

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНТРОЛЬ ОПТИКИ МИКРОСКОПОВ

Т.А. ИВАНОВА
В.К. КИРИЛЛОВСКИЙ

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ
И КОНТРОЛЬ
ОПТИКИ
МИКРОСКОПОВ**

Т.А.ИВАНОВА
В.К.КИРИЛЛОВСКИЙ

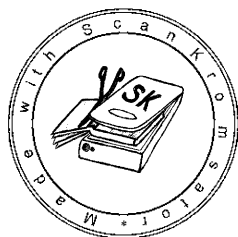
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНТРОЛЬ ОПТИКИ МИКРОСКОПОВ



ЛЕНИНГРАД «МАШИНОСТРОЕНИЕ»
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ 1984

ББК 22.34
И20
УДК 535.826.001.24

Рецензент канд. техн. наук В. П. Петров



Иванова Т. А., Кирилловский В. К.

И20 Проектирование и контроль оптики микроскопов. — Л.:
Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. 231 с., ил.

В пер.: 1 р. 30 к.

В книге описаны методы проектирования оптических систем микроскопов, характеризующихся высоким качеством изображения — ахроматических и апохроматических объективов, панкратических систем. Приведены результаты расчета этих систем, проанализирована точность изготовления их конструктивных элементов, дана оценка технологичности конструкций. Рассмотрены приборы контроля оптических систем с применением лазерной и телевизионной техники.

Книга предназначена для ИТР, занимающихся разработкой и контролем оптических систем.

И 2706000000-882
038(01)-84 195-83

ББК 22.34
6П5.8

ПРЕДИСЛОВИЕ

Область применения световых микроскопов непрерывно расширяется, к конструкциям и схемам приборов предъявляются новые и все более высокие требования. Это приводит к выполнению большого объема работ по изучению свойств оптических элементов и построению на их основе оптических систем микроскопов, обладающих повышенными характеристиками и улучшенным качеством изображения.

Первой работой, обобщающей опыт создания отечественной микрооптики, была книга В. А. Панова и Л. Н. Андреева «Оптика микроскопов», вышедшая в издательстве «Машиностроение» в 1976 г. В большей части ее объема отражены результаты работ авторов по созданию методов расчета двух групп оптических систем: зеркально-линзовых объективов и объективов с исправленной кривизной изображения. Первая группа объективов применяется в настоящее время для специальных исследований, в основном в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра, и может быть отнесена к системам мелкосерийного выпуска. Вторая группа — планобъективы — составляет основной объем комплектующей оптики лабораторных и исследовательских микроскопов различного назначения: биологических, поляризационных, люминесцентных, металлографических.

Опыт создания систем с форсированными оптическими характеристиками показал, что чувствительность отдельных элементов конструкций к погрешности изготовления может быть столь высокой, что система оказывается невыполнимой в условиях серийного производства. Последнее обстоятельство потребовало от разработчиков оптики приборов и в первую очередь объективов микроскопов исследования возможности оптимизации конструкций систем с позиции критериев технологичности. Результаты этих исследований, а также изложение принципов построения рациональных схемных решений объективов микроскопов с улучшенными оптическими и технологическими характеристиками нашли отражение в первой части предлагаемой книги.

Важную роль в современном оптическом приборостроении играют системы с плавным изменением увеличения. Применение панкратических систем в оптическом устройстве микроскопа позволяет не только повысить эксплуатационные параметры приборов, но

и сократить номенклатуру комплектующих узлов: объективов, окуляров, дополнительных проекционных элементов. В связи с этим значительный объем первой части книги отведен изложению принципов построения панкратических систем с оптической и механической компенсацией смещения плоскости изображения, исследованию абберационных свойств систем, анализу точности их изготовления, а также изложению принципов построения на их основе различных функциональных узлов микроскопов. Первая часть книги написана канд. техн. наук Т. А. Ивановой.

Во второй части излагаются вопросы контроля качества изготовления поверхностей, качества изображения и aberrаций отдельных компонентов и собранных систем. Рассматриваются направления развития аппаратуры контроля с применением телевизионной, лазерной, электронно-вычислительной техники, а также современных методов обработки изображения для целей контроля оптических систем. Вторая часть книги написана канд. техн. наук В. К. Кирилловским.

Основная часть материалов книги представляет собой результаты исследований и разработок авторов, которые в ней впервые собраны воедино и обобщены.

Авторы выражают глубокую благодарность канд. техн. наук лауреату Ленинской премии В. А. Звереву, поддержка и доброжелательное внимание которого помогли выходу этой книги в свет.

Замечания и пожелания читателей просим направлять по адресу: 191065, Ленинград, ул. Дзержинского, 10, изд-во «Машиностроение».

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря фундаментальным работам Аббе в области микроскопии в 80-х годах прошлого столетия, проектирование и исследование оптики микроскопов стало проводиться на теоретической основе. В 1872 г. появились первые микрообъективы, изготовление которых было основано на расчетных данных. Эти объективы имели ахроматическую коррекцию аберраций. По мере возрастания числовых апертур и увеличений, оптическая конструкция объективов все более усложнялась. Комплект объективов-ахроматов был завершен в 1879 г. разработкой иммерсионного микрообъектива $100 \times 1,25$. Оптическая конструкция ахроматов, созданная около ста лет тому назад, практически не изменилась до наших дней и является, по-видимому, оптимальной.

Дальнейшие теоретические исследования Аббе были направлены на повышение разрешающей способности микрообъективов за счет увеличения числовых апертур и улучшения коррекции хроматических аберраций. Аббе установил возможность исправления вторичного спектра с помощью оптических материалов с особым ходом дисперсии и ввел в практику исследований на микроскопе новый тип объективов, названных им апохроматами.

Выдающихся достижений в совершенствовании оптики микроскопов добился в 30-х годах текущего столетия Богехольд, разработавший первые объективы с исправленной кривизной изображения. Эти объективы, как и их последующие модификации, в качестве принципиально нового оптического элемента содержали мениски значительной толщины. В дальнейшем этот тип коррекции в сочетании с теоретическими положениями по апохроматизации оптических систем определил появление планапохроматов — объективов, обладающих наиболее совершенным качеством изображения. Однако, если оптические системы ахроматов и апохроматов оптимальны, так как сохранились до настоящего времени практически неизменными, работы по созданию объективов с плоским полем изображения не привели пока к появлению устойчивых конструкций. Решение этой сложной проблемы зависит не только от развития средств вычислительной техники, широко используемой сейчас на всех этапах проектирования оптики, но в значительной степени — от разработки новых сортов стекол и совершенствования методов расчета.

Работы советских оптотехников Д. Ю. Гальперна, А. Н. Грамматина, Л. Н. Андреева, В. А. Панова и других обогатили теорию и практику расчета оптических систем микроскопов. С их именами связаны: создание оптических систем высокого класса для микроэлектронной промышленности, контактных объективов для биологической и люминесцентной микроскопии; разработка первых отечественных комплектов планоптики для лабораторных и исследовательских моделей микроскопов; расчет зеркально-линзовых объективов для исследований в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра.

Перспективы применения микроскопов в различных областях народного хозяйства, неизбежное увеличение номенклатуры и объема их выпуска ставят перед разработчиками оптики микроскопов задачу поиска рациональных схемных решений планобъективов, сочетающих в себе высокое качество изображения, простоту оптической конструкции и технологичность изготовления в условиях серийного производства, т. е. те факторы, которые по выражению М. М. Русинова определяют «живучесть» хорошей оптической системы.

Повышение эффективности серийного выпуска оптических систем микроскопов, качество изображения которых определяется явлением дифракции, в значительной степени обусловлено развитием методов контроля и точностью контрольной аппаратуры. Традиционные методы оценки качества оптики микроскопов путем наблюдения изображений тест-препаратов, в том числе метод оценки систем по виду дифракционной точки, широко распространенные в оптическом производстве, перестают удовлетворять современным требованиям в отношении чувствительности определения ошибок систем высокого класса, ограничивают рост производительности, перегружают работников — экспертов высокой квалификации — и исключают автоматизацию контроля серийно выпускаемых систем.

Возросшие требования к качеству изображения микроскопа, порождаемые прогрессом научных исследований, обуславливают повышение чувствительности и надежности оптики микроскопов. Успехи проектирования оптических систем способствуют созданию методов и приборов контроля, которые дают возможность в количественном выражении аттестовать изготовленные системы на соответствие их расчету.

Развитие этого направления было начато видными советскими учеными В. П. Линником и А. А. Захарьевским и продолжено их последователями Т. И. Соколовой, Р. М. Лариной и др. Разрабатывались методы измерения разрешающей способности и частотно-контрастных характеристик, интерферометры для оценки волновых аберраций объективов микроскопа, средства исследования светорассеяния. Эти работы стали фундаментом для проведения дальнейших исследований и разработок по созданию комплекса методов и средств контроля и исследования оптических систем микроскопа в условиях серийного производства.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИКИ МИКРОСКОПОВ

Глава I

ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ МИКРОСКОПОВ

1. КРИТЕРИИ КОРРЕКЦИИ ОБЪЕКТИВОВ МИКРОСКОПОВ

Объективы микроскопов относятся к классу оптических систем, обладающих наиболее совершенным качеством изображения. В структуре оптического изображения, создаваемого объективами микроскопов, определяющую роль играет явление дифракции. Основным критерием коррекции aberrаций объективов микроскопов до недавнего времени оставался критерий Релея, согласно которому система идеальна, если обусловленное сферической aberrацией отклонение волнового фронта от опорной сферы Гаусса не превышает четверти длины волны. Происходящее при этом снижение интенсивности света в параксиальном фокусе, составляющее около 20 %, было принято Релеем за допустимое.

На основе этого критерия в зависимости от степени исправления хроматических aberrаций, а также коррекции aberrаций внеосевых пучков — астигматизма и кривизны изображения — сложилась классификация объективов по типам коррекции: 1) ахроматические, 2) апохроматические, 3) планахроматические, 4) планапохроматические [51].

К ахроматическим объективам был отнесен тип систем, волновые aberrации которых для осевой точки предмета в спектральном интервале от C до F не превышают $0,5\lambda$. Вторичный спектр таких систем, обусловленный применением в них обычных сортов стекол, составляет в области спектра от линии C до линии g для слабых объективов около 1λ , для высокоапертурных объективов — около 2λ . Астигматизм и кривизна изображения не исправляются. В апохроматических объективах волновые aberrации для точки на оси в области спектра от линии C до линии F не превышают $0,25\lambda$, в области спектра от линии C до линии g — $0,5\lambda$. По уровню исправления астигматизма и кривизны изображения этот тип объективов не отличается от ахроматов.

После того как были найдены способы исправления в объективах микроскопов астигматизма и пецвалеовой кривизны, возможность получения плоского поля изображения в сочетании с соответствующим уровнем коррекции хроматических aberrаций привела к созданию объективов с новым типом коррекции: планахроматов и планапохроматов.

Приведенная классификация объективов микроскопов сложилась исторически и является до некоторой степени условной, так как не

содержит в своей основе данных о характеристике объектов и свойствах приемника изображения. Более поздними исследованиями влияние волновых aberrаций на структуру оптического изображения было уточнено. Было установлено, что распределение освещенности в изображении точечного объекта зависит не только от максимальной деформации волновых фронтов, но и от их формы, т. е. типа aberrаций. Допустимое снижение освещенности в параксиальном фокусе связано с назначением оптического прибора, и в некоторых случаях приходится выбирать более строгие допуски.

Таким образом, возникла необходимость в критерии, который устанавливал бы взаимосвязь между значением интенсивности в дифракционном фокусе и волновыми aberrациями оптических систем. Критерий подобного типа был введен Марешалем, который предложил использовать соотношение между интенсивностью в центре опорной сферы и среднеквадратичным отклонением волнового фронта от сферической формы [9]. Согласно критерию Марешала, следует считать оптическую систему хорошо скорректированной, если нормированная интенсивность в дифракционном фокусе больше или равна 0,8. Это условие эквивалентно требованию к среднеквадратичному отклонению волнового фронта от опорной сферы с центром в дифракционном фокусе, которое не должно превышать $\lambda/14$.

Воспользовавшись новым критерием, найдем относительную освещенность в центральном максимуме для объективов микроскопов с различной степенью коррекции хроматических aberrаций. В табл. 1.1 приведены результаты расчета волновых aberrаций для линий D , C , F , g объективов, имеющих увеличение и числовые апертуры соответственно: ахроматических $3,7 \times 0,11$ (ОМ-12); $40 \times 0,65$ (ОХ-1); $90 \times 1,25$ (ОМ-41); апохроматических $60 \times 1,0$ (О6АМ-60); $90 \times 1,30$ (О2АМ-90). Волновые aberrации вычислены в плоскости установки, соответствующей минимальной сферической aberrации для $\lambda_D = 0,589$ мкм. В этой же плоскости определены относительные освещенности для каждой длины волны λ_k при условии, что спектральная чувствительность приемника равна единице. И, наконец, в последнем столбце таблицы приведены значения полихроматической относительной освещенности i_2 для плоскости установки, соответствующей минимальным волновым aberrациям с учетом спектральной чувствительности глаза.

Из анализа данных таблицы следует, что для основной длины волны $\lambda_D = 0,589$ мкм значения чисел Штреля для всех объективов близки к единице. Преимущество апохроматов перед ахроматами заключается в некотором увеличении числовых апертур, а следовательно, в повышении разрешающей способности. Так, ахроматический объектив О2-60 при увеличении $60\times$ имеет числовую апертуру 0,85, в то время как у апохромата О6АМ-60, имеющего увеличение $60\times$, числовая апертура $A = 1,0$. При сравнении полихроматических относительных интенсивностей i_2 преимущество апохроматических объективов не так очевидно, поскольку с ростом к границам видимого интервала вторичного спектра, присутщего ахроматам, происходит снижение спектральной чувствительности глаза.

Таблица 1.1

Шифр объектива и его харак- теристика	$\sin \sigma$	Волновая аберрация $N\lambda$					Относительная освещенность				
		D	C	F	g		i_D	i_C	i_F	i_g	i_Σ
OM-12 $3,7 \times 0,11$	0	0	0	0	0	0					
	$0,11\sqrt{1/4}$	0,0185	0,1042	-0,0404	0,0865						
	$0,11\sqrt{1/2}$	0,0186	0,1876	-0,0855	0,1864						
	$0,11\sqrt{3/4}$	0,0135	0,2605	-0,1191	0,3185						
	0,11	0,0154	0,3364	-0,1217	0,5074		0,988	0,693	0,923	0,434	0,940
OX-1 $40 \times 0,65$	0	0	0	0	0	0					
	$0,65\sqrt{1/4}$	0,0543	0,1670	0,0365	0,3241						
	$0,65\sqrt{1/2}$	0,0281	0,2360	0,0766	0,7563						
	$0,65\sqrt{3/4}$	0,0179	0,2955	0,2325	1,4199						
	0,65	0,0789	0,4000	0,5590	2,3601		0,978	0,687	0,442	0,029	0,830
OM-41 $90 \times 1,25$	0	0	0	0	0	0					
	$1,25\sqrt{1/4}$	0,1062	0,2347	0,1698	0,6822						
	$1,25\sqrt{1/2}$	0,1107	0,3618	0,2887	1,3972						
	$1,25\sqrt{3/4}$	0,0865	0,4561	0,4325	2,2262						
	1,25	0,0440	0,5256	0,6056	3,1692		0,962	0,432	0,305	0,005	0,777
O6AM-60 $60 \times 1,0$	0	0	0	0	0	0					
	$1,0\sqrt{1/4}$	0,0244	0,0083	-0,0226	-0,0559						
	$1,0\sqrt{1/2}$	0,0065	-0,0284	-0,0661	-0,1113						
	$1,0\sqrt{3/4}$	0,0011	-0,0655	-0,0829	-0,1177						
	1,0	0,0494	-0,0480	-0,0217	-0,0248		0,983	0,952	0,956	0,933	0,977
O2AM-90 $90 \times 1,30$	0	0	0	0	0	0					
	$1,30\sqrt{1/4}$	-0,0519	-0,0525	-0,0872	-0,0657						
	$1,30\sqrt{1/2}$	-0,0923	-0,1089	-0,1196	-0,0244						
	$1,30\sqrt{3/4}$	-0,0480	-0,0941	-0,0414	0,1618						
	1,30	-0,0394	-0,0972	-0,0419	0,2564		0,952	0,944	0,916	0,520	0,832

Однако, если сравнить значения i_{λ} объективов с различным типом коррекции, то степень исправления вторичного спектра апохроматических объективов выразится особенно сильно: значения чисел Штреля для апохромата ОБАМ-60 для всех длин волн больше 0,9, в то время как у сильных ахроматов для линии g оно меньше 0,5. Высокий уровень оптической коррекции апохроматов, оцениваемый по относительным освещенностям, хорошо проявляется при исследовании биологических объектов, обработанных специальными краси-

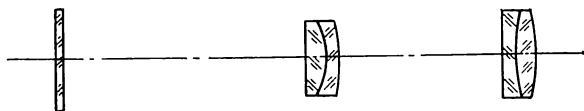


Рис. 1.1. Ахроматический объектив 3,7×0,11

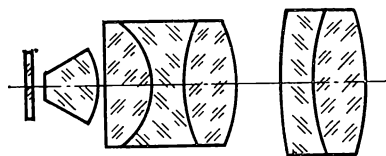


Рис. 1.2. Ахроматический объектив 40×0,65

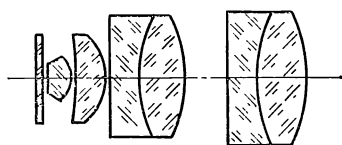


Рис. 1.3. Ахроматический иммерсионный объектив 90×1,25

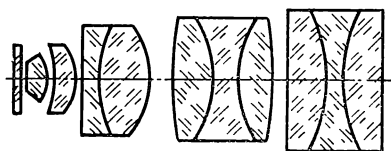


Рис. 1.4. Апохроматический иммерсионный объектив 60×1,0

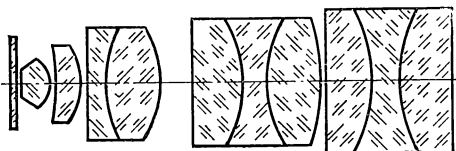


Рис. 1.5. Апохроматический иммерсионный объектив 90×1,30

телями. В этом случае изображения элементов объекта, представляющего собой совокупность различно окрашенных структур, лежат в одной плоскости и, следовательно, оказываются одинаково резкими как при наблюдении, так и при фотографировании.

Обратимся далее к схемным решениям ахроматических и апохроматических объективов, изображенным на рис. 1.1—1.5. Апохроматы имеют сложную оптическую конструкцию, содержащую не только большое число линз и трехлинзовые склеенные компоненты, но и детали, изготовленные из флюорита и квасцов — трудоемких в обработке материалов. Вследствие большого числа оптических элементов в апохроматах допуски на их изготовление должны быть более строгие, чем в объективах-ахроматах, в противном случае следует ожидать появление технологических aberrаций, значительно превышающих расчетные.

Таким образом, в процессе создания объективов микроскопов необходим анализ и систематизация структур объектов, подлежащих

исследованию в микроскопах определенного класса, и выработка на основании этого анализа требований к коррекции aberrаций объективов. Кроме того, для достижения в изготовленном объективе качества изображения, не отличающегося от расчетного, необходима оптимизация оптических конструкций объективов по критерию технологичности.

2. ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ С ОСОБЫМ ХОДОМ ДИСПЕРСИИ. ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПРАВЛЕНИЯ ВТОРИЧНОГО СПЕКТРА В ОБЪЕКТИВАХ МИКРОСКОПОВ

В настоящее время оптические свойства материалов, определяющие возможность уменьшения вторичного спектра в оптических системах, принято характеризовать графической зависимостью относительной частной дисперсии от

коэффициента дисперсии: $p_{\lambda_1, \lambda_2} = f(v_{\lambda_1})$. Согласно ГОСТ 3514—76, показатель преломления n_e для длины волны $\lambda_e = 0,546$ мкм, расположенной вблизи максимума чувствительности глаза человека, принимается в качестве основного показателя преломления, средняя дисперсия $n_{F'} - n_{C'}$, — в качестве основной дисперсии и коэффициент дисперсии $v_e = (n_e - 1) / (n_{F'} - n_{C'})$ — как число Аббе в современной его интерпретации. Если нанести на диаграмму (рис. 1.6) относительные частные дисперсии оптических стекол, рассчитанные для одних и тех же длин волн, например

$p_{F', g} = (n_g - n_{F'}) / (n_{F'} - n_{C'})$, в зависимости от коэффициента дисперсии v_e , то обнаруживается закономерность, замеченная еще Аббе: координаты большинства стекол располагаются вблизи некоторой прямой, называемой нормальной. Согласно данным совместного каталога «Оптическое стекло», разработанного СССР и народным предприятием «К. Цейс» (ГДР), для фиксирования нормальной прямой выбраны стекла К18 и Ф13. Материалы, отличающиеся по v_e более чем на 3 единицы от стекол с обычным ходом дисперсии при равных значениях относительных частных дисперсий $p_{F', g}$, принято считать особыми. Однако номенклатура стекол с особым ходом дисперсии весьма ограничена, а их особые свойства выражены недостаточно сильно. Выдающимися дисперсионными свойствами обладает фтористый кальций, широко используемый в оптическом приборостроении, и новое фторфосфатное стекло ФФС2, коэффициенты дисперсии которых отличаются от обычных стекол на 30 единиц. Данные этих материалов приведены в табл. 1.2.

Рассмотрим влияние параметров оптических материалов на возможность исправления вторичного спектра оптических систем. Под

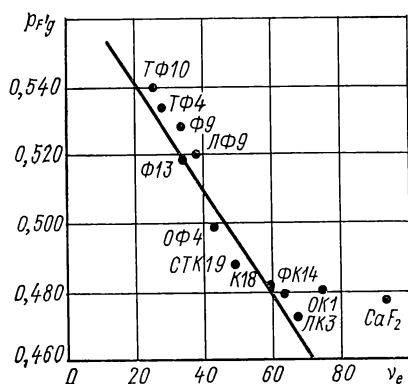


Рис. 1.6. Зависимость относительной частной дисперсии от коэффициента дисперсии

Т а б л и ц а 1.2

Длина волны, нм	Обозна- чение линии спектра	n						k		
		K18	Ф13	CaF ₂	ФФС2	ОФ4	СТК19	K18—Ф13	CaF ₂ —ОФ4	CaF ₂ —СТК19
365,0	i	1,540341	1,666345	1,444874	—	1,689190	1,781150	0,009900	0,002991	0,002022
404,36	h	1,533680	1,650690	1,441500	—	1,676640	1,769291	0,004227	0,001164	0,000657
435,83	g	1,529806	1,642054	1,43493	1,442210	1,669506	1,762531	0,002053	0,000500	0,000287
479,99	F'	1,525637	1,633116	1,437301	1,440020	1,661975	1,755269	0,000569	0,000111	0,000065
486,13	F	1,525150	1,632096	1,437044	1,439780	1,661105	1,754423	0,000453	0,000081	0,000047
546,07	e	1,521230	1,624083	1,434966	1,437720	1,654190	1,747647	0,0	0,0	0,0
587,56	d	1,519179	1,620048	1,433879	1,436620	1,650632	1,744132	0,000141	0,000033	0,000020
589,29	D	1,519102	1,619900	1,433838	1,43658	1,650500	1,744000	0,000154	0,000039	0,000022
643,85	C'	1,516972	1,615822	1,432713	1,435466	1,646848	1,740377	0,000569	0,000111	0,000065
656,27	C	1,516550	1,615036	1,432491	1,43522	1,646135	1,739667	0,000707	0,000136	0,000081
706,52	r	1,515043	1,612272	1,431705	—	1,643600	1,737140	0,001288	0,000208	0,000119
768,2	A ₂	1,513510	1,609570	1,430916	—	1,641060	1,734610	0,002149	0,000285	0,000164
1013,9	—	1,509270	1,602780	1,428828	—	1,63425	1,727840	0,006172	0,000380	0,000175

вторичным спектром оптической системы $\Delta s'_{\text{вт.сп}}$, как известно, понимают разность отрезков до параксиальных изображений осевой точки предмета для длины волны λ и основной длины волны λ_0 $\Delta s'_{\text{вт.сп}} = s'_\lambda - s'_{\lambda_0}$ при условии, что в заданном спектральном интервале хроматическая aberrация исправлена не менее чем для двух длин волн, т. е. $s'_{\lambda_1} - s'_{\lambda_2} = 0$.

Величина вторичного спектра и возможность его исправления в оптической системе, составленной из тонких компонентов, определяются известным соотношением [47], которое, если принять за основную длину волны линию e , имеет вид

$$s'_\lambda - s'_e = -\frac{s'^2}{f'} \frac{(p_{e\lambda})_2 - (p_{e\lambda})_1}{v_2 - v_1}, \quad (1.1)$$

где

$$p_{e\lambda} = (n_\lambda - n_e)/(n_{F'} - n_{C'}).$$

Из выражения (1.1) видно, что для уменьшения вторичного спектра необходимо иметь стекла с возможно близкими значениями относительных частных дисперсий (лангкроны и курцфлинты) и максимально возможной разностью коэффициентов дисперсии. Этому требованию наилучшим образом отвечают пары: $\text{CaF}_2 - \text{ОФ4}$, $\text{CaF}_2 - \text{СТК19}$, $\text{ФФС2} - \text{ОФ4}$, $\text{ФФС2} - \text{СТК19}$, которые отличаются не только уменьшенным вторичным спектром, но и умеренными значениями оптических сил Φ_1 , Φ_2 , приемлемыми для конструктивной реализации. В табл. 1.2 приведены значения коэффициента $k = -[(p_{e\lambda})_2 - (p_{e\lambda})_1]/(v_2 - v_1)$ для стекол К18—Ф13 и пары $\text{CaF}_2 - \text{ОФ4}$, а на рис. 1.7 изображена зависимость $k = f(p, v)$. Анализ этих данных показывает, что величина вторичного спектра тонкого объектива, выполненного из материалов $\text{CaF}_2 - \text{ОФ4}$, в ультрафиолетовой части спектра приблизительно в 5 раз, а в ближней ИК области в 20 раз меньше соответствующих величин при использовании стекол К18—Ф13.

Однако возможности уменьшения вторичного спектра в объективах микроскопов не ограничиваются применением столь короткого перечня материалов. Так, в результате использования в оптической системе лангфлинтов (стекла марок ТФ4, ТФ5, ТФ10 и других) в сочетании с курцфлинтами (ОФ4, СТК19 и другими) и лангкронами (CaF_2 , ФФС2) удастся получить высокий уровень коррекции вторичного спектра при достаточно простой оптической конструкции объективов. Эти материалы будут положены в дальнейшем в основу расчета склеенных компонентов с уменьшенным вторичным спектром.

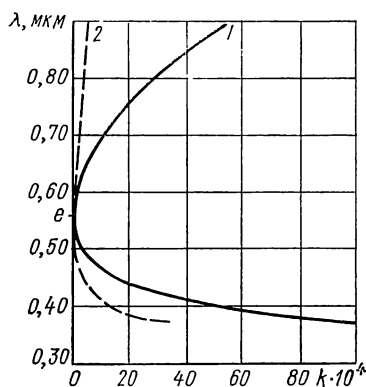


Рис. 1.7. Кривые, характеризующие вторичный спектр для двух комбинаций оптических материалов:
1—К18—Ф13; 2— CaF_2 —ОФ4

3. ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В процессе создания оптических систем с повышенными оптическими характеристиками, и в первую очередь объективов микроскопов, неизбежно возникает вопрос о возможности их реализации в условиях серийного производства. В настоящее время благодаря широкому использованию ЭВМ при разработке объективов влияние отклонений их конструктивных элементов на оптические характеристики может быть установлено на стадии абберрационного расчета систем. С этой целью программа автоматизированного расчета, разработанная для ЭВМ БЭСМ-6, дополнена специальным блоком [16], обеспечивающим вычисление среднеквадратичных отклонений функций (увеличения, последнего отрезка, аббераций) при заданных допусках на конструктивные элементы, приемлемых для серийного производства: подгонке под пробное стекло $m = 1$ кольцу, отклонениях радиусов пробного стекла от номинала $\Delta r/r = 0,1 \%$, допуске на толщины линз и воздушные промежутки $\Delta d_i = 0,01$ мм, отклонении показателей преломления для основной длины волны $\Delta n_{\lambda_0} = 0,0003$ и дисперсии $\Delta(n_{\lambda_2} - n_{\lambda_1}) = 0,00003$. Получаемые результаты позволяют оптику-конструктору судить о чувствительности создаваемой им системы к погрешностям изготовления и возможности компенсации этих погрешностей в процессе юстировки, т. е. иметь представление о технологичности оптической конструкции на стадии ее разработки.

ГОСТ 18831—73 устанавливает понятие технологичности конструкций в приборостроении как совокупность свойств конструкции изделия, проявляемых в возможности оптимальных затрат труда, средств, материалов и времени при технической подготовке производства, изготовлении, эксплуатации и ремонте по сравнению с соответствующими показателями однотипных конструкций изделия того же назначения при обеспечении установленных значений показателя качества и принятых условиях изготовления, эксплуатации и ремонта. Развитие средств вычислительной техники позволяет оптимизировать затраты труда при создании объективов микроскопов, однако изготовление этих систем в серийном производстве остается сложной технологической проблемой, решение которой в значительной степени зависит от чувствительности методов контроля и точности контрольной аппаратуры.

В настоящее время общепринятым методом контроля микрообъективов в производственных условиях является визуальное исследование структуры дифракционного изображения светящейся точки. Визуально оцениваются неравномерность яркости первого дифракционного кольца, нарушение его симметрии при расфокусировке, смещение колец относительно дифракционного максимума, т. е. те искажения, которые свидетельствуют о качестве сборки микрообъектива. Этой операции предшествует контроль отдельных элементов объектива на всех стадиях производственного процесса. Материал оптических деталей отбирается по высшим категориям однородности и бессвильности. Все оптические детали в процессе

их изготовления контролируются на соответствие допускам, указанным в технической документации. Вместе с тем известно, что в процессе склеивания линз и крепления компонентов в оправках могут возникать напряжения, деформирующие рабочие поверхности компонентов и вызывающие в результате этого искажения в структуре дифракционного изображения точки. Опасность этих деформаций для серийного выпуска объективов заключается в том, что при недостаточно чувствительных методах пооперационного контроля брак может обнаружиться только в готовом объективе.

В соответствии с существующими методами контроля исследуемый компонент устанавливается в микроскопе с механической длиной тубуса 160 мм вместо микрообъектива, изображение светящейся точки рассматривается через окуляр, увеличение которого выбирается из условия полезного увеличения микроскопа:

$$\Gamma = v_k \Gamma_{\text{ок}} = 500 \div 1000 A,$$

где v_k — увеличение компонента в микроскопе; $\Gamma_{\text{ок}}$ — видимое увеличение окуляра; A — числовая апертура компонента.

Однако компоненты объективов в отличие от самих объективов не имеют самостоятельной коррекции аберраций. Как показывают результаты расчета большей части выпускаемых микрообъективов, сферическая аберрация компонентов в условиях контроля превышает в волновой мере $2-3\lambda$, т. е. находится далеко за пределами допуска, устанавливаемого критерием Релея. Влияние этой аберрации на распределение энергии в исследуемом кружке может значительно превысить влияние ошибок изготовления, что неизбежно приведет к попаданию на сборку узлов, в которых погрешности технологического процесса вызвали искажения волнового фронта, меньшие аберраций компонентов в контролируемом положении, но соизмеримые с аберрациями самих микрообъективов.

Покажем, что для склеенных компонентов независимо от их аберраций в системе объектива может существовать положение плоскости предмета и изображения, при котором сферическая аберрация имеет минимальное значение, удовлетворяющее для большей части компонентов критерию Релея. Назовем это положение положением наилучшей установки. В теории аберраций третьего порядка известно соотношение, связывающее параметр \mathcal{P} , входящий в первую монохроматическую сумму Зейделя $S_I = \sum h_i \mathcal{P}_i$, с основными параметрами тонкого компонента P , W , π [67],

$$\mathcal{P} = (\alpha' - \alpha)^3 P + 4\alpha(\alpha' - \alpha)^2 W + \alpha(\alpha' - \alpha)[2\alpha(2 + \pi) - \alpha'], \quad (1.2)$$

где α , α' — внешние углы первого параксиального луча с оптической осью системы. Если принять параксиальный угол в пространстве изображений за единицу, то значение угла α в пространстве предметов будет определять линейное увеличение v в исследуемомложе-

Шифр объектива и его характеристика	Номер компонентов по схеме объектива	Конструктивные параметры компонентов	D	f', s_F, s'_F
ОМ-12 3,7×0,11	1	$r_1 = \infty$ $r_2 = -7,70$ $r_3 = -19,1$	2,5 1,4982 К1 1,2 1,5826 БФ8 7,0	$f' = 50,52$ $s_F = -47,68$ $s'_F = 50,94$
	2	$r_1 = \infty$ $r_2 = 23,03$ $r_3 = -23,03$	1,2 1,6259 БФ12 2,1 1,5100 К3 8,5 8,5 8,5	$f' = 57,91$ $s_F = -55,39$ $s'_F = 58,32$
М-42 8×0,20	1	$r_1 = \infty$ $r_2 = 8,95$ $r_3 = -8,95$	1,5 1,6475 ТФ1 2,8 1,5147 К14 5,8 6,3 6,3	$f' = 22,60$ $s_F = -19,29$ $s'_F = 23,22$
	2	$r_1 = 403,13$ $r_2 = 14,102$ $r_3 = -14,102$	1,5 1,6242 Ф4 2,0 1,5147 К14 7,5 7,6 7,6	$f' = 32,74$ $s_F = -30,28$ $s'_F = 32,97$
ОМ-5 10×0,3	2	$r_1 = -281,6$ $r_2 = 11,641$ $r_3 = -10,495$	1,0 1,6475 ТФ1 1,7 1,5147 К14 7,5 7,5 7,5	$f' = 27,67$ $s_F = -25,50$ $s'_F = 28,13$
	3	$r_1 = 47,57$ $r_2 = 12,303$ $r_3 = -24,55$	1,0 1,6475 ТФ1 3,0 1,5147 К14 9,0 9,0 9,0	$f' = 42,41$ $s_F = -40,38$ $s'_F = 41,82$
ОМ-27 20×0,40	2	$r_1 = \infty$ $r_2 = 6,5$ $r_3 = -7,47$	1,5 1,6475 ТФ1 1,6 1,5147 К14 4,4 4,8 5,1	$f' = 20,02$ $s_F = -17,65$ $s'_F = 20,45$
	3	$r_1 = 53,28$ $r_2 = 8,55$ $r_3 = -10,51$	1,0 1,6475 ТФ1 1,8 1,5147 К14 6,3 6,4 6,5	$f' = 21,96$ $s_F = -20,22$ $s'_F = 21,88$

Т а б л и ц а 1.3

A_0	P	W	v_1	v_2	v	s	s'
1 : 7,2	—4,941	2,304	—0,25	2,293	0,43; 1,8	70,0; —19,654	29,25; —40,12
1 : 6,8	11,935	4,506	1,488	—10,165	1,549; —22,195	—18,0; —58,0	—31,38; 1343,7
1 : 3,9	12,278	4,728	—6,415	1,435	—47,578; 1,582	—19,762; —5,0	1098,5; —12,53
1 : 4,4	10,639	4,032	1,646	—34,19	1,709; 41,67	—11,128; —29,5	—23; —1331,7
1 : 3,7	13,533	4,853	1,428	—16,375	—34,69	—26,30	987,94
1 : 4,7	3,022	3,172	1,700	—0,408	1,700; 0,393	—15,433; —148,21	—30,29; 58,50
1 : 3,9	11,870	5,308	1,331	—2,195	—2,723	—25,0	74,955
1 : 3,4	7,808	3,645	+1,713	—3,096	—3,607	—26,313	101,09

Шифр объектива и его харак- теристика	Номер компонентов по схеме объектива	Конструктивные параметры компонентов	D	f', s_F, s'_F
ОМ-23 40×0,75	3	$r_1 = -25,0$	5,4	$f' = 62,86$
		0,8 1,6475 ТФ1	5,9	$s_F = -57,41$
		$r_2 = 7,04$ 1,65 1,4874 ЛК3	5,9	$s'_F = 67,06$
	4	$r_1 = 16,99$	6,5	$f' = 26,61$
		1,1 1,7172 ТФ3	6,6	$s_F = -26,14$
		$r_2 = 9,50$ 1,5 1,4874 ЛК3	6,6	$s'_F = 25,39$
ОХ-1 40×0,65	4	$r_1 = 23,01$	5,1	$f' = 16,27$
		1,05 1,6475 ТФ1	5,3	$s_F = -14,69$
		$r_2 = 6,223$ 2,01 1,5163 К8	5,4	$s'_F = 15,82$
	2	$r_1 = \infty$	2,7	$f' = 14,72$
		1,74 1,6259 БФ12	3,2	$s_F = -11,15$
		$r_2 = -2,655$ 1,05 1,6128 Ф1	3,8	$s'_F = 15,19$
		$r_3 = 4,742$ 2,09 1,4704 ЛК6	4,4	
		$r_4 = -5,224$		
О2-60 60×0,85	2	$r_1 = -5,27$	2,5	$f' = 8,74$
		0,4 1,6475 ТФ1	2,9	$s_F = -6,22$
		$r_2 = 3,88$ 1,6 1,5163 К8	3,6	$s'_F = 10,46$
	4	$r_1 = \infty$	4,95	$f' = -115,19$
		0,5 1,6076 БФ25	4,85	$s_F = 108,57$
		$r_2 = 3,6$ 2,3 1,4704 ЛК6	4,85	$s'_F = -124,57$
		$r_3 = -3,6$ 0,5 1,5749 ЛФ5		
		$r_4 = -10,33$		
ОМ-43 85×1,0 в. и.	3	$r_1 = -14,997$	3,3	$f' = 12,02$
		0,5 1,6475 ТФ1	3,7	$s_F = -9,49$
		$r_2 = 4,286$ 1,8 1,5004 К2	4,0	$s'_F = -13,30$
	4	$r_1 = \infty$	4,6	$f' = 23,16$
		1,0 1,7172 ТФ3	4,6	$s_F = -20,19$
		$r_2 = 5,521$ 1,9 1,4874 ЛК3	4,6	$s'_F = 24,39$

A_0	P	W	v_2	v_3	v	s	s'
1 : 10,6	—10,094	33,916	0,0695	1,033	0,176	300,0	56,0
1 : 4,0	2,159	1,535	—	Решение отсутствует			
1 : 3,0	5,353	2,879	2,383	—2,603	—2,915; 2,17	—20,28; —7,2	63,24; —19,49
1 : 3,4	15,350	5,789	—1,938	0,861	9,208	—12,748	150,72
1 : 2,4	44,310	9,311	3,07	1,17	2,806	—3,1	—14,07
1 : 23	7517,52	75,663	—	Решение отсутствует			
1 : 3,0	27,387	7,913	1,271	7,299	6,024	—7,5	—59,24
1 : 5,0	13,710	10,359	1,123	—0,544	—0,597	—59,0	38,21

Шифр объектива и его харак- теристика	Номер компонентов по схеме объектива	Конструктивные параметры компонентов	D	f', s_F, s'_F
ОМ-41 90× × 1,25 м. н.	3	$r_1 = -34,02$	3,4	$f' = 11,68$
		1,0 1,6475 ТФ1	3,8	$s_F = -9,27$
		$r_2 = 5,29$	4,4	$s'_F = 12,46$
	4	1,75 1,5004 К2		
		$r_3 = -4,02$	4,6	$f' = 26,24$
		1,0 1,7398 ТФ4	4,7	$s_F = -23,49$
		1,9 1,5110 К5	4,8	$s'_F = 27,22$
		$r_3 = -7,447$		

нии. Рассматривая в качестве неизвестного параметра v и принимая $\pi = 0,65$, преобразуем выражение (1.2) к виду

$$\mathcal{P} = (-P + 4W - 5,3) v^3 + (3P - 8W + 6,3) v^2 - (3P - 4W + 1) v + P = (v - 1) [- (P - 4W + 5,3) v^2 - (2P - 4W + 1) v + P]. \quad (1.3)$$

Очевидно, что корни кубического уравнения $\mathcal{P} = 0$ определяют увеличение компонента v , при котором его сферическая абберация третьего порядка равна нулю. Корень уравнения $v_1 = 1$ практического значения не имеет. Задача, таким образом, сводится к определению области существования действительных корней уравнения второй степени относительно параметра v :

$$v^2 - v (2P - 4W + 1)/(P - 4W + 5,3) + P/(P - 4W + 5,3). \quad (1.4)$$

Исследования показали, что уравнение (1.4) имеет решение при следующих соотношениях параметров P, W : если $P \leq 0$, W может принимать любые значения; если $P > 0$, W должно удовлетворять условиям:

$$\begin{aligned} W &\geq 0,25 + \sqrt{1,075P}; \\ W &\leq 0,25 - \sqrt{1,075P}. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Зная фокусные расстояния и фокальные отрезки компонентов, легко найти соответствующее положение плоскостей предмета и изображения s, s' . Таким образом, задача определения для компонентов положения плоскости предмета, при котором его сферическая абберация третьего порядка равна нулю, сводится к расчету основных параметров P, W по известным конструктивным элементам и последующему решению уравнения (1.4) в соответствии с найденными значениями коэффициентов при неизвестном v .

Применим предложенный способ для исследования компонентов серийных микрообъективов. С этой целью выполнен расчет основных

A_0	P	W	v_2	v_3	v	s	s'
1 : 2,6	18,428	5,710	1,332	15,578	5,638	—7,2	—53,41
1 : 5,5	2,566	9,888	—0,071	1,126	—0,027	—1000	27,92

параметров P , W склеенных компонентов ахроматических объективов ОМ-12, М-42, ОМ-27, ОХ-1, ОМ-41 и других, входящих в комплекты микроскопов, серийно выпускаемых отечественной промышленностью [45]. Анализ результатов расчетов показывает, что условию (1.5) соответствуют компоненты всех перечисленных выше объективов. В табл. 1.3 приведены фокусные расстояния и фокальные отрезки компонентов, их относительные отверстия A_0 , основные параметры P , W , а также увеличения v_2 , v_3 , полученные в результате решения уравнения (1.4).

Дальнейший анализ проводился следующим образом. Из двух действительных корней уравнения (1.4) для последующих расчетов выбирался корень, приводящий к наименьшим значениям числовых апертур: $\sin \sigma = D/2s$, где D — диаметр контролируемого компонента. В результате тригонометрического контроля хода лучей через компоненты было установлено, что сферическая aberrация в области реальных числовых апертур $\sin \sigma$ имеет высшие порядки, возрастающие с ростом относительных отверстий компонентов A_0 и увеличением значений их основных параметров P , W . Вместе с тем исследование влияния изменения в некоторых пределах отрезка s на остаточную сферическую aberrацию компонентов показало возможность ее оптимизации в соответствии с допуском, установленным критерием Релея.

В табл. 1.3 приведены положения наилучшей установки компонентов, обозначенные s , s' . В табл. 1.4 представлены результаты aberrационного расчета компонентов при существующем методе контроля (установка компонента в микроскопе с длиной тубуса 160 мм) и в положении, определяемом отрезками s , s' . Из анализа этих данных следует, что если в первом случае сферическая aberrация составляет в волновой мере $\Delta s_N \approx 1 \div 10 \lambda$, то в положении наилучшей установки ее коррекция удовлетворяет критерию Релея.

Ниже будет показано, что условие существования для компонентов микрообъективов положения наилучшей установки определяет возможность повышения чувствительности методов контроля ком-

Шифр объектива и его характеристика	Номер компонента по схеме объектива	$\sin \sigma$	Волновая aberrация компонентов N_λ	
			в положении наилучшей установки	в цеховой схеме контроля
ОМ-12 3,7×0,11	1	$\frac{0}{\sqrt{1/2}}$ 1	0,000 —0,062 0,127	0,000 0,613 2,250
	2	$\frac{0}{\sqrt{1/2}}$ 1	0,0 —0,002 0,018	0,0 —0,179 —1,205
М-42 8×0,20	1	$\frac{0}{\sqrt{1/2}}$ 1	0,0 —0,087 0,077	0,0 —0,574 —2,035
	2	$\frac{0}{\sqrt{1/2}}$ 1	0,0 —0,047 0,006	0,0 —0,572 —2,250
ОМ-5 10×0,30	2	$\frac{0}{\sqrt{1/2}}$ 1	0,0 —0,192 0,088	0,0 0,945 3,567
	3	$\frac{0}{\sqrt{1/2}}$ 1	0,0 0,025 0,128	0,0 —0,020 0,151
ОМ-27 20×0,40	2	$\frac{0}{\sqrt{1/2}}$ 1	0,0 —0,062 0,056	0,0 0,361 2,085
	3	$\frac{0}{\sqrt{1/2}}$ 1	0,0 —0,112 0,079	0,0 0,119 1,040
ОХ-1 40×0,65	2	$\frac{0}{\sqrt{1/2}}$ 1	0,0 —0,166 0,028	0,0 —0,844 —3,420
	4	$\frac{0}{\sqrt{1/2}}$ 1	0,0 —0,130 0,053	0,0 0,196 1,475
ОМ-43 85×10 в. и.	3	$\frac{0}{\sqrt{1/2}}$ 1	0,0 —0,365 0,244	0,0 —6,876 —28,260

Шифр объектива и его характеристика	Номер компонента по схеме объектива	$\sin \sigma$	Волновая aberrация компонентов N_λ	
			в положении наилучшей установки	в цеховой схеме контроля
ОМ-43 85×10 в. п.	4	$\frac{0}{\sqrt{1/2}}$ 1	0,0 —0,165 0,001	0,0 —1,093 —3,519
ОМ-41 90×1,25 м. и.	3	$\frac{0}{\sqrt{1/2}}$ 1	0,0 —0,276 0,111	0,0 2,510 10,182
	4	$\frac{0}{\sqrt{1/2}}$ 1	0,0 —0,123 0,048	0,0 2,129 9,978

понентов по виду дифракционного изображения точки и позволяет повысить точность контроля центрировки линз в процессе склеивания. Таким образом, на стадии операции склеивания линз создается возможность обнаружения деформаций их поверхностей, вызванных неравномерностью слоя клея, и одновременного контроля центрировки этих поверхностей. Это условие справедливо не только для объективов с ахроматическим типом коррекции aberrаций, но и для многих апохроматов и объективов с плоским полем изображения. При разработке новых объективов следует стремиться к достижению установленных выше соотношений между основными параметрами P , W , рассматривая условие существования положения наилучшей установки в качестве одного из критериев технологичности оптической конструкции объективов микроскопов.

4. АНАЛИЗ ДЕЦЕНТРИРОВКИ В ОБЪЕКТИВАХ МИКРОСКОПОВ

В послевоенные годы основные усилия разработчиков оптики микроскопов были направлены на создание объективов с плоским полем изображения. На страницах зарубежной печати систематически появляются сообщения о новых конструкциях оптики объективов с планахроматической и планапохроматической коррекцией aberrаций. Значительные успехи в этой области достигнуты в отечественном приборостроении, где, начиная с 60-х годов, ведутся интенсивные работы по созданию объективов с дифракционно ограниченным качеством изображения по всему полю зрения.

Однако опыт освоения этих разработок в серийном производстве показал, что вместе с повышением оптических характеристик объективов значительно возросла трудоемкость их изготовления, что обусловлено не только усложнением оптической конструкции, но,

в первую очередь, высокой чувствительностью к децентрировке отдельных поверхностей и компонентов, которая, в свою очередь, определяется выбранным распределением коррекционной нагрузки в системе планобъектива. Так, в работе [51] показано, что для исправления астигматизма в высокоапертурных объективах микроскопов фронтальные мениски должны иметь увеличение, значительно превышающее увеличение апланатической линзы. Нарушение условия апланатизма приводит к росту остаточных aberrаций широкого пучка во фронтальной части, которые приходится компенсировать с помощью последующих элементов объектива. В результате чувствительность поверхностей к погрешностям центрировки оказывается достаточно высокой. А это, в свою очередь, требует повышения точности центрировки как отдельных линз, так и склеенных компо-

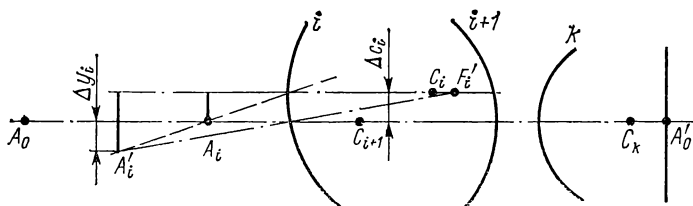


Рис. 1.8. Оптическая система, содержащая децентрированную поверхность i

нентов объективов микроскопов. Таким образом, создание объективов с плоским полем изображения привело к необходимости разработки новых методов и приборов контроля центрировки.

Независимо от применяемого метода контроля важно знать взаимосвязь смещений центров кривизны поверхностей относительно оптической оси системы со смещением изображения осевой точки предмета, построенного системой. На рис. 1.8 показана оптическая система с децентрированной поверхностью, в которой $A_0A'_0$ — оптическая ось системы; Δc_i — смещение центра кривизны i -й поверхности относительно оси. Из рисунка следует, что поперечное смещение относительно оси изображения осевой точки A_i предмета после i -й поверхности равно

$$\Delta y_i = \Delta c_i (1 - v_i),$$

где v_i — увеличение i -й поверхности. Пересчитанное в пространстве изображений системы, содержащей k поверхностей, это смещение составит

$$\Delta y'_i = \Delta c_i (1 - v_i) \prod_{i=1}^k v_{i+1}. \quad (1.6)$$

Обусловленное суммарным действием децентрировок поверхностей системы смещение будет

$$\Delta y' = \sum_{i=1}^{i=k} \Delta c_i (1 - v_i) \prod_{i=1}^k v_{i+1}. \quad (1.7)$$

Таким образом, для нахождения поперечного смещения относительно оси изображения осевой точки предмета необходимо иметь значения увеличений поверхностей v_i , полученные в результате расчета нулевого луча через оптическую систему. Установим далее взаимосвязь смещения изображения осевой точки предмета, построенного системой, со смещением осевой точки изображения в схеме контроля.

Так как отдельные компоненты в объективе микроскопа имеют относительные отверстия, не превышающие $A_0 = 1 : 2$, то выходную апертуру оптической системы можно определить выражением:

$$\sin \sigma'_0 \approx D_{0i} n' / 2s'_i \prod_i^k v_{i+1}, \quad (1.8)$$

где D_{0i} — диаметр осевого светового пучка на i -й поверхности; n' — показатель преломления среды за рассматриваемой поверхностью; s'_i — расстояние от поверхности до осевой точки образованного ею изображения.

Для контрольной схемы аналогичное выражение имеет вид

$$\sin \sigma'_k \approx D_{kj} n' / 2s'_j \prod_j^m v_{j+1},$$

где D_{kj} — диаметр осевого светового пучка на рассматриваемой поверхности в контрольной схеме.

Находим отношение числовых апертур объектива и системы контроля

$$\sin \sigma'_0 / \sin \sigma'_k = D_{0i} s'_j \prod_j^m v_{j+1} / D_{kj} s'_i \prod_i^k v_{i+1}. \quad (1.9)$$

Используем нулевой инвариант Аббе

$$n' / s' - n / s = (n' - n) / r,$$

где r — радиус кривизны рассматриваемой поверхности. Это выражение легко преобразовать к виду

$$1 - v = (n' - n) s' / n' r.$$

Применительно к рассматриваемому случаю получаем

$$(1 - v_j) / (1 - v_i) = s'_j / s'_i.$$

Подставляя это выражение в (1.9), имеем

$$\sin \sigma'_0 / \sin \sigma'_k = D_{0i} (1 - v_j) \prod_j^m v_{j+1} / D_{kj} (1 - v_i) \prod_i^k v_{i+1}. \quad (1.10)$$

Сравнивая (1.10) и (1.6), находим

$$\sin \sigma'_0 / \sin \sigma'_k = D_{0i} \Delta y'_{kj} / D_{kj} \Delta y'_{0i},$$

откуда

$$\Delta y'_{kj} = D_{kj} \sin \sigma'_0 \Delta y'_{0i} / D_{0i} \sin \sigma_k.$$

Поскольку объективы микроскопов относятся к узкопольным светосильным системам, можно положить $D_{hj} \approx D_{0i}$, тогда

$$\Delta y'_{kj} \approx \Delta y'_{0i} \sin \sigma'_{0j} / \sin \sigma'_{0i}.$$

Выведенные соотношения позволяют по результатам расчета влияния децентрировки поверхностей на смещение осевой точки изображения в оптической системе, получаемым обычно с помощью ЭВМ, определить соответствующее смещение осевой точки изображения в контрольной схеме и выбрать способ контроля в зависимости от допустимой децентрировки поверхностей в оптической системе. Кроме того, соотношение (1.7) дает возможность по величине допуска, заданного на децентрировку при коллимационном методе контроля, выявить отдельные составляющие, вносимые каждой из поверхностей.

Глава II

БАЗОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ОБЪЕКТИВОВ МИКРОСКОПОВ

5. АНАЛИЗ ФРОНТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСОКОАПЕРТУРНЫХ ОБЪЕКТИВОВ МИКРОСКОПОВ

Рассмотрим принцип построения фронтальных систем высокоапертурных объективов микроскопов. Известно, что фронтальная линза объектива, содержащая апланатические поверхности второго и первого рода, не имеет сферической аберрации, комы и практически не чувствительна к децентрировке [14]. Первая поверхность такой линзы вносит астигматизм, который определяет собой остаточный астигматизм объективов с ахроматическим и апохроматическим типом коррекции. Для исправления астигматизма в объективах с плоским полем изображения в работе [51] было предложено отступать от условия концентричности первой поверхности апертурному лучу, выполняя соотношение $k = s_1/r_1 = 0,1 \div 0,3$, где s_1 — передний отрезок объектива; r_1 — радиус кривизны первой поверхности.

Используя основные положения теории аберраций третьего порядка, найдем значения монохроматических сумм Зейделя для фронтальной линзы, расположенной в воздухе и имеющей увеличение v . Если вторая поверхность линзы апланатическая первого рода, то значения углов и высот первого параксиального луча определяются равенствами:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= v \\ h_1 &= s_1 v \\ \alpha_2 &= n \\ h_2 &= s_1 v - nd, \\ \alpha_3 &= 1 \end{aligned} \tag{2.1}$$

где d — толщина линзы; n — показатель преломления материала, из которого она изготовлена.

Радиус кривизны первой поверхности

$$r_1 = h_1 (n - 1) / (n\alpha_2 - \alpha_1) = s_1 v (n - 1) / (n^2 - v).$$

Выразим радиус кривизны второй поверхности через r_1 и четвертую монохроматическую сумму S_{IV}

$$r_2 = -(n - 1) r_1 / [nr_1 S_{IV} - (n - 1)] \equiv h_2 (n - 1) / (n\alpha_2 - \alpha_3). \quad (2.2)$$

Используя соотношения (2.1) и (2.2), определим толщину d , при которой линза обладает заданным значением пецвалеовой кривизны,

$$d = (s_1 v - h_2) / n = [s_1 v - r_2 (n + 1)] / n.$$

Имея в виду существование телецентрического хода лучей в пространстве предметов и принимая значение инварианта Лагранжа — Гельмгольца $J = n_1 (H_1 \alpha_1 - h_1 \beta_1) = H_1 v = 1$, найдем угол β_2 , составленный вторым параксиальным лучом с оптической осью,

$$\beta_2 = (n^2 - v) / s_1 v^2 n. \quad (2.3)$$

Подставим значения углов и высот параксиальных лучей, определяемых соотношениями (2.1), (2.3), в выражения сумм Зейделя:

$$S_I = \sum h \Delta \alpha v (\Delta \alpha / \Delta v)^2;$$

$$S_{II} = \sum h \Delta \alpha v \Delta \alpha \Delta \beta / \Delta v^2;$$

$$S_{III} = \sum h \Delta \alpha v (\Delta \beta / \Delta v)^2.$$

После несложных преобразований получаем:

$$S_I = s_1 n^2 v (n - v)^2 (1 - v) / (n - 1)^2;$$

$$S_{II} = n (n - v) (1 - v) (n^2 - v) / v (n - 1)^2;$$

$$S_{III} = (n^2 - v)^2 (1 - v) / s_1 v^3 (n - 1)^2. \quad (2.4)$$

Определим зависимость коэффициентов аберраций третьего порядка от увеличения фронтальной линзы для заданного значения переднего отрезка $s_1 = -0,65$ и показателя преломления $n = 1,744$ (стекло марки СТК19). Из анализа графических зависимостей, представленных на рис. 2.1, следует, что при значениях $v > n$ происходит быстрый рост первой монохроматической суммы Зейделя, которая в области наименьших значений астигматизма достигает значительной величины ($S_I > 10$).

Рассмотрим далее влияние прогиба фронтальной линзы, определяемого углом α_2 , на коэффициенты S_I , S_{II} , S_{III} . На рис. 2.2 изображены графические зависимости изменения монохроматических сумм от изменения α_2 при фиксированных значениях $v = 2,25$ и $S_{IV} = 0,025$. Анализ кривых обнаруживает существование некоторой области значений α_2 , в которой S_{III} близка к нулю при небольших значениях первой монохроматической суммы Зейделя. Следовательно, во фронтальной линзе объективов возможно уменьшение

астигматизма в результате отступления радиусов кривизны обеих поверхностей линзы от условия апланатичности. Возникающая при этом сферическая aberrация тем меньше, чем ближе увеличение линзы к $v_{\text{апл}} = n$.

Это обстоятельство можно использовать для построения фронтальных систем объективов с уменьшенной и исправленной кривизной изображения. Исследованиями установлено, что для конструктивной реализации последующей части объектива в пределах стандартизованной высоты ($h = 45$ мм) выходная апертура после фронтальной системы должна составлять $\sin \sigma' \leq 0,20$. Это условие определяет увеличение фронтальных систем высокоапертурных объективов $v_{\text{ф.с}} \geq 4,5$.

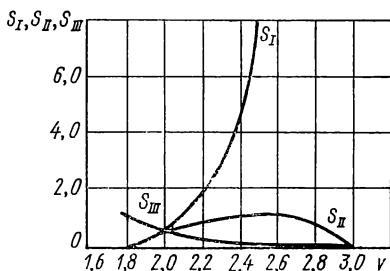


Рис. 2.1. Зависимость монохроматических сумм от увеличения фронтальной линзы

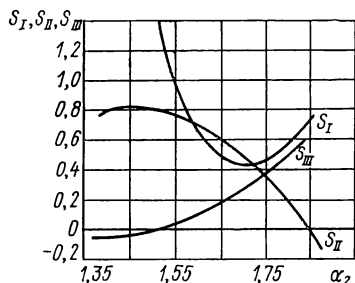


Рис. 2.2. Влияние прогиба фронтальной линзы на монохроматические суммы при $v = 2,25$, $S_{IV} = 0,025$

фронтальной системы должна составлять $\sin \sigma' \leq 0,20$. Это условие определяет увеличение фронтальных систем высокоапертурных объективов $v_{\text{ф.с}} \geq 4,5$.

Рассмотрим несколько вариантов решения фронтальной системы, оптическая конструкция которой изображена на рис. 2.3, отличающихся увеличением первой линзы: $v_1 = 2\times; 2,25\times; 2,5\times$. Увеличение фронтального мениска $v_2 = v_{\text{ф.с}}/v_1 = 2,25\times; 2\times; 1,8\times$. Прогиб мениска найдем из условия минимальной сферической aberrации третьего порядка, выведенного для тонкой линзы [68], $\alpha_{\text{min}} = (2n_2 + 1)(v_2 + 1)/2(n_2 + 2)$, где n_2 — показатель преломления материала мениска.

В результате синтеза этих двух элементов получим набор конструктивных решений фронтальной системы, параметры которых и остаточные aberrации приведены в табл. 2.1 и 2.2. Анализ результатов расчета показывает, что при достаточно хорошей коррекции астигматизма сферическая aberrация имеет небольшие значения. К числу трудно исправимых aberrаций во фронтальной системе следует отнести отступление от закона синусов. Величина η во всех вариантах решения превышает 10 %, и для ее уменьшения необходимо усложнение конструкции фронтального мениска. Выполнение мениска в виде склеенного компонента с разностью показателей преломления материалов кроновой и флинтовой линз $\Delta n \geq 0,15$ улучшает не только коррекцию монохроматических aberrаций, но и позволяет снизить хроматизм увеличения всего объектива до 1 %.

Таблица 2.1

v_1	s'	$\sin \sigma$	Точка на оси							$g - F'$
			ϵ		C'		F'	$\Delta s'$	g	$F' - C'$
			$\Delta s'$	$\eta, \%$						
2,0	—18,290	0	0,000	0,000	0,307	—0,334	—0,664	—0,330	—0,641	
		$0,85 \sqrt{1/4}$	—0,196	—1,993	0,124	—0,545	—0,889	—0,344	—0,669	
		$0,85 \sqrt{1/2}$	—0,445	—4,415	—0,109	—0,814	—1,177	—0,363	—0,705	
		$0,85 \sqrt{3/4}$	—0,785	—7,501	—0,425	—1,180	—1,572	—0,392	—0,755	
		0,85	—1,302	—11,774	—0,903	—1,741	—2,178	—0,437	—0,838	
2,25	—19,164	0	0,000	0,000	0,312	—0,339	—0,673	—0,334	—0,651	
		$0,85 \sqrt{1/4}$	—0,206	—1,648	0,120	—0,561	—0,911	—0,350	—0,681	
		$0,85 \sqrt{1/2}$	—0,483	—3,638	—0,138	—0,860	—1,232	—0,372	—0,722	
		$0,85 \sqrt{3/4}$	—0,882	—6,704	—0,509	—1,290	—1,695	—0,405	—0,781	
		0,85	—1,537	—9,515	—1,115	—2,001	—2,464	—0,463	—0,886	
2,5	—21,830	0	0,000	0,000	0,352	—0,383	—0,760	—0,377	—0,735	
		$0,85 \sqrt{1/4}$	—0,253	—1,346	0,116	—0,654	—1,051	—0,397	—0,770	
		$0,85 \sqrt{1/2}$	—0,607	—2,938	—0,215	—1,035	—1,459	—0,424	—0,820	
		$0,85 \sqrt{3/4}$	—1,147	—4,874	—0,718	—1,617	—2,083	—0,466	—0,899	
		0,85	—2,109	—7,278	—1,611	—2,657	—3,206	—0,549	—1,046	
2,25	—19,722	0	0,000	0,000	0,180	—0,191	—0,376	—0,185	—0,371	
		$0,85 \sqrt{1/4}$	—0,197	—1,450	—0,009	—0,398	—0,591	—0,193	—0,389	
		$0,85 \sqrt{1/2}$	—0,455	—3,188	—0,255	—0,669	—0,875	—0,206	—0,414	
		$0,85 \sqrt{3/4}$	—0,819	—5,356	—0,601	—1,053	—1,279	—0,226	—0,452	
		0,85	—1,410	—8,228	—1,158	—1,681	—1,945	—0,264	—0,523	

y'	Точка вне оси						
	s_P	s'_P	S_{IV}	$(y'_{F'} - y'_{C'})/y'_{e'}$ %	z'_m	z'_s	$z'_s - z'_m$
-0,474 -0,953	∞	11,531 11,379	-0,05	2,109 2,099	-0,008 -0,003	0,001 0,0001	0,008 0,033
-0,472 -0,949		11,180 11,045	-0,025	2,119 2,107	-0,015 -0,061	-0,004 -0,015	0,011 0,046
-0,474 -0,951		12,997 12,885	-0,025	2,110 2,110	-0,015 -0,061	-0,004 -0,015	0,011 0,046
-0,473 -0,949		9,028 8,902	-0,025	1,486 1,494	-0,018 -0,072	-0,006 -0,025	0,012 0,047

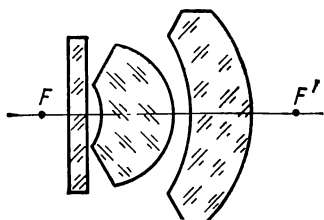
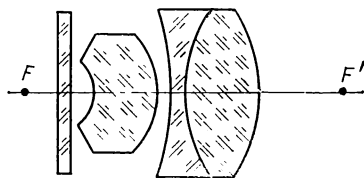


Рис. 2.3. Фронтальная система планобъектива небольшого увеличения

Рис. 2.4. Фронтальная система усложненной конструкции, а в табл. 2.1 и 2.2 представлены результаты абберационного расчета одного из ее вариантов, использованного в дальнейшем при построении оптической системы планобъектива, имеющего увеличение 63 \times и числовую апертуру $A = 0,85$.

6. РАСЧЕТ ТРЕХЛИНЗОВЫХ СКЛЕЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ С УМЕНЬШЕННЫМ ВТОРИЧНЫМ СПЕКТРОМ

Исследование свойств трехлинзовых склеенных компонентов представляет особый интерес в связи с разработкой оптических систем с уменьшенным вторичным спектром. На базе этих компонентов могут быть получены схемные решения объективов микроскопов с форсированными оптическими характеристиками: повышенными числовыми апертурами и уменьшенной вуалирующей засветкой (объективы для исследования в отраженном свете). Трехлинзовый склеенный компонент по сравнению с двухлинзовым обладает лиш-

ним коррекционным параметром — оптической силой третьей линзы, — который в предшествующих исследованиях [67, 70] рассматривался как свободный.

Если рассматривается система с исправленным и уменьшенным вторичным спектром, целесообразно связать оптическую силу третьей линзы с величиной вторичного спектра. Тогда оказывается возможным выразить основные параметры трехлинзового склеенного компонента через хроматические коэффициенты и постоянные оптических материалов [29]. Расчет этих величин позволяет по заданным значениям аберраций третьего порядка и хроматическим аберрациям выбрать для компонента материалы линз и расположить их в нужном порядке подобно тому, как по P , W , C делается выбор комбинаций стекол для двухлинзового объектива.

При выводе аберрационных соотношений воспользуемся основными параметрами тонкого компонента P , W , C . Кроме того, для характеристики величины вторичного спектра системы введем в рассмотрение коэффициент $C_2 = C_{FL}$, определяемый известным соотношением [68]

$$C_2 = -(\varphi_1 p_1 / v_1 + \varphi_2 p_2 / v_2 + \varphi_3 p_3 / v_3), \quad (2.5)$$

где φ — оптические силы линз компонента; v — коэффициенты дисперсии материалов; p — относительные частные дисперсии для линий F , D .

В качестве переменных выбираем: кривизну первой поверхности компонента ρ_1 , а также оптические силы линз φ_1 , φ_2 , которые могут быть найдены из соотношения (2.5), условий масштаба $\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 1$ и с учетом хроматического коэффициента C_1 :

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{C_1 (v_2 p_3 - v_3 p_2) + C_2 (v_3 - v_2) + (p_3 - p_2)}{-p_1 (v_3 - v_2) + p_2 (v_3 - v_1) - p_3 (v_2 - v_1)} v_1; \\ \varphi_2 &= \frac{-v_2}{v_1 (v_3 - v_2)} [v_1 (C_1 v_3 + 1) + \varphi_1 (v_3 - v_1)]; \\ \varphi_3 &= \frac{v_3}{v_1 (v_3 - v_2)} [v_1 (C_1 v_2 + 1) + \varphi_1 (v_2 - v_1)]. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Кривизна первой поверхности и оптические силы φ_1 , φ_2 определяют значения углов α первого параксиального луча, входящие в коэффициенты аберраций третьего порядка оптической системы:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 0; \\ \alpha_2 &= (n_2 - 1) \rho_1 / n_2; \\ \alpha_3 &= (n_3 - 1) \rho_1 / n_3 - \varphi_1 (n_3 - n_2) / n_3 (n_2 - 1); \\ \alpha_4 &= (n_4 - 1) \rho_1 / n_4 - \varphi_1 (n_4 - n_2) / n_4 (n_2 - 1) - \varphi_2 (n_4 - \\ &\quad - n_3) / n_4 (n_3 - 1); \\ \alpha_5 &= 1. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Выразим основные параметры тонкого компонента P , W с помощью углов, определяемых равенствами (2.7). После нахождения

отдельных слагаемых, входящих в P_i , W_i на поверхностях компонента, и приведения подобных членов получаем соотношения для основных параметров в виде:

$$P = a\rho_1^2 + b\rho_1 + d; \quad (2.8)$$

$$W = e\rho_1 + h. \quad (2.9)$$

Выражения для коэффициентов a , b , d , e , h можно найти в работе [29].

Дифференцируя далее выражение (2.8) и приравнявая производную к нулю, установим зависимость, связывающую основные параметры компонента P , W с параметрами, соответствующими минимальной сферической аберрации третьего порядка:

$$P_{\min} = d - b^2/4a; \quad W_0 = e\rho_{\min} + h = (-be/2a) + h;$$

$$P = P_{\min} + a(W - W_0)^2/e^2.$$

Анализ выведенных соотношений показывает, что с их помощью может быть выполнен расчет систем следующих типов:

1) трехлинзовых склеенных компонентов, составленных из трех различных материалов при $n_2 \neq n_3 \neq n_4$ (базовые элементы для трехцветных апохроматов); оптические силы линз определяются формулами (2.6);

2) трехлинзовых склеенных компонентов, составленных из материалов, относительные частные дисперсии которых лежат на одной прямой [75];

3) трехлинзовых склеенных компонентов, наружные линзы которых выполнены из одного стекла при $n_2 = n_4$ (базовые элементы для двухцветных апохроматов и систем с уменьшенным вторичным спектром); оптические силы линз определяются из соотношений:

$$\varphi_1 + \varphi_3 = (1 + C_1v_2) v_1/(v_1 - v_2);$$

$$\varphi_2 = -(1 + C_1v_1) v_2/(v_1 - v_2).$$

Отметим, что при расчете систем этого типа можно получить значения P_{\min} , W_0 для двухлинзового склеенного объектива. Для этого достаточно в последних соотношениях считать $\varphi_3 = 0$; $\varphi_1 = 1 - \varphi_2$ (комбинация «крон впереди») или $\varphi_1 = 0$; $\varphi_3 = 1 - \varphi_2$ (комбинация «флинт впереди»).

Дальнейшая задача по рассмотрению аберрационных свойств трехлинзовых склеенных компонентов сводится к выбору оптических материалов и нахождению численных значений величин P_{\min} , W_0 . Для вычисления коэффициентов a , ..., h , определяющих параметры P_{\min} , W_0 , была составлена программа для ЭВМ ЕС-50.

При расчете трехлинзовых компонентов первого типа ($n_2 \neq n_3 \neq n_4$) были выбраны оптические материалы, предпочтительные для разработки трехцветных апохроматов: из группы лангкронов — флюорит и фторфосфатное стекло ФФС2 с показателями преломления $n_D = 1,43658$, $n_F = 1,43978$, $n_C = 1,43522$, $n_g = 1,44221$; из группы лангфлинт — ТФ2, ТФ4; из группы курцфлинт — ОФ4, СТК19.

Таблица 2.3

Материалы	C_2	φCaF_2	$\varphi O\Phi 4$	$\varphi T\Phi 4$	a	b	d	P_{min}	ρ_{min}	W_0	a/c^2
CaF_2 $O\Phi 4$ $T\Phi 4$					2,406 2,439 2,472 2,506 2,539	-8,489 -9,004 -9,299 -9,375 -9,232	8,741 10,375 11,131 10,774 9,074	1,252 2,066 2,387 2,007 0,685	1,764 1,845 1,880 1,870 1,817	0,107 0,115 0,109 0,089 0,054	0,829 0,824 0,820 0,815 0,810
CaF_2 $T\Phi 4$ $O\Phi 4$					2,406 2,439 2,472 2,506 2,539	-9,393 -9,443 -9,428 -9,350 -9,207	11,752 12,118 11,725 10,641 8,931	2,584 2,979 2,738 1,921 0,585	1,952 1,935 1,906 1,865 1,812	0,179 0,150 0,119 0,087 0,051	0,829 0,824 0,820 0,815 0,810
$O\Phi 4$ CaF_2 $T\Phi 4$					2,406 2,439 2,472 2,506 2,539	-6,016 -6,776 -8,073 -9,909 -12,282	-0,397 2,882 7,415 12,215 16,297	-4,158 -1,823 0,824 2,421 1,447	1,250 1,388 1,632 1,976 2,418	-0,020 -0,003 0,042 0,118 0,228	0,829 0,824 0,820 0,815 0,810
$O\Phi 4$ $T\Phi 4$ CaF_2					2,406 2,439 2,472 2,506 2,539	-8,308 -9,263 -10,304 -11,430 -12,641	9,623 11,761 13,588 15,205 16,715	2,450 2,967 2,854 2,173 0,984	1,726 1,898 2,083 2,280 2,488	0,112 0,144 0,177 0,213 0,251	0,829 0,824 0,820 0,815 0,810
$T\Phi 4$ CaF_2 $O\Phi 4$					2,406 2,439 2,472 2,506 2,539	-11,685 -11,930 -11,685 -10,871 -9,566	10,695 13,366 14,492 14,334 10,149	-3,493 -1,220 1,250 2,546 1,140	2,428 2,445 2,357 2,168 1,883	0,312 0,298 0,255 0,181 0,074	0,829 0,824 0,820 0,815 0,810
$T\Phi 4$ $O\Phi 4$ CaF_2					2,406 2,439 2,472 2,506 2,539	-9,212 -9,702 -10,433 -11,404 -12,617	10,224 11,842 13,550 15,225 16,746	1,406 2,196 2,546 2,251 1,075	1,914 1,988 2,109 2,275 2,483	0,184 0,179 0,188 0,211 0,249	0,829 0,824 0,820 0,815 0,810

Материал	C_{2FD}	φ_1	φ_2	φ_3	α
C_1					
CaF ₂ ОФ4 CaF ₂	0,0000	1,8372 1,4372 1,0372 0,6372 0,2572 0,0	—0,8372 —0,8372 —0,8372 —0,8372 —0,8372 —0,8372	0 0,40 0,80 1,20 1,60 1,8372	2,5482 2,5482 2,5482 2,5482 2,5482 2,5482
$C_1 =$					
CaF ₂ ОФ4 CaF ₂	0,0036	2,2363 1,8363 1,4363 1,0363 0,6363 0,2363 0,0	—1,2363 —1,2363 —1,2363 —1,2363 —1,2363 —1,2363 —1,2363	0 0,40 0,80 1,20 1,60 2,00 2,2363	2,6212 2,6212 2,6212 2,6212 2,6212 2,6212 2,6212
$C_1 =$					
CaF ₂ ОФ4 CaF ₂	0,0072	2,6354 2,2354 1,8354 1,4354 1,0354 0,6354 0,2354 0,0	—1,6354 —1,6354 —1,6354 —1,6354 —1,6354 —1,6354 —1,6354 —1,6354	0 0,40 0,80 1,20 1,60 2,00 2,40 2,6354	2,6943 2,6943 2,6943 2,6943 2,6943 2,6943 2,6943 2,6943
C_1					
CaF ₂ СТК19 CaF ₂	0,0000	2,1215 1,7215 1,3215 0,9215 0,5215 0,1215 0,0	—1,1215 —1,1215 —1,1215 —1,1215 —1,1215 —1,1215 —1,1215	0,0 0,40 0,80 1,20 1,60 2,00 2,1215	2,6731 2,6731 2,6731 2,6731 2,6731 2,6731 2,6731
$C_1 =$					
CaF ₂ СТК19 CaF ₂	0,0036	2,6562 2,2562 1,8562 1,4562 1,0562 0,6562 0,2562 0,0	—1,6562 —1,6562 —1,6562 —1,6562 —1,6562 —1,6562 —1,6562 —1,6562	0,0 0,40 0,80 1,20 1,60 2,00 2,40 2,6562	2,8057 2,8057 2,8057 2,8057 2,8057 2,8057 2,8057 2,8057

b	d	ρ_{\min}	P_{\min}	W_0	a/e^2
= 0					
—9,1623	8,4162	1,7978	0,1800	0,0428	0,8096
—9,9885	12,6355	1,9599	2,8471	0,0903	0,8096
—10,8146	15,5570	2,1220	4,0825	0,1378	0,8096
—11,6407	17,1806	2,2841	3,8861	0,1853	0,8096
—12,4668	17,5065	2,4462	2,2580	0,2328	0,8096
—12,9567	17,0867	2,5424	0,6163	0,2610	0,8096
0,0050					
—8,7410	3,1219	1,6673	—4,1652	—0,0508	0,7996
—9,9609	10,4936	1,9000	1,0325	0,0227	0,7996
—11,1309	15,9528	2,1327	4,0298	0,0962	0,7996
—12,4008	19,4934	2,3654	4,8266	0,1697	0,7996
—13,6207	21,1176	2,5982	3,4232	0,2431	0,7996
—14,8407	20,8252	2,8309	—0,1807	0,3166	0,7996
—15,5614	19,7520	2,9683	—3,3436	0,3600	0,7996
0,0100					
—7,9715	—5,8059	1,4793	—11,7020	—0,1767	0,7897
—9,5852	5,4601	1,7788	—3,0649	—0,0753	0,7897
—11,1990	14,1909	2,0783	2,5537	0,0260	0,7897
—12,8127	20,3865	2,3777	5,1538	0,1274	0,7897
—14,4265	24,0470	2,6772	4,7355	0,2288	0,7897
—16,0403	25,1722	2,9767	1,2988	0,3301	0,7897
—17,6540	23,7622	3,2762	—5,1564	0,4315	0,7897
—18,6037	21,7475	3,4524	—10,3662	0,4912	0,7897
= 0					
—9,1906	4,2706	1,7191	—3,6292	—0,0854	0,7925
—10,5197	12,1375	1,9677	1,7876	0,0058	0,7925
—11,8488	17,9024	2,2163	4,7719	0,0970	0,7925
—13,1780	21,5653	2,4650	5,3238	0,1882	0,7925
—14,5071	23,1262	2,7136	3,4432	0,2795	0,7925
—15,8362	22,5651	2,9622	—0,8697	0,3707	0,7925
—16,2399	22,0046	3,0377	—2,6614	0,3984	0,7925
0,0050					
—8,2212	—9,1722	1,4651	—15,1945	—0,3152	0,7749
—10,1840	5,0244	1,8149	—4,2169	—0,1718	0,7749
—12,1468	16,1168	2,1647	2,9700	—0,0284	0,7749
—14,1096	24,1051	2,5144	6,3662	0,1150	0,7749
—16,0724	28,9892	2,8642	5,9716	0,2584	0,7749
—18,0352	30,7692	3,2140	1,7864	0,4018	0,7749
—19,9981	29,4450	3,5638	—6,1897	0,5452	0,7749
—21,2553	26,9661	3,7878	—13,2898	0,6370	0,7749

Материал	C_{2FD}	φ_1	φ_2	φ_3	α
$C_1 =$					
CaF ₂ CTK19 CaF ₂	0,0071	3,1909 2,7909 2,3909 1,9909 1,5909 1,1909 0,7909 0,3909 0,0	-2,1909 -2,1909 -2,1909 -2,1909 -2,1909 -2,1909 -2,1909 -2,1909 -2,1909	0,0 0,40 0,80 1,20 1,60 2,00 2,40 2,80 3,1909	2,9384 2,9384 2,9384 2,9384 2,9384 2,9384 2,9384 2,9384 2,9384
C_1					
CaF ₂ ТФ4 CaF ₂	0,0002	1,4189 1,2189 1,0189 0,8189 0,6189 0,4189 0,2189 0,0	-0,4189 -0,4189 -0,4189 -0,4189 -0,4189 -0,4189 -0,4184 -0,4189	0,0 0,20 0,40 0,60 0,80 1,00 1,20 1,4189	2,4976 2,4976 2,4976 2,4976 2,4976 2,4976 2,4976 2,4976
$C_1 =$					
CaF ₂ ТФ4 CaF ₂	0,0039	1,6181 1,4181 1,2181 1,0181 0,8181 0,6181 0,4181 0,2181 0,0	-0,6181 -0,6181 -0,6181 -0,6181 -0,6181 -0,6181 -0,6181 -0,6181 -0,6181	0,0 0,20 0,40 0,60 0,80 1,00 1,20 1,40 1,6181	2,5465 2,5465 2,5465 2,5465 2,5465 2,5465 2,5465 2,5465 2,5465
$C_1 =$					
CaF ₂ ТФ4 CaF ₂	0,0075	1,8183 1,6183 1,4183 1,2183 1,0183 0,8183 0,6183 0,4183 0,4183 0,2183 0,0	-0,8183 -0,8183 -0,8183 -0,8183 -0,8183 -0,8183 -0,8183 -0,8183 -0,8183 -0,8183 -0,8183	0,0 0,20 0,40 0,60 0,80 1,00 1,20 1,40 1,40 1,60 1,8183	2,5956 2,5956 2,5956 2,5956 2,5956 2,5956 2,5956 2,5956 2,5956 2,5956 2,5956

b	d	ρ_{\min}	P_{\min}	W_0	a/e^2
0,0100					
—6,5409	—32,1916	1,1130	—35,8317	—0,6334	0,7578
—9,1375	—10,0000	1,5549	—17,1038	—0,4332	0,7578
—11,7340	8,0851	1,9967	—3,6294	—0,2331	0,7578
—14,3305	22,0640	2,4385	4,5914	—0,0329	0,7578
—16,9270	31,9365	2,8803	7,5587	0,1672	0,7578
—19,5235	37,7028	3,3222	5,2725	0,3674	0,7578
—22,1200	39,3627	3,7640	—2,2672	0,5675	0,7578
—24,7165	36,9164	4,2058	—15,0605	0,7676	0,7578
—27,2540	30,5584	4,6376	—32,6383	0,9632	0,7578
= 0					
—9,3770	10,9885	1,8772	2,1874	0,0958	0,8167
—9,6238	12,1196	1,9266	2,8493	0,1111	0,8167
—9,8704	13,0656	1,9760	3,3039	0,1263	0,8167
—10,1171	13,7966	2,0253	3,5514	0,1416	0,8167
—10,3938	14,3427	2,0747	3,5917	0,1568	0,8167
—10,6104	14,6937	2,1241	3,4247	0,1720	0,8167
—10,8571	14,8496	2,1735	3,0506	0,1873	0,8167
—11,1272	14,7968	2,2276	2,4036	0,2040	0,8167
0,0050					
—9,4432	10,0954	1,8542	1,3407	0,0580	0,8098
—9,8081	11,9471	1,9258	2,5028	0,0812	0,8098
—10,1722	13,5062	1,9973	3,3478	0,1044	0,8098
—10,5362	14,7774	2,0688	3,8790	0,1276	0,8098
—10,9002	15,7609	2,1402	4,0964	0,1508	0,8098
—11,2642	16,4567	2,2117	4,0001	0,1740	0,8098
—11,6282	16,8647	2,2832	3,5900	0,1972	0,8098
—11,9922	16,9850	2,3547	2,8662	0,2203	0,8098
—12,3892	16,7881	2,4326	1,7192	0,2456	0,8098
0,0100					
—9,4126	8,4581	1,8132	—0,0753	0,0101	0,8031
—9,8945	11,1397	1,9060	1,7101	0,0417	0,8031
—10,3764	13,4403	1,9989	3,0698	0,0733	0,8031
—10,8583	15,3600	2,0917	4,0038	0,1044	0,8031
—11,3403	16,8987	2,1845	4,5122	0,1364	0,8031
—11,8222	18,0565	2,2774	4,5949	0,1680	0,8031
—12,3041	18,8333	2,3702	4,2518	0,1996	0,8031
—12,7860	19,2292	2,4630	3,4831	0,2312	0,8031
—12,7860	19,2292	2,4630	3,4831	0,2312	0,8031
—13,2679	19,2441	2,5559	2,2887	0,2628	0,8031
—13,7939	18,8255	2,6572	0,4991	0,2973	0,8031

Сочетания этих материалов дают наименьшие значения оптических сил линз системы.

При исследовании трехлинзовых компонентов с одинаковыми показателями преломления в наружных линзах были выбраны материалы, рекомендуемые для расчета двухцветных апохроматов: в качестве лангкронов — флюорит и стекло ФФС2; в качестве курцфлинтов — ОФ4, СТК19, а также ряд обычных флинтов для разработки систем с уменьшенным вторичным спектром.

Все расчеты проводились для значений хроматического коэффициента C_1 от 0 до $+0,0500$ с шагом $0,0050$. В системах первого типа для значения $C_1 = 0$ задавался ряд значений хроматического коэффициента C_2 с шагом $0,0005$, ограниченный с одной стороны величиной, соответствующей C_2 двухцветного апохромата, а с другой — значениями оптической силы креновой линзы, приемлемыми для практической реализации. При расчете систем третьего типа в качестве примера исследовалось соотношение сил наружных линз компонента.

Результаты расчета систем для материалов CaF_2 , ОФ4, ТФ4; CaF_2 , ОФ4, CaF_2 и CaF_2 , СТК19, CaF_2 приведены в табл. 2.3—2.4. Для остальных материалов результаты расчета даны в приложении.

7. ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПОНЕНТОВ С БОЛЬШИМИ КОМПЕНСИРУЮЩИМИ АБЕРРАЦИЯМИ

Анализ работ, проводимых специалистами ведущих фирм в направлении создания объективов с планахроматическим и планапохроматическим типами коррекции aberrаций, свидетельствует о предпочтительном использовании в них исходной конструкции, представляющей собой синтез двух систем: фронтальной с уменьшенной кривизной изображения и последующей, построенной по схеме «перевернутого» телеобъектива в обратном ходе лучей. Целесообразность такой конструкции обнаруживается при разработке объективов, начиная с увеличения $16\times$. В работе [1] была изложена методика расчета последующей части объектива в обратном ходе лучей на основании теории aberrаций третьего порядка. Согласно этой методике aberrации последующей части рассчитываются так, чтобы они в первом приближении были равны по абсолютной величине соответствующим aberrациям фронтальной части, но противоположны по знаку (для продольных величин).

В случае расчета ахроматического объектива с плоским полем должны быть выполнены следующие условия (величины, стоящие в левой части равенств, относятся к последующей части, а в правой — к фронтальной):

$$\Delta s'_{п.с} = -\Delta s'_{ф.с}; \quad \eta_{п.с} = \eta_{ф.с};$$

$$(z'_s - z'_m)_{п.с} = -(z'_s - z'_m)_{ф.с};$$

$$S_{IV п.с} = -S_{IV ф.с};$$

$$\Delta s'_{FC п.с} = -\Delta s'_{FC ф.с};$$

$$\Delta y'_{FC}/y'_{D п.с} = \Delta y'_{FC}/y'_{D ф.с},$$

где $\Delta s'$ — продольная сферическая аберрация; η — величина, характеризующая отступление от закона синусов; $z'_s - z'_m$ — астигматическая разность бесконечно тонких лучей; S_{1V} — коэффициент Пецваля, определяющий кривизну изображения; $\Delta s'_{FC}$, $\Delta y'_{FC}/y'_D$ — хроматическая разность положения и увеличения соответственно.

Аберрации фронтальной части вычисляются путем расчета хода лучей. Далее на основании предыдущих соотношений определяются три монохроматических коэффициента Зейделя и две хроматические суммы, после чего составляется и решается система уравнений относительно основных параметров тонкого компонента P , W , C . В зависимости от числовых значений величин основных параметров и относительных отверстий выбираются типы компонентов, затем

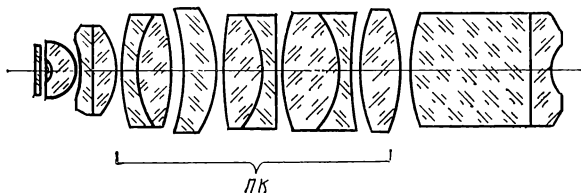


Рис. 2.5. Оптическая схема планахроматического иммерсионного объектива $100\times 1,25$

вычисляются их конструктивные элементы. Если аберрации, полученные в результате расчета хода лучей, существенно отличаются от заданных, процесс повторяется путем интерполяции числовых значений соответствующих коэффициентов.

Однако использование теории аберраций третьего порядка при расчете высокоапертурных объективов микроскопов, особенно с увеличениями, превышающими $40\times$, встречает серьезные затруднения, обусловленные конструктивной сложностью последующей части объектива. Эта сложность, в свою очередь, объясняется коррекционной нагрузкой на компоненты в оптической системе план-объектива. Действительно, числовые апертуры после фронтальных систем остаются значительными: $\sin \sigma' \approx 0,2$. Как будет показано далее, коррекционные возможности мениска последующей части объектива весьма ограничены. Таким образом, к положительному компоненту предъявляются требования компенсации аберраций для осевой точки предмета, превышающих 10λ при относительном отверстии отдельных его элементов, доходящих до $A_0 \approx 1 : 2,5$.

В этих условиях задача разработки конструкции положительного компонента не решается однозначно, и необходимо систематическое исследование возможных вариантов решения не только для достижения необходимых аберрационных свойств, но и с точки зрения технологичности отдельных элементов компонента. На рис. 2.5 изображена оптическая система планахроматического иммерсионного объектива ОПА-5, имеющего увеличение $100\times$ и числовую апертуру $A = 1,25$, с выделенной на ней конструкцией положительного компонента последующей части ПК. Очевидно, что расчет такой сложной системы в области аберраций третьего порядка даже при

широком использовании ЭВМ не всегда может гарантировать оптимальное распределение коррекционной нагрузки между отдельными ее элементами, что, в свою очередь, может привести к повышенной чувствительности этих элементов к погрешностям изготовления.

Вместе с тем при тщательном анализе условий работы положительного компонента последующей части объектива обнаруживается определенная последовательность в построении его схемного решения. Например, к первому элементу этой сложной системы, которую удобно назвать компенсационной, целесообразно отнести тонкий компонент, расположенный непосредственно за фронтальной частью объектива. Если бы в этом элементе, относительное отверстие которого составляет $A_I \approx 1 : 2,5$, удалось добиться исправления осевых аберраций для бесконечно удаленной плоскости предмета в обратном ходе лучей (выполнив его, например, в виде трехлинзового склеенного компонента), то второй элемент системы оказался бы в условиях значительно меньших относительных отверстий $A_{II} = A_I/v_{к.с.}$, где $v_{к.с.}$ — увеличение положительного компонента последующей части объектива (компенсационной системы), найденное при определении габаритных размеров. Учитывая, что в высокоапертурных объективах микроскопов это увеличение составляет $v_{к.с.} \approx 3 \times \div 4 \times$, имеем $A_{II} \approx 1 : 7,5 \div 1,10$. Следовательно, от второго компонента системы, работающего в условиях малых относительных отверстий, можно потребовать компенсации аберраций, вносимых предшествующими элементами объектива.

При расчете компонентов с большими компенсирующими аберрациями принципиальное значение имеет выбор сортов стекол и определение оптических сил кроновой и флинтовой линз. Используя известное соотношение, связывающее хроматическую аберрацию положения с хроматическим коэффициентом тонкого компонента C [67],

$$\Delta s'_{xp} = \frac{1}{n'\alpha'^2} \sum hC(\alpha' - \alpha),$$

определим область значений C компенсационных систем высокоапертурных объективов микроскопов. Исследования числовых значений остаточных аберраций фронтальных систем показывают, что для компенсации хроматической аберрации положения величина C компенсационной системы должна находиться в пределах $C = 0,05 \div 0,10$.

При выборе оптических материалов могут быть использованы рекомендации, данные в гл. I и работе [47]. Для получения наименьших значений оптических сил линз в системе, рассчитываемой на основе двух материалов, целесообразно выбирать в качестве лангкранов — флюорит и новое фторфосфатное стекло ФФС2, в качестве курцфлинт — стекла марок ОФ4, СТК19. Оптические силы кроновой φ_1 и флинтвой φ_2 линз выразятся тогда известными соотношениями

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= (1 + C_1 v_2) v_1 / (v_1 - v_2); \\ \varphi_2 &= 1 - \varphi_1 = -(1 + C_1 v_1) v_2 / (v_1 - v_2),\end{aligned}$$

где v_1, v_2 — коэффициенты дисперсии материалов кроновой и флинтовой линз.

Коэффициент C_2 , определяющий вторичный спектр системы, будет постоянной величиной, зависящей от найденных значений φ_1, φ_2 и константы оптических материалов

$$C_2 = -(\varphi_1 p_1 / v_1 + \varphi_2 p_2 / v_2),$$

где p — относительные частные дисперсии материалов.

При расчете компенсационной системы на основе трех оптических материалов (лангкронов, курцфлинтов, лангфлинтов) второй хроматический коэффициент C_2 становится независимым параметром, определяющим вместе с коэффициентом C_1 оптические силы элемен-

тов системы, см. соотношения (2.6). Изменяя значения C_2 при заданном значении C_1 , можно добиться оптимизации оптических сил φ_i компонентов компенсационной системы и величины вторичного спектра.

В табл. 2.5 приведены значения φ_i для ряда оптических материалов при $C_1 = 0,075$. Из анализа результатов расчета следует, что оптические силы линз имеют большую величину и для конструктивной реализации системы целесообразно применение, по крайней мере, двух склеенных компонентов.

Для нахождения конструктивных параметров компонентов целесообразно использовать значения углов, составленных первым параксиальным лучом с оптической осью системы:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 0; \alpha_2 = \frac{n_2 - 1}{n_2} \rho_1; \\ \alpha_3 &= \frac{n_3 - 1}{n_3} \rho_1 - \frac{n_3 - n_2}{n_3 (n_2 - 1)} \varphi_1; \\ \alpha_4 &= \varphi_1 + \varphi_2; \alpha_5 = \frac{n_5 - 1}{n_5} \rho_4 + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{n_5}; \\ \alpha_6 &= \frac{n_6 - 1}{n_6} \rho_4 - \frac{n_6 - n_5}{n_6 (n_5 - 1)} \varphi_3 + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{n_6}; \\ \alpha_7 &= 1.\end{aligned}$$

В эти выражения в качестве свободных параметров входят значения кривизны наружных поверхностей первого и второго компонентов ρ_1, ρ_4 . Кроме того, если система рассчитывается для двух

Т а б л и ц а 2.5

Материал	$C_2 g F$	φ_1	φ_2	φ_3
CaF ₂ ОФ4 CaF ₂	0,0440	7,8241	—6,8241	0
CaF ₂ ОФ4 ТФ4	0,0440 0,0450 0,0460 0,0470 0,0480	7,7923 6,9794 6,1665 5,3536 4,5407	—6,7605 —5,1335 —3,5065 —1,8795 —0,2525	—0,0318 —0,8459 —1,6600 —2,4741 —3,2882
CaF ₂ СТК19 ТФ4	0,0440 0,0450 0,0460 0,0470 0,0480	8,5395 7,5468 6,5541 5,5614 4,5687	—6,5842 —4,9997 —3,4151 —1,8305 —0,2460	—0,9553 —1,5471 —2,1390 —2,7308 —3,3227

оптических материалов, в качестве дополнительного параметра берется внешний угол α_4 , зависящий от разбивки сил кроновой и флинтовой линз между компонентами.

Исследование аберрационных свойств двух склеенных компонентов при использовании современной электронно-вычислительной техники не представляется трудоемким. Подобная задача была решена Б. Л. Нефедовым [48] применительно к разработке объективов зрительных труб с уменьшенным вторичным спектром и имела своей целью отыскание комбинации компонентов, обладающих наименьшими значениями высших порядков сферической аберрации и сферохроматизма. В нашем случае задача лишь несколько усложняется необходимостью придания компонентам большой коррекционной нагрузки, но и здесь она решается вполне однозначно.

8. ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕКЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕНИСКОВ КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНЫ

Рассмотрим коррекционные возможности менисков конечной толщины, предложенных Богехольдом для исправления кривизны изображения объективов микроскопов [45]. Применение этого эле-

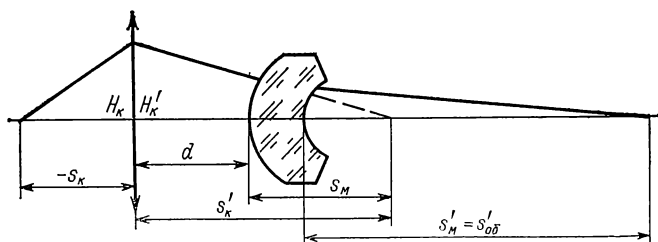


Рис. 2.6. Принципиальная схема последующей части план-объектива

мента в последующей части объектива позволяет не только уменьшить сумму Пецваля, но и реализовать условие компактности габаритных размеров оптических систем планобъективов, высота которых в настоящее время стандартизована и составляет 45 мм.

На рис. 2.6 изображена принципиальная схема последующей части объектива, содержащая компенсационную систему (условно обозначенную совмещенными главными плоскостями $H_K H'_K$) и мениск. Положение плоскости предмета компенсационной системы s_K известно в результате расчета фронтальной части объектива; положение плоскости изображения определится как $s'_K \approx s_K v_K$, где v_K — увеличение компенсационной системы.

При анализе аберрационных свойств мениска в качестве параметров удобно использовать увеличение мениска v_m и его передний отрезок s_m . Кроме того, можно принять, что положение последней поверхности мениска совпадает с опорной плоскостью объектива, следовательно, отрезок, определяющий расстояние от последней поверхности мениска до плоскости изображения, известен и равен

$s' = 147$ мм (для объективов проходящего света с длиной тубуса 160 мм).

Исследуем аберрационные свойства менисков в обратном ходе лучей, выразив радиусы кривизны поверхностей через значения углов и высот первого параксиального луча:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 1/v_M \\ h_1 &= -s'_M/v_M \\ \alpha_2 &= (-s'_M + s_M v_M)/v_M d \\ h_2 &= -s_M \cdot \\ \alpha_3 &= 1\end{aligned}$$

Толщина мениска d может быть использована в качестве дополнительного коррекционного параметра.

В табл. 2.6 приведены результаты расчета семейства менисков при $\sin \sigma = 0,015$; $2y = 25,0$; $s_p = 10,0$; $n_D = 1,744$ (стекло СТК19), отличающихся увеличением v_M , положением плоскости предмета и толщиной. Анализ данных таблицы позволяет сделать следующие выводы.

1. Для выбранного увеличения v_M существует область конструктивных решений, определяемая отрезком s_M , в которой радиусы кривизны менисков имеют приемлемые для практической реализации значения.

2. Коррекционные возможности менисков в отношении компенсации остаточных аберраций фронтальных систем весьма ограничены. Хроматизм увеличения значителен и противоположен по знаку хроматизму увеличения фронтальной части.

3. Увеличение отрезка s_M при выбранном значении v_M целесообразно не только для усиления компенсационных свойств мениска, но и для снижения относительных отверстий компонентов компенсационной системы.

В результате исследования свойств отдельных элементов объективов построение последующей части планобъектива представляется как процесс оптимизации параметров компенсационной системы и мениска конечной толщины. При наличии в последующей части необходимых коррекционных возможностей этот процесс успешно решается с помощью ЭВМ.

Рассмотрим более подробно хроматические аберрации мениска. Используя известное соотношение для определения хроматического коэффициента одиночной поверхности [67]

$$C = \frac{\Delta \alpha}{\Delta l/n} \left(\frac{\delta n'}{n'} - \frac{\delta n}{n} \right),$$

найдем значения C_1 , C_2 для наружных поверхностей мениска:

$$\begin{aligned}C_1 &= (\alpha_1 - \alpha_2)/v; \\ C_2 &= (\alpha_2 - 1)/v.\end{aligned}$$

Введем в мениск радиус ахроматизации $r_{\text{СКЛ}}$, приняв, что кроновая и флинтсовая линзы выполнены из марок стекол, имеющих равные

s_M	r_1, r_z	S_{IV}	d	$\Delta s'_{\sqrt{1}}$	$\Delta s'_{\sqrt{1/2}}$	$\eta_{\sqrt{1}}, \%$	z'_m	z'_s	$\Delta s'_{FC}$	$\Delta y'_{FC}/y'_D$
$v_M = 5,5 \times$										
40,0	-7,825	-0,0298	8,5	0,709	0,353	-1,928	1,048	0,405	0,273	-0,604
	-17,270									
	-11,908	-0,0236	12,5	0,167	0,083	-0,555	0,506	0,210	0,410	-0,592
45	-34,939									
	-5,574	-0,0415	8,5	1,816	0,897	-4,902	1,968	0,744	0,003	-0,441
	-12,179									
50	-8,400	-0,0311	12,5	0,571	0,285	-1,583	0,922	0,364	0,256	-0,605
	-21,609									
	-5,398	-0,0461	10,5	1,931	0,952	-5,326	2,111	0,801	-0,140	-0,371
	-12,982									
	-6,488	-0,0400	12,5	1,223	0,606	-3,224	1,499	0,577	0,036	-0,508
	-16,556									
$v_{III} = 6,5 \times$										
35	-8,841	-0,0309	10,5	0,336	0,168	-1,362	0,630	0,250	0,325	-0,725
	-24,637									
	-10,690	-0,0280	12,5	0,173	0,086	-0,728	0,449	0,185	0,375	-0,709
40	-35,778									
	-6,155	-0,0422	10,5	1,100	0,546	-4,042	1,256	0,478	0,139	-0,639
	-15,767									
45	-7,407	-0,0372	12,5	0,620	0,309	-2,331	0,876	0,341	0,233	-0,708
	-20,872									
	-4,721	-0,0557	10,5	2,212	1,086	-9,112	2,109	0,793	-0,135	-0,364
	-12,318									
	-5,667	-0,0482	12,5	1,392	0,688	-5,178	1,483	0,564	0,017	-0,554
	-15,770									

значения показателей преломления для основной длины волны. При определении хроматического коэффициента склеенной поверхности возникает неопределенность типа 0/0, которую нетрудно исключить, если ввести в рассмотрение воздушную прослойку бесконечно малой толщины. В результате хроматический коэффициент склеенной поверхности, разделяющей две среды с равными показателями преломления для основной длины волны, будет

$$C_{\text{СКЛ}} = (n - 1) (1/v_3 - 1/v_2) (\alpha_2 - h_{\text{СКЛ}}/r_{\text{СКЛ}}).$$

Здесь $h_{\text{СКЛ}}$ — высота первого параксиального луча на склеенной поверхности, $h_{\text{СКЛ}} = h_1 - \alpha_2 d_1$, где d_1 — толщина первой линзы, выбираемая по конструктивным соображениям; v_2 , v_3 — коэффициенты дисперсии материалов.

В табл. 2.7 приведены результаты расчета хроматических коэффициентов и аберраций склеенного мениска, имеющего увеличение

Т а б л и ц а 2.7

s_M	d	d_1	$r_{\text{СКЛ}}$	C_1	$C_{\text{СКЛ}}$	C_2	$\Delta s'_{FC}$	$\Delta y'_{FC}/y'_D$, %
35	10,5	3,5	—15	—0,0203	—0,0070	0,0064	0,426	—0,897
			—25		0,0013		0,203	—0,572
			—50		0,0075		0,036	—0,328
			∞		0,0138		—0,131	—0,084
			50		0,0200		—0,298	0,160
			25		0,0262		—0,465	0,404
			15		0,0346		—0,687	0,730
40	10,5	3,5	—15	—0,0298	—0,0028	0,0233	—0,179	—0,066
			—25		0,0061		—0,430	0,326
			—50		0,0127		—0,618	0,621
			∞		0,0193		—0,807	0,801
			50		0,0260		—0,995	1,210
			25		0,0326		—1,184	1,504
			15		0,0414		—1,435	1,897

$v_M = 6,5 \times$ при различных значениях радиуса ахроматизации. В качестве материалов линз выбраны стекла СТК19 и ТФ4. Как видно из этих данных, для получения положительного (в обратном ходе лучей) хроматизма увеличения необходимы большие значения хроматического коэффициента $C_{\text{СКЛ}}$, что приводит к отрицательной хроматической разности положений и увеличивает тем самым коррекционную нагрузку компенсационной системы.

Исследования показывают, что введение разности показателей преломления для основной длины волны в материалах кроновой и флинтовой линз мениска не изменяет заметным образом состояние его аберрационной коррекции.

СИНТЕЗ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБЪЕКТИВОВ МИКРОСКОПОВ

9. ОБЪЕКТИВЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПРОХОДЯЩЕМ СВЕТЕ. ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Объективы с ахроматическим типом коррекции для исследований в проходящем свете составили первый комплект объективов микроскопов, проектирование и изготовление которого было основано на теоретических данных. Созданные в конце 80-х годов прошлого столетия, они практически не изменились до наших дней, несмотря

на совершенствование средств и методов расчета. Анализируя оптические конструкции этих объективов, Берек сформулировал общие принципы построения их схемных решений [7]. Слабые микрообъективы создаются по типу объектива Пецваля в обратном ходе лучей. Построение конструкций высокоапертурных объективов, по мнению Берека, должно выполняться таким образом, чтобы все поверхности системы имели по возможности

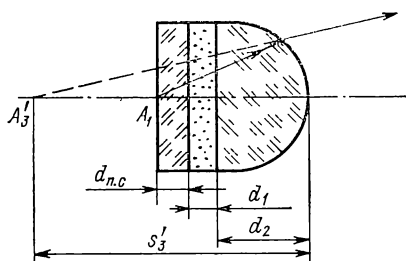


Рис. 3.1. Фронтальная линза иммерсионного объектива

малые значения первых двух коэффициентов aberrаций третьего порядка. Отсюда, как следствие, вытекает необходимость синтеза объектива из двух самостоятельных частей: фронтальной, снижающей числовую апертуру до умеренных значений и имеющей близкую к апланатической коррекцию aberrаций, и последующей, по своим свойствам, а следовательно, и по конструкции приближающейся к объективу Пецваля.

При такой конструкции в ахроматических объективах удастся исправить сферическую aberrацию, кому, хроматизм положения и отчасти сферохроматическую aberrацию. Астигматизм и кривизна изображения определяются фронтальной линзой объективов, поскольку, как показано в гл. II, апланатические поверхности второго рода имеют значения третьей монохроматической суммы Зейделя, не равные нулю.

Установим взаимосвязь между параметрами фронтальной линзы высокоапертурного объектива микроскопа и возможностью уменьшения в нем кривизны изображения. На рис. 3.1 изображена фронтальная линза иммерсионного объектива, материал которой имеет показатель преломления n_3 , близкий к показателю преломления иммерсии n_2 и покровного стекла n_1 .

Пусть поверхность линзы, обращенная к воздуху, представляет собой апланатическую поверхность первого рода. Тогда ее радиус кривизны определится известным соотношением:

$$r_3 = r_{\text{апл}} = n_3 s_3 / (n_3 + 1), \quad (3.1)$$

где s_3 — положение плоскости предмета относительно данной поверхности.

Рассчитаем параметры первого параксиального луча через систему поверхностей (рис. 3.1), имея в виду, что плоскость предмета совпадает с первой поверхностью покровного стекла. Для этой системы имеем

$$s_3 = -d_{\text{п.с.}} n_3 / n_1 - d_1 n_3 / n_2 - d_2, \quad (3.2)$$

где $d_{\text{п.с.}}$, d_1 , d_2 — толщина покровного стекла, слоя иммерсии и линзы соответственно.

Подставив (3.2) в (3.1), найдем

$$d_2 = -\frac{1}{n_1 n_2 n_3} [n_3^2 (d_{\text{п.с.}} n_2 + d_1 n_1) + r_3 n_1 n_2 (n_3 + 1)]. \quad (3.3)$$

Выразим радиус апланатической поверхности через значение четвертой монохроматической суммы $S_{IV} = -(n_3 - 1)/n_3 r_3$ и подставим его в выражение (3.3). Кроме того, примем $n_1 = n_2$ (показателя преломления покровного стекла $n_D = 1,515 \pm 0,002$ согласно ГОСТ 6672—75, кедрового масла $n_D = 1,515 \pm 0,001$ по ГОСТ 13739—78). После несложных преобразований получаем

$$d_2 = \frac{1}{n_2 n_3^2 S_{IV}} [(n_3^2 - 1) n_2 - n_3^3 (d_{\text{п.с.}} + d_1) S_{IV}]. \quad (3.4)$$

Увеличение такой системы будет равно $v_{\text{ф.л.}} = n_2^2$.

Определим в зависимости от значения S_{IV} параметры фронтальной линзы, приняв $d_{\text{п.с.}} = 0,17$; $d_1 = 0,3$; $n_3 = 1,5263$ (стекло К20). Результаты расчета $v_{\text{ф.л.}}$, r_3 , d_2 , s'_3 представлены в табл. 3.1.

Анализ данных таблицы позволяет сделать следующие выводы.

1. С уменьшением S_{IV} толщина линзы возрастает.

2. Вместе с увеличением толщины линзы увеличивается отрезок s'_3 .

Увеличение заднего отрезка ограничивает возможность построения последующей части объектива из тонких компонентов. Известно, что высота микрообъективов стандартизована и равна 45 мм (в прежних разработках, в том числе в комплекте ахроматов, она составляет 33 мм). Если иметь в виду, что положение плоскости

Т а б л и ц а 3.1

n_3	$v_{\text{ф.л.}}$	S_{IV}	r_3	d_2	s'_3	Объективы
1,5263	2,3296	0,4420	—0,78	0,93	—1,7773	ОМ-41; О2АМ-90
		0,35	—0,9852	1,157	—2,4889	—
		0,3172	—1,087	1,3	—2,5417	О6АМ-60
		0,30	—1,1494	1,429	—2,9037	—
		0,25	—1,3793	1,809	—3,4845	
		0,20	—1,7241	2,380	—4,3556	
		0,15	—2,2988	3,331	—5,8075	

Таблица 3.2

Наименование элемента и его параметры	$\sin \sigma$	D		C	F	g	$s'_F - s'_C$	$s'_g - s'_F$	S_{IV}
		$\Delta s'$	$\eta, \%$						
Фронтальная система; $s = -14,6871$; $v = 5,0881$	0	0,0	0,0	0,1332	-0,3270	-0,5865	-0,4602	-0,2595	0,2163
	$-1,0 \sqrt{1/4}$	-0,1077	-0,2376	0,0294	-0,4448	-0,7124	-0,4742	-0,2676	
	$-1,0 \sqrt{1/2}$	-0,2263	-0,4716	-0,0848	-0,5749	-0,8517	-0,4901	-0,2768	
	$-1,0 \sqrt{3/4}$	-0,3578	-0,6999	-0,2114	-0,7195	-1,0068	-0,5081	-0,2873	
	-1,0	-0,5048	-0,9198	-0,3528	-0,8817	-1,1811	-0,5289	-0,2994	
Последующая часть в обратном ходе; $s_1 = 17,8730$; $v = 0,0791$	0	0,0	0,0	-0,1333	0,3133	0,5590	0,4466	0,2457	0,0052
	$-0,016 \sqrt{1/4}$	0,0836	-0,2113	-0,0577	0,4131	0,6683	0,4708	0,2552	
	$-0,016 \sqrt{1/2}$	0,2123	-0,4943	0,0625	0,5574	0,8199	0,4949	0,2625	
	$-0,016 \sqrt{3/4}$	0,3678	-0,8512	0,2101	0,7254	0,9902	0,5153	0,2648	
	-0,016	0,4781	-1,2324	0,3140	0,8434	1,1040	0,5294	0,2605	

Таблица 3.3

sin σ	Точка на оси										
	D		C	F	g	D	C	F	g	Волновая аберрация N _λ	
	Δs'	η, %	Δs'								
0	3,200	0,0	3,092	1,374	-0,329	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
1,0 √1/4	-1,073	-0,052	-1,762	-2,034	-3,504	0,032	0,011	-0,038	-0,122	-0,122	
1,0 √1/2	-0,716	-0,039	-1,784	-1,407	-3,191	-0,038	-0,103	-0,145	-0,308	-0,308	
1,0 √3/4	1,985	0,055	0,581	0,882	-1,999	-0,001	-0,135	-0,151	-0,443	-0,443	
1,0	-1,338	0,159	-3,066	-2,788	-6,908	0,062	-0,154	-0,169	-0,653	-0,653	
Точка вне оси											
y'	s _p	s' _p	$\frac{y'_F - y'_C}{y'_D}, \%$	z' _m	z' _s	z' _s - z' _m	$\frac{y' - y'_0}{y'_0}, \%$	S _{IV}			
0,0		-10,450	0,961	3,200	3,200	0,0	0,0	0,2213			
7,103	∞	-10,377	0,965	-1,405	-2,019	-0,614	0,562				
10,104		-10,303	0,970	-6,152	-7,001	-0,849	1,138				

изображения относительно опорной плоскости объективов с длиной тубуса 160 мм $s' = 147$ мм и принять этот отрезок равным заднему отрезку объектива, то получим

$$s'_3 < s'v_{ф.п}/v_{об}.$$

При $v_{об} = -90\times$, $v_{ф.п} = 2,33$ с учетом положения главных плоскостей в компонентах $s'_3 < -3,88$ мм.

В табл. 3.1 приведены также параметры фронтальных линз, положенных в основу расчета ахроматического объектива ОМ-41 [45] ($90 \times 1,25$ м. и.), и апохроматических объективов О6АМ-60 ($60 \times 1,0$ м. и.), О2АМ-90 ($90 \times 1,3$ м. и.).

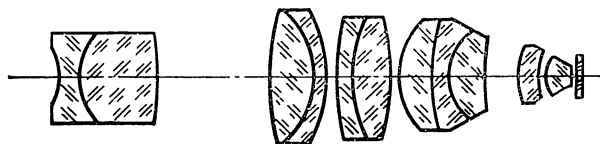


Рис. 3.2. Оптическая схема иммерсионного апохроматического объектива с уменьшенной кривизной изображения

Уменьшение S_{IV} требует построения последующей части объектива по схеме перевернутого телеобъектива в обратном ходе лучей, имеющего увеличенное по сравнению с тонкой системой значение заднего отрезка. Так, при разработке

нового апохроматического иммерсионного объектива $63 \times 1,0$ м. и. с уменьшенной кривизной изображения во фронтальной линзе было принято значение $S_{IV} = 0,175$. Параметры последующего мениска были найдены (согласно рекомендациям гл. II) из условия минимальной сферической аберрации третьего порядка, определяющего значение угла α первого параксиального луча в стекле [68].

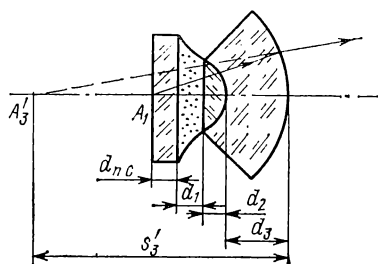


Рис. 3.3. Фронтальная линза иммерсионного планобъектива

Аберрации для осевой точки предмета фронтальной и последующей частей объектива $63 \times 1,0$ м. п. в обратном ходе лучей представлены в табл. 3.2. Последующая часть объектива построена по принципу синтеза двух элементов: компенсационной системы и мениска конечной толщины, свойства которых были исследованы по методике, изложенной в гл. II. Результаты аберрационной коррекции всего объектива приведены в табл. 3.3. Оптическая схема объектива изображена на рис. 3.2. Таким образом, результатом уменьшения S_{IV} во фронтальной части до значения 0,175 и снижения хроматизма увеличения до 1 % явилось усложнение оптической конструкции апохроматического объектива, имеющего увеличение $60\times$ и числовую апертуру $A = 1,0$,

Дальнейшее уменьшение кривизны изображения в иммерсионных объективах микроскопов требует введения нового коррекционного элемента во фронтальной системе: склеенной фронтальной линзы, изображенной на рис. 3.3. Если плосковыпуклая линза выполнена из стекла, показатель преломления которого равен показателю преломления иммерсии, то действие такого склеенного компонента эквивалентно действию мениска, обращенного первой поверхностью к среде иммерсии. Фронтальная линза усложненной конструкции явилась базовым элементом при расчете планобъективов с увеличением $100\times$.

10. ОБЪЕКТИВЫ С ПЛОСКИМ ПОЛЕМ ИЗОБРАЖЕНИЯ. ПЛАНАХРОМАТИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТИВЫ С УМЕНЬШЕННЫМ ВТОРИЧНЫМ СПЕКТРОМ

В течение последних двадцати лет в отечественной и зарубежной печати систематически появляются публикации, посвященные разработке микрообъективов с плоским полем изображения. В статье

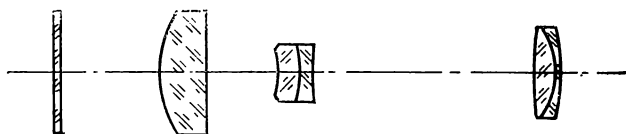


Рис. 3.4. Планахроматический объектив $2,5\times 0,05$

[81] дается отчет о работах, проведенных фирмой «Лейтц» (ФРГ) в период с 1944 по 1963 г. по созданию объективов с планахроматической и планопохроматической коррекцией аберраций на поле 28 мм. Приводятся оптические схемы различных модификаций микрообъективов с указанием дат изготовления их экспериментальных образцов. По этим данным можно судить о ходе работ в направлении оптимизации конструкций объективов. Однако, несмотря на некоторое упрощение схемных решений, присущее последним модификациям, оптическая конструкция объективов фирмы «Лейтц» остается исключительно сложной и едва ли может считаться приемлемой для изготовления в условиях серийного производства.

Объективы значительно более простой конструкции, имеющие планахроматический тип коррекции аберраций на поле 20 мм, разработаны фирмой «Бауш и Ломб» (США) [92]. Интересной особенностью этого комплекта является общая отрицательная склеенная линза, вынесенная в тубус микроскопа и имеющая увеличение $5\times$.

К 60-м годам относится появление первых отечественных планобъективов, созданных на основе теоретических работ советских оптотехников [1, 2]. В период с 1960 по 1972 г. опубликовано большое число статей по расчету и исследованию объективов с плоским полем изображения. Наиболее рациональные конструкции защищены авторскими свидетельствами. На рис. 3.4—3.6 показаны оптические схемы планахроматических объективов для проходящего света,

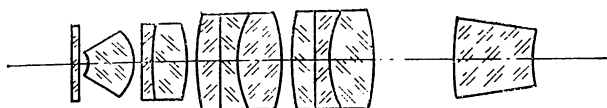


Рис. 3.5. Планахроматический объектив $40\times 0,65$

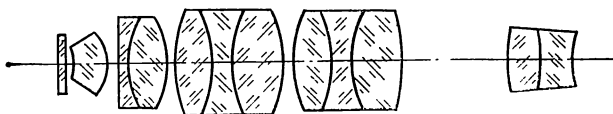


Рис. 3.6. Планахроматический объектив $63\times 0,85$

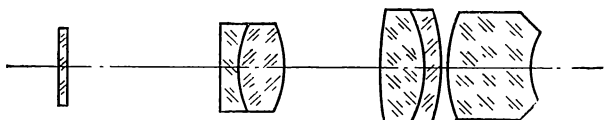


Рис. 3.7. Планахроматический объектив с уменьшенным вторичным спектром $10\times 0,22$

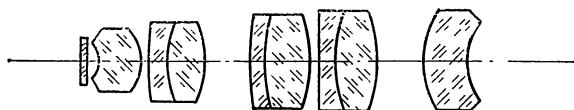


Рис. 3.8. Планахроматический объектив с уменьшенным вторичным спектром $25\times 0,55$

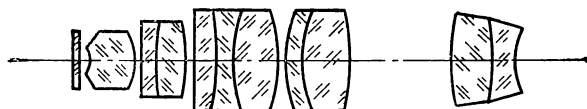


Рис. 3.9. Планахроматический объектив с уменьшенным вторичным спектром $40\times 0,65$

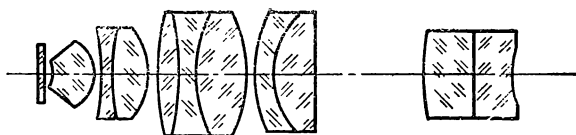


Рис. 3.10. Планахроматический объектив с уменьшенным вторичным спектром $63\times 0,85$

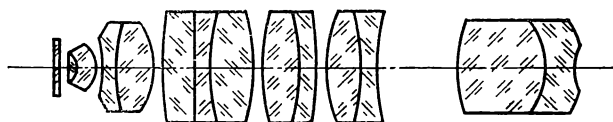


Рис. 3.11. Планахроматический иммерсионный объектив $100\times 1,25$

разработанные Л. Н. Андреевым для лабораторных и исследовательских моделей микроскопов. Методика расчета этих объективов, основанная на теории аббераций третьего порядка, опубликована в работе [51]. Объективы имеют стандартизованные характеристики увеличения и высоты ($h = 45$ мм), скорректированы в пределах линейного поля зрения $2y' = 25$ мм; остаточный хроматизм увеличения во всем комплекте постоянен и составляет 2 %. Разработка фторфосфатного стекла ФФС2, не имеющего аналога за рубежом, создала предпосылки для дальнейшего совершенствования планахроматических объективов.

На рис. 3.7—3.11 показаны оптические схемы новых планахроматических объективов с уменьшенным вторичным спектром, созданные по принципу синтеза оптических систем из базовых элементов. Наиболее сложную оптическую конструкцию имеет объектив $100 \times \times 1,25$ м. и. (ОПХ-100). Его схема построена на базе коррекционного элемента, получившего распространение в объективах больших увеличений, — склеенной фронтальной линзы. Четвертая сумма этого элемента имеет для объектива $100 \times 1,25$ значение $S_{IV} = 0,1538$. Остаточный хроматизм увеличения фронтальной части объектива уменьшен до значения $(y'_F - y'_C)/y'_D = 1,4$ % благодаря введению радиуса ахроматизации во фронтальном мениске. Последнее обстоятельство обусловило возможность уменьшения хроматизма увеличения всего объектива до 1,2 %.

Коррекционная нагрузка в последующей части объектива распределяется следующим образом. При небольшом компенсационном хроматизме увеличения последнего мениска хроматическая разность положений имеет отрицательные значения. Для компенсации остаточных аббераций фронтальной системы и последнего мениска первый компонент последующей части объектива должен иметь большие положительные значения сферической абберации и хроматической разности положений при минимальных значениях сферохроматической абберации. В условиях значительных числовых апертур $\sin \sigma \approx 0,2$ этот компонент неизбежно будет представлять собой сложную оптическую систему, параметры элементов которой целесообразно оптимизировать в процессе габаритного расчета. Например, целесообразно рассматривать эту систему состоящей из двух элементов: первого, расположенного после фронтальной части и создающего изображение объекта в бесконечности, и второго, строящего изображение бесконечно удаленного объекта в плоскости предмета последнего мениска. Тогда увеличение объектива выразится соотношением $v_{об} = -v_{ф.с} v_m f'_{II}/f'_I$, где $v_{ф.с}$ — увеличение фронтальной системы; f'_I, f'_{II} — фокусные расстояния соответствующих элементов компенсационной системы; v_m — увеличение мениска.

Увеличение $v_{ф.с}$ и положение плоскости изображения $s'_{ф.с}$ известны в результате расчета фронтальной системы. Можно далее принять $f'_I \approx -s'_{ф.с}$. Второй элемент компенсационной системы и последний мениск образуют телеобъектив с известными значениями эквивалентного фокусного расстояния $f'_{экв} = f'_{II} v_m$ и последнего отрезка $s'_{F'} \approx s'_{ог}$. В качестве независимых параметров при расчете

Характеристика объектива	sin σ	Точка на оси												Siv
		D		η, %	C		F		F-C	D			F	
		Δs'	Δy'		Δs'	Δs'	Δs'	Волновая aberrация						
10×0,22	0	0	0	0	1,137	-0,229	-1,366	0	0	0	0	0	0	0,022
	-0,22 √1/4	-0,398	-0,004	0,052	0,616	-0,247	-0,863	-0,022	0,082	-0,028				
	-0,22 √1/2	-0,396	-0,006	0,060	0,490	0,132	-0,358	-0,063	0,132	-0,035				
	-0,22 √3/4	-0,084	-0,002	0,020	0,680	0,824	0,144	-0,086	0,195	0,014				
	-0,22	0,364	0,008	-0,077	1,021	1,613	0,592	-0,076	0,276	0,134				
25×0,55	0	1,0	0	0	0,797	0,711	-1,086	0	0	0	0	0	0,035	
	-0,55 √1/4	-0,281	-0,003	0,028	0,426	-0,292	-0,719	0,032	0,103	0,014				
	-0,55 √1/2	-0,650	-0,010	0,059	-0,030	-0,316	-0,286	-0,022	0,109	-0,019				
	-0,55 √3/4	0,420	0,008	0,086	0,909	1,167	0,258	-0,052	0,147	0,004				
	-0,55	3,766	0,079	0,091	4,118	5,112	0,994	0,142	0,379	0,289				
40×0,65	0	0	0	0	2,112	-1,204	-3,316	0	0	0	0	0	0,036	
	-0,65 √1/4	-0,787	-0,006	0,009	0,926	-0,789	-1,715	-0,023	0,083	-0,057				
	-0,65 √1/2	-0,683	-0,007	0,007	0,629	0,514	-0,115	-0,072	0,122	-0,066				
	-0,65 √3/4	0,414	0,006	0,000	1,379	2,819	1,439	-0,079	0,178	0,024				
	-0,65	2,426	0,039	0,000	3,169	5,882	2,712	-0,006	0,300	0,253				
63×0,85	0	0	0	0	4,406	-2,535	-6,941	0	0	0	0	0	0,0046	
	-0,85 √1/4	-1,363	-0,009	0,027	1,550	0,053	-1,496	-0,040	0,097	-0,063				
	-0,85 √1/2	1,690	0,016	0,017	3,558	6,987	3,429	-0,042	0,180	0,068				
	-0,85 √3/4	5,016	0,056	-0,012	6,900	11,317	4,416	0,105	0,394	0,442				
	-0,85	-17,730	-0,268	0,061	-12,078	-24,125	-12,047	0,023	0,452	0,409				
100× ×1,25 м. и.	0	1,400	0	0	5,753	4,916	-0,837	0	0	0	0	0	0,163	
	-1,25 √1/4	-0,985	-0,006	0,009	2,726	3,730	1,005	0,003	0,134	0,038				
	-1,25 √1/2	-0,931	-0,008	0,007	2,662	3,766	1,104	-0,034	0,221	0,260				
	-1,25 √3/4	1,039	0,011	-0,025	5,487	3,538	-1,949	-0,028	0,351	0,385				
	-1,25 3	3,743	0,046	-0,149	10,433	-0,055	-10,488	0,037	0,597	0,446				

Характеристика объектива	Точка вне оси							
	y'	s_P	s'_P	$(y'_F - y'_C)/y'_D, \%$	z'_m	z'_s	$z'_s - z'_m$	$(y' - y'_0)/y'_0, \%$
$10 \times 0,22$	0		2,642	0,33	0	0	0	0
	8,642	∞	-1,443	0,31	-0,154	-0,588	-0,434	0,310
	12,385		-2,488	0,30	-0,117	-1,121	-1,004	0,637
$25 \times 0,55$	0		-5,53	1,20	1,000	1,000	0,000	0,0
	6,286	∞	-5,50	1,22	0,837	0,492	-0,345	0,4
	12,750		-5,50	1,23	0,317	-0,990	-1,307	1,8
$40 \times 0,65$	0		-7,792	1,092	0	0	0	0,0
	6,267	∞	-7,792	1,102	-0,262	-0,543	-0,281	0,351
	12,670		-7,792	1,133	-1,178	-2,199	-1,021	1,439
$63 \times 0,85$	0		-5,937	1,114	0	0	0	0
	6,299	∞	-5,346	1,137	0,648	0,180	-0,468	0,342
	12,730		-5,299	1,163	2,561	0,704	-1,857	1,401
$100 \times$ $\times 1,25$ м. и.	0		-6,758	1,270	1,400	1,400	0,000	0,000
	4,958	∞	-6,734	1,275	3,000	0,610	-2,390	0,287
	10,004		-6,664	1,293	7,754	-1,866	-9,620	1,168

телеобъектива целесообразно выбрать увеличение мениска и его толщину. Аберрационные свойства менисков в зависимости от этих параметров рассмотрены в гл. II.

Первый элемент компенсационной системы работает при относительном отверстии $A_I \approx 1 : 2,5$. Если реализовать его конструкцию в виде трехлинзового склеенного компонента, то сферическая аберрация оказывается недоисправленной. Второй элемент имеет $A_{II} = 1 : 5 \div 1 : 7,5$, при этом в основном он производит коррекцию для компенсации аберраций осевой точки предмета остальных элементов объектива. В этих условиях его конструкция должна содержать по крайней мере два склеенных компонента.

Следует отметить, что оптимизация аберраций всего объектива с помощью ЭВМ по программе автоматизированной коррекции оптических систем не изменяет существенным образом соотношение между заданными параметрами отдельных элементов объектива.

В табл. 3.4 представлены результаты расчета объектива $100\times$ и всего комплекта планахроматических объективов, оптические конструкции которых построены по принципу синтеза оптических систем из базовых элементов.

11. ПЛАНАХРОМАТИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТИВЫ

Планахроматические объективы микроскопов принадлежат к классу оптических систем, обладающих наиболее совершенным качеством изображения. Их оптические характеристики близки к предельным. Числовые апертуры достигают значений: $A = 1,3$ для увеличения $100\times$ и $A = 1,4$ для увеличения $63\times$. Качество изображения соответствует дифракционному в спектральном интервале от линии g до линии C по всему полю зрения $2y' = 28$ мм. Конструкция объективов чрезвычайно сложна, оптические силы линз компенсационной системы превышают соответствующие значения в планахроматических объективах. Условия исправления хроматических аберраций в пределах допусков, установленных для ахроматов, обуславливают необходимость применения лангкронов вместо обычных кронов уже в конструкции планахроматических объективов. Действительно, если рассматривать принципиальную схему планахромата как синтез фронтальной и компенсационной систем и мениска конечной толщины, то второй элемент компенсационной системы и мениск образуют конструкцию телеобъектива, вторичный спектр которого, как известно [69], в φ_1 раз больше соответствующих значений тонкой системы (φ_1 — оптическая сила первого компонента телеобъектива), имеющей равное с ним фокусное расстояние. Таким образом, применение сильного лангкрона ФФС2 в компенсационной системе планахроматического объектива $100\times \times 1,25$ позволило исправить его остаточную хроматическую аберрацию положения до значений, присущих ахромату $90\times \times 1,25$. Дальнейшее уменьшение вторичного спектра планахромата $100\times \times 1,25$ возможно лишь в результате замены обычных флинтгов на курцфлинты, что безусловно потребует

увеличения оптических сил линз, а следовательно, усложнения конструкции компонентов.

Вопрос о предпочтительности выбора трехлинзовых компонентов перед двухлинзовыми и одиночными при построении компенсационной системы объектива целесообразно решать после сравнительной оценки технологичности различных вариантов систем.

Таким образом, дальнейшее повышение оптических характеристик планахроматического объектива, имеющего увеличение $100\times$ и числовую апертуру в среде иммерсии $A = 1,25$, приводит к конструкции планапохромата $100 \times 1,25$ (см. рис. 2.5), методика расчета которого на основе теории аберраций третьего порядка из

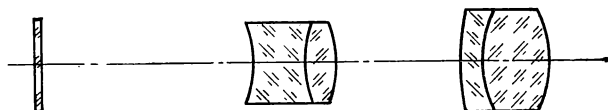


Рис. 3.12. Планапохроматический объектив $2,5 \times 0,08$

ложена в работе [51]. Числовая апертура объектива несколько уступает соответствующему значению серийного апохромата $90 \times 1,3$ м. и. Вместе с тем конструкция объектива чрезвычайно сложна и ее принципиальное упрощение едва ли представляется возможным без разработки новых оптических стекол.

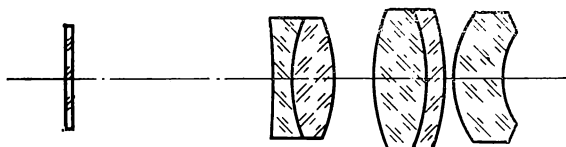


Рис. 3.13. Планапохроматический объектив $6,3 \times 0,20$

В работе [49] в результате анализа соотношений для определения оптических сил линз тонкого апохроматического объектива из стекол двух марок получен весьма важный вывод о целесообразности с точки зрения уменьшения этих сил разработки сильных курцфлинтов при возможно малом значении их коэффициента дисперсии. Введение в практику стекол с подобными свойствами позволит оптимизировать конструкции высокоапертурных планапохроматических объективов микроскопов. Однако, если разработка рациональных схемных решений высокоапертурных планапохроматов сдерживается отсутствием сильных курцфлинтов с малыми значениями коэффициентов дисперсии, то метод синтеза оптических систем из базовых элементов позволяет создать оптимальные конструкции планапохроматических объективов малых и средних увеличений. На рис. 3.12—3.13 показаны оптические схемы новых планапохроматов $2,5 \times 0,08$ и $6,3 \times 0,20$, скорректированных в пределах линейного поля зрения в пространстве изображений $2y' = 25$ мм. Конструкция объектива $2,5 \times 0,08$ построена по двухкомпонентной схеме и значительно упрощена по сравнению с серийным планахроматом

Характеристика объекта	sin σ	Точка на оси															
		D		C	F	g		F-C	g-F	D	C	F	g				
		Δs'	Δy'			η, %	Δs'										
														Волновая аберрация N _λ			
2,5× ×0,08	0	0,138	0	0	0,391	-0,207	-0,422	-0,598	0,215	0,0	0,0	-0,0	-0,0				
	-0,08 √ 1/4	-0,410	-0,0064	0,017	-0,243	-0,536	-0,577	-0,293	-0,041	-0,036	0,008	-0,085	-0,010				
	-0,08 √ 1/2	-0,430	-0,0094	0,036	-0,360	-0,310	-0,151	0,049	0,159	-0,129	-0,061	-0,181	-0,192				
	-0,08 √ 3/4	0,230	0,0061	0,054	0,188	0,637	1,034	0,449	0,397	-0,161	-0,094	-0,159	-0,115				
	-0,08	1,796	0,0548	0,070	1,618	2,554	3,238	0,936	0,684	0,029	0,074	0,143	0,295				
6,3× ×0,2	0	0	0	0	0,135	0,053	0,593	-0,082	0,540	0,0	0,0	0,0	0,0				
	-0,2 √ 1/4	0,003	0,0001	0,007	0,124	0,104	0,690	-0,020	0,586	0,001	0,021	0,017	0,136				
	-0,2 √ 1/2	0,079	0,0018	0,017	0,197	0,161	0,748	-0,036	0,586	0,011	0,061	0,055	0,294				
	-0,2 √ 3/4	-0,026	-0,0007	0,035	0,142	-0,047	0,447	-0,189	0,494	0,041	0,120	0,075	0,442				
	-0,2	-0,805	-0,0257	0,074	-0,536	-1,099	-0,830	-0,563	0,269	-0,032	0,097	-0,015	0,413				
Характеристика объекта	SIV	Точка вне оси															
		y'	sP	sP'	(y' _F -y' _C)/y' _D , %		z' _m	z' _s	z' _s -z' _m	(y' _D -y' ₀)/y' _D , %							
					y'	sP				sP'	(y' _F -y' _C)/y' _D , %		z' _m	z' _s	z' _s -z' _m	(y' _D -y' ₀)/y' _D , %	
											(y' _F -y' _C)/y' _D , %					(y' _D -y' ₀)/y' _D , %	
2,5× ×0,08	-0,00035	0	27,886	1,308	0,177	0,138	0,138	0,138	0	0	0	0	0				
		6,424	27,716	1,139	0,187	-0,092	0,061	0,061	0,153	-0,617	-0,617						
		12,605	27,293	0,950	0,190	-0,075	0,015	0,015	0,090	-2,491	-2,491						
6,3× ×0,2	0,0198	0	58,845	3,806	0,019	0	0	0	0	0	0	0					
		6,251	54,522	3,103	0,017	0,096	-0,228	-0,228	-0,324	0,097	0,097						
		12,538	54,553	3,082	0,012	0,459	-0,889	-0,889	-1,348	0,390	0,390						

того же увеличения (см. рис. 3.4). Кроме того, числовая апертура увеличена в 1,6 раза, вторичный спектр не превышает $0,3\lambda$ по всему спектральному интервалу от линии g до линии C . Объектив рассчитан на базе нового фторфосфатного стекла ФФС2 и не содержит флюорита. Это обстоятельство позволяет использовать планапохромат $2,5 \times 0,08$, а также другие объективы, разработанные на базе ФФС2, в поляризационных микроскопах, оптика которых не должна иметь собственных натяжений. Результаты абберрационного расчета объективов $2,5 \times 0,08$, $6,3 \times 0,20$ приведены в табл. 3.5.

Исходя из принципов построения объективов проходящего света, направленных на создание оптимальных конструкций и достижение максимально возможных оптических характеристик, отметим очевидное достоинство нового комплекта: снижение остаточного хроматизма увеличения до 1 % в планобъективах с увеличениями от $25\times$ до $100\times$ включительно и до 0 % в объективах малых увеличений. Можно ожидать, что с появлением сильных курцфлинтов хроматизм увеличения в высокоапертурных объективах будет исправлен полностью. Это позволит упростить конструкцию сложных компенсационных окуляров, а также гомалей и других проекционных систем, применяемых в комплекте с серийно выпускаемыми планахроматическими и планапохроматическими объективами.

12. РАСЧЕТ РЕФЛЕКСОВ В ОБЪЕКТИВАХ ОТРАЖЕННОГО СВЕТА

Значительную область исследования в микроскопии составляют непрозрачные объекты, изучение свойств которых оказывается возможным в результате отражения света от их поверхностей. К таким объектам относятся минералы, руды, металлы, сплавы, а также некоторые биологические препараты. Освещение объекта в микроскопах отраженного света осуществляется через объектив, который при этом играет роль конденсора.

Исследованиями установлено [13], что существенное влияние на качество изображения непрозрачных объектов оказывает рассеянный свет, образующийся в результате отражения светового потока от рабочих поверхностей линз объектива. Отдельные составляющие этого отраженного светового потока, называемые рефлексам первого порядка, могут создавать значительную освещенность засветки поля наблюдения, снижая тем самым контраст изображения объекта. Так, если на объекте имеются два элемента с коэффициентами отражения R_1 и R_2 , причем $R_2 < R_1$, то освещенность изображения этих элементов составит соответственно $E_1 = mR_1$, $E_2 = mR_2$, где $m = \text{const}$. Контраст в идеальном изображении определится равенством

$$k = (E_1 - E_2)/(E_1 + E_2) = (R_1 - R_2)/(R_1 + R_2).$$

Если освещенность, создаваемая засветкой, постоянна по полю зрения и равна E_p , тогда освещенность изображения элементов объекта возрастает на E_p и контраст в изображении станет равным

$$k_p = (E_1 - E_2)/(E_1 + E_2 + 2E_p).$$

Введем понятие коэффициента потери контраста $e = (k - k_p)/k$. После преобразований получим $e = 2E_p/(E_1 + E_2 + 2E_p)$. Для большинства случаев, представляющих практический интерес, можно принять $2E_p \ll E_1 + E_2$, тогда $e \approx 2E_p/(E_1 + E_2)$. Очевидно, что

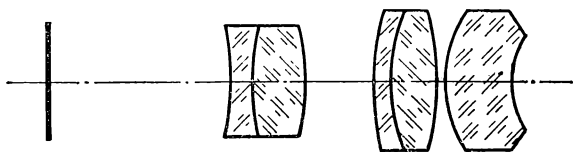


Рис. 3.14. Планахроматический объектив отраженного света с тубусом ∞ , $f' = 24,8$; $A = 0,20$; $k = 0,08$ %

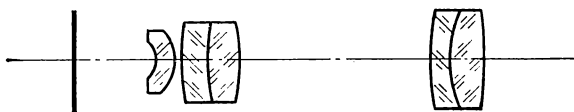


Рис. 3.15. Планахроматический объектив отраженного света с тубусом ∞ , $f' = 25,0$; $A = 0,20$; $k = 2,67$ %

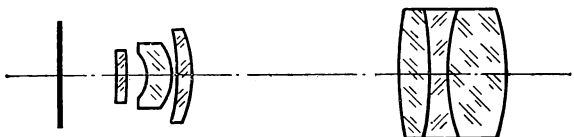


Рис. 3.16. Планахроматический объектив отраженного света с тубусом ∞ , $f' = 25,0$; $A = 0,25$; $k = 0,60$ %

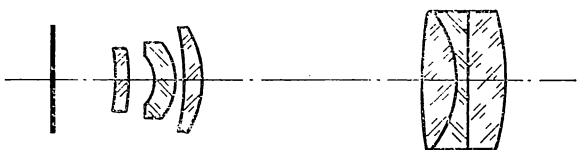


Рис. 3.17. Планахроматический объектив отраженного света с тубусом ∞ , $f' = 25,0$; $A = 0,25$; $k = 1,08$ %

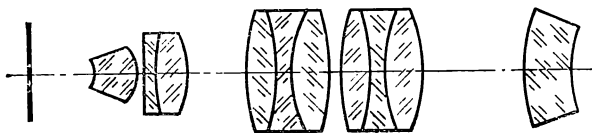


Рис. 3.18. Планахроматический объектив отраженного света с тубусом ∞ , $f' = 6,3$; $A = 0,65$; $k = 0,17$ %

наибольшего значения $e_{\max} = 2E_p/E_1$ этот коэффициент достигает, когда $E_2 \rightarrow 0$, т. е. когда на объекте имеются слабоотражающие элементы.

Таким образом, для характеристики потери контраста, обусловленной рефлексами первого порядка, необходимо знать отношение освещенности засветки к освещенности основного изображения.

Последняя, как известно, для объективов отраженного света определяется выражением

$$E_1 = \pi B \tau^2 \sin^2 \sigma',$$

где B — яркость источника; τ — пропускание объектива; $\sin \sigma'$ — его задний апертурный угол.

Для нахождения освещенности засветки А. П. Грамматиным [13] было предложено рассматривать действие оптической системы, включающей в себя апертурную и полевую диафрагмы осветителя, отражающую поверхность объектива и его часть, заключенную между осветителем, отражающей поверхностью и плоскостью изображения объекта. Построенные этой системой рефлексные изображения апертурной и полевой диафрагм, а также материальная диафрагма-оправа последней поверхности объектива формируют световую трубку отраженного потока, создающего засветку изображения. Очевидно, что освещенность засветки определится диаметром одной из этих диафрагм, видимой под наименьшим углом из осевой точки изображения:

$$E_p = \pi B \tau_p^2 \sin^2 \sigma'_p,$$

где τ_p — коэффициент пропускания части объектива, заключенной между отражающей и последней поверхностями; $\sin \sigma'_p$ — апертурный угол засветки.

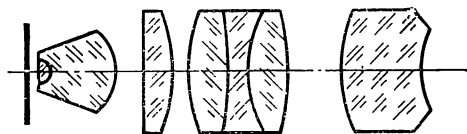


Рис. 3.19. Планахроматический иммерсионный объектив отраженного света с тубусом ∞ , $f' = 6,3$; $A = 0,65$ м. и.; $k = 0,05$

Для расчета освещенности засветки, создаваемой рефlekсами первого порядка, разработана специальная программа для ЭВМ, предусматривающая расчет первого и второго параксиальных лучей от апертурной и полевой диафрагм осветителя. С помощью этой программы удалось выполнить анализ освещенности засветки в объективах отраженного света, входящих в комплекты металлографических и поляризационных микроскопов, выпускаемых отечественной промышленностью. Оптические схемы объективов, имеющих планахроматическую коррекцию aberrаций, изображены на рис. 3.14—3.19. Результаты расчетов коэффициентов засветки k — отношения освещенности засветки к освещенности основного изображения — приведены для каждого объектива под соответствующим рисунком в варианте просветленной оптики.

Анализ значений k позволяет сделать следующие выводы.

1. Коэффициент засветки в объективах отраженного света изменяется в достаточно широких пределах, принимая в некоторых случаях недопустимо большие значения.

2. Коэффициенты засветки объективов больших увеличений, несмотря на усложнение оптической конструкции и увеличение числа линз, меньше соответствующих значений объективов малых увеличений.

3. Объективы, имеющие практически одинаковые оптические характеристики, могут существенно отличаться по величине коэффи-

циента засветки. При этом объективы могут иметь один тип оптической конструкции.

4. Влияние просветления оптики на коэффициент засветки оказывается различным в объективах, отличающихся по оптической конструкции и характеристикам.

13. ОПТИМИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ОБЪЕКТИВОВ С УМЕНЬШЕННОЙ ВУАЛИРУЮЩЕЙ ЗАСВЕТКОЙ

Анализ результатов расчета освещенности засветки в объективах, имеющих равные фокусные расстояния и числовые апертуры, но отличающихся по своей оптической схеме, позволяет сделать весьма

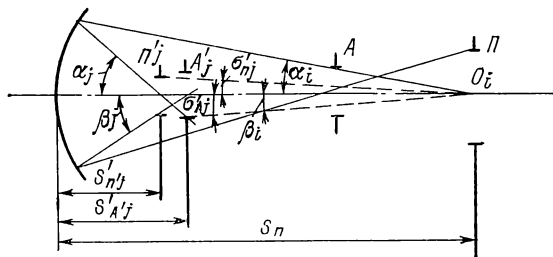


Рис. 3.20. Ход лучей, отраженных от произвольной поверхности объектива

важный вывод о том, что существует определенная зависимость между конструктивными параметрами объективов и их коэффициентом засветки. Следовательно, должна существовать принципиальная возможность создания объективов отраженного света с уменьшенной вуалирующей засветкой. Над решением этой проблемы работают в настоящее время советские и зарубежные оптоотехники [3, 81].

В работе [3] получены простые и удобные соотношения, позволяющие при расчете первого и второго параксиальных лучей выполнять анализ коэффициентов засветки в отдельных элементах объективов отраженного света. Рассмотрим ход лучей, отраженных от произвольной поверхности объектива (рис. 3.20). Пусть A и P — изображения апертурной и полевой диафрагм осветителя, построенные предыдущей частью объектива; A_j' , P_j' — их изображения, построенные исследуемой отражающей поверхностью; α_i , β_i , α_j , β_j — углы первого и второго параксиальных лучей до и после отражающей поверхности соответственно.

Очевидно, что

$$\alpha_j = (2/r_i - \alpha_i/h_i)h_i; \quad \beta_j = (2/r_i - \beta_i/H_i)H_i, \quad (3.5)$$

где h_i , H_i — высоты параксиальных лучей на отражающей поверхности радиуса r_i .

Найдем значения углов σ_{A_j}' , σ_{P_j}' , под которыми видны рефлексные изображения диафрагм из точки O_i , совпадающей с центром изобра-

жения полевой диафрагмы осветителя и сопряженной с осевой точкой изображения:

$$\begin{aligned}\sigma'_{Aj} &= \alpha_j (s'_{\Pi'j} - s'_{A'j}) / (s'_{A'j} - s_{\Pi}); \\ \sigma'_{\Pi j} &= \beta_j (s'_{\Pi'j} - s'_{A'j}) / (s'_{\Pi'j} - s_{\Pi}),\end{aligned}\quad (3.6)$$

где s_{Π} , $s'_{A'j}$, $s'_{\Pi'j}$ — расстояния от отражающей поверхности до изображения полевой диафрагмы Π и до рефлексных изображений диафрагм A'_j и Π'_j соответственно.

Найдем далее коэффициент засветки, создаваемой отраженным световым потоком в точке O_i . В зависимости от того, какая из диафрагм определит собой апертуру засветки, он будет равен:

$$k_p = \sum k_i = \begin{cases} \sum \frac{\tau_{pi}}{\tau_{об}^2} \left(\frac{\sigma'_{Aj}}{\alpha_i} \right)^2; \\ \sum \frac{\tau_{pi}}{\tau_{об}^2} \left(\frac{\sigma'_{\Pi j}}{\alpha_i} \right)^2, \end{cases}$$

где k_{pi} — коэффициент засветки, созданной i -й поверхностью.

Удобно представить k_{pi} в виде произведения:

$$\bar{k}_{pi} = \begin{cases} k_{\alpha i} \tau_{pi} / \tau_{об}^2, & k_{\alpha i} < k_{\beta i}; \\ k_{\beta i} \tau_{pi} / \tau_{об}^2, & k_{\beta i} < k_{\alpha i}, \end{cases}$$

где $\tau_{pi} / \tau_{об}^2$ — относительное пропускание рефлексной системы, зависящее в основном от типа просветляющего покрытия. Таким образом,

$$k_{\alpha i} = (\sigma'_{Aj} / \alpha_i)^2; \quad k_{\beta i} = (\sigma'_{\Pi j} / \alpha_i)^2.$$

В результате подстановки в последние соотношения значений σ'_{Aj} , $\sigma'_{\Pi j}$ и несложных преобразований получаем:

$$\begin{aligned}k_{\alpha i} &= \left[\frac{r_i (H_i \alpha_i - h_i \beta_i)}{r_i (H_i \alpha_i + h_i \beta_i) - 2h_i H_i} \right]^2; \\ k_{\beta i} &= \left[\frac{r_i (H_i \alpha_i - h_i \beta_i)}{2h_i (r_i \alpha_i - h_i)} \right]^2.\end{aligned}\quad (3.7)$$

Таким образом, для определения коэффициента засветки достаточно произвести расчет двух параксиальных лучей через оптический элемент в прямом или обратном ходе. При этом коэффициенты $k_{\alpha i}$, $k_{\beta i}$ сохраняют свое значение независимо от пространства, в котором производится расчет рефлексов первого порядка.

Следует, однако, заметить, что коэффициент $k_{\beta i}$ (в отличие от $k_{\alpha i}$) зависит от условия нормировки, принятой при расчете второго параксиального луча; так, в выражении (3.7) имеется в виду, что $\beta_1 = D_{\Pi} / 2 (s_A - s_P)$, где D_{Π} — диаметр полевой диафрагмы осветителя или ее изображения; s_A , s_P — расстояния до полевой и апертурной диафрагм или их изображений от первой поверхности объектива.

Иногда удобно использовать значения углов и высот параксиальных лучей при обычных условиях нормировки: $\alpha_1 = 0$; $\alpha' = 0$; $\beta_1 = 0$; $\beta' = -1$; $y_1 = -f'_{об} \beta' n_1 / n' = -1$ при $n' = n_1 = 1$; $f'_{об} = 1$,

где f'_{06} — фокусное расстояние объектива. В этом случае коэффициент $k_{\beta i}$ принимает вид

$$k_{\beta i} = \left[\frac{r_i (H_i \alpha_i - h_i \beta_i)}{2h_i (r_i \alpha_i - h_i)} \right]^2 \left[\frac{y_{06}}{f'_{06} \sigma_{06}} \right]^2, \quad (3.8)$$

где σ_{06} — передний апертурный угол объектива; y_{06} — половина поля зрения объектива.

На основе выведенных соотношений в работе [3] выполнен анализ основных типов поверхностей, используемых при построении оптических конструкций объективов микроскопов, имеющих умеренные увеличения ($v_{06} \leq 15\times$). Для трех типов апланатических поверхностей получены следующие выводы.

1. $s_1 = 0$; $s' = 0$; $h = 0$. Рефлексное изображение полевой диафрагмы совпадает с плоскостью изображения: $k_\alpha = 1$; $k_\beta = \infty$.

2. $s_1 = r(n + n')/n$; $s' = r(n + n')/n'$. Выразив радиус апланатической поверхности r через угол первого параксиального луча α и его высоту на поверхности h и подставив найденное выражение в (3.7), получаем:

$$k_\alpha = 1/(1 - 2H\alpha n')^2; \quad k_\beta = (1/2h\alpha n')^2 (y_{06}/f'_{06} \tau_{06}).$$

3. $s_1 = r$; $s' = r$, высота первого параксиального луча на поверхности $h = \alpha r$; $k_\alpha = 1$; $k_\beta = \infty$.

Коэффициент засветки при отражении от апланатических поверхностей первого и третьего типов численно равен относительному пропусканию рефлексной системы и не зависит от апертуры объектива. Для поверхности второго типа коэффициент засветки значительно меньше относительного пропускания рефлексной системы. Следовательно, применение в объективах отраженного света апланатических поверхностей второго типа перспективно.

Найдем величину засветки, обусловленной фронтальной поверхностью произвольного радиуса. При телецентрическом ходе луча в пространстве предметов

$$\beta_1 = 0; \quad H_1 = y_1 = -1; \quad k_\alpha = [r/(r - 2s_1)]^2;$$

$$k_\beta = [r/2h_1(r - s_1)]^2 (y_{06}/f'_{06} \tau_{06})^2.$$

Если потребовать, чтобы при уменьшении апертуры осветителя коэффициент засветки не превосходил, по крайней мере, относительного пропускания рефлексной системы, то необходимо иметь $k_\alpha \leq 1$. При решении соответствующего неравенства получаем $r \geq s_1$; $s_1 \leq 0$, т. е. при отрицательном первом отрезке фронтальный радиус должен быть либо выпуклым, либо вогнутым, но меньшим в последнем случае по абсолютной величине рабочего расстояния.

Исследование характеристик отдельных поверхностей оптических систем в отношении создаваемой ими засветки изображения позволяет выбрать определенные типы поверхностей, пригодные для создания объективов с повышенным контрастом изображения. Опти-

Точки на оси (абберации представлены в обратном ходе лучей)													
Фокусное расстояние f' , числовая апертура A	$m_{зр}$, мм	D		η , %	C	F		$s'_F - s'_C$	D	C	F		S_{IV}
		$\Delta s'$	$\Delta y'$			$\Delta s'$	Волновая aberrация N_λ						
$f' = 50,0$ мм $A = 0,10$	0	0	0	0	0,041	—0,004	—0,045	0	0	0	0	0	—0,0018
	$5 \sqrt{1/4}$	—0,009	0	0,001	0,028	0,001	—0,027	—0,011	0,073	—0,005			
	$5 \sqrt{1/2}$	—0,010	—0,001	0	0,021	0,014	—0,007	—0,032	0,122	0,009			
	$5 \sqrt{3/4}$	—0,004	0	—0,003	0,022	0,035	0,013	—0,047	0,170	0,063			
	5	0,011	0,001	—0,010	0,032	0,067	0,035	—0,040	0,227	0,168			
$f' = 25,0$ мм $A = 0,25$	0	0,011	0	0	0,019	0,006	—0,013	0	0	0	0	0	0,0178
	$6,25 \sqrt{1/4}$	—0,002	—0,0003	—0,043	0,004	—0,002	—0,006	0,052	0,141	0,016			
	$6,25 \sqrt{1/2}$	—0,006	—0,0011	—0,054	—0,003	—0,001	0,002	—0,018	0,138	—0,019			
	$6,25 \sqrt{3/4}$	—0,001	—0,0001	—0,026	0,001	0,011	0,010	—0,017	0,123	0,040			
	6,25	0,018	0,0046	0,050	0,017	0,036	0,019	0,008	0,224	0,327			
$f' = 15,69$ мм $A = 0,35$	0	0,006	0	0	0,010	0,005	—0,005	0	0	0	0	0	0,0394
	$5,49 \sqrt{1/4}$	—0,001	—0,0001	0,012	0,003	0,000	—0,003	0,067	0,156	0,067			
	$5,49 \sqrt{1/2}$	—0,003	—0,0008	0,013	—0,001	—0,001	0,000	0,008	0,171	0,041			
	$5,49 \sqrt{3/4}$	—0,001	—0,0002	0,001	0,001	0,003	0,002	—0,055	0,164	0,059			
	5,49	0,008	0,0029	—0,025	0,009	0,013	0,004	0,025	0,286	0,274			

Фокусное расстояние f' , числовая апертура A	Точка вне оси (абerrации представлены в обратном ходе лучей)							
	y_D'	s_P	s_P'	$\frac{y' - y_0'}{y_0'}, \%$	z_m'	z_s'	$z_s' - z_m'$	$\frac{y_F' - y_C'}{y_D'}, \%$
$f' = 50,0$ мм $A = 0,10$	0	0	-8,55	0	0	0	0	0,16
	0,895	0	-8,34	0,044	-0,015	-0,005	0,010	0,16
	1,793	0	-8,31	0,177	-0,061	-0,018	0,043	0,16
$f' = 25,0$ мм $A = 0,25$	0	-5,960	∞	0	0,011	0,011	0	-0,124
	0,707	24,747	-12,602	-0,0047	0,010	0,007	-0,003	-0,062
	1,001	25,609	-11,972	0,0442	0,009	0,004	-0,005	-0,061
$f' = 15,69$ $A = 0,35$	0	-1,915		0	0,006	0,006	0	-0,243
	0,444	-1,915	∞	-0,034	0,005	0,003	-0,002	-0,243
	0,628	-1,915		-0,068	0,003	0,000	-0,003	-0,244

ческие схемы объективов отраженного света небольших увеличений, разработанные А. Г. Арлиевским на основе теоретических исследований, изображены на рис. 3.21—3.23. Результаты аберрационной коррекции приведены в табл. 3.6. Коэффициент засветки указан для просветленной оптики объективов при коэффициенте отражения ее объекта 100 %.

Создание подобных объективов позволит существенно улучшить качество изображения микроскопов отраженного света и повысить точность измерения коэффициентов отражения.

Полученные соотношения позволяют выполнить анализ основных типов поверхностей, используемых при построении объективов микроскопов, и выбрать комбинации, пригодные для создания объективов с повышенным контрастом изображения.

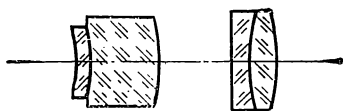


Рис. 3.21. Планахроматический объектив отраженного света с тубусом ∞ , $f' = 50$; $A = 0,1$; $k = 0,16$ %

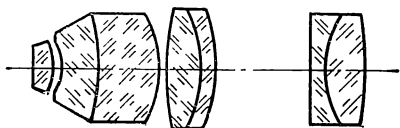


Рис. 3.22. Планахроматический объектив отраженного света с тубусом ∞ , $f' = 15,7$; $A = 0,35$; $k = 0,36$ %

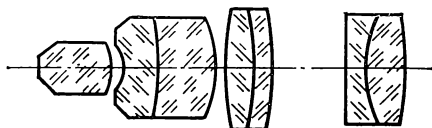


Рис. 3.23. Планахроматический иммерсионный объектив отраженного света с тубусом ∞ , $f' = 15,7$; $A = 0,35$ м. и.; $k = 0,26$ %

Однако оптимизация схемных решений объективов отраженного света не исключает необходимость разработки эффективных просветляющих покрытий.

14. РАСЧЕТ ДОПУСКОВ НА ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ОБЪЕКТИВОВ

Разработка любой оптической системы должна заканчиваться анализом влияния технологически приемлемых отклонений от номинальных значений конструктивных элементов (радиусов кривизны, толщин линз, воздушных промежутков, показателей преломления и т. д.) на оптические характеристики системы и назначением допусков на изготовление этих элементов. Если для достижения габаритных размеров и требуемого качества изображения допуски на конструктивные элементы оказываются невыполнимыми в условиях серийного производства, оптическая система может быть признана нетехнологичной.

Объективы микроскопов и особенно высокоапертурные планакроматы и планопохроматы относятся к классу оптических систем, обладающих исключительно высокой чувствительностью к погрешностям изготовления. Для обеспечения возможностей их серийного выпуска в настоящее время применяется технология сборки и юстировки, основные положения которой были сформулированы еще

Аббе применительно к изготовлению ахроматических и апохроматических объективов. Согласно этим положениям, слабые объективы изготавливаются и собираются с максимально возможной точностью; в сильных объективах остается регулируемым один из воздушных промежутков, с помощью которого компенсируются остаточные технологические aberrации. Кроме того, чтобы исключить влияние ошибок пробных стекол и отклонений от номинальных значений показателей преломления оптических материалов, на стадии подготовки производства выполняется дополнительный перерасчет высокоапертурных объективов микроскопов применительно к константам оптического стекла и радиусам пробных стекол.

Чувствительность оптических систем к погрешностям изготовления в настоящее время исследуется с помощью ЭВМ. В результате расчета выдаются следующие данные об оптической системе: изменение функций (последнего отрезка, увеличения, aberrации) при последовательном изменении каждого параметра системы; максимальные интервалы суммарных изменений функций при заданных допусках; доверительные интервалы суммарных изменений функций с вероятностью 99,73 % [16].

Для анализа объективов микроскопов удобна программа (разработанная ранее для ЭВМ БЭСМ-4), позволяющая вычислять приращение функций при условии постоянства последнего отрезка s'_{06} , изменение которого компенсируется соответствующим изменением рабочего расстояния системы.

Требованию $s'_{06} = \text{const}$ соответствуют реальные условия работы объективов микроскопов, длина тубуса которых стандартизована, а процесс сборки и юстировки направлен на достижение наилучшего качества изображения для заданного (стандартизованного) положения плоскости изображения. Очевидно, что допуски на конструктивные элементы с низкой чувствительностью к погрешностям изготовления, могут быть соответствующим образом расширены.

Рассмотрим влияние погрешностей изготовления оптических элементов на aberrации планахроматического объектива, имеющего увеличение $v = -100\times$ и числовую апертуру $A = 1,25$.

В табл. 3.7 приведены изменения продольной и волновой сферической aberrации для максимальной числовой апертуры и зоны $n \sin \sigma = 1,25 \sqrt{1/2}$, величины η на краю зрачка, хроматических aberrаций для параксиальной области и $n \sin \sigma = 1,25$, а также приращения меридиональной и сагиттальной кривизны z'_m , z'_s , вызванные погрешностью изготовления радиусов кривизны поверхностей. В табл. 3.8 даны соответствующие изменения aberrаций, обусловленные ошибкой толщин линз и воздушных промежутков $\Delta d_i = 0,01$ мм. Влияние показателей преломления оптических материалов не рассматривается ввиду перерасчета объектива применительно к фактическим значениям параметров стекол.

Анализ данных таблицы показывает, что объектив весьма чувствителен к погрешностям изготовления толщин линз и воздушных промежутков. Максимальной чувствительностью обладает фронталь-

Таблица 3.7

Число колец m	$\delta \left(\Delta s' / \sqrt{l} \right)$	$\delta_N \sqrt{l}$	$\delta \left(\Delta s' / \sqrt{l^2} \right)$	$\delta_N \sqrt{l^2}$	$\delta \eta \sqrt{l}$	$\delta \left(\Delta s'_{FC} \right)_0$	$\delta \left(\Delta s'_{FC} \right) \sqrt{l}$	$\delta z'_m$	$\delta z'_s$
1	0,342	0,013	0,095	0,003	0,004	0,020	—0,001	0,019	—0,001
1	—1,406	—0,061	—0,373	—0,012	0,007	—0,070	—0,048	—0,018	—0,011
1	—0,714	—0,022	—0,122	—0,003	0,018	0,040	0,029	—0,028	—0,005
3	0,075	0,003	0,024	0,000	0,000	—0,030	—0,096	0,000	0,000
1	0,971	0,029	0,195	0,006	—0,017	—0,007	—0,016	0,026	0,006
2	—0,748	—0,017	—0,065	—0,002	0,028	—0,015	—0,155	—0,035	0,008
1	—0,477	—0,002	—0,110	—0,003	0,007	0,050	0,060	0,010	—0,003
2	0,497	0,011	0,039	0,000	—0,020	0,094	0,037	0,022	0,006
1	0,715	0,022	0,146	0,004	—0,012	0,029	0,057	0,019	0,006
1	—1,039	—0,043	—0,268	—0,008	0,012	—0,029	0,013	—0,016	—0,005
2	0,600	—0,019	—0,101	—0,003	0,014	0,052	0,027	—0,018	0,006
1	1,322	0,061	0,427	0,013	—0,018	0,009	—0,064	0,028	0,009
1	—0,941	—0,038	—0,303	—0,007	0,303	—0,035	—0,004	0,013	—0,004
3	—0,227	0,003	0,071	0,003	0,027	0,064	—0,071	0,017	—0,005
1	1,297	0,048	0,323	0,010	—0,018	0,010	—0,041	0,020	0,007
1	—1,166	—0,047	—0,291	—0,009	0,020	0,041	0,105	—0,014	0,007
2	—0,175	—0,009	—0,068	—0,002	—0,012	—0,050	—0,053	—0,008	—0,002
1	0,902	0,031	0,208	0,006	—0,021	—0,008	—0,037	—0,035	0,006

ная система объектива, в которой при изменении на $\Delta d_i = 0,01$ мм, т. е. на величину, предельно достижимую в серийном производстве, возникает волновая сферическая абберация на краю апертуры, превышающая допуск Марешаля. Следовательно, для компенсации технологических аббераций объектива необходима регулировка одного из воздушных промежутков, например, расстояния d_3 между фронтальной линзой и фронтальным мениском.

Найдем среднеквадратичное отклонение волновой абберации $\sqrt{\sum_{i=1}^m \delta N_i^2}$, обусловленное допусками на подgonку под пробное стекло m , толщины линз и воздушные промежутки Δd_i (за исключением Δd_3). Для края зрачка оно равно приблизительно $0,38\lambda$; необходимое компенсационное изменение воздушного промежутка $\Delta d_3 \approx 0,02$ мм; при этом на зоне зрачка $n \sin \sigma = 1,25 \sqrt{1/2}$ наблюдается практически полная компенсация среднеквадратичной ошибки $\sqrt{\sum_{i=1}^m \delta N_i^2}$.

Суммарные приращения остальных функций от погрешностей выполнения параметров, в том числе от изменения Δd_3 , не превышают 10 % от исходных величин. Таким образом, в результате изготовления объектива состояние его оптической коррекции практически не изменится.

Существенное влияние на качество изображения объективов микроскопов оказывает кома на оси, вызванная децентрировкой поверхностей и компонентов. Согласно условию Марешаля [21], допустима кома децентрировки определяется выражением

$$k_{\text{доп}} \leq 1,8\lambda/\sin \sigma', \quad (3.9)$$

где $\sin \sigma'$ — выходная числовая апертура системы. В работе [17] исследован вопрос о суммировании комы на оси в сложной оптической системе; показано, что суммарная кома децентрировки с вероятностью 99,73 % составляет $k_c = 1,153 \sqrt{\sum_{i=1}^m k_{i\text{max}}^2}$, где $k_{i\text{max}}$ —

наибольшее значение комы, возникающей при децентрировке поверхности с номером i на величину, равную допуску $\Delta c_{i\text{max}}$.

Исследование децентрировки в планхроматическом объективе $100 \times 1,25$ показало, что наибольшее влияние на осевую кому оказывают вторая, шестая и десятая поверхности объектива, а также последняя поверхность мениска. Если установить допуск на точность центрировки этих поверхностей $c_i = 0,005$ мм ($i = 2, 6, 10, 19$), а для остальных принять $c = 0,010$ мм, то суммарная кома децентрировки с вероятностью 99,73 будет равна $k_c \approx 0,090$, т. е. несколько превысит допустимую величину $k_{\text{доп}} = 0,085$ мм, определяемую по формуле (3.9). Дальнейшее уменьшение этой технологической абберации производят, ужесточая допуск на центрировку отдельных поверхностей объектива. Кроме того, при серийном выпуске микрообъективов применяется юстировочная операция — поперечное смещение одного из компонентов системы, с помощью

Таблица 3.8

Δd_i	$\delta(\Delta s'_{V\bar{1}})$	$\delta^N_{V\bar{1}}$	$\delta(\Delta s'_{V^{1/2}})$	$\delta^N_{V^{1/2}}$	$\delta\eta_{V\bar{1}}$	$\delta(\Delta s'_{FC})_0$	$\delta(\Delta s'_{FC})_{V\bar{1}}$	$\delta z'_m$	$\delta z'_s$
0,030	0,645	0,018	0,105	0,003	0,000	-0,366	-2,025	0,000	0,000
0,010	-2,898	-0,139	-0,854	-0,028	-0,048	-0,267	-0,527	0,090	0,012
0,010	7,748	0,192	1,838	0,052	-0,080	0,490	0,459	0,150	0,054
0,010	8,100	0,188	1,820	0,051	-0,105	0,375	0,367	0,168	0,054
0,010	8,146	0,183	1,837	0,052	-0,103	0,311	0,199	0,166	0,053
0,010	2,103	0,078	0,506	0,018	-0,014	0,227	0,135	0,038	0,016
0,010	0,930	0,040	0,296	0,010	0,000	0,113	0,019	0,020	0,008
0,010	0,854	0,037	0,269	0,009	-0,001	0,104	0,019	0,018	0,007
0,010	1,577	0,060	0,442	0,014	-0,011	0,087	-0,009	0,029	0,012
0,030	0,294	0,018	0,135	0,006	0,018	0,033	-0,048	0,018	0,006
0,030	-0,366	-0,024	-0,177	-0,006	-0,006	-0,057	0,051	0,027	0,006
0,050	0,060	0,005	0,035	0,000	0,005	-0,005	-0,005	0,030	0,006
0,030	-0,084	-0,009	-0,081	-0,003	-0,006	0,000	0,010	0,033	0,006
0,020	1,816	0,052	0,306	0,008	-0,044	0,050	0,172	0,058	0,012
0,020	2,214	0,044	0,290	0,010	-0,016	-0,118	0,106	0,032	0,006
0,030	0,966	0,036	0,525	0,006	-0,015	0,156	0,162	0,045	0,009
0,010	1,725	0,059	0,410	0,012	-0,017	0,036	-0,015	0,021	0,006
0,010	1,685	0,054	0,362	0,011	-0,044	-0,065	-0,138	0,018	0,006

которой удастся полностью устранить кому на оси для края зрачка. Остаточная кома децентрировки для других зон зрачка при этом, как правило, оказывается в пределах допустимой. Очевидно, что в качестве компенсационного предпочтительно выбирать компонент, имеющий одну влияющую поверхность.

15. ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ОБЪЕКТИВОВ МИКРОСКОПОВ

Анализ объективов микроскопов с различными типами коррекции аберраций показывает, что по мере повышения требований к качеству изображения, создаваемому этими системами, усложняется их конструкция. Это в свою очередь сопровождается необходимостью ужесточения допусков в системе, вызванного не только увеличением числа конструктивных элементов, но главным образом повышением их чувствительности к погрешностям изготовления. Учитывая возможности современного оптического производства, в том числе состояние методов и аппаратуры контроля, оптическую конструкцию объектива микроскопа целесообразно отнести к технологичной, если в результате ее изготовления по допускам серийного производства, а также последующей сборки и юстировки с применением существующих средств контроля выполняются требования, предъявляемые к характеристикам системы.

Вместе с тем, если классифицировать объективы микроскопов с точки зрения объема их выпуска, то ахроматические объективы следует отнести к изделиям серийного производства с четко выраженной тенденцией перехода к крупносерийному. Апохроматы и план-объективы в настоящее время относятся к элементам мелкосерийного выпуска; однако, растущие потребности в микроскопах, позволяющих не только визуально исследовать структуру объектов, но также фотографировать и осуществлять и микрокиносъемку, выдвигают планахроматические объективы микроскопов в класс изделий серийного производства.

Если принять систему допусков — $\Delta r_i/r_i = 0,01\%$; $m = 1$ кольцо, $\Delta d_i = 0,01$ мм — приемлемой для серийного изготовления элементов объективов, то основную трудоемкость их выпуска составит процесс контроля качества склеенных и закатанных в оправы компонентов, а также контроль точности их центрировки. К числу менее трудоемких способов, гарантирующих высокую точность и надежность результатов, относится метод контроля компонентов в положении наилучшей установки в проходящем свете. Теоретические положения этого метода были развиты в гл. I. Исследование компонентов в положении наилучшей установки позволяет в процессе одной и той же технологической операции (склеивания компонентов или закатки их в оправы) оценивать точность центрировки и наличие деформаций оптических поверхностей, искажающих структуру дифракционного изображения точечного тест-объекта.

К трудоемким методам контроля несомненно относится интерференционный, необходимость в котором обнаруживается при оценке

компонентов высокоапертурных апохроматов и планапохроматических объективов, не имеющих положения наилучшей установки. Эти же объективы требуют, как правило, исключительно высокой точности центрировки поверхностей (0,001—0,002 мм), которая может быть реализована только с помощью автоколлимационного метода контроля, также отличающегося крайней трудоемкостью измерений.

Если классифицировать объективы микроскопов с позиции трудоемкости методов контроля их расчетных параметров, то к объективам с повышенной технологичностью целесообразно отнести системы, компоненты которых имеют положение наилучшей установки. В системах этого класса заложены предпосылки к автоматизации изготовления не только отдельных элементов, но сборки и юстировки самих объективов. Отметим, что положение наилучшей установки присуще компонентам, имеющим небольшие значения основных параметров P , W . В компонентах такого типа отсутствуют поверхности большой кривизны, а это в свою очередь позволяет размещать на блоке и обрабатывать одновременно несколько деталей, что способствует повышению эффективности серийного производства.

Глава IV

СИНТЕЗ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПЕРЕМЕННЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

16. СВОЙСТВА ОДИНОЧНОГО ПОДВИЖНОГО КОМПОНЕНТА

Преимуществом панкратических систем перед системами дискретного изменения увеличения является возможность получения произвольного масштаба изображения в заданном диапазоне увеличений при постоянном положении плоскости изображения. Совершенствование методов расчета способствовало распространению панкратических систем во многих областях оптического приборостроения: в фотоафической, киносъемочной и телевизионной технике, в микроскопах, зрительных трубах, в фотограмметрических приборах. Современный уровень развития панкратических систем характеризуется многообразием конструкций, отличающихся сложностью кинематических связей, числом подвижных и неподвижных оптических элементов и рядом других признаков. Для систематического изучения свойств панкратических систем предлагаются различные способы их классификации, из которых наиболее общепринятой является классификация Бэка [77]. Согласно этой классификации, все панкратические системы разделяются в зависимости от сложности кинематических связей между подвижными компонентами на системы с механической компенсацией смещения плоскости изображения (первого класса) и системы с оптической компенсацией

(второго класса). В системах первого класса изменение масштаба изображения и компенсация смещения плоскости изображения во всем диапазоне увеличений осуществляются в результате нелинейного перемещения отдельных элементов схемы. В системах второго класса постоянство положения плоскости изображения достигается в результате установления определенных соотношений между фокусными расстояниями компонентов, расстоянием между компонентами и положением плоскости предмета и имеет место лишь в отдельных положениях подвижных компонентов, перемещающихся по линейным направляющим. Число этих положений, названных точками оптической компенсации, зависит от числа изменяющихся воздушных промежутков с учетом расстояния до плоскости предмета и изображения. В остальных положениях подвижных компонентов существует расфокусировка плоскости изображения, величина которой не должна превышать глубину резкости системы. Это требование ограничивает числовые апертуры систем с оптической компенсацией в отличие от систем с нелинейным законом перемещения компонентов, где теоретическая расфокусировка плоскости изображения отсутствует. Однако, как показывает анализ точностей изготовления систем того и другого класса, системы с оптической компенсацией обладают тем преимуществом, что в них влияние неточностей выполнения фокусных расстояний компонентов на расфокусировку плоскости изображения может быть практически полностью скомпенсировано в процессе юстировки. В системах с механической компенсацией существует технологическая расфокусировка плоскости изображения, которая также должна быть меньше глубины резкости системы.

Теория расчета систем с переменными оптическими характеристиками получила свое развитие в трудах советских и зарубежных авторов. Вопросам исследования панкратических систем, главным образом в параксиальной области, посвящено значительное число статей в зарубежной печати, среди которых особого внимания заслуживают работы Бергштейна [79, 80]. Большой вклад в теорию и практику расчета систем с перемещенными оптическими характеристиками, предназначенных для целей киносъёмочной и телевизионной техники, внесли советские ученые Д. С. Волосов, М. С. Стефанский, М. Г. Шпякин и другие [11, 12].

За последнее десятилетие область применения панкратических систем значительно расширилась. Одним из достижений современного оптического приборостроения следует считать развитие систем плавного изменения увеличения применительно к задачам, решаемым с помощью микроскопов, измерительных приборов, зрительных труб. Создание оптики этих приборов потребовало дальнейшего совершенствования методов проектирования систем с переменными оптическими характеристиками, поиска конструкций, обладающих компактностью, постоянством положения зрачков, возможностью исправления дисторсии.

Перспективы использования оптических приборов в различных областях народного хозяйства и увеличения объема их выпуска

выдвигают на первый план проблему создания систем, обладающих максимальной простотой конструкции и технологичностью изготовления в условиях серийного производства. Решение этой проблемы в значительной степени определяется рациональностью методов проектирования оптики приборов. Идеи синтеза систем — метода построения оптических конструкций путем последовательного усложнения исходного (базового) элемента в результате добавления к нему коррекционных элементов, — высказанные М. М. Русиновым и положенные им в основу создания светосильных широкоугольных объективов, оказались исключительно плодотворными для разработки оптики приборов различного назначения [6].

Применение идей синтеза для создания систем с переменными оптическими характеристиками позволило разработать рациональные методы расчета панкратических систем с оптической и механической компенсацией, на основе которых в настоящее время проектируются и выпускаются серийно световые микроскопы с плавным изменением увеличения, универсальные измерительные микроскопы и ряд других приборов, отличающихся высоким качеством изображения и технологичностью конструкций.

Покажем, что в основу построения панкратической системы любой степени сложности может быть положен одиночный подвижный компонент, создающий изменение масштаба изображения плоскости предмета в процессе своего перемещения вдоль оптической оси. Очевидно, что длина системы $l = -s + s'$ (где s — положение плоскости предмета, s' — положение плоскости изображения) при этом не остается постоянной.

Действительно, если определить отрезок s' через отрезок s и увеличение компонента v , т. е. $s' = sv$, и выразить величину s через фокусное расстояние компонента по известной формуле отрезков $1/f' = 1/s' - 1/s$ [74], то нетрудно получить соотношение, определяющее зависимость длины системы от увеличения и фокусного расстояния компонента

$$l = -(1 - v)^2 f' / v. \quad (4.1)$$

При перемещении компонента происходит изменение линейного увеличения v , следовательно, изменяется длина системы. Если продифференцировать выражение (4.1) по переменной v и приравнять производную к нулю, то нетрудно установить, что величина l достигает своего экстремального (минимального) значения при двух значениях увеличения: при $v' = 1$ $l = 0$; при $v'' = -1$ $l = 4f'$.

Рассмотрим изменение длины системы во всем диапазоне увеличений v от 0 до $\pm\infty$. На рис. 4.1 представлена графическая зависимость функции $l = f(v)$, найденная при условии $f' = 1$. Функция имеет две ветви 1, 2, соответствующие положительным и отрицательным значениям увеличения. Кроме того, эта функция обладает тем интересным свойством, что при замене параметра v на обратную величину $\bar{v} = 1/v$ значение ее остается постоянным. На графике этому условию отвечают точки пересечения ветвей $l = f(v)$ с прямыми, параллельными оси абсцисс.

Геометрический смысл постоянства функции $l = f(v)$ для увеличений v и $1/v$ состоит в том, что при перемещении подвижного компонента относительно исходного положения, определяемого отрезками $-s, s'$, в положение $\tilde{s} = -s', \tilde{s}' = -s$ длина системы остается постоянной, т. е. расфокусировка плоскости изображения отсутствует. Это обстоятельство позволяет рассматривать одиночный подвижный компонент, имеющий диапазон изменения увеличений $M = v_{\max}/v_{\min} = v/\bar{v} = v^2$, как элементарную панкратическую систему с двумя точками оптической компенсации. Положения плоскостей предмета и изображения при увеличениях v и $1/v$ соответствуют точкам оптической компенсации, для промежуточных значений увеличения в диапазоне от v до $1/v$ имеет место изменение длины системы, или расфокусировка плоскости изображения. Из рис. 4.1 видно, что величина этой расфокусировки тем больше, чем больше значение v .

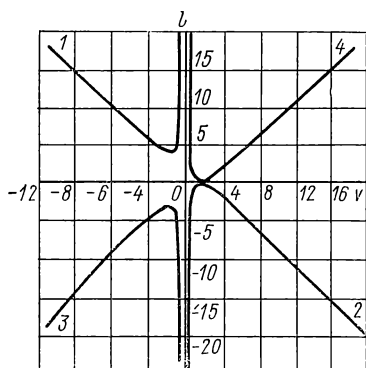


Рис. 4.1. Зависимость длины системы от увеличения

Если принять в выражении (4.1) значение фокусного расстояния $f' = -1$, то графическая зависимость $l = f(v)$ изобразится кривыми 3, 4, симметричными кривым 1, 2 относительно оси абсцисс.

Рассмотрим более подробно свойства однокомпонентной панкратической системы в параксиальной области. На рис. 4.2 изображен подвижный положительный компонент с фокусным расстоянием f' : в исходном положении (а) и в смещенном на величину Δ положении (б). Положительные значения Δ соответствуют перемещению компонента вправо — по направлению хода луча.

Из формулы отрезков получим соотношение, определяющее положение плоскости изображения в начальный момент перемещения компонента, $s' = sf'/(s + f')$. Очевидно, что при перемещении компонента на величину Δ передний отрезок определится равенством $\tilde{s} = s - \Delta$, а задний отрезок — равенством $\tilde{s}' = (s - \Delta) f' / [(s - \Delta) + f']$. Тогда условие постоянства положения плоскости изображения будет

$$\delta' = \tilde{s}' - (s' - \Delta) = (s - \Delta) f' / (s - \Delta + f') - [sf' / (s + f') - \Delta] = 0. \quad (4.2)$$

Преобразуем это выражение, приведя дроби к общему знаменателю. После некоторых упрощений получим квадратное уравнение относительно величины s

$$s^2 + s(2f' - \Delta) - f'\Delta = 0. \quad (4.3)$$

Наличие в уравнении второй степени при неизвестном s доказывает существование у компонента двух пар неподвижных сопряженных плоскостей, одна из которых соответствует предмету и изобра-

жению, а вторая может быть использована в качестве зрачков компонента. Последнее обстоятельство имеет принципиальное значение для построения оптических систем визуального назначения (микроскопов, зрительных труб), в которых положение выходного зрачка за окуляром не должно смещаться в процессе изменения увеличения, а положение входного зрачка, как правило, определено объективом оптической системы.

Отсюда имеем два корня уравнения (4.3):

$$s_A = -(2f' - \Delta + \sqrt{4f'^2 + \Delta^2}) / 2; \quad (4.4)$$

$$s_P = -(2f' - \Delta - \sqrt{4f'^2 + \Delta^2}) / 2. \quad (4.5)$$

Приведем далее ряд формул, определяющих параметры одиночного подвижного компонента, доказательство которых можно найти в работе [74]. Положение плоскости изображения в начальный момент перемещения

$$s' = (2f' + \Delta + \sqrt{4f'^2 + \Delta^2}) / 2. \quad (4.6)$$

Увеличение компонента в исходном положении

$$v = s'/s = -(\Delta + \sqrt{4f'^2 + \Delta^2}) / 2f'. \quad (4.7)$$

Увеличение компонента в противоположном исходному положении

$$\tilde{v} = \tilde{s}'/\tilde{s} = (\Delta - \sqrt{4f'^2 + \Delta^2}) / 2f' = 1/v. \quad (4.8)$$

Длина системы

$$l = 2f' + \sqrt{4f'^2 + \Delta^2}. \quad (4.9)$$

Положение выходного зрачка в начальный момент перемещения

$$s'_P = (2f' + \Delta - \sqrt{4f'^2 + \Delta^2}) / 2. \quad (4.10)$$

Увеличение в зрачках в начальный момент перемещения

$$v_P = s'_P/s_P = -(\Delta - \sqrt{4f'^2 + \Delta^2}) / 2f' = -\tilde{v} = -1/v. \quad (4.11)$$

Увеличение в зрачках в смещенном положении компонента

$$\tilde{v}_P = \tilde{s}'_P/\tilde{s}_P = (\Delta + \sqrt{4f'^2 + \Delta^2}) / 2f' = -v. \quad (4.12)$$

Для дальнейшего определения параметров одиночного подвижного компонента как элементарной панкратической системы будем

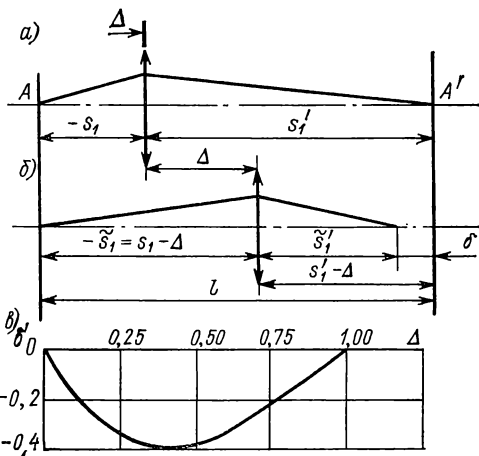


Рис. 4.2. Подвижный компонент в двух положениях и соответствующая им расфокусировка δ'

в качестве независимого параметра использовать отрезок s . Достоинство такого выбора, как показано далее, состоит в возможности классификации систем в зависимости от положения плоскости предмета и изображения; например, одиночный компонент, имеющий действительное положение плоскости предмета и изображения, относится к типу оборачивающих положительных систем, компонент с мнимой предметной плоскостью и действительной плоскостью изображения — к типу положительных коллективов и т. д.

Из уравнения (4.3) имеем

$$f' = -s(s - \Delta)/(2s - \Delta). \quad (4.13)$$

Примем величину максимального перемещения компонента $\Delta_{\max} = 1$. Придавая отрезку s значения от 0 до $\pm\infty$, получим набор однокомпонентных панкратических систем, параметры которых могут быть найдены на основании соотношений (4.5)—(4.13).

На практике требуется определить расфокусировку плоскости изображения в промежуточных положениях компонента в интервале увеличений $v_{\min} < v < v_{\max}$. Из выражения (4.2) находим

$$\begin{aligned} \delta' &= \frac{(s - \Delta)(s + f')f' - (s + f' - \Delta)(sf' - s\Delta - f'\Delta)}{(s + f' - \Delta)(s + f')} = \\ &= \frac{s^2 + s(2f' - \Delta) - f'\Delta}{(s + f')(s + f' - \Delta)} \Delta. \end{aligned} \quad (4.14)$$

Задавая последовательно ряд значений перемещению Δ , можно построить ход кривой остаточной расфокусировки плоскости изображения $\delta' = f'(\Delta)$, которая для $s = -0,75$ показана на рис. 4.2, в.

Найдем максимальную величину этой расфокусировки, дифференцируя выражение (4.14) по переменной Δ . В результате несложных преобразований получаем уравнение

$$\Delta^2 - 2\Delta(s + f') + s^2 + 2sf' = 0, \quad (4.15)$$

откуда

$$\Delta = (s + f') \pm f'.$$

Таким образом, максимальная расфокусировка плоскости изображения имеет место при двух значениях перемещения:

$$\Delta_{\delta' \max} = s + 2f'; \quad \Delta_{\delta' \max} = s.$$

Отметим, что максимальное перемещение компонента $\Delta_{\max} = 1$, следовательно, значение $\Delta_{\delta' \max}$ не может быть больше этой величины. Последнее обстоятельство обуславливает знак подкоренного выражения при решении уравнения (4.15) для систем различных типов. Так, для компонентов, имеющих передний отрезок в пределах $0 < |s| < 1$, справедливо решение $\overline{\Delta}_{\delta' \max} = s$, для остальных систем — $\Delta_{\delta' \max} = s + 2f'$.

Максимальная расфокусировка может быть найдена в результате подстановки значений $\Delta_{\delta'_{\max}}$ в выражение (4.14), которое после несложных преобразований приобретает вид:

$$\delta'_{\max} = (s + 2f')^2 / (s + f'), \quad \Delta_{\delta'_{\max}} = s + 2f'; \quad (4.16)$$

$$\delta'_{\max} = s^2 / (s + f'), \quad \Delta_{\delta'_{\max}} = s. \quad (4.17)$$

Соотношение (4.14) можно, кроме того, преобразовать, выразив передний отрезок s через фокусное расстояние компонента и его увеличение: $s = f'(1 - v)/v$. Подставив значение s в выражение (4.14), получаем

$$\delta' = \Delta [(1 - v^2)f' - v\Delta] / (f' - v\Delta). \quad (4.18)$$

В табл. 4.1 приведены гауссовы параметры однокомпонентных панкратических систем, найденные при условии нормировки $\Delta_{\max} = 1$. Из анализа данных табл. 4.1 устанавливается существование четырех типов компонентов.

1. В области отрицательных значений отрезка s фокусное расстояние компонента f' имеет положительное значение, а увеличение v — отрицательное, т. е. исследуемый компонент работает как положительная оборачивающая система, при этом диапазон изменения увеличения M уменьшается по мере увеличения рабочего расстояния s . Отнесем этот тип компонента к типу положительных оборачивающих систем.

2. В области положительных значений отрезка s ($0 < s < 0,5$) компонент имеет отрицательное значение f' , положительное увеличение $v > 0$, причем в одном из промежуточных положений увеличение $v = 1$, т. е. плоскости предмета и изображения совпадают с компонентом. Назовем этот тип системы отрицательным коллективом.

3. В диапазоне отрезков $0,5 < s < 1$, увеличение компонента также положительное, существует положение, в котором $v = 1^{\times}$, фокусное расстояние компонента $f' > 0$; такой компонент может быть назван положительным коллективом.

4. Наконец, в области значений $s > 1$, увеличение компонента и фокусное расстояние отрицательны, компонент работает как отрицательная оборачивающая система. Диапазон увеличения снижается по мере увеличения отрезка s .

Области применения однокомпонентных панкратических систем следующие.

1. Определим возможность применения одиночного компонента в системах с дифракционным качеством изображения. Согласно критерию Релея, изображение, создаваемое компонентом, не будет отличаться от идеального, если величина остаточной расфокусировки δ'_{\max} , выраженная в волновой мере, не превышает $0,25\lambda$ [9]:

$$\delta'_N = \delta'_{\max} \sin^2 \sigma' / 2\lambda \leq 0,25, \quad (4.19)$$

где $\sin \sigma'$ — выходная числовая апертура компонента; λ — длина волны света. Если принять максимальное перемещение компонента,

s	f'	s'	v	M	s_P	$s'_{P'}$	δ'_{\max}	$\sin \sigma'$	l	Тип системы
—5,0	2,727	6,0	—1,2	1,44	0,545	0,455	—0,091	0,008	11,0	Положительная обра- чивающая система
—2,5	1,458	3,5	—1,4	1,96	0,583	0,416	—0,166	0,006	6,0	
—2,0	1,200	3,0	—1,5	2,25	0,600	0,400	—0,200	0,005	5,0	
—1,5	0,938	2,5	—1,67	2,78	0,625	0,375	—0,252	0,005	4,0	
—1,25	0,803	2,246	—1,80	3,23	0,643	0,357	—0,284	0,004	3,496	
—1,0	0,667	2,0	—2,0	4,0	0,667	0,333	—0,335	0,004	3,0	
—0,75	0,525	1,75	—2,33	5,44	0,700	0,300	—0,400	0,004	2,5	
—0,50	0,375	1,50	—3,0	9,0	0,750	0,250	—0,500	0,003	2,0	
—0,25	0,208	1,25	—5,0	25,0	0,833	0,166	—0,656	0,003	1,5	
0	0	—	—	—	—	—	—	—	—	Отрицательный кол- лектив
0,25	—0,375	0,75	3,0	9,0	1,50	—0,500	—1,500	0,003	0,50	
0,50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Положительный кол- лектив
0,75	0,375	0,25	0,333	9,0	—0,50	1,500	0,400	0,003	—0,50	
1,0	0	—	—	—	—	—	—	—	—	Отрицательная обра- чивающая система
1,25	—0,208	—0,25	—0,20	25,0	0,167	0,833	0,668	0,003	—1,50	
1,50	—0,375	—0,50	—0,333	9,0	0,250	0,750	0,500	0,003	—2,00	
2,00	—0,667	—1,00	—0,50	4,0	0,333	0,667	0,333	0,004	—3,00	
2,50	—0,938	—1,50	—0,60	2,78	0,375	0,625	0,250	0,005	—4,00	
5,00	—2,222	—4,00	—0,80	1,56	0,444	0,556	0,111	0,007	—9,00	

например, $\Delta_{\max} = 50$ мм, то можно найти реальную величину расфокусировки δ'_{\max} и далее определить числовую апертуру компонента $\sin \sigma'$, в пределах которой выполняется условие (4.19). В табл. 4.1 приведены предельно допустимые значения $\sin \sigma'$ для компонентов различных типов.

Таким образом, если будет обеспечен надлежащий уровень оптической коррекции, однокомпонентные панкратические системы могут использоваться в приборах с дифракционным качеством изображения в области числовых апертур, соответствующих критерию Релея.

2. Однокомпонентные панкратические системы могут применяться в области значительных числовых апертур в оптических системах с пониженными требованиями к качеству изображения, в которых волновые aberrации составляют 5—10λ (в осветительных системах микроскопов и других приборов) для плавного изменения числовой апертуры осветительного пучка и площади освещаемого участка объекта.

3. Одиночный компонент может применяться в области значительных числовых апертур в системах с высоким качеством изображения для создания скачкообразного изменения увеличения. В этом случае компонент работает только в двух крайних положениях, соответствующих точкам оптической компенсации.

4. Одиночный подвижный компонент является базовым элементом двухкомпонентных панкратических систем с механической компенсацией смещения плоскости изображения. В результате синтеза элемента, создающего значительный диапазон увеличений, и фокусирующего элемента, компенсирующего остаточную расфокусировку плоскости изображения первого компонента, создается двухкомпонентная панкратическая система с механической компенсацией.

17. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАУССОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ ПАНКРАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТИПА «КОЛЛЕКТИВ»

В предыдущем параграфе было показано, что расфокусировка плоскости изображения в однокомпонентной панкратической системе достигает большой величины и ограничивает ее полезные числовые апертуры. Дальнейшее уменьшение остаточной расфокусировки возможно лишь в результате усложнения системы. Очевидно, что панкратические системы с оптической компенсацией должны содержать последовательно чередующиеся подвижные и неподвижные компоненты, поскольку два компонента, разделенных постоянным воздушным промежутком, эквивалентны одиночной панкратической системе. Таким образом, трехкомпонентная панкратическая система должна иметь два крайних жестко связанных компонента и расположенный между ними неподвижный компонент. В такой системе будет существовать четыре точки оптической компенсации в соответствии с числом изменяющихся воздушных промежутков и с учетом расстояния до плоскостей предмета и изображения,

Известной методикой расчета панкратических систем с оптической компенсацией является методика Бергстейна [80]. Для выражения основных параксиальных соотношений в системах, составленных из n последовательно чередующихся подвижных и неподвижных компонентов, Бергстейн воспользовался методом «гауссовых скобок». Введенная им в рассмотрение совокупность параметров, названная модифицированными гауссовыми скобками, позволила получить аналитические зависимости, связывающие фокусные расстояния компонентов, расстояния между компонентами и положения точек оптической компенсации с диапазоном изменения масштаба изображения M . Методика Бергстейна, основанная на использовании в качестве исходного соотношения формулы Ньютона, дает возможность в результате нескольких приближений определить гауссовы параметры систем, принимая в качестве начальных данных лишь диапазон изменения масштаба изображения и положение точек оптической компенсации.

При анализе гауссовых параметров систем, определяемых по методике Бергстейна, обращает на себя внимание тот факт, что фокусные расстояния крайних компонентов приблизительно равны. Это обстоятельство привело к заключению о возможности существования класса панкратических систем симметричного типа, характеризующихся равенством фокусных расстояний крайних компонентов. Далее будет показано, что вывод аналитических зависимостей при этом существенно упрощается, а параметры системы симметричного типа оказываются тождественными соответствующим величинам, определяемым по методике Бергстейна.

Рассмотрим класс симметричных трехкомпонентных панкратических систем с линейно перемещающимися крайними компонентами, для которого справедливо равенство фокусных расстояний крайних компонентов $f'_1 = f'_3$ [26]. Найдем условие существования двух типов этих систем. Первый тип систем, определяемый увеличением $v = +1\times$ в среднем положении компонентов, содержит промежуточную плоскость изображения и может быть назван панкратическим коллективом. Второй тип систем, имеющий в среднем положении увеличения $v = -1\times$, относится к оборачивающим системам.

Для вывода аналитических зависимостей в панкратических системах симметричного типа в качестве исходного параметра целесообразно использовать увеличение первого компонента v_0 в среднем положении системы. Пусть имеется некоторая плоскость изображения, создаваемая предыдущей оптической системой, и эта плоскость является мнимой предметной плоскостью для трехкомпонентной системы, изображенной на рис. 4.3. При симметричном положении крайних компонентов относительно среднего (рис. 4.3, *a*) и при условии равенства их фокусных расстояний система будет иметь увеличение $v = +1\times$, если плоскость изображения после первого компонента совпадает со вторым компонентом. Введем обозначения (рис. 4.3): φ_1, φ_3 — оптические силы первого и третьего компонентов, $\varphi_1 = \varphi_3$; φ_2 — оптическая сила второго компонента; d_0 — расстояние между компонентами в среднем положении системы; s_1 — рас-

стояние от первого компонента до плоскости предмета; s'_3 — расстояние от третьего компонента до плоскости изображения.

Положение плоскости предмета в среднем положении компонентов

$$s_1 = s'_1/v_0 = d_0/v_0. \quad (4.20)$$

Оптические силы крайних компонентов, выраженные через параметры d_0 , v_0 , равны

$$\varphi_1 = \varphi_3 = (1 - v_0)/s'_1 = (1 - v_0)/d_0. \quad (4.21)$$

При перемещении крайних компонентов относительно исходного (среднего) положения на величину $\Delta = d_0$ система займет положение, изображенное на рис. 4.3, б. Обозначим в этом случае расстояние от первого компонента до плоскости предмета через \tilde{s}_1 , расстояние от третьего компонента до плоскости изображения — через \tilde{s}'_3 . Тогда условие постоянства положения плоскости изображения будет:

$$\tilde{s}_1 = s_1 - d_0; \quad \tilde{s}'_3 = s'_3 - d_0.$$

Определим оптическую силу второго компонента, обеспечивающую это условие. Выразим расстояние от каждого компонента до плоскости предмета и изображения при смещенном положении системы через соответствующие величины при симметричном положении:

$$\begin{aligned} \tilde{s}'_1 &= \tilde{s}_1 f'_1 / (\tilde{s}_1 + f'_1) = \\ &= d_0 (1 - v_0) / (1 - v_0 + v_0^2). \end{aligned}$$

Так как в смещенном положении расстояние между компонентами $\tilde{d}_1 = 0$; $\tilde{d}_2 = 2d_0$, то справедливы соотношения:

$$\tilde{s}_2 = \tilde{s}'_1, \quad \tilde{s}'_2 = \tilde{s}_3 + 2d_0, \quad (4.22)$$

откуда

$$\tilde{s}_3 = \tilde{s}'_3 f'_3 / (-\tilde{s}_3 + f'_3) = -d_0 (1 + v_0) / (1 + v_0 - v_0^2).$$

Тогда

$$\tilde{s}'_2 = -d_0 (1 + v_0) / (1 + v_0 - v_0^2) + 2d_0 = d_0 (1 - v_0) (1 + 2v_0) / (1 - v_0 + v_0^2). \quad (4.23)$$

Подставляя в выражение для оптической силы компонента $\varphi = 1/\tilde{s}'_2 - 1/\tilde{s}_2$ значение отрезков из соотношений (4.22), (4.23), получаем после несложных преобразований

$$\varphi_2 = -2v_0^3/d_0 (1 - v_0) (1 + 2v_0). \quad (4.24)$$

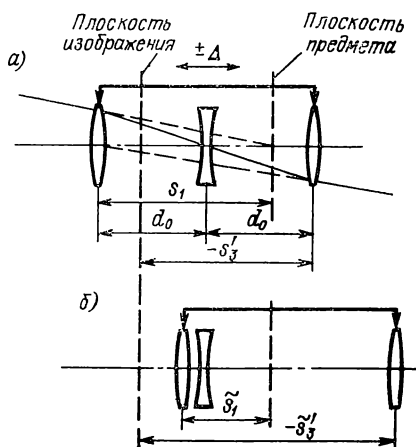


Рис. 4.3. Трехкомпонентная панхроматическая система типа «коллектив» в двух положениях подвижных компонентов

Увеличение системы в крайнем положении компонентов определяется из соотношения отрезков и равно

$$\tilde{v}_1 = \tilde{s}'_1 \tilde{s}'_2 \tilde{s}'_3 / \tilde{s}_1 \tilde{s}_2 \tilde{s}_3 = 1 + 2v_0. \quad (4.25)$$

Очевидно, вследствие симметрии системы положение изображения останется неизменным и при перемещении подвижных компонентов в противоположное крайнее положение, а общее изменение увеличения определится как произведение увеличений в двух крайних положениях системы при прямом и обратном ходе:

$$M = (1 + 2v_0)^2. \quad (4.26)$$

Следует заметить, что определяемый таким способом диапазон увеличений является теоретическим, соответствующим условию совмещения главных плоскостей компонентов, а реальный диапазон несколько меньше значения, определяемого по формуле (4.26).

Найдем положение плоскости изображения в промежуточных положениях подвижных компонентов. Пусть Δ — перемещение компонентов относительно своего среднего положения. Тогда положение плоскости предмета относительно первого компонента $\tilde{s}_1 = s_1 - \Delta$, а воздушные промежутки между компонентами $d_1 = d_0 - \Delta$; $d_2 = d_0 + \Delta$. Проецируя эту плоскость в пространство изображений системы, находим \tilde{s}'_3 . Расфокусировка плоскости изображения при этом

$$\delta' = \tilde{s}'_3 - (s'_3 - \Delta).$$

Опуская громоздкие, но несложные преобразования, найдем величину δ' , выраженную через параметры системы,

$$\delta' = \frac{2v_0^3 \Delta^2 (d_0^2 - \Delta^2) (v_0 - 1)}{2v_0^3 \Delta (d_0^2 - \Delta^2) (v_0 - 1) - 2v_0 d_0 (d_0 - \Delta)(d_0 - v_0 \Delta) - d_0^3}. \quad (4.27)$$

Покажем существование у панкратической системы типа «коллектив» двух пар сопряженных плоскостей, неподвижных при перемещении компонентов в противоположные крайние положения. Для этого спроецируем плоскость, определяемую отрезком $\tilde{s}_1 = s_1 - d_0$, в пространство изображений системы, считая оптические силы компонентов известными.

В результате несложных преобразований получаем квадратное уравнение относительно s_1

$$s_1^2 v_0 (1 - 2v_0) - s_1 d_0 (1 - v_0 - 4v_0^2 + 2v_0^3) - d_0^2 (1 + 2v_0 - 2v_0^2) = 0. \quad (4.28)$$

Решение этого уравнения определяется выражением

$$s_1 = d_0 [(1 - v_0 - 4v_0^2 + 2v_0^3) \pm (1 + v_0 - 2v_0^3)] / 2v_0 (1 - 2v_0^2),$$

которое дает значение корней:

$$s_A = d_0 / v_0 \equiv s_1; \\ s_P = d_0 (2v_0^2 - 2v_0 - 1) / (1 - 2v_0^2). \quad (4.29)$$

Таким образом, решение уравнения (4.28) определяет положение двух плоскостей, неподвижных при крайних положениях подвижных компонентов. Анализ полученных результатов показывает,

что одна из этих плоскостей является исходной предметной плоскостью, а вторая может быть использована в качестве зрачка системы. В параксиальной области смещения изображения второй плоскости в промежуточных положениях подвижных компонентов достаточно малы, что дает основание считать положение зрачков систем стабильным.

Уравнения (4.20), (4.21), (4.24), (4.29) определяют в зависимости от увеличения v_0 семейство панкратических систем, отличающихся диапазоном увеличений, расфокусировкой плоскости изображения и положением входного зрачка. Кроме того, габаритные размеры систем могут изменяться в некоторых пределах в зависимости от значения d_0 , принятого по условиям нормировки за единицу.

На рис. 4.4 представлены графические зависимости фокусных расстояний компонентов f'_1 , f'_2 и положения плоскости предмета s_1 от исходного параметра v_0 , найденные при условии $d_0 = 1$. Из анализа этих зависимостей следует, что область панкратических систем, представляющих интерес для практического использования, ограничивается значениями $v_0 = 0,4 \div 0,8$. В табл. 4.2 приведены параметры панкратических систем типа «коллектив», найденные для области полезных увеличений.

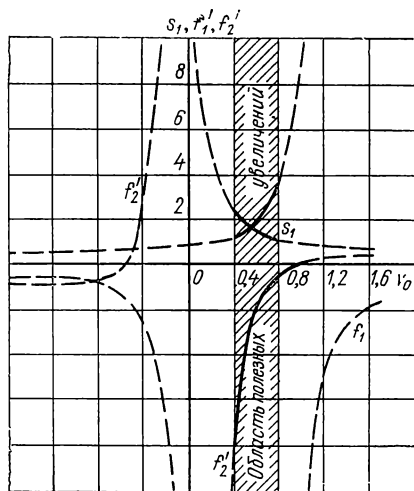


Рис. 4.4. Зависимость параметров панкратического коллектива от увеличения v_0

Был выполнен расчет расфокусировки δ' для двух панкратических систем с исходными параметрами $v_0 = 0,5$; $0,65$. По результатам расчета построены кривые 1 ($v_0 = 0,5$) и 2 ($v_0 = 0,65$) остаточной расфокусировки плоскости изображения этих систем в зависимости от положения подвижных компонентов (рис. 4.5). Из графика видно, что расфокусировка возрастает с ростом диапазона увеличений.

Т а б л и ц а 4.2

v_0	M	s	f'_1	f'_2	s_P
0,4	3,24	2,5	1,667	—8,437	—2,176
0,5	4,00	2,0	2,0	—4,0	—3,000
0,6	4,84	1,667	2,5	—2,037	—5,286
0,7	5,76	1,429	3,333	—1,050	—71,000
0,8	6,76	1,250	5,0	—0,508	4,714

Покажем возможность уменьшения остаточной расфокусировки плоскости изображения в панкратических системах с оптической компенсацией. Для этого сместим плоскость предмета на величину δ_0 . Тогда в пространстве изображений возникнет смещение $\delta'_0 = \delta_0 q$, где q — продольное увеличение системы, причем $q = v^2$ для соответствующего положения подвижных компонентов. Если знак при δ'_0 противоположен знаку расфокусировки системы δ' , то суммарное смещение плоскости изображения $\delta_\Sigma = \delta' - \delta'_0$; таким образом, остаточная расфокусировка плоскости изображения может быть значительно уменьшена. То обстоятельство, что при этом в крайних положениях компонентов $\delta'_\Sigma \neq 0$, не исключает возможность оптимизации расфокусировки во всем диапазоне увеличений, поскольку реальное перемещение компонентов меньше теоретического (соответствующего условию совмещения главных плоскостей компонентов). В табл. 4.3 приведены результаты оптимизации остаточных смещений плоскости изображения системы при $v_0 = 0,65$, $d_0 = 20$ в соответствии с описанной методикой (кривая 3).

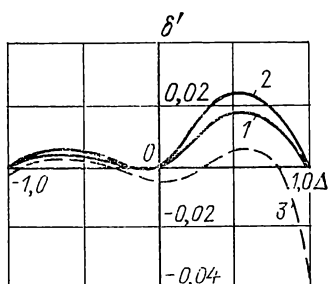


Рис. 4.5. Зависимость расфокусировки плоскости изображения от перемещения компонентов в панкратической системе типа «коллектив»

Из таблицы видно, что в результате оптимизации остаточной расфокусировки плоскости изображения в системе возникают четыре точки оптической компенсации, а значения максимальной расфокусировки в интервале увеличений системы $v_{\min} < v < v_{\max}$ равны по величине и противоположны по знаку. Последнее условие может быть выражено аналитически следующим образом. Смещение плоскости предмета δ_0 проецируется в пространство изображений при увеличениях $v = 1$ и $1 < v < v_{\max}$ соответственно как $\delta'_{01} = \delta_0$ и $\delta'_{02} = \delta_0 v^2$. Если положить условие $\delta'_\Sigma (v = 1) = -\delta'_\Sigma (1 < v < v_{\max})$, то получим необходимую для оптимизации величину δ_0 :

$$\delta' + \delta_0 v^2 = -\delta_0 \quad (v = 1);$$

$$\delta_0 = -\delta' / (1 + v^2).$$

Т а б л и ц а 4.3

Δ	v	δ_0	δ'_0	δ	δ'_Σ
-1,0	2,30	-0,007	-0,0370	0	-0,0370
-0,5	1,522	-0,007	-0,0162	0,0237	0,0075
0	1	-0,007	-0,007	0	-0,0070
0,5	0,655	-0,007	-0,003	0,0103	0,0073
1,0	0,435	-0,007	-0,001	0	-0,001

18. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАУССОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПАНКРАТИЧЕСКИХ ОБОРАЧИВАЮЩИХ СИСТЕМ

Рассмотрим второй тип симметричных панкратических систем, определяемых увеличением $v = -1\times$ в среднем положении компонентов (рис. 4.6, а). Для него справедливы соотношения: $f'_1 = f'_3 = s_1 v_0 / (1 - v_0)$; $s'_1 = s_1 v_0$; $s'_3 = -s_1$; $f'_2 = -(s_1 v_0 - d_0)/2$. При перемещении компонентов в крайнее положение (рис. 4.6, б) и в отсутствии смещения плоскости изображения будут выполнены условия: $\tilde{s}_1 = s_1 - d_0$; $\tilde{s}'_3 = s'_3 - d_0 = -s_1 - d_0$. Если найти далее значения отрезков \tilde{s}_2 , \tilde{s}'_2 , проецируя плоскости, определяемые \tilde{s}_1 и \tilde{s}'_3 , в пространство изображений крайних компонентов системы, и выра-

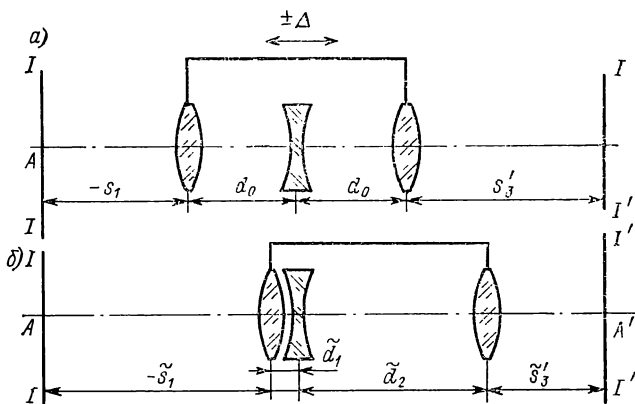


Рис. 4.6. Панкратическая оборачивающая система в двух положениях подвижных компонентов

зить через них величину фокусного расстояния второго компонента, то в результате несложных преобразований получим квадратное уравнение относительно увеличения v_0 :

$$v_0^2 (s_1^2 + s_1 d_0) - v_0 (s_1^2 + d_0^2) - (s_1^2 - d_0^2) = 0. \quad (4.30)$$

Решение этого уравнения определяет параметры системы, при которых положение изображения вследствие симметрии системы будет сохраняться постоянным для трех положений подвижных компонентов. Таким образом, будут иметь место три точки оптической компенсации. Корни уравнения (4.30) определяются выражением

$$v_0 = \frac{(s_1^2 + d_0^2) \pm \sqrt{(s_1^2 + d_0^2)^2 + 4 (s_1^2 - d_0^2) (s_1^2 + s_1 d_0)}}{2 (s_1^2 + s_1 d_0)}. \quad (4.31)$$

Анализ выражения (4.31) показывает, что изменение масштаба изображения в системах оборачивающего типа возможно как для действительного, так и для мнимого положения плоскости предмета, при этом увеличение системы в крайнем положении подвижных

компонентов определяется из соотношения отрезков $\tilde{s}_1, \tilde{s}'_1; \tilde{s}_2, \tilde{s}'_2; \tilde{s}_3, \tilde{s}'_3$:

$$\tilde{v} = \tilde{s}'_1 \tilde{s}'_2 \tilde{s}'_3 / \tilde{s}_1 \tilde{s}_2 \tilde{s}_3;$$

$$\tilde{v} = [2d_0(s_1 + d_0 - d_0 v_0) - s_1 v_0(s_1 + d_0)] / s_1 v_0(s_1 - d_0).$$

Из выражения (4.30) следует, что при заданных габаритных размерах системы, т. е. при известной величине d_0 и условии $|s_1| > d_0$, существует два значения действительных корней для заданного положения предметной плоскости s_1 . Двум действительным корням уравнения (4.31) соответствует два значения фокусных расстояний компонентов, а также два значения диапазона изменения увеличения M . В табл. 4.4 приведены результаты решения квадратного

уравнения (4.30) и найденные по ним параметры ряда панкратических систем при условии $d_0 = 1$.

Анализ полученных результатов приводит к заключению, что область решений, представляющих практическое значение, определяется величиной $v_0 < 0$, что соответствует знаку «—» в числителе выражения (4.31). При этом панкратические системы, имеющие параметр $v_0 < 0$, могут быть по аналогии с вариообъективами с оптической компенсацией названы системами типов P (positive) и N (negative) [79]. Системы первого типа характеризуются действитель-

ным положением плоскости предмета; изменение увеличения осуществляется перемещением положительных компонентов относительно отрицательного, и диапазон изменения увеличения составляет $M = (1/\tilde{v})^2$. Системы второго типа имеют мнимое положение плоскости предмета, перемещающиеся компоненты отрицательной оптической силы и диапазон изменения увеличения $M = \tilde{v}^2$.

В табл. 4.5 приведены параметры систем, имеющих действительное и мнимое положения плоскости предмета, рекомендуемые для практического использования.

На рис. 4.7 изображена зависимость остаточной расфокусировки плоскости изображения по диапазону перемещения компонентов для систем с теоретическим диапазоном $M = 10,7 \times$ (кривая 1) и $M = 6,8 \times$ (кривая 2). Из анализа этих кривых следует, что величина смещения плоскости изображения возрастает с ростом диапазона увеличений. Как в системах типа «коллектив», введение плоскости установки в пространство предметов, смещенной на величину δ_0 относительно расчетного положения, позволяет оптимизировать кривую остаточных смещений плоскости изображения при четырех точках оптической компенсации в системах оборачивающего типа (кривая 3 на рис. 4.7).

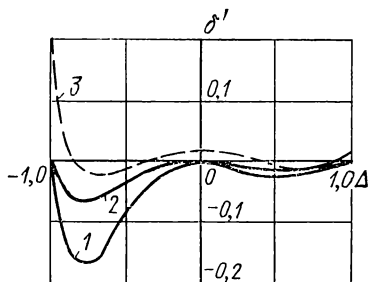


Рис. 4.7. Зависимость расфокусировки плоскости изображения δ' от перемещения Δ компонентов в панкратической оборачивающей системе

Т а б л и ц а 4.4

s_1	v'_0	$f'_{1,3}$	f'_2	v'	v''_0	$f'_{1,3}$	f'_2	v''
—4	—0,6152	1,5235	—0,7304	—0,212	2,0319	7,8765	4,5637	—0,848
—6	—0,6271	2,3124	—1,3813	—0,382	1,8604	12,9733	6,0813	—0,890
—8	—0,6287	3,0881	—2,0148	—0,496	1,7894	18,1341	7,6576	—0,914
—10	—0,6284	3,8589	—2,6418	—0,576	1,7506	23,3230	9,2529	—0,930
4	—0,5397	—1,4021	1,5794	—3,377	1,3897	—14,2646	—2,2794	—1,234
6	—0,5731	—2,1859	2,2193	—2,281	1,4541	—19,2141	—3,8622	—1,192
8	—0,5872	—2,9598	2,8490	—1,869	1,4900	—24,3259	—5,4601	—1,106
10	—0,5948	—3,7298	3,4742	—1,655	1,5130	—29,4925	—7,0651	—1,083

Т а б л и ц а 4.5

s_1	v_0	$f'_{1,3}$	f'_2	$\varphi_{1,3}$	φ_2	M	s_P
—5	—0,6238	1,9206	—1,0592	0,5207	—0,9441	10,7	1,65
—6	—0,6271	2,3124	—1,3813	0,4324	—0,7240	6,8	1,63
—7	—0,6283	2,7012	—1,6992	0,3702	—0,5885	5,1	1,59
5	—0,5605	—1,7960	1,9010	—0,5568	0,5260	7,1	0,10
6	—0,5731	—2,1859	2,2193	—0,4575	0,4506	5,2	0,22
7	—0,5814	—2,5736	2,5349	—0,3886	0,3945	4,1	0,32

Рассматривая панкратические системы в противоположных крайних положениях как сложные компоненты, имеющие равные эквивалентные фокусные расстояния, приходим к заключению о существовании у панкратических систем оборачивающего типа второй пары неподвижных сопряженных плоскостей. Проецируя плоскость, определяемую отрезком $\bar{s}_1 = s_1 - d_0$, в пространство изображений системы, фокусные расстояния компонентов которых считаем известными, получаем после ряда преобразований квадратное уравнение относительно отрезка s_1

$$s_1^2 [2f_2'(f_1' - d_0) + f_1'(f_1' - 2d_0)] + s_1 [2f_1'(f_1f_2' - 2d_0f_2' - d_0f_1')] + + 2d_0^3(f_1' + f_2') - 2d_0f_1f_2'(f_1' + d_0) + d_0^2f_1'^2 = 0. \quad (4.32)$$

Одно из решений этого уравнения определяет положение плоскости предмета, а второе может быть использовано для нахождения зрачков системы.

19. КОРРЕКЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПАНКРАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СИММЕТРИЧНОГО ТИПА

Задача исследования абберационных свойств панкратических систем может быть решена аналитически, если исходить из предположения, что компоненты системы достаточно тонки. Как показал Г. Г. Слюсарев [67], это допущение позволяет выразить коэффициенты монохроматических аббераций третьего порядка, так называемые суммы Зейделя, через совокупность параметров, из которых одни зависят только от «внутренних» конструктивных элементов системы (радиусов кривизны и показателей преломления), а другие — только от «внешних» ее элементов. Для дальнейших выводов удобно пользоваться выражениями сумм Зейделя в следующем виде:

$$\begin{aligned} S_I &= \sum h_i \mathcal{P}_i; \\ S_{II} &= \sum H_i \mathcal{P}_i - I \sum \mathcal{W}_i; \\ S_{III} &= \sum \frac{H_i^2}{h_i} \mathcal{P}_i - 2I \sum \frac{H_i}{h_i} \mathcal{W}_i + I^2 \sum \Phi_i; \\ S_{IV} &= \sum \Phi_i \pi_i; \\ S_V &= \sum \frac{H_i^3}{h_i^2} \mathcal{P}_i - 3I \sum \frac{H_i^2}{h_i^2} \mathcal{W}_i + I^2 \sum \Phi_i \frac{H_i}{h_i} (3 + \pi_i). \end{aligned} \quad (4.33)$$

В приведенных соотношениях величины \mathcal{P}_i , \mathcal{W}_i зависят от радиусов кривизны поверхностей, показателей преломления, а также от координаты точки пересечения первого вспомогательного луча с осью оптической системы до преломления его через компонент. Переменную по координате можно исключить, введя в рассмотрение систему основных параметров P , W , зависящих только от радиусов

кривизны и показателей преломления компонентов и связанных с параметрами \mathcal{P} , \mathcal{W} следующими зависимостями:

$$\begin{aligned}\mathcal{P} &= (\alpha' - \alpha)^3 P + 4\alpha (\alpha' - \alpha)^2 W + \alpha (\alpha' - \alpha) [2\alpha (2 + \pi) - \alpha']; \\ \mathcal{W} &= (\alpha' - \alpha)^2 W + \alpha (\alpha' - \alpha) (2 + \pi).\end{aligned}\quad (4.34)$$

Метод разделения переменных, входящих в выражения для aberrаций третьего порядка, на параметры, зависящие только от внешних и только от внутренних элементов системы, позволяет описать aberrационные свойства панкратических систем в виде совокупности линейных уравнений относительно основных параметров каждого компонента P , W .

Система переменного увеличения должна быть достаточно хорошо скорректирована на всем диапазоне изменения увеличения. Однако вследствие ограниченного числа параметров задача коррекции панкратической системы сводится к исправлению aberrаций лишь для нескольких дискретных значений увеличения; во всем диапазоне перемещения компонентов остаточные aberrации не должны превышать некоторых допустимых пределов, устанавливаемых в зависимости от числовых апертур системы, чувствительности приемника информации и ряда других факторов. С точки зрения коррекционных возможностей трехкомпонентная панкратическая система, каждый компонент которой состоит из линз бесконечно малой толщины (склеенных или несклеенных), обладает шестью свободными параметрами, относительно которых имеется возможность решить шесть коррекционных уравнений для выбранных положений системы.

Однако, если рассматривать панкратическую систему в совокупности с другими оптическими элементами, то задача полного исправления aberrаций для ряда дискретных значений увеличения может быть заменена условием постоянства рассматриваемых aberrаций для нескольких, рационально выбранных положений системы. Тогда, очевидно, последующими оптическими элементами всегда удастся скомпенсировать постоянные значения остаточных aberrаций предшествующей панкратической системы.

В области aberrаций третьего порядка условие постоянства aberrаций для заданной выходной апертуры и постоянного линейного поля зрения может быть заменено условием постоянства соответствующих сумм Зейделя для рассматриваемых положений подвижных компонентов. Однако в выражения монохроматических сумм, определяемых соотношениями (4.33), а также в выражения зависимостей параметров компонентов \mathcal{P} , \mathcal{W} от основных параметров P , W (4.34) входят значения внешних переменных, зависящих от выбора исходных данных для расчета первого и второго параксиальных лучей. Выбор же этих данных произволен, и хотя это обстоятельство не влияет на величины самих aberrаций, оно лишает возможности судить о постоянстве сумм Зейделя при изменении увеличения системы. Таким образом, для исследования коррекционных соотношений при любом положении подвижных компонентов необходимо значение параметров систем привести к определенному

условию масштаба, например $\alpha' = 1$; $\beta_1 = -1/\alpha_1$. Тогда значения инварианта Лагранжа—Гельмгольца $I = n\alpha y = -\alpha_1\beta_1(s - s_p)$, входящие в выражения (4.33), также будут неизменны, а условие постоянства сумм Зейделя для отдельных увеличений систем будет означать условие постоянства соответствующих аберраций для этих увеличений.

Исследование панкратических систем в параксиальной области показало, что в системах типа «коллектив» достигим значительно меньший диапазон изменения увеличения, чем в системах оборачивающего типа. Далее в условиях ограниченных числовых апертур, обусловленных остаточной расфокусировкой плоскости изображения, компоненты панкратического коллектива имеют меньшие относительные отверстия, чем компоненты панкратических оборачивающих систем. Наконец, анализируя результаты расчета второго параксиального луча в среднем положении подвижных компонентов, можно с достаточной степенью точности считать ход главного луча симметричным относительно среднего компонента коллектива. Тогда, если взять крайние компоненты одинаковыми, симметрично расположенными, то в среднем положении системы будут отсутствовать кома, дисторсия и хроматизм увеличения. Если использовать симметричную конструкцию среднего компонента и задаться условием исправления астигматизма в одном из крайних положений системы, то вследствие ее симметрии это условие будет выполняться и в противоположном крайнем положении подвижных компонентов.

Рассмотрим возможность исправления монохроматических аберраций в панкратическом коллективе, построенном из одиночных линз, конструкция которых определена из рассмотренных выше условий. Выразив значения параксиальных углов и высот через увеличение первого компонента v_0 , найдем значения монохроматических сумм Зейделя для крайних положений компонентов. В положении, определяемом $v = 1 + 2v_0$, имеем:

$$S_I = \frac{d_0}{v_0} \left[\mathcal{P}_1 + \mathcal{P}_2 - \frac{1 + v_0}{(1 - v_0)(1 + 2v_0)} \mathcal{P}_3 \right] (1 - v_0)(1 + 2v_0);$$

$$S_{II} = \left[\mathcal{P}_1 + \mathcal{P}_2 - \mathcal{P}_3 v_0 / (1 - v_0) - \frac{1 + 2v_0 + 2v_0^2}{2v_0} \sum \mathcal{W} \right] \frac{2d_0(1 - v_0)}{1 - 2v_0^2};$$

$$S_{III} = 4d_0 \frac{v_0(1 - v_0)}{(1 + 2v_0)(1 - 2v_0^2)^2} \left\{ \mathcal{P}_1 + \mathcal{P}_2 - v_0^2 \frac{1 + 2v_0}{1 - v_0^2} \mathcal{P}_3 - \frac{1 + 2v_0 + 2v_0^2}{v_0} \times \right. \\ \left. \times \left[\mathcal{W}_1 + \mathcal{W}_2 - \frac{v_0(1 + 2v_0)}{1 + v_0} \mathcal{W}_3 \right] + \frac{(1 + 2v_0 + 2v_0^2)^2(1 - 3v_0^2 + v_0^3)}{2v_0^3} \right\}.$$

Если выразить далее значения \mathcal{P} , \mathcal{W} через основные параметры P , W , определив последние с помощью угла α_2 первого параксиального луча в стекле, то можно найти условие исправления одной из монохроматических сумм Зейделя в зависимости от прогиба положительных линз системы для всего семейства панкратических коллективов. На рис. 4.8 изображена зависимость угла α_2 , определя-

ющего возможность исправления астигматизма (кривая 1) и сферической aberrации (кривая 2) от увеличения первого компонента v_0 . Из анализа этих зависимостей следует, что в области значений $v_0 = 0,6 \div 0,68$, т. е. в системах, имеющих значительный диапазон увеличений и удаленное положение входного зрачка, условия $S_I = 0$ и $S_{III} = 0$ выполняются при одном значении α_2 . Кроме того, в этой области $S_{IV} \approx 0$. Анализ S_{II} для увеличений $v_0 = 0,6 \div 0,68$ показывает, что вторая монохроматическая сумма Зейделя имеет умеренные значения для крайних положений подвижных компонентов и равна нулю в среднем положении.

Имеет практическое значение исследование хроматических aberrаций панкратического коллектива. Достаточно подробно этот вопрос рассмотрен в работе [26], где показано, что в системе, составленной из одиночных линз, возможно исправление хромати-

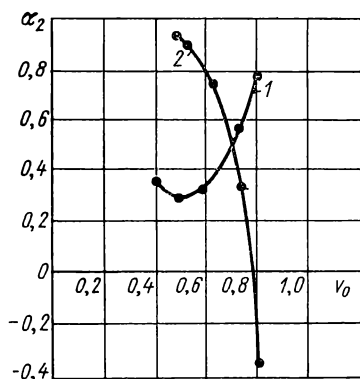


Рис. 4.8. Зависимость прогиба первой линзы панкратического коллектива от v_0

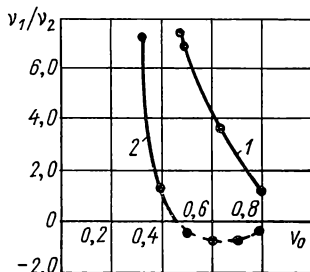


Рис. 4.9. Зависимость отношения коэффициентов дисперсии v_1/v_2 от увеличения v_0 в панкратическом коллективе

ческих aberrаций в крайних положениях подвижных компонентов при соотношении коэффициентов дисперсии материалов положительных и отрицательной линз:

$$v_1/v_2 = \frac{(1 + v_0)^2 + (1 - v_0)^2 (1 + 2v_0)^2}{2v_0^3 (1 + 2v_0)}, \quad \Delta s'_{FC} = 0; \quad (4.35)$$

$$v_1/v_2 = \frac{(1 - 4v_0^2) - v_0(1 - 2v_0^2)}{2v_0^3}, \quad (y'_F - y'_C)/y'_D = 0. \quad (4.36)$$

На рис. 4.9 изображена зависимость отношения коэффициентов дисперсии для значений $v_0 = 0,4 \div 0,8$, обуславливающих исправление хроматизма положения (кривая 1) и хроматизма увеличения (кривая 2). Таким образом, область реальных соотношений коэффициентов дисперсии, приводящих к исправлению хроматизма положения, соответствует максимальному диапазону увеличений коллектива. Исправление же хроматической разности увеличений имеет место лишь в области малых увеличений v_0 . Численные исследования $(y'_F - y'_C)/y'_D$ показывают, что при соотношении коэффициентов

M	$\varphi_{1,3}$	φ_2	v	\bar{d}_1	\bar{d}_2	s_P	$\begin{matrix} a_{1j} \\ d_{1j} \\ h_{1j} \end{matrix}$
10,7	0,5207	—0,9441	—1,0×	1,0	1,0	1,65	88,2389 29,1157 9,6072
			—3,27×	2,0	0,0	2,65	4131,0779 255,9654 15,8599
			—0,31×	0,0	2,0	0,65	1,5992 1,8529 2,1469
6,8	0,4324	—0,7240	—1,0×	1,0	1,0	1,63	105,2153 28,5544 7,7494
			—2,61×	2,0	0,0	2,63	2381,5091 182,6616 14,0101
			—0,38×	0,0	2,0	0,63	4,1354 2,5527 1,5757
5,1	0,3702	—0,5885	—1,0×	1,0	1,0	1,59	121,8355 27,6729 6,2854
			—2,26×	2,0	0,0	2,59	1682,0109 143,5614 12,2531
			—0,44×	0,0	2,0	0,59	8,1269 3,0309 1,1304
7,1	—0,5568	0,5260	—1,0×	1,0	1,0	0,10	—108,3744 —2,1626 —0,0431
			—0,38×	2,0	0,0	1,1	—4,4071 —5,7565 —7,5190
			—2,67×	0,0	2,0	—0,9	—2269,4350 81,2522 —0,2237

Т а б л и ц а 4.6

a_{2j} d_{2j} h_{2j}	a_{3j} d_{3j} h_{3j}	b_{1j} l_{1j} k_{1j}	b_{2j} l_{2j} k_{2j}	b_{3j} l_{3j} k_{3j}	c_j g_j m_j
—112,0375 6,8965 —0,4245	88,2468 —39,9818 18,1144	—135,5775 0,3389 14,9849	224,0678 54,6009 —7,5710	—217,4079 143,5771 —85,5710	111,7277 —259,3973 101,6649
—1089,9509 117,2136 —12,6052	182,8213 —19,6607 2,1143	—7934,1577 —183,1935 7,7589	2725,1702 79,7432 —14,3651	—497,1649 118,3461 —19,7043	4054,0258 —268,2675 56,7304
—9,5340 —11,0468 —12,7996	36,1318 23,6196 15,4403	—2,0476 3,6956 11,3129	14,2994 36,5196 65,4313	—75,1310 77,9571 —69,8162	52,6458 —113,8412 13,4441
—143,7048 2,4553 —0,0419	105,2782 —32,1645 9,8268	—162,1029 7,4896 16,0046	287,3290 72,9800 —2,5777	—259,0197 130,6336 —55,6447	117,4400 —278,6934 64,3528
—915,4065 82,2024 —7,3817	194,4927 —17,4652 1,5684	—4402,9658 —92,7732 11,6707	2198,0747 —0,8000 —17,5811	—521,1157 116,7918 —16,7733	1825,9730 —353,4280 48,1767
—19,4638 —12,0144 —7,4161	50,6354 —26,5620 13,9338	—5,4611 6,8356 10,5197	31,1194 47,8743 47,2456	—108,9253 92,8544 —67,4442	72,3260 —148,5276 31,0796
—174,4278 —0,0441 —0,0000	121,8378 —27,6117 6,2576	—188,0561 14,9767 16,5051	348,8518 87,1199 0,0440	—299,2965 125,5197 —41,5205	122,7214 —301,6072 47,3487
—835,0466 61,6204 —4,5471	207,8708 —15,3394 1,1319	—3028,9315 —44,1684 14,5255	1948,4199 46,6464 —17,4942	—550,7506 115,9967 —14,1204	1044,0495 —405,6095 40,2952
—32,6469 —12,1757 —4,5409	63,7617 —28,4031 12,2676	—10,9761 10,8062 9,5871	54,4109 57,9449 35,6530	—144,6260 104,8496 —63,5917	90,3912 —180,8490 41,9439
309,7129 —38,4590 4,7757	—108,3112 29,0630 —7,7984	155,7131 41,1704 1,5811	—619,2993 139,4462 —25,0824	277,7765 —36,4832 0,4210	127,6757 —176,2604 28,4154
37,3302 8,0908 1,7536	—44,2668 —9,5942 —2,0794	5,2769 14,5682 29,0546	—62,2047 8,2318 6,4903	97,5986 45,4796 15,1295	—41,8392 —77,9478 —62,7772
1913,8143 —60,0870 1,8865	—225,5885 41,4204 —7,6052	4075,9264 46,2113 —6,9195	—4464,5962 295,6456 —14,1635	632,8129 612,7486 1,1675	293,6016 —462,1116 30,9715

M	$\varphi_{1,3}$	φ_2	v	\bar{d}_1	\bar{d}_2	s_P	$\begin{matrix} a_{1j} \\ d_{1j} \\ h_{1j} \end{matrix}$
5,2	-0,4575	0,4506	-1,0×	1,0	1,0	0,22	-124,2078 -4,5517 -0,1668
			-0,44×	2,0	0,0	1,22	-8,4973 -7,7024 -6,9819
			-2,28×	0,0	2,0	-0,78	-1623,3715 48,6187 -1,4561
4,1	-0,3886	0,3945	-1,0×	1,0	1,0	0,315	-140,8395 -6,3383 -0,2852
			-0,49×	2,0	0,0	1,316	-13,9784 -9,5268 -6,4929
			-2,03×	0,0	2,0	-0,685	-1306,5763 998,1047 -762,4606

дисперсии (4.35) в среднем положении компонентов вследствие симметричного хода главного луча хроматизм увеличения равен нулю; в крайних положениях его величина достигает больших значений противоположного знака, и скомпенсировать его последующими оптическими элементами не представляется возможным. Вместе с тем очевидно, что при введении радиусов ахроматизации в компоненты системы, выполненные, например, из стекол марок ТК16, Ф1, хроматические aberrации могут быть исправлены для любого положения подвижных компонентов.

Коррекция aberrаций в панкратических системах оборачивающего типа представляет собой более сложный и трудоемкий процесс по сравнению с панкратическими системами типа «коллектив», что обусловлено следующими факторами:

1) компоненты оборачивающих систем работают при больших относительных отверстиях;

2) в системах оборачивающего типа теоретически возможен большой диапазон увеличений; следовательно, составление коррекционных соотношений необходимо, по крайней мере, для трех положений подвижных компонентов.

a_{2j} d_{2j} h_{2j}	a_{3j} d_{3j} h_{3j}	b_{1j} l_{1j} k_{1j}	b_{2j} l_{2j} k_{2j}	b_{3j} l_{3j} k_{3j}	c_j g_j m_j
329,5042 —28,8875 2,5326	—124,1919 26,3274 —5,5811	181,0108 50,2025 3,4364	—658,9722 128,2004 —17,4137	315,8248 —23,3852 —4,2782	107,9708 —196,0313 19,4695
57,2095 8,7716 1,3449	—59,8663 —9,1790 —1,4074	10,6142 21,0171 29,3809	—98,0693 14,4098 6,6936	134,7865 50,9141 12,4442	—51,7726 —100,4958 —62,8437
1551,3264 —46,4607 1,3915	—230,3329 40,2141 —7,0210	2838,9308 72,4882 —6,8883	—3545,6140 259,0048 —12,3837	633,7646 —51,3186 —1,3989	393,1715 —443,1036 28,8435
354,8922 —22,8991 1,4775	—140,8420 24,5138 —4,2667	207,1177 58,7747 4,8707	—709,7909 124,8970 —13,1626	356,2387 —12,5498 —6,4232	94,1095 —220,2892 12,9579
79,5558 9,0972 1,0403	—76,0277 —8,6938 —0,9941	17,9869 27,8387 29,5915	—139,2237 21,5300 6,7444	173,6675 56,1937 10,5807	—60,4627 —124,6797 —63,3382
1367,2094 —1044,4228 797,8434	—240,2372 306,4386 —390,8829	2241,6834 —1149,1380 447,5243	—3076,2586 2930,5778 —2682,2167	651,7963 —589,8666 444,3097	397,0084 —1916,6357 2734,6416

Если не рассматривать пока условие ортоскопии $S_V = 0$ и задаться положениями, соответствующими $v_1 = -1/\sqrt{M}$; $v_2 = -1 \times$; $v_3 = -1/\sqrt{1/M}$, то абберационные свойства панкратических систем могут быть выражены совокупностью девяти линейных уравнений относительно основных параметров компонентов P_i , W_i вида:

$$S_I = a_{ij}P_i + b_{ij}W_i + c_j;$$

$$S_{II} = d_{ij}P_i + e_{ij}W_i + g_j;$$

$$S_{III} = h_{ij}P_i + k_{ij}W_i + m_j, \quad 1 \leq i \leq 3; \quad 1 \leq j \leq 3. \quad (4.37)$$

Входящие в уравнения (4.37) коэффициенты a_{ij} , b_{ij} , ..., m_j представляют собой соотношения внешних параметров, преобразованные согласно соотношениям (4.33), (4.34) и принятым ранее условиям нормировки $\alpha' = 1$; $\beta_1 = -1/\alpha_1$. Значения этих коэффициентов приведены в табл. 4.6. Дальнейший анализ панкратических систем оборачивающего типа имел своей целью выявление оптимального способа коррекции аббераций по всему диапазону увеличений

системы. Были рассмотрены два способа коррекции. В первом способе были составлены и решены системы шести линейных уравнений, соответствующих исправлению первых двух коэффициентов Зейделя для трех основных положений компонентов. По найденным значениям параметров P_i , W_i определялась третья монохроматическая сумма для этих же положений.

Из анализа полученных данных были сделаны следующие выводы.

1. Значения основных параметров P_i , W_i , соответствующие условию $S_I = S_{II} = 0$ для трех положений подвижных компонентов, как в системах с действительным положением плоскости предмета, так и в системах с мнимым положением, практически не меняются с изменением отрезка s_I .

2. В крайних положениях компонентов значения S_{III} равны между собой и близки к значению S_{III} в среднем положении.

3. Четвертая сумма Зейделя в системах с действительным положением плоскости предмета близка к нулю, а в системах с мнимым положением плоскости предмета имеет небольшие отрицательные значения.

4. Для компенсации в системах постоянного астигматизма необходимо применение дополнительных компонентов, самостоятельно скорректированных в отношении сферической аберрации и комы.

Последующие исследования показали перспективность описанного способа коррекции для создания панкратических систем с повышенными оптическими характеристиками: максимальной апертурой $\sin \sigma \approx 0,1$ (при $v = v_{\max}$) и максимальным полем зрения $2y = 100$ мм (при $v = v_{\min}$).

Во втором способе коррекции исследовался характер изменения систем при условии исправления $S_I = S_{II} = S_{III} = 0$ для $v_1 = v_{\max}$ и $v_2 = -1\times$. По найденным значениям P_i , W_i определялись значения сумм Зейделя в остальных положениях компонентов. Анализ результатов исследования показал, что во всем диапазоне перемещения компонентов отсутствует постоянство первой монохроматической суммы. Она в интервале увеличений $1 < |v| < |v_{\max}|$ достигает значений $S_I \approx -100$ ($M = 10,7\times$), а в интервале $v_{\min} < |v| < 1$ — значений $S_I \approx 40$. Вторая и третья суммы близки к нулю во всем диапазоне изменения увеличений. Таким образом, в системе, имеющей небольшие числовые апертуры, этот тип коррекции может оказаться предпочтительным.

Следует, однако, заметить, что если для выполнения требований к габаритным размерам в схемном решении прибора появляются оптические компоненты постоянного увеличения, то тем самым создается возможность использования их основных параметров для составления и решения дополнительных коррекционных уравнений. Исправление хроматических аберраций панкратических оборачивающих систем не вызывает затруднений при выполнении условия $C_i = 0$ для каждого компонента.

20. СИНТЕЗ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ПАНКРАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С МЕХАНИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ В ПАРАКСИАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ

В основу методики расчета двухкомпонентных панкратических систем с механической компенсацией может быть положено условие постоянства длины системы во всем диапазоне изменения увеличения. Этот способ впервые был предложен М. Дюнуайе [82] для расчета систем оборачивающего типа и является в настоящее время наиболее употребительным [69, 74, 78].

На рис. 4.10 изображена оптическая система, составленная из двух компонентов, имеющих оптические силы φ_1 , φ_2 и разделенных воздушным промежутком d . Эквивалентная оптическая сила такой системы будет [74]

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - d\varphi_1\varphi_2.$$

Положение плоскостей предмета и изображения определяется отрезками s_1 , s'_2 соответственно, длина системы $l = -s_1 + d + s'_2$. Воспользуемся соотношениями, выведенными в работе [74], для определения отрезков s_1 , s'_2 :

$$s_1 = (1/v - 1 + \varphi_2 d)/\varphi;$$

$$s'_2 = (1 - v - \varphi_1 d)/\varphi,$$

где v — увеличение системы в положении, определяемом воздушным промежутком d .

Подставим эти соотношения в выражение для длины системы. После преобразований получаем уравнение

$$(\varphi_1 + \varphi_2)l - \varphi_1\varphi_2ld + \varphi_1\varphi_2d^2 + (v - 1)^2/v = 0,$$

откуда

$$d^2 - ld + (f'_1 + f'_2)l + f'_1f'_2(v - 1)^2/v = 0;$$

$$d = \frac{1}{2} [l \pm \sqrt{l^2 - 4(f'_1 + f'_2)l - 4f'_1f'_2(v - 1)^2/v}]. \quad (4.38)$$

Уравнение (4.38) определяет в зависимости от увеличения v расстояние между компонентами d в системе с постоянной оптической длиной и известным фокусным расстоянием компонентов. В системе с переменным значением v расстояние между компонентами также переменное, однако смещение плоскости изображения будет отсутствовать, поскольку выполняется условие $l = \text{const}$.

Приведем также без доказательства уравнения длины отрезков, выраженные через длину системы:

$$s_1 = f'_1 \frac{d - l + (1 - v)f'_2}{f'_1 + f'_2v}; \quad (4.39)$$

$$s'_2 = f'_2 \frac{v(l - d) + (1 - v)f'_1}{f'_1 + f'_2v}. \quad (4.40)$$

Описанная методика показывает, что многообразие конструктивных решений панкратических систем с механической компенсацией

очень велико. Оно определяется областью изменения трех независимых параметров: φ_1 , φ_2 , l . Кроме того, при выбранных значениях этих параметров величина v также может меняться в достаточно широких пределах. Задача расчета панкратических систем по приведенной методике сводится к систематическому рассмотрению всех возможных комбинаций этих величин и может быть решена ввиду крайней трудоемкости только с помощью ЭВМ.

Основным недостатком рассмотренного способа построения панкратических систем с механической компенсацией является отсутствие возможности отыскания второй пары неподвижных сопряженных плоскостей, совмещаемых со зрачками системы. Кроме того, этот способ непригоден для опре-

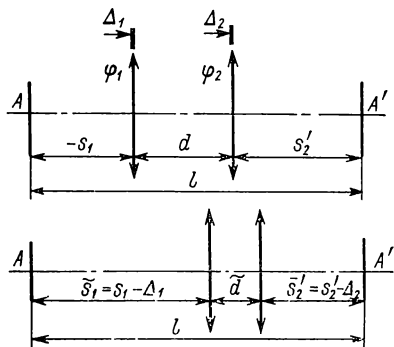


Рис. 4.10. Двухкомпонентная панкратическая система с механической компенсацией в двух положениях компонентов

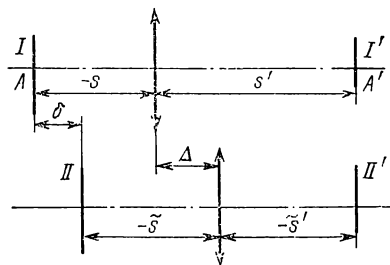


Рис. 4.11. Фокусирование двух плоскостей предмета в одну постоянную плоскость изображения с помощью подвижного компонента

деления гауссовых параметров двухкомпонентных систем, для которых предмет или изображение находится в бесконечности. Наконец, многообразие комбинаций параметров φ_1 , φ_2 , l , а также произвольный выбор значения v_{\max} приводит к необходимости перебрать все возможные комбинации четырех величин, что даже при использовании ЭВМ составляет исключительно трудоемкую задачу. Не менее затруднительна систематизация полученных решений с целью классификации систем по их функциональному признаку в оптической схеме прибора.

В связи с вышеизложенным может быть предложен следующий способ построения панкратических систем с механической компенсацией. Для этого рассмотрим фокусирующие свойства одиночного подвижного компонента, заключающиеся в способности проецировать различно расположенные плоскости предмета в одну постоянную плоскость изображения. На рис. 4.11 обозначено положение плоскости предмета I, соответствующее началу фокусируемого пространства, через s , положение плоскости предмета II, соответствующее концу фокусируемого пространства, — через \tilde{s} , положение плоскости изображения в исходный момент перемещения компонента — через s' ; положение плоскости изображения в конечный момент перемещения компонента — через \tilde{s}' . Расстояние δ

между двумя фокусируемыми плоскостями предмета I , II считаем положительным, если плоскость II смещена относительно плоскости I вправо по ходу луча.

Очевидно, что если компонент переместится на величину Δ , то положение плоскости предмета II выразится соотношением

$$\tilde{s} = s - \Delta + \delta. \quad (4.41)$$

Тогда условие постоянства положения плоскости изображения, т. е. условие фокусирования плоскостей I и II , определится равенством

$$\tilde{s}' = s' - \Delta.$$

Пользуясь соотношениями, полученными в предыдущем параграфе, найдем \tilde{s}' :

$$\begin{aligned} s' &= sf'/(s + f'); \\ \tilde{s}' &= \frac{(s - \Delta + \delta) f'}{(s - \Delta + \delta) + f'} = s' - \Delta. \end{aligned}$$

Опуская несложные преобразования, найдем зависимость перемещения компонента от параметров системы:

$$\Delta^2 - \Delta [s + \delta + sf'/(s + f')] - f'^2 \delta / (s + f') = 0. \quad (4.42)$$

Следовательно, если известно фокусное расстояние компонента f' и положение плоскости предмета \tilde{s} , то решение уравнения (4.42) определит перемещение Δ , необходимое для фокусирования объема пространства предметов, определяемого значением δ , в одну постоянную плоскость изображения.

Выражение (4.42) можно преобразовать относительно f' , что позволит исследовать гауссовы параметры фокусирующего компонента, задавая ряд значений величине s , подобно тому, как были исследованы свойства однокомпонентной панкратической системы:

$$f'^2 + f' \Delta (2s - \Delta + \delta) / \delta + s \Delta (s - \Delta + \delta) / \delta = 0. \quad (4.43)$$

Следует отметить, что если преобразовать (4.42) относительно отрезка s и положить в нем $\delta = 0$, можно получить уравнение, описывающее условие существования одиночного подвижного компонента, имеющего две пары неподвижных сопряженных плоскостей.

Таким образом, если рассматривать двухкомпонентную панкратическую систему с механической компенсацией как синтез двух элементов: одиночного подвижного компонента, создающего максимальный диапазон увеличений при перемещении на величину $\Delta_{\max} = 1$, и фокусирующего компонента, компенсирующего остаточную расфокусировку плоскости изображения δ_1 , — то можно ограничить область параметров s , δ , Δ следующими значениями (см. табл. 4.1): $-5 \leq s \leq 5$; $\delta = \pm 0,5$; $\pm 0,25$; $\Delta = \pm 0,25 \Delta_{\max}$; $\Delta = \pm 0,125 \Delta_{\max}$. Исходя из условия, что перемещение второго компонента, осуществляемое по нелинейному закону, было меньше линейного перемещения первого компонента, принимаем $\Delta_{\max} = 1$.

К достоинствам описанного способа построения двухкомпонентных панкратических систем следует отнести возможность отыскания второй пары плоскостей, неподвижных в двух крайних положениях компонентов. Действительно, поскольку первый компонент работает по принципу однокомпонентной панкратической системы, для него справедливы соотношения, выведенные в п. 16, в том числе соотношения, определяющие положение входного зрачка. Если второй компонент совершает возвратно-поступательное движение, то положение выходного зрачка системы для двух крайних положений компонентов сохраняется постоянным. Однако во всем диапазоне изменения увеличений смещение выходного зрачка может быть значительным.

В заключение следует отметить, что описанную методику также нельзя считать оптимальной для построения панкратических систем с механической компенсацией, так как она не исчерпывает все возможные варианты конструкций систем. Так, в основу создания двухкомпонентной системы может быть положен не только одиночный компонент, имеющий две точки компенсаций, но любой подвижный компонент, обладающий большим диапазоном изменения увеличения. При этом второй компонент не должен, по крайней мере, существенно сокращать этот диапазон в процессе своего фокусирующего перемещения.

В связи с этим рассмотрим третий способ построения двухкомпонентных панкратических систем с механической компенсацией. Пусть имеется два подвижных компонента с фокусными расстояниями f'_1, f'_2 , разделенных воздушным промежутком d (см. рис. 4.10). Обозначим положение плоскости предмета в исходном положении компонентов через s_1 , положение плоскости изображения — через s'_2 , максимальное перемещение компонентов относительно исходного положения — через Δ_1 и Δ_2 соответственно. Обозначим далее в смещенном положении системы передний отрезок через \tilde{s}_1 , задний отрезок — через \tilde{s}'_2 , расстояние между компонентами — через \tilde{d} , при этом $\tilde{s}_1 = s_1 - \Delta_1$.

Условие постоянства положения плоскости изображения определяется соотношением $\tilde{s}'_2 = s'_2 - \Delta_2$.

Найдем отрезки s'_2, \tilde{s}'_2 :

$$s'_1 = s_1 f'_1 / (s_1 + f'_1);$$

$$s_2 = s'_1 - d = [s_1 f'_1 - d_1 (s_1 + f'_1)] / (s_1 + f'_1);$$

$$s'_2 = s_2 f'_2 / (s_2 + f'_2).$$

В результате подстановки в последнее выражение значения s_2 получаем

$$s'_2 = \frac{s_1 f'_2 (f'_1 - d) - f'_1 f'_2 d}{s_1 (f'_1 - d + f'_2) - f'_1 d + f'_1 f'_2}. \quad (4.44)$$

Очевидно, что положение плоскости изображения \tilde{s}'_2 в смещенном положении компонентов выразится соотношением

$$\tilde{s}'_2 = \frac{(s_1 - \Delta_1)(f'_1 - d)f'_2 - f'_1 f'_2 d}{(s_1 - \Delta_1)(f'_1 - d + f'_2) - f'_1 d + f'_1 f'_2}. \quad (4.45)$$

Вместе с тем из условия постоянства положения изображения $\tilde{s}'_2 = s'_2 - \Delta_2$ имеем

$$\begin{aligned} \tilde{s}'_2 &= \frac{s_1 f'_2 (f'_1 - d) - f'_1 f'_2 d}{s_1 (f'_1 + f'_2 - d) + f'_1 (f'_2 - d)} - \Delta_2 = \\ &= \frac{s_1 [(f'_1 - d)f'_2 - (f'_1 + f'_2 - d)\Delta_2] - f'_1 [(f'_2 - d)\Delta_2 + f'_2 d]}{s_1 (f'_1 + f'_2 - d) + f'_1 (f'_2 - d)}. \end{aligned} \quad (4.46)$$

Приравняем выражения (4.45), (4.46) и перемножим перекрестно их числители и знаменатели. После приведения подобных членов получаем квадратное уравнение относительно отрезка s_1 . Уравнение имеет достаточно громоздкий вид.

Однако оно может быть значительно упрощено, если иметь в виду, что $\tilde{d} = d - \Delta_1 + \Delta_2$. Кроме того, принимаем величину перемещения первого компонента $\Delta_1 = 1$, максимальную величину перемещения второго компонента $\Delta_2 = k\Delta_1 = k$. Направление перемещения первого компонента считаем положительным, соответствующим направлению хода луча. Считаем также, что направление движения второго компонента может совпадать с перемещением первого и быть ему противоположным. Однако максимальная величина Δ_2 не должна превышать Δ_1 , т. е. $|k| < 1$.

Окончательное выражение, описывающее условие существования двухкомпонентной панкратической системы с механической компенсацией, имеет вид:

$$\begin{aligned} s_1^2 [f_2'^2 + f_1'k(2f_2' + f_1') - k(2\tilde{d} + 1 - k)(f_1' + f_2') + k\tilde{d}(\tilde{d} + 1 - k)] + \\ + s_1 [k(2\tilde{d} + 1 - k)(f_1' + f_2') - f_1'k(2\tilde{d} + 2 - k)(f_1' + 2f_2') + \\ + k\tilde{d}(\tilde{d} + 1 - k)(2f_1' - 1) + f_2'^2(2f_1' - 1) + 2f_1'^2 f_2'k] + [kf_1'(2\tilde{d} + \\ + 1 - k)(f_1' + f_2') - f_1'^2 f_2'k(2\tilde{d} + 2 - k) + f_1'k\tilde{d}(\tilde{d} - k)(f_1' - 1) - \\ - kf_1'\tilde{d} - f_1'f_2'^2] = 0. \end{aligned} \quad (4.47)$$

Таким образом, подобно одиночному подвижному компоненту двухкомпонентная система имеет две пары сопряженных плоскостей, неподвижных при перемещении компонентов из одного крайнего положения в другое. Одна из этих плоскостей является плоскостью предметов, а другая может быть использована в качестве плоскости зрачка. В связи с тем, что положение второго компонента для промежуточных значений увеличения определяется исходя из условия компенсации расфокусировки, вносимой первым компонентом, во всем диапазоне изменения увеличения имеет место постоянство положения плоскости изображения.

Для исследования класса двухкомпонентных панкратических систем с механической компенсацией преобразуем выражение (4.47)

относительно параметра f_2' — фокусного расстояния второго компонента:

$$f_2'^2 [s_1(s_1 - 1) + f_1'(2s_1 - 1)] - f_2'k[(2\bar{d} + 1 - k)(s_1^2 - s_1 - f_1') + f_1'(2 + 2\bar{d} - k)(2s_1 + f_1') - 2s_1f_1'(f_1' + s_1)] - k[f_1'^2 s_1(2\bar{d} + 2 - k - s_1) - f_1'^2 \bar{d}(\bar{d} - k) + f_1'(2\bar{d} + 1 - k)(s_1^2 - s_1 - f_1') + \bar{d}(\bar{d} + 1 - k)(f_1' - s_1^2 + s_1 - 2f_1's_1)] = 0. \quad (4.48)$$

Дальнейшее исследование гауссовых параметров двухкомпонентных панкратических систем проводилось следующим образом. Исходя из условия максимальной компактности габаритных размеров величина воздушного промежутка \bar{d} в крайнем положении компонентов была принята равной 0,15 (с учетом положения главных плоскостей компонентов).

Положение плоскости предмета задавалось в интервале значений s_1 от 0 до ± 5 (как при исследовании одиночного подвижного компонента). Коэффициент k , определяющий максимальное перемещение второго компонента по отношению к первому, был принят двух значений: $\pm 0,5$; $\pm 0,25$. В качестве свободного параметра, определяющего многообразие конструктивных решений двухкомпонентных панкратических систем для заданного положения плоскости предметов s_1 , было выбрано фокусное расстояние первого компонента f_1' .

В табл. 4.7 приведены результаты расчета гауссовых параметров ряда систем. Из анализа расчетных данных можно сделать следующие выводы.

1. В области значений отрезка s_1 от 0 до ± 5 существуют действительные корни квадратного уравнения (4.48) как для положительных, так и для отрицательных значений f_1' . При этом возникает большое многообразие типов систем, отличающихся положением плоскости предмета и изображения.

2. Уменьшение перемещения второго компонента, определяемого коэффициентом k , не изменяет тип системы, а лишь сокращает ее диапазон увеличений.

3. Для каждого значения отрезка s_1 и фокусного расстояния f_1' существует решение уравнения (4.48) для одного направления перемещения второго компонента, определяемого знаком коэффициента k . Этот вывод согласуется с результатами исследования свойств фокусирующего компонента.

Отметим преимущества предложенного способа построения двухкомпонентных панкратических систем.

1. При нахождении гауссовых параметров систем сокращено число независимых переменных, что существенно упрощает задачу определения области, пригодной для практической реализации.

2. Выбор в качестве одного из параметров $\bar{d}_1 = d_{\min}$ обеспечивает компактность габаритных размеров систем.

3. Описание свойств панкратических систем с помощью параметра s_1 позволяет вывести условие существования двух пар непо-

s_1	f'_1	k	f'_{21}	s'_{21}	u_{21}	\overline{u}_{21}	M_1	f'_{22}	s'_{22}	u_{22}	\overline{u}_{22}	M
-2,0	1,25	-0,5	-8,1610	1,9645	-2,068	-0,930	2,224	-0,9640	-2,4645	2,594	0,741	3,500
	-0,50	-0,5	0,4038	0,4972	-0,046	-0,210	4,540	-1,8597	-0,9972	0,093	0,105	1,129
	-0,75	-0,5	0,4811	0,6087	-0,072	-0,261	3,607	-2,1446	-1,1087	0,132	0,143	1,083
	-1,25	-0,5	0,6040	0,7945	-0,121	-0,336	2,772	-2,6627	-1,2945	0,198	0,206	1,040
-3,0	-0,38	-0,5	0,3636	0,4405	-0,024	-0,136	5,786	-1,7146	-0,9405	0,050	0,064	1,280
	-0,50	-0,5	0,4109	0,5064	-0,033	-0,161	4,850	-1,8706	-1,0060	0,066	0,081	1,227
	-0,75	-0,5	0,4945	0,6263	-0,053	-0,202	3,785	-2,1630	-1,1263	0,096	0,112	1,167
	-1,25	-0,5	0,6318	0,8313	-0,093	-0,264	2,838	-2,6935	-1,3313	0,149	0,165	1,107
-4,0	-0,50	-0,5	0,4155	0,5125	-0,026	-0,131	5,034	-1,8797	-1,0125	0,051	0,066	1,294
	-0,75	-0,5	0,5032	0,6381	-0,042	-0,165	3,890	-2,1796	-1,1381	0,075	0,092	1,227
	-1,00	-0,5	0,5808	0,7521	-0,059	-0,193	3,266	-2,4601	-1,2301	0,098	0,116	1,184
	-0,50	-0,5	0,4186	0,5167	-0,021	-0,110	5,158	-1,8869	-1,0167	0,042	0,056	1,333
-5,0	-0,75	-0,5	0,5094	0,6465	-0,035	-0,139	3,959	-2,1932	-1,1465	0,062	0,078	1,258
	-1,00	-0,5	0,5905	0,7655	-0,049	-0,163	3,306	-2,4808	-1,2655	0,082	0,099	1,207
	0,75	-0,5	0,1853	0,2155	-0,070	-2,862	40,954	-1,5603	-0,7155	0,232	0,862	3,714
	-0,75	-0,5	-0,8086	-0,6910	-0,436	0,7638	-1,752	0,1836	0,1910	0,121	-2,764	-22,843
+2,0	0,50	-0,5	-0,1051	-0,0975	0,014	1,610	111,490	-0,5734	-0,4025	0,060	0,390	6,540
	-0,50	-0,50	0,6637	0,9150	0,126	1,132	8,970	-3,4137	-1,4150	-0,195	-0,732	3,750

движных сопряженных плоскостей, одна из которых является плоскостями предмета и изображения, а вторая — плоскостями зрачков систем.

4. Выбор в качестве исходного параметра переднего отрезка s_1 позволяет провести классификацию двухкомпонентных панкратических систем по функциональному признаку с целью дальнейшего использования их в сложных оптических схемах приборов.

21. ОПТИМИЗАЦИЯ АБЕРРАЦИЙ В ПАНКРАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С МЕХАНИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ

Постановка задачи коррекции aberrаций в панкратических системах с механической компенсацией смещения плоскости изображения принципиально не отличается от подобной задачи применительно к системам с оптической компенсацией. Вместе с тем ее решение в первом случае представляет значительные трудности, что обусловлено следующими факторами.

1. Теоретически неограниченным диапазоном изменения увеличения в системах с нелинейным законом перемещения компонентов вследствие отсутствия в них расчетной расфокусировки.

2. Уменьшенным по сравнению с системами с оптической компенсацией числом коррекционных параметров при условии построения оптических конструкций из тонких компонентов.

3. Многообразием типов систем с механической компенсацией, затрудняющих исследование их коррекционных возможностей в общем виде.

Из всего многообразия типов панкратических систем с механической компенсацией в области микроскопии перспективны конструкции, отличающиеся максимальной компактностью габаритных размеров и стабильностью положения зрачков в пространстве предметов и изображений. Если рассматривать двухкомпонентную панкратическую систему как синтез двух элементов: одиночного подвижного компонента, создающего необходимый диапазон увеличений, и фокусирующего, то представляет практическое значение исследование aberrационных свойств первого компонента, оптические параметры которого меняются в наибольшей степени.

Рассмотрим возможность достижения постоянства монохроматических сумм Зейделя в трех положениях компонента, которое при выбранных ранее условиях нормировки будет отвечать условию постоянства соответствующих aberrаций третьего порядка. В качестве основных положений принимаем следующие: I) $\Delta_1 = 0$; $v_1 = -\sqrt{M}$; II) $\Delta_2 = s + 2f'$; $v_2 = -1$; III) $\Delta_3 = 1$; $v_3 = -\sqrt{1/M}$, где Δ — перемещение компонента; s — положение плоскости предмета в начальный момент перемещения компонента. Тогда будем иметь:

для положения I

$$\mathcal{P} = (1 - v)^3 P + 4v(1 - v)^2 W + v(1 - v)(5,3v - 1);$$

$$\mathcal{W} = (1 - v)^2 W + 2,65v(1 - v);$$

$$\dot{S}_I = sv\mathcal{P};$$

$$S_{II} = -s_P\mathcal{P}/v - (s - s_P)\mathcal{W};$$

$$S_{III} = s_P^2\mathcal{P}/sv^3 + 2s_P(s - s_P)\mathcal{W}/sv^2 + (s - s_P)^2\varphi,$$

где s_P — положение входного зрачка компонента в начальный момент перемещения;

для положения II

$$\mathcal{P} = 8P - 16W + 12,6;$$

$$\mathcal{W} = 4W - 5,3;$$

$$S_I = -(s - \Delta_2)\mathcal{P};$$

$$S_{II} = (s_P - \Delta_2)\mathcal{P} - (s - s_P)\mathcal{W};$$

$$S_{III} = -(s_P - \Delta_2)^2\mathcal{P}/(s_2 - \Delta_2) + 2(s_P - \Delta_2)(s - s_P)\mathcal{W}/(s - \Delta_2) + (s - s_P)^2\varphi;$$

для положения III

$$\mathcal{P} = [-(1 - v)^3 P + 4(1 - v)^2 W - (1 - v)(5,3 - v)]/v^3;$$

$$\mathcal{W} = [(1 - v)^2 W - 2,65(1 - v)]/v^2,$$

$$S_I = (s_1 - 1)\mathcal{P}/v;$$

$$S_{II} = -(s_P - 1)v\mathcal{P} - (s - s_P)\mathcal{W};$$

$$S_{III} = (s_P - 1)v^3\mathcal{P}/(s - 1) + 2(s - s_P)(s_P - 1)v^2\mathcal{W}/(s - 1) + (s - s_P)^2\varphi.$$

В табл. 4.8 приведены значения монохроматических сумм Зейделя для трех положений компонента, описываемого параметром $s = -0,5$ (см. табл. 4.1), найденные из условия $S_I = \text{const}$ для увеличений $v_1 = -1/\sqrt{M}$ и $v_3 = -1/\sqrt{M}$.

Т а б л и ц а 4.8

P	W	$v_1 = -1/\sqrt{M}$			$v_2 = -1$			$v_3 = -1/\sqrt{M}$		
		S_I	S_{II}	S_{III}	S_I	S_{II}	S_{III}	S_I	S_{II}	S_{III}
-5,496	-0,758	-5,0	-55,75	-14,28	-14,42	-20,03	-16,13	-5,0	4,34	2,39
0,806	1,325	0,0	-13,25	-0,25	-1,61	-1,08	3,45	0,0	1,47	-0,25
1,436	1,533	0,5	-9,0	1,15	-0,38	0,82	5,41	0,5	1,18	-0,51
7,108	3,408	5,0	29,25	13,78	11,20	17,88	23,03	5,0	-1,40	-2,89

Анализ данных таблицы показывает, что при определенном сочетании основных параметров компонента P , W может быть достигнуто условие постоянства первой монохроматической суммы для трех значений увеличения. Очевидно, что введение фокусирующего компонента, также обладающего двумя коррекционными параметрами, позволит выполнить условие постоянства двух монохроматических сумм для трех значений увеличения.

Дальнейшее усложнение конструкции системы переменного масштаба изображения приведет к необходимости решать задачу опти-

мизации ее аберраций с помощью ЭВМ. Опыт создания объективов переменного фокусного расстояния для целей киносьемочной и телевизионной техники показывает, что подобные задачи решаются в настоящее время вполне успешно.

22. АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАНКРАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Вопрос о точности изготовления панкратических систем является одним из принципиальных, определяющих перспективность их применения в приборах серийного выпуска. Если рассматривать систему переменного увеличения в любом фиксированном положении компонентов, то в общем случае расчет допусков на изготовление ее оптических элементов ничем не отличается от расчета допусков систем постоянного увеличения. Однако в панкратических системах в результате отступления параметров (фокусных расстояний, воздушных промежутков, рабочего расстояния) от номинальных значений может возникать расфокусировка плоскости изображения, величину которой необходимо установить еще на стадии габаритного расчета. Стабильность положения плоскости изображения при неточности изготовления оптических элементов определяет возможность конструктивной реализации систем. Этот фактор необходимо рассматривать наравне с их коррекционными возможностями, поскольку он обуславливает возможность достижения высокого качества изображения в процессе изготовления и сборки [30].

Определим расфокусировку плоскости изображения в зависимости от ошибок выполнения параметров панкратических систем. Используя известную формулу отрезков, найдем положение плоскости изображения, создаваемого компонентом с фокусным расстоянием f'_2

$$s'_i = s_i f'_i / (s_i + f'_i).$$

Дифференцируя это соотношение по переменной f'_i и учитывая, что $s_i + f'_i = f'_i / v_i$, найдем смещение плоскости изображения, вызванное ошибкой $\delta f'_i$,

$$\delta s'_i = (s_i / f'_i)^2 v_i^2 \delta f'_i.$$

В n -компонентной системе величина $\delta s'_i$ проецируется в пространство изображений пропорционально продольному увеличению компонентов, начиная с номера $i + 1$. Следовательно, в общем виде имеем

$$\delta s'_n = (s_i / f'_i)^2 \delta f'_i \prod_{v=i}^n v_v^2. \quad (4.49)$$

Аналогичным образом получаем выражение, определяющее влияние изменения воздушных промежутков между компонен-

тами δd_i и переднего отрезка δs_1 на смещение плоскости изображения:

$$\delta s'_n = -\delta d_i \prod_{v=i+1}^n v_v^2; \quad (4.50)$$

$$\delta s'_n = \delta s_1 \prod_{v=i}^n v_v^2. \quad (4.51)$$

Отметим, что соотношения, полученные в работе [55] для расчета расфокусировки плоскости изображения в двухкомпонентных панкратических системах с механической компенсацией, после дополнительных несложных преобразований легко приводятся к выражениям (4.49)—(4.51).

Найдем численные значения коэффициентов при переменных $\delta f'_i$, δd_i , δs_1 в трехкомпонентных панкратических системах с оптической компенсацией большой кратности. Для удобства вычислений введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} k_1 &= (s_1/f'_1)^2 v_1^2 v_3^2 = (s_1/f'_1)^2 k_6; \\ k_2 &= (s_2/f'_2)^2 v_2^2 v_3^2 = - (s_2/f'_2)^2 k_4; \\ k_3 &= (s_3/f'_3)^2 v_3^2 = - (s_3/f'_3)^2 k_5; \\ k_4 &= -v_2^2 v_3^2; \\ k_5 &= -v_3^2; \\ k_6 &= v_1^2 v_2^2 v_3^2 = v^2. \end{aligned} \quad (4.52)$$

Для определения гауссовых параметров систем воспользуемся методикой Бергштейна. Предпочтительность этой методики для дальнейшего исследования состоит прежде всего в том, что она позволяет определить положение точек оптической компенсации, в которых теоретическая расфокусировка плоскости изображения отсутствует, с помощью постоянного, известного параметра — диапазона увеличений $M = v_{\max}/v_{\min}$. Таким образом, создается возможность определять приращения расфокусировки $\delta s'_n$ (вызванные погрешностями выполнения параметров f'_i , d_i , s_1) относительно нулевых ее значений в известных положениях компонентов, что в свою очередь упрощает рассмотрение процесса юстировки систем.

В табл. 4.9 представлены результаты расчета гауссовых параметров и теоретической расфокусировки плоскости изображения $\delta s'_0$, приведенных к величине максимального перемещения компонентов $\Delta_{\max} = 1$ для двух панкратических систем с диапазоном: $M = 4\times$; $M = 8\times$. В табл. 4.10 даны значения коэффициентов k_j ($j = 1, \dots, 2i$, где i — число компонентов), а также смещений $\delta s'_j$, найденные по формулам (4.49)—(4.51) при следующих значениях исследуемых параметров: $\delta f'_i/f'_i = 1\%$; $\delta d_i = 0,01\Delta_{\max}$; $\delta s_1 = 0,01\Delta_{\max}$, где $\Delta_{\max} = 1$.

Данные табл. 4.9 показывают, что в системах имеет место оптимальный ход кривых остаточных смещений плоскости изображения $\delta s'_0 = f(\Delta)$, соответствующий четырем точкам оптической компен-

Т а б л и ц а 4.9

M	f'_1	f'_2	f'_3	Δ	s_1	d_1	d_2	s'_3	v	$\delta s'_0$
4	1,6187	—0,9820	1,5847	0,0	—3,6967	1,1537	0,15	4,5620	—1,932	0
				0,1138	—3,8105	1,0399	0,2638	4,4443	—1,804	—0,0037
				0,2275	—3,9242	0,9262	0,3775	4,3344	—1,412	0
				0,4345	—4,1312	0,7192	0,5845	4,1320	—1,058	0,0047
				0,6415	—4,3382	0,5122	0,7915	3,9205	—0,792	0
				0,8208	—4,5175	0,3329	0,9708	3,7374	—0,616	—0,0037
				1,0	—4,6967	0,1537	1,15	3,5620	—0,483	0
8	1,1468	—0,5975	1,0866	0	—2,4939	1,1363	0,11	3,2820	—2,639	0
				0,1002	—2,5941	1,0361	0,2102	3,1679	—2,150	—0,0135
				0,2002	—2,6941	0,9361	0,3102	3,0807	—1,754	0
				0,4072	—2,9011	0,7291	0,5172	2,8906	—1,138	0,0162
				0,6142	—3,1081	0,5221	0,7242	2,6678	—0,728	0
				0,8071	—3,3010	0,3292	0,9171	2,4630	—0,485	—0,0115
				1,0	—3,4939	0,1363	1,11	2,2820	—0,330	0

Т а б л и ц а 4.10

M	Δ	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_6	$\delta s'_{31}$	$\delta s'_{32}$	$\delta s'_{33}$	$\delta s'_{34}$	$\delta s'_{35}$	$\delta s'_{36}$
4	0,0	19,4703	19,0025	8,2902	—6,1518	—3,5306	3,7326	0,3152	0,1866	0,1866	0,1314	—0,0615	—0,0353	0,0373
	0,2275	11,7114	14,0272	7,4798	—4,0436	—3,0102	1,9937	0,1896	0,1377	0,1377	0,1185	—0,0404	—0,0301	0,0199
	0,6415	4,5050	7,9256	6,1207	—1,7716	—2,1727	0,6273	0,0729	0,0778	0,0778	0,0970	—0,0177	—0,0217	0,0063
	1,0	1,9652	4,6941	5,0546	—0,8437	—1,5575	0,2323	0,0318	0,0461	0,0461	0,0801	—0,0084	—0,0156	0,0023
8	0	32,9353	26,2242	9,1202	—9,6143	—4,0804	6,9643	0,3780	0,1567	0,1567	0,0991	—0,0961	—0,0408	0,0696
	0,2002	16,9789	17,6588	8,0367	—5,6034	—3,3672	3,0765	0,1947	0,1055	0,1055	0,0873	—0,0560	—0,0337	0,0308
	0,6142	3,8983	7,2956	6,0280	—1,5524	—2,1176	0,5307	0,0447	0,0436	0,0436	0,0655	—0,0155	—0,0212	0,0053
	1,0	1,0107	3,1523	4,4103	—0,4561	—1,2102	0,1089	0,0116	0,0188	0,0188	0,0479	—0,0046	—0,0121	0,0011

сации. Из анализа результатов расчетов, приведенных в табл. 4.10, можно сделать следующие выводы.

1. Панкратические системы с оптической компенсацией обобщающего типа независимо от диапазона увеличений обладают высокой чувствительностью к погрешностям изготовления их конструктивных элементов.

2. Технологическая расфокусировка, обусловленная весьма малыми отклонениями от номинальных значений f_i , d_i , s_1 , значительно превышает максимальные теоретические значения $\delta s'_0$.

3. Ошибки изготовления систем имеют наибольшее влияние на расфокусировку плоскости изображения в области максимальных увеличений.

4. Ошибки выполнения фокусных расстояний первого и второго компонентов оказывают наибольшее влияние.

Для решения вопроса о возможности компенсации погрешностей выполнения фокусных расстояний компонентов в процессе юстировки систем может быть предложен следующий прием. Располагая тремя переменными d_1 , d_2 , s_1 , составим систему трех линейных уравнений, определяющих условие компенсации ошибок $\delta f'_i$ в трех положениях компонентов, соответствующих трем точкам оптической компенсации:

$$k_4 \delta d_1 + k_5 \delta d_2 + k_6 \delta s_1 = - \sum_{i=1}^{i=3} k_i \delta f'_i. \quad (4.53)$$

Очевидно, что отклонения от номинальных значений фокусных расстояний компонентов можно считать скомпенсированными, если остаточная расфокусировка во всем диапазоне перемещения компонентов не превышает величины $\delta s'_{0\max}$.

Для исследуемых систем составим и решим уравнения вида (4.53) при следующих исходных условиях.

1. В качестве точек компенсации выберем положения компонентов, соответствующие наибольшей чувствительности к погрешностям изготовления, т. е. для системы с диапазоном $M = 4\times$ — точки $\Delta_1 = 0$; $\Delta_2 = 0,2275$; $\Delta_3 = 0,6415$; для системы с диапазоном $M = 8\times$ — точки $\Delta_1 = 0$; $\Delta_2 = 0,2002$; $\Delta_3 = 0,6142$.

2. Величины погрешностей $\delta f'_i/f'_i$ для всех компонентов примем одного знака, что соответствует наибольшим суммарным приращениям $\delta s'_n$.

В табл. 4.11 приведены результаты расчета остаточной расфокусировки плоскости изображения для системы с диапазоном $M = 8\times$ при новых значениях гауссовых параметров, найденных в соответствии с корнями уравнений (4.53): $\delta d_1 = \pm 0,0241$; $\delta d_2 = \pm 0,0481$; $\delta s_1 = \pm 0,0296$.

Анализ результатов расчета показывает:

1) остаточная расфокусировка при минимальном увеличении системы (в четвертой точке оптической компенсации) не превышает $\delta s'_{0\max}$;

2) приращение расфокусировки в промежуточных положениях

Таблица 4.11

$\Delta f_i'/f_i$	f_1'	f_2'	f_3'	Δ	s_1	d_1	d_2	s_3'	v	$\delta s_o'$
+1,0 %	1,1583	-0,5915	1,0975	0,0	-2,5235	1,1604	0,1581	3,2810	-2,567	0,0
				0,1002	-2,6237	1,0602	0,2583	3,1689	-2,091	-0,0129
				0,2002	-2,7237	0,9602	0,3583	3,0811	-1,706	0,0
				0,4072	-2,9307	0,7532	0,5653	2,8878	-1,104	0,0140
				0,6142	-3,1377	0,5462	0,7723	2,6669	-0,709	0,0
-1,0 %	1,1353	-0,6035	1,0757	0,8071	-3,3306	0,3533	0,9652	2,4657	-0,473	-0,0082
				1,0	-3,5235	0,1604	1,1581	2,2881	-0,323	0,0071
				0,0	-2,4643	1,1122	0,0619	3,2821	-2,713	0,0
				0,1002	-2,5645	1,0120	0,1621	3,1671	-2,210	-0,0148
				0,2002	-2,6645	0,9120	0,2621	3,0821	-1,804	0,0
				0,4072	-2,8715	0,7050	0,4691	2,8936	-1,171	0,0187
				0,6142	-3,0785	0,4980	0,6761	2,6692	-0,749	0,0
				0,8071	-3,2715	0,3050	0,8691	2,4608	-0,497	-0,0141
				1,0	-3,4643	0,1122	1,0619	2,2763	-0,337	-0,0058

компонентов не превышает 15—20 % от $\delta s_{j\max}$;

3) положительные значения отклонений $\delta f_i'$ улучшают ход кривой остаточных смещений плоскости изображения.

Таким образом, в результате изменения переднего отрезка s_1 и расстояния между жестко связанными подвижными компонентами $d = d_1 + d_2$ в системе может быть практически полностью устранена расфокусировка плоскости изображения, вызванная погрешностями выполнения параметров фокусных расстояний компонентов в пределах $\delta f_i'/f_i = 1\%$.

Вместе с тем из анализа точностей изготовления конструктивных элементов панкратических систем большой кратности следует, что при допусках на толщины линз и воздушные промежутки между линзами $\delta d \leq 0,1$ мм, а также на отклонения поверхностей от пробного стекла $m = 3$ ошибка фокусных расстояний компонентов (при конструктивной реализации компонента, например, из двух склеенных линз) не превышает величины $\delta f_i'/f_i = 0,5 \div 0,7\%$. При этом влияние погрешностей пробных стекол и оптических материалов исключается в результате поверочного расчета систем для фактических значений показателей преломления и радиусов пробных стекол,

23. ИССЛЕДОВАНИЕ БЛИКОВ В ПАНКРАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ МИКРОСКОПОВ

В гл. III было показано, что существенное влияние на качество изображения микрообъектов отраженного света оказывает рассеянный свет, образующийся в результате отражения рабочего светового потока от оптических поверхностей линз объектива. А. П. Грамматиным был предложен метод расчета рефлексов первого порядка, позволяющий оценивать их влияние на контраст изображения непрозрачных объектов. Далее им было выполнено теоретическое исследование, показывающее, что в оптических системах проходящего света, установленных вблизи плоскости объекта, например коллективных линзах окуляров с мнимым положением передней фокальной плоскости, возможно появление так называемых бли-

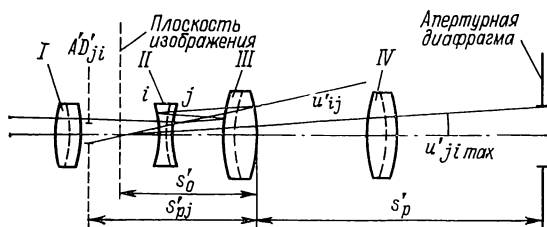


Рис. 4.12. Ход отраженного луча в панкратическом коллективе

ков второго порядка [15]. Эти блики, возникающие в результате двукратного отражения от поверхностей линз могут достигать значительной интенсивности и создавать освещенность засветки, соизмеримую с освещенностью основного изображения.

Есть все основания полагать, что подобный недостаток может быть присущ и более сложным оптическим системам, в том числе панкратическим системам типа коллектив. На рис. 4.12 изображена панкратическая система с ходом лучей, отраженных последовательно от двух поверхностей j и i , рассматриваемых как зеркальные. Каждая поверхность образует группу бликов, являющихся паразитными изображениями полевой и апертурной диафрагм осветительной системы микроскопа. Определим освещенность засветки, создаваемую рефлексами второго порядка в плоскости изображения. Освещенность основного изображения определяется соотношением

$$E_0 = \pi B_0 \tau_0 \sin^2 \sigma'_0,$$

где B_0 — яркость пучка лучей перед панкратической системой; τ_0 — коэффициент пропускания панкратической системы; σ'_0 — задний апертурный угол. Если пренебречь потерями, обусловленными поглощением в стекле, и принять коэффициент отражения ρ одинаковым для всех поверхностей, то коэффициент пропускания панкратической системы составит величину

$$\tau_0 = (1 - \rho)^n,$$

где n — число граничащих с воздухом поверхностей.

При вычислении освещенности засветки в многокомпонентной оптической системе целесообразно учитывать ослабление интенсивности паразитного пучка вследствие отражения от преломляющих поверхностей. Так как между отражающими поверхностями j и i расположено дополнительно $2(j-i-1)$ преломляющих поверхностей, общее число поверхностей в случае паразитного пучка составит $n_1 = n + 2(j-i-1)$.

Тогда освещенность засветки, создаваемая рефлексом второго порядка, будет определяться выражением

$$E_{ji} = \pi B (1 - \rho)^{n+2(j-i-1)} \rho^2 \sin^2 \sigma'_{ji},$$

где σ'_{ji} — апертурный угол засветки.

В результате расчета рефлексов второго порядка, выполненного на ЭВМ, находим положение в масштабе паразитных изображений полевой и апертурной диафрагм в трех положениях подвижных компонентов, соответствующих увеличениям

$$v_1 = 1/\sqrt{M}; v_2 = 1; v_3 = \sqrt{M}.$$

Апертурные углы вычисляются по формуле

$$\operatorname{tg} \sigma'_{ji} = D'_{ji}/2(s'_0 - s'_{ji}),$$

где D'_{ji} — диаметр паразитного изображения диафрагмы, наблюдаемой из центра поля зрения под наименьшим углом; s'_0 — положение плоскости изображения относительно последней поверхности; s'_{ji} — положение паразитного изображения относительно последней поверхности.

При расчете углов засветки диаметр апертурной диафрагмы во всем диапазоне изменения увеличения принимаем постоянным и равным

$$D_{\text{а. д}} = 2(s - s_p) \sin \sigma,$$

где s — положение плоскости предмета панкратической системы; s_p — положение входного зрачка; σ — передний апертурный угол.

Диаметр полевой диафрагмы считаем переменным в соответствии с равенством

$$D_{\text{п. д}} = 2y'/v,$$

где $2y'$ — линейный размер изображения, ограничиваемый приемным устройством, т. е. $2y' = \text{const}$. В качестве исходных данных для последующих вычислений имеем $\sin \sigma = 0,03$; $D_{\text{п. д}} = 25$ мм; $v_{\min} = 0,56\times$; $s - s_p = 160$ мм.

Анализ результатов расчета показывает, что освещенность засветки создается паразитными изображениями апертурной диафрагмы; во всем диапазоне изменения увеличения существуют блики с числовой апертурой, значительно превышающей апертуру рабочего пучка; большая часть этих бликов находится в непосредственной близости к плоскости изображения и имеет диаметр, значительно меньший диаметра поля зрения.

Покажем, что апертурный угол засветки не может превышать величины, определяемой соотношением

$$\operatorname{tg} \sigma'_{ji} = D_3 / 2s'_{\max}, \quad (4.54)$$

где D_3 — диаметр третьего компонента панкратической системы; s'_{\max} — положение изображения относительно последней поверхности при максимальном увеличении системы.

В панкратическом коллективе отсутствует действительное положение плоскости изображения, поэтому для проецирования изображения в плоскость приемного устройства необходим дополнительный компонент, диаметр которого D_4 определяется сечением световой трубки, образованной линейным размером изображения и диаметром выходного зрачка системы. Так как этот компонент не может быть расположен ближе, чем на расстоянии s'_{\max} к плоскости изображения панкратического коллектива, то $D_4 \leq D_3$, т. е. должно выполняться условие (4.54).

Следует напомнить, что при визуальных исследованиях объекта апертура засветки ограничивается диаметром зрачка глаза наблюдателя и не может значительно превышать апертуру рабочего пучка. При использовании же в качестве приемного устройства фотопленки, экрана или видикона естественное ограничение паразитного пучка отсутствует.

Для характеристики влияния рефлексов на контраст изображения в работе [13] предложен коэффициент, определяемый как отношение освещенности засветки к освещенности основного изображения. При наличии рефлексов второго порядка применительно к изображению бесструктурного объекта, т. е. при $E_0 = \text{const}$, этот коэффициент определяется выражением

$$e_{ji} = E_{ji}/E_0 = (1 - \rho)^{2(i-1)} \rho^2 (\sin \sigma'_{ji} / \sin \sigma'_0)^2.$$

Найдем суммарное действие рефлексов, определяемое коэффициентом

$$e_p = \sum_{i=1}^{i=n-1} \sum_{j=i+1}^{j=n} e_{ji}$$

при трех положениях подвижных компонентов панкратического коллектива, учитывая установленное соотношением (4.54) ограничение числовой апертуры засветки и принимая коэффициент отражения просветленных поверхностей $\rho = 1,5\%$. Из результатов, приведенных в табл. 4.12 (см. коэффициент e_1), следует, что наиболее неблагоприятным с точки зрения величины e_p является диапазон работы панкратической системы вблизи $v = 1\times$. В этом диапазоне задний апертурный угол начинает уменьшаться, а предельная апертура засветки остается постоянной ($\sin \sigma'_{ij} \approx 0,15$), так что

$$(\sin \sigma'_{ji} / \sin \sigma'_0)_{\max} = 5.$$

Еще большего значения это соотношение достигает при уменьшении передней апертуры панкратической системы. Так, если $\sin \sigma_0 = 0,0125$ (например, используется объектив микроскопа

№ поверхности		Коэффициенты засветки, %								
		$v_1 = 0,56\times$			$v_2 = 1\times$			$v_3 = 1,66\times$		
i	j	e_1	e_2	e_3	e_1	e_2	e_3	e_1	e_2	e_3
1	2	0,005	0,005	0,022	0,010	0,010	0,022	0,036	0,036	0,022
	3	0,187	0,022	0,022	0,017	0,017	0,022	0,016	0,016	0,016
	4	0,005	0,005	0,022	0,179	0,067	0,022	0,024	0,024	0,021
	5	0,006	0,006	0,020	0,026	0,026	0,020	0,035	0,035	0,020
	6	0,171	0,020	0,020	0,537	0,063	0,020	0,006	0,006	0,006
2	3	0,007	0,007	0,022	0,050	0,050	0,022	0,067	0,067	0,022
	4	0,001	0,001	0,006	0,001	0,001	0,003	0,003	0,003	0,003
	5	0,001	0,001	0,010	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001
	6	0,004	0,004	0,020	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001	0,001
3	4	0,193	0,022	0,022	0,012	0,012	0,022	0,003	0,003	0,003
	5	0,187	0,022	0,022	0,005	0,005	0,014	0,001	0,001	0,001
	6	0,041	0,021	0,021	0,022	0,022	0,021	0,001	0,001	0,001
4	5	0,012	0,012	0,022	0,007	0,007	0,020	0,007	0,007	0,007
	6	0,007	0,007	0,022	0,169	0,069	0,022	0,006	0,006	0,006
5	6	0,006	0,006	0,022	0,003	0,003	0,008	0,002	0,002	0,002
Σe_i		0,833	0,161	0,295	0,987	0,354	0,243	0,209	0,209	0,132

$100 \times 1,25$), то при увеличении панкратического коллектива $v_2 = 1\times$ максимально возможное соотношение $\sin \sigma'_{ji} / \sin \sigma'_0 \approx 10$.

Для уменьшения освещенности, создаваемой рефлексам второго порядка в панкратическом коллективе, может быть предложено простое и эффективное средство. Как известно, панкратический коллектив имеет действительное положение выходного зрачка, постоянное во всем диапазоне изменения увеличения. Таким образом, если в выходном зрачке коллектива установить апертурную диафрагму, диаметр которой рассчитан исходя из оптимальных условий работы микроскопа, то коэффициент e_p может быть уменьшен в 5—10 раз. При этом оптимальные условия работы прибора как при визуальных исследованиях объекта, так и при микрофотографировании и микрокиносъемке целесообразно связывать с известным соотношением $\Gamma = (500 \div 1000)A$, рассматриваемым применительно ко всем объективам, входящим в комплект микроскопа. Если в микроскопе используются объективы с увеличением от $2,5$ до $100\times$, а увеличение панкратической системы совместно с дополнительным компонентом $v = 1 \div 3\times$ и окуляра $\Gamma = 6\times$, то с точки зрения условия полезного увеличения оптимальным значением передней числовой апертуры

окуляр можно считать $\sin \sigma_0 \leq 0,010$; тогда для панкратической системы $\sin \sigma'_0 \approx 0,018$.

В табл. 4.12 приведены значения коэффициентов e_2 и e_3 , вычисленные применительно к предельным апертурам засветки $\sin \sigma'_{i1} = 0,0532$ и $\sin \sigma'_i = 0,018$ соответственно. Хотя значение $\sin \sigma'_{i1} = 0,018$ найдено из условия полезного увеличения, для некоторых типов объектов уменьшение диаметра апертурной диафрагмы при микрофотографировании и микрокиносъемке может быть нежелательно из-за низкого уровня освещенности в плоскости изображения. Поэтому вопрос об оптимальном диаметре апертурной диафрагмы, а следовательно, и о допустимом значении e_0 находится в зависимости от типа объекта, точнее от соотношения коэффициента пропускания (или отражения) отдельных его элементов.

Ограничение числовой апертуры засветки с помощью диафрагмы, расположенной в выходном зрачке панкратического коллектива, особенно целесообразно в тех моделях микроскопов, в которых для проекции изображения на пленку или экран используются гомали — оптические системы отрицательной силы, не имеющие действительного положения выходного зрачка. Кроме того, такой способ устранения рефлексов обладает тем преимуществом, что его действие одновременно влияет на все каналы наблюдения, в том числе и на визуальный.

В качестве дополнительного средства уменьшения (приблизительно в 2—3 раза) освещенности засветки может быть рекомендовано использование эффективного трехслойного просветляющего покрытия с интегральным коэффициентом отражения $\rho = 0,5\%$ для поверхностей, создающих наиболее интенсивные рефлексы.

Глава V

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИКИ МИКРОСКОПОВ НА ОСНОВЕ ПАНКРАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

24. ПАНКРАТИЧЕСКИЕ ОСВЕТИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

В современных микроскопах для освещения объектов в проходящем свете используется система, состоящая из двух оптических элементов: коллектора, расположенного вблизи источника света, и конденсора, находящегося перед исследуемым объектом. Изображение источника света, создаваемого коллектором, в увеличенном масштабе проецируется в апертурную диафрагму конденсора, расположенную в его передней фокальной плоскости, а полевая диафрагма, установленная в непосредственной близости к коллектору, изображается конденсором в плоскость объекта. Эта система освещения, предложенная Келером [46] в 1893 г., является в настоящее время общепринятой благодаря ряду удобств, создаваемых ею при работе:

Тип лампы	Метод исследования	Размер тела накала, мм	Габаритная яркость, кд/м ²	Диаметр колбы, мм
КГМ-12-100	Проходящий и отраженный свет, фазовый и темнопольный контраст	4×2,3	32	11
ДРШ-250-2м	Проходящий и отраженный свет, люминесценция	2,5	—	18
ДКсШ-120	Микрофотография, микропроекция	0,5	700	13
ДКсШ-150	То же	1,0	400	15

1) раздельное, независимое изменение числовой апертуры и площади освещаемого участка наблюдения;

2) освещение объекта с высокими числовыми апертурами, соответствующими числовым апертурам объективов;

3) телецентрический ход главного луча в плоскости исследуемого объекта — условие, необходимое для использования микроскопа как измерительного устройства.

Однако, несмотря на перечисленные достоинства, реализация способа Келера в сложных исследовательских моделях микроскопов встречает ряд затруднений, обусловленных, с одной стороны, разнообразием источников света, отличающихся не только яркостью, но и размерами тела накала, а с другой стороны — широким диапазоном оптических характеристик объективов микроскопов: числовых апертур и линейных полей зрения в пространстве предметов.

Таблица 5.2

Характеристика объектива			Характеристика конденсора		$D_{п. д}$	$D_{контд}$
v	A	Поле на объекте, мм	f	A		
2,5 6,3	0,08 0,20	10,0 4,0	40,3	0,22	25,0 10,0	4,1 12,8
10	0,22	2,5	40,3 23,4		6,3 20,0	17,8 10,3
25 40 63 100	0,55 0,65 0,85 1,25	1,0 0,63 0,40 0,2	10,7	1,25	17,5 11,0 7,0 3,5	14,0 15,1 19,8 29,2

В табл. 5.1 даны характеристики источников света, используемых в настоящее время при различных методах исследования в микроскопах. В табл. 5.2 приведены числовые апертуры и линейные поля зрения $2y$ в пространстве предметов комплекта план-объективов, вычисленные из условия $2y' = 25$ мм. Из анализа данных таблицы следует, что числовые апертуры объективов отличаются в $15,6\times$, а перепад полей наблюдения в плоскости объекта составляет $50\times$.

В осветительной системе, выполненной из двух

элементов (коллектора и конденсора), требование освещения больших полей на объекте не согласуется с возможностью создания высоких числовых апертур. Так, посадочный диаметр конденсора в биологических моделях микроскопов стандартизован, составляет 37 мм и ограничивает раскрытие апертурной диафрагмы до размера $D_{\text{конд}} \approx 27$ мм. Если максимальные числовые апертуры конденсора и объектива равны, то $f'_{\text{конд}} = D_{\text{конд}}/2A_{\text{об}} = D/2,5 \approx 11$ мм.

Для заполнения апертурной диафрагмы конденсора изображением источника света, размер тела накала которого составляет, например, $2y_{\text{н}} = 1$ мм (лампа ДКСШ-150), увеличение коллектора должно быть $v_{\text{кол}} \approx -27\times$. Учитывая, что расстояние от конденсора до коллектора, т. е. длина осветительных систем в исследовательских моделях микроскопов, равна $l_{\text{осв}} \approx 400 \div 600$ мм, находим фокусное рас-

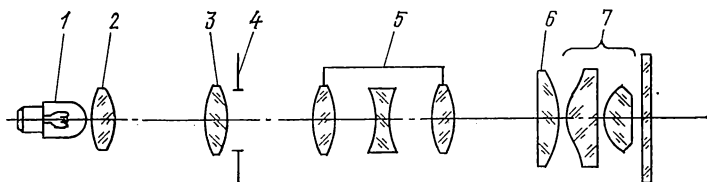


Рис. 5.1. Оптическая схема панкратического конденсора

стояние коллектора: $f'_{\text{кол}} = -(z'/v_{\text{кол}})$. Принимая $z' = l_{\text{осв}}$, получаем $f'_{\text{кол}} \approx 15 \div 23$ мм. Определим далее диаметр полевой диафрагмы коллектора исходя из требования освещения на объекте максимального поля зрения $2y = 10$ мм. Увеличение конденсора составляет $v_{\text{конд}} = +(f'_{\text{конд}}/z)$. Принимая $z \approx l_{\text{осв}} \approx -(400 \div 600)$ мм, получаем $v_{\text{конд}} \approx -0,0275 \div -0,0183\times$. Тогда диаметр полевой диафрагмы $D_{\text{п.д}} \approx 2y/v_{\text{конд}} \approx 363,64 \div 546$ мм. Очевидно, что реализация подобных диаметров при фокусных расстояниях $f' = 15 \div 23$ мм невозможна. Один из приемов, используемых в микроскопе для освещения больших полей зрения на объекте, состоит в выключении фронтальной линзы конденсора из хода лучей. В результате этого фокусное расстояние конденсора увеличивается до значения $f'_{\text{конд}} \approx 25$ мм. Однако и в этом случае диаметр полевой диафрагмы коллектора $D_{\text{п.д}} = 160 \div 240$ мм превышает реально возможные значения.

Для создания оптимальных условий освещения в микроскопе сотрудником предприятия «К. Цейс» (Германия) Р. Рихтером еще в 1939 г. было запатентовано осветительное устройство, содержащее панкратическую систему, назначение которой состояло в плавном изменении апертуры осветительного пучка при одновременном изменении величины освещаемого участка наблюдения. На рис. 5.1 изображена оптическая схема осветительного устройства, содержащего источник света 1, коллектор 2, дополнительную линзу 3, апертурную диафрагму 4, панкратическую систему 5, дополнительную линзу 6 и конденсор 7. Крайние положительные линзы панкратической системы жестко связаны между собой и перемещаются относительно неподвижной отрицательной линзы по линейному закону.

В результате изображение источника света, создаваемое коллектором и сопряженное с плоскостью апертурной диафрагмы, проецируется панкратической системой в переднюю фокальную плоскость конденсора в переменном масштабе. Выходной зрачок коллектора (поверхность коллектора) проецируется системой элементов 3—7 также в переменном масштабе на объект. Таким образом, выполняется общепринятый в микроскопии способ освещения, предложенный Келлером. Диапазон изменения числовой апертуры и освещаемого поля составляет $9\times$. В описании патента приводятся конструктивные элементы осветительной системы, позволяющие судить о степени ее исправления. По мнению самого автора, система обладает значительной расфокусировкой в промежуточных положениях подвижных компонентов и неудовлетворительной коррекцией аберраций. Тем не менее, эта система оправдала себя в применении и ее продолжает выпускать народное предприятие «К. Цейс» (ГДР) в новейших моделях микроскопов (Nu, Nf, Microval и др.). Отечественный вариант этого конденсора серийно выпускается под шифром ПК-3 и входит в комплект исследовательского биологического микроскопа МБИ-15 [45]. Одно из основных удобств, создаваемых панкратическим конденсором, состоит в возможности работы по методу фазового контраста. В этом случае кольцевая диафрагма, сопряженная с плоскостью фазового кольца объектива, устанавливается в плоскости предмета панкратической системы конденсора, и в результате изменения масштаба ее изображения удастся наилучшим образом вписать световое кольцо диафрагмы в фазовое кольцо объектива.

В дальнейшем были предприняты попытки улучшить оптическую коррекцию этой системы. Однако ни одна из модификаций панкратического конденсора не обеспечивает требуемый диапазон оптических характеристик планообъективов. Так, даже при условии выведения из хода лучей фронтальной линзы конденсора не может быть получено равномерное освещение объекта при работе с объективом $2,5\times\times 0,08$. Для освещения поля $2y = 10$ мм необходима замена всего конденсора на длиннофокусную положительную линзу. Кроме того, освещение объекта по методу темного поля и другие методы исследования требуют применения конденсоров специального типа. Неоднократные перестройки осветительной системы снижают эксплуатационные параметры прибора. Для устранения этого недостатка некоторые зарубежные фирмы выпускают в комплекте микроскопов револьверное осветительное устройство, в одном из гнезд которого установлен панкратический конденсор. Однако устройства этого типа крайне сложны и требуют высокой точности центрировки.

Оптимальным вариантом освещения объекта в проходящем свете является создание панкратической системы, встроенной в основание микроскопа и расположенной между коллектором и конденсором. Принцип построения осветительной системы состоит в следующем. Если расположить полевою диафрагму в основании микроскопа вблизи зеркала 7, изменяющего направление хода лучей от основания к плоскости объекта (рис. 5.2), то для сопряжения с ней выходного зрачка 2 коллектора 1 необходимо введение дополнительного опти-

ческого элемента. Этот элемент может быть выполнен, например, в виде панкратической системы 3. Необходимо далее согласовать положение изображения источника света, создаваемого коллектором, с плоскостями апертурных диафрагм 4, 8, что легко сделать с помощью положительной линзы 5, установленной вблизи полевой диафрагмы осветительной системы 6. Остается решить вопрос о необходимом диапазоне увеличений панкратической системы и об оптимальном варианте ее конструктивного решения.

Отметим, что изложенный принцип построения усложненного варианта осветительной системы, содержащей четыре компонента, справедлив и для создания системы освещения объектов в падающем (отраженном) свете. Отличие состоит лишь в том, что здесь целью

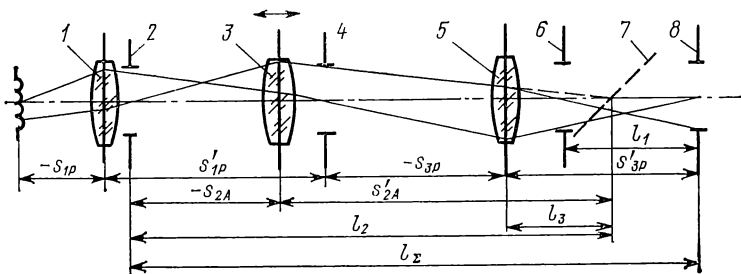


Рис. 5.2. Панкратическая осветительная система проходящего света

усложнения осветительной системы является получение действительного промежуточного изображения источника света и совмещение с ним ирисовой апертурной диафрагмы, которая не может быть установлена в выходном зрачке объектива.

Определим необходимый диапазон увеличений панкратической системы 3. Если иметь в виду, что диаметр полевой диафрагмы 6, расположенной в основании осветителя, ограничен размерами зеркала 7 и составляет примерно 25 мм, а ее удаление от передней фокальной плоскости конденсора (конструктивный размер) не превышает $l \approx 210$ мм, то нетрудно определить фокусное расстояние конденсора, необходимое для освещения поля на объекте $2y = 10$ мм,

$$f'_{\text{конд}} = -\frac{v_{\text{конд}}}{(1 - v_{\text{конд}})^2} l \approx 40 \text{ мм.}$$

В табл. 5.2 представлены результаты расчета диаметров полевой диафрагмы осветителя и апертурной диафрагмы конденсора, необходимые для нормальной работы комплекта объективов, параметры которых приведены в той же таблице. Применительно к объективу $10 \times 0,22$ рассмотрены два варианта конденсоров с фокусными расстояниями $f'_{\text{конд}} = 40,3$; $A = 0,22$ и $f'_{\text{конд}} = 23,4$; $A = 0,22$ (последний образован при выключении в конденсоре с фокусным расстоянием $f' = 10,7$ фронтальной линзы из хода лучей).

Рассмотрим процесс оптимизации параметров осветительной системы. Положение плоскостей зрачков (сопряженных с изображе-

нием источника света) от соответствующих компонентов обозначим через s_{iP} , s'_{iP} , положение плоскостей предмета (сопряженных с полевой диафрагмой) — через s_{iA} , s'_{iA} (рис. 5.2). Будем считать известными конструктивные размеры l_1 — l_3 , l_Σ . В качестве свободного параметра выбираем увеличение v_{2A} , создаваемое компонентом 3 при проекции выходного зрачка 2 коллектора 1 в плоскость полевой диафрагмы 6. Увеличение v_{2A} определяет фокусное расстояние компонента 3 $f'_2 \approx -l_2 v_{2A} / (1 - v_{2A})^2$, а также отрезки $s_{2A} \approx -l_2 / (1 - v_{2A})$; $s'_{2A} \approx -l_3 v_{2A} / (1 - v_{2A})$. При этом принимаем, что изображение выходного зрачка коллектора после компонента 3 совпадает с зеркалом 7. Выбираем далее увеличение коллектора $v_{1P} \approx -7\times$ и диаметр его выходного зрачка $D_1 = 40$ мм. Численные исследования показывают, что некоторое отступление от этих параметров, которые

Т а б л и ц а 5.3

v_{2A}	s_{2A}	s'_{2A}	f'_1	f'_2	s_{3P}	s'_{3P}	v_{3P}	f'_3	v_{3A}	$D_{3П.Д}$	$D_{4конд}$
—1,0	—225	225	28,12	112,5	—185	190	—1,03	93,7	0,70	28,0	7,2
—0,75	—257	193	32,12	110,2	—153		—1,24	84,8	0,68	20,4	8,7
—0,50	—300	150	37,5	100,0	—110		—1,73	69,0	0,64	12,8	12,1
—0,25	—360	90	45,0	72,0	—50		—3,80	39,6	0,60	6,0	26,6

обычно имеют коллекторы в схемах микроскопов, не влияет на результаты оптимизации остальных элементов осветительной системы.

Из рис. 5.2 установим следующие соотношения: — $s_{3P} = -(s'_{2A} + l_3)$; $s'_{3P} = l_\Sigma - l_2 + l_3$; $s'_{1P} \approx -s_{2A}$. Эти соотношения, а также известные конструктивные размеры l_1 — l_3 , l_Σ позволяют определить параметры всех элементов схемы. Результаты расчета этих параметров для ряда увеличений v_{2A} представлены в табл. 5.3. При этом приняты следующие значения конструктивных размеров: $l_\Sigma \approx 600$ мм; $l_1 \approx 180$ мм; $l_2 \approx 450$ мм; $l_3 \approx 40$ мм (с учетом размещения между зеркалом 7 и компонентом 5 ирисовой полевой диафрагмы 6).

Из анализа данных табл. 5.3 можно сделать следующие выводы.

1. Для заполнения полевой диафрагмы 6 (максимальный диаметр которой, согласно данным табл. 5.2, составляет $D_{3П.Д} \approx 25$ мм) изображением выходного зрачка коллектора необходимо иметь большие значения увеличения v_{2A} .

2. Для заполнения апертурной диафрагмы 8 конденсора (максимальный диаметр которой, согласно данным табл. 5.2, составляет $D_{4к.нд} \approx 26$ мм) изображением источника света необходимо иметь меньшие значения увеличения v_{2A} . Кроме того, необходимо, чтобы компонент 3 проецировал изображение источника света с увеличением $v_{3P} > 1$. Так, если $v_{3P} = 2,0$; $v_{2P} = 1,7$, $D_{4к.нд} = l_P v_{1P} v_{2P} v_{3P} = 25$ мм.

3. Для одновременного выполнения требований выводов 1 и 2 компонент 3 должен работать с переменным масштабом изображения.

При выборе типа панкратической системы целесообразно руководствоваться следующими соображениями.

1. Изменение увеличения не должно существенно влиять на смещение положения изображения источника света относительно апертурной диафрагмы конденсора.

2. Система должна иметь простую конструкцию и небольшой диапазон перемещения подвижных компонентов (условие, продиктованное удобством эксплуатации).

Этим условиям отвечает трехкомпонентная панкратическая система оборачивающего типа с оптической компенсацией. Если иметь в виду, что максимальное увеличение в зрчках для компонента 3 составляет $u_{2p} \approx 1,7$, диапазон увеличений панкратической системы может быть равен $M = (1,7)^2 = 3\times$. Система такого типа была разработана для исследовательской модели микроскопа БИОЛАМ-И.

25. ПАНКРАТИЧЕСКИЕ ОКУЛЯРЫ

Анализируя габаритные размеры и коррекционные возможности систем типа «коллектив», приходим к заключению о рациональности построения оптической схемы окуляра на базе панкратического коллектива, определяемого значениями параметра $v_0 = 0,5 \div 0,65$. При этом возможны два варианта решения. Так как расстояния до плоскостей предмета и изображения в крайних положениях подвижных компонентов определяются выражениями $s_1 = d_0/v_0 \pm d_0$, $s'_3 = -d_0/v_0 \pm d_0$ соответственно, то значение переднего фокального отрезка глазного компонента, которое не может быть меньше отрезка s'_3 , т. е. $|s_f| \geq d_0 [(1 + v_0)/v_0]$, при условии масштаба $d_0 = 20$ мм будет составлять $s_f = -(50 \div 60)$ мм. Если глазной компонент представляет собой тонкую систему, то $f'_{г.к} \approx -s_f$, и, следовательно, видимое увеличение окуляра $\Gamma_{ок} = 250/f'_{экв}$ (где $f'_{экв}$ — эквивалентное фокусное расстояние глазного компонента и панкратического коллектива) будет мало.

Дальнейшее повышение масштаба изображения, вносимого окуляром, может быть достигнуто в результате усложнения глазного компонента, например построения его по схеме перевернутого телескопа в обратном ходе лучей.

Оптическая схема панкратического окуляра, имеющего диапазон увеличений $M = 3\times$, изображена на рис. 5.3. Не останавливаясь подробно на абберационном расчете панкратического коллектива, выполняемого в соответствии с описанной в гл. IV методикой, приведем результаты оптической коррекции окуляра (табл. 5.4). К недостаткам окуляра можно отнести сложность его конструкции. Другой вариант оптической конструкции панкратического окуляра изображен на рис. 5.4. Параметры панкратической системы определяются значением параметра $v_0 = 0,5$. Передняя отрицательная линза играет роль коллектива и служит для согласования выходных зрчков объективов с последующей системой окуляра. Кроме того, эта

линза вносит дополнительное увеличение в изображение плоскости объекта, благодаря чему видимое увеличение окуляра может быть повышено. К недостаткам данной конструкции можно отнести следующие.

1. Дополнительное увеличение, вносимое отрицательным коллективом, приводит к увеличению линейного поля зрения последующей панкратической системы и тем самым усложняет условия ее работы.

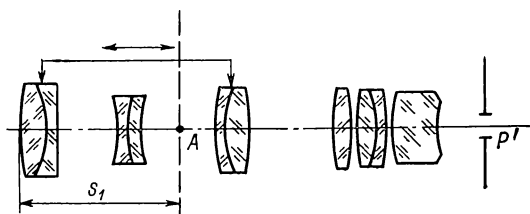


Рис. 5.3. Панкратический окуляр с усложненным глазным компонентом

2. С ростом линейного поля зрения происходит увеличение диаметров компонентов, и ахроматизация панкратического коллектива становится невозможной. В результате этого в одном из крайних

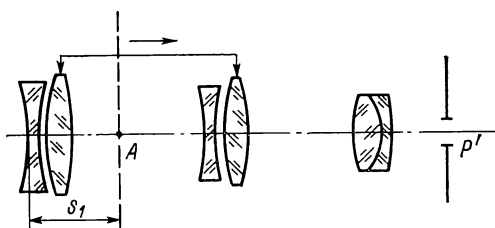


Рис. 5.4. Панкратический окуляр с дополнительным отрицательным коллективом

положений подвижных компонентов имеет место остаточный хроматизм увеличения $(y_F - y'_C)/y_D = -0,65 \%$.

3. В связи с увеличением линейного поля зрения панкратической системы коррекция внеосевых aberrаций несколько хуже предшествующего варианта решения.

Рассмотренные системы не исчерпывают возможные варианты конструкций панкратических окуляров. Например, известны схемные решения, разработанные на базе панкратических систем с

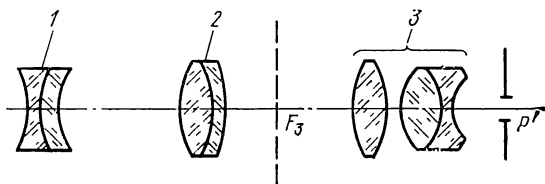


Рис. 5.5. Оптическая схема окуляра на базе панкратической системы с механической компенсацией

механической компенсацией [54]. На рис. 5.5 изображена оптическая схема окуляра, построенная по принципу синтеза однокомпонентной панкратической системы типа «положительный коллектив» (компонент 2), имеющей действительное положение зрачков и мнимое положение плоскости предмета. Компонент 2 перемещается по линей-

Таблица 5.4

$\Gamma_{\text{ок}}$	Точка на оси							
	m	D			C	F	$s'_F - s'_C$	
		s'	$\Delta s'$	$\eta, \%$	$\Delta s'$			
$4,12^\times$	0	-48,784	0	0	-0,040	0,568	0,608	
	$1,81 \sqrt{1/4}$	-48,657	0,127	-0,0098	0,077	0,726	0,655	
	$1,81 \sqrt{1/2}$	-48,526	0,258	-0,0196	0,197	0,890	0,693	
	$1,81 \sqrt{3/4}$	-48,390	0,394	-0,0294	0,321	1,058	0,737	
	1,81	-48,251	0,533	-0,0393	0,449	1,233	0,784	
$7,74^\times$	0	-33,655	0	0	0,005	0,154	0,105	
	$0,97 \sqrt{1/4}$	-33,664	-0,009	-0,0105	-0,004	0,149	0,153	
	$0,97 \sqrt{1/2}$	-33,672	-0,017	-0,0211	-0,013	0,143	0,156	
	$0,97 \sqrt{3/4}$	-33,680	-0,025	-0,0317	-0,023	0,138	0,161	
	0,97	-33,688	-0,033	-0,0422	-0,032	0,132	0,164	
$13,1^\times$	0	-20,281	0	0	-0,004	0,071	0,075	
	$0,57 \sqrt{1/4}$	-20,283	-0,002	-0,0104	-0,006	0,069	0,075	
	$0,57 \sqrt{1/2}$	-20,285	-0,004	-0,0209	-0,008	0,068	0,076	
	$0,57 \sqrt{3/4}$	-20,287	-0,006	-0,0314	-0,010	0,066	0,076	
	0,57	-20,289	-0,008	-0,0418	-0,012	0,064	0,076	
$\Gamma_{\text{ок}}$	Точка вне оси							
	y'_D	s_P	$s'_{P'}$	$(y' - y'_0)/y'_0, \%$	z'_m	z'_s	$z'_s - z'_m$	$(y'_F - y'_C)/y'_D, \%$
$4,12^\times$	0	-8,136	110,0	0	0	0	0	-0,548
	-9,033	-7,664	110,0	-0,254	0,023	-0,173	-0,196	-0,210
	-12,935	-7,142	110,0	-0,490	0,178	-0,313	-0,491	-0,317
$7,74^\times$	0	-7,940	125,5	0	0	0	0	-0,424
	-4,785	-7,766	125,5	-1,014	-0,013	-0,055	-0,012	-0,230
	-6,795	-7,587	125,5	-2,055	-0,028	-0,103	-0,075	-0,103
$13,1^\times$	0	-8,025	140,0	0	0	0	0	-0,511
	-2,805	-7,874	140,0	-1,211	0,003	-0,016	-0,019	-0,321
	-3,975	-7,719	140,0	-2,449	0,013	-0,031	-0,044	-0,151

ному закону и создает изменение масштаба изображения. Перемещение компонента 1 имеет фокусирующее действие. Подобно окуляру, изображенному на рис. 5.4, компонент 1 играет также роль коллектива, согласно положению выходных зрачков объективов с плоскостью входного зрачка однокомпонентной панкратической системы 2 и выходного зрачка глазного компонента 3. Оптическая конструкция проще рассмотренных ранее вариантов решений.

Несмотря на многообразие схемных решений панкратических окуляров, применение их в микроскопах едва ли можно считать целесообразным. Причины этого состоят в следующем.

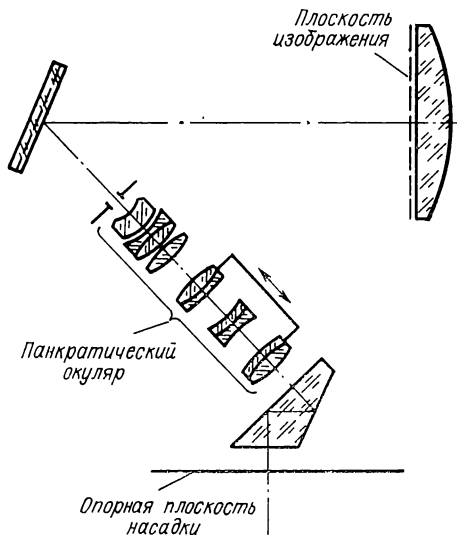


Рис. 5.6. Оптическая схема экранной насадки на базе панкратического окуляра

1. В панкратических системах с мнимой предметной плоскостью отсутствует возможность ограничения поля наблюдения, что снижает их эксплуатационные характеристики.

2. В окулярах с действительной плоскостью предмета ограничение поля зрения возможно, однако требует согласованности в изменении диаметра полевой диафрагмы и перемещении подвижных компонентов, что усложняет конструкцию окуляра.

3. В конструкции бинокулярных насадок должно быть предусмотрено синхронное перемещение компонентов окуляров в обеих ветвях наблюдения, что ведет к ее усложнению.

Эти недостатки объясняют, по-видимому, тот факт, что панкратические окуляры не получили распространения в оптических схемах микроскопов. Одним из перспективных направлений их применения являются экранные насадки, в которых окуляр работает как проекционная система. Устройство такого типа изображено на рис. 5.6.

26. ПАНКРАТИЧЕСКИЕ ФОТОВИЗУАЛЬНЫЕ НАСАДКИ

Условие полезного увеличения микроскопа $\Gamma = 500 \div 1000A$, выведенное на основании дифракционной теории образования изображения, в своем численном выражении базируется на разрешающей способности глаза. Последняя, как известно, может изменяться в некоторых пределах в зависимости от диаметра выходного зрачка прибора и состояния наблюдателя. Для создания оптимальных условий наблюдения в сложных моделях микроскопов предусмотрена возможность дополнительного изменения увеличения с помощью переключающихся линзовых систем, расположенных между объек-

тивом и окуляром. Подобным образом осуществляется дискретная смена увеличений в биологическом исследовательском микроскопе МБИ-15, фотовизуальных насадках АУ-26, МФН-11, серийно выпускаемых отечественной промышленностью [45], и других приборах. Используемые здесь дополнительные оптические системы построены по двухкомпонентной схеме и имеют, как правило, увеличения 1,08; 1,6; 2,5 \times .

Применение панкратических систем в микроскопах эффективно не только для улучшения эксплуатационных параметров приборов,

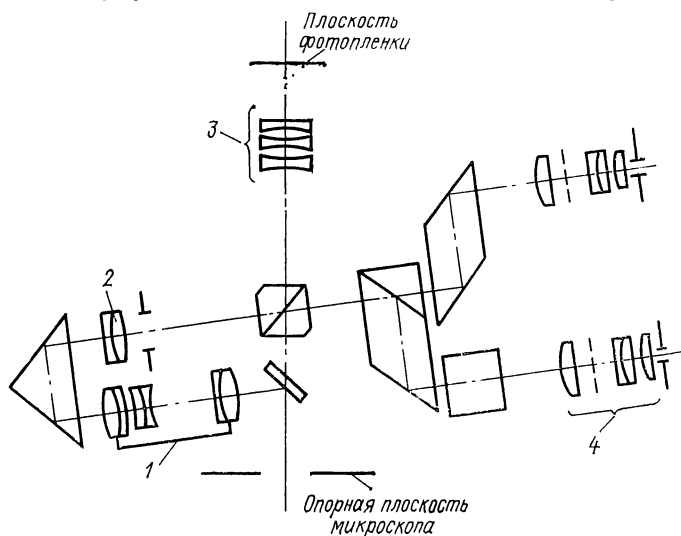


Рис. 5.7. Фотовизуальная насадка на базе панкратического коллектива:

1 — панкратический коллектив; 2 — дополнительный компонент; 3 — гомаль; 4 — окуляр

но и с точки зрения сокращения числа оптических элементов, участвующих в изменении масштаба изображения. Так, устройство дискретной смены увеличения содержит в общей сложности шесть склеенных компонентов, тогда как система плавного изменения увеличения конструктивно может быть реализована по трех- и четырехкомпонентной схеме. Вместе с тем, габаритные размеры систем, содержащих подвижные компоненты, неизбежно будут превышать соответствующие размеры систем дискретного изменения увеличения. Поскольку удаление выходного зрачка от основания микроскопа в серийных моделях стандартизовано (ГОСТ 3178—75) и не превышает 430 мм, применение панкратических систем в фотовизуальных каналах вызывает необходимость изменения компоновки призматических блоков насадок.

На рис. 5.7 изображена конструкция одного из возможных вариантов фотовизуальной насадки, построенной на базе панкратического коллектива. Такая система изготовлена в опытном варианте для лабораторной модели биологического агрегатного микроскопа.

КОНТРОЛЬ И АТТЕСТАЦИЯ ОПТИКИ МИКРОСКОПОВ

Глава VI

ЗАДАЧИ КОНТРОЛЯ И АТТЕСТАЦИИ ОПТИКИ МИКРОСКОПОВ

27. КОРРЕКЦИЯ ОБЪЕКТИВОВ И ЗАДАЧИ КОНТРОЛЯ

В наши дни оптика микроскопов достигла высокого совершенства. Широкое использование ЭВМ при расчетах оптических систем и прогресс в производстве оптических стекол привели к тому, что современный микрообъектив имеет расчетные характеристики, близкие к предельно достижимым. Волновые aberrации в нем для $\lambda = 589,29$ нм могут быть снижены до сотых долей микрометра. В апохроматических объективах коррекция хроматической разности положений и вторичного спектра выполнена с высокой степенью совершенства. В комплекте объективов, предназначенных для лабораторных и исследовательских моделей микроскопов, качество получаемого изображения приближается к идеальному для всего поля зрения.

В табл. 1.1 показано, что волновые aberrации серийно выпускаемых объективов микроскопов с ахроматическим и апохроматическим типом коррекции для осевой точки предмета и основной длины волны не превышают $0,1\lambda$, а в апохромате $60\times 1,0$ волновые aberrации не превышают $0,1\lambda$ во всем рабочем спектральном интервале (435,8—589,3 нм).

Для контроля столь малых искажений требуются методы, обладающие соответствующей чувствительностью, а для количественной оценки качества изображения и aberrаций систем в условиях производства необходимы средства измерения, погрешности которых существенно ниже измеряемых ошибок исследуемой системы.

При изготовлении микрообъективов в настоящее время существует ряд операций, качество выполнения которых определяется квалификацией рабочего, однако, по мере совершенствования технологии средств контроля и благодаря внедрению элементов автоматизации и механизации эти субъективные факторы перестают быть доминирующими.

К исключительно трудоемким операциям при изготовлении микрообъективов (особенно высокоапертурных планобъективов) относится центрировка линз при склейке с последующим креплением их в оправе. Так, из анализа влияния поперечных смещений центров кривизны поверхностей на качество изображения планахроматического объектива $100\times 1,25$ сделано заключение о необходимости цен-

трировки отдельных поверхностей с погрешностью, не превышающей 5 мкм. С еще более высокими точностями необходимо изготавливать планопохроматические объективы. Решение этой задачи в условиях серийного производства не может основываться только на мастерстве рабочего и состоит в разработке технологического оборудования и приборов контроля, обеспечивающих требуемые точности изготовления и корректировку.

Сформулируем основные проблемы, решение которых приведет к повышению эффективности серийного выпуска объективов с улучшенными оптическими и технологическими характеристиками.

Приборы и методы контроля оптики микроскопов должны обеспечивать:

1) контроль погрешностей изготовления конструктивных элементов системы;

2) качественную и количественную оценки изображения, построенного системой;

3) измерение аберраций системы для ее аттестации на соответствие расчету.

Важным требованием, выдвигаемым при решении этих проблем, является повышение оперативности и надежности контроля, пригодность средств контроля для использования в цеховых условиях серийного производства, так как объективы микроскопов являются в большинстве своем серийно выпускаемой продукцией. Поэтому те методы, которые оправдывают себя при контроле уникальных систем, для условий серийного производства должны быть принципиально переработаны.

Отдельную группу составляют методы лабораторной аттестации и исследования микрооптики. Они направлены на всесторонний анализ характеристик изготовленного объектива, их количественную оценку и могут включать более трудоемкие измерительные операции.

28. ТРЕБОВАНИЯ К ПОВЫШЕНИЮ ОБЪЕКТИВНОСТИ, ТОЧНОСТИ И ОПЕРАТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ ОПТИКИ МИКРОСКОПОВ И ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ

Если обобщить весь комплекс известных многообразных методов исследования и контроля оптических систем, можно прийти к выводу о том, что эти методы сводятся в основном к регистрации структуры волнового фронта, сформированного системой в схеме контроля, и исследованию этой структуры, которая визуализируется в форме изображения того или иного вида, например в виде интерференционных полос, теневой картины, изображения светящейся точки, линии, миры и т. д.

Оптические системы исследуются главным образом в двух зонах (рис. 6.1): 1) в зрачке системы, где объектом исследования являются отклонения фронта волны от формы, соответствующей требуемому качеству изображения, т. е. волновые аберрации $W(u; v)$; 2) в плоскости изображения, где объектом исследования служит двумерное

распределение освещенности $I(y'; z')$, характеризующее концентрацию энергии оптической системой и полноту передачи информации о структуре объекта, поступающей на ее вход.

Структура волнового фронта, которая обуславливает качество исследуемой системы, может быть представлена многомерной функцией пространственных координат на зрачке, зависящей (при наличии хроматизма) от длины волны излучения. Многомерность характерна и для функции, описывающей структуру изображения [61]. Для регистрации такого многомерного сообщения на носителе, имеющем меньшее число измерений, например, на двумерном графике, приходится дискретизировать аргументы сообщения. При этом само

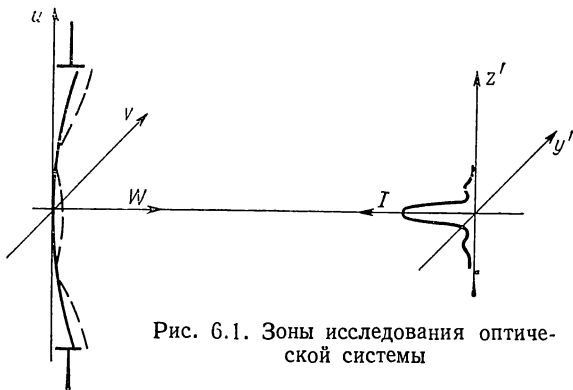


Рис. 6.1. Зоны исследования оптической системы

сообщение преобразуется в более простое, с меньшим числом измерений. Так, при исследовании качества изображения реальной оптической системы по изображению светящейся точки видно, что оно окружено цветной каймой из-за влияния хроматизма и дифракции. Такое сложное сообщение должно быть дискретизировано на приемнике изображения. Многоцветная картина преобразуется в монохромную, при этом получается ряд изображений, зарегистрированных в различных длинах волн. Плавное изменение освещенности по плоскости изображения преобразуется в ряд изолиний, каждая из которых соответствует определенному уровню освещенности, а вместе эти линии образуют топограмму уровней освещенности.

Комплекс средств формирования, регистрации, преобразования и анализа оптической измерительной информации, включающий в себя исследуемую оптическую систему, измерительную установку, формирующую требуемое изображение, и регистрирующую часть, рассматривается как оптико-измерительная регистрирующая система [37]. В такой системе значение процессов регистрации постоянно растет, причем функции приемника изображения не ограничиваются ролью только запоминающего устройства. Напротив, в современных условиях приемник изображения все в большей степени берет на себя функции трансформации, анализа и первичной обработки информации и подготовки ее к вводу в ЭВМ.

Основными направлениями развития средств контроля и аттестации оптических систем, в том числе и оптики микроскопов, являются:

1) замена качественных (субъективных) методов количественными (объективными) методами измерений;

2) все более широкое внедрение средств автоматизации операций контроля;

3) повышение точности измерений;

4) получение измерительной информации об оптических характеристиках в необходимом количестве и в сроки, достаточные для реализации автоматических систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) изготовления оптических деталей и систем.

Таким образом, необходимо осуществлять постепенную замену существующих отдельных контрольных операций, часто дающих субъективные и недостаточно полные данные, на сквозной канал контроля при помощи специализированной оптико-измерительной системы, автоматизированной на большинстве стадий получения и переработки данных. Эти задачи успешно решаются благодаря все более широкому применению лазеров, научной и прикладной фотографии, телевизионной техники и устройств связи с ЭВМ.

Процесс контроля оптического элемента или системы можно разбить на следующие основные операции: 1) юстировка оптической схемы контроля; 2) регистрация данных об ошибках волнового фронта за исследуемой системой, выраженных в виде интерференционных, теневых или других изображений; 3) расшифровка результатов контроля, т. е. представление изображений соответствующих тестов в численной форме; 4) математическая обработка результатов контроля, расчеты характеристик и критериев качества системы.

Исходя из этого можно указать следующие пути развития средств автоматизации измерений и систем оптики микроскопов.

1. Автоматизация юстировки схемы контроля и подстройки элементов схемы при замене контролируемых оптических элементов. Механизация вращения при контроле центрировки оптических компонентов.

2. Автоматизация регистрации данных, в частности интерферограмм и изофотограмм, решение проблемы регистрации в условиях вибраций. Эти задачи реализуются, в частности, благодаря применению телевизионной техники и видеозаписи.

3. Автоматизация расшифровки результатов контроля, квантование и дискретизация изображений, их цифровая обработка. Решению этой задачи способствуют методы научной и прикладной фотографии, средства фотоэлектрического считывания изображений и аналого-цифрового преобразования сигналов.

4. Автоматизация математической обработки результатов контроля. Эта задача решается благодаря созданию математического аппарата для вычисления характеристик и критериев качества оптических систем [22], а также разработкам программ на ЭВМ для автоматических расчетов и представления результатов в форме, наиболее наглядно, полно и однозначно характеризующей качество

исследуемой системы. Попутно создаются и программы оптимизации юстировки систем с использованием (в качестве исходных) данных о форме отклонений волнового фронта. Вопросы автоматизации контроля и аттестационных измерений при оценке качества систем на базе количественных методов оценки их характеристик получили в последние годы значительное развитие благодаря новым требованиям, выдвинутому производством и эксплуатацией крупногабаритных высокоточных оптических приборов, в том числе современных астрономических телескопов. Научно-технический опыт, накопленный при создании систем с зеркалами диаметром 1,2 м, 2,6 м и, наконец, 6 м, продолжая увеличиваться, находит все более широкое применение при решении задач производства особо точных оптических приборов широкого назначения, и в первую очередь — оптики микроскопов.

Известные методы контроля можно условно разделить на технологические и аттестационные. Для технологического контроля важно получение данных об аберрациях системы, вызванных ошибками изготовления. Достаточно полно эта информация отображается в виде карты отклонений фронта волны контролируемой системы от требуемой (чаще всего сферической) формы. Задача визуализации формы отклонений волнового фронта, как известно, часто решается интерференционным методом, теневым и методом Гартмана [62, 83]. Наиболее полное представление о наличии ошибок в системе и их влиянии на качество изображения дает анализ изображения светящейся точки, построенного исследуемой системой.

На этапе аттестационного контроля определяют характеристики качества изображения: структуру ФРТ, ЧКХ или модуляционно-передаточную функцию (МПФ), концентрацию энергии в пятне рассеяния, разрешение и т. д. Эти величины стремятся найти по данным прямых измерений. Рассмотрим некоторые методы контроля с точки зрения возможностей их автоматизации.

Простой и высокочувствительный, широко распространенный в практике контроля систем теневой метод, являясь главным образом качественным, совершенствуется в направлении количественных оценок геометрических аберраций для формы фронта волны [11, 31]. Однако известные количественные теневые методы обладают рядом недостатков, таких как сложность обработки результатов измерений для получения значений волновых аберраций; неизбежность систематических ошибок, связанных с неравномерностью коэффициента отражения (или пропускания) контролируемой системы и неравномерностью засветки зрачка системы; неравномерность чувствительности по полю приемника изображения. В связи с этим теневые методы нашли лишь ограниченное применение при контроле крупносерийных оптических элементов.

Метод Гартмана, получивший значительное распространение при контроле систем астрооптики [25], используется также при лабораторных исследованиях фото- и кинообъективов для оценки их геометрических аберраций [42]. Достоинство метода состоит в простоте структурной схемы, так как для выполнения измерений достаточно

точечного источника света, перфорированной диафрагмы в зрачке системы и кассеты с фотопластинкой, которая устанавливается вблизи плоскости схождения лучей, образующих изображение точки:

Основные недостатки метода Гартмана состоят в следующем:

1) необходимость фотографической регистрации гартманогаммы, ввиду того что другие известные приемники изображения не обеспечивают необходимого разрешения при требуемой точности расшифровки;

2) отсутствие наглядности, так как данные об аберрациях передаются малозаметными на глаз смещениями пятен гартмановской картины;

3) высокая трудоемкость расшифровки координат пятен и сложность автоматизации этой операции; здесь неприменим способ сплошного сканирования, а требуется высокоразрешающий анализатор изображения с поисковой системой, управляемой от ЭВМ, что удорожает систему и требует затрат дорогостоящего машинного времени;

4) сложность математического аппарата и программного обеспечения при обработке данных гартмановского исследования, что ведет к существенным затратам машинного времени на каждый цикл обработки данных и делает метод экономически неприемлемым в условиях серийного производства.

Одним из наиболее перспективных для автоматизации признается интерферометрический метод [20]. Являясь по существу количественным и выдавая информацию об отклонениях волнового фронта в виде карты волновой поверхности, этот метод позволяет: 1) юстировать исследуемую систему и схему контроля; 2) регистрировать данные как фотографическим методом, так и автоматически при помощи видеозаписи, не теряя и не искажая информацию в процессе регистрации [34]; 3) автоматизировать расшифровку данных, используя несложный метод сплошного сканирования интерференционной картины; в частности, при использовании телевизионного приемника изображения сплошное сканирование выполняется телевизионной системой; 4) трансформировать данные измерений, выраженные в форме видеосигнала, в цифровую форму с помощью существующих аналого-цифровых преобразователей и автоматически вводить для обработки в ЭВМ.

Отметим, что высокая стоимость времени работы ЭВМ требует в условиях крупносерийного производства разработки и применения автоматизированных приборов контроля, соединенных с автономными мини-ЭВМ. Это в свою очередь вызывает необходимость разработки математического и программного обеспечения, дающего возможность использовать в этой области настольные мини-ЭВМ для управления контролем и математической обработки данных, полученных при измерениях.

Значительное распространение в этих условиях могут получить компаративные методы с использованием эталонного образца, который в данном случае является как бы внешней памятью. При этом в оптико-измерительную информационную систему вводятся лишь данные об отличиях исследуемой оптической системы от эта-

лонной, что существенно сокращает объем информации, вводимой в ЭВМ для обработки, и соответственно снижает требования к объему памяти мини-ЭВМ.

Компаративные методы позволяют обрабатывать измерительные данные без применения цифровых ЭВМ, проводя непосредственное оптическое сравнение интерферограмм или их спектров.

Основные положения, сформулированные для интерферометрического метода, могут быть отнесены к методу количественного анализа изображения светящейся точки, построенного исследуемой системой.

Применение изофотометров [35] дает возможность автоматизировать анализ структуры пятна рассеяния и измерять ФРТ в широком диапазоне освещенностей (5—6 порядков и более), представляя результаты измерений в виде карты ФРТ либо при использовании аналого-цифровых преобразователей в виде массива цифровых данных, позволяющего рассчитать концентрацию энергии, релейское разрешение, ФРЛ, МПФ и другие характеристики изображения. Отметим, что ФРТ, измеренная в меньшем диапазоне освещенностей, не дает возможности расчета указанных характеристик вследствие недопустимо высоких погрешностей получаемых результатов. Это обстоятельство является одной из причин, которые сдерживали применение контроля по ФРТ качества оптических систем до появления изофотометрического метода, так как традиционные методы измерения ФРТ не позволяли определять ее значения в требуемом диапазоне освещенностей.

Задача стала разрешимой лишь с появлением метода изофот и созданных на его основе телевизионных изофотометров для измерения ФРТ и ФРЛ в требуемом диапазоне освещенностей. Создание телевизионных изофотометров и прибора для измерения ФРЛ дает возможность, помимо получения численных значений характеристик качества изображения системы, осуществлять компаративные оценки ФРТ и ФРЛ, используя эталон или расчетную информацию о требуемом качестве изображения, выраженную в виде карты ФРТ или графика ФРЛ.

29. КОНТРОЛЬ С ПРИМЕНЕНИЕМ АППАРАТУРЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО СЧИТЫВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ, НАУЧНО-ПРИКЛАДНОЙ ФОТОГРАФИИ, ТЕЛЕВИДЕНИЯ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Как показывает практика совершенствования техники контроля качества оптических систем, одним из наиболее эффективных направлений разработки автоматизированных средств контроля является применение методов обработки и автоматического считывания изображений (в виде которых реализуются данные контроля). Ими могут быть изображения различных тест-объектов (точки, линии, полуплоскости, миры и пр.), а также интерференционные, теневые и прочие картины. Термином «изображение» обозначается плоский объект, оптические характеристики которого меняются при переходе от точки к точке поверхности [61]. В монохромном изобра-

жении это изменение описывается одним параметром, соответствующим общему количеству света, воспринимаемого наблюдателем от данной точки. Цветные изображения требуют для своего описания несколько параметров.

Считывание изображения при исследовании оптических систем используется для определения в числовой форме функций, характеризующих качество системы. В процессе считывания и перед ним нередко желательна обработка изображения (дискретизация, квантование, фильтрация), которая служит для повышения наглядности при визуальной оценке изображения, сокращения трудоемкости считывания, повышения точности измерений.

Операции обработки изображения (являющиеся пространственно-инвариантными) могут быть осуществлены как при помощи обычных вычислительных устройств, так и другими, подчас более простыми и экономичными средствами, например, оптическими [50, 56], фотографическими или телевизионными.

При помощи операций обработки могут производиться дискретизация и квантование изображения, фильтрация микро- и макрошумов, повышение градиентов в измеряемых элементах и представление их в штриховой форме (вместо формы с плавными переходами интенсивностей).

В задачу автоматизации измерений должны быть включены операции автоматического распознавания элементов изображения и их описания. Это описание может быть построено на соотнесении данного изображения с заданным математически или физическим эталоном и выявлении различий, несущих искомую информацию о контролируемой системе.

Чрезвычайно гибким и универсальным средством регистрации и первичной обработки данных, представленных в виде изображений, является *фотографический материал*, используемый с применением современных методов научной и прикладной фотографии. Он позволяет регистрировать изображение непосредственно в двумерном режиме, накапливать и усиливать световые воздействия, производить операции обработки изображения в ходе фотопроцессов. Простота, доступность и экономичность фотографических методов, документальность результатов регистрации позволяют считать весьма перспективным их применение при лабораторных исследованиях и контроле оптических систем. При использовании фотографического метода на современном этапе решающее значение приобретает задача оптимального использования зарегистрированной информации. Решению этой задачи способствует внедрение результатов углубленного изучения механизма формирования фотографического изображения, применение в практике исследований таких явлений, как эффекты Сабатье, Эбергарда [44] и др. Непосредственно в области контроля и аттестации оптических систем на использовании этих эффектов основываются исследования структуры изображения способами эквиденситометрии [43] и изофотометрическим методом [32], а также повышение точности расшифровки интерферограмм и гартманограмм [37].

Данные контроля оптической системы могут быть в ряде случаев (например, для экспресс-оценок и контроля) считаны *визуально* прямо из соответствующего изображения. Так, на практике визуально контролируют ошибки оптической поверхности по интерференционной картине, полученной с помощью пробного стекла. Однако во многих случаях такие упрощенные оценки оказываются недостаточными и требуют возможно более подробного считывания координат элементов оптического измерительного изображения: координат интерференционных полос, изофот пятна рассеяния, графика функции рассеяния линии, контраста штриховых тест-объектов и пр. Операции считывания называются расшифровкой и являются, как правило, чрезвычайно трудоемкими при проведении их вручную. Ручная расшифровка характеризуется также невысокой точностью, малой оперативностью и недостаточно полным использованием зарегистрированной информации. Уровень погрешностей ручной расшифровки зависит от психофизиологических особенностей оператора расшифровки [63]. Оптико-измерительная система, автоматизированная на стадиях получения исходных данных и их математической обработки на ЭВМ, оказывается разомкнутой на операции ручной расшифровки, что затрудняет осуществление полной автоматизации контроля.

Возможности решения данной проблемы лежат на пути использования устройств автоматического ввода графической информации в ЭВМ [52, 73]. Известные *считывающие автоматы* способны функционировать совместно с ЭВМ или выводить числовые значения функции изображения на промежуточный носитель, например перфоленту.

Применительно к автоматическим считывающим устройствам оптико-измерительные изображения играют роль экспериментального сигнала, т. е. материализованной информации, получаемой в результате исследования объекта. Принципы действия считывающей аппаратуры определяются непрерывностью или дискретностью сигналов, количеством каналов записи.

К основным процессам автоматического анализа графической информации относят восприятие, подготовку и переработку экспериментальных сигналов. Рассмотрим в качестве примера случай, к которому мы будем наиболее часто приходить при решении задач автоматизации контроля оптических систем. Пусть изображение, сформированное в оптической схеме контроля (например, интерферограмма), дискретизировано с получением совокупности изолиний, т. е. линий равных значений исследуемой величины. Процесс автоматического восприятия экспериментальной информации может быть выполнен одним из трех способов: слежением за ходом линии, сканированием (разверткой, например, телевизионной, по ряду строк) или с помощью матричного приемника.

Подготовка воспринятой информации производится в целях устранения избыточной информации и формирования полезных сигналов для ввода их в вычислительные устройства. К операциям подготовки могут быть отнесены дискретизация изображения, а

также кодирование считанной информации в телеграфный код, нанесенный на перфоленгу.

Наконец, для автоматической обработки информации, осуществляемой по заданным алгоритмам, используются *электронно-вычислительные устройства*. При этом стремятся: получить в количественном выражении характеристики и критерии качества исследуемой оптической системы такие, как функция рассеяния точки (ФРТ), частотно-контрастная характеристика (ЧКХ), разрешение и пр.; произвести сравнительный анализ (например, оценить отклонения структуры реального изображения тест-объекта от идеального) и формирование сигнала о степени годности изготовленного оптического компонента. Применение элементов автоматизации считывания и обработки изображений, полученных при контроле и аттестации оптических систем, будет более подробно рассмотрено ниже.

Глава VII

КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МИКРООПТИКИ

30. КОНТРОЛЬ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Контроль геометрических параметров оптических элементов осуществляется методами оптических измерений. В широком смысле в число геометрических параметров входят толщины деталей, углы призм и клиньев, радиусы кривизны сферических поверхностей и отклонения их формы, микрорельеф оптических поверхностей. К геометрическим параметрам оптической системы может быть также отнесена децентрировка каждой поверхности.

Задачи контроля ошибок формы оптических поверхностей и децентрирования поверхностей в системе в условиях серийного оптического производства являются наиболее сложными. Так как традиционные методы контроля этих параметров [4] на сегодняшний день часто не удовлетворяют резко возрастающие требования к качеству и точности выпускаемых систем, ведутся интенсивные разработки новых и усовершенствованных методов и приборов.

Простейший и наиболее распространенный способ контроля формы оптических поверхностей состоит в измерении радиусов кривизны. При этом подразумевается, что контролируемая поверхность имеет сферическую форму. Контроль чаще всего осуществляется контактным путем при помощи индикаторных или кольцевых сферометров.

Контактный метод имеет следующие недостатки:

опасность повреждения исследуемых поверхностей;

возникновение погрешностей в результатах измерений при механических и тепловых деформациях исследуемой детали и деталей сферометра;

затруднения при определении ошибок, связанных с отклонением формы детали от сферической.

Преодоление последнего недостатка при одновременном повышении точности и производительности контроля достигается благодаря применению оптических методов контроля радиусов кривизны поверхностей, к числу которых относятся автоколлимационный метод и метод колец Ньютона (или метод пробного стекла) [4, 41].

Метод пробного стекла является контактным интерференционным методом. Он прост в реализации, не требует сложного и дорогостоящего оборудования и при достаточном навыке контролера позволяет оценивать не только радиус кривизны, но также зональные и локальные ошибки сферических поверхностей оперативно и с достаточно высокой точностью: до долей длины световой волны. Этим методом контролируют как вогнутые, так и выпуклые поверхности в широком диапазоне размеров деталей от единиц до сотен миллиметров. Указанные достоинства послужили причиной чрезвычайно широкого применения метода пробного стекла при контроле поверхностей линз, в том числе и линз микрооптики в условиях крупносерийного производства.

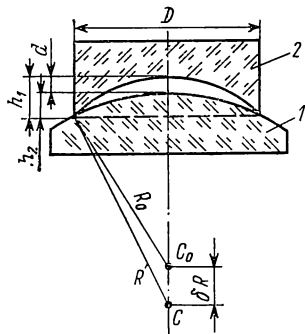


Рис. 7.1. Контроль оптической поверхности с помощью пробного стекла

Для измерения применяют пробное стекло с аттестованной сферической поверхностью. Контроль основан на наблюдении интерференционных полос равной толщины в тонком воздушном слое, ограни-

ченном поверхностями пробного стекла и контролируемой детали. Изофота каждой интерференционной полосы дает геометрическое место точек равного отступления исследуемой поверхности от эталонной.

Радиус пробного стекла R_0 должен быть примерно равным по абсолютной величине и обратным по знаку радиусу контролируемой поверхности R (рис. 7.1). Пусть линза 1 имеет выпуклую поверхность с центром кривизны C_0 . Поверхность наложенного на нее пробного стекла 2 имеет центр кривизны C , отстоящий от C_0 на расстоянии δR . При этом число интерференционных колец, наблюдаемых в пределах диаметра D , равно $2d/\lambda$, где d — максимальное расстояние между поверхностями, измеренное вдоль их общей оси и равное разности стрелок прогиба h_1 — h_2 ; λ — длина световой волны.

Интерференционные кольца одного порядка имеют различные диаметры при разных значениях λ , следствием чего является радужное окрашивание колец при наблюдении их в белом свете. Поэтому для более точной оценки числа полос желательно вести наблюдение в монохроматическом свете. При $\delta R \ll R$

$$N = \frac{\delta R}{4\lambda} \left(\frac{D}{R_0} \right). \quad (7.1)$$

В случае изменения радиуса кривизны одного из волновых фронтов при разных углах в плоскости, нормальной к оси, наблюдается эллиптичность формы колец, указывающая на астигматическую ошибку поверхности.

К недостаткам метода пробного стекла в условиях серийного производства следует отнести:

опасность повреждения исследуемой поверхности при наложении пробного стекла;

погрешности от неравномерности давления и температуры и от случайного попадания пыли;

затруднения при наложении пробного стекла и наблюдении интерференционной картины в случае контроля малогабаритных деталей микрооптики (диаметром 1—3 мм);

необходимость содержания огромного хозяйства пробных стекол, равного, по крайней мере, удвоенной численности номенклатуры линз;

затруднения при контроле поверхностей линз, закатанных в оправы, т. е. на этапе, когда особенно важно установить, не искажены ли оптические поверхности напряжениями, возникшими при закатке;

невозможность контроля искажений оптических поверхностей, возникающих в склейке, и искажающего влияния слоя клея;

невозможность контроля дефектов оптического материала линз;

погрешности контроля крутых сферических поверхностей, возникающие вследствие того, что разные участки поверхности наблюдаются под разными углами.

Процесс возникновения погрешности описан И. И. Духопелом и может быть рассмотрен на примере контроля плоской оптической поверхности под пробное стекло (рис. 7.2). При наблюдении с конечного расстояния $\sqrt{h^2 + d^2}$ в глаз наблюдателя попадают интерферирующие пучки с меняющимся наклоном α от разных точек рассеивающего экрана E , что приводит к изменению наблюдаемой по интерференционной картине разности хода пучков и искажению формы интерференционных полос, т. е. погрешностям измерения.

Погрешность, возникающая в зависимости от угла наблюдения, определяется выражением

$$\Delta = t \sqrt{1 - (d/h)^2} = t \sqrt{1 - \operatorname{tg}^2 \alpha}, \quad (7.2)$$

где Δ — изменение наблюдаемой разности хода между контролируемой поверхностью и поверхностью пробного стекла; t — расстояние между поверхностями. Так, если $\operatorname{tg} \alpha = 0,5$; $t = 5$ мкм, то $\Delta = 1,3$ мкм $\approx 2,06\lambda$ (при $\lambda = 630$ нм).

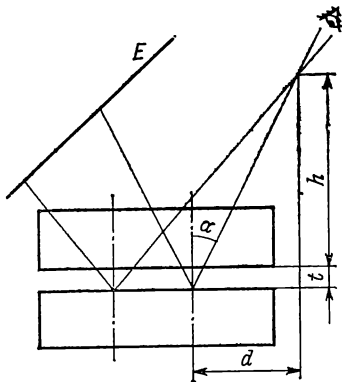


Рис. 7.2. Возникновение погрешности в схеме контроля пробным стеклом при наклонном ходе лучей

При контроле крутых оптических поверхностей с помощью пробного стекла погрешность увеличивается до такой степени, что в ряде случаев проверку их под пробное стекло ведут по частям, причем снижается как производительность контроля, так и его надежность.

31. КОНТРОЛЬ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ БЕСКОНТАКТНЫМИ МЕТОДАМИ

Большинство бесконтактных методов контроля формы оптических поверхностей, получивших распространение в условиях оптического производства, основаны на исследовании формы и структуры волнового фронта, сформированного при участии контролируемой поверхности, визуализированной в форме изображения того или иного вида, например, в виде интерференционных полос, теневой картины, совокупности пятен, составляющих диаграмму Гартмана, и т. д.

Бесконтактные методы исследования формы оптических поверхностей могут быть разделены на прямые и косвенные. Прямые методы основаны на измерении отклонений фронта световой волны за исследуемой поверхностью от требуемой (чаще всего — сферической) формы. Достоинство прямых методов в том, что они позволяют определять конкретное расположение ошибок на контролируемой поверхности. Основные недостатки заключаются в необходимости исследования каждой поверхности в отдельности и в трудоемкости обработки данных контроля, если требуется оценить влияние ошибок на качество изображения всей системы или данного компонента.

Косвенные методы оценки качества поверхностей, состоящие в наблюдении и исследовании структуры изображения тест-объекта (например, светящейся точки) основаны на том, что искажения формы оптических поверхностей однозначно связаны с изменениями структуры изображения. При наблюдении изображения тест-объекта и измерении его структуры может быть оперативно оценен вид искажений поверхности (симметричные, зональные, астигматизм, децентрировка) и определена величина отклонения характеристики качества изображения системы от расчетной.

Достоинство косвенных методов состоит в оперативности качественных оценок, возможности однозначно и обобщенно определить влияние всего комплекса ошибок на конечный результат работы системы — качество даваемого изображения. Косвенные методы позволяют оценить искажения одновременно всех поверхностей, образующих, например, склеенный оптический компонент, и влияние слоя клея.

Недостаток косвенных методов — невозможность указания точного положения ошибки на оптической поверхности. Однако при крупносерийном производстве оптики такими указаниями пользуются редко и оценка качества изготовления оптических элементов может производиться на основании сведений о снижении качества изображения, обусловленного ошибками поверхностей.

Бесконтактные методы контроля формы искажений фронта световой волны и формы оптических поверхностей возникли и начали

развиваться в прошлом веке. Наиболее ранним из них можно считать теневой метод Фуко. При наличии отклонений формы фронта волны изображение точки окружается светящимся ореолом, образованным аберрационными лучами. Когда место правильного изображения пересечено экраном (его называют ножом Фуко), часть аберрационных лучей будет перекрыта им, причем образуются темные участки на зрачке, указывающие на неправильный наклон поверхности. Теневой метод применяется при контроле в условиях крупносерийного производства асферических линз, используемых в осветительных системах микроскопов. В последние годы увеличивается число работ, направленных на получение количественных оценок ошибок системы по данным испытаний теньевым методом и его модификацией — методом Ронки [62].

Метод Ронки, находящийся на стыке интерференционного и теневого методов, используется при контроле аберраций в различных длинах волн и по полю и будет рассмотрен в п. 45.

Дальнейшее совершенствование методов испытания оптических поверхностей привело к созданию Гартманом метода для оценки ошибок волновой поверхности на основании данных, полученных по ряду локальных точек на зрачке [83]. Исходя из геометрической постановки вопроса, Гартман изолировал диафрагмами отдельные узкие пучки лучей, которые выходили из исследуемой системы, и определял точки, в которых эти пучки пересекали ось. Для этого он пользовался экстрафокальными фотографиями.

Метод Гартмана обладает следующими достоинствами при контроле формы оптических поверхностей: 1) результаты контроля выражены в количественной форме; 2) контрольная установка проста; 3) мала чувствительность к вибрациям.

Основные недостатки метода Гартмана состоят в том, что следы отверстий диафрагмы на фотопластинке являются дифракционными изображениями, которые тем больше по диаметру и тем сильнее размыты, чем меньше диаметры самих отверстий. Поэтому существует некоторый оптимальный диаметр отверстия, который, согласно Гартману, лежит в пределах между $1/200$ и $1/400$ фокусного расстояния. Этот минимум не только ограничивает размеры определяемых зон зрачка, но и их число.

Однако основные затруднения при использовании метода Гартмана для контроля поверхности элементов микрооптики состоят в значительной длительности всего цикла измерения (проявление фотопластинок, расшифровка координат пятен гартманограммы, ввод в ЭВМ для обработки, громоздкая программа вычислений). Кроме того, значительные неудобства вносит необходимость использования большого числа гартмановских диафрагм, соответствующего широкой номенклатуре выпускаемых объективов.

В настоящее время интенсивно развиваются интерференционные методы бесконтактного контроля оптических поверхностей и аберраций оптических систем. Контроль поверхностей линз и компонентов на лазерном интерферометре с дифрагированной эталонной волной, рассмотренный в п. 43, дает возможность обнаруживать источ-

ники ошибок изготовления сложных высокоапертурных объективов. Контроль собранных объективов на этом приборе позволяет дать суммарную оценку качеству изготовления всех оптических поверхностей объектива и точности их взаимного расположения в изготовленном объективе, т. е. качеству сборки. В гл. IX рассматривается ряд интерферометров для измерения волновых aberrаций и качества поверхностей оптики микроскопов.

Современное представление о влиянии искажений формы оптической поверхности на качество изображения точечного тест-объекта [31] дает возможность сопоставить чувствительность контроля формы оптической поверхности по волновым aberrациям с контролем по распределению освещенности в пятне рассеяния. Распределение освещенности (и энергии) в изображении светящейся точки обусловлено не столько максимальной величиной деформации фронта волны $\Delta \bar{W}_{\max}$, сколько среднеквадратичным значением деформаций $\Delta \bar{W}$. Например, при разных типах деформации размеры кружков, содержащих 50 и 80 % энергии, примерно одинаковы при равных значениях $\Delta \bar{W}$, в то время как величины $\Delta \bar{W}_{\max}$ существенно различаются.

Соблюдение критерия Релея, когда $\Delta \bar{W}_{\max} \leq \lambda/4$, не гарантирует получения пятна рассеяния, близкого к идеальному по распределению энергии. Aberrации высших порядков при $\Delta \bar{W}_{\max} \approx 0,2\lambda$, мало заметные при наблюдении интерференционной картины, приводят к расширению «основания» пятна рассеяния. При этом его диаметр, содержащий 84 % энергии, в 2,6 раза больше, чем для случая отсутствия aberrаций, что, естественно, легко обнаруживается при количественном анализе ФРТ.

32. КОНТРОЛЬ ЦЕНТРИРОВКИ

Центры кривизны всех поверхностей, составляющих оптическую систему, построенную по принципу круговой симметрии, должны лежать на одной прямой — оси симметрии, которая называется оптической осью системы. При изготовлении оптических элементов принцип совпадения с оптической осью центров кривизны отдельных поверхностей может нарушаться и система децентрируется. В связи с этим возникают задачи определения допустимых значений децентрировки поверхностей и компонентов и последующего контроля этих величин в процессе изготовления оптической системы. Если первая задача успешно решается в настоящее время при помощи ЭВМ на этапе расчета системы, то для решения второй необходима разработка специальных методов контроля и соответствующей контрольной аппаратуры. Точность центрировки одиночных линз обуславливается биением шпинделя центрировочного станка и погрешностью установки линзы относительно оси вращения шпинделя. В зависимости от допустимых значений децентрировки, указанных в технической документации на линзу, и серийности ее производства применяются следующие способы центрировки одиночных линз [6]: I — механический, II — с применением методов контроля.

I. Механический способ центрировки линз на станке-автомате заключается в установке линзы автоматически путем сжатия между торцами патронов, закрепленных на концах двух противостоящих горизонтальных или вертикальных шпинделей. Точность центрировки определяется точностью совмещения осей вращения шпинделей (а также величиной их биения) и не превышает 0,01 мм.

II. Центрировка с применением оптических методов контроля осуществляется двумя способами.

1. Центрировка линзы на оптическом станке. Линза наклеивается на точно центрированный патрон, кромка которого расположена в плоскости, перпендикулярной к оси вращения шпинделя. Клеящий слой (смола) между кромкой патрона и стеклом должен быть равномерным и иметь минимальную толщину. Центр кривизны поверхности линзы, соприкасающейся с кромкой патрона, располагается на оси вращения шпинделя. Совмещение центра кривизны второй поверхности линзы с осью вращения осуществляется перемещением линзы по кромке патрона. Точность совмещения контролируется с помощью лупы или автоколлимационного микроскопа. Этот способ относится к наиболее трудоемким и применяется для изготовления линз с погрешностью центрировки, не превышающей 0,003—0,005 мм.

2. Полуавтоматическая центрировка с применением вакуумного крепления линз. По сравнению с предшествующим этот способ более производительен, так как полностью свободен от операций приклеивания линзы.

В отечественной оптико-механической промышленности для проверки точности центрировки одиночных линз (и склеенных компонентов) наибольшее распространение получили оптические приборы двух типов.

1. Коллимационные приборы, построенные по принципу измерения биения изображения светящейся марки, образованного контролируемым элементом в задней фокальной плоскости.

2. Автоколлимационные приборы, позволяющие измерять биение изображения светящейся марки, проецируемой в центр кривизны поверхности контролируемой детали в отраженном свете.

Оптическая схема коллимационного прибора изображена на рис. 7.3. Источник света 1 с помощью матового стекла 2 освещает перекрестие 3, расположенное в передней фокальной плоскости объектива 4. Объектив коллиматора создает бесконечно удаленное изображение светящегося перекрестия 3, которое через призму 5 проецируется контролируемым компонентом 6 в его фокальную плоскость. Диаметр окружности, описываемой изображением перекрестия при вращении контролируемого компонента в оправе, определяет удвоенную суммарную децентрировку, являющуюся результа-

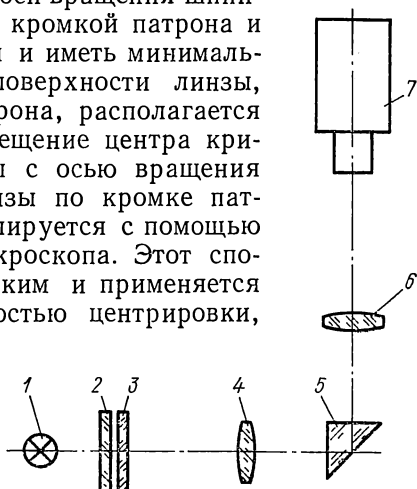


Рис. 7.3. Схема коллимационного центрировочного прибора

том смещения всех поверхностей компонента. Биение наблюдается в микроскоп 7 в увеличенном масштабе и измеряется по шкале, установленной в фокальной плоскости окуляра. Оптическая схема автоколлимационной трубки ЮС-13 изображена на рис. 7.4. Источник света 10 через конденсор 9 освещает перекрестие, прорезанное в светоделительном слое, нанесенном на пластине 8, которое объективами 2, 3 проецируется в центр кривизны поверхности контролируемой детали 1. Автоколлимационное изображение перекрестия в увеличенном масштабе наблюдается с помощью объектива 7, в плоскости шкалы 6 или матового стекла 5, установленных в фокальной плоскости окуляра 4. Биение автоколлимационного изображения светящейся марки

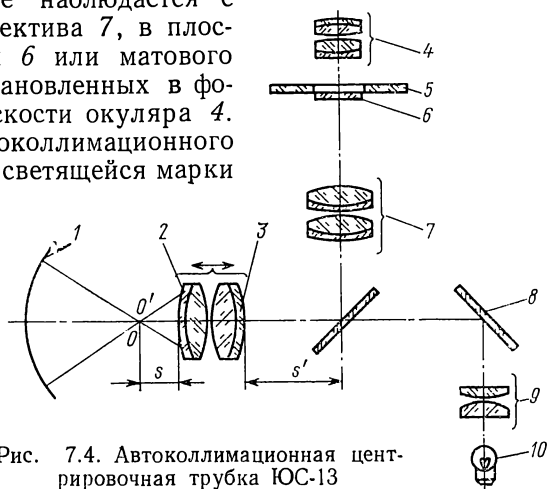


Рис. 7.4. Автоколлимационная центрировочная трубка ЮС-13

в четыре раза превышает величину смещения центра кривизны контролируемой поверхности. Объективы 2, 3 имеют продольную фокусирующую подвижку вдоль оптической оси в пределах 45—50 мм, кроме того, система элементов 2—3, 4—10 может перемещаться вдоль оптической оси относительно контролируемой поверхности на 90 мм. В результате этих двух перемещений создается возможность контролировать поверхности, радиусы кривизны которых лежат в диапазоне от $-\infty$ до $+\infty$.

В табл. 7.1 приведены результаты расчета увеличения v_1 , вносимого компонентами 2, 3 в зависимости от их положения, определяемого отрезками s , s' ; увеличение, создаваемое объективом 7, $v_2 = 8,32$. Здесь же даны значения децентрировки поверхностей c , найденные из условия, что диаметр наблюдаемого биения автоколлимационного изображения марки равен одному делению окулярной сетки, т. е. 0,1 мм.

Перспективы дальнейшего повышения эффективности серийного выпуска оптических систем, качество изображения которых ограничено только дифракцией, выдвигают проблему повышения точности центровки как одиночных линз, так и склеенных компонентов. В первую очередь эта проблема должна быть решена при изготовлении отрицательных линз, являющихся базовыми элементами на дальнейших операциях склеивания линз и крепления компонентов в оп-

s	s'	v_1	c	s	s'	v_1	c
—56,75	56,65	—0,998	3	—	26,09	0	20
—76,57	44,65	—0,606	5	624,58	24,65	0,047	64
—95,19	39,65	—0,443	7	292,61	23,15	0,096	33
—114,82	36,65	—0,345	9	163,58	21,15	0,161	19
—124,10	35,65	—0,312	10	119,40	19,65	0,210	15
—168,92	32,65	—0,214	15	73,17	16,65	0,308	10
—231,57	30,65	—0,149	21	49,23	13,65	0,406	8
—480,93	28,15	—0,067	51	38,80	11,65	0,472	6
—1699,25	26,65	—0,018	200				

равах. Так, анализ влияния смещений центров кривизны поверхностей планахроматических и планапохроматических объективов микроскопов, проведенный ранее, показал необходимость центрирования отдельных поверхностей объективов с точностью не менее 0,002 мм. Очевидно, что при точностях центрировки, приближающихся к предельно достижимым точностям изготовления элементов крепления (деталей шпинделя центрировочного станка) требуется одновременный контроль положений двух центров кривизны поверхностей проверяемой линзы от одной технологической базы. Решение этой проблемы потребовало создания принципиально новых схем контроля. Кроме того, эффективность ее решения в значительной степени обусловлена возможностью автоматизации процесса контроля и центрировки линз на операции кругления.

33. КОНТРОЛЬ ПОВЕРХНОСТЕЙ СКЛЕЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ В ПОЛОЖЕНИИ НАИЛУЧШЕЙ УСТАНОВКИ ПО ВИДУ ИСКАЖЕНИЙ ДИФРАКЦИОННОГО КРУЖКА

При оценках склеенных компонентов и узлов объективов применяется экспертный метод контроля. При этом компонент устанавливается вместо микрообъектива в микроскопе с механической длиной тубуса 160 мм. Изображение светящейся точки рассматривается через окуляр, увеличение которого выбирается из условия полезного увеличения микроскопа

$$\Gamma = V_K \Gamma_{OK} = 500 \div 1000 \text{ A}, \quad (7.3)$$

где V_K — увеличение компонента в микроскопе; Γ_{OK} — видимое увеличение окуляра; A — числовая апертура компонента.

В гл. I было показано, что для склеенных компонентов независимо от их аббераций в системе объектива существует положение плоскости предмета и изображения, при котором сферическая абберация имеет минимальное значение, удовлетворяющее для большей части компонентов критерию Релея. Условию наименьших аббераций отвечают компоненты всех микрообъективов, имеющих достаточно простую оптическую конструкцию (объективы с ахроматической кор-

рекцияй независимо от увеличений, апохроматы и планобъективы небольших увеличений).

Экспериментальное исследование возможностей метода контроля компонентов в положении наилучшей установки [28] состояло в сопоставлении структурных особенностей дифракционных изображе-

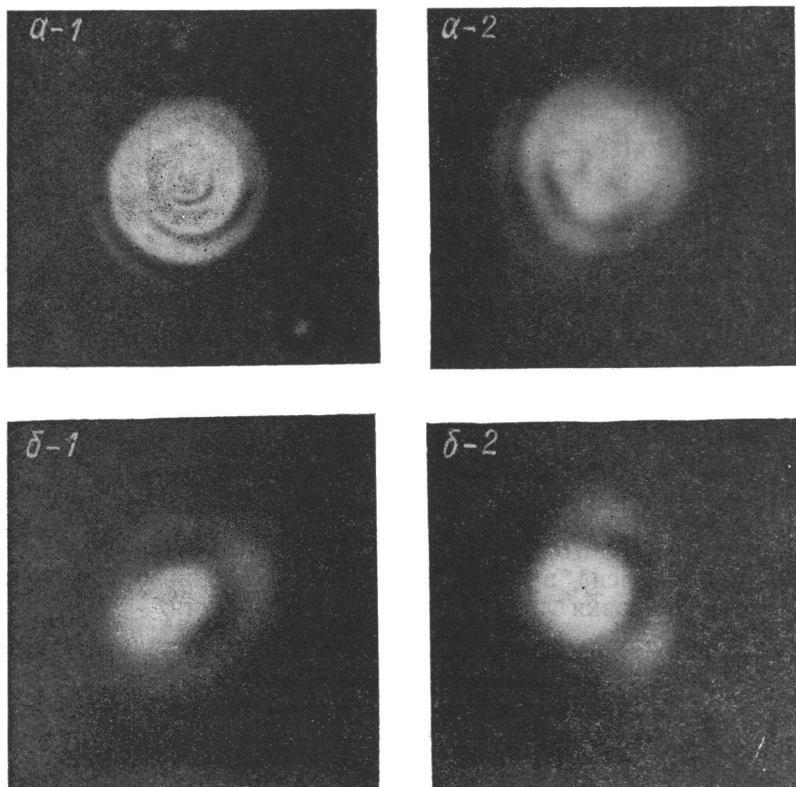


Рис. 7.5. Сравнительные результаты фоторегистрации дифракционных кружков компонентов микрооптики: *а* — в цеховой схеме контроля качества компонентов; *б* — в положении наименьших aberrаций

1 — децентрировка; *2* — ошибка типа «треугольник»

ний светящейся точки, построенных исследуемым компонентом в различных схемах. Рассмотрены 2 варианта работы компонента микрообъектива ОМ-12, имеющего положение наилучшей установки вблизи передней фокальной плоскости: вариант 1 — при установке на место объектива в микроскоп с длиной тубуса 160 мм в соответствии с принятым в производстве методом контроля; вариант 2 — при установке на место объектива в микроскоп для контроля объективов с длиной тубуса ∞ .

На рис. 7.5 приведены сравнительные результаты фоторегистрации точки для вариантов 1 и 2. Показаны изображения точки при

наличии характерных дефектов типа «децентрировка» и «треугольник», возникающих на операциях склеивания компонентов и крепления их в оправе. Как видно из приведенных фотоснимков, дефекты структуры точки, малоразличимые в традиционной схеме (вариант 1) либо неразличимые совсем, очень четко просматриваются в схеме контроля по варианту 2.

Результаты экспертной оценки по данным трех наблюдателей показали, что применение фоторегистрации повышает чувствительность и наглядность визуальной аттестации формы точки, делает оценки более сопоставимыми. Создается возможность коллокативного наблюдения дифракционной картины и сопоставительного анализа результатов последовательных оценок. Резко повышается чувствительность к искажениям волнового фронта, существенно снижается время контроля, повышается его производительность и надежность, уменьшается нагрузка на зрение контролера, т. е. улучшаются условия труда.

Использование метода и созданного на его базе прибора (рис. 7.6) дало возможность получить новый технологический процесс контроля компонентов высокоточных объективов микроскопов с дифракционным качеством изображения, снизить до минимума число бракованных компонентов, пропущенных на сборку, и таким образом уменьшить трудоемкость продукции, повысить эффективность производства и качество продукции.

Экспертный метод оценки качества систем и элементов микрооптики находит широкое применение в условиях производства, особенно при выпуске крупносерийной и массовой продукции. Совершенствование экспертного метода и аппаратуры для его реализации идет в направлении получения приборов, дающих наиболее наглядные результаты, комфортные условия наблюдения, что повышает производительность и надежность контроля, снижает утомляемость работников, занятых на этой операции. Это в свою очередь позволяет привлечь к контрольным операциям рабочих невысокой квалификации и дает возможность снизить сроки обучения и адаптации на рабочем месте.

Эффективным средством реализации контроля качества изготовления компонентов оптики микроскопов по виду дифракционного

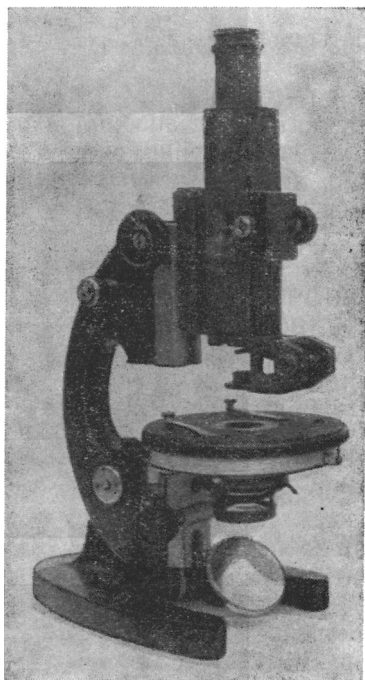


Рис. 7.6. Прибор для контроля качества компонентов микрооптики в положении наименьших аберраций

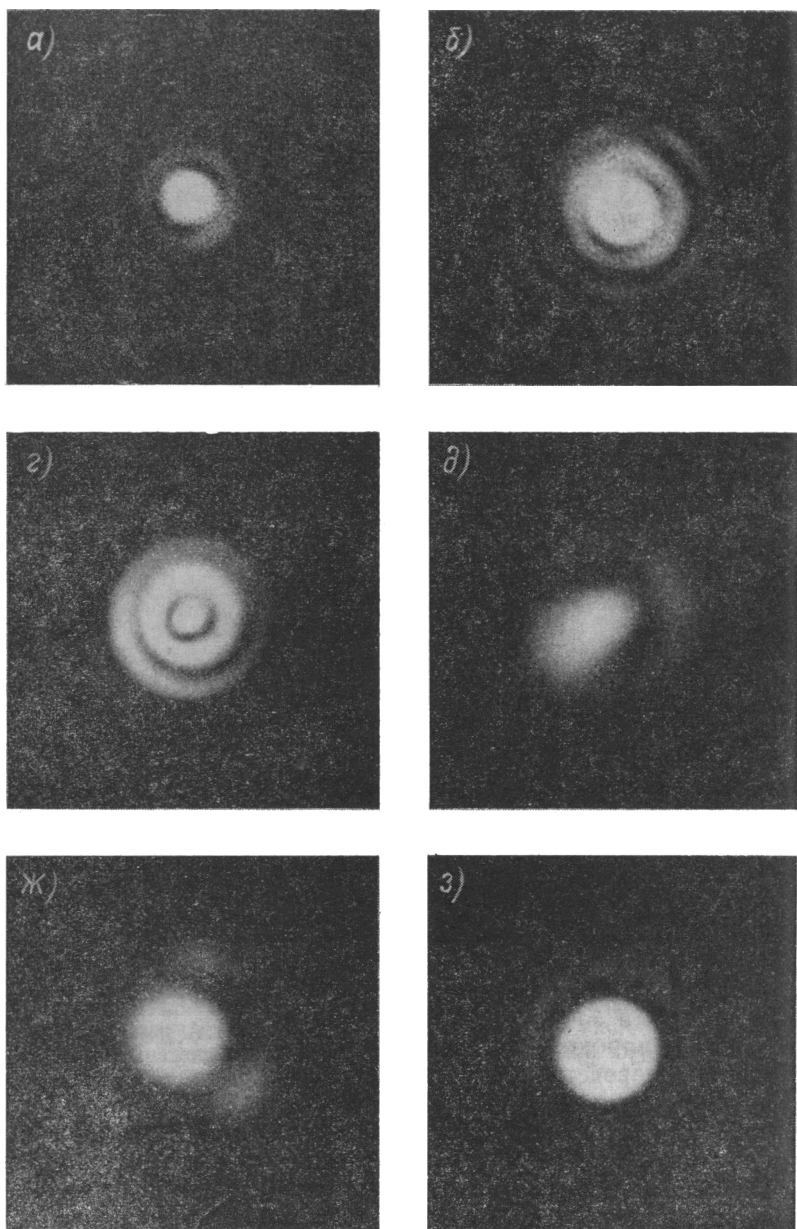
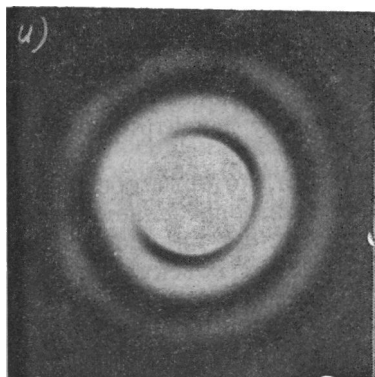
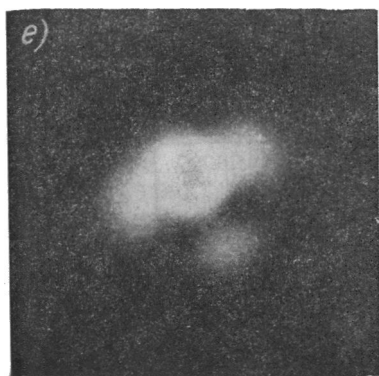
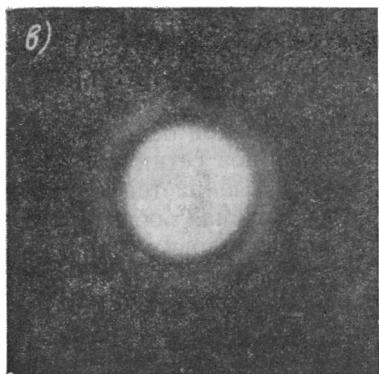


Рис. 7.7. Типовые искажения дифракционного кружка компонентол микрооптики: *а* — мальны (компонент, признанный годным); *б* — то же с увеличением экспозиции; *в* — сильная сферическая aberrация; *г* — ошибка типа комы; *ж* — ошибка типа ас угольник; *з* — дифракционный кружок, максимально приближенный к идеальному;



а — aberrации изготовления мини-
в — слабая сферическая aberrация;
 тигматизма; *жс* — ошибка типа «тре-
и — то же с увеличением экспозиции

изображения точки является принцип, рассмотренный в п. 3. Использование этого принципа дает возможность вести контроль компонента при минимальных расчетных aberrациях. Отметим, что при контроле в цеховом приборе при установке компонента в положение микрообъектива aberrации могут превосходить 20λ . При этом грубые дефекты компонента обнаруживает лишь опытный эксперт и только при сильной расфокусировке изображения. Типовые искажения формы дифракционных точек, наблюдаемые в приборе при установке компонентов в положение наименьших aberrаций для четырех серийных микрообъективов разного увеличения приведены на рис. 7.7.

34. АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ЦЕНТРИРОВКИ СКЛЕЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ МИКРООБЪЕКТИВОВ. ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ЦЕНТРИРОВКИ В ПОЛОЖЕНИИ НАИЛУЧШЕЙ УСТАНОВКИ

В гл. I выведены соотношения, определяющие поперечное смещение осевой точки изображения в оптической системе, содержащей децентрированные поверхности. Было показано, что в результате суммарного действия децентрировок поверхностей это смещение определяется равенством (1.7)

$$\Delta y' = \sum_{i=1}^{i=k} \Delta c_i (1 - v_i) \prod_{i=1}^k v_{i+1},$$

где Δc_i — смещение от оси центра кривизны i -й поверхности; v — увеличение i -й поверхности.

Используя это соотношение, определим точность центрировки поверхностей, входящих в схему микрообъектива, которая обеспечивается существующими средствами контроля. Коллимационный метод в силу своей высокой производительности является общепринятым при контроле элементов микрооптики. Контролируемый компонент устанавливает-

ся в микроскоп, осветительная система которого строит изображение светящегося перекрестия в бесконечности. При вращении компонента в оправе в фокальной плоскости окуляра наблюдается биение изображения перекрестия, величина которого пропорциональна удвоенному значению поперечного смещения заднего фокуса контролируемого компонента относительно геометрической оси оправы $\Delta y_{F'}$. Если иметь в виду, что цена деления окулярной сетки составляет 0,1 мм, а увеличение объектива микроскопа выбирается $v_{об} = -3,7\times$, то $\Delta y_{F'} = 0,01$ мм (величина, указываемая обычно в технической документации как допуск на децентрировку линз и склеенных компонентов микрооптики).

Расчет первого параксиального луча был выполнен для бесконечно удаленной плоскости предмета в компонентах ахроматического объектива ОМ-41, имеющего увеличение $90\times$ и числовую апертуру в среде иммерсии $A = 1,25$ (значения конструктивных элементов компонентов 3, 4 взяты из табл. 1.3). В табл. 7.2 приведены значения

Таблица 7.2

Номер компонента	v_1	v_2	v_3	Δc_1 , мм	Δc_2 , мм	Δc_3 , мм
3	0	0,404	-0,551	0,044	0,030	0,006
4	0	-0,220	-0,876	0,052	0,009	0,005

увеличений v_i для соответствующих поверхностей компонентов и децентрировок Δc_i . Последние найдены из предположения, что весь допуск $\Delta y_{F'} = 0,01$ мм отнесен к каждой поверхности поочередно.

Таким образом, при контроле компонентов объектива ОМ-41 коллимационным методом может возникнуть децентрировка склеенной поверхности $\Delta c_i = 0,03$ мм (компонент 3). Вместе с тем, влияние поперечного смещения центров кривизны поверхностей в объективе, исследованное с помощью ЭВМ, показывает, что именно эта поверхность при своем смещении на $\Delta c_i = 0,01$ мм вызывает кому на оси $k_i = 0,050$ мм, что составляет 0,65 допуска на кому децентрировки всего объектива.

Еще большее несоответствие между точностями, которые обеспечивают коллимационным методом, и точностями, определяемыми критериями качества изображения в оптической системе микроскопа, наблюдается в высокоапертурных апохроматических объективах и планобъективах. Для устранения погрешностей процесса склеивания линз компоненты этих объективов подвергаются дополнительной центрировке при креплении компонентов в оправе. Контроль ведется при помощи лупы, через которую наблюдается биение изображений источника света (настойной лампы), построенных поверхностями компонента в отраженном свете. Операция закатки требует высокой квалификации и мастерства рабочего, который должен добиться не только совмещения центров кривизны всех поверхностей компонента, но и соосности последнего с оправой компонента. За-

зор между торцевой поверхностью компонента и оправой заполняется при этом слоем клеящего вещества, обычно бальзама. Следует отметить, что проблема повышения точности центрировки, от решения которой зависит эффективность выпуска объективов с плоским полем изображения, обуславливает необходимость применения в качестве клеящего материала для особо точных элементов микрооптики бальзамина-М (ГОСТ 14887—80), гарантирующего равномерность и минимальную толщину слоя между склеиваемыми поверхностями. Однако, поскольку бальзамин-М не допускает нагрева, операция совмещения оптической оси компонента с геометрической осью оправы может осуществляться только обработкой наружного диаметра оправы (очевидно, что зазор между оправой и торцевой поверхностью компонента в этом случае бальзамином не заполняется). Отсюда следует, что поверхности компонента должны быть центрированы с высокой точностью еще на операции склеивания линз. Это требование совпадает с требованиями, определяемыми необходимостью автоматизации отдельных операций изготовления микрооптики. Анализ аберраций компонентов в коллимационной схеме контроля (сферическая аберрация склеенных компонентов высокоапертурных объективов микроскопов в волновой мере достигает 50—100λ) показал, что дальнейшее увеличение масштаба изображения в схеме контроля бесполезно. Вместе с тем, если использовать положение наилучшей установки, существование которого в компонентах микрообъективов было показано в гл. I, то в системе микроскопа, содержащего контролируемый компонент вместо объектива, может быть выполнено условие полезного увеличения $\Gamma = 500 \div 1000A$. Здесь A — числовая апертура компонента, $A = D_h/2s_k$, где D_h — его световой диаметр; s_k — положение плоскости наилучшей установки в пространстве предметов. При этом масштаб изображения $\Delta y'_A$ увеличивается, как показывают численные исследования, в 2,5—3 раза.

Принцип контроля центрировки склеенных компонентов в положении наилучшей установки реализован в настоящее время в микроскопе, внешний вид которого показан на рис. 7.8, а. Прибор разработан на базе штатива микроскопа «Полам», содержит основание 8 с встроенным осветителем 7 «Полам», снабженным галогенно-кварцевой лампой КГМ9-70, которая подключается к блоку питания.

В верхней части штатива установлен тубус 3 с фокусирующей системой и механизмом фокусировки 5 (ПК-851-080). Фокусирующая система предназначена для обеспечения контроля широкой номенклатуры компонентов в положении наилучшей установки.

На тубус фокусирующей системы установлена монокулярная насадка 4 (МОН-4) с набором окуляров разного увеличения: АМ-11 (7×); АМ-10 (10×); АТ-38 (15×). В окуляры установлены специальные измерительные сетки со скрещенными шкалами (цена деления шкалы 0,1 мм). Набор окуляров позволяет изменять в требуемых пределах чувствительность прибора.

В нижней части прибора, в отверстие основания, установлен объектив коллиматора 1. В подвижной каретке конденсора 2 имеется

специальный двусклеенный объектив-конденсор. На подвижном кронштейне смонтирован специально спроектированный столик микроскопа *б* с устройством для точного вращения компонента относительно оси торцевой поверхности. В нижней части тубуса микроскопа имеется резьба для вспомогательных сменных объективов.

Основные элементы оптической схемы контрольно-измерительного микроскопа: лампа КГМ-9-70 с коллектором и тест-объектом (осветитель), поворотное зеркало, коллиматорный объектив, сменный светофильтр, конденсор, сменные объективы, фокусирующая тубусная система из подвижного и неподвижного элементов, монокулярная насадка (МОН-4), сменные окуляры.

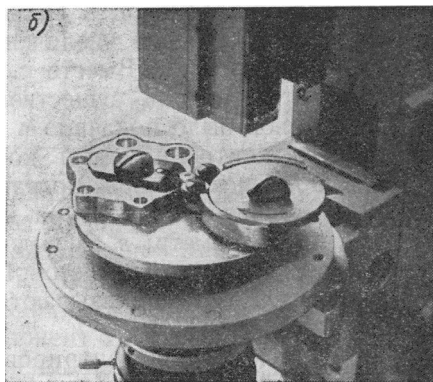
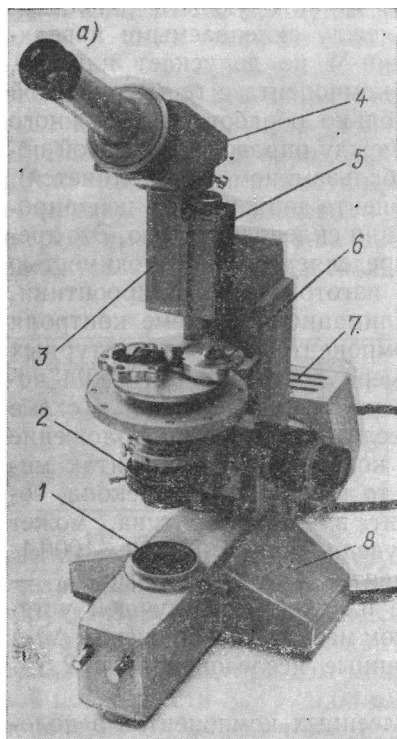


Рис. 7.8. Контрольно-измерительный микроскоп для склейки и центрировки компонентов оптики микроскопов и контроля качества компонентов: *а* — общий вид; *б* — устройство для вращения компонента

Технические данные прибора следующие: диапазон вертикальных перемещений столика — 75 мм; увеличение сетки коллиматора (отношение f' конденсора к f' коллиматора) — $0,108\times$.

Качество изображения сетки через оптическую систему прибора (без исследуемого компонента) ограничивается только дифракцией.

Основные преимущества контроля склеенных компонентов в положении наилучшей установки следующие:

1. Повышение точности центрировки при склеивании линз в 2,5—3 раза по сравнению с коллимационным методом в результате реализации условия полезного увеличения в системе контроля.

2. Возможность контроля деформаций, вызываемых неравномерностью слоя клея на операции склеивания линз; при достижении точ-

ности центрировки, заданной в технической документации, не должны обнаруживаться искажения в дифракционном изображении точечного тест-объекта, создаваемом компонентом.

3. Возможность совмещения двух контрольных операций: контроля качества компонентов и точности центрировки в положении наилучшей установки при помощи одного прибора.

Глава VIII

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

35. ЭКСПЕРТНЫЙ МЕТОД

При контроле микрообъективов, так же как и при контроле их компонентов, наибольшее распространение в условиях производства получил экспертный метод оценки структуры дифракционного пятна [51], построенного исследуемым объективом (дифракционный метод контроля). Этот метод является общепринятым как в цеховых, так и в лабораторных условиях. Он отличается высокой чувствительностью, производительностью и оперативностью.

Схема контрольной установки изображена на рис. 8.1. Лампа 1 через коллектор 2, диагональное зеркало 3 и конденсор 4 освещает точечную диафрагму 5 (так называемый точечный препарат). Освещенная точечная диафрагма рассматривается через микроскоп, содержащий контролируемый объектив 6 и окуляр 7, наблюдателем 8. Картина дифракционного кружка служит для интегральной оценки искажений фронта волны в зрачке системы, т. е. наличия аберраций. В этом состоит одно из основных преимуществ метода.

Объектив, не имеющий аберраций, превышающих критерий Релея, дает в плоскости наилучшей установки изображение светящейся точки (рис. 7.7, а, б) в виде кружка Эри, который представляет собой яркий центральный максимум, окруженный кольцами с быстро убывающей освещенностью в них (при обычном освещении различимо одно кольцо).

При наличии в объективе сферической аберрации дифракционная картина видоизменяется. Ослабевает освещенность центрального максимума и повышается освещенность дифракционных колец. Число колец, непосредственно наблюдаемых глазом, возрастает с увеличением аберрации (рис. 7.7, г). Если в объективе имеется кома или

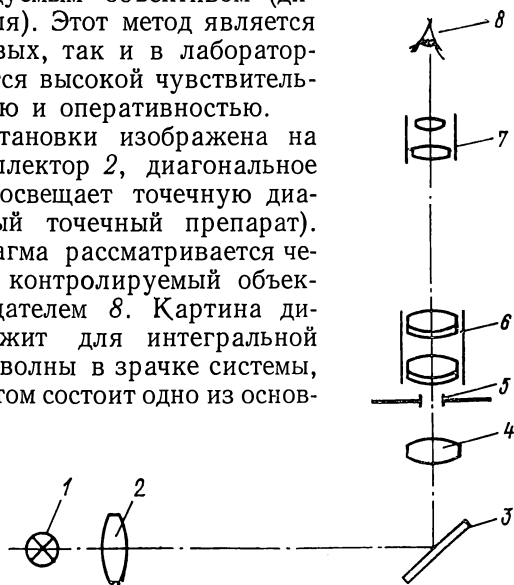


Рис. 8.1. Схема контроля элемента микрооптики по виду изображения дифракционной точки

астигматизм, дифракционное изображение точки теряет правильную форму кружка (рис. 7.7, *д, ж*). Ошибки изготовления оптических поверхностей, неоднородности стекла, деформации линз при их закреплении в оправе и склейке вызывают изменение формы дифракционных колец, образование фоновых засветок изображения, ореолов и «хвостов». При наличии хроматизма кольца приобретают окраску.

Дифракционный метод на практике является единственным методом контроля микрооптики, широко распространенным в условиях производства, при изготовлении и сборке ее элементов. Он позволяет обнаружить действие практически всех дефектов системы, включая загрязнение поверхностей, блики, рассеянный свет.

Недостатки этого метода следующие:

- 1) не дает количественных значений аберраций микрообъектива;
- 2) не позволяет определить разрешающую способность объектива при визуальной оценке дифракционного кружка;
- 3) для проведения контроля высококачественных систем по дифракционному кружку требует высококвалифицированных экспертов, имеющих многолетний опыт работы.

В качестве точечных диафрагм при контроле микрооптики по дифракционному кружку используются мельчайшие отверстия, обычно присутствующие в алюминиевом или серебряном покрытии плоских зеркал. Размеры таких отверстий могут составлять единицы микрометров.

Для оценки разрешения микрообъективов потребителем используются препараты микроскопических структур растительных и животных тканей. Наиболее широко распространены срезы микроводорослей — диатомей. Частота элементов этих структур заранее измерена и имеет определенное значение для данного вида. Подбираются структуры с шагом от 1,8 до 0,25 мкм. При таком контроле одновременно с определением разрешения эксперт обнаруживает дефекты объектива и оценивает его качество. Общепринято пользоваться небольшим набором (до десяти) препаратов различных диатомей.

Толщину покровного стекла, соответствующую наилучшей коррекции объектива, находят используя тест-пластинку Аббе. Она же позволяет качественно оценить исправление сферической аберрации и хроматизм. Пластика Аббе представляет собой стеклянный клин, имеющий с одной стороны зеркальное покрытие, по которому на расстояниях от 1,9 до 0,3 мкм нарезаны штрихи. Толщина клина от 0,09 до 0,24 мм; он наклеен на предметное стекло. Эксперт наблюдает размытие и окрашивание краев штрихов в изображении, словесно описывает наблюдаемую картину и дает качественную оценку системе при ее работе в прямом и косом освещении.

Фоторегистрация при оценке качества изображения микрообъективов используется главным образом тогда, когда микроскоп предназначен для работы с невидимым излучением (ультрафиолетовым или инфракрасным) и когда испытываются микрообъективы, предназначенные специально для микрофотографии. Объектами могут служить сетки и миры с шагом штрихов от 100 до 1 мкм. Качество изображения оценивается экспертным методом по четкости краев

изображения штрихов, общему контрасту фотоизображения и характеру искажения штрихов объекта в пределах рабочего поля. Кроме того, препарат «решетка» используется для контроля кривизны поля и дисторсии изображения, построенного микрообъективом.

Очевидно, что при увеличении серийности и повышении точности современной микрооптики экспертный метод не удовлетворяет требованиям производства, так как не поддается автоматизации, а получаемые оценки неоднозначны и зависят от индивидуальных особенностей эксперта. Поэтому ведутся работы по созданию количественных методов контроля и аттестации оптических систем микроскопов.

36. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ОПТИКИ МИКРОСКОПА

С точки зрения потребителя, эксплуатирующего оптическую систему, строящую изображение, важнейшая задача контроля и аттестации — измерение действительной структуры изображения и сопоставление полученного результата с расчетной характеристикой.

Для решения этой задачи можно использовать метод оценки функции распределения освещенности в изображении светящейся точки (ФРТ), полученной путем прямого измерения структуры пятна рассеяния. ФРТ может быть использована как первичная характеристика качества изображения, так как она позволяет расчетным путем перейти к другим требуемым характеристикам и критериям качества изображения, таким как функция рассеяния линии (ФРЛ), частотно-контрастная характеристика (ЧКХ), краевая функция, разрешение и т. д.

Обозначим ФРТ как двумерную функцию распределения относительной освещенности $D(y'; z')$, где y' и z' — прямоугольные координаты в плоскости изображения. Распределение освещенности в изображении точки, построенном идеальной оптической системой (рис. 8.2), описывается выражением [9]:

$$D(y'; z') = \left[\frac{2J_1(Z)}{Z} \right]^2. \quad (8.1)$$

Здесь $J_1(Z)$ — функция Бесселя 1-го рода 1-го порядка аргумента

$$Z = 2\pi r' A' / \lambda,$$

где r' — расстояние от центрального максимума в плоскости изображения точки, $r' = \sqrt{(y')^2 + (z')^2}$; λ — длина волны света; A' — задняя апертура объектива, $A' = \sin \sigma'$ (σ' — апертурный угол в пространстве изображений).

На практике широко используется значение радиуса первого темного кольца дифракционного пятна, связанное с линейным пределом разрешения оптической системы [65]. Предельное разрешение оптического прибора при изображении им двух близко расположенных точек достигается при попадании центрального максимума одного дифракционного кружка на первый минимум второго кружка (рис. 8.3).

Определим линейный предел разрешения с помощью ФРТ. Если $D_1(y')$ и $D_2(y')$ — распределения освещенности в двух отдельных изображениях светящихся точек, то при близком расположении точек их изображения частично накладываются и дают некоторое суммарное распределение освещенности

$$I(y') = D_1(y') + D_2(y').$$

Обозначив расстояние между точками в объекте через ε , определим контраст в изображении пары точек:

$$K = \frac{I_{y'_0} - I_{y'_0/2}}{I_{y'_0}} \gg K_{\text{п}}, \quad (8.2)$$

где $K_{\text{п}}$ — пороговый контраст, который может быть уловлен приемником изображения. Две точки объекта различаются, если контраст

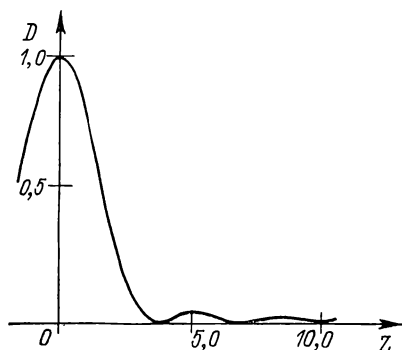


Рис. 8.2. Распределение освещенности в дифракционном изображении точки, построенном идеальной оптической системой

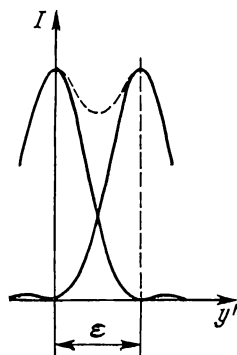


Рис. 8.3. Распределение освещенности в дифракционном изображении пары близко расположенных точек

в их изображении больше или равен пороговому контрасту приемника. Для идеальной системы при

$$\Delta y' = \varepsilon = 0,61\lambda/A \quad (8.3)$$

контраст в изображении пары точек составляет 0,2.

Понятие функции рассеяния применяют для описания структуры изображения линии [89]. Распределение относительной освещенности в этом изображении (по нормали к направлению линии) называют функцией рассеяния линии (ФРЛ), которая может быть получена как результат интегрирования ФРТ по одному из направлений:

$$D_{\text{л}}(y') = \int_{-\infty}^{\infty} D(y'; z') dz'. \quad (8.4)$$

Практическое применение ФРЛ и способы ее измерения будут рассмотрены в пп. 40, 41.

Современная теория образования изображения предусматривает возможность представления объекта как суммы элементарных синусо-

идальных составляющих, различающихся амплитудой, пространственной частотой и фазой. Изображение синусоидальной структуры, построенное оптической системой, также имеет синусоидальную структуру, а изображение более сложного объекта может быть получено путем суммирования синусоидальных составляющих. В этом случае передача изображения через оптическую систему описывается математическим аппаратом Фурье [53].

Преобразование Фурье двумерного объекта

$$o(\mu; \nu) = \iint_{-\infty}^{\infty} O(y; z) e^{-2\pi i(\mu y + \nu z)} dy dz, \quad (8.5)$$

где μ и ν — пространственные частоты синусоидальных составляющих в направлениях соответственно y и z , или в сокращенном виде

$$O(y; z) \xrightarrow{F} o(\mu; \nu).$$

Функцию, описывающую двумерное изображение, считая увеличение оптической системы единичным, обозначим $I(y; z)$. Выполним преобразование Фурье:

$$I(y; z) \xrightarrow{F} i(\mu; \nu).$$

Аналогично найдем преобразование Фурье функции рассеяния точки

$$D(y; z) \xrightarrow{F} d(\mu; \nu).$$

При этом

$$i(\mu; \nu) = o(\mu; \nu) d(\mu; \nu). \quad (8.6)$$

Амплитуда каждой частотной составляющей изображения может быть найдена перемножением соответствующей частотной составляющей объекта на функцию $d(\mu; \nu)$, которая называется оптической передаточной функцией (ОПФ). Как показано, ОПФ может быть получена как преобразование Фурье ФРТ:

$$d(\mu; \nu) = \iint_{-\infty}^{\infty} D(y; z) e^{-2\pi i(\mu y + \nu z)} dy dz. \quad (8.7)$$

Для одномерного тест-объекта (освещенной щели) имеем

$$d_{\pi}(\mu) = \int_{-\infty}^{\infty} D_{\pi}(y) e^{-2\pi i \mu y} dy. \quad (8.8)$$

ОПФ может быть выражена через модуль $T(\mu)$ и аргумент $\varphi(\mu)$:

$$d_{\pi}(\mu) = T(\mu) e^{i\varphi(\mu)}. \quad (8.9)$$

Модуль ОПФ характеризует способность системы передавать контраст объекта при изображении структур различной частоты и называется частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ). Аргумент

ОПФ представляет собой частотно-фазовую характеристику и определяет правильность передачи оптической системой пространственного расположения малых структурных элементов.

Объект, характеризующийся распределением яркости, состоящим из постоянной составляющей и синусоидальной гармоник, может быть представлен выражением:

$$O(y) = b_0 + b_1 \cos 2\pi\mu y, \quad (8.10)$$

где b_0 — средняя яркость; b_1 — амплитудное значение яркости; μ — пространственная частота.

Распределение освещенности в изображении этого объекта

$$I(y) = b_0 + b_1 T_\mu \cos (2\pi\mu y - \varphi). \quad (8.11)$$

Это выражение отличается от предыдущего появлением фазового угла φ , показывающего смещение изображения, и изменением амплитуды в T_μ раз.

Контраст синусоидального объекта

$$K = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}}, \quad (8.12)$$

где E_{\max} и E_{\min} — максимальная и минимальная интенсивности (относительная яркость предмета или относительная освещенность изображения) соответственно.

Если контраст объекта

$$K_0 = b_1/b_0, \quad (8.13)$$

то контраст изображения

$$K_I = b_1 T_\mu / b_0, \quad (8.14)$$

откуда коэффициент изменения амплитуды

$$T_\mu = K_I / K_0. \quad (8.15)$$

Значение ЧКХ на фиксированной частоте называют коэффициентом передачи контраста (КПК). Способ оценки качества изображения по этой функции обладает рядом преимуществ по сравнению с другими существующими способами. Он дает более полную информацию, чем разрешение. С помощью ЧКХ можно по результатам расчета оптической системы быстро и точно предсказать, как будет эта система изображать любой объект периодической структуры, и определить падение контраста в изображении этих структур. Когда волновая aberrация системы превышает две-три волны, вычисление ЧКХ производится на основе геометрической оптики, т. е. без учета дифракции. Если же волновая aberrация составляет меньше двух длин волн, то дифракция принимается во внимание.

Наиболее полное представление о качестве изображения дает полихроматическая частотно-контрастная характеристика, с помощью которой можно сравнить достоинства апохроматов по сравнению с ахроматами. Как показывают вычисления, при волновых aberrациях 0,05—0,07λ величина ЧКХ не отличается от ЧКХ

идеальной системы и поэтому при таких значениях волновых аберраций отпадает необходимость ее определения. На контрастность изображения могут влиять рассеянный свет, направленность освещения и т. д. Вопросы вычисления ЧКХ и оценки ее как критерия качества изображения достаточно подробно освещены в работе [76]. При экспериментальном определении ЧКХ нередко пользуются мирой, имеющей синусоидальную структуру. Изображения миры обычно сканируют узкой щелью.

При исследовании объективов микроскопов задача аппаратурной реализации измерения ЧКХ усложняется в связи с необходимостью применения тест-объектов с чрезвычайно высокими пространственными частотами, до $3 \times 10^3 \text{ мм}^{-1}$ [57, 71]. Измерения ЧКХ прямым методом производятся на аппаратуре с фотоэлектрическим приемником сигнала при использовании гармонического анализа изображения миры Фуко с П-образным распределением пропускания. Используемый в установке избирательный электрический фильтр, введенный между приемником и отсчетным прибором, выделяет требуемую частоту, подавляя гармоники. В связи с невозможностью изготовления миры требуемой частоты тест-объект формируется при помощи дополнительного микроскопа, работающего в обратном ходе лучей и создающего уменьшенное изображение материального тест-объекта в предметной плоскости исследуемого микрообъектива. Для того чтобы измеренные таким образом значения коэффициента передачи контраста (КПК) характеризовали исследуемый объектив, аберрации проекционного микроскопа должны быть пренебрежимо малы по сравнению с аберрациями контролируемого микрообъектива.

37. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПЯТНА РАССЕЯНИЯ. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СКАНИРОВАНИЕ И ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ ФОТОМЕТРИЯ

По результатам визуальных оценок невозможно определить в количественной форме распределение освещенности в пятне рассеяния $D(y'; z')$, т. е. перейти к однозначным количественным критериям оценки качества изображения. Это, в свою очередь, не позволяет точно количественно аттестовать систему и исключает автоматизацию контроля. Поэтому в современных условиях производства при повышении требований к качеству изображения оптических систем появились методы количественной оценки структуры пятна рассеяния.

Совокупность этих методов можно разбить на три основные группы: 1) методы фотоэлектрического сканирования; 2) методы фотографической фотометрии; 3) изофотометрические методы.

Фотоэлектрические методы измерения распределения освещенности в пятне рассеяния осуществляются с помощью сканирующих диафрагм. Увеличенное оптическое изображение пятна рассеяния сканируется диафрагмой, диаметр которой в 40—50 раз меньше исследуемого поля. Обычно сканирование производится по ряду параллельных прямолинейных строк. Выводя на осциллограф сигнал строки, наблюдают график изменения напряжения видеосигнала по

этому сечению, которое в определенных пределах, зависящих от формы световой характеристики фотоприемника, пропорционально освещенности в каждой точке строки сканирования.

Однако за пределами этого линейного участка напряжение сигнала при сканировании непропорционально уровню освещенности, причем отклонение от пропорциональности изменяется по нелинейному закону. Поэтому фотометрическая структура пятна искажается и измерения носят лишь ориентировочный характер. Линейный участок световой характеристики для существующих фотоприемников в режиме непрерывного сканирования не позволяет оценивать перепады освещенности более чем в 100 раз. В то же время практика исследования ФРТ реальных приборов показывает, что для достоверной оценки концентрации энергии в пятне рассеяния необходимо измерить ФРТ в пределах не менее четырех порядков. Тем не менее, этот метод позволяет восстановить приближенную фотометрическую структуру пятна рассеяния в виде совокупности фотометрических сечений.

Работа микрофотометра по этому методу описана Г. В. Креопаловой и Д. Т. Пуряевым [41]. Прибор предназначен для наблюдения структуры пятна рассеяния системы и состоит из оптической скамьи, сканирующего устройства и регистрирующей электронной схемы. Другие известные схемы фотоэлектрического сканирования пятна рассеяния в принципе подобны той, что описана, и отличаются чаще всего лишь аппаратурным оформлением.

Трудности при реализации таких измерений следующие: 1) малые размеры пятна рассеяния; 2) недостаток света в схеме контроля; 3) вибрации в схеме, вызывающие перемещение исследуемого пятна рассеяния во время измерений. Эти трудности взаимосвязаны. Малый размер сканирующей диафрагмы не позволяет создать на фотокатode приемника освещенности, достаточные для применения высоких скоростей сканирования. С другой стороны, вибрации, неизбежные в условиях производства, вызывают перемещения пятна рассеяния по полю, что может привести к весьма большим погрешностям измерений, если весь цикл сканирования занимает отрезок времени, за который пятно рассеяния смещается на расстояние, превышающее 5—10 % его диаметра. Поэтому установки данного типа должны быть отнесены к лабораторным устройствам и их применение для контроля серийной продукции в цеховых условиях связано с серьезными ограничениями.

Фотографический процесс при использовании его в оптической измерительной системе обладает следующими достоинствами [43]:

1) двумерное воспроизведение исследуемой картины доступными и надежными средствами, стабильность изображения во времени, получение неограниченного числа копий;

2) простота системы регистрации, возможность переноса процесса анализа данных с рабочего места в цехе на универсальную лабораторную аппаратуру обработки изображения и ввода данных в ЭВМ;

3) использование самого фотопроцесса в режиме двумерного преобразования информации с выполнением операций квантования по уровням плотности, выделение линий равной плотности, фильтрация

пространственных частот при фотообработке, устранение оптических шумов т. е. приведение измерительной информации к виду, оптимальному для ввода в ЭВМ.

Рассмотрим основные характеристики процесса применительно к задаче исследования структуры оптического изображения [44]. Светочувствительность фотослоя имеет иной характер, чем чувствительность к свету человеческого глаза или фотоэлектрического приемника. Если последние в обычных условиях воспринимают мгновенное значение яркости объекта, то фотографическая эмульсия реагирует на общее количество световой энергии, которое в фотографической практике называют экспозицией и обозначают через H , причем $H = Et$, где E — освещенность оптического изображения в данной точке поверхности фотослоя; t — время действия света.

Оптическая плотность почернения D_n является функцией логарифма экспозиции. Кривая взаимосвязи между измеренным почернением и наложенной экспозицией $D_n = f [\lg (Et)]$ называется характеристической кривой фотоматериала.

Прямолинейный участок, или рабочая часть кривой, характеризуется зависимостью

$$D_n = \gamma \lg (Et), \quad (8.16)$$

где $\gamma = \operatorname{tg} \alpha$ — тангенс угла наклона прямолинейного участка к оси абсцисс, называемый коэффициентом контрастности.

Форма характеристической кривой фотоматериала зависит главным образом от его типа и условий проявления. Как правило, в выражении

$$D_n = f [\lg (Et)]$$

значение $t = \operatorname{const}$, что соответствует равному времени экспозиции для всех участков изображения. В этом случае характеристическая кривая представляет собой зависимость

$$D_n = f (\lg E),$$

которая связывает оптическую плотность почернения в фотографическом изображении с освещенностью в оптическом изображении.

Для использования фотографического материала в качестве средства для измерения фотометрической структуры оптического изображения необходимо установить и поддерживать соответствие между освещенностями в оптическом изображении и оптическими плотностями, выражаемое характеристической кривой. При этом необходимо соблюдать следующие правила:

- 1) на фотоматериале наряду с исследуемым оптическим изображением объекта зарегистрировать фотометрический клин;
- 2) задать время экспозиций изображения объекта и время экспозиции фотометрического клина равными;
- 3) учитывая непостоянство свойств фотоматериала внутри партии, изображение объекта и клина получить на одном куске фотоматериала;
- 4) проявлять оба изображения в строго одинаковых условиях;

5) обеспечивать идентичность условий измерения оптической плотности, так как в зависимости от направленности светового пучка при измерении найденные значения плотности могут различаться.

Рассмотрим фотографическую фотометрию идеального дифракционного кружка (рис. 8.4, *а*). Как известно, освещенность в максимумах дифракционных колец распределяется в соотношении: 1 : 0,0175 : 0,042 : 0,0016... В логарифмической шкале соотношение этих величин имеет вид:

$$\lg E_{\max} = 0; -1,8; -2,4; -2,6...$$

Соотнесем распределение освещенности в дифракционном пятне с характеристической кривой нормального фотоматериала, рассматривая регистрацию на прямолинейном участке. Спроектируем линейный участок на ось $\lg E$ графика распределения освещенности. Как видно из рисунка, диапазон пропорционального воспроизведения не позволяет произвести регистрацию распределения освещенности в идеальном дифракционном кружке. В этот диапазон $\Delta \lg E$ (называемый фотографической шириотой фотоматериала) попадает лишь часть центрального максимума и при этом не укладываются дифракционные кольца. Либо, наоборот, могут быть зарегистрированы дифракционные кольца, но при этом пик центрального максимума оказывается на участке нечувствительности (в области передержек). Таким образом, требуется не менее двух снимков, для того чтобы воспроизвести распределение освещенности идеальной дифракционной точки на фотоматериале.

Для получения функции распределения освещенности в оптическом изображении по фотографическим изображениям прежде всего измеряют распределение оптической плотности в фотоизображении, используя для этой цели микрофотометр. Сигнал с микрофотометра поступает на самописец и регистрируется на движущейся ленте в виде графика $D_n(y')$. Далее исходя из характеристической кривой по значениям плотностей определяют уровни освещенности, после чего график $D_n(y')$ преобразуется в искомую функцию рассеяния точки.

Для того чтобы сократить эти преобразования и производить их в один этап, следует характеристическую кривую фотоматериала сразу строить в осях $D_n = f(E)$. Тогда, используя эту характеристику, получаем сразу график ФРТ. Очевидно, он будет верен только в пределах линейного участка и частично — начального и конечного участков исходной характеристической кривой $D_n = f(\lg E)$.

Измеряя изображение светящейся точки по нескольким направлениям, если оно имеет асимметричную форму, находим двумерную функцию. Так, на рис. 8.4, *б* показаны полученные на микрофотометре графики двух взаимно перпендикулярных разрезов ФРТ микрообъектива с ошибкой типа комы. ФРТ используется как характеристика качества изображения либо может служить для определения одного из известных критериев оценки качества.

Изображения тест-объектов, получаемые при испытаниях оптических систем, характеризуются чаще всего плавным изменением освещенности. В то же время при проведении измерений таких изобра-

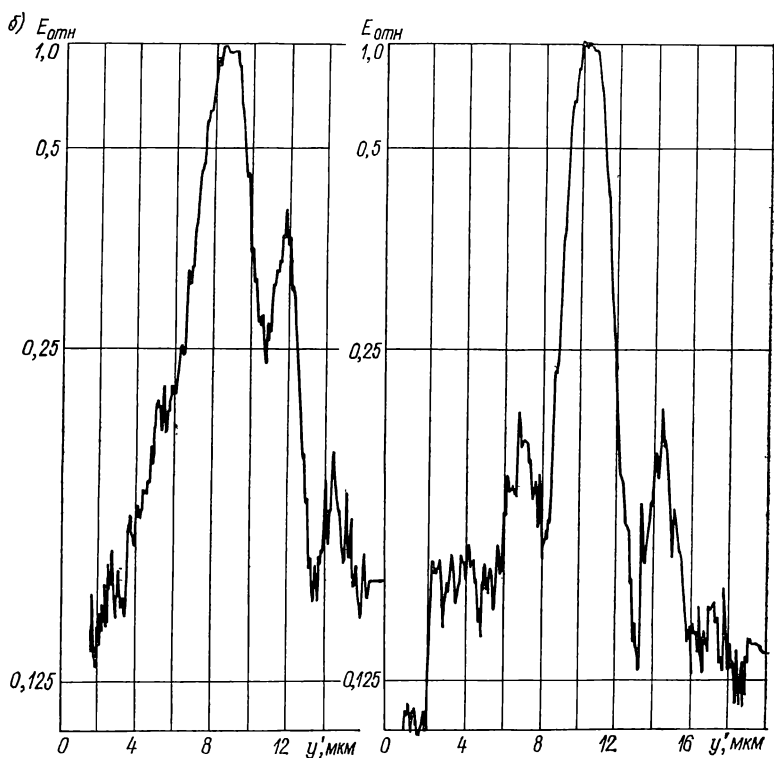
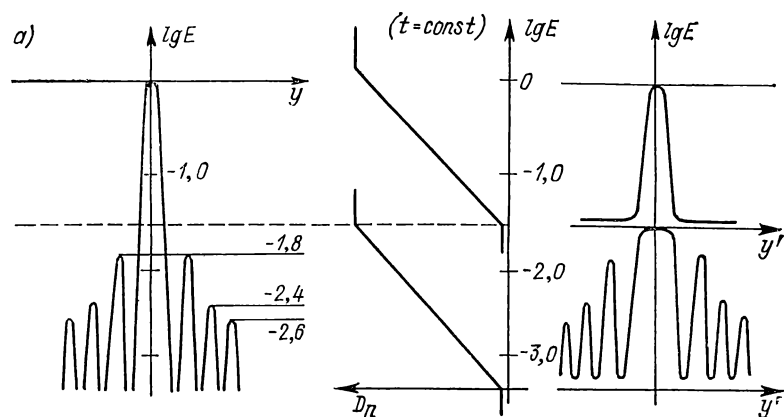


Рис. 8.4. Фотографическая фотометрия: *а* — структура идеального дифракционного круга и световая характеристика фотоматериала; *б* — графики фотометрических разрезов ФРТ микрообъектива (в шкале относительных освещенностей)

жений получают лишь ограниченное число дискретных значений функции в ряде характерных точек. Например, распределение освещенности в фотографическом изображении пятна рассеяния можно охарактеризовать конечным числом замкнутых кривых — эквиденсит, проходящих в данном распределении $D_n = f(y'; z)$ через точки $D_n = \text{const}$. Соответствующие значения освещенности находят, пользуясь характеристической кривой данного снимка, при этом эквиденситы становятся изофотами; их совокупность дает топограмму двумерной ФРТ [10].

Эквиденситы фотоизображения пятна рассеяния могут быть получены с помощью фотоэлектрических сканаторов, управляемых от ЭВМ, однако эти приборы дороги и дефицитны, требуют квалифицированного обслуживания и больших затрат машинного времени. Поэтому во многих случаях целесообразно использование фотографического метода выделения эквиденсит.

Наибольшее распространение благодаря своему удобству и оперативности нашел способ получения эквиденсит с использованием эффекта Сабатье, состоящего в частичном обращении изображения на фотоматериале при использовании специального режима обработки проявление — засветка — проявление. Время экспозиции при печати с негатива изменяют в соответствии с требуемыми интервалами между выделяемыми плотностями; его рассчитывают по формуле

$$t_2 = t_1 \cdot 10^{\Delta L} \quad (8.17)$$

где t_1 — экспозиция для первой эквиденситы, соответствующей уровню вуали исходного негатива.

Полученные отдельные эквиденситы печатают на листах фотопленки, которые затем совмещают по меткам с исходного негатива в единую изофотограмму — топограмму двумерного распределения освещенности в изображении точки.

Методы определения ФРТ путем анализа распределения оптической плотности в фотографическом изображении пятна рассеяния позволяют решать поставленную задачу, однако имеют следующие недостатки:

1) диапазон исследуемых освещенностей ограничивается лишь диапазоном полезных экспозиций негативного фотоматериала, что, как было показано, недостаточно для полного количественного анализа ФРТ и использования ее в целях определения других критериев количественной оценки качества изображения;

2) метод эквиденсит требует проведения сенситометрического испытания фотоматериала с получением характеристической кривой, что трудоемко и требует использования громоздкой и дорогостоящей аппаратуры. Поэтому метод эквиденсит нашел применение главным образом в лабораторных исследованиях.

38. ИЗОФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ

Для устранения недостатков традиционных методов определения ФРТ с 1974 г. ведется разработка изофотометрических методов анализа пятна рассеяния. Эти методы позволяют регистрировать

перепады освещенности в пятне рассеяния более пяти порядков, строить графики ФРТ в любом сечении, топограмму распределения освещенности, а также вычислять концентрацию энергии в пятне [23, 32]. Изофотометрическая регистрация ФРТ нашла применение при контроле различных оптических систем, астрономических зеркал и оптических материалов [24, 33].

Рассмотрим принципиальное отличие оценок структурных характеристик по методу изофот и по методу эквиденсит [32]. Изобразим в логарифмическом масштабе функцию распределения абсолютной освещенности $\lg E = \psi(y)$, полученную многократно при различных световых потоках от объекта (рис. 8.5). Наложим на изображенную совокупность распределений шкалу равномерно и достаточно часто расположенных фотометрических сечений $E_1; E_2; \dots; E_n$, проходящую через все отдельные распределения. Из построения видно, что независимо от общего уровня освещенности в исследуемом распределении само распределение может быть отображено одинаково детально совокупностью расположенных по логарифмическому закону фотометрических сечений [32].

Построим характеристическую кривую высококонтрастного материала в виде функции $D_n = f(\lg E)$ при $t = \text{const}$, где t — время.

Каждому времени экспозиции соответствует своя характеристическая кривая, смещенная вдоль оси $\lg E$.

Равномерная шкала логарифмов времени экспозиции позволяет получить семейство характеристических кривых высококонтрастного фотоматериала, соответствующих равномерному ряду фотометрических сечений, расположенных по логарифмическому закону. Таким образом, исследуемое распределение освещенности отображается в виде совокупности равномерно расположенных сечений независимо от общего (среднего) уровня освещенности с одинаковой степенью подробности передачи фотометрической структуры. Для построенного семейства характеристических кривых $D_n = f(\lg E)$ каждой отдельной кривой соответствует соотношение из следующей серии:

$$E_1 = H/t_1; E_2 = H/t_2; \dots; E_n = H/t_n. \quad (8.18)$$

Разделив полученный ряд освещенностей на значение максимальной освещенности в данном распределении, находим выражение в относительных (безразмерных) единицах

$$E_{\text{отн}} = 1/t_{\text{отн}}, \quad (8.19)$$

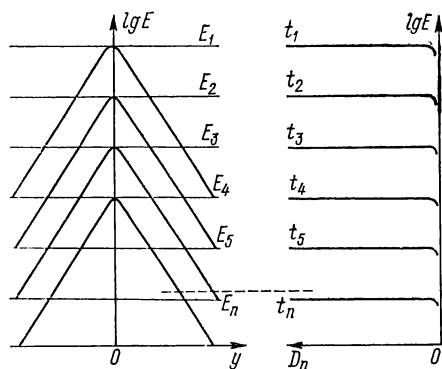


Рис. 8.5. Схема изофотометрического метода ФРТ при изменяющейся общей освещенности и изофотометрическая световая характеристика

или в логарифмической форме

$$-\lg E_{\text{отн}} = \lg t_{\text{отн}}. \quad (8.20)$$

При этом время удобно задавать в целых числах, а относительную освещенность — в долях от максимального значения, принятого за единицу. Последние две формулы являются основными выражениями структурометрического метода изофотометрической фоторегистрации.

На практике при контроле качества изображения оптической системы изображение светящейся точки, построенное исследуемой системой, многократно фотографируют на однотипный фотоматериал высокой контрастности при различных длительностях экспозиции. Изофоты различных уровней, расположенные на отдельных снимках, после оконтуривания совмещают и получают топограмму распределения освещенности (изофотограмму).

Для повышения точности обработки данных изофотометрии и сокращения затрат времени на вычисления разработана программа [58] расчета концентрации энергии в пятне рассеяния по данным изофотометрии на ЭВМ ЕС-1020. Освещенность E , регистрируемая на фотоматериале, связана с выдержкой t законом невязимости, который по Шварцшильду имеет вид [87]

$$E = ct^{-p(t)}, \quad (8.21)$$

где c — константа; $p(t)$ — полином.

Логарифмируя выражение (8.21), получают полином

$$\bar{y} = \sum_{k=0}^m a_k \bar{x}^k, \quad (8.22)$$

где $a = \ln c$; $\bar{y} = \ln E$; $\bar{x} = \ln t$. Таким образом, первая часть задачи программирования расчета концентрации энергии на ЭВМ сводится к аппроксимации калибровочной кривой $\bar{y} = f(\bar{x})$, характеризующей выбранный фотоматериал.

Исходными данными для аппроксимации служат экспериментально установленные значения t_i , соответствующие эталонному набору относительных освещенностей в безаберрационном дифракционном изображении точки

$$E_i = \left[\frac{2J_1(r_i)}{r_i} \right]^2,$$

где J_1 — функция Бесселя первого рода первого порядка; r_i — нули функции Бесселя первого рода нулевого порядка, $i = 0, 1, 2, \dots, 12$. Значения t_i находят путем изофотометрической регистрации на данном фотоматериале оптического изображения дифракционного кружка, сформированного камерой-обскурой, ориентированной соосно лучу источника когерентного излучения. Величина относительного отверстия при этом имеет порядок 10^{-3} .

Диаметр первого темного кольца в таком изображении составляет

$$d_1 = 2,44\lambda l/D_T, \quad (8.23)$$

где D_T — диаметр точечной диафрагмы; l — расстояние от диафрагмы до экрана.

После аппроксимации зависимости $\bar{y} = f(\bar{x})$ с использованием соотношений Форсайта [68] получают калибровочную кривую (рис. 8.6).

Подставляя в (8.21) конкретные значения времени экспозиции из набора $t_i = t_0 2^i$, где $i = 0, 1, 2, \dots, n$, можно получить величины всех уровней освещенности E , которые соответствуют экспериментальным изофотам.

Зная для каждого направления φ_{ij} значения r_{ij} , полученные с помощью измерений (где φ_{ij} и r_{ij} — полярные координаты точки на изофотограмме относительно оптической оси), аппроксимируют зависимость $E_j(r)$ — распределение освещенности вдоль радиуса изофотограммы.

Для определения энергии излучения $F(D_K)$ в кружке рассеяния диаметром D_K вычисляют интеграл

$$F(D_K) = 0,5 \int_0^{2\pi} \int_0^{D_K^2/4} E(\bar{z}) d\bar{z} d\varphi,$$

где $\bar{z} = r^2$.

Известная формула «трапеции» позволяет заменить внешний интеграл суммой вида

$$F(D_K) = 0,5 \sum_i \int_0^{D_K^2/4} E_j(\bar{z}) d\bar{z},$$

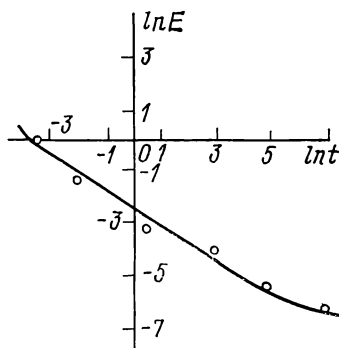


Рис. 8.6. Калибровочная кривая фотоматериала

в которой оставшийся интеграл определяется с помощью любого численного метода интегрирования с достаточно малым шагом по \bar{z} .

Относительная концентрация энергии \bar{F} для кружка диаметром D_{Ki} в пятне рассеяния рассчитывается по формуле

$$\bar{F}(D_{Ki}) = 100F(D_{Ki})/F(D_{\max}).$$

Предложенный алгоритм был реализован на ЭВМ ЕС-1020. Для расчета концентрации энергии по одной изофотограмме требуется около 2 мин машинного времени. После ввода исходных данных они распечатываются в удобном виде. Кроме того, для контроля правильности задания радиусов r_{ij} пользователем может быть затребован вывод изофот на графопостроитель (рис. 8.7). Результатом расчета являются построенные на автоматическом цифropечатающем устройстве (АЦПУ) таблица значений и график функции $\bar{F}(D_K)$ (рис. 8.8).

Для получения необходимого сочетания фотоизображений фотометрических сечений и обеспечения последующего совмещения изофот с картой ФРТ аппаратура фотографической изотометрии строится комплексно [32]. В изотометрическую съемочную установку (рис. 8.9, б) входят микроскоп, строящий изображение 4 освещенной точечной диафрагмы 1, состоящий из объектива 2 и окуляра 3, грейфер 9, контроргрейфер 5, лентопротяжный тракт 8 и микроскоп сквозного визирования 6, 7. В камере используется перфорированная

пленка. После съемки и обработки фотоснимков с выделением контура получают серию негативов, на каждом из которых имеется одна изофота, зарегистрированная с привязкой ее положения к системе

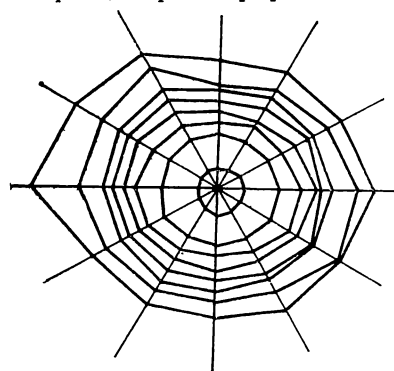


Рис. 8.7. Изофотограмма пятна рассеяния системы, не имеющего дифракционной структуры, полученная при помощи графопостроителя по данным расшифровки

координат, связанной с перфорациями. Такая привязка позволяет при печати с данного негатива, содержащего серию изображений отдельных изофот, получить совмещенную изофотограмму в автоматическом режиме.

Устройство для автоматической печати совмещенных изофотограмм (рис. 8.10, б) построено по следующей схеме. Проекционная лампа 6 через конденсор 5 и поворотную призму 4 освещает кадровое окно 3, в котором последовательно перемещаются кадры серии изофот с помощью лентопротяжного механизма, в который входят грейфер 2 и контргрейфер 8. Негатив 7, содержащий серию изофот, заряжен в лентопротяжный

тракт. Освещенный кадр проецируется объективом 9 в плоскость экрана 1, на который помещается фотобумага.

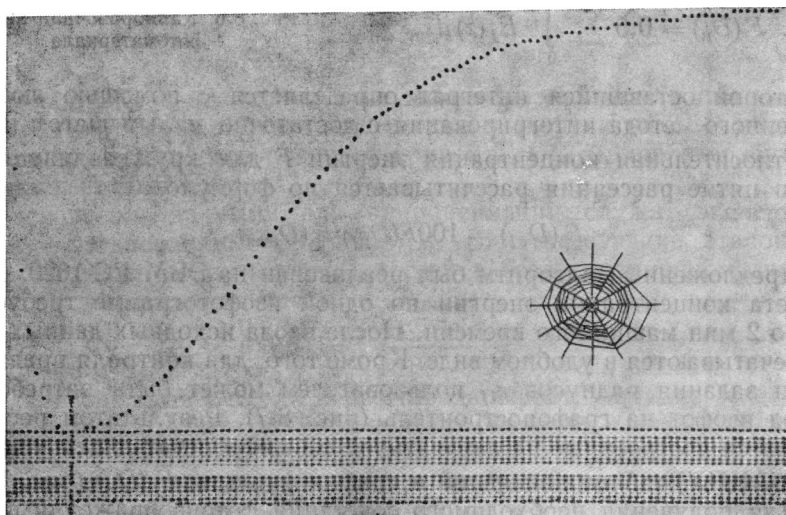


Рис. 8.8. Функция концентрации энергии в пятне рассеяния (рассчитана на ЭВМ по результатам изофотометрии)

Изофоты экспонируются последовательно с соблюдением их взаимного расположения, что достигается автоматически благодаря работе грейфера. По окончании печати и фотографической

обработки получают топограмму двумерной ФРТ исследуемого зеркала системы.

Установки для съемки и печати изофотограмм построены на базе серийной регистрирующей фотокамеры типа РФК-5. Режим обработки снимков приведен в [37] и состоит из следующих операций.

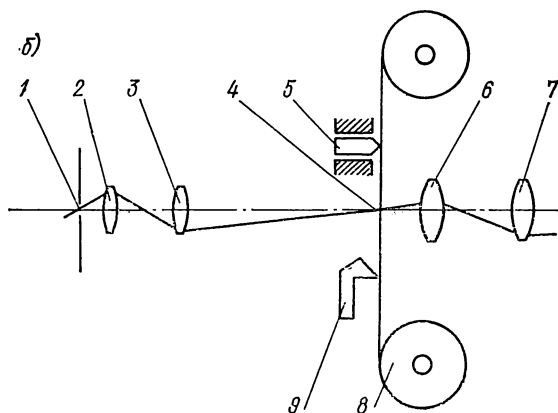
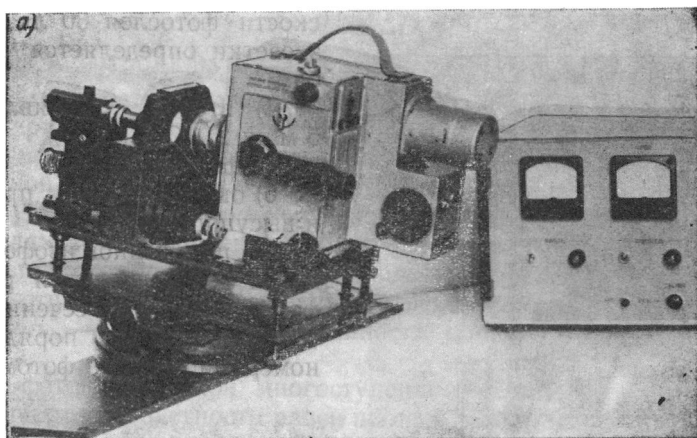


Рис. 8.9. Общий вид (а) и схема (б) аппаратуры фотографической изофотометрии для съемки изофот

1. Исходные негативы, полученные при съемке и проявленные до высокого контраста, печатаются контактно за одну серию равных экспозиций на один кусок фотоматериала высокого контраста. Проявление ведется в контрастно работающем проявителе при интенсивном перемешивании.

2. С полученных отпечатков производится повторная печать на том же высококонтрастном материале. Для выделения контуров фото-

метрических сечений проявление этой копии производится в соответствии со следующим примерным режимом:

- 1) первое проявление — 2 мин, 21 °С, проявитель УП-2;
- 2) ополаскивание — 1 мин в проточной воде;
- 3) равномерная засветка в черной кювете с водой при положении фотоматериала эмульсионным слоем вверх — освещенность в плоскости фотослоя 30 лк, время засветки определяется по пробам;
- 4) второе проявление — 5 мин, 21 °С;
- 5) фиксирование;
- 6) окончательная промывка и высушивание.

По полученной изофотограмме ФРТ определяются радиусы фотометрических сечений в соответствии с их порядковыми номерами. Если фотометриче-

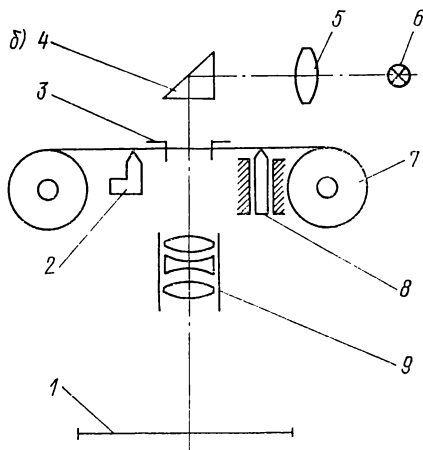
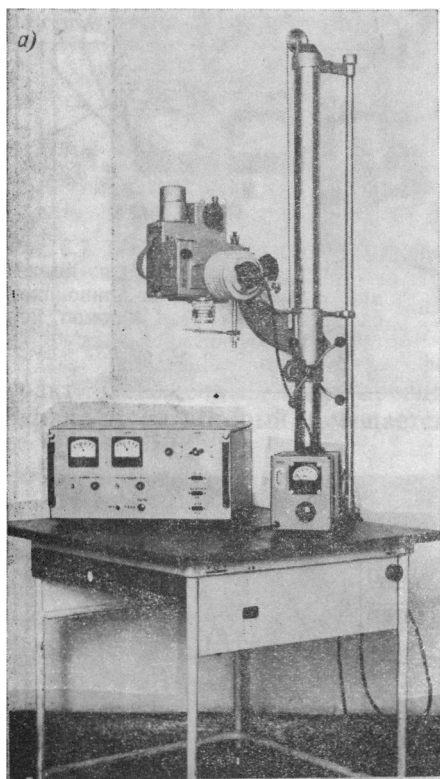


Рис. 8.10. Общий вид (а) и схема (б) аппаратуры фотографической изофотометрии для печати изофотограмм с автоматическим совмещением

ские сечения асимметричны, радиусы измеряются по нескольким направлениям для каждого фотометрического сечения. Зная для фотометрических сечений соотношение времен экспонирования, а следовательно, значения освещенностей, по градуировочной кривой находят действительные уровни освещенности для соответствующих изофот. При использовании ЭВМ значения радиусов сечений и параметры калибровочной кривой вводятся в машину в качестве исходных данных для расчета характеристик качества изображения.

Точность измерений методом изофотометрии обусловлена рядом погрешностей, основными причинами которых являются конечность величины контраста используемого фото процесса, отклонения от

закона взаимозаместимости и светорассеяние в фотографических слоях. Способ учета влияния невзаимозаместимости показан выше. Кратко рассмотрим влияние двух других погрешностей.

Вследствие отсутствия фотоматериалов, обладающих идеальной ступенчатой характеристикой, величина H практически лежит в некотором интервале полезных экспозиций

$$\Delta \lg H \approx \Delta D_p.$$

Здесь $\Delta D_p = D_{\max} - D_0$, где D_{\max} и D_0 — максимальная и минимальная плотности соответственно.

Это приводит к тому, что на негативе при данной величине t граница фотометрического сечения изображается некоторой зоной переменной плотности ΔD , соответствующей интервалу освещенности $\Delta \lg E$. Поперечник фотометрического сечения может быть измерен в пределах зоны переменной плотности с погрешностью $2\Delta r_i$, где r_i — радиус фотометрического сечения. Размер $2(r_i + \Delta r_i)$ соответствует фотометрическому сечению при освещенности $\ln E_i - \Delta \lg E_i$, где $\Delta \lg E_i$ — абсолютная погрешность определения уровня освещенности.

При фотографической многоступенной печати результирующий коэффициент контрастности равен произведению всех коэффициентов контрастности отдельных ступеней: $\gamma_{\Sigma} = \gamma_1 \gamma_2 \dots \gamma_n$. Таким образом, путь к снижению погрешности ΔE_i лежит через печать изображений фотометрических сечений на контрастном фотоматериале при идентичных экспозиционных условиях для достижения высоких значений γ_{Σ} , приводящих к пренебрежимо малым величинам Δr_i и $\Delta \lg E_i$.

Рассеяние света в эмульсионном слое фотоматериала на резкой границе сильно и слабо экспонированных участков обуславливает возникновение диффузного ореола. На негативном фотоматериале его ширина составляет около 50 мкм. Использование уконтрачивания позволяет снизить эту величину на порядок. В работе [37] показано, что при этом погрешность измерения фотометрического сечения не превышает 2 %.

Традиционные качественные методы контроля оптики должны развиваться в направлении повышения объективности и однозначности оценок, расширения области применения, оснащения аппаратурой, способствующей повышению производительности и надежности, снижению трудоемкости на операциях контроля.

Анализ последних достижений в этой области и собственный опыт разработки и совершенствования методов контроля оптических систем позволяет наметить следующие пути поиска направлений развития традиционных качественных методов контроля.

А. Контроль по виду дифракционного изображения точки. Этот метод имеет помимо упомянутых выше, недостаток, возникающий при попытках визуально оценить аберрации объектива микроскопа при различных длинах волн. Опыт проведения таких исследований показывает, что при значениях $\lambda \approx 466$ нм и $\lambda \approx 700$ нм форма дифракционного изображения точки плохо различается, так как не удается достичь удовлетворительной визуальной яркости изображения.

этому надежные качественные оценки при прямом визуальном наблюдении невозможны. Устранить этот недостаток могла бы фотографическая регистрация изображения точки на фотоматериале, сенсibilизированном в данной спектральной зоне, но эта работа достаточно трудоемка и требует участия работника высокой квалификации. Безусловно, для массовых оценок такой метод неприемлем.

Совершенствование визуального дифракционного метода может идти по пути использования при испытании оптики микроскопов тест-препарата в виде светящейся линии. Существо метода состоит в следующем. В качестве тест-объекта микрообъектива выбирают освещенную щель малой ширины (прозрачная линия необходимого качества может быть найдена в поле точечного препарата, полученного путем вакуумного осаждения алюминия на предметном стекле). Изображение такого тест-объекта через систему микроскопа дает (как показано в п. 17) картину дифракционного изображения линии, имеющую центральный максимум (нулевой порядок) и побочные максимумы — дифракционные полосы. При наличии обнаруженных в белом свете искажений формы дифракционного изображения точки, характеризующих кому или астигматизм в испытываемой системе, линия тест-объекта ориентируется в направлении, перпендикулярном направлению наихудшего сечения дифракционного пятна.

Предложенный метод визуальной оценки дифракционного изображения точки по сравнению с традиционным обладает рядом преимуществ:

1) существенно повышаются световые характеристики схемы контроля: при использовании монохроматического света становится намного ярче изображение, что позволяет анализировать дифракционную картину линии в тех условиях, когда дифракционная картина точки не поддается анализу;

2) при использовании белого света полученное изображение дифракционной щели позволяет судить об особенностях работы данного объектива подобно тому, как это производится в методе испытания по штриховому препарату. При наличии аберраций в исследуемом объективе наблюдается потеря четкости краев полос. Общий контраст и «размывание» изображения линии, четкость и симметричность боковых максимумов оцениваются для данного объектива в сравнении с эталоном. Хроматические аберрации определяются по окраске дифракционных полос.

Б. Исследование формы функции рассеяния. Физиологические особенности зрения таковы, что глаз с наибольшей определенностью способен оценивать геометрическую форму объекта, но в значительно меньшей степени он может уловить тонкие различия в распределении освещенностей в наблюдаемом объекте. Следствием этого является потребность в получении графиков пространственного распределения освещенности при исследовании фотометрической структуры объекта, когда неразличимые глазом колебания и соотношения освещенностей тонко оцениваются наблюдателем при изучении формы графика. Исследования показали, что представляет интерес способ исследования качества оптики микроскопов, состоящий в визуализации графика

функции рассеяния линии, т. е. поперечного распределения освещенности в изображении дифракционной щели, построенном исследуемой системой. Прием визуализации, использованный ранее при исследовании киносьемочной оптики [38], состоит в перекрывании щели оптическим клином переменного пропускания. Можно показать, что видимая граница темного и светлого при наблюдении изображения такого тест-объекта, как щель, перекрытая клином, имеет форму ФРЛ системы (см. п. 41). При изменении ФРЛ наблюдаемая форма граничного контура ощутимо изменяется и дает наглядную характеристику аппаратной функции системы. Хроматизм оценивают по изменению формы графика ФРЛ в зависимости от λ .

В. Модифицированный тест Ронки. Если на пути сходящегося пучка лучей несколько впереди плоскости изображения точки, построенного микрообъективом, установить линейную решетку, состоящую из ряда параллельных штрихов, и наблюдать за ним на экране расфокусированное изображение, то форма теневых полос характеризует ошибки на зрачке системы. В частности, отклонения формы волны от сферической вызывают нарушение прямолинейности полос. Характерные картины полос позволяют качественно квалифицировать аберрацию системы. Исследование изменения картины аберраций при различных значениях λ позволяет оценить, например, сферохроматизм (см. рис. 9.7 и 9.11).

39. ТЕЛЕВИЗИОННАЯ ИЗОФОТОМЕТРИЯ, МЕТОДЫ И АППАРАТУРА

Использование средств телевизионной техники дает ряд существенных преимуществ при разработке оптико-измерительных информационных систем для оптического производства [36], заключающихся в возможности:

- 1) управления контрастом, яркостью и структурой изображения;
- 2) устранения влияния вибраций на качество изображения;
- 3) создания комфортных условий наблюдения и оценки изображений;
- 4) сплошного и выборочного сканирования с визуализацией графика фотометрической структуры;
- 5) автоматического считывания координат элементов изображений, полученных при оптических измерениях, и ввода их для обработки на ЭВМ;
- 6) дистанционного наблюдения изображений и управления аппаратурой контроля;
- 7) контроля и регистрации параметров исследуемой системы в ходе технологических операций (юстировки, регулировки) и непрерывного проведения этих операций до достижения оптимальных характеристик оптической системы.

Современные телевизионные системы, выполненные на транзисторах, имеют приемлемые габаритные размеры и оснащены автоматическими схемами поддержания необходимых рабочих режимов передающих трубок. В оптических измерительных установках нашли применение промышленные телевизионные системы с видеокондом и

телевизионный малогабаритный комплекс ВМ-ЛОМО с портативным видеомагнитофоном.

Телевизионная система позволяет изменением коэффициента усиления видеоусилителя изменять контраст изображения на телеэкране. Для получения максимального контраста применяется пороговый усилитель. Исползованная на его выходе дифференцирующая цепочка предназначена для выделения импульсов, формирующих на экране контуры изображения. Метод телевизионно-фотографической изофотометрии, применяемый взамен фотографического выделения контура [34], существенно снижает трудоемкость получения изофотограммы, описывающей двумерную ФРТ исследуемой системы.

Прямая телевизионная изофотометрия пятна рассеяния позволяет еще более оперативно получать данные о форме ФРТ в процессе измерения, существенно снижая трудоемкость контроля. Работа в режиме накопления дает возможность регистрировать изображение при малых световых потоках в схеме контроля. Устранение влияния нелинейности передающей трубки в режиме дискретизации способствует повышению точности и надежности измерений.

К методу телевизионной изофотометрии на этапе его разработки предъявлялись следующие требования:

1) возможность получения в практически приемлемые сроки аттестационных характеристик кружка рассеяния (в соответствии с предусмотренным критерием оценки качества изображения), распределения энергии в различных диаметрах кружка, размеров кружка на сопоставимом уровне относительной освещенности и т. д.;

2) наглядность результатов и возможность качественной оценки формы кружка рассеяния и его фотометрической структуры.

Суть метода состоит в следующем [35]. Оптическое изображение светящейся точки, построенное исследуемой системой микроскопа, переносится в плоскость фотокатода передающей телевизионной трубки. В телевизионном канале формируется видеосигнал, соответствующий изображению фотометрического сечения. Видеосигнал преобразуется, подвергается дискриминации и дифференцированию, в результате чего выделяется линия контура фотометрического сечения — изофота. Для получения системы фотометрических сечений изображения светящейся точки необходимо образовать ряд сечений, расположенных на уровнях относительной освещенности, связанных определенным математическим соотношением. На практике часто наиболее удобно расположение уровней освещенности по закону

$$E_{\text{отн}} = 2^{-i}, \quad (8.24)$$

где i — порядковый номер изофоты.

Получение требуемой системы сечений производится введением в телевизионную систему блока запираания электронного луча, включенного в цепь катода передающей трубки. С управляющим входом блока запираания соединен выход таймерного устройства. Выход телевизионной системы работает в режиме выделения контура изображения. Совокупность контуров сечений регистрируется устройством памяти, на котором могут быть последовательно записаны все

Выделенные изотопы и получена топограмма распределения освещенности в исследуемом пятне рассеяния. У современных видеоконв соотнoшение взаимозаместимости $Et = \text{const}$ справедливо при времени накопления до 1000 с, что соответствует 25 000 кадров (для видеоконв с кадмиевой мишенью). Задавая время накопления по закону удвоения, можно получить свыше 10 уровней фотометрических сечений. На выходе телевизионной системы подключаются вычислительные устройства: счетчик площадей сечений, ЭВМ для расчета концентрации энергии или преобразования Фурье ФРТ с целью вычисления ЧКХ.

Рассмотрим принципиальную схему установки для телевизионной изофотометрии с накоплением (рис. 8.11, а). Она имеет точечный препарат 5, установленный за осветительной системой, содержащей лампу 1, коллектор 2, поворотное зеркало 3 и конденсор 4. Изображение 7 светящейся точки строится исследуемым объективом 6. Это изображение переносится с увеличением при

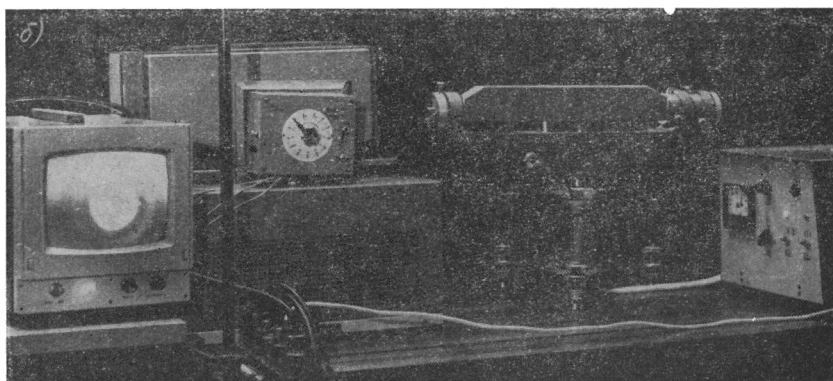
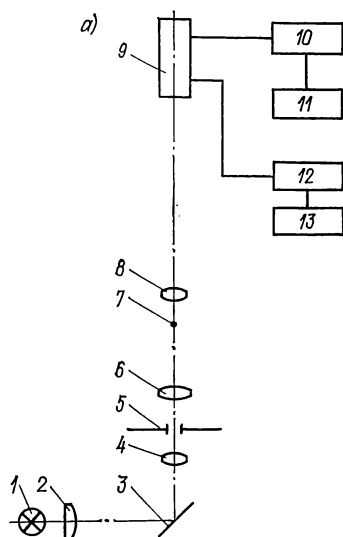


Рис. 8.11. Телевизионный изофотометр с накоплением: а — схема; б — общий вид установки

помощи окуляра 8 на мишень передающей телевизионной трубки 9. В катодную цепь трубки (например, видеоконв) включен блок запираания электронного луча 12. Его управляющий вход соединен с выходом реле 13. К выходу телевизионной системы подключается блок выделения контура 10, выход которого подается на запоминающее устройство 11.

Общий вид установки показан на рис. 8.11, б. Установка работает следующим образом. В исходном состоянии электронный луч передающей трубки сканирует мишень и снимает с нее электрический заряд. Сигнал с реле времени вызывает запираение электронного луча трубки, и на ее фотокатоде накапливается электрический заряд, соответствующий экспозиции и формирующий изображение фотометрического сечения. По окончании сигнала с таймерного устройства видикон открывается и электронный луч считывает заряд, накопленный на фотокатоде. При этом образуется телевизионный сигнал, который проходит блоки выделения контура и регистрируется устройством памяти. Если требуется документ, регистрация выполняется на фотоматериале. Кроме того, в последние годы разработаны запоминающие электронно-лучевые трубки, способные сохранять изображение в течение многих часов. Использование аналого-цифрового преобразователя видеосигнала дает возможность автоматизировать считывание координат изофот и вводить результаты измерений для обработки в ЭВМ.

Описанный телевизионный изофотометр имеет существенные преимущества по сравнению с устройствами фотографической изофотометрии, особенно в схемах контроля при дефиците световой энергии, например при исследовании монохроматических ФРТ объектива с целью контроля хроматизма.

Недостатками данного устройства является то, что из-за необходимости получения серии кадров с удлиняющимся рядом времен экспозиции накопления один цикл измерения может длиться десятки минут. Кроме того, фотометрические сечения регистрируются лишь на отдельных уровнях освещенности, увеличение числа которых затруднено, так как влечет за собой увеличение затрат времени на измерение. Поэтому работа над телевизионным изофотометром была продолжена.

В новом изофотометре экспрессность измерений достигнута за счет формирования всех фотометрических сечений при одинаковых временах экспозиции, составляющих $1/25$ с. Графическая информация выводится на экран электронно-лучевой трубки практически одновременно с процессом анализа изображения точки благодаря тому, что в схему введены новые элементы. Позади осветителя установлен фотометрический клин, который может перемещаться в плоскости, перпендикулярной оптической оси. Клин связан с электрическим преобразователем перемещения, с выхода которого сигнал подается на вертикальную развертку двухкоординатного регистрирующего устройства, например осциллографа с памятью. К горизонтальной развертке регистратора подключены: выход телевизионной установки через осциллограф с блоком выделения строки и блоки, формирующие контур изображения.

На рис. 8.12, а изображена принципиальная схема устройства. Оно содержит осветительную систему, в которую входят источник излучения 1, расширительная линза 16, зеркало 14 и объектив 13, фокусирующий пучок на отверстие точечного препарата 12. В осветительную систему введен перемещающийся (вращающийся) фото-

метрический клин 3, плавно меняющий световой поток. Клин оснащен приводом 2 и датчиком угла поворота 15. Из отверстия точечной диафрагмы распространяется расходящийся пучок в зрачок исследуемой системы 11, которая строит пятно рассеяния 10. Это изображение переносится с увеличением при помощи окуляра 9 на мишень передающей трубки 8. Телевизионная трубка через блоки 7 и 5, формирующие контур фотометрического сечения, связана с регистрирующим устройством 4 и видеоконтрольным устройством (ВКУ) 6. Выход датчика угла поворота клина соединен с выходом вертикальной развертки регистратора.

В исходном состоянии фотометрический клин введен полностью; чувствительность телевизионной системы установлена таким образом, чтобы исходный световой поток в схеме контроля формировал изображение

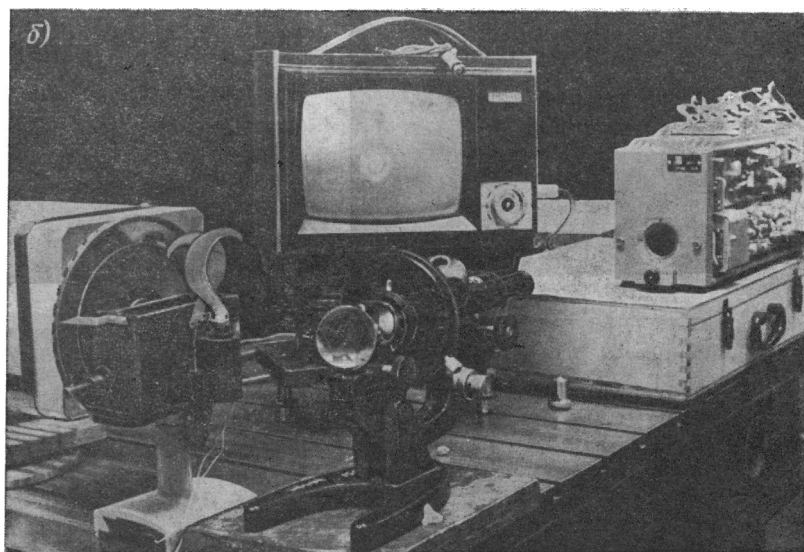
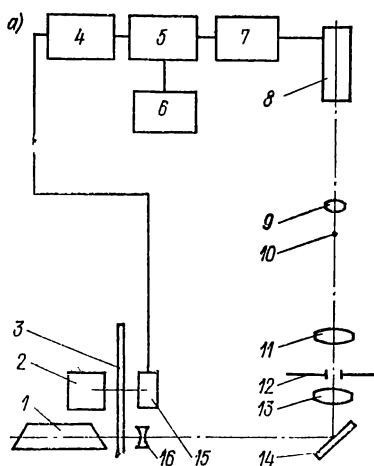


Рис. 8.12. Телевизионный изофотометр с изменяющимся световым потоком: а — схема; б — общий вид установки

линии равного уровня освещенности (изофоты) в изображении точечного источника, соответствующей максимуму освещенности E_1 , которая принимается равной единице. Переместим фотометрический клин и добьемся повышения светового потока вдвое. Кривая распре-

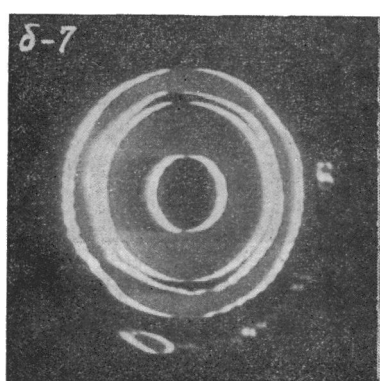
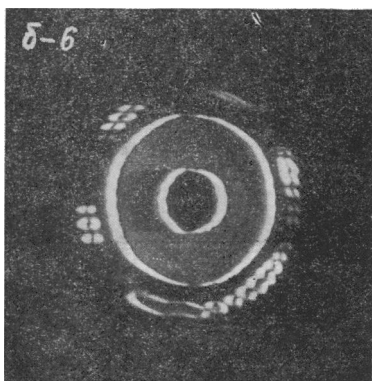
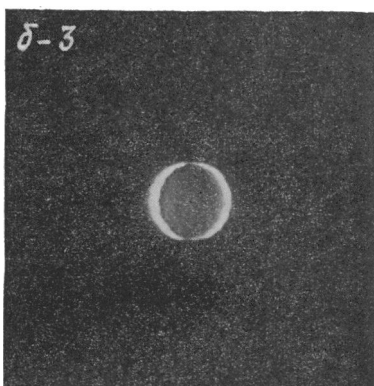
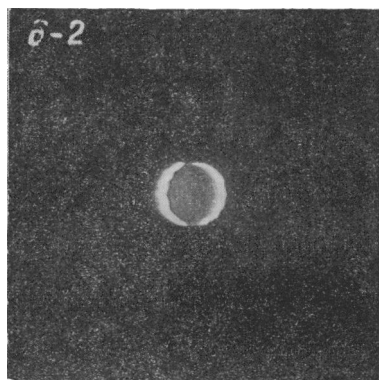
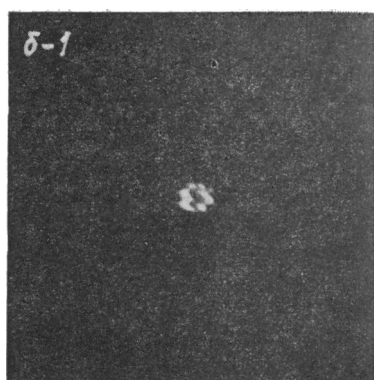
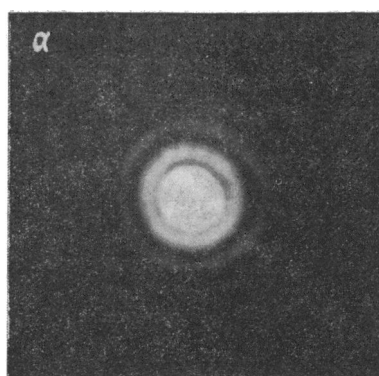


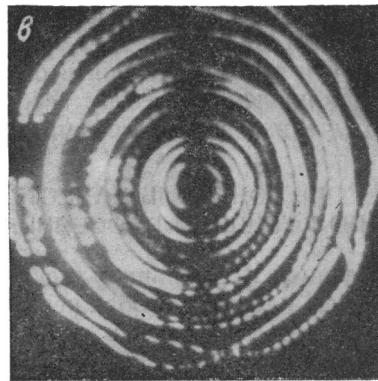
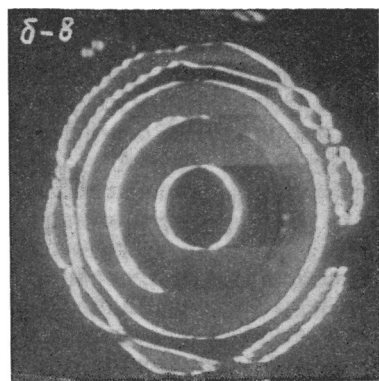
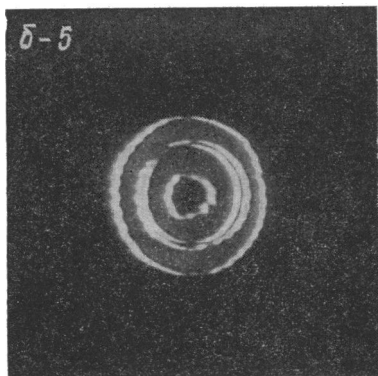
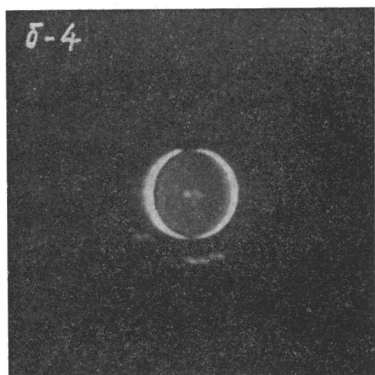
Рис. 8.13. Телевизионная изофотометрия дифракционного пятна: α — вид
изофотограмма (фо

деления освещенности при этом сместится в новое положение, а крутая световая характеристика телевизионной системы с дискриминатором выделит из распределения освещенности изофоту на уровне освещенности, вдвое меньшем, чем первоначальный, и на экране ВКУ будет сформировано изображение изофоты для уровня освещенности $E_2 = 0,5$. Следующее удвоение светового потока вызывает формирование изофоты уровня относительной освещенности $E_3 = 0,25$ и т. д. Промежуточные положения клина дают изофоты промежуточных уровней освещенности.

Уровень относительной освещенности, которой соответствует изофота, составляет

$$E_i = \tau_0 / \tau_i,$$

где τ_0 — пропускание клина, при котором выделяется изофота максимума освещенности в пятне рассеяния (определяется экспериментально); τ_i — пропускание клина, соответствующее искомому уровню освещенности.



пятна; б — изофоты различных уровней освещенности; в — совмещенная то с экрана ВКУ)

Если центральный максимум дифракционного пятна получен при $\tau_0 = 1$, то E_i определяется просто:

$$E_i = 1/\tau_i.$$

В тех случаях, когда клин отградуирован в значениях оптической плотности, E_i находят из выражения

$$\lg E_i = \lg \tau_0 - \lg \tau_i = \lg (1/\tau_i) - \lg (1/\tau_0) = D_{\pi i} - D_{\pi 0},$$

откуда

$$E_i = \text{antilg} (D_{\pi i} - D_{\pi 0}). \quad (8.25)$$

Видеосигналы всех изофот последовательно подаются на электронно-лучевую трубку с памятью, например, на экран осциллографа типа СВ-7А, дополненного блоком кадровой развертки. В результате запоминания ряда фотометрических сечений и воспроизведения на экране их исходного взаимного расположения формируется изофотограмма, т. е. топограмма распределения освещенности в изображении точечного источника, построенном исследуемой оптической системой. Далее с помощью построчного осциллографа выделяется строка, проходящая через максимум освещенности изображения. Фотометрическому клину сообщается непрерывное возвратное перемещение (например, вращение круглого клина), что вызывает изменение светового потока в системе по пилообразному закону. При этом благодаря датчику перемещения (угла поворота) изменяется высота расположения строки на экране осциллографа пропорционально смещению клина, т. е. пропорционально увеличению его оптической плотности.

Одновременно с изменением плотности клина изменяются уровень и площадь выделяемого фотометрического сечения и расстояние между парой импульсов на строке, соответствующих концам диаметра фотометрического сечения. Таким образом, благодаря увеличению расстояния между импульсами при одновременном уменьшении высоты расположения строки на экране осциллографа строится график, отображающий форму ФРТ в данном сечении.

Изофотометр позволяет в процессе фокусировки и юстировки системы следить за изменением качества изображения по форме графика ФРТ и точно определять оптимальное положение, соответствующее наилучшему качеству изображения. Общий вид изофотометра и полученная изофотограмма показаны на рис. 8.12, б и 8.13.

40. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ПО ФУНКЦИЯМ РАССЕЯНИЯ ЛИНИИ И КРАЕВОЙ

Как показано в п. 36, наряду с функцией рассеяния точки, первичным критерием качества изображения оптической системы является распределение освещенности в изображении светящейся линии или функция рассеяния линии (ФРЛ). На основе этой функции могут быть определены другие известные характеристики и критерии качества оптического изображения, такие как пограничная кривая, частотно-контрастная характеристика (ЧКХ), фотографическая разрешающая

способность и т. д. Функцию рассеяния линии $D_{\text{л}}$ получают фотометрированием изображения тест-объекта в виде достаточно длинной (строго говоря — бесконечно длинной) освещенной щелевой диафрагмы малой ширины. Однако, с другой стороны, ФРЛ можно вычислить, интегрируя функцию рассеяния точки (ФРТ) по одному из направлений, пользуясь формулой (8.4).

Краевая функция определяется как распределение интенсивности в изображении края ножа (полуплоскости), построенного исследуемой системой. При этом распределение в направлении, перпендикулярном к проекции края ножа, описывается суммированием функций рассеяния линий в пределах полуплоскости. Отсюда, если считать масштаб изображения равным единице, краевая функция может быть рассчитана по формуле

$$D_{\text{к}}(y) = \int_{-\infty}^{y_0} D_{\text{л}}(y) dy, \quad (8.26)$$

где y — координата в направлении, перпендикулярном проекции края ножа; y_0 — координата проекции края полуплоскости; $D_{\text{л}}$ — функция рассеяния линии исследуемой оптической системы.

В качестве примера использования ФРЛ рассмотрим ее применение при исследовании осветительной системы микроскопа.

В существующих типах конденсоров микроскопов хроматические aberrации могут достигать 70 $\mu\text{м}$, причем поперечные aberrации составляют 0,40—0,50 мм. Aberrации конденсора в схеме освещения по Келеру [46] приводят к нарушению сопряжения диафрагмы коллектора (полевой диафрагмы) с полевой диафрагмой в плоскости изображения за микрообъективом и с плоскостью препарата. При этом влияние aberrаций в наибольшей степени сказывается в размытии изображения края полевой диафрагмы. При фотометрических работах, когда используются малые диаметры полевой диафрагмы, aberrационное размытие краев изображения полевой диафрагмы, построенного конденсором в плоскости препарата, приводит к нарушению равномерности освещения исследуемого поля препарата, что затрудняет фотометрирование и влечет за собой появление систематических ошибок.

Для оценки влияния aberrаций конденсора на нарушение равномерности освещения препарата следует определять краевую или пограничную функцию конденсора, характеризующую размытие изображения края полевой диафрагмы в плоскости препарата. Численные значения ФРЛ и краевой функции могут быть определены по точечной диаграмме данной системы.

Точечная диаграмма (рис. 8.14), получаемая в ходе расчета хода лучей, обычно представляет собой диаграмму следов лучей, исходящих из окружностей на зрачке системы, расположенных равномерно по квадрату радиуса, т. е. отсекающих на зрачке равноплощадные зоны. Зонам присвоены соответствующие порядковые номера.

Освещенность E_i в плоскости изображения, в зоне, ограниченной совокупностью точек одного номера i , пропорциональна, с одной

стороны, площади этой зоны S_{Π} , а с другой стороны, — площади зоны зрачка S_3 , которой соответствует зона изображения,

$$E_i = k S_{\Pi} S_3, \quad (8.27)$$

где k — коэффициент пропорциональности.

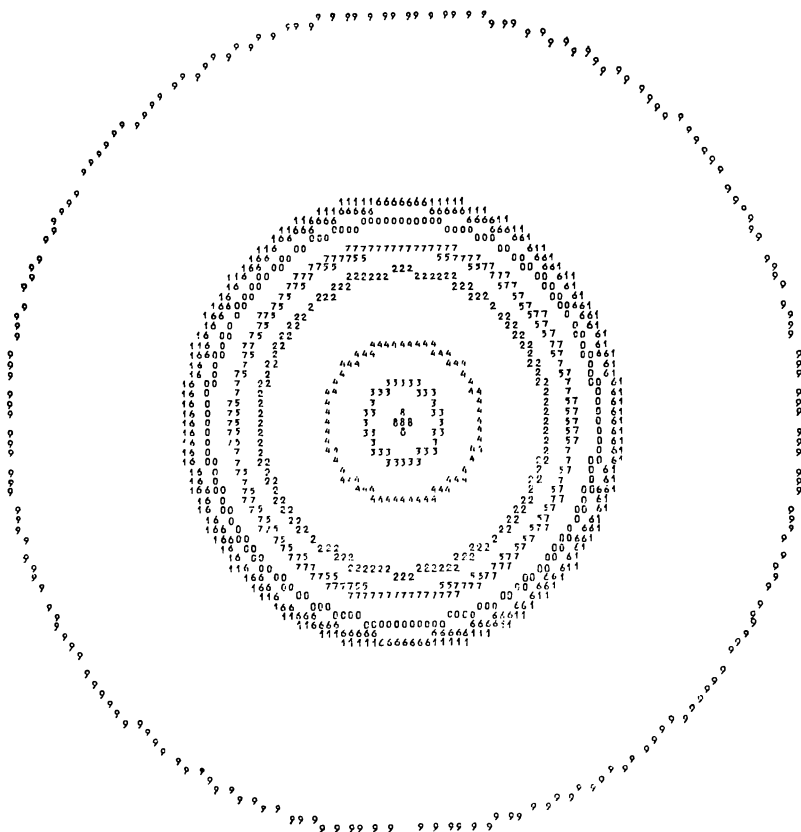


Рис. 8.14. Точечная диаграмма конденсора КОН-4

Деля все зональные уровни освещенности E_i на максимальный уровень E_{\max} , получаем ФРТ в значениях относительных освещенностей:

$$\bar{D}_i = \frac{E_i}{E_{\max}} = \frac{k S_{\Pi \max} S_{3 \max}}{k S_{\Pi i} S_{3 i}}.$$

Так как площади зон зрачка равны, то $S_{3 i} = S_{3 \max}$, и после сокращения получим

$$\bar{D}_i = S_{\Pi \max} / S_{\Pi i}. \quad (8.28)$$

Для упрощения обозначим:

$$S_{\Pi i} = S_i; \quad S_{\Pi \max} = S_{\max}.$$

Тогда окончательно имеем

$$\bar{D}_i = S_{\max}/S_i = 1/\bar{S}_i. \quad (8.29)$$

Относительная освещенность, соответствующая данной зоне точечной диаграммы, обратна относительной величине площади этой зоны. Соотношение (8.29) используется для подсчета ФРТ системы, имеющей преобладающую сферическую aberrацию третьего порядка, что соответствует работе простого конденсора осевым пучком, когда он изображает отверстие полевой диафрагмы малого диаметра.

Расчет ФРЛ по точечной диаграмме является приближенным и не учитывает влияния дифракции, однако вследствие чрезвычайно больших aberrаций конденсора получаемые данные достаточны для оценки их влияния на неравномерность освещения поля препарата. Каждой линии точечной диаграммы присваивается значение уровня освещенности, найденной при расчете ФРТ. Далее точечную диаграмму разбивают на строки и суммируют число точек a_i , которое укладывается (по распечатке АЦПУ ЭВМ) в каждой строке, умножая количество точек на уровень относительной освещенности \bar{D}_i зоны,

$$\sum_N = a_i \bar{D}_i + a_{i+1} \bar{D}_{i+1} + \dots + a_{\max} \bar{D}_{\max}, \quad (8.30)$$

где N — номер строки разбиения. Значение ФРЛ находим (рис. 8.15), деля полученные суммы по строкам на значение максимальной суммы:

$$\bar{D}_{\text{л}} = \sum_N / \sum_{\max}. \quad (8.31)$$

После того как найдена ФРЛ конденсора, вычисляем его краевую функцию. Для этого все текущие значения $\bar{D}_{\text{л}}$ суммируем, выписывая нарастающий итог D_N , после чего находим собственно краевую функцию, приведя полученный ряд чисел к его максимальному значению:

$$\bar{D}_N = D_N / D_{N_{\max}}. \quad (8.32)$$

Оценка качества изготовленного конденсора может быть выполнена измерением ФРЛ, которую находят, анализируя изображение освещенной щелевой диафрагмы через исследуемую оптическую систему. Такой метод обладает преимуществами при экспериментальной оценке качества изображения оптической системы по сравнению со схемами измерения ФРТ, так как дает существенный выигрыш в энергии, проходящей через систему, что облегчает выбор приемника и анализ изображения. При исследовании оптических систем спектральной аппаратуры по ФРЛ получают непосредственно аппаратную функцию прибора. Другим преимуществом контроля по ФРЛ является отсутствие жестких требований к положению строки сканирования освещенности поперек изображения щели.

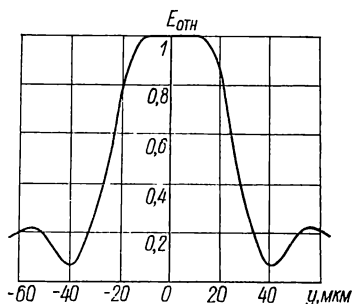


Рис. 8.15. ФРЛ, рассчитанная по точечной диаграмме

Для измерения ФРЛ применяются методы построчного фотоэлектрического сканирования [41]. К сканирующей системе предъявляются следующие требования:

1) точность контроля должна быть постоянной при перепаде значений измеряемой освещенности до 10^6 , что обуславливает применение сложных и дорогостоящих источников питания для фотоумножителя, усилителя и регистратора, причем все эти элементы должны быстро и многократно менять свою чувствительность при помощи переключателей;

2) ширина щели не должна превышать 0,1—0,2 диаметра дифракционного пятна, следовательно, ее ширина в обычных условиях составляет микрометры.

Следствием указанных требований к сканирующей системе являются ее недостатки. Необходима прецизионная механика, требующая особо квалифицированного обслуживания. Малые размеры диафрагм не позволяют получить достаточный уровень светового потока в системе, что вынуждает пользоваться малыми скоростями сканирования. В процессе сканирования для достижения требуемого диапазона измеряемых освещенностей необходимо переключение электрооборудования, а так как после переключения режимы должны установиться, то сканирование приходится прерывать. Кроме того, прецизионная система чувствительна к вибрациям, которые всегда имеются в цеховых условиях оптико-механического производства.

Интересный способ анализа ФРЛ описан Н. Джонсом и Б. Вольфом [89]. Распределение освещенности поперек изображения щели получают в виде логарифмической кривой ФРЛ, фотографируя изображение щели через серый клин. Метод состоит в следующем. Оптическое изображение щели перекрывается клином, плотность в котором изменяется вдоль клина:

$$D_{\text{кл}} = K_{\text{к}} z', \quad (8.33)$$

где $D_{\text{кл}}$ — оптическая плотность; z' — протяженность вдоль изображения клина; $K_{\text{к}}$ — постоянная клина.

Результирующее двумерное распределение относительной освещенности характеризуется в поперечном сечении функцией рассеяния линии $D_{\text{л}}(y')$, а в продольном направлении — функцией модуляции освещенности клина:

$$-\lg E_{\text{отн}} = K_{\text{к}} z', \quad (8.34)$$

где $E_{\text{отн}}$ — относительная освещенность за клином. Изофота суммарного двумерного распределения освещенности дает график ФРЛ с логарифмической шкалой распределения освещенности. Изофоту получают путем оконтуривания фотографического изображения распределения.

Недостатками фотографического метода являются: высокая трудоемкость получения количественных результатов исследования, что связано с изготовлением фотонегативов и фотоснимков, и дискретность во времени измерительных данных. Например, при юстировке исследуемой системы, даже при многократном выполнении трудоем-

кого цикла измерений, могут быть получены лишь данные о структуре изображения линии в отдельных положениях юстировочных подвижек объектива. При этом положение, соответствующее действительно наилучшей установке, может быть пропущено.

41. ТЕЛЕВИЗИОННЫЙ МЕТОД И АППАРАТУРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ПО ФУНКЦИИ РАССЕЯНИЯ ЛИНИИ

Оценка качества изображения по ФРЛ вызывает интерес исследователей и при условии устранения отмеченных в п. 39 недостатков может явиться перспективной для условий серийного и массового

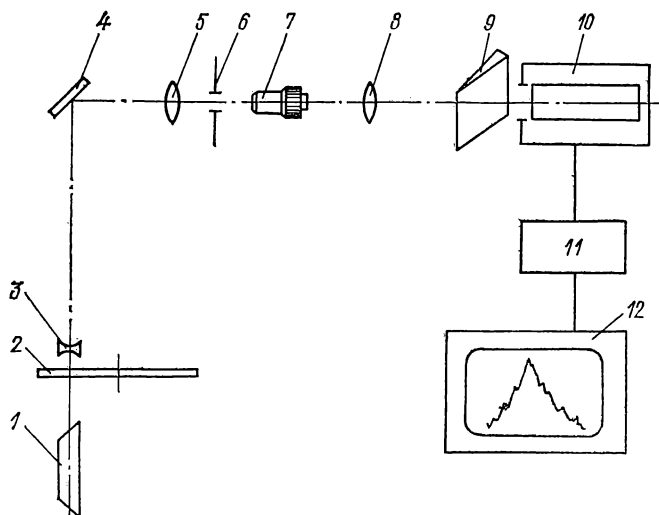


Рис. 8.16. Схема установки измерения ФРЛ микрообъектива

производства. Поэтому была поставлена задача создания устройства, позволяющего, во-первых, визуально наблюдать ФРЛ испытуемого объектива в виде графика непосредственно в процессе измерения; во-вторых, непрерывно наблюдать и измерять параметры характеристики качества изображения при юстировках, фокусировках и других перестройках исследуемой системы и, в-третьих, расширить диапазон измеряемых освещенностей в ФРЛ [38]. Решена эта задача благодаря использованию средств телевизионной техники. Собрана установка (рис. 8.16) для контроля ФРЛ микрообъективов, позволяющая наблюдать график ФРЛ непосредственно сразу после установки объектива в схему контроля.

Луч источника излучения 1 (ЛГ-36), пройдя переменной поглотитель 2, предназначенный для коррекции светового режима установки, расширяется элементом 3 и с помощью плоского зеркала 4 направляется в конденсор 5, который посылает его на препарат 6 — алюминированное покровное стекло с мельчайшими отверстиями в зеркальном покрытии (точечный препарат). Среди точечных отвер-

ствий на препарате нетрудно отыскать и щелевые отверстия (типа царапин), одно из которых используется в качестве щелевого тест-объекта. Изображение освещенной щели строится контролируемым микрообъективом 7 и переносится окуляром 8 с увеличением на мишень телевизионной трубки телекамеры 10. В непосредственной близости от мишени трубки, перпендикулярно оптической оси помещен фотометрический клин 9, плотность которого линейно возрастает вдоль оси клина, ориентированной параллельно направлению щели 6. Телевизионная камера (КТП-39) через блок выделения контура 11 подключена к видео-контрольному устройству 12, на экране которого наблюдается график ФРЛ исследуемого микрообъектива. Визуальный анализ графиков ФРЛ, полученных при перефокусировках микроскопа, показывает, что возникающее при этом изменение ФРЛ хорошо просматривается, что создает возможность гарантированного проведения контроля объектива в плоскости наилучшей наводки. При исследовании комы щель в фокальной плоскости коллиматора ориентируется в направлении, перпендикулярном направлению вектора комы.

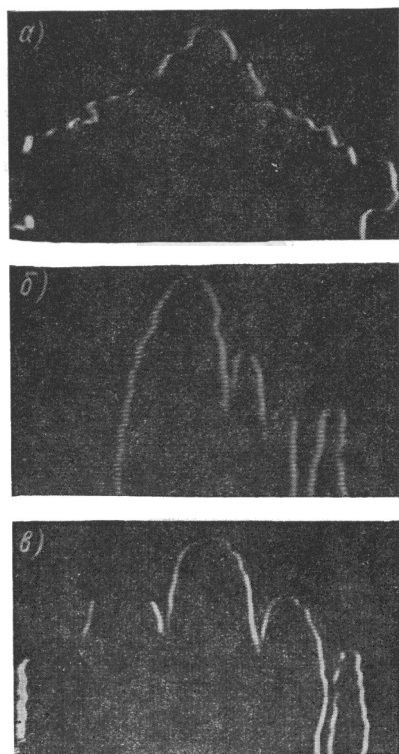


Рис. 8.17. ФРЛ микрообъективов (для $\lambda = 632,8$ нм): а — неофлюар $10 \times 0,30$; б — неофлюар $20 \times 0,60$; в — ОХ-1 $40 \times 0,65$

Для определения масштаба по оси освещенностей (направленной вдоль изображения щели) необходимо знать постоянную клина K_R и общее поперечное увеличение v_1 от плоскости клина до экрана ВКУ. Далее градуировка оси освещенностей производится исходя из соотношения

$$- \lg E_{\text{отн}} = K_R z v_1, \quad (8.35)$$

где z — протяженность вдоль оси клина.

Расшифровка координат графика дает возможность ввести ФРЛ в ЭВМ для дальнейшей обработки. Операция преобразования Фурье позволяет найти ЧКХ исследуемого объектива. На рис. 8.17 приведены графики ФРЛ микрообъективов, полученные на рассмотренной установке (снимки с экрана ВКУ).

К достоинствам установки для измерения ФРЛ микрооптики можно отнести следующие:

1) оперативность и наглядность контроля, возможность непрерывного наблюдения изменения формы ФРЛ при перефокусировках и юстировках системы, возможность более точного и быстрого определения плоскости наилучшей наводки;

2) возможность проведения массового оперативного контроля качества объективов, наличия дефектов изготовления и сборки.

42. КОНТРОЛЬ УРОВНЯ РАССЕЯННОГО СВЕТА

В ряду методов оценки качества оптики микроскопов немалую роль играют методы контроля уровня рассеянного света. Оптическая система, образуя изображение, одновременно является источником наложенного на него рассеянного света. Объективы, создающие значительный уровень рассеянного света, обладают существенно пониженным качеством изображения, а объективы отраженного света, создающие блики, практически непригодны для работы [3]. То же относится к объективам, имеющим значительную собственную флуоресценцию. Реальное распределение освещенности в плоскости изображения, построенного оптической системой, складывается в результате взаимодействия световых пучков различного происхождения. В их число входят:

1) сходящиеся пучки, формирующие оптическое изображение объекта; в этих пучках контраст изображения деталей объекта зависит от степени гомоцентричности (аббераций), точности совпадения точек схождения лучей с плоскостью приемника изображения (фокусировки), степени дифракции (на краю зрачка, экранах в зрачке, фазовых кольцах и т. д.);

2) пучки, отраженные оптическими поверхностями, создающие блики или рефлексы; чаще всего они представляют собой в разной степени расфокусированные вторичные изображения объекта;

3) свет, рассеянный в направлении приемника изображения включениями стекла, загрязнениями оптических поверхностей, торцевыми поверхностями линз, оправами, диафрагмами, а также свет, отраженный поверхностью самого приемника изображения и рассеянный деталями камеры и внутренней поверхностью объектива. Помимо перечисленных составляющих необходимо учитывать рассеяние света в тубусе микроскопа.

Влияние рассеянного света на структуру оптического изображения рассмотрено И. Б. Блюмбергом [8]. Падая на оптическое изображение объекта, рассеянный свет вызывает уменьшение деталей и интервала яркости изображения. На рис. 8.18, *а* показано изображение объекта, состоящее из пяти участков разной освещенности,

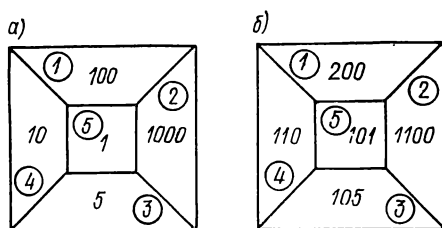


Рис. 8.18. Влияние светорассеяния на соотношение интенсивностей в изображении объекта: *а* — светорассеяние отсутствует; *б* — при наличии рассеянного света

обозначенной в условных единицах. После наложения на все участки дополнительной освещенности, равной 100 единицам, значения результирующих освещенностей станут выражаться значениями, показанными на рис. 8.18, б. Как видно, абсолютные величины перепадов освещенности E между соседними участками не изменились. Однако контрасты (интервалы освещенности) в деталях

$$\Delta E = E_i/E_j \quad (8.36)$$

(где E_i и E_j — освещенности в соседних участках изображения) и общий контраст

$$\delta E = E_{\max}/E_{\min} \quad (8.37)$$

претерпели значительные изменения, что видно из табл. 8.1.

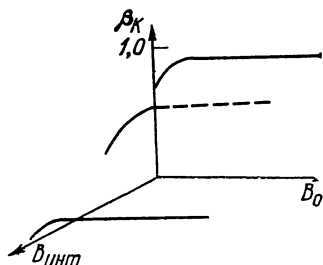


Рис. 8.19. Поверхность коэффициентов потери контраста

Таблица 8.1

Участки изображения (по рис. 8.18)	ΔE	ΔE_p
3—5	5	1,04
4—5	10	1,09
1—5	100	1,98
2—5	1000	10,89

Уменьшение контраста оптического изображения, обусловленное рассеянием света, измеряется коэффициентом потери контраста

$$\beta = \lg (\Delta E)_p / \lg (\Delta E), \quad (8.38)$$

где ΔE_p — контраст изображения с учетом рассеянного света; ΔE — контраст без учета рассеянного света. Для всех объектов значение β_k характеризуется поверхностью (рис. 8.19), лежащей в системе координат, где в двух осях строится зависимость $\beta_k(B_0)$, а по третьей ося откладываются значения $B_{\text{инт}}$, причем B_0 — яркость участка объекта; $B_{\text{инт}}$ — интегральная яркость объекта.

Таким образом, при прочих равных условиях степень соответствия оптического изображения объекту зависит от характера объекта: от его интервала яркостей и интегральной яркости. Увеличение интервала яркости оптического изображения достигается уменьшением в поле зрения участков большой яркости, что сопровождается уменьшением интегральной яркости.

Методика фотоэлектрической оценки уровня рассеянного света в изображении, построенном объективом микроскопа отраженного света, предложена в работе [13]. В ней определялся коэффициент засветки

$$r = \Phi_n/\Phi, \quad (8.39)$$

где Φ_n — паразитный световой поток; Φ — поток, несущий изображение объекта со 100 %-ным отражением,

Если коэффициент отражения реального объекта R_p , то относительная величина его засветки

$$r_p = r/R_p. \quad (8.40)$$

Установка для измерения величины r , позволяющая фотометрировать поле зрения микрообъектива отраженного света, содержит микроскоп, осветитель отраженного света, визирную часть микрофотонасадки с откидной призмой и фотоумножитель (ФЭУ). Ирисовая диафрагма в плоскости изображения ограничивает рабочее поле, а линза, помещенная в этой плоскости, сопрягает выходной зрачок объектива с фотокатодом ФЭУ. Источник излучения и ФЭУ питаются стабилизированным напряжением, фототок регистрируется зеркальным гальванометром.

Во время измерений снимают два отсчета: первый I_1 — для эталонного объекта с известным коэффициентом отражения R_0 ; второй I_2 — в отсутствие объекта. При этом

$$I_1 \approx \Phi R_0 + \Phi_{\text{п}}, \quad I_2 \approx \Phi_{\text{п}}, \quad (8.41)$$

откуда

$$r = I_2 R_0 / (I_1 - I_2). \quad (8.42)$$

В качестве эталонов используют полированные стеклянные пластинки с вычисленным коэффициентом отражения.

Наметим ряд методов исследования рассеянного света, подразумевая при этом под рассеянным светом все перечисленные составляющие излучения, падающего в плоскость приемника изображения, за исключением пучков, строящих изображение объекта.

1. Аберрационное и дифракционное светорассеяние может быть учтено *расчетным* путем. Для этого достаточно, например, рассчитать контраст на заданной частоте (соответствующей передаче существенно важных деталей объекта) для безаберрационной системы данной апертуры и для исследуемой системы.

2. Представление об источниках светорассеяния в зрачке объектива дает *теневого* метод, если наблюдать зрачок при полном перекрытии изображения точечного тест-объекта ножом Фука. Незначительная яркость зрачка может быть скомпенсирована, если при его фотографировании использовать материал достаточной чувствительности в режиме накопления энергии, т. е. с длительной экспозицией.

В целях увеличения светового потока (например, при фотоэлектрическом измерении) в схеме контроля светорассеяния светящаяся точка может быть заменена освещенной щелевой диафрагмой, однако при этом в теневой картине может быть потеряна информация об источниках рассеянного света, ориентированных перпендикулярно оси щели.

3. Уровень освещенности, создаваемой рассеянным светом в плоскости изображения, может быть определен средствами *фотографической* фотометрии (см. п. 36).

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ АБЕРРАЦИЙ ОПТИКИ МИКРОСКОПОВ

43. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВОЛНОВЫХ АБЕРРАЦИЙ ОПТИКИ МИКРОСКОПОВ. ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ

Качество изображения микроскопа в процессе его изготовления обусловлено в основном следующими факторами: расчетными остаточными aberrациями системы, погрешностями изготовления оптических поверхностей и узлов и погрешностями сборки и юстировки системы.

Погрешности изготовления поверхностей особенно нежелательны, так как они, оказывая существенное влияние на качество изображения, чаще всего не могут быть исправлены при сборке и юстировке. Не обнаруженные своевременно ошибки поверхностей требуют значительных затрат времени при их определении в собранном оптическом узле; бракованные узлы направляются на разборку и повторную сборку, что ведет к снижению эффективности производства.

Ошибки изготовления и сборки деталей и систем микроскопа влекут за собой искажения формы волнового фронта, построенного системой. Зная эти искажения, можно судить о качестве изготовления системы. Основные характеристики качества изображения, такие как функция рассеяния точки, разрешение, частотно-контрастная характеристика и концентрация энергии, могут быть получены, если известны величина и форма деформации фронта волны.

Разработанный в последние годы математический аппарат и программы ЭВМ дают возможность производить расчеты качества изображения как для симметричных деформаций волнового фронта, так и для несимметричных aberrаций типа комы, астигматизма и т. д. [31]. Для определения ФРТ в случае зональных ошибок поверхности или симметричных aberrаций системы достаточно рассчитать на ЭВМ одномерное преобразование Фурье функции волновых aberrаций на зрачке, измеренных с необходимой точностью. При этом исследованиями показано [22], что распределение освещенности в пятне рассеяния обусловлено не столько максимальной деформацией фронта волны ΔW_{\max} , сколько среднеквадратической деформацией $\Delta \bar{W}$. Поэтому точность изготовления поверхностей и систем в соответствии с условием Релея, когда $\Delta W_{\max} \leq \lambda/4$, не гарантирует получения качества изображения, близкого к идеальному. Если на поверхности имеется система зональных ошибок, то, например, при $\Delta W_{\max} = 0,22\lambda$, $\Delta \bar{W} = 0,07\lambda$ диаметр пятна рассеяния, содержащего 84 % энергии, в 2,6 раза больше, чем у идеальной оптической системы.

В настоящее время для экспериментального исследования деформаций оптических поверхностей и волновых фронтов все более широкое применение находит метод интерферометрии, позволяющий контролировать как системы в целом, так и отдельные оптические по-

верхности. Результаты интерферометрических измерений достаточно наглядны, так как дают возможность наблюдать карту или совокупность профилей двумерного рельефа отклонений исследуемого волнового фронта от сферической поверхности, выбранной в качестве опорной.

Помимо возможности оперативных качественных и количественных оценок ошибок поверхностей и систем интерференционный метод дает возможность производить косвенные количественные оценки качества изображения, создаваемого системой, либо оценивать влияние ошибок отдельных поверхностей на качество изображения, построенного всей системой. Обработка на ЭВМ позволяет анализировать структуру дифракционного изображения точки по данным топографии ошибок волнового фронта, полученным по результатам интерференционного контроля, с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье и построенных на нем программ. По данным промера координат интерференционных полос, ЭВМ восстанавливает форму волнового фронта и дает ее аналитическое выражение, устраняет ошибки, вносимые интерферометром. Однако, делая выводы и принимая решения по результатам такого контроля, необходимо помнить, что при этом остаются неучтенными влияние рассеянного света, включений оптических материалов, загрязнений и микрорельефа оптических поверхностей.

Первые схемы интерферометров для контроля микрообъективов были предложены еще в 1923 г. Ф. Твайманом [86]. В нашей стране в 1933—1934 гг. В. П. Линником был создан лабораторный вариант интерферометра Тваймана для испытания объективов микроскопа.

Недостаток первых интерферометров состоял в том, что они позволяли измерять волновые aberrации лишь с точностью до 1λ , что не отвечало требованиям оценки микрообъективов, где волновые aberrации в то время по расчету не превышали $0,25\lambda$.

В 1956 г. А. Н. Захарьевским и Л. А. Фединым [21] был создан макет интерферометра по схеме Тваймана для измерения волновых aberrаций микрообъективов, в котором использован предложенный В. П. Линником фотографический метод регистрации интерференционной картины на высокочувствительных фотоматериалах, что позволило повысить точность измерения волновых aberrаций до значения $0,1\lambda$.

Существующий макет интерферометра по схеме Тваймана позволяет производить измерения волновой aberrации микрообъективов для точки на оси, однако, из-за наличия ветви сравнения, возникают трудности при настройке и измерении микрообъективов различных типов.

Для повышения точности интерферометрических измерений волновых aberrаций за последние годы было предложено несколько схем интерферометров, в которых в качестве источника света использовались оптические квантовые генераторы (ОКГ) непрерывного действия. Однако испытания ранее изготовленных макетов показали, что наряду с основной интерференционной картиной в выходном зрачке исследуемого микрообъектива наблюдаются побочные интер-

ференционные и дифракционные картины, которые затрудняют расшивку и исключают возможность проведения уверенных измерений.

Анализ работ по количественным методам и приборам для оценки качества изображения микрооптики свидетельствует о том, что как в нашей стране, так и за рубежом новые количественные методы применялись до недавнего времени лишь в лабораторных условиях; сведения о применении последних для контроля промышленной продукции не встречались.

44. ИНТЕРФЕРОМЕТР С ДИФРАГИРОВАННОЙ ЭТАЛОННОЙ ВОЛНОЙ

Среди многочисленных устройств, созданных для получения интерференционных картин в период, предшествующий изобретению ОКГ, классическая схема двухлучевого интерферометра Тваймана [86] является наиболее распространенной. Однако, для того чтобы образовалась достаточно контрастная интерференционная картина, необходимо получить одинаковую оптическую длину хода обоих пучков через схему интерферометра, что определяется малой длиной когерентности излучения применяемого в интерферометре источника (ртутной лампы).

При использовании в этой схеме в качестве источника гелий-неонового ОКГ благодаря высокой когерентности его излучения длина хода объектного и эталонного пучков может значительно различаться, причем наблюдается интерференционная картина, сохраняющая достаточный контраст. На этом принципе разработан неравноплечий интерферометр [19]. Основным недостатком этой схемы при контроле качества поверхностей и систем оптики микроскопов является потребность в двух эталонных поверхностях, вследствие чего требования к каждой из них ужесточаются вдвое.

Оригинальная схема интерферометра с дифрагированным эталонным фронтом разработана и реализована П. В. Головкин, Н. В. Королевым, Т. А. Ивановой, В. К. Кирилловским и Р. М. Рагузиным [35]. Интерферометр может работать без применения в его схеме точных и эталонных поверхностей. Благодаря высокой когерентности применяемого излучения и его способности фокусироваться в пятно малых размеров в интерферометре используются идеально сферические волновые фронты, образованные при дифракции сходящихся пучков на диафрагме диаметром приблизительно 5 мкм.

Прибор может быть использован для оценки погрешностей изготовления вогнутых и выпуклых сферических поверхностей, аттестации качества объективов различного назначения, в том числе — объективов микроскопов. Принцип действия интерферометра состоит в том, что на одной из поверхностей расщепителя светового пучка, выполненного в виде плоскопараллельной пластины, нанесено зеркальное покрытие вместо светоделительного, используемого в неравноплечих интерферометрах. В центре зеркального покрытия имеется точечное отверстие, а между источником излучения и расщепителем

пучка расположен объектив, задний фокус которого совмещен с точечным отверстием на расщепителе пучка. Точечное отверстие служит источником дифрагированной сферической волны, которая является опорной. Таким образом, возникающая в этой схеме интерференционная картина есть результат сложения идеальной сферической волны, возникшей при дифракции на точечном отверстии, и рабочей волны, отраженной от контролируемой поверхности. Благодаря такому решению расщепителя в интерференционной картине отсутствуют паразитные изображения, возникающие в обычных светоделительных элементах. Это обстоятельство позволяет повысить во многих случаях точность и надежность интерференционного контроля.

Благодаря использованию дифрагированной волны, образующейся на точечном отверстии в сходящемся пучке, в качестве опорной схема интерферометра существенно упрощается. Отпадает необходимость изготовления сферической эталонной поверхности, требования к которой в неравноплечих интерферометрах ограничивают достижимую точность измерения, так как погрешности изготовления эталона трудно снизить до величины менее $\lambda/10$.

Для выравнивания интенсивностей пучков и повышения контраста интерференционной картины в обеих ветвях интерферометра установлены поляризационные пластинки. Таким образом, интерферометр с дифрагированной волной позволяет контролировать оптические элементы и поверхности, отличающиеся коэффициентом пропускания или отражения в большом диапазоне, от 1 до 90 % без замены элементов интерферометра. Решение подобной задачи в неравноплечем интерферометре требует замены неалюминированной эталонной сферической поверхности на алюминированную или просветленную, что вызывает повторную настройку прибора.

Схема интерферометра с дифрагированной эталонной волной показана на рис. 9.1. Луч источника когерентного излучения 6, пройдя расширитель 5, фокусируется объективом 4 в точечное отверстие 3 зеркала 7. Отверстие совмещено с центром кривизны контролируемой волновой поверхности 19. Центр кривизны осветительного сферического зеркала 1 совмещен с отверстием 3; в плече наблюдения имеются объектив 9 и окуляр 11 для наблюдения освещенной точечной диафрагмы и автоколлимационного изображения точки в центре кривизны контролируемой поверхности. Для наблюдения интерференции в зрачке вводится дополнительно линза Бертрана 10. В трех ветвях интерферометра установлены с возможностью поворота поляризационные пластины 2, 8 и 23. Для регистрации интерферограммы за окуляром устанавливается фотографическая камера 12 с объективом 18 и фотоматериалом 13 или телевизионная передающая камера 14 с объективом 17 и выходом сигнала на видеоманитофон 15 и видеоконтрольное устройство 16.

Интерферометр работает следующим образом. Пучок лучей источника 6, прошедший через расширительный элемент 5, фокусируется на точечном отверстии 3 в зеркальном покрытии наклонного плоского зеркала 7 в виде пятна рассеяния диаметром около 100 мкм. Точечное

отверстие становится источником дифрагированной сферической волны, которая в автоколлимации от исследуемой сферической поверхности 19 изображается в виде пятна рассеяния, перекрывающего точечное отверстие 3. Отразившись от зеркала 7, эта рабочая волна направляется на приемник изображения через объектив 9 и окуляр 11.

Часть излучения источника, сфокусированного объективом 4 на точечное отверстие, но не прошедшего через него, отражается от зеркала 7 в направлении осветительного сферического зеркала 1 и фокусируется на отверстии 3 в направлении плеча наблюдения. При этом на отверстии формируется вторая дифрагированная сферическая волна, фронт которой использован в качестве опорного. В резуль-

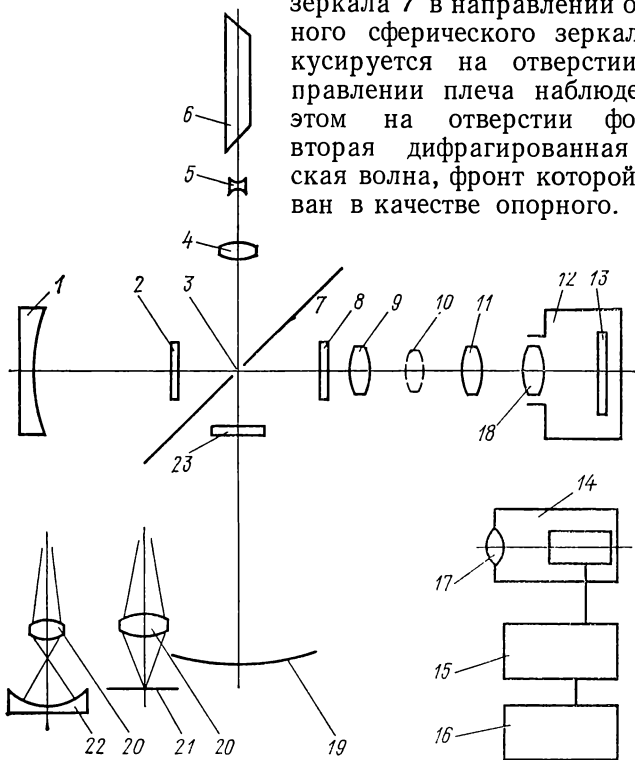


Рис. 9.1. Схема интерферометра с дифрагированной эталонной волной

тате сложения этой волны с рабочей возникает интерференция в совмещенных световых пучках, распространяющихся в направлении приемника изображения. Особенность рассмотренного варианта схемы интерферометра в режиме контроля оптических поверхностей состоит в том, что он является полностью безэталонным, так как в нем не содержится ни одной эталонной оптической поверхности, а также отсутствуют поверхности, погрешности изготовления которых входят в погрешности измерения.

Если производится контроль aberrаций микрообъектива, в объектную ветвь интерферометра устанавливается исследуемый микрообъектив 20, а за ним — плоское зеркало 21. Дифрагированный го-

моцентрический пучок фокусируется микрообъективом на зеркальную поверхность, отражается от нее и в виде сходящегося пучка направляется исследуемым объективом через наклонное зеркало 7 в систему 9—11, где наблюдается интерференция рабочего волнового фронта, дважды искаженного аберрациями исследуемого объектива, с эталонным дифрагированным фронтом. К качеству поверхности зеркала 21 не предъявляются эталонные требования, так как диаметр рабочего участка, на котором происходит отражение лучей, чрезвычайно мал (около $6 \cdot 10^{-4}$ мм), и, следовательно, в этом режиме интерферометр по-прежнему работает как безэталонный.

Недостаток такой схемы контроля объективов состоит в невозможности контроля асимметричных искажений фронта волны типа комы, так как в результате отражения рабочего пучка от плоского зеркала искажения волнового фронта в прямом и обратном ходе переналагаются с поворотом на 180° относительно оси. Аберрации типа комы при этом компенсируются.

Для устранения этого недостатка используется схема контроля, в которой перед исследуемым объективом 20 располагается эталонное сферическое зеркало (алюминированное пробное стекло) 22, центр кривизны которого совмещен с точкой схождения лучей перед контролируемым объективом. В этом случае погрешность измерения волновой аберрации определяется погрешностью эталона. Однако после того, как кома в объективе (порождаемая чаще всего децентрировкой его компонентов) исправлена, другие аберрации изготовления объектива могут быть с высокой точностью проконтролированы в схеме с плоским зеркалом.

При наличии в схеме контроля значительных вибраций, а также при необходимости длительной и регулярной работы на интерферометре используется телевизионная система. Интерференционная картина формируется на фотокатode передающей трубки телевизионной камеры 14 и передается с увеличением на экран видеоконтрольного устройства 16. Для устранения влияния вибраций телевизионное изображение движущейся интерференционной картины записывают на видеоманитофоне 15 и затем наблюдают и расшифровывают изображение неподвижной интерферограммы, воспроизводимое с одиночного кадра (рис. 9.2, а). На практике в большинстве случаев используются интерферограммы, полученные при расфокусировке интерферометра. При продольной расфокусировке образуется картина интерференционных колец, удобная для оценки аберраций типа астигматизма. При поперечной расфокусировке зрительная оценка картины полос (рис. 9.2, б) хорошо выявляет сферическую аберрацию и кому. Вводимые продольная и поперечная расфокусировки интерферометра устраняются при обработке интерферограммы на ЭВМ. Ширина полос в интерференционной картине зависит от взаимного расположения точек схождения лучей, направленных из эталонной и объектной ветвей [40]. При поперечной расфокусировке, когда точки лежат в плоскости, перпендикулярной оси, на расстоянии a_1 одна от другой, ширина полос

$$b = \lambda L / a_1, \quad (9.1)$$

где L — радиус кривизны исследуемой волновой поверхности, вписанной в зрачок исследуемой системы; λ — длина волны света.

В случае продольной расфокусировки, когда точки схождения лучей располагаются вдоль оси системы на расстоянии a_2 , наблюдается картина колец, радиус каждого из которых равен

$$r_k = L \sqrt{2k\lambda/a_2}, \quad (9.2)$$

где k — номер кольца, $k = 1, 2, 3$.

Условием получения неискаженной интерферограммы волнового фронта является сопряжение поверхности приемника изображения с исследуемой оптической поверхностью или со сферической поверхностью, вписан-

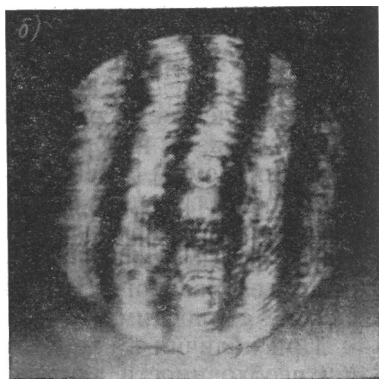
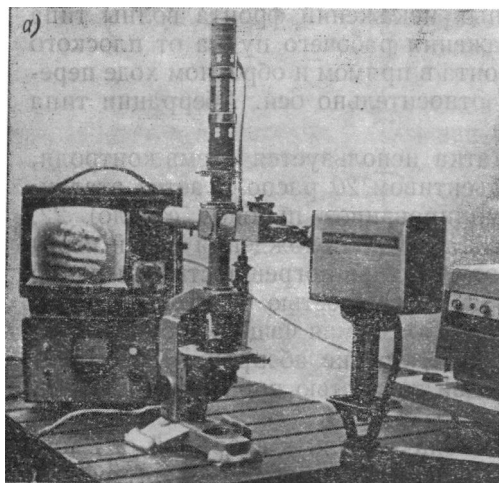


Рис. 9.2. Интерферометр с дифрагированной эталонной волной в агрегате с телевизионной установкой и видеомагнитофоном для устранения влияния вибраций (а) и интерферограмма на экране ВКУ (б)

ной в зрачок системы. Если фотографический объектив регистратора не сфокусирован на исследуемый зрачок, в показаниях интерферометра возникают отклонения, трудноустраняемые при дальнейшей их математической интерпретации, а визуальная оценка характера ошибок и аберраций может быть неверна [60]. Возможность появления погрешности регистрации особенно велика при контроле волновых поверхностей с малым радиусом кривизны.

Нарушение сопряжения поверхности приемника изображения с исследуемой волновой поверхностью возникает и при неперпендикулярности оптической оси объектива регистратора плоскости приемника изображения. При этом возникают перспективные искажения координат интерференционных полос, которые могут быть учтены и устранены при последующей математической обработке результатов расшифровки интерферограммы, но в процессе контроля путем непосредственной визуальной оценки интерферограммы (например, с применением отсчетной сетки) могут быть получены неверные результаты, если нарушения не устранены своевременно.

45. ИНТЕРФЕРОМЕТР С ЭТАЛОННОЙ ФРОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Интерферометр типа бесконтактного пробного стекла (рис. 9.3) предназначен для контроля правильности формы полированных вогнутых и выпуклых поверхностей линз. Источник света 1 (в исходном варианте использована ртутная лампа СМР-1) конденсором 2 проецируется в плоскость диафрагмы 3, являющейся входным зрачком прибора. Диафрагма 3 находится в фокальной плоскости объектива 4. Параллельный пучок лучей из объектива 4 проходит через светофильтр 5 (выделяющий в излучении ртутной лампы линию 541,6 нм) и, отразившись от гипотенузной грани призм-куба 10, попадает в объектив 11 и собирается в его фокальной плоскости, которая совмещена с центром кривизны пробного стекла 12 и детали 13. Лучи, отраженные от пробного стекла и проверяемой детали, проходят объектив 11, призму-куб 10, объектив 9, призму 7 и фокусируются на сетке окуляра 6.

Интерференционная картина, возникшая в результате наложения волн, отраженных от поверхностей пробного стекла и детали, наблюдается при удалении окуляра с помощью объектива 8.

Для контроля вогнутых поверхностей в интервале радиусов кривизны 70—300 мм используется комплект из четырех сменных объективов интерферометра. Для контроля выпуклых поверхностей в интервале радиусов кривизны 12—300 мм необходим набор из пяти сменных объективов. Потребность в таком числе сменных объективов объясняется тем, что при частично когерентном излучении линии ртути, как показывает опыт работы на приборе, размер воздушного промежутка между проверяемой и эталонной поверхностями не должен превышать 10 мм. Следовательно, эталонная поверхность каждого радиуса может быть использована для контроля поверхностей лишь в ограниченном диапазоне радиусов кривизны.

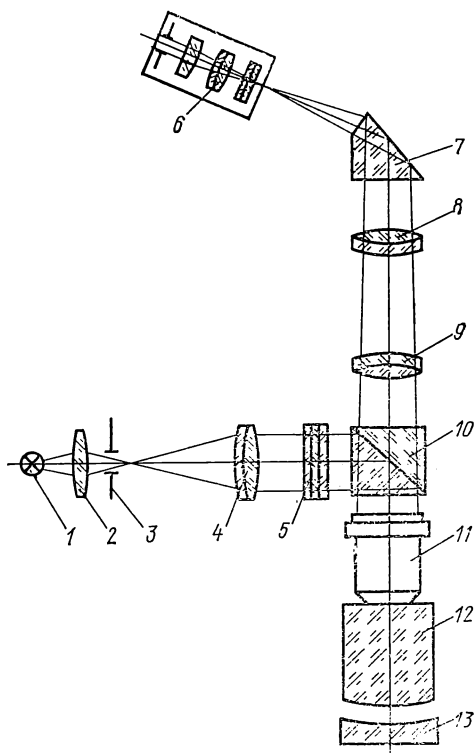


Рис. 9.3. Схема интерферометра с эталонной фронтальной поверхностью

Благодаря использованию высококогерентного излучения разработан и изготовлен подобный по схеме прибор, более простой в эксплуатации. В частности, в нем для контроля вогнутых поверхностей вместо набора из четырех сменных объективов используется один; с его помощью могут быть проконтролированы радиусы кривизны от 12 до 300 мм, и дальнейшее расширение диапазона радиусов кривизны лимитируется лишь конструктивным решением прибора. В то же время при повороте оси прибора в горизонтальное положение возможен контроль поверхностей и с большими значениями радиусов. Кроме того, существенно возрастает световой поток в схеме контроля, что позволяет производить моментальное фотографирование интерференционной картины, когда она в процессе контроля движется из-за действия вибраций.

Следует заметить, что для получения интерференционной картины высокого качества все оптические поверхности прибора, за исключением эталонной, должны быть просветлены для длины волны когерентного излучения (чаще всего — 630 нм).

46. ИНТЕРФЕРЕНЦИОННО-РАСТРОВЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ХРОМАТИЗМА И ПОЛЕВЫХ АБЕРРАЦИЙ МИКРООПТИКИ

В последнее время наряду с классическими интерферометрами, построенными по принципу деления амплитуды световой волны, ведутся работы по созданию и применению интерферометра, построен-

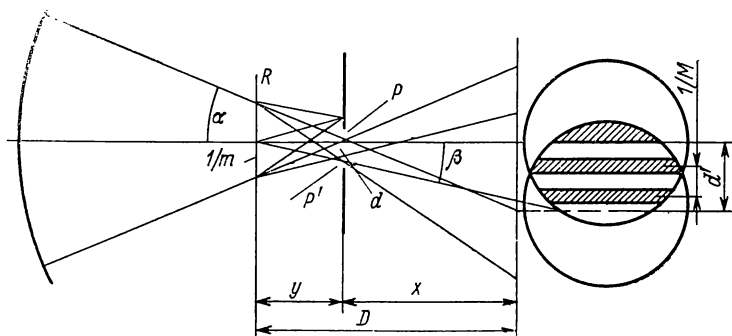


Рис. 9.4. Схема интерферометра Ронки

ного по принципу деления волнового фронта. Внимание исследователей к этим приборам привлечено, главным образом, благодаря их высокой устойчивости к вибрациям. Кроме того, приборы по таким схемам не требуют применения эталонных оптических поверхностей и позволяют вести контроль при освещении белым светом или с выделением любой длины волны.

Для контроля оптических систем микроскопов усовершенствованы схемы интерферометров сдвига на базе применения низкочастотной дифракционной решетки. Такие схемы были предложены в начале века итальянским ученым Васко Ронки [62] для контроля астрономических систем. Принцип работы схемы (рис. 9.4) следую-

щий. Предположим, что сферическая световая волна, построенная оптической системой, с центром кривизны в точке P падает на решетку R , установленную нормально к оптической оси. Решетка имеет частоту m и отстоит от центра кривизны сферической волны на y . Это расстояние считается положительным, если отсчет производится в направлении, обратном направлению распространения света.

При этом по обеим сторонам от точки P образуются дифракционные спектры различных порядков, имеющие для монохроматического света вид точек. Расстояние между спектрами в первом приближении для малых углов дифракции равно $d = y\beta$, где β — угол дифракции, $\beta = m\lambda$, отсюда $d = ym\lambda$.

Таким образом, решетка порождает ряд дифрагированных волн, повернутых на угол β и смещенных на расстояние d одна относительно другой. При малой величине d и монохроматиче-

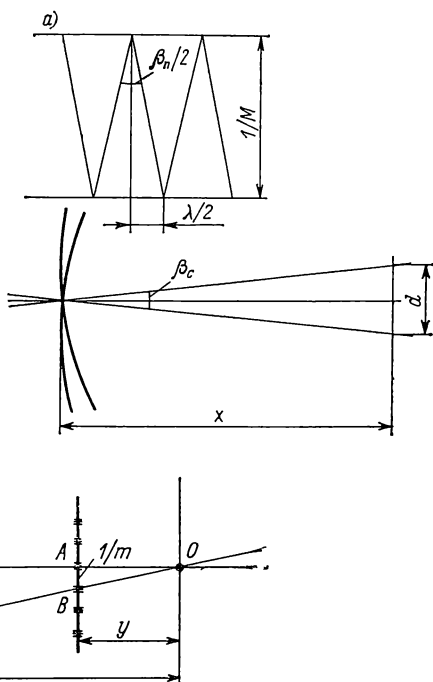


Рис. 9.5. Принцип образования полос в интерферометре с решеткой: a — определение шага интерференционных полос: b — деформирование полос при малых углах дифракции

ском освещении дифрагированные фронты подобны исходному сферическому волновому фронту. Выделим из всей совокупности дифрагированных фронтов только два соседних. После концентрации в точках P и P' фронты расходятся, образуя в той области пространства, где они перекрываются, интерференционные полосы. На экране эти полосы прямолинейны, параллельны и отстоят друг от друга на равные промежутки. Частота полученной системы полос составляет M . Угол отклонения волнового фронта 1-го порядка равен углу дифракции β .

Рассмотрим сложение двух систем взаимно отклоненных плоских фронтов. Как видно из рис. 9.5, a , шаг интерференционной полосы равен

$$1/M_{\Pi} = \lambda/\beta_{\Pi}.$$

Для сферических фронтов угол наклона составляет $\beta_c = d/x$. Отсюда шаг интерференционных полос равен $1/M = \lambda x/d$. Имея в виду что $d = ym\lambda$, находим $1/M = x/my$. Тогда частота интерференционных полос

$$M = my/x.$$

Из этого выражения вытекает следующее:

1. В интерферометре с решеткой частота интерференционных полос не зависит от длины волны освещения в схеме, а определяется лишь частотой решетки и ее положением относительно плоскости изображения.

2. Расстояние между интерференционными полосами может быть определено на основании простых геометрических соотношений.

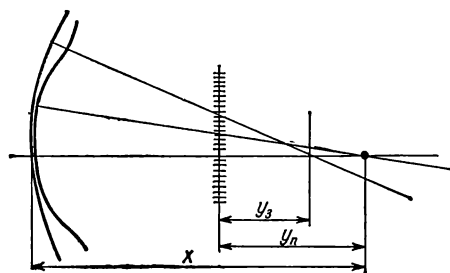


Рис. 9.6. Схема работы интерферометра с решеткой при наличии aberrаций

Рассмотрим упрощенную схему интерферометра с решеткой (рис. 9.5, б) для малого угла дифракции, когда величиной d можно пренебречь. Из подобия треугольников AOB и $A'O'B'$ находим

$$y/x = M/m,$$

откуда получаем приведенное выше выражение $M = my/x$.

Если исследуемый волновой фронт искажен aberrацией (рис. 9.6), то расстояние от изображения до решетки в параксиальной области может быть определено из выражения

$$y_{\Pi} = M_{\Pi}x/m.$$

Для зоны, содержащей aberrацию, плоскость фокусировки смещена, и расстояние от изображения до решетки иное:

$$y_3 = M_3x/m.$$

Очевидно, что шаг полосы в интерферограмме для этой зоны также изменяется и составляет $1/M_3$. Интерферограмма безабберационной системы содержит прямые полосы (рис. 9.7, а). Если система имеет отрицательную сферическую aberrацию, а решетка расположена перед плоскостью изображения ($y < 0$), то полосы интерферограммы искажаются в виде буквы X (рис. 9.7, б). Положительная сферическая aberrация в тех же условиях дает обратную картину — 0-образное искажение полос (рис. 9.7, в).

Продольную aberrацию можно определить как

$$\Delta y = y_{\Pi} - y_3 = \frac{M_{\Pi}x}{m} - \frac{M_3x}{m} = \frac{x}{m} (M_{\Pi} - M_3).$$

Обозначим продольную сферическую aberrацию через δL . Тогда

$$\delta L = x \Delta M/m.$$

Следовательно, продольная сферическая aberrация пропорциональна приращению частоты интерференционных полос в рассматриваемой зоне относительно частоты полос в параксиальной области.

Для систем, работающих из бесконечности, т. е. телескопов, фото- и кинообъективов и т. п., имеем $x = f'$. Тогда последняя формула примет вид

$$\delta L_{\phi} = f' \Delta M/m.$$

В микроскопе расстояние до плоскости изображения определяется длиной тубуса d_T . Следовательно, aberrация объектива микроскопа находится по формуле:

$$\delta L_m = d_T \Delta M/m.$$

Имея интерференционную картину зрачка, полученную на растровом интерферометре, если aberrация симметрична к оптической оси, можно по форме интерференционных полос

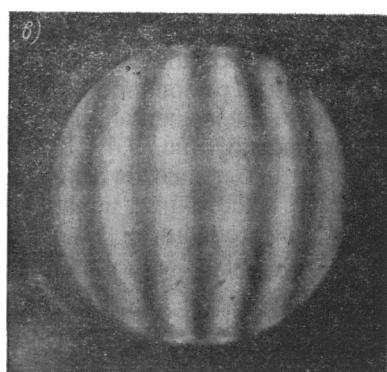
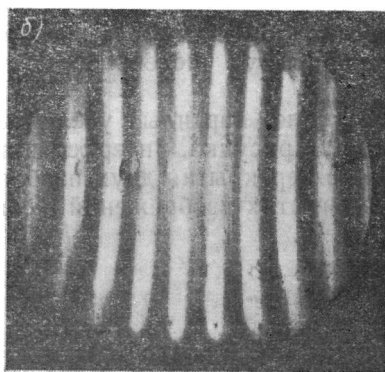
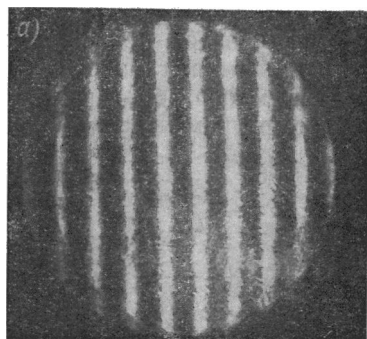


Рис. 9.7. Интерферограммы Ронки: *а* — при отсутствии aberrации; *о* — отрицательная сферическая aberrация; *в* — положительная сферическая aberrация (решетка находится перед плоскостью изображения, построенного объективом)

уверенно судить о наличии, характере и величине aberrации. Пусть схема построена таким образом, чтобы центральная полоса проходила через вертикальный диаметр интерферограммы. Нанесем координатные оси и отложим на них высоту зрачка h и продольную aberrацию Δy . Поскольку сферическая aberrация в параксиальной области принимается равной нулю, то ось ординат h проведем касательно к первой интерференционной полосе в точке ее пересечения с горизонтальным диаметром. На оси ординат нанесем градуировку в

долях высоты зрачка, принимая максимальную высоту зрачка за единицу:

$$h_{\max} = R = 1,$$

где R — радиус зрачка.

Масштаб градуировки оси абсцисс δL находим из выражения

$$\Delta M = m\delta L/x,$$

приравнивая δL некоторой величине (например, 0,1 мм), поскольку значения m и x известны.

Таким образом, интерферометр с решеткой позволяет прямо на интерферограмме получить кривую сферической aberrации исследуе-

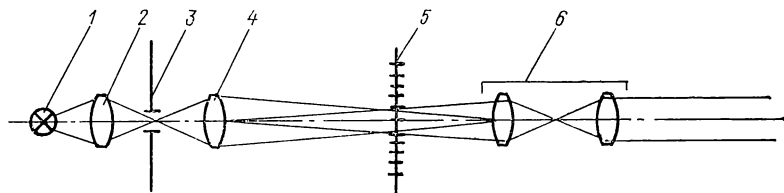


Рис. 9.8. Схема интерферометра с решеткой для исследования aberrаций микрообъектива

мой системы. Кривую геометрической aberrации можно преобразовать в график волновой aberrации, используя численное (или графическое) интегрирование.

Рассмотрим изменение интерференционной картины с увеличением частоты решетки (рис. 9.4). Как видно из рисунка, интерференционные полосы наблюдаются только в зоне перекрытия двух изображений зрачка. Расстояние между центрами этих изображений d' определяется соотношением

$$d' = \beta D,$$

а радиус каждого изображения зрачка равен

$$r = \alpha x,$$

где α — апертурный угол исследуемой оптической системы.

Область перекрытия двух изображений зрачка исчезнет, когда расстояние между их центрами изображений станет равным диаметру, т. е. когда будет выполняться условие: $d' = 2r$; $\beta D = 2\alpha x$. При малых y считаем $D \approx x$, и тогда предельный угол дифракции $\beta = 2\alpha$, а предельная частота решетки $m = 2\alpha/\lambda$.

Если в интерференции принимают участие две дифрагированные волны первого порядка, приведенные соотношения несколько видоизменяются. Расстояние между центрами изображений зрачков будет равно $d'' = 2\beta D$.

Область перекрытия двух изображений зрачка исчезнет, когда $d'' = 2r$; $d' = r$; $\beta D = \alpha x$. Если x велико по сравнению с y , можно принять $\beta D = \beta x$. Тогда предельная частота решетки соответствует

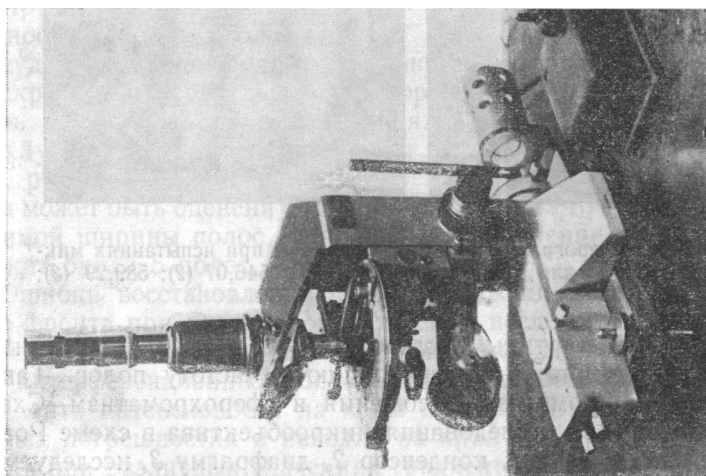


Рис. 9.9. Прибор для контроля хроматических аберраций микробъектива

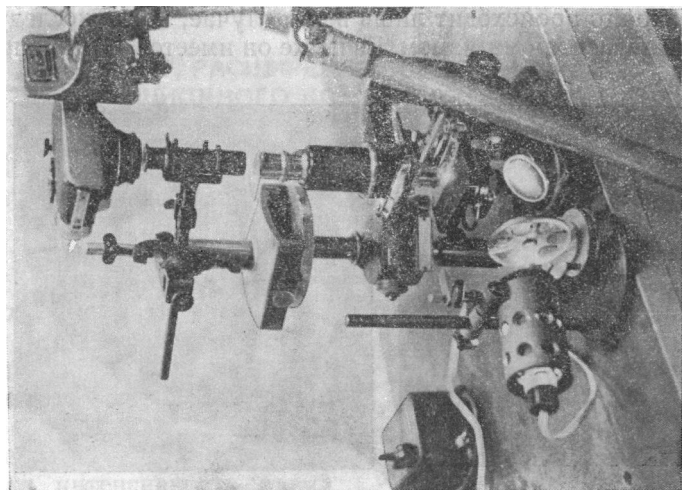


Рис. 9.10. Установка для контроля полевых аберраций микробъектива

случаю $\beta = \alpha$. Учитывая, что $\beta = m\lambda$, получаем значение предельной частоты решетки $m = \alpha/\lambda$.

На изложенном принципе построен интерферометр с решеткой для исследования аберрации оптики микроскопов. В монохроматическом свете частота интерференционной полосы не зависит от длины волны. Однако это происходит лишь в том случае, когда исследуемая система не обладает хроматизмом. Если же он имеется, то при анализе

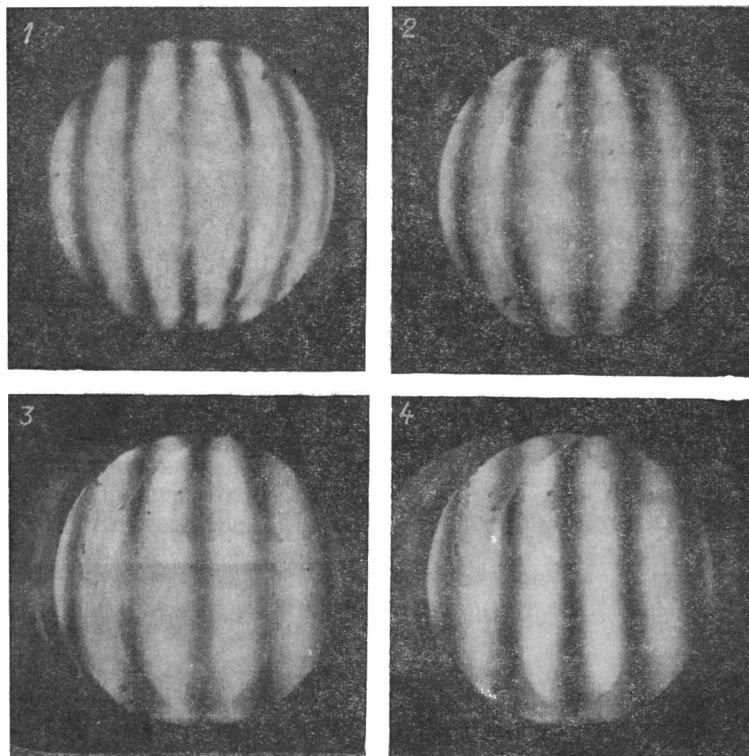


Рис. 9.11. Интерферограммы Ронки, полученные при испытаниях микрообъектива ОХ-1, для длин волн 486,13 (1); 546,07 (2); 589,29 (3); 656,27 (4) нм

интерференционной картины последовательно в различных длинах волн получаем различную конфигурацию и частоту полос. Таким образом, находим хроматизм положения и сферохроматизм. Схема прибора (рис. 9.8) для исследования микрообъектива в схеме Ронки содержит источник света 1, конденсор 2, диафрагму 3, исследуемый объектив 4, решетку 5 и наблюдательную систему 6. При необходимости определения полевых аберраций смещаются диафрагма 3 и наблюдательная система 6.

Общий вид прибора для контроля аберраций микрообъективов, в том числе хроматических, показан на рис. 9.9. Установка для кон-

троля полевых aberrаций изображена на рис. 9.10. Интерферограммы микрообъективов даны на рис. 9.11.

Поскольку интерферометр работает с источником белого света, то введением интерференционных светофильтров выделяем требуемые длины волн (линии D, C, F, G, e) для исследования хроматизма микрообъектива.

47. РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ, ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАСШИФРОВКИ ИНТЕРФЕРОГРАММ

Наибольшее распространение получили два основных способа расшифровки интерферограмм — геометрический и фотометрический. Из них в практике оптического приборостроения применяется преимущественно геометрический способ. При этом способе расшифровки устанавливается связь между смещением или искривлением полосы и вызванной им разностью хода.

При интерференции двух равноинтенсивных пучков результирующая интенсивность равна

$$E = A^2 = 4A_1^2 \cos^2(\pi\delta/\lambda), \quad (9.3)$$

где A_1 — амплитуда составляющих колебаний; δ — разность хода; λ — длина волны.

При таком распределении освещенности максимум полосы широк и неудобен для измерений. Края полос размыты, наведение на них перекрестия измерительного прибора дает лишь ограниченную точность. Считают [31], что в условиях производственной лаборатории двухлучевой интерференции может быть получена точность измерения, равная 0,1 ширины интерференционной полосы, т. е. разность хода может быть оценена с точностью $0,1\lambda$ и эта точность не зависит от видимой ширины полос, если поле интерференционной картины содержит около 5 полос.

Ошибки восстановления формы искажений исследуемого волнового фронта при интерферометрических исследованиях в решающей степени определяются погрешностями измерения координат положения интерференционных полос, которые, в свою очередь, зависят от градиента интенсивности на краю полосы. Данные о среднеквадратичных погрешностях σ наводки на край фотографического изображения при различных значениях градиента g_{\max} величины пропускания позволили получить график взаимосвязи этих величин (рис. 9.12) [25].

Повышение точности расшифровки достигается, когда интерференционные полосы принимают форму узких линий, контрастных фону. Подобное распределение освещенности получается, в частности,

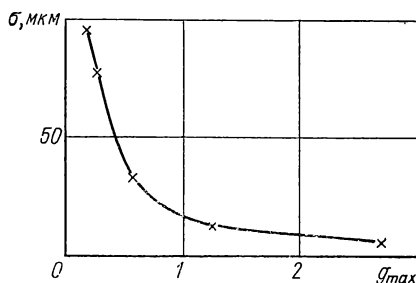


Рис. 9.12. Зависимость среднеквадратичной погрешности наводки на край детали фотографического изображения от пограничного градиента освещенности

методом многолучевой интерференции [66]. Недостатком этого метода является необходимость алюминировать исследуемую поверхность, что в условиях серийного производства линзовых систем неприменимо.

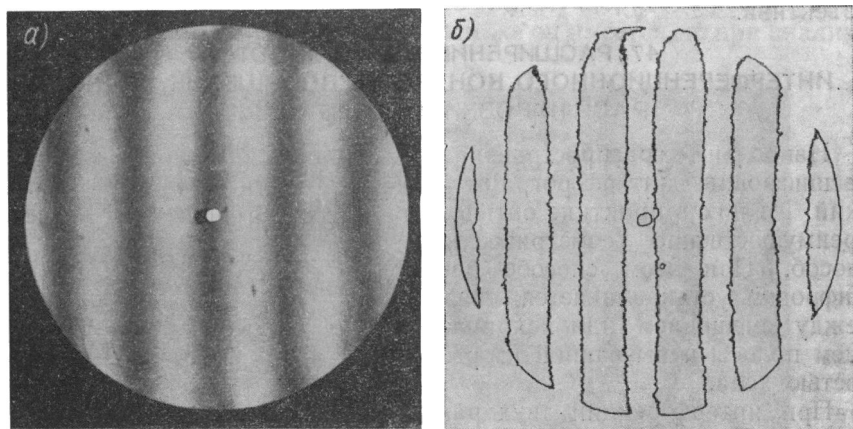


Рис. 9.13. Изображение интерференционных полос до оконтуривания (а) и после него (б)

В работе [5] предлагается метод изменения структуры фотографического изображения интерференционной картины, основанный на удвоении частоты интерференционных полос. Рассмотрение метода [37] показывает, что его недостаток состоит в необходимости проведения сенситометрических испытаний фотоматериала. Кроме того, полосы исходной интерферограммы должны иметь строго симметричную структуру, а сама интерференционная картина — строго равномерную интегральную освещенность по полю, что на практике соблюдается редко.

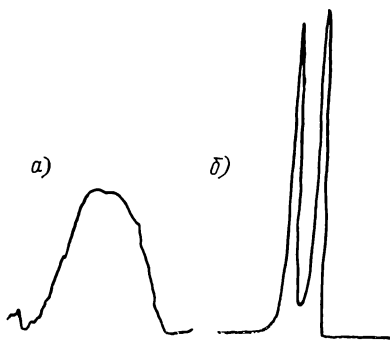


Рис. 9.14. Структура интерференционной полосы: а — без оконтуривания; б — после оконтуривания

Эффективный метод трансформации интерференционной картины, позволяющий заменить каждую полосу парой четких узких линий — эквивалент — предложили В. Лау и Е. Круг [43]. По оценке авторов точность

измерений близка к получаемой с помощью многолучевой интерферометрии.

Требуемого результата достигают путем повышения контраста интерферограммы на фотоматериале и применения оконтуривания с использованием эффекта Сабатье (рис. 9.13). Изменение структуры

полосы видно из рис. 9.14. Исследования [34] погрешностей измерения положения полос интерферограмм позволили сделать следующие выводы:

- 1) относительная погрешность расшифровки неоконтуренных интерферограмм возрастает с увеличением ширины полосы;
- 2) относительная погрешность расшифровки оконтуренных интерферограмм убывает с увеличением ширины полосы;
- 3) погрешности расшифровки путем наведения на центр и на края оконтуренной полосы практически однозначны;
- 4) применение оконтуривания беззернистой интерферограммы с широкими полосами позволяет уменьшить погрешность расшифровки в 30 раз.

48. ТЕЛЕВИДЕНИЕ И ВИДЕОЗАПИСЬ ПРИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОМ КОНТРОЛЕ. АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСШИФРОВКИ ИНТЕРФЕРОГРАММ

Влияние вибраций, неизбежно присутствующих в условиях действующего производства, затрудняет применение интерференционного метода и снижает его эффективность.

При перемещении исследуемой оптической поверхности относительно прибора под действием вибрации интерференционные полосы перемещаются и изменяется вид интерференционной картины. Смещение исследуемой поверхности на расстояние $\lambda/2$ вызывает сдвиг интерференционной картины на одну полосу. Перемещение полос равно

$$N = 2L_{\text{д}}/\lambda, \quad (9.4)$$

где N — число полос, на которое смещается интерференционная картина; $L_{\text{д}}$ — перемещение исследуемой поверхности.

Таким образом, если за время экспозиции при фотографировании интерференционной картины она сместится на половину полосы, то световые полосы наложатся на темные промежутки, что при расшифровке на снимке такой картины вызовет трудности. Таким образом, перемещение исследуемой поверхности за время экспозиции на величину $\lambda/4$ делает интерференционный контроль невозможным. Естественно, что и вдвое меньшее смещение $\lambda/8$ приведет к размытию картины интерференции и существенно повысит погрешности расшифровки координат положения полос. При использовании источника когерентного излучения с длиной волны 632,8 нм смещение исследуемой поверхности не должно превышать 0,1 мкм.

Практикой цеховых интерференционных исследований установлено, что в условиях производства доступные средства виброзащиты не позволяют избежать значительных по амплитуде и частоте колебаний интерференционной картины. Однако, так как эти колебания нерегулярны и в процессе наблюдения встречаются краткие мгновения, когда интерференционная картина стабилизируется, что многократное фотографирование с выдержками 0,004—0,001 с дает возможность после обработки негатива выбрать из ряда кадров от-

дельные снимки более или менее приемлемого качества, пригодные к расшифровке (рис. 9.15). Поскольку фотографирование ведется при этом по существу наугад, то до фотографической обработки пленки исследователь не имеет уверенности в том, что получены хорошие снимки. Кроме того, зафиксированные интерферограммы, естественно, не оптимальны по качеству (контрасту, четкости), что ведет к снижению точности измерений. Настройка интерферометра согласно существующей методике ведется при непосредственном наблюдении интерференционной картины при интенсивном когерентном освещении, что вызывает быструю утомляемость работника.

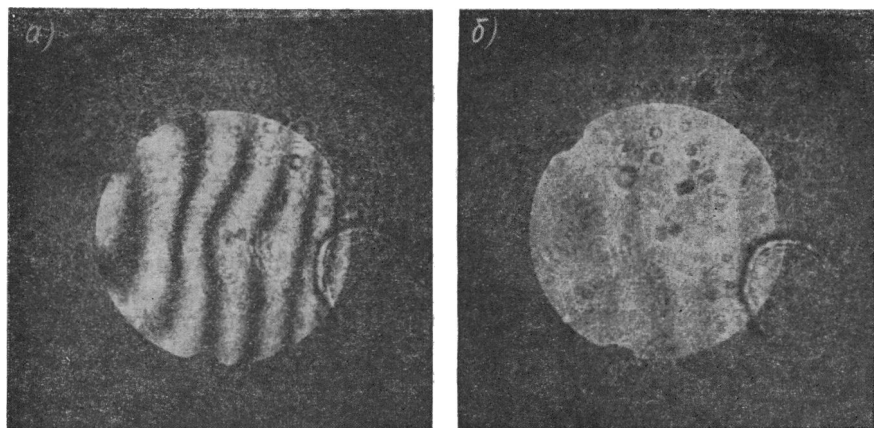


Рис. 9.15. Фоторегистрация интерферограммы при значительных вибрациях в схеме контроля: *а* — удачный снимок; *б* — неудачный

Предложен [34] способ проведения интерференционных исследований оптических деталей и систем с использованием в интерференционной схеме контроля в качестве приемной и регистрирующей части телевизионной установки, включающей в себя телевизионную камеру, видеоконтрольное устройство (ВКУ) и видеомagneтофон. При настройке интерферометра увеличенное изображение интерференционной картины контролируется по экрану ВКУ, что намного удобнее и оперативнее, чем непосредственный контроль через интерферометр. В поле зрения измерителя при этом наряду с изображением интерференционной картины находятся маховички управления интерферометром и вся установка. Наблюдение интерференционной картины исследуемой детали или системы на экране ВКУ создает дополнительные возможности групповой экспертной оценки качества поверхности.

Достоинством телевизионного интерферометра является также возможность регулировки контраста интерференционной картины на экране ВКУ. В целях увеличения точности расшифровки координат интерференционных полос контраст интерференционной картины

может быть повышен настолько, что края каждой полосы приобретают совершенно четкие контуры.

Включение видеомагнитофона в схему телевизионной интерференционной установки позволяет во многих случаях решить проблему устранения влияния вибрации при контроле. Компенсация вибрации ранее затруднялась ее сложным, нерегулярным характером. При наблюдении в микроскоп изображения точечного источника, сформированного в интерференционной оптической схеме, его перемещения представляются хаотичными, причем амплитуда колебаний непрерывно меняется. Это усложняет использование тех способов «остановки» вибрирующего изображения, которые основаны на стробоскопическом эффекте, например, модуляции светового потока обтюратором или применении стробоскопических ламп.

Представлялось перспективным применение киносъемки, позволяющей получить серию многочисленных кадров интерференционной картины, каждый из которых регистрируется с достаточно короткой выдержкой, так что после фотографической обработки негатива возникает возможность широкого выбора кадра, содержащего изображение интерференционной картины, оптимальное по качеству. Дальнейший анализ, однако, выявил существенные недостатки метода киносъемки. Это, во-первых, необходимость достаточно длительного процесса проявления киноплёнки. Кроме того, сама киносъёмочная камера при своей работе создает вибрации, т. е. возникает дополнительная проблема виброизоляции кинокамеры от основания интерферометра и всей контрольной установки.

Для решения поставленной задачи была выбрана телевизионная установка, связанная с видеомагнитофоном, позволяющим демонстрировать не только картину процесса в движении, но и отдельные остановленные кадры. Для ее реализации использован телевизионный комплекс ВМ-ЛОМО. Схема установки показана на рис. 9.16. Установка состоит из интерферометра 4, передающей телевизионной камеры 3 типа «Взор», которая воспринимает изображение интерференционной картины, а также из телевизионного приемника «Юность-603», используемого в качестве видеоконтрольного устройства 2, и видеомагнитофона 1 типа ВК $1\frac{1}{2}$. Лабораторные и цеховые испытания разработанной установки показали, что она обеспечивает получение и качественный анализ четкой интерферограммы в реально существующих производственных условиях, когда непосредственное изучение интерференционной картины из-за вибраций невозможно, а фотографирование затруднено вследствие недостатка света и при значительной трудоемкости не дает надежных результатов.

Визуальная оценка интерферограмм, применяемая наиболее широко при контроле оптических систем интерференционным методом, позволяет определить величину и положение зональных и местных деформаций волнового фронта и оптических поверхностей, а также астигматизм. Однако для наиболее полной реализации возможностей этого метода, повышения точности и оперативности измерений волновых аберраций и качества поверхностей, учета их влияния на качество изображения, создания предпосылок автоматизации контроля

необходим ввод информации, полученной при интерференционных измерениях, в ЭВМ для математической обработки.

Для этого информация, которая содержится в интерферограмме, приводится к дискретной, цифровой форме. Цифровая расшифровка осуществляется путем измерения координат точек интерференционных полос. Один из простейших, ручных способов расшифровки интерференционной картины состоит в определении координат полос интерферограммы на измерительном микроскопе (например, типа

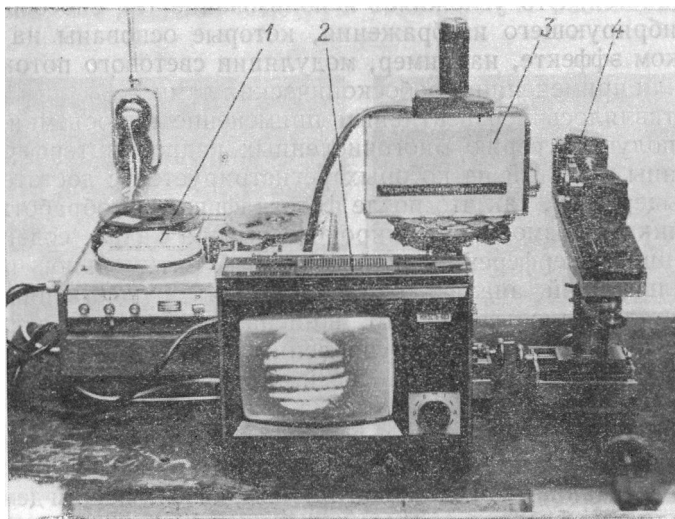


Рис. 9.16. Неравноплечий лазерный интерферометр с телевизионной установкой

ИЗА-2, УИМ-21 и т. д.). При расшифровке кольцевых интерферограмм измеряют расстояния от оси вращения измерительного столика до точек пересечения колец с радиусами, расположенными под равными углами, заданными исходя из условия учета всех особенностей контролируемой волновой поверхности. Считывание координат положения интерференционных полос производится по точкам. Естественно, что эта работа отличается высокой напряженностью и трудоемкостью при невысокой точности.

Известны методики автоматизации расшифровки, использующие микрофотометры с электронным или электромеханическим сканированием, обеспечивающие точность измерения смещений интерференционных полос около 10 % без автоматизации ввода данных в ЭВМ.

Автоматизированная телевизионная система для обработки сложных интерферограмм рассмотрена в работе [39]. Устройство имеет в качестве приемника изображения и сканирующего узла телевизионную передающую трубку, позволяющую повысить скорость счи-

тывания изображения в три раза по сравнению с другими сканато-рами. Информация, содержащаяся в видеосигнале, вводится в БЭСМ-4 для дальнейшей обработки по программе автоматизированной расшифровки интерферограмм. В процессе ввода производится устранение избыточности информации, для чего установлены только две градации освещенности, подлежащие вводу: уровень белого — 1 и уровень черного — 0. Это оказывается достаточным и не снижает точности обработки интерферограммы при установке интерферометра на полосы конечной ширины.

В целях исключения сложных операций опознавания порядка интерференции и нумерации полос разработан двухволновый метод, согласно которому измерения проводятся на двух различных, но близких длинах волн.

Методика обработки интерферограммы состоит в том, что поле интерферограммы на экране телевизионной трубки разбивается на m строк по вертикали и n столбцов по горизонтали. Каждой точке изображения соответствует во времени импульс напряжения с амплитудой, пропорциональной амплитуде видеосигнала. На блоке считывания i -х импульсов всех строк за время прохождения одного кадра производится преобразование видеосигнала в форму, удобную для ввода в ЭВМ. Считывание всего изображения производится за n кадров. Середина интерференционной полосы определяется программой ЭВМ.

Создание устройств автоматизации обработки изображений и ввода данных измерений в ЭВМ для дальнейшей обработки и получения результата контроля замыкает цепочку устройств, составляющих информационную автоматизированную оптико-измерительную систему контроля оптики.

ПРИЛОЖЕНИЕ *

Материалы	C ₂	φCaF ₂	φOφ4	φTφII	a	b	d	P min	ρ min	W%	a/e
CaF ₂ Oφ4 TφII					2,365	-8,712	10,589	2,567	1,841	0,153	0,835
					2,408	-9,006	11,082	2,662	1,869	0,141	0,829
					2,451	-9,184	11,063	2,461	1,873	0,121	0,823
					2,494	-9,246	10,390	1,821	1,853	0,092	0,817
					2,537	-9,193	8,921	0,594	1,811	0,053	0,811
CaF ₂ TφII Oφ4					2,365	-8,684	10,484	2,514	1,835	0,151	0,835
					2,408	-8,992	11,022	2,630	1,866	0,140	0,829
					2,451	-9,180	11,043	2,449	1,872	0,120	0,823
					2,494	-9,247	10,394	1,823	1,853	0,092	0,817
					2,537	-9,194	8,926	0,597	1,811	0,053	0,811
Oφ4 CaF ₂ TφII	0,00050 0,00040 0,00030 0,00020 0,00010	0,8523 1,0841 1,3159 1,5477 1,7795	1,5737 1,0062 0,4388 -0,1286 -0,6961	-1,4261 -1,0904 -0,7547 -0,4191 -0,0834	2,365	-5,403	-3,177	-6,263	1,142	-0,011	0,835
					2,408	-6,315	1,073	-3,065	1,310	0,001	0,829
					2,451	-7,750	6,394	0,253	1,582	0,044	0,823
					2,494	-9,738	11,783	2,280	1,951	0,119	0,817
					2,537	-12,249	16,240	1,456	2,413	0,228	0,811
Oφ4 TφII CaF ₂					2,365	-8,387	9,919	2,485	1,772	0,137	0,835
					2,408	-9,217	11,470	2,653	1,913	0,151	0,829
					2,451	-10,198	13,162	2,557	2,079	0,175	0,823
					2,494	-11,330	14,919	2,054	2,270	0,207	0,817
					2,537	-12,614	16,663	0,987	2,485	0,249	0,811
TφII CaF ₂ Oφ4					2,365	-11,667	8,746	-5,639	2,465	0,300	0,835
					2,408	-11,894	12,194	-2,488	2,469	0,290	0,829
					2,451	-11,618	14,431	0,666	2,369	0,251	0,823
					2,494	-10,839	14,177	2,401	2,172	0,180	0,817
					2,537	-9,558	10,151	1,149	1,883	0,074	0,811
TφII Oφ4 CaF ₂					2,365	-8,358	9,912	2,529	1,766	0,135	0,835
					2,408	-9,203	11,472	2,682	1,910	0,150	0,829
					2,451	-10,193	13,165	2,568	2,078	0,174	0,823
					2,494	-11,331	14,919	2,052	2,271	0,207	0,817
					2,537	-12,614	16,662	0,984	2,485	0,249	0,811

Материалы	C_2	φCaF_2	$\varphi O\Phi 4$	$\varphi T\Phi 12$	a	b	d	P_{min}	ρ_{min}	W_0	a/e^2
CaF ₂ OΦ4 TΦ12					2,424	—8,756	9,638	1,733	1,805	0,110	0,826
					2,453	—9,161	10,854	2,305	1,866	0,113	0,822
					2,482	—9,375	11,294	2,445	1,887	0,106	0,818
					2,511	—9,399	10,758	1,966	1,870	0,086	0,814
					2,540	—9,233	9,047	0,659	1,816	0,053	0,810
CaF ₂ TΦ12 OΦ4					2,424	—9,448	12,074	2,871	1,948	0,168	0,826
					2,453	—9,473	12,143	3,000	1,930	0,140	0,822
					2,482	—9,441	11,609	2,633	1,901	0,112	0,818
					2,501	—9,353	10,513	1,807	1,861	0,082	0,814
					2,540	—9,207	8,895	0,553	1,811	0,050	0,810
OΦ4 CaF ₂ TΦ12					2,424	—6,705	3,010	—1,625	1,382	0,002	0,826
					2,453	—7,517	5,910	0,152	1,531	0,025	0,822
					0,482	—8,735	9,513	1,829	1,759	0,071	0,818
	0,00050	0,7319	1,1358	—0,8677	2,511	—10,359	13,220	2,539	2,062	0,139	0,814
	0,00040	0,9920	0,6714	—0,6635	2,540	—12,389	16,434	1,332	2,437	0,233	0,810
OΦ4 TΦ12 CaF ₂	0,00030	1,2522	0,2070	—0,4592	2,424	—8,690	10,570	2,784	1,791	0,125	0,826
	0,00020	1,5123	—0,2573	—0,2550	2,453	—9,574	12,368	3,029	1,950	0,155	0,822
	0,00010	1,7725	—0,7217	—0,0507	2,482	—10,532	13,952	2,783	2,120	0,186	0,818
					2,511	—11,564	15,391	2,080	2,301	0,218	0,814
					2,540	—12,670	16,752	0,957	2,493	0,252	0,810
TΦ12 CaF ₂ OΦ4					2,424	—11,432	12,427	—1,047	2,357	0,291	0,826
					2,453	—11,530	14,186	0,642	2,349	0,270	0,822
					2,482	—11,538	14,860	2,142	2,263	0,227	0,818
					2,511	—10,558	13,676	2,581	2,101	0,160	0,814
					2,540	—9,888	9,861	1,003	1,867	0,069	0,810
TΦ12 OΦ4 CaF ₂					2,424	—9,381	10,954	1,880	1,934	0,183	0,826
					2,453	—9,887	12,400	2,441	2,014	0,182	0,822
					2,482	—10,599	13,929	2,617	2,134	0,192	0,818
					2,511	—11,518	15,428	2,223	2,292	0,214	0,814
					2,540	—12,644	16,784	1,053	2,488	0,250	0,810

Материалы	C_2	ΦCaF_2	$\Phi O\Phi 4$	$\Phi \Phi 9$	a	b	d	P_{min}	ρ_{min}	W_0	a/e^2
CaF ₂ OΦ4 Φ9					2,328	-8,982	13,175	4,512	1,928	0,196	0,840
					2,380	-9,083	12,292	3,627	1,907	0,168	0,833
					2,431	-9,147	11,382	2,780	1,880	0,135	0,825
					2,483	-9,176	10,287	1,810	1,847	0,097	0,818
					2,535	-9,169	8,846	0,553	1,808	0,054	0,811
CaF ₂ Φ9 OΦ4					2,328	-7,955	9,337	2,542	1,708	0,129	0,840
					2,380	-8,560	10,060	2,365	1,798	0,133	0,833
					2,431	-8,967	10,517	2,251	1,843	0,122	0,825
					2,483	-9,177	10,290	1,813	1,847	0,097	0,818
					2,535	-9,189	8,965	0,637	1,812	0,055	0,811
OΦ4 CaF ₂ Φ9					2,328	-4,409	-9,582	-11,670	0,946	-0,024	0,840
					2,380	-5,337	-3,975	-6,967	1,121	-0,021	0,833
					2,431	-6,932	3,164	1,775	1,425	0,018	0,825
					2,483	-9,194	10,342	1,833	1,851	0,098	0,818
					2,535	-12,123	16,063	1,569	2,391	0,222	0,811
OΦ4 Φ9 CaF ₂					2,328	-8,357	0,093	2,594	1,794	0,155	0,840
					2,380	-9,050	11,015	2,412	1,901	0,156	0,833
					2,431	-9,983	12,593	2,348	2,052	0,171	0,825
					2,483	-11,155	14,547	2,020	2,245	0,201	0,818
					2,535	-12,567	16,593	1,019	2,478	0,246	0,811
Φ9 CaF ₂ OΦ4					2,328	-11,903	4,208	-11,002	2,555	0,309	0,840
					2,380	-12,272	9,516	-6,302	2,577	0,311	0,833
					2,431	-12,017	13,586	-1,260	2,470	0,275	0,825
					2,483	-11,138	14,524	2,036	2,242	0,200	0,818
					2,535	-9,633	10,435	1,283	1,899	0,080	0,811
Φ9 OΦ4 CaF ₂					2,328	-7,330	10,066	4,298	1,573	0,089	0,840
					2,380	-8,527	11,171	3,534	1,791	0,121	0,833
					2,431	-9,802	12,705	2,827	2,015	0,158	0,825
					2,483	-11,156	14,546	2,018	2,245	0,201	0,818
					2,535	-12,588	16,569	0,943	2,482	0,248	0,811

Материалы	C_2	φ_{CaF_2}	$\varphi_{O\Phi_4}$	φ_{TK21}	α	b	d	P_{min}	ρ_{min}	W_0	a/ε^2
CaF_2 $O\Phi_4$ $TK21$					3,772 3,484 3,196 2,907 2,619	44,209 22,578 6,529 3,934 -8,815	-1 166,561 -587,738 -237,933 -59,895 3,704	-1 296,079 -626,314 -241,267 -61,226 -3,711	-5,859 -3,239 -1,021 0,276 1,682	-7,427 -4,223 -2,118 -0,754 -0,045	0,662 0,693 0,726 0,761 0,799
CaF_2 $TK21$ $O\Phi_4$					3,772 3,484 3,196 2,907 2,619	29,974 14,396 2,736 -5,002 -8,821	-870,360 -445,989 -185,441 -48,842 3,744	-929,902 -660,860 -184,027 -50,993 -3,682	-3,072 -2,065 -0,428 0,860 1,683	-5,562 -3,368 -1,747 -0,658 -0,045	0,662 0,693 0,726 0,761 0,799
$O\Phi_4$ CaF_2 $TK21$	0,00050 0,00040 0,00030 0,00020 0,00010	7,9639 6,5218 5,0795 3,6374 2,1952	15,2874 11,4919 7,6961 3,9006 0,1052	-22,2513 -17,0137 -11,7757 -6,5380 -1,3004	3,772 3,484 3,196 2,907 2,619	344,552 207,469 102,968 31,066 -8,245	-13 117,492 -6 312,453 -2 372,491 -525,605 1,153	-20 984,648 -9 402,816 -3 201,824 -608,581 -5,334	-45,665 -29,771 -16,108 -5,341 1,573	-33,959 -19,727 -9,581 -3,192 -0,079	0,662 0,693 0,726 0,761 0,799
$O\Phi_4$ $TK21$ CaF_2					3,772 3,484 3,196 2,907 2,619	99,724 -70,717 -46,993 -28,556 -15,403	-247,848 -87,837 -5,611 22,403 19,758	-906,886 -446,655 -178,349 -47,702 -5,883	13,217 10,147 7,351 4,910 2,939	5,930 3,725 2,090 0,986 0,354	0,662 0,693 0,726 0,761 0,799
$TK21$ CaF_2 $O\Phi_4$					3,772 3,484 3,196 2,907 2,619	414 303 -263 791 -147 225 -64 624 -15,978	-9 423,191 -4 328,410 -1 467,354 -236,102 19,967	-20 848,046 -9 321,179 -3 162,806 -595,156 -4,397	54,010 37,853 23,032 11,111 3,049	34,327 20,084 9,925 3,520 0,388	0,662 0,693 0,726 0,761 0,799
$TK21$ $O\Phi_4$ CaF_2					3,772 3,484 3,196 2,907 2,619	-113 959 -78,899 -50,785 -29,623 -15,409	-406,149 -160,024 -30,353 17,893 19,747	-1 262,760 -606,675 -232,096 -57,551 -2,911	15,703 11,322 7,044 5,093 2,040	7,495 4,579 2,462 1,082 0,354	0,662 0,693 0,726 0,761 0,799

Материалы	C_2	φCaF_2	$\varphi CTK9$	$\varphi T\Phi 4$	a	b	d	P_{min}	ρ_{min}	W_0	a/e^2
CaF ₂ CTK9 TΦ4					2,255	-7,622	8,281	1,842	1,689	0,158	0,851
					2,344	-8,535	10,206	2,437	1,820	0,157	0,838
					2,432	-9,135	11,210	2,633	1,877	0,131	0,825
					2,520	-9,421	10,658	1,854	1,868	0,079	0,813
					2,608	-9,395	7,918	-0,540	1,800	-0,004	0,801
CaF ₂ TΦ4 CTK9					2,255	-7,602	8,229	1,823	1,685	0,157	0,851
					2,344	-8,525	10,172	2,420	1,818	0,156	0,838
					2,432	-9,132	11,196	2,625	1,877	0,131	0,825
					2,520	-9,422	10,661	1,856	1,868	0,079	0,813
					2,608	-9,396	7,926	-0,534	1,800	-0,004	0,801
CTK9 CaF ₂ TΦ4					2,255	-5,569	1,673	-1,763	1,234	0,053	0,851
					2,344	-6,189	3,011	-1,073	1,320	0,027	0,838
					2,432	-7,695	7,013	0,926	1,581	0,046	0,825
					2,520	-10,089	12,503	2,408	2,001	0,121	0,813
					2,608	-13,368	18,305	1,179	2,562	0,258	0,801
CTK9 TΦ4 CaF ₂					2,255	-6,887	7,007	1,750	1,526	0,121	0,851
					2,344	-8,055	9,289	2,368	1,718	0,130	0,838
					2,432	-9,661	12,281	2,688	1,985	0,162	0,825
					2,520	-11,703	15,728	2,143	2,321	0,222	0,813
					2,608	-14,183	19,375	0,099	2,718	0,312	0,801
TΦ4 CaF ₂ CTK9					2,255	-8,921	7,398	-1,421	1,977	0,224	0,851
					2,344	-10,392	10,908	-0,609	2,216	0,259	0,838
					2,432	-11,097	13,986	1,328	2,281	0,247	0,825
					2,520	-11,037	14,609	2,527	2,189	0,180	0,813
					2,608	-10,211	10,751	0,760	1,956	0,049	0,801
TΦ4 CTK9 CaF ₂					2,255	-6,867	6,990	1,763	1,522	0,119	0,851
					2,344	-8,046	9,286	2,382	1,716	0,129	0,838
					2,432	-9,658	12,282	2,694	1,985	0,162	0,825
					2,520	-11,704	15,728	2,140	2,140	0,222	0,813
					2,608	-14,184	19,373	0,094	2,718	0,312	0,801

Материалы	C_2	φ_{CaF_2}	φ_{CTK9}	$\varphi_{T\Phi 11}$	a	b	d	P_{min}	ρ_{min}	W_0	a/ε^2
CaF ₂ CTK9 TΦ11					2,217	-8,011	10,444	3,207	1,806	0,206	0,856
					2,313	-8,632	11,251	3,198	1,865	0,186	0,842
					2,410	-9,054	11,331	2,828	1,878	0,146	0,829
					2,506	-9,275	10,231	1,651	1,850	0,083	0,815
					2,603	-9,296	7,497	-0,802	1,785	-0,005	0,802
CaF ₂ TΦ11 CTK9					2,217	-6,975	7,417	1,929	1,573	0,132	0,856
					2,313	-8,111	9,295	2,185	1,753	0,146	0,842
					2,410	-8,888	10,572	2,376	1,843	0,132	0,829
					2,506	-9,305	10,396	1,759	1,856	0,085	0,815
					2,603	-9,363	7,918	-0,502	1,798	0,000	0,802
CTK9 CaF ₂ TΦ11					2,217	-5,149	0,142	-2,847	1,161	0,065	0,856
					2,313	-5,821	1,782	-1,878	1,258	0,034	0,842
					2,410	-7,399	6,144	0,464	1,535	0,049	0,829
					2,506	-9,885	12,003	2,256	1,971	0,121	0,815
					2,603	-13,278	18,131	1,197	2,550	0,257	0,802
CTK9 TΦ11 CaF ₂					2,217	-6,937	7,373	1,947	1,564	0,141	0,856
					2,313	-7,982	9,049	2,165	1,725	0,136	0,842
					2,410	-9,525	11,841	2,430	1,976	0,159	0,829
					2,506	-11,566	15,361	2,018	2,307	0,214	0,815
					2,603	-14,106	19,219	0,109	2,709	0,307	0,802
TΦ11 CaF ₂ CTK9					2,217	-8,763	6,099	-2,559	1,976	0,209	0,856
					2,313	-10,272	9,954	-1,449	2,220	0,249	0,842
					2,410	-11,014	13,434	0,851	2,284	0,242	0,829
					2,506	-10,986	14,411	2,372	2,191	0,179	0,815
					2,603	-10,191	10,756	0,782	1,957	0,050	0,802
TΦ11 CTK9 CaF ₂					2,217	-5,901	6,859	2,931	1,330	0,068	0,856
					2,313	-7,461	9,036	3,020	1,612	0,097	0,842
					2,410	-9,359	11,915	2,828	1,941	0,146	0,829
					2,506	-11,597	15,333	1,919	2,313	0,217	0,815
					2,603	-14,173	19,125	-0,166	2,722	0,312	0,802

Материалы	C ₂	ΦCaF ₂	ΦCTK9	ΦTΦ12	a	b	d	P _{min}	ρ _{min}	W _*	a/e ²
CaF ₂ CTK9 TΦ12					2,306 2,383 2,461 2,538 2,616	-8,013 -8,789 -9,281 -9,489 -9,412	8,865 10,575 11,311 10,552 7,778	1,904 2,473 2,561 1,685 -0,687	1,737 1,843 1,885 1,868 1,798	0,149 0,144 0,118 0,067 -0,010	0,843 0,832 0,821 0,810 0,800
CaF ₂ TΦ12 CTK9					2,306 2,383 2,461 2,538 2,616	-8,185 -8,869 -9,299 -9,475 -9,396	9,383 10,883 11,395 10,474 7,676	2,119 2,632 2,611 1,633 -0,760	1,774 1,860 1,889 1,866 1,795	0,164 0,152 0,120 0,066 -0,012	0,843 0,832 0,821 0,810 0,800
CTK9 CaF ₂ TΦ12	0,00050 0,00040 0,00030 0,00020 0,00010	0,5561 0,8881 1,2202 1,5522 1,8842	1,2134 0,7172 0,2211 -0,2749 -0,7711	-0,7695 -0,6054 -0,4413 -0,2772 -0,1131	2,306 2,383 2,461 2,538 2,616	-6,018 -6,906 -8,484 -10,751 -13,707	3,047 5,247 9,123 13,903 18,815	-0,878 0,244 1,812 2,522 0,860	1,304 1,448 1,723 2,117 2,619	0,042 0,037 0,070 0,147 0,274	0,843 0,832 0,821 0,810 0,800
CTK9 TΦ12 CaF ₂					2,306 2,383 2,461 2,538 2,616	-7,355 -8,586 -10,166 -12,095 -14,374	7,891 10,336 13,223 16,382 19,648	2,026 2,604 2,724 1,976 -0,093	1,594 1,801 2,065 2,382 2,746	0,118 0,138 0,176 0,237 0,321	0,843 0,832 0,821 0,810 0,800
TΦ12 CaF ₂ CTK9					2,306 2,383 2,461 2,538 2,616	-9,523 -10,550 -10,982 -10,819 -10,062	9,348 12,349 14,376 14,065 10,054	-0,482 0,676 2,125 2,537 0,378	2,064 2,212 2,230 2,130 1,923	0,240 0,253 0,226 0,155 0,033	0,843 0,832 0,821 0,810 0,800
TΦ12 CTK9 CaF ₂					2,306 2,383 2,461 2,538 2,616	-7,528 -8,666 -10,184 -12,081 -14,357	8,016 10,352 13,217 16,395 19,671	1,872 2,474 2,681 2,021 -0,026	1,632 1,817 2,068 2,379 2,743	0,133 0,145 0,178 0,235 0,319	0,843 0,832 0,821 0,810 0,800

Материалы	C ₂	ΦCaF ₂	ЛФ9	ΦСТК19	a	b	d	P _{min}	ρ _{min}	W ₀	a/e ²
CaF ₂ ЛФ9 СТК19					2,060	-3,785	5,742	4,024	0,918	0,033	0,879
					2,191	-6,189	6,259	1,919	1,411	0,101	0,860
					2,322	-7,913	8,452	1,710	1,703	0,132	0,841
					2,453	-8,959	9,900	1,720	1,825	0,108	0,822
					2,584	-9,326	8,261	-0,132	1,804	0,018	0,804
CaF ₂ СТК19 ЛФ9					2,060	-9,307	21,027	10,575	2,258	0,340	0,879
					2,191	-9,175	17,148	7,544	2,093	0,289	0,860
					2,322	-9,101	13,792	4,876	1,959	0,214	0,841
					2,453	-9,085	10,574	2,163	1,851	0,118	0,822
					2,584	-9,128	7,048	-1,011	1,765	0,002	0,804
ЛФ9 CaF ₂ СТК19					2,060	-6,479	-0,181	-5,275	1,572	0,112	0,879
					2,191	-9,303	3,668	-6,223	2,122	0,215	0,860
				2,4425	2,322	-10,905	9,979	-2,821	2,347	0,260	0,841
	0,00050	0,6631	-2,1056	1,6801	2,453	-11,287	14,250	1,269	2,300	0,282	0,822
	0,00040	0,9750	-1,6562	0,9177	2,584	-10,447	11,898	1,341	2,021	0,028	0,804
ЛФ9 СТК19 CaF ₂					2,060	-1,680	10,019	9,726	0,407	-0,083	0,879
					2,191	-4,449	9,187	6,929	1,015	-0,017	0,860
					2,322	-7,405	10,490	4,587	1,594	0,069	0,841
					2,453	-10,550	13,624	2,282	2,150	0,177	0,822
					2,584	-13,884	18,236	-0,409	2,685	0,303	0,804
СТК19 CaF ₂ ЛФ9					2,060	-4,509	-2,243	-5,209	1,094	0,145	0,879
					2,191	-4,321	-4,402	-6,542	0,985	0,056	0,860
					2,322	-5,601	0,081	-3,295	1,205	0,023	0,841
					2,453	-8,349	8,076	0,973	1,701	0,074	0,822
					2,584	-12,565	16,999	1,638	2,430	0,227	0,804
СТК19 ЛФ9 CaF ₂					2,060	-7,202	10,698	4,404	1,747	0,223	0,879
					2,191	-7,435	8,361	2,055	1,696	0,169	0,860
					2,322	-8,593	9,698	1,750	1,849	0,152	0,841
					2,453	-10,676	13,491	1,877	2,175	0,187	0,822
					2,584	-13,685	18,523	0,406	2,647	0,587	0,804

Материалы	C_2	ψCaF_2	$\psi O\Phi 4$	$\psi CTK19$	a	b	d	P_{min}	ρ_{min}	W_0	α/ϵ^2
CaF ₂ OΦ4 CTK19					1,303	31,605	344,439	159,915	-12,119	0,345	0,982
					1,596	15,385	134,762	97,702	-4,817	-0,376	0,947
					1,889	3,244	36,525	35,132	-0,858	-0,266	0,905
					2,182	-4,819	8,302	5,642	1,103	0,004	0,861
					2,475	-8,804	8,692	0,863	1,778	0,079	0,819
CaF ₂ CTK19 OΦ4					1,303	-22,195	245,746	151,287	8,511	-0,069	0,982
					1,596	-16,949	135,496	90,518	5,307	0,511	0,947
					1,889	-13,044	67,143	44,630	3,451	0,576	0,905
					2,182	-10,481	29,458	16,876	2,401	0,397	0,861
					2,475	-9,258	11,227	5,571	1,869	0,117	0,819
OΦ4 CaF ₂ CTK19					1,303	54,124	714,862	153,195	-20,754	1,152	0,982
					1,596	21,223	205,050	134,528	-6,645	-0,371	0,947
					1,889	-1,139	3,079	2,907	0,301	-0,163	0,905
					2,182	-12,969	-47,932	-32,198	2,971	0,338	0,861
					2,475	-14,265	15,197	5,353	2,881	0,378	0,819
OΦ4 CTK19 CaF ₂					1,303	21,199	237,936	151,790	-8,129	0,186	0,982
					1,596	12,920	114,983	88,847	-4,045	-0,324	0,947
					1,889	4,789	45,830	42,796	-1,267	-0,341	0,905
					2,182	-3,195	16,998	15,828	0,732	-0,126	0,861
					2,475	-11,035	14,995	2,697	2,228	0,180	0,819
CTK19 CaF ₂ OΦ4					1,303	-55,121	731,344	148,791	21,137	-1,042	0,982
					1,596	-25,252	236,225	136,386	7,907	0,557	0,947
					1,889	-7,115	10,732	4,033	0,399	0,399	0,905
					2,182	-0,707	-37,955	-38,012	0,162	-0,067	0,861
					2,475	-6,027	-2,600	-6,270	1,217	-0,080	0,819
CTK19 OΦ4 CaF ₂					1,303	-32,603	355,563	151,761	12,502	-0,229	0,982
					1,596	-19,414	158,593	98,581	6,079	0,563	0,947
					1,889	-11,500	54,164	36,667	3,042	0,501	0,905
					2,182	-8,857	15,155	6,167	2,029	0,266	0,861
					2,475	-11,488	14,468	1,139	2,320	0,218	0,819

Материалы	C ₂	ΦCaF ₂	ΦΦ1	ΦTK17	a	b	d	P _{min}	ρ _{min}	W ₀	a/ε ²
CaF ₂ Φ1 TK17					2,174 2,272 2,369 2,467 2,565	-5,561 -7,473 -8,671 -9,154 -8,923	5,910 8,156 10,434 10,559 6,345	2,354 2,011 2,503 2,070 -1,413	1,278 1,644 1,829 1,854 1,739	0,105 0,143 0,147 0,108 0,015	0,863 0,848 0,834 0,820 0,807
					2,174 2,272 2,369 2,467 2,565	-6,170 -7,811 -8,812 -9,173 -8,894	6,594 8,987 10,971 10,658 6,157	2,217 2,272 2,779 2,133 -1,551	1,418 1,719 1,834 1,858 1,733	0,139 0,163 0,156 0,109 0,013	0,863 0,848 0,834 0,820 0,807
					2,174 2,272 2,369 2,467 2,565	-4,765 -8,602 -10,853 -11,518 -10,597	8,518 6,347 10,592 14,687 12,069	5,907 -1,794 -1,833 1,247 1,126	1,095 1,893 2,289 2,333 2,065	0,075 0,191 0,251 0,230 0,108	0,863 0,848 0,834 0,820 0,807
					2,174 2,272 2,369 2,467 2,565	-6,169 -6,882 -8,399 -10,718 -13,840	6,575 7,390 10,170 13,927 17,670	2,198 2,177 2,729 2,290 -0,994	1,418 1,514 0,132 2,171 2,697	0,130 0,116 0,132 0,187 0,291	0,863 0,848 0,834 0,820 0,807
					2,174 2,272 2,369 2,467 2,565	-7,574 -6,092 -6,358 -8,373 -12,137	12,741 2,082 2,004 8,025 15,658	6,144 -2,001 -2,260 0,921 1,303	1,741 1,340 1,341 1,696 2,365	0,194 0,088 0,037 0,067 0,196	0,863 0,848 0,834 0,820 0,807
TK17 CaF ₂ Φ1					2,174 2,272 2,369 2,467 2,565	-6,778 -7,221 -8,540 -10,737 -13,811	7,754 7,734 10,185 13,911 17,720	2,470 1,997 2,490 2,232 -0,865	1,558 1,589 2,175 2,691	0,164 0,136 0,141 0,189 0,289	0,863 0,848 0,834 0,820 0,807
					2,174 2,272 2,369 2,467 2,565	-6,778 -7,221 -8,540 -10,737 -13,811	7,754 7,734 10,185 13,911 17,720	2,470 1,997 2,490 2,232 -0,865	1,558 1,589 2,175 2,691	0,164 0,136 0,141 0,189 0,289	0,863 0,848 0,834 0,820 0,807
					2,174 2,272 2,369 2,467 2,565	-6,778 -7,221 -8,540 -10,737 -13,811	7,754 7,734 10,185 13,911 17,720	2,470 1,997 2,490 2,232 -0,865	1,558 1,589 2,175 2,691	0,164 0,136 0,141 0,189 0,289	0,863 0,848 0,834 0,820 0,807
					2,174 2,272 2,369 2,467 2,565	-6,778 -7,221 -8,540 -10,737 -13,811	7,754 7,734 10,185 13,911 17,720	2,470 1,997 2,490 2,232 -0,865	1,558 1,589 2,175 2,691	0,164 0,136 0,141 0,189 0,289	0,863 0,848 0,834 0,820 0,807
					2,174 2,272 2,369 2,467 2,565	-6,778 -7,221 -8,540 -10,737 -13,811	7,754 7,734 10,185 13,911 17,720	2,470 1,997 2,490 2,232 -0,865	1,558 1,589 2,175 2,691	0,164 0,136 0,141 0,189 0,289	0,863 0,848 0,834 0,820 0,807

Материалы	C ₂	φ_{CaF_2}	$\varphi_{\Phi 1}$	φ_{TK20}	a	b	d	P _{min}	ρ_{min}	W _o	α/e^2
CaF ₂ Φ1 TK20					2,187 2,281 2,375 2,468 2,562	-5,793 -7,602 -8,725 -9,162 -8,912	6,079 8,366 10,551 10,573 6,369	2,243 2,031 2,536 2,072 -1,379	1,324 1,666 1,836 1,855 1,738	0,111 0,145 0,147 0,107 0,017	0,861 0,847 0,834 0,820 0,807
					2,187 2,281 2,375 2,468 2,562	-6,253 -7,854 -8,828 -9,175 -8,895	6,615 8,990 10,940 10,640 6,262	2,145 2,229 2,737 2,115 -1,456	1,429 1,721 1,858 1,858 1,735	0,137 0,160 0,154 0,108 0,016	0,861 0,847 0,834 0,820 0,807
					2,187 2,281 2,375 2,468 2,562	-4,931 -8,887 -11,106 -11,588 -10,334	9,227 5,977 10,380 14,739 11,354	6,448 -2,678 -2,603 1,140 0,936	1,127 1,947 2,338 2,346 2,016	0,078 0,201 0,261 0,233 0,096	0,861 0,847 0,834 0,820 0,807
	0,00050 0,00040 0,00030 0,00020 0,00010	-0,1944 0,3668 0,9282 1,4896 2,0509	-2,0152 -1,5901 -1,1651 -0,7400 -0,3150	3,2097 2,2233 1,2368 0,2504 -0,7359	2,187 2,281 2,375 2,468 2,562	-6,348 -7,035 -8,499 -10,741 -13,761	6,744 7,571 10,303 13,959 17,560	2,138 2,147 2,699 2,276 -0,912	1,451 1,541 1,799 2,175 2,684	0,134 0,119 0,138 0,188 0,288	0,861 0,847 0,834 0,820 0,807
					2,187 2,281 2,375 2,468 2,562	-7,671 -6,002 -6,221 -8,328 -12,322	19,403 1,026 1,005 7,826 15,973	6,677 -2,922 -3,068 0,802 1,160	1,753 1,315 1,309 1,686 2,404	0,197 0,079 0,028 0,064 0,208	0,861 0,847 0,834 0,820 0,807
TK20 CaF ₂ Φ1					2,187 2,281 2,375 2,468 2,562	-6,808 -7,286 -8,602 -10,754 -13,744	7,636 7,828 10,314 13,949 17,589	2,338 2,009 2,525 2,236 -0,840	1,556 1,597 1,810 2,178 2,681	0,159 0,135 0,141 0,189 0,287	0,861 0,847 0,834 0,820 0,807
					2,187 2,281 2,375 2,468 2,562	-6,808 -7,286 -8,602 -10,754 -13,744	7,636 7,828 10,314 13,949 17,589	2,338 2,009 2,525 2,236 -0,840	1,556 1,597 1,810 2,178 2,681	0,159 0,135 0,141 0,189 0,287	0,861 0,847 0,834 0,820 0,807
					2,187 2,281 2,375 2,468 2,562	-6,808 -7,286 -8,602 -10,754 -13,744	7,636 7,828 10,314 13,949 17,589	2,338 2,009 2,525 2,236 -0,840	1,556 1,597 1,810 2,178 2,681	0,159 0,135 0,141 0,189 0,287	0,861 0,847 0,834 0,820 0,807
					2,187 2,281 2,375 2,468 2,562	-6,808 -7,286 -8,602 -10,754 -13,744	7,636 7,828 10,314 13,949 17,589	2,338 2,009 2,525 2,236 -0,840	1,556 1,597 1,810 2,178 2,681	0,159 0,135 0,141 0,189 0,287	0,861 0,847 0,834 0,820 0,807
					2,187 2,281 2,375 2,468 2,562	-6,808 -7,286 -8,602 -10,754 -13,744	7,636 7,828 10,314 13,949 17,589	2,338 2,009 2,525 2,236 -0,840	1,556 1,597 1,810 2,178 2,681	0,159 0,135 0,141 0,189 0,287	0,861 0,847 0,834 0,820 0,807

Материалы	C_2	φCaF_2	$\varphi \Phi_1$	$\varphi TK21$	a	b	d	P_{min}	ρ_{min}	W_0	a/ε^2
CaF ₂ Φ ₁ TK21					1,992	-0,497	14,052	14,021	0,124	-0,044	0,890
					2,146	-4,862	7,546	4,792	1,132	0,066	0,867
					2,299	-7,717	8,867	2,393	1,677	0,133	0,844
					2,453	-9,062	10,449	2,081	1,846	0,113	0,822
					2,607	-8,897	4,725	-2,865	1,706	-0,028	0,801
CaF ₂ TK21 Φ ₁					1,992	-5,553	14,414	10,545	1,393	0,194	0,890
					2,146	-7,494	12,104	5,560	1,746	0,214	0,867
					2,299	-8,698	12,193	3,960	1,891	0,196	0,844
					2,453	-9,163	10,957	2,402	1,867	0,120	0,822
					2,607	-8,889	4,671	-2,905	1,704	-0,028	0,801
Φ ₁ CaF ₂ TK21					1,992	3,610	40,529	38,893	-0,906	-0,156	0,890
					2,146	-5,454	5,299	1,834	1,270	0,088	0,867
					2,299	-10,577	5,579	-6,583	2,299	0,260	0,844
	0,00050	-0,5672	-3,2897	4,8570	2,453	-11,761	14,494	0,400	2,396	0,250	0,822
	0,00040	0,1087	-2,4730	3,3643	2,607	-9,004	5,167	-2,605	1,726	-0,022	0,801
Φ ₁ TK21 CaF ₂	0,00030	0,7846	-1,6562	1,8715	1,992	-3,296	11,627	10,264	0,827	0,054	0,890
	0,00020	1,4605	-0,8394	0,3788	2,146	-4,537	7,633	5,235	1,057	0,052	0,867
	0,00010	2,1365	-0,0226	-1,1138	2,299	-6,896	8,917	3,748	1,499	0,085	0,844
					2,453	-10,373	13,478	2,513	2,113	0,175	0,822
					2,607	-14,970	19,314	-2,173	2,870	0,336	0,801
TK21 CaF ₂ Φ ₁					1,992	-12,460	59,500	40,019	3,127	0,405	0,890
					2,146	-6,577	7,055	2,014	1,532	0,178	0,867
					2,299	-5,016	-4,323	-7,059	1,090	0,022	0,844
					2,453	-7,775	6,149	-0,011	1,584	0,045	0,822
					2,607	-14,855	19,258	-1,901	2,848	0,330	0,801
TK21 Φ ₁ CaF ₂					1,992	-8,352	23,450	14,695	2,096	0,293	0,890
					2,146	-7,169	11,047	5,059	1,670	0,200	0,867
					2,299	-7,877	9,168	2,423	1,712	0,148	0,844
					2,453	-10,474	13,399	2,220	2,134	0,182	0,822
					2,607	-14,962	19,328	-2,136	2,869	0,336	0,801

Материалы	C ₂	ΦCaF ₂	Φ Φ1	Φ БФ28	a	b	d	P _{min}	ρ _{min}	W ₀	a/e ²
CaF ₂ Φ1 БФ28					2,749	4,099	-215,582	-217,110	-0,745	-1,284	0,782
					2,670	-3,394	-72,690	-73,768	0,635	-0,559	0,792
					2,591	-7,856	-6,806	-12,760	1,515	-0,113	0,803
					2,512	-9,285	10,121	1,543	1,847	0,078	0,814
					2,434	-7,680	6,223	0,164	1,577	0,042	0,825
CaF ₂ БФ28 Φ1					2,749	-27,476	-71,633	-140,288	4,997	1,318	0,782
					2,670	-18,090	-1,520	-32,183	3,388	0,612	0,792
					2,591	-12,045	14,048	0,651	2,323	0,209	0,803
					2,512	-8,763	10,336	1,685	1,855	0,081	0,814
					2,434	-9,936	19,031	8,896	2,040	0,201	0,825
Φ1 CaF ₂ БФ28					2,749	24,390	-561,752	-615,853	-4,436	-2,542	0,782
					2,670	12,970	-277,033	-292,782	-2,428	-1,530	0,792
					2,591	1,915	-84,134	-84,488	-0,369	-0,664	0,803
	0,00050	0,9885	9,3255	-9,3140	2,512	-8,763	8,378	0,737	1,743	0,050	0,814
	0,00040	1,1862	6,2673	-6,4535	2,434	-19,076	-7,837	-45,212	3,918	0,614	0,825
Φ1 БФ28 CaF ₂					2,749	0,891	-144,859	-144,932	-0,162	-1,000	0,782
					2,670	-6,567	-29,972	-34,011	1,229	-0,300	0,792
					2,591	-10,771	11,621	0,429	2,078	0,097	0,803
	0,00030	1,3839	3,2080	-3,5919	2,512	-11,716	15,617	1,960	2,331	0,219	0,814
	0,00020	1,5816	0,1498	-0,7314	2,434	-9,402	17,760	8,680	1,931	0,093	0,825
БФ28 CaF ₂ Φ1					2,749	-50,976	-368,740	-605,046	9,271	2,860	0,782
					2,670	-37,635	-153,428	-286,036	7,046	1,842	0,792
					2,591	-24,733	-22,205	-81,215	4,771	0,971	0,803
					2,512	-12,277	16,133	1,136	2,442	0,250	0,814
					2,434	-0,259	-47,073	-47,080	0,053	-0,319	0,825
БФ28 Φ1 CaF ₂					2,749	-30,684	-125,715	-211,333	5,580	1,603	0,782
					2,670	-21,271	-28,542	-70,903	3,982	0,872	0,792
					2,591	-14,960	9,895	-11,694	2,886	0,420	0,803
					2,512	-11,755	15,580	1,831	2,339	0,222	0,814
					2,434	-11,655	14,538	0,585	2,394	0,252	0,825

Материалы	C_2	φ_{CaF_2}	$\varphi_{O\Phi 4}$	Φ_{CTK19}	a	b	d	P_{min}	ρ_{min}	W_0	a/ϵ^2
CaF_2 $O\Phi 4$ $CTK19$					1,303 1,596 1,889 2,182 2,475	31,605 15,385 3,244 —4,819 —8,804	344,439 134,762 36,525 8,302 8,692	159,915 97,702 35,132 5,642 0,863	—12,119 —4,817 —0,858 1,103 1,778	0,345 —0,376 —0,266 0,004 0,079	0,982 0,947 0,905 0,861 0,819
CaF_2 $CTK19$ $O\Phi 4$					1,303 1,596 1,889 2,182 2,475	—22,195 —16,949 —13,044 —10,481 —9,258	245,746 135,496 67,143 29,458 11,227	151,287 90,518 44,630 16,876 5,571	8,511 5,307 3,451 2,401 1,869	—0,069 0,511 0,576 0,397 0,117	0,982 0,947 0,905 0,861 0,819
$O\Phi 4$ CaF_2 $CTK19$	0,00050 0,00040 0,00030 0,00020 0,00010	—0,9948 —0,3281 0,3385 1,0051 1,6718	—9,1755 —7,2125 —5,2496 —3,2868 —1,3240	11,1703 8,5406 5,9111 3,2816 0,6521	1,303 1,596 1,889 2,182 2,475	54,124 21,223 —1,139 —12,969 —14,265	714,862 205,050 3,079 —47,932 15,197	153,195 134,528 2,907 —32,198 5,353	—20,754 —6,645 0,301 2,971 2,881	1,152 —0,371 —0,163 0,338 0,378	0,982 0,947 0,905 0,861 0,819
$O\Phi 4$ $CTK19$ CaF_2					1,303 1,596 1,889 2,182 2,475	21,199 12,920 4,789 —3,195 —11,035	237,936 114,983 45,830 16,998 14,995	151,790 88,847 42,796 15,828 2,697	—8,129 —4,045 —1,267 0,732 2,228	0,186 —0,324 —0,341 —0,126 0,180	0,982 0,947 0,905 0,861 0,819
$CTK19$ CaF_2 $O\Phi 4$					1,303 1,596 1,889 2,182 2,475	—55,121 —25,252 —7,115 —0,707 —6,027	731,344 236,225 10,732 —37,955 —2,600	148,791 136,386 4,033 —38,012 —6,270	21,137 7,907 1,862 0,182 1,217	—1,042 0,557 0,399 —0,067 —0,080	0,982 0,947 0,905 0,861 0,819
$CTK19$ $O\Phi 4$ CaF_2					1,303 1,596 1,889 2,182 2,475	—32,603 —19,414 —11,500 —8,857 —11,488	355,563 158,593 54,164 15,155 14,468	151,761 98,581 36,667 6,167 1,139	12,502 6,079 3,042 2,029 2,320	—0,229 0,563 0,501 0,266 0,218	0,982 0,947 0,905 0,861 0,819

1. Андреев Л. Н. К методике расчета объективов микроскопа. — ОМП, 1960, № 8, с. 6—14.
2. Андреев Л. Н. Высокоапертурные безиммерсионные планапохроматические объективы. — Труды ГОИ, 1970, т. 37, вып. 167, с. 223—226.
3. Арлиевский А. Г. Исследование рефлексов первого порядка в микрообъективах отраженного света. — ОМП, 1979, № 4, с. 5—7.
4. Афанасьев В. А. Оптические измерения. М.: Высшая школа, 1981. 229 с.
5. Афанасьев В. А., Селезнев В. А. Повышение чувствительности интерференционного метода изменением денситометрических характеристик фотографических слоев. — ЖН и ПФиК, т. 20, вып. 6, 1975, с. 30—37.
6. Белоглазова А. А., Орнис А. Н. Коллимационные и автоколлимационные устройства для контроля центрирования линз. — ОМП, 1972, № 10, с. 57—62.
7. Берек М. Основы практической оптики. М.—Л.: Гостехиздат, 1933. 136 с.
8. Блюмберг И. Б. Технология обработки фотокиноматериалов. М.: Искусство, 1967. 411 с.
9. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
10. Брейдо И. И., Виленская Б. Т. Новый способ получения изофог протяженных объектов фотографическим методом эквиденсит. — ЖН и ПФиК, 1971, № 5, с. 373—375.
11. Волосов Д. С. Методы расчета сложных фотографических систем. М.—Л.: ОГИЗ — Гостехиздат, 1948. 396 с.
12. Волосов Д. С. Фотографическая оптика. М.: Искусство, 1971. 671 с.
13. Грамматин А. П., Агроскин Л. С., Ларина Р. М. Засветка поля в микроскопах отраженного света. — ОМП, 1969, № 3, с. 26—29.
14. Грамматин А. П. Некоторые дифференциальные свойства апланатических поверхностей и использование этих свойств для оценки аберраций высших порядков. — Труды ГОИ, 1970, т. 37, вып. 167, с. 63—82.
15. Грамматин А. П. О возникновении бликов в окулярах микроскопа. — ОМП, 1970, № 6, с. 21—23.
16. Грамматин А. П., Деген А. Б. Оценка технологичности оптических систем. — ОМП, 1973, № 7, с. 70—71.
17. Грамматин А. П., Филонов А. С. Суммирование комы, вызванной децентрировкой. — ОМП, 1981, № 1, с. 15—18.
18. Губель Н. Н. Аберрации децентрированных оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975. 272 с.
19. Духопел И. И., Федина Л. Г. Интерференционные методы и приборы реле контроля правильности формы сферических поверхностей. — ОМП, 1973, № 8, с. 50—58.
20. Захарьевский А. Н. Интерферометры. М.: Оборонгиз, 1952. 296 с.
21. Захарьевский А. Н., Федин А. А. Интерферометр для испытания объективов микроскопов. — ОМП, 1959, № 3, с. 1—4.
22. Зверев В. А., Родионов С. А., Сокольский М. Н. Об оценке влияния местных деформаций волнового фронта на качество оптического изображения. — Оптика и спектроскопия, 1974, т. 36, вып. 4, с. 792—795.
23. Зверев В. А., Кирилловский В. К., Сокольский М. Н. К методике расшифровки результатов изофотометрической съемки изображений точечных объек-

тов. — В кн.: Современная прикладная оптика и оптические приборы. Ч. 2. Л.: ЛИТМО, 1975, с. 62—63.

24. Зверев В. А., Кирилловский В. К., Сокольский М. Н. Применение метода изотометрической регистрации при исследованиях и аттестации главного зеркала БТА. — ОМП, 1976, № 12, с. 6—8.

25. Зверев В. А., Кирилловский В. К., Сокольский М. Н. Погрешность расшифровки гартманогаммы и метод ее снижения. — В кн.: Новая техника в астрономии. Л.: Наука, 1979, вып. 6, с. 98—101.

26. Иванова Т. А. Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Л.: ЛИТМО, 1972. 17 с.

27. Иванова Т. А. Исследование бликов в панкратической системе микроскопов. — ОМП, 1976, № 2, с. 9—12.

28. Иванова Т. А., Кирилловский В. К. Контроль качества микрооптики. — ОМП, 1978, № 3, с. 50—55.

29. Иванова Т. А. Расчет трехлинзовых склеенных компонентов с уменьшенным вторичным спектром. — ОМП, 1979, № 9, с. 12—15.

30. Иванова Т. А. О точности изготовления панкратических систем с оптической компенсацией. — Тр. ЛИТМО. «Оптическое приборостроение», 1980, с. 77—79.

31. Исследование связи распределения энергии в пятне рассеяния с величиной и формой отступления поверхности зеркала от идеальной/В. А. Зверев, С. А. Родионов, М. Н. Сокольский, Л. М. Лапо. — ОМП, 1976, № 11, с. 5—8.

32. Кирилловский В. К. Методы контроля качества изображения оптических систем. Л.: ЛИТМО, 1980. с. 52.

33. Кирилловский В. К. Методы контроля оптики микроскопов. Аналитический обзор, № 2450. М.: ВИНТИ, 1980. 90 с.

34. Кирилловский В. К. Опыт повышения качества контроля оптических систем. Л.: ЛДНТП, 1978. 28 с.

35. Кирилловский В. К. Применение лазеров при контроле и аттестации оптических систем. Л.: ЛДНТП, 1981. 28 с.

36. Кирилловский В. К. Применение телевидения в оптических измерениях. Аналитический обзор, № 2139. М.: ВИНТИ, 1979. 80 с.

37. Кирилловский В. К. Фоторегистрация при контроле и аттестации астрономических зеркал. Аналитический обзор, № 1335. М.: ВИНТИ, 1976. 150 с.

38. Кирилловский В. К., Крынин Л. И. Оценка качества изображения по функции рассеяния линии. — ОМП, 1980, № 6, с. 1—4.

39. Колдакова Е. И., Усков И. Б., Яневич С. А. — Автоматизированная обработка сложных интерферограмм. — ПТЭ, 1976, № 1, с. 59—62.

40. Коломийцев Ю. В. Интерферометры. Л.: Машиностроение, 1976. 296 с.

41. Крепалова Г. В., Пуряев Д. Т. Исследование и контроль оптических систем. М.: Машиностроение, 1978. 224 с.

42. Кривовяз Л. М., Пуряев Д. Т., Знаменская М. А. Практика оптической измерительной лаборатории. М.: Машиностроение, 1974. 333 с.

43. Круг В., Вайде Г. Применение научной фотографии/Пер. с нем. М.: Мир, 1975. 207 с.

44. Миз К. и Джеймс Т. Теория фотографического процесса/Пер. с англ. Л.: Химия, 1973. 573 с.

45. Микроскопы/Г. Е. Скворцов, В. А. Панов, Н. И. Поляков, Л. А. Федин. Л.: Машиностроение, 1969. 511 с.

46. Михель К. Основы теории микроскопа. М.: Гостехтеоретиздат, 1955. 276 с.

47. Нефедов Б. Л. Расчет апохроматов из двух и трех различных стекол. — ОМП, 1973, № 1, с. 52—62.

48. Нефедов Б. Л., Чижиков В. А. Апохромат из двух двухлинзовых склеенных компонентов. — Труды ГОИ, 1970, т. 37, вып. 167, с. 239—247.

49. Нефедов Б. Л., Полухин В. Н. Пути дальнейшего совершенствования апохроматической пары стекол. — ОМП, 1978, № 7, с. 21—23.

50. Оптическая обработка информации/Под ред. Д. Кейсента. Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 155 с.

51. Панов В. А., Андреев Л. Н. Оптика микроскопов. Л.: Машиностроение, 1976. 430 с.

52. Петренко А. И. Автоматический ввод графиков в электронно-вычислительные машины. М.: Энергия, 1968. 423 с.
53. Подводная фотография/Э. В. Бабак, Б. Н. Котлецов, П. Д. Иванов, С. А. Родионов. Л.: Машиностроение, 1969. 176 с.
54. Полтырева Е. С., Голованова Л. Н. Панкратические окуляры. — ОМП, 1974, № 4, с. 48—55.
55. Полякова И. П., Полтырева Е. С. Влияние ошибок изготовления панкратической оборачивающей системы на дефокусировку и изменение линейного увеличения. — ОМП, 1975, № 9, с. 15—18.
56. Престон К. Когерентные оптические вычислительные машины. М.: Мир, 1974. 400 с.
57. Прибор для измерения частотно-контрастных характеристик объективов микроскопа/А. А. Арсеньев, Р. М. Ларина, Г. С. Плагов, О. В. Егорова. — ОМП, 1981, № 1, с. 18—24.
58. Применение средств вычислительной техники при обработке данных изофотометрической фоторегистрации в оптических измерениях/С. А. Родионов, В. Г. Резник, В. К. Кирилловский, А. Б. Вироховский. — В кн.: Новая техника в астрономии. Л.: Наука, 1979, вып. 6, с. 101—105.
59. Ризенберг Х. Развитие идей Аббе в оптике современных микроскопов. — Иенское обозрение: специальный номер, 1964, с. 171—195.
60. Родионов С. А. О теории интерферометрического контроля оптических систем и деталей. — В кн.: Методы аттестационного контроля оптических систем и деталей астроприборов. М.: Дом оптики, 1978, с. 15—23.
61. Розенфельд А. Распознавание и обработка изображений с помощью вычислительных машин. М.: Мир, 1972. 231 с.
62. Ронки В. Испытание оптических систем. М.—Л.: Гостехтеориздат, 1933. 102 с.
63. Рубахин В. Ф. Психологические основы обработки первичной информации. Л.: Наука, 1974. 295 с.
64. Русинов М. М. Техническая оптика. М.—Л.: Машгиз, 1961. 328 с.
65. Русинов М. М. Техническая оптика. Л.: Машиностроение, 1978. 488 с.
66. Скоков И. В. Многолучевые интерферометры. М.: Машиностроение, 1969. 248 с.
67. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. Л.: ОНТИ, 1937. 698 с.
68. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. 670 с.
69. Слюсарев Г. Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975. 639 с.
70. Успенский М. А. Исследование склеенного трехлинзового объектива с наружными линзами из одинакового стекла. — ОМП, 1974, № 12, с. 27—31.
71. Установка для измерения частотно-контрастных характеристик микрообъективов/Л. С. Агроскин, Р. М. Ларина, Н. И. Поляков, Ю. М. Розанов. — ОМП, 1969, № 11, с. 25—29.
72. Федин Л. А., Барский И. Я. Микрофотография. Л.: Наука, 1971.
73. Чеголин М. П., Римский Г. В., Леонович Э. Н. Системы преобразования многоканальной графической информации в электрические сигналы. Минск: Наука и техника, 1969. 312 с.
74. Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов. М.—Л.: Машиностроение, 1966. 563 с.
75. Шпьякин М. Г. Расчет четырехцветных тонких апохроматов. — ОМП, 1978, № 2, с. 15—17.
76. Шульман М. Я. Измерение передаточных функций оптических систем. Л.: Машиностроение, 1980. 208 с.
77. Back F., Lowen H. — Generalized theory of zoomar systems. — JOSA, N 3, 1958, p. 149—153.
78. Benford J., Rosenberger H. Zoom systems in microscopy. — Advances in Optical and Electron Microscopy, London — N. Y., v. 3, 1969, 286 p.
79. Bergstein L. General theory of optically compensated varifocal systems. — JOSA, 1958, N 3, p. 154—171.
80. Bergstein L., Motz L. Four-component optically compensated varifocal systems. JOSA, 1962, N 4, p. 363—388.

81. **Claussen H. C.** Microscope Objectives with planocorrection. — *Applied Optics*, 1964, v. 3, N 9, p. 993—1003.
82. **Dunoyer M.** Avant-projets de véhicules de lunette a grossissement variable. — *Revue D'Optique*, 1924, N 8, p. 353—397.
83. **Hartmann J.** Objektivuntersuchungen. — *Zs. f. Instr. Kunde*, 1904, B. 24, 1, S. 1—21.
84. **Herriott W.** Aphotoelectric Lens Bench. — *JOSA*, 1947, v. 37, p. 472—474.
85. **Lau E., Krug W.** Die Äquidensitometrie. — *Academie-Verlag*, Berlin, 1957. 99 S.
86. **Twiman F.** An Interferometer for Testing Camera Lenses. — *Trans. Opt. Soc.*, 1920—21, 22, N 4, p. 174—193.
87. **Schwarzschild K.** On the Law of Reciprocity for Bromide of Silver Gelatine. — *Astrophis. J.*, 1900, v. 11, p. 89—95.
88. **Seidenberg R. L.** A Series of Flat Field Objectives Microscopes. — *The Microscope*, 1967, v. 15, N 7, p. 90—96.
89. **Jones L. A., Wolf R. N.** A Method for the Measurement of the Energy Distribution in Optical Images. — *JOSA*, 1945, v. 35, p. 559—569.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5

ЧАСТЬ I

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИКИ МИКРОСКОПОВ

Глава I. Основные вопросы проектирования оптических систем микроскопов	7
1. Критерии коррекции объективов микроскопов	—
2. Оптические материалы с особым ходом дисперсии. Возможность исправления вторичного спектра в объективах микроскопов . . .	11
3. Технологичность оптических систем	14
4. Анализ децентрировки в объективах микроскопов	23
Глава II. Базовые элементы объективов микроскопов	26
5. Анализ фронтальных элементов высокоапертурных объективов микроскопов	—
6. Расчет трехлинзовых склеенных компонентов с уменьшенным вторичным спектром	30
7. Оптимизация компонентов с большими компенсирующими аберрациями	38
8. Исследование коррекционных возможностей менисков конечной толщины	42
Глава III. Синтез оптических систем объективов микроскопов	46
9. Объективы для исследований в проходящем свете. Возможности повышения оптических характеристик	—
10. Объективы с плоским полем изображения. Планахроматические объективы с уменьшенным вторичным спектром	51
11. Планахроматические объективы	56
12. Расчет рефлексов в объективах отраженного света	59
13. Оптимизация оптических конструкций объективов с уменьшенной вуалирующей засветкой	62
14. Расчет допусков на изготовление оптических элементов объективов	67
15. Оценка технологичности объективов микроскопов	72
Глава IV. Синтез оптических систем с переменными оптическими характеристиками	73
16. Свойства одиночного подвижного компонента	—
17. Определение гауссовых параметров трехкомпонентной панкратической системы типа «коллектив»	81
18. Определение гауссовых параметров панкратических оборачивающих систем	87
19. Коррекционные возможности панкратических систем симметричного типа	90
20. Синтез двухкомпонентных панкратических систем с механической компенсацией в параксиальной области	99
21. Оптимизация аберраций в панкратических системах с механической компенсацией	106

22. Анализ точности изготовления оптических элементов панкратических систем	108
23. Исследование бликов в панкратических системах микроскопов	113
Глава V. Проектирование оптики микроскопов на основе панкратических систем	117
24. Панкратические осветительные системы	—
25. Панкратические окуляры	123
26. Панкратические фотовизуальные насадки	126

ЧАСТЬ II

КОНТРОЛЬ И АТТЕСТАЦИЯ ОПТИКИ МИКРОСКОПОВ

Глава VI. Задачи контроля и аттестации оптики микроскопов	128
27. Коррекция объективов и задачи контроля	—
28. Требования к повышению объективности, точности и оперативности контроля оптики микроскопов и элементы автоматизации измерений	129
29. Контроль с применением аппаратуры автоматического считывания изображений, научно-прикладной фотографии, телевидения и вычислительной техники	134
Глава VII. Контроль геометрических параметров микрооптики	137
30. Контроль формы поверхностей оптических деталей	—
31. Контроль формы поверхностей бесконтактными методами	140
32. Контроль центрировки	142
33. Контроль поверхностей склеенных компонентов в положении наилучшей установки по виду искажений дифракционного кружка	145
34. Анализ точности центрировки склеенных компонентов микрообъективов. Возможности повышения точности центрировки в положении наилучшей установки	149
Глава VIII. Методы контроля качества изображения	153
35. Экспертный метод	—
36. Количественные методы оценки качества изображения оптики микроскопа	155
37. Исследование структуры пятна рассеяния. Фотоэлектрическое сканирование и фотографическая фотометрия	159
38. Изофотометрическая регистрация	164
39. Телевизионная изофотометрия, методы и аппаратура	173
40. Контроль качества изображения по функциям рассеяния линии и краевой	180
41. Телевизионный метод и аппаратура для контроля качества изображения по функции рассеяния линии	185
42. Контроль уровня рассеянного света	187
Глава IX. Приборы и методы контроля аберраций оптики микроскопов	190
43. Методы измерения волновых аберраций оптики микроскопов. Интерференционный контроль	—
44. Интерферометр с дифрагированной эталонной волной	192
45. Интерферометр с эталонной фронтальной поверхностью	197
46. Интерференционно-растровый метод контроля хроматизма и полевых аберраций микрооптики	198
47. Расширение возможностей интерференционного контроля, повышение точности расшивки интерферограмм	205
48. Телевидение и видеозапись при интерференционном контроле. Автоматизация расшивки интерферограмм	207
Приложение	212
Список литературы	226

ИБ № 3506

Татьяна Александровна ИВАНОВА
Владимир Константинович КИРИЛЛОВСКИЙ

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ
И КОНТРОЛЬ
ОПТИКИ
МИКРОСКОПОВ**

Редактор *Н. А. Жукова*
Художественный редактор *С. С. Венедиктов*
Технический редактор *Т. П. Малашкина*
Корректоры: *Т. Н. Гринчук, И. Г. Иванова*
Переплет художника *В. Э. Нефедовича*

Сдано в набор 18.05.83. Подписано в печать 03.01.84. М-17303.

Формат 60×90¹/₁₆. Бумага офсетная.

Гарнитура литературная. Печать высокая.

Усл. печ. л. 14,5. Усл. кр.-отт. 14,5. Уч.-изд. л. 16,21. Тираж 2800 экз.

Заказ 180. Цена 1 р. 30 к.

Ленинградское отделение ордена Трудового Красного Знамени
издательства «МАШИНОСТРОЕНИЕ»,
191065, Ленинград, ул. Дзержинского, 10

Ленинградская типография № 6 ордена Трудового Красного Знамени
Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой
Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
193144, Ленинград, ул. Моисеенко, 10

