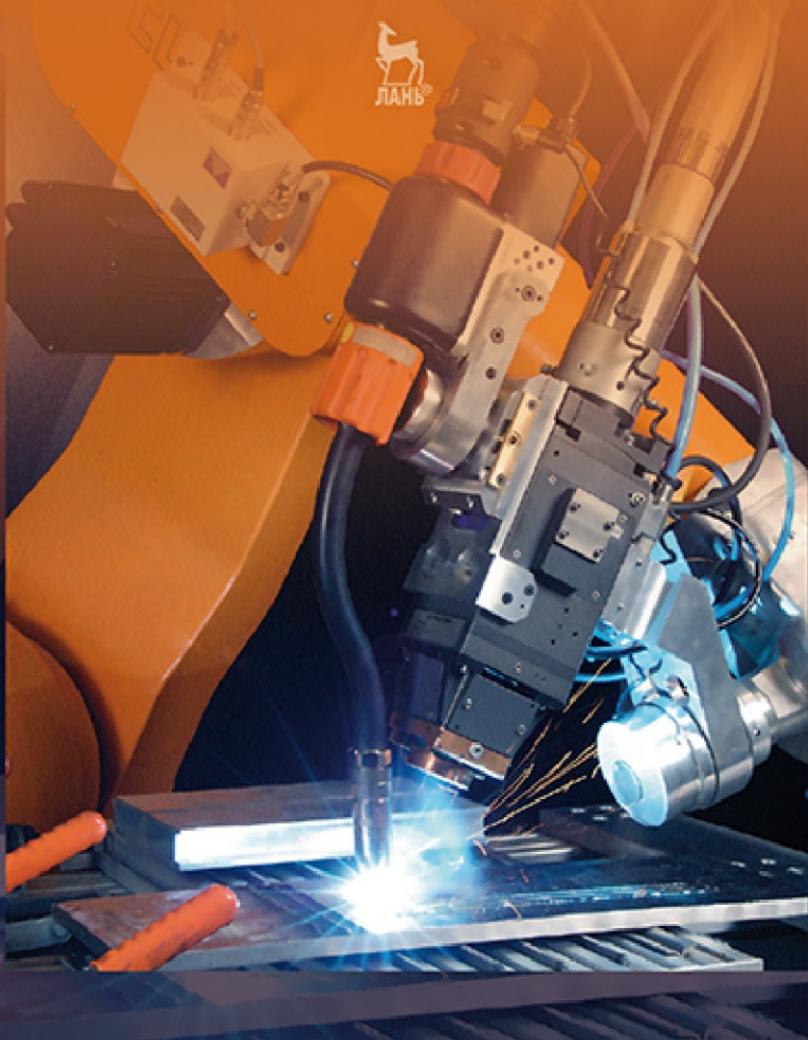


А. В. Богданов, Ю. В. Голубенко

ВОЛОКОННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ



А. В. БОГДАНОВ, Ю. В. ГОЛУБЕНКО

ВОЛОКОННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРЫ

и их применение

ДОПУЩЕНО
УМО вузов по университетскому
политехническому образованию
в качестве учебного пособия для студентов вузов,
обучающихся по направлению подготовки
«Машиностроение»



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ ·
МОСКВА ·
КРАСНОДАР ·
2016 ·

ББК 32.86-5я73

Б 73

Богданов А. В., Голубенко Ю. В.

Б 73 Волоконные технологические лазеры и их применение: Учебное пособие. — СПб.: Издательство «Лань», 2016. — 208 с. : ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

ISBN 978-5-8114-2027-8

В учебном пособии рассматриваются основные вопросы получения генерации в волоконных лазерах, методы накачки. Представлены активные элементы для активации волокна и схемы лазерных переходов. Описаны особенности резонаторов волоконных лазеров на брэгговских решетках и способы их получения. Приведены энергетические и пространственно-временные характеристики волоконных лазеров, работающих на редкоземельных элементах. Определены перспективы развития волоконных лазеров. Приведены основные типы волоконных лазеров, применяемые в технологиях, представлены типы фокусирующих головок и рассмотрены некоторые технологии применения излучения волоконных лазеров (резка, сварка, микрообработка).

Предназначено для студентов высших технических учебных заведений машиностроительных специальностей по направлению подготовки «Машиностроение» и «Проектирование технологических машин и комплексов».

ББК 32.86-5я73

Рецензенты:

А. А. ЕВДОКИМОВ — доктор технических наук, профессор Московского государственного технического университета радиотехники, электроники и автоматики; *В. И. ДЮЖИКОВ* — кандидат технических наук, профессор Московского государственного университета приборостроения и информатики.

Обложка
Е. А. ВЛАСОВА

*Охраняется законом РФ об авторском праве.
Воспроизведение всей книги или любой ее части
запрещается без письменного разрешения издателя.*

*Любые попытки нарушения закона
будут преследоваться в судебном порядке.*

© Издательство «Лань», 2016
© Коллектив авторов, 2016
© Издательство «Лань»,
художественное оформление, 2016

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ни одно из стратегически важных технологических направлений в мире не обходится без использования лазеров при обработке материалов. Лазерные технологии активно применяются в электронном машиностроении, автомобилестроении, атомной, космической, авиационной и судостроительной промышленности, медицине и практически во всех направлениях оборонного производства.

Лазерная техника играет центральную роль в происходящих в последнее время изменениях технологического уклада, которые связаны с резким повышением гибкости и мобильности производства, энергоэффективностью, снижением издержек и, одновременно, выходом на новый уровень качества продукции.

Лазерные технологии обработки материалов в современном производстве закономерно пользуются большим спросом как у крупных производителей, так и в малых фирмах. Ведь они обеспечивают целый ряд преимуществ, непосредственно влияющих на потребительские характеристики продукции: позволяют повысить качество, производительность, снизить себестоимость, обеспечить экологическую чистоту производства, а по целому ряду направлений достигнуть максимальных на сегодняшний день технических и экономических результатов. При этом современные лазерные технологические комплексы энергоэффективны и позволяют легко перестраивать технологический процесс, а гибкость и возможность унификации лазерного оборудования почти не имеют аналогов.

Волоконные лазеры являются одним из наиболее ярких достижений современной квантовой электроники. Это направление возникло на стыке лазерной физики и волоконной оптики. Существует ряд преимуществ волоконных лазеров по сравнению с традиционными квантовыми излучателями, которые позволяют имользоваться не только с обычными лазерами, а в некоторых случаях и заменить их. В начале своего развития основной задачей волоконной оптики представлялось создание волоконных световодов как пассивной среды для передачи информации. Однако, как и в любой другой развивающейся области науки, в процессе решения первоначальной задачи проявились другие возможности волоконной оптики, которые привели к расширению круга изучаемых объектов и явлений и, в свою очередь, расширили область возможных применений волоконных световодов и устройств на их основе.

Отдельным направлением волоконной оптики является разработка и исследование волоконных лазеров. В этих устройствах в качестве активной среды используются волоконные световоды, легированные различными добавками, прежде всего редкоземельными элементами. Впервые волоконный лазер был создан Снитцером в 1961 г., когда была продемонстрирована лазерная генерация в стекле, легированном ионами Nd^{3+} . Активный элемент лазера представлял собой стеклянную нить, покрытую оболочкой из стекла с пониженным показателем преломления. Развитие технологии получения волоконных световодов и полупроводниковых источников накачки позволило вернуться к идеи волоконного лазера на качественно новом уровне. Начало бурного развития этого направления относится к концу 1980-х гг., когда было показано, что волоконные световоды, легированные ионами Er^{3+} , могут найти применение в волоконных усилителях сигнала на длинах волн в диапазоне 1,53–1,56 мкм, т. е. в спектральной области минимальных оптических потерь волоконных световодов на основе кварцевого стекла. Исследования в области волоконно-оптических усилителей послужили толчком для создания мощных полупроводниковых источников накачки. Открытие фоторефрактивного эффекта в световодах и разработка

методики записи внутриволоконных брэгговских отражающих решеток позволили формировать брэгговские зеркала, образующие резонатор непосредственно в волоконных световодах, и реализовать широкий набор лазерных конфигураций в чисто волоконном исполнении. Все это привело к бурному развитию волоконных лазеров.

Понятие «волоконные лазеры» охватывает чрезвычайно широкий круг лазерных конфигураций, характеризующихся различными масштабами выходной мощности, а также спектральными и временными характеристиками выходного излучения.

Классификация волоконных лазеров по уровням выходной мощности выглядит достаточно условной, отражая в то же время особенности схемы построения лазера. Так, лазеры малой выходной мощности используют накачку в сердцевину световода. Это накладывает ограничения на характеристики полупроводникового источника накачки, который должен иметь характерный размер излучающей области 5–10 мкм. При этом мощность накачки не превышает сотен милливатт, поэтому характерная выходная мощность таких лазеров находится в диапазоне 10^{-1} – 10^2 мВт. Среди этих устройств можно выделить волоконные лазеры, излучающие в одной продольной моде с шириной линии около 20 кГц.

Разработка мощных полупроводниковых источников с широкой излучающей областью позволила приступить к созданию непрерывных волоконных лазеров средней мощности — от сотен милливатт до десятков ватт. В основе таких устройств лежат волоконные световоды с двойной оболочкой и сердцевиной, легированной активной примесью. Обычно в лазерах средней мощности в качестве отражателей используются брэгговские решетки, при этом объемные элементы в схеме лазера отсутствуют и нелинейно-оптические явления в резонаторе, как правило, не возникают. В таких лазерах не требуется использовать специальные меры для предотвращения лучевого пробоя материала световода. Условная верхняя граница выходной мощности подобных устройств составляет несколько десятков ватт в одной поперечной моде.

ГЛАВА 1 СВЕТОВОДЫ

1.1. ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА

Важнейшим оптическим параметром материала является его показатель преломления. По волновой теории света показатель преломления материала (n) выражается через отношение скорости света в вакууме (c) к скорости света в среде данного материала (u):

$$n = c/u, \quad (1.1)$$

или оптической длины волны в вакууме ($\lambda_{\text{в}}$) к длине волны в материале ($\lambda_{\text{м}}$):

$$n = \lambda_{\text{в}}/\lambda_{\text{м}}. \quad (1.2)$$

Поскольку $n > 1$ для всех известных веществ, свет распространяется в материале медленнее, чем в вакууме.

Типичные значения показателей преломления материалов, используемых в оптоволокне, приведены в таблице 1.1.

Из формул (1.1), (1.2) и значений, приведенных в таблице 1.1, видно, что показатель преломления стекла изменяется в зависимости от его состава.

Таблица 1.1

Показатели преломления материалов, используемых в оптоволокне

Материал	Длина волны в вакууме, нм	Показатель преломления	Длина волны в материале, нм
Стекло	850	1,4525	585,5
	1300	1,4469	898,5
	1550	1,4440	1073,4
GaAlAs	850	3,6	236,1
Пластик	650	1,4–1,5	433–464

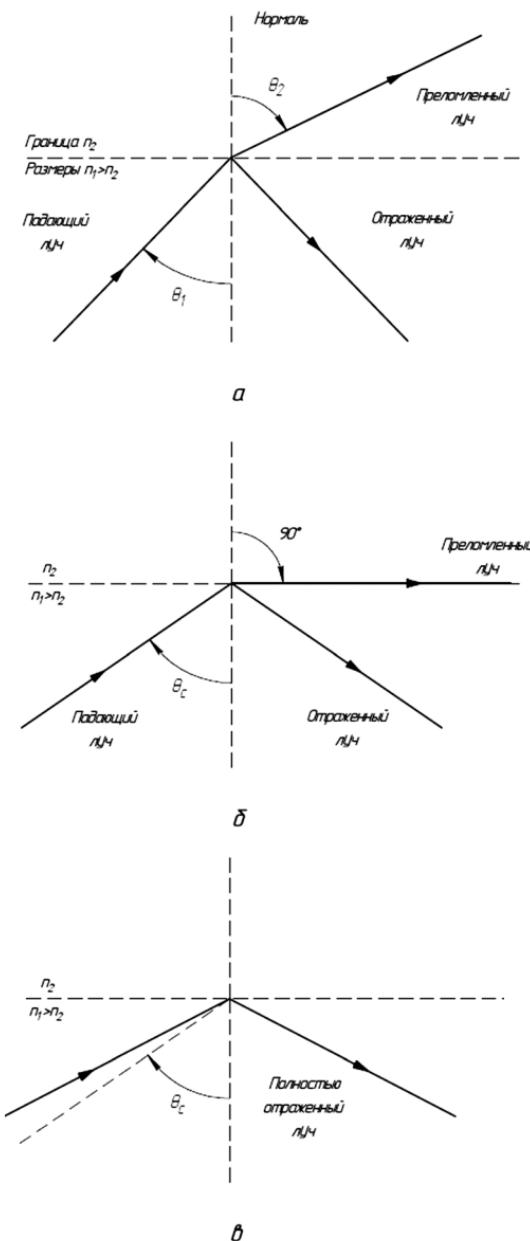


Рис. 1.1
Отражение и преломление света на границе двух сред

Основные понятия, используемые при обсуждении механизма преломления, иллюстрирует рисунок 1.1. На всех трех видах рисунка граница раздела проходит между двумя средами с показателями преломления n_1 и n_2 , причем $n_1 > n_2$.

Рассмотрим случай преломления светового луча при переходе из одной среды в другую (рис. 1.1а). Углом падения называется угол между перпендикуляром к границе раздела двух сред и падающим лучом (Θ_1). На границе раздела часть света отражается обратно (отражение Френеля). Углом отражения называется угол между перпендикуляром к границе раздела двух сред и отраженным лучом. Оставшаяся часть света пересекает границу раздела, образуя преломленный луч, который распространяется под углом Θ_2 . Согласно закону Снеллиуса между углом падения и углом преломления существует следующее соотношение:

$$n_1 \sin(\Theta_1) = n_2 \sin(\Theta_2). \quad (1.3)$$

Если угол падения Θ_1 увеличивается, то при определенном его значении преломленный луч полностью исчезает ($\Theta_2 = 90^\circ$). Такой угол называется критическим углом скольжения Θ_c (рис. 1.1б):

$$\Theta_c = \arcsin(n_2/n_1). \quad (1.4)$$

При углах, больших критического (рис. 1.1в), свет полностью отражается и во вторую среду не проникает, а интенсивность отраженного луча равна интенсивности падающего. Это явление называется полным внутренним отражением.

При расчете характеристик реального распространения света в оптоволокне используется величина числовой апер-

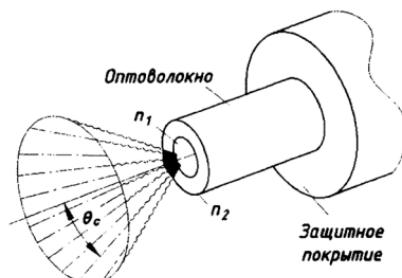


Рис. 1.2
Входной конус при входе света в оптоволокно

туры (NA). Эта величина тесно связана с условием полного внутреннего отражения и волнового распространения света в оптоволокне. Она определяет угловой растр входного конуса (рис. 1.2), соответствующего максимальному углу входа света в оптоволокно:

$$\text{NA} = \sin\Theta, \quad (1.5)$$

где Θ — половина угла ввода.

Величина NA — важный технологический параметр, так как чем больше значение NA, тем лучше свет вводится в оптоволокно. При малых значениях NA вводится достаточно узконаправленный луч света [11].

1.2. УСТРОЙСТВО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

Оптическое волокно (рис. 1.3) состоит из двух концентрических слоев: сердечника (ядра) и оптической оболочки, имеющих показатели преломления соответственно n_1 и n_2 . Ядро и оптическая оболочка могут быть изготовлены из одного материала (например, особо чистого кварцевого стекла), изменение показателя преломления при этом достигается подбором специальных добавок, вводимых в чистый расплав кварца. Этот процесс называется легированием. В качестве легирующего вещества чаще всего выступают окислы германия (GeO_2), фосфора (P_2O_5), бора (B_2O_3), фтора (F), эрбия (Er) и неодима (Nd). В частности, фтор и окись бора уменьшают показатель преломления, а окись германия и окись фосфора его увеличивают. Вокруг оптической оболочки в целях предохранения от внешних воздействий, влияющих на оптические свойства оптоволокна (влага,

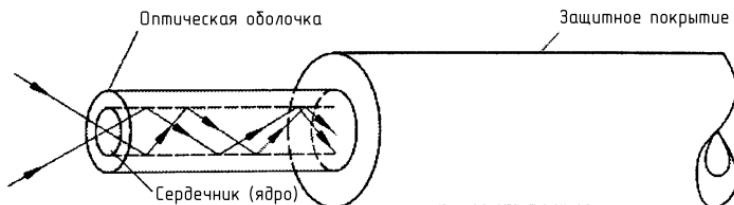


Рис. 1.3
Структура оптического волокна

царапины, микротрешины), наносятся два слоя полимера (акрилат). Ядро оптоволокна также может быть изготовлено из стекла, а оптическая оболочка из пластика (PCF-оптоволокно). И, наконец, пластиковое оптоволокно имеет ядро и оболочку из пластика.

Показатель преломления сердечника n_1 больше показателя преломления оптической оболочки n_2 . Численная разница показателей преломления невелика — порядка одного процента. Наиболее распространенные соотношения диаметров сердечника и оптической оболочки приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Наиболее распространенные соотношения диаметров сердечника и оптической оболочки

Сердечник, мкм	Оптическая оболочка, мкм	Сердечник, мкм	Оптическая оболочка, мкм
8	125	62,5	125
50	125	100	140

При указании значений этих величин для конкретного оптоволокна используется запись, в которой после численного значения диаметра сердечника через косую черту указывается значение диаметра оптической оболочки. Например, оптоволокно для сетевого оборудования фирмы Hirschmann имеет маркировку 62,5/125.

При вводе света внутрь волокна под углом, большим критического, свет, испытывая полное внутреннее отражение, будет двигаться зигзагообразно вдоль сердечника оптоволокна. Лучи, при движении пересекающие ось световода, называются меридиональными. Часть лучей, называемых косыми (асимметричными), будет двигаться по спиралеобразной траектории, не пересекая ось волокна; при анализе волоконно-оптических процессов они, как правило, не учитываются. Используемые материалы, состав и размеры компонентов определяют физические параметры и особенности оптоволокна.

Под основными параметрами оптоволокна понимают профиль показателя преломления, число мод, потери оптической мощности.

1.3. ПРОФИЛЬ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Распределение значений показателя преломления вдоль диаметра поперечного сечения оптического волокна называют профилем показателя преломления. Различают оптические волокна со ступенчатым профилем, когда сердечник и оптическая оболочка имеют однородный (но разный) показатель преломления, и с градиентным профилем, когда показатель преломления сердечника плавно уменьшается от центра к краям. У градиентных волокон отсутствует резкое изменение показателя преломления на границе ядра и оптической оболочки, что характерно для ступенчатого профиля. Чаще всего у градиентных световодов профиль показателя преломления близок к параболе, такие световоды называют параболическими.

Для оптимизации работы на какой-либо одной длине волн используется и более сложная структура профиля (рис. 1.4).

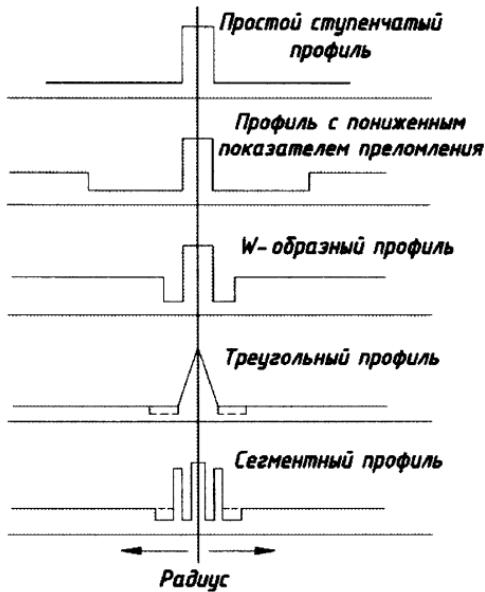


Рис. 1.4
Профили показателей преломления
для одномодового волоконного световода

1.4. МОДЫ

Строгое рассмотрение уравнений Maxwella, определяющих характер распространения света в оптоволокне, показывает, что в волокне может распространяться ограниченное число типов электромагнитных колебаний, называемых модами. Каждая мода имеет характерные для нее структуру электромагнитного поля, а также фазовую и групповую скорость. Под фазовой скоростью понимается скорость перемещения фазы волны, а групповая скорость определяет скорость переноса энергии электромагнитной волной. Для свободно распространяющихся электромагнитных волн обе скорости эквивалентны и равны скорости света, в то время как для электромагнитных волн, перемещающихся в оптоволокне, величины фазовой и групповой скорости различны и зависят от частоты колебаний, материала оптоволокна и его геометрических параметров. Следствием влияния этих факторов является дисперсия. Различают следующие виды дисперсии:

- материальную (молекулярную) дисперсию, обусловленную зависимостью показателя преломления материала световода от длины волны излучения;
- волноводную дисперсию, определяемую длиной волны в оптическом волноводе и фактически зависящую от совокупности таких геометрических параметров оптоволокна, как отклонение от круглой формы сечения, непостоянство диаметра, несоосность ядра и оболочки, непостоянство показателя преломления по длине оптоволокна и т. п.;
- межмодовую (модовую) дисперсию, являющуюся результатом различной скорости распространения мод в многомодовом волокне.

Моды характеризуются тем, что после двух последовательных переотражений от границы сердечника и оптической оболочки их электромагнитные поля оказываются в фазе. Если это условие не соблюдается, то волны, интерферируя, гасят друг друга.

Являясь одним из возможных решений уравнения Maxwella, мода выступает в качестве математического поня-

тия, определяющего такую физическую характеристику, как режим работы оптоволокна.

Различают одномодовый и многомодовый режимы работы волоконно-оптических линий связи. Условием одномодового режима, в котором по оптоволокну распространяется одна основная мода, является выполнение неравенства:

$$F = (2\pi \times \text{NA} \times r/\lambda_0) < F_{\text{отс}}. \quad (1.6)$$

Здесь λ_0 — рабочая длина волны; r — радиус сердечника; F — нормированное значение рабочей частоты; $F_{\text{отс}}$ — нормированное значение частоты отсечки (частоты, соответствующей предельному значению длины волны данной моды). Величина $F_{\text{отс}} = 2,405$ для световодов со ступенчатым профилем и $F_{\text{отс}} = 3,53$ в случае параболического профиля.

Величину НА можно найти из выражения:

$$\text{NA} = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}. \quad (1.7)$$

Здесь n_1 и n_2 — показатели преломления сердечника и оптической оболочки.

Условие, определяемое неравенством (1.6), необходимо, но недостаточно. Кроме него, должно выполняться следующее равенство:

$$2r\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} = 0,38\lambda_0. \quad (1.8)$$

Если неравенство (1.6) не выполняется, в световоде устанавливается многомодовый режим. В этом случае число мод приблизительно равно $N = F^2/2$ для световода со ступенчатым профилем и $N = F^2/4$ в случае градиентного профиля. Характер распространения света в многомодовом и одномодовом волокне для разных профилей показателя преломления поясняется на рисунке 1.5.

Подробнее рассмотрим характерное для многомодового волокна явление межмодовой дисперсии. При вводе луча в оптическое волокно путь распространения от начала до конца волокна для разных мод различен. Это обуславливает разное время распространения мод, переносящих энергию первичного сигнала, и перераспределение выходной

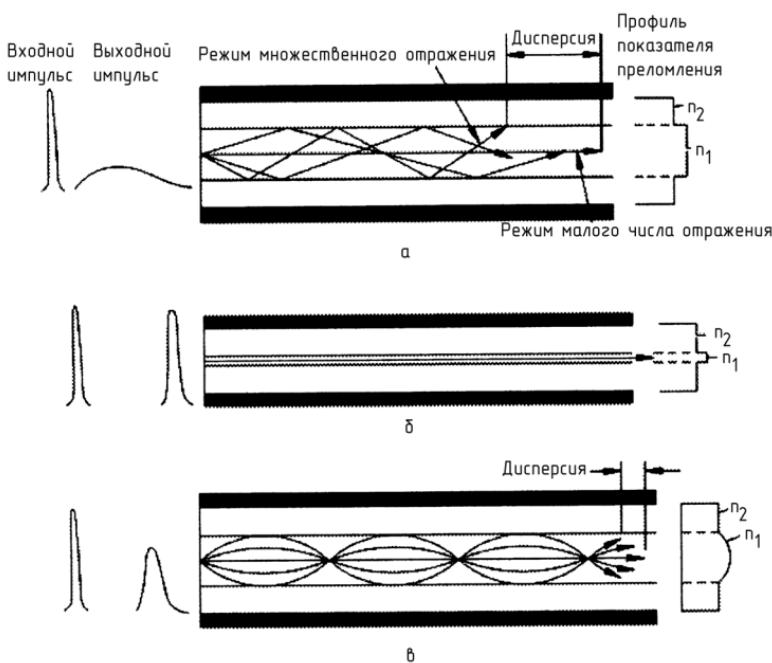


Рис. 1.5
Распространение света в многомодовом и одномодовом
волокнах для разных профилей показателя преломления

суммарной энергии в заданном отрезке времени. В результате, если импульс света на входе оптоволокна имел ярко выраженные фронт и срез сигнала, то на выходе получаем существенно размытый сигнал со сглаженными фронтом и срезом. Это размывание сигнала обусловлено межмодовой дисперсией и проявляется тем сильнее, чем длиннее линия связи. Межмодовая дисперсия ограничивает пропускную способность волокна, так как при повышении частоты входного сигнала (последовательность коротких импульсов) размытые края среза одного импульса начинают перекрываться размытым фронтом последующего, ведя к потере информативности сигнала (рис. 1.6).

Несмотря на большую дисперсию, многомодовое оптоволокно со ступенчатым профилем показателя преломления является очень распространенным в силу более низких требований к технологическому оборудованию для его про-

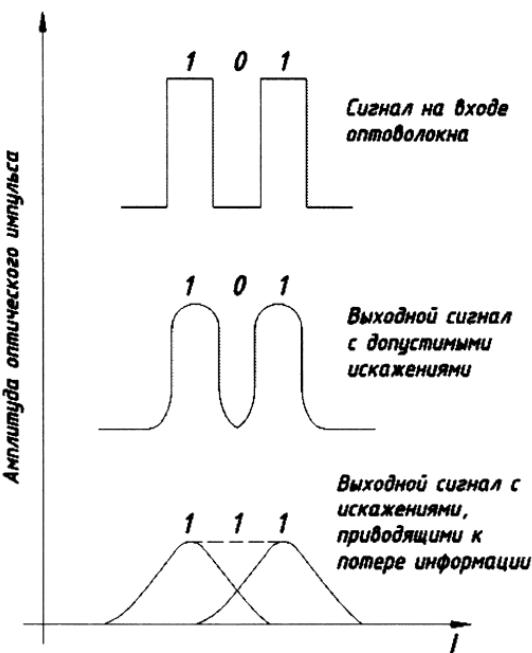


Рис. 1.6
Искажение передаваемого сигнала вследствие
межмодовой дисперсии

изводства и используемому материалу. Данное волокно может иметь сердечник из стекла и оптическую оболочку из полимера (PCF) или быть полностью изготовленным из пластика. Для волокна с градиентным показателем преломления величина межмодовой дисперсии существенно меньше. Это происходит благодаря свойству света распространяться быстрее в среде с меньшим показателем преломления: большую часть пути переотраженные лучи проходят через области сечения оптоволокна с меньшим показателем преломления, поэтому на выходе оптоволокна они появляются почти одновременно с лучами, распространявшимися вдоль оси через область с максимальным значением показателя преломления. Градиентное оптоволокно широко используется при построении локальных сетей и в коммуникациях, требующих широкой полосы пропускания, например при передаче видеоизображения. При этом наи-

более распространенные значения отношения диаметра ядра к диаметру оптической оболочки составляют 50/125, 62,5/125. Для многомодового световода важной характеристикой является также ширина полосы пропускания волокна в пересчете на километр его длины, называемая коэффициентом широкополосности. Например, величина этого коэффициента, равная 600 МГц·км (стандартное многомодовое волокно фирмы Siemens для длины волны до 1300 нм), говорит о том, что на расстояние в 1 км может быть передан сигнал в полосе частот до 600 МГц или на расстояние 2 км — в полосе до 300 МГц, то есть произведение длины линии передачи на ширину полосы частот сигнала должно быть величиной, меньшей или равной коэффициенту широкополосности.

Для одномодового волокна существенным является другой вид дисперсии — материальная дисперсия (или молекулярная). Если вспомнить формулу (1.2), то очевидно, что для разных длин волн (для источников излучения характеристика определенная ширина спектра для заданного значения рабочей частоты) показатель преломления также различен. Таким образом, даже в рамках одной моды скорость распространения в оптоволокне для разных значений частот спектра рабочей частоты различна. Этот вид дисперсии присутствует и в многомодовом оптоволокне, но им, по сравнению с межмодовой дисперсией, можно пренебречь.

Еще один вид дисперсии — волноводная дисперсия — также является существенным для одномодового волокна. По существу этот вид дисперсии связан с тем, что заметная часть оптической мощности (до 20% от общей мощности) распространяется по оптической оболочке, имеющей отличный от ядра показатель преломления, что делает ее скорость иной, чем при распространении в ядре. Суммарную дисперсию, включающую в себя материальную и волноводную, называют хроматической дисперсией. Хроматическая дисперсия обозначается как $D(\lambda)$ и выражается в единицах $\text{пс}/(\text{нм} \cdot \text{км})$. Для одномодового волокна, в отличие от многомодового, где оперируют понятием коэффициента широкополосности, спецификация хроматической дисперсии необходима. Типовое значение для стандартного одно-

модового волокна: D (1310 нм) < 1,8 пс/(нм·км). Приблизительная оценка ширины полосы пропускания (BW) через величину одномодовой дисперсии может быть получена из выражения:

$$BW = 0,187 / (D(\lambda) \times SW \times L). \quad (1.9)$$

Здесь SW — ширина спектра излучателя, нм; L — длина волокна, км.

Из приведенных выражений (1.6) и (1.8) хорошо видны основные технологические пути решения вопроса получения одномодового режима: это уменьшение диаметра сердечника, уменьшение разности показателей преломления сердечника и оптической оболочки, увеличение длины волны источника излучения. Реально компромисс следует искать только между первыми двумя параметрами. С увеличением диаметра улучшаются условия для ввода повышенной мощности и условия сочленения отрезков волокна, одновременно с этим необходимо выбрать малое значение разности показателей преломления ядра и оптической оболочки, что, в свою очередь, приводит к ухудшению распространения основной моды и повышенной чувствительности к внешним воздействиям (например, изгибам). При большой разности показателей преломления сердечника и оболочки маленький диаметр сердечника повышает требования к точностистыковки отрезков волокна. В современных одномодовых волокнах диаметр сердечника составляет порядка 6–10 мкм, а разность показателей преломления $n_1 - n_2 = 0,003 - 0,005$. Одномодовый режим работы для заданной длины волны реализуется при диаметре волокна, соизмеримом с длиной волны. Все это приводит к тому, что световой пучок отражается от поверхности сердечника реже, вызывая меньшую дисперсию. В результате одномодовое волокно по сравнению с многомодовым имеет существенно меньший коэффициент затухания.

На рисунке 2.1 представлена простейшая конфигурация волоконного лазера с торцевой накачкой, состоящего из полупроводникового источника накачки с волоконным выходом, отрезка волоконного световода, легированного активными ионами, и двух брэгговских решеток (другие способы накачки будут рассмотрены ниже). Входная брэгговская решетка обычно имеет коэффициент отражения, близкий к единице на длине волны генерации, а необходимый коэффициент отражения выходной решетки определяется величиной усиления и оптических потерь излучения в активном световоде. Брэгговские решетки могут быть записаны как непосредственно в активном световоде, так и в отрезках фоточувствительного световода, которые привариваются к активному. Рассмотрим отдельные элементы, составляющие волоконный лазер, и их свойства.

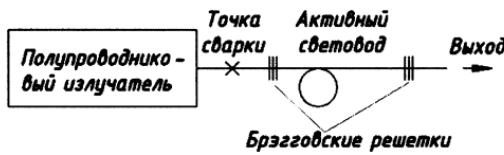


Рис. 2.1
Простейшая
конфигурация волокон-
ного лазера

2.1. АКТИВНЫЕ ДОБАВКИ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ

Так же как и в случае твердотельных лазерных источников, наибольшее распространение в качестве активных легирующих добавок волоконных световодов получили ионы лантаноидов, или редкоземельных элементов. Спе-

тические оптические свойства данных элементов определяются тем, что для них характерна достройка внутренней f -оболочки, когда уже заполнились внешние оболочки. Наличие незаполненной внутренней оболочки приводит к появлению ярко выраженной дискретной структуры электронных переходов, которая и обуславливает применение ионов редкоземельных элементов в качестве активной примеси.

Применимость активного иона для легирования волоконных световодов на основе кварцевого стекла определяется следующими факторами: во-первых, активный ион должен иметь излучательный переход в ближней ИК области спектра, где кварцевое стекло наиболее прозрачно. Во-вторых, в кварцевом стекле энергия фотонов составляет $400\text{--}1100\text{ см}^{-1}$, поэтому наличие энергетических уровней с малым энергетическим зазором внутри оптического перехода приводит к безызлучательной релаксации, препятствуя появлению люминесценции. Поэтому в качестве активной примеси волоконных световодов на основе кварцевого стекла наибольшее распространение нашел ряд элементов, приведенных в таблице 2.1.

Таблица 2.1

**Редкоземельные элементы, используемые
для создания активных волоконных световодов,
и спектральные области их люминесценции**

Активный ион	Область люминесценции (мкм)	Активный ион	Область люминесценции (мкм)
Nd^{3+}	0,92–0,94	Er^{3+}	1,53–1,6
	1,05–1,1 1,34	Tm^{3+}	1,7–1,9
Ho^{3+}	1,9–2,1	Yb^{3+}	0,98–1,16

Там же содержатся данные об области люминесценции этих активных ионов. Отметим, что в волоконных световодах на основе стекол другого состава, в частности флюоридных и халькогенидных, возможно получение лазерной генерации с использованием и других активных ионов, например празеодима. Схемы энергетических уровней элементов, приведенных в таблице 2.1, и используемые оптические переходы представлены на рисунке 2.2.

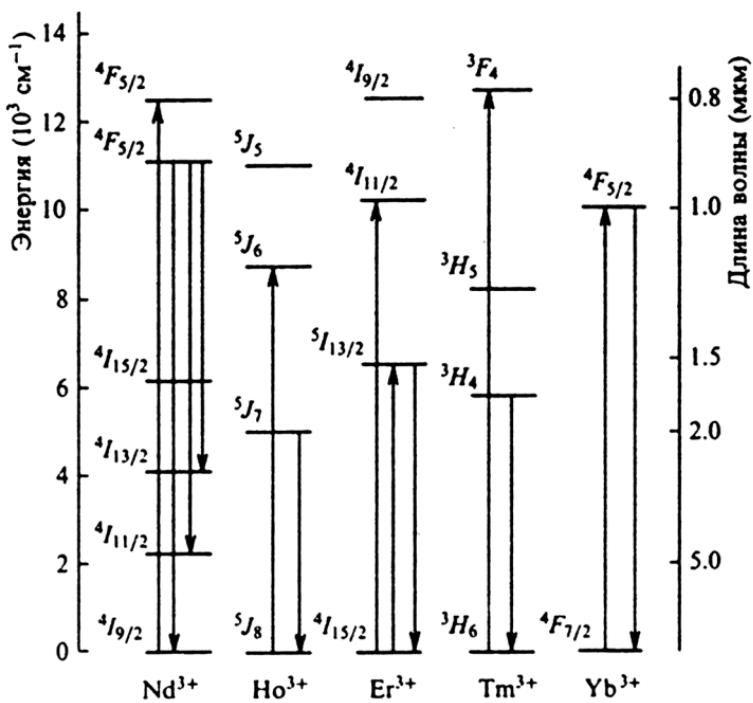


Рис. 2.2
Схема энергетических уровней ионов
ряда редкоземельных элементов

Неодим (Nd³⁺)

Ионы неодима в кварцевом стекле имеют ряд сильных полос поглощения в видимом и ближнем ИК-диапазоне, однако для селективного возбуждения на уровень $^4F_{5/2}$ чаще всего используется полупроводниковый источник излучения с длиной волны 0,8 мкм. Три основных полосы люминесценции расположены в области 0,92, 1,06 и 1,34 мкм. При этом наиболее интенсивной является полоса люминесценции в области 1,06 мкм, соответствующая переходу $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$. (Время жизни на возбужденном уровне составляет около 0,5 мс.) На этой длине волны лазер работает по четырехуровневой схеме генерации. Это объясняет тот факт, что неодим был первой активной примесью для созда-

ния активной среды волоконного лазера, использующего световод на основе кварцевого стекла.

Реализация волоконных лазеров с использованием оптического перехода ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ ($\lambda \sim 0,92$ мкм) затруднена из-за конкуренции со стороны люминесценции в области 1,06 мкм, а генерация в области 1,34 мкм (${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$) — из-за поглощения из возбужденного состояния. Тем не менее, подавление люминесценции на 1,06 мкм позволило создать эффективный волоконный лазер, излучающий на длине волны 0,92 мкм.

Гольмий (Ho^{3+})

Энергетическая схема Ho^{3+} имеет лазерный переход ${}^5J_7 \rightarrow {}^5J_8$ с соответствующей длиной волны излучения в области 2 мкм. Время жизни на возбужденном уровне составляет около 0,5 мс. При этом гольмийевый лазер должен работать по трехуровневой схеме, поскольку на той же длине волны существует поглощение из основного состояния. Поэтому для таких лазеров для достижения инверсии необходимой является накачка в интенсивную полосу поглощения. По этой причине наибольшее распространение нашли твердотельные гольмийевые лазеры с ламповой накачкой в полосы поглощения, расположенные в видимой части спектра. Использование полосы поглощения в области 0,9 мкм, соответствующей переходу ${}^5J_8 \rightarrow {}^5J_5$, для накачки полупроводниковым источником не получило применения вследствие слабой интенсивности указанной полосы. В то же время наличие интенсивной полосы поглощения в области 1,15 мкм, соответствующей переходу ${}^5J_8 \rightarrow {}^5J_6$, позволяет рассчитывать на существенное улучшение характеристик гольмийового волоконного лазера при накачке в эту полосу.

Эрбий (Er^{3+})

Ионы эрбия в кварцевом стекле обладают лазерным переходом ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, соответствующим излучению в области 1,53–1,6 мкм, время жизни на метастабильном уровне составляет 10–12 мс. Данный спектральный диапазон совпадает с областью минимальных оптических потерь волоконных световодов на основе кварцевого стекла и, сле-

довательно, с диапазоном, используемым в современных волоконно-оптических линиях связи. В сочетании с возможностью применять полупроводниковые источники накачки на 0,98 и 1,45–1,48 мкм это обусловило широкое использование волоконных световодов, легированных ионами эрбия, а также устройств на их основе. Квантовая эффективность накачки для этих световодов приближается к 100%, а большое время жизни на метастабильном уровне, составляющее около 10 мс, позволяет достигать высоких коэффициентов усиления.

Тулий (Tm^{3+})

Лазерная генерация в кварцевом стекле, легированном ионами тулия, связана с переходом $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$ при накачке в полосу, обусловленную переходом на уровень 3F_4 (~790 нм) либо 3H_5 (1060–1250 нм). Спектральный диапазон возможной лазерной генерации составляет 1850–2100 нм, время жизни на метастабильном уровне — примерно 0,2 мс.

Иттербий (Yb^{3+})

Энергетическая структура ионов Yb^{3+} является предельно простой. Помимо основного уровня $^2F_{7/2}$ они обладают лишь одним уровнем $^4F_{5/2}$. Следовательно, в спектре поглощения волоконных световодов, легированных ионами Yb^{3+} , присутствует лишь одна полоса поглощения, имеющая сложную форму из-за штарковского расщепления. Данная полоса проявляет два максимума с центрами на 915 и 976 нм, поэтому для накачки используются полупроводниковые источники, излучающие в этих спектральных диапазонах. Спектр люминесценции, обусловленный переходом $^2F_{5/2} \rightarrow ^2F_{7/2}$, имеет максимумы в области 978–982 нм и 1030–1040 нм, простираясь до области 1,15–1,2 мкм. Время жизни на метастабильном уровне для алюмосиликатного стекла составляет около 0,8 мс. Это позволяет реализовать широкий набор волоконных источников для диапазона 0,98–1,2 мкм с различными спектральными и энергетическими характеристиками.

2.2. ФОТОИНДУЦИРОВАННЫЕ РЕШЕТКИ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Фотоиндукционные брэгговские решетки показателя преломления используются в волоконных лазерах в качестве селективных отражателей, образующих лазерный резонатор. Получение фотоиндукционных решеток показателя преломления стало возможным после обнаружения фоточувствительности световодов, т. е. стабильного изменения показателя преломления материала сердцевины световода под действием УФ-излучения определенных длин волн. В общем случае под фотоиндукционной внутриволоконной брэгговской решеткой показателя преломления следует понимать отрезок волоконного световода с модуляцией показателя преломления в световедущей области с амплитудой на уровне 10^{-5} – 10^{-3} и периодом порядка длины волны распространяющегося излучения.

Основными характеристиками решетки являются период модуляции показателя Λ , величина наведенного изменения показателя преломления δn , число штрихов N или длина решетки L . Две моды взаимодействуют на решетке с периодом Λ , если их постоянные распространения β_1 и β_2 удовлетворяют условию фазового синхронизма

$$\beta_1 - \beta_2 = \frac{2\pi m}{\Lambda}, \quad (2.1)$$

где m — целое число, характеризующее порядок решетки, в котором реализуется межмодовое взаимодействие.

Связь основной моды с модой, имеющей противоположное направление распространения, возникает на определенной длине волны λ_{Br} , задаваемой соотношением

$$2n_{eff}\Lambda = \lambda_{Br}, \quad (2.2)$$

где n_{eff} — эффективный показатель преломления основной моды световода.

В результате на длине волны возникает отражение. Параметры решеток (спектральная ширина, коэффициент отражения) могут варьироваться в широких пределах в зависимости от условий записи и фоточувствительности световода. Коэффициент отражения R однородной брэгговской решетки длиной L определяется выражением

$$R = th^2(kL), \quad (2.3)$$

где k — коэффициент связи, $k = \pi\eta\delta n/\lambda_{Br}$, η — доля мощности излучения, распространяющегося по области, в которой наведено изменение показателя преломления. Спектральная ширина резонанса на полувысоте может быть выражена следующим соотношением:

$$\Delta\lambda = \lambda\alpha \left[\left(\frac{\delta n}{2n} \right)^2 + \left(\frac{1}{N} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (2.4)$$

где α — параметр, приблизительно равный единице для глубоких решеток ($R \sim 1$) и 0,5 для решеток небольшой глубины.

Поскольку период брэгговской решетки менее 1 мкм для отражения в ближней ИК-области спектра, запись решетки производится в интерференционной картине УФ-излучения. На рисунке 2.3 представлена схема записи решеток с использованием интерферометра Ллойда.

Отметим, что такая схема требует высокой пространственной когерентности излучения и поэтому применяется, главным образом, с источником, использующим вторую гармонику аргонового лазера (длина волны излучения 244 нм).

Другой метод записи решеток основан на использовании фазовых масок. В этом методе интерфеcируют первый и минус первый порядки дифракции излучения, прошед-

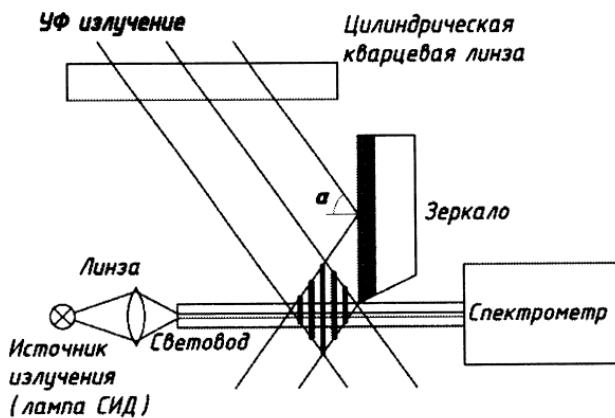


Рис. 2.3

Схема записи решеток с использованием интерферометра Ллойда

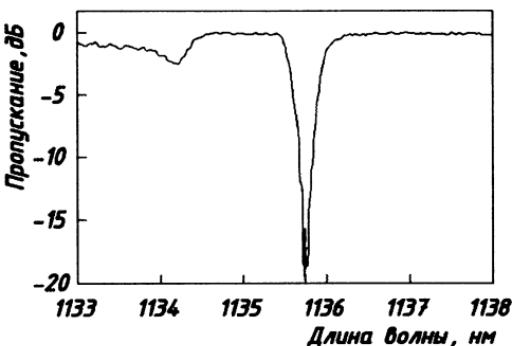


Рис. 2.4
Типичный спектр пропускания брэгговской решетки с параметрами $L = 5$ мм, $\delta n = 8 \cdot 10^{-4}$

шего через кварцевую фазовую маску, рельеф которой выполнен таким образом, чтобы подавить нулевой и другие порядки дифракции. В данном методе требования к когерентности источника излучения не столь жесткие, что позволяет использовать эксимерные лазеры KrF (248 нм) и ArF (193 нм).

На рисунке 2.4 представлен типичный спектр пропускания брэгговской решетки с параметрами $L = 5$ мм, $\delta n = 8 \cdot 10^{-4}$, $\Lambda = 0,4$ мкм. Решетка обеспечивает коэффициент отражения $R \sim 0,99$ на длине волны 1136 нм, при этом ширина спектра отражения составляет около 0,4 нм. Такие решетки, имеющие высокий коэффициент отражения и большую ширину спектра отражения, обычно используются в качестве входных отражателей волоконных лазеров.

2.3. АКТИВНЫЕ ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ

Под активными понимают волоконные световоды, в состав материала которых входят ионы элементов, обладающих оптическими переходами. При этом активный ион может вводиться как в сердцевину световода, так и в его отражающую оболочку, если по ней распространяется заметная часть оптической мощности. Для производства активных волоконных световодов используется ряд технологических процессов: MCVD (модифицированное химическое осаждение из газовой фазы), OVD (внешнее осаждение из газовой фазы), VAD (аксиальное осаждение из газовой фазы), осаждение с использованием плазмы PCVD и SPCVD.

Для введения активной примеси в этих процессах наибольшее распространение нашли метод пропитки, когда непроплавленный пористый материал сердцевины пропитывается раствором соли активной добавки, и легирование из летучих соединений.

Максимальная концентрация активных ионов в сетке кварцевого стекла невелика и ограничивается их растворимостью, а также возникновением кооперативных эффектов. Это приводит к тому, что длина активной среды волоконного лазера может достигать нескольких десятков метров. Поэтому естественным требованием к активным волоконным световодам является наличие достаточно низких нерезонансных оптических потерь. Приемлемое значение потерь составляет от 5 до 20 дБ/км, в этом случае их влияние на эффективность лазера составляет не более нескольких процентов. На рисунке 2.5 представлен спектр оптических потерь волоконного световода, легированного ионами Yb^{3+} с концентрацией $8 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Сердцевина данного образца была также легирована Al_2O_3 , что позволяет, как увеличить предел растворимости редкоземельных ионов в кварцевом стекле, так и уменьшить вероятности их кластеризации, приводящей к кооперативной ап-конверсии.

Мощные полупроводниковые источники для накачки волоконных лазеров требуют применения волоконных световодов с двойной оболочкой. В качестве активной среды мощных волоконных лазеров используются световоды, состоящие из одномодовой сердцевины, легированной как активной примесью редкоземельного элемента, так и при-

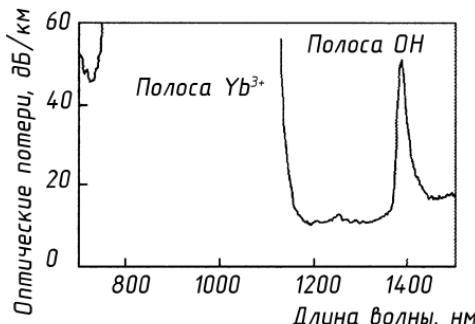


Рис. 2.5
Спектр оптических потерь в сердцевине активного световода при концентрации ионов Yb^{3+} , равной $8 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$

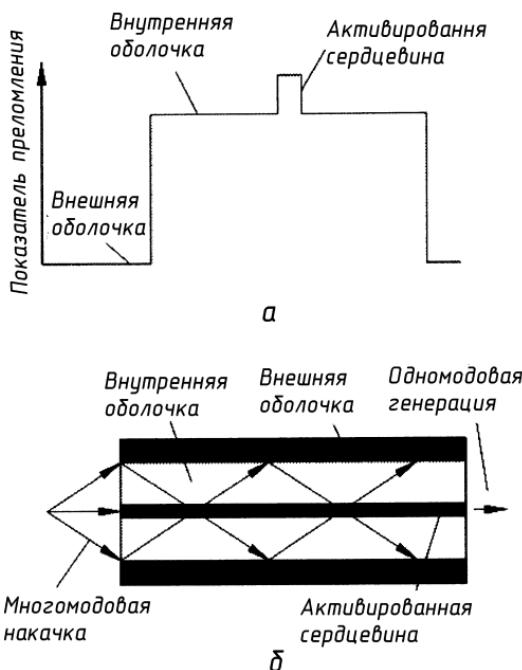


Рис. 2.6
Модельный профиль преломления (а) и принцип преобразования многомодового излучения накачки в одномодовое излучение волоконного лазера (б)

месями, формирующими профиль показателя преломления, а также из внутренней оболочки из кварцевого стекла и внешней оболочки с показателем преломления, пониженным по сравнению с таковым для кварцевого стекла. Модельный профиль показателя преломления данных световодов представлен на рисунке 2.6а.

Внутренняя оболочка (вместе с внешней оболочкой) образует многомодовый световод, по которому распространяется излучение накачки. Она имеет типичный размер 0,1–1 мм, что обеспечивает возможность ввода излучения накачки от полупроводниковых источников с мощностью от нескольких единиц до нескольких десятков ватт. При распространении по многомодовому световоду излучение накачки поглощается активными ионами редкоземельного элемента, вызывая люминесценцию, которая при наличии

обратной связи может развиться в лазерную генерацию. При этом область генерации оказывается локализованной в одномодовой сердцевине, т. е. ее характерный поперечный размер составляет 5–10 мкм. Принцип преобразования многомодового излучения накачки в одномодовое излучение волоконного лазера иллюстрируется на рисунке 2.6б. Таким образом, волоконный лазер с накачкой в оболочку может рассматриваться как устройство, позволяющее повысить яркость полупроводникового источника в сотни раз (естественно, на другой длине волны).

Для наиболее распространенного типа волоконных световодов с двойной оболочкой в качестве материала внешней оболочки используются полимеры с низким показателем преломления. В частности, это силиконовая резина, обеспечивающая числовую апертуру многомодового световода $NA = 0,38$, и тефлон AF, позволяющий увеличить NA до 0,6. Как правило, световоды с полимерным покрытием имеют внешний диаметр 100–300 мкм.

К недостаткам использования силиконового покрытия следует отнести высокий уровень оптических потерь для излучения накачки, который составляет 50 дБ/км и более. Использование тефлона позволяет получать световоды с оптическими потерями в оболочке 10 дБ/км. Кроме того, данный материал обладает высоким пропусканием в УФ-части спектра, что позволяет записывать решетки без удаления полимера. Однако тефлоновое покрытие имеет малую толщину (10–20 мкм), что увеличивает риск повреждения световода.

Для обеспечения эффективной связи мод внутренней оболочки с активированной сердцевиной необходимо использовать волоконные световоды с некруглой формой внутренней оболочки, поскольку в противном случае большая доля мощности распространяется в модах, не пересекающих область сердцевины. Для определения эффективности поглощения в оптических волокнах с различной геометрией внутренней оболочки в работе рассматривалось несколько образцов, изготовленных из одной заготовки с сердцевиной, легированной иттербием. Данные световоды имели следующие форму и параметры внутренней оболочки: круглая (диаметром 125 мкм), D-образная с одной сошлифован-

Таблица 2.2

**Влияние геометрии внутренней оболочки
на эффективность поглощения излучения накачки
в световоде, легированном ионами Yb^{3+} .**

Геометрия оболочки	Поглощение на $\lambda = 978 \text{ нм}$ (дБ/м)	
	прямое волокно	«восьмерка»
Круглая	0,3±0,05	0,6±0,05
D-образная	2,2±0,05	2,2±0,05
Прямоугольная	3,5±0,05	3,5±0,05
Квадратная	3,3±0,05	3,3±0,05

ной гранью ($125 \times 100 \text{ мкм}$), прямоугольная ($150 \times 75 \text{ мкм}$), квадратная ($125 \times 125 \text{ мкм}$). Для этих образцов было измерено поглощение в полосе иттербия для двух конфигураций: для прямых световодов и для световодов, изогнутых в форме восьмерки с радиусом изгиба 1 см. Использование последней конфигурации должно было способствовать перемешиванию мод оболочки и увеличению поглощения в полосе Yb^{3+} , если связь части мод оболочки с сердцевиной отсутствует для прямого оптического волокна. Из результатов измерений, представленных в таблице 2.2, следует, что введение нерегулярного изгиба световода приводят к изменению поглощения только для образца с круглой формой внутренней оболочки, поэтому можно сделать вывод, что каждая использованная некруглая геометрия внутренней оболочки позволяет получить эффективность поглощения накачки, близкую к 100%.

D-образная форма выглядит наиболее простой для изготовления, поскольку требуется шлифовка лишь одной грани заготовки. Однако сварка такого световода со световодом, имеющим круглую форму оболочки и используемым для изготовления брэгговских решеток, приводит к достаточно большим потерям в точке соединения из-за его асимметричной формы. Таким образом, оптимальной геометрией оболочки является квадратная форма, позволяющая добиться как высокой эффективности поглощения излучения накачки, так и малых оптических потерь при сварке с круглыми волокнами. Можно использовать и другие геометрии оболочки, в частности шестиугольную форму.

Для ряда задач необходимо использовать активные световоды с малым диаметром внутренней оболочки (30–60 мкм), накачиваемые более яркими полупроводниковыми источниками. Применение световодов с полимерным покрытием вызывает трудности из-за слишком малого внешнего диаметра, который не допускает использования сварочных аппаратов для соединения с другими волоконными световодами. В этом случае можно применять волоконный световод с двойной оболочкой на основе кварцевых стекол разного состава. В таком световоде в качестве внешней оболочки используется опорная труба из кварцевого стекла, а в качестве внутренней — кварцевое стекло с достаточно большим содержанием GeO_2 . Недостатком этой конструкции является ограничение сверху числовая апертуры световода на основе внутренней оболочки из-за разрушения заготовки, обусловленного разностью коэффициентов термического расширения для материалов внутренней и внешней оболочек. Вероятность разрушения заготовки повышается при больших геометрических размерах осажденной оболочки. Поэтому на практике числовая апертура для излучения накачки составляет 0,2–0,25, что существенно ограничивает вводимую мощность накачки.

Другим вариантом является использование активного световода с микроструктурированной оболочкой, поперечное сечение которого представлено на рисунке 2.7.

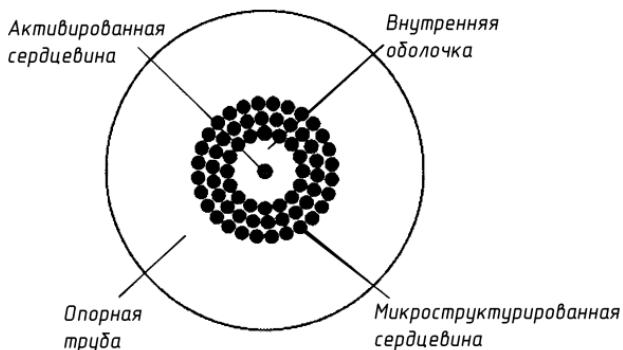


Рис. 2.7

Схема волоконного световода с микроструктурированной оболочкой:
черные кружки — воздушные промежутки.

Характерное значение числовой апертуры таких световодов составляет 0,5 и ограничивается вытеканием мод высших порядков через перемычки, поддерживающие внутреннюю оболочку. Большое значение NA позволяет увеличить плотность накачки в несколько раз по сравнению с предыдущей конструкцией световода при использовании идентичных источников накачки и сохранении диаметра внутренней оболочки.

2.4. СХЕМЫ НАКАЧКИ АКТИВНЫХ СВЕТОВОДОВ

Для накачки активного волоконного световода с двойной оболочкой было предложено несколько способов. Наиболее простым из них является случай торцевой накачки, когда излучение полупроводникового источника вводится в активный световод через торец (см. рис. 2.1). Достоинством такого способа является возможность его использования для всех описанных выше типов световодов с двойной оболочкой. К его недостаткам относится возможность использования лишь одного источника накачки (лазерного диода или их сборки), поэтому вводимая в световод мощность ограничена современными возможностями полупроводниковой технологии.

Две других схемы накачки используют принцип распределения вводимого излучения накачки по длине активного световода. Для ввода накачки можно использовать набор V-образных канавок, изготовленных на боковой поверхности световода. Принцип этого ввода накачки показан на рисунке 2.8.

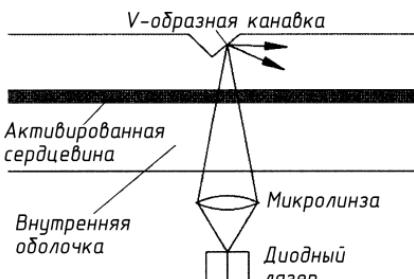


Рис. 2.8
Схема накачки через
V-образную канавку

Несомненным достоинством такого способа является возможность добавления источников по длине активного световода по мере истощения мощности от предыдущего источника. К недостаткам следует отнести необходимость фиксации полупроводникового лазера относительно активного световода и защиты области ввода от внешних воздействий.

Особенностью другого способа накачки является использование специального двойного волоконного световода, представляющего собой два волоконных световода с общим полимерным покрытием, имеющим пониженный по сравнению с кварцевым стеклом показатель преломления (GTW-световод). Один из световодов (активный) имеет сердцевину, легированную ионами иттербия, а второй (пассивный) — представляет собой волокно из высокочистого кварцевого стекла. Соответствующая конфигурация представлена на рисунке 2.9.

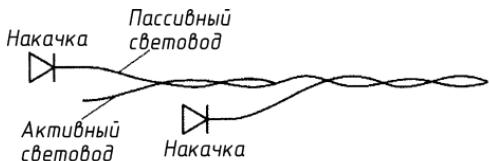


Рис. 2.9
Схема накачки с использованием двойного световода

Излучение накачки от полупроводникового излучателя вводится в пассивный световод. В области контакта световодов происходит перераспределение мощности накачки, введенной в пассивный световод, по двум световодам, при этом отношение мощностей накачки в обоих световодах определяется отношением площадей их оболочек. При распространении по активному световоду поглощение части накачки в его сердцевине компенсируется дополнительной перекачкой излучения из пассивного световода, необходимой для поддержания постоянного отношения мощностей накачки в активном и пассивном световодах. Таким образом, происходит распределенная накачка по всей длине активного световода. В данной схеме возможно использование двух источников накачки, излучение которых вводится с противоположных концов пассивного световода, а также разрыв пассивного световода в области истощения

мощности накачки и добавление следующего источника (рис. 2.9). Кроме того, можно увеличить число пассивных световодов в сборке, что позволит, в свою очередь, увеличить количество источников накачки.

2.5. ОСОБЕННОСТИ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ КАК УСИЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ

Активные волоконные световоды как усилительная среда обладают рядом особенностей по сравнению с лазерными кристаллами и стеклами. Так, волноводный характер распространения фотонов накачки и сигнала, как правило, исключает потери на их излучение через боковые поверхности среды. Только при неправильном выборе параметров световода либо при наличии изгиба световода с малым радиусом могут возникать излучательные потери. Это является несомненным преимуществом волоконных лазеров по сравнению с обычными твердотельными лазерами. Однако характерная длина активной среды волоконных лазеров составляет единицы и десятки метров, поэтому при анализе их эффективности существенным является учет нерезонансных оптических потерь как излучения накачки, так и излучения сигнала.

Другие особенности волоконных лазеров обусловлены тем, что в одномодовом волоконном световоде излучение распространяется не только в сердцевине, но и в отражающей оболочке, при этом доли мощности в сердцевине и оболочке могут оказаться сопоставимыми. Кроме того, можно вводить активную примесь не во всю сердцевину, а лишь в часть ее, либо легировать часть оболочки световода. В принципе, можно легировать различные области световода различными активными примесями, при этом взаимодействие ионов в общепринятом смысле отсутствует, а есть лишь их оптическая связь.

Таким образом, классические выражения для усиления в случае волоконных световодов должны быть модифицированы. Приведем соотношения для эволюции мощности сигнала и накачки в трехуровневой схеме усиления, по

которой работает большинство реализованных волоконных лазеров:

$$\frac{dP_s}{dz} = \chi_s [N_1 \sigma_e(\lambda_s) - N_0 \sigma_a(\lambda_s)] P_s - \alpha_s P_s; \quad (2.5)$$

$$\frac{dP_p}{dz} = -\chi_p N_0 \sigma_a(\lambda_p) P_p - \alpha_p P_p, \quad (2.6)$$

где P_s и P_p , λ_s и λ_p — мощности и длины волн излучения сигнала и накачки соответственно; σ_a и σ_p — сечения поглощения и люминесценции; N_0 и N_1 — населенности основного и метастабильного уровней; α_s и α_p — коэффициенты нерезонансных потерь для сигнала и накачки; χ_s и χ_p — интегралы перекрытия полей излучения сигнала и накачки с активной областью.

$$\chi_{s,p} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} E_{s,p}(r) 2\pi r dr}{\int_0^{\infty} E_{s,p}(r) 2\pi r dr}, \quad (2.7)$$

где $E(r)$ — радиальное распределение соответствующего поля; r_1 и r_2 — границы области световода, легированной активными ионами.

В случае накачки в оболочку световода χ_p можно приблизительно оценить как

$$\chi_p \approx S_d / S_{cl}, \quad (2.8)$$

где S_d и S_{cl} — площади поперечного сечения легированной области и оболочки, по которой распространяется накачка. Подчеркнем, что приведенное соотношение является весьма приблизительным, поскольку интеграл перекрытия излучения накачки в данном случае зависит от распределения интенсивности излучения источника накачки, способа возбуждения, формы оболочки и т. д. Тем не менее, ясно, что использование накачки в оболочку эквивалентно существенному уменьшению сечения поглощения на длине волны накачки.

В этой главе рассматриваются характеристики реализованных волоконных лазеров на основе световодов, легированных различными редкоземельными элементами.

3.1. ЛАЗЕРЫ НА ОСНОВЕ СВЕТОВОДОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ Nd³⁺

Волоконный лазер на основе световода, легированного ионами Nd³⁺, излучающий в области 1,06 мкм, был первым лазером, который использовал накачку в оболочку. Это определялось тем, что первые мощные полупроводниковые системы накачки имели невысокую яркость и для ввода излучения накачки необходимо было использовать активные световоды с размером внутренней оболочки в несколько сотен микрометров. В результате инверсия населенности была также небольшой, и генерация оказывалась возможной лишь в системах, работающих по четырехуровневой схеме, где отсутствует перепоглощение сигнала.

В течение нескольких лет после первой публикации выходная мощность неодимовых лазеров превысила 30 Вт. На рисунке 3.1 представлены типичные (спектральная и мощностная) характеристики неодимового волоконного лазера на основе световода с оболочкой размером 290×290 мкм и активированной сердцевиной диаметром 5 мкм. Для накачки использовалась диодная матрица с длиной волны излучения 0,81 мкм.

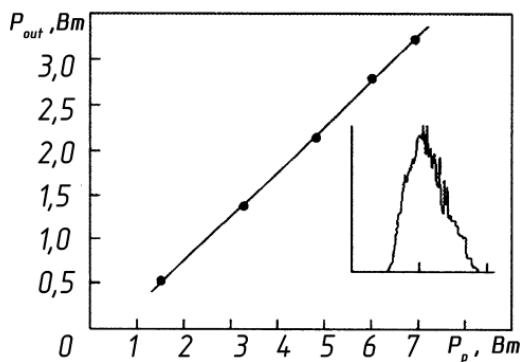


Рис. 3.1
Зависимость выходной мощности неодимового волоконного лазера от мощности накачки:
на вставке — спектр генерации лазера.

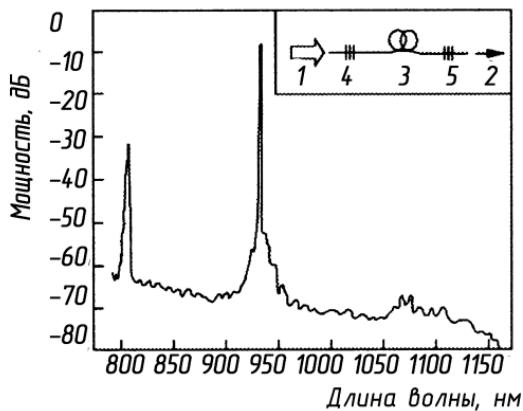


Рис. 3.2
Спектр излучения неодимового волоконного лазера на $\lambda = 925$ нм:
1 — излучение накачки,
2 — выходное излучение,
3 — активный световод,
4, 5 — брэгговские решетки.

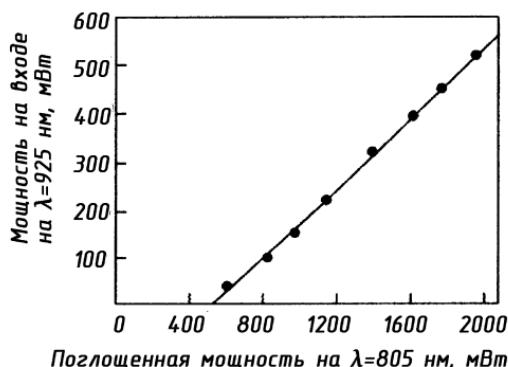


Рис. 3.3
Зависимость выходной мощности неодимового волоконного лазера на $\lambda = 925$ нм от поглощенной мощности накачки

Заслуживает внимания работа волоконного лазера, излучающего одновременно на двух длинах волн — 1060 и 1090 нм. Сердцевина световода легирована добавками алюминия и германия. При этом активные ионы попадали в различное окружение и имели разные спектры люминесценции.

При введенной мощности накачки 8,5 Вт лазер излучал более 3 Вт на длине волны 1060 нм и более 1 Вт на длине волны 1090 нм.

Значительный интерес представляет разработка неодимового лазера с длиной волны генерации в области 0,92 мкм. Такие лазеры могут найти применение для накачки иттербийового волоконного лазера, излучающего в области 0,98 мкм. В свою очередь, иттербийовый лазер, имеющий достаточно высокую мощность, может использоваться для накачки эрбьевых волоконных усилителей. Неодимовый лазер также может быть использован в схемах удвоения частоты для получения излучения в синей области спектра.

Реализация волоконных Nd-лазеров с использованием оптического перехода $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ затруднена из-за конкуренции со стороны люминесценции в области 1,06 мкм, поэтому основной проблемой создания такого лазера является подавление люминесценции в этой области. Для этого используется специальный волоконный световод с волноводной структурой, характеризующейся значительными потерями на вытекание в спектральной области $\lambda > 1$ мкм. Это позволило реализовать волоконный лазер с выходной мощностью 0,5 Вт на длине волны 925 нм. Спектр излучения лазера представлен на рисунке 3.2.

Подавление люминесценции на $\lambda = 1060$ нм составило около 60 дБ. На рисунке 3.3 представлена зависимость выходной мощности от мощности поглощенной накачки. Дифференциальная эффективность генерации составила около 35%.

3.2. ЛАЗЕРЫ НА ОСНОВЕ СВЕТОВОДОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ Yb^{3+}

Энергетическая схема уровней ионов иттербия в кварцевом стекле чрезвычайно проста: помимо основного уровня $^2F_{7/2}$ существует единственный возбужденный

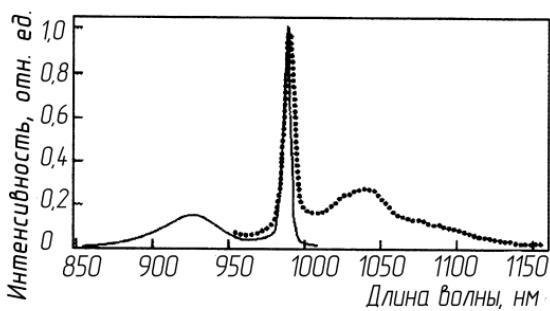


Рис. 3.4

Спектры поглощения (сплошная кривая) и люминесценции (пунктирная кривая) ионов иттербия в кварцевом стекле

уровень ${}^4F_{5/2}$. Отсутствие других энергетических уровней вплоть до УФ-диапазона означает, что в данной системе должно отсутствовать поглощение из возбужденного состояния и кооперативная ап-конверсия. Это позволяет существенно увеличить концентрацию активной примеси по сравнению с такими распространенными легирующими добавками, как неодим и эрбий. Использование световодов с высокой концентрацией активной примеси в свою очередь позволяет уменьшить длину активной среды лазера, а значит, и влияние дополнительных оптических потерь.

Спектры поглощения таких световодов, определяемые электронными переходами между расщепленными уровнями, характеризуются наличием сложной полосы поглощения с центрами на $\lambda = 915$ и 976 нм. Спектр люминесценции состоит из узкой линии с центром на 980 нм и полосы с максимумом на 1035 нм, простирающейся примерно до 1200 нм (рис. 3.4).

По литературным данным сечения поглощения и люминесценции в максимуме практически совпадают и составляют $2,5 \times 10^{-20} \text{ см}^2$ (кварцевое стекло было легировано алюминием и германием). Использование накачки в области 976 нм представляется более эффективным из-за большего сечения поглощения. В то же время, в результате накачки в полосу 915 нм может быть получена генерация в области 976 нм. Кроме того, при накачке в полосу 915 нм требования к длине волны излучения источника накачки и ее ста-

бильности при изменении температуры не столь высоки из-за большой ширины этой полосы.

Иттербийевые лазеры в настоящее время являются наиболее распространенным типом волоконных лазеров накачкой в оболочку.

Для реализации иттербийового волоконного лазера использовалась схема с брэгговскими решетками, записанными как собственно в активном световоде, так и в отрезках другого световода, сваренного затем с активным. Использовались активные световоды со следующими параметрами: разность показателей преломления сердцевины и оболочки $\Delta n = (9-11) \times 10^{-3}$, диаметр сердцевины $2a = 4,5-5,5$ мкм, концентрация ионов иттербия $(5-10) \times 10^{19}$ см $^{-3}$. Размер внутренней квадратной оболочки составил 120×120 мкм, что обеспечивало 100%-ную эффективностьстыковки световода с волоконным выходом полупроводникового источника накачки.

На рисунке 3.5а представлена типичная зависимость выходной мощности иттербийового волоконного лазера на длине волны 1100 нм от мощности накачки. Дифференциальная эффективность использования накачки в реализованном лазере составила 80%, что соответствует квантовой эффективности около 90%. На рисунке 3.5б показан спектр излучения лазера, измеренный с разрешением 0,01 нм, ширина спектра составила 0,1 нм.

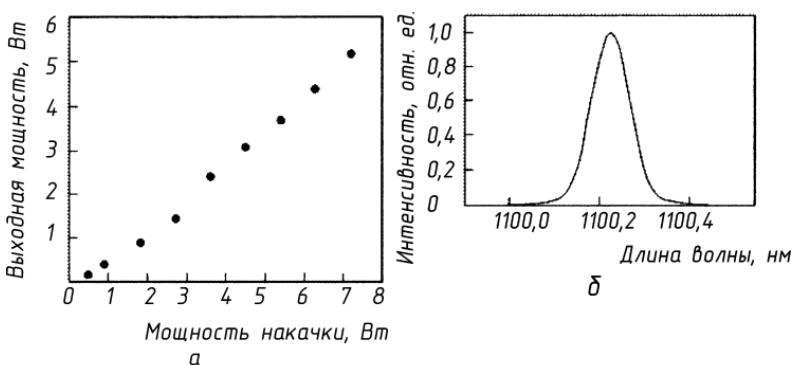


Рис. 3.5

Зависимость выходной мощности иттербийового волоконного лазера от мощности накачки (а) и спектр излучения (б)

Особенностью лазеров на основе активных волоконных световодов с накачкой в оболочку является то, что в таких устройствах трудно добиться полной инверсной населенности среды, поскольку эффективное сечение накачки уменьшается пропорционально отношению площадей оболочки и сердцевины световода. Поэтому на эффективность преобразования излучения накачки в лазерное излучение сильное влияние оказывает перепоглощение сигнала неинвертированной частью активных ионов. Спектр поглощения ионов иттербия характеризуется наличием длинноволнового края полосы поглощения с центром на 976 нм, при этом поглощении на длинах волн 1000 и 1060 нм составляет примерно 2 и 0,2% от поглощения на длине волны 976 нм соответственно. В то же время максимум люминесценции активных ионов локализован в области 1035 нм и также имеет протяженный длинноволновый край, поэтому эффективность волоконного лазера определяется конкуренцией между люминесценцией и перепоглощением сигнала, в свою очередь, определяя спектральную зависимость эффективности преобразования излучения накачки в лазерное излучение.

На рисунке 3.6 показана спектральная зависимость дифференциальной эффективности генерации для семи образцов волоконных лазеров. Видно, что максимальная дифференциальная эффективность составляет около 80% и достигается в спектральной области 1,08–1,11 мкм. На длине волны 1,049 мкм она спадает до 57%, что объясняется влиянием перепоглощения излучения. В длинноволновой области спад эффективности объясняется резким уменьшением сечения люминесценции.

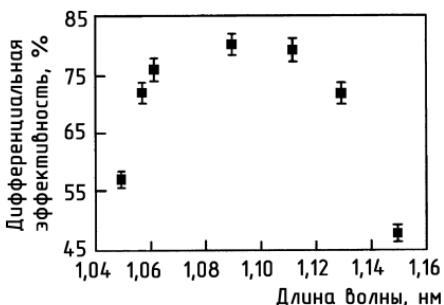


Рис. 3.6
Спектральная зависимость дифференциальной эффективности иттербиевого волоконного лазера с накачкой в оболочку

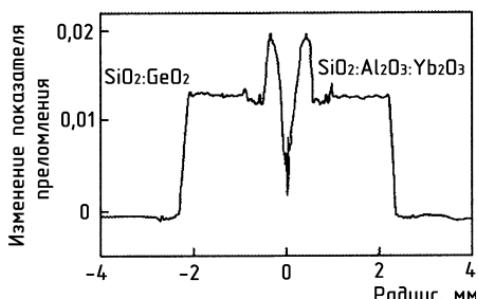
Полученные результаты справедливы для выбранной геометрии активного волоконного световода, т. е. для данного отношения площадей оболочки и сердцевины, составляющего около 500. Эффективность лазеров в коротковолновой части может быть повышена в результате увеличения диаметра активной сердцевины. Перспективным представляется также использование световодов с уменьшенным размером оболочки. Это выглядит возможным, учитывая современную тенденцию увеличения яркости полупроводниковых источников накачки.

Использование активных волоконных световодов с уменьшенным диаметром внутренней оболочки является особенно актуальным для реализации лазеров, излучающих в области 980 нм. Интерес в таким лазерам определяется возможностью их использования для накачки мощных эрбиевых усилителей. Как видно из рисунка 3.4, поглощение в этой области конкурирует с люминесценцией, что требует создания высокой степени инверсии населенности для получения лазерной генерации.

Для реализации лазера, излучающего области 980 нм, использовался активный световод с двойной оболочкой на основе стекол разного состава. На рисунке 3.7 показан профиль показателя преломления заготовки такого волоконного световода, изготовленный MCVD-методом.

Внутренняя оболочка световода являлась кварцевым стеклом с дополнительным легированием GeO_2 , молярная концентрация примеси в ней была около 10%, что обеспечивало числовую апертуру для излучения накачки, равную 0,22. Роль внешней оболочки в данном случае играла

Рис. 3.7
Профиль показателя преломления заготовки активного волоконного световода с оболочками на основе стекол разного состава



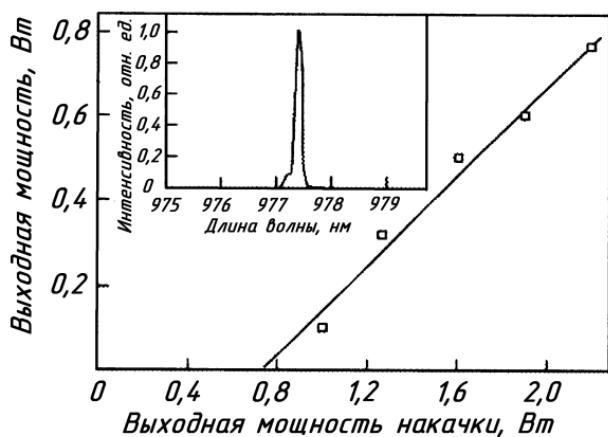


Рис. 3.8

Зависимость выходной мощности лазера на $\lambda = 977,5$ нм от входной мощности накачки:

на вставке — спектр излучения лазера.

опорная труба из кварцевого стекла. При изготовлении сердцевины использовалось легирование из раствора ионами иттербия и алюминием. Волоконный световод имел диаметр внутренней оболочки около 25 мкм и диаметр сердцевины 10 мкм. Концентрация ионов Yb^{3+} составляла около $2 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, что обеспечивало коэффициент поглощения 2,5 дБ/м на 915 нм. Входная брэгговская решетка лазера записывалась непосредственно на активном световоде, который предварительно пропитывался водородом. Накачка волоконного лазера осуществлялась полупроводниковым источником излучения с длиной волны 915 нм, позволяющим вводить около 5 Вт мощности в световод с диаметром 50 мкм и $\text{NA} = 0,22$.

На рисунке 3.8 (на вставке) представлен спектр излучения полученного волоконного лазера, генерация имеет место на длине волны 977,5 нм.

Максимальная мощность генерации достигалась при использовании в лазере активного волоконного световода длиной 1,5 м. Кроме того, показана соответствующая зависимость мощности генерации от вводимой мощности накачки. Дифференциальная эффективность преобразования на-

качки в сигнал составила 53%, а по отношению к поглощенной мощности — 82%.

Для ввода большей мощности накачки и, следовательно, достижения более высокой мощности генерации используется световод с микроструктурированной оболочкой. При этом числовая апертура внутренней оболочки, имеющей диаметр 20 мкм, составила 0,7, выходная мощность излучения на 980 нм — 1,4 Вт, при этом поглощенная мощность накачки равнялась 2,5 Вт. К недостаткам предложенной конфигурации следует отнести использование объемных зеркал в качестве отражателей, формирующих резонатор.

На основе волоконных световодов, легированных ионами Yb^{3+} , впервые был запущен многомодовый лазер с резонатором, сформированным многомодовыми брэгговскими решетками, записанными в многомодовом градиентном световоде с диаметром сердцевины 50 мкм. В качестве активной среды лазера использовался волоконный световод с диаметром легированной ионами Yb^{3+} сердцевины 16 мкм и с диаметром внутренней оболочки 50 мкм. Вследствие малой разности показателя преломления активированной сердцевины и внутренней оболочки ($\Delta n = 0,003$) генерация на торцах световода осуществлялась не только в основной mode, но и в модах внутренней оболочки, распределение полей которых достаточно хорошо перекрывались с сердцевиной. Были изготовлены и исследованы два волоконных многомодовых лазера с входными отражателями, имеющи-

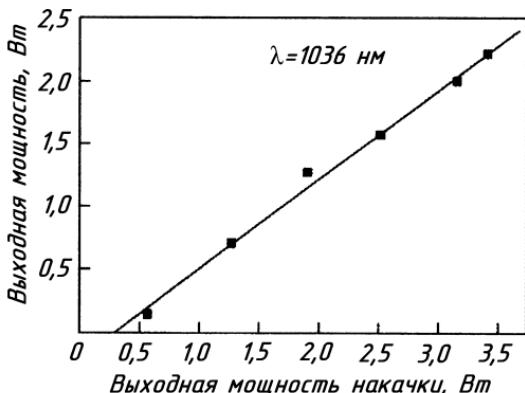


Рис. 3.9
Зависимость
мощности генерации
на $\lambda = 1036 \text{ нм}$ от
мощности накачки
для многомодового
волоконного лазера

ми резонансные длины волн 1,03 и 0,98 мкм. В качестве выходного отражателя в реализованных схемах использовался выходной торец активного световода. Зависимость выходной мощности лазера, излучающего на $\lambda = 1036$ нм, от мощности накачки представлена на рисунке 3.9.

Дифференциальная эффективность лазера составила 80%, что соответствует 90%-ной дифференциальной квантовой эффективности. Для лазера с длиной волны излучения 978 нм была достигнута выходная мощность 1,5 Вт. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что многомодовые решетки могут быть эффективно использованы в качестве отражателей в схемах многомодовых лазеров.

В последнее время для создания лазеров с повышенной выходной мощностью все большее распространение находят специальные волоконные световоды, представляющие собой объединение активного световода с пассивными [1]. Был из-

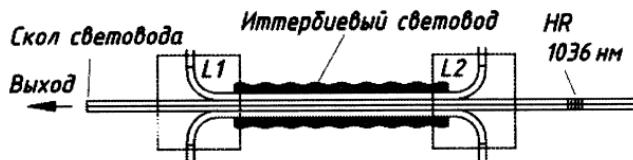


Рис. 3.10

Упрощенная схема волоконного лазера на тройном световоде:

$L1$ и $L2$ — точки разветвления световода; HR — брэгговская решетка с коэффициентом отражения, близким к 100% на $\lambda = 1072$ нм; в качестве выходного зеркала использовался скол световода, перпендикулярный его оси.

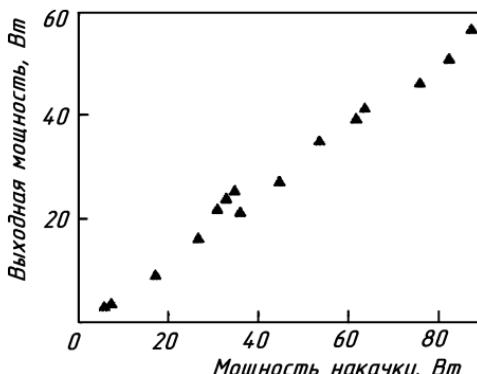


Рис. 3.11

Зависимость выходной мощности от мощности накачки для иттербийового волоконного лазера с накачкой через пассивные световоды

готовлен лазер на тройном световоде, являющимся объединением активного световода с двумя пассивными (рис. 3.10).

Использовались четыре источника накачки общей мощностью до 100 Вт. Выходная непрерывная мощность лазера составила 65 Вт на длине волны 1072 нм. Соответствующая зависимость выходной мощности от мощности накачки показана на рисунке 3.11.

3.3. ЛАЗЕРЫ НА ОСНОВЕ СВЕТОВОДОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ Er^{3+}

Ионы Er^{3+} в кварцевом стекле имеют полосу люминесценции с центром на 1,53 мкм, что позволяет реализовать волоконные лазеры и усилители для спектрально-го диапазона 1,53–1,6 мкм. Соответствующий спектр люминесценции ионов Er^{3+} в алюмогерманосиликатном стекле представлен на рисунке 3.12.

Источники излучения на основе волоконных световодов, легированных ионами эрбия, работают по трехуровневой схеме, что подразумевает необходимость достижения высокой степени инверсии населенности. Максимум полосы поглощения практически совпадает с максимумом люминесценции, поэтому в первой работе по реализации эрбьевого волоконного лазера с накачкой в оболочку использовалась волноводная структура с малым диаметром внутренней оболочки, позволяющим добиться высокой степени инверсии. Диаметр внутренней оболочки составил 22 мкм, числовая апертура равнялась 0,18. При мощности накачки 900 мВт

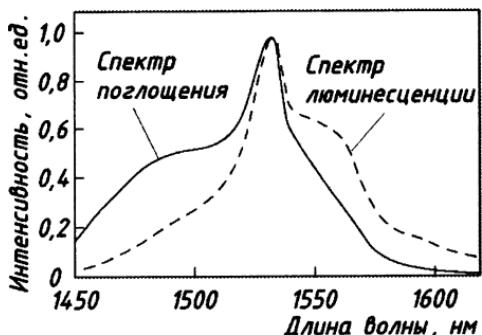


Рис. 3.12

Спектры поглощения и люминесценции ионов эрбия в алюмогерманосиликатном кварцевом стекле

($\lambda = 980$ нм) была получена лазерная генерация мощностью 300 мВт на длине волны 1540 нм. Дифференциальная эффективность составила 40%.

Понятно, что выходная мощность в данном случае ограничивается возможностями ввода мощности накачки во внутреннюю оболочку малого размера. В то же время, как видно из рисунка 3.12, в спектральной области 1,56–1,6 мкм (*L*-полоса) люминесценция доминирует над поглощением. Это позволяет снизить требования к степени инверсии населенности и использовать активные световоды с большим размером внутренней оболочки, и, следовательно, применять более мощные источники накачки. Использование активного световода с диаметром внутренней оболочки 50 мкм позволяет получить усиленный сигнал в *L*-полосе мощностью 1 Вт. Можно предположить, что такие световоды могут быть использованы и для создания лазеров, излучающих в этом спектральном диапазоне.

Для получения лазерной генерации в диапазоне 1,53–1,6 мкм чаще всего используют волоконные световоды, легированные одновременно ионами Yb^{3+} и Er^{3+} . В таких световодах эффективное поглощение накачки на длине волны 976 нм обеспечивается ионами Yb^{3+} , которые передают энергию возбуждения ионам Er^{3+} . Такая передача оказывается возможной благодаря близости энергетических уровней $^2F_{5/2}$ ионов иттербия и $^4I_{11/2}$ — ионов эрбия. Одной из проблем реализации такого световода является выбор и воспроизведение правильного химического состава сердцевины. Так, для того чтобы снизить вероятность обратной передачи энергии, необходимо уменьшить время жизни ионов Er^{3+} на возбужденном уровне $^4I_{11/2}$, что достигается использованием фосфоросиликатного стекла для материала сердцевины. Кроме того, важным является выбор соотношения концентраций активных ионов. Максимальная эффективность лазерной генерации (около 50%) достигается в случае, когда концентрация ионов иттербия превышает концентрацию ионов эрбия в 30 раз.

В настоящее время компанией IPG промышленным образом выпускаются волоконные лазеры с длиной волны излучения в диапазоне 1,53–1,62 мкм и выходной мощностью более 100 Вт. Отметим также, что волоконные свето-

воды, легированные ионами Er^{3+} и Yb^{3+} , используются для создания мощных одночастотных волоконных лазеров с шириной линии излучения менее 30 кГц и выходной мощностью более 5 Вт (при мощности накачки 25 Вт).

3.4. ЛАЗЕРЫ НА ОСНОВЕ СВЕТОВОДОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ Tm^{3+}

Эффективное использование накачки в оболочку световодов легированных ионами Tm^{3+} , затруднено тем, что генерация в области 1,8–2 мкм происходит по трехуровневой схеме. Однако ситуация облегчается наличием мощной полосы поглощения с центром на 787 нм, обусловленной переходом $^3H_4 \rightarrow ^3F_4$. Спектр поглощения волоконного световода, легированного ионами Tm^{3+} , показан на рисунке 3.13.

Кроме того, полосы поглощения и люминесценции, обусловленные переходом $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$, в кварцевом стекле, легированном ионами Tm^{3+} , существенно разнесены. Так, если центр полосы поглощения приходится в область 1600 нм, то центр линии люминесценции — в область 1800 нм. При этом ширина линии люминесценции составляет около 300 нм. Все это позволяет получить достаточную степень инверсии, при которой перепоглощение сигнала является несущественным в спектральной области $\lambda > 1,8$ мкм.

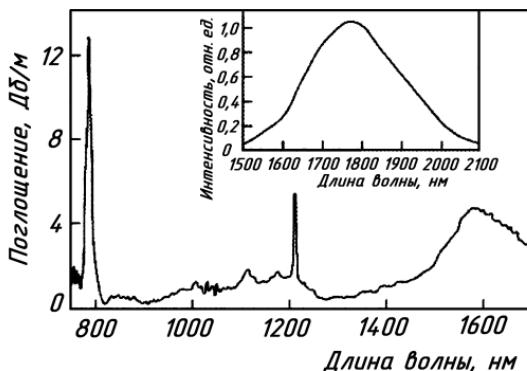


Рис. 3.13
Спектр поглощения волоконного световода,
легированного ионами тулия:
на вставке — спектр люминесценции.

3.5. ЛАЗЕРЫ НА ОСНОВЕ СВЕТОВОДОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ Ho^{3+}

Ионы Ho^{3+} имеют переход $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$, который может быть использован для получения лазерной генерации в области 2 мкм. На рисунке 3.14 представлен спектр люминесценции волоконного световода, легированного ионами Ho^{3+} , при возбуждении излучением криптонового лазера на длине волны 676 нм. Данная длина волны соответствует переходу $^5I_8 \rightarrow ^5I_4$. Постоянная времени люминесценции составила 0,5 мс.

Для создания волоконного Ho^{3+} -лазера использовался активный световод с сердцевиной на основе алюмогерманосиликатного стекла, введение активного иона осуществлялось методом пропитки. По оценке концентрация активной примеси составила $1,2 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Разность показателей преломления сердцевины и оболочки световода была около 0,08, длина волны отсечки лазера, первой высшей моды лежала в области 1,5 мкм.

На рисунке 3.15 показан спектр оптических потерь изготовленного световода.

Поскольку гольмиеевые волоконные лазеры работают по трехуровневой схеме, то для получения инверсии населенности необходимо эффективное поглощение накачки. Наиболее сильные полосы поглощения находятся в видимой области, поэтому в первом продемонстрированном гольмиеевом лазере накачка осуществлялась аргоновым лазером

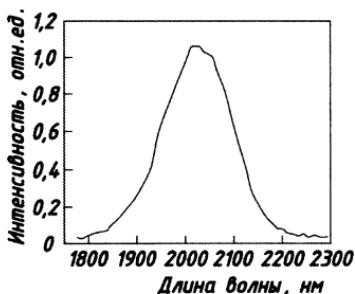


Рис. 3.14
Спектр люминесценции ионов гольмия в кварцевом стекле

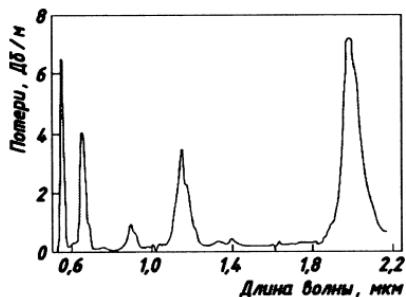


Рис. 3.15
Спектр поглощения волоконного световода, легированного ионами гольмия

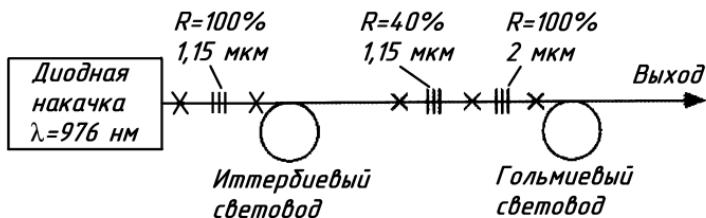


Рис. 3.16
Схема гольмиеевого волоконного лазера,
крестиками показаны точки сварки

с $\lambda = 457,9$ нм. Волоконный лазер имел относительно низкую дифференциальную эффективность (1,7%) и максимальную выходную мощность (0,67 мВт) при поглощенной мощности накачки 85 мВт.

Очевидно, что эффективное практическое применение гольмиеевых волоконных лазеров требует использования полупроводниковых лазеров для накачки. Однако существующие мощные источники работают на длинах волн более 750 нм и не могут быть использованы для накачки в полосы поглощения гольмия в видимом диапазоне. В то же время использование полосы поглощения, локализованной в области 900 нм, представляется малоперспективным вследствие слабого поглощения.

Использование мощных иттербийевых лазеров с диодной накачкой в оболочку позволило создать эффективный гольмиеевый волоконный лазер, в котором накачка проводится в сильную полосу поглощения на 1,15 мкм, которая соответствует переходу $^5I_8 \rightarrow ^5I_6$. Схема реализованного лазера показана на рисунке 3.16.

В качестве активной среды использовался легированый гольмием световод с параметрами, указанными выше. Брэгговская решетка имела резонансную длину волны 2001 нм с шириной линии 1 нм и коэффициент отражения более 99%.

Выходной торец световода был использован в качестве выходного 4%-ного зеркала. Для накачки в сердцевину гольмиеевого волоконного лазера использовался иттербийевый волоконный лазер с $\lambda = 1150$ нм и максимальной выходной мощностью 3 Вт.

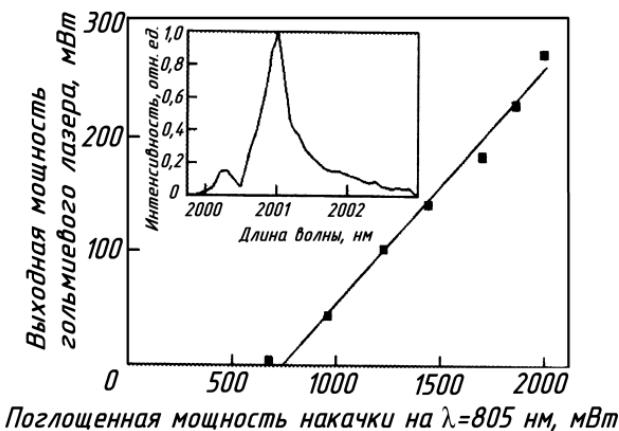


Рис. 3.17

Зависимость выходной мощности гольмиеевого волоконного лазера в области 2 мкм от поглощенной мощности накачки:

на вставке — спектр излучения лазера.

На рисунке 3.17 проиллюстрирована зависимость выходной мощности гольмиеевого лазера от поглощенной мощности накачки иттербийевого лазера для длины резонатора 4,5 м. Максимальная выходная мощность 280 мВт была достигнута при поглощенной мощности накачки 2 Вт, дифференциальная эффективность составила 20%. Здесь же показан выходной спектр излучения гольмиеевого лазера измеренный с разрешением 0,2 нм. Длина волны генерации определялась резонансной длиной волны брэгговской решетки, ширина линии излучения лазера была около 0,4 нм.

Эффективность генерации описанного гольмиеевого лазера существенно снизили высокие дополнительные оптические потери в активном световоде (0,65 дБ/м на $\lambda = 1,3$ мкм). В принципе, возможно изготовить образцы с оптическими потерями порядка 0,01 дБ/м, в этом случае дифференциальная эффективность генерации может быть увеличена примерно до 25%.

В настоящее время мощность полупроводниковых источников накачки, имеющих волоконный выход с диаметром сердцевины 100 мкм, достигает 20 Вт.

В последние несколько лет были реализованы и исследованы гольмиеевые лазеры с использованием дополнительного легирования ионами тулия и иттербия. Накачка осуществлялась в полосы поглощения данных элементов с передачей возбуждения ионам гольмия. Это позволило использовать накачку в оболочку активного световода. Для системы Tm:Ho выходная мощность была равна 5 Вт на длине волны излучения около 2,1 мкм при мощности накачки 20 Вт. Для системы Yb:Ho выходная мощность составила 0,85 Вт при мощности накачки 11 Вт.

Лазерный источник в технологических применениях не является, как правило, конечным инструментом. Это источник светового потока с высокой мощностью или энергией с определенными свойствами, которые позволяют преобразовать его в инструмент, выполняющий при наличии разных дополнительных условий технологическую операцию. Лазерная технологическая головка как раз и обеспечивает эту финишную функцию сборки потоков лучевой энергии и потоков других необходимых веществ. Кроме того, в технологическую головку могут быть интегрированы сенсоры разного типа, как контрольно-аварийные, так и обеспечивающие функции управления процессом (например, слежение за поверхностью).

Рассмотрим имеющиеся на рынке технологические головки и основные тенденции их развития. Это поможет технологам лучше ориентироваться при формировании спецификаций на лазерную технологическую систему [8].

4.1. ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ ЛАЗЕРНЫХ ГОЛОВОК

4.1.1. ОПТИЧЕСКАЯ ФУНКЦИЯ

Естественно, что главная функциональность — оптическая: преобразование оптического потока, выходящего из транспортного оптического волокна лазера. Световое излучение выходит из среза в виде конуса с полным углом 0,2–0,4 радиана (в зависимости от модового типа во-

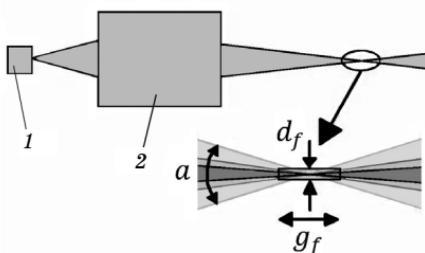


Рис. 4.1
Оптическое преобразование
светового потока
лазерной головкой:
1 — лазер; 2 — лазерная головка.

локна) и в этом виде непригодно для термических операций. Хотя есть исключения — можно выполнять сварку тонких металлов просто излучением, выходящим из кварцевого волокна — за счет очень высокой стойкости кварца срез разрушается довольно медленно. Это единственный нам известный способ использования волоконного лазера без лазерной головки — но все равно необходимо подавать защитный газ и выполнять модуляцию мощности излучения.

Оптическая функция (рис. 4.1) состоит в формировании области высокой концентрации лучевой энергии в зоне обработки. Часть технологических процессов использования мощных лазеров (сварка и резка) с точки зрения физики процесса существенно трехмерна, таким образом, важен не только диаметр пятна фокусировки d_f , но и характерная длина перетяжки пучка. Эти величины можно оценивать, исходя из указанного в паспорте волоконного лазера параметра качества излучения BPP (Beam Production Parameter) и угла фокусировки выходного пучка, который можно рассматривать как отношение фокусного расстояния выходной линзы F_l и апертуры пучка D до этой линзы $a = D/F$ (эти параметры указываются в спецификации лазерной головки):

$$d_f = 4 \times \text{BPP}/a, \quad f = g_f \times \text{BPP}/a^2. \quad (4.1)$$

Следует учитывать, что распределение интенсивности потока в лазерном пучке неоднородно и приведенные оценки дают характерные размеры высокоэнергетической зоны пучка, причем для хорошо спроектированной системы с минимальной сферической aberrацией. Для многих технологических применений неоднородность пучка весьма предна; так, при термической закалке она приводит к тому, что

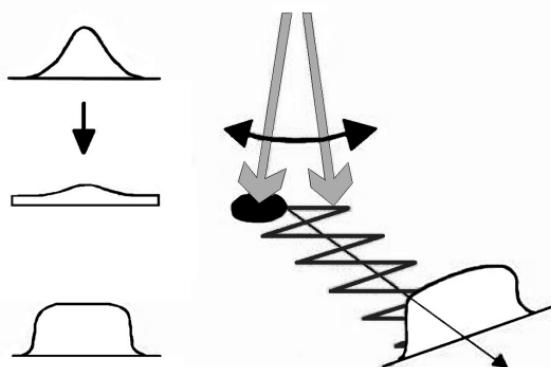


Рис. 4.2

Два метода выравнивания распределения светового потока — статический (слева) и динамический (справа)

в центре металла доводится до плавления, а на периферии глубина закалки недостаточна. Поэтому в состав оптических функций нужно дополнительно включать выравнивание интенсивности — либо статическим методом (рис. 4.2), скажем, за счет использования асферической оптики, либо динамическим, за счет быстрого сканирования (развертки) лазерного пучка по поверхности по оптимальному закону. Сканирование также необходимо в ряде случаев для сварки больших толщин, оно обеспечивает расширение парогазового канала, улучшение дегазации и исключение пор и других дефектов сварного шва.

Кроме всей этой функциональности важно, чтобы оптическая система передавала лучевую мощность с малыми потерями и не ухудшала качество лазерного пучка. В настоящее время есть фактически только один оптический материал, пригодный для изготовления линз для волоконных лазеров мощностью 500–20 000 Вт — кварцевое стекло разных марок с качественным просветляющим покрытием. Характерные потери на одной линзе для таких элементов составляют 0,3–0,5%, общие потери мощности в лазерной головке не превосходят 1,5–3%. Передаваемая мощность ограничивается как лучевой стойкостью оптических элементов, так и формированием термических линз из-за изменения показателя преломления кварцевого стекла при нагреве в зоне прохождения лазерного пучка. Для

кварца эффект всегда положительный, т. е. в первом приближении тепловые линзы эквивалентны появлению положительных линз в системе, так что проявляется этот эффект на практике в смещении точки фокуса в сторону лазерной головки. Моделирование по методикам [6] показывает, что характерное время формирования тепловой линзы составляет 2–20, так что эффект возникает практически сразу, а не «при длительной работе», как часто ошибочно считается.

Лучевая стойкость высококачественных линз весьма велика и превышает значение $5 \text{ кВт}/\text{см}^2$, а вот термические линзы могут возникать при существенно меньшей плотности мощности и именно они могут ограничивать предельную рабочую мощность системы. Если воспользоваться практическим опытом лидера в производстве лазерных головок Precitec, то можно, исходя из доступной технической документации, построить график необходимой апертуры системы от мощности передаваемого потока (рис. 4.3) и определить, что практическое значение рабочей плотности мощности, усредненное по апертуре, составляет около $0,6\text{--}0,7 \text{ кВт}/\text{см}^2$. Весь набор оптической функциональностиведен в таблицу 4.1.

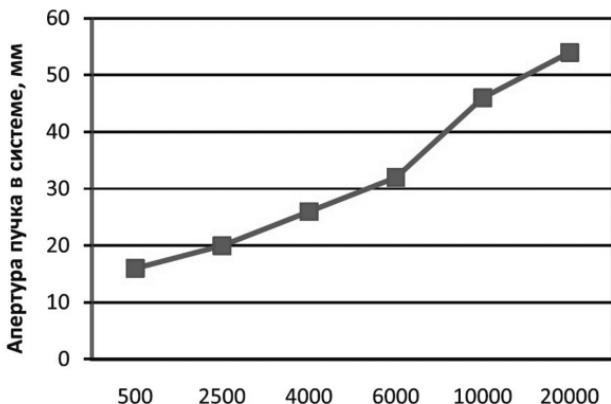


Рис. 4.3
Зависимость апертуры пучка внутри системы
от предельной передаваемой мощности
(исходя из технической документации фирмы Precitec)

Таблица 4.1

Оптическая функциональность лазерных головок

Функция	Технологические процессы	Методы реализации
Передача лучевого потока с минимальными потерями мощности и качества пучка	Все	Использование оптических компонентов с малыми потерями на поглощение и рассеяние, а также с малыми термическими наводками
Формирование пятна с заданной плотностью мощности на поверхности материала	Сварка и резка малых толщин, закалка, наплавка, перфорация, очистка	Оптическое преобразование пучка линзами или зеркалами
Формирование трехмерной области высокой концентрации лучевой энергии	Резка и сварка металла больших толщин	То же с оптимизацией геометрических параметров перетяжки пучка
Формирование равномерного пятна термического нагрева	Закалка, наплавка, очистка	Использование асферических оптических элементов (а также градиентной оптики)
Динамическое выравнивание энергетического потока	Закалка, наплавка, очистка, сварка больших толщин	Использование сканеров-приводов быстрого управления направлением пучка

4.1.2. ФУНКЦИИ ЮСТИРОВКИ

Из-за неточностей изготовления деталей головки, в том числе и оптических, посадок, сборочных отклонений и т. п. возникает необходимость согласования пространственного положения элементов головки и положения лазерного пучка (рис. 4.4). Особенno это важно для процесса лазерной резки, где фокусированный лазерный пучок ходит через небольшое (0,5–1,5 мм) отверстие в сопле. Поэтому в конструкцию лазерной головки вводят элементы, обеспечивающие согласование оптической оси лазерного пучка и оси газового сопла, — обычно это механические элементы (набор регулировочных винтов), обеспечивающие такую юстировку за счет взаимного смещения узлов головки. Ничто, в принципе, не мешает эту функцию автоматизировать и сле-

дует ожидать появления лазерных головок, обеспечивающих автоматизированное совмещение осей.

Далее нужно установить оптимальное положение точки фокуса пучка относительно среза сопла. Для этого в большинстве головок имеется микрометрический механизм смещения фокусирующей линзы относительно корпуса. Проблема, однако, состоит в том, что из-за разницы показателя преломления кварца для мощного пучка с длиной волны 1080 нм и для длины волны встроенного в лазер пилотного источника (красный, около 630 нм) точки фокуса смещены на расстояние 2–5 мм, и по пилотному пучку без учета этого смещения выполнить операцию установки оптимального расстояния z не удается. В результате пользователю приходится проводить экспериментальные работы на материалах (например, выполнять серии треков на мощном пучке) для выяснения реального положения фокуса мощного пучка.

Технология обработки требует, чтобы точка фокуса пучка находилась на заданном расстоянии Δf от поверхности материала, если смещение Δz установлено, то необходимо просто поддерживать требуемое значение расстояния от среза сопла до детали $\Delta f = \Delta z$ (с учетом знаков, так как фокус может быть и заглублен под поверхность). Функция поддержания расстояния в большинстве головок реализуется на основе введения в конструкцию емкостного датчика расстояния от сопла до детали. Сопло конструктивно изолируется от корпуса головки диэлектрическим элементом, и специальная электроника измеряет емкость между промежутком соплометаллический лист и преобразует в электрический сигнал, несущий информацию о расстоянии, который передается в систему управления координатной системой для выполнения корректировки положения головки.

Иногда технология качественной лазерной резки может включать управление положением точки фокуса относитель-

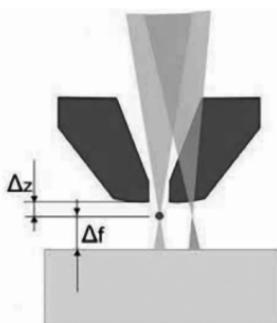


Рис. 4.4
Взаимное положение сопла лазерной головки, детали и лазерного пучка

но листа. Так, раскройные столы фирмы Trumpf с СО₂-лазерами включают режимы врезки с перемещением точки фокуса относительно листа с использованием адаптивного зеркала. Следовательно, функция осевого перемещения точки фокуса в технологических установках для волоконных лазеров также прямой кандидат на автоматизацию и перевод на электронное управление, но пока реализована только в нескольких моделях головок.

4.1.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ

Лазерный технологический процесс требует также подачи в зону обработки веществ (газов, наплавочных материалов). Все эти потоки должны быть согласованы и синхронизированы с потоком лучевой энергии. Простейший вариант — подача режущего газа через коаксиальное сопло при лазерной резке. В качестве газа используется чистый кислород, сжатый воздух, азот, а также смеси газов. Избыточное давление газа в выходной камере перед соплом может составлять от 0,3 до 15 атм, а в технологии лазерно-кислородной резки листов большой толщины LasOx [2] до 40 атм. Следовательно, конструкции выходных камер головок для резки должны быть рассчитаны на высокое статическое давление газа.

Технология лазерной сварки выдвигает иные требования к газовой смеси. Во-первых, требуется защитить ванну расплава инертным газом (как правило, аргоном). Во-вторых, подавать в зону активного взаимодействия лазерного пучка с металлом и паром газовые смеси для управления процессом. Последнее обязательно при лазерной сварке СО₂-лазерами при мощности выше 42 кВт [8], но является пока дискуссионным для лазерной сварки волоконными лазерами. Пока, как правило, плазмоподавляющие и управляющие смеси не используют, но есть экспериментальные данные, что и в случае лазерной сварки мощными волоконными лазерами можно эффективно управлять сварочным процессом за счет использования газовых смесей. На рисунке 4.5 представлена сопловая часть лазерной головки VF001M, в которой реализована двойная газовая схема — лазерный



Рис. 4.5
Сварочная насадка к лазерной головке VFO01M

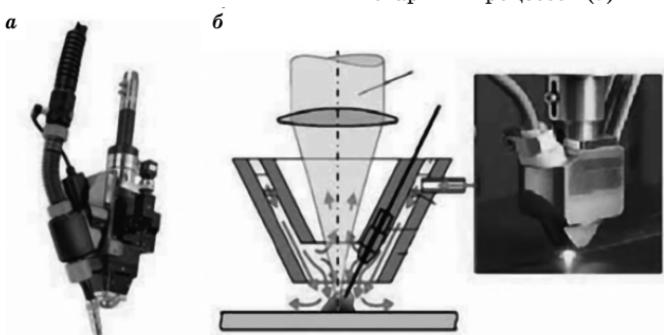


Рис. 4.6
Головка для гибридной сварки
фирмы Precitec (а) и вариант
более глубокой интеграции двух
сварочных процессов (б)

пучок проходит через центральное коаксиальное отверстие, через систему отверстий вблизи оси подается контролируемая газовая смесь в зону активного взаимодействия, а периферийная зона формирует окутывающий ламинарный поток аргона для защиты сварного шва. Такая головка неприменима для скоростной сварки линейных швов, так как зона защиты шва при высоких скоростях недостаточна по длине, но идеально годится для качественной сварки с максимальной глубиной проплавления и контурной сварки, в том числе и таких критических материалов, как титановые сплавы.

В простейшем варианте при лазерной термообработке не используются сопловые системы и защитные газы, но в идеале требуются специальные насадки для защиты металла от окисления или для активации диффузионных процессов насыщения поверхностного слоя металла из газовой фазы.

Лазерная наплавка требует подачи в зону нагрева порошковых материалов или проволок, если смотреть на опыт развития наплавочных процессов на основе лазеров, то это

могут быть достаточно сложные и гибко управляемые системы с пространственной раскладкой порошковых струй сканирующими соплами.

Гибридные способы лазерной сварки требуют интеграции в сварочной насадке лазерной части с дуговыми сварочными инструментами. В простейшем случае это почти механическая суперпозиция систем, как в гибридной головке фирмы Precitec (рис. 4.6а), в более сложных системах — это сквозная интеграция (рис. 4.6б).

4.1.4. КОНТРОЛЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ

Лазерная технологическая головка является энергетически нагруженным объектом, передающим большую мощность, поэтому разумно снабжать ее сенсорами и защитными функциями. Сюда можно отнести следующие опции:

- мониторинг температуры корпуса или отдельных зон, который может давать информацию о деградации оптических элементов и ошибках юстировки системы;
- прямой мониторинг состояния оптики;
- встроенный контроль мощности лучевого потока;
- датчики давления или расхода технологических газов.

Все это важно, особенно для полностью автоматизированных процессов, так как мониторинг состояния позволит предотвратить не только выпуск бракованной продукции, но и разрушение довольно дорогостоящего устройства.

В этот же раздел можно добавить функции защиты оптики, поскольку материальный процесс лазерной обработки непременно связан с активным выделением паров, брызг и других потоков, способных разрушить оптические свойства выходной поверхности. В процессе лазерной резки достаточно использовать сравнительно дешевый элемент — защитное стекло (как расходный материал), так как существует естественная защита в виде осевого потока режущего газа. При лазерной сварке и некоторых других процессах такая защита отсутствует и приходится использовать шторные газодинамические завесы перед защитными стеклами, основанные на использовании щелевых сопел, формирующих плоский защитный воздушный экран.

4.1.5. ФУНКЦИИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ АДАПТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА

При использовании лазерных головок в роботизированных комплексах возникает необходимость функций предварительного, текущего и финишного контроля процесса. Наиболее явно это можно пояснить на процессе лазерной сварки. Подготовленные под сварку элементы никогда не обладают абсолютной точностью ни по геометрии элементов, ни по зазорам, ни по пространственному положению относительно координатной системы манипулятора. Поэтому возникает задача предварительного сканирования расположениястыка и зазора между элементами в пространстве и последующей корректировки программы движения. Это не будет идеальным решением, так как в ряде случаев зазор может меняться непосредственно во время сварочного процесса из-за термических напряжений. Поэтому идеальное решение будет состоять в использовании встроенных в головки трех систем сенсоров, формирующих, по терминологии фирмы Precitec, сквозную систему контроля качества лазерной сварки LWQC — Laser Welding Quality Control. Система должна содержать:

- сенсоры предварительного измерения геометрии сварного шва STS — Seam Tracking Systems;
- сенсоры текущего контроля LWM — Laser Welding Monitor;
- сенсоры контроля финишной геометрии сварного шва SGM — Seam Geometry Monitor.

Это в равной мере касается и других технологических процессов, например, лазерной закалки и лазерной очистки.

На данном этапе развития конструкций лазерных головок эта функциональность реализована в минимальной стадии. В серийные лазерные головки обязательно встроена возможность подключения емкостного сенсора расстояния, и некоторые производители встраивают в головки модуль видеосенсора, который позволяет производить предварительное обучение робота по положениюстыка (рис. 4.7) На выставке «Машиностроение-2009» фирма Trumpf демонстрировала полностью автоматический процесс сварки коробчатых деталей, в котором использовался встроенный видеопо-

Рис. 4.7

Лазерная сварочная головка YW50 фирмы Precitec со встроенным модулем видеосенсора (осевой вариант)

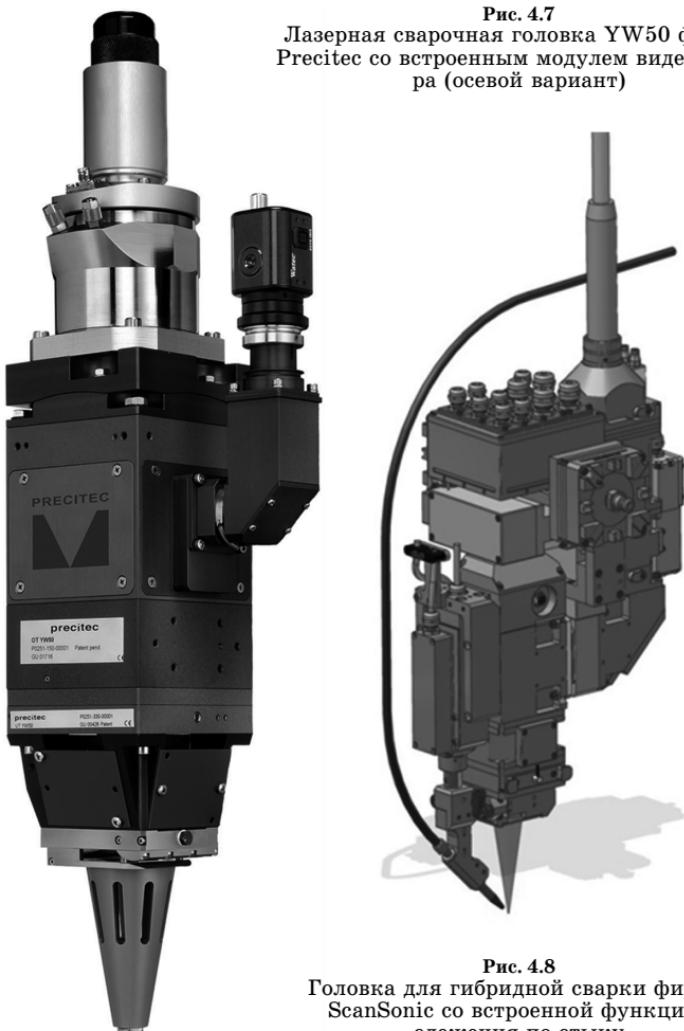


Рис. 4.8

Головка для гибридной сварки фирмы ScanSonic со встроенной функцией слежения по стыку

сенсор для предварительного сканирования положения стыка деталей, а сварка производилась на втором проходе. Из беседы со специалистами фирмы выяснилось, что система надежно работает только при применении высококачественного полированного металла заготовок. Это только подтверждает, что системы адаптации процесса сварки пока находятся в самом зачаточном состоянии.

Из альтернативных решений следует упомянуть лазерные сварочные головки фирмы ScanSonic (рис. 4.8), снабженные системой механического слежения по стыку на основе щупа или подаваемой присадочной проволоки в случае гибридных способов сварки. Такую систему можно отнести к классу LWM, так как сварка и слежение выполняются в едином проходе. Тем не менее, вряд ли это решение имеет большую перспективу для лазерной сварки, следует ожидать активного развития именно оптических сенсоров, особенно на основе телекамер с лазерной подсветкой.

ГЛАВА 5 ОБЗОР ИЗДЕЛИЙ НА РЫНКЕ

Большинство лазерных головок для волоконных лазеров выполнены по схеме, представленной на рисунке 5.1.

Первая часть представляет собой кварцевый дублет и служит для преобразования расходящегося пучка в параллельный, поэтому ее называют коллиматором. Вторая часть — фокусирующая одиночная кварцевая линза, которая и производит конечную фокусировку лучевой мощности на обрабатываемом изделии.

Эта схема обладает приемлемыми, хотя и не идеальными оптическими параметрами и является основой большинства лазерных головок. Обычно фокусное расстояние выходной линзы f в 1,5–2,5 раза больше фокусного расстояния коллиматора. В качестве примера приведем лазерные головки фирмы Optoskand (рис. 5.2). Многие пользователи приобретают такие головки как полуфабрикат из-за умеренной цены и заменяют только выходную сопловую часть под конкретные задачи. Выходная линза в этих головках размещена в механизме продольного перемещения, что позволяет осуществлять регулирование положения точки фокуса относительно среза сопловой насадки.

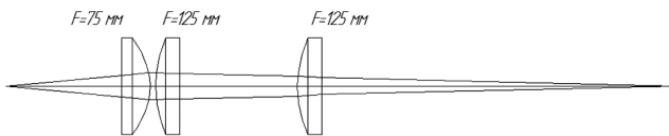


Рис. 5.1
Типичная оптическая схема лазерной головки
для волоконных лазеров



Рис. 5.2
Оптические коллиматоры и
фокусирующие модули
фирмы Optoskand

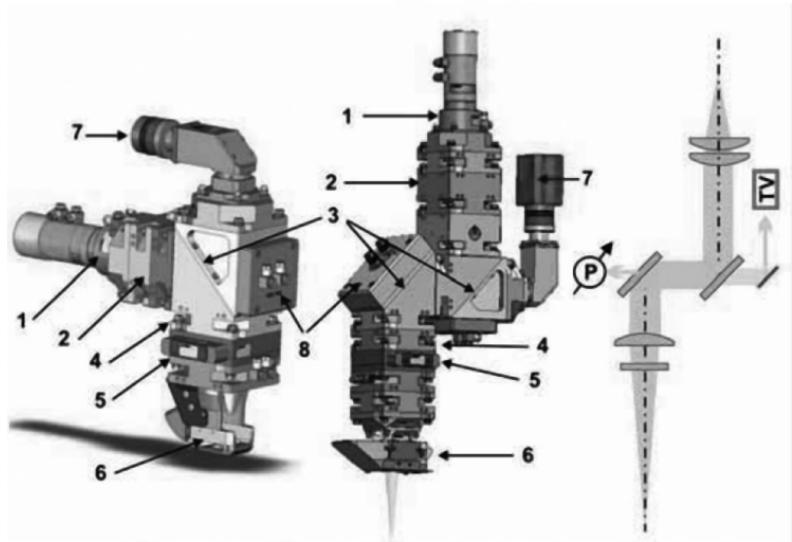


Рис. 5.3
Модульные сварочные головки фирмы Precitec:

1 — оптический коннектор; 2 — модуль коллиматора; 3 — расщепитель пучка (плоское зеркало); 4 — фокусирующий модуль; 5 — контейнер со сменным защитным стеклом; 6 — модуль шторной защиты; 7 — видеокамера или окуляр для наведения и слежения; 8 — измеритель мощности.

В большинстве головок фирмы Precitec использована эта же оптическая схема, в некоторых головках с минимальными фокусными расстояниями для улучшения фокусировки дополнительно может быть не одиночная фокусирующая линза, а набор двух линз. Фирма также предлагает модификации с поворотным зеркалом в тракте, что в ряде

случаев удобно для применения с роботами и встраивания видеосенсоров. На примере изделия YW52 можно проследить тенденции модульности и унификации (рис. 5.3), система компонуется из стандартных модулей форматом 74×74 мм с проходной апертурой около 48 мм, достаточной для передачи мощности до 20 кВт. Пользователь имеет возможность самостоятельно компоновать систему нужной геометрии с нужными параметрами фокусировки, так как можно изменять как фокусное расстояние коллиматора (100, 125, 150, 200 мм), так и фокусное расстояние фокусирующей линзы (150–1000 мм).

Модульная система имеет значительную массу и высокую цену, поэтому для более массовых головок для лазерной резки фирма не использует модульный подход и предлагает оптимизированные по массе и габаритам головки серий YR30, YK52 для работы с роботами. Отличительной

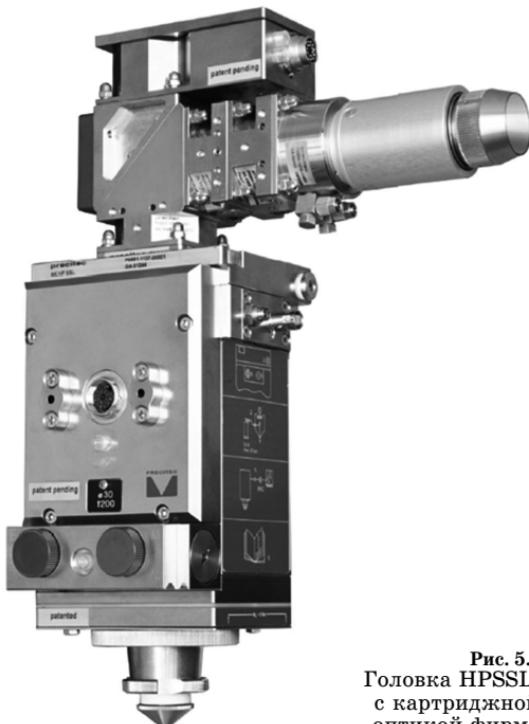


Рис. 5.4
Головка HPSSL для резки с картриджной сменной оптикой фирмы Precitec

особенностью этих насадок является улучшенная емкостная система слежения за поверхностью Lasermatic®Z, способная работать с минимальными по размеру сопловыми наконечниками, что обеспечивает малую чувствительность к боковым элементам изделия при 3D-резке роботами.

Следует упомянуть также довольно популярную на российском рынке режущую головку для порталных раскройных систем HPSSL (рис. 5.4), имеющую картриджный вариант смены оптики, что позволяет оперативно обслуживать оптику на станках и быстро менять параметры фокусировки.

Для технологии лазерной наплавки фирма Precitec разработала два базовых варианта наплавочных головок YC50 (рис. 5.5), снабженных одноканальной (аксиальной) или четырехканальной системой подачи порошков. В этих разработках, созданных на базе популярной сварочной голов-



Рис. 5.5
Наплавочные головки
YC50 фирмы Precitec с
четырехканальной
(слева) и одноканальной
(справа)
подачей порошка

ки YW50, пока еще не реализованы опции сканирования ни лазерного пучка, ни порошкового потока, но можно только приветствовать появление на рынке первых серийных головок для этих перспективных процессов.

Модульный подход к конструкции лазерных головок дает пользователю достаточную гибкость в выборе параметров процесса, но только на стадии разработки технологического процесса. Другой подход к гибкости и модульности представлен в лазерной головке VF001M российской фирмы «Электроресурс». В этой головке использована перестраиваемая оптическая система, за счет которой можно плавно менять фокусное расстояние (или угол фокусировки), следовательно, размер фокального пятна f_d и длину перетяжки. Для изменения фокусировки вообще не нужно выполнять разборку системы, более того, вся перестройка выполняется электронным путем под управлением встро-



Рис. 5.6

Лазерная технологическая головка с переменным фокусным расстоянием VF001M и принцип магнитной фиксации технологических насадок

енного микропроцессора, так что робот или ЧПУ-система могут выполнять перестройку параметров автоматически по ходу выполнения программы. Внешний вид лазерной вариоголовки представлен на рисунке 5.6, процессорный блок может при необходимости размещаться не на корпусе головки, а в любом удобном для управления месте, хотя он используется в основном для предварительной настройки. Принцип модульности в головке VF001M также используется, но только для быстрой замены технологических насадок (сварка, резка, закалка), которые фиксируются на стыковочном узле с помощью магнитного фиксатора. Ниже перечислены полезные функции, которые обеспечивают такой конструктивный подход:

1) можно оперативно перестраивать параметры пучка (фокусное расстояние, положение фокуса) для оптимизации производительности и качества операций. В принципе, это может выполнять ЧПУ-система автоматически;

2) положение точки фокуса относительно среза сопла также управляет электронным образом, более того, реализован режим «имитации» точки фокусировки мощного пучка, т. е. при переходе в режим «R» с пульта на головке или по команде ЧПУ точка фокуса видимого пилотного источника подсвечивает точку фокуса мощного пучка, что существенно упрощает операции настройки;

3) за счет магнитной фиксации технологической насадки имеется быстрый оперативный доступ к контейнеру с защитным стеклом для промывки или замены;

4) технологические насадки содержат встроенную систему емкостного измерения расстояния от сопла до листа, причем связь с управляющим процессором осуществляется по беспроводному каналу (оптическая), поэтому при смене насадки не требуется никаких операций по отключению разъемов;

5) магнитная фиксация технологических насадок надежно защищает лазерную головку от ударов и наездов на не-предвиденные препятствия.

Виды лазерных технологических головок для волоконных лазеров представлены далее.

5.1. ГОЛОВКИ ДЛЯ СВАРКИ

5.1.1. ГОЛОВКИ ФИРМЫ HAAS LTI

СВАРОЧНЫЕ ГОЛОВКИ PHW-50, PHW-75

Сварочная головка PHW-75 (рис. 5.7, 5.8, табл. 5.1) спроектирована для сварки мощными лазерами. Она имеет надежную модульную конструкцию. В ее основе лежат водоохлаждаемые медные параболические зеркала. Доступна опция фокусировки в два пятна нагрева.



Рис. 5.7
Внешний вид
сварочных головок
PHW-50, PHW-75

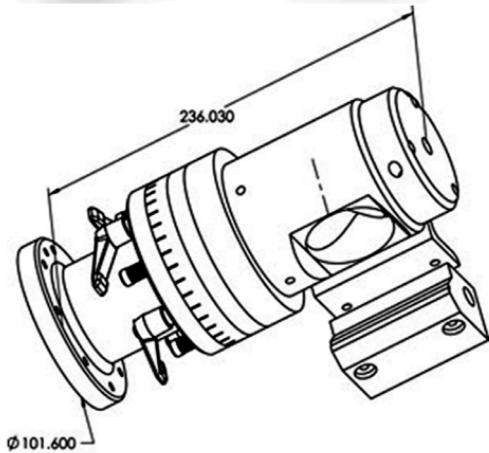


Рис. 5.8
Габаритные
размеры сварочных
головок PHW-50,
PHW-75

Таблица 5.1

Технические характеристики

Фокусное расстояние	127, 200, 250, 300 мм
Апертура	38, 50, 75 мм
Охлаждение	Водяное

ГОЛОВКИ СЕРИИ G2

Головки серии G2 (рис. 5.9) предназначены для резки и сварки, имеют модульную конструкцию. Доступны варианты для всех длин волн.

Особенности:

- апертура 34,8 мм;
- максимальное давление газа 8,8 бар;
- доступен широкий круг оптики;
- модульная конструкция для пользовательских конфигураций;
- все крепежи из нержавеющей стали по метрическому стандарту.



Рис. 5.9
Внешний вид
сварочных головок
серии G2

СВАРОЧНАЯ ГОЛОВКА СЕРИИ 50

Внешний вид, габаритные размеры и возможные варианты компоновки сварочных головок серии 50 представлены на рисунках 5.10, 5.11 и 5.12.



Рис. 5.10
Внешний вид
сварочных головок
серии 50

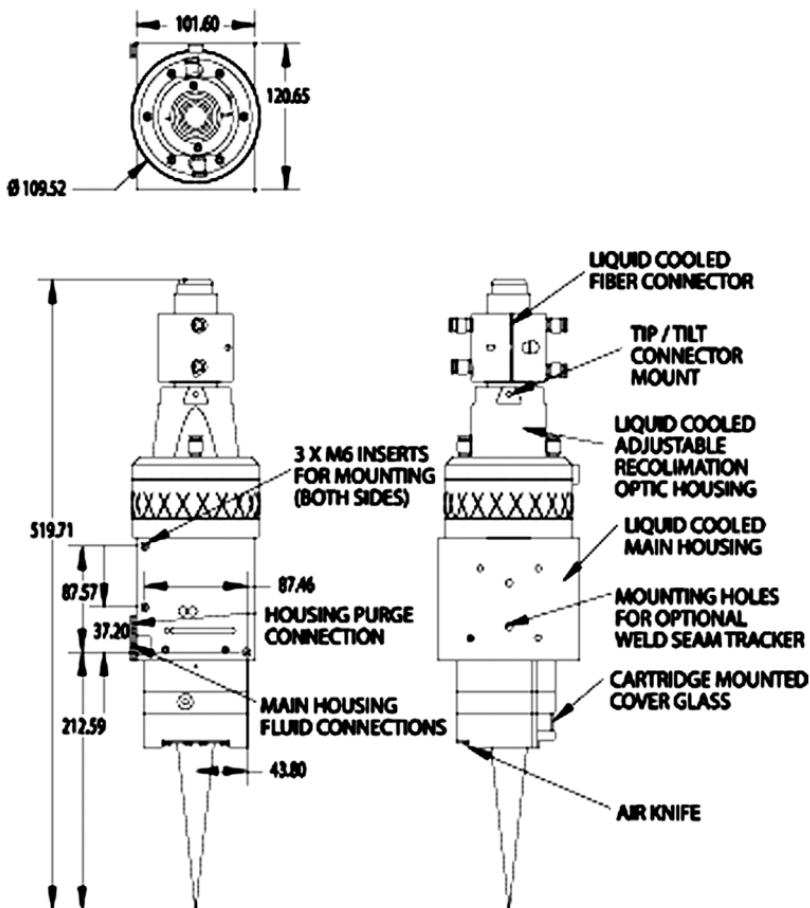


Рис. 5.11
Габаритные размеры сварочных головок серии 50

Особенности:

- мощность лазера до 10 кВт;
- модульная конструкция;
- водяное охлаждение;
- различные адаптеры для всех видов волокон;
- надежная конструкция.

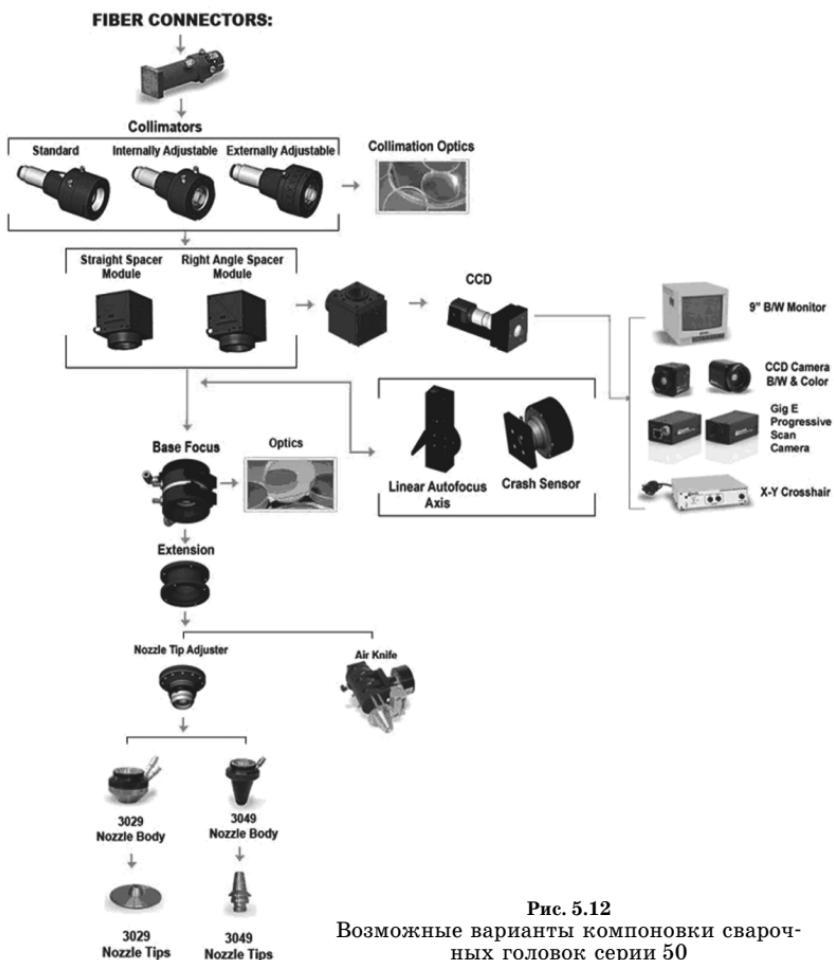


Рис. 5.12
Возможные варианты компоновки сварочных головок серии 50

5.1.2. ГОЛОВКИ ФИРМЫ HIGHYAG

ГОЛОВКА PDT-B

Головка PDT-B (рис. 5.13, 5.14, 5.15 и 5.16) со встроенным контактным датчиком, модулем слежения за стыком и автофокусом предназначена для сварки, пайки и наплавки. Датчик слежения расположен непосредственно перед ла-

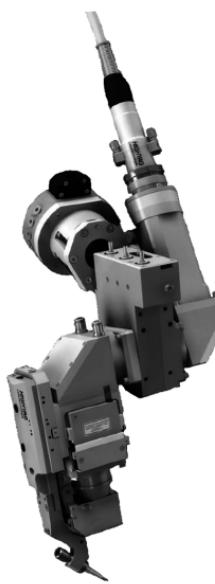


Рис. 5.13
Внешний вид
сварочной
головки PDT-B

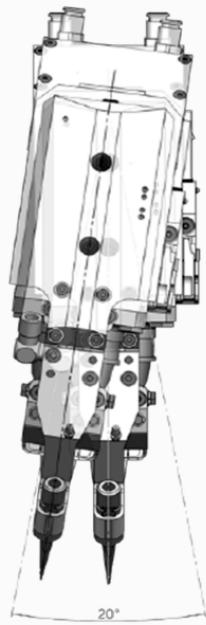


Рис. 5.14
Отклонения головки
при слежении за
стыком

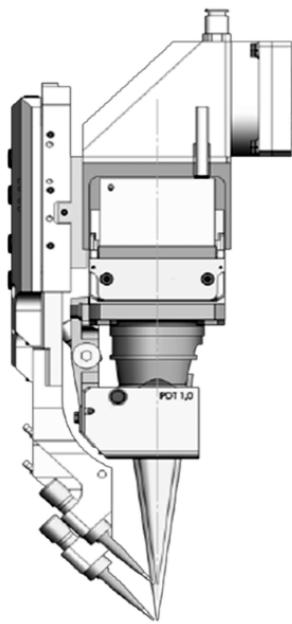


Рис. 5.15
Отклонения головки
при слежении за
стыком

Рис. 5.16
Возможные варианты компоновки
сварочной головки PDT-B

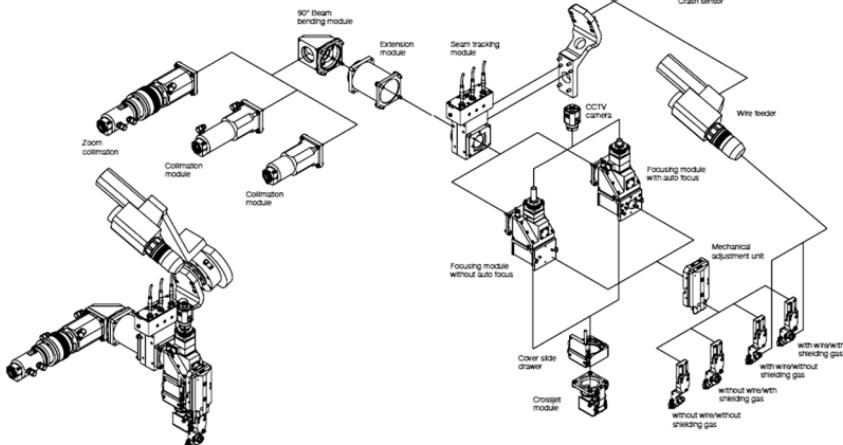


Таблица 5.2

Компоненты сварочной головки PDT-B

Модуль фокусировки		Коллиматор	
Коннектор для волокна		CCD-камера	
Защитное стекло		Контактный датчик — обеспечивает точное наведение фокуса	
Система CrossJet (встроенная система обдува)		Модуль слежения за стыком	

зерным излучением и контролирует положение луча во всех плоскостях. Компоненты сварочной головки PDT-B представлены в таблице 5.2.

ГОЛОВКА RSK

В процессе сварки с помощью лазерной обрабатывающей головки RSK прижимной ролик повторяет контур заготовки, при этом он под действием пневматического пресса давит вниз с постоянной силой. Так как ролик и оптика жестко связаны, гарантируется точное положение фокуса по оси z , компенсируя большие допуски на заготовку и неточности робота (см. рис. 5.17). Возможные варианты компоновки сварочной головки показаны на рисунке 5.18. Ком-

Рис. 5.17

Принцип работы системы, обеспечивающей точное положение фокуса

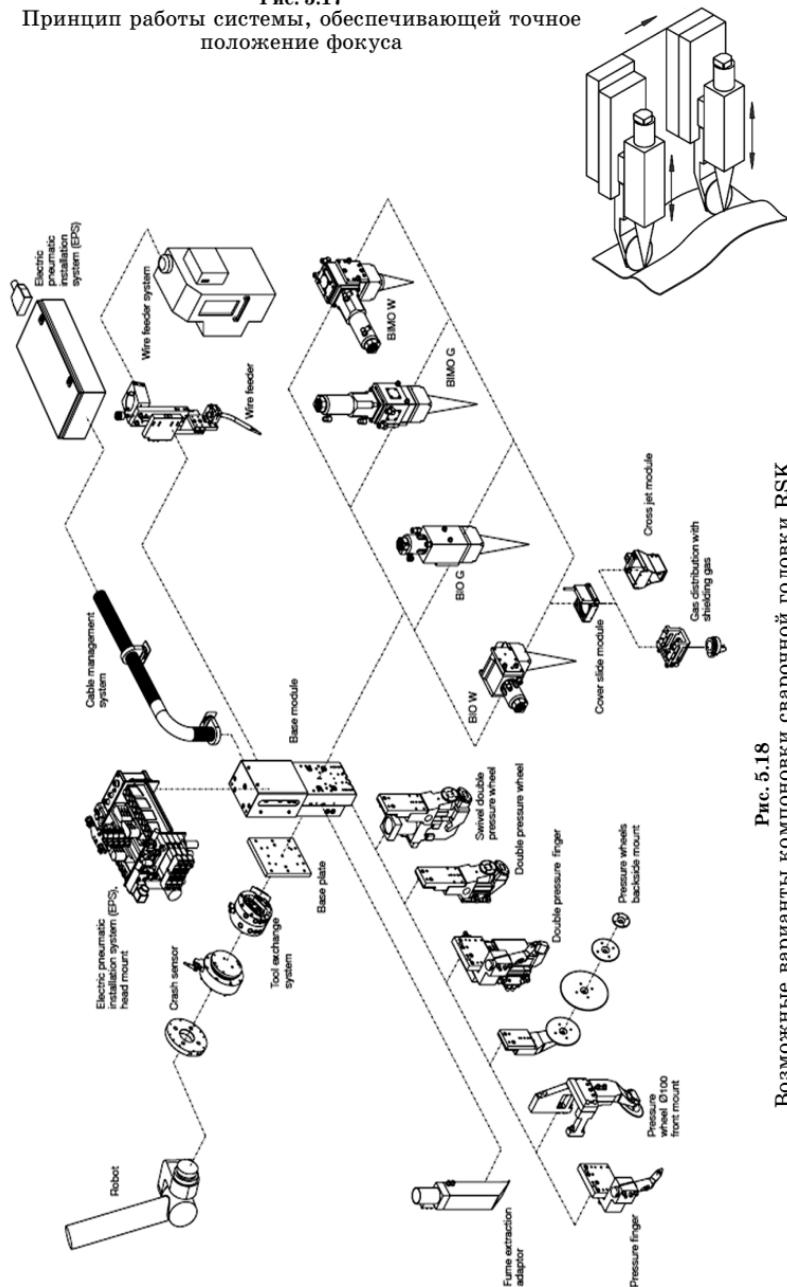


Рис. 5.18
Возможные варианты компоновки сварочной головки RSK

поненты обрабатывающей головки RSK представлены в таблице 5.3, технические характеристики — в таблице 5.4.

Т а б л и ц а 5.3
Компоненты обрабатывающей головки RSK

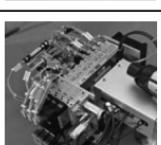
<p>Фокусирующая головка BIMO (использует картриджный принцип установки фокусирующей линзы)</p>	
<p>CCD-камера (ПЗС-камера)</p>	
<p>Сопло для защитного газа</p>	
<p>Система CrossJet</p>	
<p>Модуль двухточечного прижимного приспособления с использованием технологии ZINCWELD</p>	
<p>Двухточечный роликовый прижим</p>	
<p>Электрические пневматические установки системы EPS</p>	

Таблица 5.4

Технические характеристики сварочной головки RSK

Фокусное расстояние головки (увеличение и фокусное расстояние)	0,75 и 150 мм, 1,0 и 200 мм
Коллиматор (увеличение и фокусное расстояние)	1,5 и 200 мм, 1,8 и 160 мм, 2,0 и 130 мм
Максимальная мощность лазерного излучения	До 6 кВт
Максимальный угол выхода лазерного излучения из волокна (половина угла)	125 или 210 мрад
Длина волны	800–950 нм 1020–1080 нм
Потери излучения	Менее 5% для 1080 нм
Коннектор волокна	HIGHYAG LLK, LLK-Auto, Trumpf LLK-B, Optoskand QBH
Расход газа системой CrossJet	500 л/мин при давлении 0,6 МПа
Габариты	RSK 0° DR (двуточечный роликовый прижим) Примерно 321×315×889 мм RSK 0° DF (двуточечное прижимное приспособление) Примерно 337×315×872 мм RSK 0° R (роликовый прижим) Примерно 321×315×775 мм RSK 90° F left (прижимное приспособление) Примерно 321×321×775 мм
Масса	RSK DR. Примерно 28 кг RSK DF. Примерно 31 кг RSK R. Примерно 33 кг RSK F. Примерно 38 кг

ГОЛОВКА PDT

Головка предназначена для сварки и пайки нахлесточных соединений, оснащена контактным датчиком, который позволяет следить за стыком (рис. 5.19, 5.20). Компоненты и технические характеристики обрабатывающей головки PDT даны в таблицах 5.5 и 5.6 соответственно.

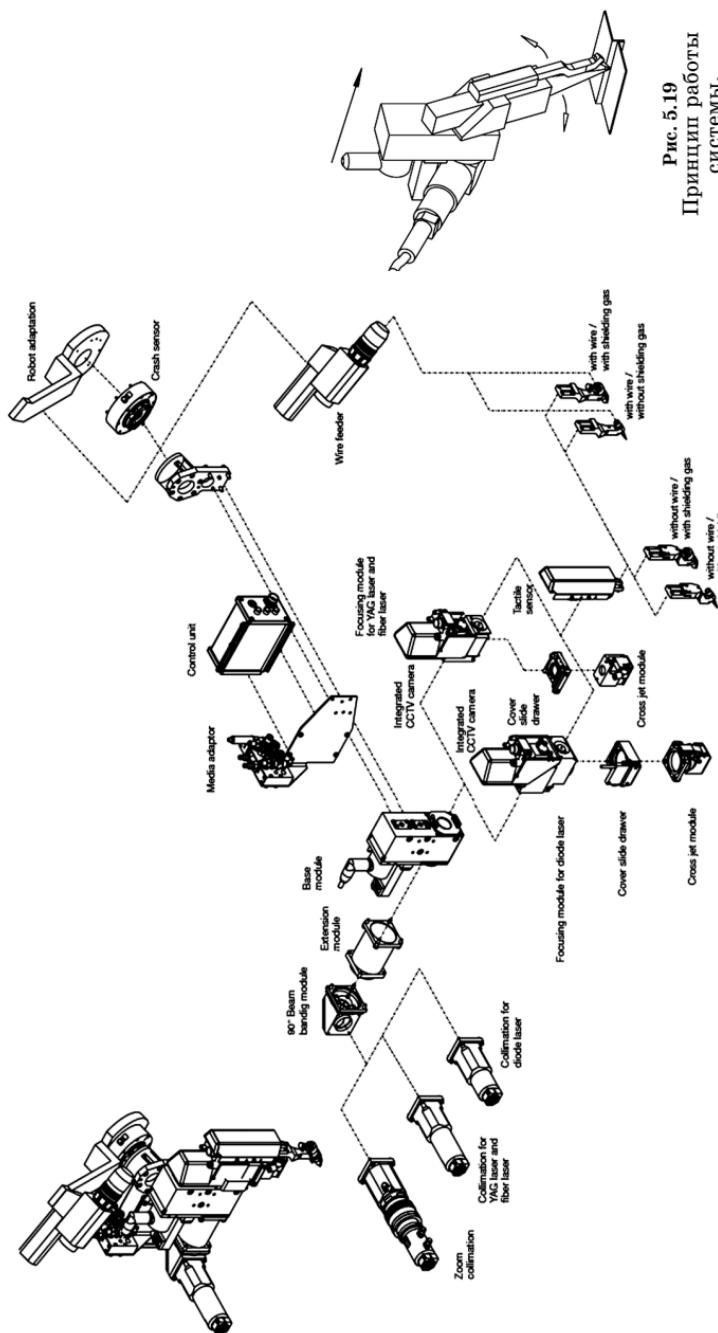


Рис. 5.19

Принцип работы
системы,
обеспечивающей
слежение за
стыком

Возможные варианты компоновки сварочной головки PDT
Рис. 5.20

Таблица 5.5

Компоненты обрабатывающей головки PDT

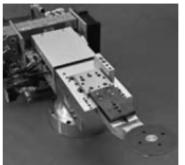
Фокусирующий модуль		CCD-камера	
Коллиматор Различные диаметры пучка при постоянном фокусном расстоянии		Контактный датчик	
		Прижимной ролик (контактный датчик)	

Таблица 5.6

Технические характеристики обрабатывающей головки PDT

Фокусное расстояние головки (увеличение и фокусное расстояние)	0,75 и 150 мм, 1,00 и 200 мм, 1,70 и 340 мм, 3,30 и 660 мм
Коллиматор (увеличение и фокусное расстояние)	1,8 и 110 мм, 2,0 и 100 мм, 2,3 и 90 мм, 3,0 и 70 мм
Максимальная мощность лазерного излучения	До 6 кВт
Максимальный угол выхода лазерного излучения из волокна (половина угла)	125 или 210 мрад
Длина волны	800–950 нм 1020–1080 нм
Потери излучения	Менее 5%
Коннектор волокна	HIGHYAG LLK, LLK-Auto, LLK-B, QBH
Расход газа системой CrossJet	500 л/мин при давлении 0,6 МПа
Габариты	800×430×540 мм 410×180×540 мм (компактный дизайн)
Масса	11–25 кг

5.1.3. ГОЛОВКИ ФИРМЫ KUGLER

ГОЛОВКИ LK190, LK390

Головки для сварки и термообработки. Их можно считать универсальными. Они выпускаются и для волоконных, и для газовых CO₂-лазеров. Отличия заключаются в использовании различных блоков подвода излучения к технологической головке и используемых оптических элементах.

Головки данных моделей обладают рядом достоинств:

- компактный дизайн;
- гибкость (благодаря модульной конструкции);
- прямое водяное охлаждение зеркал.

Лазерная сварочная головка LK390CW с ручным вращением блока

Внешний вид головки LK390CW с ручным вращением блока показан на рисунке 5.21, габаритные размеры представлены на рисунке 5.22 и в таблице 5.7.

Рис. 5.21
Внешний вид головки
LK390CW

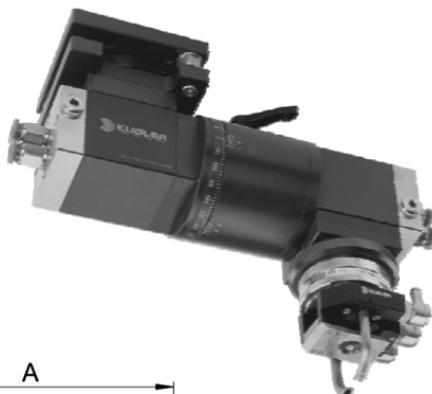


Рис. 5.22
Габаритные размеры головки
LK390CW

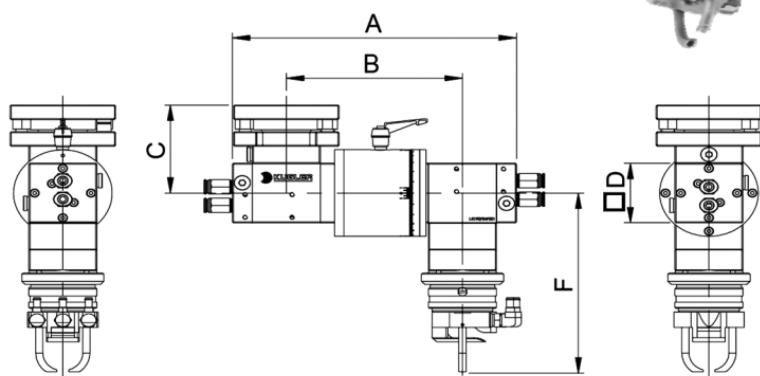


Таблица 5.7

Габаритные размеры головки LK с ручным приводом

Параметр	LK190CW с ручным вращением блока	LK390CW с ручным вращением блока
A, мм	242	274
B, мм	150	160
C, мм	85,5	97,50
D, мм	58	79
F, мм	150/175/200/250/300	

**Лазерная сварочная головка LK390W.
Компактный корпус**

Внешний вид сварочной головки LK390W с компактным корпусом представлен на рисунке 5.23, габаритные размеры — на рисунке 5.24 и в таблице 5.8.

Рис. 5.23
Внешний вид головки LK390W



Рис. 5.24
Габаритные размеры головки LK390W

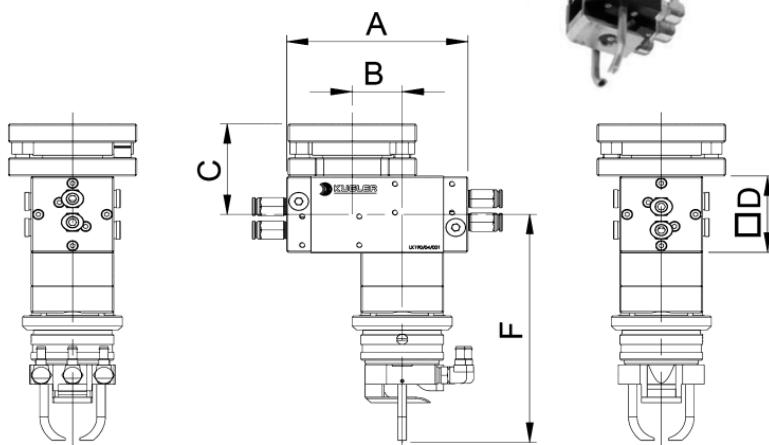


Таблица 5.8

Габаритные размеры головок LK190W и LK390W

Параметр	LK190W	LK390W
<i>A</i> , мм	127	164
<i>B</i> , мм	35	50
<i>C</i> , мм	69,5	79,5
<i>D</i> , мм	58	79
<i>F</i> , мм	150/175/200/250/300	

**Лазерная сварочная головка LK390W
с моторизованным вращением блока**

Внешний вид сварочной головки LK390W с моторизованным вращением блока представлен на рисунке 5.25, габаритные размеры — на рисунке 5.26 и в таблице 5.9. Технические характеристики головки даны в таблице 5.10.

Рис. 5.25
Внешний вид лазерной
сварочной головки
LK390W



Рис. 5.26
Габаритные размеры
головки LK390W

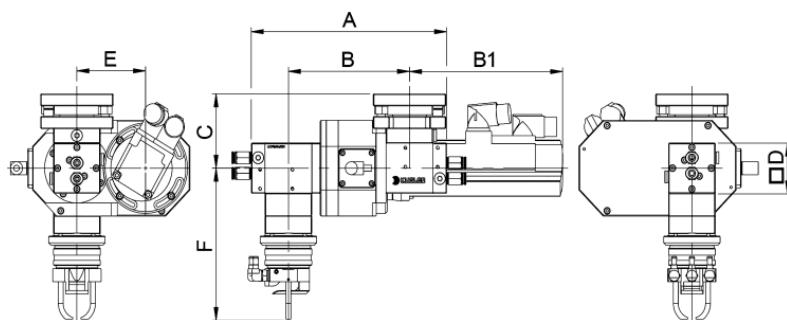


Таблица 5.9

Габаритные размеры головок LK190W и LK390W

Параметр	LK190W с моторизованным вращением блока	LK390W с моторизованным вращением блока
<i>A</i> , мм	242	284
<i>B</i> , мм	150	170
<i>B</i> 1, мм	189,70	179,70
<i>C</i> , мм	85,50	97,50
<i>D</i> , мм	58	79
<i>E</i> , мм	85	93
<i>F</i> , мм	150/175/200/250/300	

Таблица 5.10

Технические характеристики головок

Параметр	LK190	LK390
Максимальная мощность лазера	20 кВт	
Фокусное расстояние	150, 175, 200, 250, 300 мм	
Апертура	35 мм	50 мм
Охлаждение	Водяное прямое охлаждение зеркал	

5.1.4. ГОЛОВКИ ФИРМЫ PRECITEC**SP50R**

Сварочная головка SP50R — лазерная головка с зеркалами для СО₂-лазеров с вращающимся на 360° фокусирующим блоком, с датчиками контроля температуры и положения зеркал, позволяет сваривать тонкие и толстые листы металла (рис. 5.27).

Сварочная головка SP50R состоит из блока фокусировки луча и поворотного блока, имеет модульную конструкцию и различные фокусные расстояния от 150 мм. Плоское зеркало отклоняет луч на 90°, параболическое отклоняет луч на 90° и фокусирует его. В головку интегрированы датчики слежения за температурой зеркал. При замене или снятии зеркала для его очистки не требуется юстировка благодаря картриджной системе. Еще одной особенностью данной головки является конструкция, позволяющая вращать



Рис. 5.27
Внешний вид лазерной
сварочной головки
SP50R

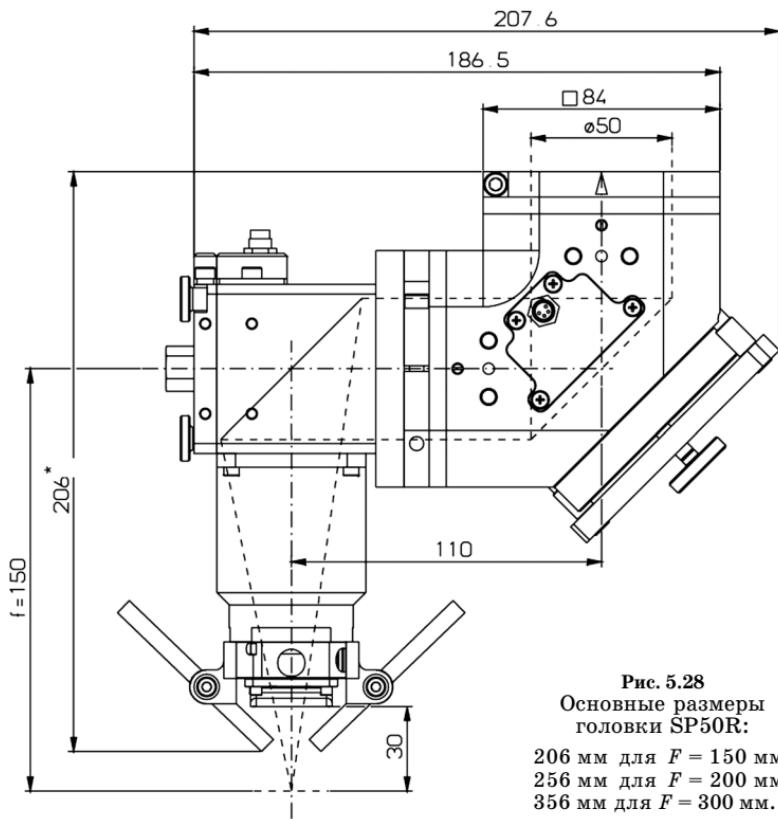


Рис. 5.28
Основные размеры
головки SP50R:

206 мм для $F = 150$ мм,
256 мм для $F = 200$ мм,
356 мм для $F = 300$ мм.

Таблица 5.11

Технические характеристики головки SP50R

Фокусное расстояние	150, 200, 300 мм
Свободная апертура	50 мм
Ориентация фокусирующего блока	360°
Вес	3,8 кг
Рабочая температура	5–80°C
Влажность воздуха	30–95%
Расход газа	400 л/мин

блок фокусировки на 360°, который фиксируется зажимным устройством с винтом. По заказу головка может комплектоваться бифокальной оптикой. Основные размеры головки SP50R представлены на рисунке 5.28, технические характеристики — в таблице 5.11.

ЛАЗЕРНАЯ ГОЛОВКА YW30

Компактная лазерная головка YW30 (рис. 5.29, 5.30) спроектирована для сварки мощными Nd:YAG-лазерами в промышленном производстве. Благодаря модульной системе

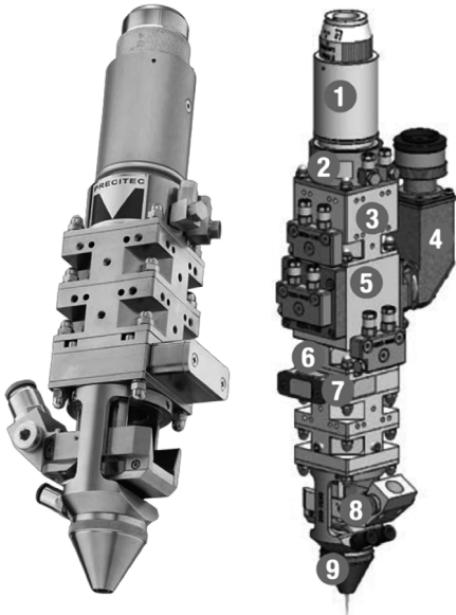


Рис. 5.29
Внешний вид лазерной
сварочной головки YW30

Рис. 5.30
Основные части лазерной
сварочной головки YW30:

- 1 — гнездо для подключения волокна;
- 2 — водоохлаждаемая диафрагма;
- 3 — линза коллимации с водяным охлаждением;
- 4 — модуль камеры;
- 5 — светоделительный модуль;
- 6 — фокусирующая линза с водяным охлаждением;
- 7 — картридж с защитным стеклом;
- 8 — CrossJet;
- 9 — сопло.

Таблица 5.12

Технические характеристики сварочной головки YW30

Максимальная мощность лазера	6 кВт
Фокусное расстояние коллимации	75, 100, 125, 150 мм
Фокусное расстояние головки	150, 200, 250 мм
Масса	2–4 кг (в зависимости от конфигурации)
Габариты	50×50 мм (edges dimension)

ме головка может быть адаптирована под конкретные потребности. Технические характеристики головки представлены в таблице 5.12.

СВАРОЧНАЯ ГОЛОВКА YW50

Компактная лазерная головка YW50 (рис. 5.31) спроектирована для сварки мощными Nd:YAG-лазерами в промышленном производстве. Датчик, интегрированный в головку, используется для контроля температуры сварочной головки и защитного стекла, он отвечает самым высоким требованиям. Также есть система мониторинга загрязнения защитного стекла. Для защиты высококачественных оптических компонентов сварочной головки от паров и брызг сварочная головка оснащена защитным стеклом и системой CrossJet. Защитные стекла устанавливаются в патрон, их легко заменить всего одним движением. Все разъемы расположены в верхней части головки. Сварочная головка YW50 доступна с фокусными расстояниями 150, 200, 250, 300, 500 и 680 мм (рис. 5.32, табл. 5.13).

Процесс сварки может контролироваться с помощью плазмы, температуры и датчиков, контролирующих выходную мощность. Головка YW50 дополнитель-



Рис. 5.31
Внешний вид
лазерной
сварочной
головки YW50

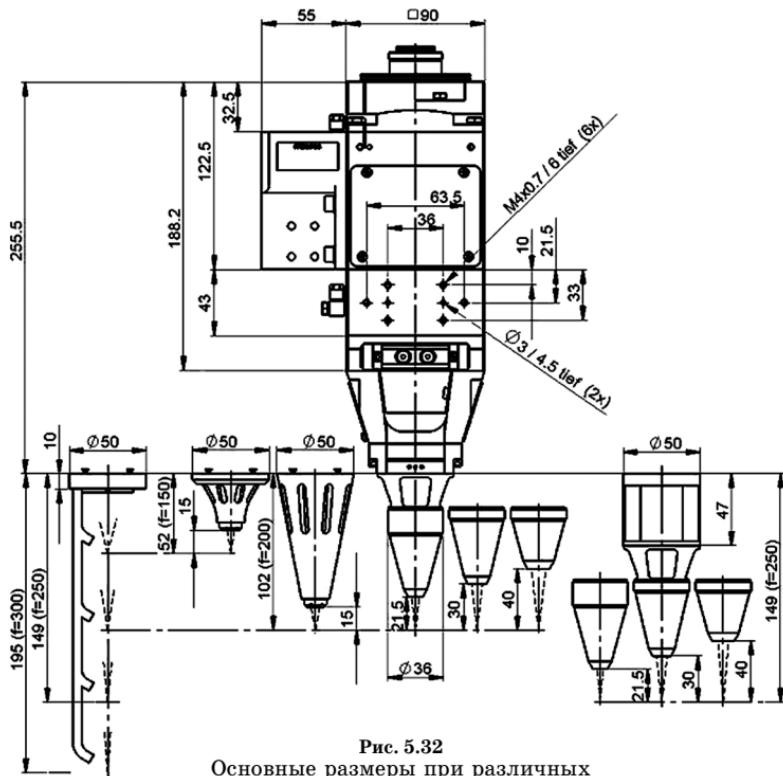


Рис. 5.32
Основные размеры при различных
фокусных расстояниях головки YW50

Таблица 5.13

Технические характеристики головки YW50

Фокусное расстояние	150, 200, 250, 300, 500, 680 мм
Апертура	48 мм
Расстояние до сопла: соосная подача газа ($f = 150, 200$ мм); боковая подача газа ($f = 150, 200, 250,$ 300 мм); без подачи газа ($f = 500, 680$ мм)	15 мм (± 2) 42, 92, 139, 185 мм 432, 602 мм
Длина вдоль оси	307,5, 357,5, 404,5, 450,5, 655,7, 825,7 мм
Вес	4 кг
Рабочая температура	5 до 55°C
Охлаждение	Водяное охлаждение
Расход защитного газа CrossJet	500 л/мин при давлении 3,5 бар

но может комплектоваться устройством оптического слежения за положением шва, которое обнаруживает отклонение между запрограммированным и реальным путем сварки. Сварочное оборудование всегда может быть правильно расположено по отношению ко шву.

ЛАЗЕРНАЯ ГОЛОВКА YW50 Г-ОБРАЗНАЯ

Компактная лазерная головка YW50 (рис. 5.33) спроектирована для сварки мощными Nd:YAG-лазерами (до 20 кВт) в промышленном производстве. Датчик, интегрированный в головку, используется для контроля температуры сварочной головки и защитного стекла, он отвечает самым высоким требованиям. Также есть система мониторинга загрязнения защитного стекла. Для защиты высококачественных оптических компонентов сварочной головки от паров и брызг сварочная головка оснащена защитным стеклом и системой CrossJet. Защитные стекла устанавливаются в патрон, их легко заменить всего одним движением. Все разъемы расположены в верхней части головки. Сварочная головка YW50 доступна с фокусными расстояниями 150, 200, 250, 300, 500 и 680 мм (рис. 5.34, табл. 5.14).

Процесс сварки может контролироваться с помощью плазмы, температуры и датчиков, контролирующих выходную мощность. Головка YW50 может дополнительно комплектоваться устройством оптического слежения за положением шва, которое обнаруживает отклонение между запрограммированным и реальным путем сварки. Сварочное оборудование всегда может быть правильно расположено по отношению ко шву.



Рис. 5.33
Внешний вид лазерной сварочной головки YW50

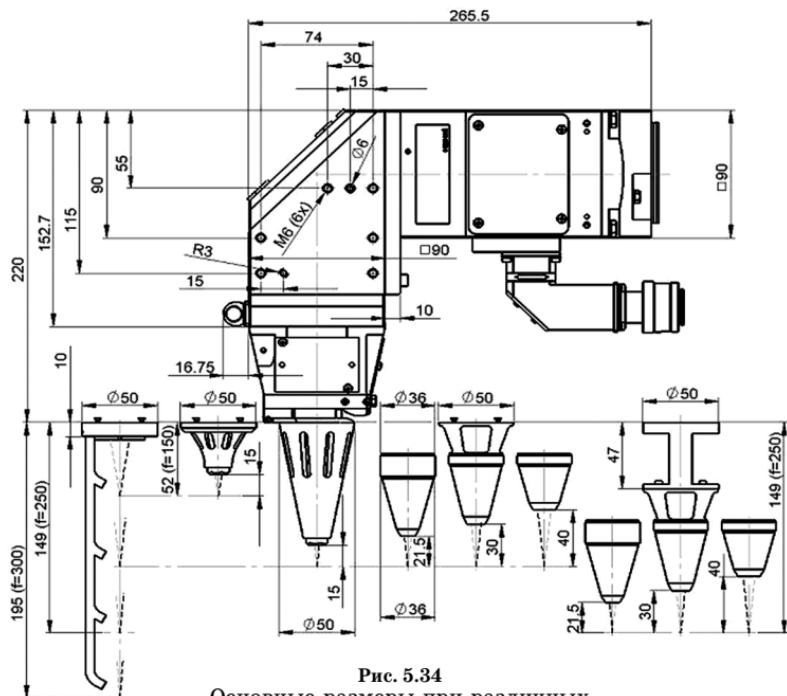


Рис. 5.34
Основные размеры при различных
фокусных расстояниях головки YW50

Таблица 5.14

Технические характеристики головки YW50

Фокусное расстояние	150, 200, 250, 300, 500, 680, 1115 мм
Апертура	48 мм
Расстояние до сопла: коосная подача газа ($f = 150, 200$ мм); боковая подача газа ($f = 150, 200,$ $250, 300$ мм); без подачи газа ($f = 500, 680$ мм)	15 (± 2), 20, 30, 40 мм 42, 92, 139, 185 мм 432, 602 мм
Длина вдоль оси: flat; flex	272, 322, 369, 415, 620,2, 790,2 мм 377, 427, 474, 520, 725,5, 895,2 мм
Вес	7 кг
Рабочая температура	5 до 55°C
Охлаждение	Водяное охлаждение
Расход защитного газа CrossJet	500 л/мин при давлении 3,5 бар

Варианты изгиба корпуса головки:

- «плоский»: отклонение луча происходит перед фокусирующим объективом, что позволяет уменьшить высоту головки;
- «гибкий»: отклонение луча происходит между делителем пучка и коллиматором. Заказчик может определять направление отклонения пучка.

ЛАЗЕРНАЯ ГОЛОВКА YW52

Компактная лазерная головка для сварки YW52 (рис. 5.35, табл. 5.15) может быть использована с диодными и твердотельными лазерами. Благодаря модульной конструкции заказчик может принять решение о конкретном исполнении модели (рис. 5.36). В своей базовой конфигурации головка очень выгодна в цене. Однако ее состав может быть расширен для использования в полностью автоматизированном производстве с различными датчиками контроля процесса.

Эффективность:

- подходит для высоких мощностей лазера;
- высокое качество сварки за счет высококачественной оптики;

Рис. 5.35
Внешний вид
лазерной сварочной
головки YW52

Рис. 5.36
Основные части
лазерной сварочной
головки YW52:

1 — оптический разъем; 2 — апертурная бленда, водяное охлаждение; 3 — коллимирующая линза, водяное охлаждение; 4 — модуль камеры наблюдения; 5 — модуль рассеивающей линзы; 6 — фокусирующая линза, водяное охлаждение; 7 — картридж с защитным стеклом; 8 — CrossJet и разъемы подсоединения воздуха.

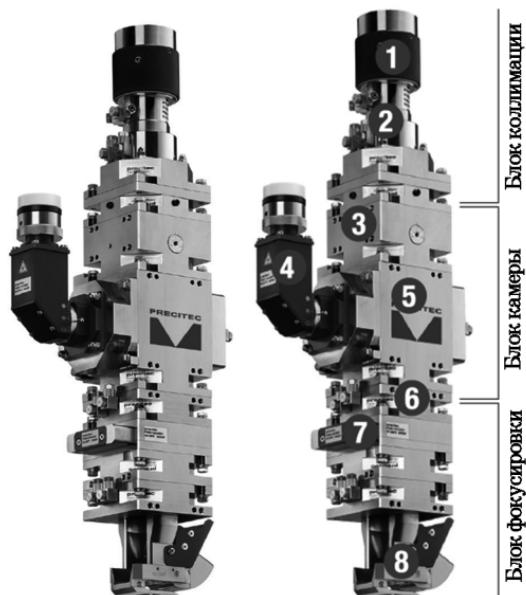


Таблица 5.15

Технические характеристики сварочной головки YW52

Мощность лазера	20 кВт
Фокусные расстояния головки	100, 125, 150, 200 мм
Фокусные расстояния коллиматора	От 150 до 1000 мм
Масса	От 3 до 6 кг в зависимости от конструкции
Размеры (стандартное исполнение)	74×74 мм

- долговечные защитные стекла, благодаря применению концепции CrossJet.

Гибкость:

- модульная конструкция;
- индивидуальная, специфическая конфигурация по запросу заказчика;
- простая интеграция в уже существующее оборудование;
- различные коллимирующие и фокусные расстояния.

Удобство в использовании и безопасность:

- простое обучение благодаря камере наблюдения;
- простота замены оптики;
- картридж с защитным стеклом с мониторингом;
- рабочее состояние контролируется при помощи ПК.

Контроль качества:

- сочетается с контролем предпроцесса (отслеживание шва LPF), контролем во время процесса (система LWM), контролем постпроцесса (контроль геометрии шва SGM);
- кассета с защитным стеклом и независимым от лазерной мощности контролем присутствия, температуры и загрязнения.

Охлаждение: не требуется отдельного устройства охлаждения, так как используется охлаждение лазерного источника.

5.1.5. ГОЛОВКИ ФИРМЫ SCANSONIC

AL03 (АДАПТИВНАЯ ЛАЗЕРНАЯ
ОБРАБАТЫВАЮЩАЯ ОПТИКА)

Применение:

- для обработки стальных и алюминиевых сплавов;
- для Y-швов отбортованных соединений;

- для угловых швов соединений внахлест;
- для угловых швов соединений тавровых соединений.

АЛО — головка для лазерной сварки/пайки с интегрированной системой слежения дополнительной проволокой для CW-лазеров с длиной волны от 880 до 1070 нм (рис. 5.37).

Благодаря запатентованному тактильному методу ведения шва система АЛО3 точно определяет начало шва и отслеживает его прохождение, непосредственно в процессе сварки/пайки. Различные отклонения в соединяемых деталях выравниваются автоматически.

Автарическая система слежения может быть интегрирована в любое управляющее устройство. Система управляется через цифровые входы-выходы или промышленнойшиной (Interbus).

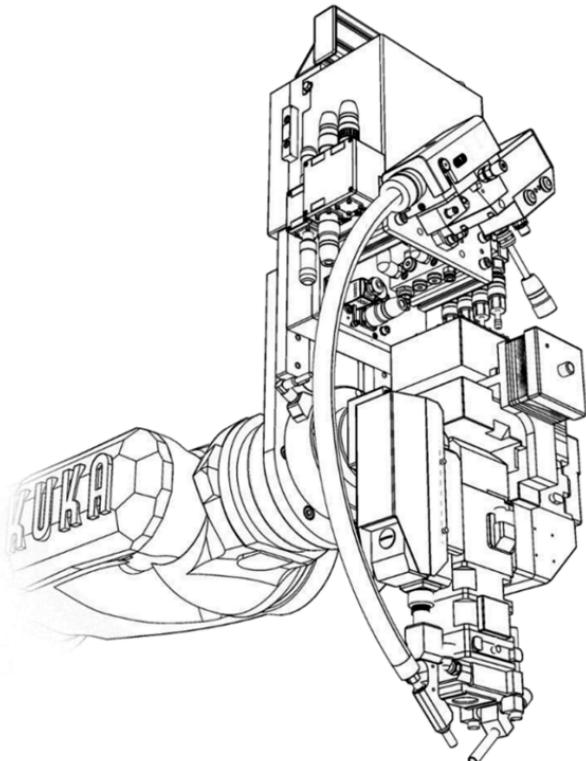


Рис. 5.37
Внешний вид лазерной сварочной головки АЛО3

ALO3 работает со следующими лазерами:

- диодные лазеры фирмы Laserline GmbH («Лазерлайн»);
- твердотельные лазеры (стержневые и дисковые) фирм Rofin GmbH или Trumpf GmbH («Рофин» или «Трумпф»);
- волоконные лазеры фирмы IPG Laser GmbH («ИПГ»).

Характеристики:

- фокусное расстояние — 141–250 мм;
- точное отслеживание шва присадочной проволокой с помощью тактильного датчика;
- лазерная головка для CW-лазеров мощностью до 6 кВт;
- рабочий диапазон боковой y : ± 15 мм;
- рабочий диапазон по высоте z : ± 10 мм;
- оптимизированные системы для пайки и сварки деталей;
- адаптация к различным работам;
- параметрирование через Ethernet;
- подключение к системам подвода проволоки различных производителей;
- интегрированный CrossJet;
- блок замены защитного стекла;
- простое обслуживание системы;
- вес — 20 кг;
- габаритные размеры — 100×200×300 мм.

Опционально:

- автофокус при наведении фокуса;
- системы для диодных, волоконных или стержневых, а также дисковых лазеров с простым или двойным пре-ломлением луча;
- подвод защитного газа дозами или коаксиально;
- Interbus или Modbus;
- применим для горячей проволоки до 100 или 230 А;
- камера и генератор перекрестья;
- высокоточное устройство смены инструментов;
- противоударный датчик;
- водяное охлаждение.

ВО (СВАРКА С ПРИМЕНЕНИЕМ ОБРАБАТЫВАЮЩЕЙ ЛАЗЕРНОЙ ОПТИКИ)

Применяется для сварки:

- стальных и алюминиевых сплавов;
- особенно для I -швов при сварке внахлест.

Лазерная обрабатывающая оптика ВО (рис. 5.38) предназначена для промышленного использования лазерной мощности до 6 кВт и состоит из коллиматора и фокусирующей оптики.

Возможны две конфигурации головки ВО: прямая и угловая. Благодаря использованию различных соотношений изображения получаются соответствующие рабочие расстояния и фокусный диаметр, что позволяет расширить спектр применения ВО в промышленности.

Различные компоненты, такие как кассета для быстрой замены защитного стекла и модуль обдува оптики сжатым воздухом — CrossJet, имеются в качестве опций.

Применимы различные типы лазеров, такие как: волоконный, диодный и дисковый.

По желанию заказчика обрабатывающая оптика может быть доукомплектована дополнительными компонентами.

Свойства:

- лазерная сварочная головка для CW-лазеров мощностью до 6 кВт;
- возможность подсоединения к роботу;
- интегрированный CrossJet;
- простое сервисное обслуживание;
- система легкой замены защитного стекла.

Опции:

- конфигурации для диодных, волоконных, стержневых/дисковых лазеров;
- прямое или угловое исполнение;
- управляемая фокусировка;
- камера и генератор перекрестья;
- водяное охлаждение;
- высокоточная система смены инструмента;
- противоударный датчик.

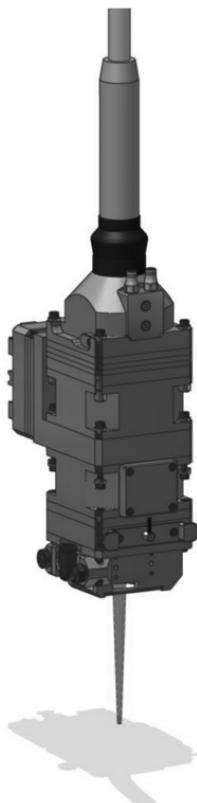


Рис. 5.38
Внешний вид
лазерной свароч-
ной головки ВО

BO-SF

Особенности:

- практически постоянное положение фокуса даже с использованием высокомощных и одномодовых лазеров;
- надежность эксплуатации с высокомощными лазерами;
- испытано на 30-киловаттном лазере (YLS-30 000, на фирме IPG Laser GmbH, Германия).

Лазерная обрабатывающая оптическая головка BO-SF (рис. 5.39), часть модульной системы Scapacs®, применяется в промышленности для качественного решения задач с высокими требованиями к стабильному положению фокуса. Конструктивное исполнение обеспечивает высокое качество пучка при незначительных потерях мощности.

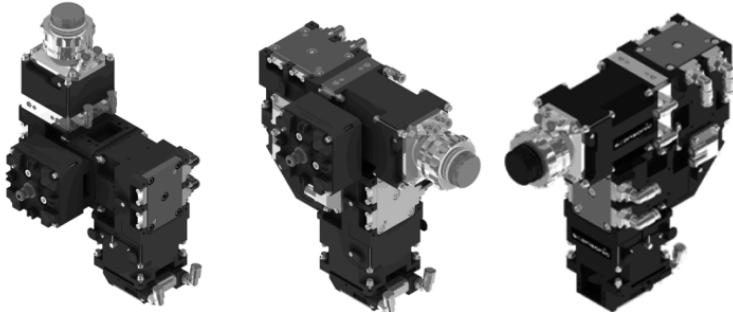


Рис. 5.39

Внешний вид лазерной головки BO-SF различных конструкций

Применение различных коэффициентов увеличения дает возможность получать соответствующие рабочие расстояния и диаметры фокусного пятна, что позволяет легко интегрировать оптическую головку BO-SF в любые обрабатывающие установки под различные производственные задачи.

Характеристики:

- высокая надежность процесса за счет практически нулевого смещения фокуса;
- высокая эффективность процесса, благодаря высокому качеству излучения в фокусе;
- высокая стабильность процесса за счет долговременной стабильности положения фокуса;

- положение фокуса не зависит от загрязнений;
- водяное охлаждение зеркал обеспечивает длительную работу оборудования в критических условиях, при накопительных загрязнениях и неглубоком проваре на зеркалах, без снижения качества и эффективности всего процесса в целом;
- благодаря конструктивному выполнению узла замены защитного стекла, имеется доступ к очистке системы (например, чистым воздухом или газом перед началом работы);
- практически безошибочное отображение в системах с тройным (и более) отражением луча (патент).

Технические характеристики сварочной головки BO-SF представлены в таблице 5.16.

Таблица 5.16

Технические характеристики сварочной головки BO-SF

Максимальная мощность лазера	30 кВт
Смещение фокуса	$\pm 0,02 \text{ мм}/\text{kVt}$ При увеличении $M = 1:3$; $F_{\text{КОЛ}} = 80 \text{ мм}$; для 1–6-киловаттного волоконного лазера (BPP: 25 $\text{мм}\cdot\text{мрад}$)
Типы лазеров	Все промышленные твердотельные лазеры
Длина волны излучения [нм]	915–1070
Рабочий угол	До 450 мрад при $F_{\text{КОЛ}} = 80 \text{ мм}$
Потери мощности	< 2%
Фокусное расстояние [мм] (свободная комбинация, другие по запросу)	Коллимация 80, 120, 175. Фокусировка 175, 250, 350, 500
Типы коннекторов (другие по запросу)	Стандарты автопрома Trumpf Typ-D Trumpf Typ-B Optoskand QBH
Кроссджет	Газ: воздух. Рабочее давление газа: 6 бар
Охлаждение	Водяное
Расход воды	При использовании максимальной мощности: 3,5 л/мин. Стандартный: 1 л/мин. Колебания температуры потока $\pm 0,5^\circ\text{C}$
Вес	8,5–10 кг

5.2. ГОЛОВКИ ДЛЯ РЕЗКИ

5.2.1. ГОЛОВКИ ФИРМЫ HAAS LTI

РНА-19

Внешний вид лазерной головки РНА-19 представлен на рисунке 5.40.



Рис. 5.40
Внешний вид лазерной головки для резки РНА-19

Особенности:

- фокусное расстояние 38, 50, 64, 75, 89, 95, 100, 127, 191 мм;
- стандартная оптика 1,0" и 1,1";
- максимальное давление газа 7 бар;
- доступны модели для всех длин волн.

ОБРАБАТЫВАЮЩАЯ ГОЛОВКА С АВТОФОКУСОМ

Внешний вид обрабатывающей головки с автофокусом представлен на рисунке 5.41.



Рис. 5.41
Внешний вид лазерной головки для резки с автофокусом

Особенности:

- предназначена для волоконных, Nd:YAG- и CO₂-лазеров мощностью до 10 кВт;
- фокусное расстояние 2,5–15";
- диаметр линз 2";
- водоохлаждаемая фокусирующая линза;
- встроенный сервопривод постоянного тока;
- магнитный датчик слежения за расстоянием;
- емкостной автофокус;
- фокусное расстояние 2,5–15";
- диаметр линз 2";
- ход по оси z 25 мм;
- скорость перемещения до 254 мм/с;
- точность ±0,025 мм.

ГОЛОВКИ СЕРИИ G4

Головки серии G4 (рис. 5.42, 5.43) предназначены для резки лазерами высокой мощности.

Особенности:

- апертура 45,5 мм;
- стандартная 2,0" оптика;
- различные фокусные расстояния;
- давление газа до 25 бар;
- x-y-z-регулируемая оптическая конструкция картриджа;
- обнаружение сбоев;
- водяное охлаждение оптики;
- доступен широкий круг оптики;

**Рис. 5.42**

Внешний вид лазерных головок для резки серии G4



Рис. 5.43
Внешний вид лазерных головок для резки серии G4
различных конструкций

Таблица 5.17

Компоненты головок серии G4

Блок, предохраниющий головку от столкновения, Laser Crash Protection & Detection		Узел лазерной головки Laser Head Assembly	
Прокладка с водяным охлаждением Water Cooled Spacers		Держатель сопла с настройкой зазора Nozzle Tip Stand-Off Adjusters	
Держатель оптического картриджа Optic Cartridge Retainer		Держатель сопла	

- модульная конструкция для пользовательских конфигураций;
- все крепежи из нержавеющей стали по метрическому стандарту;
- представлено большое количество предварительно собранных конфигураций.

Для различных целей можно укомплектовать головку различными частями (табл. 5.17).

ГОЛОВКИ СЕРИИ G5

Серия головок G5 (рис. 5.44, 5.45, табл. 5.18) предназначена для высокоскоростной резки мощными лазерами.

Рис. 5.44
Внешний вид лазерных головок для резки серии G5 различных конструкций

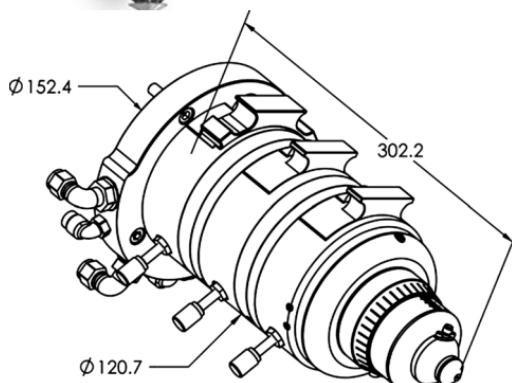


Рис. 5.45
Основные размеры

Таблица 5.18

Технические характеристики головок серии G5

Апертура	34,8, 45,5 мм
Оптика	Стандартная 1,5", 2,0" оптика
Максимальная мощность лазера	6 кВт
Максимальное давление режущего газа	25 бар
Охлаждение	Водяное охлаждение оптики

Таблица 5.19

Компоненты головок серии G5

Блок, предо- храняющий головку от столкновения, Laser Crash Protection & Detection		Узел лазерной головки Laser Head Assembly	
Прокладка с водяным охлаждением Water Cooled Spacers		Держатель сопла с настройкой зазора Nozzle Tip Stand-Off Ad- justers	
Держатель оптического картриджа Optic Cartridge Retainer		Держатель сопла	
		Сопло	

Особенности:

- $x-y-z$ -регулируемая оптическая конструкция картриджа;
- регулировка до ± 5 мм по оси z ;
- внутреннее охлаждение нескольких оптических конфигураций;
- обнаружение сбоев;

- с водяным охлаждением оптики;
- доступен широкий круг оптики;
- модульная конструкция для пользовательских конфигураций;
- все крепежи из нержавеющей стали по метрическому стандарту.

Для различных целей можно укомплектовать головку следующими частями (табл. 5.19).

ГОЛОВКИ СЕРИИ G6

Серия головок G6 предназначена для высокоскоростной резки лазерами.

Внешний вид головки в различных исполнениях представлен на рисунке 5.46.



Рис. 5.46

Внешний вид лазерных головок для резки серии G5 различных конструкций

Особенности:

- апертура 24,6 мм;
- максимальное давление газа 25 бар;
- используется стандартная оптика 1,1";
- доступен широкий круг оптики;
- X-Y-регулируемая оптическая конструкция картриджа;
- доступен широкий круг оптики;
- модульная конструкция для пользовательских конфигураций;
- все крепежи из нержавеющей стали по метрическому стандарту.

5.2.2. ГОЛОВКИ ФИРМЫ HIGHYAG

BIMO-FSC

До недавнего времени волоконные, дисковые и диодные лазеры играли незначительную роль в лазерной резке. Новое поколение высокоэффективных и экономичных волоконных, дисковых и диодных лазеров будет оспаривать преобладание CO₂-лазера в режущей отрасли рынка. Однако различные лазеры требуют различных режущих головок.

Оптический тракт является одним из определяющих факторов качества резки. Для легкой интеграции в динамично движущееся оборудование для резки и снижения механических нагрузок на оптическое волокно коллиматор может быть установлен под углом 90°. Такая конструкция обеспечивает легкий доступ к основным узлам для регулировки и мониторинга (рис. 5.47, 5.48, 5.49, 5.50, табл. 5.20).



Рис. 5.47

Внешний вид лазерной головки для резки BIMO-fsc

Рис. 5.48
Головка BIMO-fsc в
разрезе:

1 — оптическая розетка (приемник оптического коннектора); 2 — коллиматор (оптическая система коллимации излучения); 3 — камера и порт датчика (устанавливаются по желанию); 4 — поворотное зеркало (модуль поворота излучения на 90°); 5 — картридж со сменной линзой; 6 — корпус лазерной головки (базовый модуль); 7 — юстировочный узел для позиционирования фокуса по координатам x , y , z ; 8 — линзы фокусирующей системы; 9 — крышка держателя защитного стекла с системой контроля; 10 — режущее сопло.

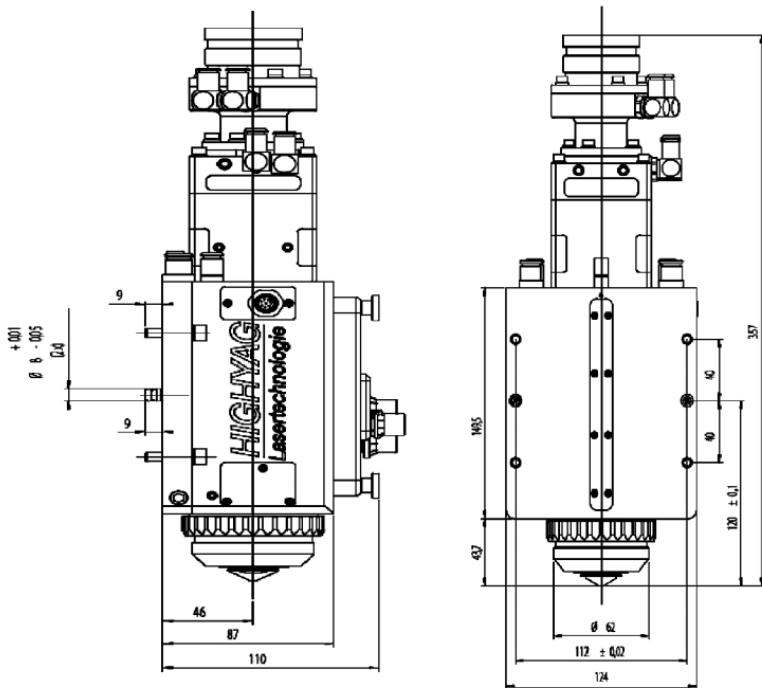
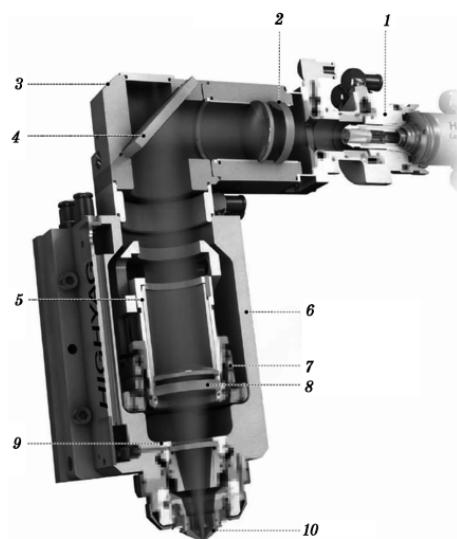


Рис. 5.49
Основные размеры головки для резки BIMO-fsc

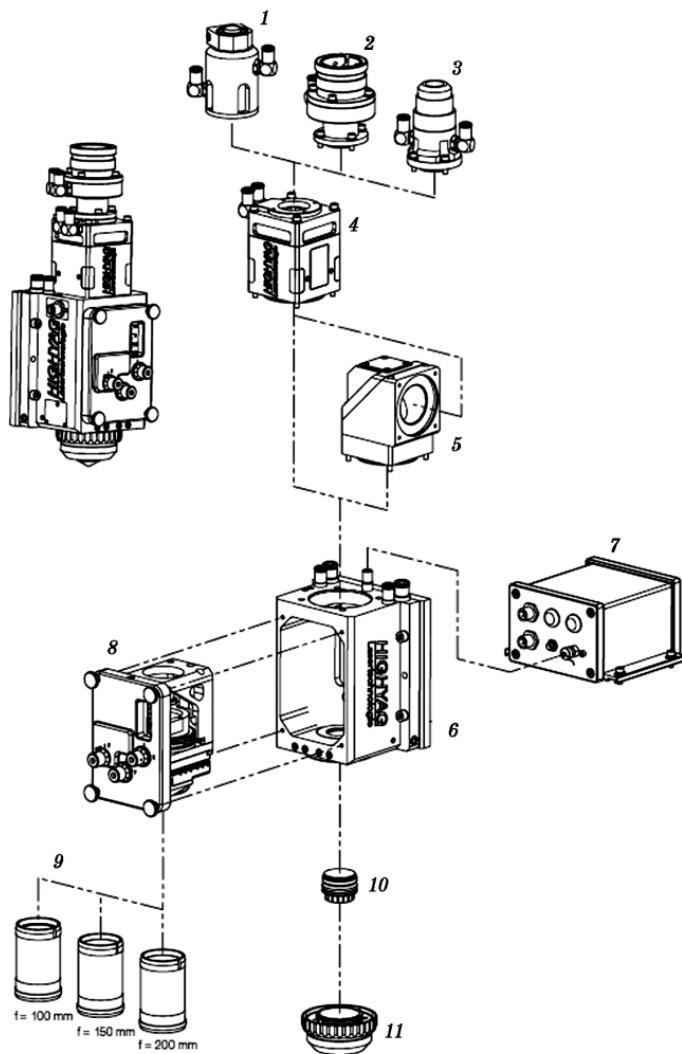


Рис. 5.50
Возможные варианты компоновки головки BIMO-fsc:

1 — коннектор волокна стандартный; 2 — коннектор волокна универсальный; 3 — коннектор волокна QBH; 4 — модуль коллиматора; 5 — модуль поворота луча на 90° ; 6 — основной модуль; 7 — модуль емкостного датчика слежения; 8 — модуль фокусировки с возможностью регулирования по осям x , y , z ; 9 — держатель фокусирующей линзы; 10 — контейнер со сменным защитным стеклом; 11 — сопло режущей головки с емкостным датчиком слежения.

Таблица 5.20

Технические характеристики головки BIMO-fsc

Фокусное расстояние головки (увеличение и фокусное расстояние)	1,00 и 100 мм, 1,50 и 150 мм, 2,00 и 200 мм
Коллиматор (увеличение и фокусное расстояние)	1,00 и 100 мм
Максимальная мощность лазерного излучения	До 4 кВт (пиковая мощность до 200 кВт)
Потери излучения	Менее 3% для 1064 нм
Длина волны	1025–1080 нм
Коннектор волокна	HIGHYAG LLK-HP, LLK-Auto, LLK-B, LLK-D, QBH
Диаметр отверстия режущего сопла	0,75–2,5 мм
X, Y-регулировка сопла	±1 мм
Z-регулировка сопла	–10 мм/+20 мм
Давление режущего газа	До 2,5 МПа
Габариты	125×110×360 мм
Масса	5,4 кг

5.2.3. ГОЛОВКИ ФИРМЫ IPG

IPG D25/D38

Оптические головки на основе сопловых частей моделей ЭИП964, ЭИП1035 и ЭИП1214 производства IPG предназначены для лазерного раскroя материалов (рис. 5.51, 5.52, 5.53).



Рис. 5.51
Внешний вид
лазерной головки
для резки
IPG d25/d38

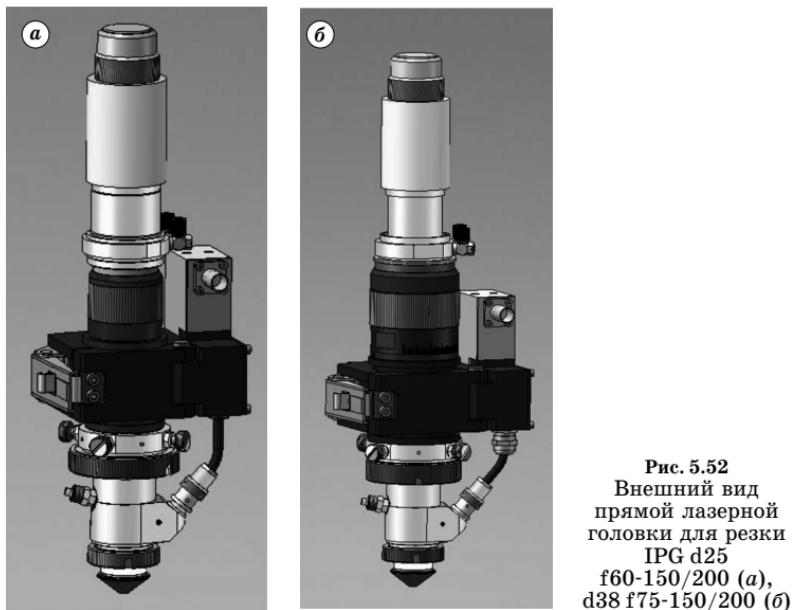


Рис. 5.52
Внешний вид
прямой лазерной
головки для резки
IPG d25
f60-150/200 (а),
d38 f75-150/200 (б)

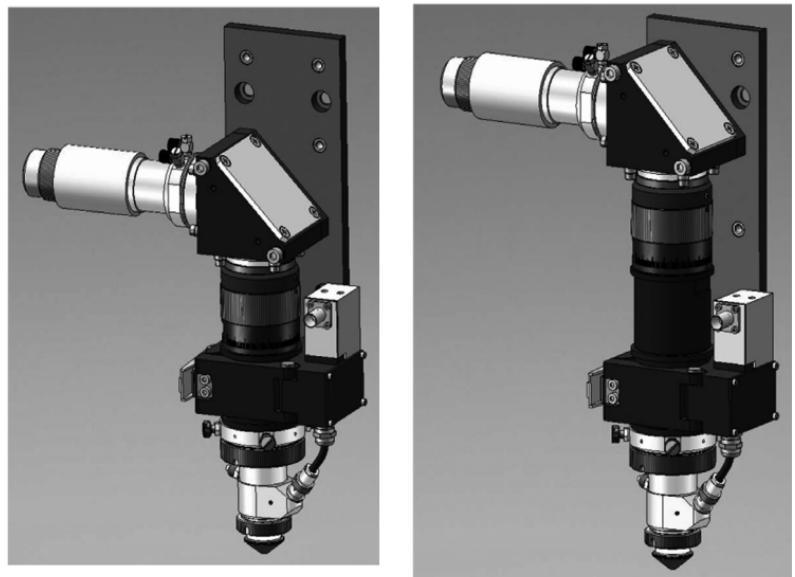
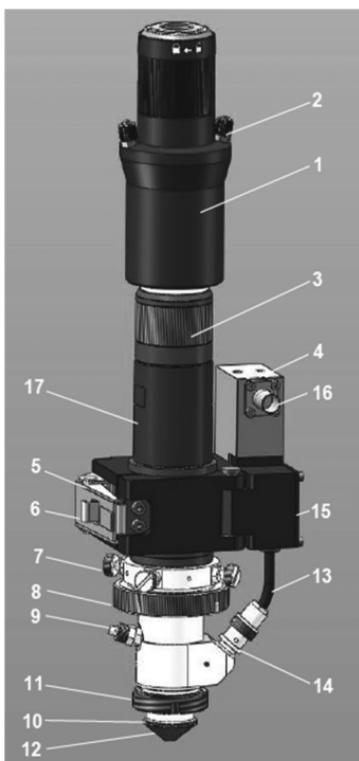


Рис. 5.53
Внешний вид поворотной лазерной головки для резки
IPG d38 f75-150/200

Рис. 5.54

Основные части головки
IPG d25 f60W-150/200
(ЭИП1206.000.000):

1 — коллиматор с водяным охлаждением P30-001214 d25 f60 с розеткой QBH;
2 — штуцеры для подключения охлаждения коллиматора шлангами 6/4 (2 шт.); 3 — фокусирующее устройство d25 f150/200 (ЭИП1052.000.000), снабжено юстировочным лимбом для продольной регулировки, диапазон регулирования ± 5 мм; 4 — предусилитель Precitec VV HP 1/5" (опционально); 5 — кронштейн крепления головки; 6 — защелка кронштейна; 7 — винты юстировки сопла в поперечном направлении (4 шт.); 8 — контрящая гайка; 9 — штуцер для подсоединения режущего газа пневмотрубкой 6/4; 10 — керамическая проставка Precitec KT B2"; 11 — гайка крепления керамической проставки; 12 — сопловая насадка; 13 — соединительный кабель емкостного датчика (опционально); 14 — разъем для подключения сопла к плате сопряжения; 15 — место установки платы сопряжения IP1112 (опционально), либо место для датчика заказчика; 16 — разъем для подсоединения прибора EG8010A; 17 — переходник для варианта с линзой f200.



Головки имеют одинаковое фокусное расстояние коллиматора, но различаются фокусными расстояниями фокусаторов. Головки ЭИП1035 и ЭИП1214 имеют принудительный обдув защитного стекла.

Головки имеют две регулировки:

- продольную — для изменения положения фокуса относительно насадки;
- поперечную — для юстировки поперечного положения насадки относительно оси лазерного луча.

Для обеспечения возможности измерения расстояния от сопловой насадки до обрабатываемого металла сопловая насадка выполнена электрически изолированной.

При необходимости головки могут укомплектовываться емкостным датчиком на основе прибора EG8010A производства PRECITEC.

Основные части головки IPG d25 f60W-150/200 представлены на рисунке 5.54. Позиции 5–16 входят в состав сопловой части ЭИП1035.000.000 оптической головки.

Расположение оптических элементов внутри оптической головки IPG d25 f60W-150/200 показано на рисунке 5.55, основные размеры — на рисунке 5.56.

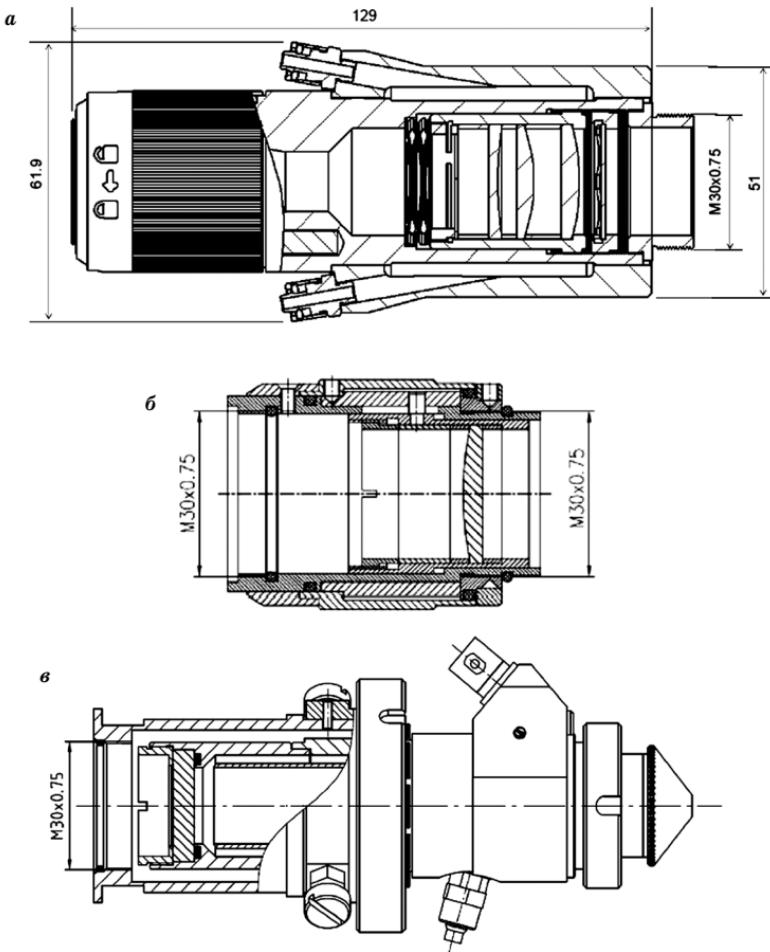


Рис. 5.55
Расположение оптических элементов
внутри оптической головки IPG d25 f60W-150/200:

а — линз в коллиматоре Р30-001214 d25 f60; *б* — линз в фокусаторе ЭИП1052;
в — защитного стекла в сопловой части ЭИП1035 оптической головки.

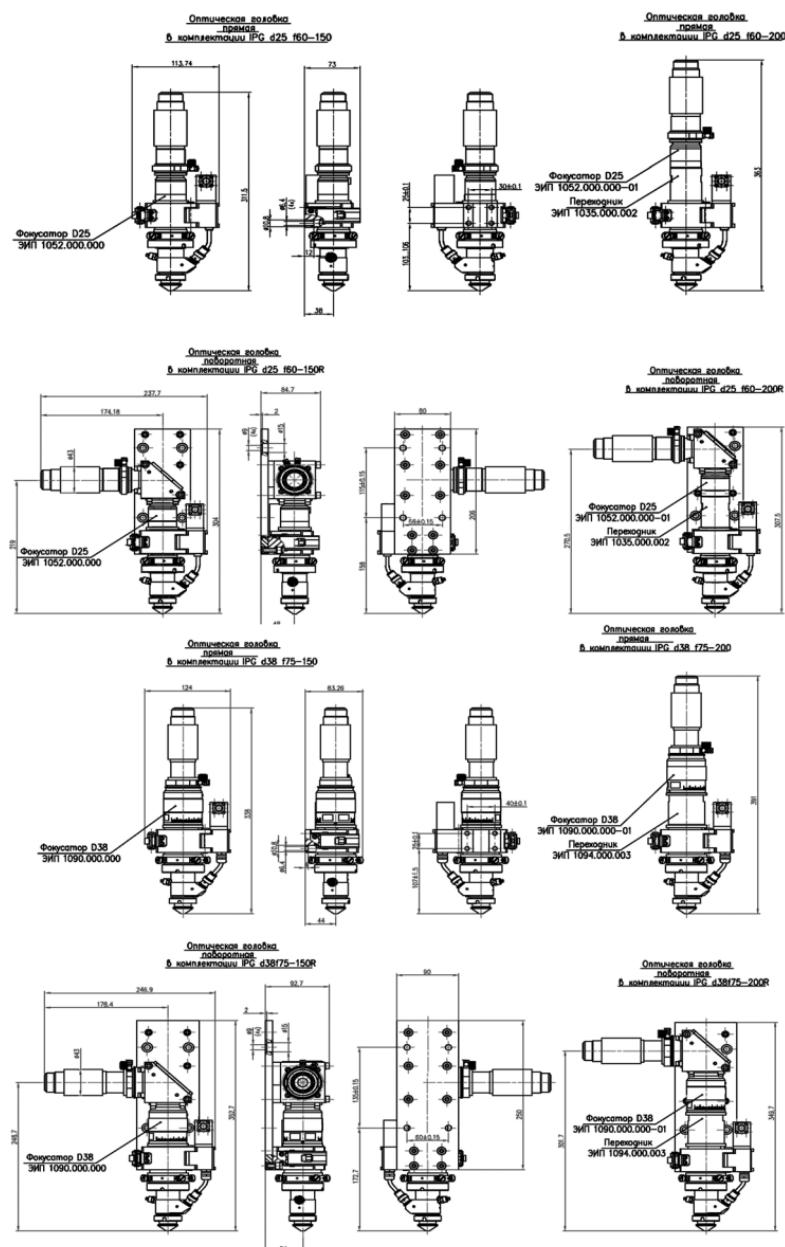


Рис. 5.56
Основные размеры головок IPG

Таблица 5.21

Технические характеристики головок IPG

Параметр	IPG d25 f60-200/300	IPG d25 f60-150/200	IPG d38 f100W-150/200
Диаметр линз, мм: коллиматора; фокусатора	25 25	50 38	
Диаметр защитного стекла, мм	26,6		38
Толщина защитного стекла, мм	5,1		9,8
Чистая апертура, мм	Максимально 22		Максимально 30
Диапазон настроек: поперечная; продольная	±1,5 ±3		±2 ±7
Фокусное расстоя- ние коллиматора, мм	60		100
Фокусное расстоя- ние фокусатора, мм	200, 300	150, 200	150, 200
Рабочая температура		5–55°C	
Температура хранения		От –25 до +55°C	
Влажность	От 30 до 95% без выпадения росы		
Принудительный обдув защитного стекла	Нет		Есть
Максимальная мощность излуче- ния, кВт	1	2	3
Максимальное дав- ление режущего газа, бар		20	
Длина вдоль про- дольной оси от сопла к верхнему концу соединения головки (стандартная кон- фигурация)	366 мм при фокусном рас- стоянии 200 мм; 466 мм при фокусном рас- стоянии 300 мм	310 мм при фокусном рас- стоянии 200 мм; 410 при фо- кусном рас- стоянии 300 мм	382 мм при фокусном рас- стоянии 150 мм; 435 мм при фокусном рас- стоянии 200 мм
Масса прибора, кг	3,5	3,0	4,0

Продолжение табл. 5.21

Параметр	IPG d25 f60-200/300	IPG d25 f60-150/200	IPG d38 f100W-150/200
Установка кронштейна крепления отверстия (поперечные)			

Технические характеристики головок IPG представлены в таблице 5.21.

РЕЖУЩАЯ ГОЛОВКА

Фокусирующие линзы:

- диаметр линз — 30 мм;
- фокусное расстояние — 125, 200, 250 мм.

Внешний вид лазерной режущей головки представлен на рисунке 5.57, габаритные размеры — на рисунке 5.58.

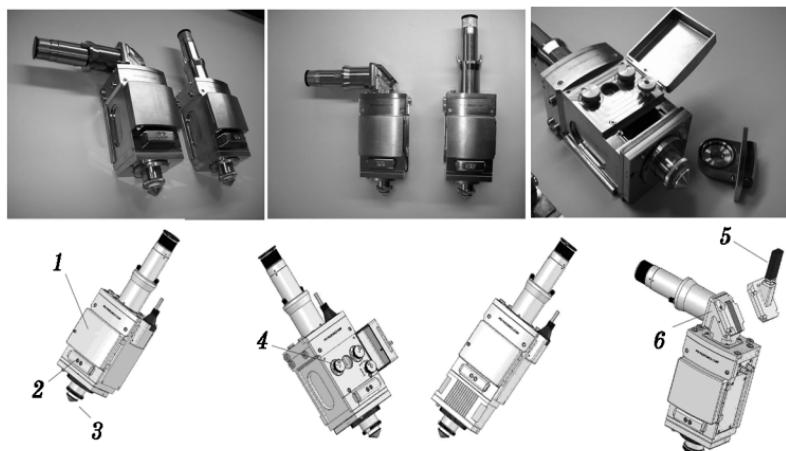


Рис. 5.57
Внешний вид лазерной режущей головки:

1 — модуль обслуживания для юстировки луча и регулирования фокусного расстояния; 2 — контейнер со сменным защитным стеклом; 3 — датчик слежения за зазором (по оси Z) со сменными соплами; 4 — юстировка луча по осям X и Y и регулирование фокусного расстояния без применения инструментов; 5 — ПЗС камера визуального наблюдения (ставится поциальному запросу); 6 — дополнительный оптический блок для поворота излучения на угол 90°.

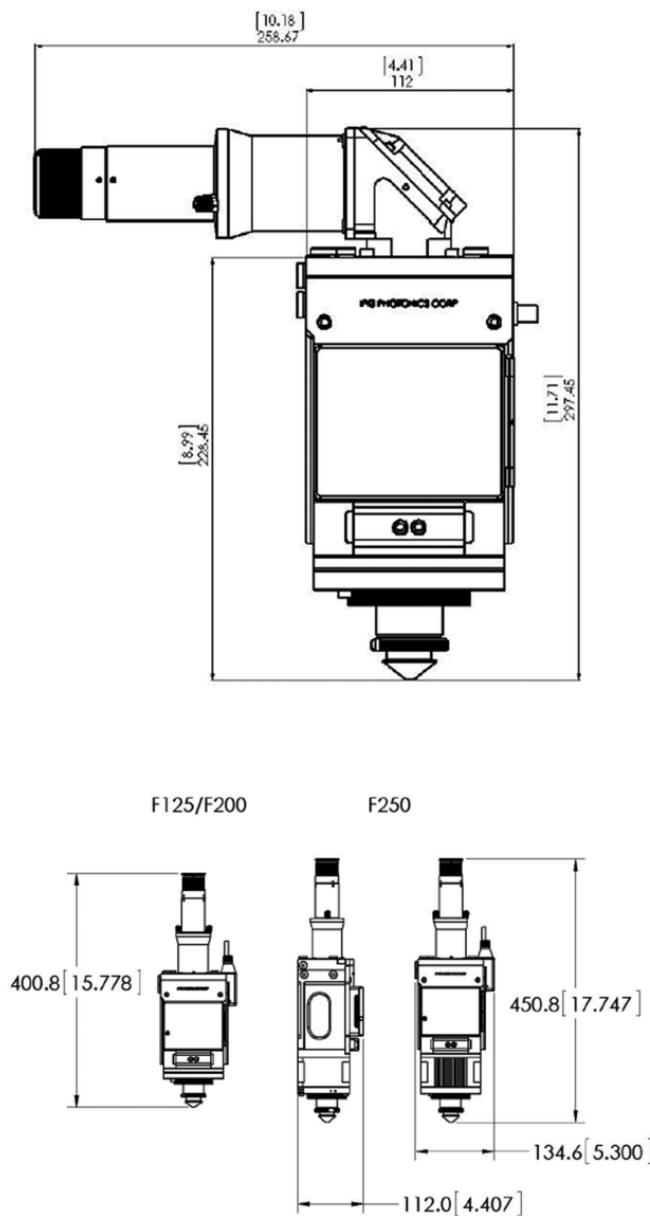


Рис. 5.58
Габаритные размеры лазерной режущей головки

5.2.4. ГОЛОВКИ ФИРМЫ PRECITEC

DS1.5"

DS1.5" (рис. 5.59) создана для 3D-резки листового металла. Имеется встроенный датчик слежения за расстоянием с возможностью изменения фокусного расстояния. Технические характеристики головки представлены в таблице 5.22.

Таблица 5.22
Технические характеристики DS1.5"



Рис. 5.59
Внешний вид
лазерной головки для
резки DS 1.5"

Максимальная мощность лазера	6 кВт
Электроника	Lasermatic®
Фокусное расстояние	5" и 7,5"
Диаметр линзы	1,5"
Максимальный диаметр линзы	34 мм
Длина вдоль оси	187 мм*, 251 мм**
Вес	3,0 кг*, 4,1 кг**
Максимальный диаметр	110 мм
Максимальная режущая кромка	46°
Диапазон юстировки в вертикальном направлении	От -8 до 2 мм*; от -8 до 2 мм**
Диапазон юстировки в вертикальном направлении с укороченным адаптером	От -6 до -16 мм** (официально)

Примечания. * При фокусном расстоянии 5".
** При фокусном расстоянии 7,5".

FINE CUTTING HEAD

Область применения головки Fine Cutting Head (рис. 5.60, 5.61) — точное машиностроение, ювелирное дело, часовая промышленность. Головки используются для резки материалов даже с высокой отражающей способностью, таких как золото, латунь, бронза и серебро. В процессе образуется гладкая поверхность среза, дальнейшая обработка не требуется.



Рис. 5.60
Внешний вид лазерной головки для резки Fine Cutting Head

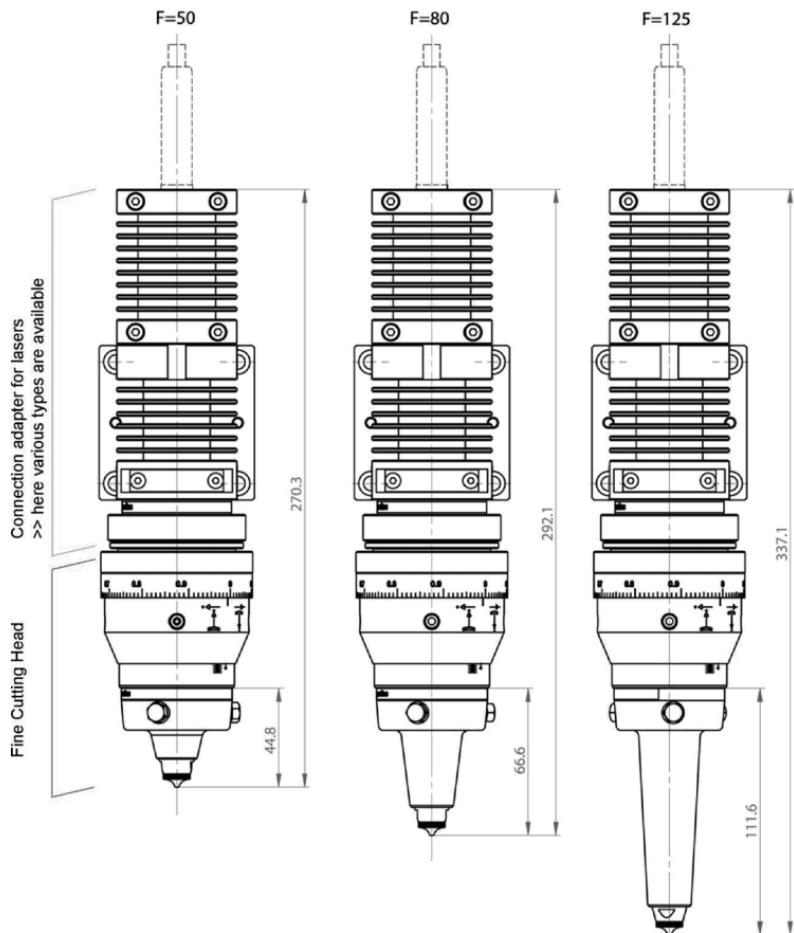


Таблица 5.23

Технические характеристики лазерной головки

Максимальная мощность твердотельного лазера	500 Вт (для длин волн 1030–1080 нм)
Максимальная мощность СО ₂ -лазера	1000 Вт
Фокусное расстояние для твердотельного лазера	50, 80, 125 мм
Фокусное расстояние для СО ₂ -лазера	2", 3", 5"
Свободная апертура	16 мм
Длина вдоль оси	94, 116, 190 мм
Масса	1,1 кг (для $F = 50$ мм)
Диаметр	68 мм
Электроника	Lasermatic® Z

Эффективность:

- резка без заусенцев;
- быстрая и точная работа;
- высокая скорость резки;
- встроенный датчик слежения за расстоянием;
- отличное соотношение цена/производительность.

Технические характеристики лазерной головки даны в таблице 5.23.

HP1.5

HP1.5 (рис. 5.62) — высокомощная режущая лазерная головка с системой замены картриджса и регулируемым с помощью ЧПУ положением линзы.

Режущая головка HP1.5"М (см. табл. 5.24) используется для резки тонких и толстых листов металла, а также для резки труб. Подобно другим моделям в серии HP, HP2"М оснащена проверенной системой замены картриджей. Это позволяет быстро и просто заменять предварительно регулируемые картриджи и автоматизировать резку разнородных материалов переменной толщины.



Рис. 5.62
Внешний вид лазерной головки для резки HP1.5" М

Таблица 5.24

Технические характеристики лазерной головки HP1.5" М

Максимальная мощность лазера	6 кВт
Электроника	Lasermatic®
Фокусное расстояние	5"/7.5"/10" (10" с удлинительным адаптером)
Диаметр линзы	1,5"
Апертура	33 мм
Длина вдоль оси	294 мм
Вес	4,9 кг
Максимальное давление режущего газа	25 бар
Вертикальный диапазон юстировки	От -14 мм до 6 мм
Скорость перемещения линзы	25 мм/с

HP2

HP2 (рис. 5.63) — высокомощная режущая лазерная головка с системой замены картриджа и регулируемым с помощью ЧПУ положением линзы. Основные части головки представлены на рисунке 5.64.



Рис. 5.63
Внешний вид лазерной головки для резки HP2

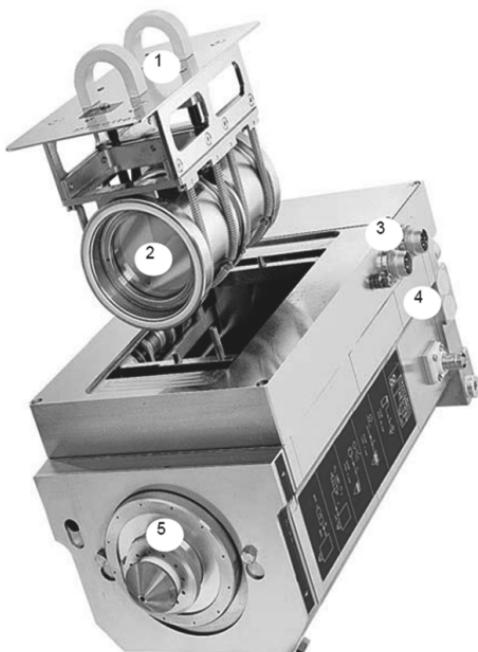


Рис. 5.64
Основные части
головки HP2:

1 — сменный картридж для использования различных фокусных расстояний; 2 — фокусирующая линза; 3 — соединения для сенсорики; 4 — соединения для подключения воздуха и воды; 5 — датчик с керамической вставкой и сопло.

Режущая головка HP2" М используется для резки тонких и толстых листов металла, а также для резки труб. Подобно другим моделям в серии HP, HP2" М оснащена проверенной системой замены картриджей. Это позволяет быстро и просто заменять предварительно регулируемые картриджи и автоматизировать резку разнородных материалов переменной толщины.

Эффективность:

- высокая скорость резки со встроенными датчиками расстояния;
- короткое время переналадки с быстрым изменением фокусного расстояния;
- предварительно регулируемая фокусирующая оптика;
- быстрый газообмен;
- оптимизированный поток газа.

Гибкость:

- резка материалов с различной толщиной;

Таблица 5.25

Технические характеристики лазерной головки HP2

Максимальная мощность лазера	8 кВт
Электроника	Lasermatic®
Фокусное расстояние	5"/7,5"/10" (10" с удлинительным адаптером)
Диаметр линзы	2"
Свободная апертура	45,5 мм
Длина вдоль оси	300 мм
Масса	9 кг
Вертикальный диапазон юстировки	От -10 до 5 мм
Размеры (в поперечном сечении)	180×162 мм

- резка неметаллических материалов, таких как пластик или дерево;
- фокусные расстояния с учетом ваших приложений.

Технические характеристики даны в таблице 5.25.

HPSSL

Лазерная головка HPSSL (рис. 5.65, табл. 5.26) предназначена для установки в станки лазерного раскрова и резки труб, которые работают с волоконными лазерами.

- Измерение расстояния:
- постоянное расстояние до заготовки при любой рабочей температуре;
 - компенсирование неравномерностей материала;
 - постоянное качество резки.

- Мониторинг:
- измерение времени точки врезания;
 - работа с фактическим временем прорезания;

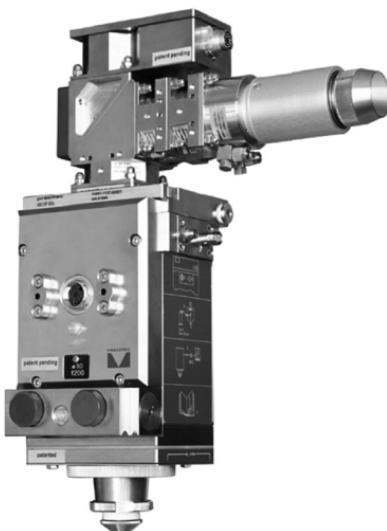


Рис. 5.65
Внешний вид лазерной головки для резки HPSSL

Технические характеристики лазерной головки HPSSL

Максимальная мощность лазера	6 кВт (с длинами волн от 900 до 1080 нм)
Электроника	Lasermatic®
Фокусные расстояния коллимации	75, 100 мм
Фокусные расстояния фокусировки	125, 200, 250 мм (250 мм с удлиненным адаптером)
Диаметр линз	30 мм
Рабочий диаметр линзы	26 мм
Масса	4,5 кг (при коллимации $F = 100$ мм, при фокусировке $F = 125$ мм)
Вертикальная регулировка	От -10 до 10 мм (фокусировка $F = 125$ мм/ $F = 150$ мм) от -15 до 5 мм (фокусировка $F = 200$ мм/ $F = 250$ мм)
Размеры (высота×ширина×глубина)	103×89×349 мм (включая коллимацию 75 мм, оптический разъем QBH)

- огромный выигрыш по времени цикла (высокая скорость).

Отслеживание профиля:

- датчик обнаруживает помехи во время резки;
- уведомление на CNC.

Процесс излучения:

- измерение излучения;
- предоставление данных на интерфейс пользователя;
- определение положения фокуса.

Мониторинг состояния защитного стекла:

- мониторинг защитного стекла на предмет загрязнений и проваров;
- онлайн-мониторинг уровня загрязнения;
- быстрая замена картриджа с защитным стеклом;
- определение присутствия/отсутствия защитного стекла.

Мониторинг сменного картриджа:

- наличие сменного картриджа;
- обнаружение фокусного расстояния (сменный картридж);
- отсутствие потери времени.



Рис. 5.66

Основные части головки HPSSL:

1 — мониторинг процесса (излучение процесса, определение профиля обработки, мониторинг врезания); 2 — модуль отклонения луча; 3 — оптический разъем; 4 — подключение воздушного охлаждения; 5 — подключение датчика; 6 — моторизированный сменимый картридж (фокусирующая линза); 7 — картридж с защитным стеклом; 8 — датчик с керамической проставкой и соплом.

Механизм настройки положения фокуса:

- резка материалов различных толщин в одном цикле;
- быстрое прорезание;
- отсутствие ручной настройки положения фокуса.

Мониторинг температуры:

- постоянный контроль температуры при помощи датчика;
- высокая безопасность процесса.

Отражение лазерного излучения:

- измерение отраженного лазерного излучения при помощи датчика;
- защита от разрушения волокна.

Стабильность процесса:

- использование новейших технологий и материалов;
- высокая динамика при постоянной стабильности процесса.

На рисунке 5.66 представлена головка для лазерной резки HP SSL с угловой коллимацией и моторизированным картриджем.

M1.5" KN, KS, HN Z, DXN, DL

Лазерные головки M1.5" KN, KS, HN Z, DXN, DL (рис. 5.67) оснащены интегрированными бесконтактными датчиками слежения за расстоянием для 2D- и 3D-резки тонких и толстых листов с механической защитой от столкновения. Технические характеристики представлены в таблице 5.27.



Рис. 5.67
Внешний вид лазерных головок для резки

Таблица 5.27

**Технические характеристики лазерных головок для резки
M1.5" KN, KS, HN Z, DXN, DL**

Параметры	M1.5 KN	M1.5 KS	M1.5 HN Z	M1.5 DXN	M1.5 DL
Фокусное расстояние	5", 7,5"	5", 7,5"	5", 7,5"	5", 7,5"	5", 7,5"
Диаметр линзы	Ø1,5"	Ø1,5"	Ø1,5"	Ø1,5"	Ø1,5"
Свободная апертура	33 мм	33 мм	33 мм	33 мм	33 мм
Длина вдоль оси	197,5 мм	197,5 мм	197,5 мм	197,5 мм	197,5 мм
Максимальное давление газа для резки	20 бар	20 бар	20 бар	20 бар	20 бар
Разрешающая способность	< 0,01 мм	< 0,01 мм	< 0,01 мм	< 0,01 мм	< 0,01 мм
Рабочий интервал: рекомендовано; возможно	1–4 мм 0,3– 10,0 мм	1–5 мм 0,3– 5,0 мм	1–5 мм 0,3– 5,0 мм	1–10 мм 0,3– 10,0 мм	1–10 мм 0,3– 10,0 мм

Продолжение табл. 5.27

Параметры	M1.5 KN	M1.5 KS	M1.5 HNZ	M1.5 DXN	M1.5 DL
Диапазон юстировки: горизонтальная; вертикальная	±1,5 мм от -2,5 до 3 мм				
Масса	1,5 кг	1,5 кг	1,4 кг	1,6 кг	1,5 кг
Рабочая температура	5–55°C	5–55°C	5–80°C	5–55°C	5–80°C
Электроника	Laser-matic®	Laser-matic®	Laser-matic® Z	Laser-matic®	Laser-matic® Z
Радиус пятна измерения ($zn = 1$ мм)	3,5 мм	1,5 мм	1,5 мм	8,5 мм	8,0 мм
Поперечная чувствительность	5,5 мм	4,9 мм	1,2– 5,0 мм	13,5 мм	8,5 мм

M1.5" S F2.5", C F2.5", S F3.75"

Лазерные головки M1.5" S F2.5", C F2.5", S F3.75" (рис. 5.68) — универсальные головки с интегрированными бесконтактными датчиками слежения за расстоянием для волоконных, газовых, для 2D-резки тонких листов с механической защитой от столкновения. Универсальность заключается в том, что при применении этих головок для волоконных и газовых лазеров заменяется только фокусирующая линза.



Рис. 5.68
Внешний вид лазерных головок для резки M1.5"

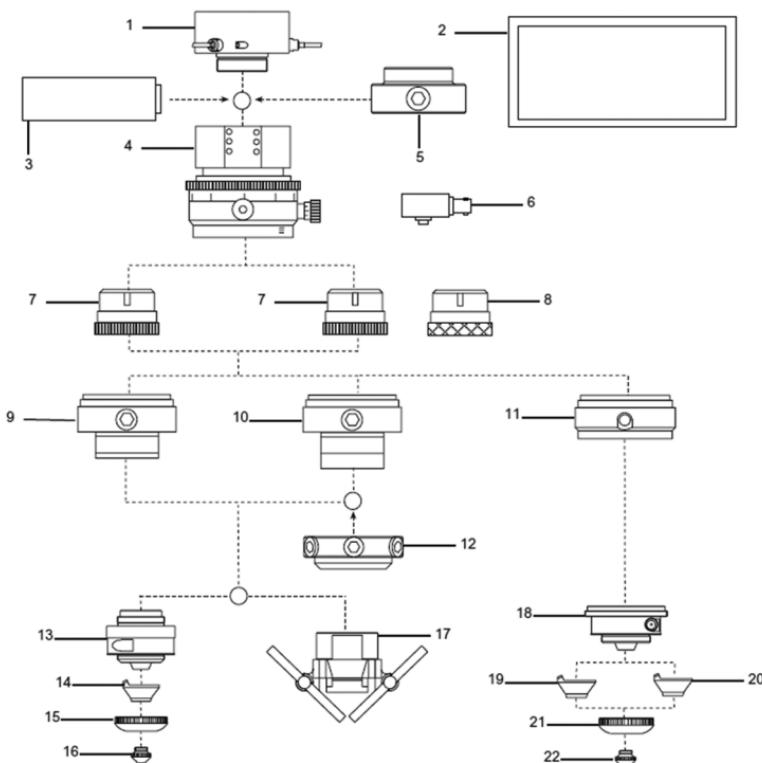


Рис. 5.69
Возможные варианты компоновки головки М1.5":

1 — датчик PS 130 (по запросу); 2 — Lasermatic®-электроника; 3 — емкостный датчик; 4 — верхняя часть М1.5"; 5 — ввод для охлаждения; 6 — предусилитель; 7 — держатель для линз 1,1" и 1,5"; 8 — монтажный инструмент; 9 — нижняя часть, укороченная для головки М1.5 S F3.75"; 10 — нижняя часть для головок М1.5 S F3.75" и М1.5" С F2.5"; 11 — нижняя часть для головок М1.5" S F2.5" и М1.5" С F2.5"; 12 — ввод для охлаждения; 13 — приставка с датчиком для головки М1.5" S F3.75"; 14 — керамическая часть; 15 — накидная гайка; 16 — сопло-электрод; 17 — CrossJet (по запросу); 18 — вставка датчика для головки М1.5" S F2.5" и М1.5" С F2.5"; 19 — керамическая вставка; 20 — шайба-изолятор; 21 — накидная гайка; 22 — сопло-электрод.

Благодаря своим коротким фокусным расстояниям эти режущие головки идеально подходят для резки листового металла волоконными и газовыми лазерами.

Все настройки этих режущих головок, такие как фокусировка и др., можно легко сделать извне. Положение ТСР при этом остается неизменным.

Все режущие головки оснащены механической защитой от столкновения для защиты корпуса сопла от повреждений. Даже во время фазы программирования риск столкновения и риск повреждения отсутствуют.

Эти головки производят точные резы, их легко настроить, и они удобны в обслуживании.

Охлаждение объектива происходит благодаря режущему газу, поступающему от верхней поверхности объектива.

Возможные варианты компоновки головки представлены на рисунке 5.69. Технические характеристики головок для резки — в таблице 5.28.

Таблица 5.28

**Технические характеристики головок для резки
M1.5" S F2.5", C F2.5", S F3.75"**

Параметры	M10.5 S F2.5"	M1.5 C F2.5"	M1.5 S F3.75"
Фокусное расстояние	2,5"	2,5"	3,75"
Диаметр линзы	1,5"	1,5"	1,5"
Свободная апертура	33 мм	33 мм	33 мм
Длина вдоль оси	135 мм	135 мм	166 мм
Максимальное давление газа для резки	20 бар	20 бар	20 бар
Разрешающая способность	< 0,01 мм	< 0,01 мм	< 0,01 мм
Рабочий интервал: рекомендовано; возможно	1 мм 0,3–10,0 мм	1 мм 0,3–10,0 мм	1 мм 0,3–10,0 мм
Диапазон юстировки: горизонтальная; вертикальная	±1,5 мм от -1,0 до 3,0 мм	±1,5 мм от -1,0 до 3,0 мм	±1,5 мм от -1,0 до 3,0 мм
Масса	1,4 кг	1,4 кг	1,5 кг
Рабочая температура	5–55°C	5–80°C	5–55°C
Электроника	Lasermatic®	Lasermatic® Z	Lasermatic®
Радиус пятна измерения ($z_n = 1$ мм)	3,5 мм	8,0 мм	3,5 мм
Поперечная чувствительность	7,0 мм	8,5 мм	7,0 мм

SOLIDCUTTER

В режущую систему SOLIDCUTTER (рис. 5.70, 5.71) был вложен многолетний опыт работы компании Precitec в области лазерной резки. Быстро реагирующий датчик контроля расстояния с интегрируемым контролем высоты обеспечивает высокое качество резки с большой скоростью даже сложных деталей. Головка может быть использована с однодиодными и твердотельными лазерами. Линзы защищены от пыли и ход лучей полностью герметизирован, что является причиной для длительного срока службы оптики в грубых производственных условиях. Технические характеристики представлены в таблице 5.29.

Рис. 5.70
Внешний вид
лазерной головки
для резки Solidcutter

Рис. 5.71
Основные части
головки HPSSL:
1 — оптический разъём; 2 — подключение
водяного охлаждения
и режущего газа; 3 —
механизм регулирования
положения головки;
4 — датчик.



Таблица 5.29

Технические характеристики лазерной головки для резки Solidcutter

Максимальная мощность лазера	4 кВт (с длинами волн от 900–1080 нм)
Электроника	Lasermatic® Z
Фокусные расстояния коллимации	75, 100 мм
Фокусные расстояния фокусировки	75, 100, 125 мм
Рабочий диаметр линзы	26 мм
Оевые размеры	От 350 мм (350, 380, 402 мм)
Ход головки	±15 мм
Габаритные размеры (шир. × глуб.)	Около 163×132 мм
Масса системы	Около 5 кг

Эффективность:

- высокие скорости резки сложных 3D-деталей (резка в пространстве), благодаря высокодинамичной оси z с закрытым контуром (автоматического регулирования);
- компактный, стильный дизайн, простое управление;
- полная герметичность конструкции благодаря концепции двойной камеры;
- герметичный модуль оптики без стороннего подвода продувочного воздуха;
- встроенные дополнительные фильтры;
- подключение Robcad-Simulation без трудоемкой оптимизации на производственное оборудование;
- высокие скорости реза — до 20 м/мин.

Гибкость:

- фокусные расстояния — по вашему запросу;
- все подсоединения расположены в верхней области головки;
- прямые и угловые конструкции головки;
- минимальное время переналадки, высокий срок службы.

Удобство и безопасность:

- фланец для простого и быстрого монтажа на оборудование;
- датчик столкновения с автоматическим сигналом отключения оборудования;
- оптимизированная струя режущего газа до 25 атм;
- интегрированный коллиматор;
- различные устройства охлаждения.

YITC

YITC (рис. 5.72) — компактная головка для резки волоконными и Nd:YAG лазерами:

- интегрированный бесконтактный контроль расстояния;
- подходит для различных YAG-лазер источников;
- магнитная защита от столкновения;
- тонкий дизайн;
- предназначен для промышленного использования.

Еще одна тенденция в обработке листового металла с использованием лазеров является сокращение полых заготовок «изнутри наружу». Эта технология в основном ис-

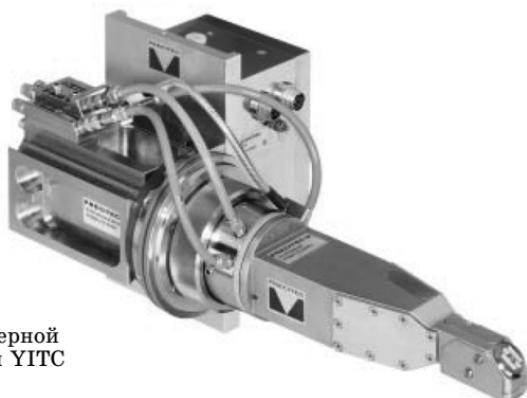


Рис. 5.72
Внешний вид лазерной головки для резки YITC

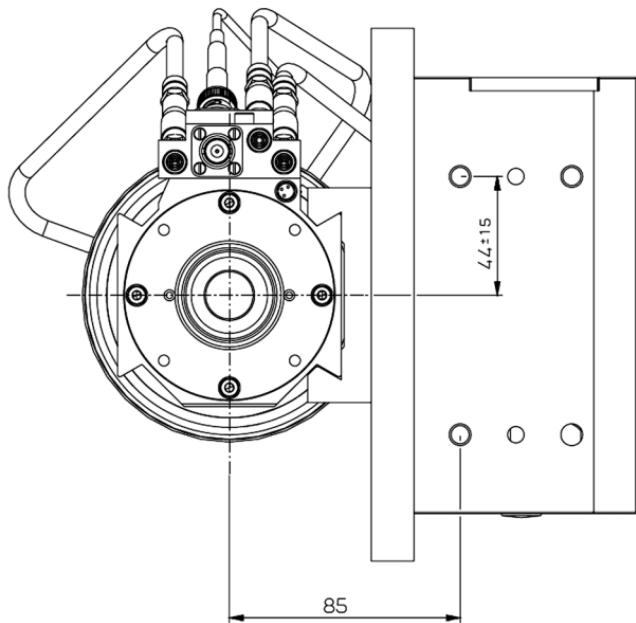


Рис. 5.73
Общий вид крепления лазерной головки к роботу

пользуется, если необходимо избежать брызг на внутренней стороне металлического листа или частей трубы, которые будут порезаны. Кроме того, передний край на внутренней поверхности получается без заусенцев.

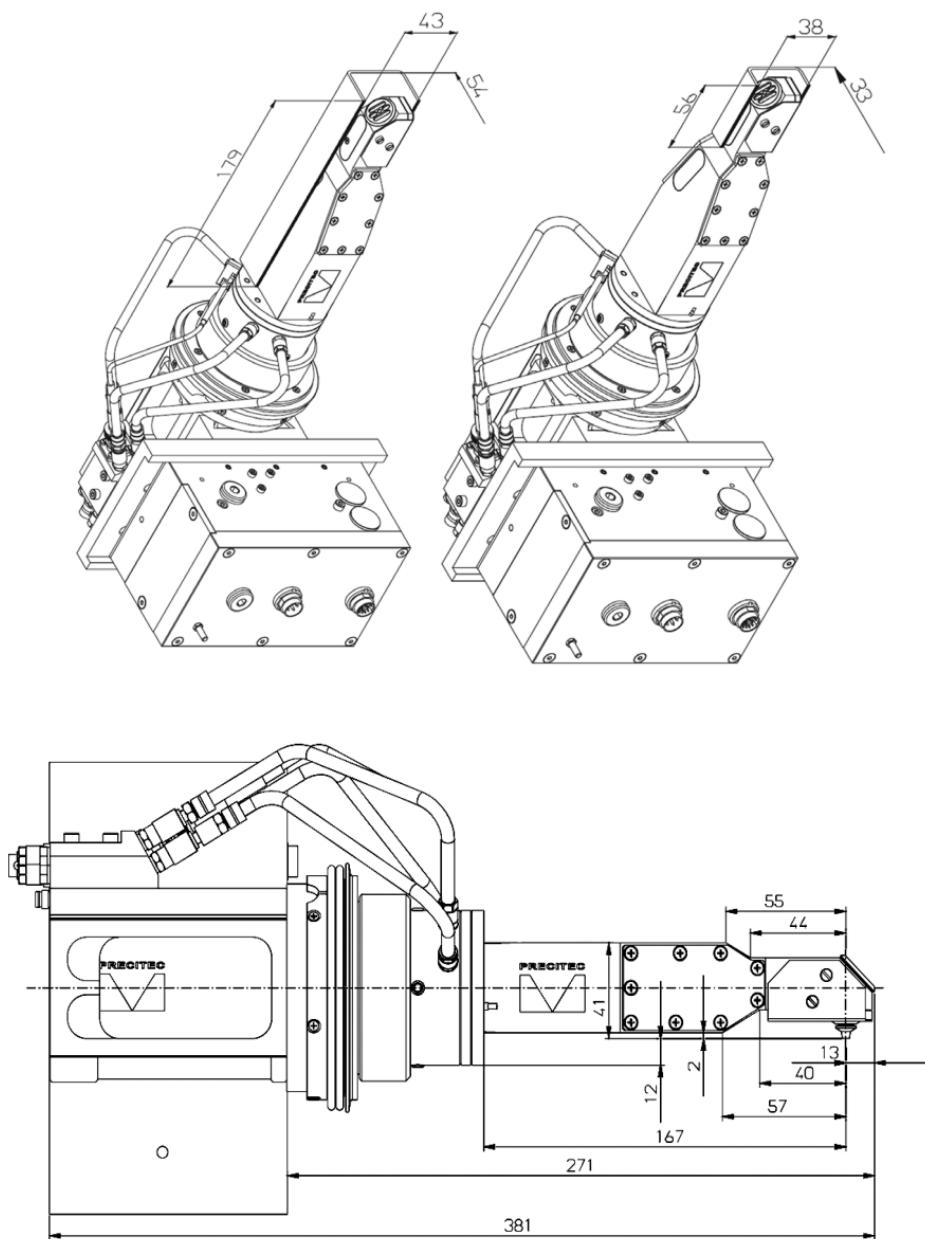


Рис. 5.74
Основные размеры головок различной длины

Precitec предлагает YITC режущую головку для этого типа приложений. Головка специально разработана для роботов и обладает тонким дизайном, очень универсальная, идеально подходит для резки в узких, труднодоступных местах. YITC режущая головка используется в основном для обработки гидроформованных частей, например, в автомобильном производстве.

Блок водяного охлаждения интегрирован в головку, что гарантирует должное охлаждение оптических компонентов. Чтобы избежать повреждений вследствие коррозии, для контура охлаждения была выбрана специальная нержавеющая сталь.

Конструкция позволяет установить линейный привод на обе стороны при установке головки на робота (рис. 5.73).

Головки различной длины представлены на рисунке 5.74. Технические характеристики — в таблице 5.30.

Таблица 5.30

**Технические характеристики лазерной головки
для резки YITC**

Фокусное расстояние	100 мм
Диаметр линзы	25 мм
Свободная апертура	22 мм
Максимальная мощность лазера	1,5 кВт
Диапазон юстировки: вертикальный; горизонтальный	±5 мм ±1,5 мм
Диаметр защитного стекла	21,5 мм
Минимальная ширина трубки	50 мм
Глубина проникновения	56, 179 мм
Максимальное давление режущего газа	20 бар
Охлаждение	Оптика — режущим газом, головка — водяное охлаждение
Электроника	Lasermatic® Z
Разъем подключения	BNC-разъем

YK-52

Лазерная головка YK-52 (рис. 5.75) — головка с интегрированным бесконтактным датчиком слежения за расстоянием для волоконных и Nd:YAG-лазеров, предназначенных для 3D-резки:

- конструкция небольших габаритов;
- низкий вес головки;
- вертикальная и горизонтальная юстировка линз с неизменной точкой центра головки;
- защита от столкновения с помощью магнитного датчика;
- сигналы ошибки в случае обрыва кабеля и при превышении области измерения.

Лазерная головка для резки YK-52 выпускается с тремя фокусными расстояниями, которые наиболее необходимы в современных процессах лазерной резки (табл. 5.31). Компоненты этой головки имеют модульную структуру и поэтому могут легко собираться и дополняться. Может быть быстро сделан переход к различным фокусным расстояниям. Особо

характеристики этой режущей головки являются ее низкий вес и оптимальная тонкая конструкция. Все настройки могут быть легко осуществлены с внешней стороны.

Вместе с Precitec-осями головка образует компактную, автономную систему с автоматическим регулированием — идеальное решение для использования на роботах. Опционально возможна установка системы магнитной коллизионной защиты. Эта система способствует отделению режущей головки от оси z при горизонтальном столкновении. Специальный сильфон исключает падение головки.

Режущая головка YK-52 должна быть расположена в ходе лучей позади коллиматора. Ключевым элементом является присоединитель-



Рис. 5.75
Внешний вид лазерной головки для резки YK-52

Таблица 5.31

**Технические характеристики лазерной головки
для резки YK-52**

Параметры	<i>F</i> = 80 мм	<i>F</i> = 120 мм	<i>F</i> = 150 мм
Фокусное расстояние	80	120	150
Диаметр линзы	50 мм	52 мм	52 мм
Апертура	46 мм	48 мм	48 мм
Рабочий интервал: рекомендовано; возможно	0,3–3,0 мм 0,3–5,0 мм	0,3–3,0 мм 0,3–5,0 мм	0,3–3,0 мм 0,3–5,0 мм
Диапазон юстировки: горизонтальная; вертикальная	±1 мм от –4 до 5 мм	±1 мм от –4 до 5 мм	±1 мм от –4 до 5 мм
Длина вдоль оси	138,5 мм	180,7 мм	205,3 мм
Разрешающая способность	< 0,01 мм	< 0,01 мм	< 0,01 мм
Присоединительные размеры головки	4×M4	4×M4	4×M4
Максимальное давление режущего газа	20 бар	20 бар	20 бар
Вес	0,9 кг	1,0 кг	1,1 кг
Рабочая температура	5–80°C	5–80°C	5–80°C
Электроника	Lasermatic® Z	Lasermatic® Z	Lasermatic® Z
Охлаждение	Воздушное охлаждение линзы режущим газом		

ная головка с держателем линз и фокусирующей линзой. Могут быть использованы линзы диаметром не более 52 мм. Центрирование линзы производится с помощью противоположно расположенных винтов. Центрирование составляет ±1 мм в любом направлении. Вертикальное положение фокуса может быть изменено перемещением линзы с ее держателем. При желании возможен подбор держателя линзы под ее диаметр. При использовании вспомогательного инструмента после открытия режущей головки возможна регулировка положения фокуса, а также простая замена линз.

Для открытия головки необходимо отвинтить блок с датчиком, расположенный под присоединительной головкой. При этом возможен доступ к защитному стеклу так,

что блок с датчиком может быть легко извлечен для очистки или замены. Юстировки линзы и все режущей головки остаются при этом свободными от влияний.

Дополнительная информация по различным коллиматорам может быть выслана по запросу.

Блок с датчиком и оборудованием. В соответствии с фокусным расстоянием фокусирующей линзы используются вместе подходящий держатель линзы и вставной блок с датчиком. Предлагаются компоненты для фокусных расстояний 80, 120 и 150 мм. Для каждого вставного блока с датчиком имеются соответствующие сопло-электроды, которые могут быть использованы альтернативно.

Подача режущего газа. Подключение режущего газа и присоединительная втулка для электродного кабеля находятся непосредственно на самой присоединительной головке. Режущим газом одновременно охлаждаются линза и защитное стекло. Выравнивание давления между верхней и нижней сторонами защитного стекла снижает нагрузку на него так, что по сравнению с обычными режущими головками без выравнивания давления, как правило, могут быть использованы существенно более тонкие защитные стекла.

Коллизионная защита (оциально). Магнитная коллизионная защита вызывает отделение режущей головки от оси *z* при горизонтальных столкновениях. Сильфон при этом будет препятствовать падению головки. Во время отклонения движения увеличивается расстояние от конца сопла к присоединительному фланцу.

Охлаждение. Режущая головка УК-52 имеет несколько возможностей охлаждения. Линзы охлаждаются режущим газом, вставной блок с датчиком также имеет воздушное охлаждение.

Возможности подключения. Благодаря четырем отверстиям с резьбой M4 в присоединительной головке становится возможным прикрепление присоединительного фланца на лазер или коллиматор. Для установки на Precitec-оси LD 30C D50 и LD 30C D66 существуют подходящие адAPTERЫ. Для присоединения коллиматора служат присоединительные адAPTERЫ с внутренней резьбой M54×1, M58×1

или M58×0,5, как присоединительный элемент, подлежащий доставке. Присоединительные отверстия и винтовая резьба могут модифицироваться в соответствии с желаниями клиента.

РЕЖУЩАЯ ГОЛОВКА YR-30

Режущая головка YR-30 (рис. 5.76) снабжена интегрированным бесконтактным датчиком слежения за расстоянием для Nd:YAG-лазеров, предназначенных для 3D-резки:

- конструкция небольших габаритов;
- предварительно регулируемая фокусирующая система;
- все узлы водяного охлаждения сделаны из коррозионно-стойкой нержавеющей стали высокого качества;
- сигналы ошибки в случае коррозии, обрыва кабеля и при превышении диапазона измерения.



Рис. 5.76
Внешний вид лазерной головки для резки YR-30

Таблица 5.32

Технические характеристики лазерной головки для резки YR-30

Фокусное расстояние	73, 100 мм
Диаметр линзы	30 мм
Свободная апертура	27 мм
Длина в осевом направлении	120 мм (при фокусном расстоянии 73 мм), 150 мм (при фокусном расстоянии 100 мм)
Максимальное давление газа для резки	25 бар
Охлаждение	Водяное охлаждение корпуса, воздушное охлаждение линзы режущим газом
Разрешающая способность	< 0,01 мм
Рабочий интервал: рекомендовано; возможно	1 мм 0,3–10,0 мм

Продолжение табл. 5.32

Диапазон юстировки: горизонтальная; вертикальная	$\pm 1,0$ мм от -6 до 4 мм
Вес	1,1 кг
Рабочая температура	5–80°C
Электроника	Lasermatic® Z
Радиус пятна измерения ($z_n = 1$ мм)	6 мм
Боковая чувствитель- ность	11 мм

Резка головкой YR-30 отлично подходит для резки с бесконтактным слежением за расстоянием с помощью Nd:YAG-лазеров. Показывает хорошие результаты при резке материалов с высоким коэффициентом отражения. Технические характеристики лазерной головки для резки YR-30 представлены в таблице 5.32.

5.3. ГОЛОВКИ ДЛЯ НАПЛАВКИ

5.3.1. ГОЛОВКИ ФИРМЫ PRECITEC

YC-50

YC-50 (рис. 5.77) — головка для лазерной наплавки CO₂ и твердотельными лазерами. Применяется, когда требуется повысить износостойкость или коррозионную стойкость изделия. Может применяться для восстановления режущих инструментов, турбинных лопаток и пресс-форм, для усиления швов и т. д.

YC-52

Благодаря лазерной наплавке можно увеличить износостойкость и улучшить коррозионные свойства конструктивных элементов. Для этого метода лазерной обработки компания Precitec предлагает головку YC-52 (рис. 5.78, 5.79). Она может быть использована как с газовыми CO₂, так и с твердотельными лазерами. Области применения представленной головки могут быть, к примеру, ремонтная



Рис. 5.77
Внешний вид
лазерной головки
для наплавки YC-50



Рис. 5.78
Внешний вид
лазерной головки
для наплавки YC-52

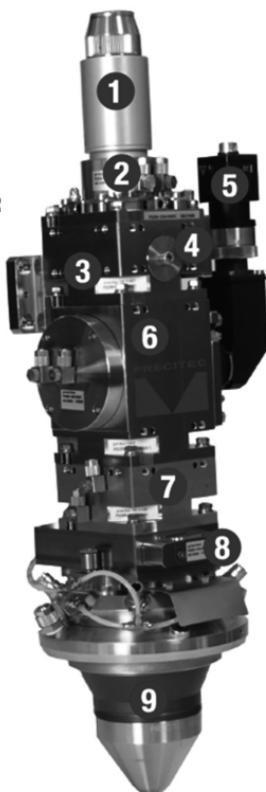


Рис. 5.79
Основные части головки HPSSL:

1 — оптический разъем; 2 — апертурная диафрагма, водяное охлаждение; 3 — коллимирующая линза, водяное охлаждение; 4 — модуль для установки положения фокуса; 5 — модуль камеры наблюдения; 6 — модуль рассеивающей линзы; 7 — фокусирующая линза, водяное охлаждение; 8 — картридж с защитным стеклом; 9 — соосное кольцевое сопло.

Таблица 5.33

**Технические характеристики лазерной головки
для резки YC52**

Рабочее расстояние	От 12 до 14 мм (24 мм при фокусном расстоянии 250 мм)
Минимальный диаметр TCP (фокуса порошка)	0,7 мм (кольцевое сопло), 2,0 мм (4-струйное)
Ширина шва	Зависит от мощности лазера и возможной расфокусировки лазерного луча, до 6 мм
Рабочий диаметр линзы	48 мм
Масса	Около 5,5 кг

сварка рабочих инструментов, турбинных лопаток или пресс-форм, восстановление поверхностей, а также генерирование структур в инструментальном производстве, автомобилестроении и авиационной промышленности. Технические характеристики лазерной головки даны в таблице 5.33.

Эффективность:

- подходит для высоких мощностей лазера;
- высокое качество, благодаря высококачественной оптике;
- настройка ширины шва при помощи модуля для положения фокуса;
- линзы защищены защитными стеклами;
- долгий срок службы защитных стекол, благодаря соосной подаче защитного газа.

Гибкость:

- модульная конструкция;
- индивидуальная, специфическая конфигурация головки по запросу клиента;
- простая интеграция в уже существующие станки и системы;
- различные концепции сопел (внеосевое сопло, сопло с четырех сторонней подачей порошка, коаксиальное кольцевое сопло);
- различные коллимирующие и фокусные расстояния.
Удобство в использовании и безопасность:
- высокая повторяемость процесса благодаря точному совмещению лазерного луча и подаче порошка;

- адаптивная для всех распространенных типов лазеров;
- простая замена оптики;
- картридж с защитным стеклом с мониторингом состояния;
- рабочее состояние контролируется при помощи ПК.

Для оптимальной интеграции наплавочной головки YC-52 в автоматизированные производственные линии и системы в ее конструкции предусмотрены различные датчики для мониторинга как самой оптики, так и всего процесса наплавки:

Контроль оптики. При помощи контроля защитного стекла можно определять уровень загрязнения и температуру защитного стекла. Также само наличие защитного стекла находится под контролем.

Процесс управления. Благодаря встроенным датчикам мониторинга процесса становится возможным точное соблюдение глубины и ширины напыляемого шва, при напылении нескольких слоев или прерывистой геометрии.

Контроль качества. Онлайн-мониторинг процесса при помощи системы LWM.

5.4. ГОЛОВКИ ДЛЯ ПАЙКИ

5.4.1. ГОЛОВКИ ФИРМЫ SCANSONIC

ALO1

ALO1 — адаптивная оптическая лазерная система с отслеживанием шва с помощью сварочной проволоки (рис. 5.80).

Запатентованный процесс отслеживания шва позволяет ALO1 находить начало шва и точно направлять процесс именно по шву.

Характеристики:

- легкий вес — оптика 1";
- для длины волны 900–1030, 1064, 1080 нм;
- мощность лазера до 4 кВт;



Рис. 5.80
Внешний вид
лазерной головки
для пайки ALO1

- коэффициент масштабирования 2,0:1, 2,5:1, 3,2:1; 4,0:1; 5,3:1;
- коннектор для волокон Trumpf В или Тип D (ЛЛК-Авто);
- интегрированная система CrossJet.

5.5. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ГОЛОВКИ

5.5.1. ГОЛОВКИ ФИРМЫ KUGLER

ГОЛОВКА LK190F

Зеркальная фокусирующая головка LK190F предназначена для сварки и резки волоконными лазерами.

Головка LK190F имеет модульную конструкцию и компактный дизайн (рис. 5.81, 5.82). Она оснащена сменными асферическими зеркалами с прямым водяным охлаждением, что позволяет использовать ее с лазерами мощностью до 20 кВт. Дополнительно на все зеркала может быть нанесено высококачественное отражающее покрытие EGY. Волоконные лазеры имеют ряд достоинств: небольшие габариты, хорошее качество выходного излучения, высокую мощность, поэтому остальные системы в лазерных комплексах

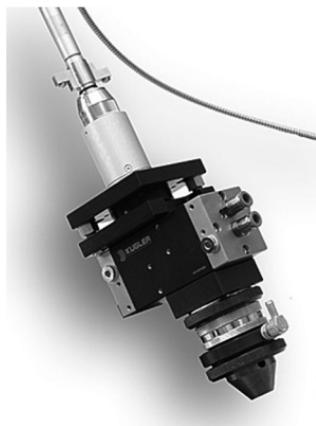


Рис. 5.81
Фокусирующая головка
для волоконных лазеров
высокой мощности LK190F



Рис. 5.82
Лазерная сварочная
головка LK190 с моторизо-
ванным вращением блока

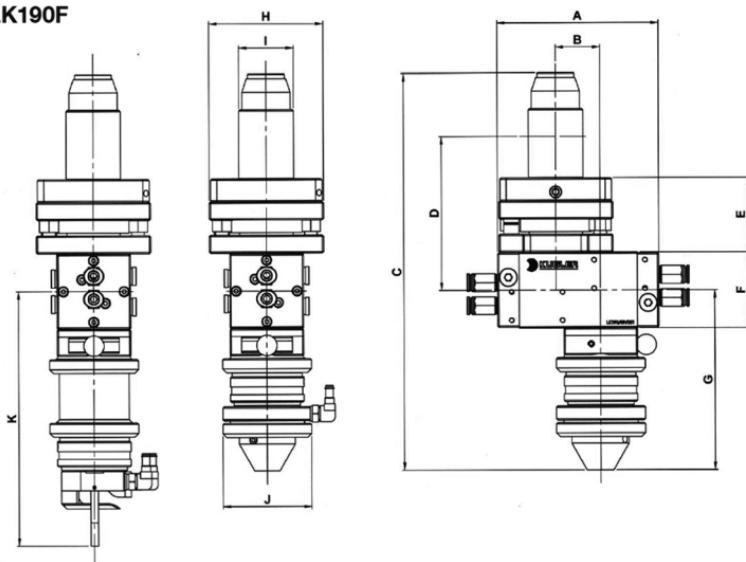
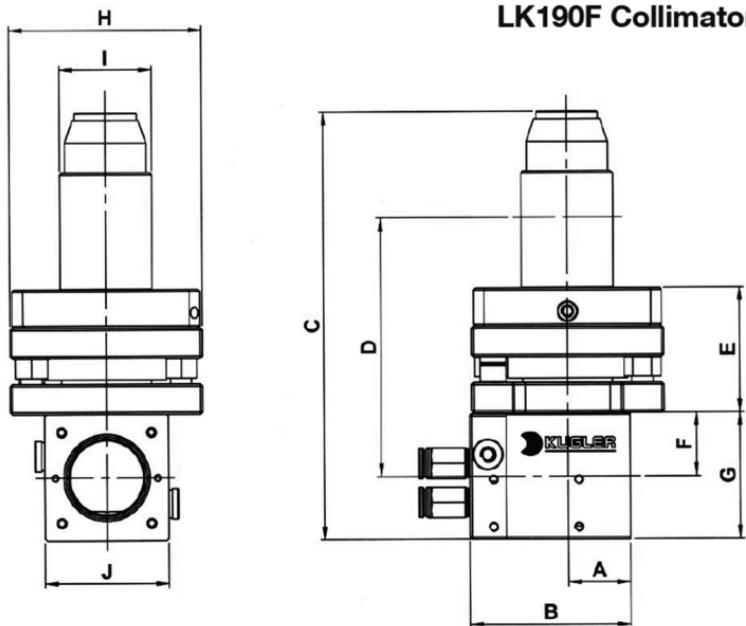
LK190F**LK190F Collimator**

Рис. 5.83
Основные размеры

Таблица 5.34

Основные размеры

<i>A</i> , мм	127	29	<i>G</i> , мм	140,5±6	58,5
<i>B</i> , мм	35	75	<i>H</i> , мм	±90	±90
<i>C</i> , мм	309,7 ± 6	198,2	<i>I</i> , мм	Ø43h8	Ø43h8
<i>D</i> , мм	120	120	<i>J</i> , мм	Ø70	58
<i>E</i> , мм	58	58	<i>K</i> , мм	198,7 ± 6	—
<i>F</i> , мм	59	29,5			

Таблица 5.35

Технические характеристики головки LK190

Максимальная мощность лазера	20 кВт
Фокусное расстояние	150, 175, 200, 250, 300 мм
Апертура	35 мм
Охлаждение	Водяное прямое охлаждение зеркал

должны соответствовать данным критериям. Вот почему KUGLER создал компактную, надежную головку LK190F с оптикой наилучшего качества. Установленное сопло Лаваля позволяет производить эффективную резку на расстоянии 10 мм до поверхности материала.

Основные размеры головки представлены на рисунке 5.83 и в таблице 5.34, технические характеристики — в таблице 5.35.

5.5.2. ГОЛОВКИ ФИРМЫ SCANSONIC

**SCAPACS.
УНИВЕРСАЛЬНАЯ ГОЛОВКА**

Внешний вид головки представлен на рисунке 5.84, модульные элементы — на рисунке 5.85. Схема компоновки лазерной головки — на рисунке 5.86.

1. Блок подключения волоконного лазера (волокна). Водяное охлаждение отводит поглощенное тепло. Возможны варианты для подключения различных типов волокон (табл. 5.36).

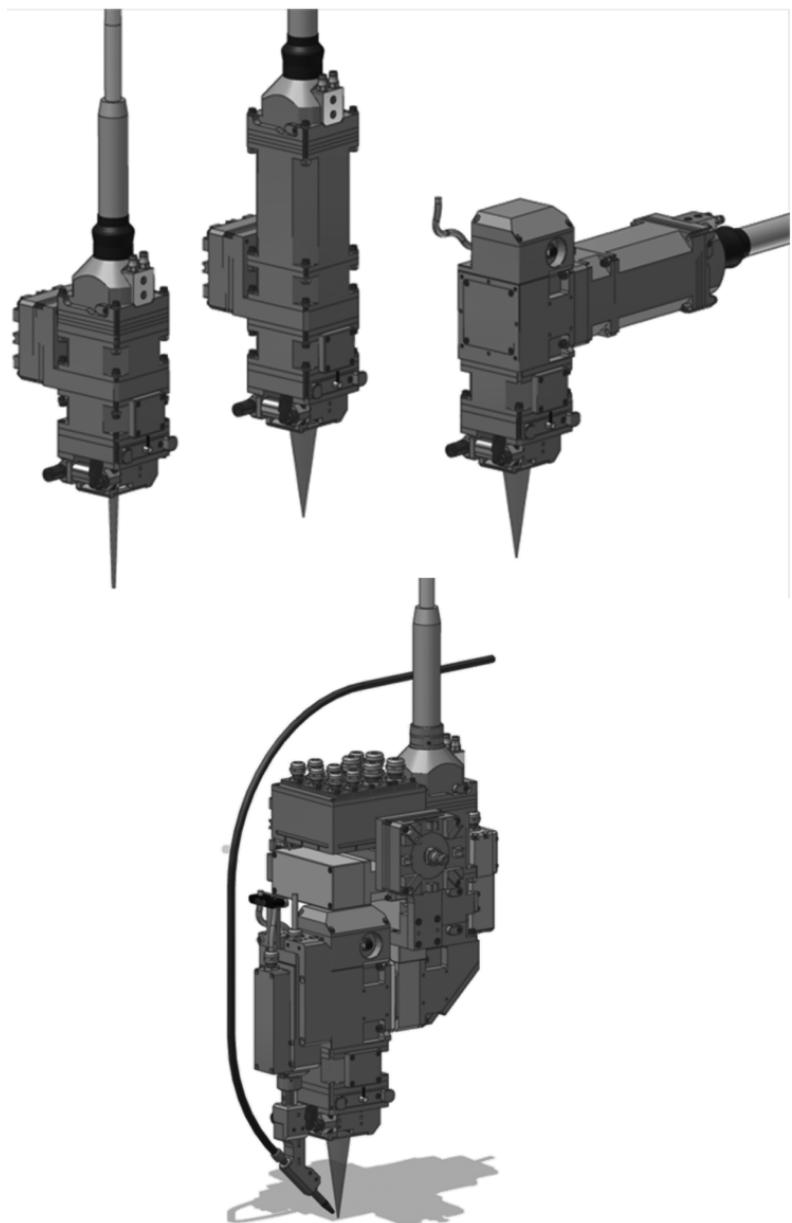


Рис. 5.84
Внешний вид головки

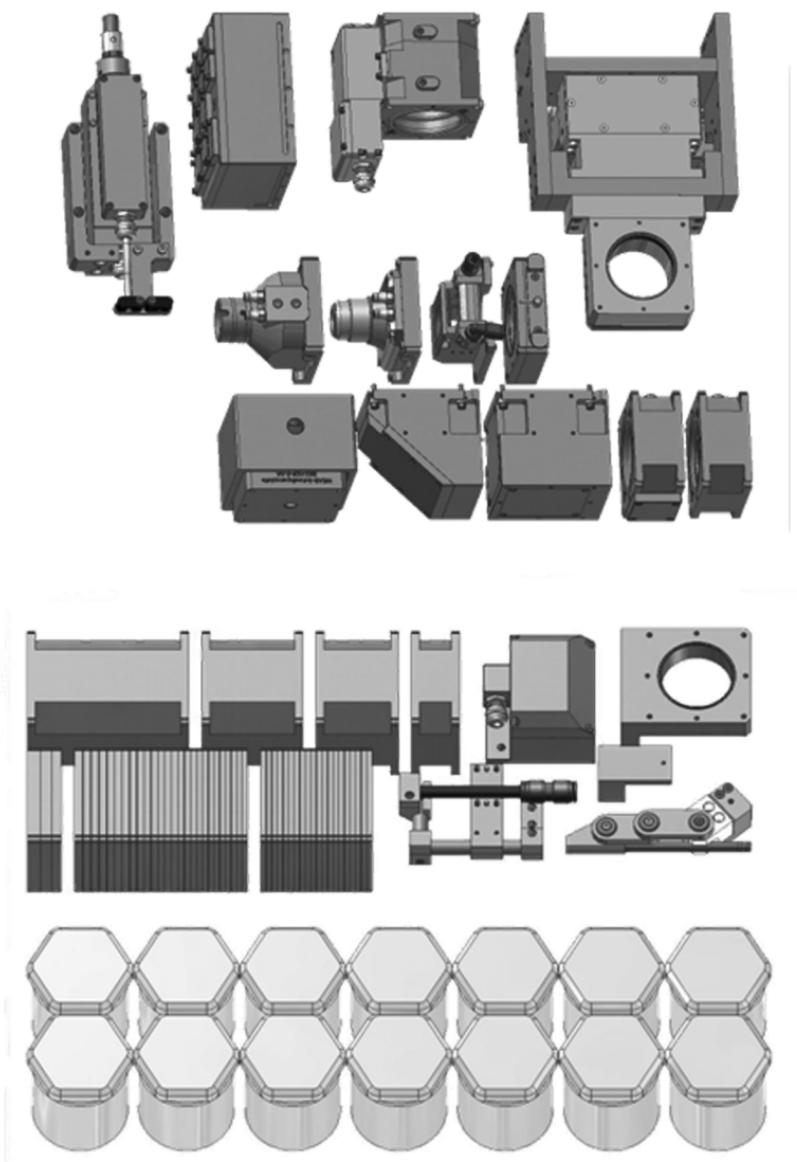


Рис. 5.85
Модульные элементы головки SCAPACS

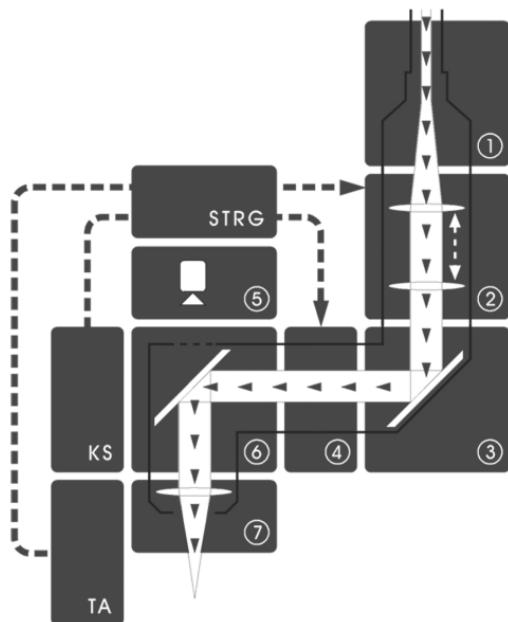


Рис. 5.86
Схема основных узлов головки:

1 — блок подключения волоконного лазера (волокна); 2 — блок коллимации; 3 — блок дефлектора (зеркало); 4 — ось вращения; 5 — камеры наблюдения; 6 — блок дефлектора с камерой связи; 7 — блок фокусировки (линзы); KS — датчик силы; TA — телескопическая стрела; STRG — интегрированный контроллер.

Таблица 5.36

Блок подключения волоконного лазера

Trumpf-B (Trumpf, Laserline-Diodelaser)	
Optoscand QBH (Rofin, IPG)	
D-fiber (будущий стандарт)	

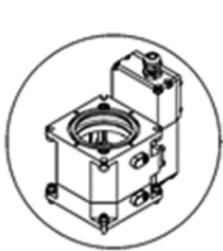


Рис. 5.87
Блок коллимации

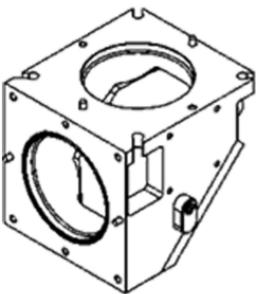


Рис. 5.88
Блок дефлектора

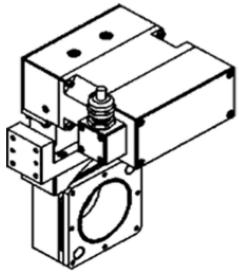


Рис. 5.89
Ось вращения

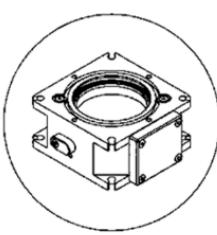


Рис. 5.90
Блок фокусировки

2. Блок коллимации (рис. 5.87). Может быть совмещен с модулем автоматической фокусировки. Доступны различные фокусные расстояния. Состоит из корпуса и линз.

3. Блок дефлектора (зеркало) (рис. 5.88). Отклоняет лазерный луч на 90°. На зеркало наносится специальное отражающее покрытие.

4. Ось вращения (рис. 5.89). Требуется для отслеживания шва.

5. Камеры наблюдения.

6. Блок дефлектора с камерой связи. Отклоняет лазерный луч на 90°. Содержит полупрозрачное зеркало.

7. Блок фокусировки (линзы) (рис. 5.90). Осуществляет фокусировку лазерного луча на поверхность заготовки. Определяет коэффициент изображения в сочетании с коллимирующим блоком. Определить диаметр луча в фокусе. Доступны различные фокусные расстояния. Состоит из корпуса и линз.

Характеристики:

- высокая надежность процесса за счет практически нулевого смещения фокуса;
- высокая эффективность процесса благодаря высокому качеству излучения в фокусе;
- высокая стабильность процесса за счет долговременной стабильности положения фокуса;
- положение фокуса не зависит от загрязнений;
- водяное охлаждение зеркал обеспечивает длительную работу оборудования в критических условиях, при накопительных загрязнениях и неглубоком проваре на зеркалах, без снижения качества и эффективности всего процесса в целом;
- благодаря конструктивному выполнению узла замены защитного стекла, имеется доступ к очистке системы (например, чистым воздухом или газом перед началом работы);
- практически безошибочное отображение в системах с тройным (и более) отражением луча (патент).

5.6. ГОЛОВКИ ДЛЯ ГИБРИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

5.6.1. ГОЛОВКИ ФИРМЫ PRECITEC

YH-50

Система YH-50 (рис. 5.91, 5.92) предназначена для сварки стали и алюминия. Высококачественная оптика предохраняется от брызг и паров защитным стеклом (встроенный датчик следит за наличием загрязнений на нем) и мощной системой CrossJet.

Технические характеристики головки YH-50 представлены в таблице 5.37.

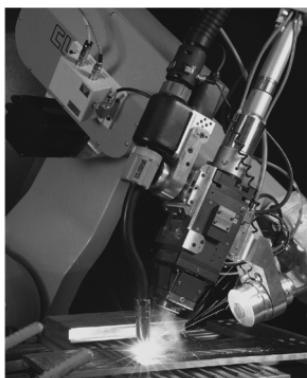


Рис. 5.91
Внешний вид головки
YH-50

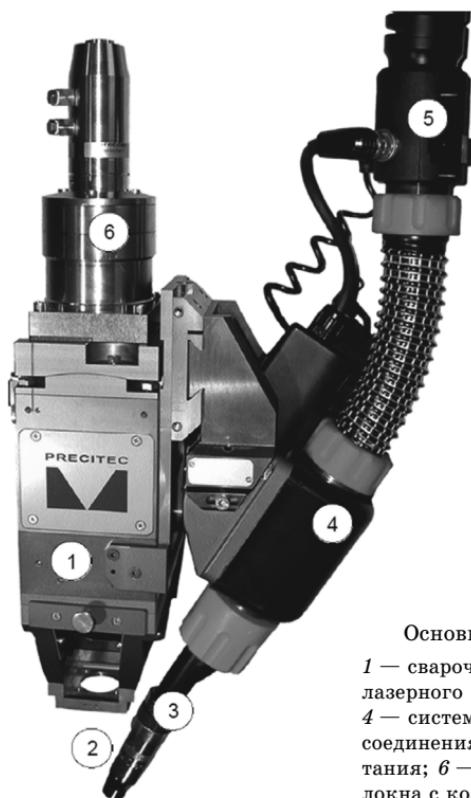


Рис. 5.92

Основные части головки YH50:

- 1 — сварочная головка YW50; 2 — выход лазерного луча; 3 — сварочная горелка; 4 — система подачи проволоки; 5 — блок соединения со сварочным источником питания; 6 — разъем для подключения волокна с коллиматором.

Таблица 5.37

Технические характеристики головки YH50

Сварочный источник питания	GLC 403 QUINTO/400 А при скважности 60%
Система подачи проволоки	CK 118 RK + CLOOS-DUO-DRIVE
Горелка	MRW380
Лазерная сварочная головка	YW50
Источник лазерного излучения	Nd:YAG- или YLS-волоконный лазер
Фокусное расстояние	100, 200 мм
Масса	12 кг

5.7. ГОЛОВКИ ДЛЯ ЗАКАЛКИ

5.7.1. ГОЛОВКИ ФИРМЫ SCANSONIC

RLH-A

Внешний вид головки и ее основные части представлены на рисунках 5.93 и 5.94 соответственно. Описание функций: 1D-сканер, построенный на базе модульной оптики Scapacs®, с интегрированным высокодинамичным контролем температуры, позволяет производить закалку сложных конструктивных элементов.

Особенности:

- позволяет производить закалку деталей со сложной геометрией;
- настройка параметров процесса: середина следа, ширина следа слева и справа, температура подогрева, закалки и ее интенсивность, расфокусировка, коэффициент эмиссии; возможное изменение параметров процесса во время закалки;

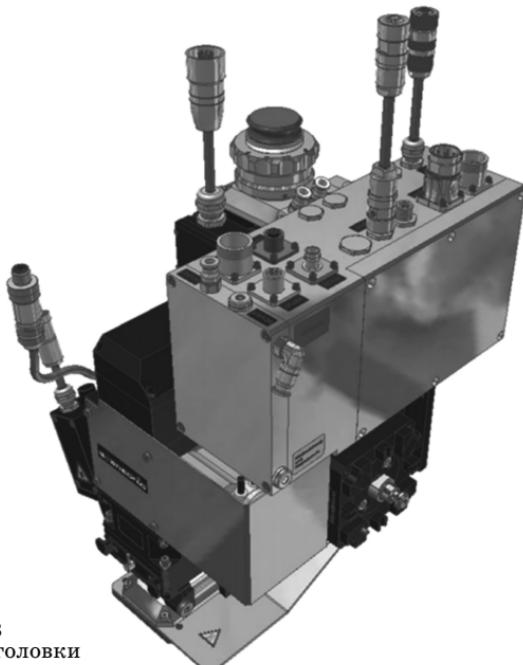


Рис. 5.93
Внешний вид головки
RLH-A

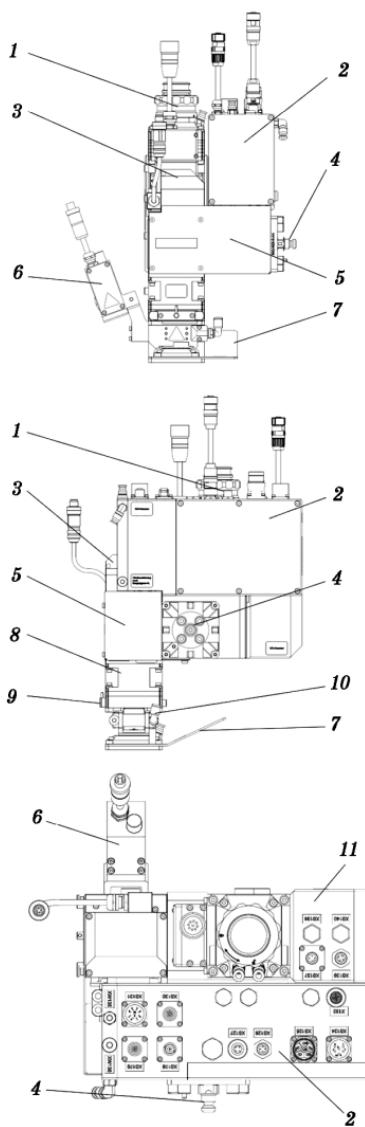


Рис. 5.94
Основные части головки RLH-A:

1 — коннектор волокна, например, типа Trumpf-D; 2 — блок интерфейса; 3 — камера; 4 — фланец для присоединения к роботу; 5 — блок сканатора; 6 — дополнительно: соединение проектора; 7 — охлаждаемый экран; 8 — модуль фокусирующей системы; 9 — модуль шторной защиты; 10 — система воздушной защиты оптики; 11 — пиromетр.

- гарантированное качество закалки благодаря высокодинамичному контролю температуры, варьированию скорости зеркала сканатора и плавному изменению мощности лазера (патент ЕР 08 022 027 B2);
- уменьшается время наладки, процесс корректировки параметров процесса прост в исполнении, модуль автофокуса позволяет изменять диаметр пятна без изменения рабочего положения лазерной головки;
- возможность интегрирования камеры наблюдения;
- дополнительный проектор линий для оптимальной настройки рабочего положения;

Благодаря компонентам Scarpacs® оптическая система может быть оптимизирована для лазерного источника и параметров процесса (диаметр волокна, источник лазерного излучения, распределение энергии).

Функции отдельных модулей

Различные оптические разъемы (рис. 5.95):

- Trumpf-D;
- Trumpf-B;
- QBH;
- MMI.

Коллимация (рис. 5.96):

- фиксированная коллимация или модуль автофокусировки;

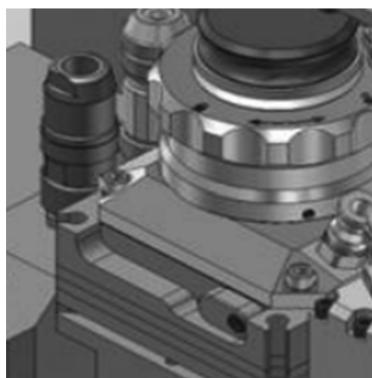


Рис. 5.95
Оптический разъем

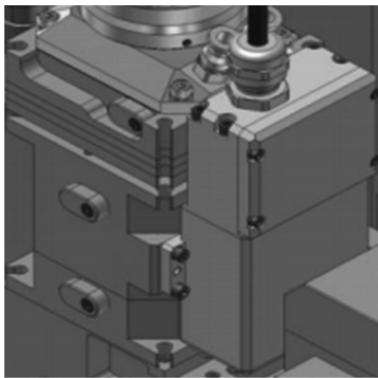


Рис. 5.96
Коллимация

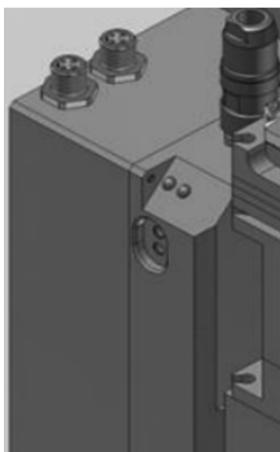


Рис. 5.97
Пирометр

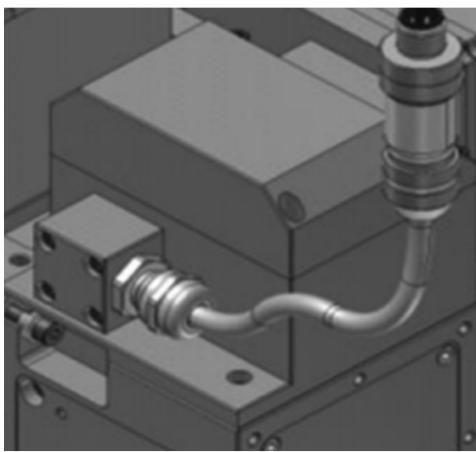


Рис. 5.98
Камера наблюдения

- изменение диаметра пятна в фокусе во время процесса закалки благодаря интегрированному модулю автофокусировки;
- дополнительное защитное стекло торца волокна во избежание попадания грязи.

Пирометр (рис. 5.97):

- интегрированный пирометр на основе камеры;
- коаксиальное измерение хода луча от пирометра до лазерного луча;
- сканатор перемещается в поле измерения пирометра;
- таким образом, область измерения от пирометра до фокуса лазерного луча постоянна и может быть оптимизирована;
- ошибка в позиционировании сканера не повлияет на результат измерений;
- температурные поля могут быть выбраны программным обеспечением; нет необходимости в модуле механической юстировки.

Камера наблюдения (рис. 5.98):

- коаксиальная камера, наблюдения которой не зависят от положения сканирующих зеркал;
- точная и простая проверка положение следа закалки при помощи камеры;

- благодаря этому становится возможным быстрый, безошибочный ввод в эксплуатацию данной системы.

Блок сканера (рис. 5.99):

- высокодинамичный сканатор;
- 1D-проектор линий;
- программирование параметров (ширина левой, правой и средней позиции) отсканированных линий;
- внешнее охлаждение для всей оптики. Таким образом, проникновение охлаждаемой воды в оптику невозможно.

Присоединение к роботу (рис. 5.100):

- быстрая установка одновременно с высокой точностью.

Блок защитного экрана (рис. 5.101):

- блок защитного экрана от пыли;
- дополнительное защитное стекло между объективом и блоком защитного экрана для дополнительной защиты фокусирующей линзы;
- модуль CrossJet.

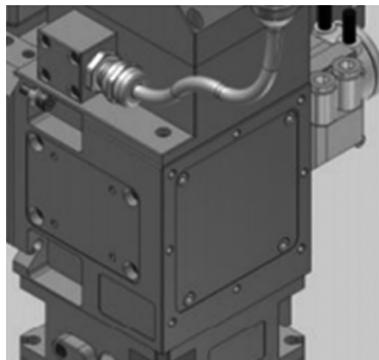


Рис. 5.99
Блок сканера

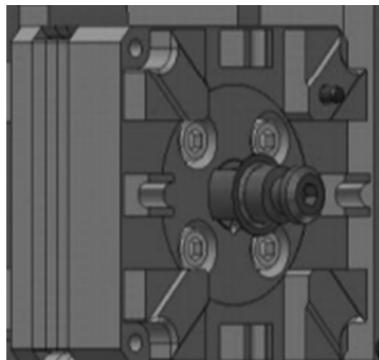


Рис. 5.100
Присоединение к роботу

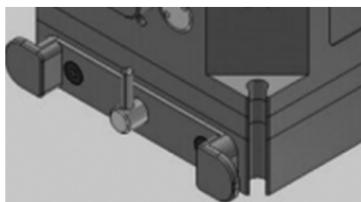


Рис. 5.101
Блок защитного экрана

Таблица 5.38

**Технические характеристики головки
и встроенной камеры**

Основные характеристики	Свойства
Головка	
Напряжение питания	±24 В/max 10 А
Вес	Около 16 кг
Предельное ускорение (механическое)	3g
Предельное ускорение при холостом ходе	5g
Класс защиты	На основании IP64 (при подключении волокна)
Расход охлаждающей воды	2 л/мин при давлении 6 бар
Диапазон температур окружающей среды	Хранение от -25 до 70°C. В работе: от 10 до 45°C
Оптические параметры:	
рабочие длины волн	1030–1060 нм
оптический разъем	Опционально Trumpf B или D, QBH,MMI
мощность лазера	4 кВт
полный угол расхождения излучения	250 мрад
качества луча	25 мм·мрад
ширина линии максимальная в TCP	50 мм
Камера наблюдения	
Напряжение питания	24 В
Видеосигнал	BAS

Контроль:

- современные шины управления;
- приводы/датчики соединены шиной;
- возможная установка в стойку устройства;
- система RLH взаимодействует с промышленным оборудованием при помощи полевых шин (Profibus, Interbus, Devicenet или Profinet);

- параметры задаются в системе ПК, который также может быть использован для работы лазерной установки и системы ПЛК.

Технические характеристики головки приведены в таблице 5.38.

5.8. КРАТКИЙ АНАЛИЗ

1. Процесс разработки лазерных технологических головок для волоконных лазеров в целом продвигается успешно. В настоящее время на рынке есть выбор головок для лазерной сварки и резки, появились первые модели наплавочных головок.

2. Можно проследить основные тенденции в дизайне лазерных головок модульность, перестраиваемость, насыщение сенсорами и контрольными функциями.

3. Отсутствуют технологические головки для высококачественной закалки, легирования и очистки.

4. В области создания головок с адаптивными возможностями разработчиками сделаны пока только первые шаги, но адекватно поставленные разработчиками цели позволяют надеяться, что развитие адаптивных технологий — дело ближайших лет.

ГЛАВА 6 ВОЛОКОННЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ ЛАЗЕРЫ

На сегодняшний день волоконные промышленные лазеры имеются в ассортименте продукции следующих компаний:

- 1) Videojet (США);
- 2) Coherent (США);
- 3) Quantel Group (Франция);
- 4) Rofin (США);
- 5) NKT Photonics (Дания);
- 6) Toptica Photonics AG (Германия);
- 7) MPB Communications (Канада);
- 8) Fibercore (США);
- 9) SPI Lasers (Великобритания);
- 10) Multiwave (Португалия);
- 11) Menlo Systems GmbH (Германия);
- 12) Leukos (Франция);
- 13) Fianium (Великобритания);
- 14) IPG Photonics (США).

Каждая из приведенных компаний специализируется на производстве различной продукции, объединяет их наличие в производимых устройствах волоконных лазеров с различными характеристиками и разного назначения.

В перечне представлены относительно крупные компании и небольшие фирмы, имеющие уникальные разработки в области волоконных лазеров и реализующие продукты на рынке [7, 3].

Продукцию компаний, выпускающих лазеры для промышленного применения, рассмотрим далее более подроб-

но. В продукции компаний, не выпускающих мощные промышленные модели, рассмотрим наиболее интересные (или имеющие наименьшее число аналогов) модели.

6.1. ПРОДУКЦИЯ КОМПАНИИ VIDEOJET

Основная специализация компании в сфере лазерных технологий — производство лазерных установок для маркировки, преимущественно на основе СО₂-лазеров.

Компания Videojet также выпускает мелкосимвольные каплеструйные принтеры, термотрансферные принтеры, аппликаторы и принтеры-аппликаторы для этикеток, расходные материалы для этих устройств, графические системы.

В качестве примера производимых компанией волоконных лазеров можно назвать установки для лазерной маркировки моделей Videojet 7210&7310. В них применяются волоконные лазеры мощностью 10 Вт (модель 7210) и 20 Вт (модель 7310).

Отличительные особенности устройств:

- компактность;
- отсутствие потребности во внешнем компьютерном управлении (это экономит место на производственной линии и повышает надежность работы);
- потребляемая мощность менее 300 В·А.

Заявленное применение — маркировка сложных поверхностей металлических и пластиковых изделий.

6.2. ПРОДУКЦИЯ КОМПАНИИ COHERENT

Основная специализация компании в сфере лазерных технологий: производство лазерных установок для научных и промышленных применений. В ассортименте имеются СО₂-лазеры, эксимерные, волоконные, твердотельные лазеры.

Компания Coherent также производит измерительное оборудование для определения различных параметров лазерного излучения.

В качестве примеров производимых компанией волоконных лазеров можно назвать лазеры серии Talisker (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Лазеры серии Talisker

Мощность, Вт	Длина волны, нм		
	355 нм	532 нм	1064 нм
4	Talisker Ultra 355-4		
8		Talisker Ultra 532-8	
16			Talisker Ultra 1064-16

Отличительные особенности продукции данной компании:

- наличие моделей с различными длинами волн, что расширяет спектр обрабатываемых материалов;
- импульсный режим работы с генерацией пикосекундных импульсов.

Заявленное применение — лазерная микрообработка (резка, сверление и др.) малых толщин металла, кремния, высокоточная обработка стекла (скрайбирование) и др.

6.3. ПРОДУКЦИЯ КОМПАНИИ QUANTEL

Основная специализация компании в сфере лазерных технологий — производство твердотельных лазерных установок, преимущественно на основе алюмоиттриевого граната, обогащенного неодимом (Nd:YAG).

Компания Quantel также производит волоконные лазеры, перестраиваемые лазеры, различные лазеры для медицины.

В качестве примера производимых компанией волоконных лазеров можно назвать иттербиеевые лазеры серии Ylia (табл. 6.2).

Таблица 6.2

Лазеры серии Ylia

Мощность	Модели лазеров
10	Ylia M10
20	Ylia M20, Ylia M20EG, Ylia M20HF
30	Ylia 30EG

Отличительные особенности данных устройств:

- легко интегрируются;
- время задержки не превышает 9 мкс.

Заявленное применение — гравировка, маркировка, лазерная микрообработка, обработка поверхности, подгонка резисторов.

6.4. ПРОДУКЦИЯ КОМПАНИИ ROFIN

Основная специализация компании в сфере лазерных технологий — производство промышленных лазеров (CO_2 -, твердотельных, волоконных), а также специализированных комплексов на их основе.

Таблица 6.3

Основные характеристики лазеров мощностью 500–1000 Вт

Параметр	Rofin FL x50	Rofin FL x75	Rofin FL 010
Способ накачки	Диодными лазерами	Диодными лазерами	Диодными лазерами
Выходная мощность	500 Вт	750 Вт	1000 Вт
Расходимость луча (при использовании волокна диаметром 50 мкм)	$\leq 2,5 \text{ мм}\cdot\text{мрад}$	$\leq 2,5 \text{ мм}\cdot\text{мрад}$	$\leq 2,5 \text{ мм}\cdot\text{мрад}$
Оптические волокна	От 50 до 600 мкм	От 50 до 600 мкм	От 50 до 600 мкм

Таблица 6.4

Основные характеристики лазеров мощностью 2000–4000 Вт

Параметр	Rofin FL 020	Rofin FL 030	Rofin FL 040
Способ накачки	Диодными лазерами	Диодными лазерами	Диодными лазерами
Выходная мощность	2000 Вт	3000 Вт	4000 Вт
Расходимость луча (при использовании волокна диаметром 50 мкм)	$\leq 2,5 \text{ мм}\cdot\text{мрад}$	$\leq 2,5 \text{ мм}\cdot\text{мрад}$	$\leq 2,5 \text{ мм}\cdot\text{мрад}$
Оптические волокна	От 50 до 600 мкм	От 50 до 600 мкм	От 50 до 600 мкм

Таблица 6.5

**Основные характеристики одномодовых лазеров
мощностью 500–1000 Вт**

Параметр	Rofin FL x50S	Rofin FL x75S	Rofin FL 010S
Способ накачки	Диодными лазерами	Диодными лазерами	Диодными лазерами
Выходная мощность	500 Вт	750 Вт	1000 Вт
Расходимость луча (при использовании волокна диаметром 50 мкм)	≤ 0,4 мм·мрад. Одномодовый режим	≤ 0,4 мм·мрад. Одномодовый режим	≤ 0,4 мм·мрад. Одномодовый режим
Оптические волокна	20 мкм	20 мкм	20 мкм

Таблица 6.6

**Основные характеристики компактных лазеров
мощностью 500–3000 Вт**

Параметр	Rofin FL x50C	Rofin FL x75C	Rofin FL 010C	Rofin FL 030C
Способ накачки	Диодны-ми лазе-рами	Диодны-ми лазе-рами	Диодны-ми лазе-рами	Диодны-ми лазе-рами
Выходная мощность	500 Вт	750 Вт	1000 Вт	3000 Вт
Расходимость луча (при использовании волокна диаметром 50 мкм)	≤ 0,4 мм·мрад	≤ 0,4 мм·мрад	≤ 0,4 мм·мрад	≤ 0,4 мм·мрад*
Оптические волокна	20 или 50 мкм	20 или 50 мкм	20 или 50 мкм	20 или 50 мкм

* При использовании волокна диаметром 50 мкм.

В качестве примера производимых компанией волоконных лазеров можно назвать лазеры серий FL (500–6000 Вт), Star Fiber (100–600 Вт), PowerLine-F (20–50 Вт) и LASAG (50 Вт) (табл. 6.3–6.6).

Отличительные особенности устройств:

- в серии FL имеются лазеры в компактном исполнении для интеграции в технологические комплексы, а также лазеры, работающие в одномодовом и многомодовых режимах;
- в серии Star Fiber предусмотрен автоматический контроль параметров излучения в зависимости от скорости процесса;

- лазеры этой серии могут выпускаться в компактных корпусах;
 - серия PowerLine-F отличается компактными размерами и воздушным охлаждением;
- Лазерные установки серии LASAG могут работать как в одномодовом, так и в многомодовом режимах, предусмотрено их воздушное охлаждение.

Заявленное применение:

- серия FL — резка, сварка, термическая обработка металлов, дистанционная резка;
- серия StarFiber — прецизионная резка и сварка металлов;
- серия PowerLine-F — маркировка, гравировка, травление, скрайбирование, резка, изоляция краев, обрезка, структурирование и др.;
- серия LASAG — прецизионная резка твердых материалов (сапфир, керамика), перфорация с большим соотношением сторон.

6.5. ПРОДУКЦИЯ КОМПАНИИ NKT PHOTONICS

Основная специализация компании в сфере лазерных технологий: фотонные кристаллические волокна, волоконные лазеры невысокой мощности, лазеры, реализующие излучение непрерывного спектра (т. е. Supercontinuum), оптические параметрические осцилляторы.

В качестве примеров производимых компанией волоконных лазеров можно назвать модели Koheras Basic OEM, Koheras AdjustiK Benchtop, Koheras AcoustiK Benchtop, Koheras BoostiK OEM, Koheras BoostiK.

Технические характеристики лазеров рассмотрены в таблице 6.7.

Отличительные особенности устройств:

- низкие шумы;
- высокая точность частоты;
- доступно много длин волн;
- компактный дизайн.

Таблица 6.7

Характеристика лазера Koheras AcoustiK Benchtop

Оптические характеристики	
Koheras AcoustiK™	E ₁₅
Центральная длина волны, нм	8 каналов в диапазоне 1530–1565
Излучение лазера	Непрерывный — одночастотный
Качество пучка	M ² < 1,05
Выходная мощность (на 1 лазер)	До 50 мВт
Фазовые шумы, мкрад/√Гц, на 1 м оптического пути	< 120 при 500 МГц < 110 при 10 Гц
RIN пиковая (относительная интенсивность шума), МГц	Примерно 0,3
Уровень RIN, дБс/Гц	< 115 при 1 МГц < 140 при 10 МГц
Оптическое соотношение сигнал/шум, дБ	> 50 (в зависимости от длины волны)
РМ-выход	Опционально
Настройка температуры	Стандартно
Диапазон настройки температурной, нм	> 0,6
Возможность быстрой настройки пьезоэлемента	Опционально
Диапазон настройки пьезоэлектрика, пм	> 16(0–200 V DC)
Пьезоэлектрические настройки пропускной способности, кГц	До 100
Оптический контрольный выход	Включая (FC/APC)
Технические характеристики	
Koheras AcoustiK™	E ₁₅
Длина пигтейла волокна, м	90–240 В, 50–60 Гц
Коннекторы	> 1
Габариты	FC/APC или коллимированные
Рабочие температуры, °С	15...40
Температура хранения, °С	-20...50

Заявленное применение — источники излучения в квантовой оптике, источники накачки в нелинейной оптике, эталоны для волоконных лазеров, источники излучения в метрологии и системах светового обнаружения и распознавания дальности (ЛИДАР).

6.6. ПРОДУКЦИЯ КОМПАНИИ TOPICA PHOTONICS AG

Основная специализация компании в сфере лазерных технологий — производство диодных и волоконных лазеров (эрбьевых и иттербьевых), измерителей длины волн, терагерцовых лазеров, лазерных диодов.

В качестве примера производимых компанией волоконных лазеров можно назвать фемтосекундные лазерные установки серии FemtoFiber Pro, FemtoFerb 1560, пикосекундные лазерные установки серии PicoFyb, многоцветный лазер iChrome TVIS.

Технические характеристики лазеров приведены в таблицах 6.8, 6.9.

Отличительные особенности устройств:

- возможна работа на нескольких длинах волн;
- генерация фемтосекундных и пикосекундных импульсов;
- возможен заказ лазеров с различными частотами импульсов.

Заявленное применение — в научных исследованиях, технологиях обработки материалов, офтальмологии, хирургии.

Таблица 6.8
Характеристики лазеров серии FemtoFiber Pro

Система	Длина волны, нм	Длительность импульса, фс	Мощность, МВт	Частота импульсов, МГц
FemtoFiber Pro IR	1560	< 100	> 350	80
FemtoFiber Pro NIR	1560/780	< 100	> 350	80
		100	> 140	80
FemtoFiber Pro SCIR	980–2200	< 100	> 150	80
FemtoFiber Pro UCP	980–1400	< 25	> 30	80
FemtoFiber Pro TVIS	488–640	< 1	1–10	80
FemtoFiber Pro TNIR	830–1100	< 200	1–5	80

Таблица 6.9
Характеристики лазеров серии PicoFyb

PicoFyb 1030	1030 нм	6 пс	> 10 МВт	20, 30 МГц
PicoFyb 1064	1064 нм	6 пс	> 10 МВт	20, 30 МГц

6.7. ПРОДУКЦИЯ КОМПАНИИ MPB COMMUNICATIONS

Основная специализация компании в сфере лазерных технологий — производство маломощных волоконных лазеров и усилителей для волоконных лазеров, а также систем для оптоволоконной связи, иттербийевых волоконных лазеров видимого спектра (на основе нелинейных эффектов).

В качестве примеров производимых компанией лазерных установок можно назвать YFL-P-10-1120, YFL-P-20-1120, Ytterbium Micro Fiber Laser, Visible Fiber Lasers с длиной волны 514 нм и схожие модели на длинах волн 514, 532, 560, 580, 592, 628, 642 нм (серия YFL-P).

Далее рассмотрим лазеры видимого спектра (так как широкий спектр этих лазеров является отличительной чертой ассортимента компании и для них приведены параметры, редко указываемые для лазеров в настоящее время, такие как качество луча и эллиптичность).

Применяемые лазеры: иттербийевые волоконные лазеры, применяются нелинейные преобразователи частоты.

Отличительные особенности устройств 514 nm Visible Fiber Lasers и аналогичных на других длинах волн (532, 560, 580, 592, 628, 642 нм):

- низкие амплитудные шумы;
- полностью воздушное охлаждение;
- графический пользовательский интерфейс.

Заявленное применение 514 nm Visible Fiber Lasers:

- лазерный спектральный анализ;
- офтальмология;
- медицинская биометрия;
- лазерное спекание;
- измерение тонких пленок и покрытий.

Обозначение лазеров имеет вид:

YFL-P-XXXX-YYY,

где XXXX — мощность, мВт; YYY — длина волны, нм.

Максимальные мощности лазеров видимого диапазона: от 500 до 5000 мВт в зависимости от длины волны.

Таблица 6.10
Основные технические характеристики

Параметры излучения	Минимум	Норма	Максимум	Единица измерения
Диаметр пучка из выходного окна диаметром 20 мм	Норма -20%	0,32	Норма +20%	мм
Расходимость луча (полный угол)	Норма -20%	2,7	Норма +20%	мрад
Эллиптичность	—	7 (обычная)	—	%
Стабильность наведения луча	—	< 5	—	мрад/ град
Качество пучка M^2	—	1,1	—	—
Испускаемая длина волны	531,5	532	532,5	нм
Степень поляризации	98	99	—	%

Технические характеристики для наиболее мощных лазеров на длине волны 532 нм (основные характеристики остальных лазеров видимого диапазона этой же серии мало отличаются) приведены в таблице 6.10.

Свойства излучения:

- пучок — коллимированный;
- поперечная мода: TEM_{00} ;
- поляризация: линейная;
- ориентация поляризации: вертикальная по отношению к базе.

6.8. ПРОДУКЦИЯ КОМПАНИИ FIBERCORE

Основная специализация компании в сфере лазерных технологий: производство оптических волокон как нелегированных (для коммуникации), так и легированных эрбием (для усилителей); измерительное и лабораторное оборудование.

Характеристики представлены в таблице 6.11.

Таблица 6.11

Основные технические характеристики

Параметр	Модель лазера		
	I-4 (980/125)	I-6 (980/125)	I-25 (980/125)
Длины волн	870–970		
Числовая апертура	0,22–0,24		0,23–0,25
Диапазон диаметров мод*, мкм, при заданной длине волны	3,5 при 980 нм, 5,9 при 1550 нм		3,3 при 980 нм, 5,4 при 1550 нм
Поглощение на длине волн накачки (980 нм), Дб/м	3,5–4,5	4,5–5,5	23–27
Пиковое поглощение (1530 нм), Дб/м	5,0–6,7	7,2–8,4	40 (в норме)
Фоновые потери**, Дб/км	< 10		
Дисперсия поляризованной моды, пс/м	< 0,005		
Диаметр волокна, мкм	125±1		
Концентричность покрытия, мкм	≤ 0,3		≤ 0,5
Диаметр покрытия, мкм	245±5%		
Тип покрытия	Двойное акриловое		

Примечания. * Диаметр моды – номинальное расчетное значение, рассчитанное для рабочей длины волны и использованием типичных значений числовой апертуры и длин волн. ** Фоновые потери рассчитываются в минимальной точке спектра (обычно 1100 или 1200 нм для легированных эрбием волокон).

6.9. ПРОДУКЦИЯ КОМПАНИИ SPI LASERS

Основная специализация компании в сфере лазерных технологий — выпуск промышленных иттербийевых волоконных лазеров мощностью до 1 кВт.

В качестве примера наиболее мощных лазерных установок, производимых компанией, можно назвать установку redPOWER 1kW OEM Fiber Laser (возможно интегрирование в многокиловаттные системы) или redPOWER R4 RS-R 500W Series Laser (импульсный режим).

Отличительные особенности устройств redPOWER 1kW OEM Fiber Laser:

- масштабирование мощности;
- отсутствие необходимости в обслуживании.

Заявленное применение — сварка, резка металлов, пробивка отверстий, маркировка (для импульсных моделей — сварка пластмасс).

Подробные технические характеристики официально приводятся компанией только для потенциальных покупателей.

6.10. ПРОДУКЦИЯ КОМПАНИИ MULTIWAVE

Основная специализация компании в сфере лазерных технологий: наносекундные импульсные лазеры на длине волны 1550 и 1064 нм.

В качестве примера производимых компанией Multiwave лазеров можно назвать модели MOPA-DY, MOPA-M, MOPA-PV (1064 нм), MOPA-L (1550 нм).

Далее рассмотрим лазер MOPA-L (табл. 6.12).

Таблица 6.12
Основные технические характеристики

Параметр	Спецификация	Обычное значение	Единица измерения
Центральная длина волны	1550±5	1549,8	нм
Стабильность центральной длины волны	Активная стабилизация	< 0,05	нм
Ширина спектра (мгновенная 3 Дб)	< 10	< 10	МГц
Длительность импульса	< 5	< 3,5	нс
Частота следования импульсов	20–150	20–150	кГц
Номинальная средняя мощность	1	1,20	Вт
Максимальная пиковая мощность	5	6,5	кВт
Поляризация выходного излучения	Случайная		—
Стабильность максимальной мощности	< 5	< 2	%
Максимальная энергия импульса	20	25	мкДж
Фактор распространения луча	< 1,1		м ²

Отличительные особенности устройства МОРА-L:

- без фокусировки безопасен для глаз;
- длина волны 1550 нм.

Заявленное применение — системы ЛИДАР, измерение расстояния.

6.11. ПРОДУКЦИЯ КОМПАНИИ MENLO SYSTEMS GMBH

Основная специализация компании в сфере лазерных технологий — изготовление фемтосекундных волоконных лазеров и установок на их основе, комбинированных установок для измерений.

В качестве примеров производимых компанией лазеров можно назвать модели Orange A 515 Femtosecond Laser и M-Fiber A 780 Femtosecond Laser. Компания MenloSystems GmbH производит эрбьевые (длины волн 1560 и 780 нм) и иттербьевые (длины волн 1030 и 515 нм) волоконные лазеры.

Приведенные производителем характеристики:

- длина волны, регулируемая в диапазоне 510–525 нм;
- средняя выходная мощность более 250 мВт при частоте 100 МГц;
- длительность импульса менее 150 фс.

Отличительные особенности модели:

- длина волны 515 нм;
- встроенные микроконтроллер, синхронизатор с внешним источником команд.

Заявленное применение не указано.

6.12. ПРОДУКЦИЯ КОМПАНИИ LEUKOS

Основная специализация компании в сфере лазерных технологий — производство волоконных лазеров типа суперконтиниум, элементов оптических систем (в основном фильтров).

В качестве примера производимых компанией Leukos лазерных установок можно назвать модели LEUKOS-SP, LEUKOS-CARS, LEUKOS-STM-100.

Таблица 6.13

Основные технические характеристики

LEUKOS-SP-OEM	SP-8-OEM	SP-20-OEM
Спектральный диапазон	370–2200 нм	370–2300 нм
Модовый состав	Одномодовый (мода LP11 в видимом диапазоне)	Одномодовый (мода LP11 в видимом диапазоне)
Общая выходная мощность	> 15 мВт	> 65 мВт
Частота следования импульсов	8 кГц	20 кГц
Длительность импульса	< 1 нс	< 1 нс

Рассмотрим лазер LEUKOS-SP, так как он, в отличие от большинства других моделей, работает в широком спектральном диапазоне длин волн (от ультрафиолетового (УФ) до инфракрасного (ИК)) и представляет наибольший интерес.

Отличительными особенностями лазерной установки LEUKOS-SP являются:

- компактность;
- длительность импульса менее 1 нс.

Технические характеристики представлены в таблице 6.13.

Заявленное применение — системы ЛИДАР, спектроскопия.

6.13. ПРОДУКЦИЯ КОМПАНИИ FIANIUM

Основная специализация компании в сфере лазерных технологий — производство волоконных лазеров типа суперконтиниум, фемтосекундных лазеров.

В качестве примера производимых компанией Fianium лазеров можно назвать модели Supercontinuum SC400, SC400-PP, FemtoPower FP1060.

Рассмотрим лазер SC400-PP.

Отличительные особенности лазера SC400-PP:

- выбор частоты следования импульсов;
- длительность импульса менее 6 пс.

Заявленное применение — спектроскопия.

Технические характеристики рассмотрены в таблице 6.14.

Таблица 6.14

Основные технические характеристики

Модель	SC400-6-PP	SC400-4-PP	SC400-2-PP
Общая мощность (весь спектр)	> 6 Вт, 80 МГц > 4 Вт, 40 МГц > 2 Вт, 20 МГц > 1 Вт, 10 МГц > 0,5 Вт, 5 МГц > 0,2 Вт, 2 МГц > 0,1 Вт, 1 МГц	> 4 Вт, 40 МГц > 2 Вт, 20 МГц > 1 Вт, 10 МГц > 0,5 Вт, 5 МГц > 0,2 Вт, 2 МГц > 0,1 Вт, 1 МГц	> 2 Вт, 20 МГц > 1 Вт, 10 МГц > 0,5 Вт, 5 МГц > 0,2 Вт, 2 МГц > 0,1 Вт, 1 МГц
Мощность в видимом спектре (400–750 нм)	> 900	> 600	> 300
Средняя спектральная плотность мощности	> 3 мВт/нм	> 2 мВт/нм	> 1 мВт/нм
Спектральная плоскость		< 6 Дб	
Стабильность мощности		< ±1%	
Частота следования импульсов	Выбирается 100 кГц — 80 МГц	Выбирается 100 кГц — 40 МГц	Выбирается 100 кГц — 20 МГц
Минимальная длина волны		< 420 нм	
Максимальная длина волны		> 2200 нм	
Основная длительность импульса		≈6 пкс	
Выходная оптика		В пространство или коллиматор	
Диаметр пучка		≈2 мм при 633 нм	
Тип поляризации		Не поляризовано	

6.14. ПРОДУКЦИЯ КОМПАНИИ IPG PHOTONICS

Продукция компании наиболее широко известна. Вследствие чего подробно останавливаться имеет смысл лишь на отдельных продуктах.

Основная специализация компании в сфере лазерных технологий — высокомощные промышленные волоконные лазеры.

Другие производимые лазеры: для телекоммуникации и медицины.

Отдельно следует отметить, что данная компания, в отличие от перечисленных выше, имеет производственные мощности в России. Российские лазеры выпускаются под маркой «ИРЭ-Полюс». Характеристики лазеров разных моделей представлены в таблице 6.15.

Таблица 6.15
Характеристики YLS-XXXX

Параметр	ЛС-XX (12U)	ЛС-XX (25U)	ЛС-XX (31U)
Описание	Компактный иттербийный волоконный лазерный комплекс киловаттного уровня мощности	Иттербийовый волоконный лазерный комплекс киловаттного уровня мощности	Иттербийовый волоконный лазерный комплекс киловаттного уровня мощности со встроенной системой охлаждения
Возможные режимы работы	CW, QCW, SM	CW, QCW, SM	CW, QCW
Доступная выходная мощность, кВт	0,5–2,0	0,5–50,0	1–6
Диаметр волокна, мкм	50, 100, 200, 300	50, 100, 200, 300 (в зависимости от выходной мощности)	100, 200, 300
Электрооптический КПД, %	> 30	> 30	В зависимости от системы охлаждения
Тип выходных разъемов	HLS-8 (QBH type) & LCA (QD type)	HLS-8 (QBH type), HLC-16 & LCA (QD type)	HLS-8 (QBH type) & LCA (QD type)

Продолжение табл. 6.15

Параметр	ЛС-ХХ (12U)	ЛС-ХХ (25U)	ЛС-ХХ (31U)
Дополнительные опции	Встроенный каплер; встроенный оптический переключатель 1×2, 1×4 и 1×6	Встроенный каплер; встроенный оптический переключатель 1×2	Встроенный каплер; встроенный оптический переключатель 1×2
Интерфейс	Стандартный: LaserNet, Digital I/O, аналоговое управление; дополнительные опции: DeviceNet, Profibus or Ethernet	Стандартный: LaserNet, Digital I/O, аналоговое управление; дополнительные опции: DeviceNet, Profibus or Ethernet	Стандартный: LaserNet, Digital I/O, аналоговое управление; дополнительные опции: DeviceNet, Profibus or Ethernet
Тип	12U стойка NEMA 12 Enclosure	25U стойка NEMA 12 Enclosure	31 стойка NEMA 12 Enclosure
Габариты, мм: высота; ширина глубина	558 790 815	1106 856 806	1400 856 806
Возможность обновления	Имеется, максимум 2 кВт	Имеется, максимум 4 кВт	Имеется, максимум 10 кВт
Резервный модуль	Недоступен	Доступная опция < 3 кВт	Недоступен

Таблица 6.16

Характеристики ЛС-ХХ (12U)

Режим работы	Непрерывный, квазинепрерывный, маломодовый (ВРР = 2 мм·мрад)
Поляризация	Случайная
Максимальная выходная мощность	500 Вт — 3 кВт (одномодовый до 2 кВт)
Длина волны	1070 нм
Диаметр волокна	50 мкм
КПД от розетки	~30%
Терминация оптического волокна	HLC-8, QBH — совместимый, LCA, QD — совместимый
Управляющий интерфейс	Lasernet, Цифровой I/O, Аналоговый сигнал
Габариты, мм	12U стойка rittal, 558×790×815

Примеры производимых лазеров представлены далее.

1. ЛС-ХХ (12U). Иттербийевый волоконный лазер в низкой стойке (рис. 6.1, табл. 6.16).

Квазинепрерывный режим до 1,5 кВт, кондиционер, Interbus, Profibus, Profinet, DeviceNet; интегрированный каплер; выходное волокно 100, 200, 300 мкм в диаметре.

2. ЛС-ХХ (25U). Иттербийевый волоконный лазер кВт-диапазона (рис. 6.2, табл. 6.17).



Рис. 6.1
Иттербийевый волоконный
лазер в низкой стойке
(ЛС-ХХ (12U))



Рис. 6.2
Иттербийевый волоконный
лазер киловаттного диапазо-
на (ЛС-ХХ (25U))

Характеристики ЛС-ХХ (25U)

Режим работы	Непрерывный, квазинепрерывный, маломодовый (ВРР = 2 мм·мрад)
Поляризация	Случайная
Максимальная выходная мощность	500 Вт — 4 кВт (одномодовый до 3 кВт)
Длина волны	1070 нм
Диаметр волокна	50 мкм
КПД от розетки	~30%
Терминация оптического волокна	HLC-8, QBH — совместимый, LCA, QD — совместимый
Управляющий интерфейс	Lasernet, Цифровой I/O, Аналоговый сигнал
Габариты	25U стойка rittal, 1106×856×806 или 1106×1456×806



Рис. 6.3
Иттербийевый волоконный
лазер киловаттного
диапазона
(ЛС-ХХ (31U))

енний оптический переключатель 1×2 или 1×4 ; кондиционер; Interbus, Profibus, Profinet, DeviceNet; 2-канальное аналоговое управление; 2-канальный Fieldbus; оптический интерфейс безопасности; выходное волокно 200 или 300 мкм в диаметре, возможность модернизации с увеличением мощности; установка резервного модуля.

Квазинепрерывный режим до 3 кВт; встроенный каплер; встроенный оптический переключатель 1×2 ; кондиционер; Interbus, Profibus, Profinet, DeviceNet; 2-канальное аналоговое управление; 2-канальный Fieldbus; оптический интерфейс безопасности; выходное волокно 100, 200 или 300 мкм в диаметре, возможность модернизации с увеличением мощности; установка резервного модуля.

3. ЛС-ХХ (31U). Иттербийевый волоконный лазер кВт-диапазона (рис. 6.3, табл. 6.18).

Квазинепрерывный режим до 5 кВт; встроенный каплер; встро-

енный оптический переключатель 1×2 или 1×4 ; кондиционер; Interbus, Profibus, Profinet, DeviceNet; 2-канальное аналоговое управление; 2-канальный Fieldbus; оптический интерфейс безопасности; выходное волокно 200 или 300 мкм в диаметре, возможность модернизации с увеличением мощности; установка резервного модуля.

Таблица 6.18

Характеристики ЛС-ХХ (31U)

Режим работы	Непрерывный, квазинепрерывный, маломодовый (ВРР = 4,5 мм·мрад)
Поляризация	Случайная
Максимальная выходная мощность	500 Вт — 30 кВт (одномодовый до 5 кВт)
Длина волны	1070 нм
Диаметр волокна	100 мкм
КПД от розетки	~30%
Терминация оптического волокна	HLC-8, QBH — совместимый, LCA, QD — совместимый, HPC16 IPG Standard
Управляющий интерфейс	Lasernet, Цифровой I/O, Аналоговый сигнал
Габариты	25U стойка rittal, 1106×856×806, 1400×1480×806, 1400×1200×806

Анализ применения волоконных лазеров показывает, что лазерная резка занимает 35% от общего объема, лазерная сварка — 25%, маркировка и гравировка — 15%, микрообработка — 20%.

7.1. ЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА

В настоящее время лазерная резка применяется во всех отраслях промышленности: от раскroя листового металла для корпусов различных приборов до изготовления строительных конструкций, деталей машин, узлов летательных аппаратов, судов, специзделий.

7.1.1. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРА ДЛЯ КАЧЕСТВЕННОЙ РЕЗКИ [10]

Скорость резки металла определяет производительность лазерных технологических установок, при этом существенным параметром является величина шероховатости боковой стенки реза R_z . Лазерная резка позволяет получать готовые детали без последующей финишной обработки, и альбом технологий промышленных лазерных станков на основе СО₂-лазеров содержит условия качественной резки для широкого набора материалов. Для технологических волоконных лазеров подобный альбом пока только формируется, и технологии производства сталкиваются с проблемами выбора параметров волоконных лазеров, наиболее подходящих для задач конкретного производства [10].

В литературе подробно рассматривались различные факторы, которые могут оказывать влияние на качество газолазерного реза и на глубину проплавления металла при лазерной сварке. К ним относят: микронеустойчивости (термокапиллярную, Рэлей-Тейлоровскую, капиллярно-испарительную, капиллярно-ветровую), образование «ступеньки» на фронте проплава и реза, неустойчивость плечевого погранслойного течения расплава и др. Отметим, что многие авторы считают нужным упомянуть о большой сложности процессов внутри лазерного реза и о возникающих из-за этого затруднениях при попытках однозначно интерпретировать экспериментальные результаты. На рисунке 7.1 показана боковая поверхность реза малоуглеродистой стали толщиной 5 мм, выполненного с помощью волоконного лазера ЛС-3.5 производства НТО «ИРЭ-Полюс». Лазер снабжен транспортным волокном с диаметром сердцевины 100 мкм и характеризуется параметром качества выходного пучка $M^2 = 13,5$. Рез получен с использованием оптической головки фирмы OPTOSKAND. В данной головке установлена коллимирующая линза с $f_c = 120$ мм и фокусирующая линза с $f_f = 200$ мм. Соответствующее фокальное пятно имело диаметр $d = 190$ мкм, глубина фокуса $z_R = 2$ мм. Мощность лазера составляла 3,5 кВт, режущим газом являлся воздух. Резка производилась на скорости 3 м/мин.

Стрелкой отмечена глубина, ниже которой характер реза существенно изменялся. Подобные картины резов наблюдаются и при использовании CO₂-лазеров. Можно предположить, что на соответствующей глубине прекращается эффективное канализирование пучка лазера внутри реза, пучок рассеивается на большие углы и поглощается боковыми стенками. Материал ниже стрелки прогревается и плавится не за счет прямого воздействия лазерного излучения, а в основном за счет раскаленной газовой струи и теп-

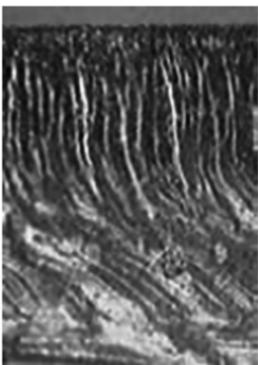


Рис. 7.1
Боковая поверхность реза малоуглеродистой стали толщиной 5 мм

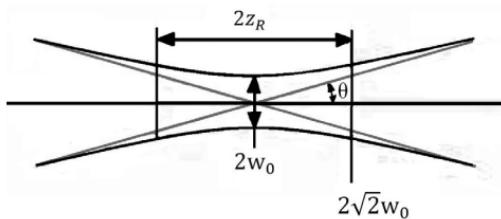


Рис. 7.2
Продольное сечение асимметричного пучка

лопроводности металла. Рассеяние может происходить на сравнимых с длиной волны лазера неоднородностях, возникающих из-за упомянутых выше микронеустойчивостей, которые имеют весьма большие инкременты развития.

Поскольку лазерные пучки, в том числе и многомодовые, всегда частично когерентны, старт к развитию неоднородностей может дать интерференция между центральной частью пучка и его периферией, отражающейся от стенок реза. Интерференция вызывает пространственную модуляцию интенсивности излучения внутри реза и соответствующую неоднородность воздействия излучения на материал.

На рисунке 7.2 приведено продольное сечение асимметричного лазерного пучка, распространяющегося вдоль оси z и имеющего перетяжку в точке $z = 0$. Границей лазерного пучка (по уровню интенсивности $1/e^2$) является гиперболоид вращения, угол θ определяет расходимость пучка в дальней зоне. Зависимости радиуса лазерного пучка w и радиуса кривизны его волнового фронта R от z описываются следующими формулами:

$$w(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{M^2 \lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2 \right]^{1/2}; \quad (7.1)$$

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{M^2 \lambda z} \right) \right], \quad (7.2)$$

где λ — длина волны излучения, безразмерный параметр $M^2 \geq 1$ характеризует отклонение лазерного пучка от идеального гауссова (для последнего $M^2 = 1$) и определяет «фо-

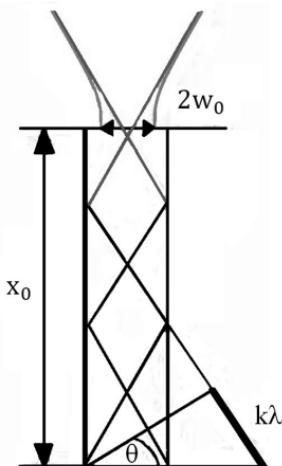


Рис. 7.3

Схема распространения лазерного пучка внутри реза:

$k\lambda$ — разность хода между периферической и центральной частями луча (достигаемая на выходе реза), при которой возникающие из-за интерференции неоднородности еще не приводят к рассеянию на большие углы и возможен чистый рез материала толщиной x_0 .

в таком случае примерно совпадает с диаметром перетяжки. Распространение луча обозначено «отражением» гиперболических асимптот от боковых стенок реза.

Поскольку $k\lambda = x_0\theta^2$, из формул (7.3), (7.4) легко получить следующее выражение:

$$x_0 = \frac{k\pi(\pi w_0^2)}{M^2(M^2\lambda)} = \frac{k\pi}{M^2} z_R. \quad (7.5)$$

Таким образом, в предположении интерференционной природы эффектов, приводящих к ограничению глубины проникновения излучения внутрь реза, предельная глубина чистого реза пропорциональна глубине фокуса и обратно

кусируемость» лазерного луча, т. е. радиус w_0 в перетяжке (точном фокусе объектива) в соответствии с формулой

$$w_0\theta = \frac{M^2\lambda}{\pi}. \quad (7.3)$$

Глубину фокуса или, как его часто называют, длину перетяжки, т. е. длину, на которой диаметр пучка меняется в два раза, удобно характеризовать так называемой рэлеевской длиной z_R (рис. 7.2):

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{M^2\lambda}. \quad (7.4)$$

Длина перетяжки равна удвоенной величине z_R . На рисунке 7.3 схематично представлено распространение лазерного пучка внутри реза. Максимальная толщина металла, для которой возможен чистый рез, обозначена как x_0 . Перетяжка режущего излучения расположена на поверхности периметра

хорошо известно, что ширина реза

в таком случае примерно совпадает с диаметром перетяжки. Распространение луча обозначено «отражением» гиперболических асимптот от боковых стенок реза.

пропорциональна параметру M^2 , определяющему исходное качество лазерного пучка.

Входящий в формулу безразмерный коэффициент k попытаемся определить из известных экспериментальных данных.

Для упомянутого выше волоконного лазера ЛС-3.5 с оптической головкой, имеющей фокусные расстояния коллиматора и объектива соответственно $f_c = 120$ мм и $f_f = 200$ мм, при которых параметры в фокусе составляют: $\theta = 0,048$ рад, $w_0 = 0,096$ мм, $z_R = 2$ мм. Однаковое по всей высоте значение R_z , соответствующее чистому резу, получено для малоуглеродистой стали толщиной до 3 мм. Подставляя эти значения в (7.5), получаем $k \sim 6,5$.

Хотя формула (7.5) носит оценочный характер и не учитывает ряд эффектов, связанных с формированием газовой струи и положением перетяжки относительно поверхности материала, значения коэффициента k , полученные для разных типов лазеров и различающихся в пять раз толщин обрабатываемого материала, оказались близкими (если взять среднее значение, то отклонение в пределах $\pm 20\%$).

Как видно из соотношения (7.5), при заданной ширине реза, определяемой размером пучка в перетяжке $2w_0$, глубина фокуса, а следовательно, и глубина чистого реза обратно пропорциональна длине волны излучения λ , т. е. при прочих равных условиях лазер с меньшей длиной волны должен обеспечивать большую глубину чистого реза. Но еще сильнее, чем от длины волны, глубина чистого реза зависит от оптического качества пучка M^2 при фиксированной ширине реза зависимость обратная квадратичная. С этим связано полученное нами в экспериментах с волоконным лазером существенно меньшее значение чистого реза по сравнению с аналогичными данными для одномодового CO_2 -лазера той же мощности. Для увеличения толщин обрабатываемых материалов необходимо повышать качество лазерных пучков. Так, при использовании волоконного лазера с транспортным волокном с диаметром жилы 50 мкм ($M^2 = 6,5$) вместо 100 мкм ($M^2 = 13,5$) при том же диаметре перетяжки около 0,2 мм максимальная толщина чистого реза составит 13 мм. Еще более эффективны в этом отношении одномодо-

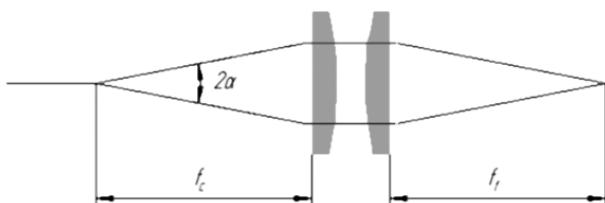


Рис. 7.4
Схема оптической головки волоконного лазера

вые волоконные лазеры. Правда, в настоящее время коммерчески доступны одномодовые волоконные лазеры с выходной мощностью менее 1 кВт.

Для технологов, применяющих волоконные лазеры, приведем дополнительное полезное соотношение.

На рисунке 7.4 схематически изображена оптическая головка волоконного лазера. На выходе из оптического многомодового транспортного волокна лазерный луч расходится с углом раствора 2α , который для иттербийевых лазеров и волокон с диаметрами 50–300 мкм составляет ~0,16 рад. Далее луч преобразуется в плоскостно-параллельный пучок коллимирующим блоком линз с фокусным расстоянием f_c и фокусируется на материал объективом с фокусным расстоянием f_f . Из формул (7.3)–(7.5) легко получить следующее выражение для максимальной глубины чистого реза:

$$x_0 = \frac{k\lambda}{\alpha^2} \left(\frac{f_f}{f_c} \right)^2. \quad (7.6)$$

То есть глубина чистого реза определяется только квадратом отношения фокусов линз в оптической головке и не зависит от диаметра используемого транспортного волокна. Размерный коэффициент перед скобками составляет ~1 мм. Отметим, что для одномодового лазера и одномодового транспортного волокна $2\alpha = 0,1$ рад и данный коэффициент ~3 мм.

Результат экспериментов показывает об обратной пропорциональности скорости качественного реза толщине материала при прочих равных условиях (при заданных мощности лазера, диаметре транспортного волокна и характеристиках оптической головки).

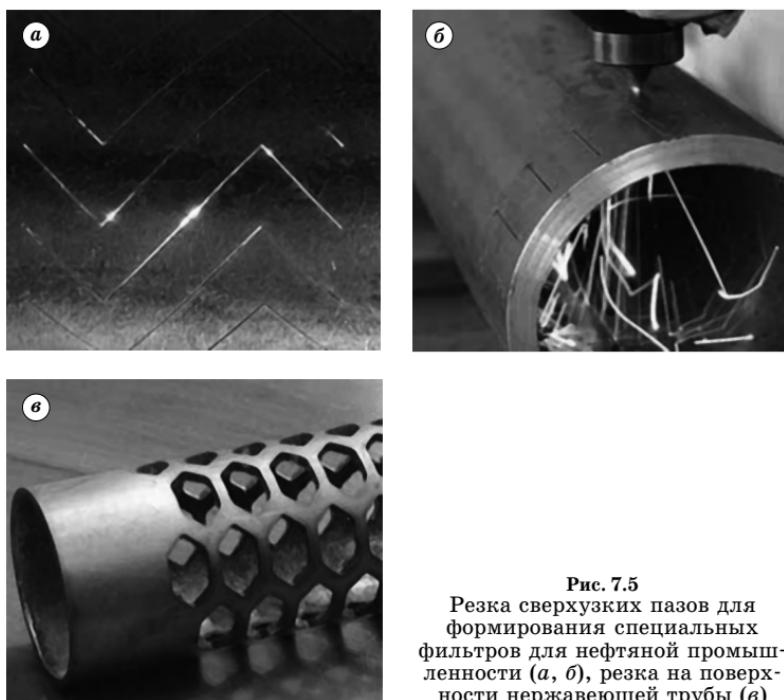


Рис. 7.5

Резка сверхузких пазов для формирования специальных фильтров для нефтяной промышленности (а, б), резка на поверхности нержавеющей трубы (в)

С другой стороны, скорость реза прямо пропорциональна плотности мощности излучения на материале, т. е. при равных характеристиках оптической головки обратно пропорциональна квадрату диаметра транспортного волокна.

Полученные результаты дают расчетную основу для выбора типа и параметров волоконных лазеров, исходя из конкретных условий их применения в технологических системах.

Расчетно-экспериментальным путем определены граничицы набора параметров чистого реза тонкой углеродистой стали для одномодовых волоконных лазеров.

Все шире применяется так называемая дистанционная резка тонких материалов (толщиной до 0,5 мм) с помощью одномодовых волоконных лазеров мощностью ~1–3 кВт и гальваносканеров без подачи режущего газа — процесс резки обеспечивается за счет высокого давления паров обрабатываемого материала. Так, оптимальная скорость резки по

контуру для нержавеющей стали толщиной 0,5 мм с достижением удовлетворительного качества реза — 45 м/мин.

При обработке больших площадей наиболее удачным решением является совмещение сканера с порталом при программной спшивке отдельных зон сканерной обработки.

Сегодня все больший интерес для потребителей представляет процесс лазерной сварки, при котором волоконные лазеры обладают существенным преимуществом в скорости процесса и к тому же легко совмещаются с различными вспомогательными устройствами.

На рисунке 7.5 a представлен процесс резки сверхтонких пазов шириной 0,2–0,25 мм в трубе из стали 45Х в процессе изготовления фильтрующих элементов для нефтяной промышленности, а на рисунке 7.5 b — одно из изделий при подсветке изнутри, на рисунке 7.5 c — резка системы отверстий на цилиндрической поверхности. Примеры иллюстрируют возможность получения отверстий произвольной сложности из цилиндрических труб с высокой точностью.

7.2. ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА

В настоящее время для лазерной сварки и наплавки широко используются установки с импульсными твердотельными лазерами с ламповой накачкой. Применение импульсных лазеров обеспечивает минимальную зону термического влияния на материал, что позволяет сохранить геометрию свариваемых изделий практически без изменений. Поэтому установки с твердотельными лазерами нашли широкое применение при производстве приборов электронной техники, точного приборостроения, ювелирных и медицинских изделий, ремонта и восстановления пресс-форм и других ответственных изделий. Эти установки используются для изготовления сложных и ответственных изделий в атомной, аэрокосмической, электронной, оборонных отраслях промышленности. В настоящее время на российском рынке предлагается широкий спектр современных установок с лазерами с ламповой накачкой — от компактных комплексов для ручной точечной сварки до

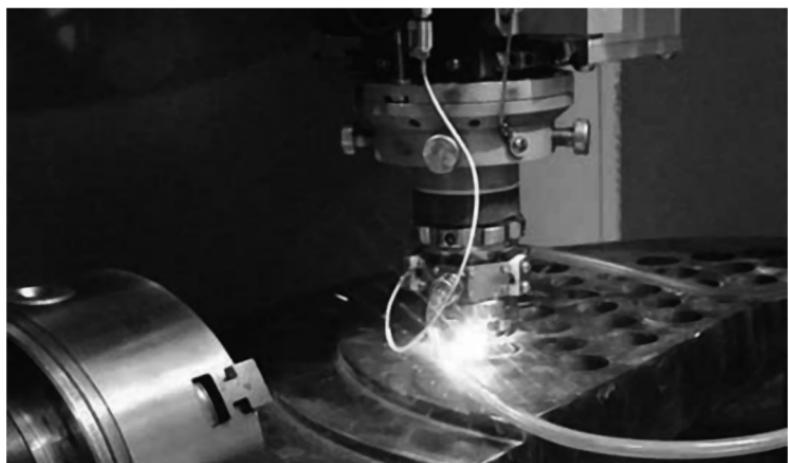


Рис. 7.6
Вид процесса лазерной сварки на демостендe



Рис. 7.7
Опытные сварки
железнодорожных
корпусов гидродемпферов с крышками



Рис. 7.8
Макеты сэндвич-
панелей, изготовлен-
ных лазерной сваркой
«напроплав»

широко универсальных лазерных машин с управляемыми от компьютера координатными столами. Большая часть систем, используемых в нашей стране, отечественного производства [4], [5].

На рисунке 7.6 изображен процесс сварки. Сварочная насадка обеспечивает использование двух газовых потоков — окутывающего потока для защиты сварного шва от окисления (обычно чистый аргон) и плазмоподавляющего потока, который направлен в зону действия лазерного пучка (argon с небольшой добавкой гелия). В ряде случаев гелий можно не применять.

На рисунке 7.7 приведены изображения сварки серийного изделия — гидродемпфера для системы подвески железнодорожных вагонов. Сварка корпусов с крышками произведена в рамках тестирования возможности перехода к лазерной сварке. Демостенд позволяет полностью автоматизировать процесс — автоматически выполняется три прихватки с шагом 120° и полный цикл сварки.

Общее время операции — 44 с, расчет себестоимости сварного шва при полной загрузке установки с учетом времени на установку и смену изделия около 50 руб. Испытания на разрыв показали, что сварные швы держат нагрузку как минимум 5000 кг.

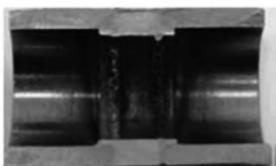
На рисунке 7.8 представлены разные варианты сварки сэндвич-структур (сотовых панелей). Это иллюстрация возможностей процесса лазерной сварки, которая проводилась для технологов судостроительной отрасли, где остро стоит вопрос об использовании такого рода элементов в конструкции судов. Тем не менее, эти изделия показывают широкие возможности демостенда при изготовлении коробчатых элементов.

Рисунок 7.9 иллюстрирует возможности лазерной сварки разнородных металлов. При мощности лазера 1500–2000 Вт можно выполнять качественные соединения сталью с бронзами с толщинами стенки около 3 мм и то же самое для меди при толщине до 2,5 мм.

На рынке продаж технологических лазеров ожидается существенные изменения, связанные с появлением мощных волоконных лазеров, которые имеют целый ряд прин-



Рис. 7.9
Пример сварки разнородных металлов — сталь 10895 с бронзой БрОФ6,5-0,15. Образцы после проточки и разрезки



ципиальных технических преимуществ. Достигнутые параметры по мощности позволяют сваривать материалы толщинами до 20–30 мм. Системы сварки с волоконными лазерами активно применяются в автомобилестроении, авиастроении и судостроении, нефтяной и газовой отраслях (например, для сварки труб). За счет высокого КПД и надежности таких систем растет энергоэффективность, существенно упрощается обслуживание, уменьшаются весо-габаритные параметры, что дает возможность создавать мобильные системы, осуществлять дистанционную сварку, использовать всю гамму современных робототехнических систем и т. д. По нашим оценкам, объем российского рынка в этом сегменте уже в ближайшие годы может составить сотни миллионов долларов. Среди потенциальных российских потребителей следует назвать судостроительную промышленность, авиакосмическую, сталелитейную, нефтяную и газовую отрасли, железнодорожный транспорт и многие другие.

7.3. ЛАЗЕРНАЯ МАРКИРОВКА И ГРАВИРОВКА

Маркировка деталей и узлов — один из важных процессов в современном производстве. Отсутствие маркировки затрудняет (а в ряде случаев делает невозможным) контроль качества и объема выпускаемой продукции. Маркировка нужна производителю для продвижения его торговой марки, а потребителю — как гарантия качества и источник информации о параметрах продукции. Все это требует совершенствования методов маркировки, не влияющих на свойства маркируемых деталей и изделий. Из сущест-

вующих способов маркировки лазерная маркировка — наиболее современный, технологичный и гибкий метод, позволяющий управлять лазерным излучением (во времени и в пространстве), регулировать его энергию. При использовании лазеров различной длины волны круг маркируемых материалов очень широк: металлы, пластик, полупроводники, резина, кожа, спецсплавы, дерево и т. д. Маркировка осуществляется точно, быстро и качественно [4].

Одним из наиболее интересных методов обработки драгоценных металлов является маркировка и гравировка. Современные лазеры, оснащенные компьютерным управлением, позволяют наносить на металл методом лазерной маркировки и гравировки практически любую графическую информацию: рисунки, надписи, вензеля, логотипы. Причем изображение можно наносить как в растровом, так и в векторном видах. Векторная гравировка — луч лазера рисует контуры изображений в виде тонких линий. Растрорвя — когда можно получить практически фотографическое изображение (изображение состоит из точек). Современное оборудование позволяет перемещать лазерный луч со скоростью более двух метров в минуту и обеспечивать графическое разрешение на металле до 200 линий на миллиметр. Интересным применением лазерной технологии гравировки является нанесение лазером различных логотипов, вензелей владельцев, товарных марок и знаков на элементы столовой посуды, как из драгоценных металлов, так и недрагоценных металлов, например для обозначения «нерж.» на клинках ножей. Высокое разрешение (тонкие линии), точность и повторяемость (менее 5 мкм) графического рисунка на металле позволяет эффективно применить лазер для маркировки разметки изделий под дальнейшую ручную гравировку. Широкий диапазон режимов обработки на лазерах позволяет точно дозировать энергию лазерного излучения, что в свою очередь обеспечивает возможность высокоточной обработки двухслойных материалов, например ювелирных изделий из недрагоценных металлов, предварительно покрытых лаком. Нанесенные лазером изображения не стираются и не смываются, так как они составляют единое целое с материалом, на который нанесены.

7.3.1. ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ МАТЕРИАЛОВ

Одним из важнейших процессов современного производства является маркировка выпускаемой продукции. Маркировка деталей, узлов или конечного изделия позволяет производителю контролировать объем выпускаемой продукции, контролировать качество и продвигать свою торговую марку. Конечный пользователь получает на маркированном изделии информацию о типе и параметрах продукции и гарантию качества от производителя. Из существующих способов маркировки наиболее современным и гибким методом является лазерная маркировка, ибо она позволяет управлять лазерным излучением, точно дозируя энергию для маркировки в пространстве и во времени. Номенклатура материалов, маркируемых лазером, очень широка: металлы и сплавы, керамика, пластик, полупроводники, стекло, дерево и т. д. Лазерная маркировка не влияет на свойства маркируемой продукции и осуществляется качественно, точно и быстро [4].

7.3.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ

Взаимодействие падающего потока лазерного излучения с материалом зависит от трех составляющих — меры отраженного, поглощенного и прошедшего излучения. Отраженное и прошедшее излучение не отдает энергию материалу, таким образом, маркировка определяется количеством поглощенной энергии. Поглощательная способность зависит от длины волны падающего излучения, которая также определяет мощность падающего излучения.

С уменьшением длины волны увеличивается энергия лазерного излучения

$$E = h \cdot c / \lambda,$$

где h — постоянная Планка; c — скорость света в вакууме; λ — длина волны. К тому же с уменьшением длины волны уменьшается отражательная способность материалов, а следовательно, большее количество энергии будет поглощено обрабатываемым материалом.

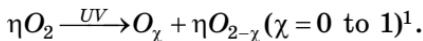
Поглощенная материалом энергия тратится либо на вибрационное или электронное возбуждение, либо на осуществление фотохимической реакции.

При вибрационном возбуждении поглощенная энергия фотона вызывает молекулярные колебания в материале, включая растяжения, изгибы или вращения связей, которые скрепляют атомы. При поворотах молекулярные колебания заставляют атомы теряться друг о друга, что приводит к увеличению температуры и передаче колебаний к смежным атомам.

Если падающий фотон имеет достаточно высокую энергию, он может вызвать электронное возбуждение. После поглощения возбужденный электрон может потратить полученную энергию различными способами — на эмиссию фотона или на вибрационное возбуждение.

Эмиссия фотона не будет изменять материал или его свойства, но вибрационное возбуждение, вследствие выделения тепла, может изменить материал.

Фотохимическая реакция происходит, если поглощенная энергия фотона вызывает химическую реакцию. Примером фотохимического поглощения является восстановление диоксида титана TiO_2 . Диоксид титана, цвет которого белый, обычно добавляется к пластмассам как пигмент:



UV-фотон может разрушить химические связи и удалить часть кислорода (восстановление). Маркированная область пластмассы становится черной — образуется четко различимый контраст. Из всех процессов для фотохимических реакций требуется самое большое количество энергии фотона.

7.3.3. ТИПЫ ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ

Существует четыре типа лазерного воздействия на поверхность обрабатываемого материала (рис. 7.10).

Создание поверхностного контраста характеризуется высокими скоростями сканирования луча по поверхности и/или короткими продолжительностями пульсов. Цвет из-



Рис. 7.10
Типы воздействия лазерного излучения
на поверхность обрабатываемого материала

меняется только на поверхности материала, которая поглощает свет. Это создает видимый контраст с необработанной поверхностью материала. Данный тип известен как фотохимический эффект. Таким способом, например, зачастую маркируются этикетки товаров. При этом используется специальная термобумага, меняющая окраску под действием луча. Аналогичным способом работают некоторые факсимильные аппараты.

К преимуществам данного типа маркировки можно отнести:

- низкую мощность, необходимую для создания рисунка;
- компактность оборудования, работающего по этой технологии;
- сверхвысокую производительность (скорость сканирования луча может достигать 1500 мм/с);
- возможность получения высокой разрешающей способности;
- бесконтактность обработки.

Недостатками являются:

- необходимость применять для маркировки специальные материалы;
- возможная порча отпечатка со временем под действием солнечного света, температуры и др.

Оплавление поверхности — более медленный процесс, при котором материал достигает температуры плавления и который через химический спад, эффекты окисления или изменение в поверхностной морфологии обеспечивает ви-

димую маркировку. Редко применяется при маркировке металлических поверхностей из-за низкого контраста. Например, белая маркировка на темных пластмассовых поверхностях появляется из-за вспенивания пластмассы, обрабатываемой лазерным лучом. Лазерный луч плавит пластмассу, в которой создаются пузырьки газа из-за сгорания углерода с образованием CO₂ или непосредственно теплового разложения пластмассы. Пузырьки газа поднимаются у поверхности, но не покидают материал из-за отвердевания расплавленного пластика, образуя пену. К вспениванию склонны полиолефины и полиэтилены высокой плотности. Основным недостатком данного метода является низкая износостойкость маркировки.

Гравировка поверхности или полное удаление материала — самый медленный процесс маркировки, поскольку материал выпаривается. Маркировка становится хорошо видимой, так как окружающий свет противопоставляет глубину канала рядом с немаркированным материалом. Технология получила широкое применение во всех областях производства. В микроэлектронике она применяется для маркировки заготовок, изделий и оснастки на всех стадиях разработки и производства, например, для кремниевых пластин.

Значительную роль в данном типе маркировки играют параметры обрабатываемого материала. Наиболее существенные из них — теплопроводность, скрытая теплота испарения и коэффициент отражения лазерного излучения. Если исходить из того, что весь удаляемый материал испаряется, то количество материала, которое можно удалить с помощью лазера, будет ограничиваться величиной скрытой теплоты испарения. Максимальная глубина слоя испаряемого материала определяется следующим образом:

$$D = \frac{E_0}{A\rho(c(T_1 - T_0) + L)}, \quad (7.7)$$

где c — удельная теплоемкость; T_1 — температура кипения; T_0 — температура окружающей среды; L — скрытая теплота парообразования; A — облучаемая площадь; ρ — плотность материала; E_0 — энергия, полученная под дейст-

вием лазерного импульса. Формула непосредственно вытекает из закона сохранения энергии. Стоит отметить, что вся энергия лазерного импульса делится на поглощенную E_0 и отраженную.

Формула дает лишь приблизительную оценку. Важно понимать, что теплофизические параметры материалов изменяются в зависимости от температуры образца и длины волны излучения. Сильнейшее влияние на форму полученного отверстия оказывает модовый состав (распределение энергии внутри пучка).

Также значительное влияние на процесс маркировки оказывает мощность излучения. При этом зависимость очень сложно описать аналитически, так как на разных уровнях плотности энергии процессы протекают по-разному.

При медленном нагреве непрерывным лазером наиболее важным критерием является отвод тепла вглубь материала. В этом случае точка испарения получается достаточно большой. Для плоских образцов большую роль играет толщина.

Если объем подводимой энергии превышает объем энергии, отводимой теплопередачей, происходит плавление материала.

С увеличением интенсивности (т. е. перехода к импульсным лазерам), существенное влияние начинает оказывать вторичное излучение с поверхности и, как следствие, отвод энергии в окружающую среду. При достижении уровня $105 \text{ Вт}/\text{см}^2$ процесс начинает проявлять новые свойства. Это связано с тем, что над поверхностью образца создается облако плазмы, частично экранирующее поверхность. Потери энергии в этом случае могут достигать 40%. Для того чтобы избежать возникновения такого явления, следует делать небольшую паузу при подаче импульсов лазера. Дальнейший рост удельной энергии излучения активирует процесс механического разрушения материала совместно с термическим. В этом случае на поверхности происходит микровзрывы. Взрывы способствуют выдавливанию всего материала, находящегося в жидкой фазе, и его разбрызгиванию на значительные расстояния, сравнимые и даже иногда превосходящие, диаметр пучка обработки. Кроме

того, резкий нагрев стимулирует протекание различных химических реакций в зоне воздействия. При работе без создания особой среды превалируют процессы окисления. Этот фактор играет существенную роль для маркировки изделий, поскольку позволяет получать химические соединения цвета, отличного от основного материала. Зачастую этот слой прочно держится на поверхности и позволяет добиваться качественного изображения. Простое удаление материала чаще всего осуществляется на относительно небольшую величину и не позволяет добиться нанесения хорошо различимых символов.

Гравировка поверхности с оплавлением — комбинация удаления материала с оплавлением, которое происходит на дне гравировального канала. Применяется для гравировки металлических деталей.

Оптоволоконные лазеры (ОВ-лазеры), появившиеся в последнее время на рынке лазерных технологий, дают новые технологические возможности для маркировки материалов. Их особенность — более высокое качество лазерного пучка. ОВ-лазеры имеют высокие рабочие частоты и обеспечивают за счет этого более высокую производительность, также у них лучшее разрешение изображения из-за стабильности лазерного луча. Еще одной особенностью этих лазеров является возможность управления модовым составом лазерного пучка, что позволяет увеличивать перечень обрабатываемых материалов и точно дозировать энергию пучка.

Благодаря оптоволоконным лазерам появляется возможность использования цветной маркировки для ряда материалов, таких как железо, титан и их сплавы, цирконий и др. ОВ-лазеры дают возможность точно и стабильно в пространстве и времени дозировать энергию лазерного пучка и формировать четкие структуры на поверхности металлов. Это позволяет обеспечивать появление оксидных пленок определенного состава на поверхности материалов, особенно на металлах и сплавах, способных образовывать цветные окислы. Конечно, цветная маркировка может получиться и у лазеров с диодной и даже с ламповой накачкой, однако этот эффект будет сложновоспроизводимым и неустойчивым.

Особой привлекательностью ОВ-лазера является его более низкая стоимость по сравнению с другими. Также оптоволоконный лазер не требует водяного охлаждения, что позволяет внедрять его в производство без организации сложных подключений.

7.3.4. ДОБАВКИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ НЕВОСПРИИМЧИВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Некоторые материалы недостаточно восприимчивы к лазерной энергии и не позволяют оставить четкую и высококонтрастную лазерную маркировку. В этом случае можно применять различные добавки. В качестве примера таких добавок можно привести:

- поверхностное напыление — Thermark;
- гранулированная добавка — Micabs®.

Добавка Thermark для распыления на поверхности готового изделия.

Получаемая при нанесении Thermark маркировка является нестираемой, высококонтрастной и обладает высоким разрешением. При этом на сам субстрат оказывается минимальное термальное воздействие.

При лазерной маркировке добавки Thermark происходит термическая связка стекловидного материала и неорганического пигмента с поверхностью, что обеспечивает маркировке постоянство. Помимо этого, маркировка становится устойчивой к кислотам и щелочи, ультрафиолету, абразивному воздействию и очень высоким температурам.

Одним из преимуществ добавки Thermark является то, что при лазерной маркировке воздействие на субстрат минимальное. При прямой лазерной маркировке происходит удаление материала либо его отжиг, что потенциально может привести к коррозии или структурному изменению материала. В случае же добавки Thermark для образования связи между материалом Thermark и поверхностью субстрата требуется меньшее количество термальной энергии. Это позволяет сохранить целостность субстрата, что требуется в таких критических отраслях, как аэрокосмос и промышленная керамика.

При использовании добавки с твердотельными лазерами возможно наносить черную или цветную маркировку на стекло и керамику, а также улучшить качество маркировки на металле, при этом снизив степень негативного воздействия на него.

Micabs® позволяет наносить четкую маркировку на термопластик. Micabs поставляется в виде гранул. Micabs® может использоваться для любых термопластичных полимеров, при этом сохраняются свойства базового полимера. Получаемая маркировка не стирается и широко используется для идентификационных ярлыков, электрических и электронных компонентов, а также упаковки.

Для нанесения маркировки маркируемый полимер должен иметь способность к поглощению лазерного излучения. Однако большинство полимеров практически прозрачны для длины волн лазерного излучения. Разные технологии предусматривают распыление материала на поверхности, чтобы поглотить лазерное излучение, трансформировать поглощенное излучение в тепло и карбонизировать (выжечь) маркировку.

Что касается Micabs, то этот гранулятор добавляется при составлении рецептуры смеси либо посредством сухого перемешивания. Таким образом, достигается идеальная дисперсия лазер-активных частиц. При облучении лазером частицы поглощают лазерную энергию и изменяют свой цвет со светлого на темный. Лазерная маркировка реализуется внутри частицы Micabs и не приводит к карбонизации окружающей структуры.

На сегодняшний день, несмотря на многообразие лазеров, реальное коммерческое применение для маркировки получили системы с волоконными, твердотельными лазерами с длиной волны 1,06 мкм и СО₂-лазерами (10,6 мкм).

Для микроэлектроники характерен достаточно широкий спектр материалов для маркировки. Наиболее используемыми являются металлы, пластиковые и керамические корпуса изделий, кремний, органические материалы.

Процесс маркировки происходит благодаря локальному испарению и расплавлению материала под действием импульса лазерного излучения. При этом важную роль так-

Таблица 7.1

Характеристики установки маркировки

Характеристики излучателя	
Тип лазера	Лазер на иттрий-алюминиевом гранате с блоком генерации второй гармоники
Класс лазера	4
Длина волны	532 нм
Средняя мощность	15 Вт
Максимальная пиковая мощность	150 КВт
Тип накачки	Диодная
Тип охлаждения	Двухконтурное водяное
Тип затвора	Оптоэлектрический
Длина импульса	3–50 нс
Характеристики оптической головки	
Тип системы создания изображения	Зеркальная отклоняющая
Фокусное расстояние	160 мм
Рабочее расстояние от головки	201,5 мм
Регулировка фокусного расстояния	±6,96 мм
Размеры рабочего поля	110×110 мм
Допустимый диапазон частот	5–100 кГц
Минимальный размер получаемой точки	35 мкм
Диаметр минимального пятна	20 мкм
Скорость сканирования	1–5000 мм/с

же играют химические процессы, стимулируемые монохроматическим излучением и высокой температурой в зоне действия лазера.

Основные характеристики установки приведены в таблице 7.1.

7.3.5. МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИЕ КОРПУСА

В качестве задачи маркировки керамических поверхностей требуется нанесение матричного (2D) кода уникального номера металлокерамического корпуса для последующе-

го его машинного считывания, его визуально читаемой расшифровки, номера партии и другой информации. Работы проводились для керамики различных видов.

Код наносится для обеспечения прослеживаемости выпускемой продукции. Выдача кода, его хранение, привязка корпуса к кристаллу, взаимодействие с внешними базами данных предприятия обеспечивается с использованием ПО разработки специалистов НИИСИ РАН и встроенных возможностей ПО системы маркировки. Такая система позволяет анализировать отказы, возникающие в процессе испытаний и эксплуатации и проконтролировать как, когда и кем выполнялась каждая операция технологического процесса.

Особенность задачи в том, что свободная поверхность для маркировки в некоторых случаях имеет вид полосы шириной не более 1,5 мм. При этом точность позиционирования корпуса с использованием автоматической транспортной системы составляет $\pm 0,2$ мм. Таким образом, требуется нанести четкий контрастный машинночитаемый код высотой не более 1 мм. Рекомендованная высота кода составляет 4–10 мм.

Была проведена серия экспериментов по подбору параметров, которые показали следующее:

- 1) при малой и средней удельной мощности следов не остается;
- 2) при максимальной удельной мощности образуется маркировка в виде ряда углублений, но из-за отсутствия контраста они практически нечитаемы;
- 3) узком диапазоне технологических параметров образуется соединение контрастного цвета;
- 4) для создания «залитой» поверхности наиболее эффективна последовательность параллельных линий. При этом для обработки в фокусе линии получаются слишком тонкими и контрастный материал выкрашивается. В связи с этим фокус смешен относительно поверхности. Частота линий должна быть заметно больше их ширины;

- 5) технологические параметры для нанесения надписей могут отличаться от параметров «заливки» поверхностей.

7.3.6. ОСНАСТКА ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

Единственным требованием была визуальная читаемость. В связи с этим использовались максимальная мощность и скорость, при которых обеспечивается читаемость. Маркировка оснастки такого типа сложности не представляет. Можно отметить, что в зависимости от параметров можно добиться различных оттенков и даже цветов, что расширяет возможности для художественно-оформительских работ.

7.3.7. ОСНАСТКА С АНОДИРОВАННЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Аналогично предыдущей задаче требовалась исключительно читаемость. Наиболее удачным решением было признано удаление покрытия. При этом использовался механизм не испарения или расплавления материала, а его разрушения. Маркировка получается контрастная и хорошо читаемая. Подбор параметров сложности не представляет.

7.3.8. КРЫШКИ КОРПУСОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Крышка корпуса представляет собой пластинку из ковра толщиной 0,4 мм, покрытую от одного до четырех слоев золотом или никелем малой толщины. Маркировка должна быть визуально читаемой и не нарушать коррозионную стойкость.

Толщина коррозионно-стойкого слоя крышки очень мала. Как правило, коррозионным слоем является слой никеля толщиной до 3 мкм. Удалось получить четко различимый контраст оплавлением слоя никеля с частичным удалением материала, не превышающим в глубину 1–1,5 мкм. Тем самым сохранялась коррозионная стойкость крышки. Контрастность символов можно повысить увеличением толщины линий (метод «заливки» или конгруэнтных изображений). Рекомендуется увеличение частоты следования импульсов для лучшего перекрытия точек и создания более равномерной зоны маркировки.

При проведении экспериментов по оценке полученной коррозионной стойкости было отмечено, что в ряде случаев маркированная поверхность более стойкая, чем основная. Это связано с тем, что при обработке материала происходит дополнительная закалка материала в области маркировки.

7.3.9. КРЕМНИЕВЫЕ ПЛАСТИНЫ

Стояла задача минимизировать повреждения поверхности, не допустив создания внутренних трещин, искажения геометрии и иных очагов напряжений. Это вызвано тем, что пластина подвергается утонению и может разрушиться при наличии внутренних дефектов.

Поскольку область маркировки зачастую покрыта следами предыдущих обработок, маркировка за счет изменения цвета без внедрения в поверхность невозможна. Для мягкого внедрения использованы многократные проходы, высокая скорость при относительно большой мощности, смещение фокуса. Для улучшения читаемости используются широкие линии.

Из вышеизложенного видно, что лазер — это универсальный инструмент маркировки, дающий возможности использования различных механизмов создания рисунков, таких как стимуляция химической реакции, расплавление и перемешивание материалов, испарение материала, разрушение верхнего слоя и т. д.

Все эти методы отработаны и применяются в НИИСИ РАН с использованием всего одной технологической установки.

Установка имеет развитое и функциональное ПО, которое позволяет использовать файлы распространенных форматов (графические, AutoCad и т. п.), соединять оборудование с сетью для контроля процесса, выдачи информации для маркировки из внешних источников, удаленного управления и т. д. Это заметно расширяет возможности и облегчает процесс разработки программ.

К рекомендациям по выбору оборудования можно добавить, что наиболее удобными являются установки с длиной волны видимого или УФ-спектра. Это связано с тем, что

металлы и некоторые другие материалы имеют высокий коэффициент отражения в ИК-диапазоне, что резко увеличивает требования к мощности. Наиболее распространен зеленый цвет. Для органических материалов и материалов, содержащих опасные компоненты, необходимо иметь систему вентиляции для удаления дыма и испаряемых материалов, которые вредны для здоровья, а при осаждении на оптику могут ее повредить. Важным параметром оборудования является стабильность мощности излучателя. Так как, например, флуктуация мощности в 5–7% может привлечь за собой прожиг материала, снижая коррозионную стойкость изделия или сделать маркировку нечитаемой.

7.4. ЛАЗЕРНАЯ МИКРООБРАБОТКА

По мере усложнения структуры материалов лазерные технологии применяются все больше и чаще. Так, благодаря многослойным компонентам в компактном корпусе мобильника умещается широчайший диапазон функций: от простого общения до просмотра видео. Пример такой структуры — мультитач-панель, ставшая знаменитой благодаря iPhone и делающая возможным ввод символов от руки, — состоит по крайней мере из десятка слоев материалов общей толщиной менее 1 мм.

Другой пример — измерительные полоски глюкометров, которые состоят из ламинированных слоев, работающих для приема крови, транспортировки жидкости, цветовой индикации, измерения уровня глюкозы и т.д. Здесь тоже не обошлось без лазерных технологий. Другие примеры показаны на рисунке 7.11.

Лазерная микрообработка материалов [9], как правило, производится лазерным излучением, сфокусированным в пятно диаметром менее 25 мк. Для большей части приложений микрообработки такой диаметр пятна является даже большим, так как зачастую толщина обрабатываемого материала или слоя составляет около 10 мкм, а требуемая точность размерной обработки и позиционирования — 1–2 мкм и менее. Процессы, протекающие при взаимодействии лазерного излучения с материалами, а следовательно,



Рис. 7.11

Примеры изделий, полученных лазерной микрообработкой

и результат этого взаимодействия сильно зависят от поглощения материала на длине волны данного лазерного источника, пиковой мощности лазера и длительности воздействия излучения на материал. При попадании лазерного излучения на поверхность материала сначала происходит испарение и ионизация поверхностных примесей и загрязнений, которые практически всегда, в том или ином виде присутствуют. Далее излучение поглощается основным материалом, и если интенсивность недостаточно высока, то материал плавится, испаряется, а пары ионизуются. При этом давление паров способствует выплескиванию расплава и образованию отверстия. Конечно, при построении теоретической модели и численном моделировании физических процессов, происходящих при взаимодействии ЛИ, необходимо рассматривать процессы тепло- и массопереноса, газодинамику и оптические свойства паров и образующейся плазмы, а также учитывать геометрию взаимодействия, влияющую, в частности, на процессы «разгрузки» и, следовательно, на характеристики взаимодействия.

При достаточно высоком коэффициенте поглощения материала на данной длине волны или высокой интенсивности излучения, могут происходить фотоабляционные процессы, когда материал за очень короткое время испаряется непосредственно из твердого состояния, минуя жидкую фазу, и при этом ионизуется, превращаясь в плазму. Поскольку все эти процессы протекают за весьма короткое время, формируется ударная волна. Все или большинство из этих физических процессов происходят при резке, сварке, пайке, сверлении материалов и влияют на точность и качество результата лазерной микрообработки.

При работе с многослойными материалами обработать нужный слой можно достаточно легко, для этого необходимо выбрать длину волны лазерного излучения, которая наилучшим образом поглощается материалом обрабатываемого слоя. Типичный пример — сверление глухих отверстий в гибких печатных платах, когда необходимо просверлить полиимид, нанесенный на медную фольгу. Излучение СО₂-лазера с длиной волны 9,4 мкм хорошо поглощается полиимидом и отражается от меди (коэффициент отражения меди почти 100%).

Более сложная ситуация возникает при обработке многослойных полимерных материалов, хотя базовые принципы работы остаются теми же — для обработки заданного слоя необходим тщательный выбор длины волны ЛИ. В целом поглощение большинства органических материалов лежит в среднем ИК-диапазоне, поэтому СО₂-лазеры широко применяются для обработки полимерных материалов, при этом некоторые материалы наилучшим образом обрабатываются более коротковолновым излучением эксимерных лазеров УФ-диапазона.

Толщина каждого из слоев многослойного материала может быть от 10 до 75 мкм. При обработке внутреннего слоя может возникнуть проблема, когда лазерное излучение, проходя через внешние слои материала, частично в них поглощается и возникают нежелательные эффекты расплавления или даже резки тех слоев, которые должны остаться нетронутыми. Решение этой проблемы включает в себя не только выбор длины волны ЛИ для селективного поглощения в нужном слое, но также и точнейшее управление происходящими при взаимодействии процессами за счет правильного выбора параметров лазерного источника — средней мощности ЛИ, модового состава ЛИ (качества излучения), а в случае импульсного лазера — энергии и частоты повторения импульсов, длительности импульса. Немаловажную роль будут играть и объектив, фокусирующий излучение, и система управления перемещениями образца или/и объектива, и система видеонаблюдения. В связи с особенностями физико-химических характеристик полимерных материалов процесс их лазерной обработки требует

также высокой аккуратности и точности в размещении, обращении и перемещении обрабатываемой полимерной пленки на каждом этапе обработки.

Удаление проводящего слоя оксида индия-олова (ITO) с поверхности стекла (технология применяется в производстве мониторов контрольных приборов самолетов) или с поверхности полиэстера.

Как правило, толщина проводящей пленки до 70 мкм, требования к точности позиционирования и ширине «линий» $\pm 1,5$ мкм, и при удалении проводящего слоя недопустимо нарушение подложки. Как правило, для такого процесса применяется лазерное излучение УФ-диапазона, так как излучение с длиной волны 1,06 мкм может легче разрушить подложку за счет термических эффектов, особенно в местах пересечения наносимых лазером линий. Именно для такого рода обработки важно, чтобы пиковая мощность лазерного импульса была большой, а частота повторения импульсов высокой. Это позволяет вести удаление пленки ITO с ПЭТ на скорости до нескольких метров в секунду, чтобы избежать нежелательных термических эффектов за счет среднего нагрева материала и повысить выход процесса. В настоящее время для этого успешно применяются импульсные волоконные лазеры (длина волны 1,068 мкм) и их вторые гармоники (534 нм). Процесс используется, например, в формировании электродов на мультитач-дисплеях или для создания изолирующих разрывов в проводящих зонах тонкопленочных солнечных батарей. Современные солнечные батареи — это многослойные структуры, состоящие из слоев меди, индия, галлия и селенида между двумя электродами. Лазерное скрайбирование используется для создания электрической изоляции и резке солнечных батарей на сегменты. При необходимости лазеры также используются для сварки компонентов солнечных батарей из меди и нержавеющей стали.

7.4.1. О ГИБКИХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ

Гибкие печатные платы, как правило, изготавливаются на полиимидных подложках. В простейшем варианте — с помощью проводящих «чернил». В более сложном это

многослойная структура, состоящая из диэлектрических, клеевых и проводящих (медных) слоев, с довольно сложной топологией электрических соединений. Используются гибкие печатные платы для миниатюризации приборов (например, в слуховых аппаратах), или там, где мало места для жестких плат (например, для приборной доски автомобиля), или при частых изгибах (например, в кроссовках, мигающих при ходьбе). Их также используют для гибких клавиатур компьютеров, в калькуляторах, в медицинских приборах, в авионике и космической промышленности, в производстве фото- и видеоаппаратуры (например, камеры с поворотными экранами).

Основные тенденции — миниатюризация приборов, все более высокая плотность упаковки их компонентов, со все большим количеством выходов на внешнее или основное оборудование (например, тест-полоски глюкометров).

При производстве гибких плат лазеры в принципе применяются так же, как и в производстве жестких плат. Но есть и особенности. Чаще всего лазеры используются для трех задач — для удаления избыточного полииамида там, где это необходимо, для сверления сквозных и глухих отверстий и иных структур, а также для удаления временного защитного покрытия с поверхности проводников. Традиционные механические и химические методы имеют ограничения по точности и размеру отверстия до нескольких десятков микрон. Тогда как лазер при определенных условиях способен просверлить отверстие диаметром менее 10 мкм.

Полиимидные материалы хорошо обрабатываются коротковолновым излучением эксимерных лазеров (248 нм) или третьей гармоникой лазеров с длиной волны 1,06–1,07 мкм.

Базовая гармоника, так же как и 10-микронное излучение CO₂-лазеров, оплавляет края полииамида, создавая «валики» расплавленного и не удаленного материала и вызывает почернение (за счет сажи). Как правило, эксимерные лазеры приводят к лучшим результатам, но их производительность ниже, чем Nd:YAG-, а тем более волоконных лазеров.

7.4.2. ЛАЗЕРНАЯ МИКРОПАЙКА И МИКРОСВАРКА

Лазерная микропайка используется в производстве жестких и гибких печатных плат для слуховых аппаратов, в сердечных стимуляторах, медиаплеерах, сотовых телефонах. В авионике она широко используется в волоконнооптических гироскопах, где пигтейлы привариваются с помощью лазера к плате для обеспечения большей стабилизации положения волокна.

Лазерная микропайка имеет ряд преимуществ перед традиционными методами. Прежде всего это бесконтактность процесса, а следовательно, меньший риск электростатического разрушения деталей, повторяемость и контролируемость процесса вследствие стабильности параметров и качества излучения современных лазерных источников.

До недавнего времени наиболее часто для микросварки применялись диодные лазеры, как наиболее экономичное решение, однако сегодня на этом рынке неплохую конкуренцию им составляют волоконные лазеры.

Лазеры также применяются и для микросварки инструментария малоинвазивной хирургии, например катетеров (рис. 7.12). В этой ситуации важно произвести сварку в нужных местах в условиях сложной трехмерной геометрии объекта.

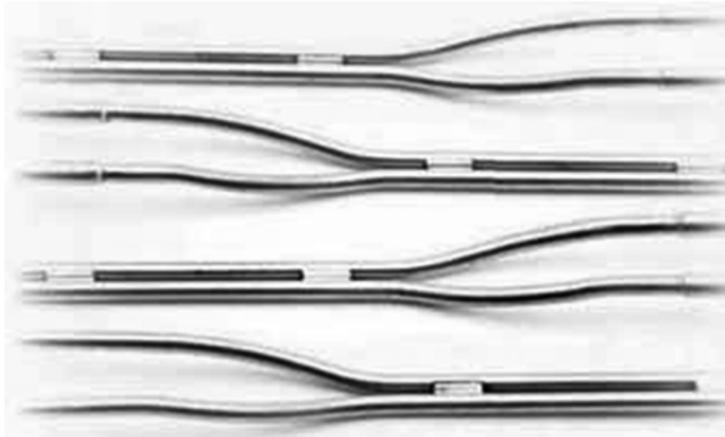


Рис. 7.12
Инструменты малоинвазивной хирургии

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волоконные Yb-, Er-, Yb-, и Nd-лазеры на световодах с многоэлементной первичной оболочкой / И. А. Буфетов, М. М. Бубнов, М. А. Мелькумов [и др.] // Квантовая электроника. — 2004. — Т. 35, № 4. — С. 328–334.
2. Гапонцев, В. П. Волоконные лазеры и их применение: научный обзор / В. П. Гапонцев, И. Э. Самарцев. — М. : МФТИ ; ФФКЭ, 2006.
3. Жарский, В. В. Прототип лазерного многофункционального станка / В. В. Жарский, А. И. Скрипченко, В. М. Медвецкий // РИТМ. — 2009. — № 9. — С. 24–27.
4. Коденко, Н. Технология лазерной маркировки материалов / Н. Коденко, А. Иванов // Современная светотехника. — 2011. — № 6. — С. 22–25.
5. Курков, А. С. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности / А. С. Курков, Е. М. Дианов // Квантовая электроника. — 2004. — Т. 34, № 10. — С. 881–900.
6. Сапрыкин, Д. Л. Возможность будущего роста // РИТМ. — 2009. — № 9. — С. 19–24.
7. Скрипченко, А. И. Инновационный путь волоконных лазеров / А. И. Скрипченко, В. М. Медвецкий // РИТМ. — 2010. — № 9. — С. 65–69.
8. Скрипченко, А. И. Технологические головки для волоконных лазеров // РИТМ. — 2010. — № 2. — С. 22–27.
9. Степанова, М. А. Лазерная микрообработка // РИТМ. — 2010. — № 1. — С. 24–26.
10. Стрельцов, А. П. Выбор параметров лазера для качественной резки / А. П. Стрельцов, В. Н. Петровский // РИТМ. — 2007. — № 2. — С. 41–46.
11. Яковлев, В. Н. Основы оптоволоконной технологии // Современные технологии автоматизации. — 2002. — № 7. — С. 74–81.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Световоды	6
1.1. Отражение и преломление света	6
1.2. Устройство оптического волокна	9
1.3. Профиль показателя преломления	11
1.4. Моды	12
Глава 2. Элементы волоконного лазера	18
2.1. Активные добавки волоконных световодов	18
2.2. Фотоиндуцированные решетки показателя преломления	23
2.3. Активные волоконные световоды	25
2.4. Схемы накачки активных световодов	31
2.5. Особенности волоконных световодов как усилительной среды	33
Глава 3. Характеристики волоконных лазеров	35
3.1. Лазеры на основе световодов, легированных ионами Nd^{3+}	35
3.2. Лазеры на основе световодов, легированных ионами Yb^{3+}	37
3.3. Лазеры на основе световодов, легированных ионами Er^{3+}	45
3.4. Лазеры на основе световодов, легированных ионами Tm^{3+}	47
3.5. Лазеры на основе световодов, легированных ионами No^{3+}	48
Глава 4. Технологические головки для волоконных лазеров	52
4.1. Функциональность лазерных головок	52
4.1.1. Оптическая функция	52
4.1.2. Функции юстировки	56
4.1.3. Технологические функции	58
4.1.4. Контроль и безопасность	60
4.1.5. Функции, обеспечивающие адаптивность процесса	61
Глава 5. Обзор изделий на рынке	64
5.1. Головки для сварки	70
5.1.1. Головки фирмы HAAS LTI	70
5.1.2. Головки фирмы HIGHYAG	73
5.1.3. Головки фирмы KUGLER	81
5.1.4. Головки фирмы PRECITEC	84

5.1.5. Головки фирмы SCANSONIC	92
5.2. Головки для резки	98
5.2.1. Головки фирмы HAAS LTI	98
5.2.2. Головки фирмы HIGHYAG	104
5.2.3. Головки фирмы IPG	107
5.2.4. Головки фирмы PRECITEC	115
5.3. Головки для наплавки	136
5.3.1. Головки фирмы PRECITEC	136
5.4. Головки для пайки	139
5.4.1. Головки фирмы SCANSONIC	139
5.5. Универсальные технологические головки	140
5.5.1. Головки фирмы KUGLER	140
5.5.2. Головки фирмы SCANSONIC	142
5.6. Головки для гибридных технологий	147
5.6.1. Головки фирмы PRECITEC	147
5.7. Головки для закалки	149
5.7.1. Головки фирмы SCANSONIC	149
5.8. Краткий анализ	155
Глава 6. Волоконные промышленные лазеры	156
6.1. Продукция компании Videojet	157
6.2. Продукция компании Coherent	157
6.3. Продукция компании Quantel	158
6.4. Продукция компании Rofin	159
6.5. Продукция компании NKT Photonics	161
6.6. Продукция компании Topica Photonics AG	163
6.7. Продукция компании MPB Communications	164
6.8. Продукция компании Fibercore	165
6.9. Продукция компании SPI Lasers	166
6.10. Продукция компании Multiwave	167
6.11. Продукция компании Menlo Systems GmbH	168
6.12. Продукция компании Leukos	168
6.13. Продукция компании Fianium	169
6.14. Продукция компании IPG Photonics	171
Глава 7. Применение волоконных лазеров	175
7.1. Лазерная резка	175
7.1.1. Выбор параметров лазера для качественной резки	175
7.2. Лазерная сварка	182
7.3. Лазерная маркировка и гравировка	185
7.3.1. Технология лазерной маркировки материалов	187
7.3.2. Физические основы лазерной маркировки	187
7.3.3. Типы лазерной маркировки	188
7.3.4. Добавки для лазерной маркировки невосприимчивых поверхностей	193
7.3.5. Металлокерамические корпуса	195
7.3.6. Оснастка из нержавеющей стали	197
7.3.7. Оснастка с анодированными поверхностями .	197
7.3.8. Крышки корпусов различных типов	197
7.3.9. Кремниевые пластины	198
7.4. Лазерная микрообработка	199
7.4.1. О гибких печатных платах	202
7.4.2. Лазерная микропайка и микросварка	204
Список литературы	205

*Александр Владимирович БОГДАНОВ,
Юрий Владимирович ГОЛУБЕНКО*

**ВОЛОКОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРЫ
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ**

Учебное пособие

Зав. редакцией
инженерно-технической литературы *Т. Ф. Гаврильева*
Ответственный редактор *Н. В. Черезова*
Выпускающие *Е. П. Королькова, Н. А. Крылова*

ЛР № 065466 от 21.10.97
Гигиенический сертификат 78.01.07.953.П.007216.04.10
от 21.04.2010 г., выдан ЦГСЭН в СПб

Издательство «ЛАНЬ»
lan@lanbook.ru; www.lanbook.com
196105, Санкт-Петербург, пр. Юрия Гагарина, д. 1, лит. А.
Тел./факс: (812) 336-25-09, 412-92-72.
Бесплатный звонок по России: 8-800-700-40-71

ГДЕ КУПИТЬ

ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИЙ:

*Для того, чтобы заказать необходимые Вам книги, достаточно обратиться
в любую из торговых компаний Издательского Дома «ЛАНЬ»:*

по России и зарубежью. «ЛАНЬ-ТРЕЙД».
192029, Санкт-Петербург, ул. Крупской, 13
тел.: (812) 412-85-78, 412-14-45, 412-85-82; тел./факс: (812) 412-54-93
e-mail: trade@lanbook.ru; ICQ: 446-869-967; www.lanpbl.spb.ru/price.htm
в Москве и в Московской области. «ЛАНЬ-ПРЕСС».
109263, Москва, 7-я ул. Текстильщиков, д. 6/19
тел.: (499) 178-65-85; e-mail: lanpress@lanbook.ru
в Краснодаре и в Краснодарском крае. «ЛАНЬ-ЮГ».
350901, Краснодар, ул. Жлобы, д. 1/1
тел.: (861) 274-10-35; e-mail: lankrd98@mail.ru

ДЛЯ РОЗНИЧНЫХ ПОКУПАТЕЛЕЙ:

интернет-магазин
Издательство «Лань»: <http://www.lanbook.com>
магазин электронных книг
Global F5: <http://globalf5.com/>

Подписано в печать 17.02.16.
Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 84×108 1/32.
Печать офсетная. Усл. п. л. 10,92. Тираж 200 экз.

Заказ № 020-16.

Отпечатано в полном соответствии с качеством
предоставленного оригинал-макета.
в ПАО «Т8 Издательские Технологии».
109316, г. Москва, Волгоградский пр., д. 42, к. 5.