

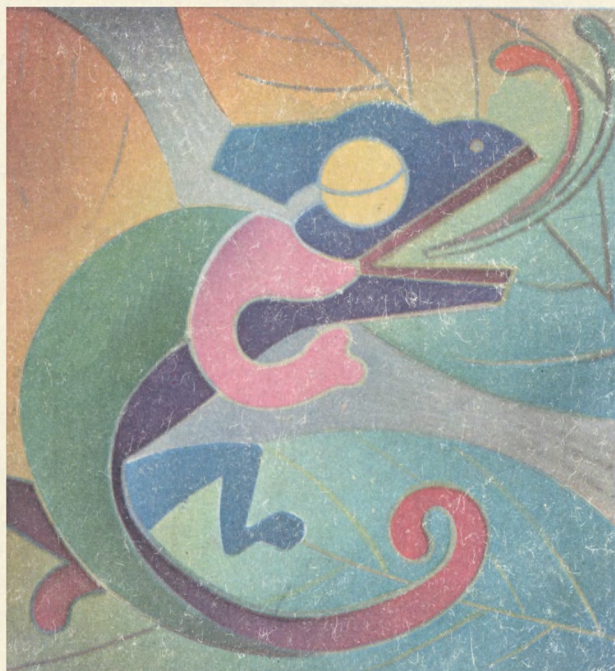


БИБЛИОТЕЧКА • КВАНТ •

ВЫПУСК 20

С. А. ПИКИН
Л. М. БЛИНОВ

ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ





Так выглядят «нити» в нематике



Современные электронные часы и карманный калькулятор на жидких кристаллах



БИБЛИОТЕЧКА • КВАНТ •

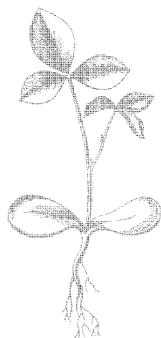
ВЫПУСК 20

**С. А. ПИКИН
Л. М. БЛИНОВ**

ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ



**МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ
ЛИТЕРАТУРЫ
1982**



Scan AAW

22.37

П 32

УДК 539.1

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Академик И. К. Кикоин (председатель), академик А. Н. Колмогоров (заместитель председателя), доктор физ.-мат. наук Л. Г. Асламазов (ученый секретарь), член-корреспондент АН СССР А. А. Абрикосов, академик Б. К. Вайнштейн, заслуженный учитель РСФСР Б. В. Воздвиженский, академик В. М. Глушков, академик П. Л. Капица, профессор С. П. Капица, академик С. П. Новиков, академик Ю. А. Осипьян, академик АПН СССР В. Г. Разумовский, академик Р. З. Сагдеев, кандидат хим. наук М. Л. Смолянский, профессор Я. А. Смородинский, академик С. Л. Соболев, член-корреспондент АН СССР Д. К. Фаддеев, член-корреспондент АН СССР И. С. Шкловский.

Пикин С. А., Блинов Л. М.

П 32 Жидкие кристаллы/Под ред. Л. Г. Асламазова.— М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982.— 208 с.— (Библиотечка «Квант». Вып. 20).— 35 к.

В книге известных специалистов увлекательно и популярно рассказывается об удивительном мире жидких кристаллов, раскрывших перед учеными свои тайны лишь в последние годы. Читатель узнает об основных свойствах и принципах строения этих веществ, в том числе об электрооптическом эффекте, объясняющем устройство современных электронных часов. Тех, кто хочет узнать о тонкоплёночных тепловизорах, заинтересуют холестерические жидкие кристаллы с необычайно чувствительной к температуре цветовой гаммой. Станет ясно, как пишут лазерным лучом и почему возможен плоский телевизор. И еще о многих применениях жидких кристаллов узнает читатель.

Для школьников, преподавателей, студентов, лекторов.

П $\frac{1704060000-095}{053(02)-82}$ 188-82

ББК 22.37
531.9

П $\frac{1704060000-095}{053(02)-82}$ 188-82

© Издательство «Наука».
Главная редакция
физико-математической
литературы, 1982

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Введение. ИЗ ПРОШЛОГО В БУДУЩЕЕ	7
Глава I. ЖИДКОСТЬ С ОПТИЧЕСКОЙ ОСЬЮ	10
§ 1. Что такое жидкость?	10
§ 2. Занимательные модели молекул	16
§ 3. Какую роль играет оптическая ось?	21
§ 4. Шесть чудес света	23
§ 5. Где взять поляризатор?	38
§ 6. Седьмое чудо света	41
§ 7. От дефектов ориентации к названию «нематик»	45
Глава II. ЭФФЕКТ ФРЕДЕРИКСА	51
§ 1. И все-таки нематик упругий	51
§ 2. Что продлевает поле с оптической осью?	57
§ 3. Как работают циферблаты электронных часов?	64
§ 4. «Хозяева» и «гости»	66
§ 5. Жидкие кристаллы и голография	74
§ 6. Карманный телевизор	79
Глава III. СЮРПРИЗЫ КОНВЕКЦИИ	85
§ 1. Связана ли скорость течения с оптической осью?	85
§ 2. Ориентационный орнамент	87
§ 3. Электрический ток взбалтывает нематик	94
§ 4. Модель тумана и управляемые шторы	96
Глава IV. СПИРАЛЬНЫЕ МОЛЕКУЛЫ	102
§ 1. Правые и левые молекулы	103
§ 2. Об искусности химика	107
§ 3. Твист-структура и шаг спирали	115
§ 4. Гигантская оптическая активность	122
§ 5. Избирательное отражение света	126
§ 6. В тепле синее, на холоде краснеет	132
§ 7. Тонкопленочный тепловизор	135
Глава V. ОТЧАСТИ ТВЕРДЫЕ ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ	140
§ 1. Твердый кристалл трехмерен	140
§ 2. Твердая решетка из жидких нитей	146
§ 3. Самый лучший кокс и сверхпрочные волокна	151
§ 4. Кристалл, твердый только в одном направлении	153
§ 5. Сметтики... Сколько их?	160

§ 6. Оптические антиподы в смектиках	166
§ 7. Плавление при охлаждении!	170
§ 8. Лазерное перо и ультразвуковой «рентген»	174
Г л а в а VI. ЭКСКУРСИЯ В БИОЛОГИЮ	179
§ 1. Общие рассуждения	179
§ 2. Вода и длиннохвостые молекулы	180
§ 3. Клетки и мембраны	185
§ 4. Жидкие кристаллы и поведение мембран	189
§ 5. Из научной фантастики	197
§ 6. Когда хороший кристалл — плохой симптом	199
§ 7. Какие новости в эволюции?	201
Заключение	203

ПРЕДИСЛОВИЕ

Мы решили вдвоем писать одну книгу, книгу о жидких кристаллах. Об этих необычных веществах, конечно, слышали почти все, они используются в самых современных электронных приборах, о них пишут даже в газетах, не говоря уже о журналах и книгах.

Наука о жидких кристаллах — одна из самых молодых и наиболее трудных областей физики. Трудности обусловлены сложностью молекул, образующих эти вещества. Для объяснения свойств жидких кристаллов необходимо привлекать не только теорию обычных жидкостей, достаточно сложную саму по себе, но также и науки о твердых кристаллах, например, кристаллографию и физику твердого тела.

Рассказать о жидких кристаллах без математических формул, наглядно и по возможности образно — вот цель, которую ставили перед собой авторы. Задача эта не из легких: научную строгость мы хотели в разумных пределах сочетать с примерами и аналогиями из окружающей нас живой и неживой природы. Хотелось также познакомить читателя с многочисленными применениями жидких кристаллов, но так, чтобы это не увело его слишком далеко от темы.

Неустанно критикуя друг друга, мы должны были написать книжку, доступную для широкого читателя и прежде всего — школьников старших классов. При этом мы пытались осветить широкий круг проблем, включающий строение разнообразных жидких кристаллов (в том числе и самых модных), многочисленные эффекты

их взаимодействия с внешними полями, а также приложения к технике и биологии.

Надеемся, что наш труд не окажется бесполезным и книжка привлечет кого-то из молодежи к новой захватывающей области науки, какой является физика жидких кристаллов.

Авторы выражают благодарность Ю. Г. Магаковой и И. И. Гориной за содействие при изготовлении цветных фотографий, а также Л. А. Авдеевой за помощь при изготовлении рисунков.

*С. А. Пикин
Л. М. Блинов*

ИЗ ПРОШЛОГО В БУДУЩЕЕ

Жидким кристаллам не повезло. Хотя их открытие совпало с моментом, когда закладывался фундамент здания современной физики, но только сейчас, приподнимая это здание за угол, пытаются поставить жидкие кристаллы на свое законное место. А место им — именно в фундаменте. Ведь за всю историю, с глубокой древности до наших дней, человеку не удавалось выйти за пределы трех понятий, описывающих, как казалось, все состояния материи: газ, жидкость, твердое тело.

Человеку по своей природе трудно разглядеть внутреннее противоречия в том или ином понятии. Ему гораздо легче принять решение типа «или то, или другое», чем «и то, и это». Заслуга великого немецкого философа Гегеля заключалась как раз в том, что он усмотрел главный принцип развития в единстве и борьбе противоположных начал. Но и спустя столетие человек с большим трудом признал, что электрон — это частица и волна одновременно, что масса и энергия едины, что свойства кристалла и жидкости могут совместиться в одном веществе — жидком кристалле.

Прошло примерно двадцать лет с момента, когда в 1888 г. австрийский ботаник Ф. Рейнитцер и немецкий кристаллограф Ф. Леман описали необычные свойства жидких кристаллов *), прежде чем ученые начали осознавать, что открыто новое, четвертое состояние вещества. Действительно, вещества эти обладали текучестью, как обычные жидкости, и в то же время их оптические свойства были поразительно похожи на свойства кристаллов. Оказалось, что порядок расположения атомов, характерный для кристаллов, может быть не полным и что вообще

*) История открытия жидких кристаллов увлекательно рассказана в книге А. С. Сониной. Кентавры природы.— М.: Атомиздат, 1980,

может быть несколько разных видов порядка (например, один порядок в ориентации молекул, а другой — в расположении их центров масс). А это означает, что может быть даже и не один, а несколько типов промежуточных состояний. Теперь, наверное, никто не удивится, если будет обнаружено состояние, промежуточное между газом и жидкостью; во всяком случае к понятию «газообразной пленки» прибегают при обсуждении свойств жидких слоев вещества толщиной в одну молекулу.

В начале нашего бурного века Д. Форлендер в университетском городке Галле (Германия) со своими тридцатью аспирантами изготовил несколько сотен новых жидких кристаллов. Уже никто не сомневается в их реальности, и физики, обычно с большим опасением относящиеся к сложным химическим соединениям, охотно берутся за их исследования.

Ж. Фридель во Франции предлагает первую классификацию жидких кристаллов, голландец С. Озеен и чех Х. Цохер создают теорию упругости, а В. К. Фредерикс и В. Н. Цветков в СССР в 30-х годах впервые исследуют их необычные электрические и оптические свойства.

Успехи атомной физики, физики полупроводников и химии полимеров затмили на некоторое время казавшиеся скромными и академическими исследования жидких кристаллов. Вплоть до 60-х годов ими занимаются только энтузиасты-одиночки. А тем временем бурно развивается электроника. Идет процесс микроминиатюризации приборов: от электронных ламп к транзисторам, затем к интегральным схемам, и, наконец, к большим интегральным схемам (БИСам). Уменьшаются потребляемые мощности, уменьшаются источники питания. И вдруг оказывается, что есть все, кроме экономичного малогабаритного устройства, способного передать информацию от электронной схемы к человеку. Дело в том, что телевизионная трубка слишком громоздка, полупроводниковые диоды, излучающие свет, потребляют большие токи и т. д.

И тогда вспоминают о жидких кристаллах. В США заново открывают эффекты, ранее обнаруженные В. К. Фредериксом и В. Н. Цветковым. Начинается настоящий бум.

Вместе с появлением электронных приборов с жидкокристаллическими табло и циферблатами (часы, калькуляторы, электронные словари-переводчики, плоские

телевизионные экраны и т. д.) наступил ренессанс в физике и химии жидких кристаллов. Активно исследуется их строение, во всех аспектах изучается текучесть, создаются новые вещества, в которых открывается множество необычных явлений, вызванных действием внешних сил (электрического поля, температуры и т. д.).

Трудами ученых разных специальностей и разных стран (особенно СССР, Франции, США, Англии) наука о жидких кристаллах быстро развилась и приобрела ясные и строгие очертания, свое собственное лицо.

И тут к длинной очереди из одного ботаника, нескольких кристаллографов, десятков химиков, сотни физиков и тысячи электронщиков подходит человек и спрашивает: «Кто последний?». Оказывается — это биолог!

Даже в наиболее полных современных курсах биологии о жидких кристаллах не сказано ни одного слова. А тем временем в умах наиболее проницательных людей постепенно «выкристаллизовывается» идея о том, что сущность живого неразрывно связана с упорядоченным строением клеток живых организмов. Но ведь основным компонентом живого организма является вода, а упорядоченные растворы — это и есть жидкие кристаллы. И вот уже делаются попытки объяснить фундаментальные процессы, проходящие в живом организме, с помощью именно тех подходов, которые выработала физика жидких кристаллов. Избирательный перенос различных веществ через границу живой клетки — мембрану, распространение возбуждения по нервным тканям, болезнь и старение клеток, а, значит, и организма в целом, механизм синтеза самовоспроизводящихся молекул — вот некоторые из биологических проблем, в решении которых могут помочь исследования жидких кристаллов. Высказываются и вполне обоснованные доводы о существенной роли жидкокристаллического состояния в эволюции жизни на Земле.

Наше глубокое убеждение состоит в том, что как в науке о жидких кристаллах, так и в технических аспектах, связанных с их применением, мы стоим лишь в начале пути. И камень, случайно выпавший из фундамента физики, будет поставлен на свое место.

ЖИДКОСТЬ С ОПТИЧЕСКОЙ ОСЬЮ

Все это было тайной для людей
И стало им открыто лишь поздней.

Гете. «Фауст»

§ 1. Что такое жидкость?

Вода нас изумляет с детства. С первых купелей человек не перестает поражаться свойствам жидкости, легко текущей между пальцев и причиняющей боль при резком шлепке по водной поверхности. Мы замороженно смотрим на весеннюю капель и потоки дождевой воды с замысловатыми завихрениями и водоворотами, на монументальные струи гигантских водопадов и переливы света, цвета и теней в лесном ручье, на голубое сияние моря и сверкающие горошины росы. Все эти явления связаны с такими свойствами жидкости, как текучесть и вязкость, поверхностное натяжение и сцепление с твердыми телами, способность отражать, преломлять и рассеивать свет. Такими же свойствами обладают и объекты, давшие название этой книге, хотя надо сразу сказать, что жидкие кристаллы имеют ряд особенностей, не присущих обычным жидкостям. Для понимания особенностей жидких кристаллов и надо вспомнить, что такое вообще жидкость.

Строение, силы взаимодействия молекул, поверхностное натяжение. Несмотря на кажущуюся простоту и доступность, жидкое состояние еще не изучено так полно и глубоко, как нам хотелось бы, по крайней мере так, как исследованы твердые кристаллы и разреженные газы. И дело здесь в том, что в жидкости составляющие ее атомы и молекулы довольно сильно взаимодействуют между собой (в отличие от газа) и в то же время могут свободно перемещаться относительно друг друга, не оставаясь на одном месте (в отличие от кристалла).

В жидкости атомы и молекулы не могут разойтись на сколь угодно большое расстояние друг от друга. Например вода, налитая в кастрюлю, не исчезает без каких-

либо особых причин. Это означает, что между молекулами воды действуют значительные силы притяжения. Эти силы, правда, не так велики, как в кристалле, где они заставляют атомы и молекулы занимать строго определенные места в кристаллической решетке. Нагревание приводит к увеличению подвижности молекул. При высокой температуре они начинают метаться настолько быстро, что силы притяжения со стороны соседей уже не могут удерживать молекулы в ограниченном объеме, и жидкость превращается в газ.

Внутри сосуда с жидкостью в среднем имеется баланс сил (рис. 1). Другое дело — на поверхности. Здесь равнодействующая сил притяжения направлена внутрь, и поэтому поверхность у жидкости не исчезает. Поверхностный слой играет роль упругой пленки, которая в условиях равновесия имеет вполне определенную площадь. Всякое искусственное увеличение этой площади — растяжение пленки — приводит в действие упругие силы, которые стремятся сократить поверхность, т. е. восстановить ее равновесную площадь.

В то же время хорошо известно из опыта, что жидкость сильно сопротивляется сжатию. Не так-то просто сдвинуть поршнем воду в насосе, если все отверстия закрыты. Таким образом, молекулы сопротивляются более тесному сближению. Значит, они отталкивают друг друга, если оказываются на небольшом расстоянии, т. е., другими словами, молекулы не могут проникать друг в друга.

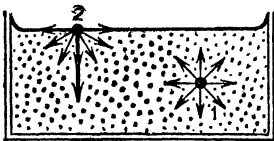


Рис. 1. Равнодействующая сил притяжения для молекул 1 внутри объема равна нулю, а для молекул 2 на поверхности направлена внутрь жидкости.

Сцепление с твердыми телами. Важен вопрос о том, как твердая поверхность взаимодействует с наружным слоем молекул жидкости. На молекулы, находящиеся на твердой поверхности, действуют две силы притяжения: одна — со стороны жидкости, другая — со стороны твердого тела. Если молекулы жидкости, находящиеся вне наружного слоя, притягивают сильнее, то поверхность капли стремится как можно меньше соприкасаться с твердой поверхностью (рис. 2, а). Это пример несмачивания и, в частности, водоотталкивания. Если сильнее притягивает твердый материал, жидкость стремится занять как

можно больше места на твердой поверхности (рис. 2, б). Это пример смачивания. В случае смачивания жидкость в узкой щели имеет вогнутую поверхность, а при несмачивании — выпуклую. Отсюда следует, что смачивающая жидкость должна втягиваться в капилляр — узкую щель

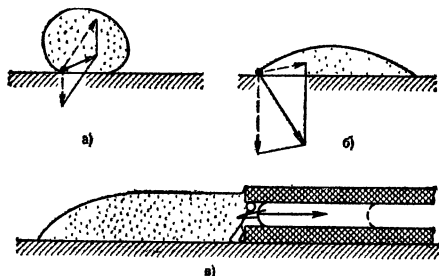


Рис. 2. Равнодействующая сил для молекулы жидкости, которая находится на краю капли, соприкасающейся с твердой поверхностью. а) Смачивания нет; б) смачивание есть; в) капля жидкости втягивается в узкую щель между твердыми пластинками в случае смачивания

между двумя твердыми пластинами. Это вызвано тем, что упругие силы изогнутой пленки стремятся сократить ее поверхность, т. е. центральная часть пленки должна продвинуться в щель. Но молекулы жидкости в точках соприкосновения со стенками вновь образуют вогнутую поверхность, стремясь как можно больше соприкаться с твердым материалом, и т. д. (рис. 2, в). В этом случае говорят, что жидкость движется под действием капиллярных сил.

Вязкое течение, вихревое движение. Обычно молекулы жидкости, попавшие на твердую поверхность, накрепко прикрепляются к ней, так что оторвать их почти невозможно. Поэтому, если сдвигать верхнюю стеклянную пластинку параллельно нижней (неподвижной) со скоростью v (рис. 3), то скорость самого верхнего слоя жидкости будет равна v , а самого нижнего — нулю. На промежуточной глубине скорость имеет значение, промежуточное между 0 и v , как показано на рисунке. Жидкость течет как бы слоями, каждый из которых — со своей скоростью. Разная скорость слоев возникает из-за трения между ними, которое в жидкости называется вязкостью. Собственно говоря, вязкость описывает силу, которая возникает только при движении слоев жидкости относительно друг друга. Остановка пластины немедлен-

но приводит к прекращению действия этой силы в жидкости. Этим жидкость отличается от кристалла, в котором, как в пружине, после снятия нагрузки продолжает действовать упругая сила, возвращающая атомы на место. Между прочим, жидкость может показаться твердой и упругой, если воздействовать на нее очень быстро (резко шлепнуть ладонью, бросить плоский камешек почти параллельно поверхности воды). Молекулы за время такого воздействия отчасти сохраняют свои мгновенные расположения в пространстве, и жидкость ведет себя в эти мгновения почти как твердое тело.

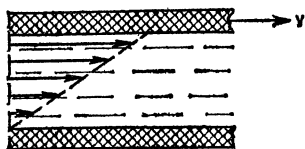


Рис. 3. Течение вязкой жидкости: распределение скорости по толщине слоя.

Если медленно тянуть верхнюю пластину с постоянной скоростью (рис. 4), устанавливается плавное слоевое течение. При этом молекулы постоянно перескакивают из слоя в слой, быстрые молекулы замедляются, медленные — ускоряются, т. е. происходит обмен импульсами движения, что и создает механизм трения. Когда на пути такого потока встречается какое-нибудь препятствие (например, цилиндр на рис. 4, а), то слои

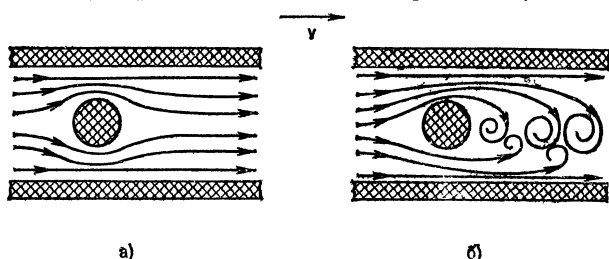


Рис. 4. Обтекание препятствия потоком жидкости при разной скорости.

а) Медленное течение, б) образование вихрей при быстром течении.

плавно обтекают его. Но стоит заметно увеличить скорость v , как такое спокойное течение разрушается, и за цилиндром возникают завихренности и водовороты (рис. 4, б). Это явление мы часто наблюдаем в бурных ручьях после мощного ливня. Причина его состоит в том, что при быстром течении на расстояниях, сравнимых с размером препятствия, молекулы не успевают

перескакивать из слоя в слой так, чтобы обеспечить налаженный механизм трения и плавно замедлить скорость слоев. В этом случае вязкость жидкости не столь существенна, слои ломаются, перемешиваются, словом, начинается вихревое движение жидкости. Этот эффект важен для работы многих машин и, в частности, для движения подводных лодок, которым он сильно мешает вследствие большой затраты энергии и образующегося шума.

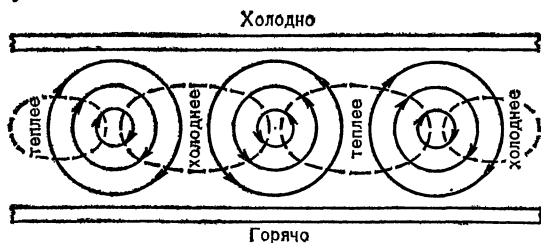


Рис. 5. Медленное конвективное течение в слое жидкости.

Конвективные явления. Не обязательно для всех этих явлений, чтобы на пути потока жидкости встретилось твердое препятствие. Бывают случаи, когда в чистой жидкости, первоначально неподвижной, возникает сначала плавное, а затем и вихревое течение. Например, это происходит при конвекции. Конвекция — очень распространенное явление, которое наблюдается, если подогреть слой жидкости снизу, а верхний слой оставить холодным. При этом более холодные, а значит, более плотные, верхние слои стремятся опуститься вниз, в то время как более теплые, т. е. менее плотные, нижние слои устремляются вверх под действием сил Архимеда (рис. 5). Плавный процесс движения начинается, когда выталкивающие силы Архимеда сравниваются с силами трения и превзойдут их. Естественно, что слоистое течение между пластинами не может в одной точке начаться, а в другой оборваться. Оно должно быть замкнутым вследствие закона сохранения массы, т. е. иметь вид каких-то слоеных ячеек (рис. 5). На одном краю ячейки жидкость теплее, а на другом — холоднее, чем было бы в отсутствие движения. Но тогда по соседству с данной ячейкой равноправно должны появиться и другие такие же. Так и получается на опыте, что вдоль пластинки жидкость разбивается на подобные конвективные ячейки. Чем больше

разница температур нижних и верхних слоев, тем быстрее течение в ячейках, а при очень большой скорости ячейки разрушаются и образуются вихри.

Конвективные потоки наблюдаются не только на лабораторном столе, но и в огромных масштабах — в океанах воды и воздуха. Циркуляция громадных масс воды и воздуха, вызванная неодинаковым нагревом суши, моря и атмосферы, фактически обуславливает все капризы погоды, штормы и тайфуны, многие сезонные погодные явления на разных континентах. Конвективные ячейки иногда можно наблюдать в иллюминатор самолета, летящего над грядой облаков: видны почти правильные шестиугольники со сторонами в несколько километров (рис. 6). Это явление связано с более высокой температурой Земли и нижнего слоя облаков по сравнению с температурой воздуха на большой высоте. Форма ячеек при взгляде сверху объясняется тем, что в плоскости облачного слоя все направления равноправны, и поэтому конфигурация ячейки должна быть симметричной. Шестиугольники — как раз такие симметричные фигуры, которые можно вплотную подогнать одну к другой *). То же наблюдается и в миниатюре в тонком слое жидкости между двумя стеклянными пластинками. При этом длина стороны шестиугольника примерно равна толщине слоя, поскольку никакого другого характерного расстояния в этом слое нет.

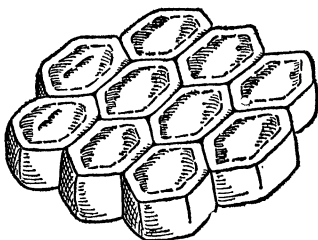


Рис. 6. Шестиугольные конвективные ячейки можно наблюдать в слое облаков.

Мы вспомнили, пожалуй, самые важные свойства обычных жидкостей (и плотных газов), присущие, как будет видно, и жидким кристаллам. Однако эти свойства сыграют в жидких кристаллах новыми красками, поскольку они будут сочетаться со свойствами твердых кристаллов. Чтобы увидеть это, надо познакомиться с особенностями устройства и взаимодействия молекул.

*) Эти соображения о симметрии и плотной упаковке ячеек имеют строгое обоснование благодаря расчетам энергетической выгоды той или иной системы конвективных ячеек.

§ 2. Занимательные модели молекул

В рассказе о жидкости говорилось, что ее молекулы только в среднем находятся на каком-то характерном расстоянии друг от друга. Ответ на вопрос, как взаимодействуют между собой молекулы и чему равно среднее расстояние a между ними, дает квантовая меха-

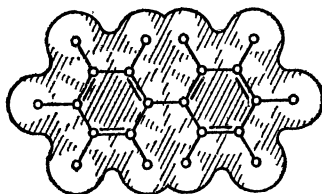


Рис. 7. Электронные облака.

Модель молекулы (показаны расположение ядер и связи между атомами).

ника. Эта наука показывает, что, действительно, между молекулами на больших расстояниях возникают силы притяжения, а на очень малых расстояниях — силы отталкивания. На расстоянии a , которое условно можно назвать размером молекул, силы притяжения и отталкивания как раз уравниваются.

Мы знаем, что атом состоит из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженного облака электронов, окружающего ядро. Поэтому молекулы, составленные из атомов, представляют собой довольно ажурную конструкцию из ядер, укутанную электронными облаками (рис. 7). Если молекулы сближаются, то электронные облака соприкасаются первыми и начинают энергично отталкивать друг друга *). Силы отталкивания быстро ослабевают при удалении молекул друг от друга. Атом в целом нейтрален: отрицательно заряженное облако в точности компенсирует положительный заряд ядра. Поэтому вопрос о силе взаимодействия атомов или молекул, которые сами по себе не являются электрически заряженными, усложняется в случае больших расстояний. Все же попытаемся разобраться в этом вопросе на примере атомов.

*) Такое отталкивание в основном обусловлено квантовыми эффектами.

Представим себе, что по какой-то случайной причине в первоначально нейтральном атоме произошло смещение отрицательно заряженного электронного облака относительно положительно заряженного ядра (рис. 8). Такая система эквивалентна двум зарядам противоположного

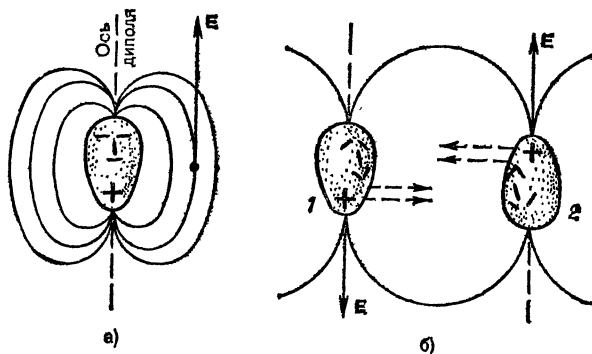


Рис. 8. Электрические диполи и силы притяжения.

а) Диполь атома создает электрическое поле, б) нейтральные атомы на большом расстоянии притягиваются

знака, расположенным на некотором расстоянии друг от друга. Тогда, как мы знаем, в окрестности двух зарядов, имеющих противоположные знаки, возникнет электрическое поле E , силовые линии которого изображены на рис. 8, а. Это поле быстро убывает при удалении от атома. Если в окрестности атома 1 находится нейтральный атом 2 (см. рис. 8, б), то электрическое поле, созданное атомом 1 в этом месте, должно сместить заряды электронов и ядра так, как изображено на рис. 8, б. В свою очередь такое относительное смещение зарядов в атоме 2 должно создавать электрическое поле в месте нахождения атома 1 и, таким образом, создавать соответствующее разделение зарядов в атоме 1.

Все это означает, что два нейтральных атома вызывают и поддерживают определенные значения электрического поля друг на друге и системы зарядов. Упомыная система зарядов противоположного знака, расположенных на определенном расстоянии друг от друга, называется электрическим диполем (буквально — имеющим два полюса). К чему же приводит образование диполей? Из рис. 8, б видно, что разноименно заряженные

части атома должны притягиваться друг к другу (соответствующие силы изображены пунктирными стрелками), а, значит, и атомы целиком должны притягивать друг друга. По тем же самым причинам и тому же механизму нейтральные молекулы должны притягивать друг друга за счет образования диполей.

При низкой температуре, когда тепловые толчки ослабевают, описанные силы притяжения и отталкивания выстраивают молекулы в геометрически четкие ряды и колонны — образуется кристалл. При умеренных температурах усиливающиеся тепловые толчки разваливают стройные шеренги молекул, но молекулы еще не могут в среднем далеко разойтись — это жидкость. Наконец, высокая температура не оставляет молекулам никаких шансов удержаться вместе — жидкость превращается в газ.

Интересно, что можно легко сделать наглядную механическую модель жидкости, насыпав в ящик стальные шарики стандартного размера. В этом случае силами, удерживающими шарики вместе, будут силы тяжести шариков и силы, действующие на них со стороны стенок ящика (упругая оболочка). Силы отталкивания теперь, естественно, связаны с твердой формой шариков. Тепловые толчки можно имитировать тряской ящика. Если ящик не трясти, то шарики образуют правильную решетку, а при заметной тряске начнут свободно перемещаться в любом направлении в пределах ящика. В жизни пример жидкого поведения массы почти твердых и довольно крупных шариков дают зыбучие пески. В таких песках песчинки — зерна округлой формы диаметром 0,1—1 мм — смачиваются водой подземных источников. Приобретенная зернами влажная оболочка не позволяет им слипаться, т. е. силы притяжения ослабевают. В результате зыбучие пески приобретают текучесть и, как известно, могут представлять опасность для сравнительно тяжелых объектов.

Так устроены обычные жидкости, состоящие из относительно простых молекул. Однако нас поджидает замечательное открытие, если молекулы имеют отнюдь не сферическую форму, а, скажем, очень вытянутую в одном направлении или очень уплощенную. В этих случаях атомы в молекулах располагаются в основном либо вдоль определенной линии (рис. 9, а), либо лежат в выделенной плоскости (рис. 9, б).

Ясно, что по описанным выше причинам большая часть атомов одной молекулы стремится оказаться вблизи атомов другой молекулы, так как только в этом случае силы притяжения и отталкивания молекул уравниваются. Если сблизились лишь два конца соседних молекул, а другие два конца удалены друг от друга, то силы притяжения заставят удаленные концы сблизиться, а силы от-

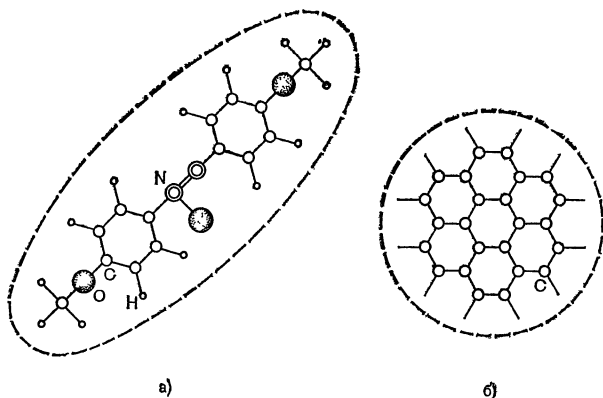


Рис. 9. Иногда молекулы имеют особую стержнеобразную (а) или дискообразную (б) форму.

талкивания не позволят молекулам проникнуть друг в друга. Но это означает, что выделенные оси (а) или плоскости (б) молекул должны быть параллельны друг другу. Несферичность формы молекул можно характеризовать вектором единичной длины e , который в случае (а) параллелен оси молекулы, а в случае (б) перпендикулярен плоскости молекулы.

Вот мы и подошли к понятию «жидкий кристалл». Жидким кристаллом называют жидкость описанных несферических молекул, которые не только удерживаются в среднем на некотором расстоянии a друг от друга, но и имеют векторы e , параллельные оси L . При этом расстояние a примерно равно толщине молекулы. Подчеркнем, что, хотя в таком состоянии оси или плоскости молекул оказываются параллельными (рис. 10), вещество все равно остается жидким. Центры масс молекул не образуют в данном случае какую-то периодическую решетку, как в кристалле, а располагаются хаотично в пространстве и могут в нем свободно перемещаться.

Разумеется, ориентация молекул в такой необычной жидкости подчиняется строгому порядку только при умеренной температуре, когда тепловые толчки не настолько сильны, чтобы разрушить этот ориентационный порядок. Сильное повышение температуры обязательно влечет за

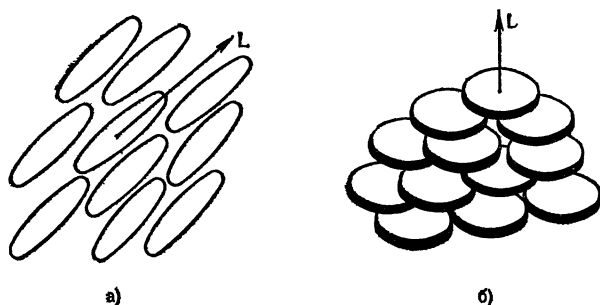


Рис. 10. Жидкие кристаллы можно приготовить из молекул-стержней (а) и молекул-дисков (б).

собой разрушение порядка в ориентации молекул, когда их хаотическое поступательное и вращательное движение становится преобладающим. Фактически при нагревании жидкий кристалл превращается в обычную жидкость.

Надо сказать, что существование того или иного жидкого состояния зависит не только от температуры. Большое значение имеет и то, сколько несферических молекул находится в единице объема, т. е. какова плотность вещества. Это особенно относится к молекулам, которые по какой-то причине слабо притягивают друг друга. Тогда надо выяснить, могут ли силы отталкивания молекул обеспечить ориентационный порядок при умеренных температурах. Оказывается, могут. Это видно из рис. 11, где изображены молекулы вытянутой формы, похожие на стержни.

Если молекул-стержней мало, т. е. плотность вещества мала, то они при различных поворотах имеют возможность не касаться друг друга своими электронными облаками. В данном случае молекулы, не мешая друг другу, поворачиваются в пространстве как угодно, и, значит, всякий порядок отсутствует. Для этого достаточно отвести каждой молекуле в жидкости объем — кубик с размером ребра, примерно равным длине молекулы l . В пре-

делах такого кубика объемом l^3 стержень действительно может быть ориентирован как угодно (рис. 11, а).

Поместим теперь то же число молекул в меньший объем, т. е. повысим плотность вещества. В результате на каждую молекулу станет приходиться объем, меньший чем l^3 . Как будут размещаться молекулы в этом случае? Естественно, они смогут разместиться в меньшем объ-

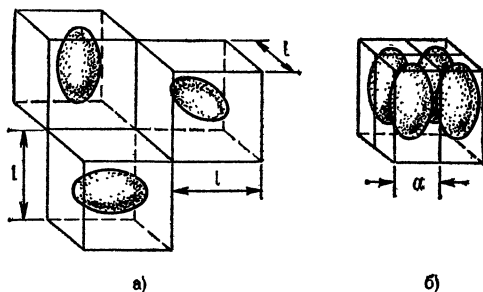


Рис. 11. При низкой плотности вещества ориентационный порядок отсутствует (а); порядок появляется при высокой плотности (б).

еме, если не будут поворачиваться как угодно, задевая друг друга, а займут более или менее параллельное положение. Если диаметр стержня a заметно меньше его длины l и на каждую молекулу приходится объем a^2l , то все молекулы должны быть ориентированы одинаково, так как только в этом случае они не задевают друг друга (рис. 11, б). Но так произойдет лишь в случае очень высокой плотности. При средней плотности, когда на каждую молекулу приходится объем, меньший чем l^3 , но больший чем a^2l , ориентационный порядок будет, конечно, неполным, но все-таки заметным. Еще раз обратим внимание на то, что этот порядок связан с тем, что молекулы из-за сильного отталкивания не могут проникать друг в друга.

§ 3. Какую роль играет оптическая ось?

Теперь мы видим, что в жидкости, состоящей из несферических молекул, при умеренных температурах и плотности вещества появляется особое направление — ось L . Вдоль такой оси ориентируются молекулы-стержни и перпендикулярно к ней — молекулы-диски. Такие же оси имеются и в некоторых твердых кристаллах, состоя-

ших, например, из продолговатых молекул. Это сходство между обычным кристаллом и удивительной жидкостью и привело к соединению двух старых понятий в одно новое — «жидкий кристалл». Наличие в жидкой среде и в кристаллической решетке выделенной оси придает материалам особые оптические свойства. Поэтому такую ось называют оптической. Таким образом, сходство жидкого кристалла с твердым кристаллом проявляется именно в оптических свойствах *).

Особенность материалов с оптическими осями состоит в том, что они эффективно, и часто эффектно, управляют световыми лучами, изменяя их интенсивность, цвет, направление. Скорость света зависит от направления его распространения по отношению к оптической оси. Белый луч света, падающий на кристалл под углом к оптической оси, на выходе из кристалла может оказаться окрашенным. В некоторых случаях хорошо видно даже невооруженным глазом, что луч света на выходе из такого материала раздваивается, т. е. образуются два луча, причем интенсивность обоих лучей можно изменять, поворачивая кристалл.

Сегодня кристаллы с оптическими осями играют важнейшую роль. Они применяются везде, где надо быстро и четко управлять световыми лучами, — от бытовых поляроидов до лазерных прицелов. Поляроиды пропускают только некоторые световые лучи. Они служат отличной защитой для глаз шоферов, операторов аэропортов, вахтенных на кораблях от слепящего света встречных автомобилей и солнца. Поляроиды-фильтры широко применяются в цветной фотографии.

Иногда бывает и так, что в обычных условиях кристалл не обладает оптической осью. Однако он может приобрести ее в результате какого-нибудь воздействия, например механического. Это обстоятельство теперь часто используют для выяснения того, насколько опасны деформации в сложных технических изделиях, подвергающихся изощренным нагрузкам. Вокруг места давления какого-нибудь зубца оптическая ось (или оси) в

*) Следует отметить, что некоторые твердые и жидкие кристаллы с более сложным строением имеют не одну, а две оптические оси. Есть и примеры твердых кристаллов, не обладающих оптическими осями: кристаллическая решетка в этом случае имеет кубическую симметрию.

материале приобретает причудливую ориентацию. Если все то же самое проделать с прозрачной моделью изделия, то свет, проходя сквозь нее, изменит интенсивность и направление в строгом соответствии с направлением оптических осей. В результате на экране возникает изображение узора сложных деформаций (рис. 12).



Рис. 12. Сложные деформации можно выявить при освещении прозрачной модели поляризованным светом.

И вот оказалось, что такими же оптическими осями и свойствами могут обладать особые жидкости, причем наблюдать перечисленные эффекты в жидких кристаллах гораздо проще, чем в твердых кристаллах. Это связано с тем, что в жидкости изменить ориентацию оптической оси намного легче, чем в твердом теле; ее можно буквально согнуть и скрутить.

Итак, мы узнали, что оптическая ось — это выделенное направление, с которым связаны особенности прохождения света сквозь кристалл. Чтобы познакомиться с этими особенностями, необходимо напомнить самые важные свойства света — этого чудесного явления природы.

§ 4. Шесть чудес света

Излучение света происходит, например, при быстром периодическом изменении расстояния между разноименными зарядами (рис. 8). Далее распространение света, рассматриваемое обычно как прохождение электромагнитных волн, можно представить себе следующим образом. Вблизи от зарядов с периодом, равным периоду колебаний зарядов, изменяется электрическое поле E . Поле E создает периодически меняющееся магнитное поле H , последнее порождает, уже на большем расстоянии от зарядов, переменное электрическое поле и т. д. Возникновение электрического поля при изменении магнитного поля — знакомое явление электромагнитной индукции, благодаря которому турбины электростанций вырабатывают электрический ток. При этом явлении вихреобразное поле E образует с полем H «левый винт» (рис. 13, а). При родственном явлении — порождении вихреобразного поля H при нарастании поля E — векторы E и H образуют «правый винт» (рис. 13, б). В том, что «винты» — разные, заключен глубокий

смысл. На рис. 14 изображен процесс распространения электромагнитных колебаний в разные стороны от оси колебаний диполя. В областях, расположенных симметрично по обе стороны от оси диполя, возникающие вихри поля E порождают вихри поля H , которые гасят магнитное поле там, где оно уже было (области 1), но запол-

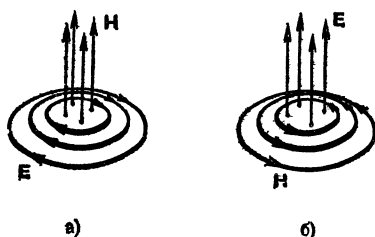


Рис. 13. Вихреобразное электромагнитное поле.

а) Вихрь электрического поля появляется при увеличении магнитного поля;
б) вихрь магнитного поля возникает при увеличении электрического поля.

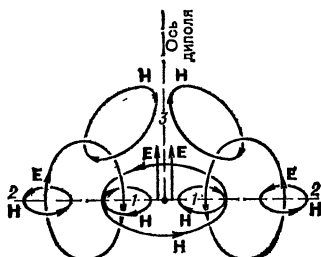


Рис. 14. Колеблющийся диполь излучает электромагнитное поле.

няют им новые области 2. Если бы вихри обоих полей имели одинаковые «винты», то магнитное поле, например, в области 1, могло бы только неограниченно увеличиваться со временем, что привело бы к нарушению закона сохранения энергии. Необходимо отметить, что векторы E и H перпендикулярны друг другу в любой точке пространства.

Поперечная поляризация. Электромагнитная волна обладает важным свойством поперечности, т. е. в ней векторы E и H колеблются перпендикулярно направлению распространения волны. Хочется немедленно привести аналогию. Вспомним красочный праздник открытия Олимпийских игр в Москве, когда спортсменки поднимали и опускали перед собой яркие обручи, стоя плечом к плечу в длинной цепочке. Каждая из них проделывала это с небольшим запаздыванием относительно своей соседки. В результате мы видели, как по цепочке бежит красивая поперечная волна.

Поперечность света можно объяснить следующим образом. Дело в том, что колеблющийся диполь не излучает волн вдоль своей оси. Из рис. 14 видно, что в области 3 на оси диполя вихри магнитного поля, порожденные по разные стороны от этой оси, полностью гасят друг дру-

га. Таким образом, волна не распространяется вдоль оси колебаний электрических зарядов. Но любое смещение зарядов \mathbf{u} всегда можно разложить на две составляющие: вдоль и поперек направления распространения волны (рис. 15). Теперь ясно, что только поперечная составляющая \mathbf{u} порождает волну в данном направлении.

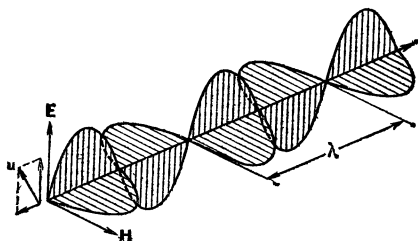


Рис. 15. В электромагнитной волне вклад в излучение дает только поперечная составляющая смещения зарядов \mathbf{u} .

А рис. 8 показывает, что в любом направлении, перпендикулярном диполю, поле ориентировано вдоль оси диполя. Значит, поле \mathbf{E} перпендикулярно направлению распространения волны. Соответственно вектор \mathbf{H} ориентирован в волне так, как показано на рис. 15.

Частота изменений электрического и магнитного полей в волне равна частоте колебаний диполя. Колебания полей бегут от диполя с конечной скоростью — скоростью света $c=300\,000$ км/с и достигают точки наблюдения тем позднее, чем дальше она находится. Расстояние, которое проходит волна за один период колебания зарядов T , составляет длину волны $\lambda=cT$ (рис. 15). Скорость света в вакууме не зависит от длины волны и частоты — это универсальная постоянная (мировая константа).

Поскольку основное физиологическое воздействие (на сетчатку глаза) оказывает именно электрическое поле, то в дальнейшем, говоря о свете, мы будем иметь в виду колебания вектора \mathbf{E} в электромагнитной волне. Наши глаза воспринимают волны различной частоты по-разному. Скажем, свет с частотой $4 \cdot 10^{14}$ колебаний в секунду мы ощущаем как красный, а с частотой $8 \cdot 10^{14}$ колебаний в секунду — как фиолетовый. В промежутке располагается вся шкала известных нам цветов.

В каждой волне, испущенной конкретной системой зарядов, вектор \mathbf{E} ориентирован в пространстве совершенно определенно (рис. 15). Каждая индивидуальная вол-

на, как говорят, линейно поляризована. Но в луче света, состоящем из множества волн, испущенных разными системами в разные моменты времени, обычно нет определенной поляризации. В таком луче все направления вектора \mathbf{E} совершенно равноправны. Такой свет называют неполяризованным или естественным. Для того чтобы свет сделать поляризованным, т. е. оставить в луче только волны с нужным направлением вектора \mathbf{E} , необходимо применять приборы, о которых мы расскажем в дальнейшем.

Фактически до сих пор мы говорили о распространении света в пустом пространстве — вакууме. А как световые волны проходят через среду, состоящую из атомов и молекул? Электрическое поле проходящей волны порождает в атомах и молекулах периодически изменяющиеся диполи. Но такие дипольные колебания, в свою очередь, приводят к излучению световой волны. Это означает, что в среде на самом деле распространяются как первичная волна, так и волны, излучаемые атомами и молекулами под действием поля первичной волны.

Первичная волна проходит среду насквозь, а вторичные волны распространяются от каждого атома или молекулы в любом направлении (кроме осей диполей). Какой же свет в результате видит наблюдатель? Фактически наблюдатель видит в любой точке пространства действие суммы векторов \mathbf{E} , порожденных в данной точке первичной и всеми вторичными волнами. При этом поле каждой волны в данной точке начинает действовать с вполне определенным запаздыванием — фазой, поскольку свет распространяется с конечной скоростью. Если продолжить аналогию с цепочками спортсменов, то результат действия многих волн в какой-то точке можно уподобить эффекту, который получится, когда все цепочки сходятся к одному человеку. Сигналы — поднятие обручей — приходят к нему по цепочкам с разным запаздыванием, зависящим от длины цепочки и момента подачи сигнала на другом ее конце. Наблюдатель в месте схождения цепочек должен мгновенно решать, что ему делать с обручем: поднять ли его над головой, опустить вниз (это максимальные отклонения, соответствующие максимальному значению поля или амплитуде), держать ли его прямо перед собой (поле равно нулю) или на какой-то другой высоте (промежуточные значения поля). Предположим пока, что он очень ловок и быстро складывает сигналы

всех цепочек в один общий — поднимает или опускает свой обруч на высоту, равную сумме сигналов от всех цепочек, пришедших в данный момент.

При очень большом числе цепочек, по которым сигналы подаются в самые разные, но вполне определенные моменты времени, наблюдатель скорее всего вообще ни разу не сдвинет обруч с места. Это произойдет потому, что среди множества сигналов, поступивших по цепочкам в любой момент времени, для каждой команды «поднять» почти наверняка найдется команда «опустить» на ту же высоту. Такие сигналы гасят друг друга, и поэтому наблюдатель никак не реагирует. И только подобрав цепочки по длине и моментам подачи сигналов специальным образом, мы можем добиться, чтобы команды «поднять» и «опустить» приходили по всем цепочкам одновременно. Тогда нашей спортсменке не позавидуешь: она должна поднимать свой обруч на громадную высоту, если таких цепочек очень большое число.

Эти примеры относятся к явлению *интерференции*. Как известно, интерференцией называют наложение волн, приводящее к установлению в каждой точке пространства постоянной амплитуды поля. Интерферировать могут и две волны — это простейший случай. Устойчивая, не меняющаяся во времени интерференционная картина получается только тогда, когда источники волн имеют одинаковую частоту, а фазы их колебаний не зависят от времени. Такие источники и волны называются когерентными.

В среде происходит интерференция первичной и всех вторичных электромагнитных волн, и соответствующую интерференционную картину должен видеть наблюдатель. Из многих опытов мы знаем, что луч света, который падает из воздуха на гладкую поверхность прозрачного тела, имеющего относительно большую плотность, испытывает *преломление* и *отражение* на границе двух сред. Сквозь тело проходит преломленный луч, а в воздухе, кроме падающего, имеется еще и отраженный луч. При этом направления всех трех лучей различны, если падающий луч не совпадает по направлению с нормалью к поверхности тела. Образование преломленного и отраженного лучей — результат интерференции первичных и вторичных волн.

Разберемся сначала в причинах преломления света. Частота колебаний в первичной и вторичной волнах од-

на и та же, так как вторичные излучатели совершают вынужденные колебания с частотой волны падающего света. Если среда состоит из одинаковых атомов-излучателей, образующих в пространстве четкий геометрический узор с фиксированными расстояниями один от другого, то в точке наблюдения поле каждой волны приобретет постоянную фазу. При громадном числе атомов и, следовательно, фаз поля в отдельных волнах приобретают самые разные значения, причем для всякого значения E почти всегда найдется и значение $-E$. Но это означает, что сумма таких полей почти всегда равна нулю. И только по определенному направлению в среде волны могут распространяться практически синхронно (в фазе), так что их амплитуды складываются. Это приводит к их взаимному усилению и возникновению нового — преломленного — луча света, не совпадающего с падающим. Фактически в данном случае мы не занимаемся кропотливым подбором цепочек для наблюдателя, а переставляем наблюдателя с места на место до тех пор, пока не найдем нужное направление по отношению к падающему лучу.

Существование преломленного луча означает, что в результате интерференции зависимость полного поля E от координат изменилась. Такое перераспределение электромагнитного поля фактически соответствует тому, что скорость света в среде v отличается от скорости света в вакууме c . Нужно подчеркнуть, что речь идет о скорости именно преломленного света, а не о скорости распространения колебаний от отдельного вторичного излучателя: последняя по-прежнему равна величине c . Это очень важное обстоятельство. Ясно, что, чем плотнее вещество, т. е. чем больше вторичных излучателей, тем сильнее эффекты интерференции. Следовательно, скорость света и преломление лучей должны зависеть от материала, причем в плотной среде лучи должны преломляться сильнее, чем в разреженной.

Эти рассуждения можно дополнить простой математической формулой, описывающей преломление света на границе двух сред с разной плотностью вещества. Пусть на плоскую поверхность стекла падает из вакуума волна под углом θ_0 к оси x (рис. 16), а преломленная волна в стекле распространяется под углом θ к той же оси. Напомним еще раз, что частота колебаний $1/T$ в падающей и преломленной волнах одна и та же и равна частоте изменения поля E в падающей волне. На пунктирных ли-

ниях векторы \mathbf{E} имеют в данный момент времени одно и то же значение, например максимальное. Расстояния между этими линиями и есть длины волн в вакууме и стекле: $\lambda_0 = cT$ и $\lambda = vT$. Но на самой поверхности расстояния a между максимумами волн должны быть одинаковыми для обеих сред, так как точки пересечения пунктирных линий с поверхностью принадлежат одновременно обеим средам. Поэтому получается, что $a = \lambda_0 / \sin \theta_0 = \lambda / \sin \theta$ или

$$\frac{\sin \theta_0}{\sin \theta} = \frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{c}{v} = n.$$

Это и есть закон преломления света, а n — показатель преломления света в стекле.

Чем плотнее среда, тем меньше скорость света v и, значит, тем больше показатель преломления лучей n .

Воздух тоже преломляет свет, хотя и слабо: показатель преломления воздуха близок к единице. Солнечные лучи, проходя через земную атмосферу, заметно искривляются в нижних (более плотных) слоях воздуха. В результате мы видим Солнце еще до того, как оно на самом деле взойдет над горизонтом (рис. 17, а). Прекрасны картины холодной и теплой поверхности моря, когда нижние слои воздуха оказываются более плотными (рис. 17, б) или менее плотными (рис. 17, в), чем верхние. Холодное море отодвигает горизонт и кажется огромной чашей, в которой плавают суда, при обычных условиях находящиеся вне поля нашего зрения. Напротив, теплое море сильно приближает горизонт, и кажется, что кривизна Земли увеличилась.

Все знают, насколько полезны линзы благодаря их способности собирать лучи света в одну точку. Это тоже пример преломления света, только на искривленной поверхности. Подобрав подходящую форму стеклянной поверхности, можно собирать параллельные лучи в одной точке — фокусе, расположенной на оси линзы (рис. 18). Герой романа Ж. Верна «Таинственный остров» смастерил линзу из стекол часов, налив между ними воду и склеив их.

Каждой длине волны λ соответствуют своя скорость света и свой показатель преломления n , причем n уве-

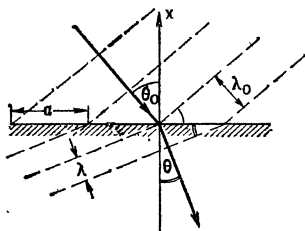


Рис. 16. Преломление света на границе двух сред.

личивается с уменьшением λ . Такова причина более сильного отклонения призмой синих лучей по сравнению с

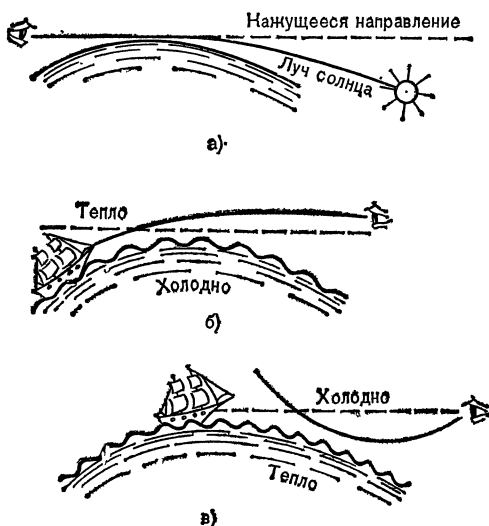


Рис. 17. Световые лучи искривляются в слоях воздуха, имеющих разную плотность.

а) Искривление солнечного луча в нижних слоях атмосферы; б) температура моря ниже температуры воздуха; в) температура моря выше температуры воздуха.

красными. Алмаз — один из самых твердых материалов, известных людям, — не только сильно преломляет свет, но и обладает большим различием показателей преломления для лучей разного цвета: $n=2,401$ для красного цвета и $n=2,465$ для фиолетовых лучей. Умелые старые мастера передавали из поколения в поколение секреты шлифовки алмазов для придания им особой формы. В результате ограненные кристаллы становились драгоценными камнями, поскольку приобретали свойство сильно разводить яркие лучи цветов радуги, составляющие белый свет.

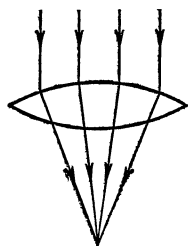


Рис. 18. Преломление световых лучей линзой.

Более простой и не менее привлекательный пример этого явления можно наблюдать в солнечный день в прозрачном ручье при слабом ветре, который гонит мелкие волны. Эти волны играют роль линз, собирающих

лучи света в виде ярких полос, которые движутся вместе с волнами (рис. 19). Полосы по краям окрашены, причем ближний к Солнцу край — голубой, а дальний — красный. Это тоже следствие более сильного преломления голубых лучей *). Подобную радужную окраску изображения дают и обычные линзы, однако в технике от нее стараются избавиться с помощью специальных оптических устройств.

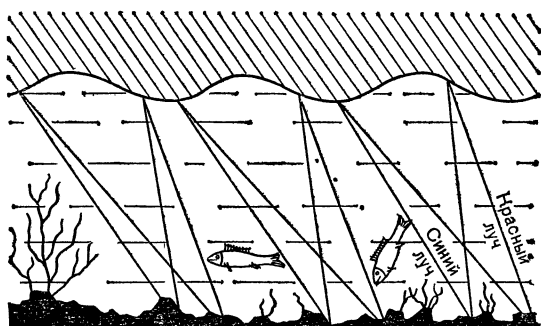


Рис. 19. Угол преломления света зависит от длины волны.

Отражение света — другое проявление интерференции вторичных волн. Луч света, отраженный от поверхности стекла, формируется всеми вторичными волнами, излученными атомами и молекулами стекла. Фактически мы опять имеем дело с изменением зависимости полного поля E от координат, но теперь — вне тела. Скорость света при этом не изменяется. В этом случае для иллюстрации пригоден рисунок типа 16, но теперь $v=c$ и $n=1$, так как падающий и отраженный лучи находятся в вакууме. Поэтому углы θ_0 и θ могут быть связаны только соотношением $\theta=180^\circ-\theta_0$ (рис. 20), поскольку $\sin\theta_0=\sin(180^\circ-\theta_0)$. Это и есть известный закон — «угол падения равен углу отражения».

В случае очень разреженной среды колебания зарядов почти не влияют на полное поле E , и отражение светового луча от такой среды практически отсутствует. Чем плотнее среда и идеальнее отражающая поверхность, тем легче наблюдать отраженные лучи и связанные с ними опти-

*) Миннарт М. Свет и цвет в природе. — М.: Физматгиз, 1959. — § 27.

ческие эффекты. В жизни мы часто сталкиваемся с интерференцией когерентных отраженных лучей. Вспомним, например, прекрасные цвета мыльных пузырей и пятен

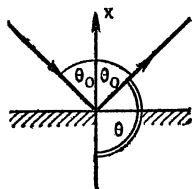
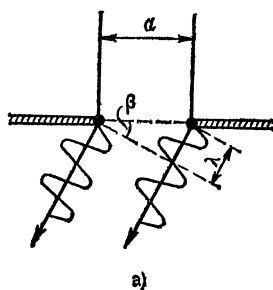


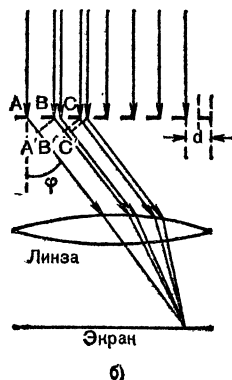
Рис. 20. Закон отражения света.

масла автомобилей, растекшегося тонким слоем на влажном темном асфальте. Сложение волн, отраженных от верхней и нижней поверхностей очень тонких пленок, дает эти цветные картины.

С интерференцией связано другое важное свойство света — *дифракция электромагнитных волн*. Дифракцией обычно называют искривление лучей у края непрозрачного объекта, что приводит к проникновению света в область геометрической тени. Другими словами, волны могут огибать препятствия. В сущности, здесь мы опять имеем дело со вторичными излучателями и вторичными волнами, интерферирующими



а)



б)

Рис. 21. Дифракция световых лучей.

а) Дифракция на малом препятствии; б) действие дифракционной решетки.

между собой. Но для наблюдения дифракции существенно одно условие — размеры препятствия и области вторичных излучателей должны быть сравнимы с длиной волны. При очень малых размерах такая область похожа на один точечный источник, который излучает волны практически по всем направлениям. Рассмотрим некоторые примеры.

На рис. 21, а изображены два когерентных излучателя вторичных волн, разделенных расстоянием a . Видно, что волны, испущенные под углом β к падающему лучу, усиливают друг друга, если одна отстаёт от другой ровно на длину волны λ , т. е. когда

$$a \sin \beta = \lambda.$$

В этом случае вторичные волны приходят в точку наблюдения в фазе, и их амплитуды складываются. Иногда для сведения волн в одну точку надо использовать собирающую линзу.

Обычно размер области a много больше длины волны λ , и, значит, угол β должен быть мал. Таким образом, интенсивность отклоненного луча особенно велика при малых углах отклонения. Вот почему так красивы силуэты прохожих и деревьев, освещенных фарами далекого автомобиля. То же можно сказать о наблюдении тысяч мельчайших царапин на оконном стекле, которые кажутся концентрически расположенными вокруг яркого источника света. В последнем случае глаз видит только такие препятствия — царапины, размеры и расположение которых удовлетворяют полученному условию. При этом царапины на окружности с центром, лежащим на оси пучка света от далекого источника, находятся в совершенно одинаковых условиях.

Если препятствий малых размеров много и все они одинаковы и расположены на одном и том же расстоянии друг от друга, то мы получаем прекрасный оптический прибор — дифракционную решетку. Часто такая решетка представляет собой ряд параллельных узких щелей, разделенных непрозрачными полосками. Суммарная ширина d прозрачной щели и непрозрачного промежутка называется периодом дифракционной решетки (рис. 21, б).

При падении на такую решетку плоской световой волны все вторичные источники в щелях начинают излучать в фазе и являются когерентными. Вторичные волны распространяются по всем направлениям, и важно выяснить, по каким направлениям эти волны усиливают друг друга. Для волн, распространяющихся от краев соседних щелей под углом φ к падающему лучу, разность хода равна длине отрезка AA' (рис. 21, б). Если на этом отрезке укладывается целое число длин волн m , т. е. $AA' = m\lambda$, то волны от всех щелей будут

находиться в фазе, усиливая друг друга, поскольку

$$AA' = BB' = CC'$$

и т. д. Из прямоугольного треугольника $AA'B$ видно, что в этом случае

$$d \sin \varphi = m\lambda.$$

Следовательно, под такими углами φ будут наблюдаться максимумы интенсивности света. Обычно за решеткой помещается собирающая линза, которая фокусирует волны, идущие параллельно, а за линзой — экран, расположенный в фокальной плоскости линзы.

Дифракционная решетка — очень ценный прибор, так как она позволяет с большой точностью измерять длины волн по известным значениям d и φ . Так как положение максимумов зависит от длины волны, то решетка разлагает белый свет в спектр при каждом значении m .

В дальнейшем мы поговорим подробнее о практической пользе дифракционных решеток. Естественную дифракционную решетку составляют мириады дождевых капель, которые отражают и преломляют солнечные лучи, вызывают их интерференцию и дифракцию, что и создает великолепное сияние радуги.

Рассеяние света. Это явление принципиально отличается от обсуждавшихся выше тем, что его причиной является некогерентность вторичных источников света. Собственно говоря, рассеяние света — это результат сложения вторичных волн, распространяющихся по всем направлениям и действующих в точке наблюдения несогласованно (некогерентно). В средах с относительно большой плотностью, особенно в твердых телах, вторичные излучатели занимают более или менее фиксированные места и в значительной мере являются когерентными, т. е. излучают волны с фазами, почти не зависящими от времени. Однако в жидкости, где порядок в расположении молекул сохраняется недолго, когерентность источников не является полной. Когерентность практически отсутствует в разреженном газе, где вторичные излучатели — молекулы — действуют почти независимо друг от друга, в разные моменты времени и с различными частотами. В этом случае нельзя сказать, что в точку наблюдения за любой отрезок времени приходят волны с постоянной фазой. Запаздывания — фазы — могут ос-

таваться постоянными только в течение короткого времени. Оно может быть меньше времени, за которое обычный прибор воспринимает действие полного электрического поля. Например, глаз воспринимает действие света за 0,04 с *).

Итак, если время реакции прибора больше времени синхронного действия вторичных волн, то прибор регистрирует лишь рассеянный свет. Поскольку волны от каждого источника распространяются по любому направлению, мы можем наблюдать рассеянный свет в любой точке прозрачной среды независимо от направления падающего луча. Между прочим, именно благодаря этому обстоятельству можно увидеть откуда-нибудь сбоку падающий, преломленный и отраженный лучи. Например, мы видим тонкие лучи лазеров вследствие их частичного рассеяния на пылинках или частицах табачного дыма в воздухе. Рассеянный свет бывает очень слабым, например в твердом теле, и чтобы его «заметить», нужны очень чувствительные приборы. Таким образом, для оценки когерентности света важна быстрая реакция прибора, а для регистрации рассеянного света важна чувствительность прибора.

Любой прибор и глаз, в частности, судит о свете по его интенсивности. Впечатление об интенсивности в конечном счете определяется той энергией, которую свет затрачивает на работу по перемещению электронов в приборе. Собственно говоря, здесь мы опять имеем дело с возникновением диполей под действием поля. Чем больше поле E , тем сильнее смещается электронное облако в атоме, т. е. смещение электронов пропорционально полю. Но работа, производимая светом, равна силе, с которой поле E действует на заряд, умноженной на путь, пройденный электроном. Поскольку сила, действующая на заряд в электрическом поле, пропорциональна величине поля, так же как и смещение электрона, то сама работа пропорциональна величине поля в квадрате. Таким образом, мы оцениваем интенсивность света по величине E^2 .

Это очень важно, так как величина E^2 не зависит от направления поля E . За время реакции любого прибора и,

*) Только в случае очень специальных источников света — лазеров — от приборов не нужно требовать бысродействия: все атомы лазера излучают одновременно, и синхронность волн может не нарушаться.

тем более, глаза поле в электромагнитной волне колоссальное число раз меняет свое направление (примерно $5 \cdot 10^{14}$ раз в секунду). Поэтому наш прибор просто ничего не зарегистрировал бы, если бы он судил о свете по величине E : для него среднее значение E было бы равно нулю. Но, к счастью, дело обстоит иначе. Фактически приборы регистрируют за время реакции средние значения полного электрического поля E , возведенного в квадрат. Значит, главную роль в месте нахождения прибора играет квадрат самого большого значения, т. е. амплитуды полного поля. В случае строго согласованного действия излучателей в среде, когда все они остаются на своих местах, возможна полная синхронизация световых волн. Это означает, например, что в точку наблюдения все волны приходят в фазе, и их амплитуды складываются. При этом амплитуда полного поля равна сумме амплитуд N полей отдельных волн. А интенсивность света в точке наблюдения будет в N^2 раз больше интенсивности отдельной волны.

Если атомы или молекулы не стоят на месте и не связаны прочно друг с другом силами взаимодействия, согласованность в излучении света ими нарушается. В какой-то момент полное поле E может стать равным сумме N полей отдельных волн, когда их фазы примут подходящие значения. Но, поскольку фазы быстро изменяются со временем, синхронность волн быстро исчезнет. Если синхронность пропадает много раз за время реакции наблюдателя, то он воспринимает рассеянные световые волны совершенно независимо и просто суммирует интенсивности отдельных волн. В случае N волн общая интенсивность только в N раз больше интенсивности отдельной волны. Часто по этой причине рассеянный свет и оказывается слабым.

В прозрачных кристаллах при низкой температуре атомы занимают жесткие места в решетках и почти не смещаются со своих позиций. В этих условиях достигается почти полная согласованность вторичных волн, рассеяние света практически отсутствует, но по особому направлению идет преломленный луч света. В очень разреженном газе согласованность вторичных волн отсутствует, преломление света тоже практически отсутствует, и поэтому свет полностью рассеивается. В жидкостях и плотных газах имеется частичная согласованность и синхронизация вторичных волн, поэтому здесь проис-

ходят как преломление, так и рассеяние света, причем последнее обладает интересными особенностями.

В жидкостях и газах, где молекулы движутся хаотически, только среднее расстояние между молекулами остается неизменным при данной температуре. В разные моменты времени в различных местах молекулы под действием тепловых толчков и сил межмолекулярного взаимодействия образуют области, которые немного от-

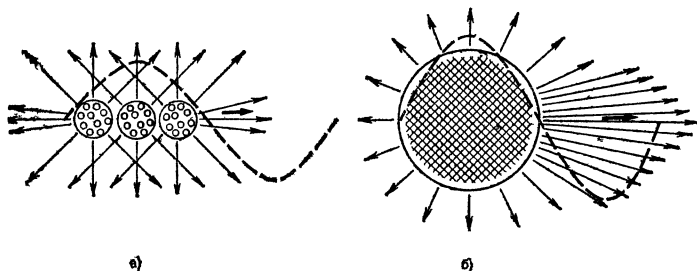


Рис. 22. Рассеяние света на зернах-сгустках молекул (пунктиром обозначена падающая волна).

а) Рассеяние во все стороны малыми зернами; б) направленное рассеяние крупным зерном.

личаются по плотности от ее среднего значения. Эти области существуют очень короткое время и имеют небольшие размеры, зависящие от температуры. Однако за время своего существования они успевают внести дополнительный вклад в рассеяние света. Действительно, предположим, что образовался «сгусток», в котором молекулы находятся на более близком расстоянии друг от друга и связаны между собой более прочно. При прохождении световой волны через такую область молекулы излучают вторичные волны практически в фазе, если длина волны заметно больше размера сгустка (рис. 22). Это приводит к более интенсивному рассеянию света, чем в случае разреженной области, где молекулы излучают вторичные волны более независимо. Сгустки можно рассматривать как эффективные вторичные излучатели.

Рассеяние света подобными временными сгустками зависит от длины волны. Например, длинные волны (красный цвет) рассеиваются слабее, чем короткие (синий цвет). Это вызвано тем, что на большой длине волны укладывается много сгустков, которые образуются

и исчезают независимо друг от друга и, значит, излучают свет со случайными фазами (рис. 22, а). Для более коротких волн количество независимых областей становится меньше и, соответственно, уменьшается число случайных фаз. Поэтому чистый воздух, в котором размеры сгустков молекул очень малы по сравнению с длинами волн, рассеивает сильнее всего короткие волны солнечного света, что и придает небу ярко-голубой цвет.

Увеличение размеров и времени существования более плотных областей, например, появление капелек воды в воздухе, увеличивает, по уже названным причинам, интенсивность рассеяния более длинных волн. И когда капли воды в воздухе сравниваются по размерам с длинами волн (от красных до фиолетовых), все они рассеиваются почти одинаково сильно. Цвета смешиваются в этом случае в один белый цвет. Поэтому облака, состоящие из капель воды размером в несколько десятых микрометра, ослепительно белы. Между прочим, большие капли воды рассеивают свет преимущественно по ходу падающего луча (рис. 22, б). Это происходит потому, что такие сгустки уже больше походят на плотную среду, где больше согласованность излучения волн именно в таком направлении.

В жидкости, например в воде, рассеяние света обладает теми же особенностями, что и в воздухе. В чистой воде свет рассеивают молекулы и области малых размеров, что придает водным глубинам приятную голубизну. Если в воде имеются взвешенные частицы размером 0,001 мм, то эти частицы рассеивают все цвета одинаково. Собственно говоря, благодаря воздушной атмосфере и водным пространствам мы познаем гармоничную, с множеством полутонов, красоту земных пейзажей. Высоко в горах, где практически нет рассеяния, мы видим резкие цветовые контрасты, чернильно-черные тени и ослепительный свет, как на полотнах Рериха.

§ 5. Где взять поляризатор?

Поговорим теперь о поляризованном свете, благодаря которому оптические наблюдения становятся еще более интересными. Каким же образом можно получить свет, в котором электрическое поле колеблется только вдоль одного направления, перпендикулярного лучу? Приведем примеры способов и устройств, приме-

няемых для получения поляризованного света. В частности, рассеянный свет голубого неба при невысоком Солнце довольно сильно поляризован. Это нетрудно понять. Если Солнце невысоко над горизонтом, а мы смотрим в зенит (рис. 23), то луч Солнца и рассеянный луч

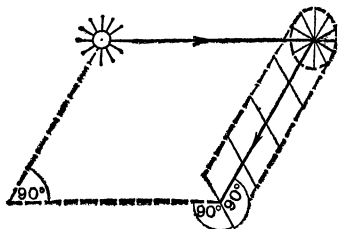


Рис. 23. Поляризация рассеянного солнечного света.

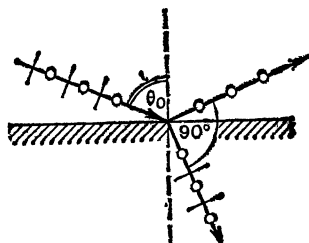


Рис. 24. Отраженный луч является поляризованным.

составляют примерно прямой угол. В зените неполяризованный солнечный луч возбуждает вторичные колебания \mathbf{E} по всем направлениям в плоскости, перпендикулярной солнечному лучу, но параллельной рассеянному лучу. А к наблюдателю приходит только один луч, который должен выбрать в этой плоскости только одно направление поляризации. Благодаря поперечности света это направление должно быть перпендикулярно рассеянному лучу.

Другим естественным источником поляризованного света является луч, отраженный от стеклянной пластинки или водной поверхности и составляющий с преломленным лучом угол 90° (рис. 24). Если падающий луч не поляризован и имеет векторы \mathbf{E} , перпендикулярные (кружки) и параллельные (черточки) плоскости падения (плоскость рисунка), то источники вторичных волн создают преломленный луч, который также не поляризован. В этих источниках диполи колеблются вдоль двух направлений, совпадающих с двумя поляризациями преломленного луча. Если же угол падения θ_0 подобран так, что отраженный луч перпендикулярен преломленному, то отражение может быть вызвано только колебаниями зарядов по направлению, обозначенному кружком. Ведь диполи не излучают свет вдоль направления колебаний! Для стекла угол θ_0 составляет примерно 60° , а для воды — 53° . Фактически мы получаем в руки простейший поляризатор — прибор, отбирающий линейно

поляризованный свет. Когда мы наблюдаем зенит с помощью зеркала, на которое рассеянный луч падает под углом $\theta_0 \approx 60^\circ$, небо в зеркале кажется темным, если мы стоим боком к Солнцу (рис. 25, а). В случае, когда

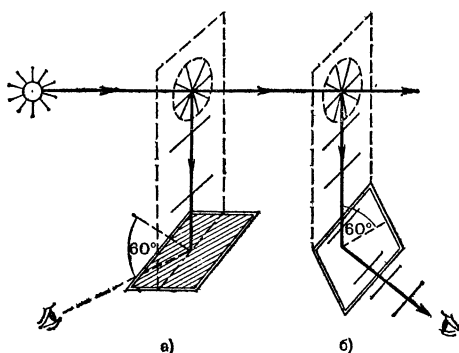


Рис. 25. Наблюдение поляризации рассеянного света с помощью зеркала.

а) Небо кажется темным; б) небо светлеет.

мы стоим лицом к Солнцу (рис. 25, б), изображение неба в зеркале светлеет.

Поляризаторы лучше всего делать из твердых кристаллов, используя знание законов, по которым свет проходит через кристалл. Вспомним теперь, что многие кристаллы обладают оптической осью. Молекулы как источники вторичных волн неодинаково поляризуются электрическим полем вдоль оптической оси и поперек нее. Скажем, вдоль оси заряды колеблются под действием поля гораздо сильнее, чем поперек оси. Это приводит к тому, что преломленные лучи, поляризованные вдоль оптической оси и перпендикулярно к ней, будут по-разному проходить через кристалл. Эта разница связана с тем, что вторичные волны интерферируют между собой в строгом соответствии с их поляризацией. Свет в зависимости от поляризации имеет различную скорость распространения, а соответствующие лучи имеют раз-

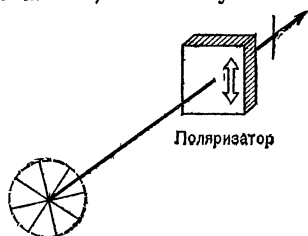


Рис. 26. Действие поляризатора (светлая стрелка изображает ось поляризатора).

ведет к тому, что преломленные лучи, поляризованные вдоль оптической оси и перпендикулярно к ней, будут по-разному проходить через кристалл. Эта разница связана с тем, что вторичные волны интерферируют между собой в строгом соответствии с их поляризацией. Свет в зависимости от поляризации имеет различную скорость распространения, а соответствующие лучи имеют раз-

ные показатели преломления. Используя это обстоятельство, можно сконструировать такую оптическую систему, в которой один из лучей отводится куда-нибудь в сторону, в то время как второй проходит сквозь систему, оставаясь линейно поляризованным. Бывает и так, что свет, поляризованный вдоль оси кристалла, проходит через него свободно, а свет, поляризованный перпендикулярно оси, сильно поглощается. Пластика такого кристалла также пропускает сквозь себя только линейно поляризованный свет (рис. 26). Классическим примером в последнем случае служит турмалин, а более современными материалами являются так называемые поляроидные пленки.

С помощью поляризатора можно видеть удивительные вещи. Мы уже говорили о том, что свет, отраженный от водной глади под углом 53° к вертикали, оказывается поляризованным параллельно поверхности воды. Если под этим углом смотреть на воду сквозь поляризатор, ось которого перпендикулярна поверхности, то отраженный свет не пройдет сквозь поляризатор. В этом случае сквозь поляризатор проходит только свет, рассеянный в глубине воды и отраженный от дна, потому что он имеет любую поляризацию. Исключая таким образом поверхностные отражения, можно разглядеть дно луж так, как если бы их не было, усилить цвета влажных камней и водорослей, увидеть волнуемое море бушующим, потому что лишь пена сохранит свою яркость, а при спокойной воде наблюдать чудесное синее сияние света, рассеянного в глубине. В практическом отношении роль поляризаторов исключительно важна в различных технических оптических устройствах, о которых мы расскажем дальше.

§ 6. Седьмое чудо света

Фактически в рассказе о поляризаторах мы упомянули *двойное лучепреломление* — различное преломление лучей в кристалле с оптической осью, зависящее от поляризации света. Двойное лучепреломление наряду с поперечной поляризацией, просто преломлением, отражением, интерференцией, дифракцией и рассеянием входит в число семи важнейших свойств света.

Пусть в нашем распоряжении имеется поляризованный свет. Рассмотрим, как он проходит сквозь кристалл

в зависимости от ориентации оптической оси кристалла. Проще всего разобраться в этом, когда свет падает на поверхность кристалла вертикально. Пусть оптическая ось кристалла параллельна поверхности и составляет с направлением поляризации света угол либо 0° , либо 90° (рис. 27). Вследствие вертикального падения луч света в обоих случаях проходит через кристалл, не преломляясь. Не изменяется и поляризация луча, потому

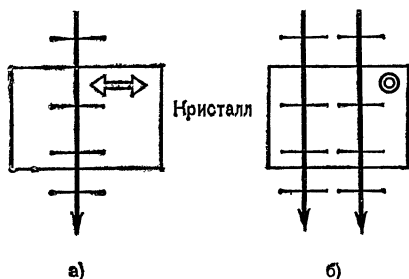


Рис. 27. Прохождение поляризованного света сквозь кристалл (оптические оси изображены светлой стрелкой (а) и кружком (б)).

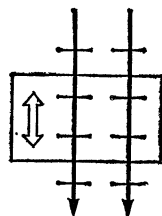


Рис. 28. Прохождение поляризованного света вдоль оптической оси кристалла.

что первичная и вторичные волны одинаково поляризованы: параллельно оптической оси в случае (а) и перпендикулярно к ней в случае (б). Но скорости света оказываются разными, соответственно v_{\parallel} и v_{\perp} . Это и не удивительно, так как электроны смещаются полем первичной волны в случае (а) сильнее, чем в случае (б) (если молекулы легче поляризуются вдоль своих длинных осей). Поэтому и результаты интерференции первичной и вторичных волн здесь совершенно различны. Если бы оптическая ось кристалла была перпендикулярна поверхности (рис. 28), то тогда скорость как угодно поляризованного света, падающего вдоль оси, была бы одной и той же. Ведь в этом случае все направления поперек оси совершенно равноправны.

Теперь несколько усложним наш опыт. Пусть оптическая ось кристалла, параллельная его поверхности, составляет угол 45° с направлением поляризации света (рис. 29). Вектор E в падающей волне имеет две составляющие: E_{\parallel} (параллельна оси) и E_{\perp} (перпендикулярна оси). Под действием полей E_{\parallel} и E_{\perp} в кристалле возник-

нут два сорта диполей, которые по-разному будут излучать вторичные волны. Эти разные волны, интерферируя с первичной волной, сформируют два различных луча света, проходящих параллельно сквозь кристалл. Поляризации этих лучей взаимно перпендикулярны, и скорости света v_{\parallel} и v_{\perp} у них различны. Оба луча, пройдя сквозь пластинку кристалла с разной скоростью, выйдут из нее с различным запаздыванием. Может оказаться так, что на выходе в какой-то момент $E_{\perp}=0$, а E_{\parallel} имеет максимальное значение (рис. 29, а). Тогда в следующие моменты времени E_{\parallel} начнет уменьшаться, а E_{\perp} — нара-

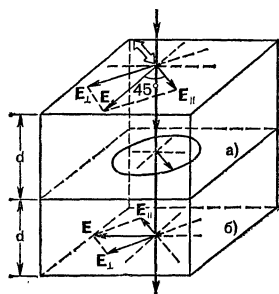


Рис. 29. Когда поляризация света и оптическая ось кристалла составляют угол 45° , можно получить круговую поляризацию (а) или поворот линейной поляризации на 90° (б).

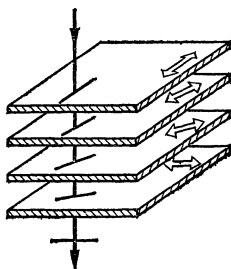


Рис. 30. Стопка тонких пластинок поворачивает поляризацию света (оптические оси соседних пластинок составляют между собой малый угол).

стать. В результате сумма составляющих — вектор \mathbf{E} — будет со временем поворачиваться, например, по кругу. Такую поляризацию называют круговой *).

Увеличив толщину пластинки в два раза, мы в два раза увеличим отставание одного луча от другого. В результате в один и тот же момент времени E_{\perp} будет иметь максимальное положительное значение, а E_{\parallel} — максимальное отрицательное. В последующие моменты поля E_{\parallel} и E_{\perp} будут в такт изменять свои значения до нуля, затем изменять свои знаки и т. д. Это означает, что сумма $\mathbf{E} = \mathbf{E}_{\parallel} + \mathbf{E}_{\perp}$ будет изменяться со временем вдоль пря-

*) Круговая поляризация является частным случаем. В общем случае конец вектора \mathbf{E} описывает эллипс, т. е. поляризация является эллиптической.

мой линии. Однако такая линейная поляризация будет повернута на 90° по сравнению с линейной поляризацией на входе в кристалл (рис. 29, б). Таким образом, выбрав подходящий кристалл с оптической осью, можно управлять поляризацией света и, в частности, поворачивать ее. Интересно, не правда ли?!

Можно, в принципе, сделать еще более хитрую оптическую систему, сложив в стопку тонкие кристаллические пластинки так, чтобы оптическая ось каждой следующей пластинки оказалась повернутой на малый угол

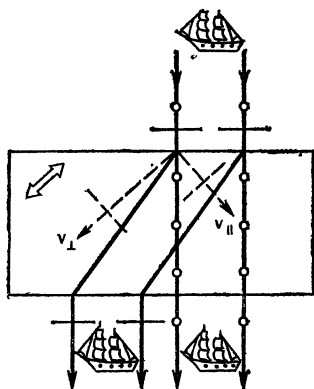


Рис. 31. Необычное двойное лучепреломление в исландском шпате (светлая стрелка — оптическая ось кристалла, черточки и кружки — поляризация падающего и двух проходящих лучей).

α по отношению к предыдущей. Толщину пластинок надо подобрать так, чтобы и полное поле E на выходе из каждой пластинки также поворачивалось на угол α . Тогда на выходе из стопки поляризация света окажется повернутой на угол 90° по отношению к поляризации падающего света (рис. 30). Правда, это технически очень сложная задача: слои должны быть очень тонкими, угол α — очень маленьким, и все необходимо сделать с большой точностью.

Теперь наступил подходящий момент рассказать о загадочных двойниках, наблюдаемых сквозь некоторые кристаллы. Это тоже результат двойного лучепреломле-

ния, еще более необычного. На рис. 31 показано, как проходят лучи, по-разному поляризованные, сквозь кристалл, оптическая ось которого наклонена. Луч, поляризованный перпендикулярно оси кристалла, проходит по прямой насквозь. Это обычный луч. Он создан интерференцией первичной и вторичных волн, поляризованных совершенно одинаково — перпендикулярно оптической оси. Другое дело луч, поляризация которого лежит в одной плоскости с осью кристалла. Поле падающей волны имеет здесь две составляющие: вдоль и поперек оптической оси (изображены пунктиром). Поэтому вторичные волны в кристалле излучаются как вдоль

оси, так и перпендикулярно к ней (пунктирные лучи), причем свет в этих направлениях имеет разную скорость (v_{\parallel} и v_{\perp}). Очевидно, что интерференция таких вторичных волн должна дать луч, который отклонится от вертикали. Если v_{\perp} больше v_{\parallel} , то преломленный луч отклоняется именно так, как изображено на рисунке. Между прочим, этот луч не подчиняется обычному закону преломления.

Читатель уже догадывается, конечно, что все, о чем мы говорили, можно осуществить и в жидком кристалле — жидкости с оптической осью **L**. И чудесные свойства света здесь проявятся с особой силой. Пока мы только заметим, что, как и твердые кристаллы, жидкие кристаллы очень разнообразны. Тот тип жидких кристаллов, который рассматривался до сих пор (см. рис. 10), называется нематическим. Будем называть нематическую жидкость для краткости нематиком. Этот общепринятый сейчас термин происходит от греческого слова «нить».

§ 7. От дефектов ориентации к названию «нематик»

Как появилось такое название и какое отношение нити имеют к жидкому кристаллу? Это вопрос отнюдь не праздный, хотя вряд ли стоило именно так называть необычную жидкость. Но взгляните на типичную фотографию этой жидкости (см. вторую страницу обложки). Прекрасно видны тонкие и толстые нити, пересекающие снимок, которые и дали термин «нематик» *). Теперь сравните его с рис. 12. Сходство большое. Мы понимаем, что оно вызвано каким-то сильным изменением направления оптической оси в пространстве. Это происходит в окрестности того места в материале, которое подверглось сильной деформации. Значит, и в жидкости имеется деформация? Да, может иметься. Только это деформация ориентации оси **L**.

Вообще-то мы уже знаем, что при умеренной температуре молекулы жидкого кристалла стремятся ориентироваться вдоль одного и того же направления **L**. Но будет ли вектор **L** одним и тем же в каждой точке пространства, зависит от многих условий. К таким условиям относятся и внешние границы, и инородные вкрапле-

*) От греческого слова νήμα (нить),

ния, и всякие воздействия на жидкий кристалл. Поэтому без особых на то оснований трудно требовать от жидкости неизменности направления L в любом месте. Хорошо, если касательные, проведенные к векторам L в разных точках выделенного участка, окажутся хотя бы приблизительно параллельными (рис. 32). Однако в этой приблизительности и заключен сюрприз.

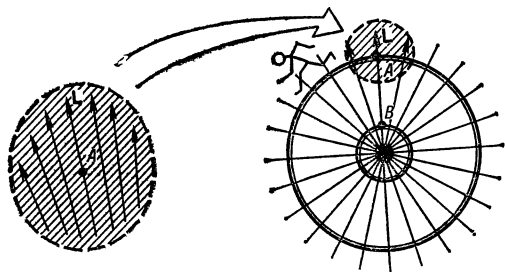


Рис. 32. Дефект ориентации — «звезда» оптических осей.

Предположим, что в городе есть небольшая площадь, от которой по радиусам расходится множество улиц, и, кроме того, имеются окружные дороги, соединяющие эти улицы (рис. 32). Улицы так густо расположены, что отрезки окружных дорог соединяют соседние улицы почти под прямым углом к улицам. Мы еще не подозреваем о существовании площади. Мы стоим на углу A далеко от площади и собираемся совершить путешествие по городу, переходя с одной улицы на другую, параллельную предыдущей (как нам кажется), по самому короткому пути — отрезку окружной дороги. Отправимся в путь. Ясно, что в конце концов мы придем на тот же угол A , хотя нам и будут казаться параллельными все соседние улицы. При истинной параллельности улиц такого никогда бы не произошло. Удивленные итогом такого путешествия, мы можем дойти до угла B и повторить попытку. Конечно, результат окажется таким же, но теперь мы заметим, что довольно круто поворачиваем налево. Наконец, дойдя до площади, вообще остановимся в растерянности, увидев, как улицы буквально разбегаются в разные стороны. Что же, такая ситуация не противоречит законам градостроительства и существует в действительности: в Париже есть такая площадь — площадь Шарля де Голля (еще ее называют — «Звезда»),

в центре которой находится знаменитая Триумфальная арка.

Так и в жидком кристалле действительно существуют такие «звезды», «лучи» которых параллельны векторам \mathbf{L} в каждой точке. Более того, звезды ориентации молекул могут быть самого разного типа (рис. 33). Так вы-

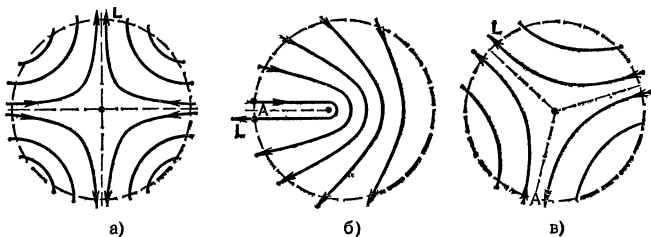


Рис. 33. Разные типы звезд ориентации.

глядят звезды в двух измерениях, т. е. на плоскости. Поскольку слой жидкого кристалла имеет еще и третье измерение (перпендикулярно плоскости рисунка), то точки — центры звезд — превращаются в линии. Вот эти-то линии или нити обычно и видны в нематике. Строго говоря, они являются дефектами ориентации вектора \mathbf{L} . И, как всякий дефект, такие нити невыгодны для сообщества молекул.

Действительно, в центре звезды (и на площади) соседние молекулы (и улицы) должны очень резко изменять свою ориентацию. При этом одни их концы должны соединиться, а противоположные концы сильно разойтись. Но это несовместимо с балансом сил притяжения и отталкивания, благодаря которому и существует жидкий кристалл. Чтобы найти какой-то выход из этого противоречия, молекулы в самом центре звезды (и улицы на самой площади) вообще никак не ориентируются. Нить как бы «расплавляется» в обычную жидкость, а улицы на площади просто исчезают.

Нематик избавился бы от своих нитей, поскольку без них абсолютно все молекулы были бы параллельны друг другу, что энергетически выгодно. Но этому мешают посторонние причины: нити могут прикрепиться своими концами к твердым частицам примеси внутри слоя, к каким-нибудь выступам и неровностям на твердой поверхности, соприкасающейся с нематиком, и т. д. Может даже

оказаться так, что нити зацепятся друг за друга, образовав сеть, и будут мешать друг другу исчезнуть.

На рис. 34 показано, как на опыте наблюдают дефекты в слое нематика. В данном случае это нить, прикрепившаяся вертикально к поверхностям стекол. Оси

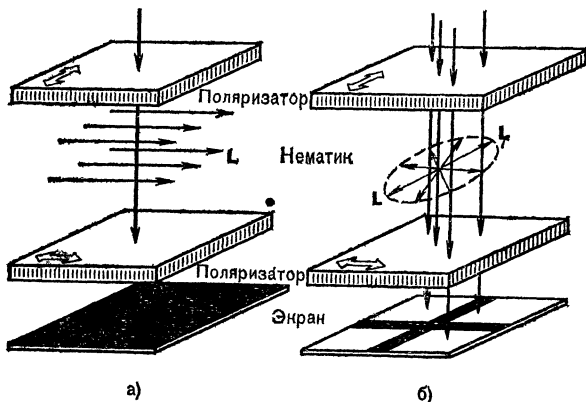


Рис. 34. Для наблюдения дефектов в нематике используют скрещенные поляризаторы.

а) При идеальной ориентации оптических осей экран не освещен; б) когда «нить» в нематике параллельна падающему лучу, на светлом экране виден темный крест.

поляризаторов обычно скрещивают. В отсутствие дефектов, когда ось L параллельна оси одного из поляризаторов, свет сквозь такую оптическую систему не проходит и слой нематика кажется черным (рис. 34, а). Но если в поле зрения попадает нить, вокруг которой вектор L причудливо изменяет свою ориентацию, свет местами находит себе дорогу сквозь оптическую систему (рис. 34, б). Это происходит благодаря эффектам поворота поляризации света (см. рис. 29). Если нити в слое нематика не прямолинейны, а изгибаются и петляют, то светотень на экране принимает самые замысловатые формы.

Некоторые нити сами по себе не очень «прочны». Если мысленно ухватиться за центр звезды, изображенной на рис. 32, и потянуть весь пучок лучей вертикально к плоскости рисунка, то все эти лучи на большом расстоянии от плоскости станут практически параллельными (рис. 35). Что ж, это наиболее выгодная ориентация молекул. И если у нематика есть малейшая возможность

вытолкнуть эту нить, например, течением, то происходит так называемое «вытекание» нити в третье измерение — вертикально к плоскости звезды. Однако не все звезды так неустойчивы. Попробуйте, тоже мысленно, потянуть за центр звезды, изображенной на рис. 33, б! Как ни тянуть этот дефект, все равно его форма в целом сохранится: обязательно останется узкий «залив», доходящий до центра звезды. Можно даже сформулировать простое правило, которое подскажет, какие дефекты устойчивы, а какие нет. Будем обходить центр города-звезды из точки А по кольцу. Примем, что на любых соседних улицах, которые мы пересекаем, нумерация домов возрастает в одном и том же направлении L . Придем по кольцу снова в точку А. И тут окажется, что либо направления нумерации — векторы L — на ближайших улицах совпадут, как на рис. 32 и 33, а, либо будут прямо противоположными, как на рис. 33, б и 33, в. Так вот, если после такого обхода векторы L параллельны, то звезда неустойчива, а если антипараллельны, то дефект устойчив.

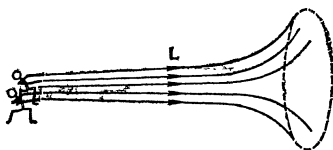


Рис. 35. «Вытекание» дефекта в третье измерение.

И последнее, что здесь следует сказать. Тонкий слой нематика, если не принять специальных мер, выглядит мутным. Обычная жидкость при тех же условиях была бы прозрачной. Это отнюдь не случайно. Дело в том, что в тонком слое мало молекул. Они рассеивают свет слабо, если слабо связаны друг с другом: интенсивность такого рассеянного света пропорциональна числу молекул. Но в нематике очень многие молекулы одинаково ориентированы, т. е. могут согласованно излучать вторичные волны. Размеры отдельных «зерен» с N одинаково ориентированными молекулами достигают сотен нанометров, т. е. это крупные области. Не надо думать, что подобные зерна вечны и резко отделены друг от друга. Напротив, они могут существовать очень недолго, их границы сильно размыты, т. е. такие области с одинаковой ориентацией молекул непрерывно рождаются и исчезают. Тем не менее, за время своего существования они успевают сильно рассеять свет. Интенсивность света, рассеянного зернами, пропорциональна N^2 . При этом

такие области сильно рассеивают вперед белый свет. Это полностью аналогично туману — воздуху с каплями воды.

Разумеется, такого рассеяния не было бы, если бы все зерна имели одну и ту же ориентацию, как в твердом кристалле. В обычных же условиях тепловые толчки мешают зернам нематика ориентироваться параллельно. В каждом зерне все молекулы ориентированы одинаково, поскольку здесь силы притяжения молекул успешно противостоят тепловым толчкам. Дело обстоит так, как будто слой нематика постоянно «растрескивается» на кусочки со своими собственными направлениями вектора \mathbf{L} . «Трещины» и есть дефекты ориентации молекул. Со временем какие-то трещины залечиваются, но возникают новые, размеры зерен все время изменяются, словом, нарисованная картина как бы плывет на наших глазах. Так происходит во всех случаях, и даже в твердых кристаллах, когда тепловое расшатывание конкурирует со стабилизирующими силами.

ЭФФЕКТ ФРЕДЕРИКСА

Сотри случайные черты —
И ты увидишь: мир прекрасен.

Александр Блок

Наиболее впечатляющие свойства жидких кристаллов, сделавшие эти объекты столь популярными, проявляются в различных оптических эффектах, которые очень необычны для жидкости. Такие эффекты присущи твердому кристаллу, но теперь мы понимаем, в чем тут дело: в нематике, как и в кристалле, **есть** оптическая ось. Но, в отличие от твердого кристалла, в жидком кристалле этой осью легко управлять с помощью самых разных воздействий, в том числе электрическими полями. Эффект изменения направления оси в нематике под действием поля наблюдался еще в предвоенные годы известным советским ученым В. К. Фредериксом и носит теперь его имя. И вряд ли многие сегодня подозревают, поглядывая на изящные циферблаты популярных электронных часов и калькуляторов (см. вторую страницу обложки), что они видят на самом деле такое явление.

§ 1. И все-таки нематик упругий

Оказалось, что именно в нематике эффект наиболее просто наблюдать. Это вызвано относительной слабостью сил молекулярного взаимодействия в таком жидком кристалле. Уже говорилось о том, что, если не принимать специальных мер, нематик как бы разбивается на осколки или зернышки. Ориентация отдельного зерна при этом довольно случайна. Ведь у нас пока нет никаких оснований считать то или иное направление в нематике избранным. Такое положение и способствует своеобразной анархии среди зерен (но не среди молекул в зерне). Значит, нужно каким-то образом указать зернам на необходимость придерживаться определенного и нужного нам направления. Способов сделать это немало.

Самый простой и надежный способ одинаково ориентировать все молекулы нематика состоит в полировке

стеклянных пластинок, между которыми будет находиться нематик. Но полировку стекла нужно производить вдоль единственного направления. Можно, например, несильно потереть стекло лоскутом ткани по избранному направлению. В этом случае на стекле образуются невидимые глазом бороздки, параллельные между

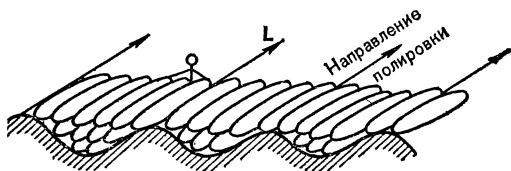


Рис. 36. Укладка молекул на полированной поверхности.

собой (рис. 36). Глубина и ширина таких микробороздок составляют 10—100 нм.

Зерна нематика имеют примерно такой же размер. Зерна, ближайшие к поверхности стекла, взаимодействуют с ним с помощью механизма притяжения, который мы уже обсуждали. Поэтому зерна нематика накрепко прилипают к стеклу. Их сцепление с твердой поверхностью наибольшее, если они укладываются в приготовленные борозды параллельно направлению полировки. Ведь в этом случае молекулы зерен наиболее близко подходят к поверхности стекла.

Таким образом, огромное число зерен, находящихся непосредственно на стекле, как бы замораживается параллельно единственной оси L и не может быть сдвинуто с места никакими тепловыми толчками. Теперь весь слой нематика получает совершенно четкое указание, как ему надо ориентироваться. Последующие тонкие прослойки зерен по своей ориентации подстраиваются к предыдущим прослойкам, и так происходит по всей толщине нематика. Правда, если полная толщина очень велика, влияние стекла, конечно, ослабевает, и на больших расстояниях от него опять появляются многочисленные «трещины». Но если толщина слоя нематика d составляет 0,01—0,1 мм, то можно быть уверенным, что весь слой ориентирован одинаково. В этом случае он совершенно прозрачен.

Обычно процедура ориентации нематика выглядит так. Берут две одинаковые полированные стеклянные пластинки, вставляют между ними прокладки толщиной

0,01—0,1 мм, ориентируют оси полировки, например, параллельно друг другу, и в щель между стеклами вводят капельку нематика. И тут вступает в действие обычное смачивание, которое мы уже ранее рассмотрели. Капля втягивается в эту узкую щель, причем оптическая ось нематика L устанавливается параллельно оси полировки. В смысле ориентации молекул мы получаем, можно сказать, монолит без всяких трещин (рис. 37, а).

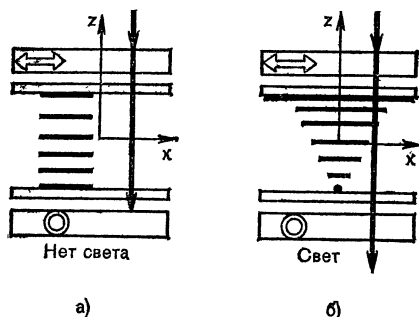


Рис. 37. При параллельной ориентации осей нематика свет не проходит через второй поляризатор (а), а при закрученной ориентации — проходит (б) (показаны проекции осей молекул на плоскость xz).

Более сложная конструкция из осей L , подобная изображенной на рис. 30, получается в нематике просто. Надо, всего-навсего, повернуть одну из стеклянных пластинок вокруг оси z на 90° . При этом оси полировки пластинок составят между собой угол 90° . В результате оси зерен, стремясь равняться на стеклянные поверхности, совершат в толще слоя плавный разворот на 90° (рис. 37, б). Между прочим, в этом легко убедиться, поместив нашу конструкцию между скрещенными поляризаторами так, как показано на рисунке. В случае (а) свет не проходит сквозь оптическую систему, в то время как в случае (б) свет сквозь нее пройдет.

Еще интересно узнать, как можно ориентировать оптическую ось нематика перпендикулярно к стеклянным пластинкам. Похожий случай изображен на рис. 28. Здесь полировка стекол не поможет. Обычный способ таков. В нематик впрыскивают очень малое количество специальных длинных молекул, которые по своему устройству напоминают головастиков, т. е. у них имеется довольно крупная головка с постоянным электрическим

диполем и длинный хвост, похожий на молекулы нематика (рис. 38, а). Обе эти детали (дипольная головка и длинный хвост) очень ценны. Диполи сильно притягиваются поверхностью стекла, особенно если на ней имеются электрические заряды или мельчайшие капли воды. Дело в том, что молекулы воды также обладают постоянными диполями.

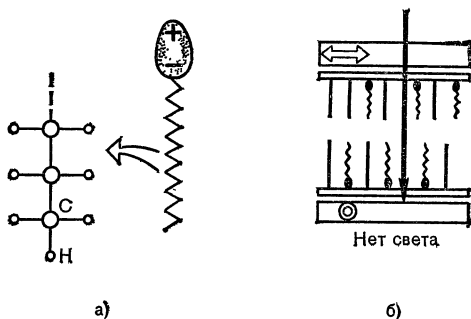


Рис. 38. Молекулы-головастики заставляют нематик ориентироваться вертикально.

а) Хвост молекулы-головастика похож на молекулу нематика; б) вертикальная ориентация молекул нематика.

Напротив, хвосты у молекул химически устроены так, что они совершенно безразличны к воде, как жир или воск. Хвост представляет собой длинную цепь из атомов углерода и водорода типа изображенной на рис. 38, а. Такие хвосты сильно притягивают длинные молекулы нематика, поскольку те и другие очень похожи.

Следовательно, складывается такая картина (рис. 38,б): добавленные молекулы прилипают дипольными головками к стеклу, их хвосты вертикальны к пластинке, хвосты заставляют ближайшие молекулы нематика выстроиться перпендикулярно к поверхности стекла. Далее в глубь нематика команды выстроиться в вертикальном направлении уже подаются молекулами жидкого кристалла. Как мы уже знаем, оптическая система на рис. 38, б не пропускает свет.

Мы сделали необходимую технологическую операцию и имеем теперь в своем распоряжении слой нематика, оптическая ось которого ориентирована нужным образом. Конечно, свойства нематика как жидкости при

этом не изменились, он по-прежнему может течь, как вода. Не обладает он и упругостью в том смысле, какой обычно вкладывается в это слово, когда говорят о пружине. Сдвинув две пластинки относительно друг друга, мы не создадим заметных сил, возвращающих пластинки на прежнее место. Впрочем, такое утверждение означает только одно: центры масс молекул не собираются возвращаться на прежнее место. Это справедливо, если на рис. 37, а стеклянные пластинки сдвигать параллельно друг другу в любом направлении, но так, чтобы оси полировки оставались параллельными. То же относится к рис. 38, б, где осей полировки вообще нет.

Но было бы опрометчиво заявить, что в нематике вообще нет никаких упругих сил. Все-таки упругость в жидком кристалле существует и она связана с тем, что в разных точках нематика может быть неодинаково ориентирована оптическая ось L . Ведь молекулы стремятся быть параллельными друг другу. Что же произойдет, если на соседних участках нематика молекулы по какой-либо причине приобретут разную ориентацию (рис. 37, б и 39)? Конечно, ориентация молекул будет сопротивляться этому и, как только причина будет устранена, станет одинаковой в любом месте слоя. Так что, если стеклянные пластинки на рис. 37, б и 39 ничем не удерживаются, под действием молекулярных сил они займут параллельное положение, причем совпадут и оси полировки.

Однако реально это трудно осуществить, так как упругие силы малы. Например, пластинки площадью 1 см^2 ,

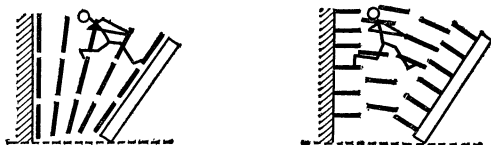


Рис. 39. Упругие ориентационные деформации.

находящиеся на расстоянии 1 см друг от друга, испытывают действие молекулярных сил $\sim 10^{-11}$ Н. Поэтому не стоит говорить о действии нематика на массивные пластинки. Но стоит рассмотреть случай, когда стекла занимают неизменное положение (рис. 37 и 38), а в нематике местами происходит отклонение оптической оси.

Тогда даже столь слабые упругие силы восстановят исходное направление вектора \mathbf{L} .

Изогнутость оптической оси играет свою роль при втягивании нематика в узкую щель между двумя стеклами параллельно направлению полировки. При этом оптическая ось изгибается подобно тетиве лука, готового послать стрелу по направлению движения. Следовательно, натяжение тонкой жидкой пленки на поверхности, о котором мы уже говорили, увеличивается в нематике за счет упругих сил ориентации. Может быть и так, что поверхностная пленка нематика вогнута, но оптическая ось перпендикулярна направлению движения и не испытывает изгиба. В этом случае натяжение поверхности меньше, и, значит, втягивание жидкости должно происходить медленнее.

Вообще все, о чем здесь говорилось, можно представить себе с помощью простой модели. Расположим в пространстве упругие линии (например, стальные струны), вдоль которых в каждой точке ориентирована оптическая ось. Только не будем проводить эти линии слишком густо, чтобы можно было разглядеть рисунок. Мысленно соединим струны в поперечном направлении одинаковыми слабыми пружинками. В равновесии, когда все пружинки не сжаты и не растянуты, струны — оптичес-

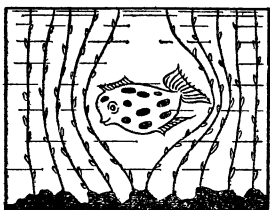


Рис. 40. Движение оптических осей в нематике напоминает колебание струн или движение водорослей в вязкой жидкости.

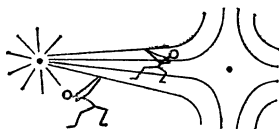


Рис. 41. Стягивание дефектов разного знака в нематике.

кие оси — в пучке параллельны. Но сжав в каком-нибудь месте пучок струн, т. е. сжав пружинки, мы приведем в действие упругие силы пружинок, сопротивляющиеся сжатию. Напротив, растянув струны в разные стороны, мы вызовем действие сил сжатия пружинок, препятствующих растяжению. Для большей достовер-

ности модели пучок струн следовало бы поместить в вязкую жидкость. Еще проще, пожалуй, представить себе лес длинных, гибких и цепких морских водорослей, закрепленных концами на дне (рис. 40).

А теперь взглянем на звезды — дефекты ориентации молекул, изображенные на рис. 32 и 33. Фактически лучи этих звезд и есть оптические оси, т. е. упругие струны. Видно, что в центрах звезд пучки осей наиболее сильно сжаты (рис. 32 и 33, б) или растянуты (рис. 33, а и 33, в). Значит, в окрестностях нитей нематика возникают заметные силы растяжения или сжатия. Напомним, что в данном случае нити проходят через центры звезд перпендикулярно плоскости рисунков. Такие звезды растяжения и сжатия притягивают друг друга, потому что разреженность одной из них могла бы компенсироваться большей плотностью другой (рис. 41). Например, с помощью микроскопа видно, как пара дефектов, изображенных на рис. 32 и 33, а, стягивается в одну точку и исчезает. Это убедительно свидетельствует о существовании упругих сил ориентации в нематике.

§ 2. Что проделывает поле с оптической осью?

Мы подошли к центральному пункту повествования об оптической оси нематика. Пора научиться ею управлять по желанию. Электрическое поле поможет это делать с легкостью. Оно поворачивает продолговатые молекулы, а значит, и ось L так, чтобы вектор L оказался либо параллелен полю E , либо перпендикулярен к нему. Ничего другого, как правило, оптической оси не дано. Рисунок 42 объясняет, почему так происходит.

Пусть в молекуле нематика диполь легко возникает вдоль длинной оси и с трудом вдоль короткой оси. Это означает, другими словами, что электронное облако легко смещается относительно положительного ядра вдоль молекулы и с большим трудом — поперек нее. Если поле E и ось L составляют между собой некоторый угол, то фактически заряды в молекуле разводятся только составляющей поля E вдоль оси L (рис. 42, а). Допустим, что заряды $+Q$ и $-Q$ разошлись вдоль молекулы на определенное расстояние. Но в таком случае поле E должно теперь действовать на каждый заряд в отдельности: с силой $F = QE$ по направлению вектора E

на положительный заряд и с такой же силой в противоположном направлении — на отрицательный заряд. Таким образом, возникают плечо и пара сил, создающие крутящий момент. Этот момент пары и поворачивает продолговатую молекулу так, чтобы она своей длинной осью ориентировалась вдоль поля E .

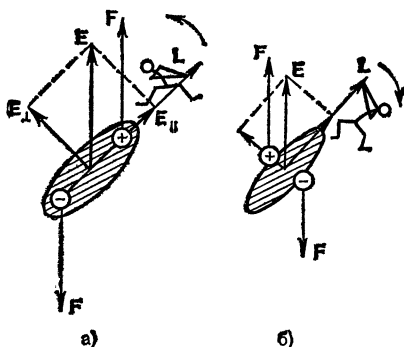


Рис. 42. Повороты молекул в электрическом поле.

а) Диполь возникает вдоль длинной оси молекулы; б) диполь возникает вдоль короткой оси молекулы.

Бывает, продолговатая молекула устроена так, что электронное облако легче сместить вдоль поперечной оси. Тогда только проекция поля E на поперечную ось создает диполь (рис. 42, б). В этом случае рассуждение полностью повторяется, но результат его, очевидно, таков: возникающий крутящий момент поворачивает молекулу так, чтобы ее продольная ось оказалась перпендикулярной полю.

Вообще-то, пока речь идет о поворотах одной-единственной молекулы, было бы неправильно говорить о повороте оптической оси нематика. Точно такие же повороты индивидуальных молекул происходят и в обычной жидкости. Эффект от них невелик. Но в том-то и дело, что в нематике все молекулы, взаимодействуя между собой, ориентируются одинаково. Поэтому, грубо говоря, достаточно толкнуть одну из них, чтобы другие, как костяшки домино, дружно повернулись вслед за первой. Здесь и кроется причина того, что для осуществления поворота именно оптической оси требуются небольшие усилия, в том числе и не очень сильное электрическое поле.

В обычной жидкости, не имеющей оптической оси в отсутствие поля, молекулы под действием поля тоже могут выстроиться параллельно. Правда, для этого потребуется сильное электрическое поле. Тем не менее, оно порождает в жидкости оптическую ось. Чем сильнее поле, тем более упругой становится ориентация оси. Так происходит при нагреве нематика и «расплавлении» его в обыкновенное жидкое состояние. Но и в этом случае нематик оставляет свой след. Дело в том, что обычная

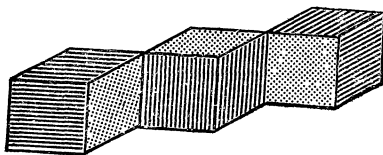


Рис. 43. Нематические «зерна» в обычной жидкости.

жидкость, бывшая нематиком, хранит о нем память. Память в том смысле, что она состоит из знакомых нам зерен, которые теперь ориентированы совершенно хаотично (рис. 43). Однако размер этих зерен или число молекул в них сильно зависит от нагрева. С увеличением температуры зерна мельчают. Но, если жидкость нагрета немного выше температуры плавления нематика, размеры зерен еще велики — около 100 нм. Поэтому ориентировать молекулы полем гораздо легче вблизи температуры плавления, чем вдали от нее.

Казалось бы, сколь угодно слабое поле может поворачивать оптическую ось нематика. Так и будет, если жидкая среда простирается неограниченно по всем направлениям. В действительности же, как мы знаем, слой нематика должен иметь конечную толщину и жесткую ориентацию молекул на стеклянной поверхности. Таким образом, отклоняющее действие поля вступает в противоборство со стабилизирующим действием упругих сил. Фактически отклонение оптической оси в слое нематика начинается тогда, когда крутящий момент электрических сил станет равен или больше возвращающего момента упругих сил. Поэтому для нематика существует совершенно определенный порог поля или разности потенциалов на электродах, выше которого оптической осью уже нетрудно управлять.

На рис. 44 показано, что можно делать с ориентацией нематика в электрическом поле выше порога, если ниже порога оптические оси ориентированы так, как изображено на рис. 37 и 38. Случай (а) соответствует исходной

горизонтальной ориентации и молекулам, поляризующимся вдоль длинной оси (рис. 42, а). Случай (б) соответствует исходной вертикальной ориентации (рис. 38, б) и молекулам, поляризующимся вдоль короткой оси (рис. 42. б). Случай (в) соответствует исходной твист

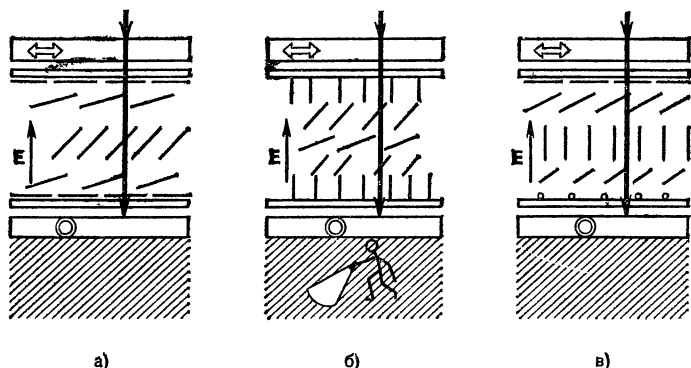


Рис. 44. Эффект Фредерикса при различной исходной ориентации молекул.

а) Горизонтальная ориентация; б) вертикальная ориентация; в) твист-ориентация

(закрученной!)-ориентации и молекулам, поляризующимся вдоль продольной оси.

Видно, что в центре слоя отклонение оптических осей наибольшее, а у стеклянных поверхностей — наименьшее. Это естественно, поскольку влияние твердой поверхности ослабевает в глубине слоя. С увеличением поля повороты оптических осей становятся все больше и достигают 90° почти во всем нематике, за исключением тонкого приповерхностного слоя, где молекулы прилипли к стеклу. Собственно говоря, такое поведение нематика и называется эффектом Фредерикса.

При умеренных значениях напряжения, превышающих порог, когда оптическая ось принимает не горизонтальное и не вертикальное, а какое-то наклонное положение, во всей своей красоте проявляется необычное двойное лучепреломление. Дело в том, что оно сопровождается цветовыми эффектами, если слой нематика освещается белым светом: по мере изменения угла наклона молекул нематик переливается всеми цветами радуги. Причина явления проста: происходит интерфе-

ренция лучей, один из которых проходит сквозь нематик по вертикали, а второй под определенным углом к вертикали, зависящим от ориентации оптической оси L . Лучи ведут себя в нематике так же, как и в исландском шпате (рис. 31). Если пучок лучей с поляризацией $E_{\text{вход}}$ широк, то во второй поляризатор по одному и тому же направлению проходят оба луча, поляризованных во

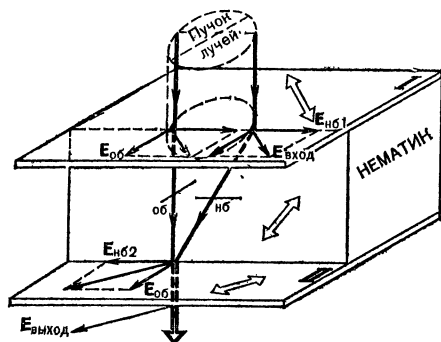


Рис. 45. Обыкновенный и необыкновенный лучи, прошедшие слой нематика, интерферируют на выходе.

взаимно перпендикулярных направлениях $E_{\text{об}}$ и $E_{\text{нб}}$ (рис. 45). К наблюдателю сквозь второй поляризатор оба луча пройдут по тому же направлению с одинаковой поляризацией: векторы E в них равны проекциям векторов $E_{\text{об}}$ и $E_{\text{нб}2}$ на ось поляризатора.

Лучи проходят слой нематика с разной скоростью. Поэтому в зависимости от длины волны, толщины слоя и угла наклона оси L лучи на выходе из нематика запаздывают по-разному. Например, может оказаться так, как показано на рисунке, т. е. лучи усилят друг друга, пройдя второй поляризатор с поляризацией $E_{\text{выход}}$. При этом запаздывание необыкновенного луча должно быть таково, чтобы векторы $E_{\text{нб}1}$ и $E_{\text{нб}2}$ были противоположны по направлению.

Но такое взаимное усиление возможно лишь для лучей определенного цвета (определенной длины волны). А если ориентация оси L изменится, то изменится и цвет яркого луча. Поэтому и возникает такая красочная картина при увеличении напряжения, подаваемого на слой нематика. Интересно, что если первый поляризатор ис-

ключает либо поляризацию E_{nb1} , либо поляризацию E_{ob} падающих лучей, то сквозь нематик проходят только либо обыкновенные, либо необыкновенные лучи и никакой интерференции между ними не происходит. Таким образом, несложная оптическая система, управляемая электрическим полем, может превратить белый парусник (рис. 31) в стремительный бриг с алыми парусами. Другой пример проявления описанного эффекта показан на обложке, где с помощью наложения неоднородного электрического поля инженер-художник изобразил хамелеона, меняющего свою окраску.

Поместив слои нематика (а), (б) и (в) (рис. 44) между скрещенными поляризаторами, в сильном поле мы будем наблюдать знакомые оптические эффекты. Во всех этих случаях свет не будет пропущен сквозь оптическую систему, так как слои нематика практически не будут изменять поляризацию света. Таким образом, появляется принципиальная возможность управления интенсивностью света, например в системе (в) — прозрачной в слабом поле (рис. 37; б). Можно было бы использовать и слой (а) (рис. 44), если ось полировки стекол расположить под углом 45° к осям поляризаторов. При этом толщину слоя надо подобрать так, чтобы осуществлялся поворот поляризации света на 90° после выхода из нематика. Такое оптическое устройство в точности повторяет рис. 29.

Простота и доступность нарисованных схем восхищает. Не надо кропотливой, почти ювелирной работы, необходимой при изготовлении твердых кристаллов для тех же целей. Не надо мощных импульсов электрического поля, используемых для поворота оптической оси в твердом кристалле. В нематике независимо от толщины слоя пороговое напряжение может составлять всего доли вольта, а толщина слоев, используемых на практике, примерно равна сотой доле миллиметра! Это и обусловило громадный практический интерес к жидким кристаллам при создании оптических индикаторов и затворов всевозможных типов.

Оптические индикаторы и затворы по командам извне пропускают и гасят сигналы, подаваемые световым лучом. Видимо, первым придумал такой затвор шотландский физик Керр в 1876 г., причем тогда использовалась обычная жидкость. Сегодня эффект возникновения оптической оси в обычной жидкости под действием сильного

электрического поля широко используется. В затворах применяется, например, нитробензол. Такие затворы обрабатывают одним ценным качеством. Они невероятно быстро работают. В некоторых жидкостях между моментами включения поля и возникновения оптической оси проходит совсем ничтожное время $\sim 10^{-11}$ с. Поэтому системы Керра применяются там, где необходима сверхвысокая скорость и точность: для измерения скорости света, в сверхскоростной фотографии, при исследовании взрывов и распространения пламени, для управления лазерными лучами.

Малое время реакции обычной жидкости на действие поля объясняется тем, что здесь, как мы знаем, поворачивается каждая молекула в отдельности. Сопротивление ее повороту со стороны остальных молекул ничтожно. Вот тут-то, в быстроедействии, жидкие кристаллы вообще и нематик в частности не выдерживают конкуренции, потому что в нематике действует огромный и слаженный ансамбль молекул или, по крайней мере, крупнозернистость необычной жидкости. В самом деле, в этом случае должны разом поворачиваться миллионы молекул. И хотя мы выигрываем в энергетической экономичности такого поворота, зато начинаем проигрывать в скорости его осуществления. Причина — вязкость вещества, которая сказывается как раз на таких больших масштабах.

Когда мы сравнивали оптические оси со струнами в вязкой жидкости и с водорослями в морской воде (рис. 40), то имели в виду именно это обстоятельство. И те, и другие не могут долго колебаться, если перестать на них воздействовать: колебания быстро угасают вследствие трения (вспомним, как колышутся водоросли!). Конечно, чем сильнее электрическое поле, тем быстрее оптическая ось изменит свое направление в нематике. Однако пока самые быстрые процессы в жидком кристалле протекают медленнее 10^{-6} с.

Мы познакомились еще с одним необычным свойством нематика — ориентационной вязкостью, которая мешает быстроедействие оптических индикаторов. К счастью, не во всех индикаторах нужны высокие скорости. Это относится, например, к циферблатам электронных часов и калькуляторов.

§ 3. Как работают циферблаты электронных часов?

Циферблатами многих современных часов служат жидкокристаллические индикаторы. На рис. 46 показано, как жидкокристаллический индикатор отображает ту или иную цифру, букву, дату и т. п. Как и на рис. 37, б и 44, в, здесь имеются: два поляризатора, оси которых скрещены; две полированные стеклянные пластинки со скрещенными осями полировки; слой нематика

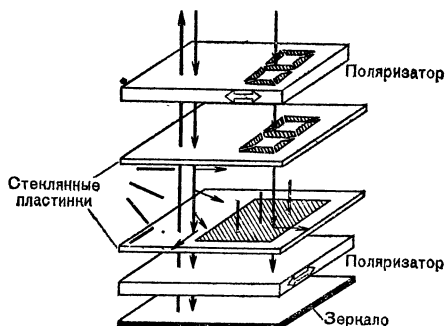


Рис. 46. Так выглядит циферблат электронных часов, если его разобрать.

между стеклами, вынужденный иметь твист-ориентацию; прозрачные электроды, нанесенные на стекла. Кроме того, под нижним поляризатором расположено зеркало, отражающее дошедший до него свет. Нижний электрод сделан сплошным, а верхний — фигурным. Фигурный электрод состоит обычно из нескольких маленьких электродов — сегментов, из которых можно составить любую цифру, букву, число и слово. Например, для изображения цифры достаточно семи сегментов. Каждый сегмент имеет свой собственный электрический контакт и включается в цепь по специальной команде. Электрическая цепь питается от пары слабеньких батареек (по 1,5 В каждая). Сигналы — команды замыкания цепи с нужным набором сегментов, т. е. цифр, букв и т. д., подаются миниатюрным генератором, работающим по специальной программе.

Свет — дневной или от электрической лампочки — падает на верхний поляризатор. Пройдя этот поляризатор, естественный свет становится поляризованным в за-

данном направлении. Далее свет проходит верхнюю прозрачную пластинку и попадает в слой нематика. Здесь распространение света зависит от того, замкнута или разомкнута электрическая цепь. Если цепь разомкнута, как на пути левого пучка света (рис. 46), то в данном месте нематика твист-ориентация оптических осей сохраняется. Поэтому по мере прохождения левого пучка света его поляризация поворачивается в соответствии с поворотом оптической оси. На выходе из слоя нематика и второй стеклянной пластинки поляризация левого пучка повернется на 90° . Но такую же ориентацию имеет ось нижнего поляризатора. Поэтому левый пучок света пройдет второй поляризатор, дойдет до зеркала, отразится от него и беспрепятственно пройдет весь путь в обратном направлении в глаз наблюдателя. Следовательно, этот участок индикатора будет выглядеть для наблюдателя светлым.

На соседнем правом участке индикатора пучок света проходит в момент замыкания электрической цепи на цифру 8. Поляризованный свет, попав в слой нематика точно под включенными сегментами, встретит вертикально ориентированные оптические оси (рис. 46). Именно так электрическое поле поворачивает молекулы, хорошо поляризующиеся вдоль продольной оси. Поэтому свет пройдет слой нематика под сегментами цифры 8, не изменив своей поляризации. Но, пройдя нематик и вторую стеклянную пластинку, этот свет будет встречен нижним поляризатором, ось которого перпендикулярна поляризации света. Следовательно, пучок света под сегментами цифры 8 не сможет пройти сквозь поляризатор: он либо поглотится, либо будет отведен куда-нибудь в сторону этим поляризатором. Значит, правый пучок в местах расположения сегментов не дойдет до зеркала, не отразится от него в глаз наблюдателя. Таким образом, индикатор в месте расположения цифры 8 будет выглядеть для наблюдателя темным, т. е. наблюдатель увидит на светлом фоне темную цифру 8.

В следующие моменты времени придут команды замкнуть цепь на другие цифры или буквы. И точно так же мы увидим их. Так устроены очень многие буквенно-цифровые индикаторы в часах, калькуляторах, электронных переводчиках, а также шкалы измерительных приборов и шкалы настройки, разнообразные табло и т. п. Современная технология и электроника позволяют встраивать

миниатюрные вычислительные машинки в корпус элегантных часов, часы размещать в кулонах и брошах. Это, так сказать, бытовое применение жидких кристаллов. Но жидкокристаллические экраны (дисплеи) с большим числом сегментов — электродов и сложной электронной схемой управления уже могут служить в качестве телевизионных экранов, преобразователей изображения (приборы ночного видения), средств управления световым лучом в системах оптической связи и оптической обработки информации в быстродействующих электронно-вычислительных машинах. А нельзя ли еще и подкрасить слой нематика, чтобы сделать такие индикаторы цветными?

§ 4. «Хозяева» и «гости»

Исходная идея заключается в следующем: растворить какой-нибудь краситель непосредственно в жидком кристалле и посмотреть, как будут изменяться оптические свойства такого раствора под действием приложенного напряжения. Ну что же, давайте попробуем. Краситель искать не придется — возьмем обычные фиолетовые чернила, которые представляют собой раствор красителя «кристаллического фиолетового» в воде. А жидкий кристалл можно купить в магазине химических реактивов. Допустим, что нам повезло, и мы имеем вещество, являющееся нематиком при обычной (комнатной) температуре. Например, это может быть соединение, сокращенно обозначаемое четырьмя заглавными буквами МББА в соответствии с его очень строгим и очень длинным химическим наименованием. При температурах от 21 до 47 °С оно и является нематиком. На рис. 47 приведена схема строения молекулы этого вещества и модель, сделанная с помощью специального конструктора, очень полезного для взрослых химиков и биологов.

Так вот, если мы попытаемся влить чернила в МББА, у нас ничего хорошего не получится, водный раствор красителя будет просто находиться на поверхности жидкого кристалла. Если же взять порошок того же красителя и насыпать в МББА, он тотчас же опустится на дно пробирки и останется там навсегда.

В чем же здесь дело? Дело в том, что растворитель и растворяемое вещество должны подходить друг другу по строению своих молекул. При этом под строением пони-

мается как их геометрическая форма, так и расположение в них электрических зарядов. Из рис. 47 видно, что для молекулы жидкого кристалла характерна удлинённая форма. Обратите внимание на то, что такая форма задается скелетом из двух шестиугольников, связанных между собой азометиновым ($-\text{CH}=\text{N}-$) мостиком. Это

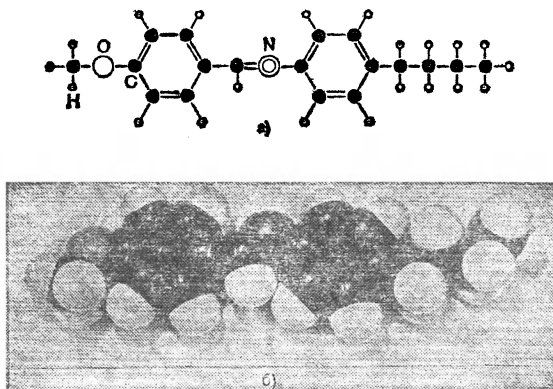


Рис. 47. Химическая формула (а) и модель (б) молекулы МББА.

бензольные кольца, состоящие из шести атомов углерода каждое. Углерод имеет четыре валентных электрона, с помощью которых он образует химические связи с другими атомами. Связи обозначаются черточками, и от каждого атома углерода в любой химической формуле должно отходить ровно четыре черточки (рис. 47, а). При этом со своим ближайшим соседом атом может поделиться одним, двумя или даже тремя электронами, т. е. установить с этим соседом одиночную, двойную или тройную связь. В бензольных кольцах, если двигаться по их периметру, одиночные и двойные связи чередуются. При этом каждый атом углерода прикрыт от внешней среды одним атомом водорода.

У молекулы МББА имеются, кроме того, два очень подвижных «хвостика». Слева стоит метокси- $(\text{CH}_3\text{O}-)$ группа, а справа особенно гибкая бутильная (C_4H_9-) группа. Эти хвостики не несут заряда и не любят соседства с молекулами воды, имеющими большие электрические диполи. Правильнее будет сказать, что вода не любит с ними соседства, так как молекулам воды гораздо

выгоднее соседствовать друг с другом. Притягивающиеся друг к другу диполи воды образуют при этом некоторое подобие подвижной кристаллической решетки, в которой молекулы не зафиксированы на своих местах, но все-таки достаточно тесно связаны друг с другом. В такую тесную «решетку» незаряженная молекула-«гость» войти не может, ее туда просто не впускают «хозяева».

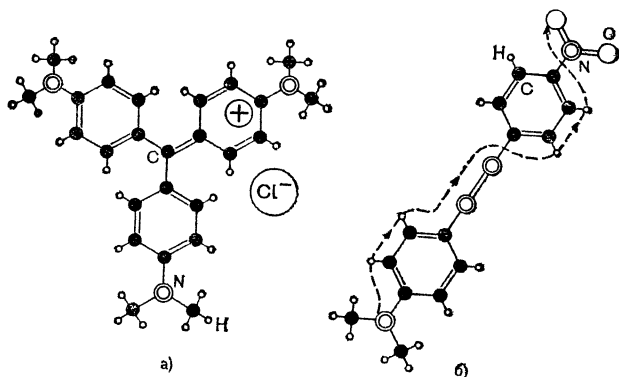


Рис. 48. Химическое строение неподходящей (а) и подходящей (б) молекулы-гостя для жидкого кристалла типа МББА.

Красители, существующие в форме заряженных ионов, могут растворяться в воде, так как им с помощью кулоновских сил удастся подстроиться к водной «решетке». Однако эти красители плохо растворяются в органических растворителях, в том числе и в жидких кристаллах типа МББА. Как раз таким красителем и является «кристаллический фиолетовый» (рис. 48, а). Молекула этого красителя содержит три бензольных кольца, немного развернутых из плоскости рисунка и образующих «пропеллер». При этом с молекулы красителя снят один электрон и отдан хлору, так что отрицательный ион хлора может плавать в водном растворе совершенно независимо от оставшегося положительного иона красителя. Но это только в водном. Если же краситель попытаться растворить в жидком кристалле, молекулы которого обладают небольшими постоянными диполями, ионы не образуются, так как кулоновские силы, действующие со стороны растворителя, оказываются недостаточными, чтобы разлучить ионную пару. В этом случае краситель вместе с атомами хлора «предпочитает» остаться в виде

твердых кристалликов, чем и объясняется неудача нашей первой легкомысленной попытки. Но зато этот пример нам подсказывает, что краситель к жидкому кристаллу нужно подбирать, исходя из принципа родственности. В гостях у родственников мы часто чувствуем себя как дома; примерно так обстоит дело и с красителями в жидком кристалле.

В жидких кристаллах хорошо растворяются вещества, молекулы которых содержат в своей основе бензольные кольца и подвижные концевые группы, например, краситель К1, формула которого показана на рис. 48, б. Бензольные кольца в нем соединены азо- $(-N=N-)$ мостиком, а слева и справа стоят дипольные диметиламино- $(N(CH_3)_2)$ и нитро- (NO_2) группы. В целом же молекула электрически нейтральна, и краситель не является ионным.

Родственность в строении К1 и МББА бросается в глаза сразу же. Неудивительно поэтому, что краситель К1 не только легко растворяется, но его молекулы легко вписываются в молекулярную упаковку МББА, так что и молекулы-гости (К1) оказываются ориентированы точно так же, как и молекулы хозяина (МББА) (рис. 49). Между прочим, сам краситель в отдельности плавится при

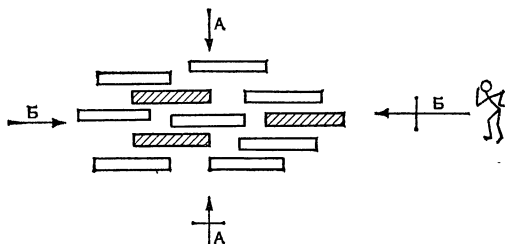


Рис. 49. Молекулы красителя (заштрихованы) ориентируются молекулами нематика.

высокой температуре, переходя непосредственно в обычную жидкость и не образуя жидкого кристалла. Это происходит из-за особого вида его концевых групп.

Вообще законно поставить вопрос: почему при похожем молекулярном строении МББА совершенно бесцветен, а К1 является красителем, интенсивно поглощающим синий и зеленый свет и свободно пропускающим красный. Это очень интересная и большая проблема, лежащая в основе целого научного направления физики

и химии красителей, которое разрабатывали, в частности, выдающиеся советские ученые академики С. И. Вавилов и А. Н. Теренин. Поговорим немного на эту тему. Это позволит нам лучше разобраться в некоторых интересных практических приложениях.

Все органические молекулы поглощают электромагнитное излучение, но, как правило, в ультрафиолетовой области спектра, где световые кванты обладают наибольшей энергией. Однако большая группа веществ поглощает более длинноволновое излучение, а именно, свет видимого диапазона. Вот эти-то вещества и есть красители. А какой должна быть молекула, чтобы поглощать длинноволновый свет?

Свет хорошо поглощается в том случае, если он может заставить электроны молекулы колебаться с большой амплитудой на световой частоте. Мы сейчас хотим, чтобы хорошо поглощался сравнительно низкочастотный свет. Значит, электроны молекулы должны легко раскачиваться на низких частотах. Каждый из нас знает, что на больших качелях частота колебаний невелика, а вся прелесть качаний — в большой амплитуде. Так же обстоит дело и с электронами в молекуле. Для низкочастотных колебаний нужно, чтобы электрическое поле световой волны сравнительно свободно могло перемещать электроны на большие расстояния. Следовательно, строение молекулы красителя должно быть таким, чтобы обеспечить легкость перемещения электронов от одного конца молекулы к другому. Эта легкость достигается в том случае, если вдоль всего молекулярного скелета имеет место строгое чередование двойных и одиночных химических связей (рис. 48, б, штриховая линия), так как лишний электрон с двойной связи может свободно перескакивать на соседнюю одиночную. Цепочку одиночных и двойных связей можно в какой-то мере уподобить рельсам для электронов. Кроме этого, желательно, чтобы концевые группы имели сравнительно большие разноименные заряды.

Роль этих концевых групп можно понять, если представить себе электроны в виде маленьких вагонеток на рельсах. В отсутствие заряженных групп вагонетки по одной равномерно расставлены вдоль рельсового пути. Разноименно заряженные концевые группы сталкивают электроны-вагонетки вдоль рельсов в один конец, образуя целый состав из вагонеток. Свет в этом случае играет роль локомотива,двигающего электроны-

вагонетки вдоль рельсов. Понятно, что, если электроны собраны в состав, а не рассыпаны равномерно вдоль всего пути, амплитуда их собственных качаний будет больше (от самого левого до самого правого конца дороги), а соответствующая частота ниже. Всем этим условиям как раз и удовлетворяет молекула K1, в которой группы NO_2 и $(\text{CH}_3)_2\text{N}$ несут соответственно отрицательный и положительный заряды.

В МББА, как и в K1, есть чередование двойных и одинокых связей, но нет сильно заряженных концевых групп, и в результате эта молекула чуть-чуть не дотягивает до того, чтобы быть красителем (она лишь немного поглощает синий свет, из-за чего вещество на просвет выглядит слегка желтоватым).

Чтобы электроны можно было перемещать как по рельсам, поле световой волны должно быть направлено вдоль молекулярного скелета (не может же локомотив двигать состав поперек рельсов). Значит, простая молекула красителя поглощает только тот луч света, который падает перпендикулярно ее длинной оси. Бывают и разветвленные молекулы, которые имеют две или более «рельсовые ветки», направленные под углом друг к другу и поглощающие свет разной поляризации и цвета.

Мы пока говорили о поглощении света электронами, но есть и другие поглотители. Например, тяжелые атомы кислорода могут колебаться по отношению к атому азота в нитрогруппе ($-\text{NO}_2$), и эти колебания поглощают очень длинноволновый свет из инфракрасного диапазона. Вообще, все колебания атомных групп молекулы имеют, как радиостанции в эфире, свои характерные диапазоны поглощения инфракрасного излучения. И в этом случае поле волны должно быть направлено вдоль соответствующих химических связей.

Теперь у нас уже есть все основания рассмотреть оптические свойства раствора красителя, условно показанного на рис. 49. Если видимый свет будет падать на раствор сверху или снизу (лучи А) и его поле будет направлено вдоль главной электронной дороги красителя, то свет поглощается. Лучи, идущие справа или слева (лучи Б), поглощаться не будут (инфракрасные лучи при этом могут поглощаться, например, на CN -связях в бензольных кольцах). Поляризованные лучи видимого света, у которых электрическое поле перпендикулярно плоскости рисунка, не будут поглощаться даже в том

случае, если они падают сверху или снизу. Разобравшись со свойствами такой оптической системы, можно предложить целую серию элегантных опытов с молекулами красителя.

Во-первых, задав ориентацию красителя с помощью жидкого кристалла и направляя на раствор свет под различными углами, можно снять карту электронных и колебательных «рельсовых путей» в этой молекуле. Это очень эффективный способ изучения строения сложных молекул. Кроме того, с помощью мощного лазерного инфракрасного света можно точно «стрелять» по цели, т. е. раскачивать полем именно ту химическую связь, которую мы хотим разорвать и таким образом провести фотохимический развал молекулы. Такие же фотохимические реакции можно осуществить и с помощью видимого и ультрафиолетового света, раскачивая теперь уже не атомы, а электроны. Во-вторых, можно использовать эффект Фредерикса для того, чтобы поворачивать молекулы красителя желаемым образом по отношению к световому лучу.

Рассмотрим, например, такой опыт. В стеклянной кювете с прозрачными электродами находится жидкий кристалл с растворенным в нем красителем типа K1 (рис. 50, а). Кристалл, а следовательно и краситель,

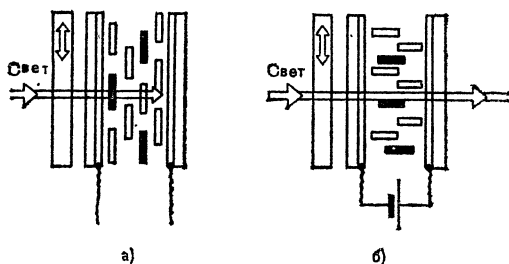


Рис. 50. Иллюстрация эффекта «гость — хозяин».
а) Поле выключено, б) поле включено.

ориентированы вертикально, например, с помощью полировки поверхностей электродов. Свет имеет вертикальную поляризацию, так что поле направлено вдоль длинных осей молекул красителя, и поэтому поглощается красителем. Монохроматический свет с длиной волны, соответствующей области поглощения красителя, при достаточной толщине слоя будет поглощаться полностью.

Теперь мы хотели бы включить поле и переориентировать жидкий кристалл так, чтобы его молекулы, а вместе с ними и молекулы красителя, выстроились вдоль светового луча. Это получится в том случае, если вдоль оси молекулы жидкого кристалла располагается большой диполь. Например, если у молекулы МББА (рис. 47) заменить бутильный хвост на нитрильную группу ($-\text{C}\equiv\text{N}$), мы получим как раз такой жидкий кристалл, какой нам нужен. Включение поля приведет к эффекту Фредерикса, и краситель приобретет ориентацию, показанную на рис. 50, б.

Таким образом, мы получили световой затвор, перекрывающий или пропускающий наш луч. Соответствующий электрооптический эффект принято называть эффектом «гость — хозяин».

Пусть имеется пучок белого света с направлением колебаний таким же, как на рис. 50. Такой пучок частично пройдет сквозь затвор даже в отсутствие поля. Краситель «вырежет» из видимого спектра свой участок (например, синий), и на выходе будет световой пучок с урезанным спектром, т. е. окрашенный (в данном случае красный). Спектральный состав прошедшего света можно исследовать с помощью спектрофотометра.

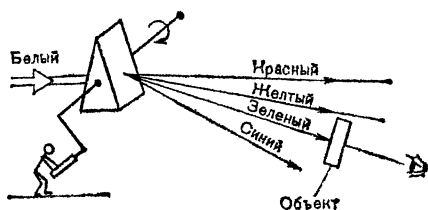


Рис. 51. Примерно так работает спектрофотометр.

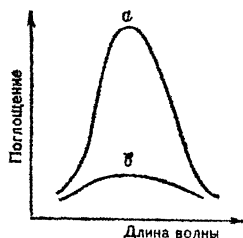


Рис. 52. Спектры поглощения красителя в жидком кристалле.

Спектрофотометр — это оптический прибор, основным элементом которого является стеклянная или кварцевая призма, разлагающая белый свет на все цвета радуги. Кроме того, в нем имеется устройство (фотоприемник), регистрирующее интенсивность цветных лучей, прошедших сквозь исследуемый объект (рис. 51). В хорошем спектрофотометре интенсивность лучей, прошедших сквозь объект, автоматически сравнивается с ин-

тенсивностью исходных лучей. В результате способность объекта поглощать лучи автоматически регистрируется на бумаге в зависимости от длины волны света, и эта кривая называется спектром поглощения объекта, пример которого приведен на рис. 52. Если спектрофотометр записывает долю света, поглощенного красителем, то в отсутствие поля будет видна характерная полоса поглощения (кривая *а*), а при включенном поле она практически исчезает (кривая *б*).

При использовании белого света затвор выполняет функции светофильтра, управляемого электрическим полем. Если в жидком кристалле растворить более сложный краситель или даже несколько разных, то можно заставить поглощаться свет с разными направлениями колебаний, да еще и в разных участках спектра. Тогда, при наложении внешнего напряжения на жидкий кристалл, мы будем переключать цвет прошедшего света, а не просто менять его интенсивность. Сейчас есть такие красители, которые позволяют переключать цвет с желтого на сиреневый или с красного на фиолетовый. При этом добавок можно еще и обойтись без поляризатора, т. е. работать с естественным белым светом.

Нетрудно догадаться, что, используя эффект «гость — хозяин», можно удовлетворить эстетические потребности широкого круга людей, предпочитающих индикаторы разных цветов в циферблатах электронных часов и калькуляторов, приборных щитках автомобилей и в измерительной технике. Кроме того, цвет и сам по себе несет информацию, иногда жизненно важную, как это может быть в случае устройств аварийной сигнализации. А если кто-либо из читателей захочет сконструировать цветной телевизионный экран на жидких кристаллах, вспомните о «гостях в чужом доме».

§ 5. Жидкие кристаллы и голография

О голографии уже много говорилось, в том числе и в популярной литературе. Поэтому здесь мы ограничимся только самым кратким изложением того, что имеет отношение к теме нашей книги.

Интригующее греческое слово «голография» переводится весьма прозаически как «полная запись». Что при этом имеется в виду? Посмотрим сначала, как регистрируется изображение какого-либо предмета на обычную

фотопластинку или фото пленку. Объектив формирует изображение предмета на пленке. В фотоэмульсии идет химическая реакция, которая при последующем проявлении приводит к почернению пленки в тех местах, где она была освещена. Существенно, что степень почернения определяется только интенсивностью света, т. е. квадратом амплитуды поля световой волны.

Направление вектора электрического поля волны оказывается при этом несущественным, так как химическая реакция в фотоэмульсии к нему нечувствительна. За быстрыми изменениями поля световой волны медлительная химическая реакция тоже не успевает следить, и потому для обычного метода фотографии эффекты запаздывания световых волн, которые мы рассмотрели в гл. I на примере с цепочкой спортсменов, оказываются несущественными.

Между тем, запаздывание световой волны также несет информацию о том предмете, который сам испускает свет или рассеивает лучи постороннего источника. Например, по нему можно легко установить расстояние до той точки, из которой луч вышел. Но как измерить запаздывание луча? Оказывается, это можно сделать, если использовать дополнительный световой пучок или, как говорят, эталонный луч, испущенный тем же источником, которым освещается интересующий нас предмет. Лучше всего, если это будет лазерный луч. На рис. 53 эталонный луч

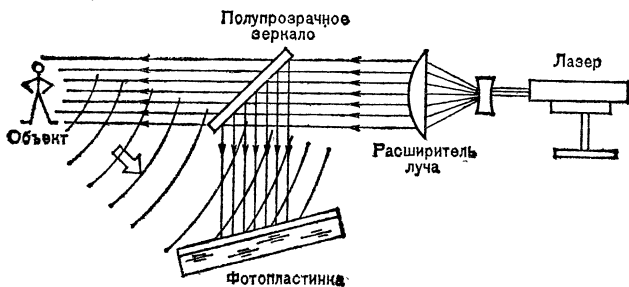


Рис. 53. Запись голограммы.

получен прямым отражением от полупрозрачного зеркала. Мы можем сложить два луча (эталонный и сигнальный), и они, как и всякие другие волны, будут интерферировать друг с другом. Об этом явлении мы рассказывали в § 4 гл. I. Картина распределения интенсивности интерферирующих лучей зависит от запаздыва-

ния сигнального луча по отношению к эталонному. Остается лишь обычным образом записать интерференционную картину на фотопленку, а еще лучше — на прозрачную фотопластинку (это важно для последующего процесса считывания изображения). Итак, результирующая запись несет информацию как об амплитуде сигнального луча (от этого зависит средняя степень почернения фотоэмульсин), так и о его запаздывании. Мы получили полную запись — голограмму.

Голограммы обладают замечательными свойствами. Во-первых, они получаются без использования объектива, и их внешний вид не имеет ничего общего с объектом. Информация об объекте находится в скрытой форме — в виде интерференционной картины. При этом каждый участок пластинки несет информацию об объекте в целом. Во-вторых, вы можете восстановить исходное изображение объекта, если будете рассматривать голограмму в лучах лазера (не обязательно с той же длиной волны, что и при записи). При этом, если вы разобьете стеклянную пластинку, не следует слишком огорчаться: ведь каждый ее осколок несет информацию обо всем объекте в целом. Просвечивая этот осколок лучом лазера, вы сможете восстановить контуры объекта; качество при этом будет, конечно, хуже, утратится информация о тонких деталях предмета.

Известно, что голограммы позволяют получать объемные изображения предметов. Но для вычислительной техники более существенными являются другие особенности голографической записи. Во-первых, она является очень компактной (на пластинку размером 10×10 см² можно записать более 10 миллиардов сведений, имеющих простейшую форму типа ответа «да» или «нет»). Во-вторых, голографическая запись очень помехоустойчива. Например, если вы написали другу шифровку из тысячи цифр на обычном листе бумаги и случайно оторвали у листа уголок с десятью цифрами, где как раз было указано место вашей встречи, то эта встреча вряд ли состоится. Если же та же шифровка была записана на голограмме, то утрата такого же небольшого участка означает лишь 1%-ное ухудшение качества записи, и если исходная запись была высококачественной, ваша встреча состоится. Третьим преимуществом голографической записи является высокая скорость ее считывания с помощью современных фотоэлектрических приборов.

Благодаря этим преимуществам голографическая запись информации используется в вычислительной технике (устройства оптической памяти). Схема записи, в принципе, такая же, как на рис. 53, только вместо объемного предмета используется записываемый образ в виде текста, картины, графика и т. п. Такой объект называется транспарантом (от английского слова transparent — прозрачный), и наиболее простым транспарантом является обычный слайд, освещаемый лазерным лучом. Однако процесс изготовления обычных слайдов, как вы можете догадаться, плохо совмещается со всей сверхскоростной деятельностью вычислительной машины. Кроме того, затруднительно осуществлять их быструю механическую смену.

Вот здесь и пора вспомнить о жидких кристаллах. С их помощью можно формировать довольно сложные образы, а потом их «списывать», или, лучше сказать, «считывать» лазерным лучом с одновременной записью в голографическую память. Жидкокристаллический транспарант играет роль преобразователя электрических сигналов, имеющих в вычислительной машине, в оптический образ, считываемый лазерным светом. При этом наибольшее распространение получили два вида жидкокристаллических транспарантов.

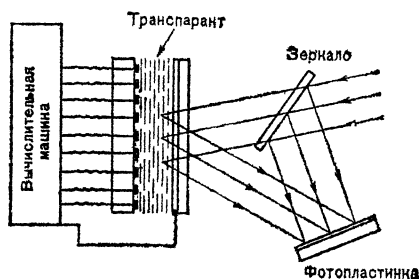


Рис. 54. Запись голограммы с жидкокристаллического транспаранта.

В первом варианте оптическая картина на жидком кристалле формируется непосредственно электрическим сигналом, идущим с машины. Простейшая модель показана на рис. 54. Слой жидкого кристалла расположен, как обычно, между двумя стеклянными пластинами с электродами. Один (передний) электрод — прозрачный сплошной, другой (задний) представляет собой мозаику

из большого числа металлических точек, к каждой из которых подведена отдельная проволочка. Проволочки, идущие к вычислительной машине, показаны на рис. 54. Подводить такие проволочки — очень тонкая работа, но находятся мастера, способные сделать до 1000 таких контактов и более на площади в несколько квадратных сантиметров. Остальное — очевидно. На каждую точку подводится соответствующий сигнал по отношению к общему прозрачному электроду, и сквозь верхнее стекло можно любоваться изображением текста, рисунка и т. п. Используя лазер, можно записать голограмму, и через доли секунды повторить весь процесс уже с новым образом и, разумеется, с использованием нового участка фотопластины.

Мозаичные транспаранты сложны в изготовлении, и поэтому чаще всего используют другую конструкцию в виде системы пересекающихся вертикальных и горизонтальных электрических шин. Процесс записи голограммы остается прежним, а принцип формирования образов на таких (матричных) системах мы рассмотрим в следующем параграфе.

В другом варианте оптическая картина сначала формируется на электроннолучевой трубке точно так же, как в домашнем телевизоре. Но с телевизора изображение нельзя списать сразу в голограмму, так как свет люминесцирующего экрана не подходит для этой цели (он не

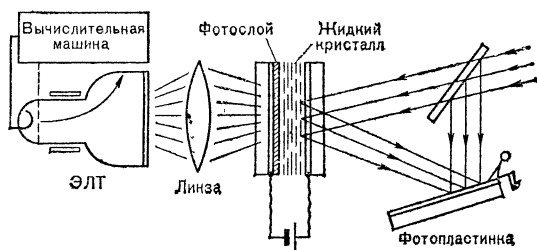


Рис. 55. Запись голограммы с электроннолучевой трубки (ЭЛТ).

является монохроматическим и не имеет четкой фазы). Поэтому опять используют жидкокристаллический транспарант, изображение на котором создается с помощью фотополупроводникового слоя, чувствительного к свету электроннолучевой трубки. Схема такого транспаранта показана на рис. 55.

В этой схеме свет с экрана трубки с помощью линзы проектируется на фоточувствительный слой, электрическое сопротивление которого уменьшается при освещении. При этом фотопроводник и жидкий кристалл присоединены последовательно к одному общему источнику напряжения. В темноте фотослой имеет высокое сопротивление, и все напряжение падает на нем. При освещении ярким участкам картинки на трубке соответствуют яркие участки изображения на фотослое, и в этих местах сопротивление фотослоя уменьшается. Напряжение батареи сразу же перераспределяется в пользу жидкого кристалла. Жидкий кристалл реагирует на приложение поля, изменяя свою ориентацию. Это изменяет его оптические свойства по отношению к падающему лазерному лучу, который меняет свою фазу в соответствии с записываемой картиной. Таким образом, свет от трубки (обычно синий) является записывающим для транспаранта, а свет лазера (обычно красный) является считывающим для транспаранта и в то же время записывающим для голограммы.

Практически все устройства голографической памяти, конструируемые в последнее время, используют в транспарантах жидкие кристаллы. Другие электрооптические материалы пока не выдерживают конкуренции; устройства, их использующие, оказываются более сложными и энергоемкими.

§ 6. Карманный телевизор

Нет нужды говорить современному человеку о пользе телевидения; каждый из нас провел у телевизора заметную часть своей жизни. И каждый знает, что чем больше экран, тем лучше. А вот от объема телевизора пользы нет никакой. И в то же время уменьшить его чрезвычайно трудно, несмотря на все успехи микроминиатюризации современных радиосхем. Виновником этого является вакуумная электроннолучевая трубка, которую никак не удается сделать плоской. Кроме того, трубка требует высоковольтного источника напряжения. Между тем, портативные телевизоры нужны не только для загородных пикников. Вы можете легко представить себе сотрудника уголовного розыска, которому из диспетчерского пункта показывают интересующую его фотографию, вместо того чтобы долго и путано

объяснять приметы соответствующего лица с помощью голоса. На экране портативного телевизионного приемника можно, например, указать необходимые географические координаты объекта, скажем, геологу или командиру воинской части. Малогабаритная телевизионная система может служить также удобным видеотелефоном и т. п.

Чтобы телевизор был портативным, ему необходимо иметь плоский экран, управляемый низкими электрическими напряжениями (порядка нескольких вольт), получаемыми с интегральных схем. Этим требованиям, в принципе, удовлетворяют экраны, использующие жидкие кристаллы. Экран может работать, например, с помощью знакомого нам эффекта Фредерикса.

Чтобы понять принцип действия жидкокристаллического экрана, сначала вспомним, как работает обычная телевизионная трубка. В ней пучок электронов отклоняется по горизонтали и вертикали с помощью электромагнитов, в результате чего луч последовательно прочерчивает по экрану строку за строкой, формируя кадр. На экран изнутри нанесен слой вещества, светящегося под действием электронного луча (люминофор). Телевизионный сигнал управляет величиной тока, переносимого электронным лучом, и, следовательно, яркостью свечения люминесцентного экрана. Строка чертится слева направо, а обратный ход луча гасится специальным импульсом. Человеческий глаз обладает инерционностью порядка 40 мс, и люминофор для экрана подобран так, чтобы он светился в течение 40 мс после ухода электронного луча с данной точки. Тогда глаз не замечает движения луча по экрану, а воспринимает все изображение в целом.

Итак, если весь кадр записывается за 40 мс, то глаз не замечает мелькания кадров. Но экран состоит из 625 строк (это телевизионный стандарт). Если 40 мс разделить на 625, то получим примерно 0,06 мс или 60 мкс. Значит, строка запишется за это время. Но экран приблизительно квадратный, и в одной строке «укладываются» те же 600 «элементов» изображения. Значит, время взаимодействия электронного луча с каждым элементом равно $60/600$, т. е. 0,1 мкс. За это короткое время люминофор успевает прийти в столь сильное возбуждение, что после ухода луча он высвечивается в течение всего времени кадра. Это значит, люминофор имеет

хорошую «память», отношение времени его выключения к времени включения составляет $T_{\text{выкл}}/T_{\text{вкл}} = 600 \times 600 = 360\,000$.

У жидких кристаллов, к сожалению, такой памяти нет. Поэтому их возбуждают не поэлементно, а построчно. Для этого делается система пересекающихся электродов, показанная на рис. 56, а. Она называется матричной, поскольку похожа на алгебраическую матрицу, т. е.

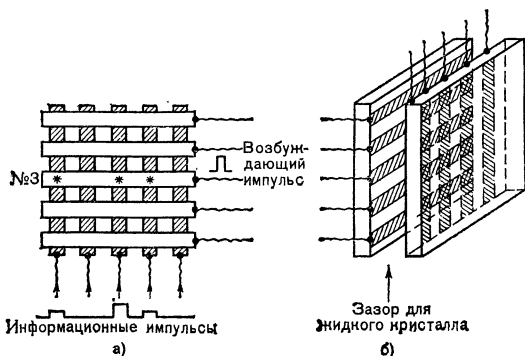


Рис. 56. Устройство электродов (а) и конструкция матричного экрана (б).

прямоугольную таблицу математических символов. Матрица состоит из X строк и Y столбцов. Ее число элементов равно произведению XY , хотя число выводов составляет всего лишь сумму $X+Y$. Обратите внимание, что при большом числе элементов, например, при $X=Y=100$, мы имеем всего 200 выводов вместо 10 000, как это было бы в случае мозаичного экрана. В этом единственное достоинство матричной системы, но зато какое!

Стекла, как всегда, складываются (электродами внутрь) в бутербродную конструкцию с зазором шириной в несколько микрометров, фиксируемым специальными прокладками. Жидкий кристалл помещается в зазор (рис. 56, б). Если стекла были предварительно обработаны для получения закрученной ориентации, мы можем наблюдать описанный ранее эффект Фредерикса на любом из элементов матрицы, куда будет подано напряжение. Для построчного возбуждения на одну из горизонтальных шин (например, № 3) подается возбуждающий импульс вполне определенной амплитуды (рис. 56, а), а на



Рис. 57. Фотография изображения, полученного с жидкокристаллического телевизионного экрана.

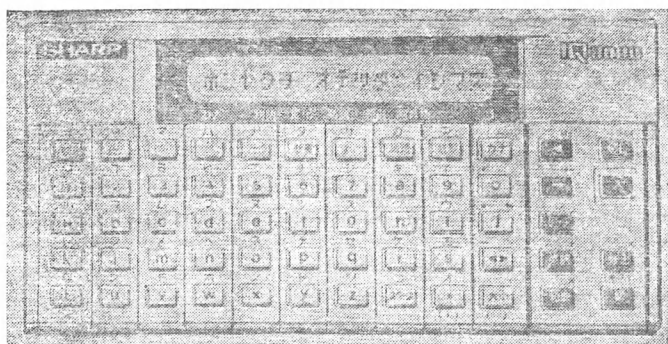


Рис. 58. Электронный словарь, выпускаемый одной из японских фирм.

все вертикальные шины одновременно — информационные импульсы, несущие сведения об изображениях. В результате все элементы строки № 3 загораются одновременно (показано звездочками), но с различной яркостью, заданной амплитудами информационных импульсов. Затем возбуждающий импульс подается на 4-ю строку, и процесс повторяется. Если мы хотим получить стандартный кадр из 600 строк, мы обязаны записать строку за 60 мкс и сохранять эту запись в течение всего кадра. На такую память ($T_{\text{выкл}}/T_{\text{вкл}}=600$) у жидких кристаллов инерционности чуть-чуть не хватает, и сейчас идет активная научная работа по улучшению свойств соответствующих материалов. На сегодняшний день уже сделаны малогабаритные черно-белые телевизоры с плоскими экранами на жидких кристаллах, которые могут принимать обычные широкоэмитательные программы. Однако число строк и столбцов в этих экранах пока не достигает стандарта (120 вместо 600), хотя качество изображения вполне приемлемое.

Пример изображения, сфотографированного с такого жидкокристаллического экрана, показан на рис. 57. Фотография сделана французскими учеными из Гренобля, которым нельзя отказать в остроумии. Действительно, трудно определить, какие дефекты образа присущи самому Квазимодо, а какие внесены электроникой и конструкцией их экрана *).

Тот же принцип, что и в телевизионном экране, используется в сложных матричных экранах современных электронных словарей. На рис. 58 показан внешний вид такого устройства. У вас имеется миниатюрная вычислительная машинка, в памяти которой записана, например, вся информация, имеющаяся в большом англо-русском словаре. На компактной клавиатуре вы набираете русское слово и тотчас же видите его английский эквивалент на жидкокристаллическом экране. При наличии большой памяти электронный словарь может оперировать сразу

*) В настоящее время созданы (японскими фирмами) более совершенные модели портативных плоских телевизоров, в которых в качестве одного из электродов применяются непрозрачные полупроводниковые пластины с управляющими элементами, изготовленными по современной технологии интегральных схем. При этом используется эффект рассеяния света, о котором мы расскажем в § 3 гл. III.

с несколькими языками. Правда, японцам и китайцам не повезло: набирать на клавиатуре иероглифы — дело сложное, но и в этом случае конечный успех не вызывает сомнений. В перспективе же просматривается замена электронных словарей электронными переводчиками, когда на клавиатуре будут набираться не отдельные слова, а сразу целые предложения. А дальше остается только читать их, разумеется, с выражением и без всякого акцента!

СЮРПРИЗЫ КОНВЕКЦИИ

...Создание тайной бури,
Игралище глухой войны ...

Петр Вяземский

В гл. I мы говорили о течении обычной жидкости. Кроме того, мы уже понимаем разницу между обычной жидкостью и жидким кристаллом, который не так уж прост. Самое время теперь пофантазировать, а как будет выглядеть жидкокристаллический «поток»? Вопрос этот не из очень легких; по существу дела его можно разбить на два разных. Во-первых, надо бы прежде всего понять, как скорость течения зависит от строения текущего вещества, а во-вторых, каковы будут оптические характеристики текущей жидкости, если эта жидкость — жидкий кристалл. Займемся сначала первой проблемой.

§ 1. Связана ли скорость течения с оптической осью?

Сказав да, мы правильно ответим на этот вопрос. Но следующие вопросы окажутся потруднее: а почему связана и как именно? Более 40 лет назад советский физик, ныне член-корреспондент Академии наук СССР В. Н. Цветков поставил очень простой на вид эксперимент, суть которого ясна из рис. 59. Измерялась (просто с помощью секундомера) скорость вытекания жидкого кристалла из круглого капилляра, помещенного в зазор довольно сильного магнита. Исследовалось вещество, молекула которого изображена на рис. 9, а. Это классический пара-азоксианизол (сокращенно ПАА), сыгравший в физике жидких кристаллов ту же роль, что, например, германий в полупроводниковой технике или муха-дрозофила в генетике.

В. Н. Цветков заметил, что при включении магнитного поля скорость вытекания жидкого кристалла замедляется примерно вдвое, а это равносильно тому, что вдвое увеличилась вязкость жидкости. Специально по-

ставленные эксперименты показали, что магнитное поле, как и электрическое, ориентирует молекулы жидкого кристалла, причем выстраивает молекулярные оси параллельно своему направлению. Значит, нам остается объяснить, почему же вязкость зависит от направления ориентации молекул.

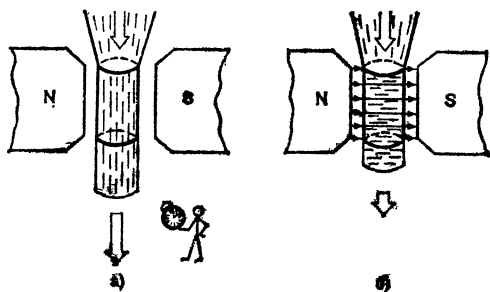


Рис. 59. Вытекание нематика из капилляра в отсутствие магнитного поля (а) и при включении поля (б).

Вспомним о том, что вязкость — это внутреннее молекулярное трение в жидкости. Давайте вернемся к уже знакомому нам случаю с движущейся верхней пластинкой и неподвижной нижней (рис. 3). Если два соседних слоя жидкости текут с разными скоростями, то трение зависит от того, насколько легко молекулы медленного слоя проскакивают в быстрый и наоборот. А теперь посмотрим на рис. 60 и сообразим, в каком случае молекулам легче из медленного слоя ворваться в быстрый, в случае (а) или (б)? Кто забивал гвозди в доску молотком, тот знает, что острием гвоздь забить легче, чем просто положив его на доску. Нечто подобное имеет место и в нашем случае: конечно, молекулам легче продвигаться в направлении вдоль их длинных осей (см. стрелки на рис. 60, б), чем в поперечном направлении (рис. 60, а). В результате торможение быстрых молекул идет гораздо сильнее в случае (б), чем в случае (а), а для опыта В. Н. Цветкова — при вытекании нематика с включенным полем. Так включение поля приводит к увеличению молекулярного трения, т. е. к увеличению вязкости.

Но откуда известно, что в отсутствие поля (рис. 59, а) оси молекул выстраиваются именно вдоль оси капилляра? На это указывает наш же собственный жизненный опыт. Вообразим, что мы наблюдаем лесосплав на узкой речке.

Можно ли себе представить ситуацию, чтобы стволы деревьев вблизи берегаплыли, оставаясь перпендикулярными потоку? Разумеется, они развернутся так, чтобы перекрыть как можно меньший перепад скоростей, т. е. вдоль по течению. В этом случае на ствол будет действовать минимальный вращающий момент сил. То же самое можно сказать о продолговатых молекулах текущего

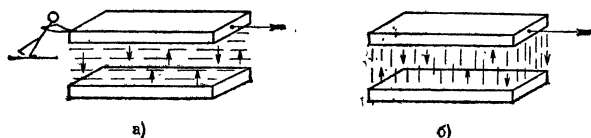


Рис. 60. Торможение молекул, увлеченных движущейся верхней пластинкой, сильнее в случае (б), чем в (а).

жидкого кристалла. Поэтому в отсутствие поля ориентация молекул в капилляре будет именно такой, какая изображена на рис. 59, а, если, конечно, скорость вытекания не слишком мала и не слишком велика. О высоких скоростях мы поговорим чуть позже. А пока запомним: скорость течения жидкого кристалла зависит от ориентации его молекул, т. е. его оптической оси — это раз, течение ориентирует его молекулы, а значит, и оптическую ось — это два. В разных условиях эти явления могут проявляться порознь, а могут и оба одновременно.

§ 2. Ориентационный орнамент

Вот теперь самое время опять поговорить о конвекции. Мы познакомились с этим явлением при рассмотрении рис. 5, который иллюстрировал классический эксперимент, выполненный в начале этого века французским ученым Бенаром. Бенар наблюдал ячеистое движение жидкости в том случае, если подогревал слой снизу. При подогреве сверху движения не возникало, откуда сразу было ясно, что в этом явлении важную роль играет поле тяжести.

Если мы используем обычную жидкость, то образование ячеек, показанных на рис. 5, довольно трудно уловить глазом: ведь глаз может видеть только оптические неоднородности в жидкости, а они в этом случае выражены не очень явно. Дело в том, что различие в коэффициенте преломления между теплыми и холодными участками

жидкости обусловлено различием в плотности жидкости, а плотность жидкости не очень сильно зависит от температуры. Да и сама разница в температуре между теплыми и холодными участками совсем невелика — какие-то доли градуса. Бенар в своих опытах использовал весьма экзотическую жидкость — спермацет, встречающуюся лишь

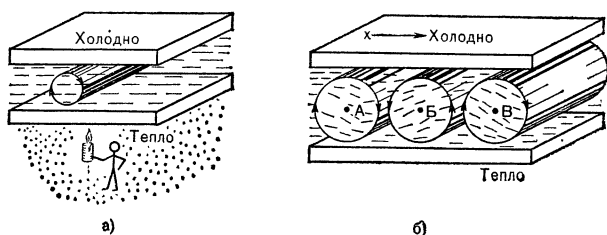


Рис. 61. Образование вихревого «рулончика» при подогреве слоя жидкого кристалла снизу (а) и изменение молекулярной ориентации в центрах «рулончиков» (б).

в теле китов, да и то не всех, а только кашалотов (эта жидкость практически не испаряется во время опытов). Но для нас это все равно простая жидкость, так как она не обладает порядком в ориентации молекулярных осей.

А к чему приведет наличие такого порядка? Давайте призовем на помощь воображение. Пусть мы имеем жидкий кристалл с молекулами, ориентированными так, как показано на рис. 61, а. Тогда все, что было сказано о простой жидкости, остается в силе; при определенной разнице температур между нижней и верхней поверхностями слоя жидкого кристалла начнется конвективное вихревое движение жидкости. Один из таких вихрей в виде длинного «рулончика» показан на рис. 61, а, так сказать, в момент его рождения, пока молекулы еще сохраняют исходную ориентацию. Но посмотрим, что же «ощущают» молекулы в точке А (рис. 61, б). Да то же самое, что стволы, попавшие в речной водоворот, — вращающий момент сил со стороны вихря. Направление этого момента зависит от направления вращения вихря, поэтому в точках А, Б, В поворот молекул — стволов происходит в разные стороны. Ну хорошо, почему бы и дальше молекулам не продолжить свое вращение, сделав пару кувыркков, как это сделали бы стволы в водовороте? А потому, что здесь кончается простая аналогия. Не будем забывать, что «все-таки нематик упругий». Действительно, у стенок

жидкость не движется, и там молекулярная ориентация не изменилась. Значит, появилось искажение ориентационной картины в целом, которое требует затраты упругой энергии. При больших углах отклонения молекул в точках А, Б, В и т. д. этот упругий момент может оказать серьезное сопротивление вращающему моменту, обусловленному движением жидкости и молекулярным трением. В результате, для заданной разности температур между нижней и верхней поверхностями, мы получим вполне стабильную молекулярную ориентацию, показанную на рис. 61, б. При этом особенно изумляет то, что молекулы жидкого кристалла, принимая участие в круговом движении по траекториям вихрей, все время остаются ориентированными так, как показано на рисунке.

Разумеется, возникшая молекулярная ориентация не замедлит проявить себя в оптических свойствах слоя. Давайте пропустим световой луч сквозь стеклянные пластинки, ограничивающие слой. Тогда для поляризованного света, имеющего колеблющийся вектор E в плоскости рисунка, показатель преломления окажется зависимым от расстояния вдоль оси x (рис. 61, б). Это происходит потому, что молекула, находящаяся под углом к полю световой волны, не так сильно с ним взаимодействует, как та молекула, ось которой лежит вдоль направления поля.

Более того, показатель преломления не просто зависит от x , а является периодической функцией этой координаты. Значит, система «рулончиков» ведет себя как

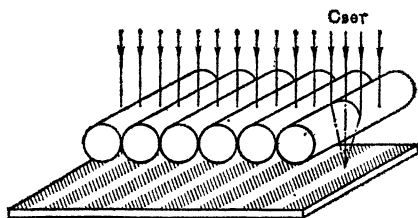


Рис. 62. При прохождении света через обойму «рулончиков» возникает оптическая картина в виде чередующихся темных и светлых полос.

обойма цилиндрических линз, уложенных по соседству друг с другом (рис. 62). Проходя через такую обойму, лучи света фокусируются в тонкие светлые линии, между которыми находятся темные участки.

Рассматривая вихревые «рулончики» в микроскоп, мы будем фактически видеть картину распределения молекул по ориентациям. Чередование темных и светлых линий отражает ориентационный узор или орнамент, возникший в жидкокристаллическом слое.

Какой же это орнамент, скажет скептик, если всего-навсего видно чередование каких-то полосок. Да, в этом случае орнамент очень прост, но ведь это следствие очень простой геометрии, выбранной нами специально, чтобы разъяснить суть дела. А на самом деле температурные перепады могут быть произвольны, конвективные потоки весьма причудливы, и столь же причудливыми окажутся ориентационные узоры, а значит, и оптические картины, выявляющие угловые распределения молекулярных осей.

Рассмотренная нами тепловая конвекция наиболее проста с физической точки зрения, да она и всем хорошо знакома по бытовому примеру циркуляции воздуха в помещении, вызванной расположением батареи парового отопления строго под холодными окнами (заметьте, как раз так, как в нашем опыте с пластинами). Но для тех, кто интересуется практическими приложениями жидких кристаллов, более интригующим окажется другой пример конвекции в нематике. Речь идет о конвекции, вызванной протеканием электрического тока через жидкий кристалл.

Но сначала поговорим о токе. Чтобы сквозь вещество шел ток, нужны свободные заряды. Жидкие кристаллы состоят из сложных, но в среднем электрически незаряженных органических молекул. Чтобы получить заряженную молекулу — ион, нужно, по крайней мере, оторвать от нее один электрон, или, наоборот, посадить лишний. Хотя это и не так легко сделать (на это нужны энергии порядка единиц электронвольт, что приблизительно эквивалентно нагреву вещества до 10 000 K), но все-таки такие ионы, как положительные, так и отрицательные, образуются. Чаще всего это происходит за счет потери или приобретения электрона примесями, имеющимися в жидком кристалле. Но даже, если бы вещество было сверхчистым, без единой чужеродной молекулы, все равно ионы рождались бы, например, за счет космического излучения или, что гораздо вероятнее, за счет ионизации молекул самого жидкого кристалла в области сильного электрического поля вблизи электродов.

Таким образом, будем считать, что ионы имеются (обычно в хорошо очищенных жидких кристаллах их пример-

но по одному на каждые 100 миллионов нейтральных молекул). При этом число положительных и отрицательных зарядов равно друг другу не только по всему образцу в целом, но, если на то нет специальных причин, — и в каждом произвольно выбранном малом объеме вещества. При выполнении этого условия электронейтральности

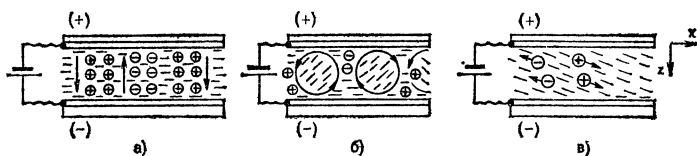


Рис. 63. Конвекция в электрическом поле.

а) Поле начинает двигать группы разделенных ионов; б) перемещение ионов вызывает вихревое движение жидкости и изменяет ориентацию молекул; в) нарушенная молекулярная ориентация является причиной разделения зарядов в поле.

получается выигрыш в электростатической энергии взаимодействия ионов. Но так бывает не всегда: могут обнаружиться причины, приводящие к нарушению нейтральности. Нам такой случай и интересен, так как мы опять хотим получить ориентационные картины, но теперь уже без использования температурных перепадов, а исключительно за счет внешнего электрического поля.

Обратимся к рис. 63, а и допустим, что мы с самого начала имеем ориентированный, как и ранее, жидкий кристалл, который на этот раз находится между обкладками плоского электрического конденсатора. Далее, не говоря пока о причине столь странного явления, мы допустим, что положительные и отрицательные ионы располагаются родственными группами так, как показано на рисунке. Тогда при включении поля произойдет вполне очевидная вещь: отрицательные ионы «поплывут» к аноду, положительные — к катоду. Но ведь ионы, так сказать, не бестелесны, если они «плывут», значит, есть перенос массы жидкости, т. е. поток. Поток должен где-то замыкаться, и наиболее естественная его геометрия показана на рис. 63, б. Это опять знакомые нам конвективные вихри. Движение этих вихрей будет поддерживаться неограниченно долго, если прибывающие к аноду и катоду ионы будут там разряжаться, а в объеме на прежних местах будут рождаться новые заряды.

Таким образом, конвективные вихри уже есть. Значит, далее будет все так же, как и раньше: мы вновь по-

лучим искажение молекулярной ориентации, как на рис. 61, б, а, значит, и точно такой же ориентационный орнамент, приводящий к системе чередующихся темных и светлых полос, хорошо различимых в поляризационный микроскоп.

Такие полосы впервые наблюдал в 1961 г. советский физик А. П. Капустин, а более подробно исследовал американский ученый Р. Вильямс. Фотографию соответствующей картины можно видеть на рис. 64. Согласитесь,

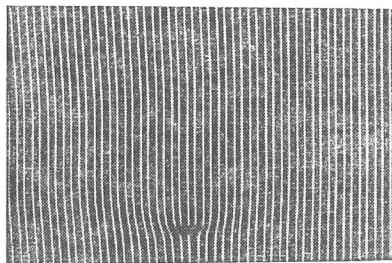


Рис. 64. Оптическая картина, наблюдавшаяся А. П. Капустиным и Р. Вильямсом.

что нелегко вообразить себе такой длинный и тонкий цилиндрический вихрь-«рулончик», диаметр которого равен ширине одной полосы (несколько микрометров), а длина соответствует размеру всей конструкции (она может достигать до 10 см и более).

Вихрями-«рулончиками» не просто приятно любоваться в микроскоп. На них можно наблюдать дифракцию монохроматического света, ведь мы же имеем дело с облой цилиндрических линз, образующих дифракционную решетку (рис. 62). Такие решетки, управляемые полем, можно, в принципе, использовать в лазерной технике для отклонения или расщепления световых пучков.

Оптические картины — вещь интересная, но нам еще нужно понять, отчего разноименные заряды оказались в разных местах (см. рис. 63, а), явно нарушив при этом электрическую нейтральность жидкости. Посмотрим на эту проблему с другой стороны. Давайте сделаем допущение о том, что у нас заранее, т. е. в отсутствие поля, есть искажение ориентаций молекул такое, как на рис. 63, в, но зато среда всюду нейтральна. Оказывается, в этом слу-

чае при включении поля разноименные заряды начнут разделяться.

Действительно, пусть где-то в объеме совсем рядом друг с другом находятся два разноименных иона. При включении поля положительный ион пойдет к катоду, а отрицательный — к аноду. Но они не свободны в выборе своего пути — мы же уже знаем, что проходить вдоль молекулярных осей ионам легче, чем поперек. Ионы идут к электродам как бы по кривому коридору: наличие «коридора» приводит к тому, что положительный заряд сместится вправо, а отрицательный — влево, т. е. наличие искаженной ориентации жидкого кристалла действительно приводит к разделению зарядов.

Обратите внимание на то, что действие поля вдоль оси z приводит к разделению зарядов в поперечном направлении, т. е. вдоль оси x (рис. 63, в).

Но мы, кажется, зашли в тупик. Чтобы получить искажение ориентации, нужно иметь поток, вызванный разделенными в пространстве зарядами. И наоборот, чтобы разделить заряды, нужно иметь искажение ориентации. Не получается ли, что мы пытаемся приподнять себя за волосы? Оказывается, это не так — мы имеем дело с ситуацией, в которой есть все, кроме одного. Нам нужна только заводная ручка, чтобы пустить в ход весь механизм. Такой «заводной ручкой» служат случайные тепловые отклонения в ориентации молекул. Ведь молекулы находятся в состоянии непрерывного теплового движения. Значит, в какой-то момент может случиться так, что из-за теплового толчка в каком-то месте ориентация молекул только чуть-чуть отклонится от исходной. Этого вполне достаточно, чтобы тут же сработал механизм так называемой обратной связи. При наличии поля цепочка событий будет выглядеть так: минимальное случайное искажение ориентации вызовет столь же минимальное разделение зарядов; тут же дрейф зарядов в поле приведет к наличию потока жидкости, который в свою очередь вызовет искажение ориентации молекул. Цепочка замкнулась, и что самое главное, направление результирующего поворота молекул совпадает с исходным малым отклонением. Произошло усиление исходного отклонения. Обратная связь оказалась положительной. Теперь отклонение молекул, а значит, и скорость жидкости будут нарастать, пока другие процессы не придержат этот рост. Мы имеем в виду прежде всего упругие силы, действующие точно так же, как и в

случае тепловой конвекции. В результате установится процесс равномерного вращения вихрей-«рулонов».

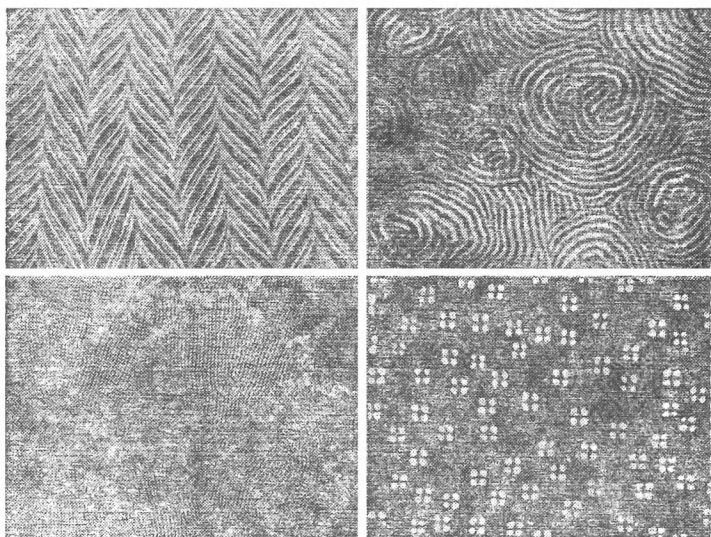


Рис. 65. Примеры различных оптических картин, причиной которых является конвекция жидкого кристалла в электрическом поле.

В зависимости от характера исходной ориентации жидкого кристалла, амплитуды и частоты приложенного поля и свойств жидкого кристалла можно наблюдать большое разнообразие ориентационных узоров, вызванных конвекцией жидкости. На рис. 65 приведены примеры соответствующих оптических картин.

§ 3. Электрический ток взбалтывает нематик

Явление, которое мы только что обсуждали, физики называют электрогидродинамической неустойчивостью. Если внешнее напряжение ниже порогового, то жидкий кристалл находится в покое. Если поле увеличить, будет достигнут порог неустойчивости, при котором и возникает вихревое течение жидкого кристалла в форме

правильных ячеек или «рулонов», показанных на рис. 61. Если еще немного увеличить напряжение, скорость циркуляции жидкости в «рулонах» будет увеличиваться, но форма ячеек пока не меняется. Однако так долго продолжаться не может.

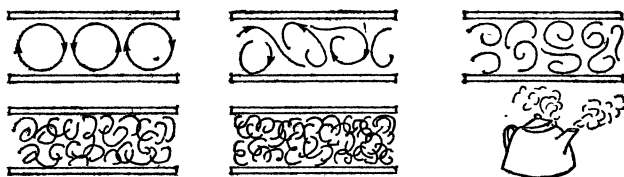


Рис. 66. Развитие турбулентности в нематике, проводящем электрический ток.

Мы уже говорили о том, что существует принципиальное различие в характере течения жидкости при малых и высоких скоростях. Уже при небольших превышениях внешнего напряжения над пороговым плавное течение круговых вихрей-«рулонов» сменяется другим, более беспорядочным движением жидкости. Образуется большое число мелких воронок, водоворотов, завихрений и т. п. Ситуация похожа на ту, которая изображена на рис. 4,б. Чем выше напряжение, тем на более мелкие и менее упорядоченные завихрения дробится весь жидкокристаллический слой, и в конце концов возникает полный хаос. Последовательность событий, показанная на рис. 66, напоминает закипание воды в чайнике. Такое хаотическое движение жидкости, а в данном случае жидкого кристалла, называется турбулентным.

Вот и получается, что внешнее поле, а точнее электрический ток, взбалтывает жидкокристаллическое вещество. Ясно, что при таком хаотическом движении жидкости и ориентация молекул окажется неузнаваемо искаженной — сильно неоднородной. В этом случае области более или менее однородной ориентации очень малы и имеют размеры порядка микрометра, т. е. соизмеримы с длиной волны света (именно такие размеры имеют мелкие вихри в жидкости). В свою очередь искажения молекулярной ориентации приводят к неоднородностям коэффициента преломления света.

И вот теперь перед нами встал вопрос: а какая польза от каких-то невидимых глазу мелких неоднородностей в показателе преломления? Но мы же уже говорили об

особенностях прохождения света через зернистые среды. Действительно, глаз может и не различать эти зерна, но каждый видит различие в оптических свойствах воды и молока или льда и снега. Сквозь воду или лед свет проходит практически без потерь; сквозь молоко или слой снега прямой луч не проходит, но и внутри он не поглощается. Фактически свет рассеивается. Для снега роль зерен играют микрокристаллики льда, для молока — частицы жира, взвешенные в воде. И в том, и в другом случае размеры зерен соизмеримы с длинами световых волн (доли микрометра).

Но, оказывается, «молоко» можно сделать из жидкого кристалла, если создать в нем оптические неоднородности — зерна, о которых мы говорили выше. Действительно, слой нематического жидкого кристалла, который был совершенно прозрачным до подключения к нему напряжения, под действием напряжения становится молочно-белым, совершенно мутным. Это явление впервые было обнаружено В. К. Фредериксом и В. Н. Цветковым в 1935 г. Впоследствии оно получило название «динамического рассеяния света» (вы, конечно, догадались, почему динамического — ведь мы имеем дело с движущейся жидкостью).

Читателю может показаться, что для того, чтобы взбалтывать нематик, создавая в нем всевозможные вихри, нужен очень большой ток. На самом деле это не так. Для получения сильного рассеяния в тонком слое достаточно пропускать через жидкий кристалл ток плотностью 1 мкА/см^2 . Этого вполне хватает, чтобы движущиеся ионы меняли ориентацию оптической оси нематика, так как противодействующие этому силы упругости очень малы.

§ 4. Модель тумана и управляемые шторы

Мы продолжаем «экспериментировать» с жидким кристаллом. Динамическое рассеяние света — один из наиболее доступных для наблюдения эффектов, и для опыта не требуется никаких сложных приспособлений. Самое главное для этого — иметь две стеклянные пластиночки (размерами, например, $30 \times 20 \times 2 \text{ мм}^3$), покрытые с одной стороны прозрачным электропроводящим слоем двуокиси олова или окиси индия. При наличии печки, где температура примерно 400°C , слой двуокиси олова наносится сам, если к стеклу поднести керамическую чашечку с хлорным оловом (чашечка должна быть, коне-

чно, на длинной проволочной ручке). Пластинки можно вырезать из обычного оконного стекла, причем края их должны быть сглажены хотя бы наждачной бумагой. Отметим, что В. К. Фредерикс и В. Н. Цветков, открывшие эффект динамического рассеяния света, использовали в качестве электродов проволочные сетки, поскольку

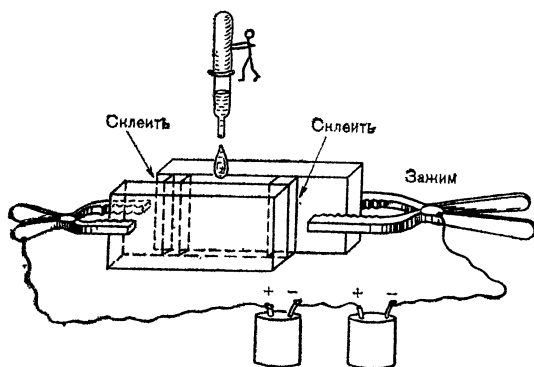


Рис. 67. Эксперимент с жидким кристаллом.

замечательные свойства слоев двуоксида олова в 30-х годах еще не были известны.

Теперь нужно взять две узкие прокладки, вырезанные, например, из полиэтиленового мешочка, и положить их между стеклами так, чтобы зафиксировать определенный зазор между проводящими покрытиями, и, сжав пальцами весь «бутерброд» в целом, заклеить его с тех торцов, где находятся прокладки, чем угодно, вплоть до пластилина (рис. 67). Обязательно проверим, оказались ли электроды с внутренней стороны стекол.

Далее нужно заполнить зазор между стеклами жидким кристаллом. Классический ПАА, на котором был открыт эффект, нам неудобен, так как он является нематиком только в диапазоне высоких температур от 118 до 135 °С. Лучше всего взять то популярное вещество МББА, о котором мы уже говорили. МББА является жидким кристаллом при комнатной температуре (но если зимой, то подальше от окна!). С помощью пипетки можно заполнить зазор (см. рис. 67), и там вещество будет удерживаться капиллярными силами, не вытекая.

Остается лишь взять две, а лучше три батарейки для карманного фонарика, соединить их последовательно и с

помощью зажимов подключить к проводящим стеклам (проводники при желании и определенном навыке можно даже припаять к двуокиси олова).

Рассматривая весь этот стеклянный «бутерброд» на просвет на фоне, например, окна, вы легко увидите, что при включении напряжения слой становится молочно-мутным, а при выключении — прозрачным. Таким образом, мы имеем управляемый полем световой затвор. Заодно можно обратить внимание на инерционность такого

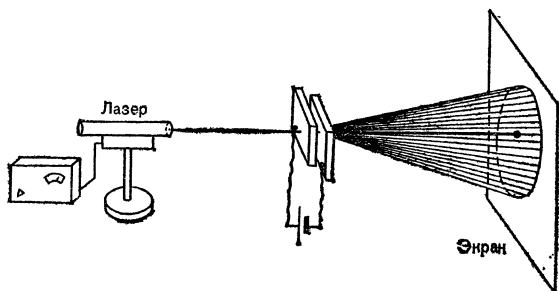


Рис. 68. Динамическое рассеяние света.

затвора. Если полиэтиленовые прокладки сравнительно толстые (например, 50 мкм), то время реакции жидкого кристалла на поле и время спада эффекта составляют секунды. Для практических же целей обычно берут прокладки порядка 10 мкм, тогда соответствующие времена составляют десятые и даже сотые доли секунды.

Более эффектный опыт с динамическим рассеянием света показан на рис. 68. Здесь использована такая же стеклянная конструкция, как и ранее. Освещение же ведется лучом портативного гелий-неонового лазера, а сзади за жидкокристаллическим затвором установлен белый экран.

В отсутствие поля свет лазера проходит сквозь жидкий кристалл и дает яркую красную точку на экране. При включении поля свет чрезвычайно эффектно рассеивается жидким кристаллом во все стороны. Рассеянный свет можно легко сделать видимым с помощью сигаретного дыма, полезность которого в данном случае сомнения не вызывает. На экране же можно видеть большое круглое световое пятно. Приятно отметить, что наблюдение эффекта рассеяния не требует использования ни поляризатора, ни анализатора. Значит, отсутствуют потери света

на поглощение, и в выключенном состоянии затвор не снижает яркости источника света.

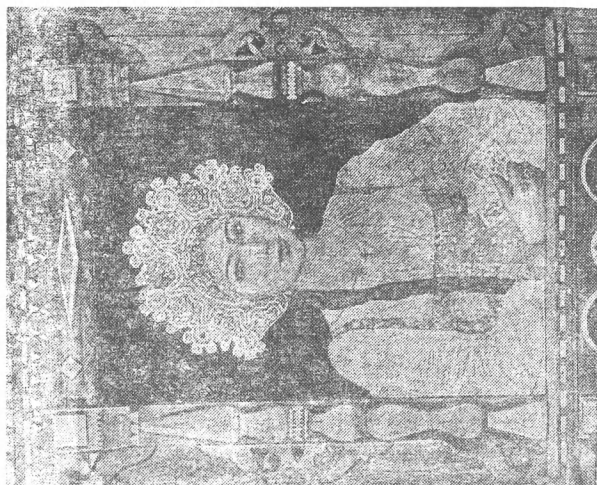
Возникает вопрос, а нельзя ли вместо маленьких стекол, которые мы использовали, попробовать взять огромные оконные стекла. Оказывается, можно. Они, правда, будут прогибаться, но, чтобы избежать этого, мы можем вместо узких прокладок положить между стеклами тонкую капроновую сетку. Когда в щель между стеклами будет залит жидкий кристалл, сетку практически не будет видно.

В результате можно сделать нечто вроде управляемых штор, если, например, нужно что-либо скрыть от любопытного глаза. Выглядело бы это примерно так, как показано на рис. 69. С помощью этого же эффекта удастся сделать и световой затвор, ослабляющий пучок лазерного света в 10 000 раз, если применить оптическую систему, зрачок которой очень мал и регистрирует только прямой входящий пучок света, а рассеянные лучи не улавливает.

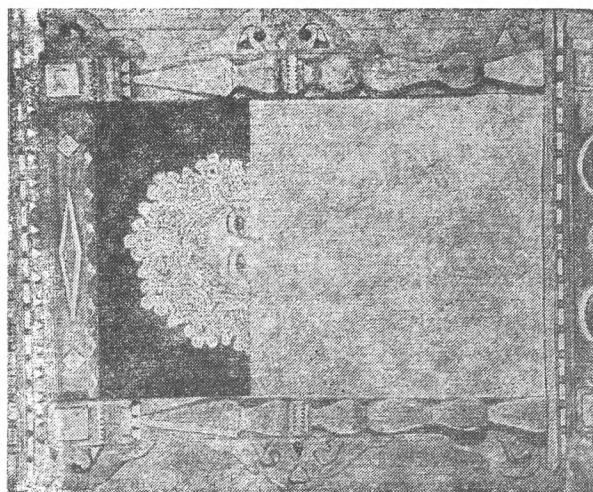
Эффект динамического рассеяния света позволяет имитировать туман или моделировать различные рассеивающие среды. Это важно для изучения физики таких сред. Приборы, имитирующие туман за бортом самолета, могут использоваться при обучении летчиков в реальных условиях полета.

Наиболее широкое применение эффект динамического рассеяния света находит в индикаторной технике. Если в электронных часах и калькуляторах на жидких кристаллах индикаторы на этом эффекте были недостаточно экономичными, то в более сложных индикаторных устройствах, где нужна к тому же повышенная яркость изображения, этот эффект оказался вполне подходящим. Например, индикаторы на динамическом рассеянии используются в приборных панелях автомобилей. В автомобиле аккумулятор достаточно мощный, и повышенное потребление энергии индикатором в данном случае несущественно. А вот выигрыш в яркости и возможность наблюдения изображения под достаточно большими углами, характерными для динамического рассеяния, очень привлекательны.

Существует занятная разновидность эффекта динамического рассеяния, который позволяет надолго (на месяцы, например) сохранять мутно-молочное состояние даже после выключения напряжения. В этом случае реализуется оптическая память. Такое явление наблюдается при



а)



б)

Рис. 69. Так выглядела бы управляемая штора (вы, конечно, узнали картину И. Глазунова «Русская красавица»).
а) Динамическое рассеяние отсутствует; б) эффект динамического рассеяния.

возбуждении полем не простого нематика, а его смеси с жидкими кристаллами, имеющими спиральное строение. С ними мы познакомимся в следующей главе. При включенном поле, как и в обычном нематике, возникает движение жидкости. При выключении поля это движение, конечно, прекращается (оно не может продолжаться при отсутствии подвода энергии извне, поскольку происходит ее расход на внутреннее трение). Но в отличие от обычных нематиков для этих смесей характерно образование «незалечивающихся» дефектов ориентации. Движение жидкости способствует образованию таких дефектов, сохраняющихся и после прекращения движения. На дефектах ориентации происходит сильное рассеяние света, при этом к слою жидкого кристалла извне энергия не подводится.

Значит, этот эффект можно использовать для создания больших табло, на которых информацию не приходится менять слишком часто. В этом случае электрическая мощность затрачивается лишь в момент записи, а затем картину можно рассматривать сколь угодно долго и при этом «бесплатно». Стереть же информацию можно полем достаточно высокой частоты, которое заставляет молекулы принять свою исходную ориентацию, а движение жидкости вызвать не может, так как за очень короткий период поля ионы разного знака не успевают расстаться друг с другом и нарушить электрическую нейтральность среды.

СПИРАЛЬНЫЕ МОЛЕКУЛЫ

...как было бы прекрасно, если бы мы могли попасть в зазеркальный дом! Наверняка там есть замечательные вещи!

Льюис Кэрролл «Алиса в Зазеркалье»

Наверное, первыми жидкими кристаллами, попавшими в руки исследователя, были эфиры холестерина. Их поведение при изменении температуры было ни на что не похоже, точнее, похоже на поведение хамелеонов: они быстро меняли свою окраску. Много позднее выясни-

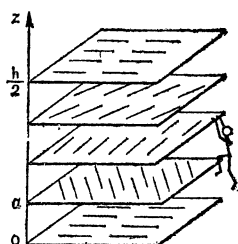


Рис. 70. Холестерик можно представлять себе как стопку тонких нематических слоев.

лось, что это тоже жидкие кристаллы, только еще более необычные. Такие жидкости называются сегодня холестерическими или, коротко, холестериками.

Холестерик по своему устройству во многом напоминает нематик, но имеет одно существенное отличие. Можно сказать, что холестерик состоит из множества нематических слоев, точнее, представляет собой стопку таких слоев (рис. 70) *). Но оптические оси этих слоев развернуты на некоторый угол, причем для двух соседних слоев такой угол составляет малую величину $\alpha \approx 0,5^\circ$. Расстояние между соседними слоями примерно равно поперечному размеру молекулы a . Если двигаться вдоль оси z , перпендикулярной плоскостям слоев, то через число слоев $180^\circ/\alpha$ их ориентация станет такой же, как в самом первом слое. Расстояние $h = \frac{360^\circ}{\alpha} a$, через которое молекулы повернутся в пространстве на 360° , представляет собой удвоенный период своеобразной решетки. Величину h называют шагом спирали, которую образуют в простран-

*) Напомним, что внутри нематических слоев молекулы перемещаются свободно. Однако перескоки молекул из слоя в слой относительно редки.

стве концы молекул, лежащих в последовательных слоях (рис. 70).

Периодическая решетка холестерика или, другими словами, холестерическая спираль удивительна тем, что четкое чередование в ней касается только ориентации молекул. В то же время в каждом нематическом слое молекулы могут свободно перемещаться, меняться местами. Словом, холестерическая жидкость свободно течет вдоль таких плоскостей, а спираль при этом почти не разрушается. Молекулы могут перескакивать и из слоя в слой, поворачиваясь при этом на угол α . Но это дается им не так легко. Поэтому свойства решетки с периодом $h/2$ вдоль оси z уже имеют определенное сходство со свойствами твердого кристалла.

Особенности строения холестериков наиболее сильно проявляются при изменении температуры вещества и различных внешних воздействиях. Холестерическая спираль демонстрирует всю палитру красок, чувствительных к малейшим повреждениям столь своеобразной решетки. Все это объясняет постоянный интерес к изучению и применению холестерических жидких кристаллов. Чем же вызвано столь странное строение холестерика? Объяснение заключается в маленькой особенности, которой обладают его молекулы.

§ 1. Правые и левые молекулы

Молекулы бывают зеркально симметричные и зеркально несимметричные. Например, молекулы, из которых состоят нематики, зеркально симметричны. Действительно, поместив молекулы, изображенные на рис. 9,

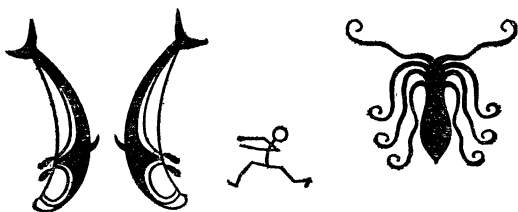


Рис. 71. Зеркальное отражение.

перед зеркалом, мы убеждаемся, что их зеркальные изображения несколько не отличаются от них самих. А теперь взгляните на рис. 71, где для примера изображены

обитатели моря и их отражения в зеркалах, мысленно расположенных по вертикали в середине картинок. Правый и левый дельфины, правая и левая половинки осьминога не совпадают между собой. Точно так же мы никогда

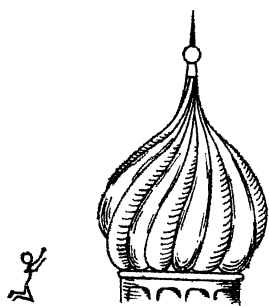


Рис. 72. «Правая» луковича храма Василия Блаженного.

не сможем совместить друг с другом правую и левую руки, любая из которых является зеркальным отражением другой. Все это примеры зеркальной несимметричности.

Не будет преувеличением сказать, что людей уже на протяжении тысячелетий занимает вопрос о симметрии различных объектов по отношению к их изображению в зеркале. Приведенные рисунки дельфинов и осьминога (1200 г. до н. э.) украшали пол царского дворца в знамени-

нитом городе Тиринфе (Греция). Зеркальная симметрия связывалась с гармонией и покоем, а отсутствие зеркальной симметрии — с движением и раскованностью. Греческие храмы и христианские соборы, как правило, обладают зеркальной симметрией, потому что по замыслу их творцов они должны быть символами незыблемости религиозных догм *). Правда, и здесь бывают исключения. Взгляните на жизнерадостный купол собора Василия Блаженного на Красной площади в Москве (рис. 72). А игривые дельфины и беспокойный осьминог (рис. 71) явно контрастируют со статичностью зеркальной симметрии.

Наличие зеркала, зеркальной глади прудов и озер позволяют установить либо существование, либо отсутствие симметрии, позволяют увидеть разницу между правым и левым. Но какой объект назвать именно правым или именно левым — дело совершенно произвольное. Мы делаем этот выбор, руководствуясь правилом ориентации, конкретнее — правилом обхода вокруг его оси. Вспомним правый и левый винты в электромагнитных колебаниях (рис. 13) — мы задавали там ориентацию оси винта и обходы вокруг нее по часовой стрелке (вправо) и против часовой стрелки (влево). Мы делаем выбор между правой и левой рукой, неявно подразумевая, что есть ось винта,

*) Вейль Г. Симметрия: Пер. с англ. — М.: Наука, 1968.

направленная от ног к голове нашего тела. Если бы мы изменили направление оси на противоположное, то названиями «правая» и «левая» пришлось бы поменяться.

Зеркальное изображение правого винта есть левый винт и наоборот (рис. 73). Оригинал и изображение, безусловно, не совпадают, хотя в данном примере оси винтов имеют одинаковую ориентацию: различаются направления обходов. Забавные приключения Алисы в Зазеркалье связаны именно с этим обстоятельством. Девочка

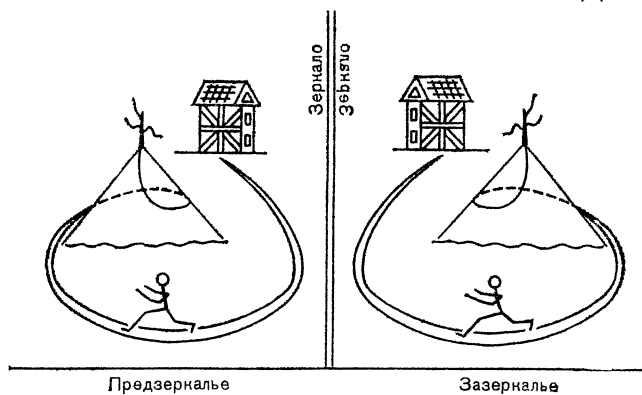


Рис. 73. В Зазеркалье все наоборот.

попадает в мир за зеркалом, где все правые винты должны быть заменены на левые и наоборот, о чем Алиса не подозревает. Вертикальная же ось холма, на который она хочет взобраться, направлена в обоих мирах одинаково. Алиса знает по своему прежнему опыту, что для подъема на холм ей нужно идти по дороге влево. Это и есть левый винт или левая спираль. В Зазеркалье этот винт стал правым, но она этого еще не знает. Что же происходит?

«...А вот и дорожка — она ведет прямо туда... Нет, вовсе не туда, но, наверное, в конце концов туда, — говорила она про себя, идя по дорожке и удивляясь внезапным поворотам. — Как она любопытно закручивается. Не дорожка, а прямо штопор. Ну, уж этот-то поворот — точно на холм. Ах, нет. Это прямо к дому. Ладно, поищем другую дорогу» *).

*) Кэрролл Л. Приключения Алисы в Стране чудес. — Сквозь зеркало и что там увидела Алиса, или Алиса в Зазеркалье: Сказки. — М.: Наука, 1978. — (Лит. памятники). — См.: Алиса в Зазеркалье, гл. II.

После нескольких неудачных попыток уйти от дома на холм Алиса решает пойти по дороге в противоположную сторону, т. е. по правой спирали. И тут ей, естественно, сопутствует удача.

В природе нередко встречаются твердые кристаллы, которые не обладают зеркальной симметрией, т. е. они существуют либо в правой, либо в левой формах. Каждая из этих форм является зеркальным отображением другой. Трудно предположить, что природа могла бы предпочесть одну форму кристалла другой. Чаще всего в среднем обе формы равновероятны. Правда, бывают и исключения. Например, в человеческом организме имеются только правая форма глюкозы и левая форма фруктозы. Употребление в пищу веществ противоположной формы приводит к серьезнейшим заболеваниям. Причина отсутствия равновесия между правой и левой формой вещества кроется, возможно, в том, что какое-либо воздействие извне нарушило непрочное равновесие, существовавшее при зарождении жизни. Известно, что ультрафиолетовое, нейтронное и другие излучения могут изменять строение молекул. Однако проблемы функционирования биологических клеток и вопросы зарождения жизни очень сложны и еще ждут полного решения. Мы поговорим о них немного подробнее в конце книги, когда будем совершать экскурсию в биологию.

Химики научились получать правые и левые молекулы в необходимых для науки и практики количествах. Об их искусстве речь пойдет дальше. А сейчас попробуем изобразить молекулу, которая не является зеркально симметричной. Она должна напоминать либо левую, либо правую половинки рис. 73, т. е. должна быть более или менее плоская поверхность и на ней холм или выступ, на который серпантинном поднимается тропинка. В нашем случае тропинку заменяет цепочка атомов, которая отходит от основного плоского участка молекулы (подошвы холма), завиваясь либо в левую, либо в правую спираль (рис. 74). В действительности на вершине холма или выступа находится какой-либо атом, наиболее далеко отошедший из основной плоскости молекулы, а спиральная цепочка может быть очень короткой — просто отрезком спирали.

Так устроены молекулы, имеющие либо левый, либо правый винт. Именно из таких молекул состоят холестерин. Сходство молекул холестерина и нематика за-

ключается в наличии у тех и у других больших плоских участков, сильно вытянутых в одном направлении. У молекулы холестерика к такому участку еще добавлен кусочек спирали. Толщина молекулы a составляет обычно около 1 нм, а общая длина l — несколько нанометров.

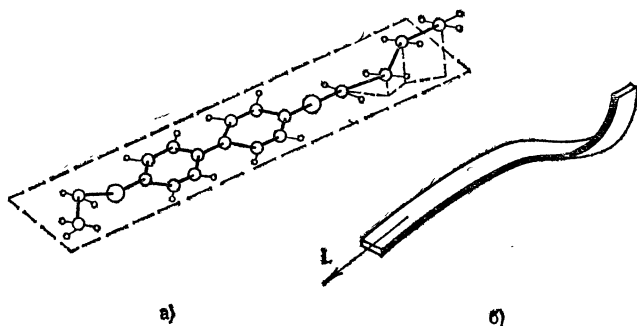


Рис. 74. Основной плоский участок и винтовой отросток молекулы.
а) атомное строение; б) моделирование отрезком спирали.

В основной плоскости насчитываются несколько десятков и даже сотни атомов, в то время как спиральный выступ насчитывает единицы атомов. Вот почему холестерик сохраняет некоторые черты нематика и в то же время так не походит на него. Чтобы оценить по достоинству сложность и тонкость работы ученых, имеющих ключи от двери в Зазеркалье, посмотрим на некоторые примеры строения реальных молекул.

§ 2. Об искусности химика

Предполагается, что все знают, как работают физики. Физика — модная наука, о физиках написано много книг и сделано немало кинофильмов. А вот химиков в кино показывают гораздо реже. А зря, так как они-то и являются настоящими Творцами с большой буквы — ведь химик создает новые молекулы — подлинные кирпичи мироздания.

Здесь мы ставим перед собой очень скромную задачу. Рассказ о жидких кристаллах был бы неполным и даже, можно сказать, ущербным, если бы мы не привели примеров получения жидкокристаллических веществ и не рассмотрели хотя бы несколько химических структурных формул. Вообще говоря, многие принимают эти форму-

лы за скучный орнамент. До разгадки шумерской клинописи тоже было, наверное, скучновато рассматривать какие-то выщербленные камни, в которых, как потом выяснилось, скрыта вечная мудрость человечества. Тому же, кто прочувствовал логику построения химических формул, хорошо видна прекрасная архитектура молекул, обусловленная загадочными правилами игры различных атомов друг с другом. Казалось бы, квантовая механика давно объяснила строение атомов и описала возможные виды взаимодействия между ними. И тем не менее структура сложной молекулы остается теоретически непредсказуемой, и при создании новых молекул химик без интуиции работать не может.

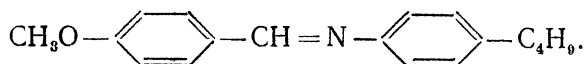
Речь у нас идет, конечно, об органической химии, поскольку все известные на сегодняшний день жидкокристаллические вещества состоят из органических молекул, т. е. представляют собой соединения углерода с водородом, кислородом, азотом и другими элементами. Среди неорганических соединений жидких кристаллов пока не обнаруживали, хотя, в принципе, это не исключено. Молекулы типичных жидких кристаллов достаточно сложны. Например, в сравнительно простой молекуле МББА имеются 18 атомов углерода, 21 атом водорода и по одному атому кислорода и азота, т. е. всего 41 атом, в чем можно убедиться простым подсчетом с помощью рис. 47. К сожалению, в природе жидкие кристаллы встречаются не так уж часто (как правило, в биологических объектах, см. гл. VI). Поэтому их приходится изготавливать или, как говорят, синтезировать искусственным путем. В отличие от анализа, который означает путь от сложного к простому, синтез предполагает путь от простого к сложному.

Химический синтез — это создание сложной и небывалой молекулярной структуры из известных более простых частей. Молекулу собирают примерно так, как собираются модели из детского конструктора, хотя химику часто приходится иметь дело с менее простыми заготовками (включая яды и взрывчатку) и вести синтез при высоких или, наоборот, низких температурах, в вакууме или при высоких давлениях.

Даже если мы получили нужное соединение, то отдыхать пока рано. Сделано только еще полдела. Во-первых, нужно убедиться, то ли вещество получено, какое мы хотели. Для этого придется сделать несколько анализов,

провести своего рода «медкомиссию» с участием самых разных специалистов. Тут и элементный химический анализ, и спектроскопия, и физико-химические исследования, и т. п. Во-вторых, если речь идет о жидких кристаллах, очень важной оказывается тщательная очистка вещества от посторонних примесей и особенно от ионов. В противном случае электрическая проводимость вещества окажется слишком высокой, и через вещество потекут очень большие токи, когда к нему будет приложено напряжение. А это в свою очередь уменьшит срок службы устройства и увеличит потребляемую мощность. На сегодняшний день разработан целый ряд весьма остроумных химических и физических методов очистки, позволяющих получать очень низкие концентрации посторонних ионов — примесей (до одного иона на миллиард молекул основного вещества и даже еще меньше).

Но вернемся к синтезу. Посмотрим еще раз на молекулярную структуру МБА (рис. 47, а) и изобразим химическую структурную формулу этого соединения, как это принято в литературе,

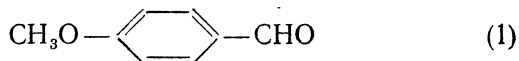


Видно, что эта формула содержит в себе всю красоту молекулярной модели, показанной на рис. 47, если смириться с тем, что шестиугольники в химической формуле заменили бензольные кольца (вместе с входящими в них атомами водорода).

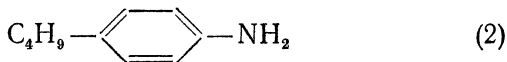
Итак, в данной молекуле есть только атомы углерода, водорода, кислорода и азота. Однако будет неверно полагать, что, задумав синтез МБА, химик берет горсть чистого углерода в виде графита или, скажем, алмазов, приносит в лабораторию три баллона с водородом, азотом и кислородом и начинает работать. Лет триста назад, когда органической химии еще не существовало, можно было бы и попытаться так поступить. Но сейчас химикам полегче. Развитая химическая промышленность предоставляет им громадный ассортимент «стройматериалов» в виде достаточно сложных молекул-заготовок.

Случай с МБА особенно показателен. Жидкий кристалл получается всего в одну стадию. Достаточно взять в нужном соотношении две жидкости, выпускаемые про-

мышленностью. Первая из них (анисовый альдегид)



даст нам впоследствии левую часть молекулы МББА, а вторая (бутиланилин)



станет правой частью. Для проведения реакции обе жидкости растворяют в спирте, смешивают оба раствора и затем, нагревая, выпаривают растворитель. В процессе реакции от углеродного атома группы $-\text{C} \begin{smallmatrix} \text{H} \\ \text{O} \end{smallmatrix}$ в моле-

куле (1) отрывается кислород, а оставшиеся электроны образуют двойную связь с атомом азота молекулы (2), который теряет оба атома водорода. Получается МББА и еще вода. Воду нужно изгнать, и жидкий кристалл готов!

Отнюдь не всегда органический синтез так прост. Иногда требуется просто-таки виртуозность фокусника. Король синтеза, американский химик Вудворд, получил, например, витамин B_{12} в 60 стадий. При этом тупиковые маршруты синтеза, конечно, не считаются. За этот синтез, занявший примерно 20 лет, Вудворд наверняка был бы удостоен Нобелевской премии по химии, если бы он не получил ее еще раньше за синтез молекулы хлорофилла (той самой, благодаря которой вся зелень зеленая) и ряда других молекул. Молекулы эти настолько сложны, что Вудворд их рисовал на доске сразу двумя руками, справа и слева, для экономии времени.

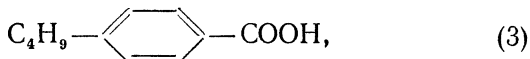
При синтезе жидких кристаллов, молекулы которых, конечно, попроще, чем у витамина B_{12} (из-за необходимой палочкообразной формы), нередко приходится делать до 15—20 промежуточных химических стадий, не считая очистки и последующих анализов.

Трудности синтеза могут, однако, быть обусловлены не только большим числом промежуточных реакций. В предыдущем параграфе мы уже говорили о правых и левых формах молекул, имеющих разные оптические свойства, т. е. являющихся оптическими антиподами. Молекулы, не отличающиеся по своему составу, но имеющие разное пространственное строение, называются изомера-

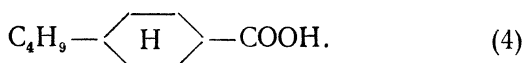
ми. Левые и правые зеркальные изомеры — это только один пример. Мы к нему еще обратимся, а пока рассмотрим другой тип изомерии.

Опыт работы с жидкими кристаллами показывает, что замена бензольного кольца, в котором двойные и одиночные химические связи чередуются, на циклогексановое, содержащее только одиночные связи, приводит к заметному снижению вязкости вещества и улучшению быстродействия соответствующих приборов.

Например, заманчиво перейти от бензойной кислоты



содержащей бензольное кольцо, к соответствующей кислоте на основе циклогексана



Это можно сделать следующим образом. Нужно добавить еще по одному атому водорода в каждый из шести углов кольца, и эти атомы возьмут на себя лишние связи (рис. 75, а, б).

Этот процесс присоединения водорода или, как говорят, гидрирования бензольного кольца химики ведут, поместив исходное соединение в автоклав, где давление водорода достигает 150 атм. при температуре 150 °С (при этом применяется еще и катализатор).

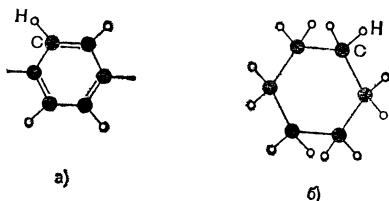


Рис. 75. В отличие от бензольного кольца (а) циклогексановое кольцо (б) не содержит двойных химических связей.

Но все оказывается не так просто. Дело в том, что, в отличие от бензольного кольца (рис. 76, а), циклогексановое не является плоским. Оно существует либо в форме «кресла», либо в форме «ванны» (рис. 76, б, в). Это еще один пример изомерии молекул. Геометрия «ванны» совершенно несовместима с палочкообразной структурой, необходимой для получения жидкокристаллического состояния, а «кресла», наоборот, оказываются подходящими. При этом молекулы образуют пары, как это показано на рис. 77. К счастью, в отсутствие нагрева ве-

щества «ванн» очень мало, и почти все вещество состоит из «кресел».

Но и это еще не все. Еще раз посмотрим на «кресло» (рис. 76, б). Оказывается, существуют две возможности для присоединения заместителей в крайние правые и крайние левые положения. Эти варианты помечены буквами Т (транс-изомер) и Ц (цис-изомер). Молекула жидко-

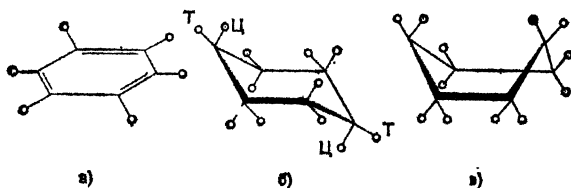


Рис. 76. Пространственная форма бензольного (а) кольца существенно отлична от строения изомеров циклогексанового кольца в виде «кресла» (б) и «ванны» (в).

го кристалла должна иметь максимально вытянутую форму, а для этого подходят только транс-изомеры (рис. 77). Следовательно, стоит задача отделения нужных нам транс-изомеров от мешающих цис-изомеров.

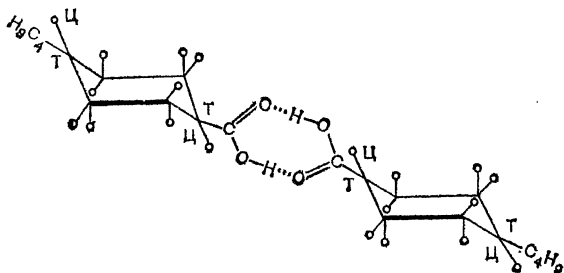


Рис. 77. Только такие пары, находящиеся в полной транс-форме с кольцами в виде «кресел», образуют жидкий кристалл.

С энергетической точки зрения молекуле выгоднее быть в транс-форме, чем в цис. В этом случае общая энергия взаимодействия атомов водорода с углеродными атомами кольца понижается (рис. 78). Однако из-за специфики действия катализатора цис-изомеры во время химической реакции образуются легче, и в получаемой смеси отношение транс- и цис-изомеров составляет 1:1. Со временем, конечно, все цис-изомеры должны перейти в

транс-форму, но при обычной температуре этого бы пришлось ждать несколько лет. Дело в том, что тепловые толчки достаточной силы, чтобы заставить цис-молекулы перепрыгнуть энергетический барьер (рис. 78) и перейти в транс-форму, слишком редки при обычных температурах. Если же смесь нагреть до 300 °С, то за несколько часов большинство цис-молекул перепрыгнет через барьер и приобретут транс-форму. При охлаждении смеси до комнатной температуры мы получим соотношение изомеров 4 : 1. Этого уже достаточно для образования нематика, и задачу синтеза жидкого кристалла можно считать решенной.

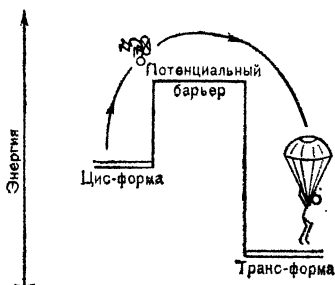


Рис. 78. Под действием теплового толчка молекула может перескочить потенциальный барьер и перейти из цис- в транс-форму.

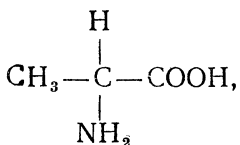
Остается лишь рассмотреть особенности синтеза зеркально несимметричных молекул, необходимых для получения жидких кристаллов со спиральным строением. Основная трудность заключается в том, что при обычных химических реакциях правые молекулы-заготовки всегда дают только правые конечные продукты, и, наоборот, левые вещества получают только из левых исходных соединений. Но, как правило, исходные соединения содержат равные количества правых и левых изомеров. Поэтому для получения только левых или только правых форм можно использовать три способа. Первый из них заключается в том, чтобы начинать синтез с определенного (например, правого) изомера, отделив его от левого. Как это сделать, мы скажем чуть ниже. Можно применить один из изомеров и в качестве промежуточного реагента.

Второй способ состоит в применении специального растворителя, не обладающего зеркальной симметрией. Например, если вести какой-либо синтез, используя в качестве исходного соединения смесь с равным количеством обоих изомеров, но в качестве растворителя взять правый холестерический жидкий кристалл, то в получаемом сложном соединении будут преобладать правые изомеры. Нужно, правда, честно признаться, что этот способ не очень эффективен; количество правых и левых

изомеров в конечном продукте различается ненамного.

Третий путь заключается в отборе только правых молекул из конечного продукта. Например, это можно сделать так. Из раствора, в котором имеются правые и левые молекулы, нужно попытаться вырастить кристаллы максимального размера. Оказывается, левые молекулы образуют свои кристаллы, а правые — свои, причем геометрическая форма правых и левых кристаллов отличается. Теперь можно взять пинцет и отложить левые кристаллы в одну (не обязательно левую) сторону, а правые — в другую. Отличить правые кристаллы от левых можно и оптическим способом, наблюдая за тем, в какую сторону кристалл поворачивает вектор электрических колебаний светового луча. Кроме того, их можно растворить по отдельности и измерить вращение вектора поляризации света в растворе. Именно так поступил сто лет назад знаменитый Пастер, заложивший основы микробиологии, а заодно впервые предложивший и этот метод. Метод Пастера хорош только тогда, когда удастся вырастить большие кристаллы.

Чаше же всего синтез сложных молекул, не обладающих зеркальной симметрией, ведут, исходя из левых или правых простых молекул-заготовок. Например, можно использовать левый изомер аминокислоты



полученный биохимическим методом. В этом методе, кстати, тоже предложенном Пастером, используют микроорганизмы (например, дрожжевые грибки), которые просто «съедают», скажем, правый изомер аминокислоты, совершенно пренебрегая левым и оставляя его химикам для дальнейшей работы. По существу и здесь используется уже упоминавшаяся выше случайность в эволюции биологических объектов, благодаря которой какие-то формы (правые или левые) оказались почему-то предпочтительнее.

Взяв в качестве исходного соединения левую аминокислоту и проведя целую серию дальнейших реакций уже с обычными (зеркально симметричными) соединения-

ми, химики получают левый изомер жидкого кристалла. С правой формой аминокислоты тем же самым путем (иногда в 10—20 стадий) получим правый жидкий кристалл. А используя полученные жидкие кристаллы, мы можем вести, как уже говорилось, несимметричный синтез других правых или левых соединений, исходя из симметричных молекул.

Благодаря искусству химиков на сегодняшний день жидкие кристаллы — уже не экзотика; синтезировано более шести тысяч жидкокристаллических соединений с самыми разнообразными свойствами.

§ 3. Твист-структура и шаг спирали

Что же нового вносит спиральная форма молекул в ориентацию оптической оси жидкого кристалла? Прежде всего, глядя на вытянутую форму молекул, разумно предположить, что их можно расположить параллельно друг другу хотя бы в одном тонком слое (рис. 79). При этом есть возможность удобно подогнать молекулы одну к другой, что соответствует, как мы знаем, балансу сил, действующих между ними. Таким образом, выделенный слой молекул имеет оптическую ось L . Но здесь надо оговориться, что вовсе не обязательно всем молекулам в таком нематическом слое одновременно иметь совершенно одинаковую ориентацию всех частей молекул. Например, молекулы могут поворачиваться вокруг своих продольных осей, так что в разных местах основные (плоские) участки молекул лежат как плашмя, так и ребром к слою. Так происходит и в настоящем нематике. Поэтому рисунок нужен только как модель.

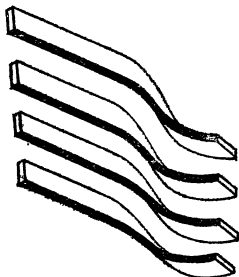


Рис. 79. Укладка спиральных молекул в тонком нематическом слое.

Далее мы хотим пристроить к этому первому слою следующие нематический слой молекул, в котором также имеется своя оптическая ось L . Разумеется, и в этом случае должен работать принцип равновесия сил. Однако при этом не запрещены повороты молекул вокруг продольных осей. Такие повороты вызываются, например, тепловыми толчками. Молекулы слоя 2 могут быть

параллельны молекулам слоя l (речь идет об основных — плоских — участках молекул), если слои находятся друг от друга на расстоянии, примерно равном сумме толщины основного участка молекулы a и высоты ее спирального выступа b . В этом случае выступы не мешают молекулам поворачиваться вокруг своих осей, но силы притяжения плоских участков заставляют молекулы сблизиться. Это связано с тем, что расстояние между слоями фактически увеличилось на высоту выступа b (рис. 80, а).

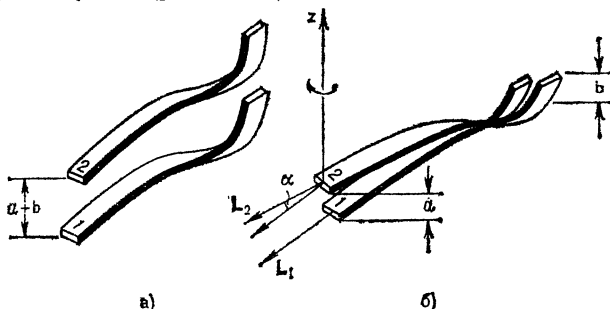


Рис. 80. Укладка спиральных молекул в соседних нематических слоях:

а) энергетически невыгодная; б) энергетически выгодная.

Но есть другая возможность взаимной ориентации оптических осей L_1 и L_2 . Если расстояние между соседними тонкими слоями меньше, чем в случае, изображенном на рис. 80, а, векторы L_1 и L_2 не могут быть строго параллельны. Это вызвано тем, что теперь молекулы не смогли бы свободно поворачиваться вокруг продольных осей; мешали бы выступы. А ведь мы знаем, что тепловые толчки мешают молекулам удерживать в одном и том же положении все элементы их конструкции. Только ориентация продольных осей остается неизменной, потому что вдоль них расположена основная масса атомов. Таким образом, мы приходим к выводу, что векторы L_1 и L_2 должны составить между собой малый угол α (рис. 80, б). Тогда наступает равновесие сил, так как плоские участки молекул расположены ближе, и в то же время молекулы получают определенную свободу для поворотов вокруг своих длинных осей.

Такие рассуждения, пусть грубые и приближенные, дают представление о том, как молекулы с выступами могли

бы расположиться в соседних слоях, а, следовательно, и в стопке слоев. И тут важно, какой винт — правый или левый — образуют молекулы холестерика. На рис. 74, 79, 80 изображены левые молекулы. Соответственно, при переходе от слоя к слою по вертикали, совпадающей с осями винтов, оптические оси поворачиваются против часовой стрелки. При этом как плоские, так и спиральные участки молекул 1 и 2 могут сближаться на минимальное возможное расстояние, при котором имеется баланс сил. Следовательно, левые молекулы образуют в стопке слоев левую спираль оптических осей (рис. 70).

Точно так же правые молекулы образуют в пространстве правую спираль холестерика. Холестерическую спираль называют еще твист-ориентацией, так как английское слово «твист» означает кручение, закрученность. Оно дало название целому направлению в танцевальном искусстве. Словно застыла в таком танце и ориентация молекул холестерика, причем именно потому, что они не совпадают со своим зеркальным отражением.

Замечательным обстоятельством является то, что слоистое строение холестерика с той или иной спиралью оптических осей возникает в веществе само собой, без каких-либо посторонних причин. Не нужно никаких воздействий и дефектов, чтобы образовался винт. Этим холестерик отличается от многих твердых кристаллов, в

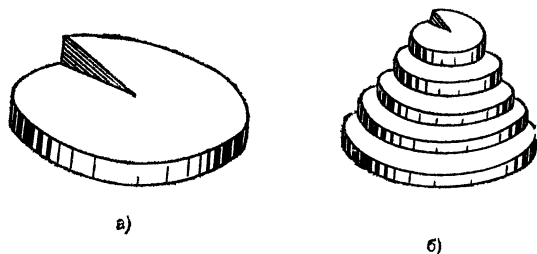


Рис. 81. Винтовой рост твердого кристалла при наличии дефекта.
а) Спиральный дефект; б) наращивание атомных плоскостей.

которых своеобразное слоистое строение и наблюдаемый винт часто связаны с существованием дефектов кристаллической решетки. Поясним это на примере роста некоторых твердых кристаллов (рис. 81). Как правило, кристалл растет прямо из жидкого раствора вещества. При этом сначала появляется одна кристаллическая плоскость, на

нее осаждаются из раствора свободные атомы, образующие вторую кристаллическую плоскость, и т. д. Нередко бывает так, что уже первая плоскость содержит дефект (рис. 81, а). Дефект этот выглядит так, как будто плоский диск разрезан по радиусу до центра, а крайние точки разреза раздвинуты по вертикали. Эта раздвижка равна расстоянию между соседними атомами в кристаллической решетке. Затем края вновь «сшиваются» между собой.

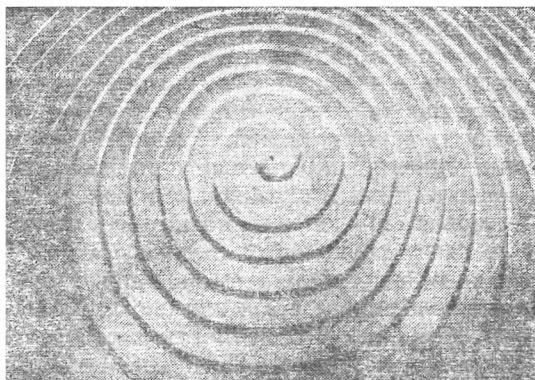


Рис. 82. А так выглядит винтовой рост реального кристалла (фото Г. Г. Леммлейна).

Подобные дефекты встречаются сплошь и рядом. И заметим, что они тоже образуют винт (в данном случае правый). Если теперь представить себе, что на первый виток такого винта осаждаются атомы вещества слой за слоем, то в результате получается длинный винт с правой нарезкой (рис. 81, б). Это и есть выросший кристалл. Вид сверху на такой кристалл напоминает красивую спираль (рис. 82). Примером такого рода в природе могут служить также раковины моллюсков.

Конечно, не следует думать, что в твердых кристаллах винт в пространстве образуется только благодаря дефектам. В некоторых кристаллах, например, в кварце и киновари, спираль образуется из-за особого расположения атомов в кристаллической решетке без всяких дефектов. Можно сказать, что у таких кристаллов типа, изображенного на рис. 81, а, спираль имеется в каждой ячейке решетки.

ки. Атомы образуют в ячейке нечто вроде винтовой лестницы, и из этих одинаковых ячеек, как из стандартных кубиков, складывается изящное здание кристалла. Шаг винта здесь равен размеру ячейки или, другими словами, периоду кристаллической решетки. Из рис. 81, а ясно, что шаг винта в кристалле с дефектом фактически равен расстоянию между соседними атомами в бездефектной кристаллической решетке, т. е. периоду такой решетки. Другое дело — холестерик. Здесь шаг спирали h очень велик по сравнению со средним расстоянием между соседними молекулами, примерно равным толщине молекул a . Это связано с тем, что образование твист-ориентации оптических осей вызывается небольшими, почти атомными, выступами молекул. В то же время образование самой оптической оси в отдельном нематическом слое, главным образом, зависит от основных (плоских) участков молекул.

В своих рассуждениях мы можем пойти дальше и поинтересоваться, чему же равны угол α и шаг спирали h в холестерике. Разумеется, эти величины — параметры вещества, состоящего из конкретных молекул. Но приближенно их можно оценить. Например, естественно думать, что угол α тем меньше, чем меньше энергия взаимодействия выступа одной молекулы с соседней молекулой. В то же время угол α должен уменьшаться с усилением взаимодействия основных участков молекул. Поскольку, грубо говоря, выступ содержит примерно один атом, а плоский участок — 100 атомов, то отношение этих энергий взаимодействий составляет около 0,01. Поэтому угол α составляет сотые доли полного оборота (360°), т. е. около 1° . В свою очередь шаг спирали $h = \frac{360^\circ}{\alpha} a$ при типичном значении $a \sim 1$ нм должен составлять несколько сотен нанометров. Значит, он сравним с длиной волны света в видимой части спектра (от красного цвета до фиолетового), что и определяет, как мы увидим, наблюдаемые красочные оптические эффекты в холестериках.

Кстати, такую же оценку угла между оптическими осями в соседних нематических слоях мы получили бы, если бы заглянули в геометрическую суть этого вопроса. В самом деле, угол α фактически равен отношению отрезка дуги, на котором располагается спиральный выступ молекулы, к радиусу этой дуги, примерно равному полной длине молекулы. Реально такой кусочек дуги составляет

сотые доли нанометра, а длина молекулы — несколько нанометров. Отсюда тоже получается малое значение угла α и, соответственно, большая величина шага твист-ориентации.

Наши заключения о характерных энергиях взаимодействия молекул и параметрах холестерической спирали позволяют сделать и другие важные выводы. Например, можно понять, почему слоистое строение холестерика так сильно зависит от различных облучений, присутствия каких-либо примесей (проще говоря, загрязнений) и т. п. Действительно, если существование спирали зависит от незначительного выступа на длинной плоской молекуле, то не так уже трудно поставить под угрозу такое существование, разрушив этот выступ. Последствия облучения холестерика, например ультрафиолетовым светом, именно таковы. Такой свет разрушает слабые спиральные участки молекул, сбивая атомы с выступов в основные плоскости, или превращает правые молекулы в левые и наоборот.

Таким образом, под действием облучения спиральные участки молекул могут распрямляться. Чем больше энергия отдельных квантов, попадающих в спиральный выступ, тем большему разрушению он подвергается — вплоть до полного исчезновения винта. Чем интенсивнее излучение или чем дольше оно действует, тем большее число молекул холестерика теряет свои спиральные свойства. Поэтому под влиянием всех этих причин или, другими словами, фотохимических реакций угол α становится все меньше, а шаг спирали — все больше. В конечном счете шаг может обратиться в бесконечность, т. е. холестерик превратится в обыкновенный нематик.

Облучение способно и на большее, если конструкция молекулы настолько слабо скреплена, что под действием света разрушаются связи между атомами даже в основном остове молекул. В этом случае сильно ослабевает взаимное притяжение остовов — длинных плоских участков. Поэтому становится невозможным даже существование нематика, т. е. холестерик превращается в обычную жидкость. Конечно, такое происходит тогда, когда вследствие облучения накопятся многочисленные «дефектные» молекулы. Для этого, как и при фотографировании, нужно подобрать необходимое время экспозиции.

Наблюдать явление очень просто. Надо прикрыть от облучения пленку холестерика, экспонируя лишь избран-

ные участки, которые и потеряют свойства холестерика. Поместив затем облученную пленку между скрещенными поляризаторами, мы увидим такую картину (рис. 83). Неэкспонированные участки останутся светлыми, поскольку здесь свет пройдет сквозь оптическую систему, как

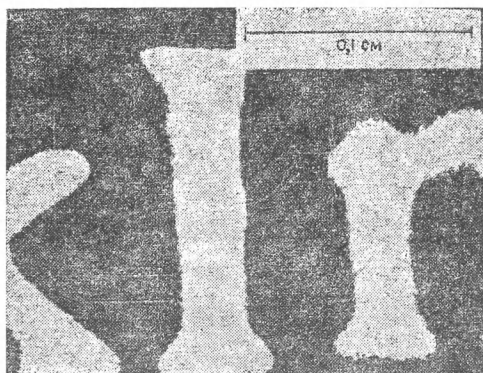


Рис. 83. Пленка холестерика, обесвеченная ультрафиолетовым светом.

и на рис. 37, б. Экспонированные участки станут черными, так как в обычной жидкости нет оптических осей и двойного лучепреломления, и, следовательно, свет проходит сквозь нее, не изменяя поляризации, а второй поляризатор не пропускает такой свет.

К подобным последствиям приводит и смешивание холестерика с обычной жидкостью, каким-либо нематиком, а также с другим холестериком, имеющим противоположный винт. При этом ослабляется роль спиральных участков, которыми обладают молекулы разбавляемого холестерика. Шаг первоначальной холестерической спирали увеличивается, а при большом разбавлении образуется просто нематик. Сильное разбавление обычной жидкостью ликвидирует, естественно, оптическую ось вообще.

Наиболее точную информацию о том, как изменяется шаг спирали, какова бы ни была причина этого изменения, дает прохождение поляризованного света сквозь пленку

холестерика. Одним из впечатляющих свойств здесь является вращение поляризации света по мере его прохождения в толщу пленки.

§ 4. Гигантская оптическая активность

Вращение линейной поляризации света впервые было обнаружено в кварце в 1811 г. Явление заключается в том, что свет, поляризованный по определенному направлению, пройдя кристалл вдоль оси винта, оказывается поляризованным по другому направлению, составляющему с первым угол φ (рис. 84). Угол φ прямо пропорционален толщине кристалла. Вообще мы уже видели примеры поворота поляризации и знаем, что он связан с двойным лучепреломлением света. В случае, показанном на рис. 29, поворот осуществлялся только при определенном расположении осей поляризатора и кристалла и определенной толщине кристалла. При этом в кристалле не имелось никакого винта оптических осей. Напротив, в случаях, изображенных на рис. 30 и 37, б, имелась спиральная ориентация оптических осей, которая создавалась искусственно. Эти примеры уже похожи на то, что наблюдается в кварце и холестерике. Но есть и различие. Оно состоит в том, что в закрученном нематике шаг винта очень велик, в то время как в кварце

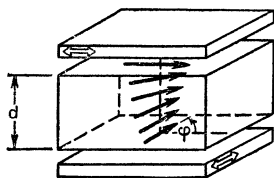


Рис. 84. Поворот поляризации света при прохождении луча сквозь слой холестерика с очень большим шагом спирали.

шаг составляет $\approx 5,4$ нм, а в холестерике — несколько сотен нанометров. Поэтому длина световой волны в закрученном нематике много меньше шага винта, в кварце — много больше его, а в холестерике — сравнима с ним.

Для научных и практических целей делают холестерики, точнее холестерические смеси, с очень большим шагом спирали. Мы упоминали об этом. Особенно просто сделать такой материал, смешивая оптические антиподы — холестерики с винтами противоположных знаков, но с одним и тем же шагом. Если числа правых и левых молекул строго одинаковы, то по существу это уже не холестерик, а нематик. Действительно, такая жидкая смесь является зеркально-симметричной, потому что отражение в зеркале содержит одинаковые количества точно таких

же правых и левых молекул. Поэтому спиральность молекул оказывается взаимно скомпенсированной, и все они своими длинными осями ориентируются по единственному направлению. А это и есть нематик. Если числа молекул-антиподов не равны, например, правых молекул больше, то смесь уже не является зеркально-симметричной: отражение в зеркале содержит больше левых молекул. В такой смеси возникает правая холестерическая спираль. Однако при небольшой разнице в количествах антиподов зеркальная симметрия нарушается не сильно, и поэтому шаг спирали становится большим.

Итак, пусть на пленку холестерика с большим шагом спирали вертикально падает свет. Свет поляризован вдоль оптической оси холестерика на верхней поверхности пленки. Как свет распространяется сквозь холестерик? Проходящий луч формируется в результате интерференции падающей волны и волн, излученных электронами молекул под воздействием поля первичной волны. Так как электроны легче всего смещаются вдоль длинных осей молекул, то поле вторичной волны, излученной на определенной глубине холестерического слоя, должно быть параллельно оптической оси на данной глубине. Если длина волны много меньше шага холестерической спирали, то согласованность распространения первичной и вторичных волн, благодаря которой они взаимно усиливаются, фактически соответствует повороту поля \mathbf{E} в луче, проходящем сквозь слой. При этом поляризация света параллельна оптической оси холестерика в любой точке спирали. Интерференционные явления, разыгрывающиеся на расстояниях порядка длины волны, как бы успевают «следить» за «медленным» поворотом осей \mathbf{L} в пространстве и подстроиться к такому повороту. Таким образом, пройдя всю толщину пленки, свет оказывается линейно поляризованным так, как направлена оптическая ось на нижней поверхности пленки.

Рассмотрим противоположный случай, когда шаг холестерической спирали много меньше длины волны. Поле \mathbf{E} проходящей волны теперь бессмысленно раскладывать на две составляющие, параллельную и перпендикулярную какой-либо оптической оси. Это можно было делать раньше, когда такая ось была всего одна на весь слой жидкого кристалла. Теперь же оптических осей — огромное число, все они по-разному ориентированы, и ни одной нельзя отдать предпочтение. В нашем распоряжении для поля-

ризации проходящих лучей есть только две возможности, никак не связанные с индивидуальными оптическими осями холестерика. Это повороты вектора электрического поля вокруг оси холестерической спирали либо по часовой стрелке, либо против нее. Другими словами, два независимых проходящих луча могут иметь только круговую поляризацию (левую и правую). С круговой поляризацией мы уже знакомы на рис. 29.

Здесь хочется отметить одну тонкость. Дело в том, что правая и левая поляризации света соответствуют картине мгновенного положения вектора E на оси световых лучей. При правой поляризации концы векторов E рисуют в

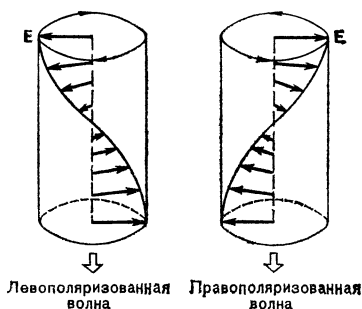


Рис. 85. Лево- и правополяризованные световые волны: в любой точке луча движение вектора E по кругу происходит соответственно по и против часовой стрелки.

пространстве правую спираль, а при левой поляризации — левую спираль. Но поворот векторов E в течение периода колебания происходит в правополяризованной волне против часовой стрелки, а в левополяризованной волне — по часовой стрелке. Это видно из рис. 85: только при таких круговых движениях вектора E в следующее мгновение свет придет в новую точку с тем направлением E , которое было в предыдущей точке.

Скорости световых лучей с разной круговой поляризацией немного отличаются. Луч с левой поляризацией в правой холестерической спирали имеет большую скорость, чем луч с правой поляризацией. Естественно, обратная картина наблюдается в левой холестерической спирали. Причина этого заключается в том, что в одном луче вторичные колебания поля вдоль оптических осей немного усиливают первичную волну с круговой поляризацией, а в другом — ослабляют. А ведь мы знаем, что результат интерференции первичной и вторичных волн как раз и определяет скорость света в среде. Однако разница в скорости световых лучей мала, поскольку на длине волны укладывается много полных витков холестерической спирали, которые почти одинаково реагируют на воздействие

света с правой и левой поляризацией (рис. 86, а). Различие в скорости волн с разной круговой поляризацией становится ощутимым, когда шаг холестерической спирали отличается от длины волны света не слишком сильно. В этом случае роль вторичных колебаний поля вдоль оптических осей сильно возрастает. Например, в правой спирали

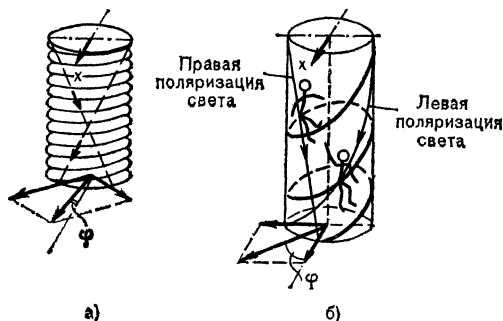


Рис. 86. Малый шаг спирали приводит к незначительной разнице в прохождении волн с левой и правой поляризацией (а); при большом шаге различие становится существенным (б).

излучение вторичных волн происходит гораздо более согласованно под воздействием левополяризованной первичной волны, чем вследствие действия волны с правой поляризацией (см. рис. 86, б).

Все, о чем мы говорили, имеет первостепенное значение для поворота линейной поляризации света на выходе из пленки холестерика. Если шаг спирали мал, т. е. мало различие в скорости двух проходящих лучей, то на выходе из пленки векторы поля в лучах повернутся по и против часовой стрелки примерно на один и тот же угол. Поэтому векторная сумма полей, которая дает нам вновь линейно-поляризованный свет, будет повернута по отношению к поляризации на входе на малый угол φ (рис. 86, а). Напротив, в случае большого шага спирали и большого различия в скорости лучей поля на выходе из холестерика окажутся повернутыми по и против часовой стрелки на совершенно разные углы. Поэтому их векторная сумма — поляризация на выходе — повернется по отношению к поляризации на входе на заметный угол φ (рис. 86, б).

Чем больше толщина пленки, тем на больший угол повернутся векторы поля в обеих волнах, но при этом возрастает и отставание одной волны от другой. Поэтому

угол ϕ прямо пропорционален толщине пленки d . Принято относить угол ϕ к 1 см толщины. И любопытно сравнить такие относительные повороты линейной поляризации света в разных веществах. В растворах сахарозы, винной кислоты величина ϕ составляет примерно 1 град/см, в кварце — около 300 град/см. В обычных холестериках величина $\phi \sim 10^5$ град/см. Это наглядно свидетельствует о большой роли, которую играет шаг холестерической спирали для поворота поляризации видимого света. Напомним, что длины волн видимого света сравнимы с шагом холестериков.

Явление поворота поляризации света называется оптической активностью вещества. Это явление, чрезвычайно чувствительное к любым изменениям строения вещества и взаимодействия между молекулами, дает ценную информацию о том, как устроены молекулы, как видоизменяется их архитектура в результате химических реакций, полимеризации. Оптическая активность применяется в различных оптических приборах (модуляторах, затворах и т. п.) и в качестве очень точного метода определения показателей преломления разных лучей в данной среде. Такой метод в 10 000 раз точнее других известных способов измерения. Исключительно важна оптическая активность биологических молекул и, в частности, белков, которые состоят из аминокислот, обладающих левыми винтами. Эта избранность спирального строения биомолекул до сих пор представляет неразрешимую загадку, над которой ломают голову ученые. Все сказанное только подчеркивает ценность холестерических жидких кристаллов, оптическая активность которых огромна, для многих областей науки, техники и жизни.

§ 5. Избирательное отражение света

С явлением оптической активности тесно связано другое замечательное явление — избирательное отражение света холестериком. Слово «избирательное» здесь совсем неслучайно: холестерик действительно отражает яркий свет лишь с избранной длиной волны λ , равной шагу холестерической спирали h . Отсюда и то богатство цветовой гаммы, которое так привлекает всех, кто смотрит на изделия из холестериков в изменяющихся условиях. К таким условиям относятся температура, механическая нагрузка, примеси, электромагнитное поле.

К пониманию избирательного отражения света мы уже фактически подошли в предыдущем параграфе, когда описывали прохождение линейно-поляризованного света сквозь холестерик. Ведь падающий луч не только проходит в глубь пленки в виде двух лучей с разной круговой поляризацией, по-разному распространяющихся в холестерике, но и отражается от пленки благодаря интерференции вторичных волн. С этим мы знакомы, но обсудим теперь данный вопрос более подробно.

На рис. 87 вновь изображена правая холестерическая спираль, точнее, ее полувиток. На нее сверху падает световой луч. Длина волны и шаг спирали предполагаются равными. Что произойдет, если волна — левополяризованная, т. е. вектор E вращается вокруг оси холестерика по часовой стрелке? Пусть в какой-то момент поле E на входе в пленку совпадает по направлению с оптической осью холестерика. Тогда в течение всего периода колебания по мере прохождения волны в глубь пленки вектор E в каждой новой точке окажется повернутым на тот же угол, что и оптическая ось холестерика. Такая согласованность обеспечивает беспрепятственное прохождение света сквозь пленку. Это похоже на захватывающий спуск верхом на перилах винтовой лестницы, когда на ее шаге совершается полный оборот вокруг оси винта.

В силу полного отсутствия согласованности между вращением вектора E против часовой стрелки (в правополяризованной волне) и вращением оптической оси по часовой стрелке правополяризованная волна не проходит сквозь правую холестерическую спираль. Таким образом, правополяризованная световая волна может только отразиться от правого холестерика, если ее длина точно равна шагу спирали и она падает на пленку вдоль оси спирали.

Интересно, что к подобному выводу мы можем прийти, рассуждая иначе. Вспомним явление интерференции волн, отраженных от верхней и нижней поверхностей тонких пленок. Пленка считалась тонкой, если ее тол-

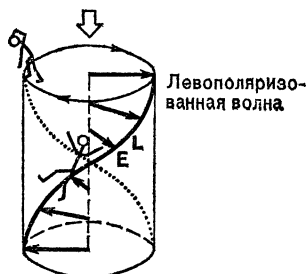


Рис. 87. Прохождение сквозь холестерик света с длиной волны, равной шагу спирали.

щина не слишком сильно отличалась от длины волны падающего света. В данном случае мы можем сказать, что пленка холестерика представляет собой стопку совершенно одинаковых слоев толщиной $h/2$. В самом деле,

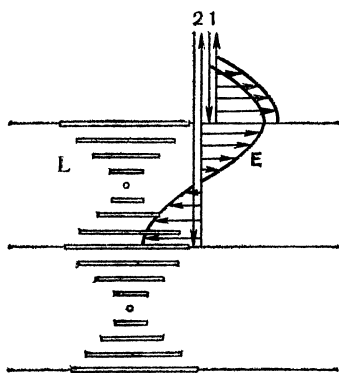


Рис. 88. Избирательное отражение возникает при совпадении длины волны света с шагом спирали холестерика.

на расстоянии $h/2$ вдоль оси холестерической спирали оптическая ось поворачивается на 180° . Но мы нигде не говорили, что направление оптической оси L и противоположное направление $-L$ чем-либо отличаются друг от друга. Напротив, знак приписывался вектору L произвольно, т. е. направления L и $-L$ для жидких кристаллов эквивалентны. Поэтому фактически поворот оптической оси на 180° означает возвращение к прежней ориентации.

Поскольку все слои толщиной $h/2$ абсолютно одина-

ковы, можно рассматривать отражение света от каждого из них как от упомянутой тонкой пленки. В случае, когда шаг спирали холестерика равен длине волны падающего света, толщина такой пленки точно равна половине длины волны. Так как свет падает перпендикулярно поверхности пленки, то лучи, отраженные от верхней и нижней границ слоя, совпадают по направлению с осью спирали. Посмотрим, как эти лучи интерферируют, т. е. как складываются поля E этих волн (рис. 88). Из рисунка видно, что волна 2, вошедшая в тонкую пленку, на пути от верхней до нижней границы и обратно отстанет от волны 1 ровно на одну длину волны λ . Но при этом поля E обеих волн на выходе из холестерика одинаковы по величине и направлению. Следовательно, полное поле в отраженном луче в два раза больше поля каждой из волн, т. е. интенсивность такого луча в четыре раза больше интенсивности отдельной волны. Так происходит усиление отраженного света за счет явления интерференции.

На деле, конечно, только в редких и специальных случаях подбирают шаг спирали, длину волны и поляриза-

цию света так, чтобы удовлетворить всем этим условиям. Чаще всего на пленку холестерика падает естественный белый свет, в котором есть любая поляризация и любая длина волны. Из всего этого обилия волн холестерик сам выбирает такую волну, которая удовлетворяет всем необходимым условиям, и отражает ее. Все остальные волны проходят сквозь пленку холестерика, и если они затем поглощаются каким-либо материалом или отводятся так, что не могут вернуться назад, то мы видим пленку окрашенной в цвет отраженной волны.

Не надо думать, что только такой слоистый кристалл способен избирательно отражать свет. Любой кристалл точно так же отражает свет. Но в твердых кристаллах толщина эквивалентных тонких пленок равна периоду кристаллической решетки, т. е. расстоянию между атомами. Это расстояние составляет обычно десятые доли нанометра. Излучение с такой длиной волны называется рентгеновским. Мы его не видим глазом. Такой свет «видят» специальные приборы. С помощью изучения отражений рентгеновских лучей успешно расшифровывается самое сложное строение любых кристаллов.

Большинство холестериков отражают видимый свет. Набор холестериков с различными шагами спиралей дает в наше распоряжение богатый набор красок — чистых и ярких. Эти краски наверняка заинтересуют художников своими возможностями, но способ написания картин такими красками художников удивит. Если привычные всем краски наносятся на белый холст, то слои холестериков надо наносить кистью на черное покрытие, которое хорошо поглощает свет. Только в этом случае они заиграют всеми цветами радуги. Действие же обычных красителей основано на совсем ином явлении — избирательном поглощении света (рис. 52).

Есть еще одна особенность холестерической краски. Цвет холестерика — результат коллективных усилий практические всех молекул вещества, которые образуют в пространстве длинную спираль. Разумеется, одна молекула независимо от других не может дать никакого вклада в обсуждаемое явление. Например, обычная жидкость, даже состоящая из оптических антиподов, не обладает избирательным отражением. Коллективность ориентации молекул в холестерике, собственно говоря, и дает им возможность построить ажурную конструкцию из оптических осей — холестерическую спираль.

Совершенно ясно, что в холестериках, как и в нематиках, можно легко управлять ориентацией оптических осей с помощью электрического поля. Механизм действия поля на молекулы при этом не изменяется. Следо-

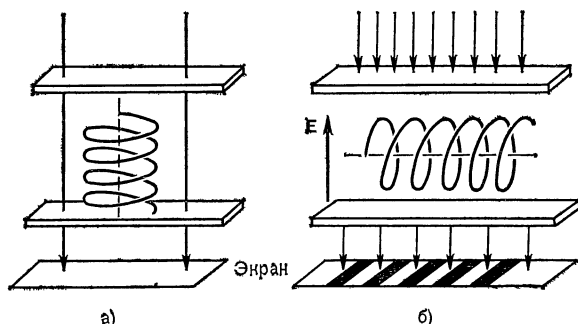


Рис. 89. Переориентация оси холестерической спирали электрическим полем.

а) Нет поля; б) поле превышает пороговое значение.

вательно, электрическое поле может видоизменять пространственную спираль так, как мы того пожелаем. Например, применительно к холестерикам эффект Фредерикса выглядит так. Если нужным образом отполировать стекла, так что молекулы прилипнут к ним параллельно осям полировки, то в слое холестерика между стеклами ось винта будет ориентирована перпендикулярно стеклянным поверхностям (рис. 89, а). Пусть молекулы поляризуются полем лучше всего вдоль продольной оси. Тогда, подав на прозрачные электроды, нанесенные на стекла, разность потенциалов электрического поля, превышающую пороговое напряжение, мы сможем повернуть ось холестерической спирали на 90° (рис. 89, б). В этом случае наблюдатель смотрит сквозь скрещенные поляризаторы на спираль сбоку. В тех местах, где оптические оси в спирали точно параллельны или перпендикулярны оси одного из поляризаторов, холестерик будет казаться наблюдателю темным. На остальных участках пленка холестерика останется светлой. Взглянув на фотографию холестерической пленки, находившейся в таких условиях (рис. 90), читатель воскликнет: «Да это же отпечатки пальцев!» Да, сегодня такие картины деформированных холестериков так и называются.

По «отпечаткам пальцев» судят о величине шага холестерической спирали, который не изменяется эффектом Фредерикса. Но спираль можно не только поворачивать, но и раскручивать электрическим полем, делая ее шаг сколь угодно большим. На рис. 91 показано, как это

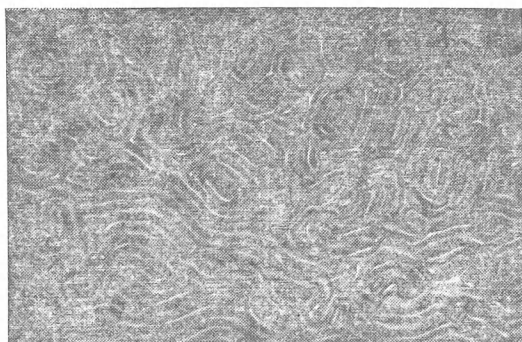


Рис. 90. «Отпечатки пальцев» — картина ориентации оптических осей в холестерике.

делается. Подав пороговое электрическое поле E перпендикулярно оси винта, мы заставим молекулы, поляризующиеся вдоль длинных осей, повернуться так, чтобы они все без исключения стали параллельными полю.

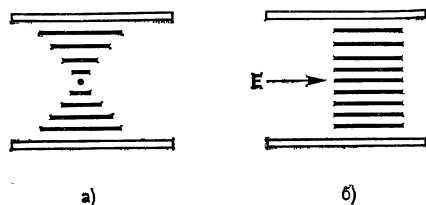


Рис. 91. Электрическое поле раскручивает холестерическую спираль.

а) Нет поля; б) поле превышает пороговое значение.

Таким образом, холестерик превращается в нематик. А при меньших значениях поля холестерик остается холестериком, но его шаг чутко следит за полем и быстро возрастает с увеличением приложенной разности потенциалов. Ясно, что при этом непрерывно меняются и избранные длины волн, которые отражаются холестериком.

Можно сказать, что художник получает возможность изменять краски на своей картине, заменяя мазок на подачу слабого напряжения. Остается добавить, что как эффект Фредерикса, так и раскрутка спирали сейчас активно исследуются с целью применения холестериков в черно-белых и цветных плоских экранах с электронным управлением.

§ 6. В тепле синеет, на холоде краснеет

Мы назвали уже несколько способов управления оптическими осями холестерика. Но, пожалуй, самым популярным и эффектным стало изменение окраски холестерика в зависимости от температуры. При этом цвет холестерической пленки зависит от температуры в такой же степени, в какой чувствителен к нагреву или охлаждению шаг спирали. И здесь прослеживается интересная закономерность. При высокой температуре в обыкновенном жидком состоянии холестерик бесцветен, точнее, безцветно вещество, которое при более низкой температуре переходит в холестерическое состояние и становится обладателем холестерической спирали. При температуре такого перехода холестерик синеет и при дальнейшем охлаждении приобретает все цвета спектра от фиолетового и голубого до красного и желтого. Это означает, что по мере охлаждения холестерической жидкости шаг спирали увеличивается, а при нагревании — уменьшается. Такое поведение холестерика нетрудно объяснить, оно сходно с поведением твердых кристаллов при изменении температуры.

Все хорошо знают, что при нагревании тела расширяются, а при охлаждении — сжимаются. Следовательно, с ростом температуры увеличивается среднее расстояние между атомами или молекулами во всяком теле. При этом вплоть до точки плавления твердый кристалл остается кристаллом, т. е. в среднем все атомы занимают в кристаллической решетке совершенно определенные места. Увеличивается лишь период решетки. Почему так происходит? Объяснение заключается в том, что с увеличением температуры возрастают случайные отклонения атомов из положений равновесия под влиянием тепловых толчков. Поскольку эти отклонения совершенно хаотичны и происходят по любому из направлений, среднее их значение равно нулю, а атомы остаются, в сред-

нем, на своих местах. Однако расстояния, на которые атомы отходят из положений равновесия то в одну, то в другую сторону, при нагреве увеличиваются. Но мы хорошо знаем, что атомы не могут сколь угодно близко подойти друг к другу, не могут проникнуть друг в друга: мешает, например, сильное отталкивание электронных облаков. Возникает своего рода несовместимость свойств атомов и решетки с неизменным средним расстоянием между атомами.

Противоречие таково: с одной стороны, случайные отклонения становятся все больше и больше, т. е. атомы при хаотичных тепловых толчках должны все ближе подходить друг к другу, а, с другой стороны, делать это атомам становится невероятно трудно. Кристалл просто избавляется от этого противоречия — он увеличивает период своей решетки, равный расстоянию между положениями равновесия атомов. Надо сказать, что, как правило, это увеличение мало: при нагреве на один градус размер тела увеличивается на одну миллионную долю своего первоначального значения. Часто такое тепловое расширение мы просто не замечаем. Не заметим мы, конечно, и расширение холестерика.

И тем не менее, уменьшение шага спирали с увеличением температуры, наблюдаемое глазом, есть результат теплового расширения. Расширения, правда, своеобразного. Дело в том, что теперь мы должны следить не только за средним расстоянием между центрами тяжести молекул, но также, что очень важно, и за средним значением угла между оптическими осями в соседних тонких нематических слоях. Мы уже оценивали этот угол α , он примерно равен $30'$. Эта оценка делалась для умеренных температур, когда тепловые толчки еще не очень значительны. Можно приближенно считать, что $30'$ — это минимальный угол α_0 , на который еще могут сближаться длинные оси молекул, расположенных в соседних тонких нематических слоях. В то же время при нагреве должны увеличиваться отклонения осей молекул от их положений равновесия вследствие случайных тепловых толчков. Эти положения равновесия определяются оптическими осями L , а хаотические колебания продолговатых молекул относительно направлений L происходят, в основном, в плоскости нематических слоев (рис. 92).

Таким образом, и здесь возникает знакомое нам противоречие, но уже на языке средней ориентации молекул

и случайных отклонений от нее. В холестерике оно ликвидируется путем увеличения среднего угла α между соседними оптическими осями L_1 и L_2 . Но увеличение угла α при практически неизменном расстоянии между соседними тонкими нематическими слоями означает, что поворот оптической оси на 180° произойдет в более тонкой

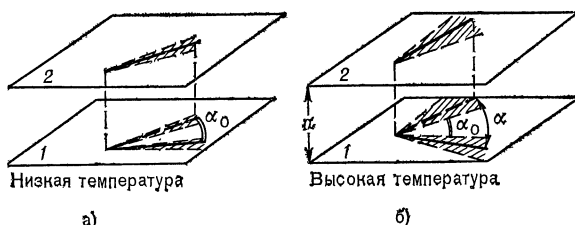


Рис. 92. Так как оси молекул не могут составлять угол, меньший α_0 , нагрев приводит к уменьшению шага спирали. Случай (а) соответствует слабым тепловым толчкам, а случай (б) — сильным

стопке таких слоев. Значит, толщина этой стопки, равная полушагу спирали, будет уменьшаться. Так происходит уменьшение шага холестерика с увеличением температуры, спираль как бы сжимается вдоль оси винта. Ясно, что вблизи температуры плавления холестерика в обычную жидкость тепловые толчки особенно сильны, и шаг спирали, соответственно, становится самым коротким *). Поэтому здесь холестериком отражаются самые короткие волны света — и пленка синее.

В обычных холестериках шаг спирали изменяется на сотни нанометров при изменении температуры на несколько градусов. Это значит, что пленка такого вещества, нагретая на несколько градусов, приобретет все цвета радуги. Но есть еще более уникальные материалы, как правило, это смеси холестерических веществ, которые демонстрируют все цвета спектра в интервале 10^{-2} и даже 10^{-3} градуса. Столь огромная чувствительность холестерика, уже сравнимая с последствиями отдельных тепловых толчков, показывает, какие необыкновенные возможности заключены в этих веществах, слои которых с толщиной всего 0,01 мм служат сегодня незаменимыми термощиндикаторами.

*) Такое поведение типично для веществ с одним сортом молекул. В смесях разных веществ наблюдается и обратная картина, что связано с более сложным взаимодействием разнотипных молекул.

§ 7. Тонкопленочный тепловизор

Глядя на мир широко раскрытыми глазами и воспринимая с их помощью громадный объем всевозможной информации, мы редко задумываемся над тем, что же такое глаз, чем он хорош и чем плох. Мы, конечно, имеем в виду не столько форму или цвет и даже не те тайные признаки, которые отличают Мику Морозова на известном портрете В. Серова от репинского «Мужика с дурным глазом». Мы говорим о характеристиках глаза как оптического прибора.

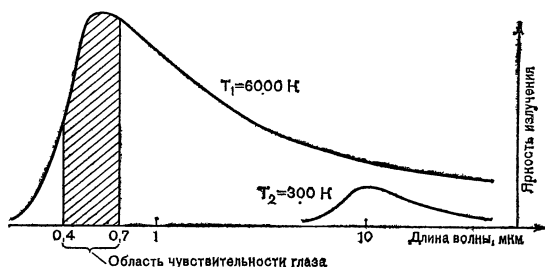


Рис. 93. Спектры излучения Солнца ($T_1=6000$ К) и тела человека ($T_2=300$ К).

Человек живет на Земле, освещаемой Солнцем, температура поверхности которого примерно 6000 К. Любое тело, нагретое до такой температуры, излучает электромагнитные волны с широким набором (спектром) длин волн, но максимальную интенсивность имеют лучи с длинами волн вблизи $\lambda_{\text{max}}=0,5$ мкм (рис. 93). В процессе эволюции органы зрения человека (а также многих животных, бодрствующих днем и спящих ночью) приобрели замечательное свойство принимать излучение именно в диапазоне длин волн от 0,4 до 0,7 мкм, причем чувствительность человеческого глаза к видимому излучению (свету) чрезвычайно высока. Глаз, кроме того, легко приспосабливается к низким и высоким уровням освещенности и имеет сравнительно высокое быстродействие (около 40 мс), соизмеримое с временем реакции человека на окружающую обстановку и потому вполне достаточное для его жизнедеятельности. Кажется бы, чего еще не хватает человеку? Но нет же... Человек хочет увидеть движение быстрых частиц в ускорителях, сфотографировать полет пули, измерить скорость сверх-

быстрых химических превращений веществ. И создает малоинерционные «глаза» — фотоэлектронные преобразователи изображений. Человек хочет исследовать сверхслабое свечение микроорганизмов и создает специальные фотоумножители, считающие отдельные кванты света. И, наконец, человек хочет видеть в темноте...

Электромагнитное излучение испускают все нагретые тела, причем чем холоднее тело, тем меньше интенсивность излучения и тем дальше в длинноволновую область смещен максимум его спектра. Существует очень простое соотношение $\lambda_{\max} \cdot T = \text{const}$ (закон Вина), с помощью которого легко установить, где находится максимум излучения тела с температурой T , если значение константы брать из предыдущего примера с Солнцем: $\text{const} = 6000 \text{ К} \cdot 0,5 \text{ мкм} = 3000 \text{ К} \cdot \text{мкм}$. Например, человеческое тело, имеющее температуру $37 + 273 = 310 \text{ К}$, испускает инфракрасные лучи с максимумом вблизи значения $\lambda_{\max} \approx 10 \text{ мкм}$ (рис. 93).

Если бы мы могли видеть инфракрасные, или, как говорят, тепловые лучи, то даже глубокой ночью нам открылась бы фантастическая картина движущихся силуэтов людей, работающих двигателей, перемещающихся (вспомним о конвекции) теплых и холодных слоев воздуха и т. д. Можно было бы увидеть тепловой след подводной лодки, скрытой толщей воды, или проследить по теплым выхлопным газам траекторию давно пролетевшего самолета.

Существует еще целый круг задач, который можно решать с помощью тепловидения. Например, нужно проверить тепловой режим громадной электрической схемы, узнать, нет ли где-нибудь перегретых элементов. Вы понимаете, что совершенно невозможно тыкать термометром в каждую из тысячи интересующих нас точек или усеивать всю схему дополнительными датчиками температуры. Точно так же для медицинской диагностики важно знать распределение температур по поверхности человеческого тела, это позволяет на ранних стадиях обнаружить опухоли или воспалительные процессы. Знание тепловых режимов различных устройств необходимо и в металлургии, химической промышленности, авиостроении и т. д. Во всех этих случаях сейчас используют тепловизоры, т. е. телевизионные установки, работающие на инфракрасных лучах.

Как это делается? К сожалению, еще не разработаны телевизионные передающие камеры, которые были бы чувствительны к длинам волн, большим 3 мкм. Поэтому все изображение целиком принять не удастся. Однако есть полупроводниковые приборы, способные выдавать электрический сигнал, пропорциональный интенсивности падающего на них инфракрасного излучения. Обычно это кристалл, для повышения чувствительности помещенный в охлаждаемую жидким азотом или гелием низкотемпературную камеру (криостат). Такой прибор может воспроизвести все изображение только поэлементно с помощью устройства развертки (сканирования). Например, перед приемником излучения устанавливают объектив и, покачивая его механически вдоль координат x и y , как локатором, «ощупывают» последовательно весь объект. Сигнал с приемника затем используют для управления яркостью луча обычной электроннолучевой трубки (только с медленными развертками луча, идущими в такт с колебаниями объектива). А с обычной трубки человек умеет считывать изображение своими глазами.

Как видите, недостатков у такого тепловизора немало: это громоздкая система, требующая охлаждения до низких температур, к тому же весьма медленно работающая из-за механической развертки изображения на входе. Каковы же другие возможности?

Вот здесь пора нам вспомнить о замечательных свойствах холестерических жидких кристаллов. Нам нужно использовать сильную температурную зависимость их оптических свойств, о которой говорилось выше. Давайте сконструируем тепловизор сами. Итак, мы хотим записать картину распределения температур на поверхности нагретого тела. Здесь могут встретиться два варианта.

Если предмет допускает прямой контакт с жидким кристаллом, то лучше всего нанести жидкокристаллическую пленку прямо на предмет. Пусть предметом будет человеческое тело с температурой, скажем, от 36 до 40 °С. Подберем холестерическую смесь так, чтобы при температуре 36 °С полоса избирательного отражения света совпадала с длиной волны красного (0,6 мкм), а при 40 °С — с длиной волны синего цвета (0,4 мкм) (рис. 94).

Тогда такому распределению температур будет соответствовать вся гамма цветов от синего до красного, и

мы можем определить, где находятся горячие участки (синие). Технически это делается так: сначала на кожу человека наносится слой черной краски, а на нее — слой жидкого кристалла. Наличие краски облегчает наблюдение избирательного отражения от жидкого кри-

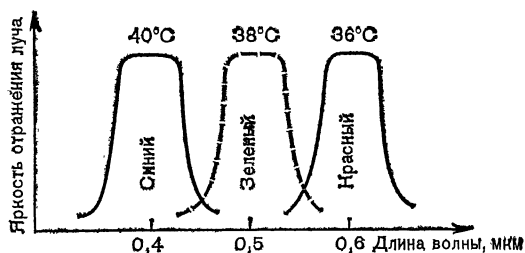


Рис. 94. При разных температурах холестерик избирательно отражает разные длины волн.

сталла. Ясно, однако, что такая раскраска человеку неприятна, поэтому исследователи разрабатывают специальные многослойные пленки, включающие черную основу (слой жидкого кристалла и защитный слой полимера). Такие пленки можно просто накладывать, причем многократно, на те участки кожи, которые желательно осмотреть. Иногда важно определить ничтожные разности температур в десятые и даже сотые доли градуса. В этом случае подбираются высокочувствительные смеси, у которых полоса отражения «пробегает» весь видимый диапазон при изменении температуры на 0,1 °C (см. третью страницу обложки).

Такой же метод измерения температур может быть реализован в случае плоских интегральных схем или в промышленных установках, применяемых в химической технологии. На этом же принципе работают и обычные комнатные термометры (см. третью страницу обложки).

Второй вариант тепловизора приходится использовать там, где непосредственный контакт жидкого кристалла с источником теплового излучения исключен. Например, электронная схема может содержать крупные и мелкие радиодетали, провода и другие объемные элементы. Источником инфракрасного излучения может быть лазер, и тогда возникает задача регистрации распределения интенсивности по сечению его луча. В этих и

множестве других случаев используется схема тепловизора, изображенная на рис. 95. В ней основным элементом является тонкая пленка холестерического жидкого кристалла, нанесенная на черную пленку — поглотитель излучения. Инженер, конструирующий такой прибор, рассуждает примерно так: объект излучает мало

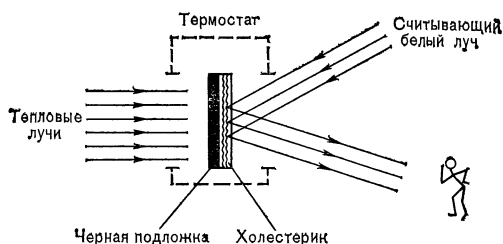


Рис. 95. Тепловизор на холестерике.

энергии, значит, ее нужно использовать полностью. Прежде всего объектив должен быть сделан из специального материала, прозрачного в инфракрасном диапазоне (например, соли фтористого лития, кальция, бария). Можно использовать и зеркальные объективы. Далее, вся лучистая энергия, прошедшая объектив, должна быть поглощена в пленке. Поэтому пленка не может быть слишком тонкой. Но она не должна быть и слишком толстой, иначе ее нельзя будет прогреть излучением из-за большой теплоемкости. Пленка жидкого кристалла не может быть очень тонкой еще и потому, что избирательное отражение возникает лишь в том случае, если на толщине слоя укладывается хотя бы несколько витков холестерической спирали.

В результате оказывается, что пленки общей толщиной порядка нескольких микрон являются наиболее подходящими. С их помощью удается решить те задачи, о которых говорилось выше. Наибольшим достоинством таких тепловизоров является простота их конструкции, но по чувствительности они уступают сканирующим тепловизорам. В настоящее время ведется большая работа по поиску новых жидких кристаллов с более резкой температурной зависимостью шага их спирали.

ОТЧАСТИ ТВЕРДЫЕ ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ

Звено в звено и форма к форме. Мир
Во всей его живой архитектуре —
Орган поющий, море труб, клавир.

Николай Заболюцкий

Все до сих пор рассказанное о жидких кристаллах касалось особых жидкостей, которым присущ строгий порядок в ориентации молекул. Но никакие определенные места или, другими словами, положения равновесия не закреплены за молекулами как в нематиках, так и в холестериках. Однако перечень жидких кристаллов только открывается нематическим и холестерическим состояниями. Оказывается, что по мере охлаждения одного и того же вещества могут наблюдаться все новые и новые состояния, которые уже не являются полностью жидкими, но и не стали еще полностью твердыми. Это тоже жидкие кристаллы, но особого рода. Они ведут себя как твердые кристаллы только по вполне определенным — избранным — направлениям в теле. Прежде чем познакомиться с ними, давайте вспомним, как устроен обычный кристалл.

§ 1. Твердый кристалл трехмерен

Все многообразие мира кристаллов, видимое нами, связано с существованием 230 способов, которыми можно расположить атомы в кристаллической решетке. При этом подразумевается, что в решетке обязательно имеются три независимых выделенных направления, вдоль которых атомы периодически занимают свои места, а решетка в целом обладает симметрией. Понятие симметрии существует в нашем сознании как признак внутренней красоты, согласованности и уравновешенности пропорций и частей, которые составляют гармоничное целое. Благодаря равновесию сил атомы и молекулы выстраиваются в кристалле правильными рядами, колоннами и слоями. По разным направлениям расстояния и силы взаимодействия между частицами, из которых

складывается кристалл, могут быть различны. Поэтому кристалл растет с неодинаковой скоростью по разным направлениям и вырастает в форме многогранника. На гранях осаждаются и закрепляются все новые и новые

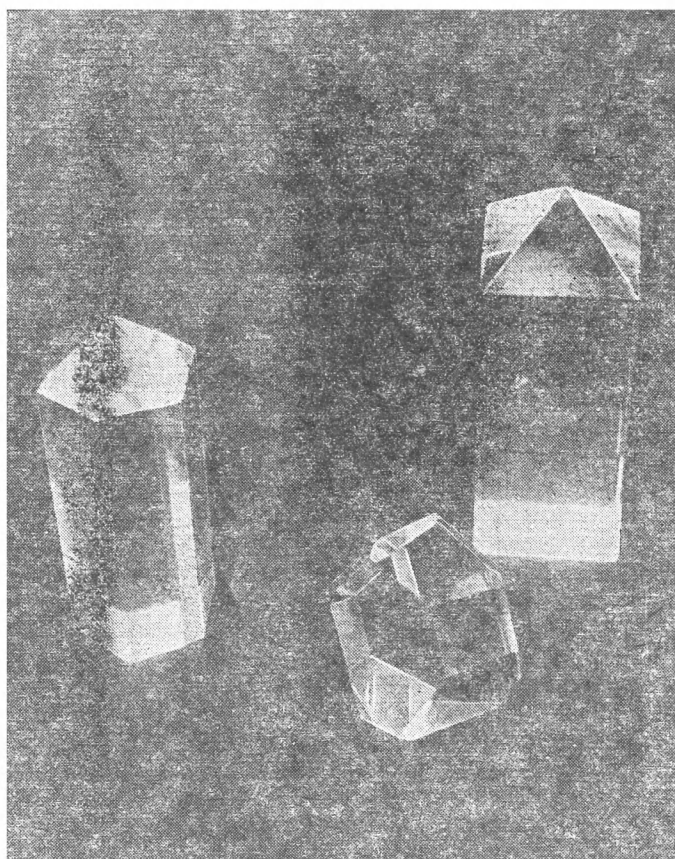


Рис. 96. Многогранники твердых кристаллов.

частицы, которые слой за слоем наращивают грани, сохраняя в кристалле только ему присущую симметрию (рис. 96).

Геометрические формы растущих кристаллов показывают нам, таким образом, способы внутреннего расположения атомов или, другими словами, типы простран-

венной симметрии. Собственно говоря, упомянутое число 230 — это число возможных типов симметрии. Наука, которая установила этот и многие другие интересные факты строения кристаллов и которая вообще изучает графику кристаллических решеток, называется кристаллографией. Мощным орудием исследования в этой науке является освещение кристалла яркими вспышками рентгеновского излучения. По сильным отражениям этого излучения от тонких слоев внутри кристалла (толщина таких слоев составляет период решетки) судят о внутреннем устройстве решетки атомов. Это очень точный и надежный метод изучения симметрии.

Вообще атомы и молекулы закономерно располагаются в решетке потому, что именно такое расположение для них наиболее экономично с энергетической точки зрения. В состоянии равновесия система обладает минимальной энергией. Если температура далека от точки плавления, т. е. слабы тепловые толчки, то атом или молекула прочно сцепляется со своими ближайшими соседями, но так, чтобы затраты энергии на это сцепление были наименьшими. Если это можно сделать в одном месте, то, значит, точно так же частицы поступят и во всяком другом месте кристалла. Главное энергетическое требование здесь — каждая частица должна находиться в одинаковых условиях. Наглядные примеры экономичного и рационального строения дает древнее зодчество (рис. 97, а) и современная архитектура, бывающая, к сожалению, слишком безликой (рис. 97, б). Не менее впечатляющим примером являются соты, которые строятся пчелами по велению инстинктов. И все-таки изощренность неживой природы при возведении кристаллических конструкций поражает воображение.

Силы, которые удерживают каждый атом на своем месте в трехмерной решетке, бывают разного типа. Иногда это просто силы притяжения и отталкивания между ионами в зависимости от их знаков. При этом ионы образуются благодаря тому, что один из атомов отдает свой электрон атому другого сорта, как, например, в обыкновенной соли получают положительный ион натрия и отрицательный ион хлора. В других кристаллах связь атомов не столь проста: оказывается, электроны могут принадлежать сразу двум атомам, как, например, в алмазе. Разорвать такую электронную связь трудно. И мы вправе заключить, что такие силы обеспечивают повышенную

прочность кристаллической решетки. Чаще, однако, встречается смешанный вариант взаимодействия, когда атомы связаны отчасти, как в поваренной соли, и отчасти, как в алмазе. Так устроены кристаллы, не проводящие электрический ток. В металлах, т. е. в кристаллах,

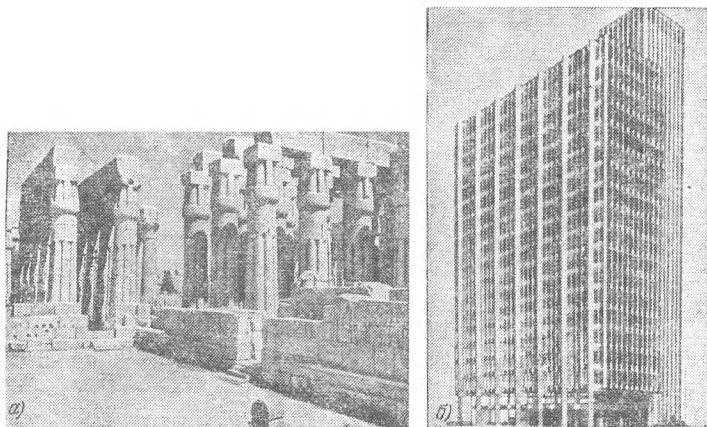


Рис. 97. Храм Амона в Луксоре, построенный в XV веке до н. э. (а), интересно сравнить с образцом современной архитектуры (б).

являющихся проводниками электрического тока, электроны вообще теряют конкретных хозяев, т. е. свои атомы, и составляют единый коллектив, принадлежащий всему кристаллу в целом.

Но существуют кристаллы, называемые молекулярными, в которых силы взаимодействия между частицами не похожи на только что названные и весьма своеобразны. Дело в том, что здесь решетка образована молекулами, каждая из которых занимает совершенно определенное место. Атомы в каждой молекуле связаны так же прочно, как в алмазе. Электроны из электронного облака молекулы не в состоянии вырваться и перейти хотя бы частично в распоряжение соседней молекулы. Поэтому в таких кристаллах молекулы взаимодействуют между собой с помощью механизма, о котором мы уже говорили, когда рассматривали причины существования жидких кристаллов. Суть его состоит в образовании у нейтральных молекул мгновенных электрических диполей, кото-

рые притягивают друг друга, а, значит, и молекулы в целом. Жидкие кристаллы, если их сильно охладить, превращаются именно в такие молекулярные кристаллы с трехмерной решеткой.

Поскольку силы притяжения в молекулярных кристаллах довольно слабые, прочность таких твердых тел не высока. Вспомните хотя бы легко тающие сахар или парафин. Но эта слабость связей таит в себе богатые возможности для многообразия конструкций из молекул. В самом деле, снабдив молекулы какими-либо дополнительными элементами, обеспечивающими хотя бы крошечное усиление притяжения молекул, мы можем сделать кристалл более прочным, если не во всех трех измерениях, то, по крайней мере, в двух или одном из выбранных направлений. Кроме того, изменяются условия соблюдения порядка и в ориентации молекул: он также становится многообразнее. Тот или иной способ построения и ориентации молекул определяется теперь внутренним уставом кристалла — его симметрией, а команды на конкретное построение подает температура.

Чем сложнее молекула, чем больше у нее выступов, отростков и других маленьких хитростей, тем дольше сопротивляется молекулярный кристалл тепловому расшатыванию. С увеличением температуры он теряет порядок в своих слоях, колоннах и рядах постепенно, шаг

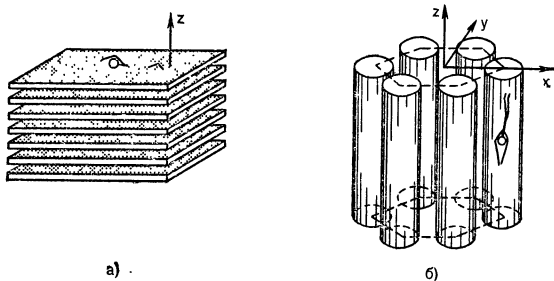


Рис. 98. Кристаллические решетки могут существовать в одном (а) или двух (б) измерениях, при этом тонкие слои и столбики являются жидкими.

за шагом, в зависимости от того, в каком направлении рвется слабейшее звено. При этом ориентация молекул либо подчиняется общему порядку, либо приходит постепенно в хаос. Полный хаос как в позициях, так и в ориентациях означает плавление в обыкновенную жид-

кость. Хаос только в позициях молекул во всех трех измерениях соответствует нематическому или холестерическому состояниям. Хаос в позициях лишь в двух измерениях означал бы, что имеются тонкие жидкие слои, образующие в третьем измерении кристаллическую решетку с единственной осью (рис. 98, а).

Хаос в позициях молекул всего в одном направлении означал бы, что имеются жидкие ряды или «нити», которые образуют в оставшихся двух измерениях периодическую решетку (рис. 98, б). Периодические решетки, образованные как жидкими нитями, так и жидкими слоями, должны, естественно, обладать твердостью кристаллов, хотя и не во всех измерениях. Так, решетка жидких нитей тверда в двух направлениях, перпендикулярных нитям. Решетка жидких слоев проявляет твердость только в одном направлении, перпендикулярном слоям. Когда мы говорим о твердости и твердых телах, то обычно имеем в виду, что материал проявляет упругость, т. е. восстанавливает свои размеры и форму после снятия нагрузки. Применительно к обсуждаемым частично твердым кристаллам это означает, что решетка нитей упруга в плоскости, которую пронизывают нити, а решетка слоев упруга вдоль оси, на которую нанизана стопка слоев.

Вдоль избранных направлений — кристаллических осей — в таких необычных кристаллах действует хорошо известный нам закон Гука — самый главный закон упругости. Он утверждает, что относительное удлинение, т. е. отношение удлинения участка тела Δc к его длине c , пропорционально силе F , действующей на единицу площади тела:

$$F = C \frac{\Delta c}{c} .$$

Коэффициент пропорциональности C называется модулем упругости. В случае, изображенном на рис. 98, а, закон Гука действует вдоль направления z , а в случае (б) — вдоль направлений x и y . Если в случае (а) сила действует вдоль жидких слоев, то в этих направлениях закон упругости не работает: тело здесь течет как вязкая жидкость. Такой же текучестью обладает тело в случае (б), когда на него действует сила, направленная вдоль жидких нитей.

Таким образом, системы жидких слоев и нитей очень своеобразны. Поговорим теперь о них подробнее.

§ 2. Твердая решетка из жидких нитей

Из всех частично твердых жидких кристаллов решетка жидких нитей кажется самой близкой по строению к полностью твердому кристаллу. Ведь в этом случае не хватает твердости лишь в единственном направлении. Казалось бы, обнаружить такое кристаллическое состояние в природе легче всего. Но не тут-то было. Долгое время природа не давала в руки ученым такие материалы, и эта модель кристалла, предсказанная физиками, существовала чисто умозрительно. Так продолжалось до 1977 г., когда индийские ученые получили в своей лаборатории дискообразные молекулы. О такой форме молекул мы уже говорили (рис. 9, б). И оказалось, что именно такие молекулы собираются в жидкие столбики или нити с диаметром, примерно равном диаметру молекулы — диска.

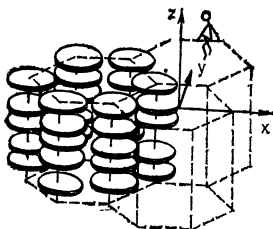


Рис. 99. Нематические столбики из дискообразных молекул.

Конструкция соответствующей кристаллической решетки показана на рис. 99. Обратите внимание на то, что в каждом столбике диски молекул примерно параллельны друг другу, как в нематике, а расстояния между дисками совершенно произвольны. Это означает, что они свободно движутся вдоль столбиков, которые именно поэтому могут быть названы жидкими нитями, а еще точнее — нематическими столбиками. Сами же нематические столбики расположены в пространстве совершенно строго; все они параллельны друг другу и образуют шестиугольную решетку в плоскости xy .

Все-таки любопытно, почему так происходит? Какие силы и детали строения молекул способствуют подобным построениям частиц? В ответ на эти вопросы можно уверенно заявить, что в этой конструкции плоские диски фигурируют не случайно. В самом деле, такая форма молекул позволяет сделать следующие заключения. Взаимное притяжение двух молекул при неизменном расстоянии между центрами дисков будет наибольшим, когда диски параллельны и располагаются друг над другом. Притяжение будет наименьшим, когда диски находятся в одной плоскости. Это связано с тем, что в первом случае

на одинаково близком расстоянии друг от друга находятся практически все атомы (попарно) двух молекул, а во втором случае близко друг от друга расположены только крайние атомы (рис. 100).

Силы отталкивания молекул тоже различны при разных взаимных положениях дисков. Из рис. 100 видно, что в случае (а) диски могут подойти друг к другу, не

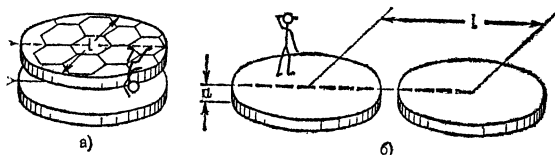


Рис. 100. Дisko-молекулы из одного столбика (а) сильно притягиваются, а из разных столбиков (б) сильно отталкиваются при одном и том же расстоянии между центрами масс.

отталкиваясь, на гораздо меньшее расстояние, чем в случае (б). Это связано с тем, что диаметр дисков гораздо больше их толщины. Таким образом, при одном и том же расстоянии между центрами масс молекулы в положении (а) сильно притягиваются, но слабо отталкиваются, в то время как в положении (б) они слабо притягиваются, но сильно отталкиваются. В молекулярном трехмерном кристалле тоже можно выделить столбики молекул, но в этих столбиках молекулы образуют периодический ряд, так как взаимодействия молекул, главным образом силы притяжения, успешно сопротивляются тепловым толчкам. А сами столбики — периодические ряды — составляют правильную шестиугольную решетку в основном за счет мощных сил отталкивания. Ведь мы знаем, что даже обыкновенные стальные шарики образуют правильную решетку, если ящик с ними не сильно трясти.

С увеличением температуры силы притяжения молекул в столбиках в конце концов не смогут удерживать диски на определенных местах, т. е. периодические ряды превратятся в жидкие нити — нематические столбики. Но само расположение столбиков в правильной решетке еще не претерпит изменений, поскольку этот порядок связан с другими силами — силами отталкивания. При еще большем нагреве уже силы отталкивания не смогут обеспечить строгий порядок в расположении столбиков — решетка в двух измерениях расплавится и образуется

трехмерный нематик, который течет в любом направлении при сохранении параллельности дисков. Решетку жидких нитей можно сравнить с пучком жесткостенных трубок, по которым течет нематик, а образование нематика в трех измерениях соответствует тому, что эти трубки лопаются при сильном разогреве.

Трехмерный нематик из дискообразных молекул был получен в лабораториях не сразу. Чаще всего возникали решетки жидких нитей. При этом выяснилось, что такая решетка не обязательно является шестиугольной. Бывают и квадратные решетки. Конечно, появление той или иной решетки зависит не только от способа укладки жестких трубок, но определяется другими деталями

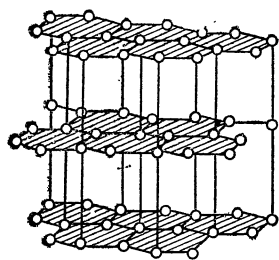


Рис. 101. Кристаллическая решетка графита представляет собой пластичный столбик огромных углеродных диско-молекул.

строения плоских молекул. Ведь молекула не обязательно имеет форму правильного диска. Вот эти-то неправильности, хотя и небольшие, придают силам взаимодействия молекул в плоскости xu небольшую угловую зависимость, которая и позволяет решетке сделать выбор между той или иной симметрией. Это полностью совпадает с тем, что происходит и в обычном твердом кристалле.

Мы не будем вдаваться в детали строения диско-молекул, но одну особенность хочется подчеркнуть. Такие мо-

лекулы обычно содержат много атомов углерода. Например, в вершинах шестиугольников, хорошо подогнанных один к другому на рис. 9, б, находятся атомы С. Поэтому такие вещества часто называют углеродистыми. Между прочим, таковыми являются сверхпрочный алмаз и малопрочный графит. Все знают, какое значение в наше время имеет графит. Устроена его решетка в трех измерениях довольно просто: можно сказать, что эта решетка представляет собой стопку огромных дисков, размером с целый кристалл, сдвинутых относительно друг друга. При этом расстояние между бесконечными дисками (0,335 нм) заметно больше расстояния между атомами в шестиугольнике (0,142 нм), что и делает графит легко расщепляющимся по плоскостям дисков (рис. 101).

Посмотрим теперь, как проявляются упругие свойства решетки жидких нитей. Мы знаем уже, что оптическая ось кристалла, образованного нематическими столбиками, параллельна жидким нитям: по этому направлению ориентируются короткие оси всех молекул. В то же время этот кристалл можно представлять себе как систему тесно уложенных жестких трубок. Чем же отличаются упругие свойства такого кристалла от свойств нематика, в котором также оптическая ось ориентирована одинаково в любом месте, если не действуют нагрузки?



Рис. 102. Изгиб столбчатого жидкого кристалла.

Отличие заключается в том, что здесь возможны не все отклонения оптической оси L от единственного направления, которые мы наблюдали в нематике на разных участках при различных нагрузках. Дело в том, что теперь оптическая ось жестко связана с настоящей кристаллической решеткой, хотя и существующей лишь в двух измерениях. Фактически вектор L совпадает по направлению с осями жестких трубок. Поэтому здесь недопустимы закручивание оптической оси в твист-ориентацию и ее изгиб, изображенный на рис. 39 (слева). Действительно, такие деформации означали бы, что жесткие трубки в некоторых участках кристалла должны были бы сильно вдавиться (проникнуть) друг в друга, что невозможно из-за сильного отталкивания молекул. Чтобы так искорежить трубки, нужны очень большие усилия, при которых само существование решетки станет невозможным. Таким образом, для оптической оси у решетки жидких нитей существует только одна возможность изогнуться так, как показано на рис. 39 (справа). Этот изгиб походит на изгиб толстого пучка жестких трубок, плотноую подогнанных друг к другу (рис. 102). В любом поперечном сечении пучка трубки параллельны друг другу, но от сечения к сечению ось пучка изменяет свою ориентацию. Такие ограниченные возможности изменения оптических свойств служат подтверждением того, что мы наблюдаем именно такой отчасти твердый

жидкий кристалл. Расплавив его в диско-нематик, мы убедимся, что в таком нематике существуют и кручение, и два типа изгибов оптической оси. Как уже говорилось, об этом свидетельствуют наблюдаемые дефекты ориентации. Нематическое состояние углеродистых веществ предоставляет уникальные возможности для наблюдения за дефектами.

Дело в том, что диско-нематик обладает очень большой вязкостью, поэтому дефектам в нем не так-то легко исчезнуть, если уж они возникли. Тем более, что можно внезапно и быстро охладить такой нематик, и все дефекты

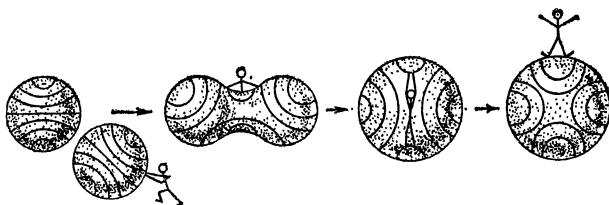


Рис. 103. Дефекты в растущих каплях диско-нематика.

ориентации в нем как бы «замерзнут», не успев исчезнуть. Получив в руки такой материал, можно не спеша исследовать его под микроскопом. При этом участок с дефектом разрезают, снимая один тонкий слой за другим под разными углами к линии дефекта и на различных расстояниях от нее. Так до мельчайших деталей изучают дефекты диско-нематиков.

Эти дефекты вызывают далеко не праздный интерес, потому что в конечном счете они очень серьезно сказываются на качестве кокса и графита, которые образуются из диско-нематиков. Надо сказать, что нематическое состояние таких веществ возникает вначале в виде маленьких сфер, а точнее — шариков, в которых оптические оси можно изобразить экваториальной и широтными линиями (рис. 103). Эти шарики постепенно растут и слипаются в крупные капли нематика, как показано на рисунке. В результате в подобных каплях накапливаются дефекты, очень похожие на те, что изображены на рис. 34. Сложная технологическая проблема состоит как раз в том, чтобы получить диско-нематик с идеальной ориентацией оптической оси, т. е. без каких-либо дефектов.

§ 3. Самый лучший кокс и сверхпрочные волокна

Ну уж, скажет читатель-скептик, к коксу-то жидкие кристаллы вряд ли имеют отношение. И действительно, никто об этом и не подозревал на протяжении многих лет. И только после получения химиками дискомолекул в чистом виде вдруг выяснилось, что подобные вещества существуют вокруг нас в огромных количествах — буквально в миллионах тонн, а технологическую значимость жидкокристаллического состояния трудно переоценить.

Кокс — это чистый углерод, получающийся из лучших сортов угля и нефти при их нагреве до 400—600 °C в бескислородной атмосфере. При выплавке чугуна или стали кокс горит за счет кислорода, находящегося в железной руде. Таким образом, он является не столько топливом, сколько химическим реагентом, восстанавливающим железо из его окислов. От режима плавки и качества кокса зависит процент содержания углерода в стали, ее механические и химические свойства. Качество же кокса как химического реагента зависит, во-первых, от количества посторонних примесей в нем, а во-вторых, от его кристаллической структуры.

Вот здесь-то мы и подошли к самому главному. Оказывается, в процессе коксования нефтяные смолы могут находиться в жидкокристаллическом состоянии. Это происходит потому, что сложные органические молекулы нефти имеют форму плоских дисков, укладываемых колонками. Если коксование вести при температурах существования таких колонок, получающийся твердый кокс имеет тоже упорядоченное строение, и его качество выше, чем при других режимах коксования. При массовом применении такого кокса получается большая экономия топлива.

Другим примером использования жидкокристаллического состояния может служить технология получения искусственных волокон. Каждый, кто видел, как укладывают асфальт, наверняка, обратил внимание, как легко вытягиваются длинные и гибкие струйки из жидкого смолистого пека. Представим теперь, что из какого-то резервуара с разогретым пеком через чрезвычайно малые отверстия выдавливаются тонкие жидкие нити (рис. 104). При их охлаждении образуются твердые углеродистые

волокна. И совсем недавно выяснилось, что прочность этих волокон может быть чрезвычайно высокой (как у стальной проволоки), если они были выдавлены из пека, находящегося в жидкокристаллическом состоянии.

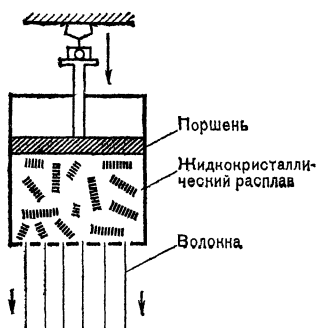


Рис. 104. При выдавливании жидкого кристалла, образованного дискообразными молекулами, получается сверхпрочное волокно.

Как и в случае с коксом, улучшение качества волокон объясняется отсутствием дефектов в их структуре.

Раз уж речь зашла у нас о волокнах, необходимо сказать несколько слов еще об одной возможности, которую предоставляют жидкие кристаллы технологам. Самые прочные синтетические полиамидные волокна, применяемые в качестве арматуры (кордов) автомобильных шин и других изделий, вытягиваются из жидкокристаллических растворов. Делается это так. Полимер, молекулы

которого имеют форму длинной жесткой нити или цепи, растворяется в специальном растворителе. При определенной концентрации полимера его молекулам выгоднее располагаться параллельно друг другу (об этом говорилось в гл. I), образуя нематическое состояние. Волокно вытягивается из этого раствора через маленькие отверстия, а после этого подвергается быстрой сушке для удаления растворителя. Прочность такого волокна на разрыв в десятки раз выше, чем у волокон, вытянутых из обычного, не жидкокристаллического раствора, и совсем немного уступает прочности стальной проволоки (излишне, по-видимому, напоминать, что органические волокна намного легче стальных и не подвержены ржавчине).

Нужно сказать, что использование жидкокристаллического состояния в технологических процессах является совершенно новым делом. Большие возможности открываются, например, и в химической технологии — выход конечных продуктов реакции может быть существенно повышен, если процесс вести в жидкокристаллических растворителях, ориентирующих (вспомним о «гостях» в чужом доме) молекулы реагирующих веществ.

§ 4. Кристалл, твердый только в одном направлении

Кто не пускал мыльные пузыри! Это действительно увлекательное занятие. И очень полезное с научной точки зрения, хотя бы потому, что они имеют прямое отношение к жидким кристаллам, о которых мы сейчас расскажем. Речь пойдет о смектических жидких кристаллах или, коротко говоря, о смектиках. «Смегма» в переводе с греческого означает «мыло». Уже давно было обнаружено, что есть сорт жидких кристаллов, которые по своему строению похожи на мыльные пленки. Как же сконструирована жидкая мыльная пленка, служащая поверхностью пузыря? Не так просто, как могло бы показаться. Это довольно сложная система, состоящая из молекул воды и молекул типа показанных на рис. 38, а.

Пленка устроена так. Тонкая прослойка молекул воды окружена с двух сторон дипольными молекулами. При этом дипольные головки обращены к воде, а длинные хвосты торчат наружу (рис. 105). Почему это так, будет ясно

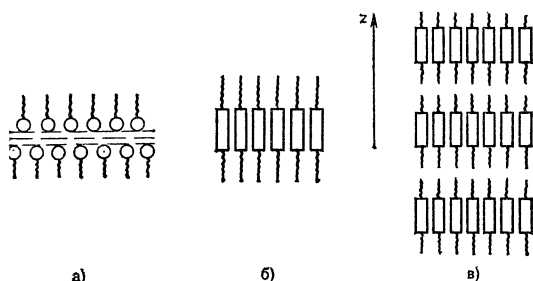


Рис. 105. Обыкновенная тонкая мыльная пленка (а) и слой смектического жидкого кристалла (б) очень похожи по своему строению. в) Слоистая структура смектика.

из следующей главы. При этом поверхность мыльной пленки абсолютно нейтральна, так как хвосты не несут на себе никаких электрических зарядов. Такая пленка ни к чему не прилипает, а заключенная в оболочку вода испаряется очень медленно, что продлевает жизнь мыльных пузырей. Кроме того, мыльная пленка, как и всякая жидкая пленка, обладает поверхностным натяжением, которое придает ей прочность и эластичность. Поэтому мыльные пузыри не разрушаются при легких прикосно-

вениях, а отскакивают как упругие шарики и сохраняются сравнительно долго.

Но мыльная пленка обладает еще одной интересной чертой. Сравните рис. 105, а и 38, б. Видно, что на обоих рисунках продолговатые молекулы ориентированы своими длинными осями перпендикулярно поверхности пленки. Следовательно, слой на рис. 105 тоже обладает порядком в ориентации молекул. Разница состоит только в том, что нематический порядок существует в толстой пленке жидкости, а индивидуальная мыльная пленка имеет толщину, равную сумме длин нескольких молекул. Таким образом, мы имеем дело с тонким слоем, в котором практически все молекулы, ориентированные одинаково (перпендикулярно поверхности), свободно перемещаются вдоль поверхности, но так, что центры масс молекул находятся на одной и той же плоскости. Эта плоскость называется смектической. Смектическая плоскость параллельна, естественно, поверхности такого тонкого слоя.

Можно сделать и толстую мыльную пленку, представляющую собой стопку тонких слоев, параллельных между собой (см. рис. 129 в следующей главе). А можно поступить и иначе. Вместо смеси воды и мыла можно использовать молекулы одного сорта, имеющие удлиненную жесткую центральную часть и два гибких хвоста (рис. 105, б). Жесткий скелет заменит собой дипольные головки «мыльных» молекул, разделенные слоем воды, и теперь мы получим стопку слоев, которые могут скользить относительно друг друга, используя гибкие хвосты как некую «смазку» (рис. 105, в). При этом толщина каждого слоя равна длине одной молекулы. Во всех слоях молекулы ориентированы одинаково и параллельны оси z . В каждом индивидуальном слое молекулы беспрепятственно передвигаются вдоль плоскости под воздействием тепловых толчков. Но все плоскости в стопке слоев находятся друг от друга на совершенно определенном расстоянии. Это расстояние одинаково для любых соседних плоскостей и примерно равно длине молекулы.

Фактически только что, может быть неожиданно для самих себя, мы описали новую конструкцию кристаллической решетки. Эта решетка периодична только в одном направлении — вдоль оси z . Период решетки составляет примерно длину одной молекулы. В таком жидком кристалле, как и в нематике, имеется оптическая ось, которая не изменяет своей ориентации на любом участке тела,

если не действуют нагрузки. Вдоль плоскостей этот жидкий кристалл ведет себя как обыкновенная жидкость. Но вдоль единственной кристаллической оси он демонстрирует свойства твердого тела, т. е. обладает упругостью. Если, например, потянуть за две поверхности такой толстой пленки в противоположные стороны по оси z , то расстояние между плоскостями увеличится. Однако при этом, как и в твердом кристалле, возникнут упругие силы, стремящиеся уменьшить период решетки. Поэтому после снятия усилий пленка вернется в исходное состояние, и период решетки станет прежним.

Такой жидкий кристалл, твердый лишь в одном измерении, называется смектическим или просто смектиком. Химики получили множество смектиков, состоящих только из молекул одного сорта, но эти молекулы всегда подчиняются двум требованиям — они длинные и «хвостатые». В некоторых случаях такие молекулы обладают еще и постоянными диполями, но отнюдь не всегда. Условие большой длины для молекул смектика довольно очевидно. Действительно, для того чтобы получился тонкий плоский слой молекул, не выскакивающих из него при умеренной температуре, необходимо гораздо большее сцепление между молекулами, чем в нематике. Конечно, при одном и том же расстоянии между параллельными молекулами их сцепление тем больше, чем они длиннее. Поэтому получается так: не очень длинные продолговатые молекулы образуют только нематик, а более длинные и более «хвостатые» молекулы могут создавать как нематик (при более высоких температурах), так и смектик (при более низких температурах). Постоянные диполи также содействуют большему сцеплению благодаря силам притяжения между разноименными электрическими зарядами.

Таким образом, в большинстве смектиков от мыльной пленки остается только свойство слоистости и жидкого поведения отдельных слоев. Изображают такие смектики обычно в виде стопки плоских слоев, внутри которых вертикальные черточки обозначают длинные оси молекул (рис. 106, а). Очень важно, что черточки перпендикулярны смектическим плоскостям и в том случае, когда слои искривляются под действием каких-либо сил (рис. 106, б). Это происходит все по той же причине более сильного сцепления молекул (по сравнению с нематиком). Следовательно, на каждом участке искривленного смектика

оптическая ось обязательно перпендикулярна касательной к поверхности слоя: ось как бы накрепко вмонтирована перпендикулярно смектическим плоскостям в каждом месте.

Столь прочная связь оптической оси с конструкцией кристаллической решетки является серьезным препятствием для управления пропусканием света сквозь смектик. Например, для осуществления эффекта Фредерикса

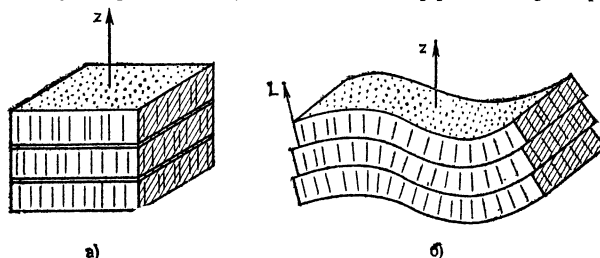


Рис. 106. В смектике А длинные оси молекул всегда перпендикулярны смектическим плоскостям.

а) Внешние силы отсутствуют; б) искривление смектических слоев под действием внешних сил.

в смектике требуются электрические поля, в десятки и сотни раз большие, чем в нематике. Это и не удивительно. Чтобы повернуть оптическую ось, теперь необходимо сильно искривить смектические слои, а это требует преодоления гораздо больших упругих сил, присущих твердому кристаллу, хотя и не очень обычному. Поэтому пока электромагнитное воздействие на смектики не практикуется столь широко, как в случае нематиков. Однако есть относительно простой способ механического воздействия на смектик, приводящий к желаемым результатам.

Совершенно естественно использовать механические свойства кристаллической решетки в одном измерении. Делается это так. Смектик помещается между двумя стеклянными пластинками, причем оптическая ось ориентируется перпендикулярно пластинкам (рис. 107, а). К пластинкам прикладываются силы, тянущие их в противоположные стороны вдоль оси z (рис. 107, б). При этом пропорционально действующим силам F увеличивается относительное удлинение $\frac{\Delta c}{c}$ расстояния между смектическими плоскостями. Возникает очевидный вопрос: до каких пор будет продолжаться такое растяжение смектика?

Совершенно определенно можно сказать, что равномерное растяжение смектика не может продолжаться бесконечно. Неограниченное увеличение расстояния между соседними смектическими плоскостями привело бы к тому, что в конце концов соседние тонкие слои оторвались бы друг от друга, а значит, разорвался бы и смектик в целом. Так и произойдет при очень большом удлинении,

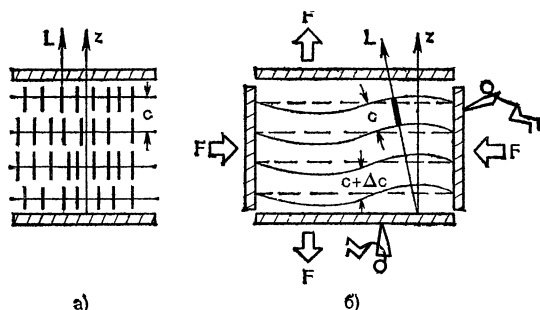


Рис. 107. Волнообразная деформация смектика А под действием механических сил.

а) Механическая нагрузка отсутствует; б) действие механических сил.

но до этого, оказывается, слои могут просто искривиться, как показано на рисунке. Действительно, такое искривление слоев без разрыва кристалла энергетически более выгодно. Ведь оно вначале, когда удлинение $\frac{\Delta c}{c}$ лишь немного превышает определенный порог, очень мало; при этом на каждом участке расстояние между соседними смектическими плоскостями практически не изменяется. Увеличиваются лишь интервалы между точками пересечения скошенных слоев с осью z , как показано на рисунке. Но этого достаточно, чтобы обеспечить общее удлинение смектика вдоль оси z .

Ясно, что, если на одном участке смектика произошел перекося тонких слоев в какую-то сторону, то на соседнем участке должен произойти такой же по величине перекося, но в противоположную сторону. Иначе слои должны были бы отрываться друг от друга и от стеклянных пластинок в том или ином месте смектика. Но это может произойти только при действии гораздо больших усилий. Таким образом, вдоль стеклянных пластинок возникает периодическое искривление смектических плоскостей (рис. 107, б). Толщина смектика составляет обычно деся-

тую долю миллиметра, а толщина отдельного тонкого слоя — около одной миллионной доли миллиметра. В этих условиях период возникающего искривления имеет промежуточное значение — около одной тысячной доли миллиметра.

Наблюдать такую мелкую рябь можно только в микроскоп. Подобное явление в более крупных масштабах нетрудно увидеть и в домашних условиях, если склеить стопку гибких полосок бумаги, скажем, клейстером и попробовать растянуть ее, пока клейстер не высох. В смектике это же явление происходит и в том случае, когда расстояние между стеклянными пластинками поддерживается неизменным, а смектик сдвигается вдоль смектических плоскостей, как показано на рис. 107, б. Похожий эффект искривления слоистой конструкции в гармошку происходит, к сожалению, и в жизни, когда сталкиваются, например, автомобили. На самом деле передняя и задняя части кузова специально конструируются так, чтобы они в критических ситуациях могли бы сами искривиться в упругую гармошку, но тем самым предохранили пассажирский салон от сильного удара.

На практике сжатие смектика поперек исходной оптической оси осуществляется с помощью сравнительно длительного разогрева смектика на каком-либо участке (например, лучом лазера) и последующего резкого охлаждения этого участка (лазерный луч мгновенно выключается). При этом участок, где действовал луч, быстро остывает и, следовательно, сжимается вдоль смектической плоскости, что и приводит к появлению «гармошки» оптических осей. Такая гармошка действует как дифракционная решетка, которая благодаря интерференции лучей, проходящих сквозь нее в разных местах, усиливает освещенность экрана на определенных участках, но ослабляет освещенность по соседству. В результате оптическая картинка на экране выглядит как периодическое чередование светлых и темных полосок.

Образование «гармошки» соответствует определенное значение относительно удлинения смектика вдоль оптической оси или его сжатия поперек оси. При этом значении, называемом порогом, проигрыш в одном виде энергии компенсируется выигрышем в энергии другого вида. В данном случае проигрыш связан с неодинаковой ориентацией оптических осей на разных участках, что, как мы знаем, энергетически невыгодно. Выигрыш связан

с тем, что упругая энергия решетки в одном измерении заметно меньше, если смектические плоскости скошены так, как показано на рис. 107, б. Ведь при этом расстояние между плоскостями заметно меньше, чем в том случае, когда все они параллельны поверхности стекол. Собственно, такова первопричина явления. Поэтому баланс именно таких изменений энергии определяет пороговое значение относительного удлинения $\frac{\Delta c}{c}$, которое обычно находится в интервале от 10^{-5} до 10^{-4} .

Таким образом, растянув смектик на одну тысячную долю от его общей толщины, мы добьемся волнообразного искривления смектических плоскостей. Если мы значительно превзойдем этот порог, то подобная «гармошка» уже не будет в состоянии уберечь смектик от разрыва, и при скошенности смектических плоскостей расстояния между ними увеличатся очень сильно. В результате произойдет разрыв смектика, а точнее — отрыв двух соседних плоскостей друг от друга. В образовавшуюся пустоту притекут молекулы из соседних участков и образуют еще один (дополнительный) тонкий смектический слой, который как бы вклинится между существовавшими слоями (рис. 108). Дальнейшее увеличение приложенных сил F приведет к возникновению все новых и новых дополнительных смектических плоскостей, с которыми неизбежно связано появление большого числа дефектов кристаллической решетки.

Дефект решетки в данном случае — это место, в котором происходит встраивание дополнительной смектической плоскости в прежнюю решетку. На рис. 108 такие места смектика обведены пунктиром. Эти дефекты напоминают дефекты в нематике, о которых мы уже говорили. На рисунке дефект изображен в виде точки. В сущности, точка — это центр дефекта. В объеме смектика точка заменяется линией, перпендикулярной в данном случае плоскости рисунка. Как и в нематике, обход вокруг центра дефекта по кольцевой тропинке приведет нас на то же

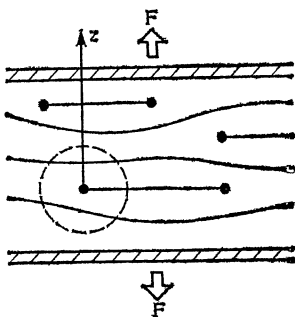


Рис. 108. При растяжении смектика A вдоль кристаллической оси в нем образуются дефекты.

место, но окажется, что по разные стороны от оси кристалла, проведенной через центр, числа плоскостей будут отличаться ровно на единицу. Таково общее свойство подобных дефектов во всяких твердых кристаллах.

Дефекты смектика замечательны тем, что они закрепляют «испорченную» кристаллическую решетку, т. е. мешают жидкому кристаллу вернуться в прежнее идеальное (без дефектов) состояние. Дефекты так сильно переплетаются, перепутываются между собой, что без специальной обработки смектика невозможно распутать такой клубок. В этом случае говорят, что «гармошка» оптических осей «запоминается» жидким кристаллом. Такая оптическая «память» может быть очень долгой и измеряться годами. «Стереть» дефекты с «лица» смектика можно, например, нагрев вещество так сильно, чтобы оно стало нематиком, а затем охладить вещество, вновь превратив его в смектик. Помочь в этом может и сильное электрическое поле. Именно эти свойства смектиков обеспечили им применение в технике, о чем мы еще расскажем.

§ 5. Смектики... Сколько их?

Смектиков много. Точнее, много разных типов смектического состояния. Только что мы рассмотрели самый простой из них — так называемый смектик типа *A*. Буква *A* в данном случае означает только первую букву латинского алфавита. Остается заключить, что есть еще смектики *B*, *C*, *D*, *E*, *F*, *G*, *H* и т. д. Алфавитный порядок в обозначении новых типов смектического состояния в целом отражает возрастающую сложность строения жидких кристаллов, которые проявляют твердость не во всех измерениях. Легко понять, что комбинации кристаллических решеток разного вида с разными ориентациями молекул в этих решетках весьма многочисленны. Реально обнаружен примерно десяток таких комбинаций. Мы остановимся на некоторых из них.

При охлаждении некоторых веществ смектик *A* превращается в смектик *B*. По внешнему виду смектик *B* напоминает мед и обладает примерно такой же вязкостью. Под микроскопом этот жидкий кристалл выглядит как цветное мозаичное панно. По дифракции рентгеновских лучей в этом смектике заключают, что в смектической плоскости такого кристалла, по крайней мере на неболь-

ших участках, молекулы расположены в правильном порядке. Обычно в этой плоской мини-решетке центры масс молекул располагаются в вершинах правильных шестиугольников (рис. 109). До сих пор не ясно, простирается ли в каждой смектической плоскости правильная шестиугольная решетка до бесконечности или все-таки размер «правильного» участка ограничен. Оказывается, это трудный и весьма принципиальный научный вопрос. Ответ на него можно будет получить только после выяснения всех деталей взаимодействия молекул внутри плоскости и в соседних плоскостях.

Дело в том, что физики доказали одну любопытную теорему, которая говорит, что бесконечная правильная кристаллическая решетка в индивидуальной смектической плоскости принципиально невозможна. Это связано с тем, что случайные отклонения молекул из положений равновесия из-за тепловых толчков слишком велики и часты в одной такой плоскости. Сколь ничтожны ни были бы эти толчки, все равно они препятствуют шестиугольникам быть идеально подогнанными друг к другу на большой площади. Если уходить по плоскости от выделенного шестиугольника все дальше и дальше, то маленькие отклонения от идеальности постепенно накапливаются, так что в конце концов мы заметим отсутствие настоящего порядка (рис. 110). Правда, это еще не означает, что такая решетка с дефектами не является твердой. Стекло, например, не обладает правильной решеткой, но является твердым.

Чтобы удержать молекулы на определенных местах в идеальной решетке на смектической плоскости, необходима поддержка со стороны соседей из ближайших плоскостей, т. е. должна быть стопка тонких слоев. Соседние плоскости по отношению к выделенной нами играют двоякую роль. С одной стороны, они сильно отталкивают молекулы этой плоскости, которые могли бы выбиваться из нее тепловыми толчками. Это сильное взаимодействие молекул, осуществляющееся на расстоянии, равном их длине, обеспечивает существование решетки в одном измерении и в смектике А. С другой стороны,

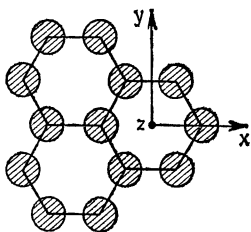


Рис. 109. Смектик В: правильная решетка на малом участке смектической плоскости.

молекулы из соседних плоскостей притягивают, хотя и слабо, молекулы выделенной плоскости. Это притяжение слабее притяжения между молекулами в одной плоскости, потому что в плоскости молекулы могут подойти друг к другу на гораздо меньшее расстояние. Тем не менее, слабое притяжение между соседними плоскостями

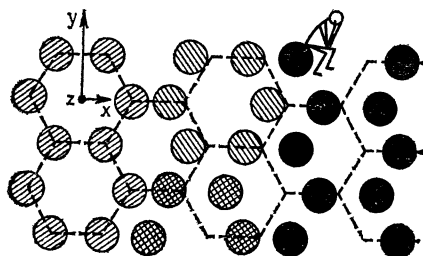


Рис. 110. На большом участке смектической плоскости в смектике *B* появляется неправильность решетки.

оказывает решающее влияние на стабильность решетки в выделенной плоскости, а, значит, и во всем смектике *B* в целом. Действительно, если по какой-то случайной причине выделенный шестиугольник сместится из правильного положения, то он должен потянуть за собой благодаря притяжению целую цепочку таких же шестиугольников из всей стопки плоскостей. Но тут тепловым толчкам не справиться с целым коллективом молекул, который вернет отклонившиеся молекулы в положения равновесия.

Итак, при наличии хотя бы слабого взаимодействия между смектическими плоскостями, обеспечивающего притяжение молекул, в объеме смектика *B* должна существовать кристаллическая решетка в трех измерениях, в то время как смектик *A* имеет одномерную решетку. Спрашивается, чем же тогда отличается смектик *B* от обычного трехмерного кристалла? Принципиально ничем. Но из-за слабого взаимодействия решеток, расположенных в соседних плоскостях, смектик *B* отличается большой податливостью в отношении сдвигов таких плоскостей в направлениях *x* и *y*. О таких кристаллах говорят, что они пластичны. Похожими свойствами обладает, например, графит (рис. 101): при нажме карандаша на бумагу с грифеля сползает на нее слой за слоем графита.

Пластичные кристаллы очень нужны многим отраслям науки и техники.

Поскольку мы затронули принципиальный вопрос об устойчивости кристаллических решеток разного типа, любопытному читателю будет интересно узнать, что неустойчивым является также бесконечный кристалл, твердый только в одном направлении. Напомним еще раз, что кристаллическая решетка неустойчива в неограниченном тонком слое, в то время как решетка бесконечных жидких нитей устойчива. Так вот, бесконечно высокая стопка смектических плоскостей абсолютно неустойчива из-за расшатывающего действия тепловых толчков. Почему же тогда мы говорили о смектике *A*? Потому, что на деле мы используем всегда невысокую стопку плоскостей — высотой до 0,1 мм. А при такой толщине тепловое расшатывание бессильно «размыть» кристалл, твердый только в одном направлении. То же самое можно сказать о решетке в тонком слое небольшой площади. Поэтому тонкая лепешка смектика *B* небольшого диаметра вполне может иметь кристаллическую решетку.

Смектик *C*, как и смектик *A*, обладает кристаллической решеткой в одном измерении. Но в отличие от смектика *A* здесь в каждой смектической плоскости длинные оси молекул наклонены по отношению к кристаллической оси *z* на угол θ (рис. 111). Очевидно, такой жидкий кристалл менее симметричен. Если, например, мы будем разглядывать стопку плоскостей смектика *A* под прямым углом к оси *z*, то, с какого бы направления в плоскости *xy* мы ни смотрели, эта стопка будет выглядеть для нас совершенно одинаково. Поэтому мы считаем ее очень симметричной. Однако разглядывая точно так же смектик *C*, мы заметим, что стопка плоскостей здесь с разных направлений выглядит по-разному: неодинаково будут выглядеть молекулы. Поэтому мы называем смектик *C* менее симметричным.

Таким образом, в смектике *C* оптическая ось *L* не совпадает с осью решетки *z*. Можно даже сказать, что в нем не одна оптическая ось, а несколько. Это усложняет оптические явления в таких жидких кристаллах. Интересно, из каких молекул должно состоять вещество, чтобы оно могло находиться не только в состоянии *A* при высокой температуре, но и в состоянии *C* при низкой температуре? Просто длинные стержни для этого не годятся: не видно причин, по которым они должны были бы накло-

ниться. А черточки на рис. 111 изображают только вытянутую форму молекул. Подходящими деталями в более сложном устройстве молекулы могут служить гибкие хвостики на концах жесткого стержня (рис. 112), что придает ей зигзагообразный вид. Такая молекула похожа на вытянутую латинскую букву S. Короткие гибкие

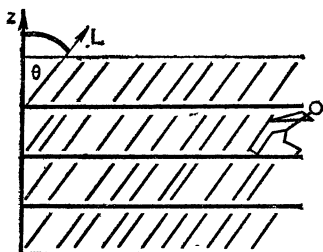


Рис. 111. Сметик С: наклон молекул в тонких нематических слоях.

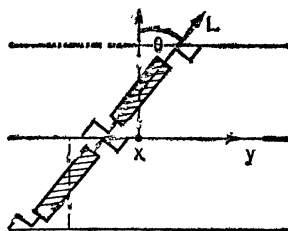


Рис. 112. В сметике С хвосты зигзагообразных молекул в слоях упаковываются согласованным образом.

хвостики в ней примерно параллельны смектической плоскости, а жесткое туловище всегда наклонено к плоскости.

Молекулы такой забавной формы действительно существуют. При высокой температуре тепловые толчки не позволяют этим «зигзагам» занимать какое-либо постоянное положение в смектической плоскости: плоскость каждого «зигзага» за ничтожные мгновения поворачивается вокруг кристаллической оси z . Поэтому в среднем за реальное время наблюдения мы увидим только проекцию «зигзага» на ось z , и для наблюдателя такой жидкий кристалл будет смектиком А. При низкой температуре и слабом тепловом расшатывании всем «зигзагам» энергетически выгодно быть параллельными друг другу, как в нематике, и словно застыть в определенном положении. И наблюдатель сразу же обнаружит, что все молекулы, а точнее их жесткие остовы, наклонены под одним и тем же углом θ к оси z и составляют угол $90^\circ - \theta$ со смектической плоскостью. Следовательно, мы получили смектик С.

Если жидкий кристалл обладает, помимо смектического (слоистого) порядка, кристаллической решеткой в двух измерениях в смектической плоскости, как смек-

тик B , а также наклоном «зигзагов» в плоскости, как смектик C , то он обозначается как смектик G (рис. 113). Если каждый тонкий слой смектика C является жидким в смектической плоскости, то о смектике G этого сказать нельзя: его молекулы, остающиеся на своих правильных местах, похожи на жерди покосившегося частокола.

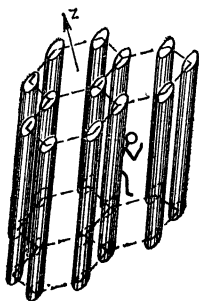
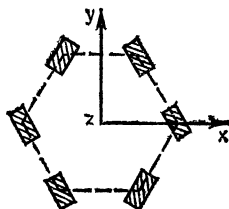


Рис. 113. Смектик G обладает свойствами смектиков B и C .



а)



б)

Рис. 114. Смектик E .
а) Молекула — планка; б) порядок в ориентации коротких осей молекул.

Смектик F очень похож на смектик C , но более вязок вдоль смектических плоскостей. Покосившиеся молекулы собираются здесь, по-видимому, в более или менее плотные группы, которые тоже могут «плыть» вдоль плоскостей, но не так легко, как это делают отдельные молекулы в смектике C . Можно сказать, что в смектике F есть что-то от смектического состояния G , «частокол» которого разорван на более или менее крупные части.

До сих пор речь шла об ориентациях длинных осей молекул. Вокруг этих осей молекулы, как правило, свободно поворачиваются за кратчайшие мгновения, так что наблюдателю кажется, что молекулы являются круглыми в поперечных сечениях. На самом деле они совсем не такие, а скорее по форме напоминают планки штакетника, т. е. являются удлиненными и уплощенными (рис. 114, а). Повторяем, в большинстве жидких кристаллов это обстоятельство совершенно не существенно из-за тепловых толчков. И только в некоторых смектиках при низкой температуре тепловое расшатывание не в силах разрушить порядок в ориентации коротких осей. Смектик E — именно такой жидкий кристалл. На рис. 114, б, изображающем вид сверху на смектическую плоскость

этого кристалла, показаны ориентации поперечного сечения «планок». При этом центры масс молекул располагаются на плоскости так, как в смектике *B*.

Наконец, самым несимметричным из всех известных смектиков является жидкий кристалл типа *H*. Его строение в смектической плоскости можно изобразить так: «повалим часток» смектика *E* набок, например в направлении оси *x*. Тогда получится картинка, показанная на рис. 115, если смотреть на смектик *H* сбоку. В такой конструкции трудно отыскать симметрию.

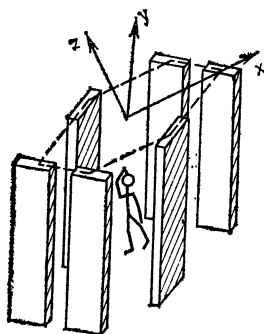


Рис. 115. Смектик *H* — скошенный смектик *E*.

Приведенные примеры наглядно показывают, насколько многолик мир жидких кристаллов, который далеко не исчерпывается перечисленными типами жидкокристаллического состояния. Между прочим, некоторые вещества в интервале температур в несколько десятков

градусов могут находиться во всех этих состояниях, попеременно сменяющих друг друга. Такое разнообразие строения жидких кристаллов особенно существенно в клетках живых организмов, где тот или иной тип жидкого или частично твердого состояния определяет всю жизнедеятельность организма.

§ 6. Оптические антиподы в смектиках

До сих пор в рассказе о смектиках мы подразумевали, что их молекулы обладают зеркальной симметрией, т. е. если их вертеть перед зеркалом, то обязательно найдется такое положение молекулы, при котором она точно совпадет со своим изображением в зеркале. Ну, а если ни одного такого положения не удастся найти? В этом случае, как мы уже знаем, молекула и ее отражение в зеркале являются оптическими антиподами. В холестерике правые и левые молекулы образуют соответственно вправо и влево закрученные спирали оптических осей. В некоторых смектиках может происходить нечто похожее, но, правда, не во всех. Так, в смектике *A*, где длинные оси молекул жестко перпендикулярны смектическим плоскостям, слабое влияние выступов и

отростков молекулярного контура (рис. 74) ничего не сможет сделать с конструкцией этого жидкого кристалла.

Другое дело — смектик *C*. Поскольку молекулам безразлично, в какую сторону от кристаллической оси z наклониться на угол θ (рис. 111), то проекции длинных

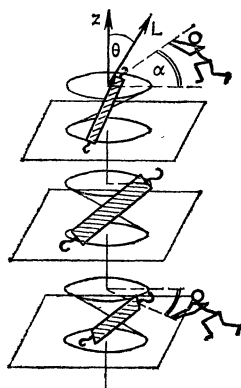


Рис. 116. Ориентационная спираль в смектике *C*.

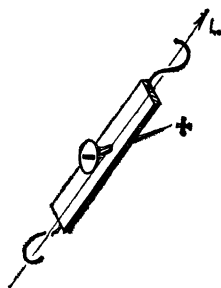


Рис. 117. Так можно представить спиральную молекулу с постоянным диполем,

осей молекул на смектическую плоскость не ограничены в своих поворотах вокруг направления z . Зеркально-симметричные молекулы во всех тонких (нематических) слоях смектика *C* выбирают одно и то же направление для своих проекций на плоскость. Но, если смектик *C* состоит только из правых или только левых молекул (или одних больше, чем других), то, как и в холестерике, проекции длинных осей на смектические плоскости оказываются закрученными в пространстве (рис. 116). Похожую закрученность приобретают и другие смектики с покосившимся «частоколом» молекул, т. е. смектики *F*, *G*, *H*.

Особый интерес представляют смектики *C*, содержащие оптические антиподы в разном количестве, молекулы которых обладают постоянными электрическими диполями. При этом нужно, чтобы такие диполи были встроены в остоны молекул поперек длинных осей (рис. 117). В сущности, на рисунке изображена знакомая вытянутая буква *S*, но теперь ее хвостики немного выступают из основного плоского участка, образуя вместе с ним обресток

спирали, и, кроме того, перпендикулярно к плоскому участку торчит диполь. Теперь представим себе, что в смектике *C* все молекулы ориентированы именно в таком положении. Точнее, так ориентируются зигзагообразные молекулы в конкретном тонком слое. В соседних тонких слоях они окажутся повернутыми вокруг оси кристалла на маленький угол α , как в холестерике (рис. 116).

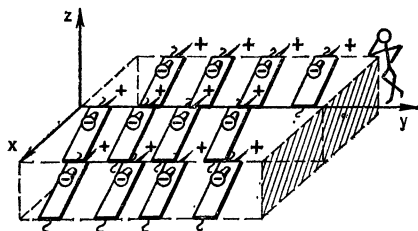


Рис. 118. Электрические заряды на краях тонкого слоя смектика *C*.

Неизменность положения «зигзагов» в конкретной смектической плоскости объясняется тем, что молекулам такой формы очень трудно поворачиваться вокруг своих длинных осей, если они наклонены. Действительно, такой поворот неизбежно приводит к тому, что хвосты молекул должны оказаться хотя бы временно в соседних тонких слоях. Но мы знаем, что между этими слоями действуют мощные силы отталкивания, которые не позволяют «чужим» молекулам проникнуть в конкретный слой. Невозможность поворотов плоских участков «зигзагов» в смектике *C* приводит к важному следствию: векторы постоянных диполей должны быть ориентированы в смектической плоскости совершенно одинаково у всех молекул (рис. 118).

Таким образом, мы приходим к замечательному выводу: противоположные торцы тонкого слоя в смектике *C* должны быть противоположно заряжены, если молекулы имеют постоянные диполи, встроенные перпендикулярно плоским участкам «зигзагов». Между прочим, такое устройство молекул как раз и означает, что они не являются зеркально-симметричными. Отразите молекулу на рис. 117 в зеркале, расположенном в ее основной плоскости, — сразу обнаружится, что положительный и отрицательный заряды диполя поменяются местами, а это и есть антипод. Любопытно, что диполи могут вовсе не влиять на существование смектика *C*, но коль скоро

он образовался, стрелки таких диполей, проведенные от отрицательных к положительным зарядам, выстраиваются строго в одном направлении.

Вообще это явление одинаковой ориентации электрических диполей в отсутствие электрического поля получило название «сегнетоэлектричество»: впервые оно было обнаружено в твердых кристаллах так называемой сегнетовой соли. И до недавнего времени думали, что сегнетоэлектричество бывает только в твердых кристаллах с особым строением решетки. Открытие такого явления в жидком слое поразило ученых и вызвало практический интерес к подобным смектикам. Дело в том, что кристаллом с одинаково ориентированными постоянными диполями легко управлять с помощью поля. В этом случае электрическому полю не надо производить работу по разведению зарядов в разные стороны, поскольку диполи уже существуют. Правда, иногда и молекулы нематика обладают постоянными диполями, но их ориентация в нематике совершенно хаотична, так что полю приходится поворачивать каждый диполь в отдельности. Все это требует слишком сильных электрических полей, если сегнетоэлектричество отсутствует. Смектик С привлекает как раз тем, что в каждом его тонком слое поле может поворачивать все диполи сразу, не тратя энергии на их образование и упорядочение. Поскольку диполи жестко связаны с остовами молекул, то дружный поворот диполей влечет за собой не менее дружный поворот длинных осей молекул. Таким образом, слабое электрическое поле относительно легко управляет оптическими осями смектика С, если этому жидкому кристаллу присуще явление сегнетоэлектричества. В отсутствие поля диполи, будто микроскопические гвоздики, вбитые в «планки» молекул, поворачиваются вместе с такими «планками» вокруг оси кристалла при переходе из одной смектической плоскости в следующую. Следовательно, наряду со спиралью осей молекул в пространстве существует и спираль электрических диполей (рис. 119, а). Шаги обеих спиралей, разумеется, совпадают. Электрическое поле E , параллельное смектической плоскости, «разматывает» спираль постоянных диполей, так как в поле на них действует крутящий момент (см. рис. 42). При этом шаг спирали становится тем больше, чем сильнее поле. Наконец, при определенном пороговом значении поля спираль разматывается полностью (рис. 119, б).

Перевод закрученного смектика C в раскрученное состояние благодаря взаимодействию постоянных диполей с электрическим полем вызывает существенное изменение оптических свойств жидкого кристалла: исчезают

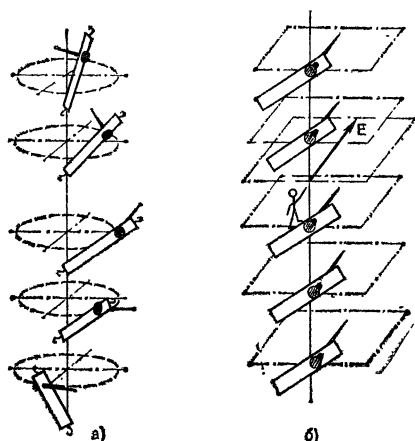


Рис. 119. Раскрутка спирали диполей в смектике C электрическим полем.

а) Поля нет; б) поле превышает пороговое значение.

избирательное отражение света, гигантское вращение поляризации света; лучи иначе проходят сквозь смектик и отклоняются им. По сравнению с твердыми кристаллами для этого требуются совсем небольшие затраты мощности. Заманчиво поэтому использовать сегнетоэлектричество в жидких кристаллах для эффективного управления лучами лазеров, как это делают специальные твердые кристаллы.

§ 7. Плавление при охлаждении!

Все хорошо знают, что вещества плавятся при нагреве и затвердевают при охлаждении. Обратное утверждение звучит парадоксально. Тем не менее, жидкие кристаллы позволяют сделать исключение из общего правила. Конкретно речь пойдет о плавлении смектика A в нематик. Плавление любых кристаллов означает полное разрушение кристаллической решетки. В данном случае исчезает периодическое расположение параллельных смектических плоскостей, т. е. разрушается решетка, су-

ществовавшая в единственном измерении. Изучать плавление смектика *A* при понижении температуры интересно не только с точки зрения науки о строении кристаллов, но и в практическом отношении. Очень часто желательно

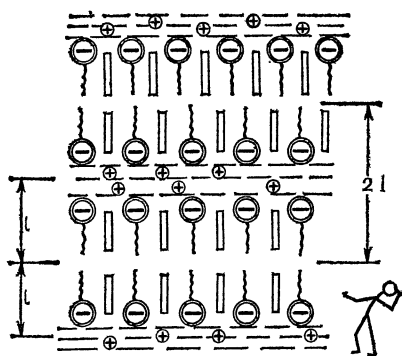


Рис. 120. Модель смектика *A*, имеющего двойную периодичность решетки по одному направлению.

иметь материалы, которые работали бы при низких температурах так же хорошо, как и при высоких. Это относится, в частности, и к нематикам, которые, как мы уже знаем, являются ценными оптическими материалами.

Понятно, что не всякий смектик может обладать подобным свойством. Необходимы специальные типы молекул и решетки. В качестве модели опять может служить мыльная пленка, изображенная на рис. 105, а и 129. Мы знаем, что это далеко не простая конструкция. Если хвосты молекул с дипольными головками как-то по-особому устроены, скажем, слишком толстые и изогнутые, или если наряду с такими молекулами присутствуют обычные длинные молекулы, способные прицепиться к хвостам, то строение стопки тонких слоев может отличаться от показанной на этих рисунках. Скорее стопка будет выглядеть так, как на рис. 120. При этом хвосты упаковываются в тонкие слои так, что в любых соседних слоях дипольные головки целиком образуют либо верхнюю, либо нижнюю поверхности. Толщина таких отдельных слоев равна примерно длине одной молекулы.

В качестве тонкого слоя можно было бы выбрать пару соседних слоев, содержащих соприкасающиеся головки.

Толщина такого слоя равна удвоенной длине молекулы. В центре этого слоя находятся в контакте две дипольные поверхности. Контакт может осуществляться как через тонкую прослойку воды, так и без нее. Вода пригодится нам, чтобы яснее понять существо дела. Например, диполь головки в качестве положительного заряда может иметь ион натрия, который в воде легко отделяется от головки. В результате образуется отрицательно заряженная молекула. Это означает, что фактически в центре рассматриваемого двойного слоя соприкасаются две отрицательно заряженные поверхности, между которыми, очевидно, возникают кулоновские силы отталкивания.

Безусловно, толщину этого двойного слоя можно принять за период кристаллической решетки в одном измерении: складывая такие слои в стопку один на другой, мы получим как раз смектик А. Ну, а как быть с одиночными слоями, центры масс которых практически находятся в центре молекул? Ведь основная масса молекул сосредоточена в их длинных хвостах. Проведя через эти центры масс плоскости, называемые смектическими, мы тоже получим решетку, но ее период будет равен расстоянию между такими плоскостями, т. е. длине одной молекулы. Таким образом, кристаллическая решетка, составленная из особых молекул, имеет два характерных периода: l и $2l$.

Читатель, конечно, отметит вычурность такой кристаллической системы. Действительно, для ее воплощения в жизнь требуется немало условий. Но природа щедра и конструирует самые удивительные молекулы и молекулярные решетки. Нарисованная решетка не может существовать при слишком высокой температуре, поскольку ее конструкция содержит элементы, которые нетрудно расшатать тепловыми толчками. При нагревании она может расплавиться как в нематик, так и в смектик А, обладающий только одним периодом решетки l . В сущности, именно такой смектик А изображен на рис. 105, в, его строение проще, чем у смектика с двойными слоями.

Но нас интересует сейчас результат охлаждения смектика с двойными тонкими слоями и двумя характерными периодами решетки. Каким бы слабым ни было притяжение между молекулами, при понижении температуры оно все сильнее подтягивает их друг к другу, что приводит к сжатию тел. Сжимается при охлаждении и решетка. И здесь происходит интересное явление. Когда в двойном

слое два одиночных слоя с обращенными друг к другу заряженными поверхностями притянутся на очень близкое расстояние, между отрицательными зарядами возникнет очень сильное отталкивание. Это означает, что при низкой температуре близкий контакт двух заряженных поверхностей просто невозможен; заряды из этих поверхностей готовы уйти куда угодно, лишь бы не находиться

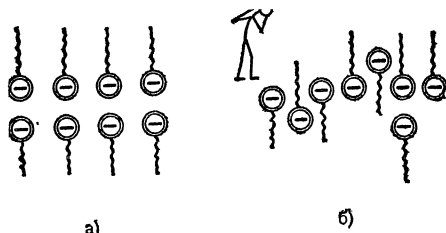


Рис. 121. Плавление решетки, имеющей два периода, при охлаждении.

а) Температура выше температуры плавления; б) температура ниже температуры плавления.

рядом. Но если разрушаются заряженные плоскости, то, значит, разрушаются и параллельные им смектические плоскости. Следовательно, плавится вся решетка в целом (рис. 121).

Так получается исключение из общего правила, гласящего, что при охлаждении происходит кристаллизация. Из всего рассказанного можно сделать еще несколько любопытных выводов. Например, если смектик А с двойными слоями подвергнуть при постоянной температуре сильному сжатию, то он в конце концов расплавится в нематик. Это прямое следствие сильного отталкивания, возникающего при уменьшении периода столь вычурной кристаллической решетки. Такие же эффекты наблюдаются и в смесях смектиков с одиночными и двойными слоями при изменении концентрации компонент, нарушающем не очень устойчивое равновесие решетки.

Подобные явления заметно затягивают образование истинно твердого кристалла при остывании вещества. Это не удивительно, потому что строение двойного слоя противоречит строению решетки, твердой во всех измерениях. Поэтому в коллективе молекул необходимо сначала разрушить группировки типа двойных слоев, расплавив их в нематик, а затем из отдельных молекул построить совершенно новую решетку. Затягивание процесса

кристаллизации имеет прямое отношение к переохлаждению вещества в жидком состоянии, в котором попадают какие-либо сгустки молекул, не согласующиеся со строением твердого кристалла. Здесь напрашивается очевидная аналогия. Все знают, как долго и трудно приходится овладевать вниманием коллектива, особенно если он разбился на группы, увлеченно беседующие о чем-то им интересном.

Таковы основные свойства смектических жидких кристаллов. Знакомясь с ними, мы не перестаем восхищаться красотой и изобретательностью природы, создающей неповторимые молекулярные ансамбли.

§ 8. Лазерное перо и ультразвуковой «рентген»

Как известно, рисовать можно карандашом, мелом, кисточкой и так далее, а стирать нарисованное — соответственно резинкой, тряпкой или еще чем-нибудь. Но представим себе работающую вычислительную машину, которая, скажем, обрабатывает метеорологическую информацию. Как было бы хорошо, если бы в результате была выдана подробная карта или какая-то сложная схема. Но такая простая вещь, как рисование, современной машине дается с большим трудом. Машина может рисовать с помощью электронного луча по экрану телевизионной трубки, но в этом случае кадр должен все время перезаписываться, так как люминесцентные экраны пока не обладают достаточно надежной памятью. Можно рисовать и с помощью «механической руки», держащей обычный карандаш, но такая система оказывается довольно громоздкой и медлительной. Кроме того, в этом случае не удастся осуществить достаточно удобное стирание информации.

А можно ли использовать лазерный луч в качестве карандаша? Конечно! Лазерный луч можно отклонять не только механически, скажем, с помощью колеблющегося зеркала, но и другими, более быстрыми способами. Например, с помощью твердых или жидких кристаллов, показатель преломления которых зависит от электрического напряжения, приложенного к кристаллу. Существуют также очень быстродействующие акустооптические устройства. Там луч отклоняется кристаллом, по которому бежит звуковая волна. Таким образом, ясно,

как можно водить лазерным карандашом; теперь нужно только заставить луч оставлять следы.

Проще всего, конечно, водить лучом по фотобумаге, но тогда нужно осуществлять процесс проявления. А можно просто выжигать изображение, как это делали многие из нас с помощью линзы и солнечного зайчика. Но выжигание требует большой энергии луча и дает нестираемое изображение. Однако сама идея использовать тепловой эффект лазерного луча оказалась очень перспективной.

Представим себе, что нам удалось найти такой материал, который был бы практически прозрачным вначале, становился непрозрачным в тех местах, по которым прошел лазерный луч, сохранял след луча сколь угодно долго и мог переводиться в исходное прозрачное состояние с помощью электрического напряжения. Тогда мы могли бы рисовать и стирать изображение многократно, а если нужно, то и очень быстро и к тому же совершенно «не прикладая рук». Оказывается, такая экзотическая среда существует — это знакомые нам смектические жидкие кристаллы. (На холестерических веществах тоже можно осуществлять этот процесс так называемой термооптической записи изображений, но с несколько худшими оптическими характеристиками.)

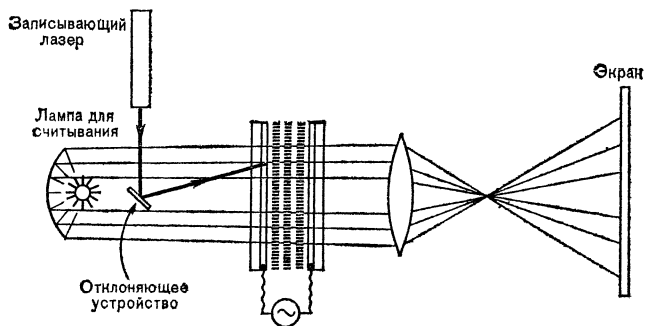


Рис. 122. Лазер записывает изображение на смектике.

Как же технически сделать рисунок лазерным пером? Что взять в качестве «бумаги»? Конструкция соответствующего жидкокристаллического устройства показана на рис. 122. Она состоит из лазера, луч которого отклоняется специальной системой, слоя жидкого кристалла, выполняющего роль «бумаги», и проекционной системы, позволяющей рассматривать изображение на экране.

Как и раньше, жидкокристаллическое вещество помещается в узкий зазор между двумя стеклами, на внутренние поверхности которых нанесены прозрачные электроды. Эти электроды нужны только для стирания изображения электрическим напряжением. Запись же осуществляется с помощью нагрева вещества лазерным лучом. Для этого лазерный луч должен поглощаться в жидком кристалле, и в то же время, как уже говорилось,

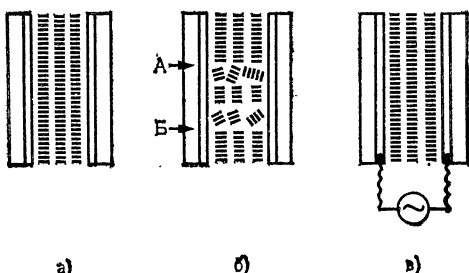


Рис. 123. Ориентация молекул смектика до записи (а), после записи (б) и после стирания (в).

вещество должно быть прозрачным для другого светового пучка, в котором рассматривается изображение. Эти два требования, казалось бы, противоречат друг другу, но проблему удастся решить, применяя в качестве примеси к жидкому кристаллу специальные красители, поглощающие только лазерный (например, красный или инфракрасный) свет и не поглощающие свет в остальном видимом диапазоне.

Чтобы устройство работало, жидкий кристалл должен обладать смектическим состоянием, которое при нагревании переходит в нематическое, а затем в обычную жидкость. Кроме того, молекулы должны обладать большим диполем, направленным вдоль длинной молекулярной оси. Это необходимо для стирания изображения с помощью знакомого нам перехода Фредерикса.

Пусть, например, мы имеем смектик при комнатной температуре, который переходит в нематик при 30°C . Предположим, что в исходном состоянии вещество находится при температуре около 25°C и его молекулы ориентированы перпендикулярно стеклам (ориентация задается специальной обработкой электродов) (см. рис. 123, а). Тогда, несмотря на наличие добавки красителя, слой жидкого кристалла будет практически прозрачен. Быс-

трый нагрев вещества записывающим лучом (скажем, до 32—35 °С) переводит его в обычную жидкость. После ухода луча вещество остывает и становится снова смектиком. Остывание идет быстро, и молекулы не успевают занять свои исходные позиции и встать перпендикулярно стеклам. В этих участках (А и Б на рис. 123, б) исходная совершенная ориентация оказывается нарушенной, появляются многочисленные дефекты, показатель преломления изменяет свое значение от точки к точке нерегулярным образом, и эти участки сильно рассеивают тот свет, с помощью которого производится считывание изображения. Такая «дефектная» ориентация может сохраняться очень долго (часы, дни или даже месяцы). Мы получаем таким образом длительную память, обусловленную тем,

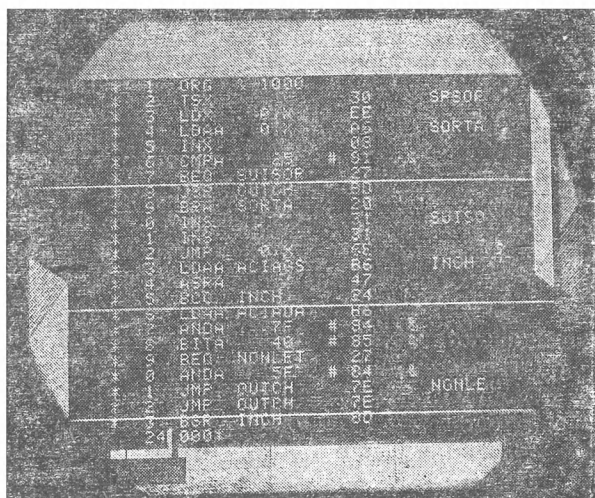


Рис. 124. Текст, записанный по смектическому жидкому кристаллу лазерным лучом,

что смектические жидкие кристаллы по определенному направлению столь же «упрямы», как и обычные твердые вещества — без достаточно сильного внешнего воздействия молекулярные слои перемещаться и даже изгибаться не могут. Только очень большая разность потенциалов на электродах может заставить молекулы выстроиться вдоль поля (вспомним об их большом дипольном момен-

те). Молекулярные слои при этом распрямляются (рис. 123, в), и вещество становится прозрачным. Произошло стирание изображения, и устройство готово к новому циклу записи.

Если лазерный луч очень острый, а слой жидкого кристалла достаточно тонкий, этим способом можно записывать даже тексты (рис. 124). Количество букв на одну «страницу» составляет примерно 1 миллион.

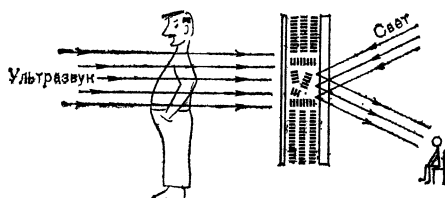


Рис. 125. Принцип действия ультразвукового «рентгена».

Изображение, полученное таким образом, можно проецировать на большой экран. Это очень важно, когда число людей, одновременно наблюдающих картину, достаточно велико. Экран при этом может быть столь же большим, как в кинотеатре. Телевизионную же трубку с экраном такого размера трудно было бы представить.

У смектических кристаллов есть еще одно интересное приложение. Их ориентацию можно изменить звуковой или ультразвуковой волной. На этом принципе сейчас делаются попытки построить ультразвуковую «рентгеновскую установку» для медицинской диагностики. В этом случае тело человека просвечивалось бы не жесткими рентгеновскими лучами, а абсолютно безвредными ультразвуковыми волнами. Слой жидкого кристалла такой установки принимает ослабленные телом пациента волны (рис. 125), и распределение их интенсивности фиксируется в виде картины нарушенной молекулярной ориентации смектика. Задача здесь состоит в том, чтобы повысить чувствительность жидкого кристалла к ультразвуковым волнам.

ЭКСКУРСИЯ В БИОЛОГИЮ

Бездонная чаша прозрачной воды
Сияла и мыслила мыслью отдельной...

Николай Забоцкий

§ 1. Общие рассуждения

Наука о живом, именуемая биологией, исключительно сложна. В биологии задать сто вопросов гораздо легче, чем ответить хотя бы на один из них. Но ответы искать нужно, и часто в этих поисках биологи обращаются к физике.

Интерес к жидким кристаллам со стороны биологов не случаен. Во-первых, именно жидкие кристаллы сочетают в себе упорядоченность, характерную для твердого тела, и подвижность, являющуюся свойством жидкости. Эти же два, казалось бы, противоположных свойства характерны и для живой материи во всех ее проявлениях. Вот почему оказывается очень заманчивым применить теорию, достаточно подробно разработанную для жидких кристаллов, к таким сложным биологическим явлениям, как сокращение мышц, передача нервных импульсов, фотосинтез, функционирование клеточных мембран и т. д. Нужно, правда, проявлять определенную осторожность при таком подходе, так как физика жидких кристаллов развита для сред, достаточно однородных на больших масштабах, чего нельзя сказать о биологических объектах. В последнем случае структурные элементы могут иметь масштабы, соизмеримые с размером молекул (примером служат клеточные мембраны).

Второй замечательной особенностью жидких кристаллов является способность их молекул к самоорганизации, т. е. к образованию упорядоченных структур (вспомним, например, о спиральной структуре холестериков). Эта особенность, разумеется, не ускользнула от внимания биологов, в связи с чем делаются попытки привлечь соответствующие представления для рассмотрения процессов самовоспроизведения молекул в клетке, проблем эволюции и т. д.

В-третьих, наконец, высокая чувствительность жидких кристаллов к внешним воздействиям, таким, как температура, посторонние примеси, свет, внешние поля и т. д., подсказывает исследователям новые подходы при выяснении механизмов работы рецепторов органов чувств.

Давайте рассмотрим некоторые из приложений жидких кристаллов к биологии, начав с подробного изложения свойств водных растворов органических молекул.

§ 2. Вода и длиннохвостые молекулы

Вода — основа всего живого. У человека, например, она составляет около 66% всей массы тела, у медузы — 95%. Вода выполняет ряд важных функций. Она является прекрасным растворителем для минеральных солей и других веществ, которые нужно вводить в

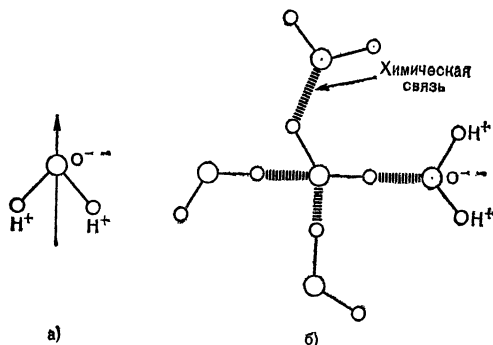


Рис. 126. Атом кислорода, соединившись с двумя атомами водорода, образует дипольную молекулу воды (а) (стрелкой показано условное направление диполя, как принято у химиков). Молекулы воды в жидком состоянии зацепляют друг друга мостиками слабых химических связей (б).

организм и выводить из него при обмене веществ. В то же время в воде абсолютно нерастворимы вещества, необходимые для сохранения целостности строения организма. Среди всех известных жидкостей вода имеет самую большую теплоемкость, что очень существенно для сохранения теплового баланса организма с окружающей средой. Рекордные свойства воды как растворителя ионных соединений и чрезвычайно высокая теплоемкость обусловлены ее весьма специфическим строением (рис. 126). Прежде всего отметим, что 2 иона водорода, заряженные

положительно, и ион кислорода, заряженный отрицательно, в молекуле воды располагаются в форме треугольника, так что получается диполь, показанный стрелкой на рис. 126, а. Но самое важное заключается в том, что в жидкой воде молекулы не являются свободными, а соединены между собой с помощью довольно слабых химических связей (между атомами кислорода и водорода) так, как показано на рис. 126, б. Каждая молекула воды оказывается связанной с четырьмя соседними молекулами. При нагреве часть энергии уходит на разрыв связей, и этим объясняется высокая теплоемкость воды.

Если бы мы захотели растворить в воде большую органическую молекулу, нам пришлось бы насильно втиснуть ее в «водную решетку», разрушив множество химических связей. Это энергетически невыгодно. Вот почему органика (если она не несет электрического заряда, как это было в случае ионных красителей, см. § 4 гл. II) не растворяется в воде, как бы выталкивается из нее. Таким образом, необычные свойства воды целиком определяются ее специальным строением.

Интересная ситуация возникает, когда в одной и той же молекуле объединены две части, одна из которых заряжена и сама по себе могла бы растворяться в воде, а другая часть не заряжена и соответственно нерастворима (см. рис. 38, а). Тогда в зависимости от концентрации таких молекул в воде может наблюдаться следующая цепочка событий.

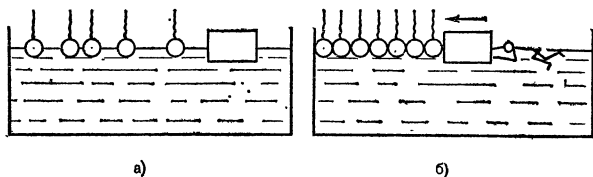


Рис. 127. Молекулы-«головастики», плавающие на поверхности воды хвостами вверх (а), легко можно сдвинуть с помощью поплавка так, чтобы образовался плотный мономолекулярный слой (б).

Пусть воды очень много, а хвостатых заряженных молекул очень мало. Тогда все они могут легко разместиться на поверхности воды так, чтобы заряженные головки были погружены в воду (благодаря притяжению со стороны ее зарядов), а хвосты, как поплавки, торчали бы вверх, избежав таким образом контакта с водой (рис. 127, а). Эти молекулярные поплавки можно сдвинуть вмес-

те с помощью плавучего барьера, как это показано на рис. 127, б. Вначале барьер будет испытывать очень слабое противодействие со стороны молекул, но когда молекулы соберутся вместе, их противодействие резко увеличится. Этот процесс похож на сжатие газа поршнем. Поршень идет легко, пока газ не превратится в жидкость, которая практически несжимаема. В данном случае мы имеем дело, можно сказать, с двумерным (а не трехмерным) газом и двумерной жидкостью.

Если бы молекулы лежали на поверхности воды хаотично, однако образуя плотный мономолекулярный (толщиной в одну молекулу) слой, мы действительно имели бы дело с настоящей двумерной жидкостью. Но в нашем случае молекулы не только могут перемещаться в плоскости слоя, но и сохраняют одну и ту же ориентацию. Значит, мы имеем дело с двумерным жидким кристаллом (один слой смектика).

Будем теперь увеличивать концентрацию молекул «головастиков». Поверхность воды очень быстро окажется занятой. Но, оказывается, существует способ ее искусственного увеличения. И «головастики» с легкостью находят этот способ (рис. 128, а). Избегая контакта с водой,

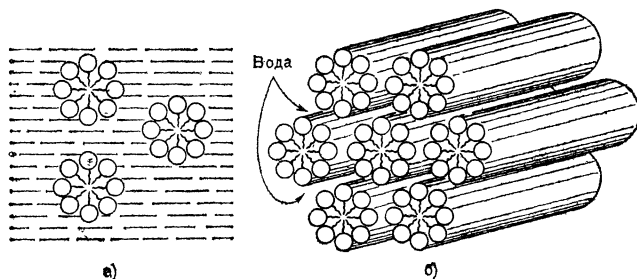


Рис. 128. Сферические мицеллы свободно плавают в воде (а), а цилиндрические — упаковываются в шестиугольную структуру (б).

хвосты молекул прячутся внутрь сфер, образованных дипольными головками, создавая так называемые мицеллы (от латинского слова «мица» — крупинка). Мицеллы имеют сферическую форму, и раствор в целом похож на взвесь твердых частиц в жидкости. В поляризованном свете такой раствор не обладает двойным лучепреломлением. По отношению же к оболочке отдельной мицеллы останутся справедливыми соображения, которые мы высказали о природе мономолекулярного слоя.

Давайте еще увеличим концентрацию хвостатых молекул или уменьшим концентрацию растворителя. Количество сферических мицелл будет увеличиваться до тех пор, пока они не начнут слипаться. Воды становится недостаточно, чтобы омывать сферические мицеллы, и возникает новая геометрия (рис. 128, б). Мицеллы приобретают форму цилиндров, тесно уложенных рядом и в сечении образующих упаковку в виде шестиугольников. Теперь оптические свойства раствора сильно зависят от того, в каком направлении мы смотрим — вдоль или поперек цилиндров. Раствор обладает сильным двойным лучепреломлением и в то же время может течь. Мы имеем дело с настоящим жидким кристаллом. Такого типа жидкие кристаллы, полученные растворением одного вещества в другом, называются лиотропными (от греческого слова «лио» — растворяю).

Будем настойчивы и продолжим опыт с этим странным раствором. Добавим еще хвостатых молекул или, что то же самое, испарим часть воды. Тогда цилиндрическое строение раствора становится невозможным, и он приобретает форму стопки параллельных слоев (рис. 129). И опять длинные хвосты избегают контакта с водой, а вода образует очень тонкие прослойки между слоями вещества. Для таких тонких прослоек воды еще вполне достаточно, и она играет роль смазки, позволяющей слоям легко скользить относительно друг друга. Это как раз то самое мыло, о котором мы уже говорили в связи с рис. 105 и которое дало название целому классу смектических жидких кристаллов. Таким образом, слоистый «пирог» на рис. 129 по своему происхождению является лиотропным жидким кристаллом, а по строению — смектическим.

Если мы еще уменьшим концентрацию воды, то получим новые картинки, показанные на рис. 130. Это структуры-перевертыши. Воды уже так мало, что теперь мы имеем дело не с раствором «головастиков» в воде, а, на-

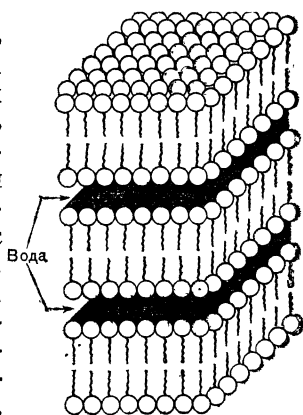


Рис. 129. Слоистое строение лиотропного жидкого кристалла.

оборот, скорее вода растворена в них. При этом она может существовать в форме цилиндров (рис. 130, а), а если ее совсем мало, то в форме небольших сфер (рис. 130, б). Обратим внимание на то, что изначальный принцип, согласно которому с водой контактируют только дипольные головки молекул, но не хвосты, выполняется и в этих

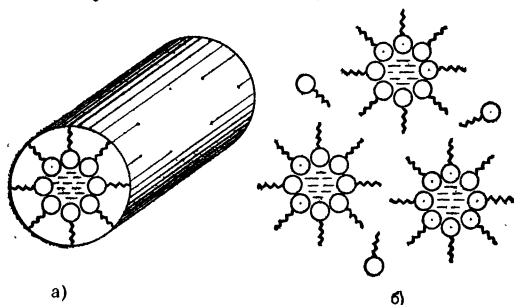


Рис. 130. Цилиндрические (а) и сферические (б) «мицеллы-перевертыши», внутри которых находятся молекулы воды.

двух случаях. То, что мы видим на рис. 130, б, строго говоря, не является жидким кристаллом. Это твердый кристалл, в который включены вкрапления, имеющие жидкокристаллическое строение (так же, как в случае сферических мицелл). Структура, показанная на рис. 130, а, еще может считаться жидкокристаллической.



Рис. 131. Для кристалла характерно упорядоченное расположение молекулярных хвостов.

Испарив остатки воды, мы получим настоящий твердый кристалл, в котором молекулы четко зафиксированы на своих местах, хвосты их неподвижны и плотно пригнаны друг к другу и имеется строгий порядок по всем направлениям (рис. 131).

Такая цепочка событий построена нами чисто логическим путем. В жизни же можно наблюдать только ее отдельные звенья. Для одних веществ, например, можно видеть последовательный переход от ситуации, показанной на рис. 127, к изображенной на рис. 129, для других известны структуры-перевертыши. Это зависит от конкретного строения молекул-«головастиков». Например, молекулы жирных кислот имеют одну дипольную головку

и один хвост и легко образуют сферические мицеллы, показанные на рис. 128, а. А вот молекулы фосфолипидов (липиды — это жиры), играющие исключительно важную роль в живых организмах, имеют два хвоста, присоединен-

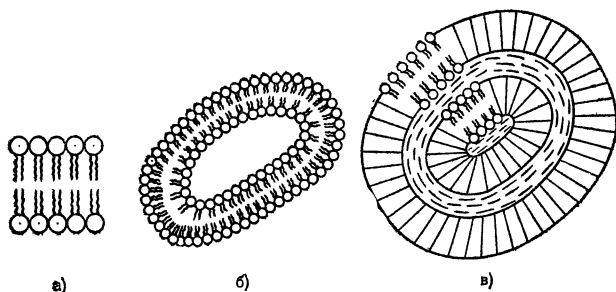


Рис. 132. Двойной слой фосфолипидов (а) является основой замкнутых структур (липосом) разных типов (б и в).

ных к одной головке, и не образуют мицелл. Причина состоит в том, что двум хвостам не хватает места в одной мицелле. Поэтому молекулы фосфолипидов образуют исключительно стабильные плоские двойные слои, строение которых может быть весьма разнообразным (рис. 132).

§ 3. Клетки и мембраны

Огромное многообразие живых организмов, начиная от бактерий и инфузорий и кончая человеком, имеют одну общую черту, резко выделяющую эти организмы на фоне неживой природы. Все они имеют клеточное строение. Клетки — это маленькие и очень сложные кирпичики, из которых построен весь живой организм. Форма и размеры клеток могут быть самыми разнообразными. Наиболее мелкие клетки (например, бактерии) могут иметь размер порядка 1 мкм, а самые крупные могут достигать длины 1 м и более. Несмотря на существенные различия в форме и размерах, клетки даже очень непохожих друг на друга организмов имеют поразительное сходство. Все они окружены внешней оболочкой — клеточной мембраной, внутри которой содержится клеточное ядро и другие частицы — внутриклеточные органеллы (рис. 133). Каждая органелла отвечает за какие-то жизненно важные функции клетки. Так, например, в ядре хранится запас генетической информации, опре-

деляющей все наследуемые признаки данного организма, митохондрии можно назвать «электростанциями» клетки, преобразующими энергию пищевых веществ в биологически полезную форму, рибосомы — это «фабрика стройматериалов», на которой производится синтез белковых молекул, и т. д. Все органеллы отделены от внутриклеточной



Рис. 133. Клетка живого организма снаружи окружена мембраной, а внутри содержит различные органеллы.

жидкости также с помощью тонких оболочек (мембран), выполняющих чрезвычайно важные функции, которые стоит рассмотреть специально. Начать, наверное, нужно с того, что внешняя (плазматическая) мембрана является механической опорой и электрическим изолятором клеток, позволяющим клеткам сохранять свою целостность и специфику. В случае растительных клеток поверх плазматической мембраны имеется еще жесткая клеточная оболочка, материал для которой опять-таки выделяется мембраной.

Известно, далее, что при построении живой ткани клетки легко узнают своих собратьев и активно отторгают «чужаков». Оpozнaвание своих сородичей также осуществляет внешняя мембрана клетки. О том, что происходит, когда эта функция нарушена, мы узнаем в конце этой главы.

В клетке идет постоянная работа всех ее органелл, и на это требуется энергия. Энергия поступает за счет окисления молекул пищевых продуктов при клеточном дыхании и первоначально преобразуется в энергию химических связей фосфатных групп сложной биологической молекулы, сокращенно называемой АТФ. Этот процесс окислительного фосфорилирования идет в мембране, окружающей клеточные митохондрии.

Состав жидкости снаружи и внутри клетки не является одинаковым. В частности, концентрации ионов определенного типа по разные стороны клеточной мембраны могут отличаться в десятки раз. Мембрана в этом случае играет роль тонко работающего активного фильтра, вводящего внутрь клетки и выводящего наружу самые разнообразные вещества. При этом мембране часто приходится перегонять ионы (например, натрия) из того места,

где их мало, туда, где их много. С помощью простой диффузии такой процесс, конечно, идти не может, и мембрана выполняет роль насоса, перекачивающего ионы. Такой активный перенос веществ через мембрану чрезвычайно важен для поддержания постоянства внутренней среды организма при изменении внешних условий.

Внешняя мембрана обладает также удивительной способностью захватывать различный материал, находящийся вне клетки, чисто механическим образом, окутывая его так, как показано на рис. 134. Она может «проглатывать» довольно крупные частицы, которые никогда не смогли бы пройти сквозь мембрану благодаря диффузии или даже активному переносу. Процесс этот называется пиноцитозом, и одну из моделей, объясняющих это явление, мы рассмотрим чуть позже.

Мембраны же являются матрицами для биологически важных молекул, которые играют ключевую роль в работе различных рецепторов (зрительных, обонятельных и др.). В зеленых листьях идет процесс фотосинтеза углеводов из углекислого газа с выделением газообразного кислорода. Он осуществляется молекулами хлорофилла, внедренными в мембраны специальных органелл — хлоропластов.

Наконец, мембраны клеток нервных тканей (нейронов) играют решающую роль в процессах распространения электрических импульсов по нервным волокнам.

Из этого простого перечисления видно, что мембраны участвуют практически во всех жизненно важных процессах, идущих в организме. Изучение мембран оказывается удивительно плодотворным подходом при попытках разгадать тайны жизнедеятельности клетки. И хотя это было понято сравнительно недавно, уже создана целая новая наука — мембранология, на которую сейчас возлагаются очень большие надежды.

Конечно, мембраны вещь интересная, скажет недовольный читатель, но о них можно почитать и в других книжках. А причем тут жидкие кристаллы? Вот сейчас мы как раз хотим показать, что мембраны есть не что иное, как знакомые нам слоистые структуры.

По современным представлениям биологическая мембрана представляет собой двойной слой, составленный из фосфолипидов и некоторых других молекул-«головастиков», свойства которых мы уже рассматривали. Внутри этого двойного слоя вмонтированы крупные молекулы

белков. Они могут пронизывать мембрану насквозь, погружаться в нее только частично или вообще находиться на поверхности двойного слоя (рис. 135). Именно эти молекулы белка играют роль катализаторов химических реакций, идущих на мембранах, опознавателей своих и чужих клеток, рецепторов сигналов и т. д.

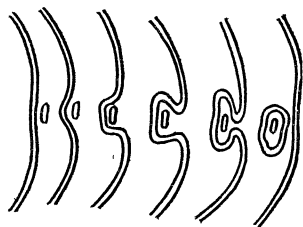


Рис. 134. Клетка может захватывать крупные частицы с помощью своей мембраны. Последовательность событий слева направо.

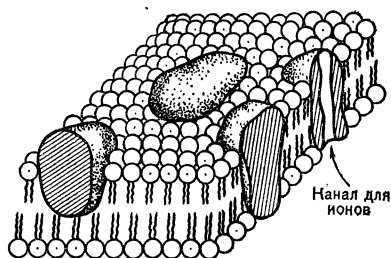


Рис. 135. В биологической мембране крупные молекулы белков вмонтированы в двойной слой фосфолипидов или лежат на его поверхности.

Сравнивая рис. 105, а и 135, можно видеть, что биологическая мембрана представляет собой антипод оболочке мыльного пузыря. Это и неудивительно, так как клетка функционирует в жидкой среде, а мыльный пузырь «живет» в воздухе, удерживая воду внутри своей оболочки. В то же время периодическая слоистая структура, показанная на рис. 129, содержит в себе основной элемент мембраны — двойной липидный слой. А достаточно ли этого сходства, чтобы считать мембрану жидким кристаллом? По-видимому, нет — ведь молекулы ее могут, в принципе, образовывать и кристаллическую упаковку, показанную на рис. 131. Были, однако, проведены специальные эксперименты (на искусственных двуслойных мембранах), показавшие, что длинные молекулярные хвосты внутри мембраны находятся в неупорядоченном состоянии, характерном для жидкого кристалла. В таких экспериментах используются специальные молекулярные метки, которые вводятся внутрь мембраны. Тонкие оптические и радиотехнические методы позволяют следить за движением этих меток и тем самым изучать свойства мембраны. Наблюдение за метками показало, что хвостатые молекулы фосфолипидов сравнительно свободно перемещаются вдоль поверхности мембраны, оста-

ваясь в пределах своего слоя. Скорости такого перемещения сравнительно велики: за 1 с молекула может передвинуться вдоль слоя на несколько микрометров, что составляет десятые доли периметра клетки. А вот перепрыгнуть из верхнего слоя мембраны в нижний или наоборот молекулам фосфолипидов чрезвычайно трудно — такие события случаются очень редко, например, один раз в час или реже. Большие молекулы белков сравнительно малоподвижны даже в плоскости двойного слоя.

Таким образом, мембрана имеет слоистое строение, но внутри слоя порядка не существует. Значит, ее строение, соответствует смектическому (А) жидкому кристаллу. И такое устройство принципиально важно для работы мембраны. Так, например, мембраны отказываются выполнять свои обязанности при кристаллизации, вызванной понижением температуры.

§ 4. Жидкие кристаллы и поведение мембран

Если мембраны имеют жидкокристаллическое строение, то возникает естественный вопрос, нельзя ли хотя бы частично понять механизм их работы, исходя из представлений физики жидких кристаллов, рассмотренных в предыдущих главах. Оказывается, иногда это возможно. Например, биологов давно удивляла форма красных кровяных шариков — эритроцитов. В обычных условиях они имеют форму дисков с вогнутой внутрь поверхностью. Эритроцит — это отдельная клетка, окруженная мембраной, причем мембрана состоит из двух слоев, имеющих разный молекулярный состав. Значит, и упругость этих слоев, противодействующая изгибу мембраны, также различна. Рассматривая энергетические затраты на изгиб двух смектических слоев, удастся показать, что при определенной разности давлений между внутренней и наружной сторонами клеточной мембраны ей выгоднее приобрести вогнутую форму. В свою очередь, вогнутая форма нужна эритроцитам, так как позволяет им легче проникать в очень тонкие кровеносные сосуды, а также плотнее прилегать к стенкам сосудов в легочных альвеолах, где эритроциты получают кислород прямо сквозь эти стенки.

С помощью представлений, известных из физики жидких кристаллов, легко объясняется также механизм «залечивания» мелких пор в мембранах. Для любого круг-

лого отверстия радиуса R в мембранах отношение площади (πR^2) к периметру ($2\pi R$) увеличивается с увеличением радиуса. Образование дырки в мембране уменьшает энергию поверхностного натяжения на величину, пропорциональную площади дырки. Это выигрыш в энергии. Проигрыш в энергии (увеличение), связанный с образованием дефекта (границы дырки), пропорционален периметру (рис. 136). Пока дырка маленькая,

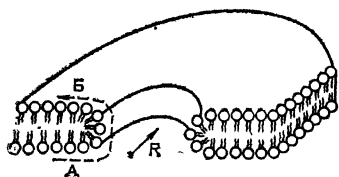


Рис. 136. Молекулы фосфолипидов могут переходить из нижнего слоя А в верхний Б и наоборот, используя кромку отверстия (радиус R).

разница в энергиях складывается в пользу последней, и случайно образовавшаяся дырка «залечивается». С ростом радиуса R достигается критический размер, поэтому, если возникнут большие дырки, то они автоматически начинают расти дальше, и мембрана разрушается.

Исходя из очень простых соображений, можно попытаться объяснить и загадочное явление пиноцитоза, иллюстрированное рис. 134. Для этого сначала попробуем изогнуть каждую из двух мембран, составленных из клиновидных молекул. Эти мембраны показаны на

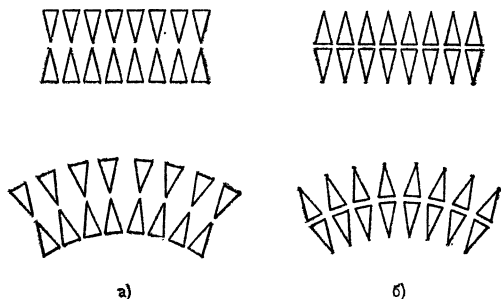


Рис. 137. При изгибе мембраны, составленной из клиновидных молекул, во внутреннем слое молекулярная упаковка уплотняется. Изгиб в случае (б) энергетически более выгоден, чем в случае (а).

рис. 137. Изгибая первую двуслойную мембрану (рис. 137, а), мы улучшаем условия для более плотной упаковки внешнего слоя, но ухудшаем для внутреннего. Для второй мембраны ситуация как раз обратная. Но ведь радиус

изгиба и периметр для внутреннего слоя всегда меньше, чем для наружного. Значит, во внутреннем слое изогнутой мембраны молекулы располагаются ближе друг к другу. Отсюда следует очевидный вывод: для первой мембраны изгиб невыгоден, а для второй выгоден. Поэтому вторая мембрана всегда стремится согнуться и приобрести замкнутую форму.

Теперь, чтобы объяснить явление пиноцитоза, нам нужно только допустить, что подошедшая к мембране частица изменяет геометрическую форму молекул фосфолипидов. Это может произойти за счет поворота дипольной части молекулы, которую правильнее предста-

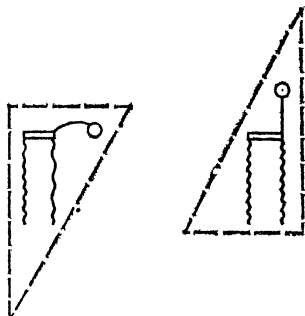


Рис. 138. Распрямление дипольной части переворачивает условный клин, описывающий общую геометрическую форму молекулы фосфолипида.

вить в виде «головки на шейке» (рис. 138). Переход этой части в вертикальное положение изменяет форму всей молекулы в целом. Если раньше она была больше похожа на клин, острие которого смотрело вниз, то теперь молекула больше напоминает клин с острием кверху. Такая форма неустойчива относительно изгиба, мембрана начинает прогибаться сама и захватывать частицу (рис. 134). Затем молекулы фосфолипида восстанавливают свою форму, и оставшаяся часть мембраны вновь приобретает плоскую структуру. Эта простая и красивая модель пиноцитоза была предложена недавно и пока еще не подкреплена никакими экспериментальными фактами.

Продолжим наши опыты с изгибом мембран. Пусть имеется мембрана, составленная из молекул клинообразной формы (остриями внутрь, рис. 137, а), и допустим, что при изгибе молекулы могут как-то перебрасываться из одного слоя в другой. Ведь вполне очевидно, что при изгибе двойного слоя молекулам становится тесновато во внутреннем слое и, наоборот, слишком просторно во внешнем. Однако для перескока из слоя в слой, причем кувырком, молекулам нужно преодолеть некоторый энергетический барьер (примерно так, как на рис. 78), и процесс этот требует длительного времени. Если же в мембране есть отверстия, перемещение молекул из слоя в

слой может происходить и без перескоков. На рис. 136 пунктиром показано, как молекула из положения А может попасть в положение Б, используя кромку мембраны в месте ее разрыва. Такие разрывы могут быть устойчивыми, если они закреплены какими-то крупными молекулами.

Пусть так или иначе часть молекул все-таки переходит из внутреннего слоя во внешний при изгибе мембраны. Но ведь с ними связан электрический диполь, например, направленный, как показано на рис. 139, а. И если раньше число диполей, ориентированных вверх и вниз, было

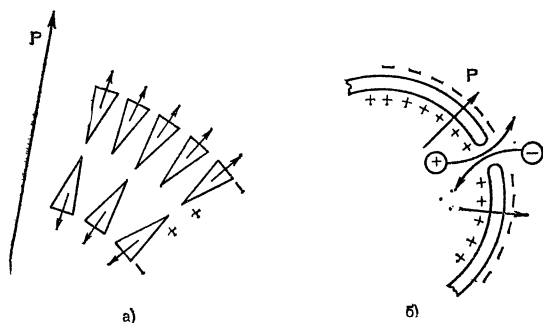


Рис. 139. При изгибе мембраны часть диполей выталкивается из внутреннего слоя во внешний так, что на мембране появляется суммарный диполь (а). Диполь, возникший за счет изгиба, заставляет ионы проходить сквозь отверстия в мембране (б).

одинаково, то теперь это не так, и мембрана в целом имеет большой суммарный диполь P , направленный изнутри наружу.

Поле этого суммарного диполя может влиять на заряженные частицы, находящиеся внутри или снаружи изогнутой мембраны. Например, оно заставляет положительные ионы двигаться изнутри наружу сквозь отверстие в мембране, даже если исходная концентрация ионов снаружи выше, чем внутри. Вот мы и получили один из механизмов активного переноса ионов сквозь мембрану.

Другим проявлением только что рассмотренного эффекта является взаимодействие сложных белковых молекул друг с другом не непосредственно, а косвенно — через мембрану. Действительно, если одна из молекул белка в модели, показанной на рис. 135, изменит свою форму при взаимодействии с каким-то химическим ве-

ществом, это неизбежно приведет к некоторому искривлению мембраны. В свою очередь искривление отразится на состоянии других белковых молекул, закрепленных внутри или на мембране, на некотором удалении от первой. Таким образом, молекулы «узнают» о том, что происходит с их далекими соседями по мембране, и могут принимать участие в различных коллективных мероприятиях.

Давайте теперь обсудим вкратце еще одну проблему, к которой жидкокристаллические свойства мембран имеют, по-видимому, близкое отношение. Речь идет об одном из интереснейших биофизических механизмов — о передаче импульсов возбуждения по нервным тканям. На сегодняшний день выяснены многие детали этого механизма, но не все. Большинство экспериментов были выполнены на волокне, представляющем одну нервную клетку гигантского размера (толщиной до 1 мм и длиной в несколько сантиметров), вынутую из кальмара. Кальмару такая громадная клетка необходима потому, что он использует реактивный принцип движения, требующий почти мгновенной координации работы всех мышц, выбрасывающих водную струю. А по толстым нервным волокнам, как оказалось, импульс возбуждения распространяется быстрее. В такую толстую клетку, окруженную мембраной (рис. 140), удалось ввести микроэлектроды и изучать ее электрические свойства.

Выяснилась следующая картина. В состоянии покоя наружная поверхность мембраны, окружающей волокно, всегда заряжена положительно по отношению к внутренней стороне до потенциала 50 мВ (рис. 140, а). Это обусловлено различием в концентрациях ионов калия и натрия внутри и снаружи клетки (ионов калия внутри клетки раз в 30 больше, чем снаружи, а натрия, наоборот, в 10 раз меньше) и различной проницаемостью мембраны для ионов калия и натрия. В состоянии покоя мембрана легко выводит натрий изнутри наружу, но не наоборот. В таких случаях говорят, что работает натриевый насос, использующий все ту же энергию фосфатных связей АТФ.

При воздействии на нервное волокно слабый электрический сигнал очень быстро затухает, проходя всего несколько миллиметров, как по плохому кабелю. Нервное волокно, собственно, и является плохим кабелем, который не может передавать сообщения на большие расстояния, если в него не встроены специальные усилители.

Но такие усилители как раз и работают в нервном волокне: это ионные насосы для натрия и калия, управляемые достаточно сильным электрическим импульсом.

Сильное раздражение клетки приводит к выключению натриевого насоса и резкому (в 20 раз) увеличению обратного пропускания натрия сквозь мембрану внутрь

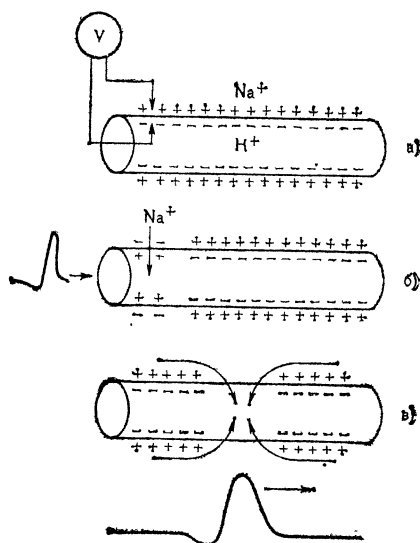


Рис. 140. Последовательность событий при возбуждении нервного волокна (а — в) и форма нервного импульса (г).

клетки за счет обычной диффузии (и увеличению выделения калия изнутри наружу). Такое электрическое «закорачивание» мембраны вызывает падение потенциала ее наружной поверхности сначала до нуля (по отношению к внутренней), а затем и до некоторого отрицательного значения. После этого натриевый ток внутрь мембраны прекращается. Но так как в покое мембрана всего волокна в целом представляла собой единый заряженный конденсатор, то закорачивание его «пластин» в одном месте не остается незамеченным в соседних участках (рис. 140, в). И таким пассивным образом электрическое возбуждение переходит на соседний участок, где весь процесс повторяется снова. Импульс идет сравнительно медленно (десятки метров в секунду), и эту скорость можно рассчитать, применяя математические уравнения, известные из

теории кабельных линий связи. Форма нервного импульса показана на рис. 140, г.

Центральным и наиболее непонятным местом во всей этой картине является именно механизм действия натриевого насоса, его запуск и выключение. Вообще сквозь идеальную мембрану, образованную двумя слоями фосфолипидов (рис. 132, а), заряженные ионы проходить не могут. Поэтому в мембрану должны быть вмонтированы крупные молекулы, образующие каналы для ионов, или же ион должен входить в состав молекулы-переносчика, растворимой в фосфолипидном слое. Можно сказать, что в этом случае ион должен сначала одеть специальный скафандр, а уж затем путешествовать сквозь мембрану. Такие молекулы-скафандры недавно обнаружены. Обнаружены и молекулы, образующие каналы для ионов (ионофоры). Теперь остается понять механизмы включения и выключения этих каналов. А не помогут ли нам здесь жидкие кристаллы?

Например, можно учесть переориентацию молекул жидкокристаллической мембраны под действием поля нервного импульса. Каждый из слоев двойного слоя фосфолипидной мембраны имеет большой диполь, образованный суммой молекулярных диполей. В электрическом поле, вызванном разрядом соседних участков мембраны и направленном перпендикулярно суммарному диполю мембраны, ее молекулы могут переориентироваться так, чтобы этот диполь встал вдоль поля. Этот процесс похож на переход Фредерикса для нематика в электрическом поле, но должен быть выражен гораздо сильнее, так как здесь поле взаимодействует с большим суммарным диполем, как в случае сегнетоэлектрических смектиков. Разумеется, переориентация молекул фосфолипидов вызывает и переориентацию молекул-каналов и молекул-скафандров по типу эффекта «гость — хозяин». Тогда эта переориентация окажется тем самым «переключателем», который управляет работой ионных насосов.

Скажем теперь несколько слов о химических аспектах работы мембран. Как уже говорилось, мембраны осуществляют процессы химического синтеза некоторых молекул, жизненно важных для организма. Здесь жидкокристаллический характер мембраны проявляется двояко. Во-первых, как и в эффекте «гость — хозяин», жидкокристаллическая мембрана ориентирует молекулы катализаторов (ферментов), обеспечивая нужную

геометрию их взаимодействия с молекулами, вступающими в реакцию. Это резко повышает избирательность молекул по отношению к своим партнерам по реакции и увеличивает скорость самих реакций. Известны, например, случаи, когда реакция, проводимая в слоистом лиотропном жидком кристалле, шла в сто раз быстрее, чем в обычном, не жидкокристаллическом растворителе.

Вторая особенность жидкокристаллических мембран, существенная для синтеза биологических молекул, вытекает из их электрических характеристик. Перенос электронов и ионов сквозь мембрану идет в присутствии сильного электрического поля, направленного вполне определенным образом. Это позволяет переводить химическую энергию в энергию электрического поля и наоборот, причем электрическое поле может играть роль дозирующей системы, «расфасовывающей» энергию небольшими порциями, как раз достаточными для образования нужных химических связей. Такой механизм дозирования энергии может оказаться существенным, например, в реакциях окисления пищевых продуктов, непосредственно связанных с реакцией синтеза АТФ (клеточное дыхание), а также и при раздаче энергии молекулами АТФ на различные нужды клетки.

Наконец, исходя из сходства с рассмотренными ранее технологическими процессами получения сверхпрочных полимерных волокон, можно предполагать, что прочность биологических тканей в ряде случаев также обусловлена их «сборкой» из белковых (полимерных) молекул в упорядоченном жидкокристаллическом состоянии.

В заключение параграфа, давайте, чуть-чуть отвлечемся от мембран и посмотрим, нет ли чего-то общего между переходами из одного жидкокристаллического состояния в другое и... утренней гимнастикой.

В настоящее время в научной литературе все чаще раздаются звонкие голоса в пользу серьезной роли жидкокристаллического состояния в процессах биологической подвижности. При этом в первую очередь имеются в виду механизмы сокращения мышц, движения клеток, перемещения одних молекул (например, ферментов) вдоль других (например, белков) и т. д. Особенно загадочным представляется механизм мышечного сокращения, в процессе которого химическая энергия, выделяющаяся при гидролизе молекул АТФ, непосредственно переходит в механическую. Сокращение мышцы осу-

ществляется за счет скольжения одних полимерных молекул относительно других, при этом пучок тонких нитей, образованных молекулами белка актина, как бы вдвигается в пучок толстых нитей, образованных молекулами другого белка — миозина. Рентгеновские исследования живых (работающих) мышц выявили большое сходство их строения со строением жидких кристаллов, поэтому некоторые ученые полагают, что и процесс взаимодействия актиновых и миозиновых молекул можно будет понять на основе представлений, развитых физикой жидких кристаллов. В частности, на языке жидких кристаллов сокращение мышцы можно рассматривать как переход из одного жидкокристаллического состояния в другое с изменением плотности. Насколько оправдается такой подход, покажет будущее.

§ 5. Из научной фантастики

Проблемой бессмертия человеческий ум занят с древнейших времен и, судя по всему, вряд ли решит ее когда-либо. Но вот мысль о том, чтобы отодвинуть момент смерти, имеет под собой серьезный научный фундамент. Речь идет об искусственном анабиозе, или попросту спячке, вызванной тем или иным способом. Одним из таких способов является замораживание организма.

Мы не будем сейчас обсуждать проблему замораживания живого человека. С ней связано не только множество нерешенных научных и технических проблем, но не ясна также этическая и социальная сторона вопроса. Вполне можно представить себе случай, когда человека, заболевшего неизлечимой при современном состоянии медицины болезнью, имело бы смысл продержать в состоянии анабиоза до момента, когда будут найдены средства лечения этой болезни. Но ведь никто не умеет предвидеть будущее, и трудно сказать, чем все это может кончиться. Поэтому обсудим лучше другие, столь же серьезные, но более земные проблемы замораживания живых объектов, которыми занимается довольно молодая наука — криобиология.

Замораживание половых клеток животных играет важную роль в работе селекционеров-животноводов, медицина остро нуждается в запасе крови, живой ткани для пересадок и т. д. Местное замораживание отдельных

органов человеческого тела необходимо при хирургических операциях. Основной проблемой при этом является сохранение целостности и работоспособности клеток организма после отогревания. Вопросы повышения холодоустойчивости организмов и борьбы с обморожениями также входят в компетенцию криобиологов.

Что же происходит с живыми клетками при замораживании? Основным их компонентом является вода, поэтому наиболее очевидным фактором представляется механическое повреждение отдельных клеток и тканей в целом микрокристалликами образовавшегося льда. Однако более важным фактором повреждения клеток считается повышение концентрации электролита в незамерзшей части водного раствора, изменение строения (дегидратация) белковых молекул, изменение липидного состава мембран и т. д.

Известно, однако, что при очень быстром замораживании клетки сохраняют свою способность к восстановлению прежних функций. Например, быстрое замораживание эритроцитов в жидком азоте позволяет хранить их неограниченно долго и затем с успехом использовать в клиниках. Это происходит потому, что при «термическом ударе» кристаллизация, т. е. правильная организация атомов или молекул в кристаллическую решетку, не успевает произойти, и вещество остается в застеклованном, т. е. твердом, но неупорядоченном состоянии. Фактически биологический раствор сохраняет свою бывшую структуру.

Теперь пора вспомнить о жидких кристаллах. Для этих веществ, в отличие от водных растворов электролитов, образование стеклообразного состояния при низких температурах — весьма обычное явление. Иногда оно образуется даже при медленном охлаждении. Поэтому для криобиологов жидкие кристаллы интересны с двух точек зрения. Во-первых, их можно было бы вводить в клетки вместо водного раствора на время их замораживания с обратной заменой при размораживании. Это позволило бы сохранить целостность клеточной структуры. Во-вторых, существуют пути модификации водных клеточных растворов для придания им свойств жидких кристаллов. Для этого можно было бы вводить в клетки молекулы-«головастики», о которых шла речь в начале этой главы. Если бы при этом удалось не нарушать основных биологических функций клетки, но по-

высить способность клеточной жидкости к стеклованию вместо кристаллизации, то проблеме можно было бы считать решенной. Эксперименты в этом направлении начались.

§ 6. Когда хороший кристалл — плохой симптом

Физик, исследующий твердое тело, всегда мечтает получить в свои руки кристаллы побольше, почище и с наименьшим количеством дефектов структуры. Живому, нормально работающему организму идеальные кристаллы совсем не нужны. Их наличие, как правило, является индикатором каких-то, как говорят медики, патологических процессов.

Примером, иллюстрирующим сказанное, является атеросклероз, для которого характерно отложение мелких твердых кристалликов холестерина на внутренних стенках кровеносных сосудов. Эти кристаллики затрудняют ток крови или даже закупоривают сосуды, приводя к тяжелому заболеванию. В этих случаях холестерин из плохого (жидкого) кристалла становится хорошим (твердым), но последствия этого — как раз обратные. Похожая ситуация наблюдается и при образовании желчных камней, в состав которых также входит холестерин и ряд солей.

Старение организма некоторые ученые связывают с процессом кристаллизации мембран. Переход мембраны из жидкокристаллического в более упорядоченное состояние затрудняет ее работу, в частности, ухудшает действие ионных насосов. Закристаллизованные фосфолипидные мембраны и обнаруживаются в тканях старых организмов. Если эта модель старения окажется правильной, нужно будет искать средства, затрудняющие кристаллизацию мембран, и они, конечно, будут найдены.

Тщательное исследование опухолевых клеток под электронным микроскопом показало заметное отличие их строения от структуры нормальных клеток. Химический состав тех и других в общем-то одинаков, но, грубо говоря, они отличаются упорядочением отдельных элементов. Например, меняется расположение нитевидных образований, находящихся непосредственно под мембраной и определяющих движение клетки, а также и строение внешней мембраны. Здоровые клетки активно переме-

щаются, пока не встретят своих родственников. Затем, опознав своих, вступают в тесный контакт с ними и останавливаются, образуя однородную ткань без просветов между клетками. Это показано на рис. 141, а. Клетки

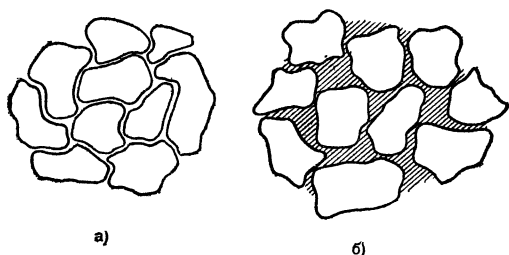


Рис. 141. Здоровые клетки тесно примыкают друг к другу (а), а между клетками опухоли имеются зазоры (б).

опухоли плохо опознают друг друга, плохо стыкуются одна с другой (рис. 141, б), и, главное, не останавливают процесса своего размножения (делением) после установления контакта друг с другом. В данном случае есть основания полагать, что в опухолевых клетках жидкокристаллическая структура мембран и нитевидных образований нарушена, если можно так выразиться, в другую сторону — в сторону большего беспорядка (по сравнению со случаем кристаллизации).

Конечно, рассказ наш довольно грустный, но изучать эти вещи необходимо, чтобы с ними бороться. И уже есть примеры, когда наука о жидких кристаллах помогает лечить серьезные заболевания.

Недавно, например, был использован тот факт, что двуслойная мембрана пропускает через себя определенные лекарственные вещества только тогда, когда она находится в жидкокристаллическом состоянии, и не пропускает их, если находится в более упорядоченном, фактически твердом, состоянии. Пусть, например, нужно ввести какой-то антибиотик непосредственно в опухолевую ткань. Для этого готовятся специальные микроскопические пузырьки — липосомы (рис. 132, б), в которых находится антибиотик. Пузырьки эти окружены двуслойной мембраной, сквозь которую при нормальной температуре (эксперименты делались на мышах) лекарство не проходит. Пузырьки вводятся в кровь, и кровь разносит их по всему телу. Закрытые пузырьки не могут

нанести ущерба организму. В это время опухоль прогревают токами сверхвысокой частоты. От нагрева мембраны пузырьков переходят в жидкокристаллическое состояние, и антибиотик выходит из них, чтобы атаковать опухолевые клетки. Опыт показал, что при таком методе количество лекарства, попавшего в опухоль, в четыре раза превосходит среднюю величину для всего организма. Сейчас ученые работают над тем, чтобы повысить чувствительность мембран к небольшим изменениям температуры. Липосомы, наполненные лекарствами, успешно применяются также и для растворения тромбов в кровеносных сосудах.

§ 7. Какие новости в эволюции?

Вопрос о том, с чего все началось, не дает покоя человечеству вот уже многие столетия. Центральной мыслью, которую признает сегодня большинство ученых, является эволюционная идея о развитии жизни на Земле из неживой материи. Противники этой теории исходят из предпосылки, что живая материя сама зарождаться не может и занесена на Землю с других солнечных систем, однако доказательств, подтверждающих это, пока нет. Таким образом, наряду с длительным ходом биологической эволюции по Ч. Дарвину от простейших живых организмов к самым сложным видам, должен был произойти не менее долгий процесс химической эволюции, завершившийся созданием живой клетки. Вот этот-то процесс нас сейчас и интересует.

Земля образовалась около 5 миллиардов лет назад, из которых первые 1,5 миллиарда ушли на химическую эволюцию, т. е. на получение самых примитивных одноклеточных организмов (бактерий). При этом химическая эволюция шла в несколько этапов. Ведь чтобы получить живые организмы, нужно сначала создать клетку, для получения клетки нужны сложные молекулы-полимеры (белки, нуклеиновые кислоты и др.), а для их синтеза нужны более простые заготовки типа аминокислот (для белков), пуринов, пиримидинов и сахаров (для нуклеиновых кислот), углеводов, жирных кислот и т. д. И все это нужно получить из смеси простейших молекул водорода, аммиака, метана и воды, которые только и имелись в наличии 5 миллиардов лет назад (разумеется, еще были минералы). Даже свободного кислорода тогда еще

не было, он появился гораздо позже, уже в биологическую эпоху.

И все-таки прямые опыты показывают, что большой набор сложных органических молекул можно получить из «первичного бульона» простейших веществ, если облучать его достаточно жестким (коротковолновым) ультрафиолетовым светом, радиоактивным излучением, или пропускать через этот «бульон» электрические разряды. Такие сильные средства в избытке имелись в распоряжении природы в те отдаленные времена. Среди искусственно полученных молекул есть некоторые (не все) «строительные кирпичи» для белков и нуклеиновых кислот, есть также углеводы и, что самое для нас интересное, есть жирные кислоты. Это значит, что уже на первом этапе эволюции могли образоваться жидкокристаллические пленки на поверхности воды или в объеме ее в виде мицелл, показанных на рис. 134.

Некоторые сахара тоже получают при моделировании первого этапа эволюции, если их синтез ведется с использованием твердых подложек в виде минеральных глин. Возникает вопрос, а не могли бы и жирные кислоты сыграть свою роль в эволюции, ориентируя какие-то простые реагенты и помогая тем самым синтезировать сложные молекулы?

На втором этапе эволюции, когда шел синтез полимерных цепочек из отдельных мономерных звеньев, роль растворителей, способных ориентировать молекулы вступающих в реакции веществ и катализировать соответствующие реакции, должна была стать еще более важной. На этом этапе возникло и большое многообразие зеркально несимметричных молекул — оптических антиподов. В их синтезе не исключена существенная роль холестерических жидких кристаллов, выступающих в качестве ориентирующих оптически правых или левых растворителей.

И наконец, самым трудным местом эволюционной теории является образование клетки. Предложены разные модели предшественников клеток; самая известная из них исходит из представлений о твердых частицах — коацерватах (от латинского *coacerve* — группироваться), чрезвычайно легко образующихся в сильно разбавленных растворах полимеров. Академик А. И. Опарин показал, что на поверхностях таких частиц могут идти специфические реакции с участием катализаторов — ферментов. Одна из моделей зародыша клетки исходит из

возможности образования мицелл (рис. 128) или, еще лучше, липосом (рис. 132). В последнем случае маленькая капелька уже имеет готовую мембрану, строение которой соответствует мембране живых клеток. Однако на сегодняшний день все представления о том, как заставить клетку работать и размножаться, оказываются весьма спорными. В утешение, правда, можно привести слова Вудворда, сказанные им в Стокгольме при получении Нобелевской премии: «Я почти не сомневаюсь, что можно в лабораторных условиях сделать нечто с характерными признаками жизни, но я не хотел бы предсказывать, сколько на это потребуется времени».

На этапе биологической эволюции роль жидких кристаллов почти не вызывает сомнений. Дело в том, что процессы фотосинтеза, приведшие к образованию кислородной атмосферы, идут в зеленых растениях с прямым участием клеточных мембран, о жидкокристаллическом строении которых мы уже говорили.

Именно в мембранах хлоропластов расположены молекулы хлорофилла, поглощающие солнечную энергию и преобразующие ее в энергию химических связей, которая затем используется при синтезе углеводов из углекислого газа. Как и при клеточном дыхании, роль мембран, по-видимому, заключается в осуществлении «расфасовки» больших квантов энергии на порции, достаточные для образования химических связей.

Успехи в применении физики жидких кристаллов к биологическим проблемам пока еще, конечно, скромны, но нет уже сомнений в том, что в недалеком будущем жидкие кристаллы приведут к впечатляющим открытиям в биологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы этой книги меньше всего хотели бы услышать от читателя такое мнение о жидких кристаллах: «Интересно! Но жаль, что все уже здесь понято и сделано физиками, химиками и инженерами». Нет, такое заключение было бы неверным. На самом деле для тех, кто всерьез заинтересуется этой областью науки, открывается обширное поле деятельности, их ждут нелегкий научный поиск, горечь неудач и радость открытий. Стоит поэтому в конце повествования о жидких кристаллах перечислить хотя бы часть нерешенных задач, которые, возможно, придется решать нашим читателям.

Прежде всего хочется подчеркнуть, что наименее ясным и изученным является вопрос об истинной роли жидкокристаллического состояния в жизнедеятельности биологических систем. Из последней главы, конечно, видно, что в этой области пока имеется больше вопросов, чем ответов, а выдвигаемые гипотезы еще ждут проверки опытом. И надо сказать, что физические опыты над живыми клетками являются очень сложными как в техническом отношении, так и в плане однозначной интерпретации результатов. Ведь, помимо всего прочего, надо точно знать, какие изменения вносятся в тонкие структуры и свойства, например биомембран, применяемыми экспериментальными методиками. В сущности, ученые сейчас стоят лишь в самом начале пути к тайнам живого.

Но и более привычные жидкие кристаллы таят в себе немало проблем. Очень важно понять, какими деталями своего устройства должны обладать молекулы, чтобы образовать то или иное жидкокристаллическое состояние с определенной структурой и нужными нам свойствами. Например, до сих пор нет ответа на вопрос, возможно ли существование нематика при низкой температуре, скажем при -60°C , да еще обладающего умеренной вязкостью. Какими же должны быть молекулы такого вещества? Это не только научный вопрос, но и очень серьезная прикладная проблема, потому что современная техника остро нуждается именно в таких материалах. Существующие же вещества хорошо работают в основном при температуре выше -20°C , а если становится холоднее, то обсуждавшиеся оптические приборы приобретают весьма замедленную реакцию.

Особо выделим полимерные жидкие кристаллы. Действительно, заманчиво получить в руки материал, имеющий одновременно свойства полимера и нематика (холестерика, смектика,...). Здесь достигнуты немалые успехи. Но еще предстоит досконально изучить свойства жидкокристаллических полимеров, найти наиболее важные области их применения. Например, не может ли тончайшая пленка такого полимера стать почти сегнетоэлектриком, т. е. быть достаточно прочной и чутко реагировать на малейшие изменения электрического поля и различных деформаций? Такие пленки нужны для нового поколения электрооптических устройств, индикаторов ультразвукового излучения. Остается также насущным совершенствование технологии производства

сверхпрочных полимерных волокон, высококачественных коксов и графита. Проблема здесь заключается в том, что промежуточное жидкокристаллическое состояние этих материалов изучать очень трудно из-за сложного состава смесей, непрерывно идущих химических реакций при высокой температуре. А ведь надо научиться управлять ориентацией молекул таких соединений, чтобы достичь желаемых результатов.

Вопросы о взаимодействии жидких кристаллов с кристаллическими, аморфными и полимерными поверхностями чрезвычайно актуальны, так как от их решения во многом зависит качество всех современных приборов и устройств, где требуется почти идеальная ориентация молекул. Сравнивая, например, часы, калькуляторы и другие вещи, произведенные разными предприятиями, можно без ошибки сказать, чьи ответы правильнее. И это не только технологическая проблема, но и трудная научная задача изучения физики и химии поверхностей. Например, в книге говорилось, что в качестве опоры для жидких кристаллов используются стекла. Но стекло — вещь хрупкая и относительно тяжелая. А что, если вместо него взять полимерную пленку? Действительно, взяли... и сделали жидкокристаллический экран, который в 3—5 раз тоньше и легче привычного и, кроме того, легко изгибается, не ломаясь и даже не трескаясь. Можно представить себе перспективы применения таких экранов, если... по качеству они не будут уступать существующим.

Или зададим еще один вопрос. До сих пор молчаливо принималось, что лучи света сами не оказывают существенного воздействия на ориентацию молекул жидкого кристалла, скажем, нематика. Но всегда ли так бывает? Конечно, нет. Например, напряженность электрического поля в лазерном луче с интенсивностью, большей 100 Вт/см², такова, что само поле луча осуществляет эффект Фредерикса в нематике, т. е. изменяет ориентацию оптической оси материала. Таким образом, можно создать оптические системы, автоматически регулирующие прохождение мощного лазерного излучения. Следовательно, открывается новая страница оптики жидких кристаллов, получившая название «нелинейная оптика».

Что же касается создания с помощью жидких кристаллов плоского цветного телеэкрана, то эта проблема интересует всех: ученых — физиков и химиков, инженеров-

электронщиков, технологов — специалистов в области создания больших интегральных схем. Здесь еще имеется много неясностей: какой физический эффект и какое жидкокристаллическое состояние лучше всего использовать, делать ли оптические ячейки многослойными, какую современную технологию целесообразнее применить? Пути решения пока только намечаются. Все сказанное о существующих и будущих применениях жидких кристаллов подытоживает сводная таблица.

Т а б л и ц а применения жидких кристаллов

Внешнее воздействие	Область применения	Тип жидкого кристалла
Температура	Индикаторы температуры Тепловая запись лучом лазера Оптические фильтры Визуализация излучения и голография Тепловая самофокусировка света Декоративные и ювелирные изделия	Холестерики Холестерики, смектики А Холестерики, нематики Холестерики, нематики Нематики Холестерики
Давление и другие механические воздействия	Акусто-оптика (визуализация звуковых излучений и др.) Визуализация течений Неразрушающий контроль качества изделий Датчики давления	Нематики Нематики, холестерики Нематики Смектики С — сегнетоэлектрики
Химические примеси	Анализ газовых смесей Криминалистика	Холестерики Холестерики
Электромагнитное поле	Электрооптические экраны Модуляторы и управляемые оптические фильтры Материалы для нелинейной оптики	Нематики, холестерики, смектики Нематики Смектики С — сегнетоэлектрики

Продолжение

Внешнее воздействие	Область применения	Тип жидкого кристалла
	Неразрушающий контроль электрических цепей Электрофотография Фотохимическая запись изобращения	Нематики Холестерики Холестерики
Корпускулярное излучение	Дозиметры излучения	Холестерики, смектики

Мы благодарим терпеливого читателя, добравшегося до конца книги. Если нам удалось его чему-либо научить, мы очень рады. Если же нам удалось его увлечь жидкими кристаллами, мы просто счастливы!

Сергей Алексеевич Пикин

Лев Михайлович Блинов

ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ

(Серия: Библиотечка «Квант»)

Редактор *Л. А. Панюшкина*

Технический редактор *Е. В. Морозова*

Корректор *Н. Б. Румянцева*

ИБ № 12098

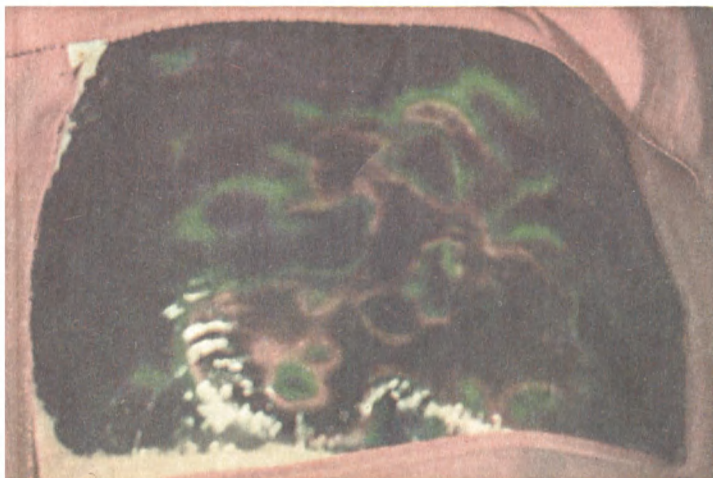
Сдано в набор 29.02.82. Подписано к печати 10.06.82. Т-06795. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 2. Литературная гарнитура. Высокая печать. Условн. печ. л. 10,92. Уч.-изд. л. 10,9. Тираж 150 000 экз. Заказ № 3834. Цена 35 коп.

Издательство «Наука»

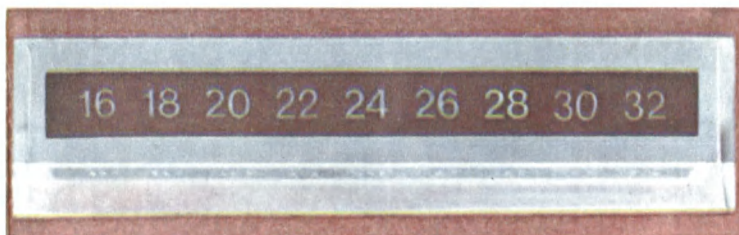
Главная редакция физико-математической литературы

117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени
Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и
книжной торговли. Москва, М-54, Валуевская, 28



С помощью холестерика можно сделать видимым распределение температуры на коже человека



Пленки холестерических жидких кристаллов используются в цифровых термометрах

БИБЛИОТЕЧКА «КВАНТ»

ВЫШЛИ ИЗ ПЕЧАТИ:

- Вып. 1. М. П. Бронштейн. Атомы и электроны.
Вып. 2. М. Фарадей. История свечи.
Вып. 3. О. Оре. Приглашение в теорию чисел.
Вып. 4. Опыты в домашней лаборатории.
Вып. 5. И. Ш. Слободецкий, Л. Г. Асламазов. Задачи по физике.
Вып. 6. Л. П. Мочалов. Головоломки.
Вып. 7. П. С. Александров. Введение в теорию групп.
Вып. 8. Г. Штейнгауз. Математический калейдоскоп.
Вып. 9. Замечательные ученые.
Вып. 10. В. М. Глушков, В. Я. Валах. Что такое ОГАС?
Вып. 11. Г. И. Копылов. Всего лишь кинематика.
Вып. 12. Я. А. Смородинский. Температура.
Вып. 13. А. Е. Карпов, Е. Я. Гик. Шахматный калейдоскоп.
Вып. 14. С. Г. Гиндикин. Рассказы о физиках и математиках.
Вып. 15. А. А. Боровой. Как регистрируют частицы.
Вып. 16. М. И. Каганов, В. М. Цукерник. Природа магнетизма.
Вып. 17. И. Ф. Шарыгин. Задачи по геометрии (планиметрия).
Вып. 18. Л. В. Тарасов, А. Н. Тарасова. Беседы о преломлении света.
Вып. 19. А. Л. Эфрос. Физика и геометрия беспорядка.
Вып. 20. С. А. Пикин, Л. М. Блинов. Жидкие кристаллы.