

С.Гонга, Д.Сэко

ОНТО- ЭЛЕКТРОНИКА

В ВОПРОСАХ
и
ОТВЕТАХ

562892

Производственное издание

**Гонда Сюнъити
Сэко Дзюнья**

ОПТОЭЛЕКТРОНИКА В ВОПРОСАХ И ОТВЕТАХ

Редактор *С. С. Полигнотова*
Художник обложки *Н. В. Зиманов*
Художественный редактор *Т. Ю. Теплицкая*
Технический редактор *Н. А. Минеева*
Корректор *Л. В. Брынцева*

ИБ № 2451

Сдано в набор 14.03.89. Подписано в печать 25.05.89. Формат 84×108^{1/32}.
Бумага офсетная № 2. Гарнитура литературная. Высокая печать.
Усл. печ. л. 9,66. Усл. кр.-отт. 9,97. Уч.-изд. 9,7. Тираж 50 000 экз. Заказ № 88.
Цена 70 к.

Энергоатомиздат, Ленинградское отделение,
191065 Ленинград, Марсово поле, 1.

Ленинградская типография № 2 головное предприятие ордена Трудового
Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга»
им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Госкомиздате СССР,
198052, Ленинград, Л-52, Измайловский пр., 29.

С.Гонга
Д.Сэку

ОПТО- ЭЛЕКТРОНИКА

В вопросах и ответах

Перевод с японского З. А. Кругляка



Ленинград
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
Ленинградское отделение
1989

BBK 32.86

Г65

УДК 681.7.068

エレクトロニクス文庫 ②⑥

オプトエレクトロニクス一問一答

工博 権田 俊一 共著
工博 世古 淳也

Редактор С. С. Полигнотова



562892

Гонда С., Сэко Д.

Г65 Оптоэлектроника в вопросах и ответах: Пер. с япон.— Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. — 184 с.: ил.

ISBN 5-283-04457-2

Написана в форме диалога, состоит из вопросов и ответов. Каждый ответ иллюстрирован рисунками. Рассмотрены понятия и явления оптоэлектроники, ее применение в науке, технике, технологии.

Для читателей, интересующихся развитием и применением новой техники.

Г $\frac{2302030500-124}{051(01)-89}$ 258—89

BBK 32.86

© О-ム社, 1984

ISBN 5-283-04457-2

© Перевод на русский язык, предисловие переводчика и список литературы. Энергоатомиздат, 1989

ПРЕДИСЛОВИЕ ПЕРЕВОДЧИКА

Уже давно стали привычными радио и телевидение, автоматика и вычислительная техника на электронных приборах. Издано много разных книг, где рассказывается о принципах работы этих приборов и систем на их основе. Но на смену многим из этих приборов уже приходят их функциональные оптоэлектронные аналоги, которые вскоре если не заменят, то дополнят электронные приборы и совместно будут работать во всех системах. Физические принципы, лежащие в основе оптоэлектронных приборов, отличаются от физических принципов электроники, и книга позволит получить представление об этом. Но здесь нет систематического изложения и не каждый вопрос сопровождается исчерпывающим ответом. Кроме того, отдельные небольшие главы содержат различную по сложности информацию, но иллюстрации способствуют достижению цели, которую поставили перед собой авторы: дать общую картину состояния и развития оптоэлектроники и пробудить у читателя интерес к происходящим и предстоящим в технике переменам. Для более полного ознакомления с темой в конце книги приведен список литературы.

Наука и техника создают новые технологии, которые постепенно вырастают в новые отрасли промышленности и занимают значительное место в нашей жизни. А мы, порой незаметно для себя, начинаем все больше и больше пользоваться их плодами.

Когда в 1960 г. изобрели лазер, оптоэлектроника была еще в колыбели. Но в последующие двадцать с лишним лет она получила мощное развитие, и сегодня, находясь под старым флагом оптической промышленности, стала самостоятельной отраслью, вместившей достижения и оптики, и электроники.

Развиваясь, оптоэлектроника вовлекает в свою сферу все больше и больше людей: производителей оптоэлектронных приборов и систем, работников торговых фирм, службы сервиса, а также потребителей. Становится возможным широкое применение оптоэлектронных систем в повседневной жизни. Это оптическая связь между пунктами, отдаленными друг от друга, оптическая память для хранения необходимой информации, лазерная обработка материалов и многое другое.

Однако оптоэлектроника еще очень молодая отрасль, к тому же связанная с множеством различных технологий, и нам представляется, что многие заложенные в ней принципы не совсем ясны, а также не совсем ясен точный смысл отдельных терминов в непривычном контексте.

Поэтому, если нам удалось, сохранив научный уровень описания, доступно рассказать о явлениях, лежащих в основе оптоэлектронных приборов, можно надеяться, что наша небольшая книга принесет пользу всем, кто заинтересуется этой новой отраслью.

В книге собраны примеры, иллюстрирующие наиболее существенные понятия и явления, но так как объем книги не позволяет описать большинство из них подробно, мы рассчитываем, что заинтересованный читатель обратится к специальным источникам.

Книга составлена из наших публикаций под общим названием «Оптоэлектроника в вопросах и ответах» в журнале «Дэнси дзасси. Эрэкутороникусу» с апреля 1981 г. по сентябрь 1983 г. Некоторые разделы дополнены в соответствии с современными представлениями.

Что такое оптоэлектроника?

Оптоэлектроника — это новое направление в науке и технике, соединившее в себе возможности оптики и электроники и появившееся как отклик на новые потребности. Являясь синтезом двух направлений, оптоэлектроника превосходит каждое из них по возможностям.

Понятие, обозначаемое словом «оптоэлектроника», значительно изменилось со времени его появления в 1955 г. Впервые этим словом называли электронные схемы с оптической связью. Затем, когда в 1960 г. был изобретен лазер, позволивший широко использовать когерентное излучение, облегчилось исследование оптических эффектов и резко возросло число попыток и предложений по использованию оптики в электронике. А развитие голографии проложило путь к еще более тесному союзу оптики с электроникой.

Представим себе фон этого скачка. В отличие от электронной техники, с самого начала использовавшей законы движения заряженных частиц для преобразования, обработки и передачи информации в виде временных рядов, оптическая техника, используя законы распространения света, смогла успешно применить их для тех же целей с особым выделением обработки видеоинформации, благодаря передаче изображений без разложения во времени. Кроме того, в ходе развития лазерной техники и технологии полупроводников один за другим стали появляться приборы, ставшие результатом синтеза этих направлений. Затем из-за высокой насыщенности информацией возникла необходимость ее быстрой обработки в различных видах и различными способами. Все это и послужило стимулом к развитию оптоэлектроники.

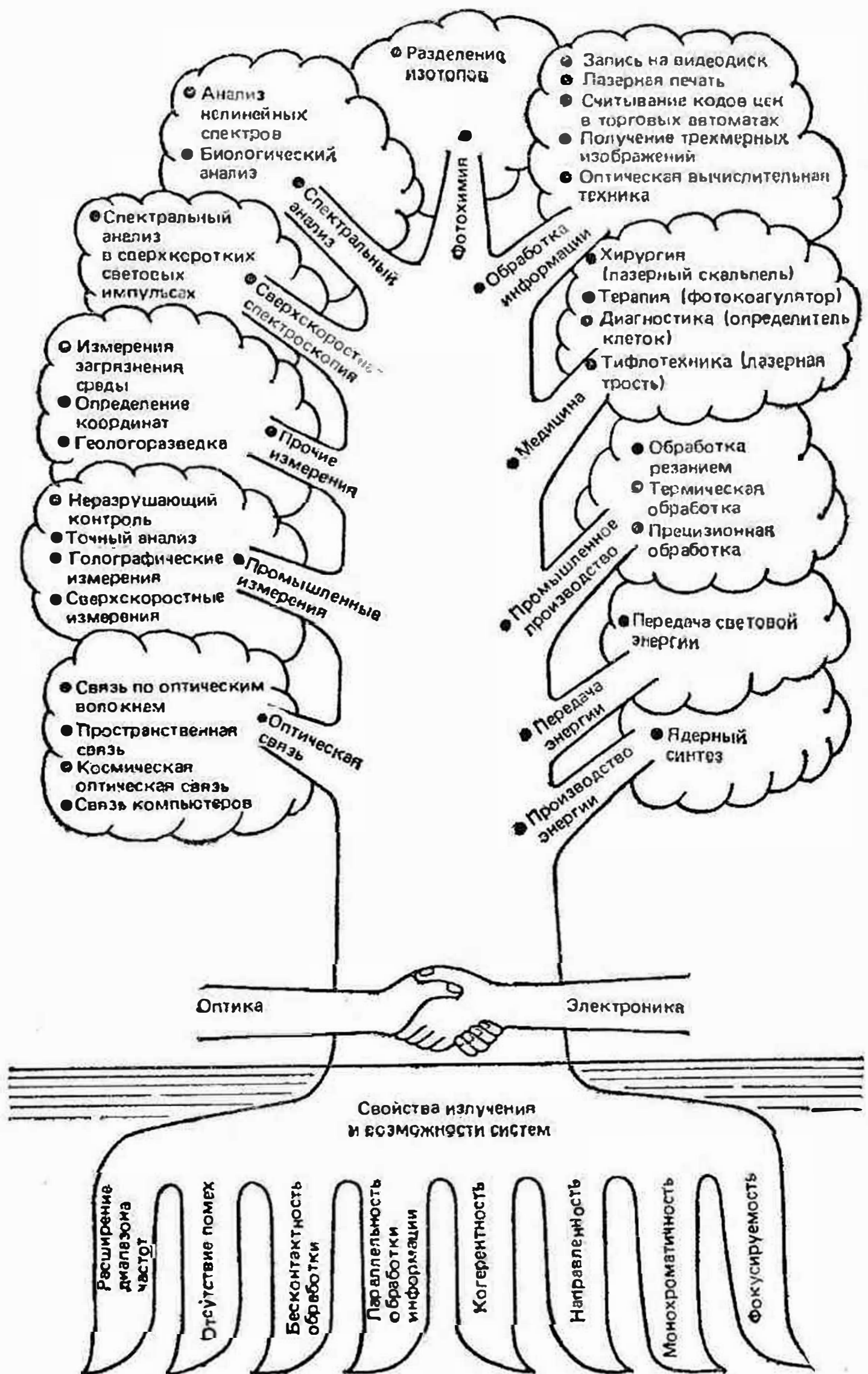


Рис. 1. Генеалогическое древо оптоэлектроники

Тифлотехника — совокупность приспособлений приборов и систем, компенсирующих абсолютную или значительную потерю зрения

Рис. 1. показывает области применения и перспективы оптоэлектроники.

В радиосвязи для увеличения объема передаваемой информации сначала перешли на ультракороткие волны, а затем в дециметровый и сантиметровый диапазон. Потом появилась оптическая связь на инфракрасных волнах, а вместе с ней — мечта уплотнить и этот канал связи, которая осуществилась с появлением лазера. Лазер позволил увеличить объем передаваемой информации сразу в 1000—10 000 раз.

Существовавшие до настоящего времени средства электронно-измерительной техники позволяли получать видеоинформацию только по точкам и затем при помощи различных электронных схем превращать ее во временные зависимости. Но когда потребовалось увеличить скорость регистрации и обработки информации, выручила оптоэлектроника. Предоставив такие средства, как пространственное преобразование Фурье и корреляционная обработка, она сделала возможным скоростную параллельную обработку полного образа объекта.

Появилось новое направление в технологии обработки материалов, использующее излучение мощных лазеров, — лазерная обработка.

Что такое оптоэлектронный прибор?

Оптоэлектронный прибор — это элемент или узел применяемой в оптоэлектронике аппаратуры (рис. 2). Классификация оптоэлектронных приборов по выполняемым функциям приведена на рис. 2. Из приборов, излучающих свет, на рисунке собраны в отдельную группу лазеры — источники когерентного излучения. Источники света — это, как правило, приборы с непосредственным преобразованием энергии электронов. Самые типичные из них: светодиод, полупроводниковый и газовый лазер. А у твердотельного лазера и лазера на красителях преобразование идет двухступенчато. Энергия электронов сначала преобразуется в свет, который и возбуждает когерентное излучение лазера.

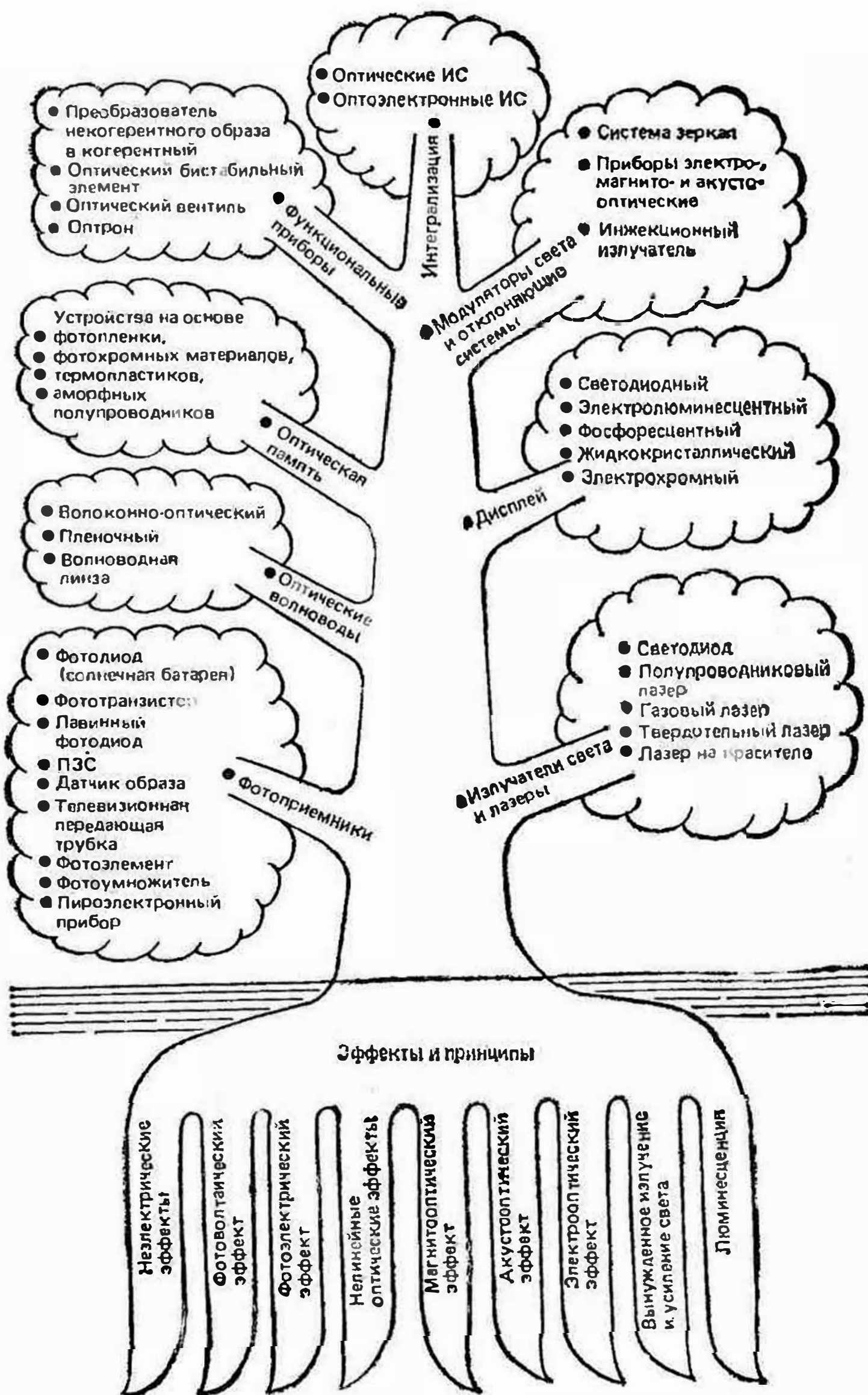


Рис. 2. Генеалогическое древо оптоэлектронных приборов

Дисплей — это устройства связи между людьми и машинами. Если в качестве рабочего тела используется электролюминесцентный или флюоресцентный материал, то это активные, излучающие свет приборы. Дисплей на жидких кристаллах и электрохромных материалах — устройства пассивные. Они работают благодаря свойствам этих веществ отражать или пропускать свет в зависимости от действия электрического тока или поля.

Фотоприемные приборы преобразуют свет в электрический ток. Такие из них, как фотодиод, фототранзистор, лавинный фотодиод, приборы с зарядовой связью, работают на основе использования контактных явлений в полупроводниках. А приборы типа передающей телевизионной трубки работают на основе фотоэффекта в материалах с малой работой выхода или на основе фотопроводимости. Работа фотоэлемента и фотоэлектронного умножителя также основана на фотоэффекте. Работа пироэлектронных приборов основана на пироэлектрическом эффекте.

Модуляторы света, изменяя параметры излучения источника, заставляют свет нести полезную информацию. Для управления ходом светового луча применяются оптические отклоняющие системы. И те, и другие приборы могут основываться на одних и тех же принципах (например, механический — повороты и перемещение зеркал) и явлениях (электро-, магнито-, акустооптический эффект и др.). В инжекционных излучателях мощность излучения управляется током, и поэтому они допускают непосредственную модуляцию.

Созданы элементы оптической памяти, позволяющие записывать и считывать информацию при помощи света. Здесь наряду с классическим необратимым фотоматериалом, таким, как фотопленка, используются обратимые фотохромные материалы, термопластики и аморфные полупроводники. Созданы и другие оптоэлектронные приборы на основе светочувствительных материалов — это преобразователь некогерентного образа в когерентный, оптический бистабильный элемент и оптический изолятор.

Для передачи излучения применяют оптические волокна, пленочные и волноводные линзы. Кроме передачи излучения волноводы способны выполнять и другие функции.

Оптические и оптоэлектронные интегральные схемы (ИС) — это новые элементы аппаратуры, полученные путем изготовления на одной базовой пластине большого числа названных выше приборов. Эти элементы позволяют миниатюризировать аппаратуру, повышают ее надежность и расширяют функциональные возможности.

Что такое люминесценция?

Явление, при котором вещество, либо поглощая энергию света ионизирующего или другого излучения, либо под действием различных химических реакций переходит в возбужденное состояние, а затем, возвращаясь в исходное состояние, излучает полученную энергию в виде света, называют *люминесценцией* (рис. 3). Кратковременное люминесцентное излучение, прекращающееся почти сразу с окончанием возбуждения, это *флюоресценция*, а длительное, продолжающееся и после окончания возбуждения, — *фосфоресценция*. Явления люминесценции делятся на несколько видов, в зависимости от способа возбуждения (табл. 1).

Фотолюминесценция — свечение вещества при облучении светом. Фотолюминесцентные материалы — это возбуждаемые ультрафиолетовым излучением соединения $Y_2O_3:Eu^{3+}$ (красное свечение) и $CaWO_4:Pb$ (сине-зеленое свечение), рабочие тела лазеров, такие, как рубин ($Al_2O_3:Cr^{3+}$), неодимовое стекло, органические красители, подобные родамину 6Ж, и многие другие.

Катодная люминесценция — свечение вещества при облучении пучком электронов. Пример материалов

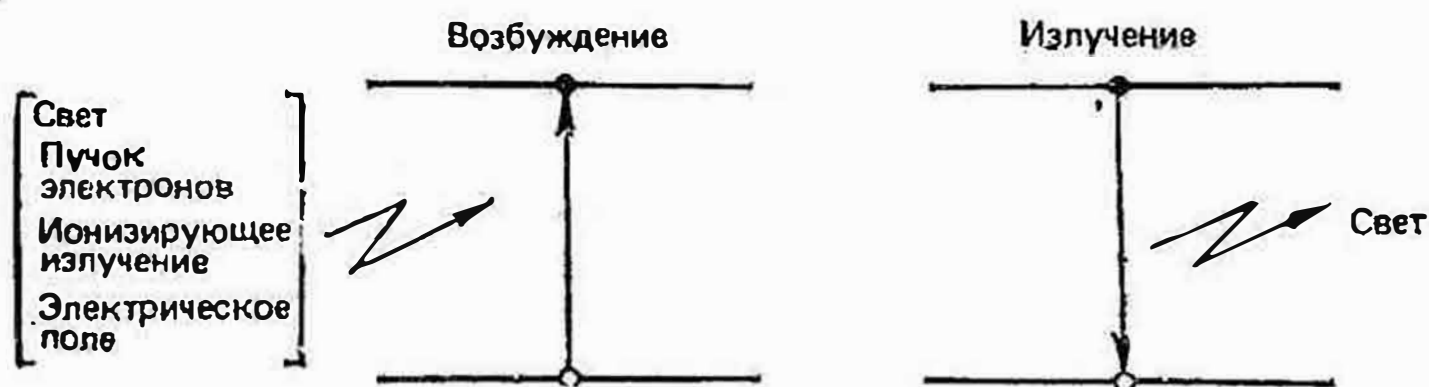


Рис. 3. Схема люминесценции

Таблица 1. Виды, механизмы, материалы и применение люминесценции

Вид	Механизм	Материал	Применение
Фотолюминесценция	Возбуждение светом	Стекло (неодимовое), красители, флюоресцирующие вещества ($\text{CaWO}_4 : \text{Pb}$, $\text{Zn}_2\text{SiO}_4 : \text{Mn}$ и др.)	Дорожные знаки, источники света (люминесцентные лампы), лазеры
Катодная люминесценция	Возбуждение пучком электронов	Флюоресцирующие вещества ($\text{ZnO} : \text{Zn}$, $\text{ZnS} : \text{Ag} + \text{In}_2\text{O}_3$, $\text{ZnS} : \text{CuAl} + \text{In}_2\text{O}_3$ и др.)	Катодно-лучевые трубки, светящиеся указатели, лазеры
Электролюминесценция: предпробойная	Ударная ионизация	Твердые тела ($\text{ZnS} : \text{Cu}$, Mn , $\text{ZnSe} : \text{Mn}$ и др.)	Знаковые индикаторы, источники света, элементы памяти
инжекционная	Инжекционное возбуждение	Полупроводники (GaAs , GaP , GaAsP , GaN , ZnSe , SiC , и др.)	Светодиоды, оптроны, лазеры, индикаторы
Хемотрюминесценция	Возбуждение химическими реакциями	HF , DF	Лазеры
Антистоксовская люминесценция	Эффект Рамана Умножение частоты света при нелинейных оптических явлениях Многофотонная ионизация	Бензол, H_2 , Si , LiNbO_3 , рубин $\text{ZnS}_x\text{Cd}_{1-x} : \text{Cu}$, Ag , соли вольфрамовой кислоты с присадками Yb , Er	Лазеры Оптические умножители частоты Светодиоды

для катодной люминесценции — $\text{ZnS} : \text{Cu}$, Al (зеленое свечение), $\text{Y}_2\text{O}_3\text{S} : \text{Eu}_2$ и модификации ZnO (красное свечение). Существуют также материалы, светящиеся при бомбардировке низкоскоростными электронами: $\text{ZnO} : \text{Zn}$ (зеленое свечение), $\text{ZnS} : \text{Ag} + \text{In}_2\text{O}_3$ (синезеленое свечение) и им подобные.

Электролюминесценция — свечение вещества под действием электрического поля. При этом свечение под действием сильного поля, увеличивающего кинетическую энергию носителей заряда в веществе, называют *предпробойной электролюминесценцией*, а излучение света, возбуждаемое инжектированными носителями за счет разности их потенциальных энергий, созданной в твердом теле, называют *инжекционной люминесценцией*. Пример материалов для предпробойной электролюминесценции — $\text{ZnS} : \text{Cu}$, $\text{ZnS} : \text{Mn}$, а для инжекционной — $\text{GaP} : \text{N}$, $\text{GaP} : \text{Zn}$, $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

Свечение, сопровождающее химические реакции, проходящие в веществах, называют *хемолюминесценцией*. Пример такого явления — свечение синего цвета, возникающее при окислении желтого фосфора. Возбуждение химического лазера производится с помощью, например, реакции между фтором и водородом.

Чаще всего энергия (частота) возбуждающего излучения выше энергии (частоты) свечения, и тогда люминесценцию называют *стоксовой*. В противоположном случае говорят об *антистоксовой* люминесценции.

Что такое вынужденное излучение и усиление света?

Все атомы и молекулы, все твердые тела и жидкости могут излучать свет с характерным для каждого из них набором длин волн. Причина в том, что энергия электронов в атоме, колебательная и вращательная энергия молекул, энергия электронных уровней в твердом теле может принимать только определенные дискретные наборы значений, характерные для каждого конкретного вида атомов, моле-

кул и твердых тел. И когда электрон с энергией E_2 переходит на уровень с энергией E_1 , испускается квант света с длиной волны λ , обратно пропорциональной разности этих энергий ($E_2 - E_1 = h\nu$, где h — постоянная Планка, $\nu = 1/\lambda$).

Излучение света может происходить двумя способами. Первый способ показан на рис. 4, а. Когда электроны в атоме, находившиеся на энергетическом уровне E_2 , без постороннего влияния переходят на более низкий энергетический уровень E_1 , испустив световой квант, это *спонтанное излучение*. Если рядом находится атом, способный излучать свет с длиной волны, равной λ или очень близкой к ней, то при поглощении этим атомом света с указанной длиной волны электрон переходит с уровня E_1 на уровень E_2 . Такое явление называют *резонансным поглощением* (рис. 4, б). Второй способ: электроны находятся на уровне E_2 , и атом подвергается воздействию света с длиной волны, соответствующей резонансному поглощению. В этом случае атом испускает свет, по длине волны и фазе полностью соответствующий воздействию (рис. 4, в). Такое явление называют *вынужденным (индуцированным) излучением*.

Считают, что причины вынужденного излучения таковы. При отсутствии света волновая функция электрона (квадрат ее амплитуды выражает вероятность пребывания электрона на данном энергетическом уровне) может быть либо функцией состояния

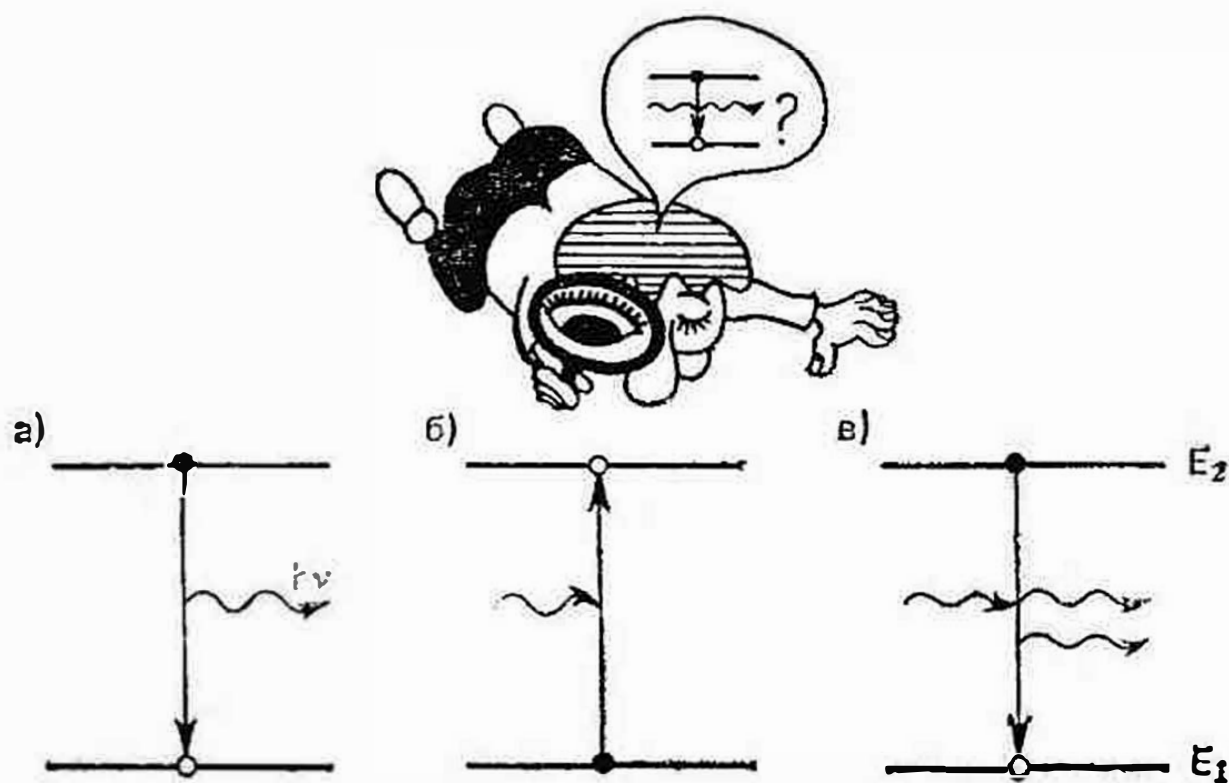


Рис. 4. Спонтанное излучение (а), резонансное поглощение (б) и вынужденное излучение (в) света

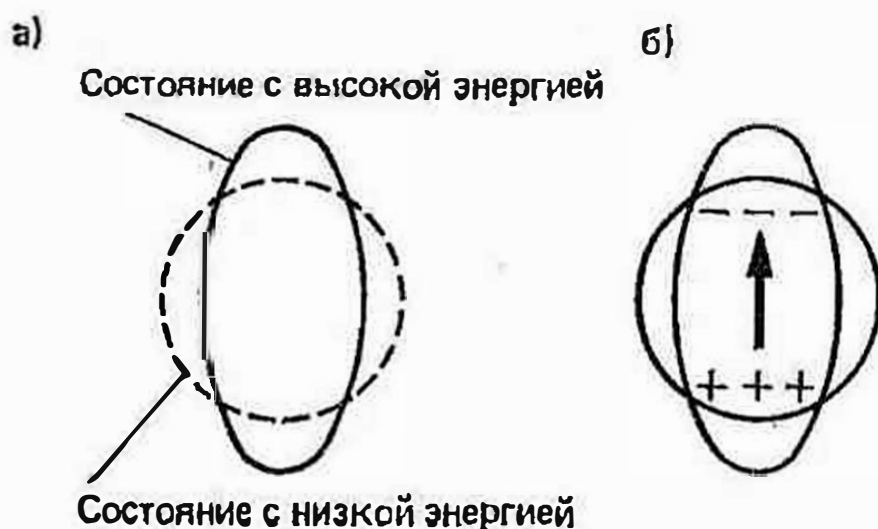


Рис. 5. Распределение электронов и вынужденное излучение в отсутствие (а) и под действием (б) внешнего излучения

E_1 , либо функцией состояния E_2 (рис. 5, а), причем обе эти волновые функции взаимно независимы. Под действием электромагнитного поля света распределение вероятности изменяется. Возникает суперпозиция состояний, описываемая линейной комбинацией указанных выше волновых функций. Иначе говоря, возникает смещение зарядов вдоль вектора напряженности электрического поля падающего света, причем заряды колеблются около положения равновесия с той же фазой и частотой, что и световая волна. Атом становится диполем, излучающим свет с частотой и фазой падающего света.

Если собрать N свободных атомов, то получим N электронов и $2N$ энергетических уровней. Когда эта система находится в тепловом равновесии, то число электронов n_1 на уровнях с энергией E_1 больше, чем число электронов n_2 на уровнях с энергией E_2 . И хотя такая система в состоянии излучать свет с длиной волны λ , однако резонансное поглощение преобладает и спонтанное излучение прекратится. Но если каким-либо способом сделать n_2 больше, чем n_1 (такое распределение электронов называют *инверсным*, и так как, по определению абсолютной температуры, это состояние возможно только при температуре ниже абсолютного нуля, его называют *состоянием с отрицательной температурой*), то вынужденное излучение будет преобладать над резонансным поглощением (рис. 6). Таким образом, падающий свет может сопровождаться вынужденным излучением с той же фазой и длиной волны, но интенсивностью во много раз выше. Это и есть *усиление света*. Повышение интенсивности на единицу длины рабочего тела, выра-

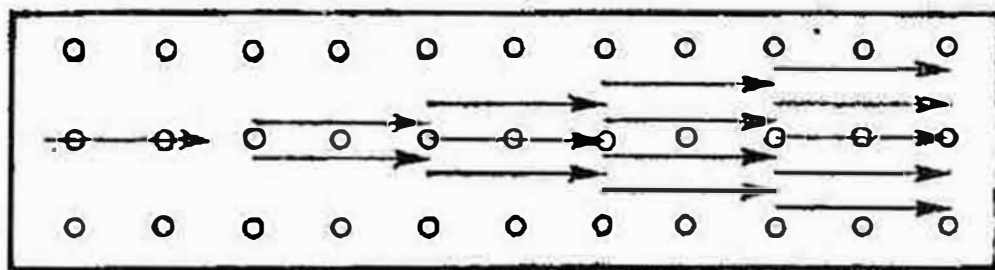


Рис. 6. Усиление света воздействием внешнего излучения на группу атомов в инверсном состоянии

женное в процентах, называют *коэффициентом усиления*. Свет можно усиливать с помощью неодимового стекла и подобных ему материалов.

Лазерная генерация — это усиление вынужденного излучения с использованием оптического резонатора.

Что такое синхротронное орбитальное излучение?

При искривлении траектории в магнитном поле ускорителей кольцевого типа, например синхротрона, электроны излучают электромагнитные волны, называемые *синхротронным орбитальным излучением*. В настоящее время часто используют термины *синхротронное излучение* и *синхротронное свечение*.

На рис. 7 приведена схема возникновения синхронного излучения в устройстве кольцевого типа. Электроны, уже набравшие необходимую скорость в линейном ускорителе, влетают в кольцо с поворотными электромагнитами и движутся в нем. В тех местах, где магнитное поле искривляет траекторию электронов, ставятся выходные окна для излучения. Полученное излучение используют для различных целей. Такие сооружения есть и в нашей стране¹: в Институте деления атомного ядра Токийского университета (0,4 ГэВ), в Институте деления и синтеза атомных ядер (0,6 ГэВ) и в институте физики высоких энергий (2,5 ГэВ).

Синхротронное излучение может занимать любую область в широком спектре длин волн — от инфракрасного, видимого и ультрафиолетового до рентгенов-

¹ В Японии. — Прим. перев.

ского излучения. Длина волны излучения уменьшается с увеличением энергии электронов (рис. 8). В существующих источниках основная доля мощности излучения приходится на диапазон от ультрафиолетовых до мягких рентгеновских лучей (длина волны 1—200 нм). Предположив, что диаметр источника излучения меньше 1 мм, можно сделать теоретический расчет интенсивности источника, близкого к точечному. Так как масса электрона меньше $1/1800$ массы протона, то энергия в несколько сотен мегаэлектрон-вольт соответствует огромной скорости — до 99,9999 % скорости света. Когда такой высокоскоростной электрон, поворачиваясь в электрическом или магнитном поле, излучает вдоль касательной к дуге траектории, все излучение собрано в конусе с углом $0,05^\circ$ при вершине. Существенные особенности этого излучения — малая расходимость, эллиптическая поляризация.

Синхротронное излучение можно применять для различных целей, но особенно привлекает внимание использование его в электронике для литографии и в электронной спектроскопии. Обычно для литографии используют видимый свет или ультрафиолетовое излучение, но, когда размеры шаблона уменьшаются до одного микрометра, то из-за дифракции и интерференции резко падает разрешающая способность даже ультрафиолетовых лучей. По этой причине литогра-

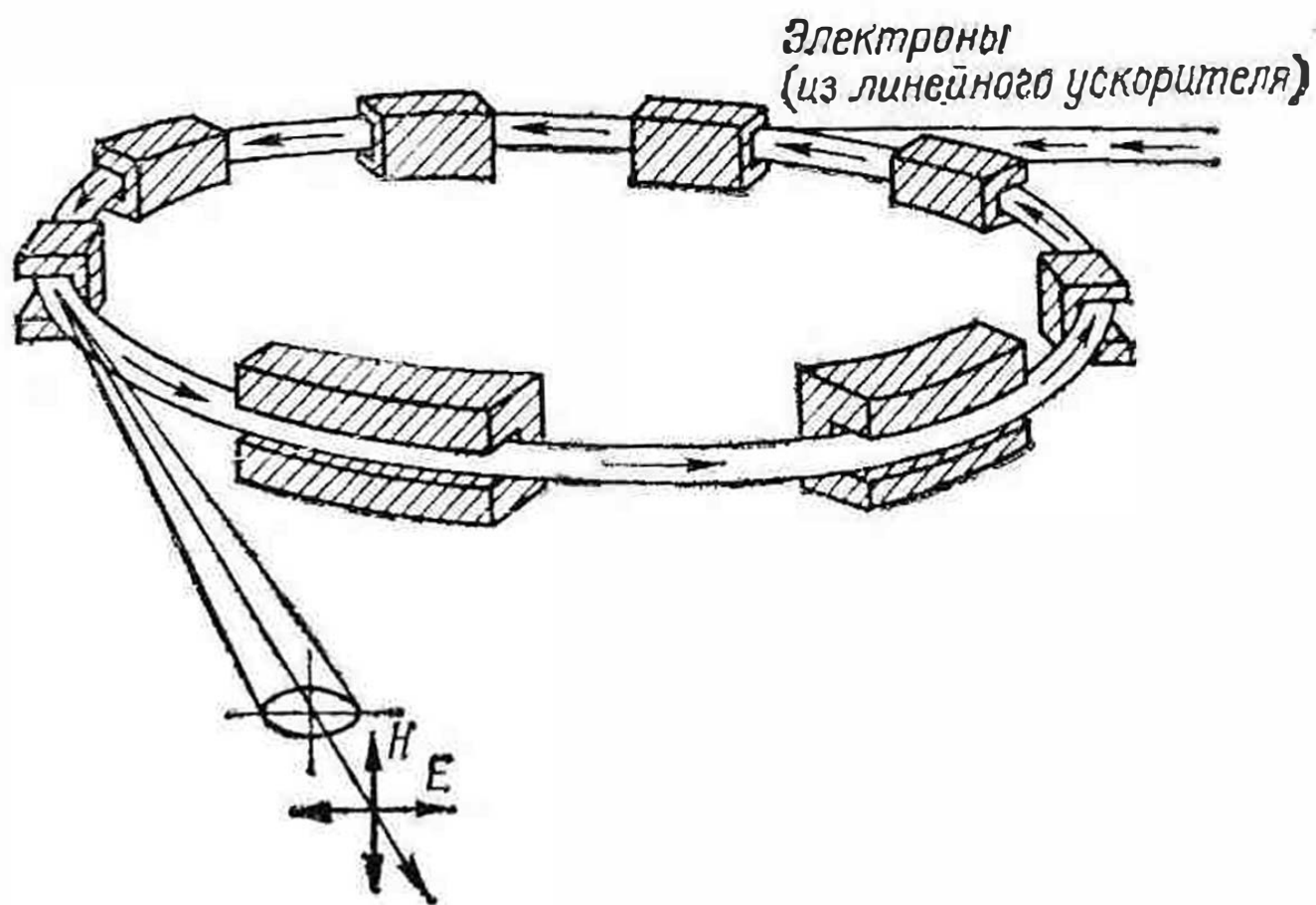


Рис. 7. Схема возникновения синхротронного излучения

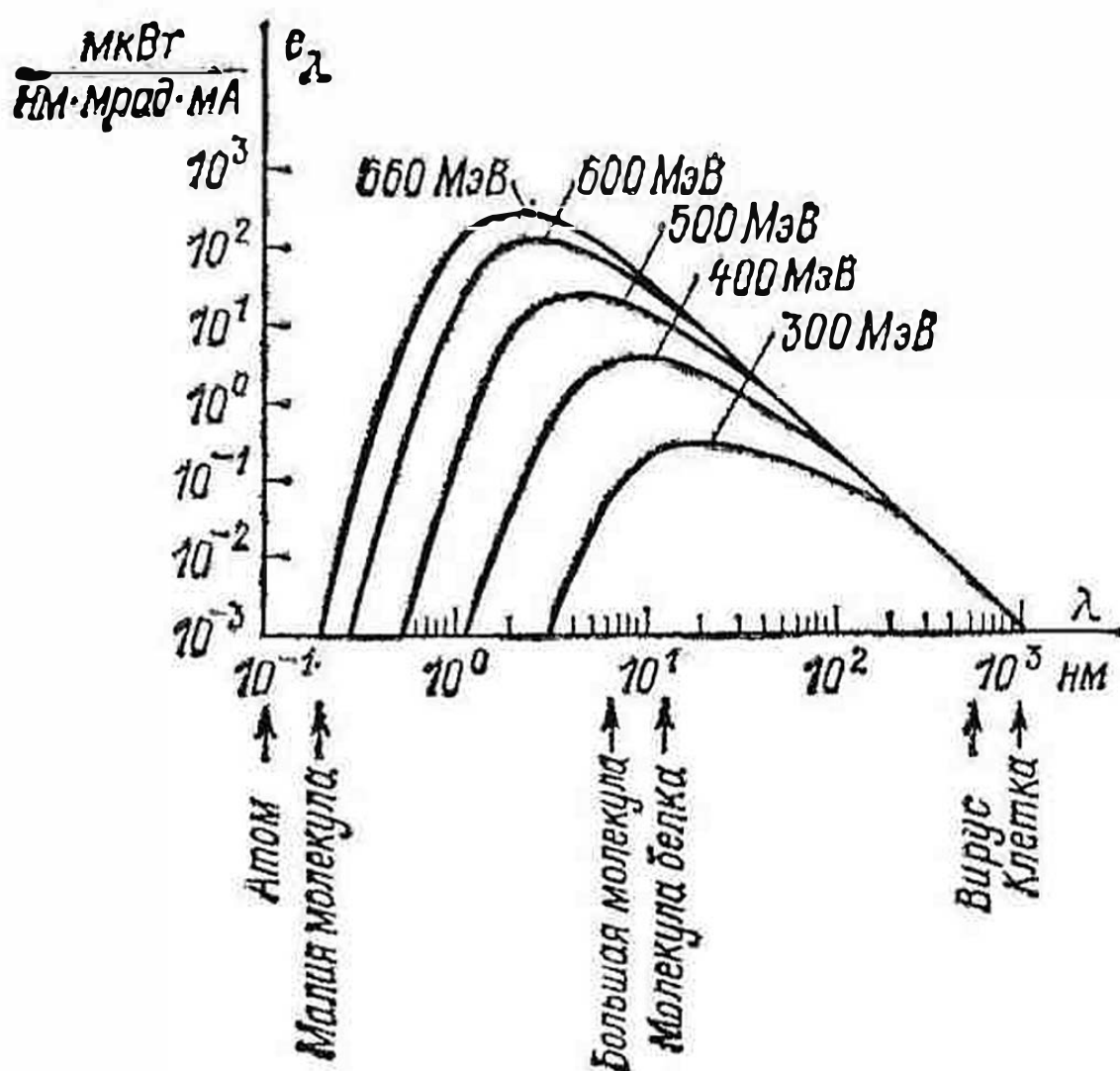


Рис. 8. Спектр синхротронного излучения

e_λ — спектральная плотность энергии излучения; для сравнения указаны некоторые объекты с размерами того же порядка, что и длина волны

фию приходится вести в коротковолновых рентгеновских лучах, но их интенсивность мала, а расходимость велика. Пучки синхротронного излучения превосходят рентгеновские по этим свойствам и позволяют экспонировать мельчайшие полосы на шаблоне. В эксперименте на фоторезисте с высоким разрешением удалось отобразить фигуры размером 0,5—1,0 мкм. Однако экспериментальных данных пока мало, еще не исследованы многие практические проблемы, например не подобраны материалы с подходящими спектральными характеристиками для фотошаблона и фоторезиста.

Источники синхротронного излучения применяют для исследования поверхностей и контактов материалов электроники путем получения спектра фотоэлектронов. Благодаря спектральной стабильности, высокой интенсивности и хорошей поляризации, синхротронное излучение как источник возбуждения может способствовать получению информации о поверхности и контактах как полупроводников, так и структур типа барьера Шотки, возникающих при контакте металла с полупроводником.

Что такое поляризация?

Свет — это электромагнитная волна. Векторы напряженности электрического и магнитного поля электромагнитной волны расположены в плоскости, перпендикулярной направлению ее распространения, и периодически изменяются по величине и направлению. Поляризация света — характеристика неравномерности распределения по направлению амплитуд колебаний этих векторов.

Если излучение монохроматическое, векторы колеблются с некоторой постоянной частотой и их можно представить в виде суммы двух взаимно перпендикулярных составляющих x и y . Если разность фаз колебаний по направлениям x и y равна нулю, то их суммарный вектор колеблется в одной плоскости. Аналогично для разности фаз, равной πn , где n — целое число. Такой случай называют *линейной поляризацией*, а плоскость, перпендикулярную направлению колебаний (обычно магнитного вектора), — *плоскостью поляризации*. Если разность фаз колебаний по направлениям x и y не равна πn , то конец вектора электрического поля описывает поверхность эллиптического цилиндра. Такой случай называют *эллиптической поляризацией*. А если разность фаз при одинаковых амплитудах составит $\pi/2$ или $(2n - 1)\pi/2$, где n — целое число, то эллиптический цилиндр станет круговым, а поляризация — *круговой поляризацией*. Различают правую и левую (по отношению к наблюдателю) круговую поляризацию. На рис. 9 показано изменение поляризации света при изменении разности фаз от 0 до 180° . В естественном свете направление электрического вектора изменяется случайным образом, и если его модуль усреднить по времени, то поляризации не наблюдается. Поэтому естественный свет считают неполяризованным.

Знакомый всем пример — поляризация света при отражении стеклом или поверхностью воды. В частности, как показано на рис. 10, если угол между преломленным и отраженным лучами прямой, то отраженный свет поляризуется полностью. Угол падения света в этом случае называют *углом Брюстера*, а само явление используют для линейной поляризации света в резонаторе лазера, располагая торцы лазер-

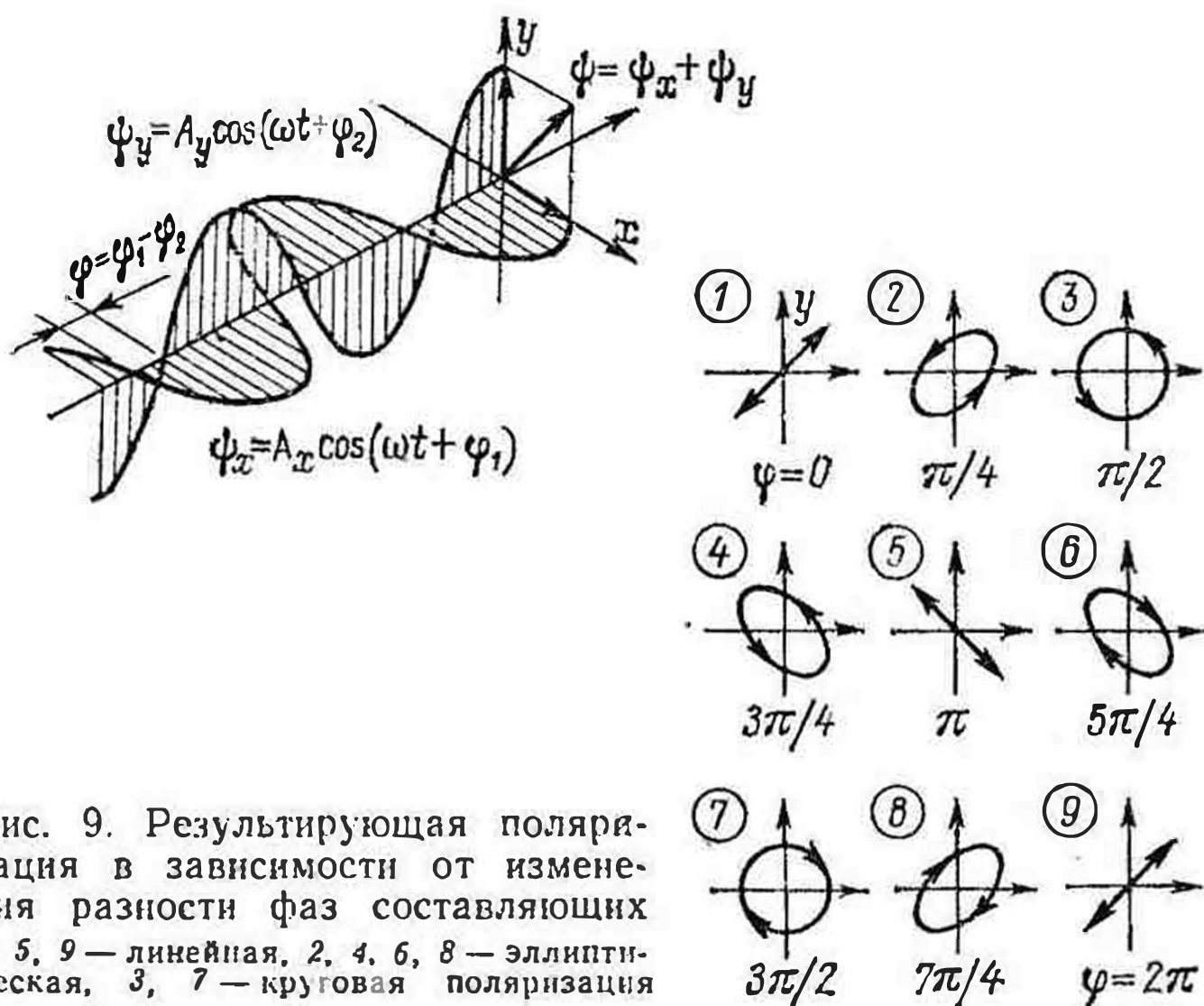


Рис. 9. Результирующая поляризация в зависимости от изменения разности фаз составляющих
1, 5, 9 — линейная, 2, 4, 6, 8 — эллиптическая, 3, 7 — круговая поляризация

ной трубки (рабочего тела) под нужным углом к оси резонатора.

Созданы и специальные поляризационные приборы — *поляризаторы*. Например, турмалиновая пластинка, поляроид, поляризационная призма. Поляроид представляет собой пластмассовую пластинку с запрессованными в нее одинаково ориентированными анизотропными кристаллами небольшого размера. Поляризация света в нем происходит за счет поглощения колебаний с определенным направлением электрического вектора.

Если вещество состоит из узких и в то же время длинных молекул, то коэффициент преломления вдоль оси ориентации молекул (оптической оси) отличается от коэффициента преломления в перпендикулярном к ней направлении. При прохождении света сквозь

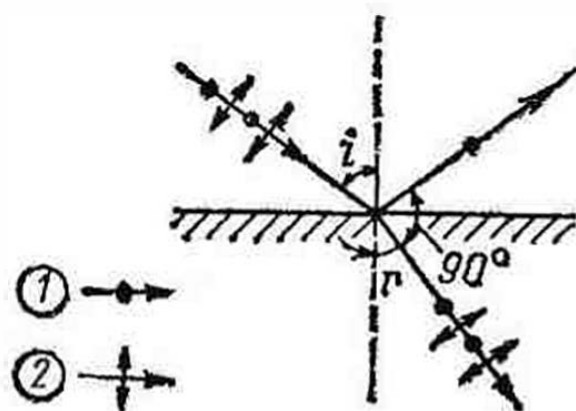


Рис. 10. Поляризация отраженного света

i — угол Брюстера; r — угол преломления; 1 и 2 — плоскость поляризации перпендикулярна и параллельна плоскости чертежа

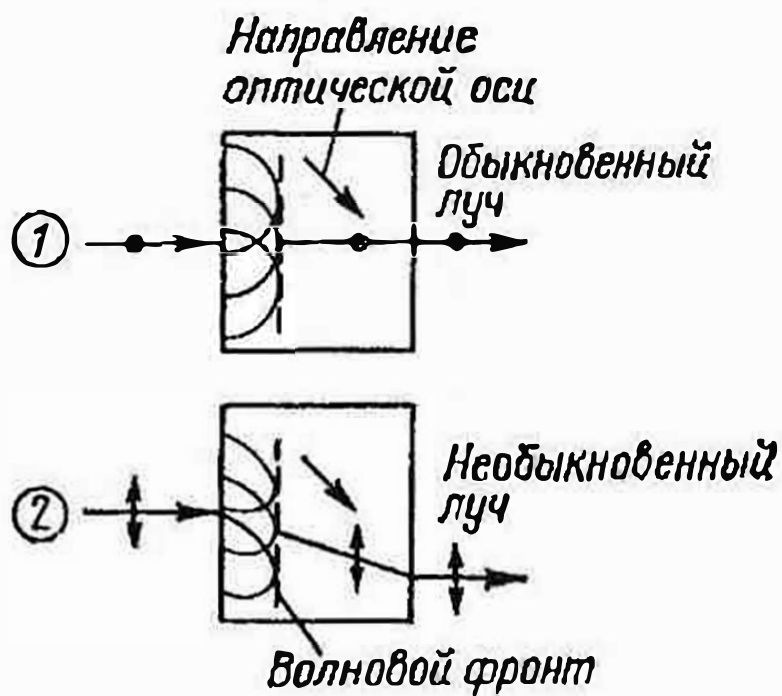


Рис. 11. Двойное лучепреломление

такое вещество наблюдается явление *двойного лучепреломления*. Если входящий свет поляризован в направлении, составляющем угол 45° с оптической осью, то, поскольку коэффициенты преломления для *x*- и *y*-составляющих электрического вектора различны, при выходе из вещества становятся разными фазы их колебаний, а это приводит к изменению поляризации света. Если на выходе из вещества разность фаз составит 90° , то линейно поляризованный свет меняет поляризацию на круговую. Плоскопараллельную пластинку, дающую такую разность фаз, называют *четвертьволновой пластинкой*. Если луч света попадает в вещество с двойным лучепреломлением под углом к оптической оси, как показано на рис. 11, то разделяется на два: луч, продолжающий идти прямо, — *обыкновенный луч* и луч, отклоняющийся в сторону, — *необыкновенный луч*. Этот эффект называют *аномальным преломлением*.

Что такое когерентность?

Способность излучения к интерференции, называемая *когерентностью*, бывает двух типов: *временная когерентность* монохроматического излучения (имеющего постоянную частоту) и *пространственная когерентность* — совпадение фаз волн, выходящих из

разных точек источника или из разных источников (рис. 12).

Обычно свет таких источников, как лампочки накаливания, не дает интерференции, так как он имеет случайную частоту (длину волны) и фазу. Излучение же таких источников, как ртутная лампа (с линейчатым спектром излучения), может частично интерферировать. Если вследствие переходов в нормальное состояние отдельных возбужденных атомов излучается цуг волн длительностью Δt , то его длина $\Delta x = c\Delta t$ (где c — скорость света). Для получения картины интерференции вышедший из источника цуг разделяют на два, так как цуги, полученные от двух разных атомов, имеют случайные параметры и не интерферируют. Но и при разделении одного цуга интерференции не будет, если разность путей, пройденных после разделения, будет больше, чем длина самого цуга Δx . Эту величину называют *длиной когерентности*. Она может быть измерена при помощи *интерферометра Майкельсона* (рис. 13) и служит мерой когерентности. Волновой цуг не монохроматичен и если даже очень близок по форме к синусоидальной волне со средней частотой ν_0 , то из-за ограниченности времени излучения содержит набор частот в интервале $\Delta\nu$. Связь длины когерентности с частотной полосой цуга выражается соотношением $\Delta x = c/\Delta\nu$. Поэтому волновой цуг естественного (белого) света и света лампы накаливания короткий, не более 10 см. А волновой цуг вынужденного излучения лазера, когда последовательно попадающий на возбужденные атомы свет вызывает излучение с теми же параметрами,

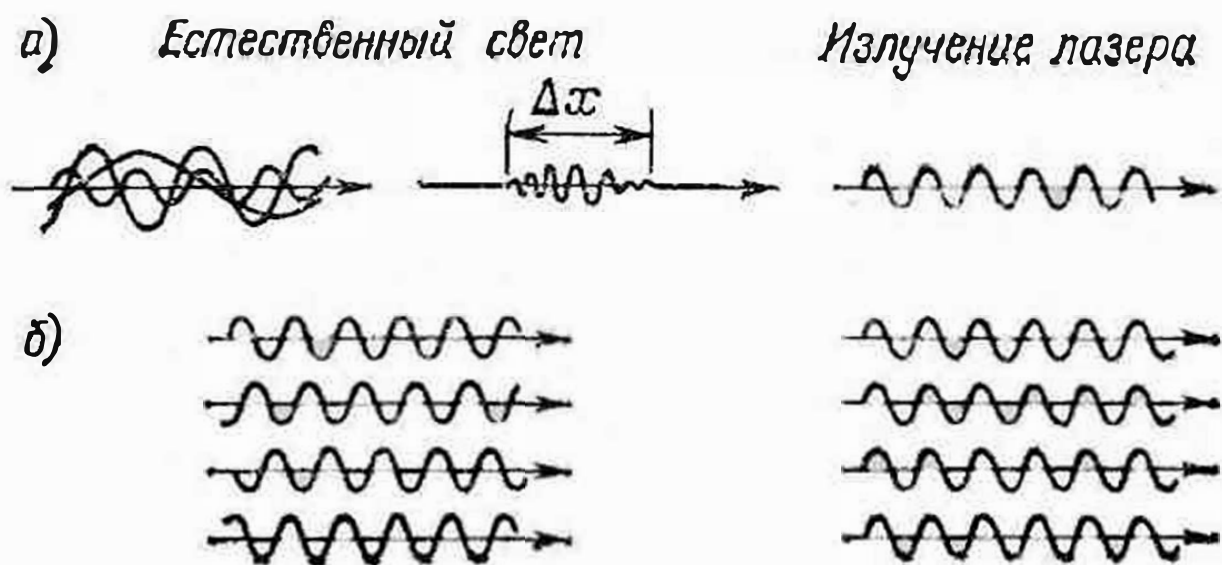


Рис. 12. Временная (а) и пространственная (б) когерентность

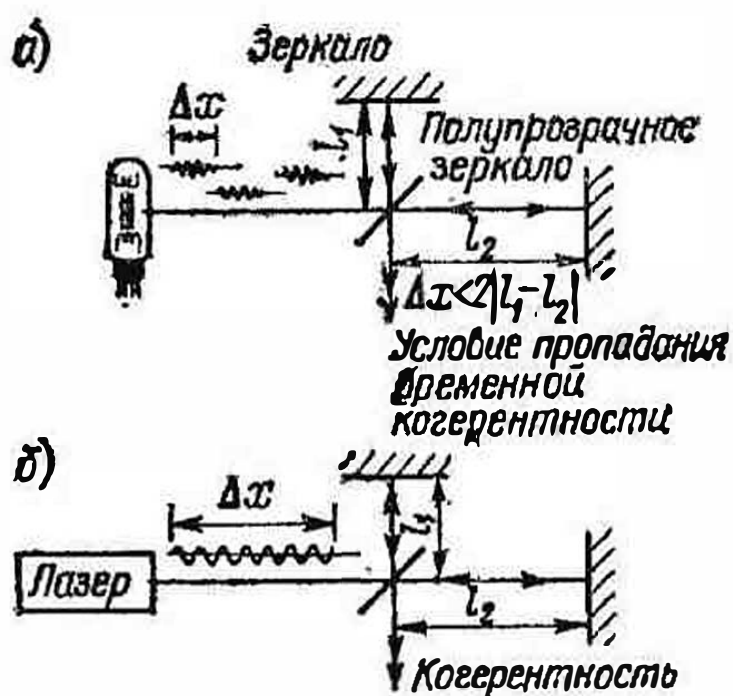


Рис. 13. Наблюдение временной когерентности в естественном свете (а) и в излучении лазера (б) с помощью интерферометра Майкельсона

представляет собой длинную синусоиду с постоянной фазой. Благодаря этому у лазерного излучения очень высокая временная когерентность. Например, у газового лазера длина когерентности может составлять десятки километров.

Пространственную когерентность можно объяснить, рассматривая интерференцию на двух щелях (рис. 14). При обычном источнике свет, выходящий из разных его точек, даже монохроматичный, не дает на экране картину интерференции (рис. 14, а). Но если приставить к источнику «иголочную диафрагму», сделав его точечным, и прошедшим через диафрагму светом осветить щели, то обязательно получим картину интерференции (рис. 14, б). Свет лазера, выходящий из разных точек апертуры, имеет совпадающие по всему фронту фазы. Поэтому сложенные после прохода щелей пучки всегда дают на экране интерференционную картину (рис. 14, в). Особенности лазерного излучения — *направленность* и *крайне низкая расходимость* — следствие высокой когерентности. А именно, если монохроматическое излучение с длиной волны λ выходит из отверстия диаметром D с согласованными по фронту фазами, то угол расхождения пучка будет $\Delta\theta = \lambda/D$. И так как диаметр D апертуры лазера значительно больше длины волны λ , то получится малорасходящийся пучок — световой «шнур» солидной толщины.

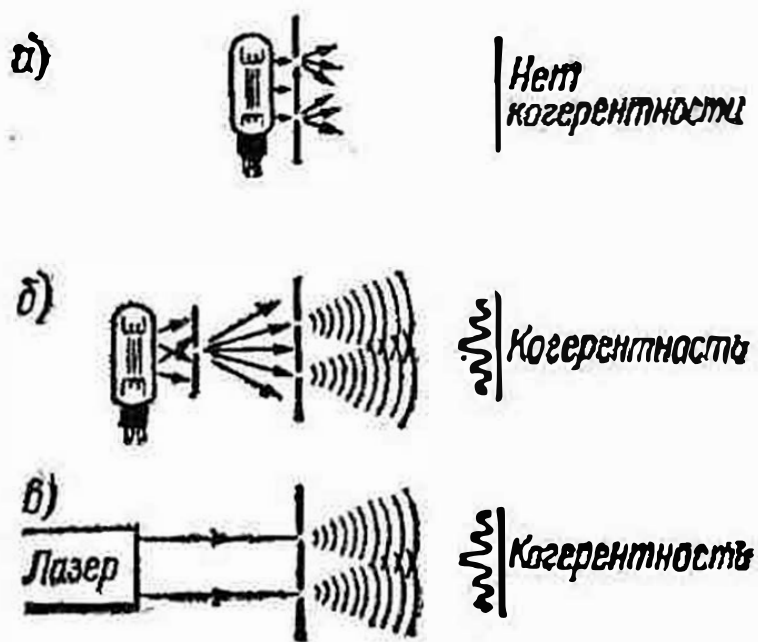


Рис. 14. Наблюдение пространственной когерентности на двух щелях

Кроме того, свет можно сфокусировать в маленькое пятно при помощи линзы. Если фокусное расстояние линзы f , а диаметр пятна R , то существует зависимость $R = f\Delta\theta$. Понятно, что свет лазера фокусируется в столь малое пятно благодаря изначальной малой расходимости.

Что такое электрооптический эффект?

Электрооптический эффект — это изменение коэффициента преломления некоторых материалов под действием электрического поля. Материалы, обладающие таким свойством, называют электрооптическими материалами. Электрооптические эффекты бывают двух видов: 1) коэффициент преломления линейно зависит от силы поля, приложенного к кристаллу, не имеющему внутренней симметрии (например, пьезокристаллу); 2) коэффициент пропорционален квадрату силы поля в веществах с внутренней симметрией. Первый называют **эффектом Поккельса**, а второй — **эффектом Керра**. Эффект Поккельса проявляется на кристаллах $KDP(KH_2PO_4)$, $DKDP(KD_2PO_4)$, $ODP(NH_4H_2PO_4)$, $LiNbO_3$ и подобных им, эффект Керра можно наблюдать в нитроглицерине, сероуглероде и подобных им жидкостях. В технике, например в оптической связи, чаще используют эффект Пок-

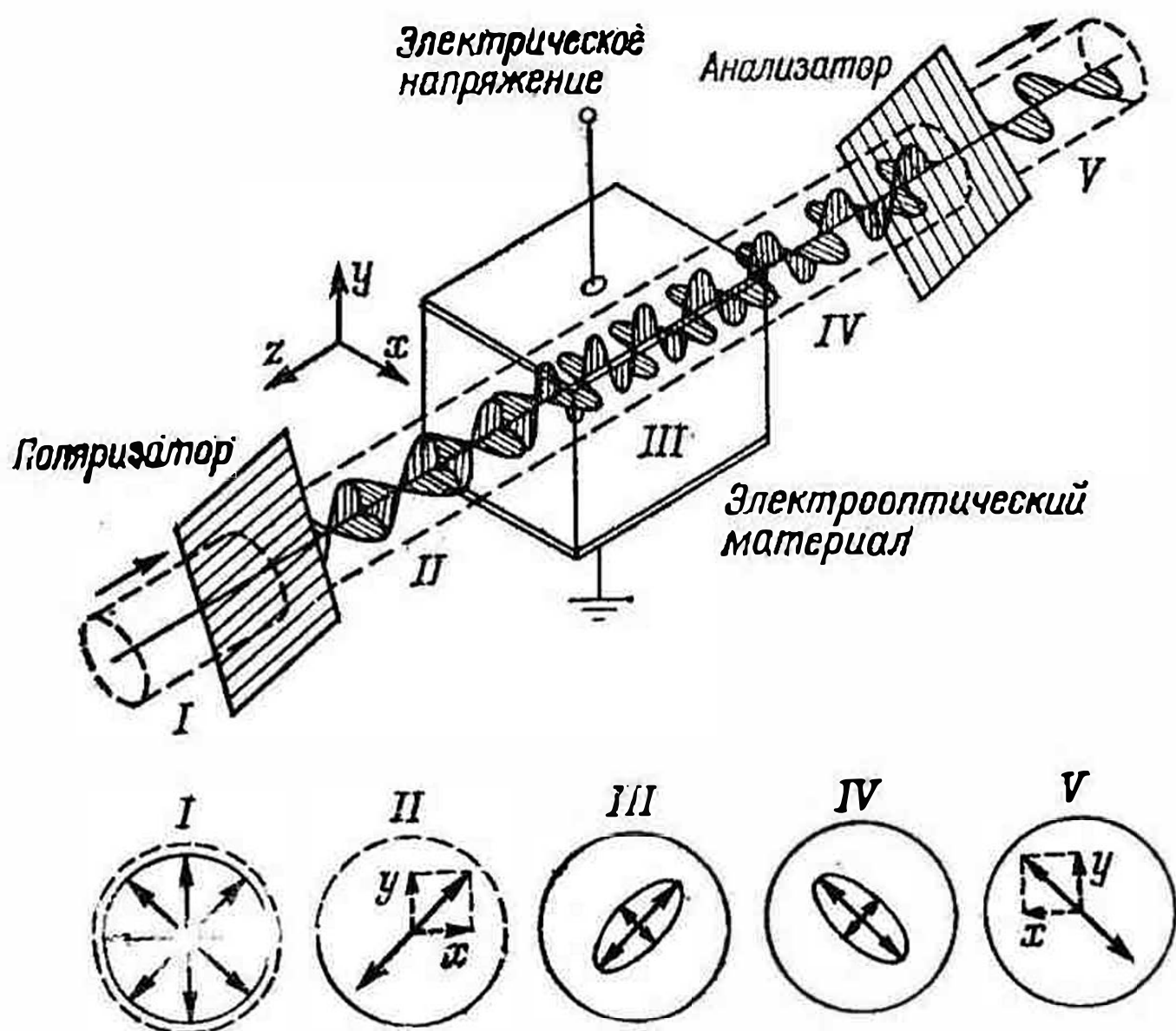


Рис. 15. Модуляция света на основе электрооптического эффекта Поккельса

I — неполяризованный входящий свет; *II* и *V* — линейная поляризация света после поляризатора и после анализатора; *III* и *IV* — эллиптическая поляризация света в кристалле и после кристалла

кельса из-за хорошей линейности и низкого рабочего напряжения.

Электрическое поле создает в электрооптическом веществе анизотропию, порождающую двойное лучепреломление. Двойное лучепреломление изменяет поляризацию волны. А изменение поляризации широко используют для модуляции света. На рис. 15 показан принцип работы прибора на основе эффекта Поккельса. Под действием приложенного к кристаллу поля становятся различными коэффициенты преломления по трем осям кристалла (в оптических кристаллах такие состояния описываются эллипсоидом рефракции). Среди этих осей z — оптическая ось, а оси x и y образуют с плоскостью поляризации углы в 45° . Неполяризованный свет лазера приобретает такую поляризацию после прохождения входного поляризатора.

Линейно поляризованный свет можно представить в виде двух составляющих x и y , имеющих одинаковые фазы. Когда поле отсутствует, направление поляризации света после прохождения через кристалл сохраняется и анализатор, расположенный перпендикулярно входному поляризатору, не дает свету выйти из прибора. Если к кристаллу приложить электрическое поле, изменятся коэффициенты преломления по осям x и y , что приведет к различию скорости света вдоль этих осей, а это, в свою очередь, — к различию фаз проходящего света по составляющим x и y . Разность фаз будет нарастать по мере прохождения через кристалл. На выходе из кристалла результатом суммирования колебаний по составляющим будет эллиптически поляризованный свет. При этом только часть энергии выйдет из прибора через анализатор — это энергия колебаний, имеющих плоскость поляризации, параллельную заданной анализатором.

При изменении напряжения, приложенного к кристаллу, будет меняться форма эллипса поляризации света. Таким образом, появляется возможность модулировать амплитуду световых волн при помощи электрического напряжения. Если разность хода по составляющим x и y станет в точности равной половине длины волны, свет на выходе из кристалла станет линейно поляризованным в направлении, перпендикулярном поляризации при входе, и интенсивность (квадрат амплитуды) излучения станет максимальной. Напряжение, дающее этот эффект, называют *полуволновым*, и ясно, что в модуляторах удобнее использовать материалы с малым полуволновым напряжением.

Зависимость интенсивности излучения от напряжения, приложенного к кристаллу, нелинейна, но можно придать ей линейность, поместив между кристаллом и анализатором четвертьволновую пластинку.

Электрооптический эффект применяют не только для описанной выше модуляции света, но и для изготовления быстродействующих оптических затворов (время срабатывания порядка наносекунд), известных как *затворы Керра*, для изготовления оптических отклоняющих систем, в оптической памяти, в трехмерных модуляторах, в оптических бистабильных элементах.

Что такое акустооптический эффект?

Акустооптический эффект — это явления дифракции, преломления, отражения или рассеяния света на периодических неоднородностях среды (зонах с разным показателем преломления), вызванных упругими деформациями при прохождении ультразвука. Периодическое чередование неоднородностей среды «работает» как дифракционная решетка, изменяющая направление светового луча. Акустооптические эффекты бывают двух видов (рис. 16). При низкой частоте ультразвука и малой ширине фронта (длине взаимодействия) ультразвуковой волны возникает *дифракция Рамана — Ната*. А если частота ультразвука высока и длина взаимодействия велика, то происходит *дифракция Брэгга*. Конкретно, если длина ультразвуковой волны в среде Λ , длина взаимодействия L , длина световой волны λ , коэффициент преломления среды n и при этом $2\pi\lambda L/(n\Lambda^2) < 1$, то наблюдается дифракция Рамана — Ната. Возникает несколько дифракционных максимумов, причем дифракционный угол максимален, когда первоначальное направление светового луча параллельно плоскости ультразвуковой волны. В этом случае дифракционный угол θ_m для максимума порядка m равен $\arcsin(m\lambda/\Lambda)$. Кроме дифракции наблюдается доплеровское смещение частоты, равное $m\Omega$, где Ω — частота ультразвука.

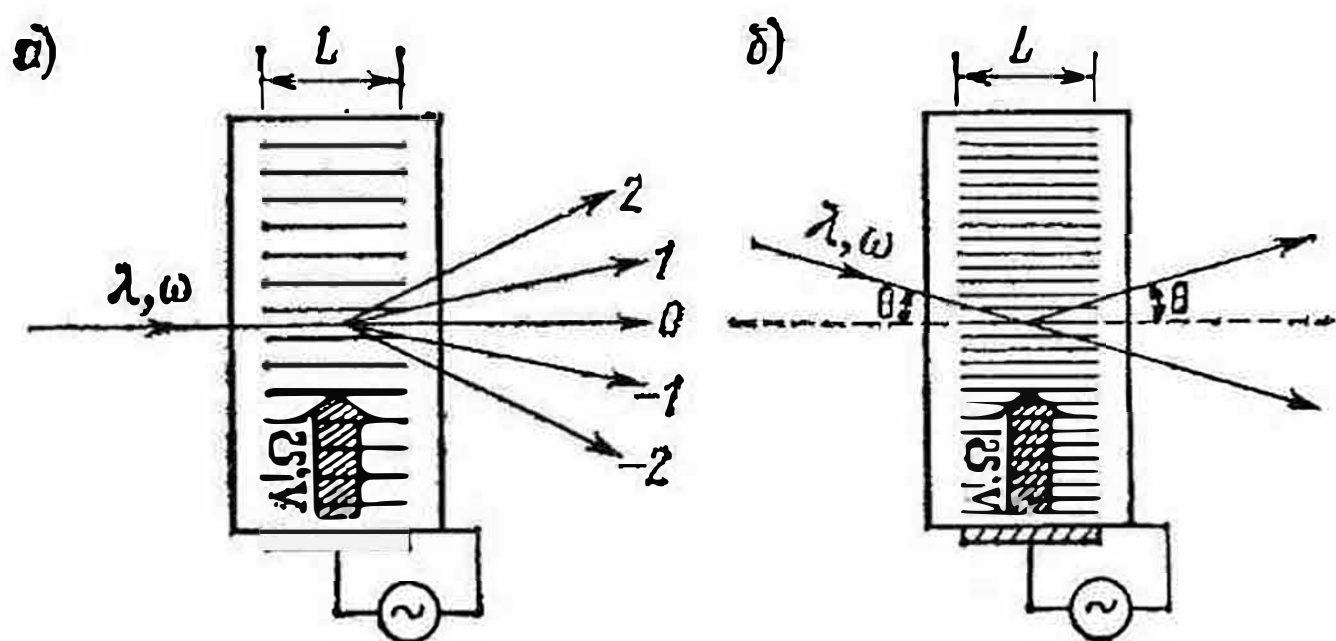


Рис. 16. Дифракция Рамана — Ната (а) и Брэгга (б) при акустооптическом эффекте

1, 2, 0, -1, -2 — порядок дифракции

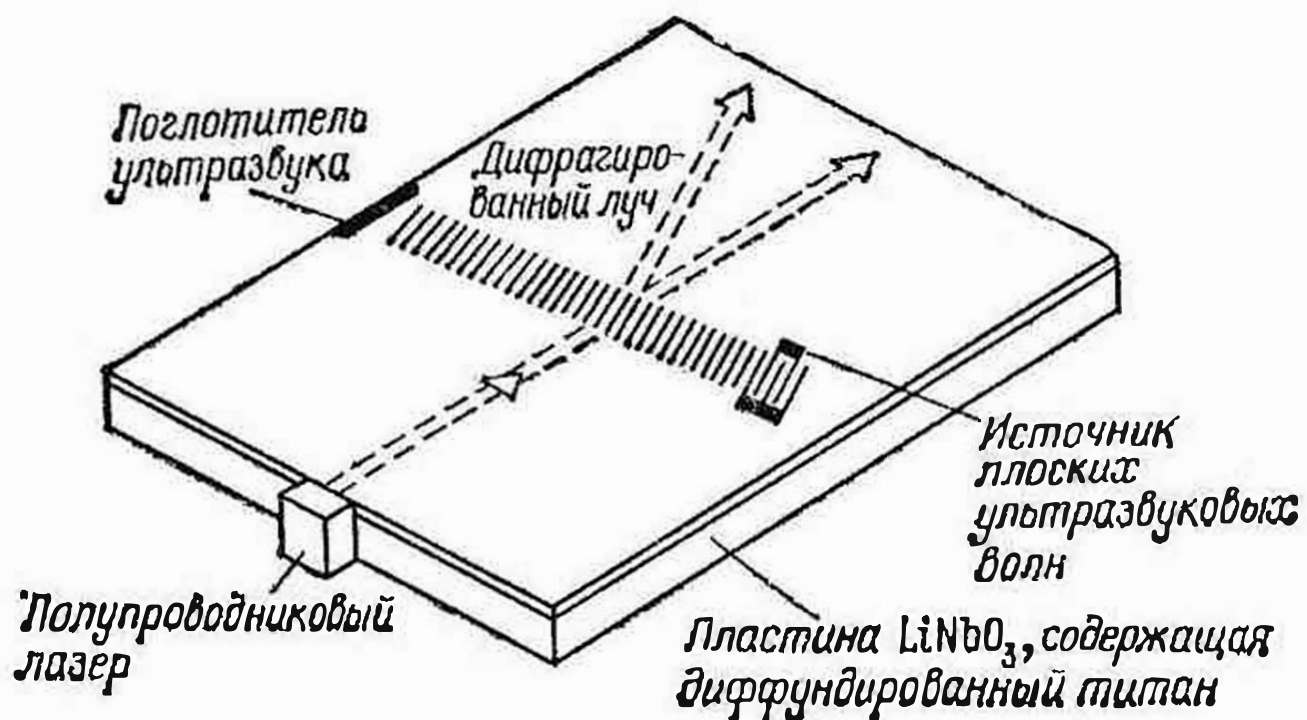


Рис. 17. Оптическая интегральная схема с модулятором на основе акустооптического эффекта

Если же соотношение параметров $2\pi\lambda L/(n\Lambda^2) \geq \geq 4\pi$, то это дифракция Брэгга. В этом случае отражается только луч света, составляющий характерный угол θ с фронтом ультразвуковой волны. Таким образом, свет может отклониться лишь на угол 2θ от первоначального направления. Этот угол — *угол Брэгга* — находится из соотношения $\sin \theta = \lambda/(2\Lambda)$. При дифракции Брэгга коэффициент отражения отклонившегося луча близок к 100 %, что существенно для практического использования. В эксперименте ($L = 1$ см, видимая область) при частотах ультразвука выше 20 МГц в жидкостях и выше 100 МГц в твердых телах наблюдается почти полная брэгговская дифракция.

Требования к акустооптическим материалам таковы: рассеяние и поглощение света должны быть незначительными, постоянная фотоупругости и коэффициент преломления велики, поглощение звука и скорость звука малы. Среди жидкостей по этим параметрам наиболее подходит вода, которую и используют в большинстве экспериментов. Среди твердых тел наиболее удобны для практического использования халькогенидные и теллурические стекла и такие кристаллы, как PbMoO_4 , TeO_2 , LiNbO_3 , GaP . А в источниках ультразвука соединения типа PZT — $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$, а также ZnO , LiNbO_3 работают как излучатели.

Типичный пример использования акустооптического эффекта — преобразование частоты оптического

излучения, т. е. *акустооптическая модуляция света*. Если ультразвуковые колебания — импульсы, то наличие или отсутствие дифракции будет соответствовать наличию или отсутствию ультразвукового импульса, а это и есть возможность *цифровой модуляции сигнала*. Так как интенсивность дифрагированного света пропорциональна силе ультразвука, то, изменяя амплитуду последнего, можно управлять интенсивностью света. Это *аналоговая амплитудная модуляция*. Кроме того, при изменении частоты ультразвука изменяется доплеровское смещение частоты оптических колебаний, что есть *частотная модуляция*. На рис. 17 показан пример размещения акустооптического прибора внутри оптической интегральной схемы. Здесь поверхностной ультразвуковой волной модулируется свет в оптическом волноводе.

Что такое магнитооптический эффект?

Магнитооптический эффект — это изменение оптических свойств вещества в зависимости от его намагниченности или от силы приложенного к нему магнитного поля. Под оптическими свойствами следует понимать отражение, пропускание, поляризацию света и другие явления. Среди магнитооптических эффектов с изменением отражения или пропускания света различают *эффект Фарадея* и *эффект Керра*. Вещества, в которых наблюдается магнитооптический эффект, называют *магнитооптическими материалами*. Среди них ферримангнетики, имеющие в структуре магнитные атомы, — $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG), CdFe_2O_4 , а также ортоферриты, образующие цилиндрические магнитные домены, — MnBi , EuO , CdTbFe .

В магнитооптических материалах, помещенных в магнитное поле, возникает циклотронное левостороннее (если смотреть по направлению вектора поля) вращение электронов в плоскости, перпендикулярной вектору поля. Если линейно поляризованный свет, проходящий через магнитооптическое вещество, представить в виде суммы левосторонней и правосторонней круговой поляризации, то из-за циклотронного вращения электронов коэффициенты преломления для

каждой из них будут различными. Поэтому на выходе из магнитооптического вещества может возникнуть разность фаз между составляющими, что приводит к повороту плоскости поляризации. Угол поворота θ пропорционален напряженности магнитного поля H и пути l , пройденному светом в веществе. Зависимость имеет вид $\theta = V H l$. Коэффициент пропорциональности V называют *постоянной Верде*. В приборах на основе магнитооптического эффекта используют материалы с высокими значениями постоянной Верде.

На рис. 18 показано прохождение света через прозрачный магнитооптический материал. Если поляризатор на входе и анализатор на выходе показанного прибора расположены взаимно перпендикулярно, то проходящий свет можно модулировать, изменяя *угол Фарадея*, зависящий от напряженности магнитного поля. Однако так как быстрое изменение магнитного поля затруднено, то для модуляции света больше подходит электрооптический и акустооптический эффект. А эффект Фарадея применяют для создания оптических изоляторов. В этих приборах магнитооптический кристалл поворачивает плоскость поляризации точно на 45° за один проход в ту или другую сторону. Если в кристалл попадает какой-либо

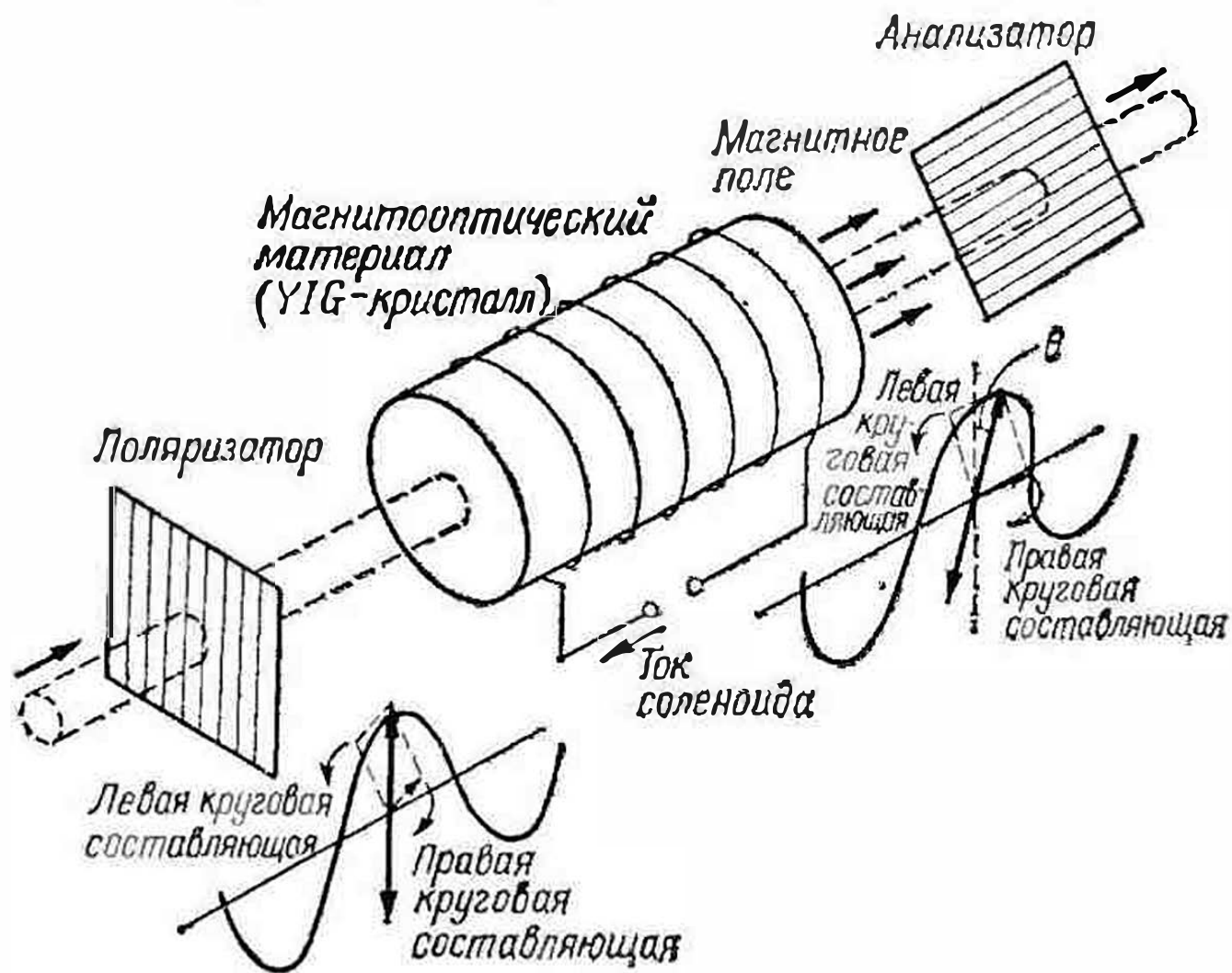


Рис. 18. Оптический модулятор на основе эффекта Фарадея

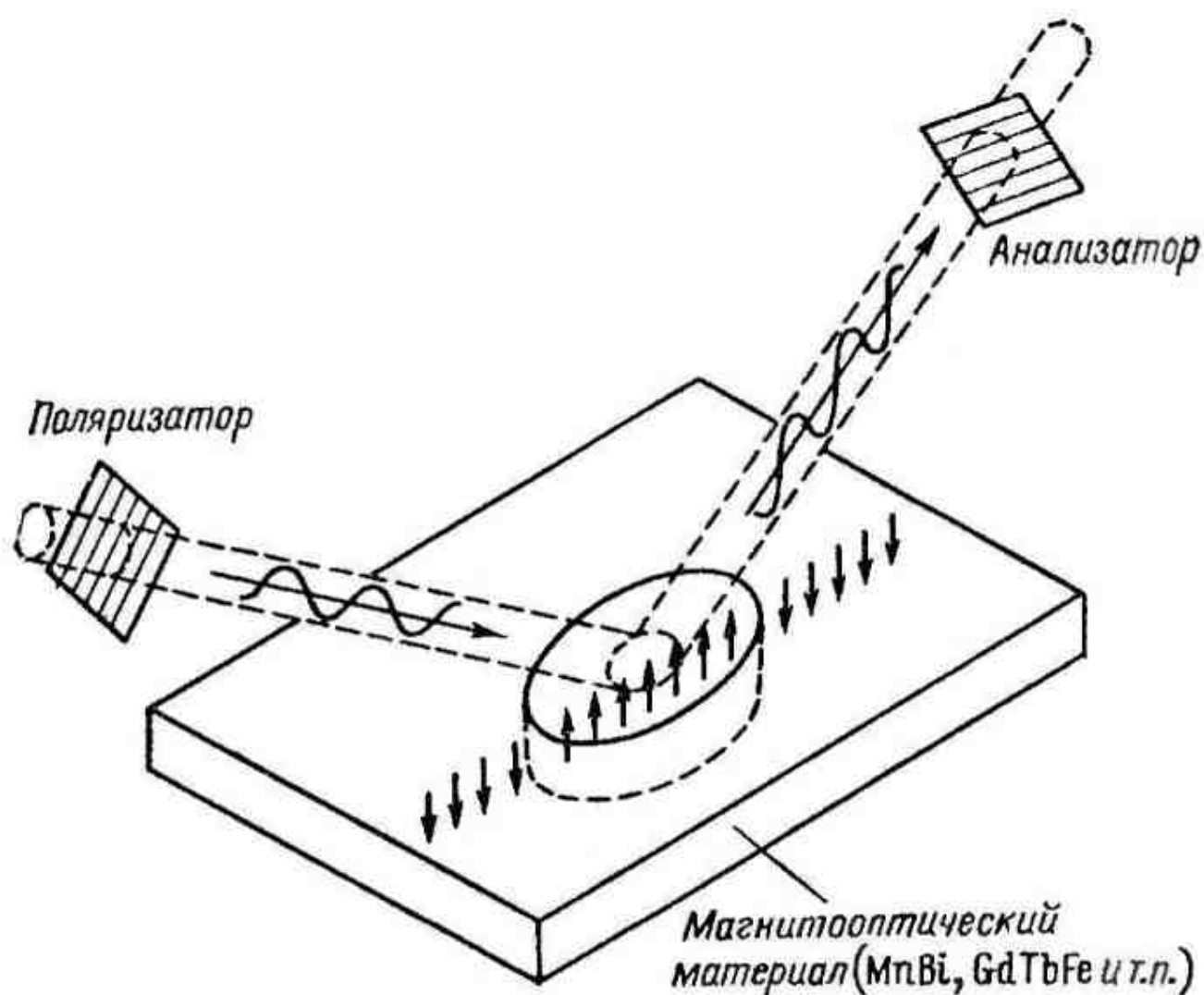


Рис. 19. Считывание оптической памяти с использованием эффекта Керра

отраженный свет, то во время обратного хода через кристалл плоскость поляризации поворачивается ровно на 90° и свет не может пройти входной поляризатор. Оптические изоляторы ставят там, где есть паразитное отражение света, например в волноводах оптической связи, чтобы исключить попадание в источник отраженного света.

Магнитооптический эффект Керра с успехом применяют для считывания информации из памяти на оптических дисках, позволяющих перезапись, и памяти на цилиндрических магнитных доменах, имеющей высокую плотность (рис. 19). Намагниченность тонких пленок таких материалов, как MnBi , ортоферриты, CdTbFe , перпендикулярна поверхности. Если малый участок пленки, помещенный в магнитное поле, нагреть светом лазера до температуры выше точки Кюри, то этот участок намагничивается (*запись в точке Кюри*). Когда пленку с такой записью облучают линейно поляризованным светом, различие углов поляризации света, отраженного от соседних участков с противоположной намагниченностью, позволяет считывать записанную информацию, пропуская отраженный свет через анализатор. Память на цилиндриче-

ских доменах уже используют в отдельных логических элементах и блоках памяти большой емкости в ЭВМ. Оптические диски с записью в точке Кюри привлекают внимание возможностью стирания и перезаписи информации.

Что такое нелинейный оптический эффект?

Когда свет (электромагнитные волны) входит в какое-либо вещество, электроны атомов и молекул вещества сдвигаются полем волн, образуя диполи, колеблющиеся в такт колебаниям этого поля. В свою очередь, колебания диполей создают электромагнитные колебания с такой же частотой, длиной волны и скоростью распространения, как и у возбуждающего излучения. Коэффициентом пропорциональности между поляризуемостью вещества и напряженностью электрического поля служит показатель преломления, зависящий от вещества. Но появились лазеры — источники когерентного излучения с высокой интенсивностью, т. е. с большой амплитудой колебаний, а в результате — нелинейные отклики на облучение, искажающие линейные зависимости в наблюдаемых явлениях. Такие случаи называли *нелинейными оптическими эффектами*. Помимо поляризации вещества, пропорциональной силе приложенного поля, возникла *нелинейная поляризация второго порядка*, пропорциональная квадрату силы поля и вызывающая такие явления, как удвоение частоты излучения, сложение частот двух излучений, параметрическое излучение и др. Кроме поляризации второго порядка может возникнуть *нелинейная поляризация третьего порядка*, вызывающая утроение частоты, искажение коэффициента преломления, *вынужденное рамановское рассеяние* и другие явления.

Генерация второй гармоники — получение излучения с удвоенной частотой (рис. 20, а) при облучении нелинейного оптического кристалла лазером. Например, для практических нужд излучение неодимового лазера в ближней инфракрасной области (1,06 мкм) преобразуют в видимое излучение (0,53 мкм). В кристалле, не имеющем зеркальной симметрии, поляризация

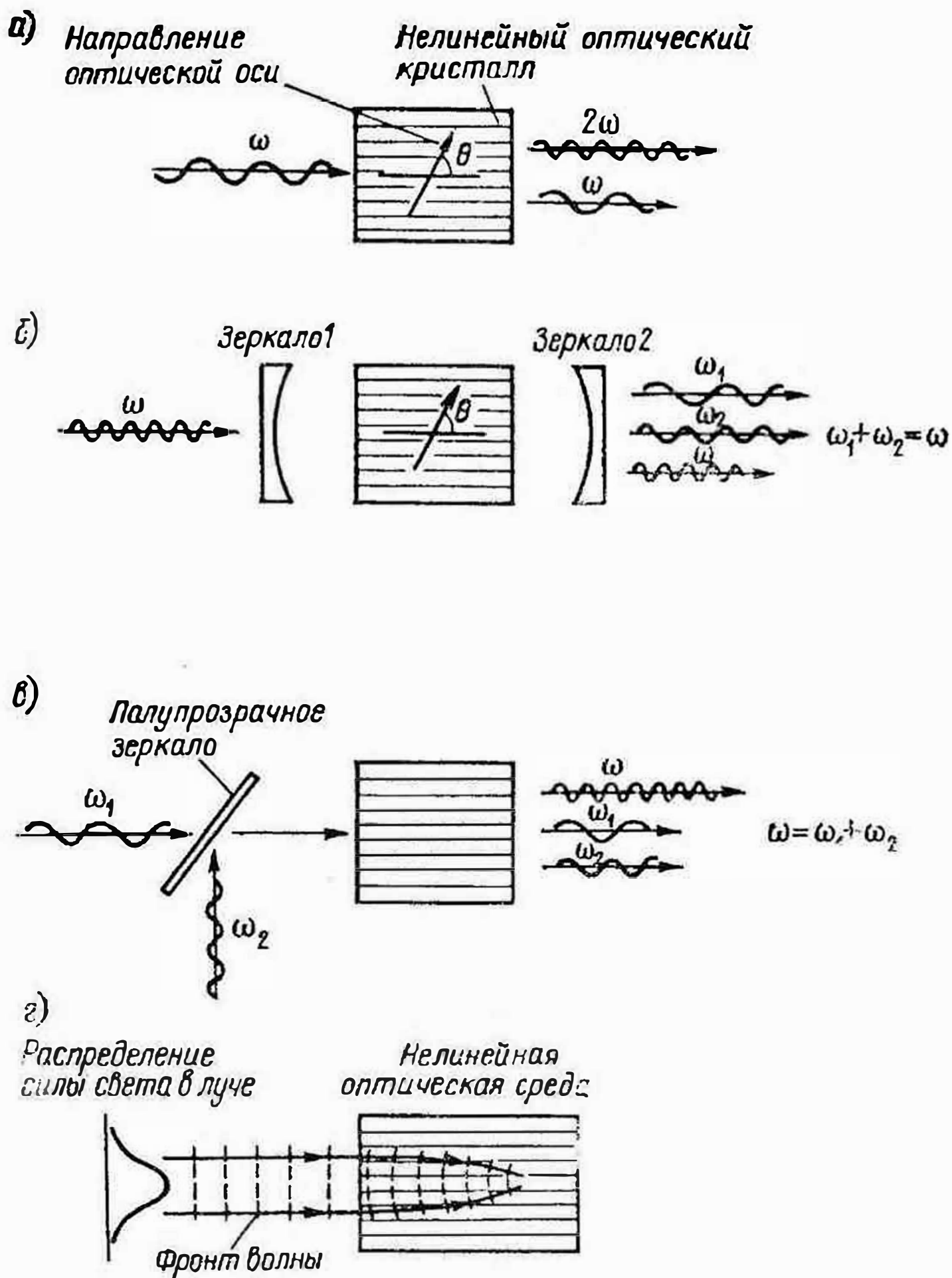


Рис. 20. Явления нелинейной оптики: а — генерация второй гармоники; б — параметрическая генерация; в — сложение света (многофотонное поглощение); г — возникновение нелинейности показателя преломления (автофокусировка)

Зеркало 1 прозрачно для колебаний с частотой ω и отражает колебания с частотой ω_1, ω_2 ; зеркало 2 прозрачно для колебаний с частотой ω и полупрозрачно для колебаний с частотой ω_1, ω_2

зависит от знака вектора поля. Если к кристаллу приложить синусоидальное поле (свет), то возникнет частично нелинейная поляризация. В результате этого в излучении диполей помимо основной частоты на-

блюдаются колебания с удвоенной частотой. Это и есть гармоники второго порядка. Для получения хорошего коэффициента удвоения необходимо согласование фаз и совпадение фазовых скоростей в излучении основной частоты и высших гармоник, чего можно добиться, используя кристаллы с двойным лучепреломлением. Аналогичным способом осуществляют *генерацию третьей гармоники*.

Если нелинейный оптический кристалл поместить в оптический резонатор и производить накачку лазерным излучением с частотой ω , то на выходе резонатора будет излучение с двумя частотами ω_1, ω_2 , удовлетворяющими соотношению $\omega = \omega_1 + \omega_2$. Это явление *параметрического излучения* (рис. 20, б). *Оптическое смещение* — это явление с эффектом, обратным предыдущему. Здесь при облучении с двумя частотами ω_1, ω_2 на выходе из кристалла получится излучение с частотой $\omega = \omega_1 + \omega_2$ (рис. 20, в). Это происходит благодаря *многофотонному поглощению*, когда вместо нескольких поглощенных квантов испускается один с более высокой энергией. Показатель преломления вещества обычно не зависит от амплитуды световых волн, но большие амплитуды вызывают его изменение (рис. 20, г). В результате световой луч в веществе начинает «сходиться». Это явление нелинейной оптики называют *автофокусировкой*.

Что такое эффект Рамана?

Эффектом Рамана (рис. 21) называют рассеяние монохроматического излучения в веществе, при котором в спектре рассеянного света появляются новые, характерные для данного вещества линии, отличающиеся от спектральной линии источника. Это явление впервые в 1928 г. обнаружил индийский физик Раман. Если направлять на вещество сильный когерентный свет, например свет лазера, то наблюдается сильное рамановское рассеяние с выраженной направленностью. Это явление, названное *вынужденным рамановским рассеянием*, впервые обнаружил Вудбьюри (Woodbury) в 1962 г. Явление, открытое Раманом, в отличие от вынужденного рамановского рассеяния

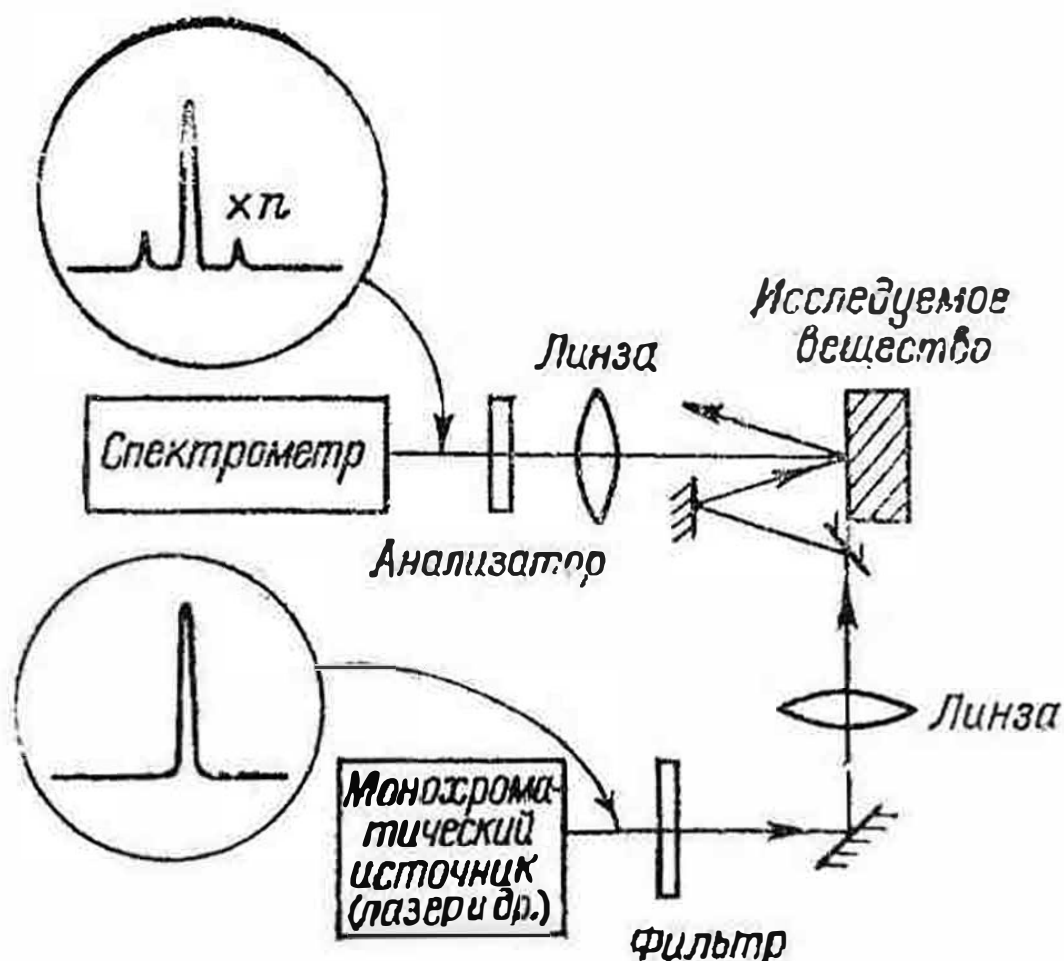


Рис. 21. Система для наблюдения эффекта Рамана

стали называть *естественным рамановским рассеянием*.

Эффект Рамана отражает обмен энергией между светом и веществом. Фотон с энергией ω_0 либо отдает часть энергии ω_r веществу, либо на столько же повышает свою энергию за счет вещества. Энергия рассеянных фотонов становится равной $\omega_0 - \omega_r$ либо $\omega_0 + \omega_r$. Первый случай называют *стоксовым*, а второй — *антистоксовым* излучением. Обычно интенсивность стоксового излучения выше, чем антистоксового. Энергия света в твердом теле изменяется вследствие взаимодействия кванта с фононом или плазмонам (рис. 22). При прохождении света через газ или жидкость рамановское рассеяние есть результат взаимодействия квантов с колеблющимися молекулами.

Эффект Рамана — сложное явление, зависящее от различных причин, стал эффективным методом получения различной информации о веществе. В последнее время его используют для оценки структуры полупроводников. Например, наблюдая рамановское рассеяние в кристалле GaAs, имеющем структуру цинковой обманки, в соответствии с правилами отбора видим, что спектры рассеяния от плоскости (100) и от других плоскостей имеют различную поляриза-

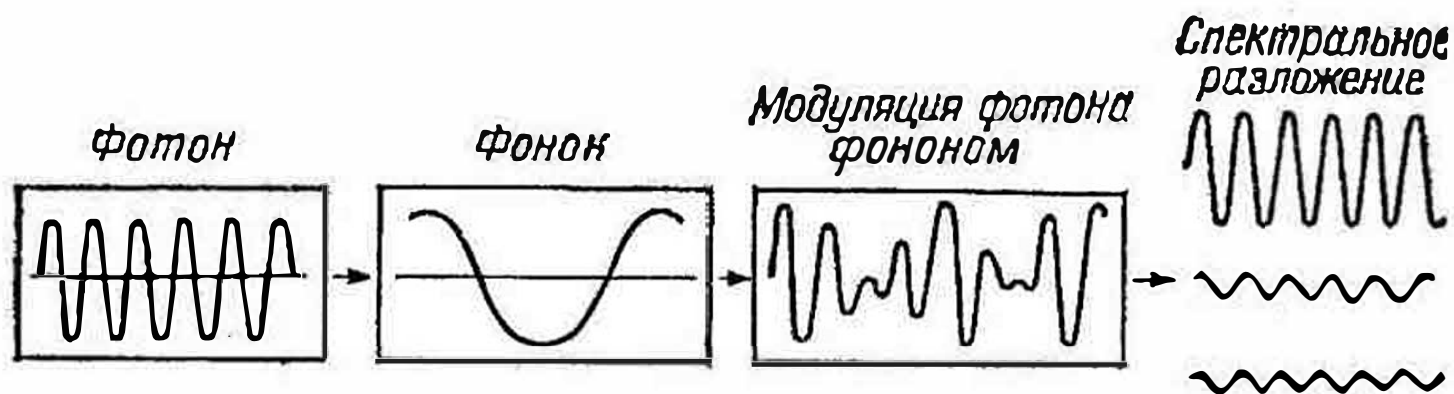


Рис. 22. Эффект Рамана (рассеяние фотона на фононе)

цию из-за взаимодействия света с LO -фононами. Используя это свойство, можно определять ориентацию кристаллической решетки тонких пленок, выращенных эпитаксиально. При наблюдении рамановского рассеяния в смешанных кристаллах, например в кристаллах $Al_xGa_{1-x}As$, можно, разделив составляющие рассеяния с фононами, характерными для $AlAs$ и для $GaAs$, определить постоянную x . Кроме этого, эффект Рамана позволяет оценить механические напряжения в поверхностном слое полупроводников и концентрацию носителей в них.

Вынужденное рамановское рассеяние использовали для создания рамановского лазера. Если мощным лазером с энергией квантов ω_0 облучать такие вещества, как, например, водород, кремний или бензол, и вызывать в них вынужденное рамановское рассеяние, то в спектре рассеяния присутствует стоксова состав-

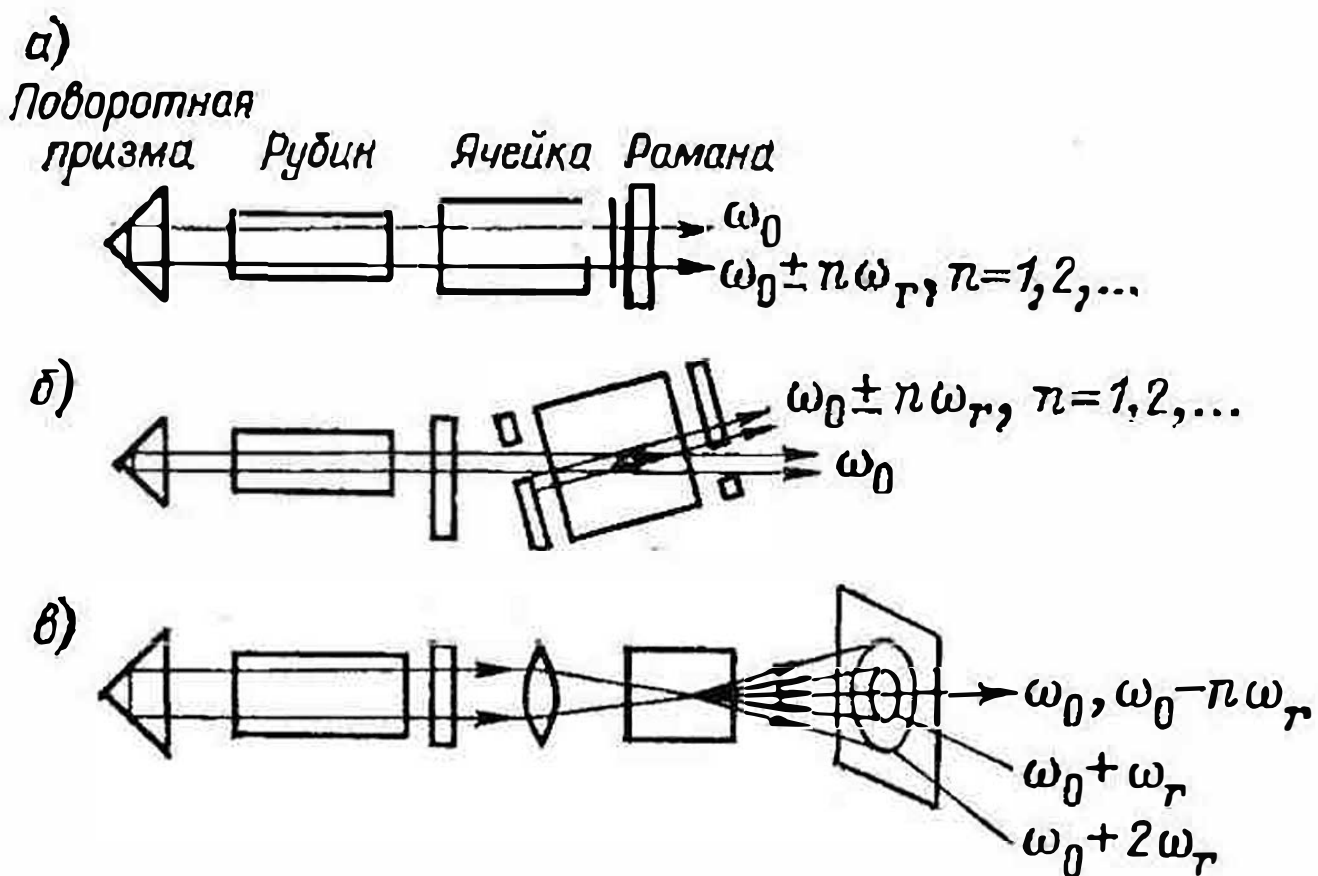


Рис. 23. Различные виды рамановских лазеров

ляющая $\omega_0 + \omega_r$, связанная с тепловой энергией вещества ω_r , а вместе с ней — высшие стоксовы ($\omega_0 - n\omega_r$) и антистоксовы ($\omega_0 + n\omega_r$) гармоники как результат нелинейности взаимодействия света с веществом. Все они когерентны, монохроматичны и излучаются в направлении, составляющем определенный угол с лазерным лучом (рис. 23, а, б, в). Для такого лазера не требуется создавать состояние с отрицательной температурой. Описанное явление применяют для преобразования частоты лазерного излучения.

Что такое хромизм?

Хромизмом называют обратимые изменения цвета вещества под действием электрического поля, при облучении светом или пучком электронов. Если цвет изменяется под действием ультрафиолетовых лучей и становится прежним под действием видимого света — это *фотохромизм*. Если цвет изменяется при облучении пучком электронов — это *катодный хромизм*, а под действием электрического поля — *электрохромизм*.

Фотохромные материалы — это, например, хлориды щелочей (КСl и др.), фториды типа CaF_2 с присадками редкоземельных элементов или такие вещества, как SrTiO_3 , CaTiO_3 , TiO_2 , с присадками металлов переходных групп, а также некоторые органические вещества. *Электрохромные материалы* среди неорганики — хлориды щелочей, оксиды переходных металлов типа WO_3 и MoO_3 , а среди органики — биологические материалы и их производные, а также имидазол, дифталоцианины редкоземельных элементов.

Рассмотрим для примера механизм фотохромного изменения окраски в кристалле $\text{CaF}_2:\text{Sm}, \text{Eu}$. Как показано на рис. 24, атомы Sm и Eu имеют уровни возбуждения, различные по энергии ионизации. Когда кристалл находится в состоянии теплового равновесия, уровни Sm^{2+} и Eu^{3+} поглощают свет и в белом свете образец приобретает зеленую окраску. Если кристалл подвергнуть ультрафиолетовому облучению, имеющему энергию $\hbar\omega_1$, электроны с уровней

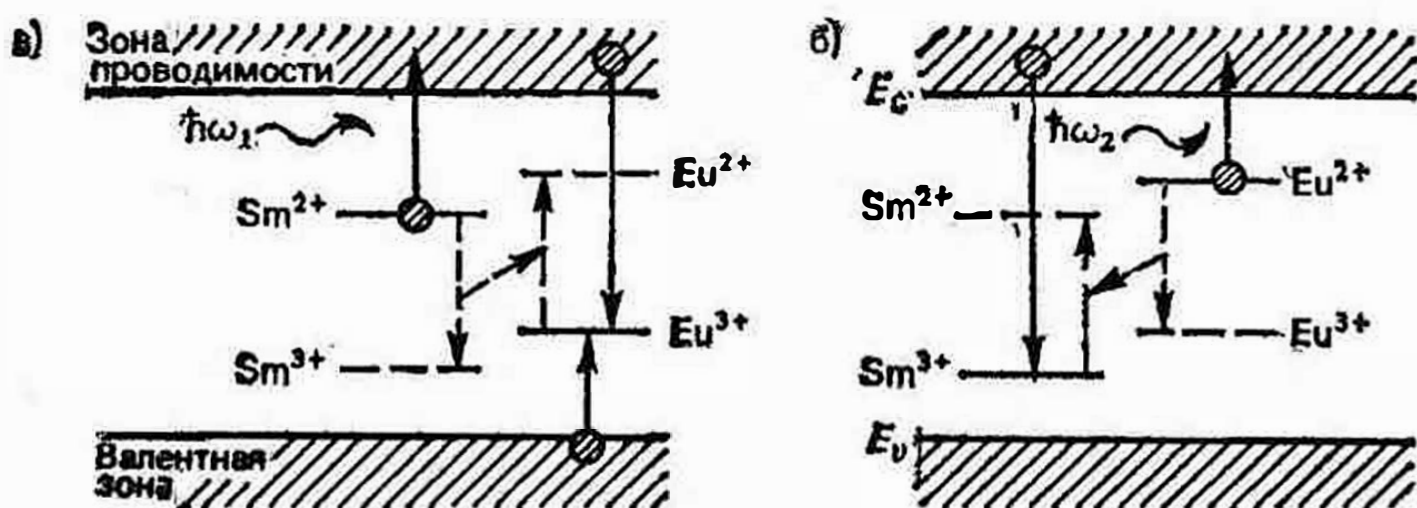


Рис. 24. Фотохромный эффект в кристалле $\text{CaF}_2:\text{Sm}, \text{Eu}$: а — облучение ультрафиолетом; б — облучение видимым светом

Sm^{2+} переходят в зону проводимости и ион Sm^{2+} превращается в Sm^{3+} . Перешедший в зону проводимости электрон посредством тепловой релаксации опускается до уровня Eu^{3+} , и получается ион Eu^{2+} . В результате пропадает окраска кристалла — он становится бесцветным. Но если теперь осветить этот же кристалл видимым светом с энергией $\hbar\omega_2$, соответствующей разности между энергиями уровня Eu^{2+} и зоны проводимости, переход электронов произойдет в обратном направлении и кристалл снова приобретет зеленую окраску.

Применение электрохромизма показано на рис. 25 на примере ячейки с рабочим веществом WO_3 . Если приложить минус поля к электроду подложки, ячейка приобретет внутреннюю окраску с интенсивностью, пропорциональной прошедшему заряду. При пропускании тока в обратном направлении окраска пропадает. Механизм изменения окраски следующий. Под действием электрического поля разлагается материал



Рис. 25. Элемент электрохромной матрицы на основе вещества WO_3



Рис. 26. Элемент электрохромной матрицы на основе биологического вещества с бромидом калия

катода. Электроны инжектируются полем в слой WO_3 , примыкающий к электролиту, и восстанавливают ионы H^+ , образуя на этом слое соединение H_xWO_3 . На рис. 26 показана электрохромная ячейка на основе биологического вещества. Изменение цвета происходит из-за резонанса радикалов органических соединений (неспаренных электронов), возникающих в результате обратимых электрохимических реакций.

Явление фотохромизма используют для изготовления солнечных очков, меняющих густоту окраски в зависимости от силы солнечного света, при лазерной записи в оптическую память, в указателях на фотохромных пленках и в цветных дисплеях.

Что такое фотопроводимость?

Увеличение электропроводности полупроводника или изолятора под действием света (рис. 27) называют *фотопроводимостью* или *внутренним фотоэффектом*. Причина увеличения электропроводности — возбуждение светом носителей в валентной зоне и зоне проводимости. По механизму возбуждения носителей различают *собственную фотопроводимость* и *несобственную фотопроводимость*.

Механизм собственной фотопроводимости показан на рис. 28, а. Если энергия квантов света выше, чем

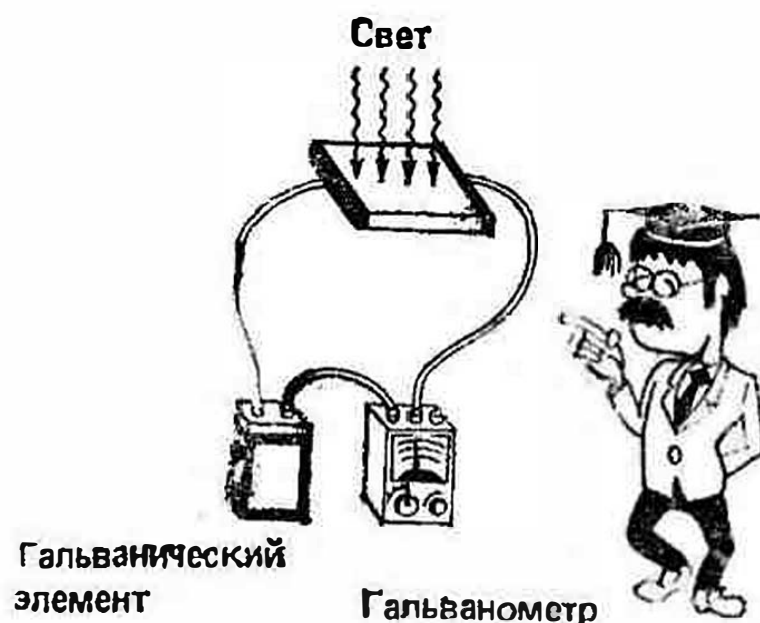


Рис. 27. Наблюдение фотопроводимости

ширина запрещенной зоны, то электроны из валентной зоны переходят в зону проводимости. Появившиеся в результате этого электроны и дырки увеличивают концентрацию носителей, а значит, и электропроводность. Фотопроводимость проявляется только под действием излучения с энергией, превышающей ширину запрещенной зоны вещества. При несобственной фотопроводимости (рис. 28, б) электроны и дырки, захваченные локальными уровнями, например примесными уровнями в запрещенной зоне, под действием света уходят в валентную зону и зону проводимости соответственно. Когда все примесные уровни отдадут свои носители, прекратится увеличение электропроводности. Явление несобственной фотопроводимости позволяет делать приборы, чувствительные в области инфракрасного излучения, имеющего низкую энергию, а также устанавливать необходимую спектральную чувствительность, подбирая примеси.

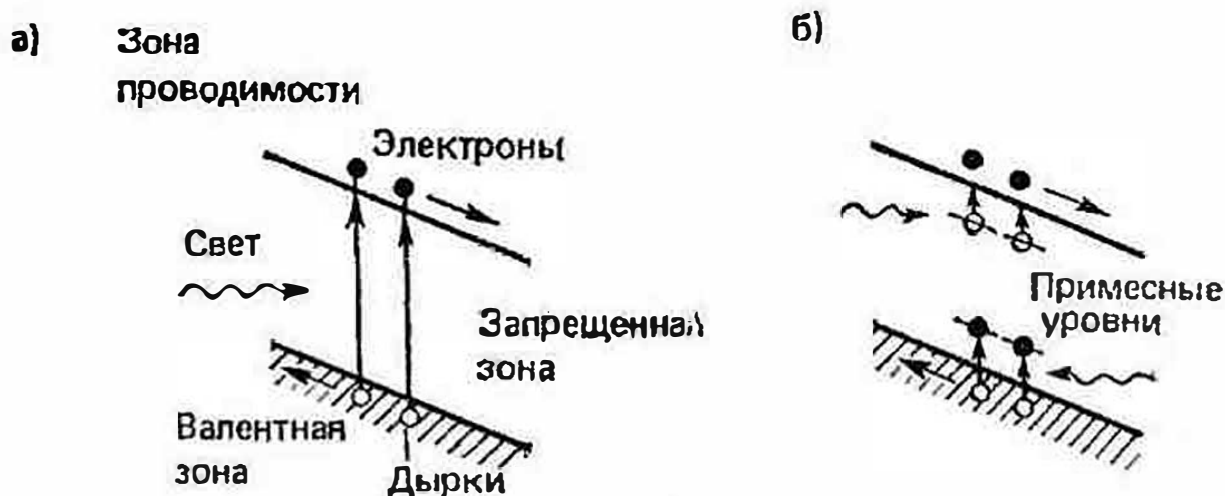


Рис. 28. Механизм фотопроводимости

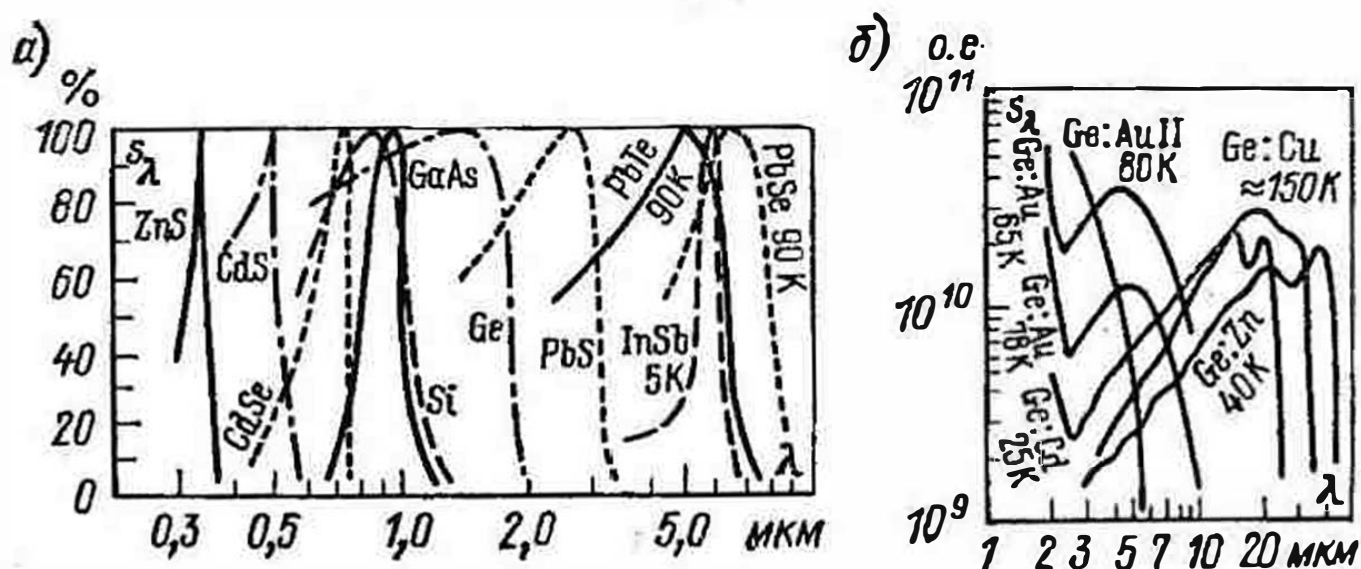


Рис. 29. Спектральная чувствительность фотопроводящих материалов

Фотопроводимость зависит от заряда, времени жизни, подвижности и концентрации носителей, созданных светом за единицу времени. Для высокой фотопроводимости вещества необходима высокая подвижность и большое время жизни носителей. Для сопоставления чувствительности фотопроводящих материалов используют такой параметр, как коэффициент усиления. Так как он зависит от количества электронов, попадающих на электроды, то позволяет оценить время жизни созданных светом носителей по времени их пролета между электродами.

Эффект фотопроводимости отсутствует в металлах, не имеющих запрещенной зоны, но принципиально возможен во всех остальных веществах. На рис. 29, а показана спектральная чувствительность полупроводников при собственной фотопроводимости, а на рис. 29, б — спектральная чувствительность германия при несобственной фотопроводимости в зависимости от присадок.

Прибор, используемый для регистрации излучения на основе фотопроводимости, называют *фоторезистором*. Быстродействие фоторезистора ниже, чем у других светочувствительных приборов, и зависит от области спектра. Для изготовления фоторезисторов используют такие материалы, как ZnO, ZnS в ультрафиолетовой части спектра (300—400 нм), ZnSe, CdS, CdSe, Cd(S, Se) в видимой области (400—750 нм), PbS, PbSe, PbTe, Ge(Au) в инфракрасной области (750—6000 нм). Среди них самое чувствительное в видимой области соединение CdS, а в инфракрасной области — PbS.

Что такое фотоэлектродвижущая сила?

Фотоэлектродвижущая сила (фото-ЭДС) — это разность потенциалов, возникающая в результате появления новых носителей в полупроводнике под действием света (рис. 30). Среди механизмов возникновения различают *фотодиффузионный*, *фотоэлектромагнитный* и *барьерный фотовольтаический эффект*.

Фотодиффузионный эффект — это возникновение разности потенциалов между освещенной и неосвещенной поверхностью. Свет порождает носители только вблизи поверхности полупроводника, а затем они диффундируют в сторону неосвещенной поверхности, где концентрация носителей мала. Если подвижность электронов и дырок различна, в процессе диффузии изменяется их концентрация в разных точках полупроводника, что и приводит к возникновению ЭДС. Как правило, такая ЭДС очень мала.

Фотоэлектромагнитный эффект наблюдается при освещении полупроводника, помещенного в магнитное поле. В этом случае изменение концентрации рожденных светом носителей происходит под действием магнитного поля (*эффект Холла*) и, если световой поток

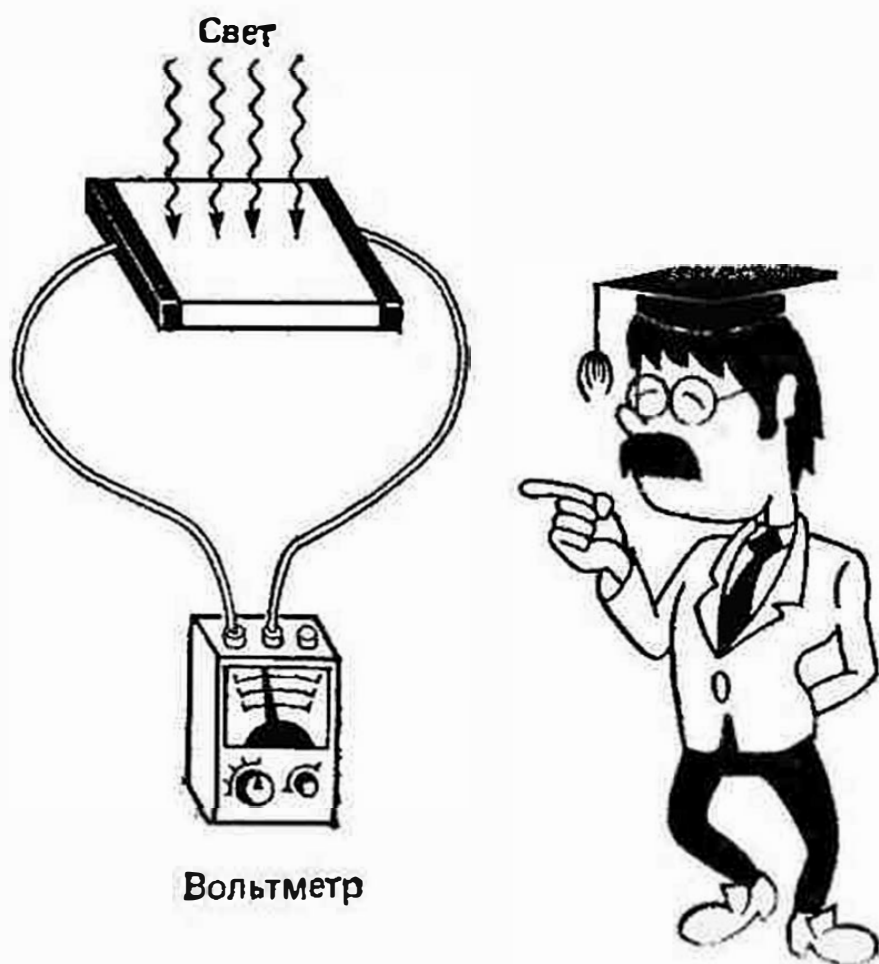


Рис. 30. Наблюдение барьерного фотовольтаического эффекта

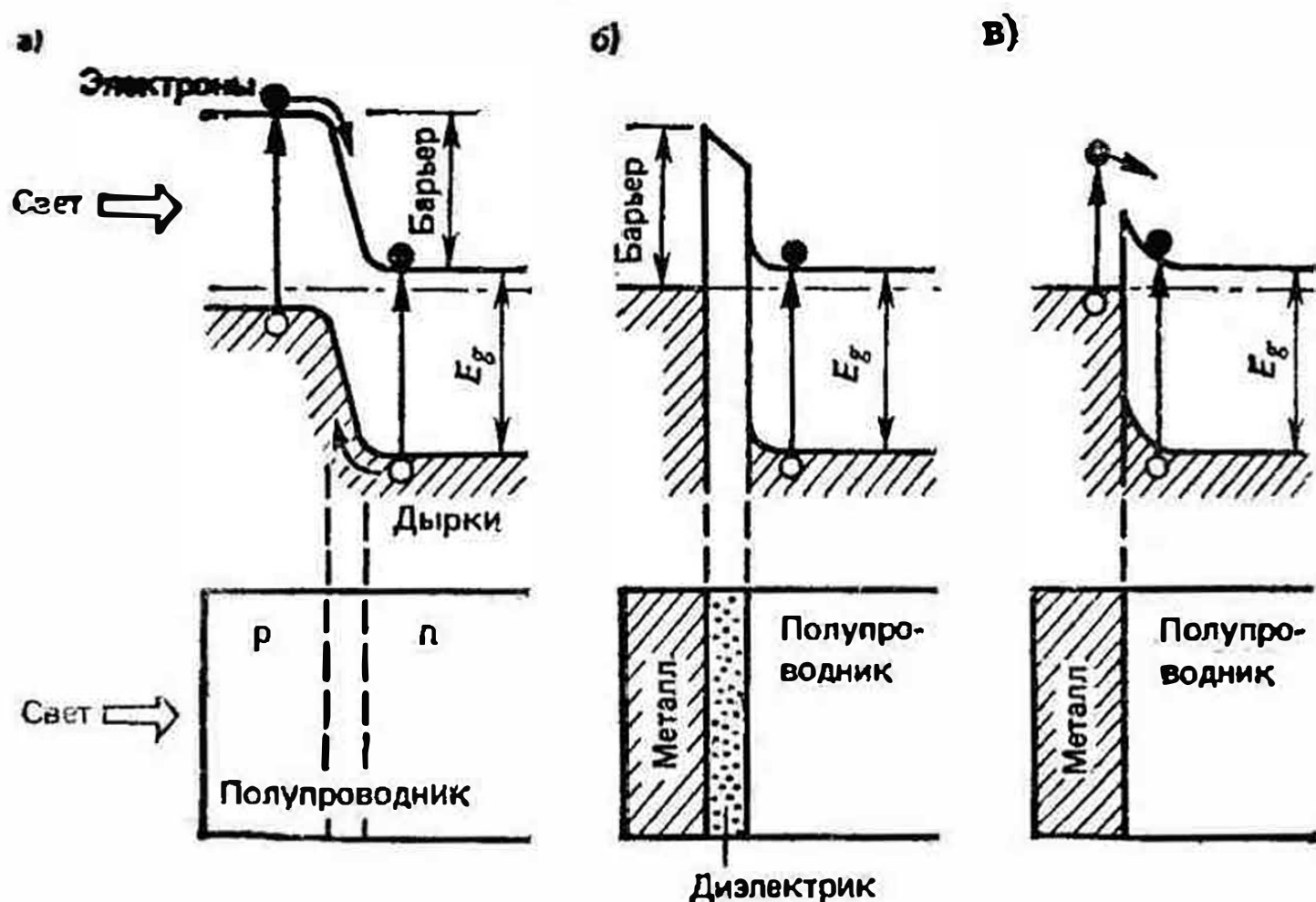


Рис. 31. Механизм барьерного фотоэффекта

и вектор магнитного поля перпендикулярны друг другу, на торцах образца появляется ЭДС.

Барьерный фотовольтаический эффект — это возникновение ЭДС при разделении носителей на неоднородностях легирования или на контактах полупроводников. При попадании света на $p-n$ -переход в результате поглощения квантов p -областью и n -областью перехода возникают электронно-дырочные пары (рис. 31, а). Вблизи контакта электроны **донора** перемещаются к **акцептору**, в результате чего донор и акцептор приобретают соответственно положительный и отрицательный заряд и образуют **двойной электрический слой**. Являясь потенциальным барьером, он разделяет электронно-дырочные пары и собирает электроны и дырки в n -область и p -область перехода соответственно. При больших концентрациях электронов и дырок устанавливается равновесие и исчезает потенциальный барьер. Напряжение, возникающее в этом состоянии на $p-n$ -переходе, называют **напряжением отпираия**. На рис. 31, б показаны энергетические зоны структуры металл — диэлектрик — полупроводник (МДП). Здесь широкая запрещенная зона диэлектрика может разделять электроны и дырки подобно потенциальному барьеру. В контакте металла с полупроводником из-за различия

сродства к электрону также возникает потенциальный барьер (рис. 31, в). (Сродство к электрону — это энергия, необходимая для поднятия электрона со дна зоны проводимости до уровня вакуума.) Зоны вблизи контакта искривляются из-за образования там поверхностного заряда.

На основе барьерного фотовольтаического эффекта и других, описанных выше явлений работают *фотодатчики* и приборы прямого преобразования световой энергии в электрическую. Так как в основе фотовольтаического эффекта лежит поглощение света, то для изготовления приборов требуются материалы с узкой запрещенной зоной. Однако если ширина запрещенной зоны слишком мала, то КПД приборов снижается, так как электроны, получившие большую энергию, переходят с высоких уровней зоны проводимости на более низкие, отдавая часть энергии другим электронам и решетке. Эта часть энергии впоследствии переходит в тепловую.

Что такое пироэлектрический эффект?

Пироэлектрический эффект — это возникновение электрического заряда на поверхности кристалла при нагреве или охлаждении (рис. 32). Обычно кристаллы разделяют на 32 группы по видам их симметрии. Среди них 11 групп кристаллов имеют центры симметрии, а остальные группы центра

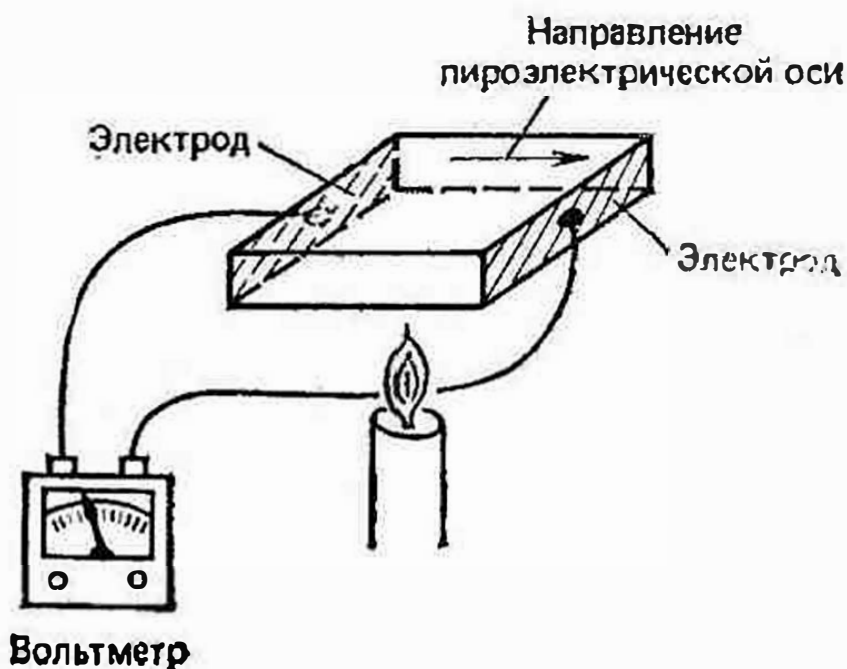


Рис. 32. Наблюдение пироэлектрического эффекта

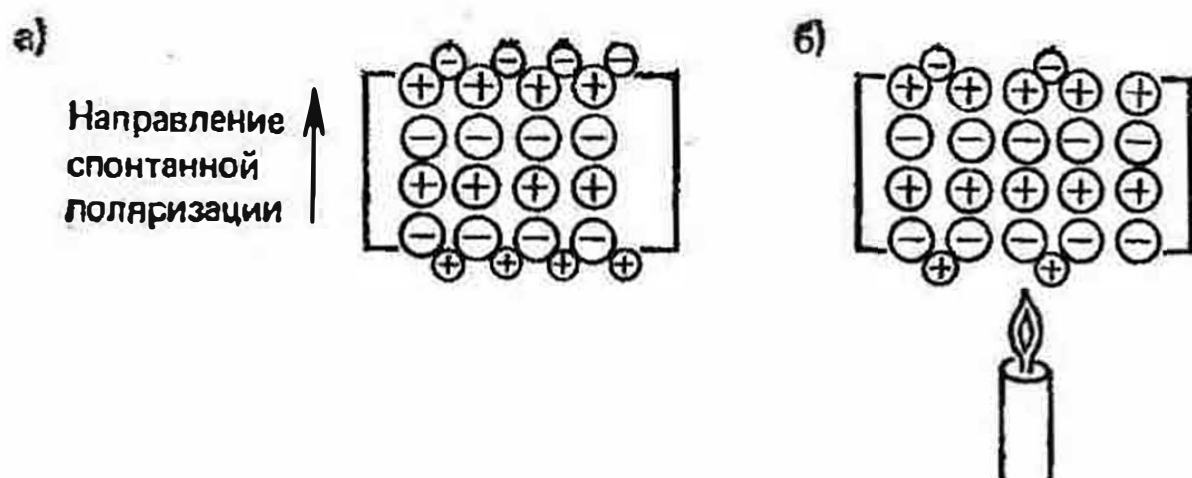


Рис. 33. Механизм пьезоэлектрического эффекта: *а* — установившееся состояние; *б* — возникновение поверхностного заряда при нагреве

симметрии не имеют. В последних, обладающих более выраженной анизотропией, может возникать *пьезоэлектрический эффект* — поляризация под действием механических напряжений. В свою очередь, 10 групп из кристаллов с пьезоэлектрическими свойствами могут поляризоваться спонтанно. Из рис. 33 видно, что если это диэлектрики, то к зарядам на поверхности «прилипают» ионы из воздуха, а если полупроводники, то поверхностный заряд нейтрализуется подвижными носителями и поляризация обычно не обнаруживается. Но если повысить температуру кристалла, молекулы десорбируют с его поверхности и поляризация кристалла проявляется в поверхностном заряде. Процесс появления поверхностного заряда можно наблюдать.

Величина, характеризующая пьезоэлектрический эффект в веществах, называется *пьезоэлектрической константой*. Она описывается выражением $(\partial D / \partial \theta)_{E=0}$, где D — электрическая индукция, а θ — температура. Для примера приведем значения констант пьезоэлектрических веществ: титанат бария BaTiO_3 — $2 \cdot 10^{-4}$, моногидратированный сульфат лития $\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ — $8 \cdot 10^{-5}$ и ниобат лития LiNbO_3 — $4 \cdot 10^{-9}$ Кл/(м²·К). Обычно пьезоэлектрические константы малы при низких температурах и вырастают с увеличением температуры. Например, в моногидратированном сульфате лития при 23 К — $0,40 \cdot 10^{-5}$, при 293 К — $8 \cdot 10^{-5}$ и при 352 К — $9,0 \cdot 10^{-5}$ Кл/(м²·К).

Среди пьезоэлектрических веществ интересен триглицинсульфат $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$, иначе ТГС. Это вещество с большой пьезоэлектрической константой, равной $3,5 \cdot 10^{-4}$ Кл/(м²·К), можно использовать

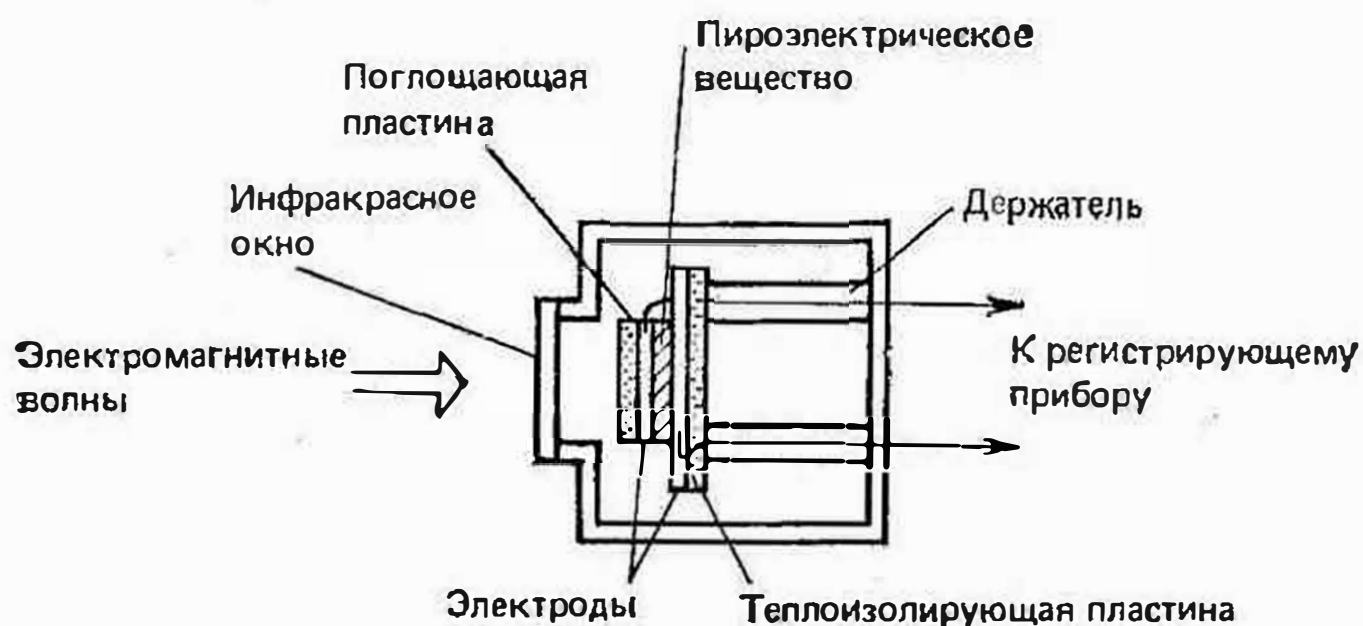


Рис. 34. Пироэлектрический датчик

как рабочее тело в описанном ниже приборе. Однако плохо, что точка Кюри чистого ТГС — 322 К, а при более высоких температурах исчезает спонтанная поляризация. Но если добавить в ТГС несколько процентов аминокислоты *L*-аланина, то асимметрия кристалла увеличивается, а модуль вектора спонтанной поляризации уменьшается незначительно.

Среди пироэлектрических приборов привлекает внимание *детектор электромагнитных волн*. Его конструкция показана на рис. 34. На теплоизолирующей пластине установлен электрод, на нем слой пироэлектрического вещества, еще один электрод, и на нем пластинка из вещества, поглощающего электромагнитные волны. Под действием электромагнитных волн эта пластинка нагревается и пироэлектрик поляризуется. Изменение поляризации фиксируется в виде электрического сигнала. Достоинства такого прибора: время нагрева рабочего элемента меньше, чем у других тепловых приборов, широкий диапазон частот детектирования; не требуется напряжения смещения. В этом приборе используют такие пироэлектрики, как ТГС и подобные ему соединения.

Что такое полупроводниковое соединение?

Полупроводниковое соединение — это соединение двух и более элементов, имеющее характерные полупроводниковые свойства. Как правило, это соединения типа $A^{III}B^V$, такие, как GaAs, InP,

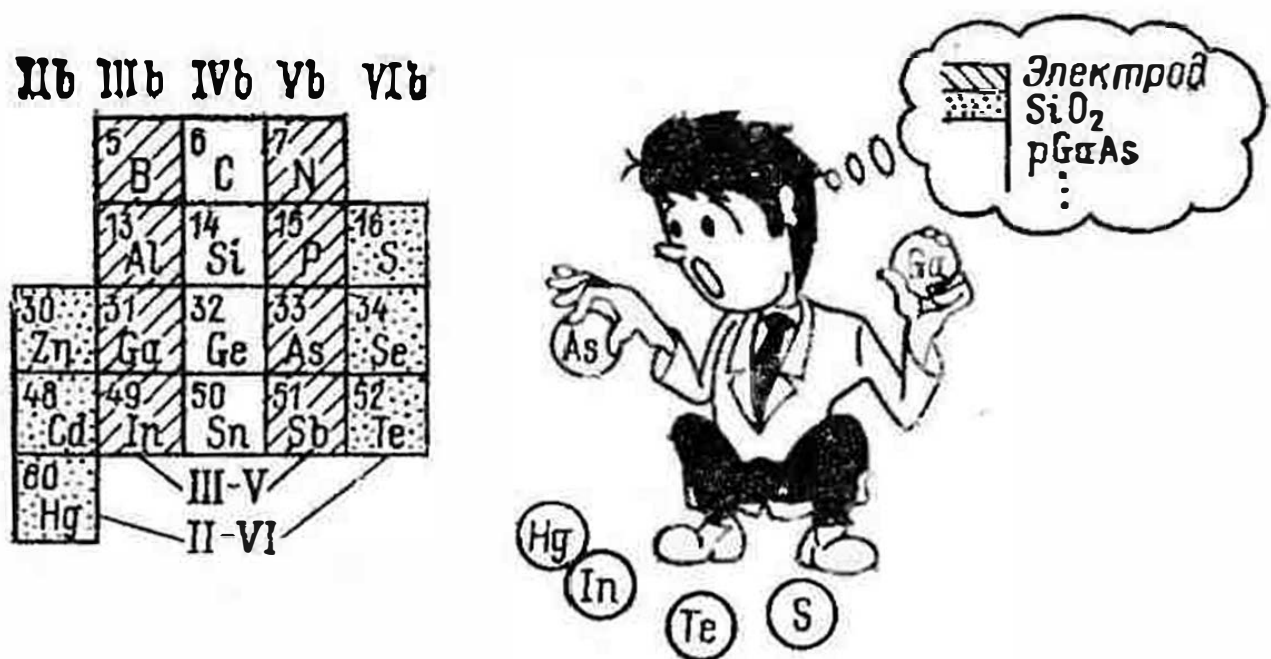


Рис. 35. Химические элементы полупроводниковых соединений

состоящие из элементов второй подгруппы III и V групп периодической системы, типа $A^{III}B^{VI}$, такие, как ZnS , $CdSe$, состоящие из элементов второй подгруппы II и VI групп периодической системы, а также типа $A^{IV}B^{IV}$, когда оба элемента принадлежат второй подгруппе IV группы, например SiC (рис. 35).

Соединения типа $A^{III}B^{V}$ имеют кристаллическую структуру цинкового блеска, а среди других преобладает структура вюрцита. Структура цинкового блеска — правильный тетраэдр. В кристаллическом двухатомном полупроводнике атомы двух видов чередуются в узлах решетки и один атом соединен с четырьмя атомами другого вида. А в аморфных полупроводниковых соединениях атомы соединены друг с другом по-разному и могут даже занимать подходящие по размеру промежутки решетки.

Атомы полупроводниковых элементов IV группы образуют ковалентную связь, а в полупроводниковых соединениях атомов из разных групп возникает связь, имеющая сильный ионный характер, из-за различного числа электронов во внешней оболочке, причем в $A^{III}B^{V}$ ионный характер связи сильнее, чем в $A^{II}B^{IV}$. У каждого типа полупроводниковых соединений с ростом молярной массы (вниз по периодической системе) растет размер атомов, а в результате увеличивается постоянная решетки, уменьшается энергия связи и растет ширина запрещенной зоны (рис. 36). Но и при одинаковой молярной массе элементов в $A^{III}B^{V}$ и $A^{II}B^{IV}$ из-за усиления ионного характера связи растет ее энергия, увеличивается температура плавления вещества и ширина запрещенной зоны.

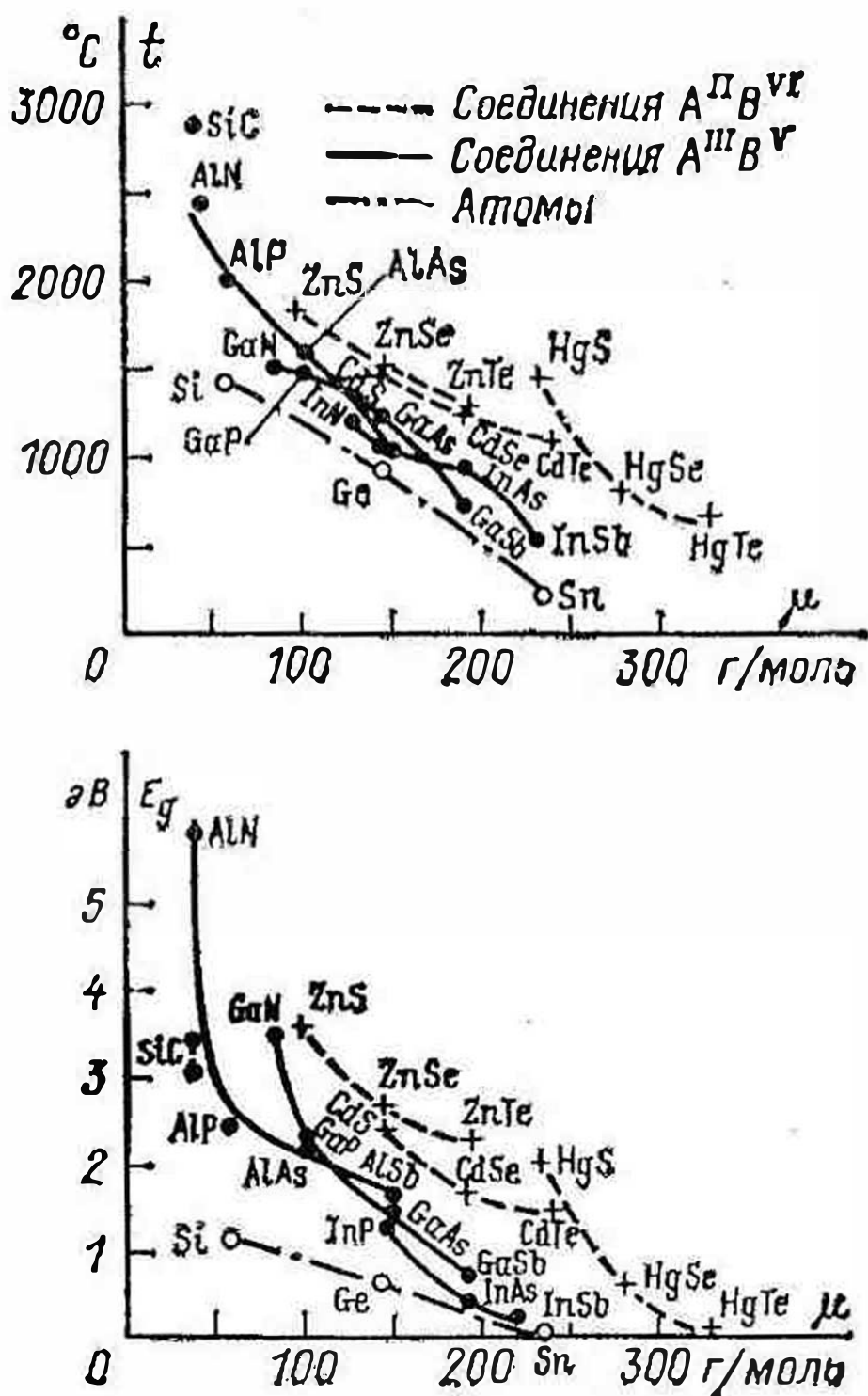


Рис. 36. Температура плавления и ширина запрещенной зоны полупроводниковых соединений в зависимости от молярной массы

Полупроводник, у которого на дне зоны проводимости волновое число $K = 0$, называют *собственным*, а не имеющий этого свойства, — *несобственным полупроводником*. В собственных полупроводниках велики масса и подвижность электронов. Среди полупроводниковых соединений преобладают соединения собственного типа, такие, как GaAs с высокой подвижностью электронов.

Поглощение света собственными полупроводниками резко возрастает, как только энергия квантов превысит ширину запрещенной зоны. Излучение света — процесс, обратный поглощению. Световая отдача собственных полупроводников выше, чем несобственных. Как уже было сказано, большинство полупроводниковых соединений собственного типа, но,

меняя тип соединения, создавая *трех-, четырехкомпонентные кристаллы*, можно получить вещества с высокой светоотдачей и нужной длиной волны.

Контакты полупроводников, различных по химическому составу, называют *гетеропереходами*. Такие структуры необходимы при изготовлении различных приборов. Управляя синтезом многокомпонентных систем, можно в любых пределах изменять постоянную решетки и структуру зон, т. е. подбором компонентов полупроводникового соединения можно получить вещество с необходимой для конкретного применения постоянной решетки и структурой электронных уровней.

На основе полупроводниковых соединений созданы полевые транзисторы с высокой подвижностью носителей, абсорбционные светодиоды с высокой светоотдачей, полупроводниковые лазеры и светоприемные приборы.

Что такое аморфное вещество?

В кристаллических структурах атомы и молекулы расположены упорядоченно на любом расстоянии по всем трем измерениям. *Аморфными веществами* (рис. 37) называют такие, у которых, в отличие от кристаллов, на дальних расстояниях упорядоченность структуры отсутствует. Такие материалы получаются при быстром охлаждении вещества, нахо-

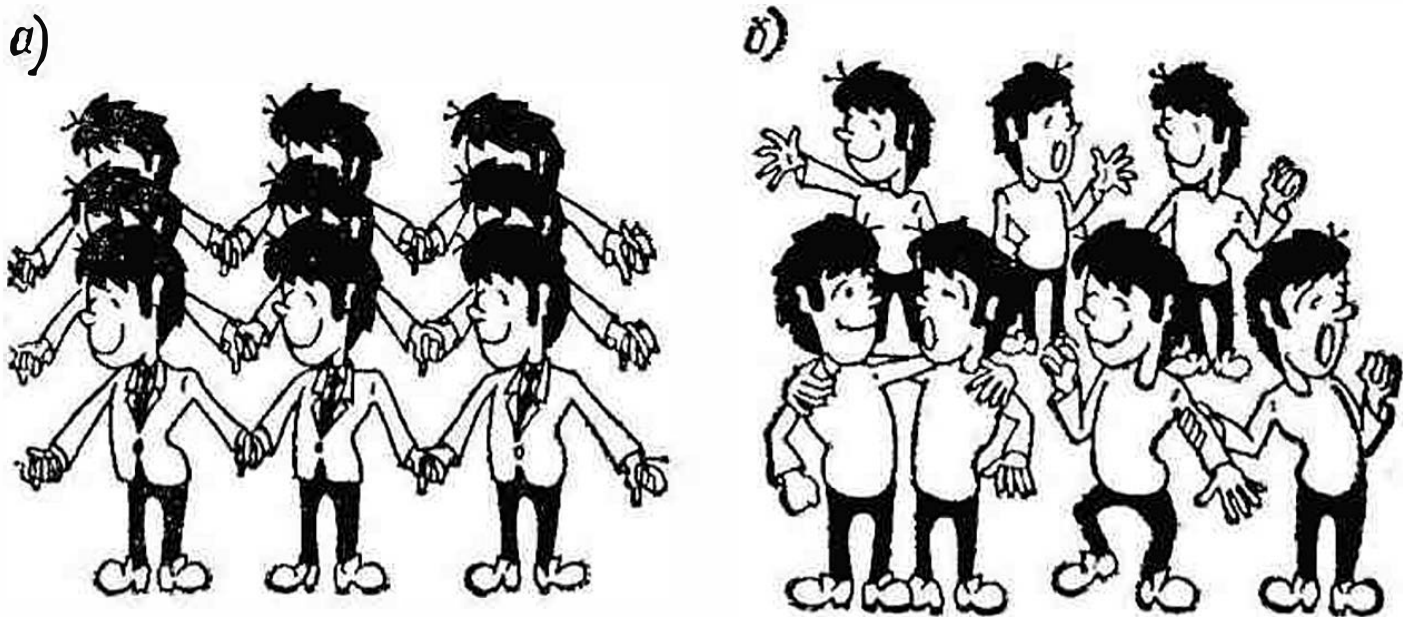


Рис. 37. «Структура» кристаллического (а) и аморфного (б) вещества

дящегося в жидкой или газообразной фазе. Главное их достоинство — низкая стоимость производства. Среди аморфных веществ, применяемых в электронике, — стекло, полупроводники (аморфный кремний, халькогениды), магнитные и другие материалы.

Из-за отсутствия дальнего порядка структура электронных уровней аморфных полупроводников отличается от уровневой структуры кристаллических полупроводников. Различие, однако, не так уж велико: аморфные полупроводники имеют почти такие же энергетические зоны, которые отличаются лишь «хвостами», соответствующими локальным уровням в запрещенной зоне (рис. 38). Область между порогами подвижности валентной зоны и зоны проводимости называют *щелью подвижности*. Она является аналогом запрещенной зоны в кристаллических полупроводниках. Изменяя присадками различных примесей структуру уровней в щели подвижности, можно управлять полупроводниковыми свойствами вещества. Среди аморфных полупроводников обращает на себя внимание аморфный кремний. Благодаря широкому спектру поглощения света и низкой стоимости он применяется как материал для солнечных батарей. Аморфный кремний получают из моносилана (SiH_4), доведенного до состояния плазмы. Поэтому готовый материал содержит не только кремний, но и большое количество водорода. Плотность уровней, локализо-

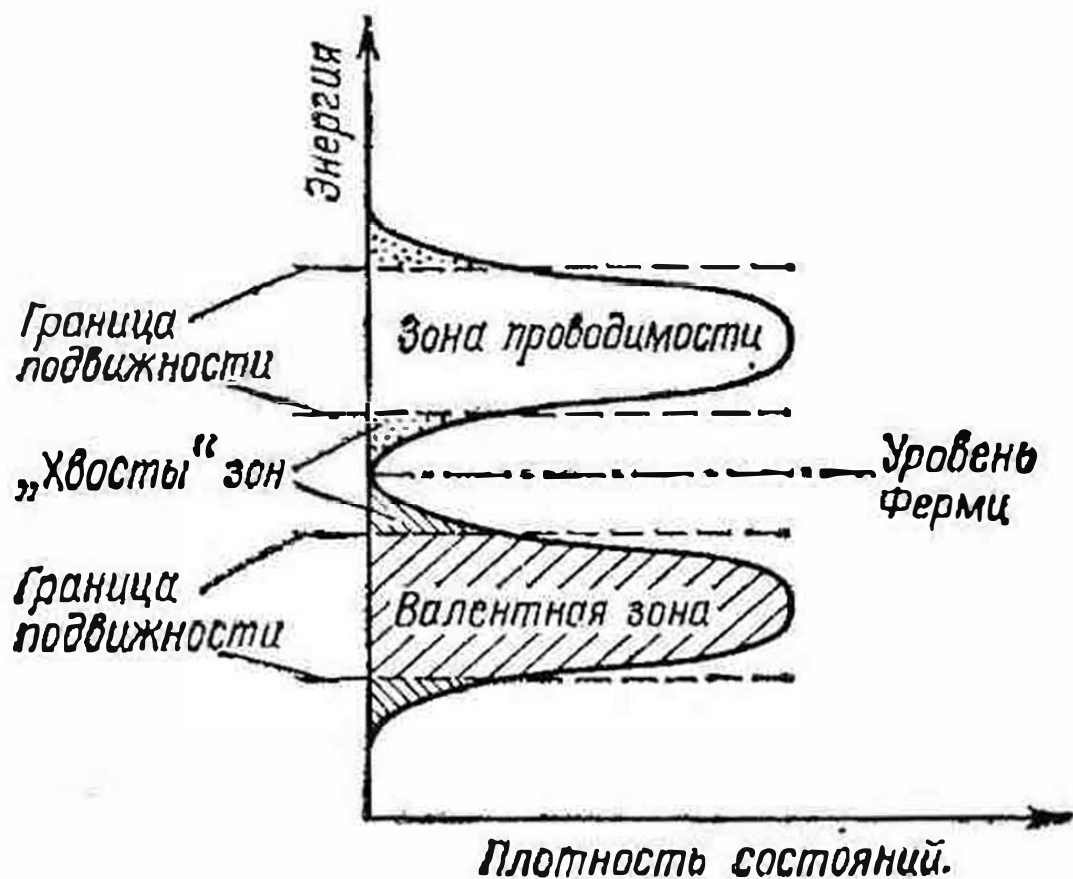


Рис. 38. Зонная структура аморфного полупроводника

ванных в щели подвижности такого вещества, низка. Причиной считают то, что свободные связи аморфного кремния заняты содержащимся в нем водородом.

Фотопроводимость аморфного кремния используют в электрофотографии. Тонкую пленку этого материала наносят на металлическую пластинку. В электрическом поле пластинку заряжают отрицательно, а кремниевую пленку — положительно. Под действием света образуются электронно-дырочные пары, которые нейтрализуют заряд в местах попадания света.

Халькогениды имеют главным компонентом халькогенные элементы (S, Se, Te), используются в приборах для коммутации цепей, ячеек памяти, так как их электропроводность зависит от силы электрического поля. Ведутся исследования по использованию халькогенных стекол в качестве неорганического фоторезиста.

Аморфный гетеропереход можно использовать в видеотехнике. Например, из аморфного материала Se — As — Te делают мишени сатиконов — передающих телевизионных трубок.

Среди аморфных магнитных материалов привлекают внимание сплавы редкоземельных элементов с металлами переходной группы и последних с металлами. Сплав $\text{Fe}_{83}\text{P}_{10}\text{C}_7$ имеет высокую механическую прочность и магнитную проницаемость. Эти свойства делают его перспективным заменителем таких материалов, как пермаллой и кремнийорганическая сталь. Пленки CdCo представляют интерес для использования в памяти на цилиндрических магнитных доменах.

Что такое гетеропереход и гетероструктура?

«Гетеро» значит «другой». Гетеропереходом называют контакт двух различных по химическому составу материалов (рис. 39). Комбинацию гетеропереходов называют *гетероструктурой*. Гетероструктуры, состоящие из одного перехода, называют *простыми*, из двух, — *двойными*, из большого числа переходов, — *мультигетероструктурами*. Материалы, образующие гетероструктуры, — это либо два полупровод-



Рис. 39. «Структура» гомо- и гетероперехода

ника, например GaAs и Ge, либо металл и полупроводник, образующие барьер Шоттки или омический контакт. Переход, образованный одинаковыми, обычно простыми материалами с различной проводимостью, называют *гомопереходом*. Переход в контакте Ge *n*-типа и Ge *p*-типа — это гомопереход.

Распределение энергии в гомопереходе и в гетеропереходе показано на рис. 40. Вверху дана картина уровней при отсутствии на переходе внешнего напряжения, внизу — для напряжения, приложенного в **прямом направлении** (плюс к *p*-области, минус к *n*-области). В гетеропереходе ступени ΔE_c и ΔE_v образованы соответственно разностью ширины запрещенных зон и различием сродства к электрону. Например, в гетеропереходе GaP и Si (рис. 41) ΔE_c — разность верхних краев, а ΔE_v — разность нижних краев отрезков сплошных линий. В последнее время значение ΔE_v вычисляют по структуре зон.

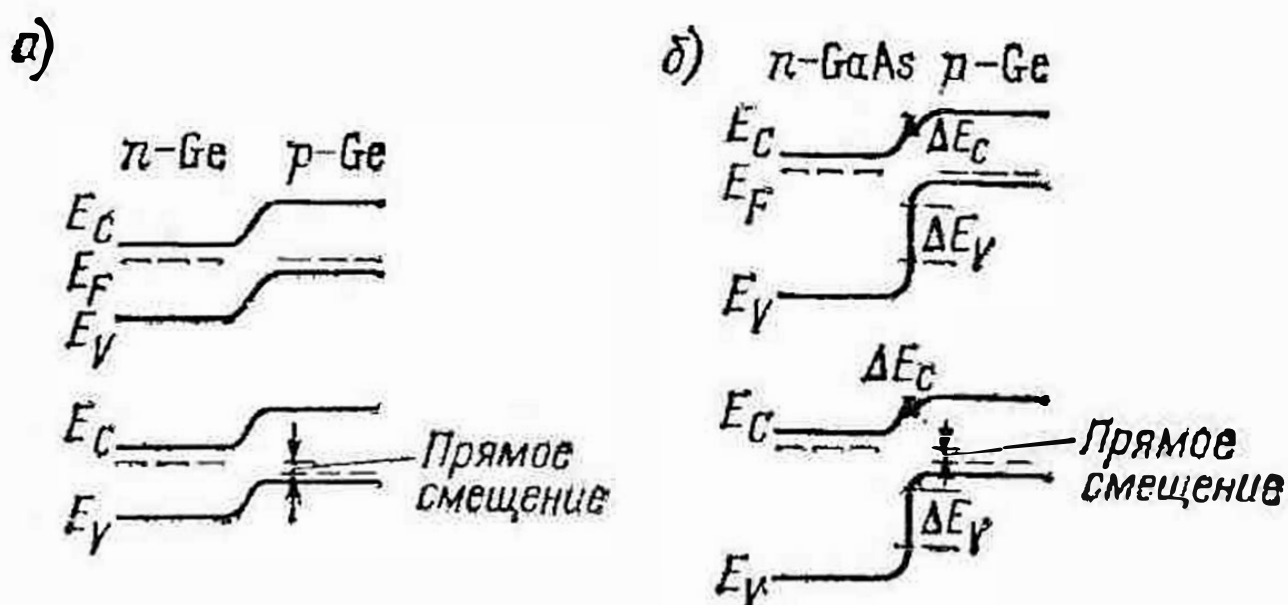


Рис. 40. Диаграмма энергетических уровней гомоперехода (а) и гетероперехода (б)

E_c — дно зоны проводимости; E_v — верхний край валентной зоны

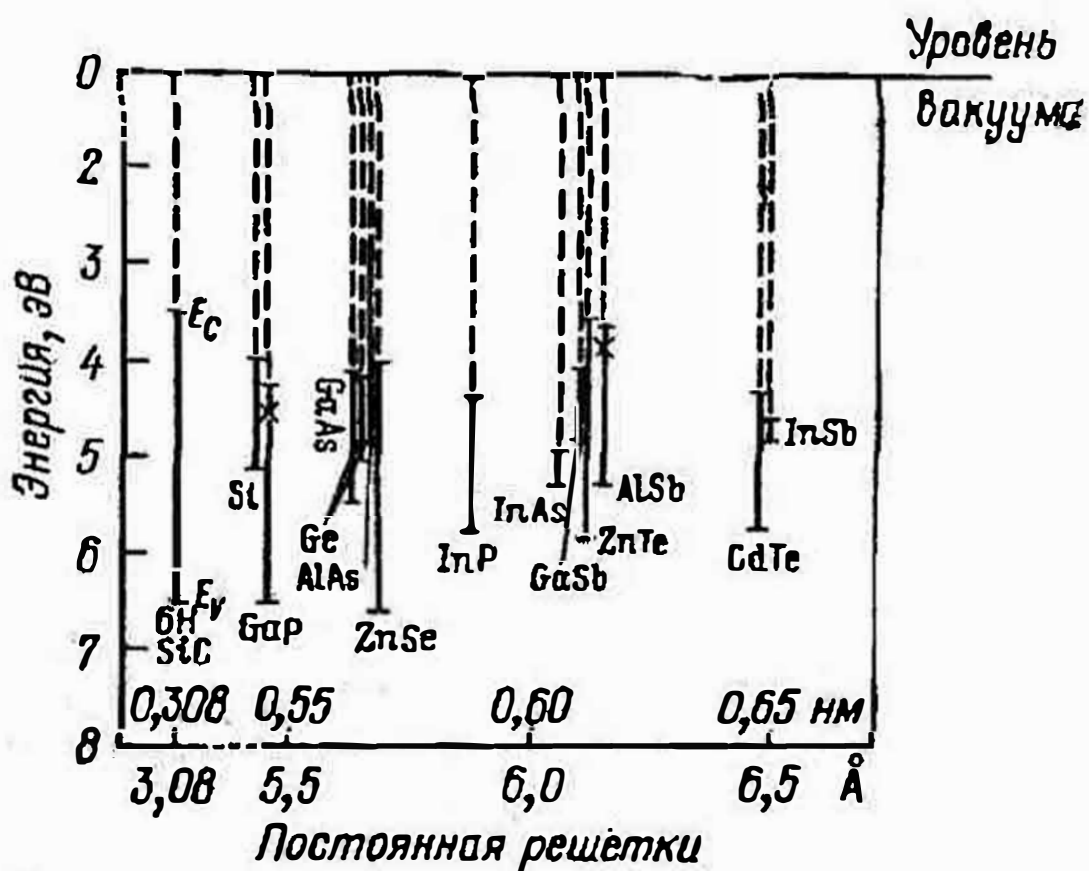


Рис. 41. Сродство к электрону (штриховая линия), ширина запрещенной зоны (сплошная линия) и постоянная решетки различных полупроводников

Для изготовления гетероперехода требуется выращивать на поверхности одного из материалов слой другого. Чтобы между атомами образовалась прочная связь, подбирают два вещества с близкими постоянными решетки (рис. 41). В трехкомпонентных соединениях расстояние между атомами может принимать любые значения, но ширина энергетической щели зависит от состава. А в четырехкомпонентных соединениях оба параметра можно подобрать независимо друг от друга.

Гетеропереходы широко используют в практике. Среди быстродействующих элементов есть гетеропереходный транзистор с высоколегированной областью базы и большой площадью эмиттера и транзистор с высокой подвижностью электронов, образованный гетеропереходами беспримесного полупроводника GaAs и *n*-AlGaAs. Принцип работы основан на свойстве высокой подвижности электронов при низкой температуре из-за незначительной диффузии примесей в GaAs. Пример использования гетероструктур в оптике — полупроводниковый лазер. В нем рабочая область зажата между *n*- и *p*-слоями с большой шириной энергетической щели. Благодаря этому повышается вероятность рекомбинации электронов и дырок, формирующих запирающий слой, что увеличивает

КПД излучения. Кроме перечисленных существуют приборы на так называемых *сверхструктурах*, состоящих из большого числа пленок различных веществ.

Что такое эпитаксия?

Эпитаксия — это выращивание на базовой подложке кристалла с заданным направлением осей. Случай, когда материал подложки и выращиваемого кристалла один и тот же, называют *гомоэпитаксией*. Выращивание кристаллов способом эпитаксии имеет ряд преимуществ по сравнению с другими способами. Качество кристаллов выше, чем при конденсации; кристаллы, необходимые в приборах, можно получать в виде тонких пленок; есть возможность управлять составом и диффузией примесей.

Способ газовой фазы — способ эпитаксии, когда материал поступает на подложку в газообразном состоянии. Одна из модификаций — *способ химического осаждения*, когда материал поступает на подложку в виде химических соединений, а эпитаксиальная пленка выращивается посредством химических реакций. Для примера рассмотрим получение эпитаксиальной пленки GaAs способом химических реакций (*химической транспортировки*). Галлий помещают в горячую часть печи, подложку — в более холодную (рис. 42). Поток AsCl_3 в водороде галлий доставляется на подложку, где путем химических реакций выделяется мышьяк и происходит рост кристалла GaAs. Еще один из способов газовой фазы — *способ пиролиза металлоорганических соединений* — выращивание эпитаксиальной пленки путем пиролиза на

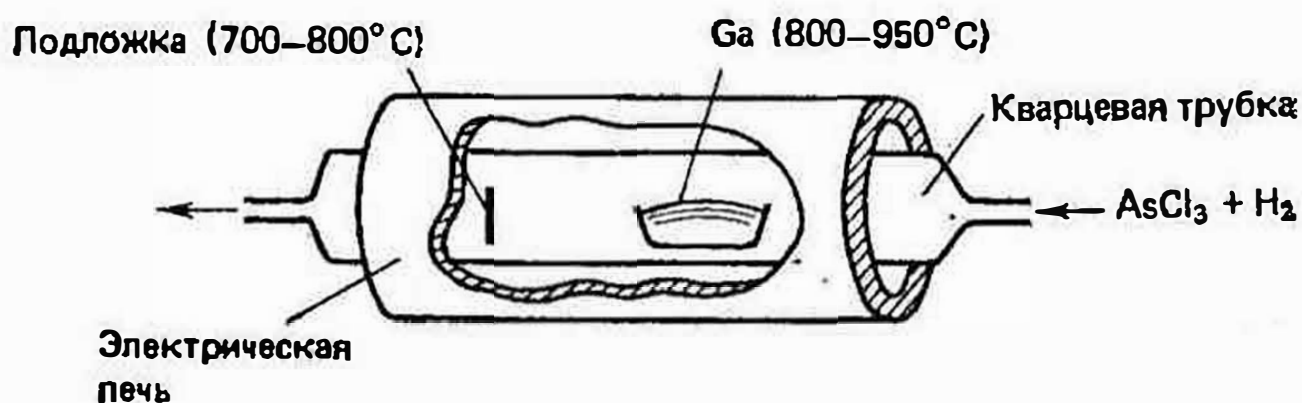


Рис. 42. Эпитаксия в газовой фазе

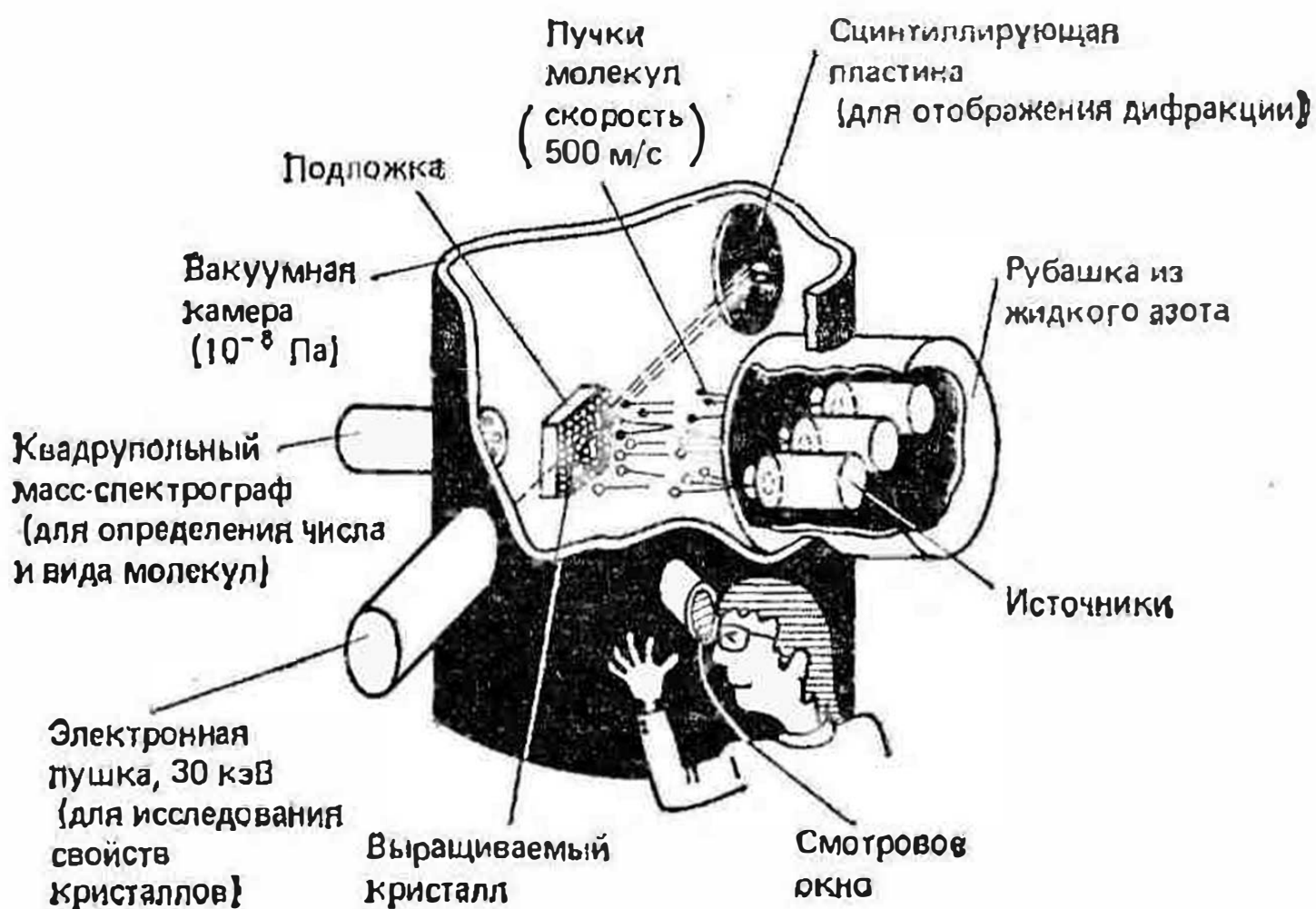


Рис. 43. Молекулярно-лучевая эпитаксия

подложке соединений органики с металлами и гидридов неметаллов. Достоинства эпитаксии способом газовой фазы: получение гомогенного кристалла на большой площади, высокое качество поверхности кристалла, технологичность.

Молекулярно-лучевая эпитаксия (рис. 43) — выращивание пленки кристалла на подложке, помещенной в высокий вакуум и нагретой до нескольких сотен градусов Цельсия, с помощью молекулярных пучков. Одна из разновидностей этого способа — *трехтемпературное вакуумное испарение*. В сверхвысоком вакууме благодаря повышенному испарению и лучшей управляемости процесса можно выращивать кристаллические пленки с недоступным прежде качеством. Особенность молекулярно-лучевой эпитаксии — рост кристаллов в состоянии теплового равновесия. У таких кристаллов снижается концентрация дефектов решетки.

Способ жидкой фазы — выращивание эпитаксиальной пленки из раствора, находящегося в контакте с подложкой. Этот способ имеет несколько разновидностей. При *способе понижения температуры раствора* медленно охлаждают помещенный на подложку раствор. При *способе наклона* раствор подают на под-

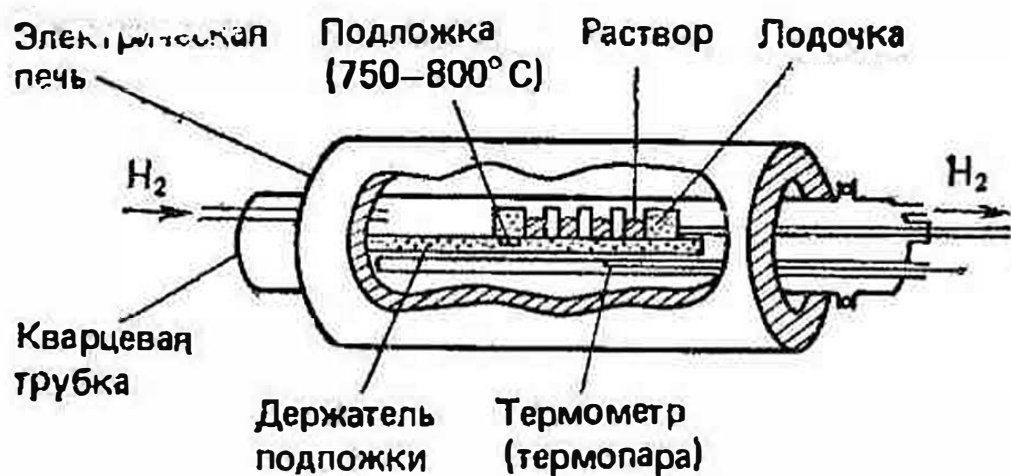


Рис. 44. Эпитаксия в жидкой фазе

ложку, наклоняя лодочку (рис. 44). При *способе погружения* подложку погружают в раствор. При *способе скольжения* емкость с раствором передвигают в горизонтальном направлении. При *способе переноса (способе разности температур)* создают перепад температур между веществом на выходе из источника (высокая температура) и подложкой (низкая температура). Из-за разности концентраций и температур происходит перенос вещества на подложку за счет диффузии и термодиффузии.

Способ твердой фазы — термическая кристаллизация аморфного вещества, уже находящегося на подложке. Обращает на себя внимание *графоэпитаксия*, которую рассмотрим в следующем параграфе.

Что такое графоэпитаксия?

При эпитаксии на подложке выращивается кристалл с соответствующей этой подложке ориентацией. Графоэпитаксия производит рост кристаллов по-другому. На аморфной подложке нарезают штрихи, затем осаждают на нее аморфное вещество, например аморфный кремний, и отжигают лазерным лучом.

Этот способ предложен Смитом с сотрудниками из Массачусетского университета. Они же называли его *графоэпитаксией*. Слово «графо» по-гречески означает «пишу». Как утверждает Смит, начало этому способу, получившему большое признание, положили узкие полоски льда, образующиеся зимним

утром на мельчайших царапинах автомобильного стекла.

Особое достоинство графоэпитаксии состоит в том, что, нанося на аморфную подложку соответствующие штрихи, можно получить кристаллы с необходимым направлением осей. Но на ориентацию кристаллических осей влияет глубина штриха. Например, при мелких штрихах, глубиной 0,06 мкм, оси кристалла плохо согласованы с направлением штрихов, а при еще более мелких, глубиной менее 0,019 мкм, направление кристаллических осей кремния перестает зависеть от направления штриха. Как показано на рис. 45, когда на группу штрихов глубиной 0,1 мкм, профиль которой имеет форму прямоугольных волн с периодом 3,8 мкм, осаждают слой кремния толщиной 0,5 мкм и затем отжигают лазером, ось [100] кремния становится перпендикулярной подложке, а оси [001] рас-

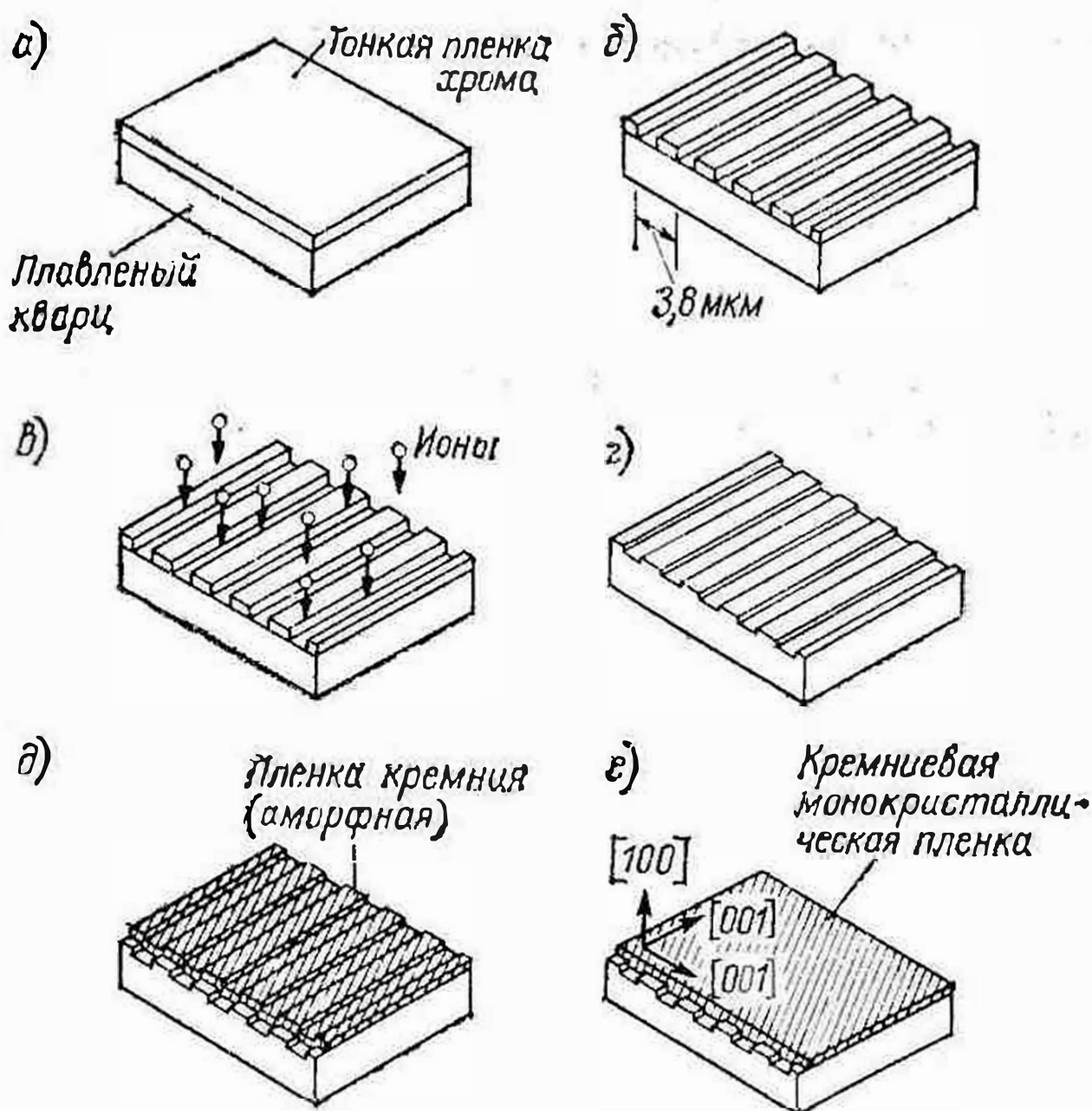


Рис. 45. Графоэпитаксия: а — покрытие кварца пленкой хрома; б — фотолитографическая подготовка полос на хrome; в — ионное травление кварца на глубину 0,1 мкм; г — снятие хромового шаблона; д — химическое осаждение пленки кремния толщиной 0,5 мкм; е — монокристаллизация лазерным отжигом

полагаются вдоль штрихов. Непосредственно после осаждения на поверхности кремния остаются шероховатости, повторяющие профиль, но после монокристаллизации поверхность становится почти плоской.

Способом, описанным выше, можно вырастить монокристалл кремния на непроводящей подложке для различных практических нужд. Первый пример — это производство обычных интегральных схем. На подложке для изоляции окисляют кремний, создавая слой кварца, на котором выращивают монокристалл кремния, и затем изготавливают микросхему. Этим же способом можно изготавливать и оптические интегральные схемы. Со времени появления возможности кристаллизации кремния на непроводящей подложке до наших дней дошли приборы, где используется кремний на сапфире. Однако выбор подложек и свобода ориентации кристаллических осей при графоэпитаксии богаче, что дает возможность изготавливать и преобразователи энергии, например солнечные батареи.

Что такое лазер?

Слово «лазер» (LASER) — аббревиатура английского выражения Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, которое переводится как «усиление света вынужденным излучением». Первоначально это слово указывало на способ усиления света, но сегодня это название высококачественного оптического генератора, дающего излучение с определенной длиной волны. Как и всякий генератор, он состоит из усилителя и системы положительной обратной связи.

Рассмотрим распределение электронов в атомах по энергетическим уровням. В состоянии теплового равновесия большая часть электронов находится на нижних уровнях, но путем какого-либо возбуждения можно осуществить инверсию состояния — увеличить число электронов на верхних уровнях. Из этого состояния под действием излучения с энергией, равной разности энергий верхнего и нижнего уровня, электроны «упадут» на нижние уровни, а их энергия перейдет в излучение с длиной волны и фазой возбуж-

дающего, усиливая его. Это и есть вынужденное излучение.

В качестве средств возбуждения для инверсии состояния используют свет, электрический разряд, инжекционные токи, химические реакции и др.

Обратная связь в лазерах бывает двух типов: дискретная и распределенная. В первом случае она осуществляется оптическим резонатором, составленным из зеркал или призм и находящимся вне лазерной среды, а во втором случае — за счет отражения, возникающего в лазерной среде при изменении ее показателя преломления (по направлению распространения света) с периодом, удовлетворяющим условиям Брэгга.

В качестве достоинств лазерного излучения отмечают следующие: высокую монохроматичность; высокий уровень выходной мощности; хорошую синфазность и высокую когерентность; малую расходимость (при одномодовом колебании расширение луча происходит только за счет дифракции).

Лазерная среда может быть твердой, жидкой и газообразной. В лазерах с возможностью выбора длины волны это могут быть такие газы, как аргон, гелий-неоновая смесь, углекислый газ, или жидкости, например родамин 6Ж. В твердотельных лазерах рабочее тело — рубин, иттриево-алюминиевый гранат (YAG).

Лазеры классифицируют по длине волны излучения (рис. 46): рентгеновские, ультрафиолетовые, видимого диапазона, ближнего и дальнего инфракрасного излучения. Среди инфракрасных лазеров самые мощные газодинамические.

Область применения лазерного излучения широка и многообразна. Основные приложения — это получение высших оптических гармоник, оптических параметрических колебаний, сложение оптических колебаний, а также лазерная спектроскопия. С помощью лазера можно быстро и с высокой скоростью проводить измерения скорости, габаритов, расстояния и тому подобных величин. В оптических информационных системах лазер используют для обработки информации (корреляционные вычисления и преобразования Фурье, проводимое с помощью линз), а в системах оптической связи — для передачи информации. Лазерное излучение имеет свойство, необходимое

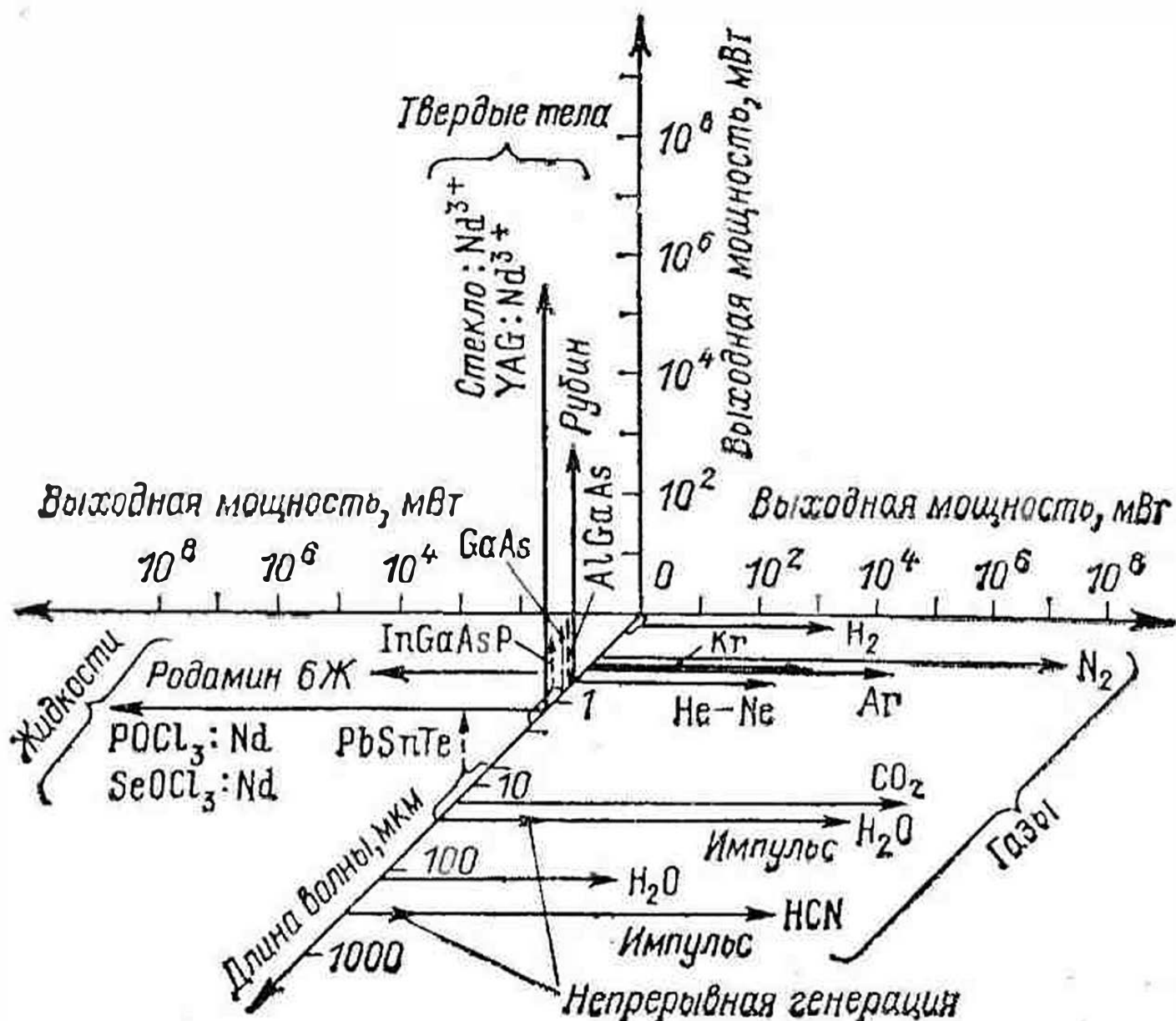


Рис. 46. Длина волны и выходная мощность различных лазеров
Штрихами обозначены характеристики полупроводниковых лазеров

для голографии, — когерентность. Лазер применяют как источник энергии при лазерной обработке материалов (резание, неконтактная обработка, изменение свойств вещества, например путем кристаллизации), а также при разделении изотопов урана и в ядерном синтезе. При помощи лазера приваривают отделившуюся сетчатку глаза, а в хирургии используют лазерный скальпель.

Что такое химическое осаждение с помощью лазера?

Химическое осаждение с помощью лазера — это способ изготовления тонких пленок из газообразного сырья с применением световой энергии. Процесс осаждения может идти двумя путями. Свет вызывает в газовой фазе химические реакции путем возбужде-

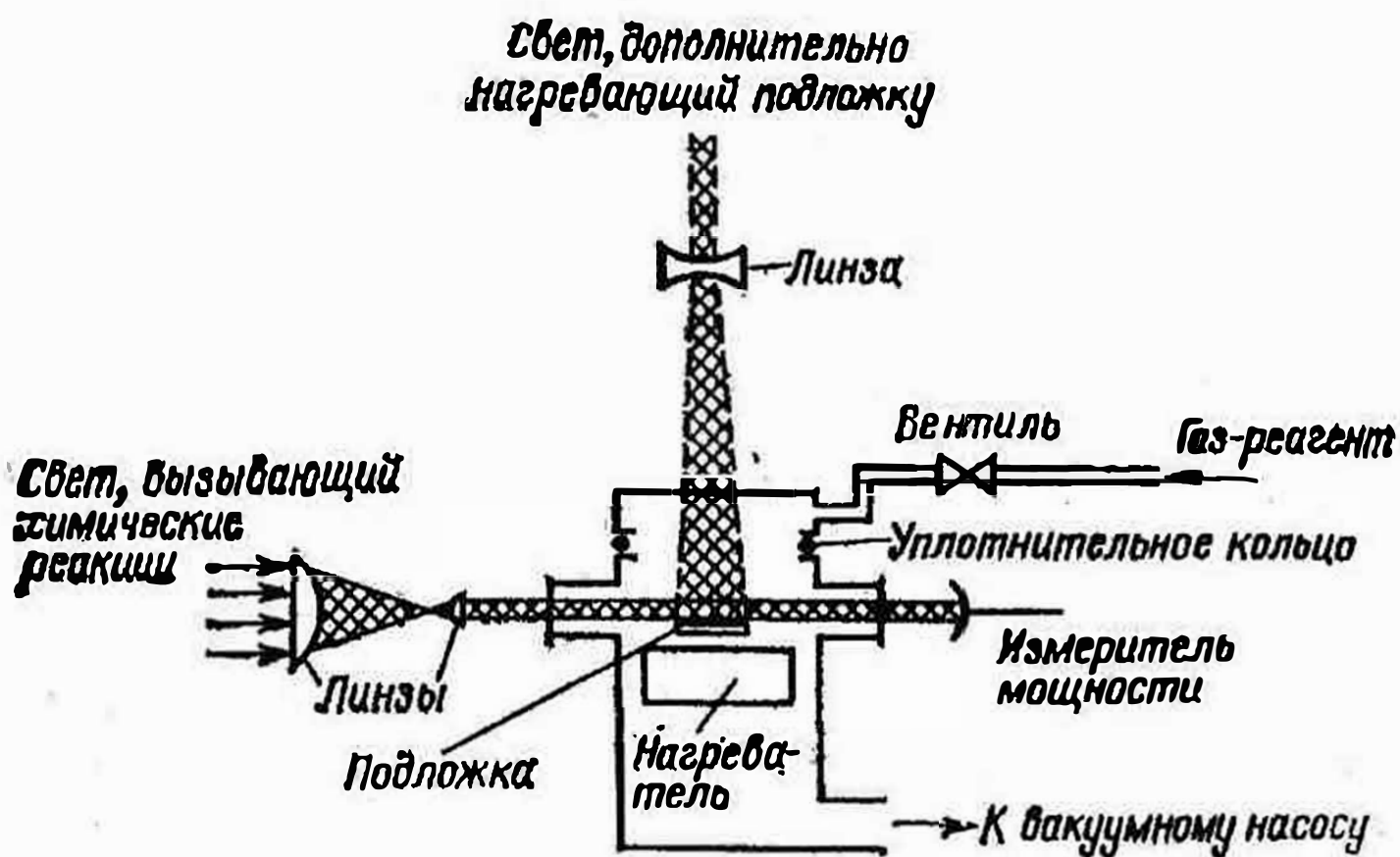


Рис. 47. Химическое осаждение с помощью света

ния дополнительных степеней свободы (электронных и колебательных уровней молекул). Кроме того, свет может нагревать подложку. Если свет идет сбоку, как показано на рис. 47, и вызывает химические реакции в газе в непосредственной близости от подложки, то считают, что пленка получается только благодаря химическим реакциям. А если свет падает на подложку сверху, проходя через газ, то пленка образуется благодаря и химическим реакциям, вызванным светом, и нагреванию этим же светом подложки.

В реакциях, вызванных светом в газовой фазе, возбуждаются колебательные и электронные уровни в молекулах. Для возбуждения колебательных уровней требуется инфракрасное излучение, а для возбуждения электронных — ультрафиолетовое. В качестве примера осаждения при возбуждении колебательных уровней рассмотрим образование кремниевой пленки путем возбуждения молекул моносилана (SiH_4) лазером на углекислом газе. В этом процессе свет расщепляет молекулы моносилана, а температура подложки поддерживается независимым нагревателем. Если облучать моносилан светом с плотностью энергии в пятне 250 Вт/см^2 на линии поглощения $P(20)$, показанной на рис. 48, то при температуре подложки выше 470 К можно выращивать аморфный кремний со скоростью 30 нм/мин .

Рассмотрим случай, когда лазер на углекислом газе возбуждает колебательные уровни молекул моносилана и одновременно нагревает подложку. Если на углеродной подложке с температурой 620—720 К при давлении моносилана 1 кПа и плотности энергии в пятне 100 Вт/см² выращивать кремниевую пленку, то на линии поглощения P (20) скорость роста 160, а на линии R (12) с незначительным поглощением — 20 нм/мин.

В кремнии поглощение света при возбуждении электронов в молекуле происходит в области малых длин волн — короче 160 нм. Металлоорганические соединения — триметилалюминий $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$ и диметилкадмий $\text{Cd}(\text{CH}_3)_2$ — имеют пик поглощения при длине волны 200 нм. Используя это свойство, осуществляют экспериментальное выделение кадмия и алюминия с помощью второй гармоники аргонного лазера (257,2 нм) или эксимерного лазера на ArF (193 нм). Способ вызванных светом химических реакций в

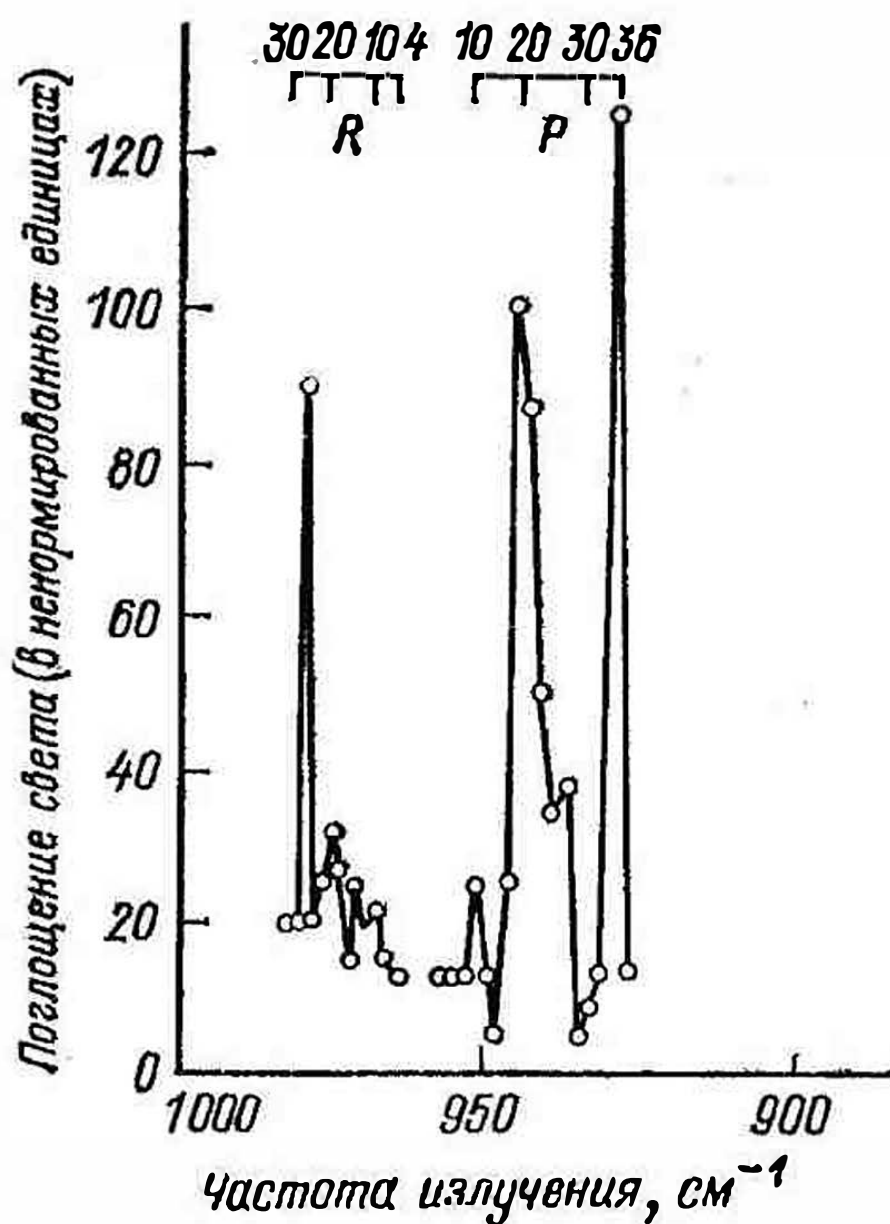


Рис. 48. Поглощение света моносиланом с возбуждением колебательных уровней

газовой фазе применяют для изготовления омических контактов и для легирования.

Кроме лазеров в качестве источников света применяют лампы высокого давления на парах ртути. Если облучать смесь моносилана с водородом ртутной лампой, температура роста кристаллов понижается и кристаллизация улучшается.

Ведутся обширные исследования химического осаждения при помощи света. Оно привлекает внимание как способ выращивания тонких пленок и как технология селективной кристаллизации, которая найдет применение в низкотемпературных процессах, при выращивании кристаллов на большой площади и в микроэлектронике.

Что такое лазерный отжиг?

После некоторых процессов, например инъекции ионов, вблизи поверхности полупроводника возникает аморфность, вызывающая потери излучения. Для возвращения в монокристаллическое состояние осуществляют отжиг путем облучения лазером — *лазерный отжиг*. В противоположность отжигу в печи лазерный отжиг можно производить на открытом воздухе в течение короткого времени, а также локально, на выбранном участке, прогревая только поверхность, не затрагивая остальных участков кристалла.

Для лазерного отжига используют *импульсные лазеры*, например рубиновый с модулируемой добротностью или неодимовый, а также *лазеры с непрерывной генерацией*, такие, как аргоновый, неодимовый и на углекислом газе. Отжигаемый материал — чаще всего кремний, но проводят эксперименты по отжигу соединений из группы $A^{III}B^V$, например GaAs, AlGaAs, из группы $A^{II}B^{VI}$, например ZnTe, а также Ga *p*-типа и In *p*-типа.

Полагают, что механизм отжига следующий. Энергия света, поглощенного образцом, переходит в теплоту, благодаря которой и происходит отжиг. Предлагается и другая модель. Из-за высокой плотности электронно-дырочной плазмы, возникшей в результате поглощения света, связь между атомами слабеет

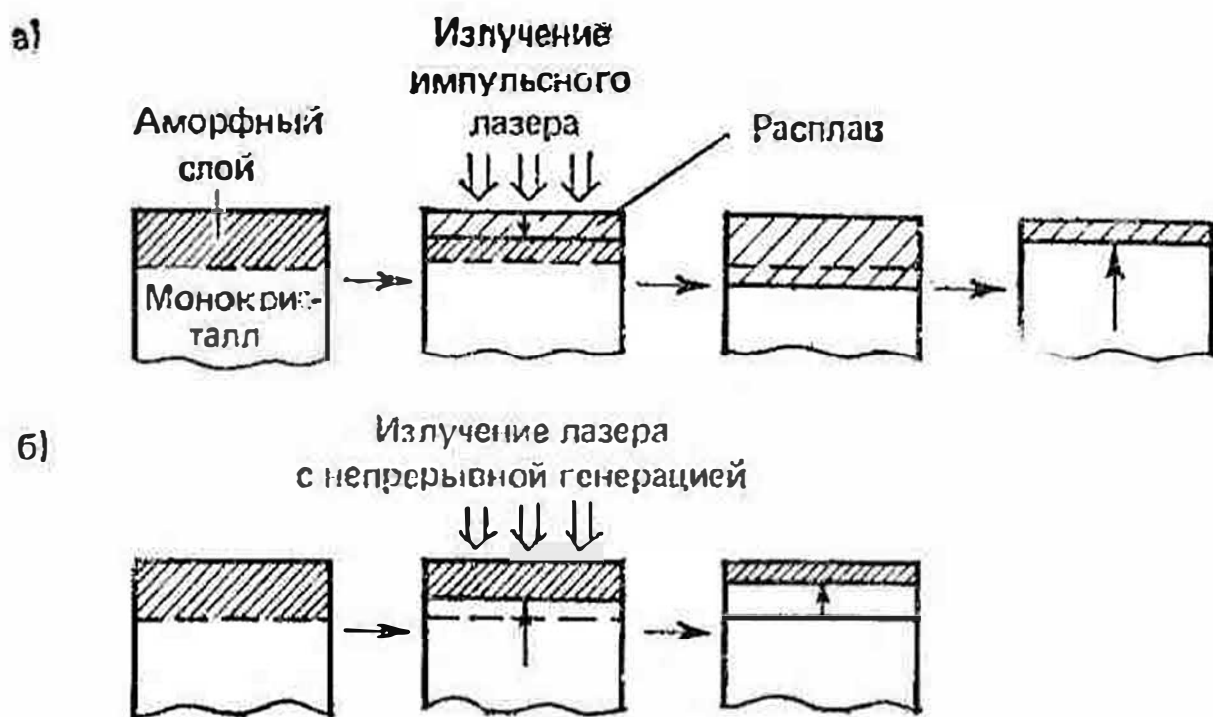


Рис. 49. Отжиг импульсным лазером (а) и лазером с непрерывной генерацией (б)

и они перераспределяются. Точка зрения на действие теплоты отображена на рис. 49. При облучении *импульсным лазером* на поверхности появляется расплав, уходящий затем в глубь кристалла. Когда область с дефектами структуры расплавлена, начинают кристаллизацию от границы расплава с кристаллом до поверхности. Время кристаллизации очень мало, в пределах 1 мкс. При облучении лазером с непрерывной генерацией из-за малой мощности расплав не образуется. Возникает эпитаксиальная перекристаллизация на границе кристалла в области, содержащей дефекты. Этот процесс похож на муфельный отжиг, но там нагрев и охлаждение идут в течение длительного времени, обычно нескольких десятков минут. При отжиге лазером с непрерывной генерацией нагрев длится несколько миллисекунд, поэтому и время кристаллизации крайне мало. Из-за быстрого охлаждения диффузия практически не влияет на распределение примесей. Это позволяет сформировать тонкий слой с высокой концентрацией присадок, что невозможно при муфельном отжиге.

Лазерный отжиг применяют для кристаллизации как аморфных, так и поликристаллических пленок кремния, осажденного на аморфные подложки. В процессе муфельного отжига вырастают кристаллические зерна небольшого размера, но если сканировать поверхность лазером, то размеры кристаллических зерен можно значительно уменьшить. Однако из-за того

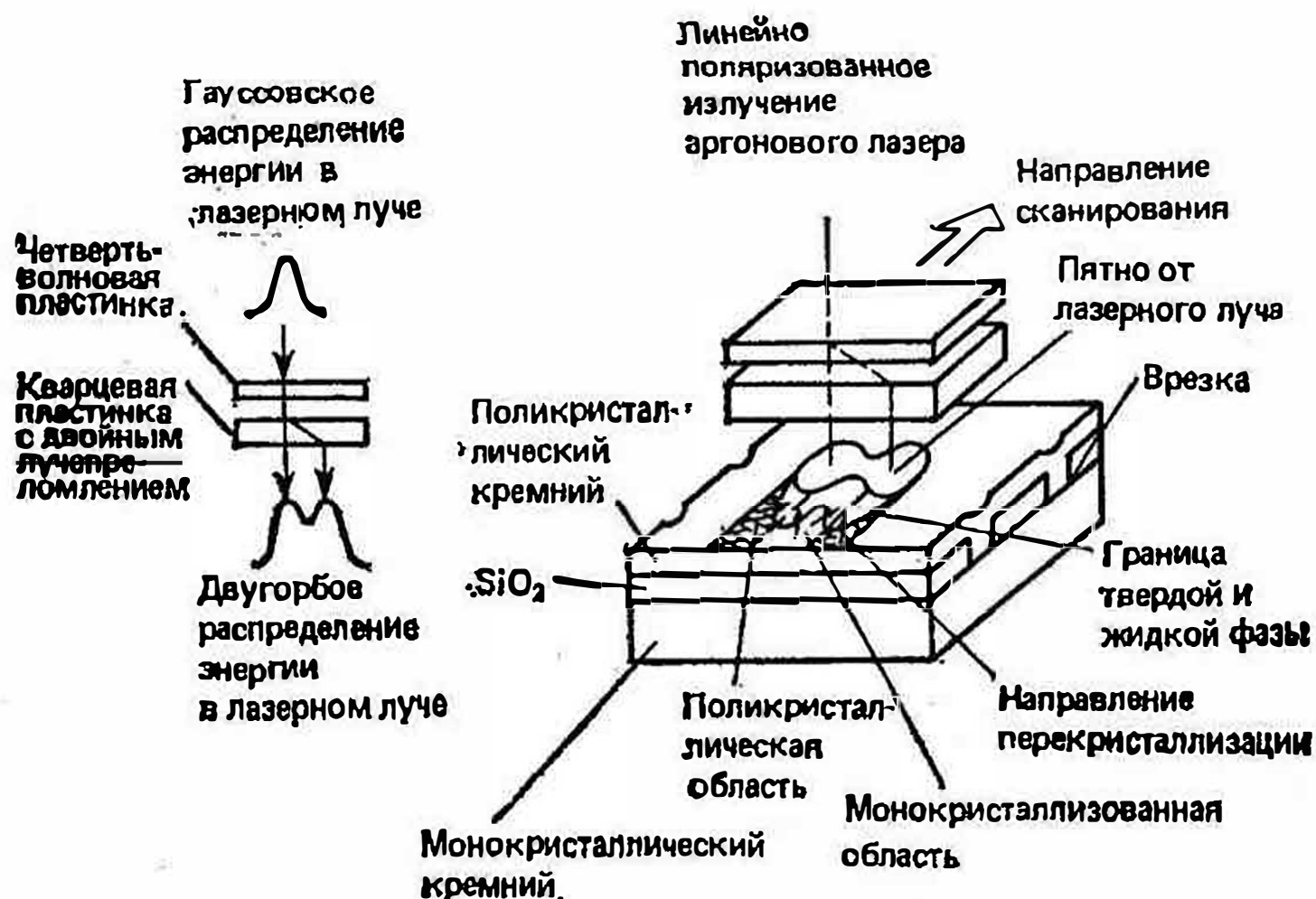


Рис. 50. Лазерный отжиг способом расширенного луча при получении структуры «кремний на диэлектрике»
Слева — схема изменения сечения лазерного луча

что мощность в лазерном луче распределена по закону Гаусса, рост кристаллов происходит от центра к краю пятна расплава и монокристаллизация большой поверхности затруднена. Для решения этой проблемы изменяют форму лазерного луча и распределение мощности, уменьшая тем самым перепад температур от края к центру пятна, как показано на рис. 50.

Что такое полупроводниковый лазер?

Полупроводниковые лазеры — это общее название всех лазеров, созданных на основе полупроводниковых материалов. Структуру, изображенную на рис. 51, можно считать типичной. Для лучшего рассеяния теплоты применяют теплоотвод. Размеры лазерной структуры незначительны: толщина примерно 150, длина 300, ширина 100—200 мкм. Состав ее снизу вверх: слой GaAs *p*-типа толщиной около 2 мкм; слой $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ *p*-типа (x около 0,3) в несколько

микронетров; активный слой (GaAs) около 0,5 мкм; слой $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ n -типа в несколько микронетров и над ними пластинка CaAs n -типа толщиной 150 мкм, Три средних слоя называют двойной гетероструктурой.

Когда через структуру полупроводникового лазера течет ток, возникает излучение, по мощности пропорциональное силе тока (естественное излучение). Но стоит току возрасти до некоторого порогового значения, мощность излучения резко увеличивается, а само излучение становится лазерным. Обычно пороговый ток составляет от единиц до сотен миллиампер, а мощность лазерного излучения, как правило, несколько десятков милливатт. Излучение почти всегда монохроматическое (одномодовое), а длина волны определяется свойствами материалов лазерной структуры. Изменяя силу тока, можно изменять выходную мощность лазера, что позволяет производить непосредственную модуляцию излучения. Модулирующие частоты могут достигать единиц гигагерц.

Если плюс источника тока приложен к p -области, а минус — к n -области, то в p -область инжектируют дырки, а в n -область электроны, идущие по направлению к активному слою. Как показано на рис. 52, активный слой GaAs находится между слоями вещества $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, имеющего большую ширину запре-

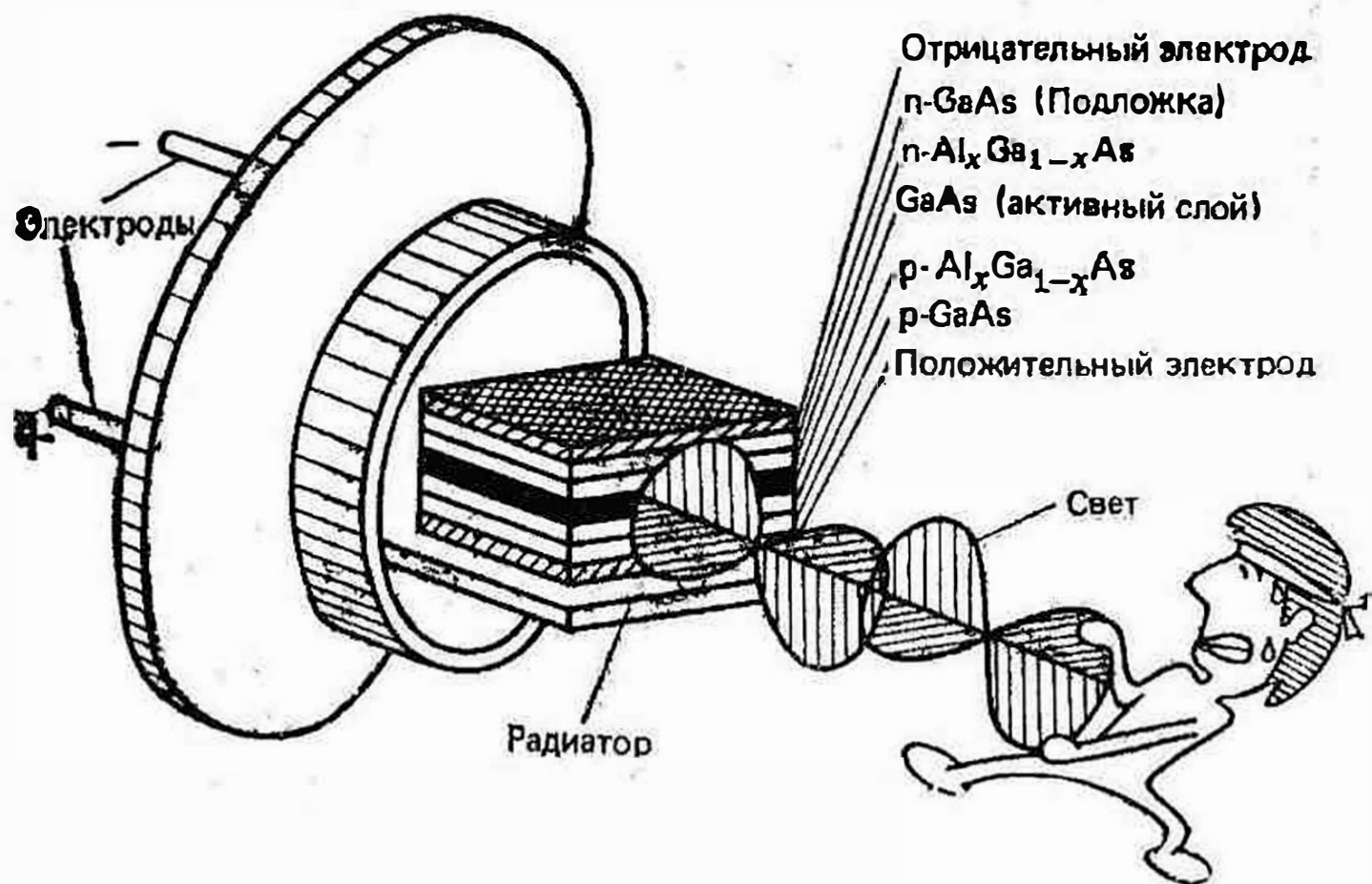


Рис. 51. Полупроводниковый лазер

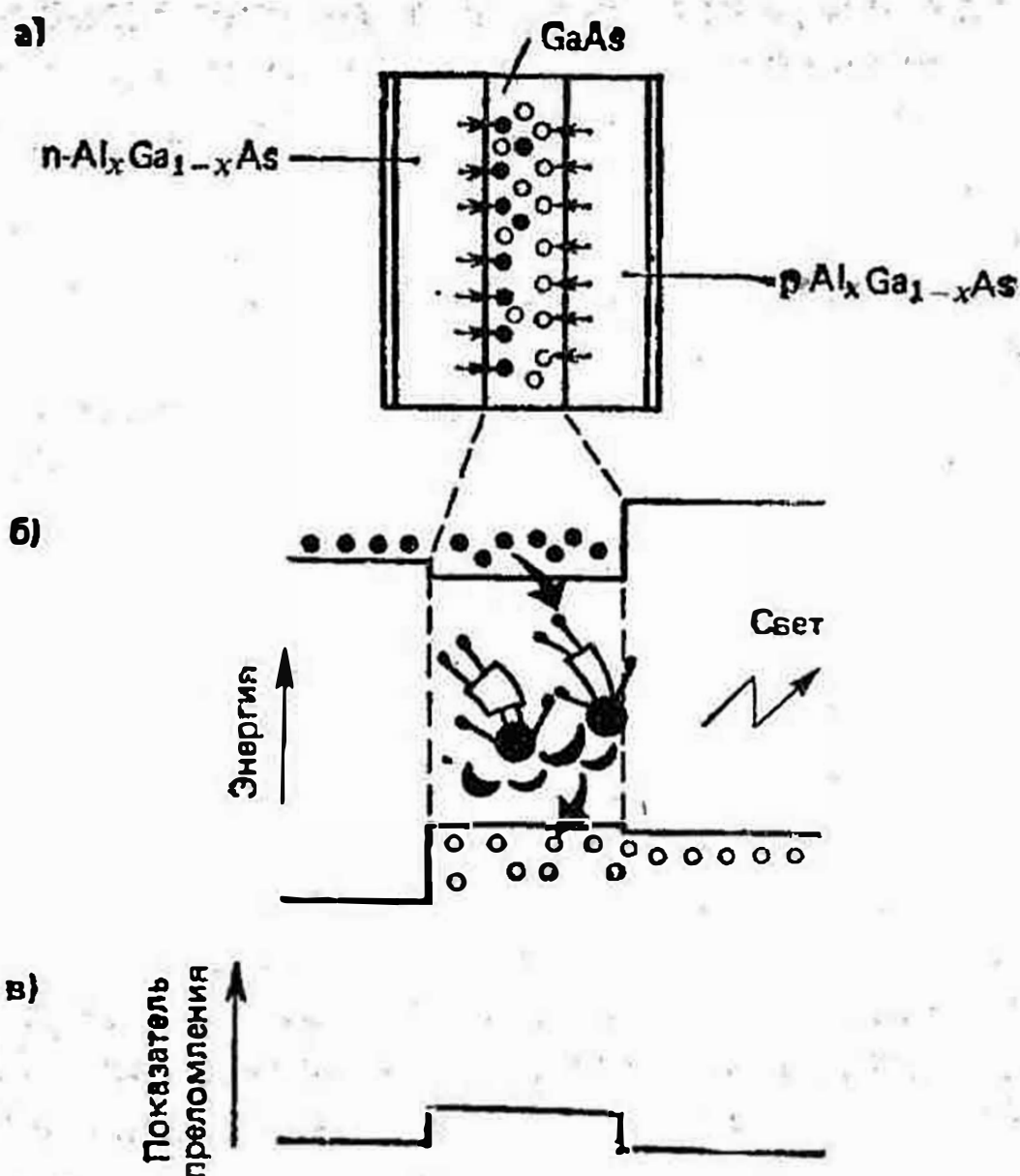


Рис. 52. Лазер с двойным гетеропереходом: а — структура; б — рекомбинация; в — распределение показателя преломления

щенной зоны. Поэтому по обе стороны активного слоя вблизи поверхности возникают потенциальные барьеры и почти все электроны и дырки рекомбинируют в активном слое, излучая свет с длиной волны, практически соответствующей ширине запрещенной зоны (0,9 мкм). Из-за высокого показателя преломления активного слоя излучение не выходит в другие области структуры и усиливается в нем благодаря вынужденному излучению. Свет достигает *плоскостей спайности* (границ активного слоя) и, отражаясь от них, не выходит в другие слои структуры. Когда сопутствующая этому процессу добавка энергии становится выше потерь, возникает когерентное лазерное излучение.

Длина волны лазерного излучения определяется материалом активного слоя. Например, активный слой из $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ дает длину волны в пределах 0,6—0,9 мкм, $\text{InGa}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ — от видимого красного до 1,6 мкм, $\text{Pb}_x\text{Se}_{1-x}\text{Te}$ — от 2 до 10 мкм при температуре жидкого азота. Полупроводниковый лазер ра-

ботает как источник света в оптиковолоконной связи. Так как оптические волокна состоят из кварцевых нитей с минимальными потерями в области длин волн 1,0—1,6 мкм, то лучше всего применять лазеры с активным слоем из $\text{InGa}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{P}_y$. Другое возможное применение полупроводникового лазера — источник света в оптическом адаптере. Здесь используют то, что свет по-разному отражается от разных бороздок, заключающих в себе информацию (изображение или звук).

Что такое полосковый лазер?

Полосковый лазер — это полупроводниковый лазер с выделенной в активном слое каким-либо способом полоской (областью), через которую проходит ток и где генерируется излучение (рис. 53, а, б).

В обычных полупроводниковых лазерах возможна перестройка спектра и генерация в широком диапазоне за счет выбора компонентов p — n -перехода. Но из-за неоднородности структуры полупроводниковых соединений рабочая область может уменьшиться до очень малых размеров, что приводит к срыву генерации. В лазерах с полосковой структурой этого недостатка нет, а кроме того, требуется меньшая мощность для генерации излучения. Однако в полосковых лазерах (рис. 53, а, б) при усилении тока область его протекания расширяется по мере удаления от контакта (показано стрелками), что вызывает генерацию поперечных мод. Поперечные моды не дают излучения и могут вызвать срывы генерации. Для обеспечения устойчивой генерации основных мод созданы различные виды полосковых лазеров.

Все они разделяются по принципу работы волновода: усиление тока и рефракция. Примеры усиливающего волновода — волновод, полученный диффузией цинка в структуру полупроводникового лазера (рис. 53, б), и волновод, созданный повышением сопротивления областей структуры (заштрихованных, рис. 53, в) путем облучения их протонами. Усиливающий волновод можно создать также, окисляя поверхность наружного слоя и оставляя полосу для омиче-

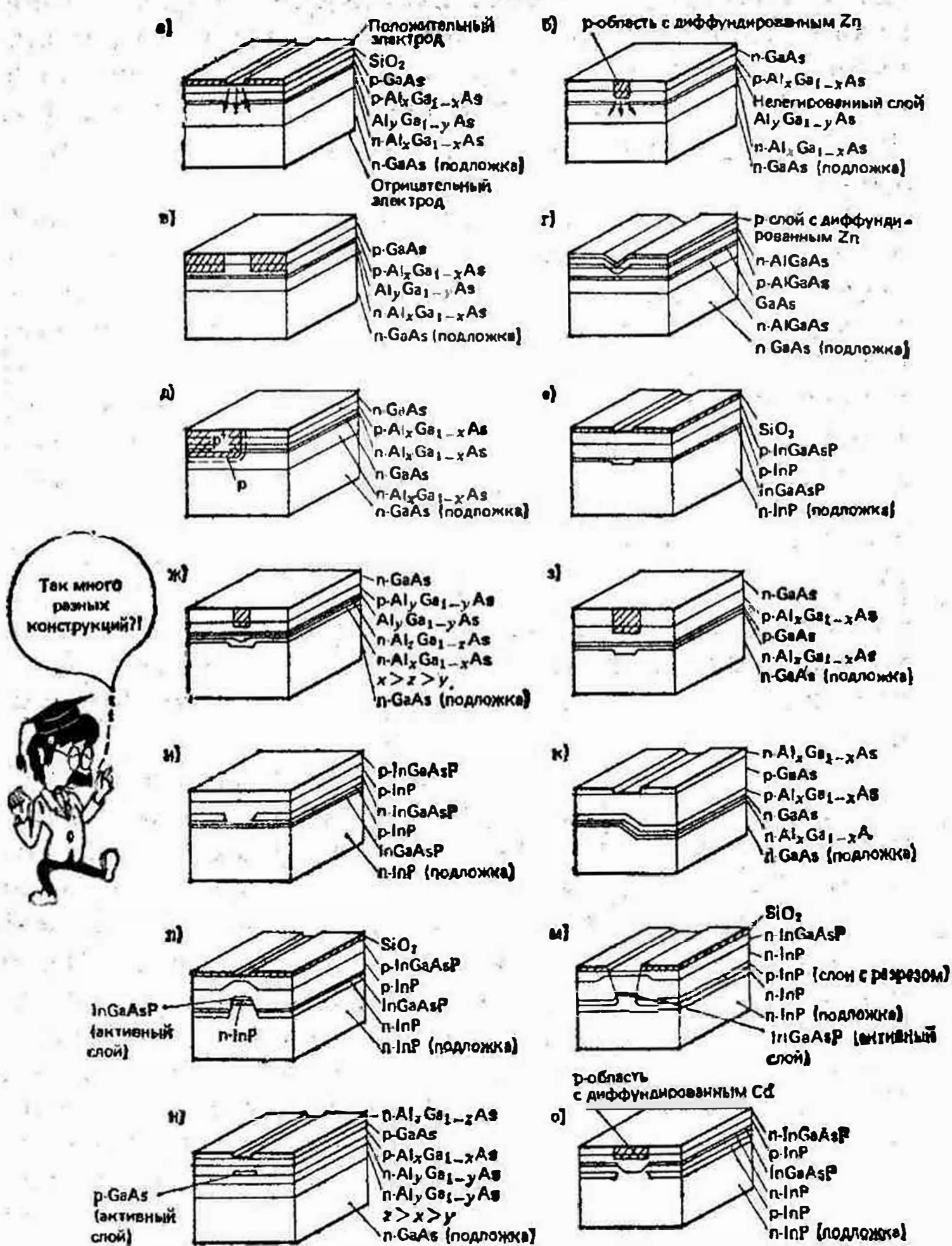


Рис. 53. Структуры полосковых лазеров: а — полоса SiO₂; б — полоса примеси; в — полоса, облученная пучком протонов; г — V-образная канавка; д — TJS-полоса (Transverse Junction Stripe); е — полоса в виде ребра; ж — PCW-полоса (Plano Complex Waveguide); з — CSP-полоса (Chanal Substrate Planar); и — самопроникающая полоса; к — TS-полоса (Terraced Substrate); л — врезанная полоса; м — ВН-полоса (Buried Hetero); н — SBH-полоса (Strip Buried Hetero); о — ВС-полоса (Buried Crescent)

ского контакта (*гетероизоляционную полосу*). Еще один способ — создание очень узкого токового канала путем повышения напряженности электрического поля вблизи ребра углубления с V-образным профилем, вытравленного в четвертом снизу слое (рис. 53, г).

Рефракционный волновод имеет распределенный показатель преломления. Это достигается одним из следующих способов: 1) легированием; 2) частичным утолщением слоев; 3) поглощением света, выходящего из активного слоя, другими слоями; 4) размещением волновода в веществе с более низким, чем у него, показателем преломления. Вторым из перечисленных способов создается так называемая *эффективная разность показателей преломления*.

Одна из реализаций первого способа — диффузия цинка с поверхности в глубь структуры (глубже активного слоя). Помимо неодинакового преломления наличие зоны диффузии (рис. 53, д) приводит к тому, что ток протекает только в другой половине структуры (показано стрелкой).

При втором способе выращивают активный слой на подложке с предварительно вытравленным каналом (рис. 53, е) или на такой же подложке делают слой с волнообразным профилем, отводящий излучение, просочившееся из активного слоя (рис. 53, ж).

При третьем способе также делают углубление в подложке. Форма первого от подложки слоя, утолщенного полосой посередине, приводит к потерям вышедшего за пределы полосы излучения (рис. 53, з). Поглощение света можно также реализовать, сделав щель в третьем от подложки слое и заполнив ее веществом, из которого вырастет слой, находящийся непосредственно на активном (рис. 53, и). Еще один пример — выращивание активного слоя на подложке со склоном (рис. 53, к).

Примеры реализации четвертого способа: 1) метатравлением делают выступ в подложке, а затем выращивают слои структуры (рис. 53, л); 2) протравив канал до четвертого сверху слоя, выращивают в нем слои структуры (рис. 53, м); 3) делают активный слой в виде полоски, скрытой под другим слоем (рис. 53, н); 4) вырастив на подложке активный слой, протравливают его так, что под ним образуется

канал с профилем в виде «трехдневной луны», и затем выращивают остальные слои (рис. 53, *б*).

Все описанные выше конструкции полосковых лазеров — это разработки на уровне патентов. Производство их начнется с появлением материалов более высокого качества и упрощением технологии.

Что такое полупроводниковый лазер с распределенной обратной связью?

Лазер — это генератор световых волн. Функционально генератор представляет собой усилитель и систему положительной обратной связи. Системы обратной связи бывают дискретными — в виде расположенного вне лазерной среды оптического резонатора, состоящего в большинстве случаев из зеркал (в полупроводниковом лазере — это плоскости спайности), и распределенными — в виде структуры, где отражение создается периодическим изменением показателя преломления вдоль пути света. Полупроводниковые лазеры с такой системой — это и есть полупроводниковые лазеры с распределенной обратной связью.

Структура с распределенной обратной связью показана на рис. 54, *а*. Это волновод с выступами и впадинами в виде дифракционной решетки. Чтобы ее период удовлетворял условиям Брэгга, должно вы-

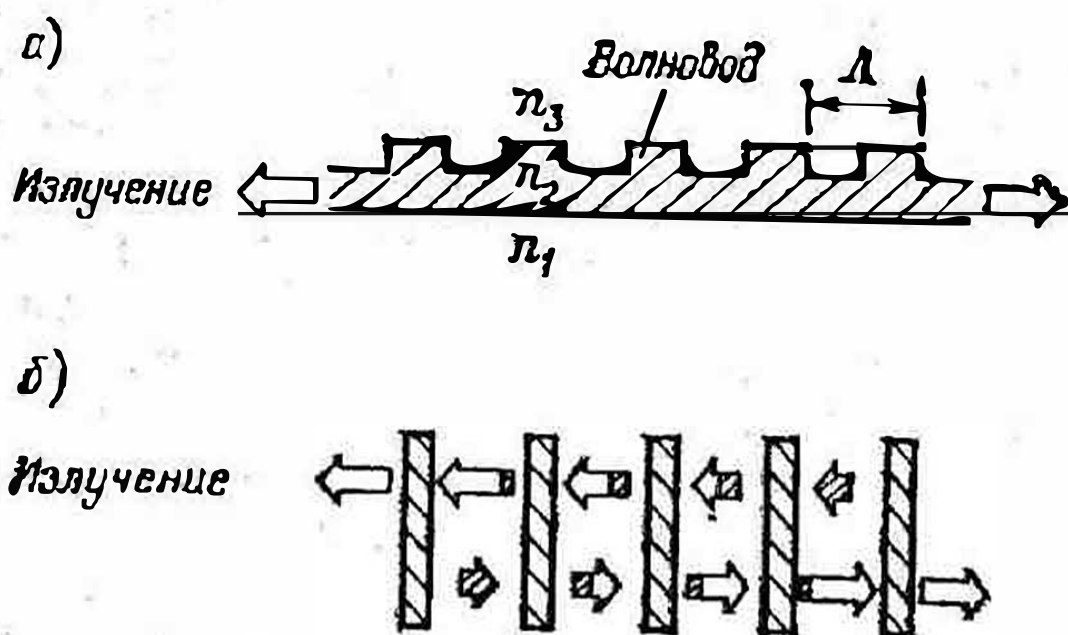


Рис. 54. Лазерная генерация в волноводе с периодической структурой

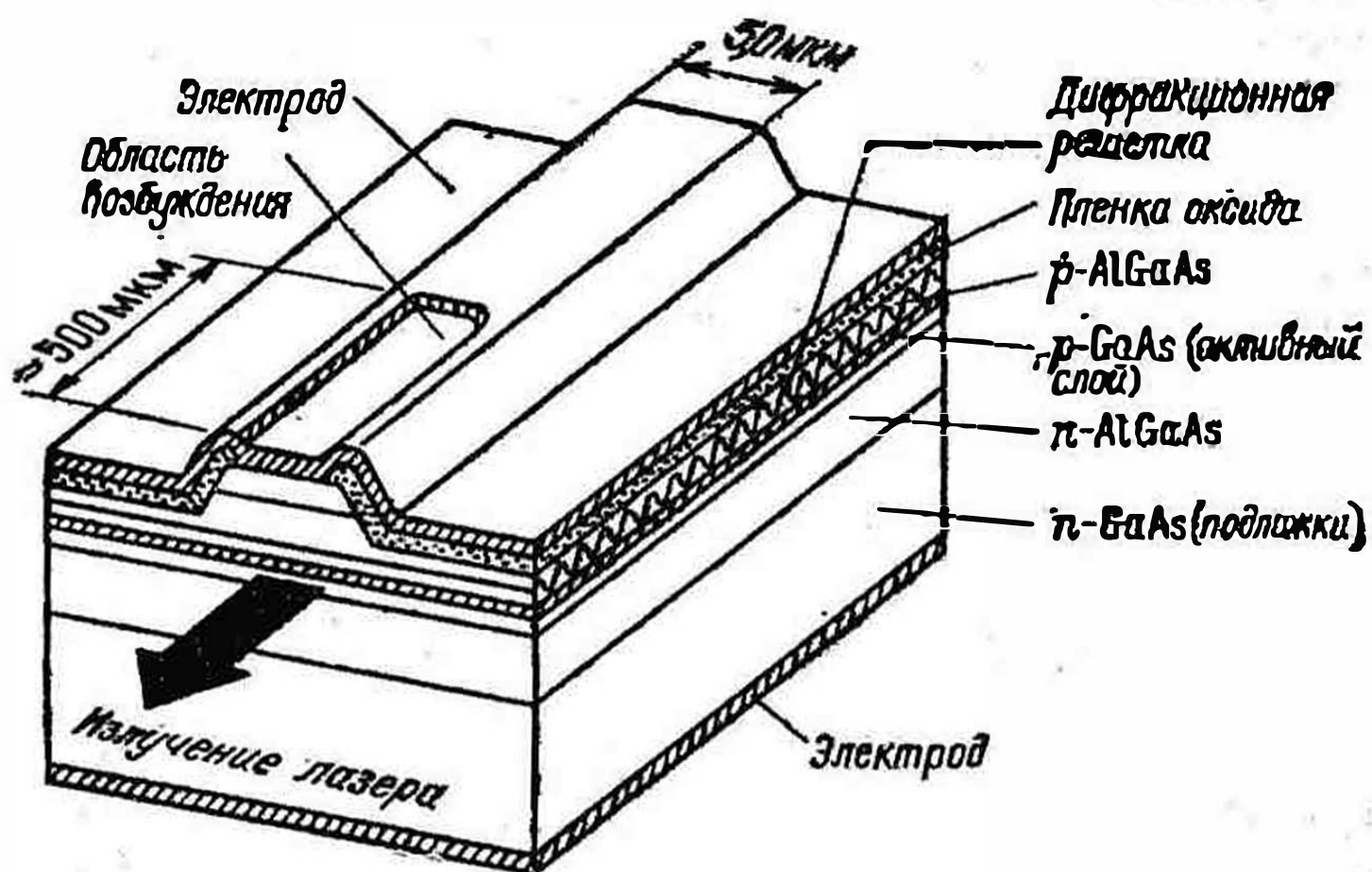


Рис. 55. Полупроводниковый лазер с распределенной обратной связью (N. Nakamura *а. оth.*, Appl. Phys. Lett., vol. 27, No. 403, 1975)

полняться соотношению $\Lambda = l\lambda_0 / (2n_{\text{эф}})$, где Λ — период решетки, λ_0 — длина световой волны в вакууме, $n_{\text{эф}}$ — эффективный показатель преломления волновода, l — порядок дифракции. Световая волна, проходящая по такому волноводу, рассеивается всеми точками дифракционной решетки. При $l = 1$ (первый порядок) рассеяния происходит в направлении распространения света и в противоположном, а при $l = 2$ (второй порядок) — также и в перпендикулярном к предыдущему направлению. Во многих точках свет понемногу рассеивается в противоположных направлениях, но в целом получается рассеяние большой интенсивности. Схема, показанная на рис. 54, б, генерирует лазерные колебания с помощью распределенной обратной связи.

Материалы для лазеров с распределенной обратной связью — $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$, $\text{PbSn}_x\text{Te}_{1-x}$ и им подобные. Пример лазерной структуры из $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с распределенной обратной связью показан на рис. 55. Период решетки в этой структуре 0,3814 мкм (третий порядок). Структуру, дающую распределенную обратную связь, выращивают непосредственно на активном слое способом эпитаксии в жидкой фазе. На эпитаксиальную пленку наносят фоторезист, а в качестве фотошаблона решетки исполь-

зуют картину интерференции лазерного света. Травлением делают выступы, и после этого изготавливают лазерную структуру, нанося сверху необходимые слои способом эпитаксии в жидкой фазе. Лазер со структурой, показанной на рис. 55, дает непрерывное излучение. В противоположность лазеру с дискретной обратной связью, часто дающему *мультимодовое излучение*, лазер с распределенной обратной связью дает *одномодовое излучение*, причем с более высокой селективностью длины волны. Кроме того, при изменении силы тока длина волны почти не меняется. В лазере с дискретной обратной связью длина волны определяется шириной энергетической щели, а следовательно, сильно зависит от температуры. В лазере с распределенной обратной связью длина волны определяется показателем преломления и от температуры практически не зависит.

Одно из применений распределенной обратной связи — это лазер, в котором такая система расположена с двух сторон активного слоя. Это *лазер с распределенным брэгговским отражением*.

Из-за того что в лазерах с распределенной обратной связью и с распределенным брэгговским отражением не используются для обратной связи плоскости спайности (эту функцию выполняет сам волновод), появляется возможность создания на одной подложке и волновода, и лазера. Такие структуры можно использовать в качестве источника света в оптических интегральных схемах.

Что такое квантовый колодец в полупроводниковом лазере?

Квантовый колодец в полупроводниковом лазере — это квантовомеханическое явление, при котором активный слой лазера становится дном *потенциальной ямы*. Квантовый колодец возникает в полупроводниковых лазерах с двойной гетероструктурой и очень тонким активным слоем (толщиной в несколько сотен ангстрем, например 0,02 мкм). Лазеры этого типа делятся на *лазеры с одиночным квантовым колодцем* и *лазеры с мультиквантовым колодцем*.

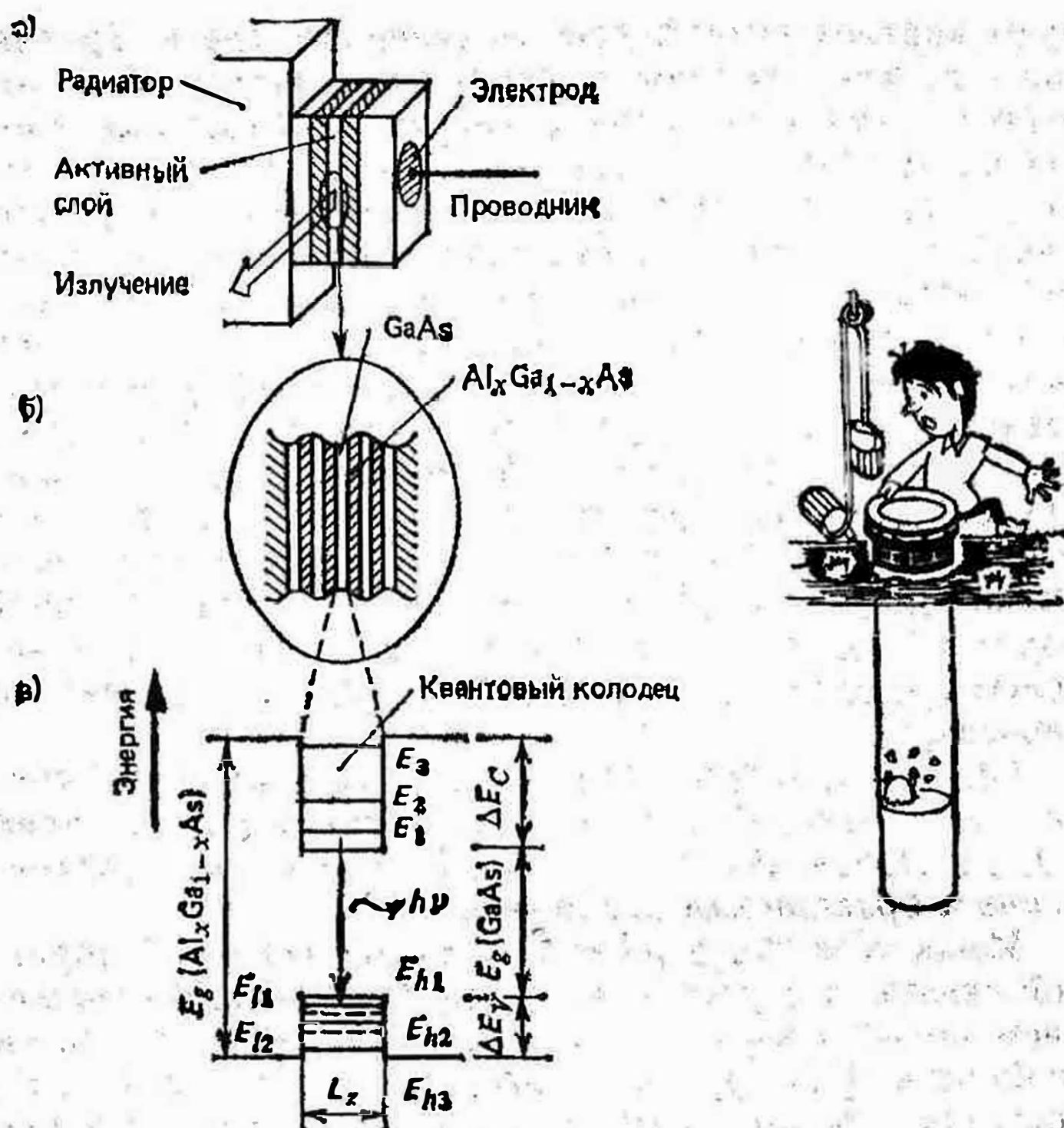


Рис. 56. Полупроводниковый лазер с мультиквантовым колодцем: а — двойная гетероструктура; б — активный слой (слой с мультиквантовым колодцем); в — дискретные уровни в квантовом колодце

В структуре первого только один слой с квантовым колодцем — активный слой, структура второго содержит много слоев с квантовыми колодцами, разделенных барьерными слоями.

На рис. 56 показана структура лазера с мультиквантовым колодцем и типичный вид зоны проводимости и валентной зоны очень тонкого слоя GaAs, зажатого между слоями $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Если ширина колодца L_z меньше длины дебройлевой волны электрона ($\lambda_p = h/p$), то квантование переноса электронов на дно колодца становится двухмерным, и в колодце возникают энергетические уровни, как показано на рис. 56. Уровни E_{hn} соответствуют тяжелым



Рис. 57. Двухмерная (сплошная линия) и трехмерная (штриховая линия) плотность электронных состояний

дыркам, а E_{ln} — легким. Плотность состояний¹ становится ступенчатой (рис. 57). Для всех трех типов носителей она пропорциональна корню квадратному из энергии (см. штриховую линию на рисунке). В структуре с квантовым колодцем плотность состояний у края зоны гораздо выше, чем в обычной трехмерной структуре.

При изготовлении лазеров с квантовым колодцем не обойтись без технологии получения сверхтонких пленок, это молекулярно-лучевая эпитаксия, химическое осаждение газообразной металлоорганики, эпитаксия в жидкой фазе. Материалами для изготовления лазеров с квантовыми колодцами служат системы $\text{GaAs} - \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{P}_y$. Например, в опытном образце лазера с одним квантовым колодцем на системе с арсенидом галлия при $L_z = 0,02$ мкм, $x = 0,52$ пороговая плотность тока та же, что и в обычном лазере — $1,5 \cdot 10^3$ А/см². Изготовлены опытные образцы лазера с пятью слоями GaAs и с тринадцатью слоями InGaAsP.

Основные достоинства полупроводникового лазера с квантовым колодцем:

1. При выращивании структуры регулируется ширина L_z и глубина ΔE квантового колодца. Благодаря этому в проекте лазеры с определенной длиной волны излучения. В частности, становится возможным переход в область более коротких длин волн.

2. При изменении температуры плотность тока меняется незначительно. Это связано со ступенчатым распределением плотности состояний, возрастающей к краю зоны.

3. Велик дифференциальный КПД выхода (80 %). Причиной считают то, что квантовый колодец соби-

¹ Количество состояний в единице объема, отнесенное к единице энергии,

рает много носителей, благодаря чему повышается коэффициент рекомбинации.

4. Возможно одномодовое излучение не в полосковой, а в ширококонтактной структуре.

5. Практически линейная зависимость мощности излучения от силы тока. Нелинейности не наблюдалось.

Что такое газовый лазер?

Газовый лазер — общее название всех лазеров с газообразной лазерной средой. Существует множество видов таких лазеров. Они очень удобны в работе, поэтому большинство из них коммерческие.

Лазеры на благородных газах генерируют с помощью энергетических уровней газов, подобных гелию. В гелий-неоновом лазере (рис. 58) для генерации увеличивают энергию части атомов неона, возбуждая газовую смесь тлеющим разрядом. Гелий добавлен в смесь для облегчения возбуждения. Атомы неона имеют более 120 спектральных линий — от 0,594 мкм в видимой до 133 мкм в инфракрасной области спектра. Коммерческие лазеры дают спектральную линию 0,6328 мкм и выходную мощность от одного до нескольких десятков милливатт. Они широко распространены.

Ионный лазер осуществляет генерацию возбуждением рабочего тела до уровня ионизации. *Ионные лазеры на инертных газах* (аргон, криптон или ксенон) могут давать непрерывное излучение в видимом диапазоне с высокой выходной мощностью. Обычно у коммерческих лазеров на аргоне (рис. 59) две мощные линии — 0,4880 мкм (синяя) и 0,5145 мкм (зеленая). Мощность каждой из них несколько ватт. Для



Рис. 58. Гелий-неоновый лазер

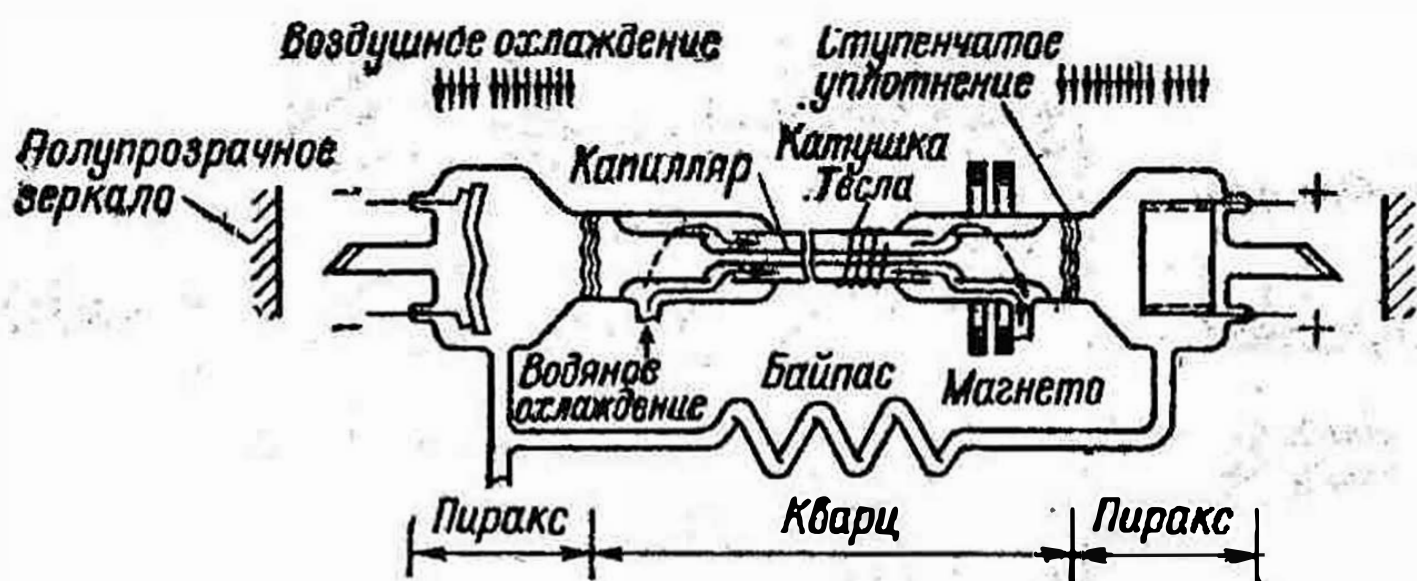


Рис. 59. Аргоновый лазер

возбуждения применяют дуговой разряд, имеющий высокую плотность тока и малое напряжение. У таких лазеров КПД мал, примерно 0,1 %, источник питания больших размеров. Лазерная трубка должна выдерживать разряды с большой силой тока, что увеличивает ее цену.

Лазеры на металлических ионах работают за счет ионного возбуждения, возникающего в положительной колонне разряда смеси газа — гелия или неона — с парами металла. Используют такие металлы, как кадмий, цинк, селен, теллур, ртуть. В частности, коммерческий гелий-кадмиевый лазер (рис. 60) имеет спектральные линии, 0,3250 мкм (ультрафиолетовая) и 0,4416 мкм (зеленая).

Молекулярные лазеры работают за счет вращательной и колебательной энергии молекул. Лазер на углекислом газе излучает в инфракрасной области — 10,6 и 9,6 мкм. У него высокий КПД, составляющий несколько десятков процентов, и высокая выходная мощность. Производят различные модификации та-

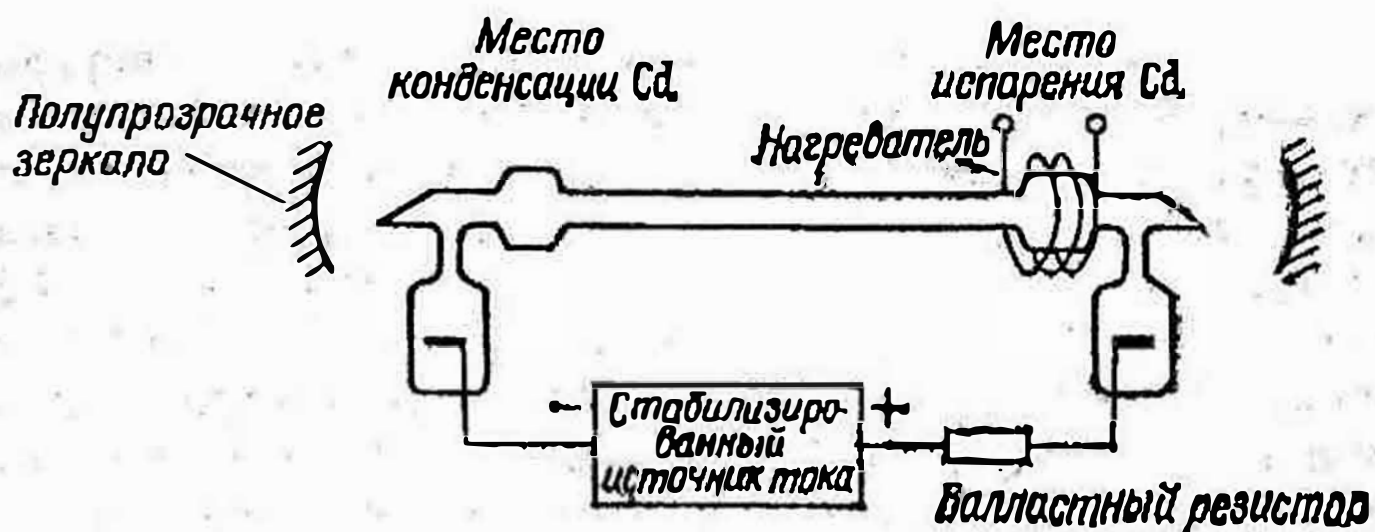


Рис. 60. Гелий-кадмиевый лазер

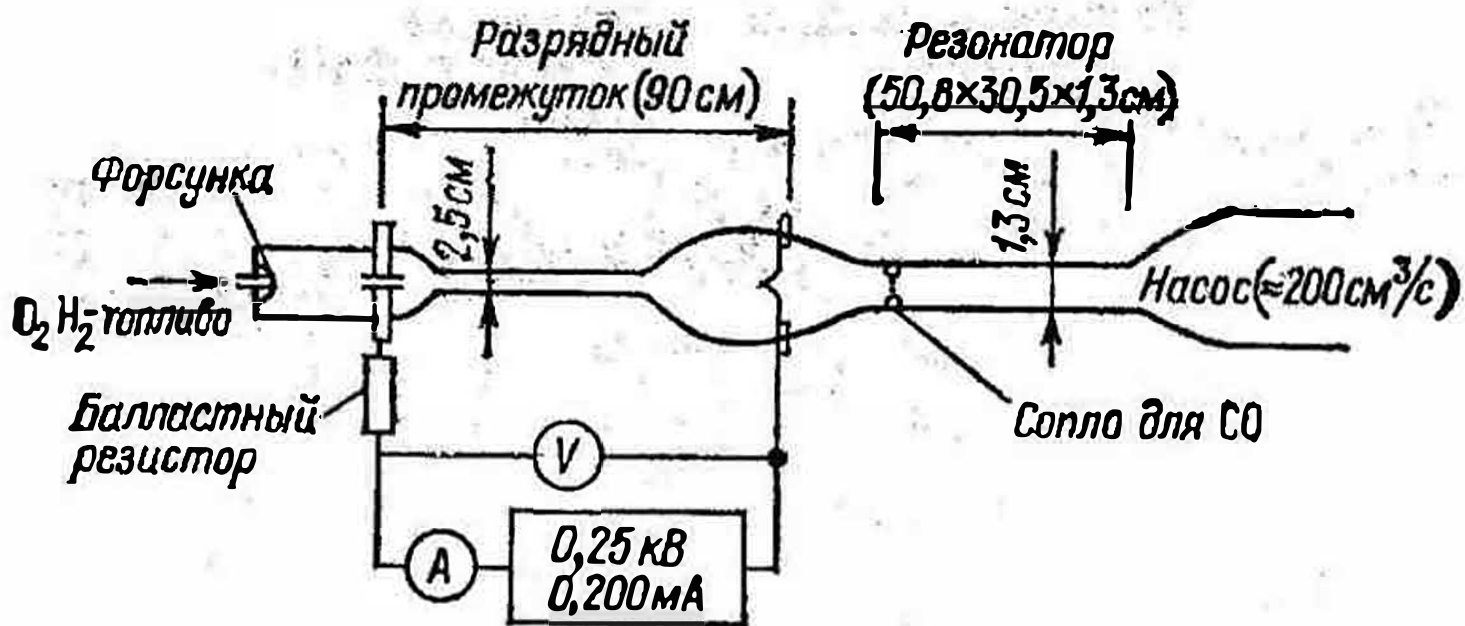


Рис. 61. Лазер на угарном газе

ких лазеров. Для их возбуждения используют химические реакции или электрический разряд. Чтобы получить высокую выходную мощность, поток газа разгоняют до высоких скоростей, или производят поперечное возбуждение, или осуществляют разряд, управляемый электронными пучками. *Лазер на угарном газе* излучает на линии 5 мкм и имеет высокий КПД — свыше 40 %. Схема молекулярного лазера показана на рис. 61. Импульсный лазер на азоте дает излучение в ультрафиолетовой области (0,3371 мкм) с мощностью от нескольких сотен киловатт до единиц мегаватт.

К газовым лазерам относятся также и эксимерные, о которых будет рассказано в следующем параграфе.

Что такое эксимерный лазер?

Эксимерные лазеры используют энергию *эксимеров* — двухатомных молекул со слабой связью между атомами. Это могут быть атомы одного или двух элементов, например криптона и фтора, кривые потенциальной энергии которых показаны на рис. 62. Атом криптона в возбужденном состоянии (Kr^*) и атом фтора в основном (F) образуют возбужденную молекулу типа $(\text{KrF})^*$ — эксимер. В эксимерном лазере (рис. 63) переход молекул из эксимерного состояния в основное сопровождается индуцированным

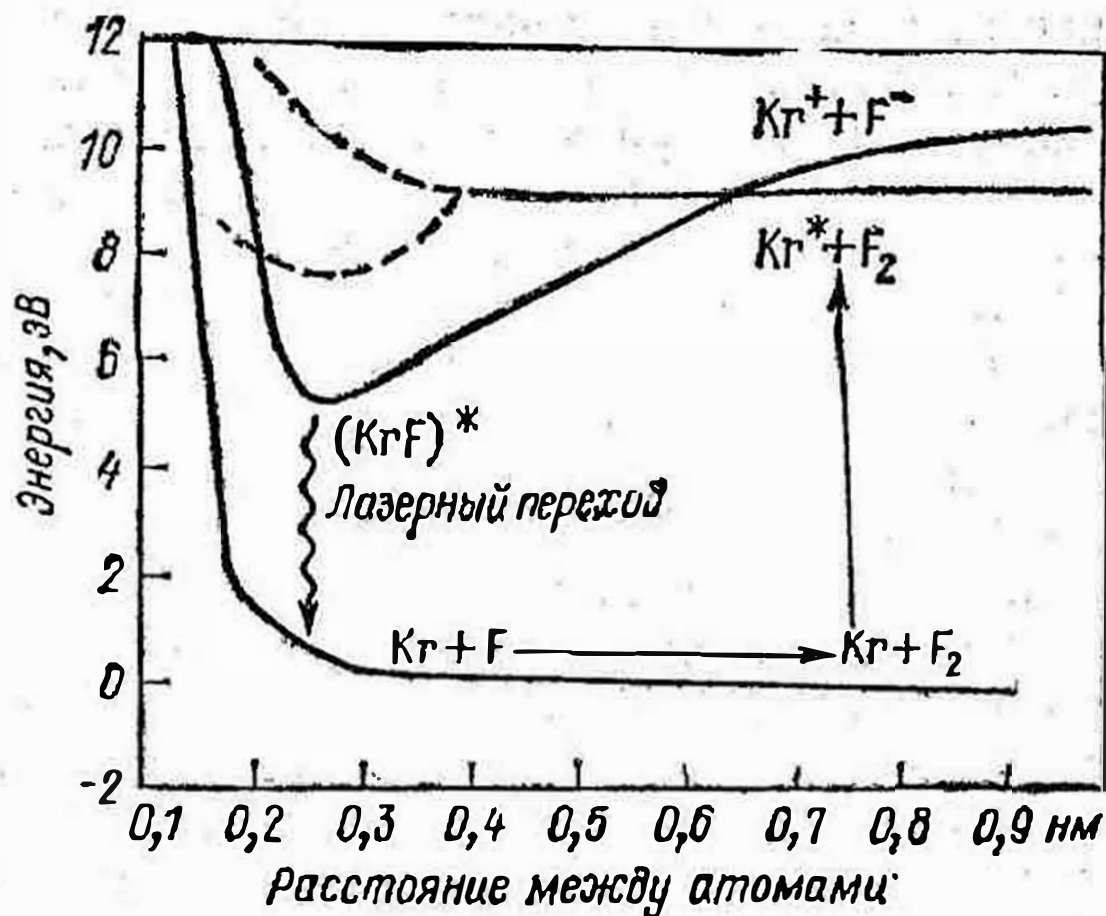


Рис. 62. Энергия связи между атомами Кг и F в зависимости от межатомного расстояния

излучением в ультрафиолетовой области. Расстояние между атомами эксимера составляет примерно 0,25 нм (2,5 Å), что меньше расстояния действия сил Ван-дер-Ваальса в основном состоянии 0,4—0,5 нм (4—5 Å). Состояние КгF крайне неустойчиво, и молекула легко делится на атомы. В этом смысле эксимерные лазеры — это лазеры, использующие связанно-свободный переход.

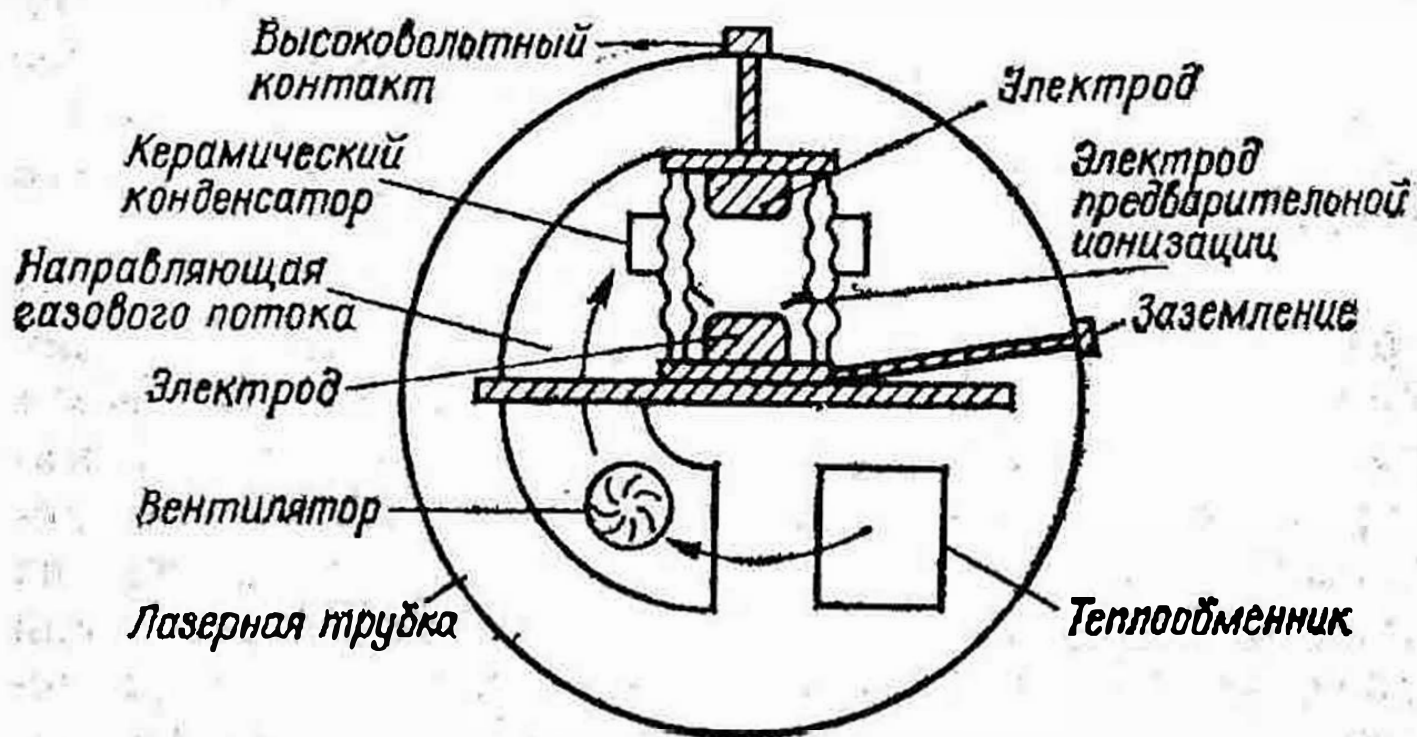


Рис. 63. Эксимерный лазер, возбуждаемый электрическим разрядом

Существует несколько типов эксимерных лазеров: 1) на эксимерах из атомов одного элемента; длина волны излучения лазера зависит от элемента (Xe — 172, Ar — 126, Kr — 146 нм); 2) гетероэксимерные лазеры с эксимерами из двух атомов разных элементов (KrF XeO); 3) лазеры, работающие за счет переноса энергии ($\text{He}^+ - \text{N}_2$). Наиболее распространены гетероэксимерные лазеры, в частности лазеры на галоидах инертных газов (KrF — 248, XeCl — 308, KrBr — 282 нм).

Для получения эксимеров применяются самые разные способы — облучение жидкой или газообразной среды пучком электронов с высокой энергией, ионизация, рекомбинация, преобразование энергии и др. Рассмотрим, например, получение эксимера KrF. Он возникает при облучении пучком электронов с энергией в несколько сотен килоэлектрон-вольт смеси газов — аргона, криптона и фтора в объемном соотношении 100 : 10 : 0,3 и находящейся под давлением от одной до нескольких атмосфер. Возбуждением посредством электрического разряда получают эксимеры в смеси гелия, криптона и фтора с соотношением парциальных давлений 1000 : 10 : 1 и под общим давлением в одну атмосферу.

Особенности эксимерного лазера: ультрафиолетовое излучение с малой длиной волн, которое трудно получить в лазерах другого типа; большая выходная мощность за счет высокого рабочего напряжения и способности эксимеров накапливать энергию; высокий КПД, из-за того что эксимер в возбужденном состоянии устойчив, а затем распадается, давая излучение без поглощения; луч с большим сечением ($5 \times 5 - 10 \times 10 \text{ см}^2$) за счет больших размеров рабочего элемента.

Эксимерный лазер используют как источник ультрафиолетовых лучей с высоким КПД для исследования молекул, для излучения мягких рентгеновских лучей, в лазерном ядерном синтезе, при синтезе материалов. В настоящее время он испытывается в процессах полупроводниковой технологии. Например, на полупроводнике InP *p*-типа осаждают кадмий или цинк, создающие омические контакты, путем разложения газа $\text{Cd}(\text{CH}_3)_2$ или $\text{Zn}(\text{CH}_3)_2$ импульсным излучением лазера на эксимере ArF (193 нм).

Что такое твердотельный лазер?

Твердотельный лазер — это лазер с твердым рабочим телом, содержащим активные ионы, за счет которых происходит усиление света. (Полупроводники — тоже твердые тела, но полупроводниковые лазеры из-за способа возбуждения не считают твердотельными.) В качестве рабочего тела используют среды, связывающие активные ионы, — так называемые *матричные среды*. Это могут быть кристаллы или аморфные тела, подобные стеклам. Например, рубиновый лазер, самый первый в истории, работал на сапфировой (Al_2O_3) матрице с ионами Cr^{3+} в качестве активных центров.

Твердотельный лазер возбуждают светом. Схема его конструкции показана на рис. 64. Она состоит из лазерного стержня, источника световой накачки, отражателя для повышения эффективности световой накачки и резонатора из двух полупрозрачных зеркал. Активные ионы в лазерной среде под действием света переходят из основного состояния в возбужденное, затем, не излучая, — в нижнее возбужденное состояние, но следующий переход вниз сопровождается излучением и называется *излучательным*. Применяя резонатор, настроенный на длину волны, соответствующую этому переходу, осуществляют лазерную генерацию.

Часто используемый лазер — это лазер на иттриево-алюминиевом гранате ($\text{Y}_2\text{Al}_2\text{O}_5$) с включением ионов неодима Nd^{3+} , так называемый *YAG: Nd³⁺-лазер*. На рис. 65 показана энергетическая диаграмма

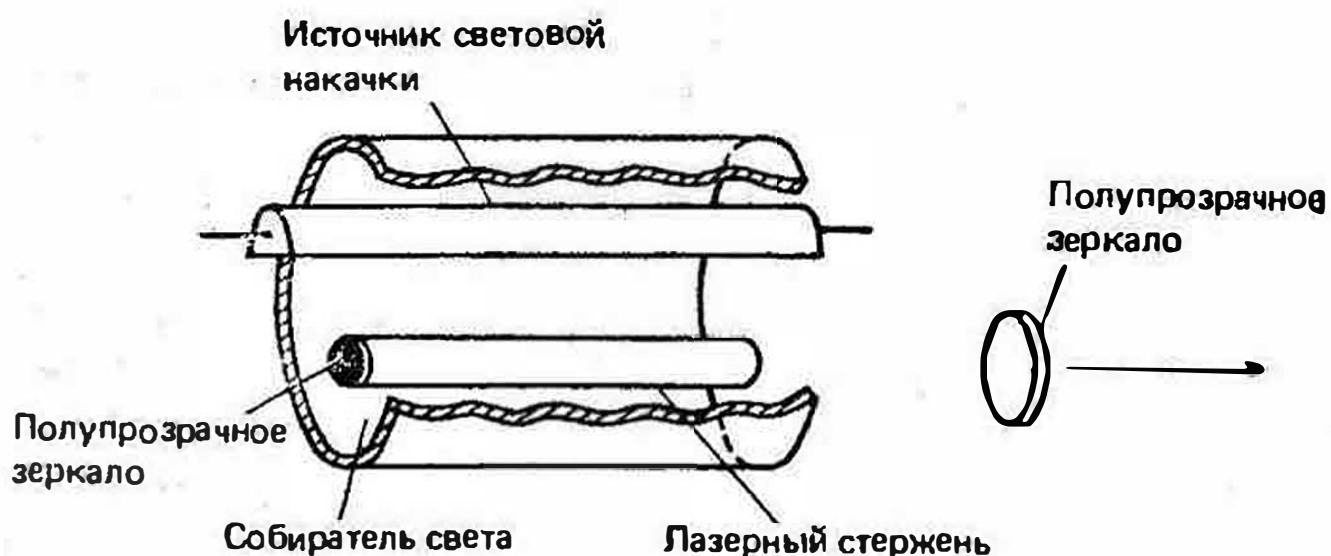
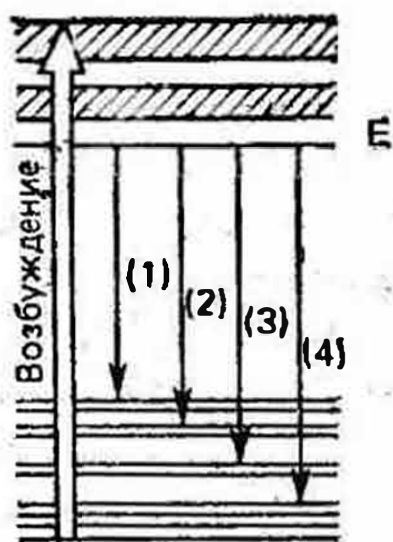


Рис. 64. Твердотельный лазер



Длина волны излучения, мкм	
(1)	1,7–2,1
(2)	1,3–1,4
(3)	1,05–1,12
(4)	0,94

Рис. 65. Диаграмма энергетических уровней $\text{YAG}:\text{Nd}^{3+}$ -лазера

этого лазера. При возбуждении все электроны собираются на уровне E , откуда осуществляются переходы (1) — (4). Среди них переход (3) захватывает 60 % всей энергии, из-за чего наиболее вероятно излучение с длиной волны 1,0684 мкм. Лазер, использующий в качестве активных ионы гольмия Ho^{3+} ($\text{YAG}:\text{Ho}$ -лазер), излучает с длиной волны 2,0975 мкм и имеет практическую ценность как пригодный для операций на сетчатке (незначительно повреждает ткани глаза). Материал $\text{YLE} (\text{LiYF}_4)$ привлекает внимание как хорошая матричная среда для активных ионов многих элементов. В качестве матричного материала применяют также стекла, поскольку их можно изготовить оптически однородными и с необходимыми оптическими и механическими свойствами. Типичный представитель — лазер на неодимовом стекле.

Монохроматичность и направленность твердотельного лазера хуже по сравнению с газовым, но выше усиление и выходная мощность (при непрерывном излучении от 10 мВт до 100 Вт, в импульсном режиме — от 1 кВт до 1 МВт, а при излучении с модулируемой добротностью — от 1 МВт до 1 ГВт).

Твердотельный лазер часто используют там, где необходима высокая выходная мощность. Так, $\text{YAG}:\text{Nd}^{3+}$ -лазер применяется для обработки материалов. Он осуществляет сверление, резку, разметку и снятие заусенцев (рис. 66). Отметим, что лазер на углекислом газе имеет значительно более высокий КПД, но в десять раз большую длину волны, поэтому неэффективен при обработке материалов. Кроме того, твердотельные лазеры применяют для отжига с целью устранения дефектов, образовавшихся в полупровод-

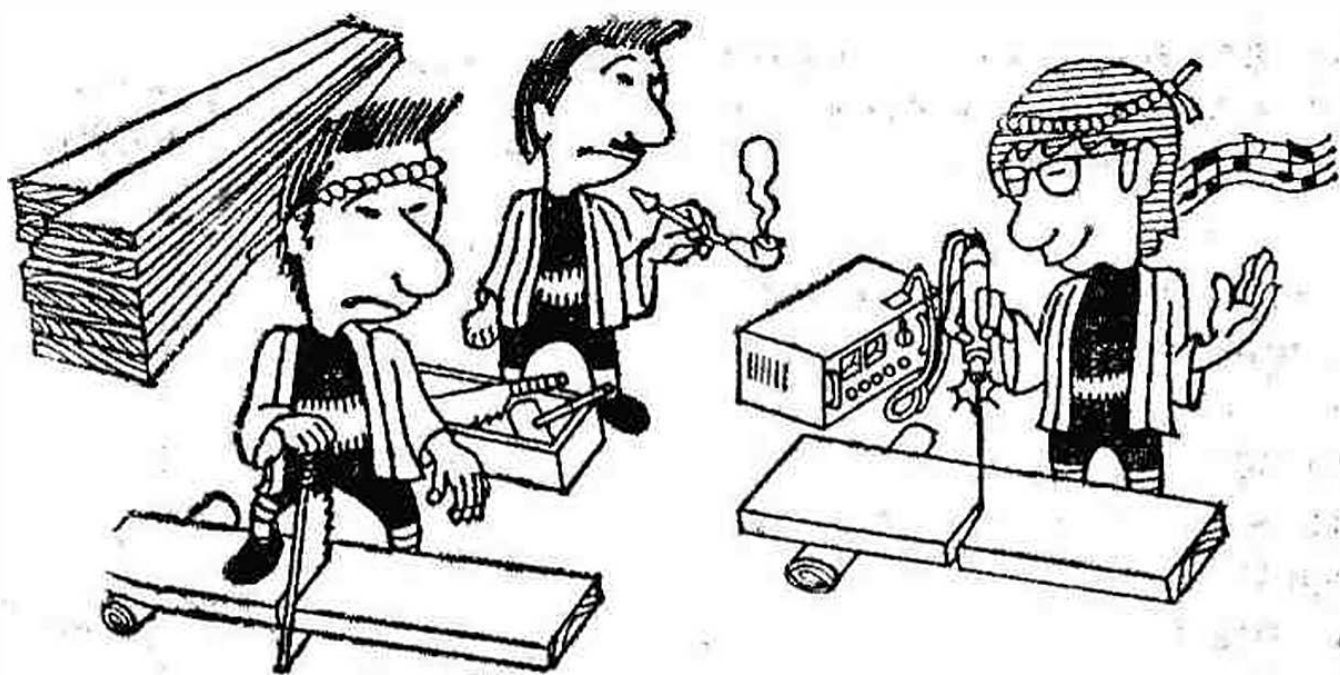


Рис. 66. Лазерная обработка материалов

нике после инъекции (*лазерный отжиг*). Для того чтобы использовать энергию ядерного синтеза, инициируют его лазерным лучом, сфокусированным для увеличения плотности энергии. Применяют для этой цели лазер на стекле.

Что такое лазер на красителях?

Лазеры на красителях, или *лазеры на красках*, используют в качестве активной среды растворы органических красителей. Впервые успешно осуществил на них лазерную генерацию в 1966 г. Сорокин с сотрудниками. В настоящее время известно свыше ста видов красителей — активных сред. Они дают лазерную генерацию в широкой области спектра — от инфракрасной до ультрафиолетовой.

Особенности лазера на красителях: благодаря широкому спектру свечения красителя длина волны лазерной генерации может изменяться в широких пределах; вследствие большого по сравнению с возбуждающим излучением поглощения велик КПД; усиление света — на уровне твердотельного лазера.

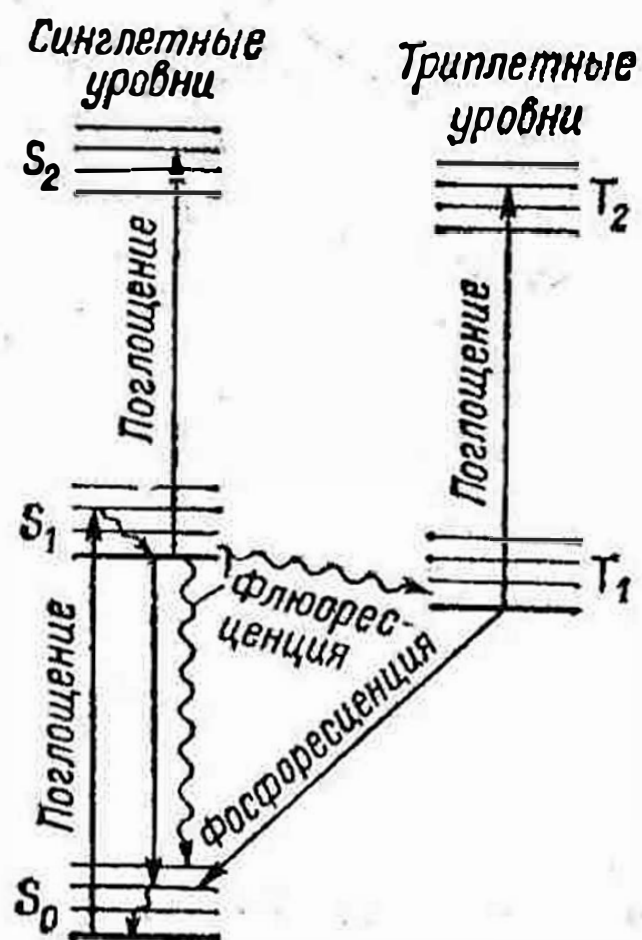
На рис. 67 показаны электронные уровни молекул красителя. Уровни синглетных (S) состояний с антипараллельными спинами и триплетных (T) состояний с параллельными спинами обозначены группами горизонтальных линий — колебательных и вращательных уровней.

Рис. 67. Диаграмма энергетических уровней молекулы красителя

При комнатной температуре и в состоянии теплового равновесия электроны красителя находятся на самом нижнем уровне. При облучении светом происходит поглощение с переходом $S_0 \rightarrow S_1$. Молекула, возбужденная до S_1 безызлучательным переходом (волнистая линия), переходит на самый низкий уровень в S_1 , а оттуда с фосфоресцентным излучением — на один из колебательно-вращательных уровней S_0 . Это излучение и используют для генерации. Молекула в состоянии S_1 кроме поглощения $S_1 \rightarrow S_2$ и безызлучательного перехода $S_1 \rightarrow S_0$ может осуществлять безызлучательный переход $S_1 \rightarrow T_1$. Эти переходы понижают квантовый выход фосфоресценции. Особенно влияет на лазерную генерацию переход $S_1 \rightarrow T_1$, поэтому, чтобы получить генерацию до того как начнет увеличиваться количество молекул в состоянии T_1 , необходимо короткое и сильное возбуждение.

В лазерах на красках применяют различные виды возбуждения. При *поперечном возбуждении* возбуждающее излучение проникает через боковую стенку ячейки, содержащей краситель, перпендикулярно выходящему лазерному излучению. При *продольном возбуждении* возбуждающее излучение направлено вдоль оптической оси лазера. Для накачки светом применяют ионный лазер с непрерывной генерацией, например аргоновый, или импульсный, например лазер на азоте. Спектр излучения лазера на красителях зависит от оптической плотности окраски рабочего тела и от коэффициента отражения зеркал, а длина волны устанавливается посредством фильтра или дифракционной решетки (рис. 68).

Материалами для лазеров на красках могут быть сцинтиллирующие полимерные красители (инфра-



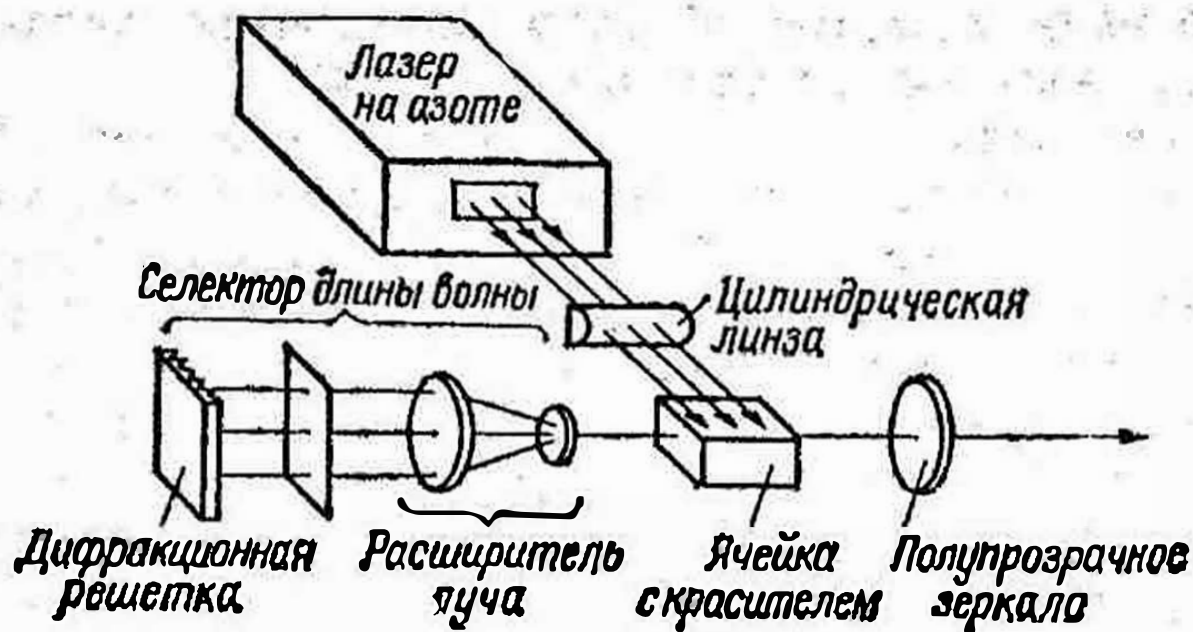


Рис. 68. Лазер на красителе, возбуждаемый излучением азотного лазера

красное излучение), соединения родамина 6Ж, родамин В, ксантиновые красители (зеленый, оранжевый свет), 4-метилумбеллиферон — производная соединений кумарина (синий цвет), полипропиленоксид (ППО) и др.

Лазеры на красителях используют, учитывая их возможности в управлении длиной волны, для получения растянутых спектров с высоким разрешением. С помощью таких спектров исследуют свойства вещества, ход химических реакций, ведут синтез различных веществ. Конкретные примеры — обнаружение загрязнения атмосферы сернистым ангидридом и другими веществами, разделение изотопов урана, кальция и других элементов избирательным возбуждением одного из изотопов. Доведя краситель до насыщения, можно получать сверхкороткие импульсы.

Что такое дисплей?

Когда мы вводим в машину информацию или получаем ее из машины, то в большинстве случаев делаем это при помощи зрения. Устройство, позволяющее зрительное восприятие информации, называют *дисплеем*. Оно является важным посредником в контактах человека с машиной (*интерфейсом «человек — машина»*). Существуют дисплеи, с подвижным изображением, подобные телевизору, и дисплеи, ото-

ображающие главным образом диаграммы, буквы и цифры, необходимые для обмена с ЭВМ.

К дисплеям предъявляется ряд требований. Изображение должно быть легко и быстро узнаваемым, скорость отображения большой, а время срабатывания незначительным. Информация должна отображаться в любом требуемом виде и легко обновляться. Дисплеи должны быть просты в наладке, надежны в эксплуатации, и позволять эффективный диалог между человеком и машиной. Эти требования не могут быть удовлетворены только электроникой, необходимы и эргономические исследования.

По принципу работы дисплеи можно разбить на два класса: *активные дисплеи*, светящиеся благодаря различным физическим явлениям в них, и *пассивные дисплеи*, работающие за счет прохождения или отражения света внешних источников.

В качестве активных дисплеев давно используют сделанные в виде различных знаков электролампы, *трубки Никиша*, работающие на тлеющем разряде, и прекрасно отображающие информацию *трубки Брауна* (рис. 69). В настоящее время к ним присоединились *люминесцентные дисплеи*, достоинство которых — малая потребляемая мощность; *светодиодная матрица* и *электролюминесцентная матрица*, а также *плазменный дисплей*. Люминесцентный дисплей (лю-

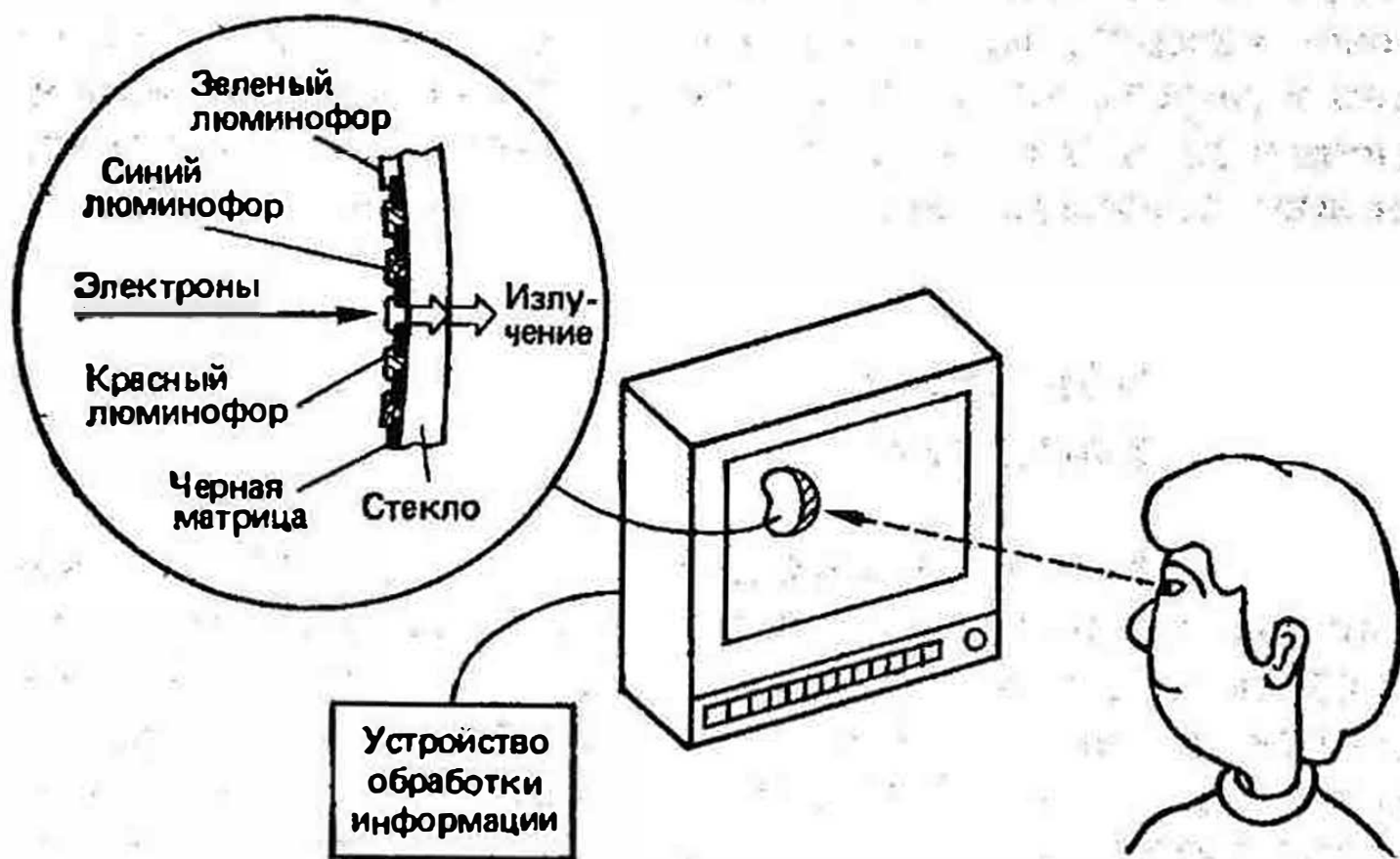


Рис. 69. Цветной дисплей на трубке Брауна

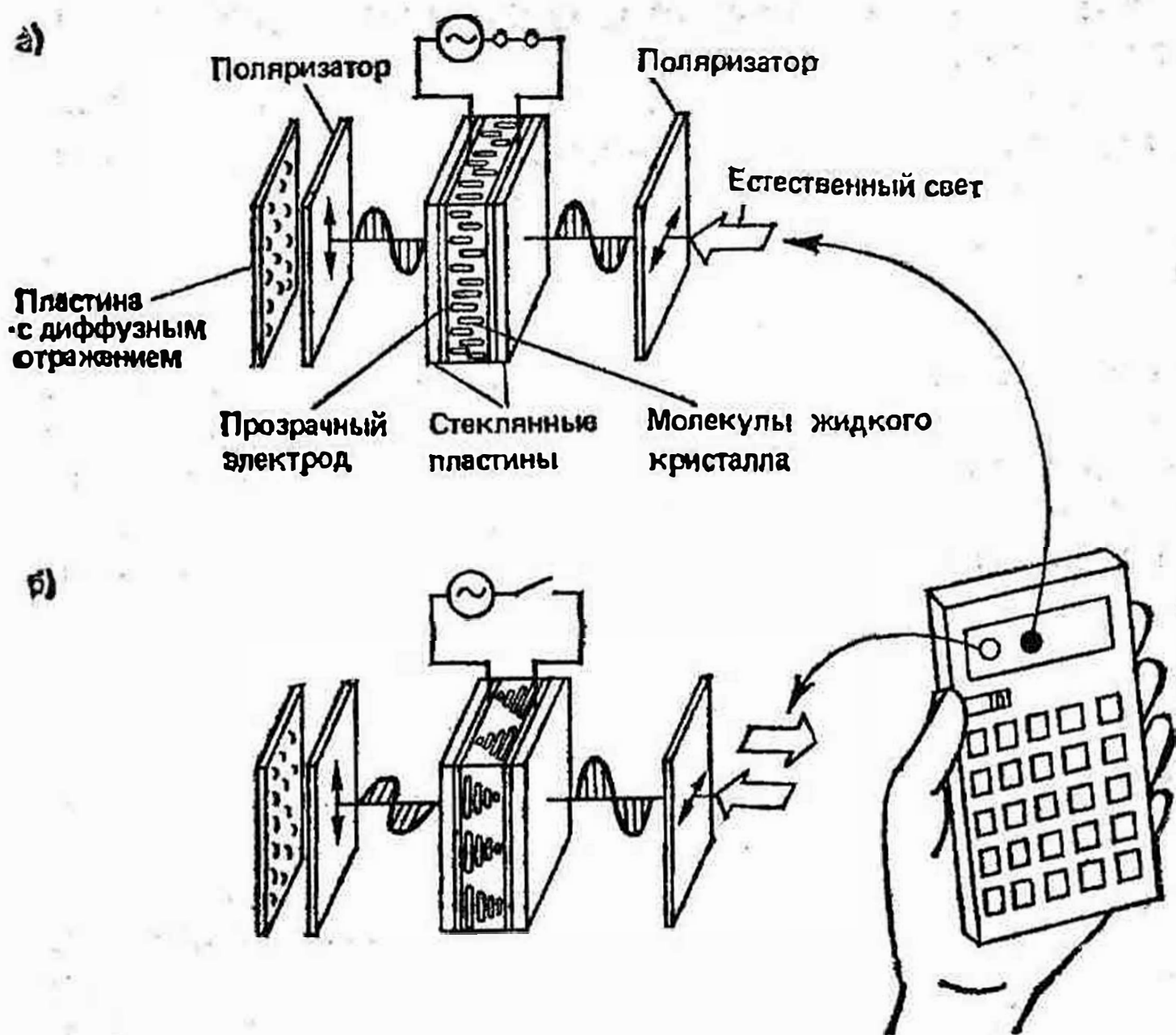


Рис. 70. Принцип действия пассивного дисплея: а — поглосение света (темное состояние); б — отражение света (светлое состояние)

минесцентная лампа) — это вакуумированный стеклянный сосуд с прозрачной стенкой. В нем запаяны нитевидный катод, сетка и анод, покрытый фосфоресцирующим веществом. Электроны, вылетевшие из катода, сталкиваясь с фосфоресцирующим веществом, заставляют его светиться. *Светодиодная матрица* ничем не отличается от светодиода с красным или зеленым свечением, но уже на пороге практического применения светодиоды с синим свечением, и предложен способ сделать светодиод многоцветным. *Электролюминесцентные матрицы* используют в приборных панелях. Они светятся за счет бомбардировки ускоренными в магнитном поле электронами центров люминесценции в фосфоресцирующем материале. *Плазменный дисплей* работает за счет испускания электронов холодным катодом, находящимся в герметическом газонаполненном сосуде. Этот дисплей пригоден для построения больших изображений, поэтому его ис-

пользуют в мониторе, отображающем несколько сотен знаков.

Пример *пассивного дисплея* — *дисплей на жидких кристаллах* (рис. 70), имеющий такие достоинства, как малые рабочие токи и напряжения. Благодаря легкости и малой толщине его широко используют для индикации в часах и микрокалькуляторах. Другой пример — *электрохромный дисплей*. Он основан на обратимых изменениях окраски рабочего вещества при электрохимических реакциях. Благодаря этому контрастность изображения в отличие от жидкокристаллического дисплея, не зависит от направления взгляда. В настоящее время находится в стадии разработки.

Что такое светодиод?

Светодиод — это прибор, излучающий свет при пропускании через $p-n$ -переход тока в прямом направлении. Впоследствии это название распространилось также на излучающие МОП-структуры, состоящие из нанесенных на полупроводник изолятора, оксида и металла.

Светодиоды обладают такими прекрасными качествами, как разная длина волн (цвет) излучения, низкое рабочее напряжение и малый рабочий ток ($1,5-3,0$ В, $3-50$ мА), малая инертность, высокая устойчивость к механическим вибрациям, высокая надежность, малые размеры и низкая стоимость.

Некоторые конструкции светодиодов показаны на рис. 71 и 72. Ток, протекающий через переход в прямом направлении, проходит по p -области в виде дырок, а по n -области — в виде электронов. Попадая в контакт перехода, электроны и дырки рекомбинируют, а их энергия переходит в излучение. Если прибор построен из полупроводников со структурой энергетических зон, дающей *прямой переход*, то электроны зоны проводимости и дырки валентной зоны рекомбинируют напрямую, акты рекомбинации происходят часто, энергия излучения практически равна ширине запрещенной зоны. При *непрямом переходе* в энергетической структуре полупроводника электрон,

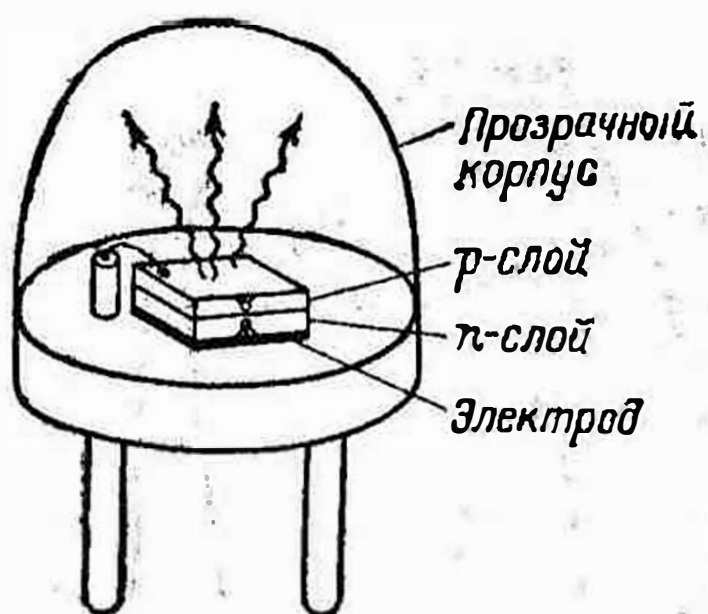


Рис. 71. Светодиод

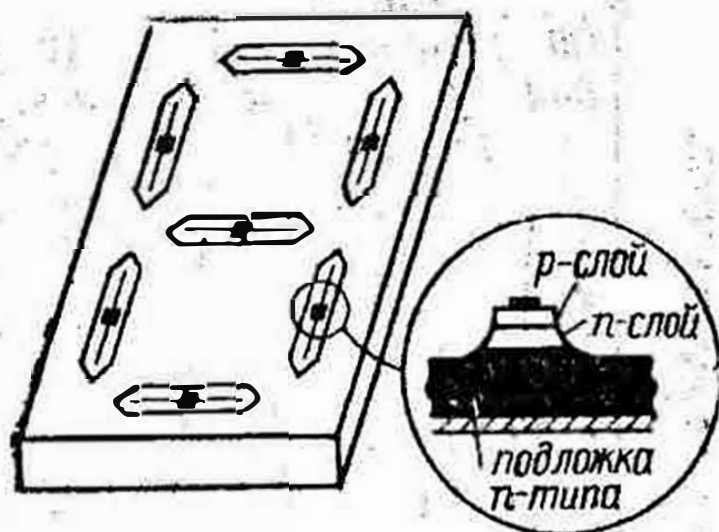


Рис. 72. Светодиодная матрица

чтобы перейти из одной зоны в другую, должен вступить во взаимодействие с фононом. В этом случае вероятность рекомбинационного излучения обычно низка. Однако даже при не прямых переходах, если в веществе имеются центры сильной люминесценции, высок квантовый выход излучения.

Длину волны (цвет) свечения можно изменять, подбирая материалы для светодиодов или добавляя примеси. На рис. 73 показаны спектры излучения различных материалов. Соединение GaAs при прямых переходах излучает вблизи области 900 нм (ближнее инфракрасное излучение). В соединении $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ при незначительном количестве алюминия переходы прямые, но с увеличением количества алюминия свечение смещается в красную область. В соединении $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ с увеличением количества фосфора длина волны излучения уменьшается и при $x > 0,4$ переходы становятся не прямыми, а световой выход быстро падает. Если добавить в это соединение азот, возникнут центры люминесценции, называемые *изоэлектронными ловушками*, дающие излучение красного или желтого цвета. Соединение GaP с не прямыми переходами, содержащее атомы цинка и кислорода, дает красное свечение, а с примесью азота — зеленое. В стадии исследований находится большое количество материалов для светодиодов с синим свечением. Это SiC, GaN, ZnSe, ZnS и др.

Светодиоды, излучающие в видимой области, работают в дисплеях. Они широко используются как контрольные лампы, в часах, в трансиверах, в игруш-

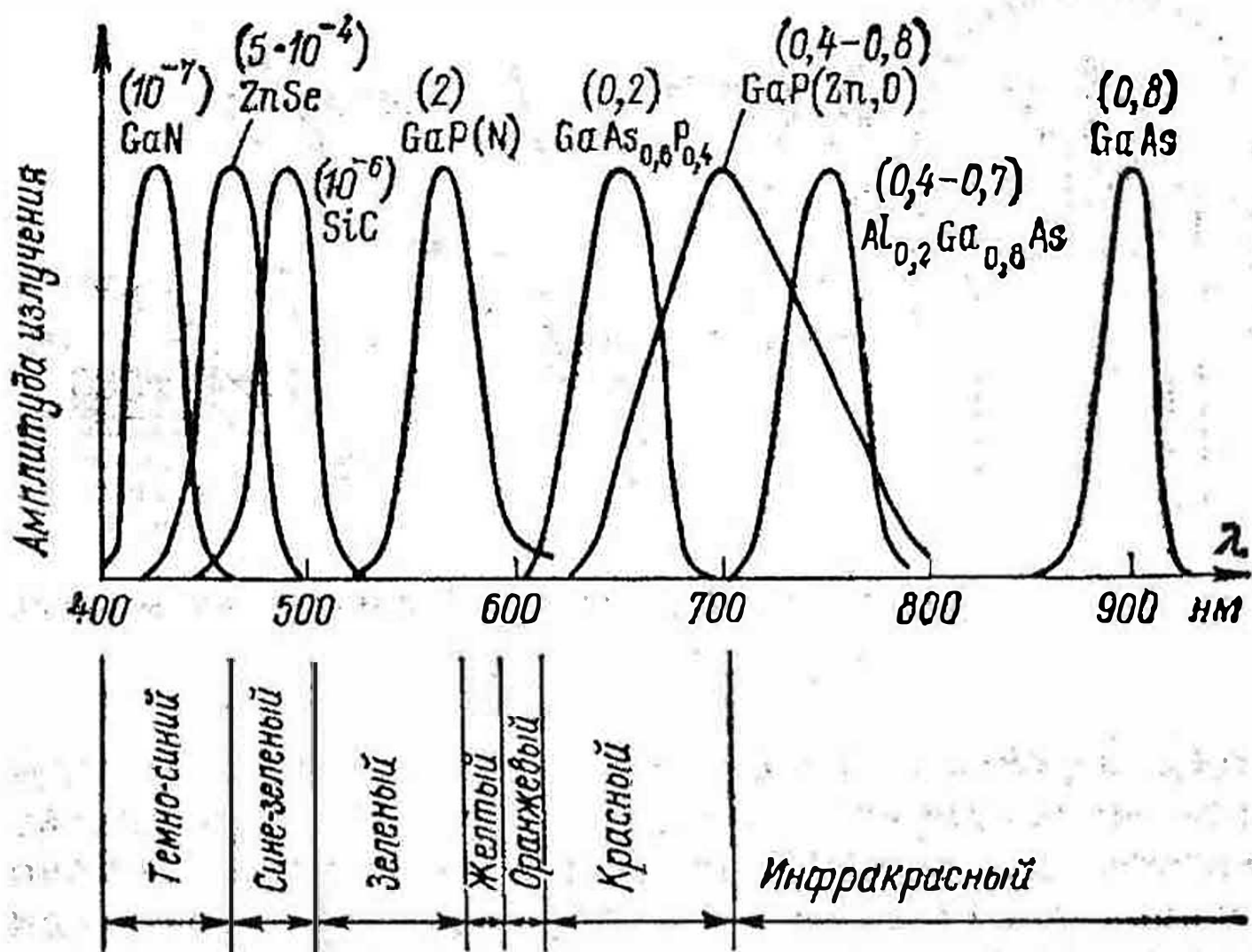


Рис. 73. Спектры излучения светодиодов.

В скобках указан квантовый выход в люменах на ватт.

ках, в автоматах-продавцах, в автомобилях и т. д. Располагая светодиодные чипы в матрицу 5×7 , можно получить один знак, а разместив их в матрице больших размеров в виде регулярных рядов точек, можно отображать много знаков или строить изображение. Последнее находится в стадии исследования. Кроме того, светодиоды, излучающие в ближней инфракрасной области, применяют для оптической связи, оптического дистанционного управления и как источники излучения в оптронных парах.

Что такое электролюминесценция?

Свечение, возникающее в веществе под действием электрического поля, называют *электролюминесценцией*. Если оно происходит в результате возбуждения носителями с высокой кинетической энергией, — это *предпробойная электролюминесценция*. А излучение, вызванное инжектированными носителя-



Рис. 74. Электролюминесценция предпробойная (а) и инжекционная (б)

ми из-за контактной разности потенциалов твердых тел, называют *инжекционной электролюминесценцией*. Говоря об электролюминесценции без указания ее типа, подразумевают предпробойную электролюминесценцию.

Один из механизмов предпробойной электролюминесценции поясняется рис. 74, а на примере соединения $ZnS : Cu$. Если к слою $ZnS : Cu$, находящемуся между прозрачным и металлическим электродами, приложить переменное электрическое поле, он начнет светиться. Электроны, вылетевшие из проводника под действием поля, ускоряются локальным полем в контакте сульфида цинка с прозрачным электродом и, сталкиваясь с центрами люминесценции, имеющими вакансии (*нелокализованными центрами люминесценции*), возбуждают их. Электроны, перешедшие в зону проводимости, рекомбинируют с центрами люминесценции Cu^+ , давая излучение. При другом механизме электроны *локализованных центров люминесценции* возбуждаются, переходя с основного уровня на возбужденные, и излучают при возвращении на основной уровень.

Типичный пример инжекционной электролюминесценции — свечение в $p-n$ -переходе. Механизм поясняется на рис. 74, б. Если $p-n$ -переход находится под напряжением, приложенным в прямом направлении, то дырки из p -области и электроны из n -области движутся навстречу друг другу и рекомбинируют с излучением, попадая в область перехода. Другие примеры инжекционной электролюминесценции: свечение в контакте полупроводник ($ZnSe$) — металл (Au), в который инжектированы носители с энергией, превы-

шающей барьер Шотки, и излучение при туннельном прохождении электронов сквозь тонкую пленку диэлектрика.

Предпробойная электролюминесценция наблюдается, как правило, в полупроводниках с широкой запрещенной зоной. На рис. 75 даны примеры спектров излучения порошкообразных электролюминесцентных материалов с нелокализованными центрами люминесценции. Кроме них можно назвать материалы с локализованными центрами люминесценции — это $\text{Sr} : \text{Ce}$, $\text{GaS} : \text{Ce}$, $\text{CaS} : \text{Ce}$, $\text{CaS} : \text{Eu}$, $\text{ZnS} : \text{Te}$, Mn , $\text{Ba}_2\text{ZnS} : \text{Mn}$, применяемые тоже в виде порошков. Материалы для инжекционной электролюминесценции — это GaN (синее излучение), SiC (синее), $\text{GaP} : \text{N}$, $\text{GaP} : \text{ZnO}$ (от красного до зеленого), $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ (от красного до оранжевого), $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (от красного до инфракрасного), GaAs (инфракрасное), $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ (инфракрасное).

На основе предпробойной электролюминесценции сначала были созданы приборы для освещения улиц, теперь на этом принципе работают дисплеи. На рис. 76 показан пример такой структуры. Электролюминесцентный материал находится между слоями диэлектрика, образуя так называемую трехслойную структуру. Сверху и снизу прикреплены контакты. Все вместе имеет толщину в пределах 1 мкм. Полная

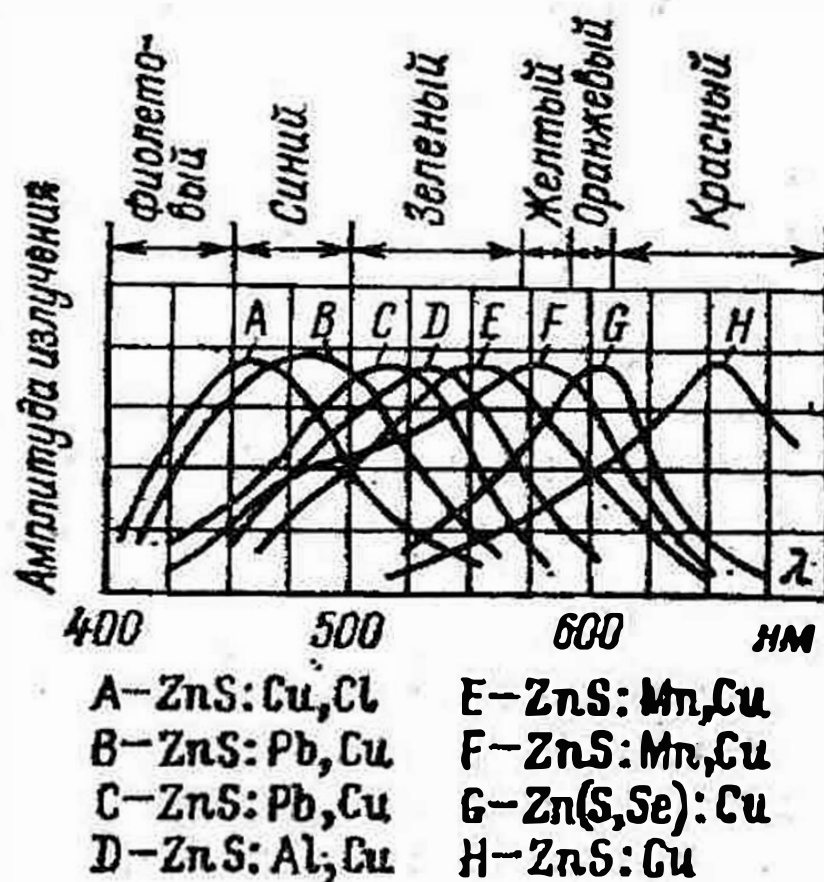


Рис. 75. Спектры излучения различных электролюминесцентных материалов с нелокализованными центрами люминесценции

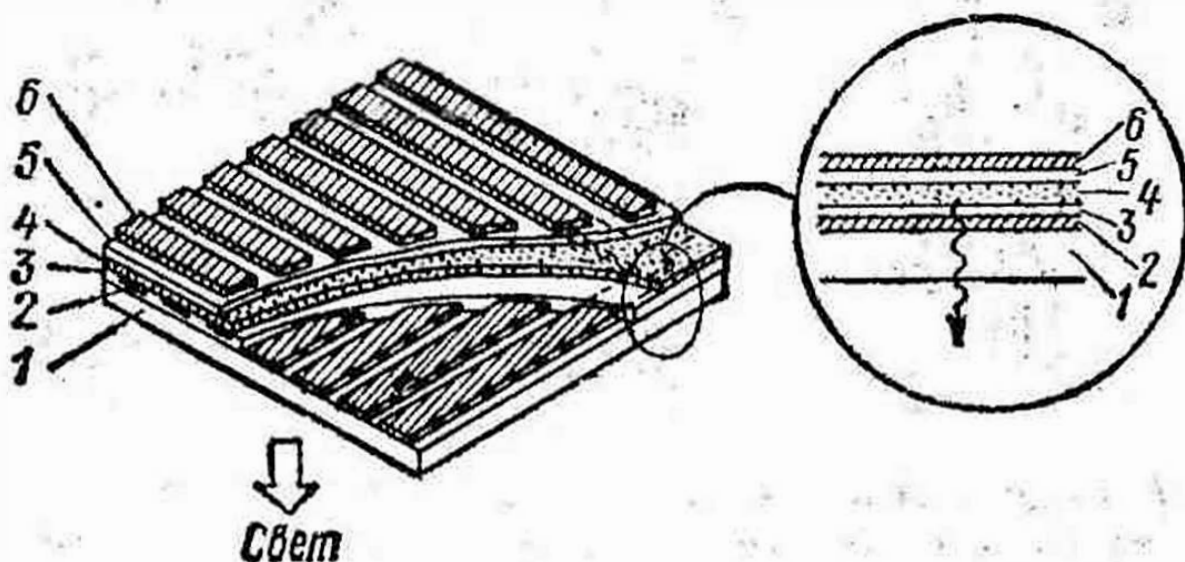


Рис. 76. Электролюминесцентный дисплей
1 — стеклянная пластина; 2 — прозрачный электрод; 3 — слой диэлектрика (Si_3N_4); 4 — активный слой; 5 — слой диэлектрика (Y_2O_3); 6 — электрод (Al)

толщина дисплея определяется толщиной стеклянной пластинки. Подобные структуры применяются в графических дисплеях и в экранах телевизоров. Свечение может быть многоцветным — от зеленого до оранжево-желтого. Исследуются возможности получения других цветов.

Что такое жидкий кристалл?

Вещество, называемое *жидким кристаллом*, обладает текучестью подобно жидкости и упорядоченным расположением молекул подобно кристаллу. Вещества, проявляющие жидкокристаллические свойства в определенном диапазоне температур, называют *термотропными жидкими кристаллами*, а проявляющие такие свойства в растворах, — *лиотропными жидкими кристаллами*.

Жидкие кристаллы бывают трех видов, отличающихся молекулярной структурой (рис. 77). В *нематической структуре* распределение центров масс молекул произвольно, но все молекулы вытянуты вдоль одной оси. В *сметической структуре* все молекулы вытянуты вдоль одной оси, центры масс молекул принадлежат определенным плоскостям, но расположены в этих плоскостях произвольно. *Холестерическая структура* — это расположение молекул в параллельных плоскостях так, что в каждой плоскости все молекулы вытянуты вдоль одной оси, а оси повернуты на одинаковый угол от плоскости к плоскости.

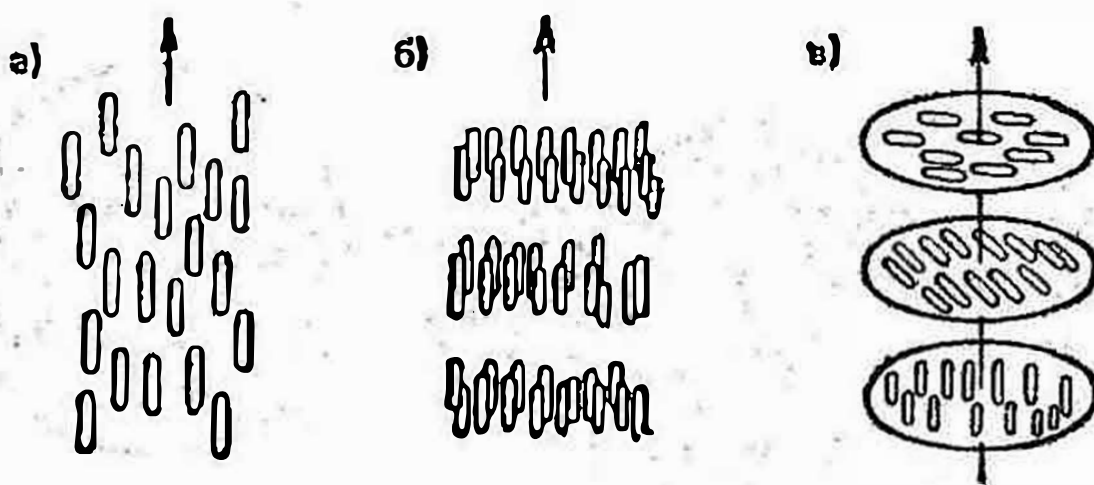


Рис. 77. Расположение молекул в жидких кристаллах: а — нематическое; б — смектическое; в — холестерическое

Молекулы жидких кристаллов обычно имеют форму длинных узких цилиндров, содержат прочные радикалы (рис. 78); минимальный размер молекулы 1,3—1,4 нм (13—14 Å).

Главная особенность жидких кристаллов — способность легко изменять структуру при внешних воздействиях. Другая особенность — анизотропия электрических, магнитных и оптических свойств, связанная с упорядоченностью структуры. Благодаря этим двум особенностям можно изменять физические свойства жидких кристаллов низким электрическим напряжением при малом расходе энергии, что позволяет использовать их в оптических преобразователях.

Применяются жидкие кристаллы и в индикаторах. Для поглощения света используют способ «гость — хозяин»: растворяют в жидком кристалле *дихроичный краситель* — краситель, меняющий цвет при изменении поляризации света (рис. 79, а). Используют также способ «скручивание — нематика» (рис. 79, б). При двойном лучепреломлении и отсутствии электрического поля длинные оси молекул жидкого кристалла образуют внутри ячейки девяностоградусный виток спирали, что вызывает поворот плоскости поляризации на 90° . Если приложить электрическое поле,

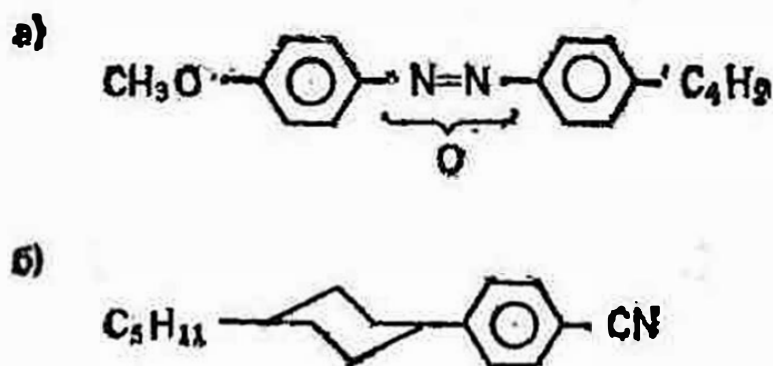


Рис. 78. Структурные формулы: а — 4-бутил-4'-метоксиназоксикарбонилбензол; б — 1-(транс-4'-пентилциклогексил)-4-цианобензол

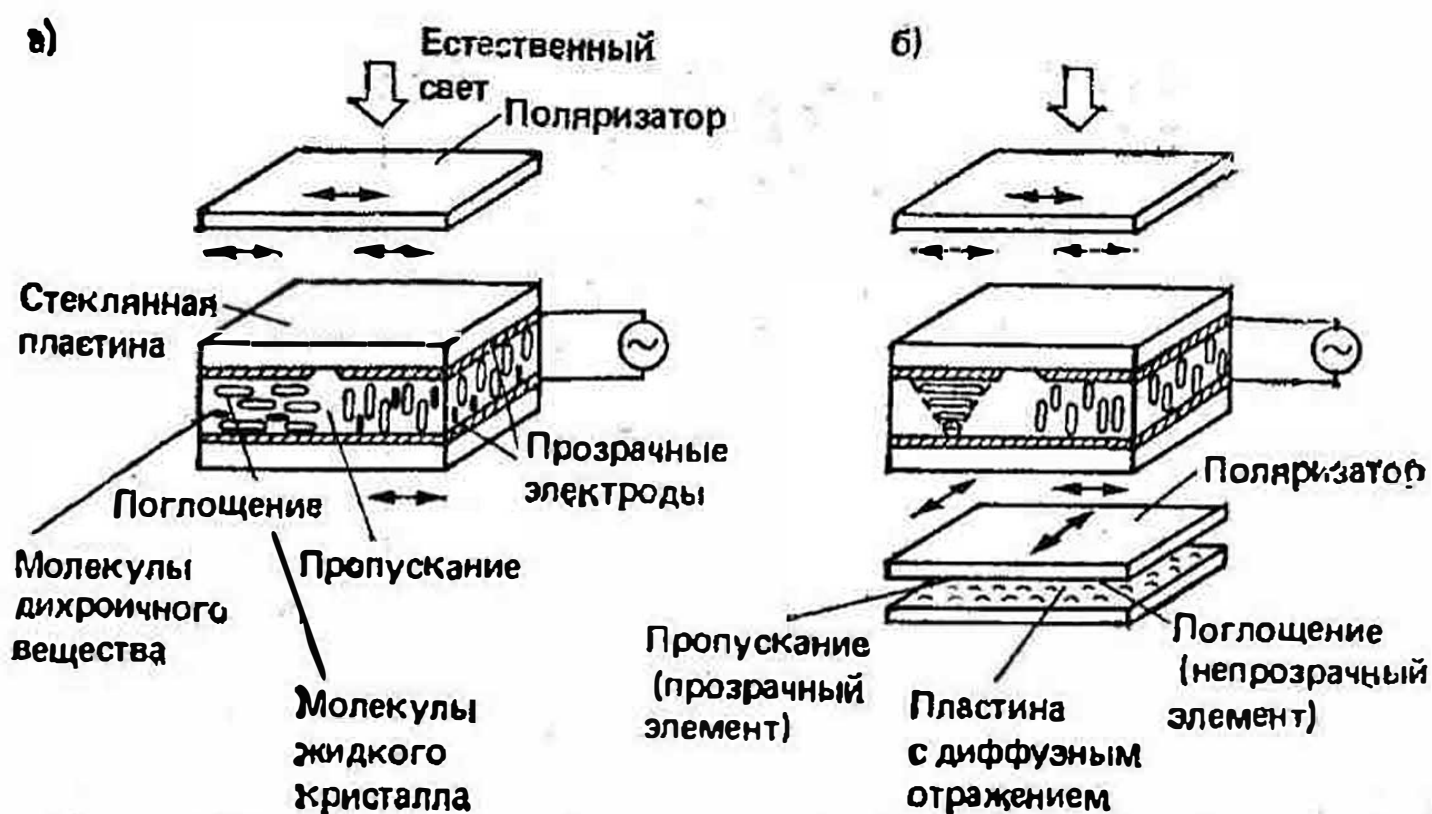


Рис. 79. Дисплеи на жидких кристаллах

ориентация молекул из спиральной становится параллельной вектору поля и вращение поляризации прекращается.

В индикаторах на жидких кристаллах используют также явления отражения и рассеяния света. Если в холестерической структуре расстояние между плоскостями с одинаковой анизотропией соответствует длине световой волны, то структура будет отражать монохроматический свет на этой волне. При турбулентном движении молекул из-за двойного лучепреломления возникает *динамическое рассеяние*. В этом случае могут образоваться также фоконные структуры, вызывающие рассеяние.

Жидкие кристаллы создают изображение в *жидкокристаллических дисплеях*. Это пассивные приборы, работающие на основе изменения оптических свойств рабочей среды. Они используются в микрокалькуляторах и часах, на приборных панелях автомобилей, в индикаторах уровня выхода стереоусилителей и т. д.

Что такое фотоэлемент и фотоэлектронный умножитель?

Фотоэлемент — это прибор, преобразующий свет в электрический сигнал. Свет, облучая светочувствительный электрод — фотокатод, заставляет его

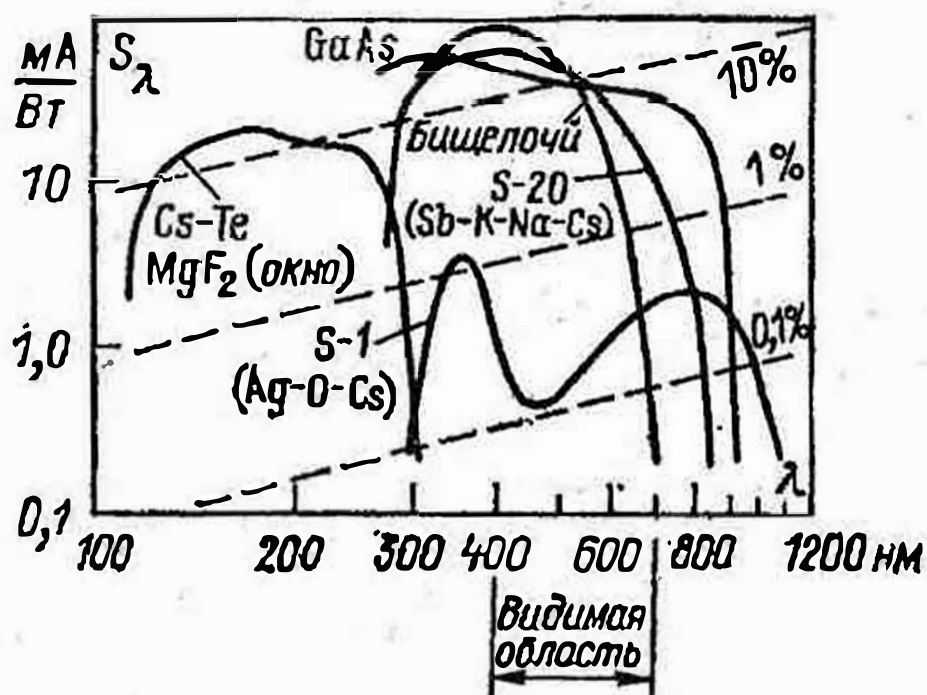


Рис. 80. Спектральная чувствительность различных фотокатодов
Штриховые линии — квантовый выход

испускать фотоэлектроны, которые попадают на анод фотоэлемента и преобразуются в электрические сигналы. **Фотоумножитель** — это прибор, в котором фотоэлектроны вызывают эмиссию вторичных электронов, благодаря чему он может реагировать даже на очень слабый свет.

Спектральная чувствительность этих приборов определяется материалом фотокатода (рис. 80). Обычно это соединение активированных серебром или цезием щелочных металлов. За ними закреплены кодовые названия. Так, соединения $\text{Sb} - \text{K} - \text{Na} - \text{Cs}$ и $\text{Ag} - \text{O} - \text{Cs}$ обозначают соответственно $S = 20$ и $S = 1$. Чувствительность $S = 20$ в видимой области, а $S = 1$ — в ближней инфракрасной области. Для повышения чувствительности $S = 1$ создают гетероструктуру Cs_2O с кристаллом из группы $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$, дающую отрицательный потенциал выхода электрона. Применяемый в последнее время фотокатод с гетероструктурой на основе GaAs имеет высокую чувствительность до ближней инфракрасной области. В вакуумных ультрафиолетовых приборах фотокатоды сделаны из $\text{Cs} - \text{Te}$, KBr , а окно — из MgF_2 .

Фотоэлемент — двухэлектродная вакуумная лампа. Ее электроды — отрицательный фотокатод и положительный анод — расположены на небольшом расстоянии друг от друга (рис. 81). Между ними создано сильное электрическое поле, сокращающее время пролета электронов, благодаря чему отклик на воздействие света происходит за короткое время, в

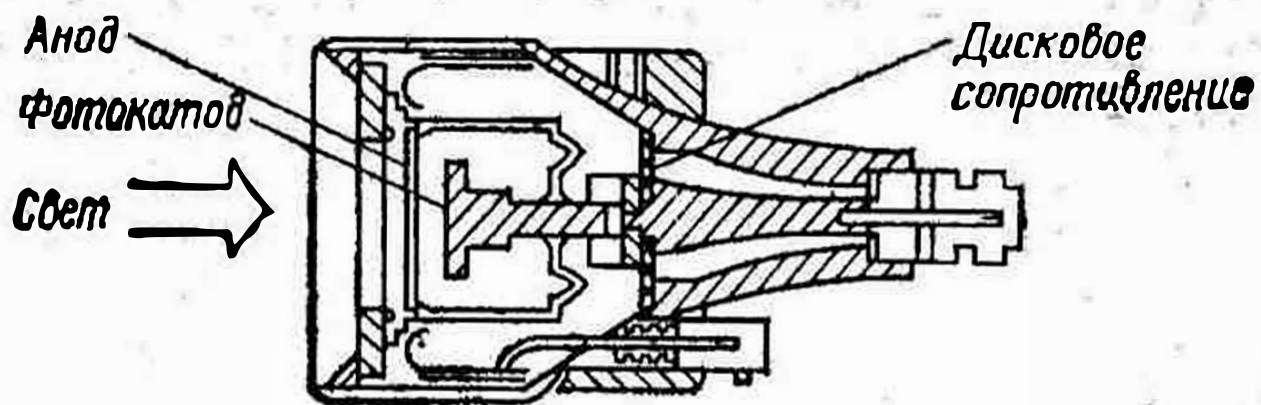


Рис. 81. Бипланарный фотоэлемент

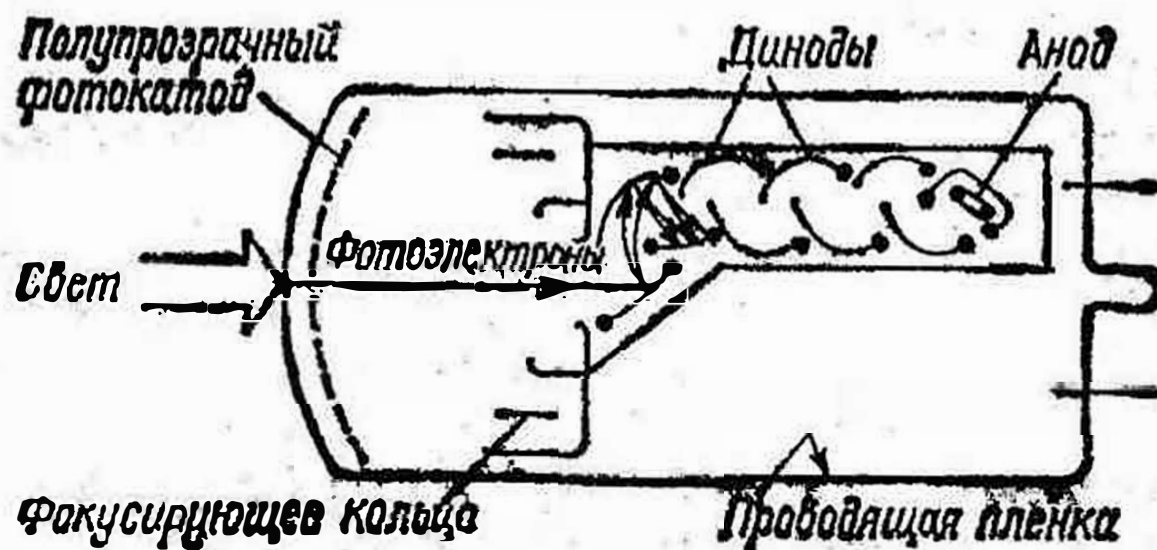


Рис. 82. Фотоумножитель

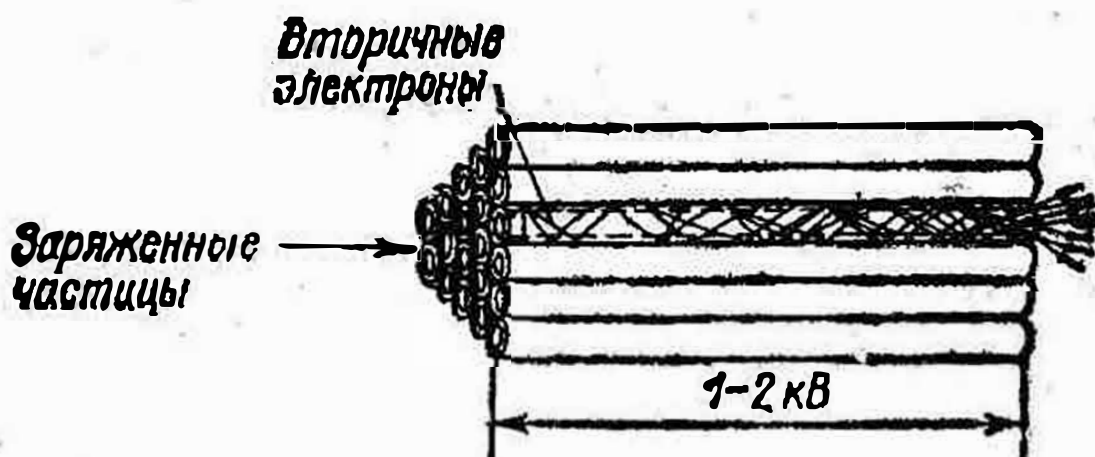


Рис. 83. Канальный анод

пределах наносекунд. Конструкция подобного прибора показана на примере *бипланарного фотоэлемента* (рис. 81).

Фотоумножители, подобные показанному на рис. 82, снабжены 8—14 динодами из материала с высоким коэффициентом выхода вторичных электронов, например $\text{Sb} - \text{Cs}$, $\text{Ag} - \text{Mg}$. Все диноды соединены со схемой делителя, обеспечивающей рост положительного потенциала от динода к диноду. Число фотоэлектронов на пути к аноду возрастает в геометрической прогрессии при удвоении на каждом диноде за счет выхода вторичных электронов. Коэффициент усиления достигает 10^6 . Фотоумножители бывают фронтального типа (с окном на торце лампы) и бокового типа (с окном на боковой поверхности), различаются по конструкции динодов и фотокатода. Длительность фронта импульса-отклика примерно 2 нс, выходной ток несколько десятков микроампер. Фотоумножители применяют для изменения интенсивности слабого света по принципу счета фотонов.

В настоящее время разрабатываются *канальные электроды* (рис. 83), усиливающие ток за счет эмиссии вторичных электронов. Это несколько миллионов капиллярных трубок из свинцового стекла. На основе канальных электродов создаются новые устройства с повышенной эффективностью. Это упоминавшийся выше бипланарный фотоэлемент с канальным анодом. Благодаря умножению электронов повышается его чувствительность, а увеличение скорости электронов и уменьшение длины их пролета позволяет получить длительность фронта импульса-отклика меньше 100 пс. Кроме того, канальные электроды позволяют создать *сцинтилляционный счетчик*, разделяющий частицы, следующие менее чем через 10 пс одна за другой.

Что такое фотодиод и $p - i - n$ -фотодиод?

Фотодиод — это приемник оптического излучения, преобразующий его в электрические сигналы за счет процессов в $p - n$ -переходе. Если же между p - и n -слоями лежит слой изолятора (i -слой), то это $p - i - n$ -фотодиод (рис. 84).

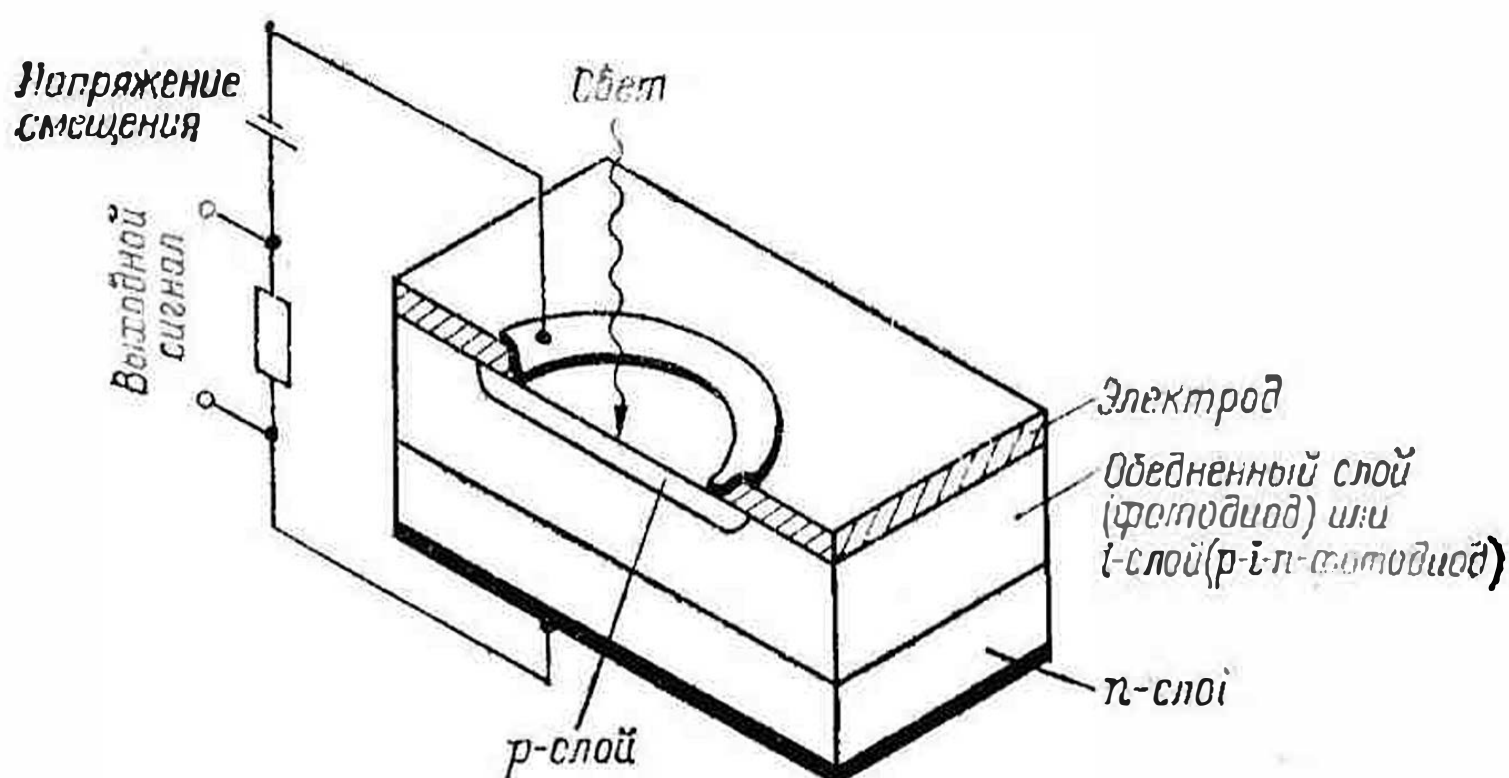


Рис. 84. Фотодиод и $p-i-n$ -фотодиод

В диодах, когда отключено внешнее поле, в области $p-n$ -перехода существует внутреннее электрическое поле, препятствующее движению носителей. Если облучать переход светом с энергией квантов, превышающей ширину запрещенной зоны, то возникают электронно-дырочные пары, диффундирующие в область перехода. Там они разделяются внутренним полем — электроны в n -область, а дырки в p -область — и вызывают ЭДС на контактах фотодиода (фотовольтаический эффект). Фотодиод, преобразующий свет в электрическую энергию за счет фотовольтаического эффекта, — это *солнечный элемент*.

Если же включить $p-n$ -переход в электрическую цепь и подать на него обратное смещение, то в области перехода возникает обедненный слой, в котором отсутствуют носители и действует сильное электрическое поле. Если теперь осветить фотодиод, то возникающие носители ускоряются в этом поле и движутся: электроны в n -слой, а дырки в p -слой. Возникающий в результате этого ток протекает по внешней цепи (рис. 85). Таким образом, фотодиод отрабатывает световые сигналы. Из-за диффузионного движения носителей вне обедненного слоя фотодиод имеет плохую частотную характеристику. Пороговая частота для фотодиодов из кремния или германия всего несколько десятков килогерц.

Толщину обедненного слоя можно увеличить, повысив напряжение смещения, но в таком обедненном

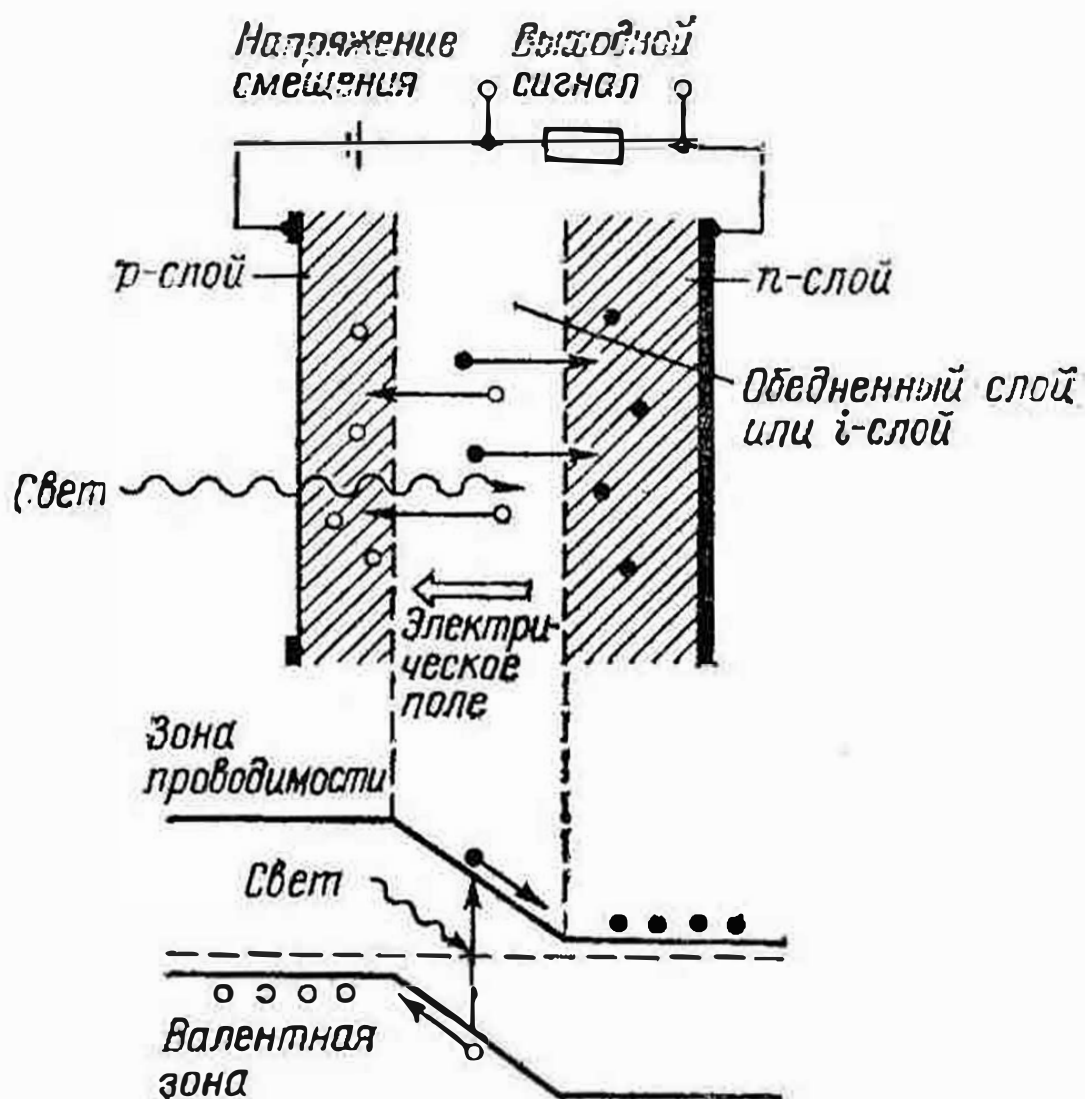


Рис. 85. Принцип работы фотодиода ($p-i-n$ -фотодиода) и диаграмма энергетических уровней

слое сравнительно низкое по напряженности поле. Для устранения этого недостатка создана $p-i-n$ -структура фотодиода. В такой структуре между p - и n -слоями находится слой собственного полупроводника с высоким сопротивлением толщиной в несколько десятков микрометров. В $p-i-n$ -фотодиоде свет в основном падает на i -слой, носители ускоряются сильным полем в этом слое, что понижает инертность и повышает порог преобразования частоты до нескольких гигагерц. Для повышения чувствительности $p-i-n$ -фотодиода увеличивают светоприемную поверхность, а для понижения емкости перехода повышают напряжение обратного смещения.

Спектральная чувствительность фотодиодов определяется составляющими их полупроводниковыми материалами. Ее границы в области малых длин волн определены поглощением света, в сторону больших длин волн их ограничивает ширина запрещенной зоны материала. Для кремния диапазон длин волн 0,4—1,1 мкм, а для германия 0,6—1,7 мкм. В дальней инфракрасной области работают фотодиоды на основе $Pb_{1-x}Sn_xTe$, $Hg_{1-x}Cd_xTe$.

Фотодиоды и $p-i-n$ -фотодиоды не могут усиливать ток, но имеют низкое рабочее напряжение и удобны в эксплуатации. Благодаря этому, а также хорошей линейности отклика, они стали неотъемлемыми элементами оптоэлектроники.

Что такое лавинный фотодиод и что такое фототранзистор?

Фотодиод и $p-i-n$ -фотодиод только отдают во внешнюю цепь электрический ток, вызываемый светом, но не усиливают его. В отличие от них *лавинный фотодиод* и *фототранзистор* усиливают фототок. Эти полупроводниковые приборы имеют высокую чувствительность и способны реагировать на очень слабый свет.

Лавинный фотодиод имеет структуру (рис. 86), сходную со структурой $p-i-n$ -фотодиода. Но обратное смещение столь велико, что обедненный слой увеличивается до размеров i -слоя, а напряженность электрического поля в нем возрастает. Электронно-дырочные пары, рожденные светом, разделяются и ускоряются этим полем в обедненном слое, получая энергию, превышающую энергию ионизации атомов

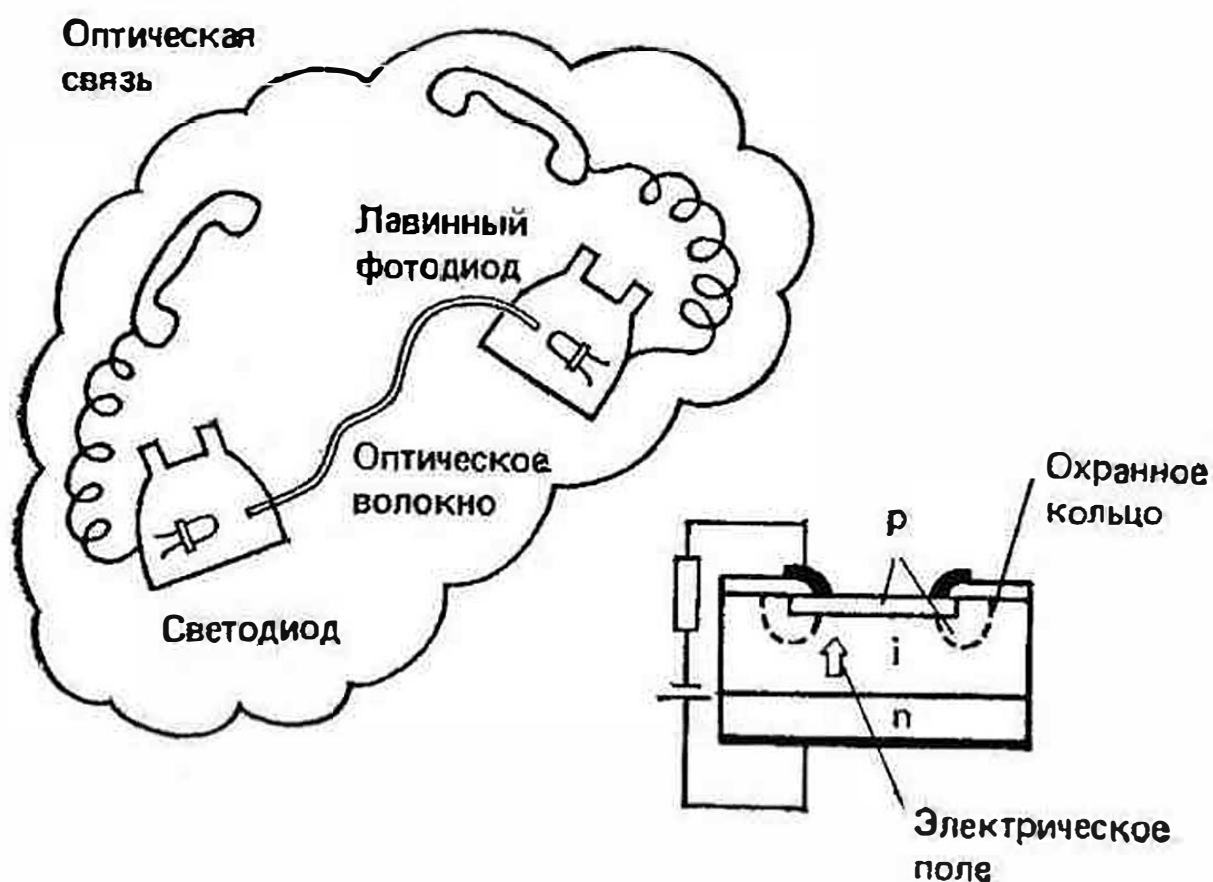


Рис. 86. Лавинный фотодиод

кристалла. Сталкиваясь затем с нейтральными атомами, носители вызывают увеличивающееся в геометрической прогрессии рождение электронов и дырок. При явлении, называемом *лавинным эффектом*, коэффициент усиления возрастает с увеличением обратного смещения и достигает значений порядка 10^3 . Во многих лавинных фотодиодах делают охранные кольца, чтобы уберечь от повреждения сильным полем поверхность диэлектрика. Благодаря сильному полю,

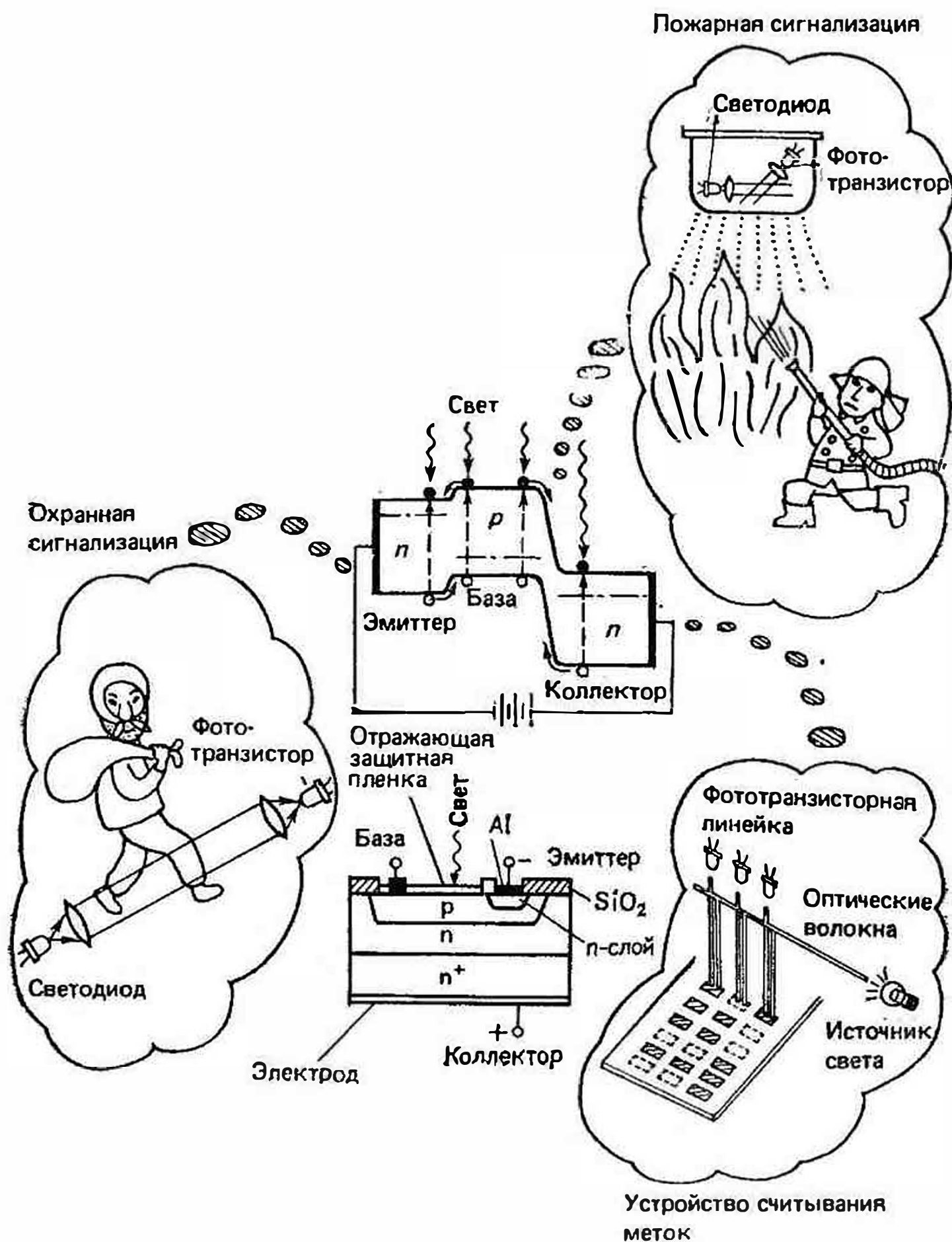


Рис. 87. Устройство и принцип работы фототранзистора

ускоряющему электроны и дырки, лавинные фотодиоды имеют высокое быстродействие: пороговая частота достигает несколько гигагерц. К недостаткам этого прибора можно отнести сильную температурную зависимость коэффициента усиления, нелинейность преобразования, малую, примерно $0,05 \text{ мм}^2$, площадь рабочей поверхности.

Фототранзистор, как показано на рис. 87, имеет структуру $n - p - n$ - или $p - n - p$ -транзистора и может усиливать фототок как обычный транзистор. Напряжение к нему приложено так, что на эмиттерном переходе — прямое смещение, на коллекторном — обратное, база свободна. Питание, как правило, подают на коллектор. Дырки из электронно-дырочных пар, рожденных излучением, собираются в базе, а электроны переходят в эмиттер или коллектор. Увеличивается положительный потенциал базы, что вызывает инжекцию электронов из эмиттера в базу, т. е. усиление фототока. Существуют кремниевые и германиевые фототранзисторы с коэффициентами усиления $10 - 10^3$. Так как прибор работает за счет диффузии носителей, то рабочие частоты малы, обычно несколько десятков килогерц. Разрабатывается *полевой фототранзистор* с лучшей частотной характеристикой. Для улучшения диаграммы направленности многие фототранзисторы оснащены микролинзой из стекла или эпоксидной смолы.

Лавинный фотодиод предполагается использовать в качестве малоинертного фотоприемника в линиях волоконно-оптической связи с высокой пропускной способностью, а фототранзистор уже работает во множестве систем: в пожарных датчиках, в датчиках охранной сигнализации, в различных фотосчитывателях и световых перьях.

Что такое фототиристор?

Нам известен тиристор — переключающий элемент с многослойной полупроводниковой структурой. В его структуре может быть четыре слоя ($p - n - p - n$) и более, дающих участок с отрицательным сопротивлением в вольт-амперной характери-

стике. Благодаря этой особенности тиристор способен включать электрический ток, если к его внутренним слоям приложено напряжение. *Фототиристор* имеет структуру, сходную со структурой тиристора, сходны и их вольт-амперные характеристики, но включается фототиристор не напряжением, а светом, попадающим на затвор. Характерная особенность структуры фототиристора, связанная со световым управлением: слой затвора не полностью скрыт другими слоями (рис. 88). Этот прибор обычно работает в управляемых светом выпрямителях и наиболее эффективен в управлении сильными токами при высоких напряжениях. Кроме того, скорость отклика на свет меньше 1 мкс, что позволяет использовать этот прибор в различных светочувствительных системах: считывателях перфокарт в ЭВМ, пожарных датчиках.

Работу обычного тиристора описывают с помощью эквивалентной схемы из двух транзисторов с $n-p-n$ - и $p-n-p$ -структурой. Работу фототиристора описывают аналогично, считая $n-p-n$ -структуру фототранзистором. Прикладывая напряжение в прямом направлении к переходам J_1 и J_3 , создают на переходе J_2 обратное смещение. Возникает состояние «выключено», и ток течь не будет. Когда на переход J_2 попадает свет, в нем возникают электронно-дырочные пары, которые, разделяясь, изменяют смещение на прямое. Электрический ток усиливается $n-p-n$ - и $p-n-p$ -структурами и быстро нарастает до значения, определяемого сопротивлением внешней цепи. Прибор переходит в состояние «включено». Напряже-

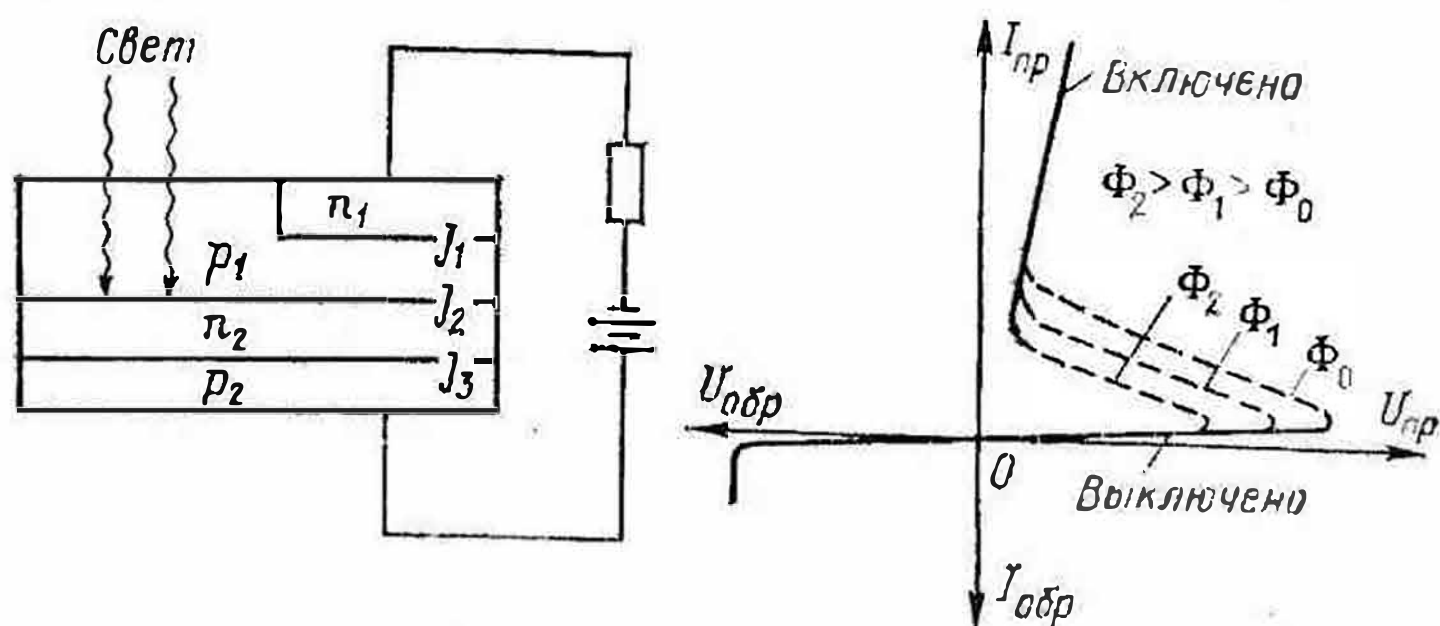


Рис. 88. Устройство и вольт-амперная характеристика фототиристора

Штриховые линии — участки с отрицательным сопротивлением; Φ — световой поток

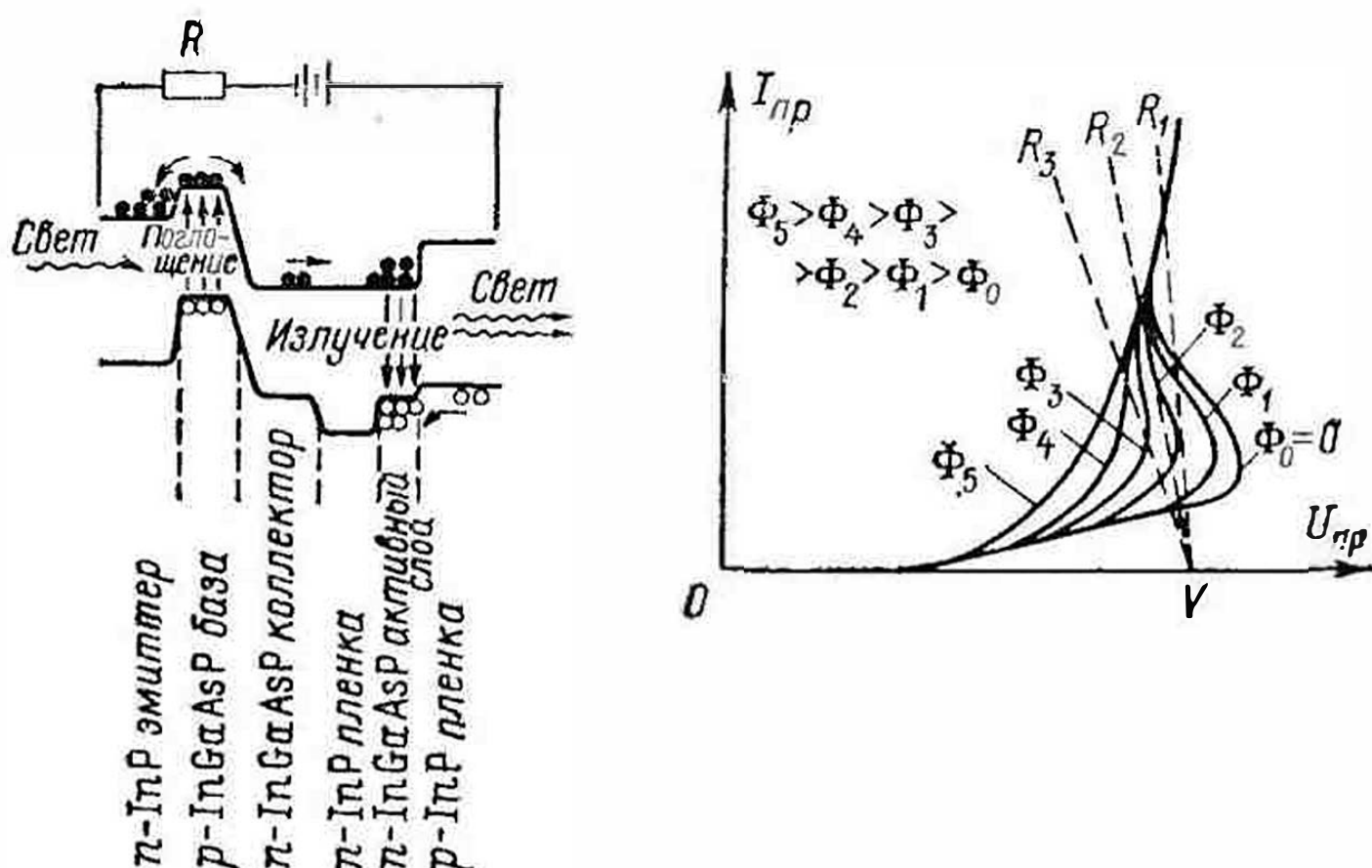


Рис. 89. Диаграмма энергетических уровней и вольт-амперная характеристика светодиода-фототиристора

Штриховые прямые — линии нагрузки; R_1 — оптический выключатель; R_2 — оптический триггер; R_3 — оптический усилитель

ние включения уменьшается с ростом светового потока. Под действием света прибор включается сразу, но после прекращения облучения он продолжает оставаться во включенном состоянии. Чтобы вернуть прибор в выключенное состояние, необходимо уменьшить приложенное напряжение. Из-за этого для работы прибора в цепях постоянного тока необходимо дополнительно ставить схему принудительного выключения, но для коммутации переменного тока, где напряжение проходит через ноль, такая схема не нужна. Фототиристоры обычно делают из кремния, поэтому вид спектральной чувствительности у них такой же, как у всех кремниевых светочувствительных элементов. Спектральная чувствительность достигает максимума в окрестности длины волны 1 мкм. В качестве управляющих источников света применяют GaAs-светодиод, GaAs-лазер, электрические лампы накаливания. Первыми вышли на рынок фототиристорные оптроны, объединившие фототиристор со светодиодом.

Фотоприемники со структурой фототиристора могут управлять не только мощностью в электрической цепи, но и свечением в светодиоде с отрицательным сопротивлением, имеющем тиристорную структуру (рис. 89). Свечение возникает в переходе I_3 . Такой

прибор предполагают использовать в качестве оптического функционального элемента (преобразователя ИК-излучения в видимое, оптического триггера, усилителя света). Эти элементы делают из материалов с высоким квантовым выходом, например GaAs, InGaAsP.

Что такое солнечная батарея?

Солнечные батареи — это полупроводниковые приборы, преобразующие солнечный свет в электрическую энергию. Типичная структура таких приборов показана на рис. 90. Она представляет собой $p-n$ -переход с омическими контактами. Если энергия квантов света выше ширины запрещенной зоны компонентов перехода, то под действием света генерируются электронно-дырочные пары. Они разделяются потенциальным барьером в области перехода, и носители движутся в n - и p -области. В результате электронов в n -области и дырок в p -области становится в избытке и эти области приобретают соответственно отрицательный и положительный заряд. При отсутствии внешней цепи накопление зарядов

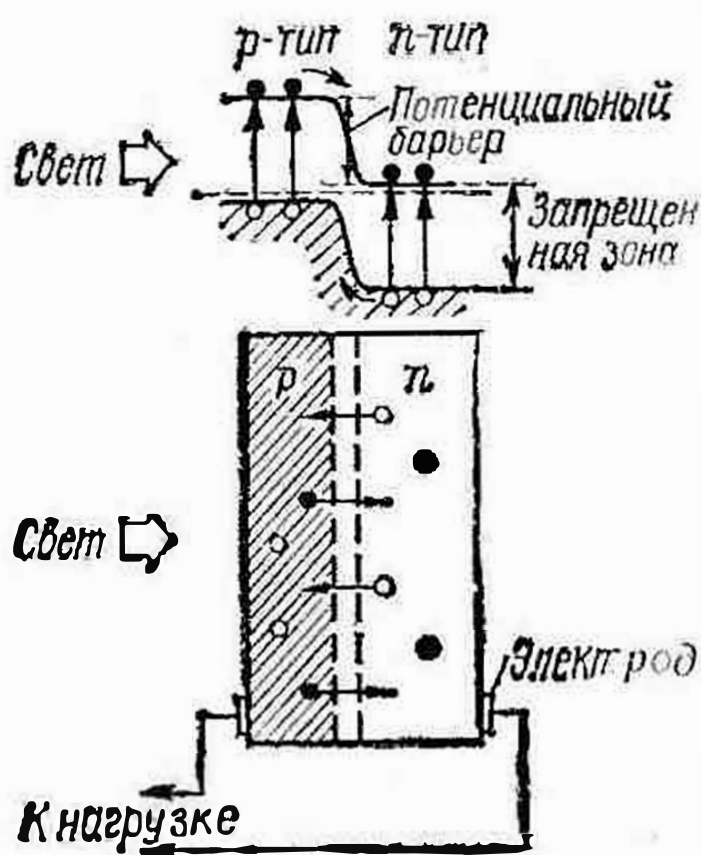


Рис. 90. Структура и диаграмма энергетических уровней солнечной батареи

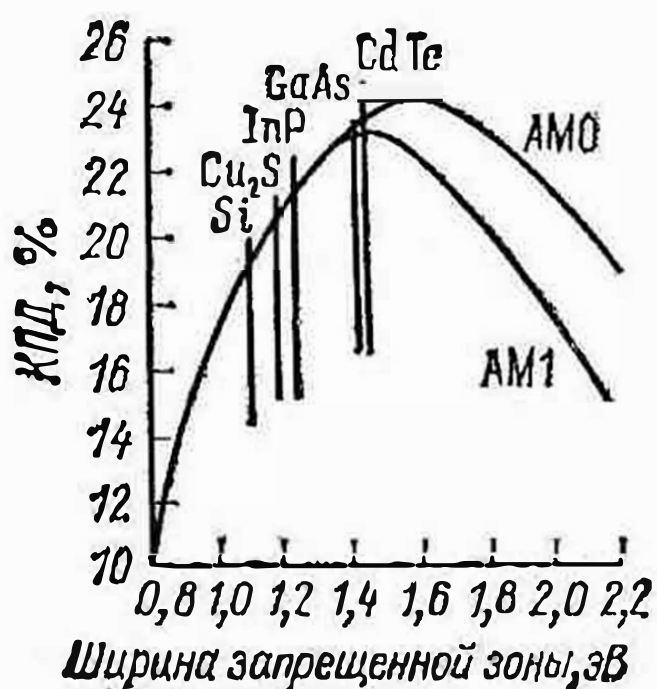


Рис. 91. Связь между шириной запрещенной зоны и КПД солнечного элемента (J. J. Loferski; J. Appl. Phys. 27, 777, 1956) AM0 — спектр солнца в воздухе; AM1 — то же над морем, когда солнце в зените

вызывает понижение и даже исчезновение потенциального барьера и разделение пар прекращается. Наступает состояние равновесия. Напряжение, возникающее в таком состоянии на $p-n$ -переходе, называют *напряжением размыкания*. Подключив к прибору внешнюю цепь с нагрузкой, можно отбирать электроэнергию.

Чтобы при поглощении солнечного света возникали электронно-дырочные пары, необходимо использовать полупроводники с шириной запрещенной зоны, соответствующей энергии излучения. Нужный полупроводник подбирают по соотношению между шириной запрещенной зоны и КПД (рис. 91) с учетом указанных ниже условий. Из-за того что свыше 90% энергии солнечного света находится в видимой области, желательно применять материалы с шириной запрещенной зоны 1,0—2,2 эВ. Кроме того, электроны и дырки, рожденные солнечным светом, не должны полностью рекомбинировать до достижения ими потенциального барьера, поэтому пригодны только материалы с долгоживущими носителями и малой скоростью поверхностной рекомбинации.

В качестве материалов для солнечных батарей используют различные полупроводники, в основном кремний. Если рассматривать только ширину запрещенной зоны и коэффициент поглощения, то кремний — не самый подходящий материал, но обилие

сырья и накопленный технологический опыт делают его удобным для широкого практического применения. Монокристаллический кремниевый солнечный элемент имеет высокий КПД — примерно 16 %. Но высока стоимость производства таких элементов. Ведутся исследования по ее снижению путем усовершенствования технологии выращивания монокристаллов. Применяя аморфный кремний, его наносят на дешевую подложку из стекла или нержавеющей стали (рис. 92). Благодаря низкой стоимости аморфный кремний широко используется. Можно подобрать полупроводниковое соединение с подходящей шириной запрещенной зоны и тем самым повысить КПД солнечного источника. Большинство этих соединений прямопереходного типа и, кроме того, могут образовывать тонкие пленки, поглощающие свет по всей толщине. Соединения, подходящие для использования в солнечных элементах, это, например, GaAs, GaAs — $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, InP из группы $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ и CdS, CdTe из группы $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$. Эти материалы имеют низкую стоимость и высокий коэффициент поглощения в области солнечного спектра.

Из солнечных элементов составляют батареи. Они работают как источники питания в микрокалькуляторах и других приборах, преобразуя в электрический ток свет комнатных светильников. Солнечные батареи из большого числа элементов устанавливают в местах, долгое время освещаемых солнцем, например в пустынях.

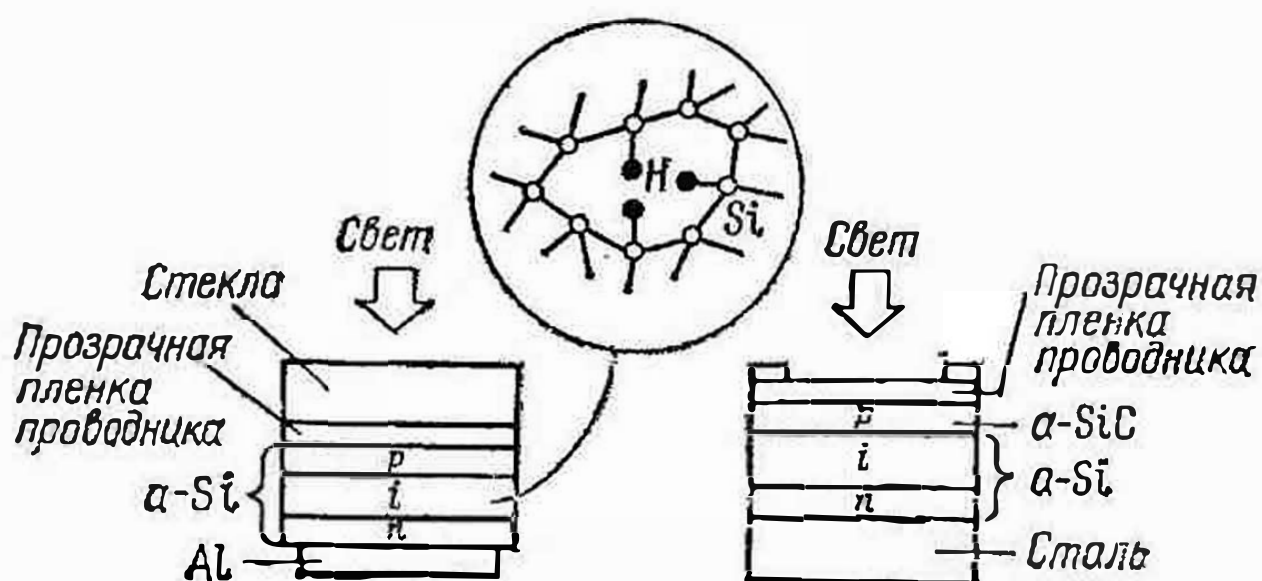
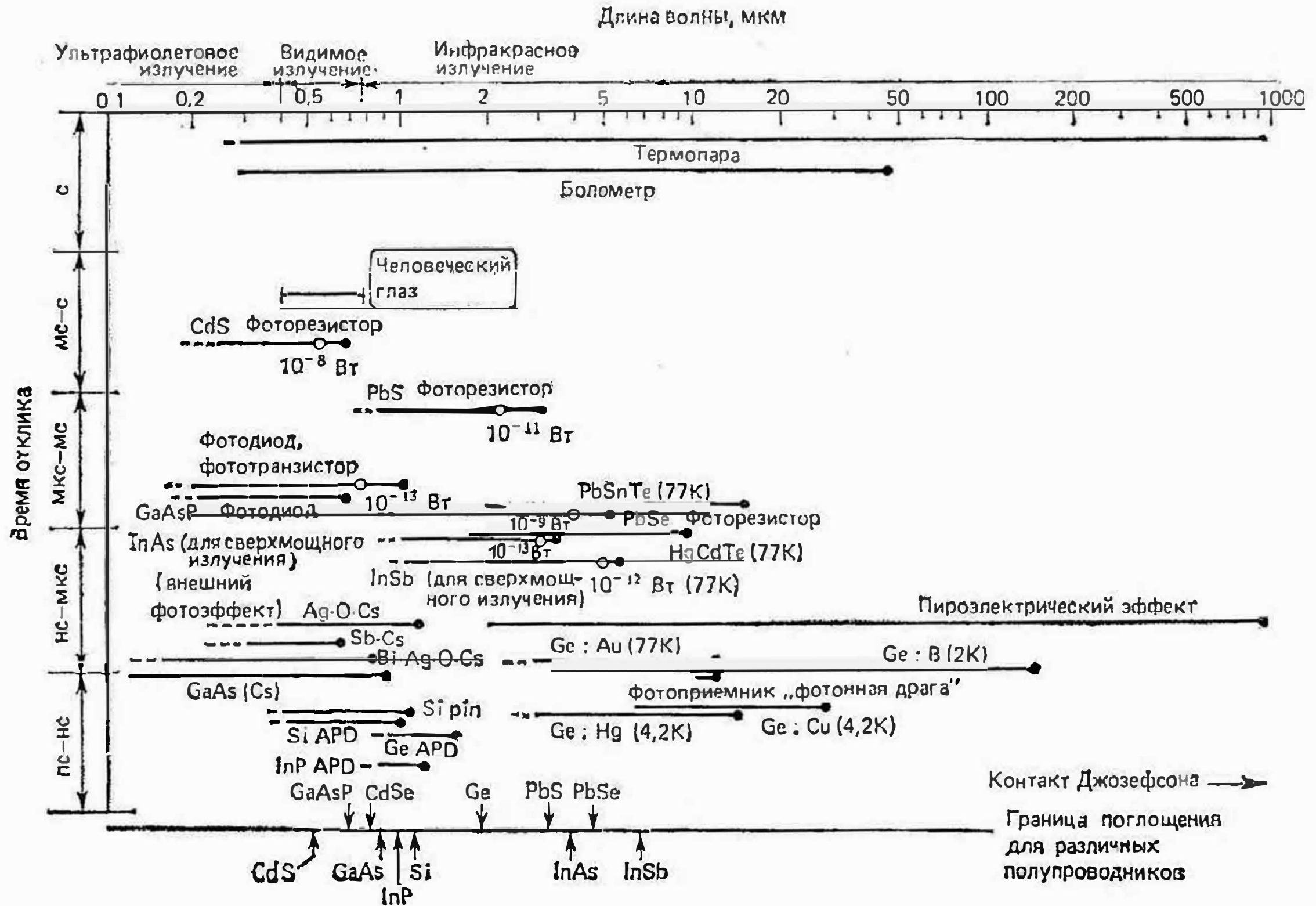


Рис. 92. Солнечный элемент на аморфном кремнии ($\alpha = \text{Si}$) Слева $p-i-n$ -структура на стекле (в круге показаны свободные связи водорода и кремния); справа $p-i-n$ -структура на стали с окном из карбида кремния, имеющего широкую запрещенную зону



Что такое фотодатчик?

Фотодатчик — это прибор, преобразующий каким-либо способом световые величины в другие измеряемые, обычно электрические. Для преобразования часто используют генерацию светом электронов и дырок в полупроводнике. Регистрируется проход этих носителей по внешней цепи. По механизму все способы регистрации света можно разделить на четыре группы, использующие 1) внешний фотоэффект (фотоэлектронную эмиссию), 2) внутренний фотоэффект (фотопроводимость, фото-ЭДС), 3) пьезоэлектрические явления (например, потемнение фотопленки под действием света), 4) пьезоэлектрический эффект. Могут быть использованы и другие, помимо указанных, явления. Детекторы инфракрасного излучения работают по принципу «фотонной драги», на основе эффекта Джозефсона и параметрических эффектов в диэлектриках, имеющих нелинейности в области дальнего инфракрасного излучения.

Характеристики оптических датчиков показаны на рис. 93, во-первых, *спектральная чувствительность*. Обычно чувствительность материалов зависит от длины волны и необходимо подбирать материал фотодатчика для конкретных длин волн. Чувствительность при использовании фотоэлектрических эффектов, как правило, определяется зонной структурой веществ. Пьезоэлектрический эффект действует до больших длин волн, расширяя диапазон чувствительности.

Следующая характеристика — *время отклика*. При пьезоэлектрическом эффекте время отклика велико, т. е. мало быстроедействие приборов. В некоторых фотопроводниках, например в сульфиде свинца, для повышения чувствительности увеличивают время жизни небольшой части носителей, но это приводит к увеличению времени отклика. Велика скорость отклика в приборах, работающих за счет фотовольтаического эффекта. Наименее инертный из них — лавин-



Рис. 93. Время отклика и спектральная чувствительность оптических датчиков

Белыми кружками обозначены самые чувствительные датчики; *APD* — лавинный фотодиод

ный фотодиод. Еще одна характеристика фотодатчиков — *пороговая чувствительность*. Это предельное допустимое отношение уровня сигнала к уровню шумов после преобразования. Самый чувствительный среди фотодатчиков прибор — фотоэлектронный умножитель.

Кроме описанных выше датчиков, определяющих силу света, существуют фотодатчики, предназначенные для определения длины волны (цвета) излучения. *Цветовой фотодатчик* представляет собой два фотодиода, размещенных на одной кремниевой пластине. Они включены в одну цепь и имеют различные спектральные характеристики, что позволяет различать цвет по направлению и силе тока.

Широко применяются двухмерные фотодатчики, позволяющие анализировать распределение освещенности поверхности, а значит плоские изображения. До последнего времени единственным представителем этих приборов была *передающая телевизионная трубка*, но в последнее время вакуумные трубки заменяются *твердотельными преобразователями изображения*, работающими по принципу приборов с зарядовой связью. Они имеют малые габариты, низкую стоимость, потребляют мало энергии и долговечны. Эти приборы нашли применение и как датчики изображения в инфракрасном свете (на основе таких материалов, как HgCdTe и PbSnTe). Фотодатчики на основе зарядовой связи широко применяют в промышленности, геологоразведке, медицине, при метеорологических наблюдениях.

Что такое передающая телевизионная трубка?

Передающая телевизионная трубка — это электронно-лучевая трубка, преобразующая двухмерную информацию об изображении в одномерную — переменный электрический сигнал. В зависимости от принципа работы (*фотоэмиссия* или *фотопроводимость*) эти приборы делят на два типа (рис. 94).

При использовании фотоэмиссии изображение преобразуется в поток фотоэлектронов, которые после ускорения накапливаются на мишени в виде заряда

с распределением, соответствующим изображению. При использовании фотопроводимости зарядовое отображение получают генерацией зарядов непосредственно на мишени. В обоих случаях информацию об изображении получают в виде переменного тока, сканируя по мишени электронным лучом, выпущенным из электронной пушки. Под действием света по-

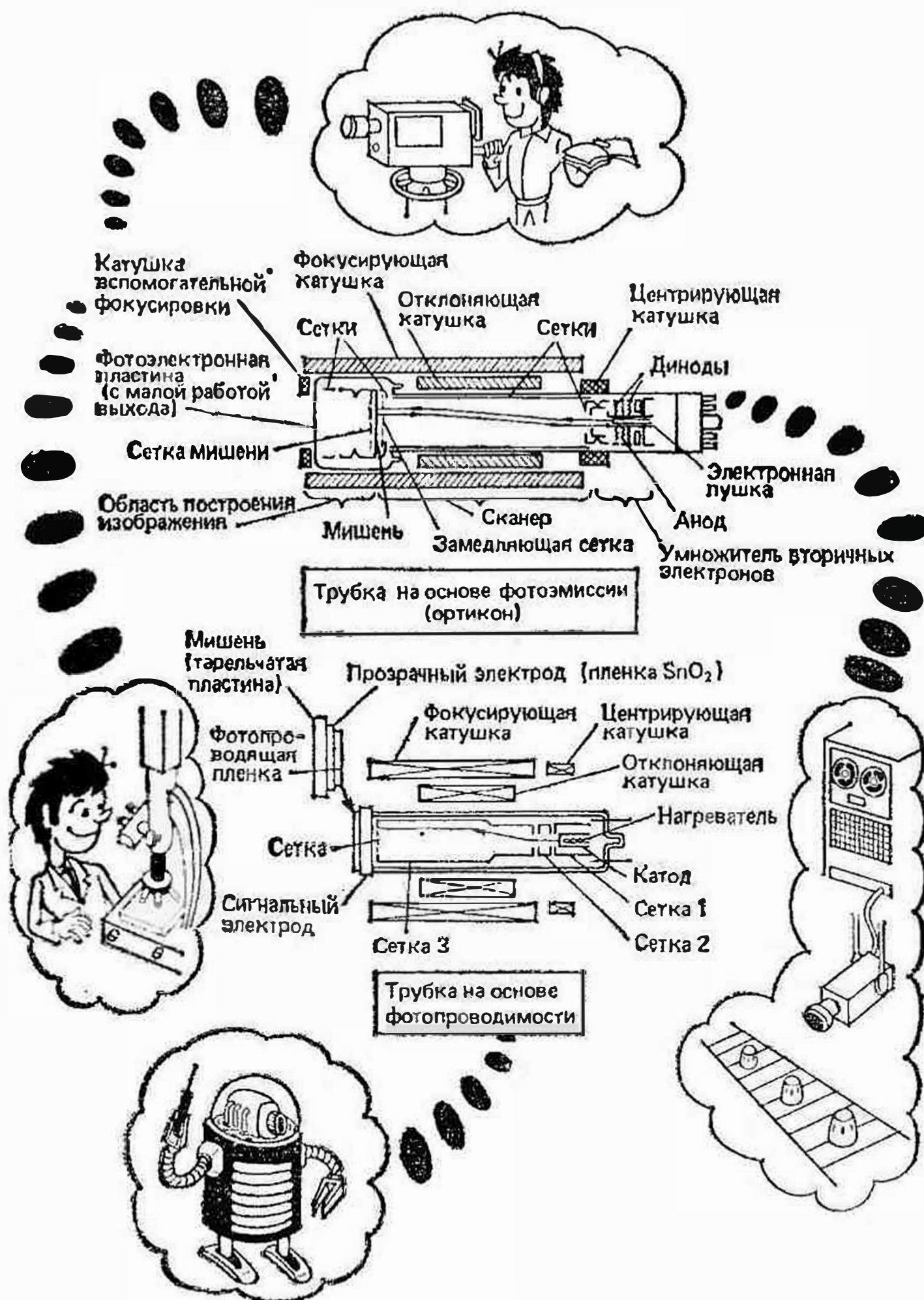


Рис. 94. Передающие телевизионные трубки

вышается положительный потенциал участка мишени в соответствии с освещенностью находящегося на нем участка изображения. При сканировании участка мишени он нейтрализуется до первоначального потенциала. Ток, требуемый для нейтрализации, и принимается как сигнал изображения. Спектральная чувствительность фотоэмиссионных приборов определяется, как и в фотоумножителях, материалом покрытия ($S = 20$, $S = 11$, $S = 10$), а в приборах на основе фотопроводимости зависит от полупроводникового материала мишени, позволяющего работу в диапазоне от длин волн, определяемых шириной запрещенной зоны (длинноволновый край), до длин волн, определяемых границей поглощения (коротковолновый край).

Усовершенствование передающих телевизионных трубок началось с развитием телевидения. Первым был иконоскоп, основанный на эффекте фотоэлектронной эмиссии. Он имел высокую чувствительность за счет накопления пространственного заряда до следующей развертки. Этот прибор и был основой всех телекамер, а развитием его стал *ортикон с переносом изображения*. Затем был создан *видикон*, работающий на принципе фотопроводимости (как фотопроводящий материал в нем использована пленка Sb_2S_3), после чего фотопроводимость стала основой приборов, преобразующих изображение в электрические сигналы. Появился *плюмбикон* (пленка PbO) с улучшенными по сравнению с видиконом характеристиками (чувствительность, темновой ток, остаточное изображение). В настоящее время разработаны такие приборы, как *карникон* (пленка $CdSe$), *сатикон* (пленка Se , As , Te), *ньюбикон* (на основе соединений из группы $A^{IV}B^{VI}$, самая высокая чувствительность). Как новое направление начинает осуществляться переход к *твердотельным чувствительным элементам*, не требующим сканирования электронным лучом подобно вакуумным трубкам. Разрабатываются и другие приборы. Прибор неаккумулятивного типа — *дисектор изображения* — позволяет свободное сканирование, *кремниевый видикон* имеет чувствительность до области ближнего инфракрасного излучения, *кремниевая трубка с умножением* позволяет умножение фотоэлектронов, *трубка с кремниевой фотографической мишенью* и *трубка с накоплением изображения* де-

лают возможным накопление сигнала. Существуют и другие типы приборов, и в соответствии с целями можно выбрать наиболее подходящий.

До последнего времени эти приборы работали только в телевидении, но в настоящее время расширяется их применение в различных контрольных системах, в дефектоскопии, в средствах визуального и компьютерного анализа, а также в устройствах зрения промышленных роботов и в качестве приборов промышленного телевидения.

Что такое прибор с зарядовой связью?

Прибор с зарядовой связью (ПЗС) накапливает в созданной внутри полупроводника *потенциальной* яме заряд, рожденный падающим светом, и затем под действием внешнего напряжения меняет конфигурацию потенциальных ям, заставляя заряд перемещаться по поверхности полупроводника. Прибор с зарядовой связью — типичный представитель твердотельных телевизионных датчиков, объединяющих сенсор и сканирующую систему.

Сначала устройствами, принимающими изображение и преобразующими его в переменный электрический сигнал, были вакуумные приборы; изображение от развертки до развертки хранилось в виде объемного заряда. С появлением видиконов чувствительный элемент, хранящий изображение, стал твердотельным. Однако считывалось изображение все еще сканированием электронного луча. В приборах с зарядовой связью механизм сканирования объединили в одной структуре с чувствительным элементом, и преобразователь изображения стал полностью твердотельным. Прибор имеет множество положительных качеств. Среди них малые габариты, низкая потребляемая мощность, точная адресация всех элементов изображения, отсутствие остаточного изображения.

Структура этих приборов — это структура МОП-диодов. Расположение управляющих контактов (рис. 95) напоминает мозаику. Если на МОП-диод подать обратное смещение, то возникнет обедненный слой, в котором нет свободных зарядов, способных

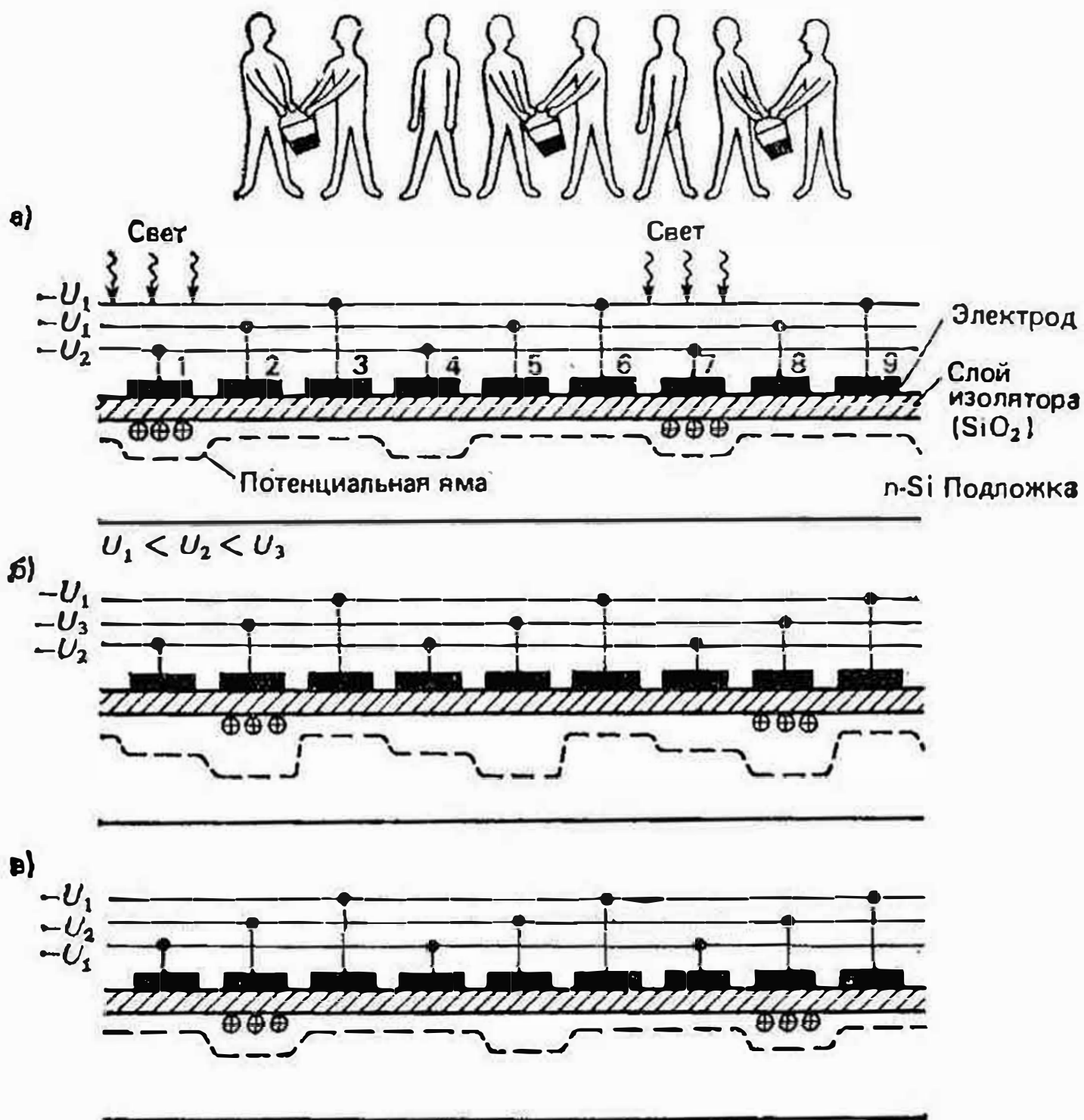


Рис. 95. Принцип работы приборов с зарядовой связью

перемещаться по поверхности полупроводника (на рисунке это кремний n -типа). Этот обедненный слой и есть потенциальная яма, в которой могут накапливаться неосновные носители из числа носителей, возникших под действием света. Передача заряда осуществляется под действием приложенного к управляющим контактам напряжения трехфазного сигнала. Сначала, как показано на рис. 95, а, накапливаются дырки в потенциальной яме, созданной высоким отрицательным напряжением, приложенным к контакту 1. Если теперь приложить высокое отрицательное напряжение к контакту 2, то потенциальная яма углубится в сторону этого контакта и туда же переместятся дырки (рис. 95, б). Сразу же конфигурацию потенциальных ям приводят к виду, показанному на рис. 95, в. Затем следует новый цикл. При повторе-

нии циклов заряд последовательно перемещается и воспринимается как изменяющийся по времени сигнал.

Поверхностно-канальные приборы с зарядовой связью создают потенциальные ямы на поверхности полупроводника. Но если на поверхности имеются дефекты, то они могут полностью погасить зарядовый сигнал. Чтобы избежать этого недостатка, были созданы *глубоко-канальные приборы с зарядовой связью*. В них заряды перемещаются в массе полупроводника.

Перемещение зарядов может быть *строчным*, когда освещение и регистрация идут одновременно, и *кадровым*, когда освещение и регистрация полностью разделены во времени. При первом способе вдвое уменьшается спектральная чувствительность, но ухудшение разрешения из-за потерь заряда незначительно. Устройства с использованием второго способа более просты.

Кроме применения в качестве телевизионных трубок в последнее время ПЗС стали использовать во встроенных в электромагнитные приборы камерах, в устройствах памяти и обработки сигналов. Как телевизионные трубки кроме ПЗС применяются *приборы инжекционного заряда (CID)*, *полевые МОП-транзисторы (MOS-FET)* и приборы типа *VBD (bucket brigade device — буквально «цепочка с ведрами»)*.

Что такое модулятор света и оптическая отклоняющая система?

Оптический модулятор — это устройство, управляющее светом, заставляя его нести информацию, а *оптическая отклоняющая система* — устройство, управляющее ходом светового луча.

Свет имеет три управляемых параметра — амплитуду, фазу и частоту. Но из-за того что модулировать частоту и фазу неудобно, а демодулировать сложно, частотная и фазовая модуляция света широко не применяется. Амплитудную же модуляцию осуществляют несколькими способами. Некоторые из них описаны ниже.

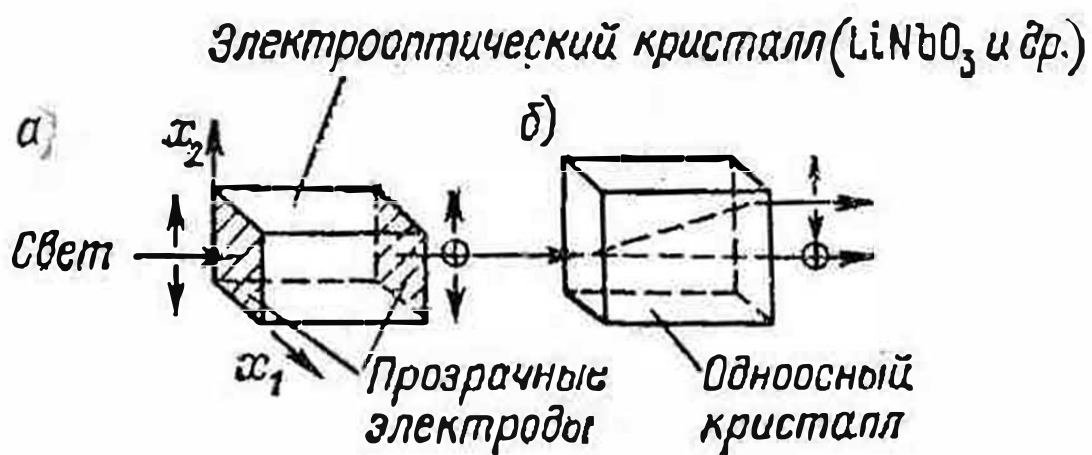


Рис. 96. Оптическая модуляция и отклонение света на основе эффекта Поккельса

На рис. 96 показана основная конструкция модулятора, работающего на основе электрооптического эффекта Поккельса (возникновение двойного лучепреломления, пропорционального силе поля). Если приложить к кристаллу электрическое поле, то в направлениях x_1 и x_2 показатели преломления изменятся. Теперь при прохождении линейно поляризованного света через кристалл плоскость поляризации будет поворачиваться на угол, пропорциональный пройденному светом пути. Подбирая силу поля и направление оптической оси кристалла, можно повернуть плоскость поляризации на 90° (рис. 96, а). Амплитуда света, прошедшего через кристалл и стоящий за ним анализатор, будет изменяться в зависимости от угла поворота плоскости поляризации. Если поставить вместо анализатора пластину с двойным лучепреломлением, получится *полярископ*, позволяющий анализировать поляризацию, или отклоняющая система (рис. 96, б). Такие приборы реагируют даже на небольшое изменение поля и малоинертны.

С помощью ультразвука можно локально изменять оптическую плотность вещества, создавая тем самым дифракционную решетку. Проходящий через нее свет изменит направление из-за преломления и дифракции (акустооптический эффект). Если свет будет входить под характерным для данной решетки углом, то первый порядок дифракции сильно отклонится от первоначального направления луча (нулевого порядка). Угол отклонения можно изменять, меняя частоту ультразвука. На рис. 97 показан пример отклонения света и световой модуляции при брэгговском отражении.

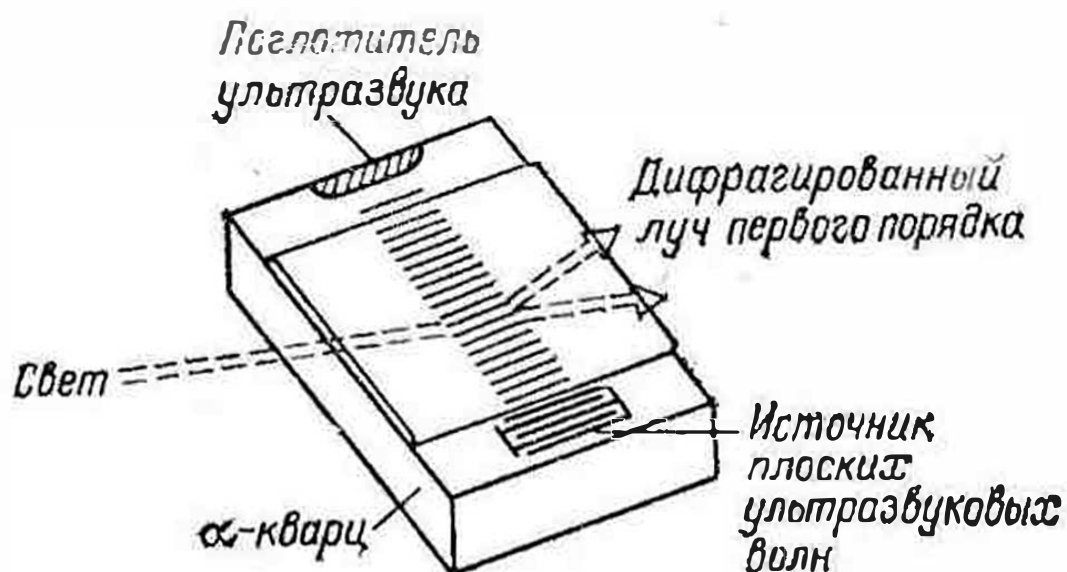


Рис. 97. Оптическая модуляция и отклонение света при брэгговском отражении

Пропуская свет сквозь прозрачное вещество и прикладывая магнитное поле, также можно поворачивать плоскость поляризации (эффект Фарадея). Посредством анализатора или пластинки с двойным лучепреломлением можно, как и в эффекте Погкельса, производить модуляцию или отклонение света. С помощью электрического поля можно изменять границу поглощения света веществом, т. е. спектральную зависимость прозрачности (эффект Франца — Келдыша). Этот эффект позволяет модулировать свет непосредственно в оптических волноводах.

Для модуляции света применяют и механические способы, отсекая луч, например, крыльчаткой из непрозрачного материала, посаженной на вал скорост-

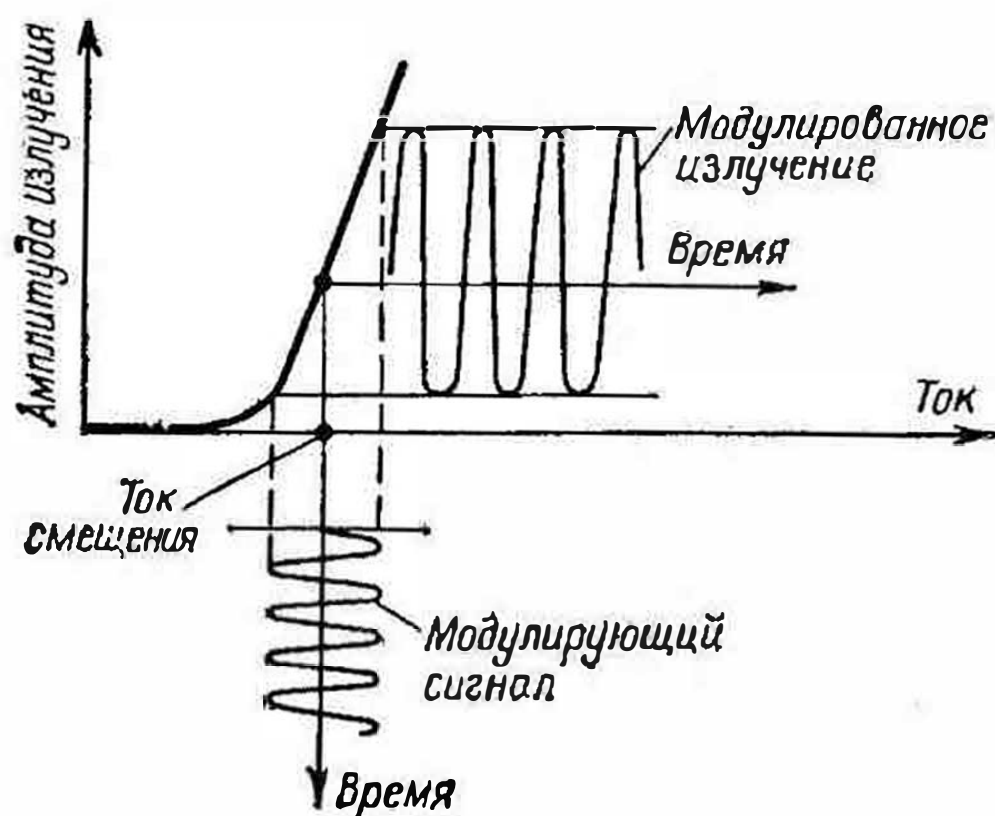


Рис. 98. Непосредственная модуляция в полупроводниковом лазере

ного электромотора, и отклоняя при помощи зеркал. В качестве привода можно применять также гальванометр или электромагнитный осциллограф.

Выше приведены примеры внешних модуляторов, модулирующих свет, уже вышедший из источника. Но если источник — полупроводниковый лазер или светодиод, то можно модулировать свет непосредственно, управляя силой излучения с помощью тока, идущего через прибор. Как показано на рис. 98, в полупроводниковом лазере обычно протекает определенный ток смещения. Изменяя его, можно модулировать излучение с частотой до нескольких гигагерц. Время отклика у светодиода больше, чем у полупроводникового лазера, но сила света пропорциональна силе протекающего через светодиод тока, поэтому больше глубина амплитудной модуляции.

Что такое преобразователь некогерентного изображения в когерентное?

Огромное достоинство обработки информации в когерентном свете — возможность быстрого (скорость сравнима со скоростью света) анализа изображения, так как когерентность позволяет параллельную обработку отдельных элементов. Однако, как правило, объекты освещаются естественным (некогерентным) светом, поэтому для обработки изображения необходимо сначала получить его на прозрачной фотопленке, что резко снижает скорость обработки и исключает возможность вести ее в реальном времени.

Преобразователь некогерентного изображения в когерентное — прибор, как ясно из названия, преобразующий изображение, получаемое в естественном свете, в когерентную картину. Он используется для обработки информации в реальном времени. Этот прибор представляет собой *оптическую память* — для записи изображения и одновременно *пространственный модулятор* — для считывания изображения путем облучения записи лазером.

Преобразователь некогерентного изображения в когерентное еще не достиг необходимого для практи-

ческого применения уровня, но в связи с огромной потребностью в таком приборе ведутся исследования различных устройств, подходящих для преобразования. На рис. 99, а показан элемент на основе монокристалла фотопроводящего сегнетоэлектрика $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO). Считывание в нем происходит на основе эффекта Поккельса, отсюда название — *считывающий оптический модулятор Поккельса*. Он состоит из двух прозрачных электродов и тонкой пленки кристалла BSO между ними. К электродам приложено напряжение. Если на поверхности электрода сформировать изображение, полученное в естественном свете, то из-за фотопроводимости распределение напряжения на кристалле повторит картину освещенности элемента. Двойное лучепреломление зависит от силы электрического поля (фактически от напряжения), поэтому распределится в соответствии с напряжением, повторяя картину освещенности. При воздействии линейно поляризованного лазерного излучения изме-

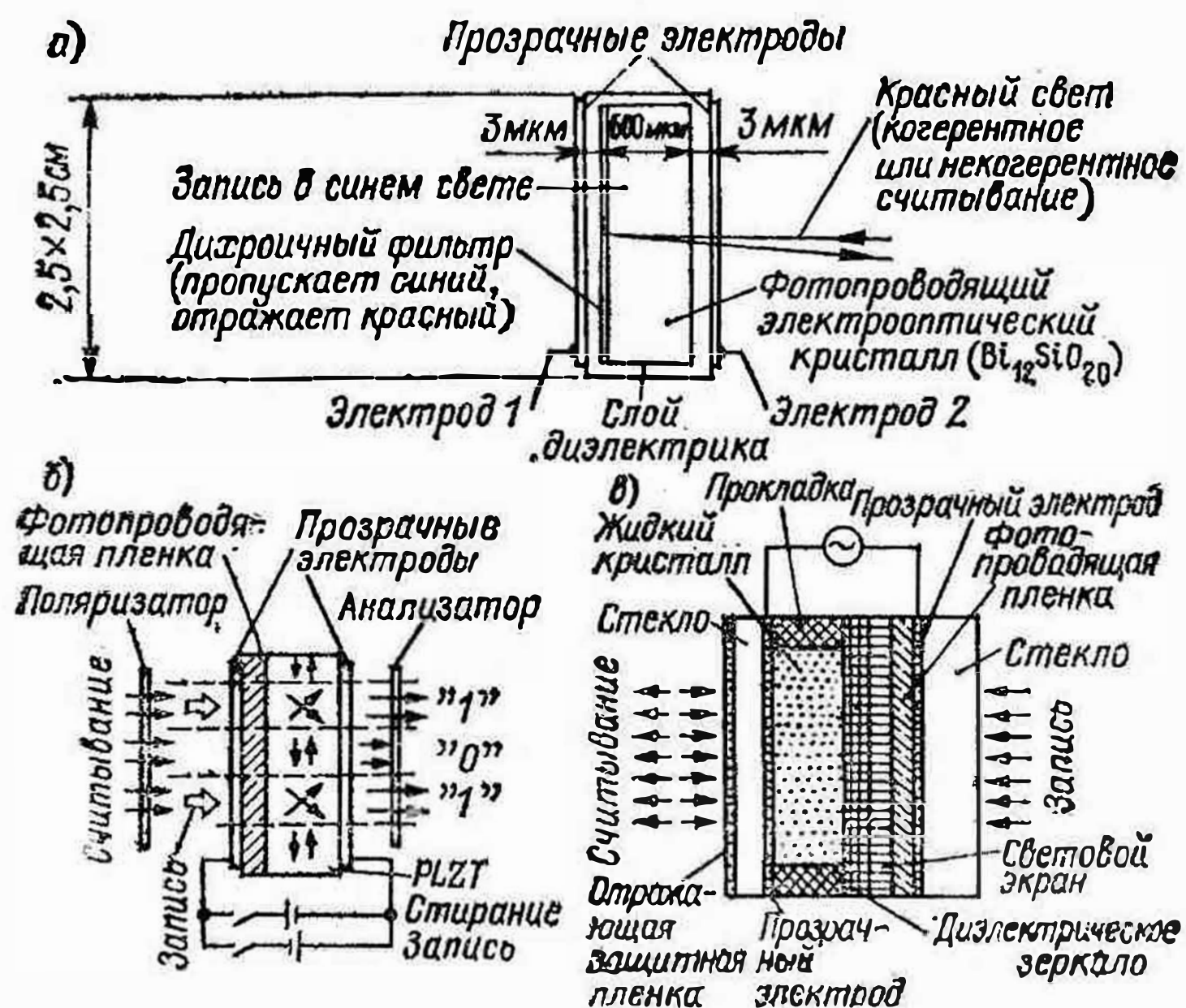


Рис. 99. Преобразователь некогерентного изображения в когерентное

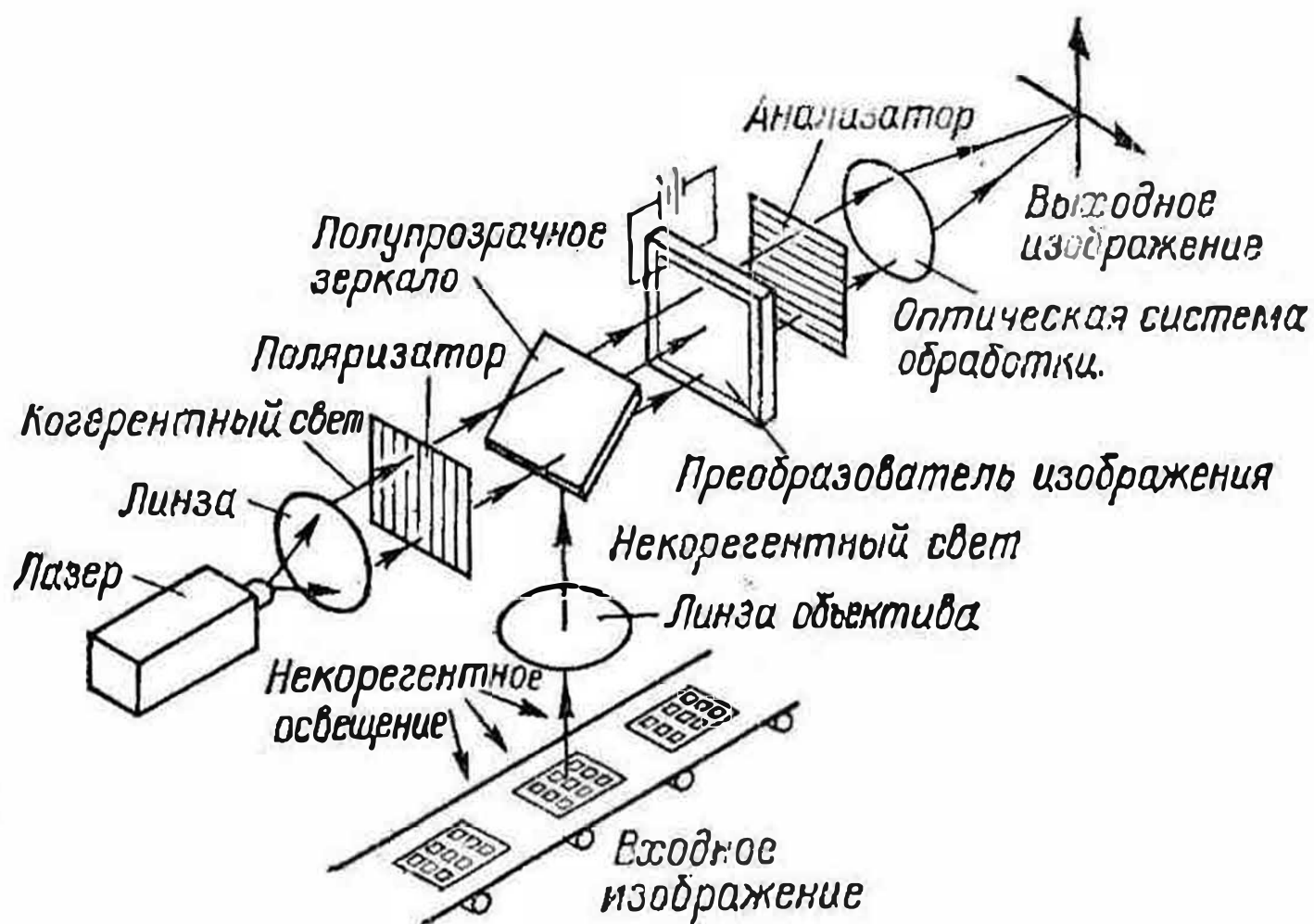


Рис. 100. Обработка изображения в реальном времени с помощью преобразователя некогерентного изображения в когерентное

нение поляризации на выходе повторит картину двойного лучепреломления, т. е. в конце концов картину освещенности некогерентного изображения. Установив на выходе анализатор, пропускающий свет, плоскость поляризации которого перпендикулярна плоскости поляризации лазерного излучения, получим когерентное изображение.

Преобразователь делают и на кристаллах типа KDPO_4 , но так как сам кристалл не является фотопроводником, наносят фотопроводящую пленку на его поверхность. Аналогичный элемент показан на рис. 99, б. Его слои составлены из фотопроводящих пленок и материала PLZT, получаемого спеканием свинца, оксидов циркона и титана с присадкой лантана. Как уже было описано, освещенность изображения на входе изменяет распределение напряжений и, следовательно, распределение поляризации доменов, а значит, двойного лучепреломления. Считывание происходит с использованием этих изменений.

На рис. 99, в показан преобразователь на основе фотопроводящих пленок и жидких кристаллов. Фотопроводящие пленки создают в жидком кристалле распределение напряженности поля, соответствующее

освещенности входящего изображения. В соответствии с полем ориентируются молекулы жидкого кристалла. Теперь, если элемент освещать линейно поляризованным светом, а выходящее излучение пропускать через анализатор, можно получить соответствующее входящему когерентное изображение. Кроме приборов, работающих на основе двойного лучепреломления, исследуются приборы на основе эластомеров и термопластиков, где под действием света изменяется форма поверхности — возникают неровности.

Преобразователи некогерентного изображения в когерентное очень эффективны в голографии и в системах, производящих корреляционные вычисления и Фурье-анализ в реальном времени (рис. 100).

Что такое оптический бистабильный элемент?

Оптический бистабильный элемент — это прибор, в котором сила выходящего света имеет гистерезисную зависимость от силы входящего, а коэффициент пропускания — два устойчивых значения. Появившись, этот прибор быстро привлек к себе внимание, его предполагают использовать в *оптических системах цифровой обработки информации*.

Устройство прибора показано на рис. 101. Он представляет собой резонатор Фабри — Перо, составленный из двух полупрозрачных зеркал, между которыми помещен материал, меняющий показатель преломления в зависимости от силы света. Если свет входит в резонатор в отсутствие резонанса, происходит многократное отражение, которое быстро ослабляет интенсивность, и излучение практически не выходит из резонатора. При увеличении силы входящего света

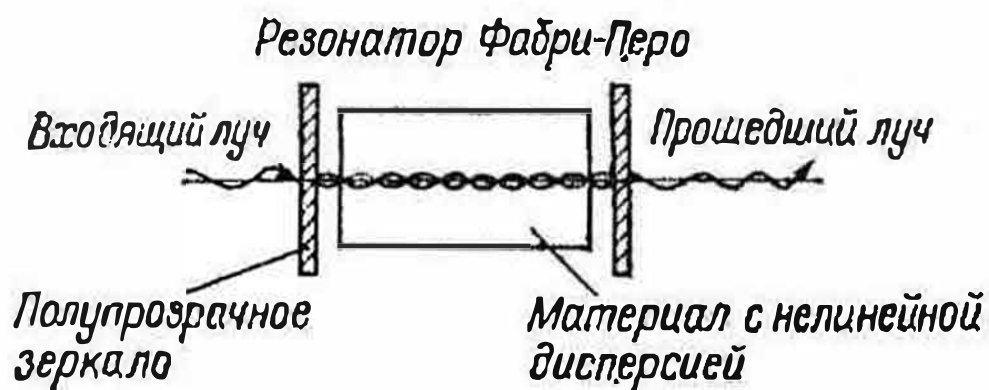


Рис. 101. Оптический бистабильный элемент

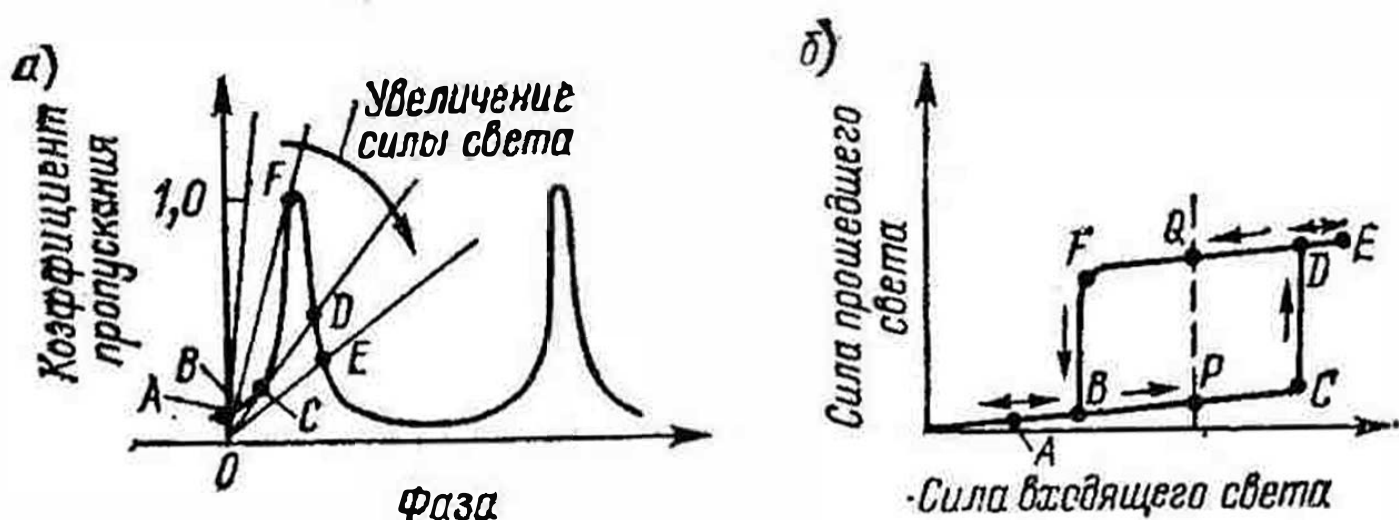


Рис. 102. Характеристики оптического бистабильного элемента: а — нагрузочная; б — круглая гистерезиса

изменяется показатель преломления вещества, помещенного в резонатор, изменяя фазу излучения. В результате этого наступает момент, когда возникает резонанс, и свет проходит сквозь резонатор. Соотношение между коэффициентом пропускания и изменением фазы света при однократном проходе показано на рис. 102, а кривой. С другой стороны, семейство прямых показывает зависимость изменения фазы от силы света (изменение фазы прямо пропорционально показателю преломления). Коэффициент пропускания для различной интенсивности входящего света показывают точки пересечения кривой 1 и прямых 2. Увеличение интенсивности света соответствует уменьшению наклона прямых 2, и система проходит через состояния А, В, С с низким коэффициентом пропускания, а из состояния С «перескакивает» в состояние D с высоким коэффициентом пропускания. Если теперь уменьшать интенсивность света, то система пройдет через состояния E, D, F, а из F перескочит в В.

Соответствующая гистерезисная зависимость показана на рис. 102, б. Отсюда видно, что при основном освещении система сохраняет состояние «нуль», обозначенное точкой Р, но под действием дополнительного импульса света она переходит в состояние «единица», обозначенное точкой Q. При резком уменьшении основного освещения система вновь возвращается в состояние «нуль» (точка Р). Это явление назвали *бистабильным оптическим эффектом*. Оно может стать основой для хранения одного бита информации. Кроме того, с помощью таких перескоков между различными состояниями можно осуществить логические функции И, ИЛИ, НЕ в *цифровых и логических оптических системах*.

Бистабильный элемент впервые успешно получил в эксперименте Гибб с сотрудниками, применяя в качестве материала с нелинейным рассеиванием пары натрия. После этого проводились опыты на множестве других материалов, среди которых рубин, InSb, GaAs. Бистабильный оптический элемент имеет короткое время перехода из одного состояния в другое и потребляет мало энергии, поэтому считают, что он станет важным элементом структуры оптических компьютеров.

Что такое оптрон?

Оптрон — это прибор, состоящий из источника и приемника света, помещенных в один корпус, как показано на рис. 103. Электрический сигнал подается на источник света, где преобразуется в световой сигнал, который принимается светоприемником, дающим на выходе соответствующий электрический сигнал. Подобные конструкции — исторические. С них началось введение оптических элементов в электрические схемы, и для них Лебнер (Loebner) впервые использовал название «оптроэлектроника».

Оптроны обладают множеством достоинств. Основные из них: полная развязка (даже разрыв) между входом и выходом, что облегчает связь между цепями с различным рабочим напряжением; отсутствие обратной связи; возможность устранения шумов.

Оптроны различают по типу источников и приемников света. Прибор, показанный на рис. 104, а, — неоновая или вольфрамовая лампа плюс фотопроводящий элемент (обычно на основе CdS) — из-за большой инертности последнего работает в качестве филь-

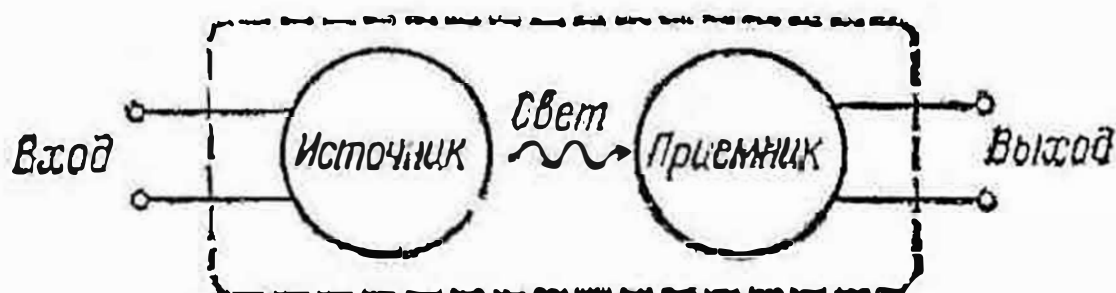


Рис. 103. Принцип работы оптрона

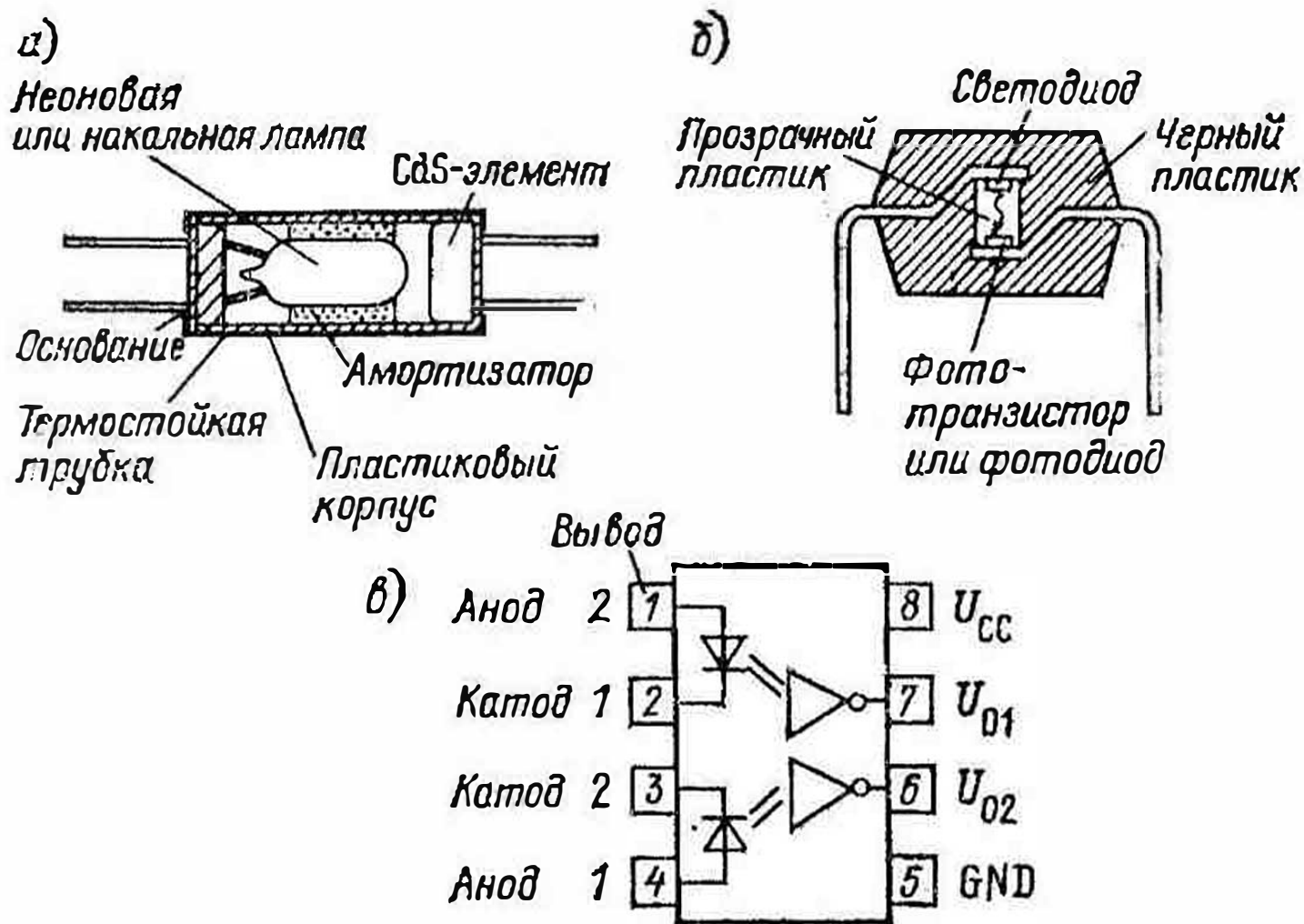


Рис. 104. Конструкция оптронов: а — лампа + элемент на CdS; б — светодиод + фототранзистор; в — двухканальный оптрон

тра, отделяющего шумы и обратные всплески. Большинство оптронов, применяемых в настоящее время, типа светодиод — фототранзистор (или фотодиод). Фототранзистор дает высокий коэффициент преобразования, а фотодиод — быстрый отклик. Такие оптроны, как правило, помещены в литой корпус DIP (dual inline package), спрессованный из двух частей (рис. 104, б). Источник света и фотоприемник связаны оптически: между ними находится прозрачный пластик. Для защиты от внешнего света корпус сделан из черного пластика и имеет толстые стенки. При использовании фотодиода из-за низкого уровня выходной мощности необходим предварительный усилитель. Поместив в одном корпусе с другими элементами ИС оптрон, получили быстродействующие ИС с оптронной связью, подобные показанной на рис. 104, в. Время задержки сигнала в оптронах — порядка наносекунд. Для управления сильными токами в качестве фотоприемника используют фототиристор.

Оптроны имеют множество применений: 1) в стабилизированных источниках питания для развязки выхода и цепей управления; 2) в составе логических схем типа И, ИЛИ, И — НЕ, ИЛИ — НЕ; 3) в быстро-

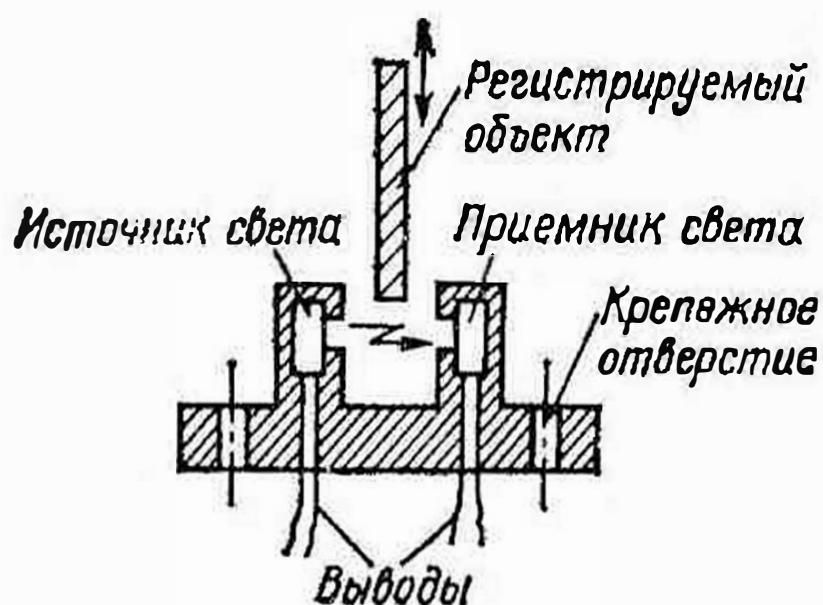


Рис. 105. Оптический прерыватель

действующих цифровых интерфейсах, таких, как системные интерфейсы компьютеров, и в периферийных блоках памяти; 4) в устройствах автоматического управления электромоторами для развязки сигнальных и мощных цепей; 5) в блоке «вибратор» электромузыкальных инструментов.

Оптический прерыватель — модификация оптрона. Он, как показано на рис. 105, позволяет управлять световым потоком в промежутке между источником и приемником света. В свою очередь, это дает возможность обнаружить непрозрачные предметы в данном промежутке. Часто используется в цифровых схемах управления электромоторами и в печатающих устройствах для связи между механической и электронной частью.

Что такое оптический вентиль?

Оптический вентиль — это устройство, позволяющее свету выйти из источника, но не дающее ему вернуться в источник после отражения. Такой вентиль необходим для защиты лазера, когда свет, выходящий из него в волокна оптической связи, отражается от стыков или обрывов волокон (вернувшееся излучение вызывает нестабильность источника и износ оптической части), и для задержки излучения при лазерном ядерном синтезе.

Рис. 106 иллюстрирует принцип, часто применяемый в оптических вентилях. Плоскость поляризации

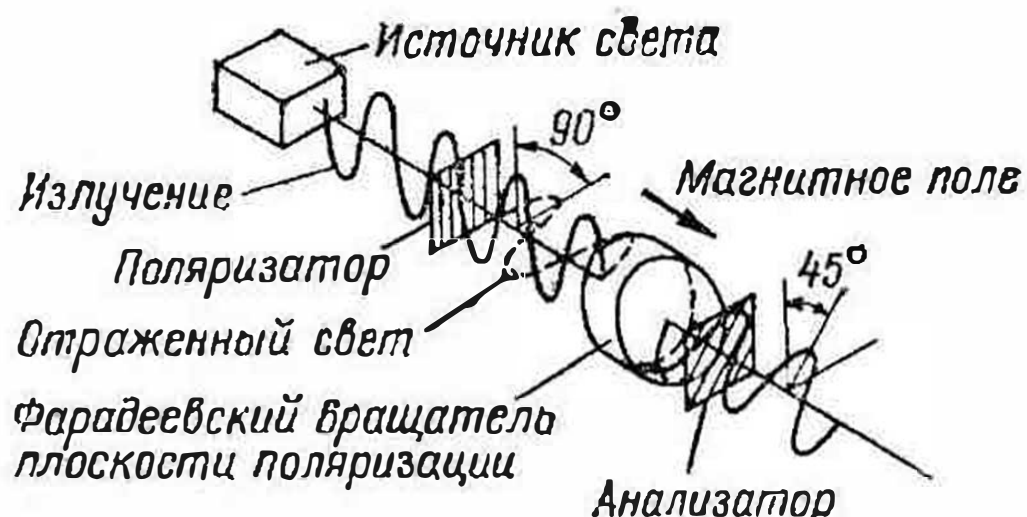


Рис. 106. Принцип работы оптического вентиля

света, вышедшего из источника, после прохода через элемент Фарадея поворачивается на 45° . Возвращающийся по каким-либо причинам свет снова проходит через элемент Фарадея, в результате чего плоскость поляризации поворачивается еще на 45° . Суммарный поворот плоскости поляризации теперь составляет 90° , и вернувшийся свет можно отсечь поляризатором, установленным, как показано на рисунке. В элементе Фарадея вращение поляризации происходит под действием магнитного поля. Если рабочее тело парамагнетик, то угол поворота пропорционален силе магнитного поля и длине пройденного светом пути, а при ферромагнетике плоскость поляризации поворачивается пропорционально пути света и намагниченности.

Оптические вентили находят различное практическое применение. Они работают в оптической связи на коротких (0,8 мкм) и длинных (1,3—1,5 мкм) волнах, в лазере на стекле (длина волны 1,053 мкм), применяемом в ядерном синтезе. В качестве рабочего тела вращающих элементов Фарадея для оптической связи в области 0,8 мкм применяют диамагнитные Фарадсевы стекла, а в области 1,3—1,5 мкм — ферромагнитные кристаллы граната.

На рис. 107 изображен оптический вентиль, работающий в области 0,8 мкм. Рабочее тело — диамагнитное стекло с малым поглощением в этой области. Так как в диамагнетике угол поворота плоскости поляризации при одинаковом пути света значительно меньше, чем в ферромагнетике, то путь света удлиняется за счет многократного повторения.

На рис. 108 показан оптический вентиль с рабочим телом в виде эпитаксиальной пленки, применяе-

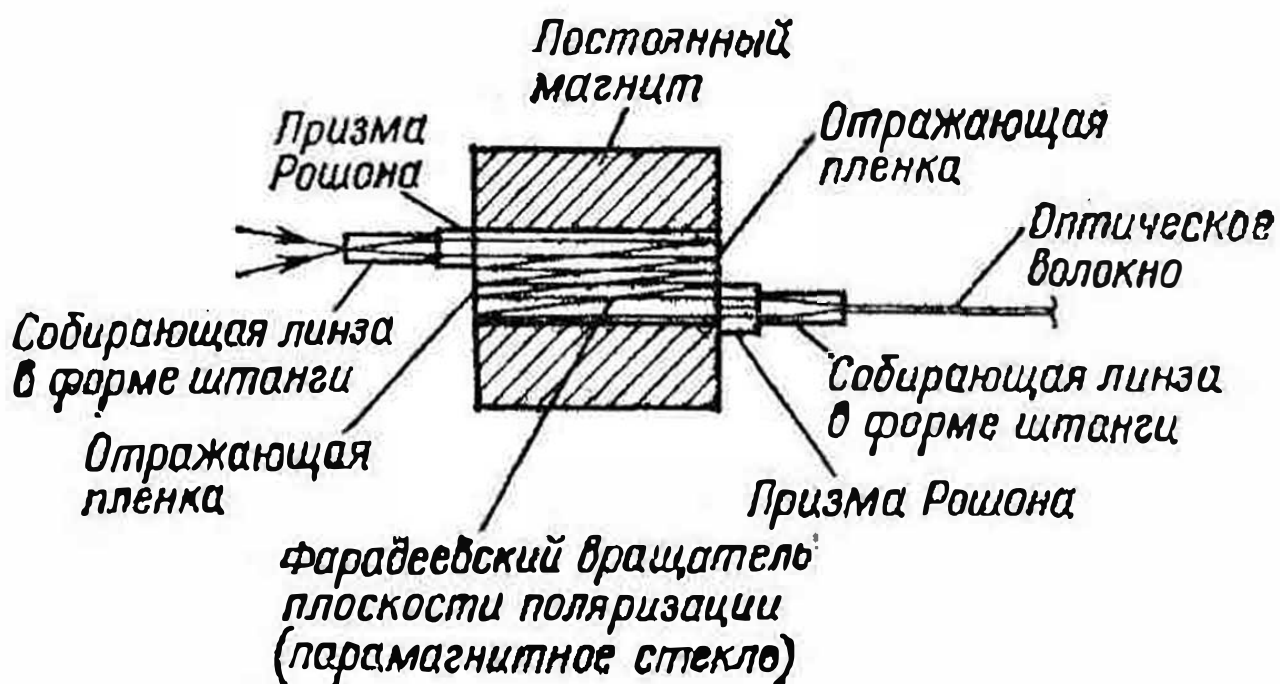


Рис. 107. Оптический вентиль для волн 0,8 мкм (OQE 78—133)

мый в области 1,3—1,5 мкм. В этой области превосходным материалом для фарадеевского вращения плоскости поляризации служит YIG (иттриево-железистый гранат), благодаря малым потерям на пропускание. Кристалл YIG отшлифован в форме цилиндра. С целью понижения стоимости кристалла и уменьшения размеров магнита в оптических вентилях применяют тонкие пленки этих кристаллов, изготовленные способом эпитаксии в жидкой фазе.

Кроме описанных выше испытываются опытные образцы волноводных вентилях, работающих за счет преобразования мод TE/TM . Преобразование происходит в тонких гранатовых пленках, полученных путем напыления на основу из немагнитного гадолино-галиевого граната. Оптические вентили волноводного типа станут одним из главных элементов оптических интегральных схем.

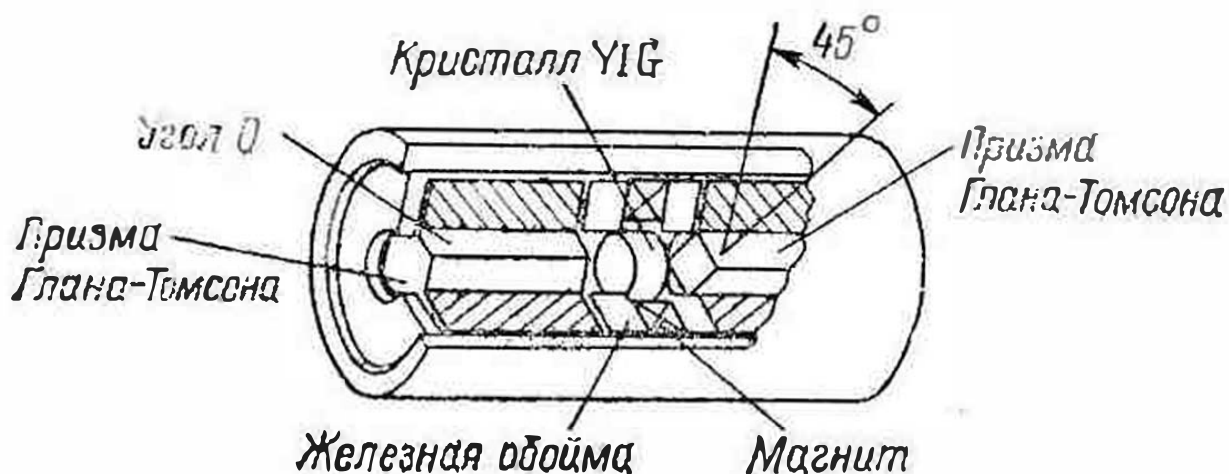


Рис. 108. Оптический вентиль (Iwamura a. oth., Ferrites Proc. ICF3 787, 1981)

Что такое оптическое волокно?

Оптическое волокно — это волокно для передачи световой энергии и оптических сигналов. Чтобы свет не выходил наружу, его заставляют отражаться от поверхности волокна или делают *волокна со ступенчатым или плавным уменьшением показателя преломления вдоль радиуса*. Одноточные волокна работают в оптической связи, в лазерном скальпеле, в установках для лазерной обработки материалов, в лазерных датчиках. А устройство, состоящее из большого числа волокон (от нескольких десятков тысяч до нескольких миллионов) может передавать изображения. Такие устройства используют в медицине, например для эндоскопии, и в технике — для осмотра недоступных мест.

Оптические волокна, как правило, бывают двух типов — *ступенчатые* и *градиентные* (рис. 109). Ступенчатые волокна представляют собой двухслойную

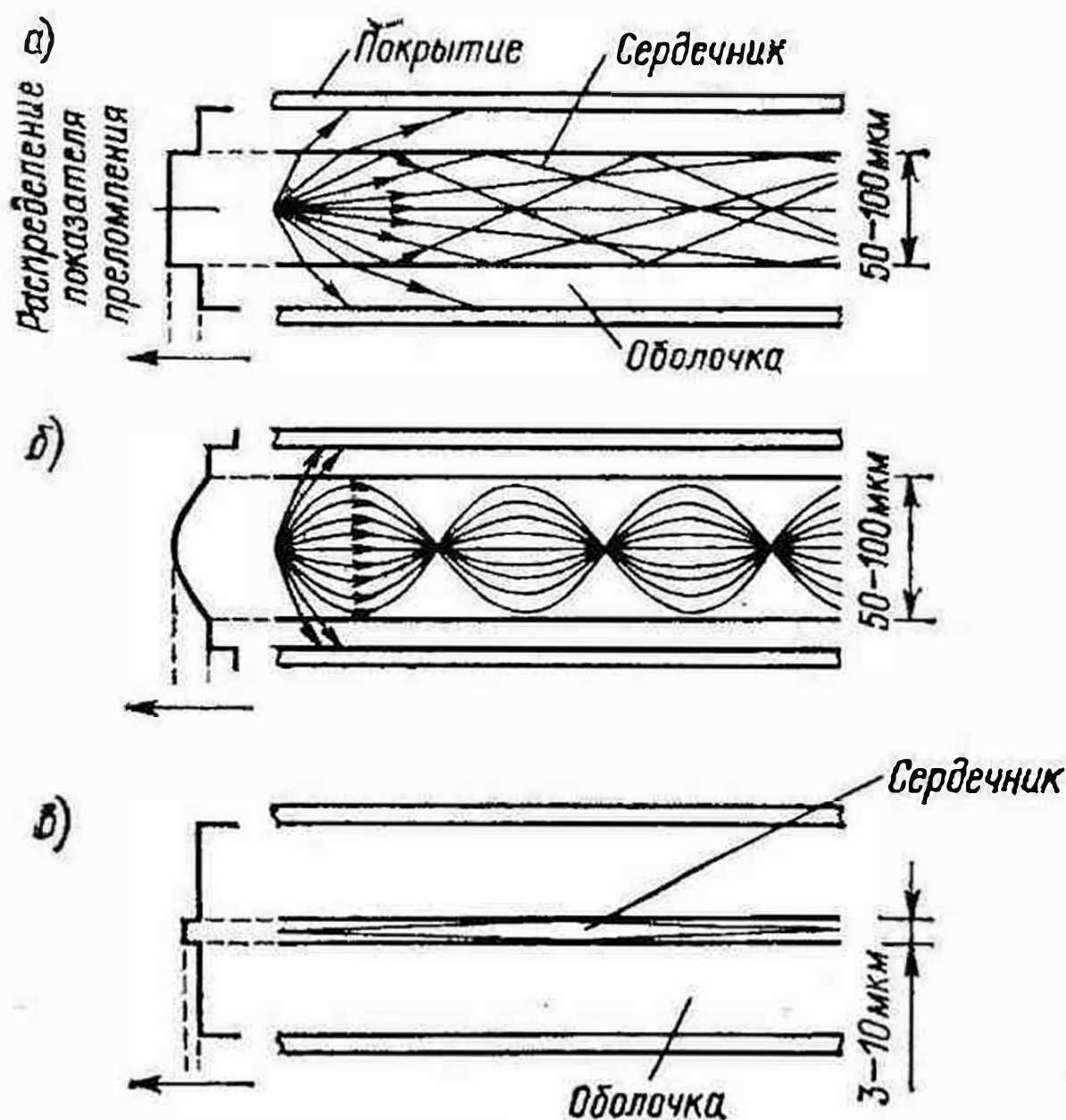


Рис. 109. Оптические волокна: а — ступенчатое многомодовое; б — градиентное; в — ступенчатое одномодовое

структуру — сердечник с высоким показателем преломления и оболочка с показателем преломления меньшим, чем у сердечника. Свет не выходит из сердечника за счет полного внутреннего отражения от границы между сердечником и оболочкой. В градиентных волокнах показатель преломления уменьшается от центра к краю поперечного сечения сердечника пропорционально квадрату радиуса. Свет проходит по такому волокну, периодически фокусируясь в точку на оптической оси, как через ряд линз.

Короткий импульс, проходя по ступенчатому волокну, удлиняется, из-за того что моды, идущие под малыми углами к оси волокна, распространяются быстрее мод, идущих под большими углами. Такое явление называют *дисперсией мод*, а волокно, где происходит дисперсия мод, — *многомодовым*. Дисперсия мод ограничивает скорость передачи информации в оптической связи несколькими десятками мегабит в секунду. В градиентном волокне лучи, проходящие разными путями, практически одновременно сходятся в точку, поэтому удлинение импульса меньше, чем в ступенчатом волокне, и скорость передачи возрастает до сотен мегабит в секунду. Для улучшения характеристик волокна и повышения скорости передачи информации в ступенчатом волокне диаметр сердечника уменьшают до нескольких микрометров. В таком волокне все моды проходят только под малыми углами, что делает волокно *одномодовым*, и скорость достигает сотен гигабит в секунду.

История развития оптических волокон — это история борьбы с потерями в них. В эндоскопах и подобных им устройствах использовались стеклянные волокна, но высокие потери делали пустой фантазией применение их для передачи света на километровые расстояния. Впервые эти трудности преодолела фирма «Корнинг» (США) в 1970 г. В использованных для передачи волокнах из особо чистого кварца потери были снижены до 20 дБ/км — и сразу оптическая связь стала реальностью. Потери излучения в оптических волокнах связаны с рэлеевским рассеянием, которое снижается обратно пропорционально четвертой степени длины волны. Рэлеевское рассеяние происходит при очень малых длинах волн, сравнимых с флуктуациями молекулярной структуры и показателя преломления вещества. При увеличении длины волны



Рис. 110. Характеристики потерь в кварцевых волокнах

рэлеевское рассеяние снижается, но возникают потери, связанные с инфракрасным поглощением. На рис. 110 показана спектральная зависимость, отражающая прогресс в улучшении очистки кварцевого стекла, позволяющей устранять потери на радикалах ОН. Теоретически потери в волокнах, связанные с рэлеевским рассеянием и инфракрасным поглощением, можно снизить до 0,2 дБ/км.

Что такое оптическое волокно, не искажающее поляризацию?

При изгибании оптического волокна в нем возникают механические напряжения, изменяющие показатель преломления. Показатель в направлениях x и y может изменяться по-разному, что вызовет нарушение поляризации проходящего по волокну излучения. *Оптическое волокно, не искажающее поляризацию*, — это такое одномодовое волокно, в котором поляризация основной моды не искажается при описанных выше условиях.

В сердечнике ступенчатых оптических волокон может распространяться только излучение, вошедшее туда под некоторым критическим углом. Световую

волну, проходящую по сердечнику волокна, можно представить в виде двух плоских волн, распространяющихся вдоль и поперек оптической оси. При этом в поперечном направлении могут существовать только отдельные стоячие волны, а в продольном — группа дискретных мод. При уменьшении диаметра сердечника и разности показателей преломления оболочки и сердечника число проходящих мод сокращается и в некоторых случаях может остаться только одна мода. Пример — одномодовые волокна. Проходящую моду называют *основной модой* (HE_{11} -модой).

Предположим, что основная мода одномодового волокна состоит из двух линейно поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях волн E_x и E_y , как показано на рис. 111, а. В идеальном волокне сечение сердечника представляет собой правильную окружность, где фазы мод E_x и E_y при прохождении не изменяются. Однако в реальном волокне имеются отклонения от формы правильной окружности; вызванные неоднородностью материала сердечника или внешними воздействиями на сердечник, такими, как вибрация, изгиб, разность температур. По этим причинам фазы обеих мод претерпевают при прохождении по волокну случайные изменения и линейная поляризация пропадает во времени и в пространстве.

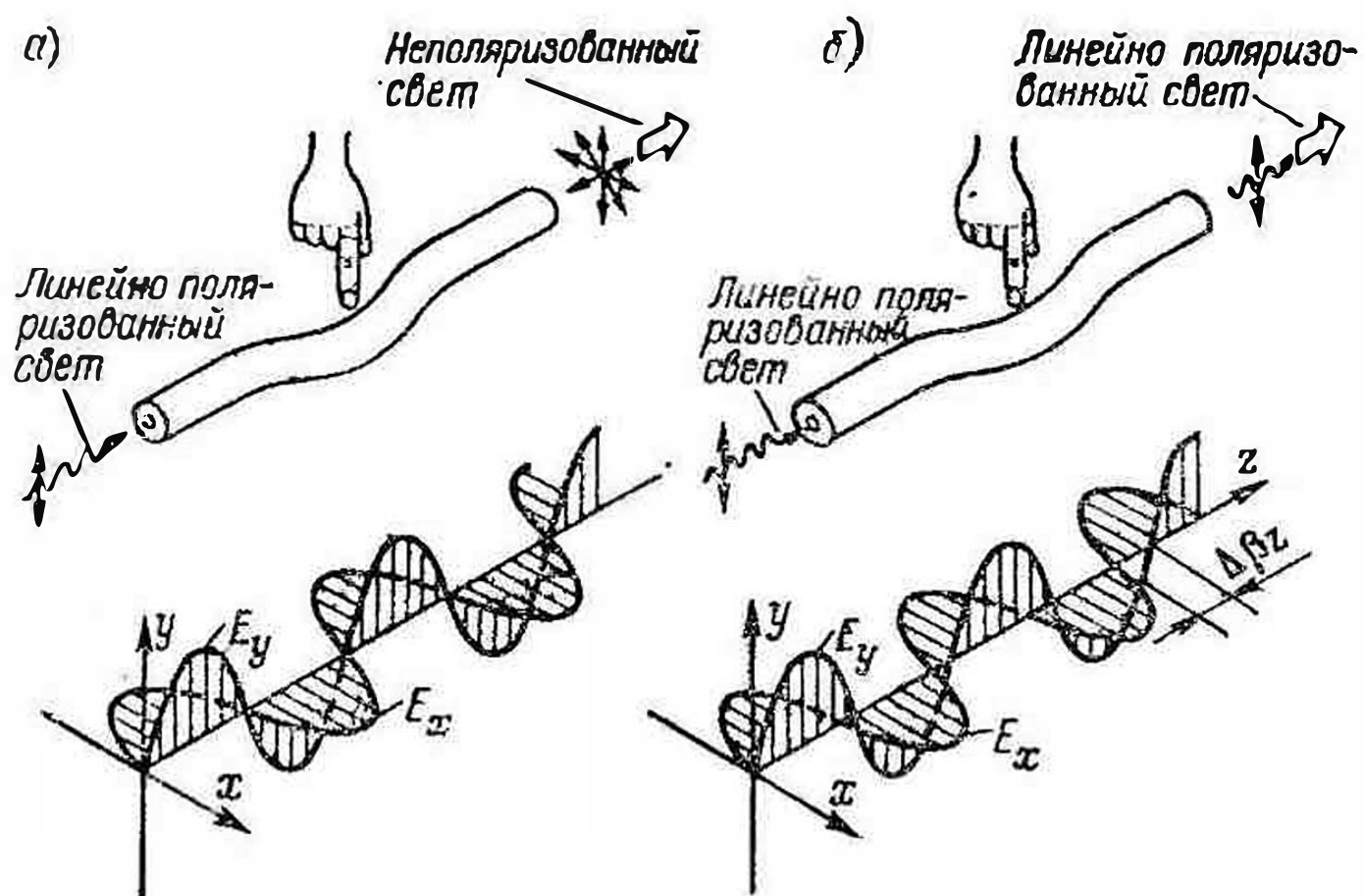


Рис. 111. Прохождение света по одномодовому волокну с искажением (а) и без искажения (б) поляризации

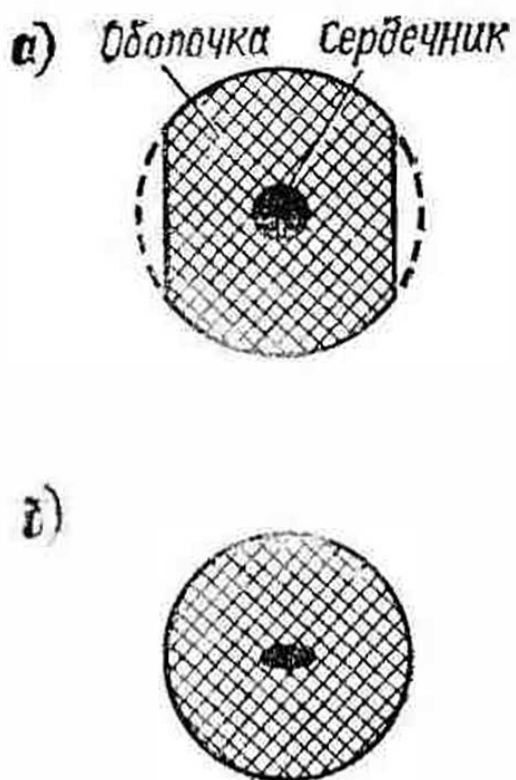


Рис. 112. Получение волокон с эллиптическим сердечником

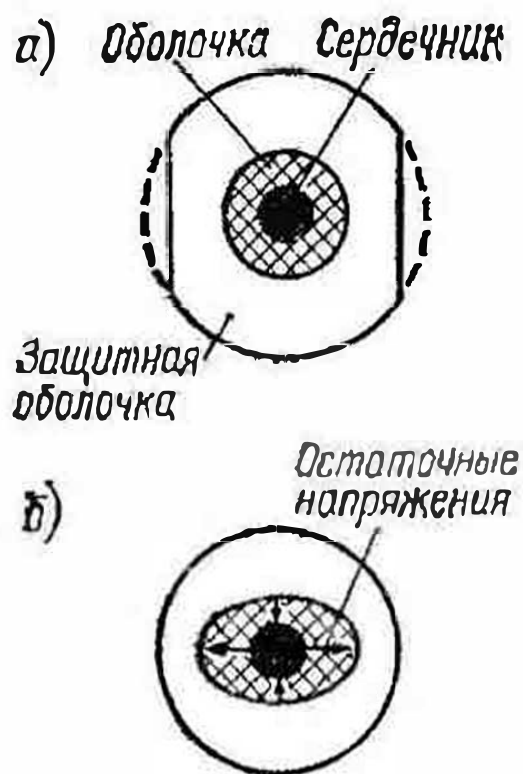


Рис. 113. Получение волокон с двойным лучепреломлением в сердечнике

Свет, имевший на входе в волокно плоскую поляризацию, не сохраняет ее на выходе из волокна.

Если сделать различными скорости мод E_x и E_y (разность скоростей $\Delta\beta$), так, чтобы разность фаз $\Delta\beta z$ превышала их изменения, вызванные дефектами, то распространение света по волокну перестает зависеть от этих изменений. Тогда если свет на входе в волокно имел линейную поляризацию, то даже при наличии дефектов в волокне поляризация света не изменяется (рис. 111, б). Получить большую разность фаз, достаточную для всей длины волокна, можно, сделав сечение сердечника эллиптическим. Один из способов показан на рис. 112. Волокно формуют, срезая две плоскости вдоль оси (а), а затем снова придают ему цилиндрическую форму волочением (б). Вторым возможным способом показан на рис. 113, а. Здесь различие показателей преломления по осям x и y в сердечнике возникает за счет различных механических напряжений по этим направлениям (рис. 113, б). Если материал сердечника и оболочки имеет различную температуру затвердевания и только сечению оболочки придана эллиптическая форма, то в сердечнике возникает деформационное двойное лучепреломление. В волокнах с оболочкой эллиптического сечения доля рассеянного света после прохода 500 м составляет

минус 30 дБ, а потери при передаче могут достигать 0,8 дБ/км.

Предполагают, что достоинства не искажающих поляризацию оптических волокон проявятся в такой измерительной технике, как волоконные датчики и волоконно-оптические гироскопы, регистрирующие с помощью интерференции поляризацию и фазу колебаний, а также в *когерентной оптической связи*, позволяющей передачу большого объема информации.

Что такое инфракрасное оптическое волокно и оптическое волокно со сверхнизкими потерями?

Обычно название «оптическое волокно» указывает на применение волокон из кварца (SiO_2), прозрачных в ближней инфракрасной области, примерно до длины волны 2 мкм. По этой причине теоретическая граница потерь 0,1 дБ/км и эти волокна невозможно использовать для передачи энергии излучения середины инфракрасной области, например излучения лазера на углекислом газе с длиной волны 10,6 мкм, работающего в лазерных скальпелях. Лишь созданные на основе новых материалов — щелочно-гадоидных и халькогенных стекол — *инфракрасные оптические волокна и оптические волокна со сверхнизкими потерями* позволили снизить потери на 2—3 порядка по сравнению с кварцевыми волокнами, что дало возможность передавать энергию излучения в средней инфракрасной области (длины волн от нескольких микрометров до нескольких десятков микрометров).

При передаче по оптическим волокнам с увеличением длины волны снижаются потери от рэлеевского рассеяния, обратно пропорциональные четвертой степени длины волны. Однако наряду с этим увеличиваются потери *инфракрасного поглощения*, возникающего из-за возбуждения инфракрасным излучением различных осцилляторов в материале оптического волокна. В кварцевых волокнах граница поглощения находится в области сравнительно коротких (приблизительно 2 мкм) волн. Теоретическая граница по-

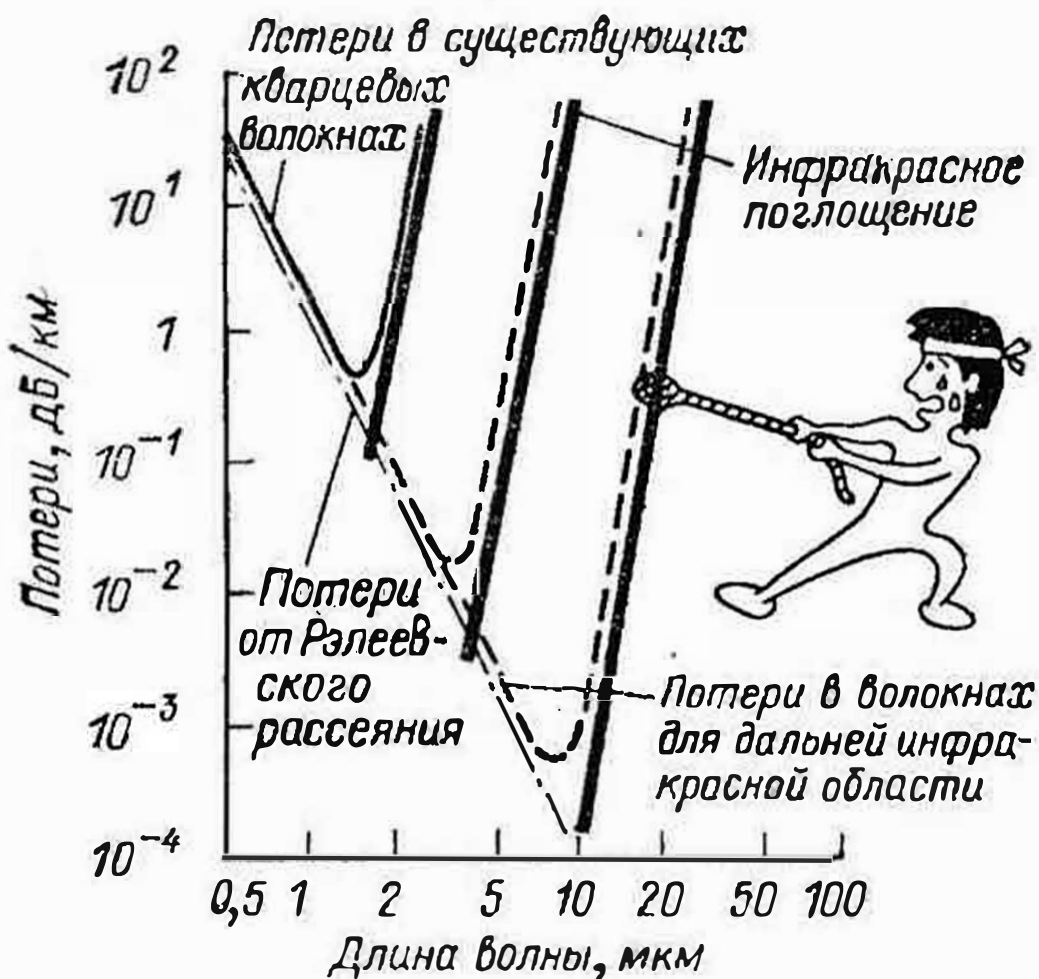


Рис. 114. Снижение потерь и инфракрасное поглощение в оптических волокнах

терь — это минимум на кривой потерь, образованной сложением кривых рэлеевского рассеяния и инфракрасного поглощения. В системах кварцевых волокон он снижается практически до 0,2 дБ/км. Потери уменьшают, изготавливая волокна из материалов, у которых граница инфракрасного поглощения находится в области более длинных волн, чем у кварца (рис. 114). Если возможно пропускание излучения с длиной волны до 10 мкм без поглощения в инфракрасной области, то потери от рассеяния составят всего 10 дБ/км и их называют сверхнизкими. С появлением таких волокон перестанет быть фантазией связь без ретрансляции через Тихий океан.

Однако в медицине и для лазерной обработки материалов подходят даже волокна из плохо очищенных веществ, не дающие большого снижения потерь в инфракрасной области. Длина используемых для этих целей волокон всего несколько метров. В аппаратах для прецизионной лазерной обработки и в лазерном скальпеле, позволяющем производить бескровные операции, работает лазер на углекислом газе. До последнего времени не было волокон, прозрачных в области средних длин волн инфракрасного излучения, поэтому для подвода излучения применялись мани-

Таблица 2. Материалы инфракрасных волокон и их свойства

Материалы	Диапазон прозрачности, мкм	Потери, дБ/км	
		теоретические	реальные
Галоиды щелочей (поликристаллы, монокристаллы, стекла):			
KRS-5 (TlBr/TlI)	0,5—40	10^{-2} — 10^{-5} (10,6 мкм) *	300 (10,6 мкм) *
ZnCl	—	10^{-3} (3,5—4,0 мкм)	4200 (10,6 мкм)
KCl	0,21—30		
AgCl, AgBr	0,4—35	10^{-3} (5 мкм)	2500—4000 (10,6 мкм)
CsI	0,24—70	—	8000 (10,6 мкм)
CsBr	0,22—55	—	5000 (10,6 мкм)
CdF ₃ —BaF ₂ —ZrF ₄	0,3—8,0	10^{-3} (3,5—4,0 мкм)	300 (3,39 мкм)
Халькогенные стекла:			
As ₂ S ₃	0,6—11	—	20 000
GeS ₃	0,5—11	10^{-2} (5—6 мкм)	360 (2,4 мкм)
Ge—Se ₃	12 **	—	10 000
Ge—P—S	0,55—10,50	10^{-1} — 10^{-2} (5—6 мкм)	380 (2,5 мкм)
	12 **	—	10 000 (5,5—7,0 мкм)
Стекла:			
GeO ₂	6 **	—	0,16 (1,7—1,8 мкм)
TeO ₂	0,38—6,60	—	10 000 (2 мкм)

* В скобках указаны длины волн, заданные при расчетах или измерениях.

** Верхняя граница.

пуляторы, подобные рукам роботов, на сочленениях которых устанавливались зеркала. В таких конструкциях было неудобно управлять потоком излучения, а юстировка их вызывала большие сложности. Выручили оптические волокна, способные проводить излучение лазера на углекислом газе.

Разработка оптических волокон для инфракрасной области излучения еще только началась, так же как и поиск материалов и различных технологий производства. Исследуются материалы, применявшиеся ранее в инфракрасной оптике (табл. 2). Это щелочно-галогидные поликристаллы, монокристаллы и стекла. В настоящее время выпускаются поликристаллические волокна длиной 2 м, проводящие излучение лазера на углекислом газе, имеющего выходную мощность 20 Вт, и стеклянные волокна длиной 100 м с потерями 300 дБ/км.

Что такое оптический волновод?

Оптические волноводы — это линии оптической связи — волоконные и пленочные. В узком смысле пленочным оптическим волноводом называют тонкую пленку, помещенную на подложку и проводящую свет.

Пропуская свет сквозь среду с более высоким показателем преломления, чем у ее окружения, можно, уменьшая угол входа волнового фронта до некоторого критического значения, добиться полного внутреннего отражения в этой среде. В результате световой луч, многократно отражаясь от границ среды, будет проходить по зигзагообразному пути. Так геометрическая оптика объясняет прохождение света по волноводу. Незначительную часть световых волн, все же выходящую сквозь боковые стенки волновода, называют *нераспространяющимися волнами*.

Как показано на рис. 115, оптические волноводы бывают *планарными*, где на подложку нанесена тонкая плоская пленка, толщиной в несколько микрон (рис. 115, а), и *канальными*, проводящими свет только в пределах полосы, сделанной в поверхностном слое подложки с показателем преломления, отличным

от показателя преломления подложки. Канальные волноводы делятся на *встроенные* (рис. 115, б), *полосковые* (рис. 115, в) и *ребристые* (рис. 115, г). На основе волноводной связи можно создавать различные оптические схемы. Например, с помощью волновода Y-образной формы можно соединять и разъединять световые потоки. Материалом для оптических волноводов обычно служат диэлектрики — анизотропные, типа электрооптических кристаллов, или имеющие в составе атомы металлов. Существуют волноводы с активным слоем, типа полупроводникового лазера, сделанные из полупроводниковых материалов. Рассмотрим типичный оптический волновод. В подложке из полупроводникового кристалла LiNbO_3 диффузией титана создана полоса с более высоким показателем преломления по отношению к остальной части подложки. В таком волноводе, сделав с двух сторон контакты и подавая на них напряжение, можно управлять световым потоком.

За счет разности показателей преломления, а также за счет впадины в подложке или выступа на пленке можно получить собирающую линзу непосредственно в волноводе. Примеры таких *волноводных линз* приведены на рис. 116. Среди них: *модоиндексная линза* и *линза Люнеберга*, работающие за счет перепада показателей преломления или изменения

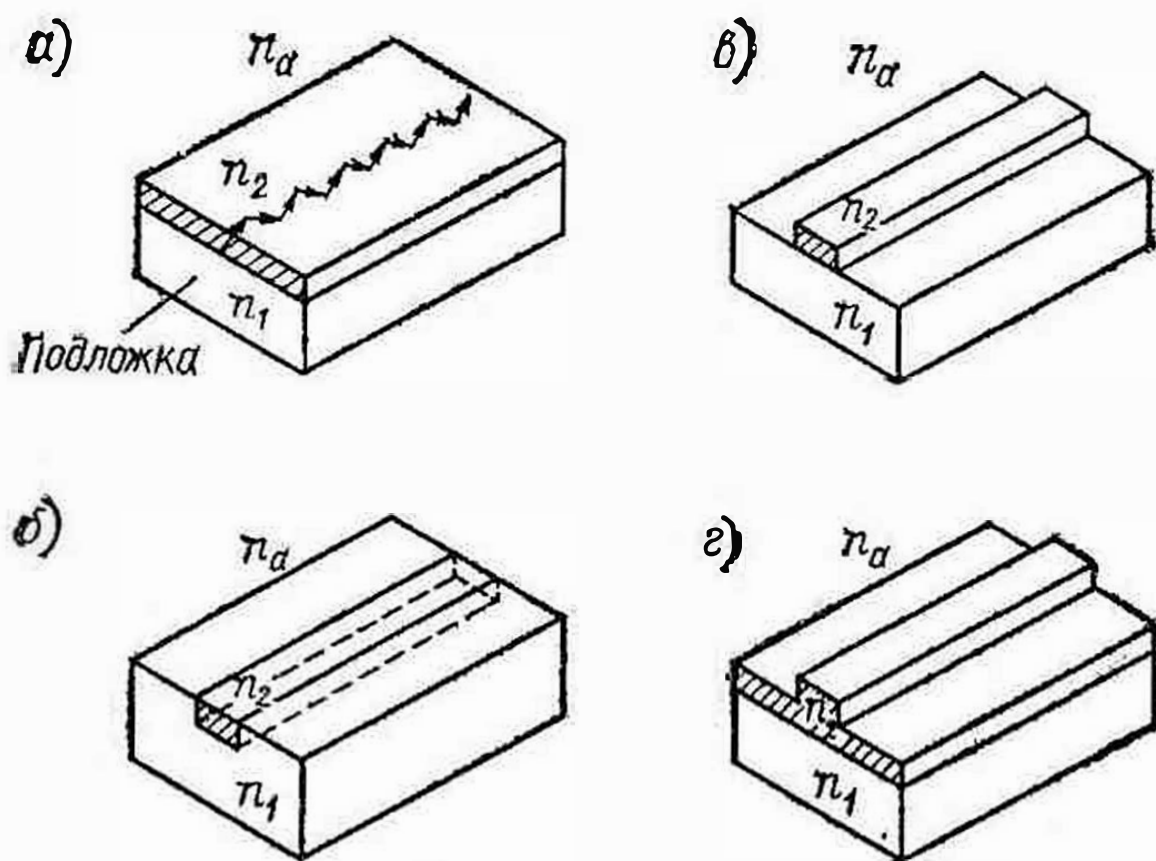


Рис. 115. Оптические волноводы
 n_a — показатель преломления воздуха; $n_2 > n_1 > n_a$

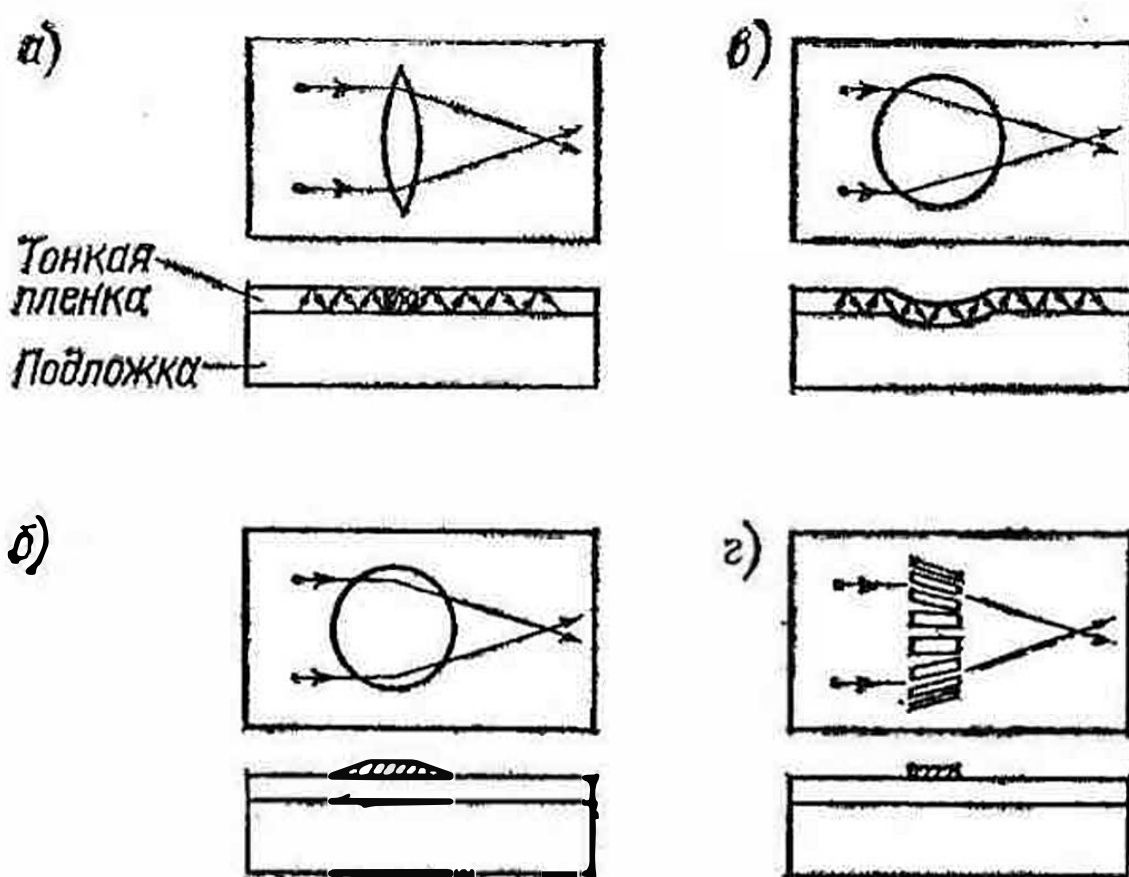


Рис. 116. Волноводные линзы: а — модоиндексная; б — линза Люнеберга; в — геодезическая; г — дифракционная

толщины пленки; *геодезическая линза*, располагающая световой поток по геодезическим линиям вогнутой поверхности в соответствии с принципом Ферма; *дифракционная линза*, фокусирующая свет дифракцией на решетке. Оптические волноводные линзы позволяют осуществлять сложную обработку оптической информации — одномерное параллельное преобразование Фурье, спектральное разложение и др.

Оптические волноводы и волноводные линзы становятся элементами *оптических интегральных схем*. Эти приборы помимо оптических волноводов и линз содержат собранные на одном основании источники света, анализаторы, приемники света, поляризаторы, оптические отклоняющие системы и оптические модуляторы. Вместе с исследованиями каждого из этих элементов ведутся исследования по их интеграции.

Что такое оптическая память?

Оптическая память — это устройство хранения информации, запись и считывание которой происходит при помощи света. *Последовательная запись (бит за битом)* — способ записи на дорожку бинар-

ного сигнала в виде временного ряда. Он широко распространен в видеодисках и цифровых аудиодисках. А двухмерную информацию, например картины, записывают в оптическую память непосредственно, формируя изображение с помощью линз, или сканируя лазерным лучом, или голографически. В виде голограммы можно записать и трехмерную информацию.

На рис. 117 показан один из принципов голографической памяти, называемый *голографической страничной памятью*. *Формирователь страниц* модулирует лазерный луч двухмерной матрицей битовой информации. Этот образ служит предметным лучом и при помощи опорного луча записывается на светочувствительную пластинку в виде микроскопических голограмм, составляющих двухмерную матрицу. Направ-

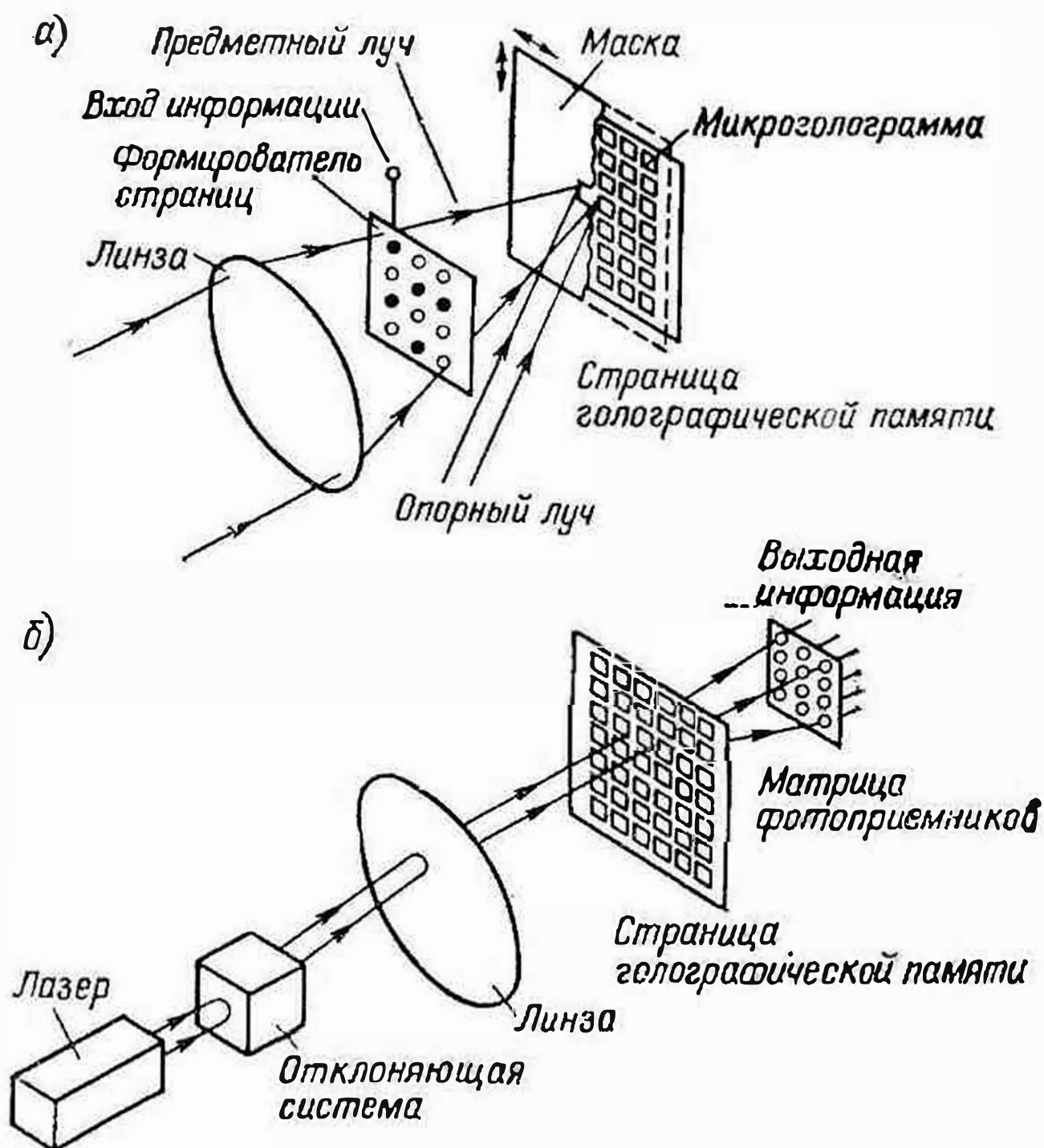


Рис. 117. Голографическая страничная память: а — запись; б — считывание

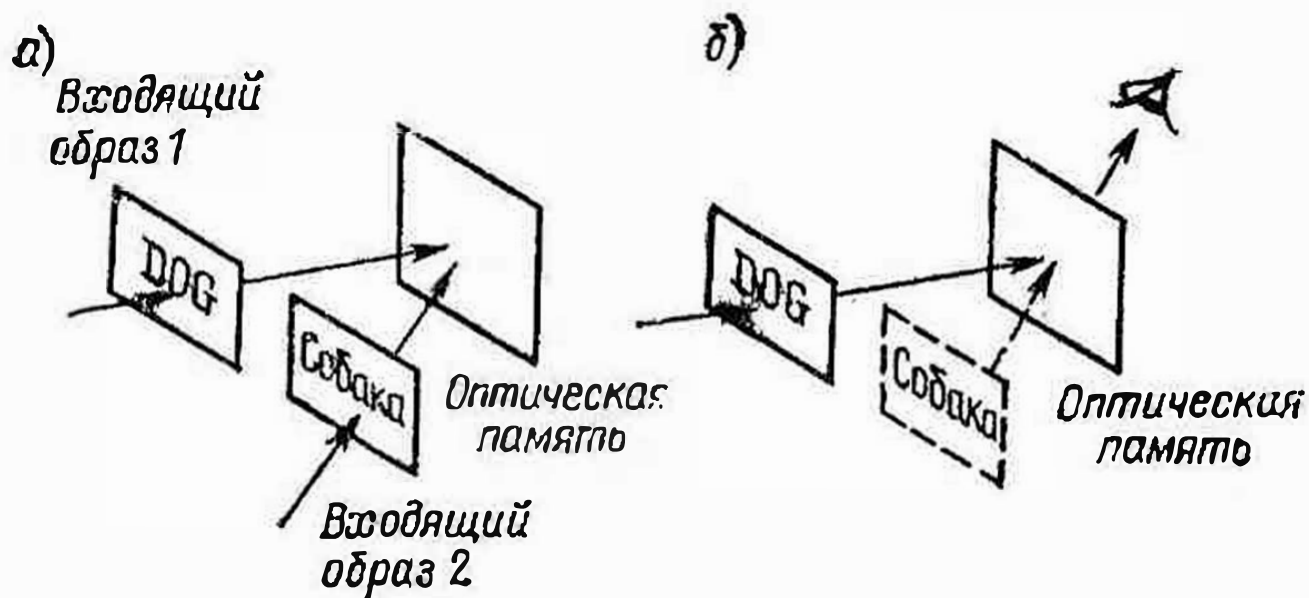


Рис. 118. Функциональная голографическая память: а — запись; б — считывание

для при помощи отклоняющей системы лазерный луч на требуемую голограмму, можно восстановить записанную на ней двухмерную битовую информацию. Прибор, работающий аналогично формирователю страниц, но позволяющий получить на пластинке двухмерную запись, соответствующую трехмерному изображению, называют *пространственным модулятором*. Это один из элементов памяти, преобразующих информацию.

Для оптической памяти используют уже существующие фотоматериалы, но они требуют мокрой обработки и не позволяют перезаписи, поэтому применяются только в постоянных запоминающих устройствах. Ведется разработка элементов памяти, позволяющих перезапись. Их основа — электрооптические материалы, такие как MOG (молибденовокислый гадолиний), LiNbO_3 , магнитооптические материалы, такие как MnBi , прозрачная керамика типа PLZT, а также термопластические пленки, жидкие кристаллы и др. Кроме того, ведутся исследования по использованию оптического бистабильного элемента в памяти оптического компьютера.

Предполагается, что голографическая память будет иметь большую емкость порядка 10^9 бит/см², а также обладать другими достоинствами. При последовательной записи, если на дорожку нанесена царапина или попала пыль, это место будет необратимо испорчено, а при голографической записи, из-за того что отдельные ее элементы рассредоточены по всему объему записи, такие повреждения не приведут к

полной потере информации. Кроме того, как показано на рис. 118, возможна голографическая «многослойная» запись, например «DOG» и «собака», «CAT» и «кошка». Это дает возможность ассоциации объектов или перевода слов. Если освещать запись через пластинку со словом «DOG», возникнет голографическое изображение слова «собака». Предполагают, что обработка информации будет производиться с помощью подобной *функциональной памяти*.

Что такое оптическая и оптоэлектронная интегральная схема?

До настоящего времени для обработки оптической информации на устойчивом железном основании длиной примерно 2 м располагали в ряд крупногабаритный лазерный источник света и закрепленные на магнитах линзы, зеркала, фильтры, модулятор и приемник света. Такая конструкция была нежесткой, неустойчивой к вибрациям и имела большие габариты. Эти и другие недостатки не позволили серийно выпускать подобные системы. Но с развитием технологии уменьшались габариты, и были созданы новые приборы, названные *оптическими интегральными схемами (интегрированной оптикой)*, в которых на одной подложке собрано много различных оптических элементов. Эти элементы имеют малые габариты, высокую надежность, расширяют функциональные возможности приборов и позволяют их массовое производство (рис. 119).

На подложках оптических интегральных схем изготавливают оптические волноводы, источники и приемники света, оптические модуляторы и отклоняющие системы. Материал подложек — полупроводник типа GaAs или диэлектрик типа LiNbO_3 . Для передачи света используют оптический волновод, созданный разностью показателей преломления отдельных участков подложки. Источником света служит полупроводниковый лазер или светодиод, а приемником — фотодиод, выращенные на подложке методом эпитаксии. Оптические модуляторы и отклоняющие системы ос-

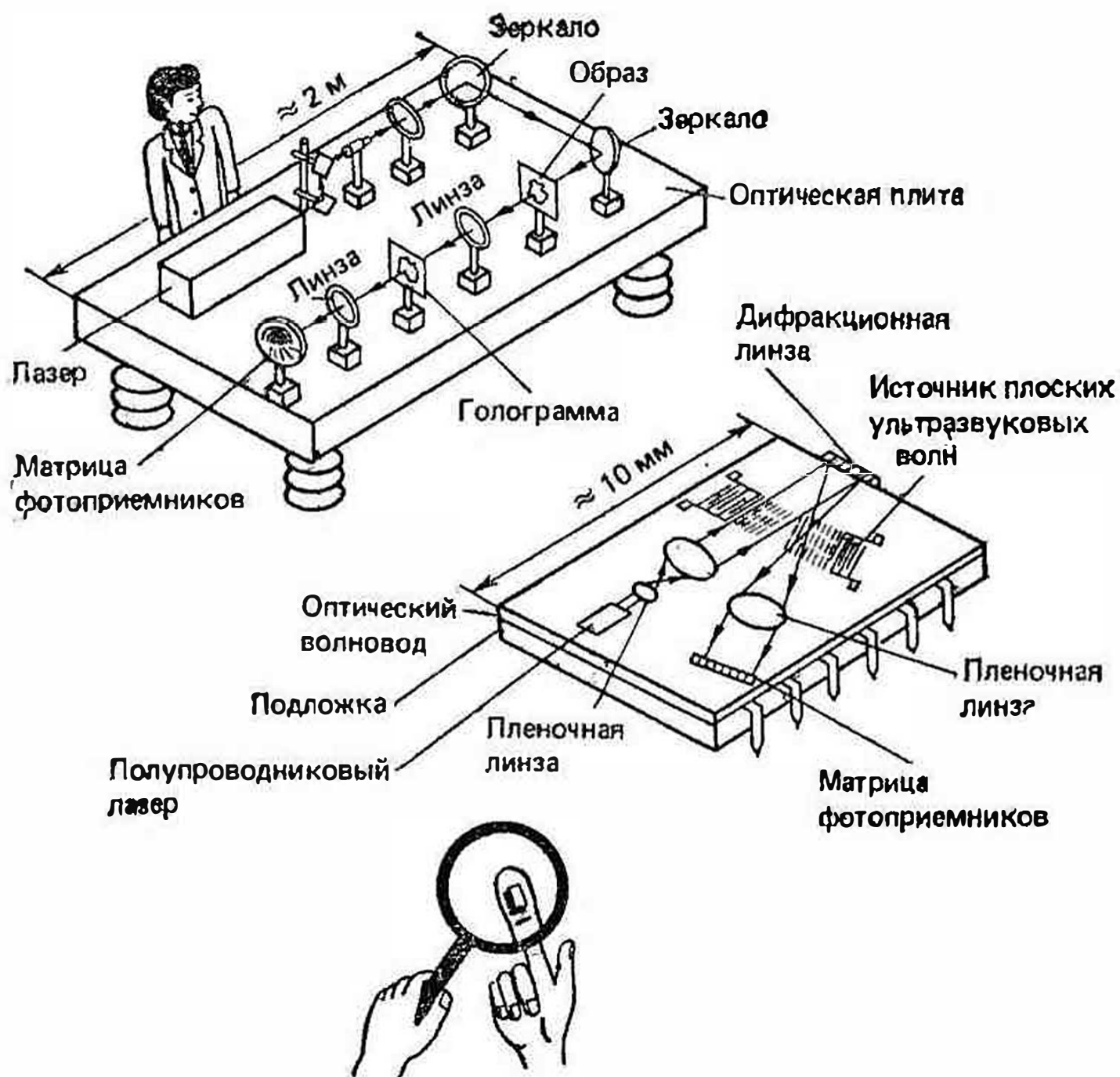


Рис. 119. Оптическая интегральная схема в сравнении с оптической системой на дискретных элементах

нованы на электрооптическом или акустооптическом эффекте. В качестве линз подходят *пленочные оптоволоноводные линзы*.

Оптические интегральные схемы — это не просто интегральные схемы, в которых электронные элементы заменены на оптические. Самая существенная особенность этих схем в том, что при обработке света используются свойства световых волн, в частности возможна параллельная цифровая обработка информации, полученной в когерентном свете, а следовательно, значительный рост скорости обработки. В качестве примера рассмотрим *оптический спектральный анализатор*. Эта интегральная схема еще находится в стадии исследований, еще не определено ее внутреннее строение, но в одном отношении она уже достигла уровня практического использования. Создан эле-

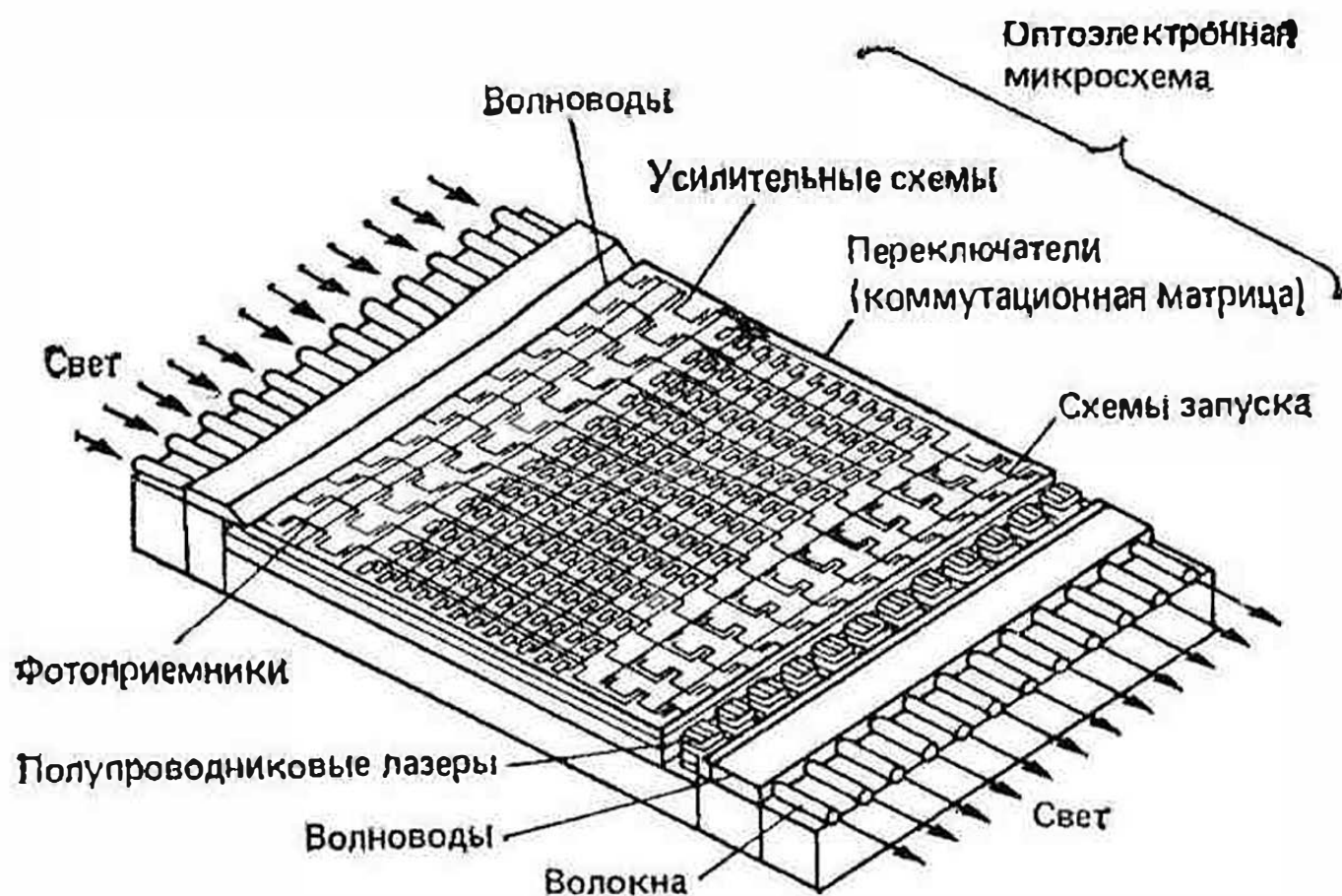


Рис. 120. Оптоэлектронная интегральная схема — многоканальный ретранслятор

мент, с высокой скоростью анализирующий спектр сигнала радара. Через оптический волновод проходит звуковая волна, соответствующая сигналу радара, и свет от полупроводникового лазера. Неоднородности среды, вызванные звуковой волной, образуют линзу, производящую одномерное преобразование Фурье. Свет проходит через линзу и поступает на оптические приемники.

Созданы также *оптоэлектронные интегральные схемы* — новый тип приборов, объединяющих не только оптические элементы, такие, как полупроводниковый лазер, но и приборы электроники, например транзисторы (рис. 120). В таких сборках используются сильные стороны оптики и электроники. Термин «оптическая интегральная схема» — новое слово, появившееся благодаря грандиозному проекту министерства внешней торговли (Японии. — *Прим. перев.*) «Развитие исследований систем, управляющих измерениями в практической оптике».

Оптоэлектронные интегральные схемы используют в оптической связи. Они работают как усилители сигналов, проходящих по оптическим волокнам, и как ретрансляторы оптических сигналов. Кроме того, предполагают использовать их в многоканальной оптической связи и для связи с оптическим гетеродином.

Что такое новые функциональные элементы оптоэлектроники?

Так как новыми функциональными элементами называют очень широкий круг приборов, то сграничимся элементами, названными министерством внешней торговли в информации о новых фундаментальных направлениях. Среди этих элементов технологически тесно связаны с оптоэлектроникой *сверхструктурные приборы* и *трехмерные приборы*.

Сверхструктурный прибор — это изготовленная в виде отдельного функционального элемента сверхструктура из большого числа тонких пленок различных материалов в виде слоев, образующих взаимно запирающие переходы. *Поперечным* называют прибор, пропускающий носители перпендикулярно слоям. Типичный пример — полупроводниковый лазер с квантовым колодцем, имеющий сверхструктуру в активной области. Благодаря ей увеличивается КПД, уменьшается пороговая для лазерной генерации плотность тока и можно при прежних материалах получать излучение с более короткой длиной волны и более чистыми модами. Если зонная структура материала позволяет только не прямые переходы и дает плохой коэффициент светового выхода, то с помощью сверхструктуры можно сделать переходы прямыми и повысить световой выход. При использовании сверхструктуры GaAs и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в лавинном фотодиоде из-за увеличения дискретности края зоны проводимости и уменьшения дискретности края валентной зоны увеличивается отношение коэффициентов ударной ионизации электронов и дырок, что ведет к ослаблению шумов.

Активно ведутся исследования сверхструктурных приборов продольного типа, пропускающих носители вдоль слоев. На рис. 121 показан образец лавинного фотодиода. В нем для снижения шума увеличено отношение коэффициентов ударной ионизации электронов и дырок путем пространственного разделения рожденных светом электронно-дырочных пар.

Трехмерный прибор отличается от всех существующих приборов, в которых отдельные элементы собраны в линейки на плоскости, тем, что элементы

Энергетические зоны

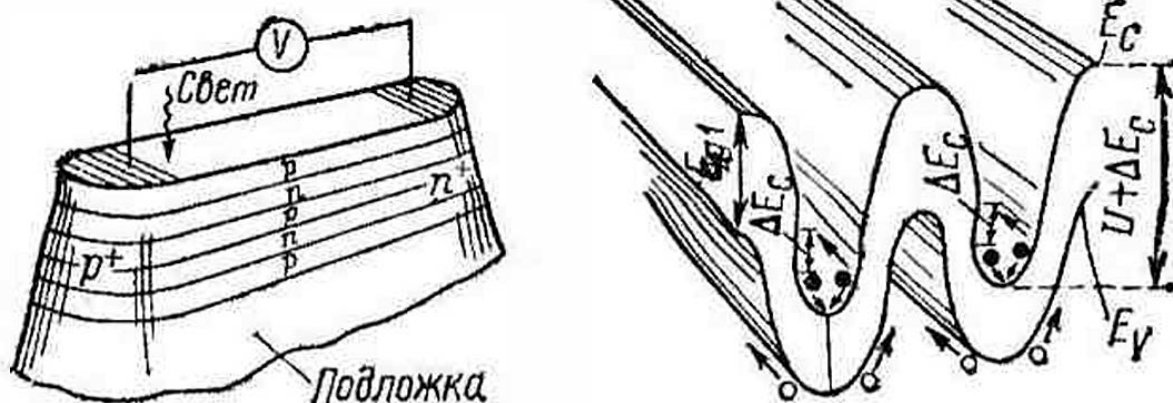


Рис. 121. Продольный лавинный фотодиод (F. Capasso, Electronics Letters, vol. 18, No. 1, p. 12, 1982)

в нем собраны по вертикали. Ведутся активные разработки технологических процессов для производства таких приборов. Предполагается создавать трехмерные приборы для использования в различных, связанных с оптикой целях. Функциональная сборка показана на рис. 122. В самом верхнем слое находятся светочувствительные элементы, а непосредственно под ними — элементы для обработки сигналов. Предполагается осуществить в одном приборе весь процесс — от приема световых сигналов до обработки информации. При надобности свет можно пропускать и до последующих слоев без обработки.

Одна из особенностей трехмерного прибора в том, что сигнал может случайным образом проходить

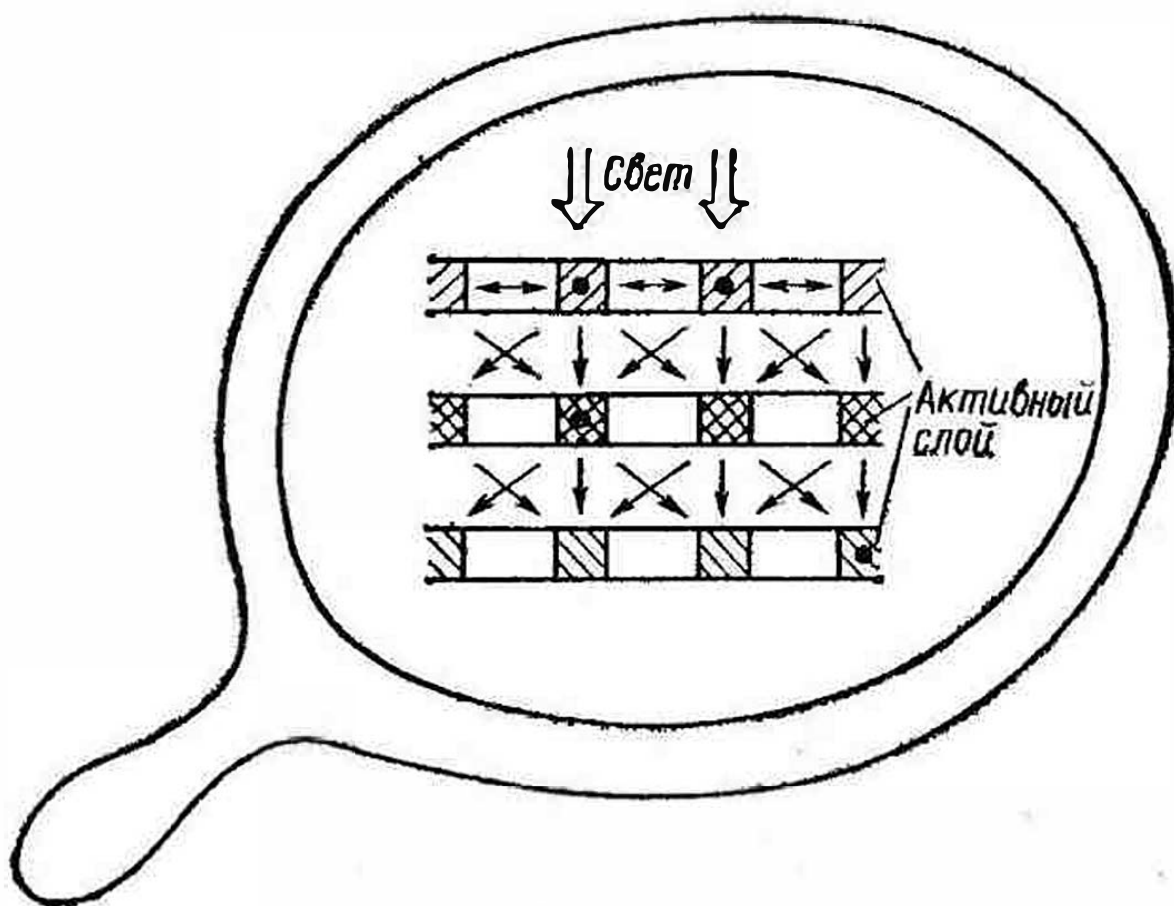


Рис. 122. Трехмерный прибор

Тонкими стрелками показано прохождение сигнала; квадратиками с кружком обозначены области элементарного преобразования

сквозь активные слои элементов поперечного типа и по активным слоям элементов продольного типа. Это позволяет параллельную корреляционную обработку сигнала в сборках приборов. При этом желательно увеличить степень свободы прохождения сигнала, а так как при электрических соединениях это невозможно, то использование света для передачи сигнала подразумевается само собой. Кроме того, в некоторых случаях предполагается использовать совместно оптические и электронные приборы. Поэтому развитие новых функциональных элементов желательно осуществлять в тесном контакте с оптоэлектроникой.

Что такое оптические средства связи?

Оптические средства связи — это системы, в которых для волновой передачи используется область электромагнитных волн с частотами 10^{12} — 10^{15} Гц, т. е. свет. Проводником света может быть пространство, направленный луч, например лазерный, и оптическое волокно. При появлении оптических волокон с низкими потерями техника волоконной оптической связи сделала скачок и в настоящее время располагает множеством способов передачи информации.

Для связи необходимы колебания несущей частоты (несущая) с высокой когерентностью, иначе говоря стабильные по фазе и частоте. Кроме того, чем выше частота несущей, тем больше информации можно с ней передать. Именно это привело к переходу от сантиметровых волн к миллиметровым и к предложению о дальнейшем повышении частоты с выходом в оптическую область. Последнее стало реальностью с изобретением лазера, сразу давшего повышение частоты в 10^4 — 10^5 раз (рис. 123). Однако в существующих источниках света для оптической связи когерентность невысока, поэтому частотная или фазовая модуляция не применяется. Несущая подвергается амплитудной модуляции, т. е. информация передается посредством изменения силы света.

Оптическая связь обладает множеством достоинств. Пропускная способность каналов велика: при

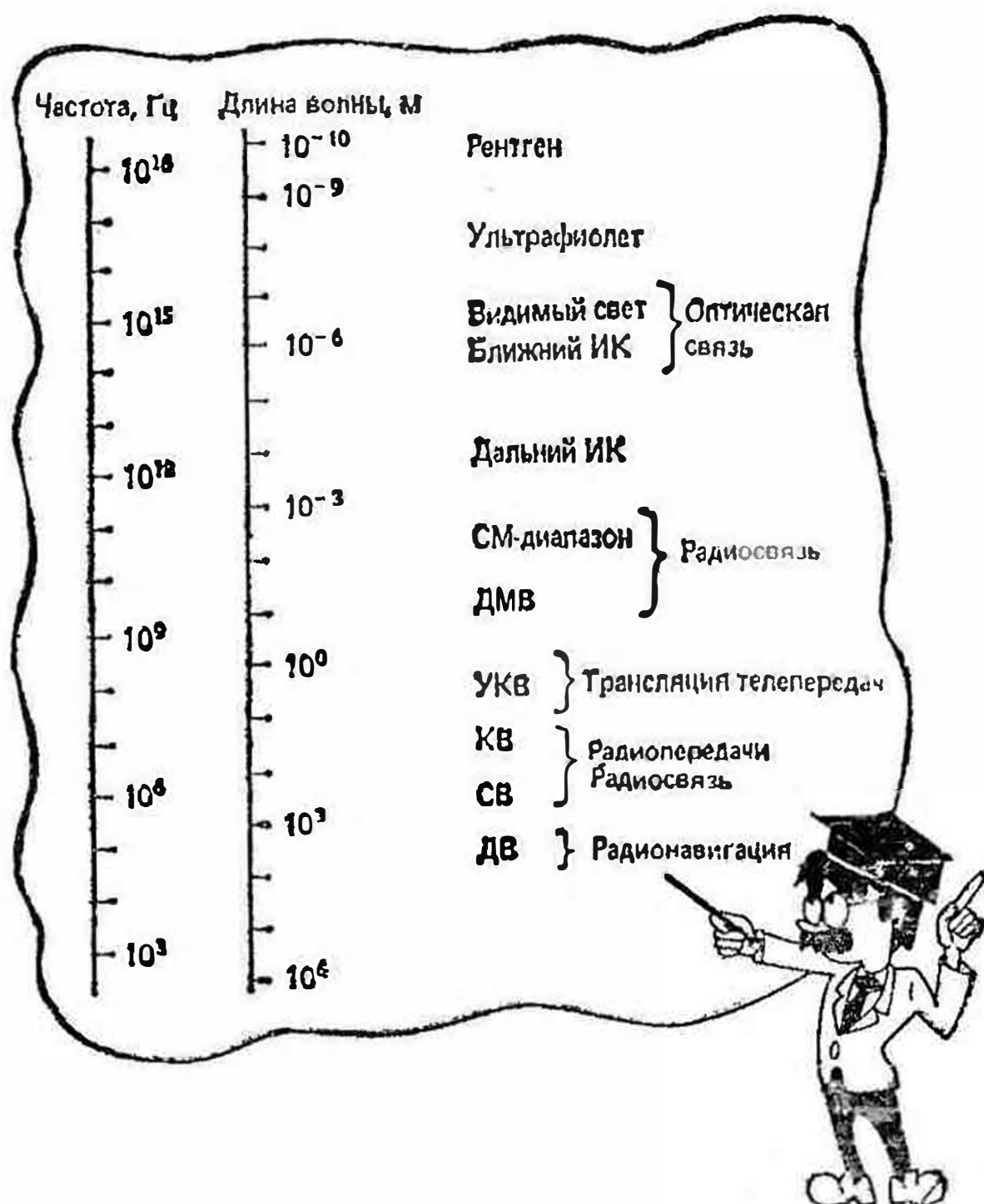


Рис. 123. Вверх по шкале частот

использовании многомодовых оптических волокон она доходит до нескольких гигабит в секунду. Потери низки: при длине волн 1,1—1,5 мкм они меньше 0,5 дБ/км. Оптическая связь устойчива к окружающей среде — ее не портят электромагнитные помехи, линии влаго- и коррозионностойки, в них отсутствуют перекрестные искажения; благодаря этому возможности для широкого использования огромны.

Схема системы оптической связи показана на рис. 124. Сначала в электронной части производят импульсно-кодovou, амплитудную или фазовую модуляцию, а затем полученным сигналом модулируют интенсивность источника света. Модулированный свет передают по оптико-волоконному волноводу. При дальней связи необходимо устанавливать ретрансляторы, принимающие и усиливающие затухающие оптические сигналы, формируя волну, распро-

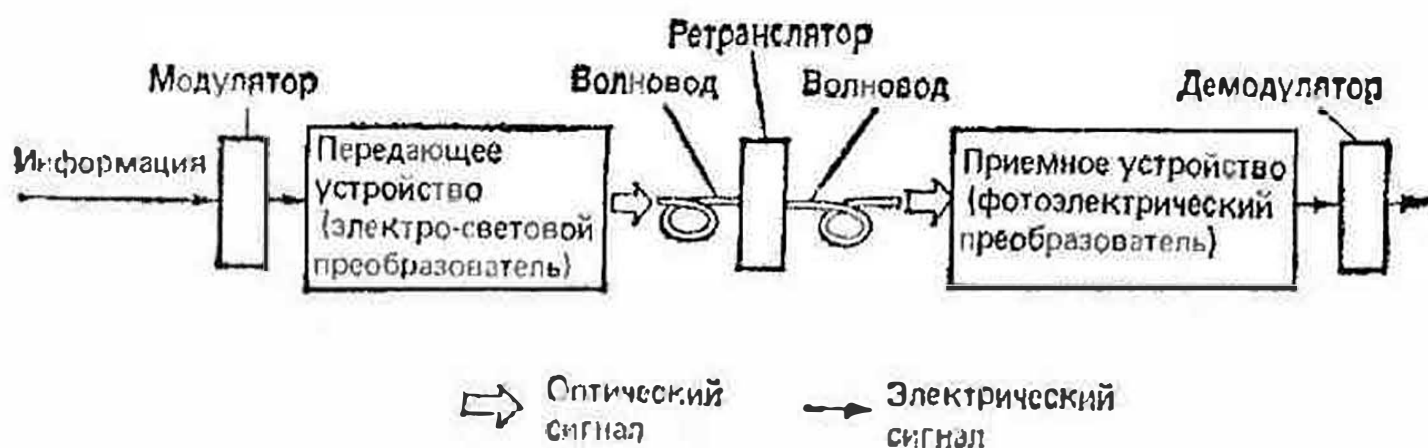


Рис. 124. Система оптической связи

страющуюся далес. Оптический сигнал демодулируют, преобразуя с помощью фотоприемника в электрический сигнал. Передачу сигналов можно производить цифровым и аналоговым способом.

Для оптической связи используют источники света с непосредственной модуляцией. Это полупроводниковый лазер, излучение которого можно модулировать со скоростью до нескольких гигабит в секунду, и светодиод, имеющий скорость модуляции 10—100 Мбит/с. Большой шаг в развитии оптической связи — лазер на GaAlAs с длиной волны около 0,85 мкм, имеющий большую долговечность (выше 40 тыс. ч) и генерирующий одномодовые колебания. Разрабатываются приборы, подобные лазеру на InGaAsP, излучающие в длинноволновой инфракрасной области с малым рассеянием и низкими потерями, благодаря использованию мелитовых волокон.

Волноводы оптической связи — это волокна ступенчатые, позволяющие передавать информацию со скоростью 1—32 Мбит/с, градиентные (100—400 Мбит/с) и одномодовые (400 Мбит/с и выше). Фотоприемники оптической связи: $p-i-n$ -фотодиод с увеличенной площадью фоточувствительной поверхности и необходимым рабочим напряжением или лавинный фотодиод с малой инертностью.

Что такое оптическая обработка информации?

Информация может быть представлена в различном виде, иметь различный объем в зависимости от способов измерения, обработки, записи и воспроизведения. *Оптическая обработка информации* —

это обработка информации с применением оптических приборов и законов оптики (рис. 125).

Естественный свет представляет собой набор волн со случайной длиной и фазой, поэтому оптика умела управлять только их амплитудой. С ростом численности людей, развитием науки и техники растет и объем информации, которую необходимо обрабатывать. В частности, возникла потребность в обработке видеoinформации, но традиционная электронная техника, обрабатывающая главным образом временные ряды, очень медленно преобразует и обрабатывает такую информацию. Приход в оптику лазера позволил получать когерентные оптические колебания и управлять их фазой. Свет начали использовать как несущую волну. Лазер стал основой способов параллельной обработки информации, по скорости сравнимой со скоростью света, так как не требовалось разложения во временной ряд. Это самое большое преимущество оптических средств и стимул к их развитию.

Фундамент когерентной оптической обработки информации — преобразования Фурье и корреляция двумерных изображений. Если установить изображение, полученное в когерентном свете, перед фокальной плоскостью выпуклой линзы, то за фокальной плоскостью получим его Фурье-образ. Кроме того, поставив еще одну линзу, работающую как фильтр Фурье-образа, получим за ее фокальной плоскостью корреляционное изображение. Даже сложная параллельная обработка оптической информации происходит со скоростью, близкой к скорости света. Используя фильтрацию пространственных мод и спектральный анализ Фурье-образа, можно исследовать особенности объектов и создавать приборы, анализирующие их недостатки. Корреляционную обработку применяют в устройствах распознавания образов.

Фазовая голография позволяет не только записывать и регенерировать пространственные образы объектов, но также, благодаря множеству достоинств (надежность, высокая плотность записи изображений и возможность их преобразования), занимает видное место в оптической обработке как основа функциональной памяти.

Оптическую обработку информации уже используют в автоматических кассовых аппаратах и оптических дисках. Постепенно входят в жизнь аналоговые

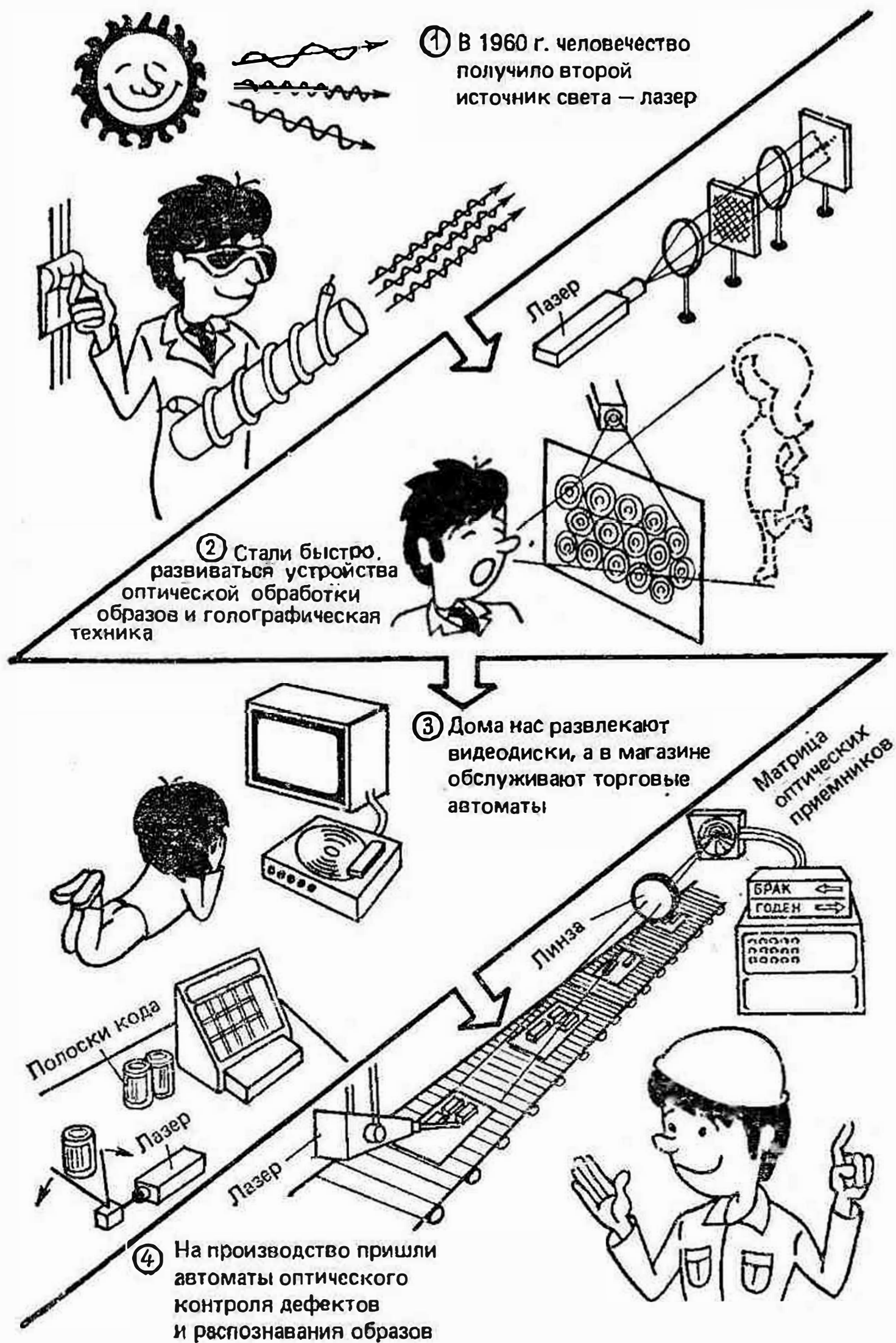


Рис. 125. Оптическая обработка информации

устройства параллельной оптической обработки информации. Кроме того, стали использоваться нелинейные оптические явления в веществах, ведутся работы по практическому применению цифровой обработки, которая, полагают, станет основой оптического компьютера.

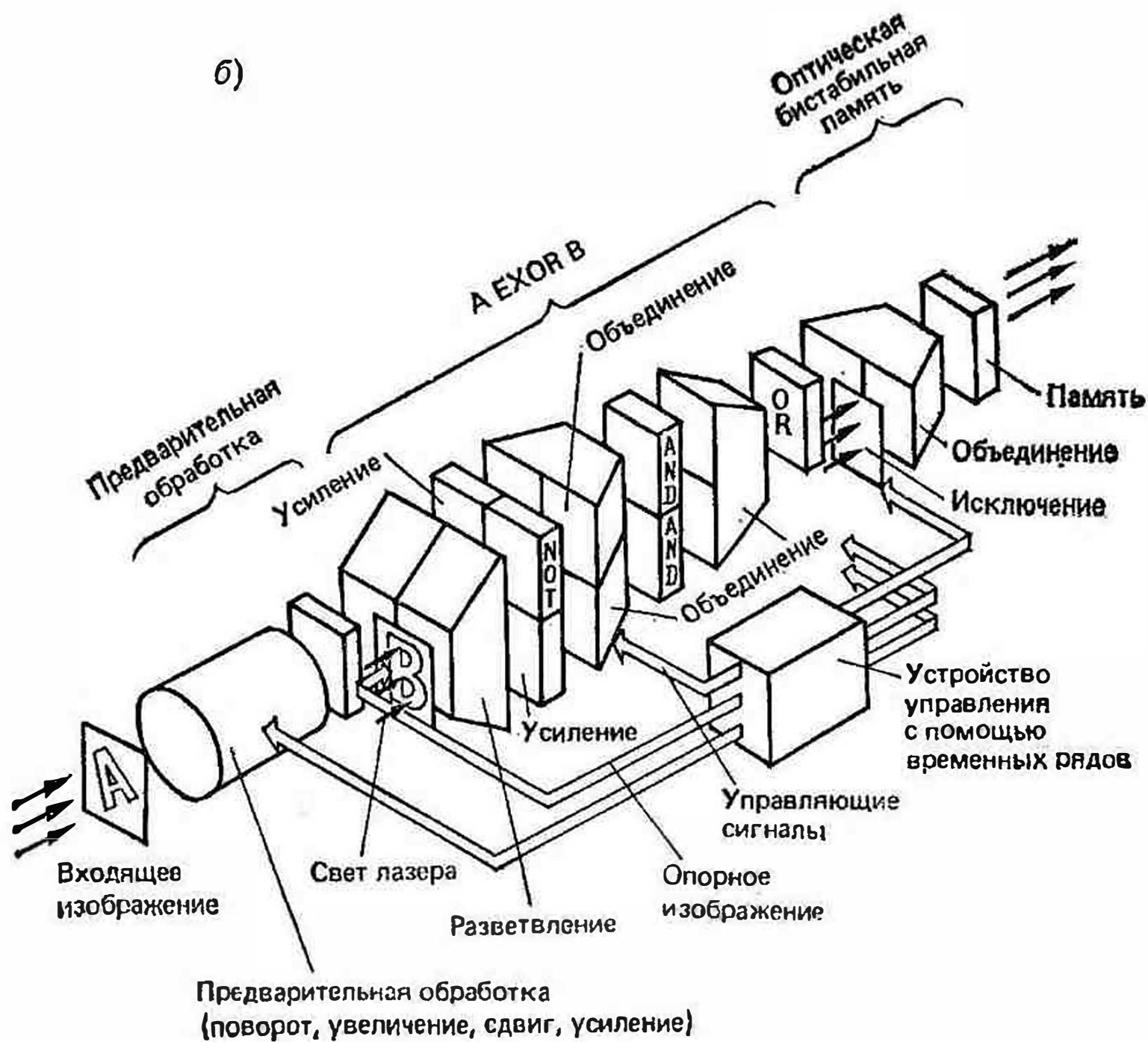
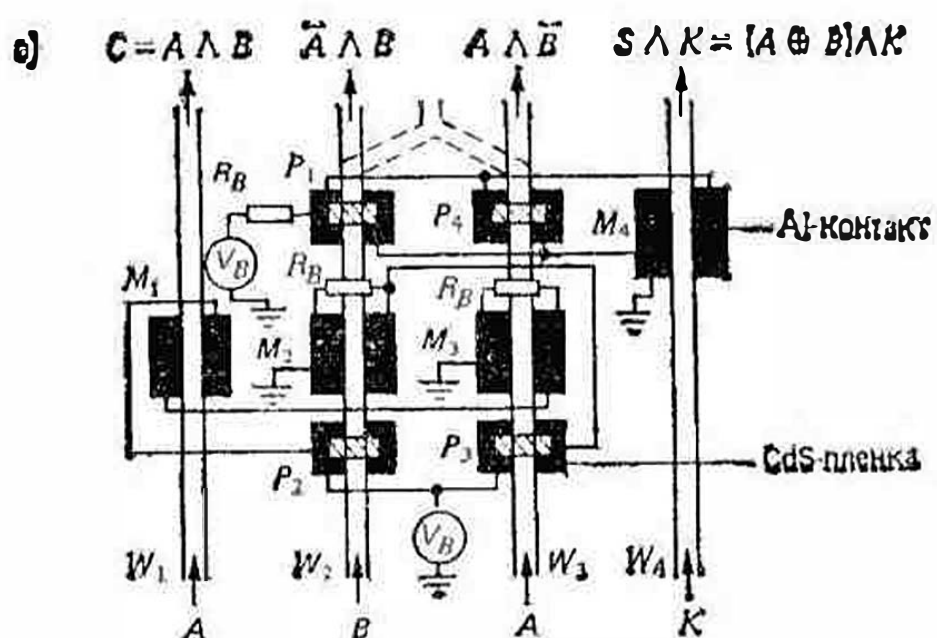
Что такое оптический компьютер?

Время переключения электронных приборов ограничено наличием объемных зарядов и временем пробега электронов. Эти факторы стали существенной преградой для увеличения быстродействия ЭВМ. Предполагают, что *оптический компьютер*, где электроны заменит свет, позволит выйти за пределы этих ограничений. В частности, среди ЭВМ последних лет резко возросла доля обрабатывающих двухмерную и трехмерную информацию, например зрительные образы. Но при существующих способах обработки такую информацию раскладывают во временные ряды, что требует значительного времени при большом объеме сложной информации. Оптический компьютер сможет вести параллельную обработку информации, так как приборы оптики получают образ целиком и не требуют его преобразования во временной ряд для последующей цифровой обработки.

Конструкция оптического компьютера пока еще не определилась окончательно, но все множество устройств такого типа можно разбить на три группы.

Первая группа — *устройства цифровой обработки временных зависимостей*. В них, в отличие от ЭВМ, работают не полупроводниковые, а оптические логические элементы с более высоким быстродействием, сигналы же распространяются по оптическим волокнам и оптическим волноводам. На рис. 126, а показан опытный образец элемента такого компьютера. Это оптическая интегральная схема, состоящая из большого числа волноводов и затворов на оптических кристаллах. Однако такой элемент обрабатывает только временные ряды и не входит в компьютер для обработки изображений.

Вторая группа — *устройства параллельной аналоговой обработки*. Когда информация об образе объ-



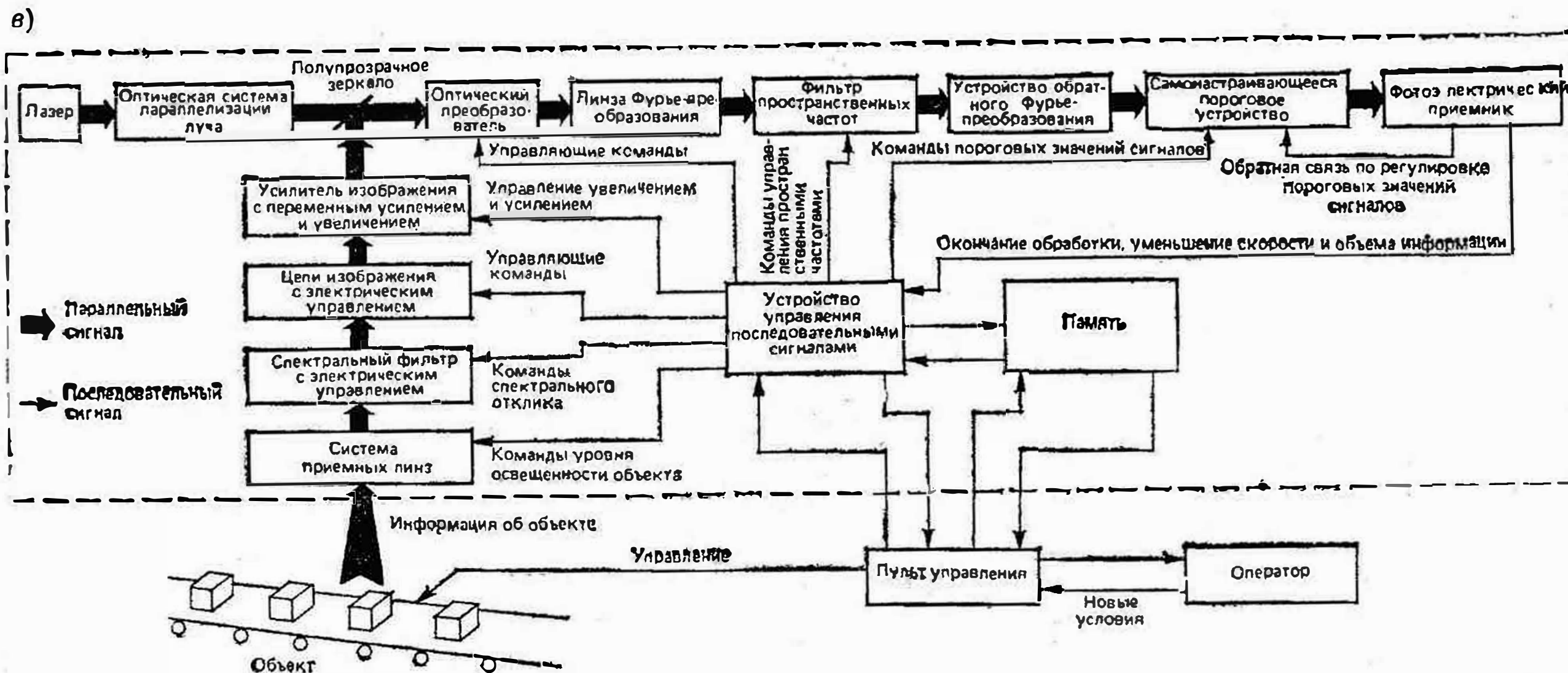


Рис. 126. Принцип последовательной (а), параллельной цифровой (б) и параллельной аналоговой (в) обработки в оптическом компьютере

екта, освещенного светом лазера, проходит через линзу, то Фурье-образ объекта или его корреляция возникает со скоростью, почти равной световой (рис. 126, в). Этот способ позволяет высокую скорость обработки благодаря возможностям оптики, но проблемы здесь те же, что и в одномерной аналоговой обработке (нелинейности, помехи и др.).

Третья группа — *устройства параллельной цифровой обработки*. В них высокая скорость параллельной обработки соединена с точностью обработки битовой информации и возможно неограниченно прерывать один процесс обработки другим. Принцип работы поясняется на рис. 126, б. Входящий образ, ставший объектом обработки, схематизируют — увеличивают или уменьшают, сдвигают, усиливают и затем обрабатывают, сравнивая с различными опорными образами согласно программе. Элементы для такой обработки собирают в блоки, состоящие из основных логических ячеек: двухмерных И, ИЛИ, НЕ. Результат в ожидании следующего этапа обработки хранят в двухмерном триггере или в оптической бистабильной памяти.

С целью применения в качестве *логических оптических элементов параллельной цифровой обработки* исследуются волоконно-лазерные пластинки, состоящие из десятков тысяч лазерных волокон диаметром в несколько десятков микрон, тонкие пленки GaAs, жидкокристаллические элементы, состоящие из жидких кристаллов и оптических волноводов. Кроме того, различные материалы исследуются для использования их в оптических бистабильных элементах. Это газы, электрооптические материалы, тонкие кристаллические пленки.

Как используют оптику для измерений?

Для автоматизации и повышения производительности труда, миниатюризации и повышения качества продукции, а также для того чтобы оградить людей от работы во вредной среде, требуются самые различные дистанционные датчики. В физике также необходимы новые средства и способы измерений, например удаленности небесных тел или длительности сверхкоротких световых импульсов. Все эти и многие

другие потребности предполагается удовлетворить при помощи техники, позволяющей быстро и точно производить измерения без контакта с объектом и при значительных его размерах.

Такие возможности предоставляет оптическая измерительная техника. Следует отметить некоторые особенности и возможности измерений, связанные с тем, что средством переноса информации служит свет.

1. Измерения неконтактные, объект не разрушается, что позволяет вести непрерывный контроль.

2. Для связи между приборами используют оптические волокна, изменяя силу света открыванием или закрыванием управляемых полей перегородок.

3. Световые волны имеют много параметров — амплитуду, частоту, фазу, поляризацию, моду, когерентность, которые можно использовать при обработке информации.

4. Оптические приборы позволяют перейти от точечных измерений к наблюдению сразу за всем объектом.

5. Возможны измерения в микроскопических образцах.

6. Применимы новые высокоэффективные способы обработки информации: преобразование Фурье, пространственная фильтрация, голография.

Все это множество достоинств становится движущей силой в разработке новых методик измерений.

С другой стороны, пока неясно практическое применение оптической измерительной техники из-за неустойчивости к вибрациям, необходимости преобразования некогерентного изображения в когерентное, большого разнообразия элементов, а также пока еще высокой цены и низкой надежности.

Развитие измерений с использованием оптики сопровождается появлением различных оптоэлектронных приборов. Это источники света — светодиоды и разные виды лазеров; фотоприемники — от одномерных, типа фотоумножителей и фотодиодов, до двумерных, таких, как телевизионные трубки и твердотельные приемники изображений; усилители изображений, оптические модуляторы, оптические отклоняющие системы и др. Исследуются измерительные устройства на основе этих приборов.

В табл. 3 приведены примеры использования оптики для измерений.

Таблица 3. Использование оптики в измерениях

Вид и используемые характеристики излучения	Прибор, устройство	Измеряемый параметр, объект	Способ, принцип
Естественный свет (хаотичность длины волны, фазы, поляризации)	Прибор контроля за уровнем жидкости	Высота уровня	Измерение силы света, отраженного от поверхности жидкости, с помощью фотоэлектрического датчика
	Устройство контроля внешнего вида	Образец из партии	Телевизионная съемка образца и компьютерная обработка изображения
	Фотоупругий датчик	Распределение механических напряжений	Наблюдение распределения показателя преломления в зависимости от механических напряжений
	Стробоскоп	Частота вращения	Определение изменения угла поворота при освещении периодическими световыми импульсами
	Матрица оптических датчиков	Знак определенной формы (например, код на почтовом конверте)	Определение знака по комбинации засвеченных или затемненных датчиков
Лазерное излучение: 1. Направленность и монохроматичность	Лазерный теодолит	Угол возвышения и азимут	Определение направления в пространстве с помощью узкого луча

2. Малая расходи-
мость

Измеритель профиля	Высота выпуклостей и глубина впадин	Измерение силы света, отра- женного от точки на поверхно- сти
Торговый автомат	Код цены на упаковке	Измерение силы света, отра- женного от полос кода
Измеритель наружного диаметра	Наружный диаметр, правильность круговой формы	Фурье-преобразование образа
Лазерный радар	Состав и степень за- грязнения атмосферы	Снятие характерных спектров рамановского рассеяния
Прибор для электриче- ских измерений	Напряжение, ток, на- пряженность магнитного поля	Эффекты Фарадея, Керра и Поккельса
Лазерный дальномер	Дальность, высота	Определение расстояния по интервалу времени между излу- чением и приемом светового им- пульса
Аппаратура скоростной фотосъемки	Движущийся объект	Фотосъемка с помощью одно- го или нескольких коротких све- товых импульсов
Анализатор состава или структуры	Состав или структура материала	Снятие спектров рассеяния при облучении образца или при ис- парении микрочастиц

Вид и используемые характеристики излучения	Прибор, устройство	Измеряемый параметр, объект	Способ, принцип
3. Когерентность	Доплеровский измеритель	Частота и амплитуда вибрации	Измерение биений при сложении отраженного, рассеянного или прошедшего луча с опорным
	Интерферометр	Шероховатость поверхности, толщина	Наблюдение картины интерференции отраженного или прошедшего луча с опорным
	Прибор для обнаружения дефектов	Образец из партии	Анализ пространственного спектра и пространственная фильтрация Фурье-образа
	Устройство чтения знаков	Знак	Корреляционная обработка с применением голографии
	Лазерный гироскоп	Частота, направление вращения	Измерение разности частот излучения кольцевого лазера
	Измеритель амплитуды вибрации	Сдвиг	Анализ голограммы объекта до и после сдвига, сделанной на одной пластинке
	Измеритель дисперсности порошков и эмульсий	Дисперсность	Анализ Фурье-образа

Что такое голография?

Обычная фотографическая техника фиксирует только амплитуды отраженных от объекта световых волн. Однако световые волны несут не только амплитудную, но и фазовую информацию. Голография регистрирует информацию об амплитудах и фазах отраженного от объекта *предметного луча* в виде картины его интерференции с *опорным лучом*. Записанную картину называют *голограммой*. Если осветить ее лучом, сходным по частоте и фазе с опорным, регенерируется волновой фронт предметного луча. Таким образом, регистрируется полная картина волнового фронта (амплитудная и фазовая), поэтому метод получил название «голография» (от греческого *holos* — «весь, полный»).

Основные принципы голографии выдвинуты Габором в 1948 г. в Англии. На их основе предполагалось увеличить разрешающую способность электронных микроскопов. Но регенерированные изображения смешивались с ненужными образами, и разобрать что-либо было невозможно. Эти недостатки были устранены в 1962 г. Лейтом и Упатниексом. Они предложили освещать голографическую пластинку предметным и опорным лучами, направленными под углом друг к другу, что позволило получить неискаженную картину интерференции и сделало голографию пригодной для практического использования. Разумеется, появление лазеров в 1960 г. было большим вкладом в успех голографии.

Рассмотрим основные принципы голографии (рис. 127). Если луч лазера разделить на два и один из них направить непосредственно на фотопластинку, а другой — на точечный объект, то на пластинке запишется картина интерференции плоского фронта со сферическим фронтом отражения от точечного объекта — чередующиеся черные и белые кольца (*зонная пластинка*). Из-за сильной дифракции на краях концентрических колец зонная пластинка работает как линза, поэтому при попадании на нее световых плоских волн наблюдатель увидит регенерированное изображение (образ) точки в том самом месте, где находился точечный объект. Если точечных объектов несколько, то записываются зонные пластинки для

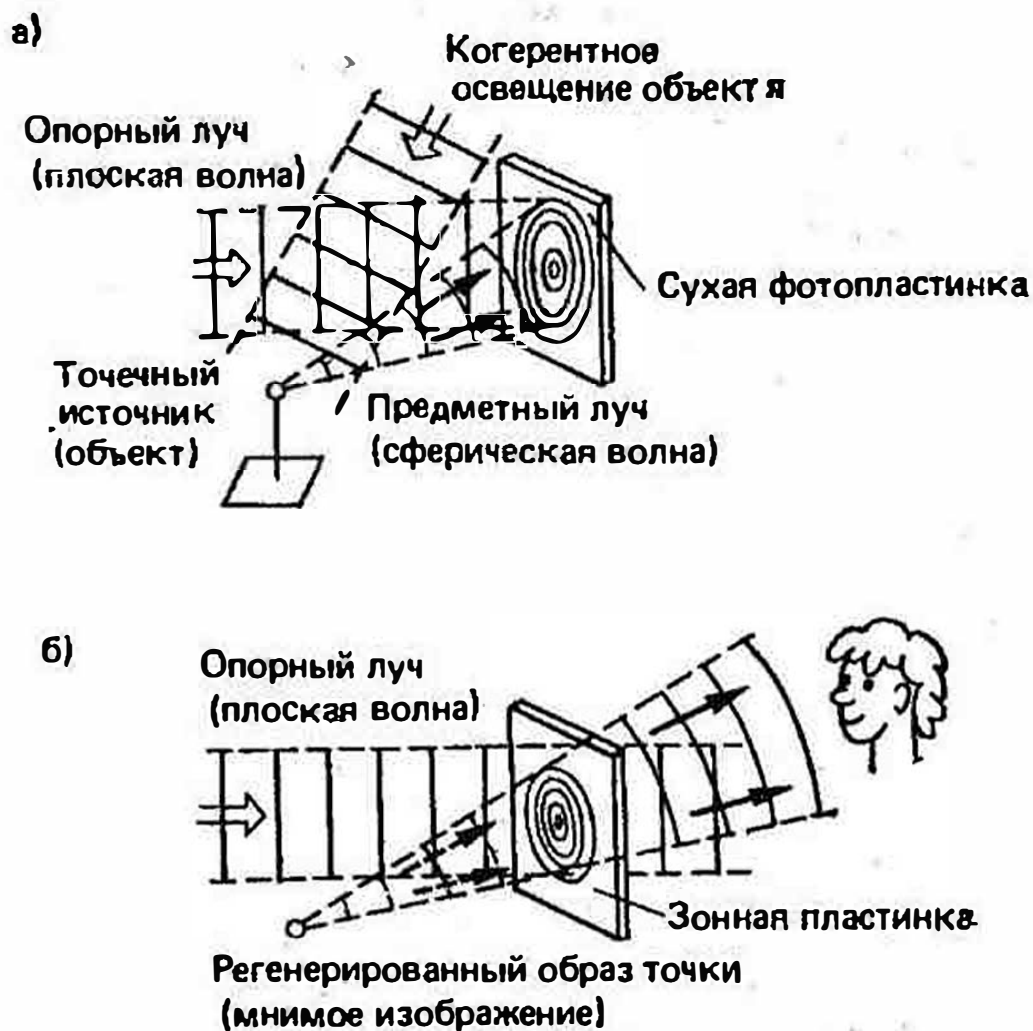


Рис. 127. Принцип голографин: а — получение зонной пластинки; б — регенерация изображения с зонной пластинки

каждой точки. При освещении такой записи плоскими световыми волнами получим регенерированные изображения всех точек в местах, соответствующих реальным объектам. Любой объект можно рассматривать как множество точек, каждая из которых создает сферическую волну. Результирующий фронт записывается на фотопластинку при помощи интерференции предметного и опорного луча, как показано на рис. 128, а. При освещении такой записи опорным лучом возникнут регенерированные изображения всех точек, которые и составят изображение оригинала. Объемный предмет будет иметь трехмерное изображение, и при поворотах пластинки можно рассмотреть невидимые стороны. Эта особенность голографии связана с полной регенерацией волнового фронта, отраженного от оригинала.

Существуют разные виды голографии. При *амплитудной голографии* интерференционная картина регистрируется изменением потемнения пластинки, при *фазовой* — изменением показателя преломления пластинки. Кроме того, есть *голография в белом свете* (голограмму можно рассматривать в естественном

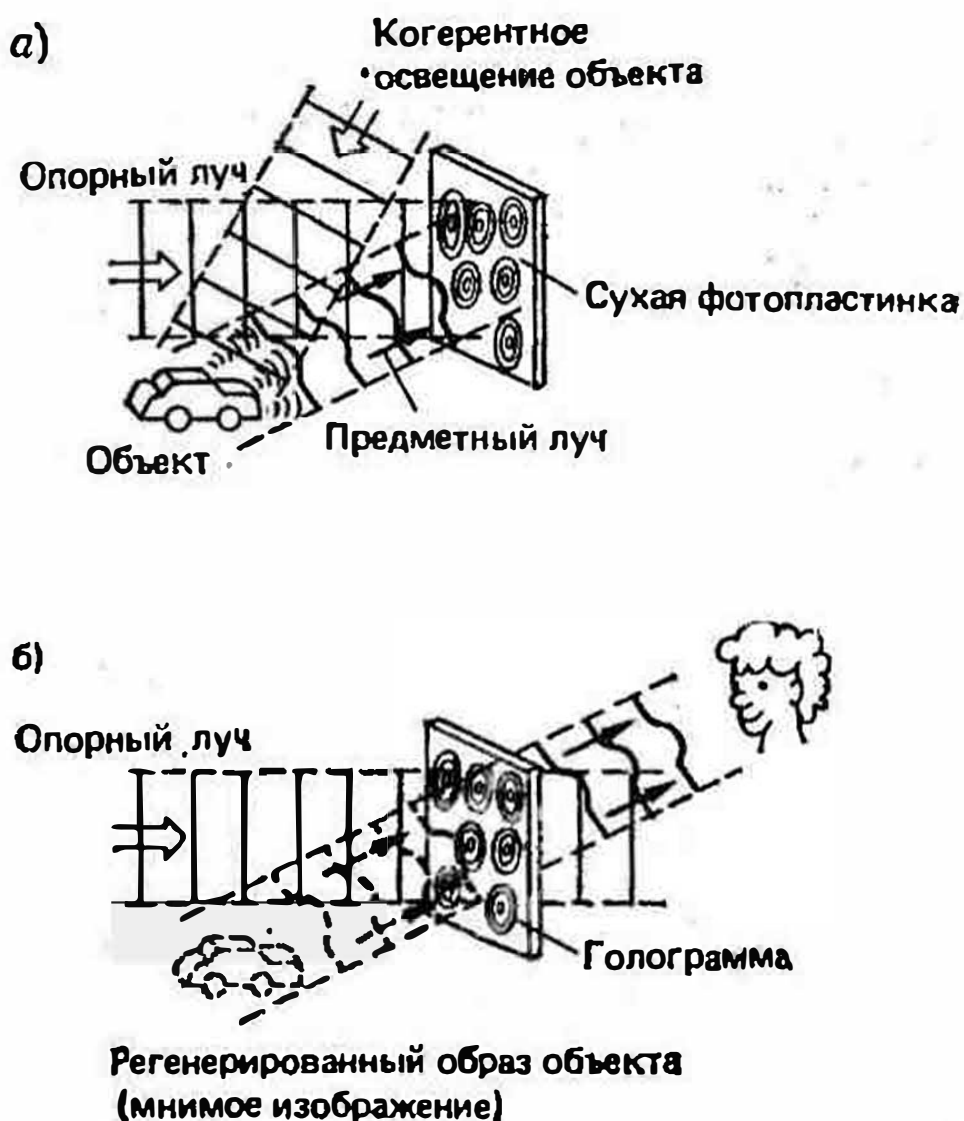


Рис. 128. Получение голограммы (а) и регенерация изображения (б) объекта

свете) и *мультиплексная голография*, позволяющая наблюдать трехмерные объекты в динамике.

Типичное практическое приложение голографии — *трехмерный дисплей*. Голографическую интерференцию используют для измерения очень малых сдвигов в плоскости, снимая объект до и после сдвига. Повреждения (царапины) и загрязнения пластинки не приводят к потере информации. Предполагается широкое использование голографических методов в оптической обработке информации.

Что такое оптический диск?

Оптический диск — это устройство в виде пластинки для записи преобразованной в цифровой код видео- или звуковой информации. *Видеодиск* служит для записи изображений, т. е. видеoinформации. Устройство для записи звука называют *аудиодиском*. Такой диск позволяет наслаждаться воспроизводимой со сверхвысокой точностью ($H_i = F_i$) музыкой. Обычно

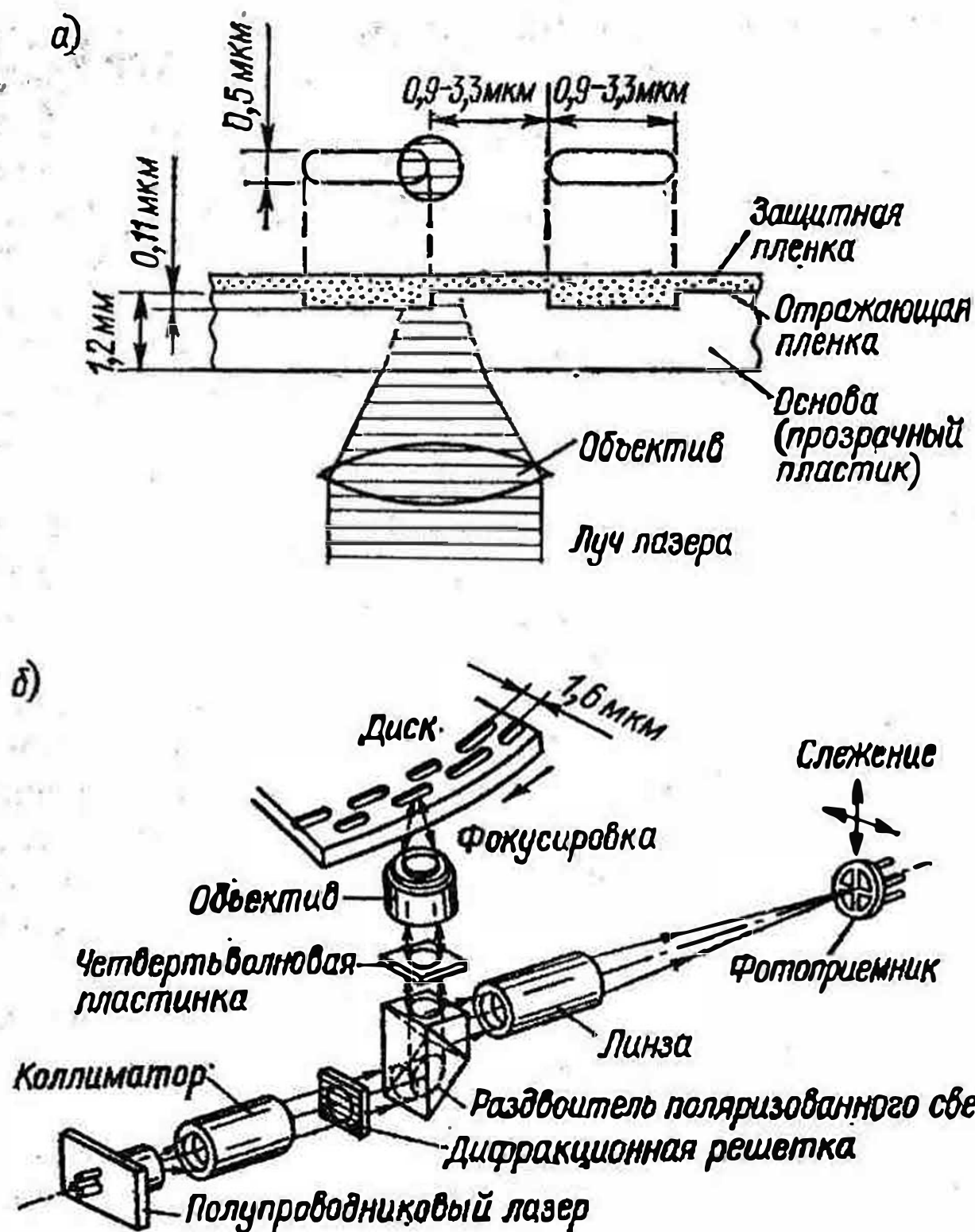


Рис. 129. Принцип устройства и работы оптического диска

диски с диаметром 12 см (в соответствии с международным стандартом миниатюризации) называют компактными дисками. Преобразование аналогового сигнала в двухуровневый осуществляют посредством импульсно-кодовой модуляции, чередуя наличие и отсутствие импульсов. Этот способ предпочитают другим из-за малых шумов и искажений.

Диск изготавливают из прозрачного материала, на поверхности делают в определенном порядке множество углублений, а для отражения света — металлическое покрытие (рис. 129, а). Оптический звукозаписывающий считывает запись, не касаясь диска. Источником света может служить полупроводниковый или гелий-неоновый лазер. Свет лазера проходит через коллиматор, поляризационный раздвоитель, четвертьволно-

вую пластинку и в виде малого, диаметром примерно 1 мкм, пятна попадает на поверхность диска (рис. 129, б). Пятно формируется объективом. Отраженный свет проходит через объектив и четвертьволновую пластинку, поэтому плоскость поляризации поворачивается на 90° по отношению к плоскости поляризации прямого луча. Поляризационный раздвоитель направляет отраженный свет на фотоприемник. Это предотвращает возможную нестабильность в работе полупроводникового лазера из-за возвращения света. Фотоприемник не только принимает сигналы о записанной на диске информации. Он состоит из четырех независимых фотоприемников и благодаря сравнению их освещенности может быть использован для слежения и фокусировки. Ширина дисковой дорожки всего 1,6 мкм, а скорость диска 200—1800 об/мин, поэтому для управления слежением и фокусировкой изготавливают различные автоматические устройства. Углубления на поверхности диска делают равными $1/4$ длины волны считывающего лазера, а для определения их наличия или отсутствия используют явление интерференции.

Можно указать такие достоинства оптических дисков, как 1) отсутствие контакта между адаптером и диском при воспроизведении, благодаря чему диск не изнашивается, а влияние пыли почти не сказывается на качестве записанной информации; 2) возможность точного выбора информации; 3) превосходное качество изображения и звука, обусловленное импульсно-кодовой модуляцией.

Современные видеодиски и аудиодиски используют только для воспроизведения информации. Запись информации производится только в виде статической картины. Но исследуется возможность обновления информации способом *записи в точке Кюри* на дисках, покрытых тонкими магнитными пленками.

Что такое лазерный радар?

В противоположность существующим радарам (Radio Detecting and Ranging — радиообнаружение и определение дальности), использующим короткие и ультракороткие волны, *лазерный радар* обнару-

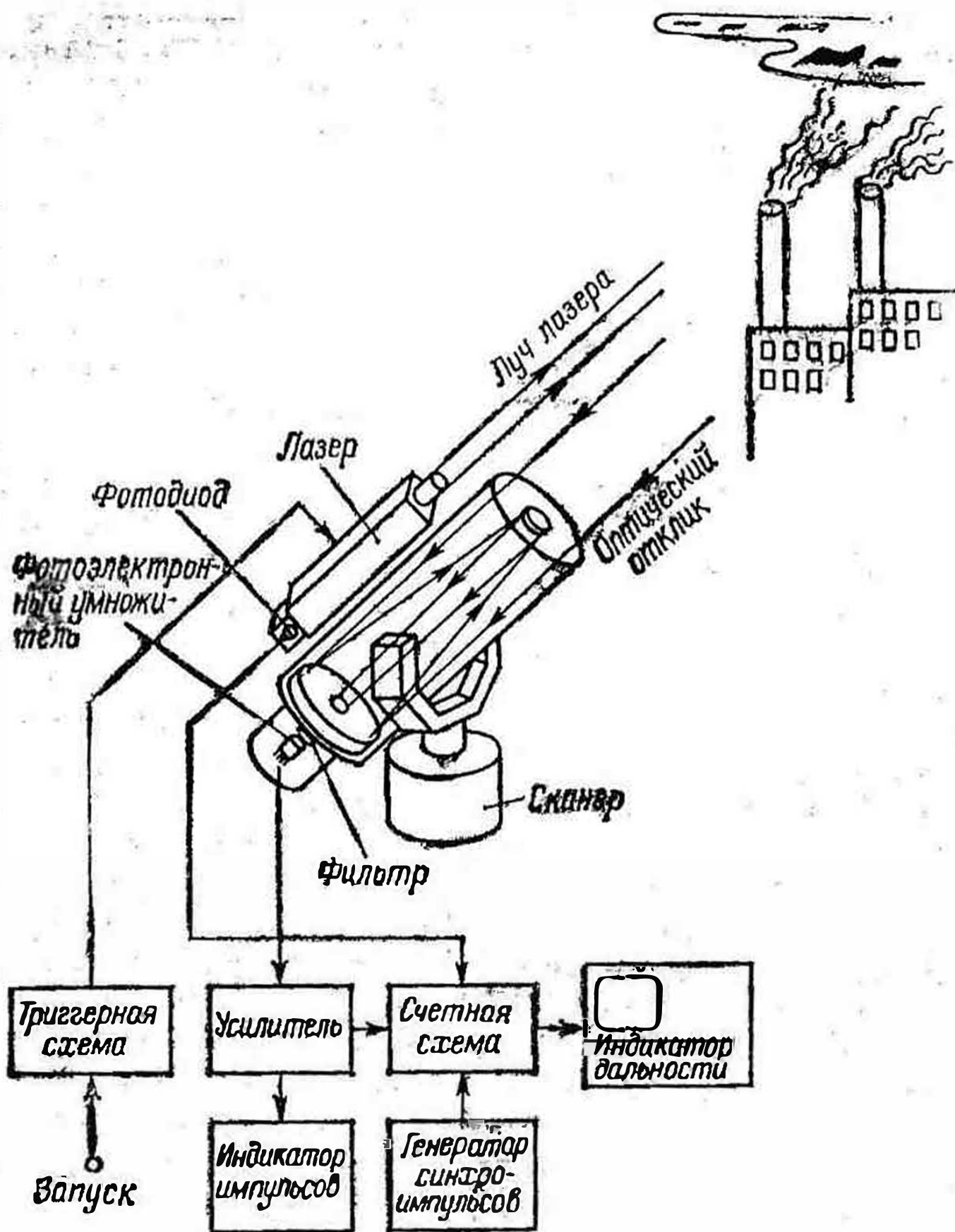


Рис. 130. Лазерный радар

живает удаленные объекты и определяет их параметры — дальность, направление, форму, скорость, плотность — с помощью света.

Устройство, называемое *лидаром* (LIDAR — Light DAR), используется в метеорологии и для контроля за состоянием атмосферы. Схема устройства показана на рис. 130. Передающая система направляет лазерный луч (обычно световой импульс) в сторону объекта, и когда он, отраженный и рассеянный, приходит в приемную систему, можно вычислить расстояние по времени прохода туда и обратно. Кроме

расстояния определяются азимут и параметры отраженного сигнала: амплитуда, длина волны, поляризация. Как видим, принципы те же, что и у радаров, но, поскольку длина световой волны на три-четыре порядка меньше длины волны сантиметрового диапазона, можно очень точно определить азимут летящего объекта. Кроме того, с помощью радиоволн нельзя обнаружить содержащиеся в воздухе мельчайшие частицы (аэрозоль, атомы, молекулы, капли воды), а с помощью лазерного излучения можно, так как свет сильно рассеивается этими частицами. Лазерный контроль за состоянием атмосферы имеет свои особенности. Атмосферные явления непрерывны во времени, а сама атмосфера непрерывна в пространстве, поэтому система должна быть способной измерять короткие промежутки времени и определять по ним расстояния.

В качестве источников света в лазерных радарх работают лазеры YAG:Nd , лазеры на неодимовом стекле, рубиновые лазеры с управляемой добротностью, лазеры на азоте, лазеры на красителях и другие. Для измерения высоты над землей или над морем применяют полупроводниковый лазер на GaAs .

Лазерный радар для наблюдения за атмосферой позволяет исследовать такие явления атмосферной оптики, как *рэлеевское рассеяние*, возникающее, когда диаметр частиц мал по сравнению с длиной волны, *рассеяние Ми*, когда размер частиц сравним с длиной волны, а также *резонансное рассеяние* атомами и молекулами. Наблюдение этих явлений имеет самостоятельное значение для физики атмосферы. Кроме того, ведется наблюдение за состоянием атмосферы и атмосферными явлениями в верхних слоях — диффузией, переносом, вертикальным распределением температуры и влажности, а также за облаками, несущими осадки.

Лазерные радары для измерения расстояния бывают различными. Например, простые устройства, используемые в качестве дальномеров в инженерно-строительных работах, принимают эхо-сигналы от рельефа местности и зданий и выдают азимут, дальность и другие параметры. Другие устройства позволяют измерять большие расстояния. В ходе американской программы «Аполлон» на поверхности Луны было установлено отражающее лазерные лучи зеркало, и теперь все страны могут измерить расстояние до

Луны с помощью лазерного радара. Точность этих измерений достигает ± 30 см.

Лазероскоп — это устройство, показывающее расположение объектов без сканирования. Такие устройства используют для наблюдения под водой и над водным пространством.

Как передают световую энергию?

Для передачи естественного света и света лазера используют оптические волокна и оптические волноводы. Почти все эти средства представлены в оптической связи, где информация передается при помощи света. Но свет можно использовать и для передачи энергии. Например, солнечную энергию выгоднее передавать и использовать непосредственно, так как при преобразовании ее в электрическую энергию и обратно КПД передачи будет очень мал. Кроме того, во множестве областей лазерной медицины и лазерной технологии уже требуется свободная передача лазерного излучения с высокой мощностью и определенной длиной волны. Передача световой энергии имеет определенные преимущества перед передачей электроэнергии. Например, для уменьшения потерь электроэнергии из-за сопротивления проводов передачу производят по высоковольтным линиям, в окрестности которых возникают помехи, создающие трудности радиоприему, работе приборов и т. д. Свет из-за крайне короткой длины волны не создает помех в окрестности линии передачи, благодаря чему передача световой энергии представляется более приемлемой, чем передача электроэнергии.

Материалы оптических волокон и способы передачи световой энергии становятся все более отличными от используемых для передачи информации. В последнем случае оптические волокна должны позволять передачу больших объемов информации при помощи света с определенной длиной волны. Поэтому здесь применяют волокна, не дающие временных рассогласований, например одномодовые. Но для передачи световой энергии требуются волокна, способные передавать только энергию в широком диапазоне свето-

вых волн. Появляется потребность в многомодовых волокнах из новых материалов взамен кварца. Если диапазон передаваемой световой энергии ограничен видимой или ближней инфракрасной областью, то для передачи подходят и существующие кварцевые волокна. Мощность передаваемой энергии можно вырабатывать до границы пробоя диэлектрика. Для кварца это примерно 100 кВт/мм^2 .

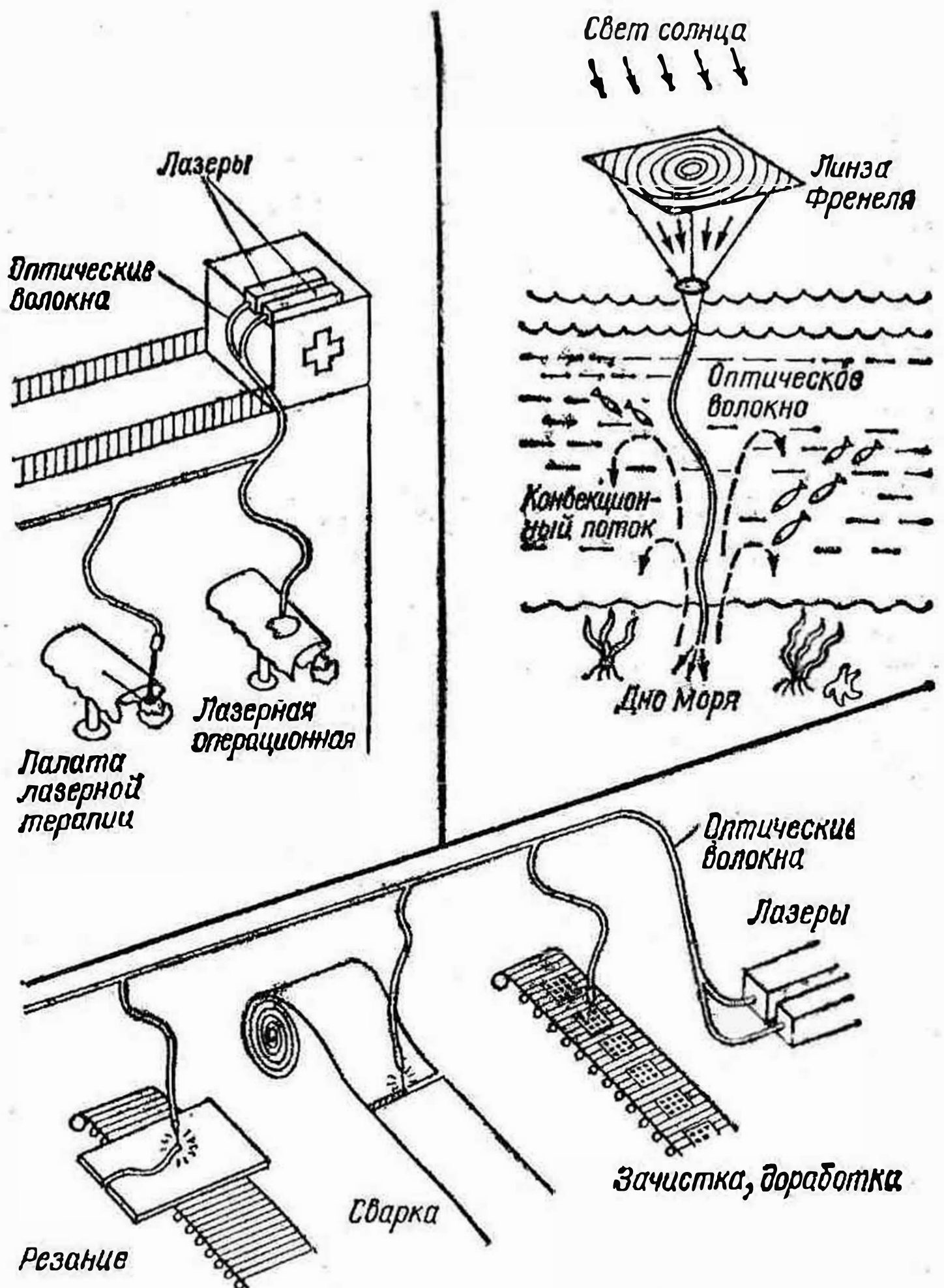


Рис. 131. Передача и использование оптической энергии

На производстве вместо электростанции устанавливают световую станцию с лазером на углекислом газе и лазером на YAG, имеющими выходную мощность 20 кВт. Световая станция обеспечивает энергией все производство, причем различные технологии — резание, неконтактная обработка, отжиг, доводка — используют излучение с необходимой длиной волны. В больницах лазеры с различной длиной волны устанавливаются в палатах лазерной терапии, но с помощью оптических волокон необходимая световая энергия подводится в операционные с лазерным скальпелем и палаты для лазерной диагностики и лечения рака. В море или океане создают рыбные места. Солнечную энергию собирают с помощью линзы Френеля и затем передают по оптическим волокнам, прогревая подводное пространство. Конвекционные потоки поднимают со дна ил, богатый питательными частицами, и на корм собирается большое количество рыбы (рис. 131).

Что такое лазерная технология обработки материалов?

Лазерная технология обработки материалов — это сварка, а также доводка, резание, сверление при помощи испарения вещества сфокусированным лазерным светом. Среди множества видов лазерной обработки есть и обработка поверхностей с целью качественного изменения свойств материала.

Для обработки материалов существенны такие свойства излучения, как высокая яркость и концентрация энергии. Достоинства лазерной обработки — отсутствие непосредственного контакта с инструментом, возможность кратковременного воздействия, работы в любой атмосфере, а также легкость автоматизации.

Виды лазерной обработки различаются временем действия излучения и плотностью мощности. Соотношение между временем действия и плотностью мощности для разных способов обработки показано на рис. 132.

Различные неметаллические материалы — стекло, резину, керамику и другие — сверлят с помощью ла-

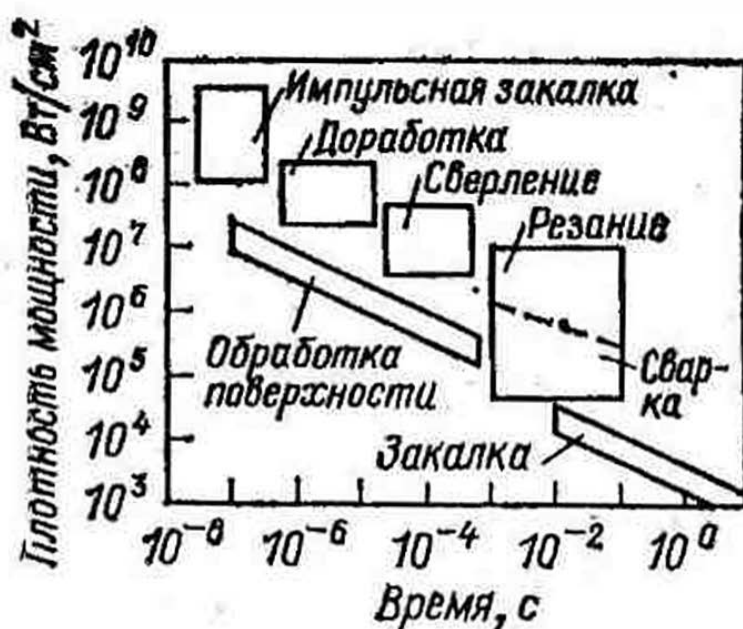


Рис. 132. Время действия и плотность мощности излучения в лазерной обработке материалов

зера на углекислом газе. Сверление алмазов рубиновым лазером — самый первый вид лазерной обработки. Сейчас алмазы перед нарезкой резьбы сверлят с помощью лазера на YAG:Nd с модулируемой добротностью (рис. 133). В алмазной пластине толщиной 1 мм можно просверлить отверстие диаметром несколько десятков микрон за несколько секунд. Металлы хорошо проводят теплоту, поэтому для их обработки применяют рубиновые, стеклянные и YAG-лазеры с импульсным излучением, способные развивать высокую плотность мощности в течение короткого времени.

Резание в отличие от сверления удобнее производить непрерывно, поэтому чаще используют лазеры с непрерывным излучением, но можно применять и импульсные. Ширина резания 100—200 мкм. При помощи лазеров режут кварцевые стекла, пластики.

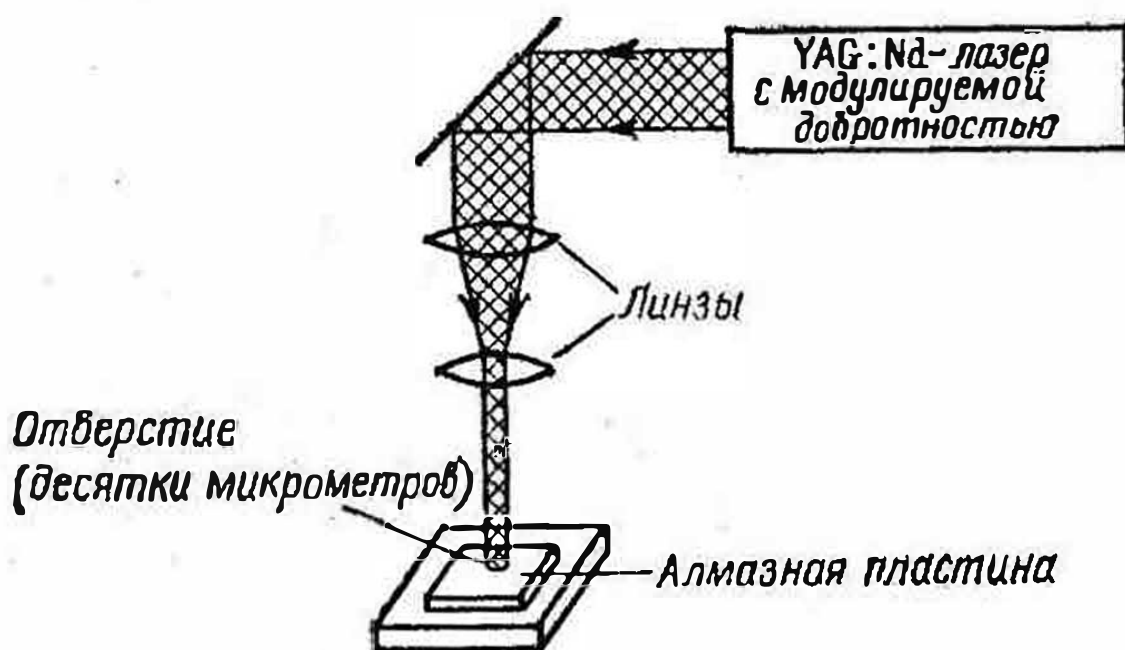


Рис. 133. Лазерное сверление

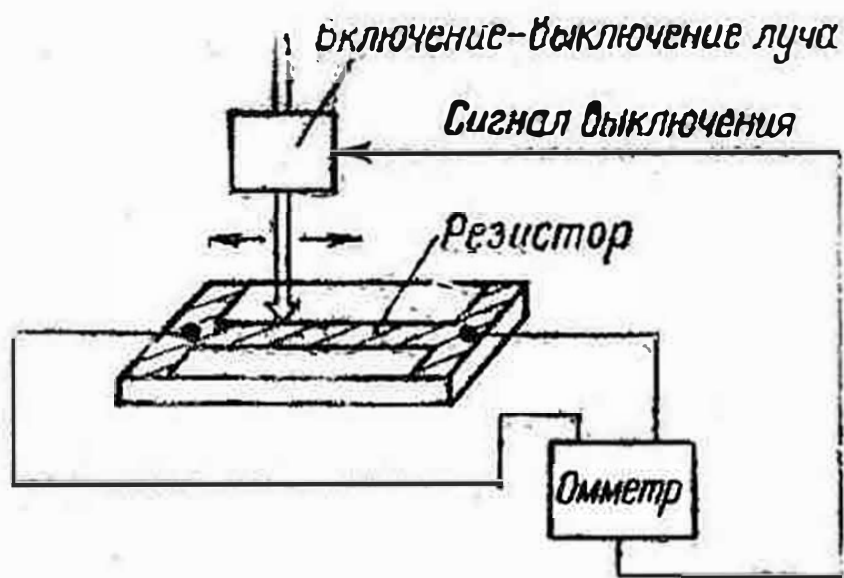


Рис. 134. Лазерная доводка

комбинированные материалы, дерево, ткани, металлы и сплавы, керамику и многое другое. Скорость резания очень велика. Например, кварцевое стекло толщиной 0,5 см режется лазером на углекислом газе скоростью около 30 см/мин.

Лазерная доводка позволяет быстро и с высокой точностью получать требуемые значения параметров тонкопленочных резисторов и конденсаторов. Подобным способом, показанным на рис. 134, можно доводить и другие элементы микроэлектроники.

Лазерная сварка позволяет соединять различные материалы. Например, керамику или стекло можно сплавить с металлами — алюминием, углеродистой и легированной сталью. С помощью лазера соединяют и металлы с металлами — медь и мягкие стали, тантал и нержавеющей сталь. Для сварки применяют лазеры с непрерывным излучением высокой мощности, они позволяют сваривать листы толщиной до 10 мм. Лазерную сварку используют при производстве автомобилей и самолетов.

При обработке поверхностей с помощью лазера можно, нагревая, производить сплавление и закалку, а также при быстром охлаждении расплавленного поверхностного слоя делать его аморфным.

Как работает лазер в медицине?

Лазер сразу же привлек внимание медицины такими свойствами излучения, как монохроматичность, когерентность, направленность, высокая интенсивность, и уже существуют, а также находятся в

стадии разработки различные виды приборов на основе лазерного излучения. С помощью этих приборов ведутся фундаментальные биологические исследования и обычные клинические. В операциях используют лазерный скальпель, широко применяется лазер в диагностике и лечении. Таким образом, начала развиваться новая отрасль, называемая *лазерной медициной* (рис. 135). Считают, что возможности лазерной диагностики и лечения обусловлены действием солнечного света на процессы в живых организмах в течение долгих лет эволюции.

При исследовании организма (объекты исследования — кровь, моча, мокрота и др.) применяются диагностические приборы — *сортировщики клеток* и *точные цитометры*. Внутри прибора находится капельница, роняющая капли, в которых содержится по одной клетке. При облучении капель светом лазера возникают рассеяние, флюоресценция, свойственные всем клеткам, но различные для разных типов клеток. Анализируя спектры рассеяния или флюоресценции, можно сортировать клетки. Производительность таких приборов примерно 5000 клеток в секунду. Они имеют широкую область применения — поиск раковых клеток, поиск помех механизму иммунитета и другие исследования. Освещая лазером коагулированные частицы, получившиеся в результате реакции антиген — антитело, по характеру рассеяния света определяют стадию реакции. Для подобных измерений мутности широко используют *лазерный нефелометр*. Созданы и другие *устройства автоматического биохимического анализа*, основанные на спектральной лазерной технике.

Новые приборы лазерной диагностики и лечения рака позволяют проводить обследование неразрушающим методом и лечение без хирургического вмешательства. Перед использованием приборов больному прописывают препарат гематопорфирин, попадающий только в ранние раковые клетки. Теперь при освещении лазером с заданной длиной волны эти клетки будут люминесцировать в определенной, известной области длин волн, что и позволит выявить рак. Применяя другой лазер, излучающий в той же области длин волн, что и раковые клетки, можно уничтожить раковые образования при помощи вызванных светом биохимических реакций. Устройства, использующие лазер

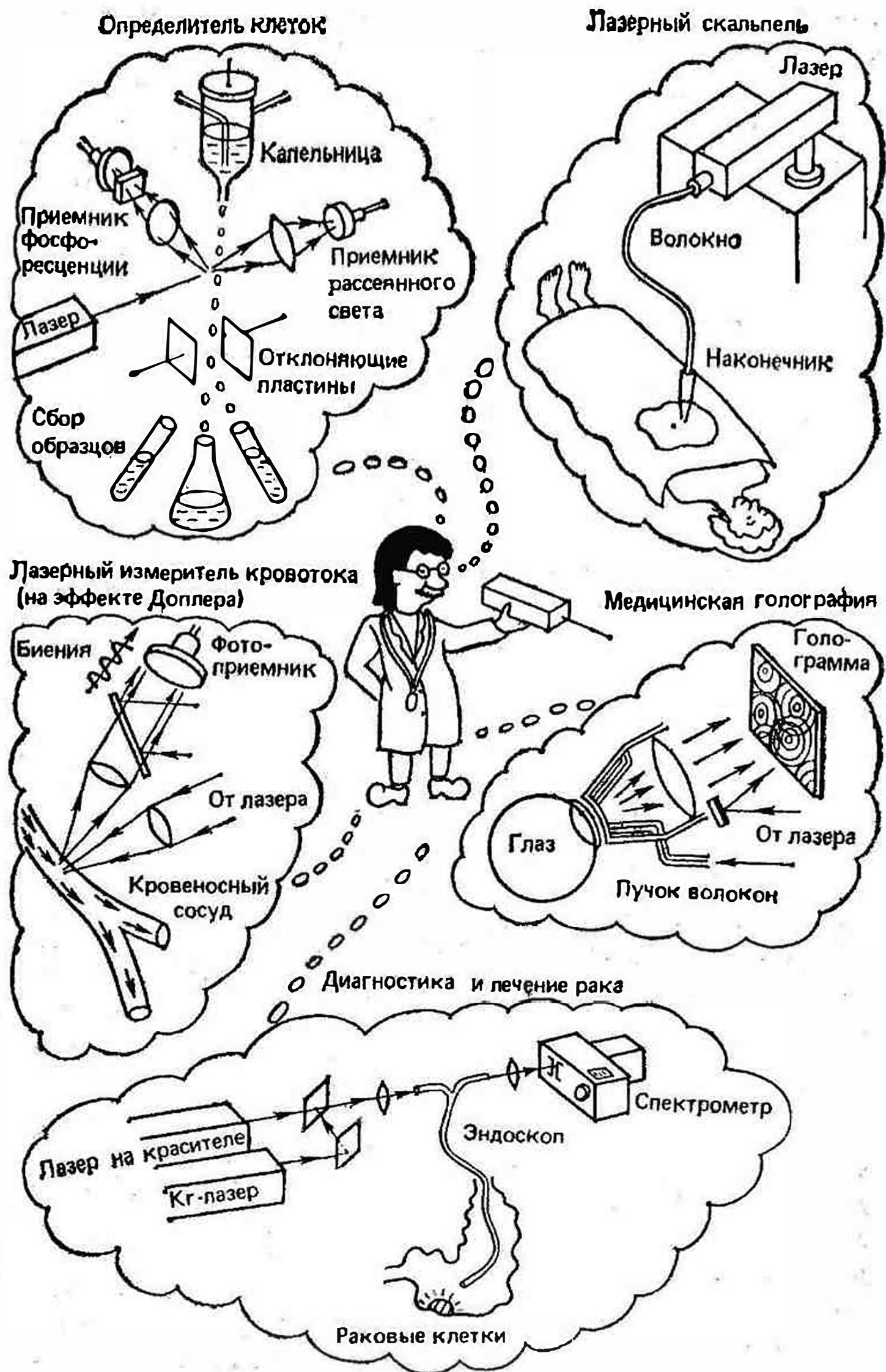


Рис. 135. Приборы лазерной медицины

как источник энергии,— это *лазерный скальпель* для хирургических операций и *фотокоагулятор* для остановки кровотечения. Кроме того, лазер применяют для акупунктуры и лечения кровоподтеков.

С помощью лазера можно измерять скорость движения жидкостей или газов, определяя доплеровский сдвиг частоты по биениям, возникающим при сложении опорного и отраженного лучей. На этом принципе основаны *лазерные доплеровские измерители тока крови* и *устройства анализа активности частиц*, измеряющие подвижность взвешенных частиц (лейкоцитов, эритроцитов и др.).

Медицинская голография вызвала новые надежды, благодаря возможности объемного отображения органов. Уже производят голографические снимки глазного дна и, с помощью эндоскопа, внутренних органов. Вошли в практику *ультразвуковые устройства голографической диагностики*, позволяющие вести наблюдения в реальном времени без опасности облучения, без вторжения в организм и повреждения тканей.

Что такое лазерный скальпель?

Операции, в которых полностью отсутствует кровотечение, всегда были мечтой хирургической медицины. *Лазерный скальпель* дал надежду на ее осуществление. Рабочим органом в нем является лазерный луч с высокой плотностью энергии, сфокусированный до толщины иглы. Делая разрез, он мгновенно испаряет живые ткани и благодаря высокой температуре закупоривает кровеносные сосуды.

Среди лазерных скальпелей основными являются CO_2 - и YAG-скальпель (рис. 136). Их действие на живые ткани различается по уровню поглощения излучения водой, составляющей 70—90 % тканей человеческого тела. Излучение CO_2 -лазерного скальпеля имеет длину волны 10,6 мкм (средняя инфракрасная область). Это излучение хорошо поглощается водой, поэтому проникает в ткани живого тела на очень малую глубину, примерно 0,2 мм. Значительная температура, выше 1500 °С, заставляющая ткани испаряться, создается в точечной области. Благодаря этому

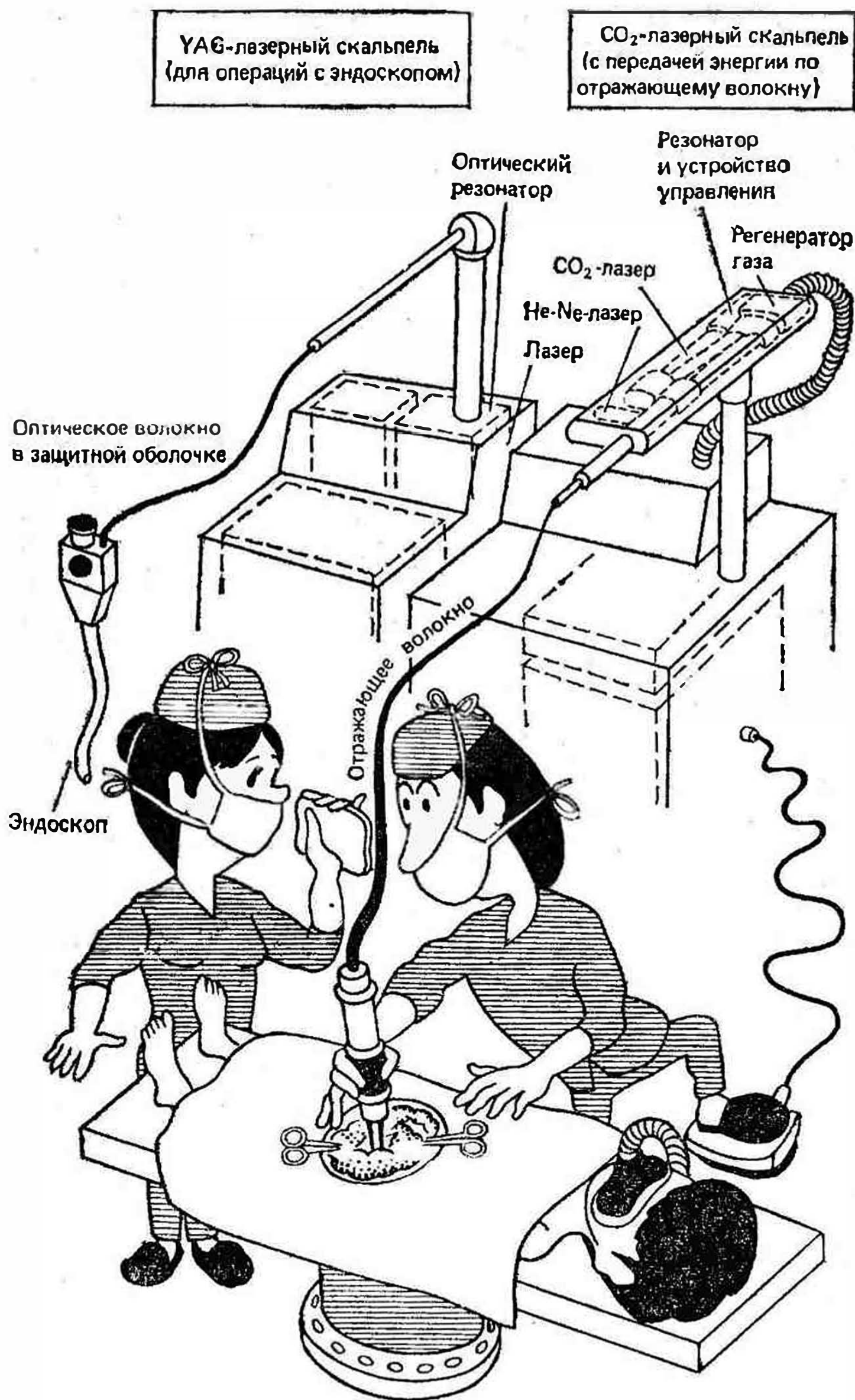


Рис. 136. Лазерный скальпель — новый прибор хирургии

лазерный скальпель действует лучше самого острого ножа, что и сделало его аппаратом повседневной хирургии. Для подвода излучения в любое место операционного поля от лазера-источника требуется соответствующее устройство. Сложность его изготовления состоит в том, что излучение CO_2 -лазера плохо проводится стеклянными волокнами. Поэтому в настоящее время для передачи излучения применяют *шарнирные суставы*, подобные манипуляторам роботов, с зеркалами, установленными вблизи шарниров. Продвигаются исследования по созданию оптических волокон, способных проводить излучение CO_2 -лазера.

Второй, YAG-лазерный скальпель, имеет рабочую длину волны 1,06 мкм, лежащую в ближней инфракрасной области. Коэффициент поглощения этого излучения водой на порядок ниже, чем у CO_2 -лазера, поэтому оно сравнительно глубоко проникает в ткани человеческого тела. Тепловой эффект распространяется на глубину 5 мм от поверхности кожи. Подводя луч к язве, откуда сочится кровь, останавливают кровотечение термокоагуляцией. Излучение YAG-лазера проходит по оптическим волокнам, что делает его эффективным в операциях с помощью эндоскопа. Во всех лазерных скальпелях используют лазеры с выходной мощностью от 20 до 100 Вт.

Ожидается, что лазерный скальпель вызовет прогрессивные изменения в хирургии, благодаря таким достоинствам, как 1) бескровность операции (следовательно, нет необходимости в крови для переливания и исключается опасность заражения сывороточным гепатитом); 2) кратковременность операции, а значит, уменьшение нагрузки на врача и больного; 3) незначительные повреждения тканевых слоев в месте разреза; 4) стерилизующий эффект нагревания; 5) уменьшение вероятности возникновения новых опухолей при операциях по поводу рака благодаря мгновенной «перевязке» сосудов.

Лазерная хирургия развивается очень быстро. Снижается стоимость приборов и упрощается работа с ними за счет усовершенствования светопроводов, повышения надежности и улучшения управляемости. Лазерный скальпель предоставляет огромные возможности для эффективного хирургического лечения.

Что такое лазерная печать?

Печатающее устройство, или печать,— одно из выходных устройств компьютера. До настоящего времени в нем использовались только литеры разных видов: английские буквы, цифры, знаки, катаканы¹ и, кроме того, скорость вывода недостаточна при современных скоростях обработки информации. *Лазерная печать* — это выходное устройство, дающее быструю и высококачественную печать на основе ксерокопирования записанной на фотопроводящем барабане лазерным светом выходной информации. Такое устройство позволяет выводить на печать даже японское иероглифическое письмо, а также не пользоваться специально размеченной бумагой, благодаря возможности печатать одновременно с текстом рисунки, графики и таблицы.

На рис. 137 показана конструкция лазерной печати IBM, сведения о которой были опубликованы в начале 1975 г. (После этого появилось множество других публикаций и появилось множество подобных устройств, предложенных различными фирмами.) Источником излучения служит газовый лазер, к примеру на основе He—Cd и He—Ne, или полупроводниковый. Спектральная чувствительность фотопроводящего материала барабана выбирается в соответствии с длиной волны лазерного излучения. Лазерный луч модулируется акустооптическим модулятором, включаясь и выключаясь в соответствии с выводимой из компьютера информацией. Модулированный луч сканирует по барабану с постоянной скоростью, что достигается использованием специальной линзы, называемой $f\theta$ -линзой.

Последующий процесс фотопечати такой же, как в существующих электрофотокопировальных установках. При освещении заряженной поверхности фоточувствительного барабана благодаря эффекту фотопроводимости заряд уходит только с освещаемых участков, и таким образом записывается «скрытое изображение». На поверхность барабана наносят краситель из порошкообразной смолы. Затем барабан при-

¹ Вариант японской азбуки. — Прим. перев.

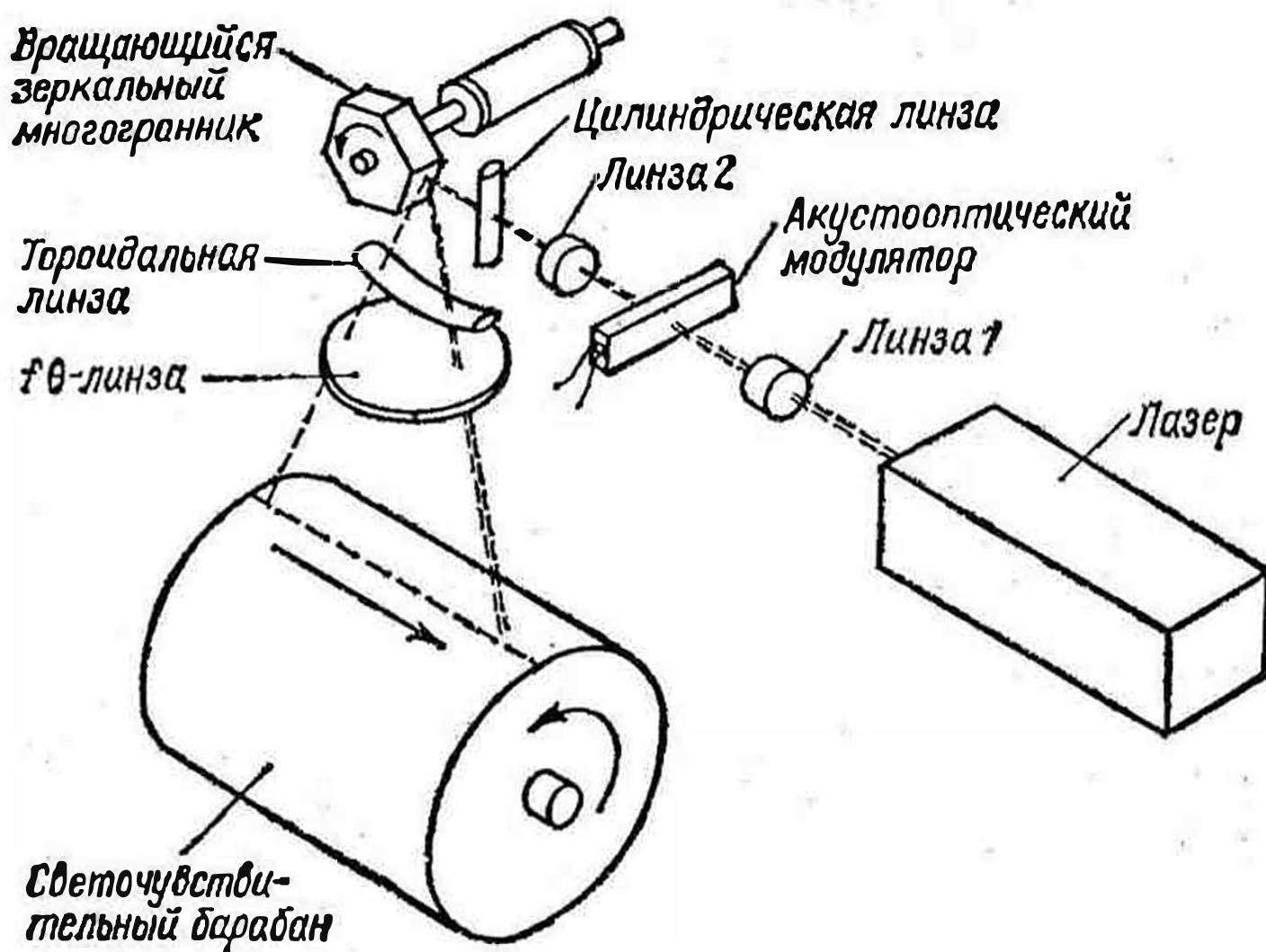


Рис. 137. Лазерная печать

жимают к бумаге и нагревом фиксируют копию. Этот процесс позволяет распечатывать любую выходящую из компьютера информацию, причем скорость печати благодаря неконтактной записи очень высока. Разрешение составляет 10 линий/мм, при диаметре луча около 100 мкм, а уменьшив диаметр, можно добиться 20—30 линий/мм. При использовании в качестве источника света полупроводникового лазера возможна непосредственная модуляция излучения и миниатюризация устройства. Но в настоящее время не существует полупроводниковых лазеров со спектром излучения, соответствующим спектральной чувствительности фотопроводников, поэтому делают попытки разработать коротковолновые полупроводниковые лазеры или светочувствительные материалы для длинноволнового диапазона.

Лазерная печать непрерывно совершенствуется и уже не будет ограничиваться функциями только выходного устройства. Вместе с входными устройствами она станет основой автоматизации учрежденческой деятельности, позволяя получать факсимильные копии, запоминать их и выдавать по требованию. Разработаны устройства и цветной лазерной печати.

Что такое лазерный гироскоп?

Традиционный гироскоп — это механическое устройство для определения угловых координат угловой скорости тела. В нем используется свойство оси волчка всегда сохранять определенное направление в пространстве. *Лазерный гироскоп* — это устройство, основанное на новом принципе определения угловой скорости тела с помощью измерений разности оптических путей для лучей правого и левого вращения (когда само устройство вращается). Этот гироскоп — миниатюрный и дешевый — обладает таким достоинством, как низкая инертность. Полагают, что он найдет широкое применение не только на самолетах и судах, но также в автомобилях и роботах.

Полупрозрачным зеркалом свет разделяют на два луча, которые движутся навстречу друг другу, проходя пути равной оптической длины. Если система в состоянии покоя, оба луча возвращаются на полупрозрачное зеркало через одинаковые промежутки времени. Если система вращается, например вправо, то луч правого вращения идет дольше, проходя путь чуть длиннее, чем в состоянии покоя, а луч левого вращения пробегает путь настолько же короче, но в противоположном направлении. Возникновение разности оптических путей, пропорциональной угловой скорости, называют *эффектом Сагнака*.

Самый первый гироскоп, в котором использовали этот эффект, — *гироскоп на кольцевом лазере* (рис. 138). В обычном лазере свет проходит туда и обратно вдоль оси резонатора, а в кольцевом лазере свет проходит по замкнутому пути. Правосторонний и левосторонний лучи возникают в нем одновременно

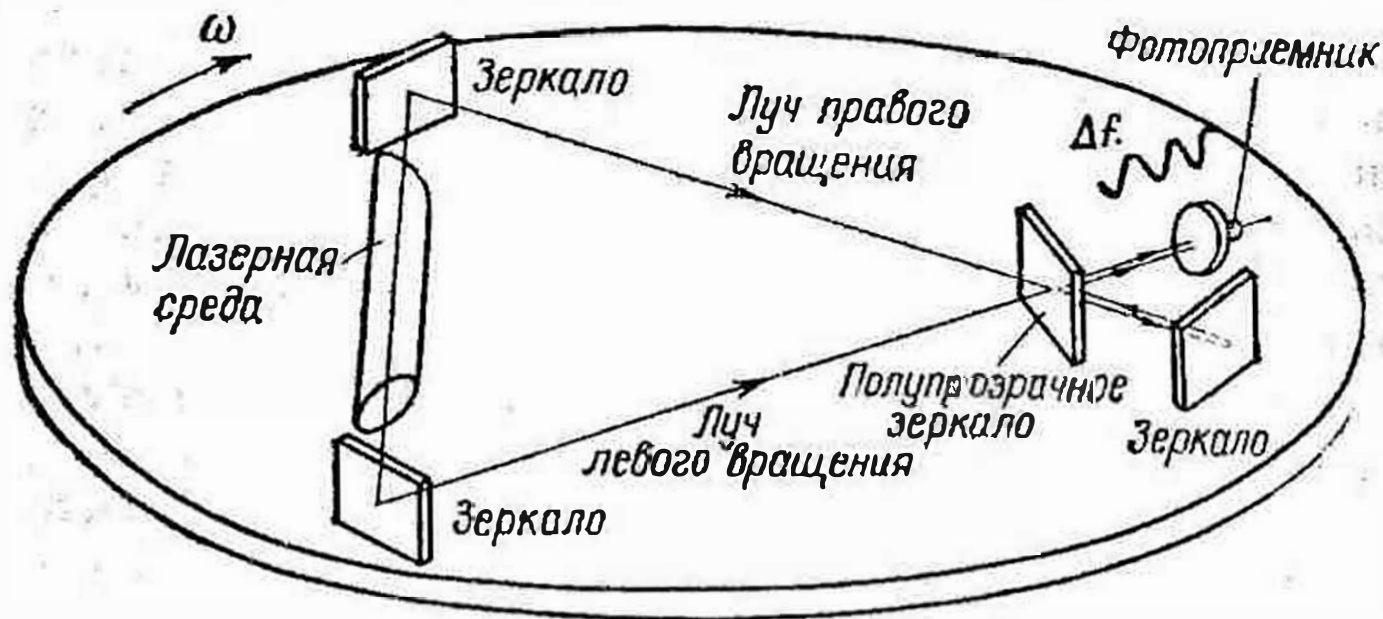


Рис. 138. Гироскоп на кольцевом лазере

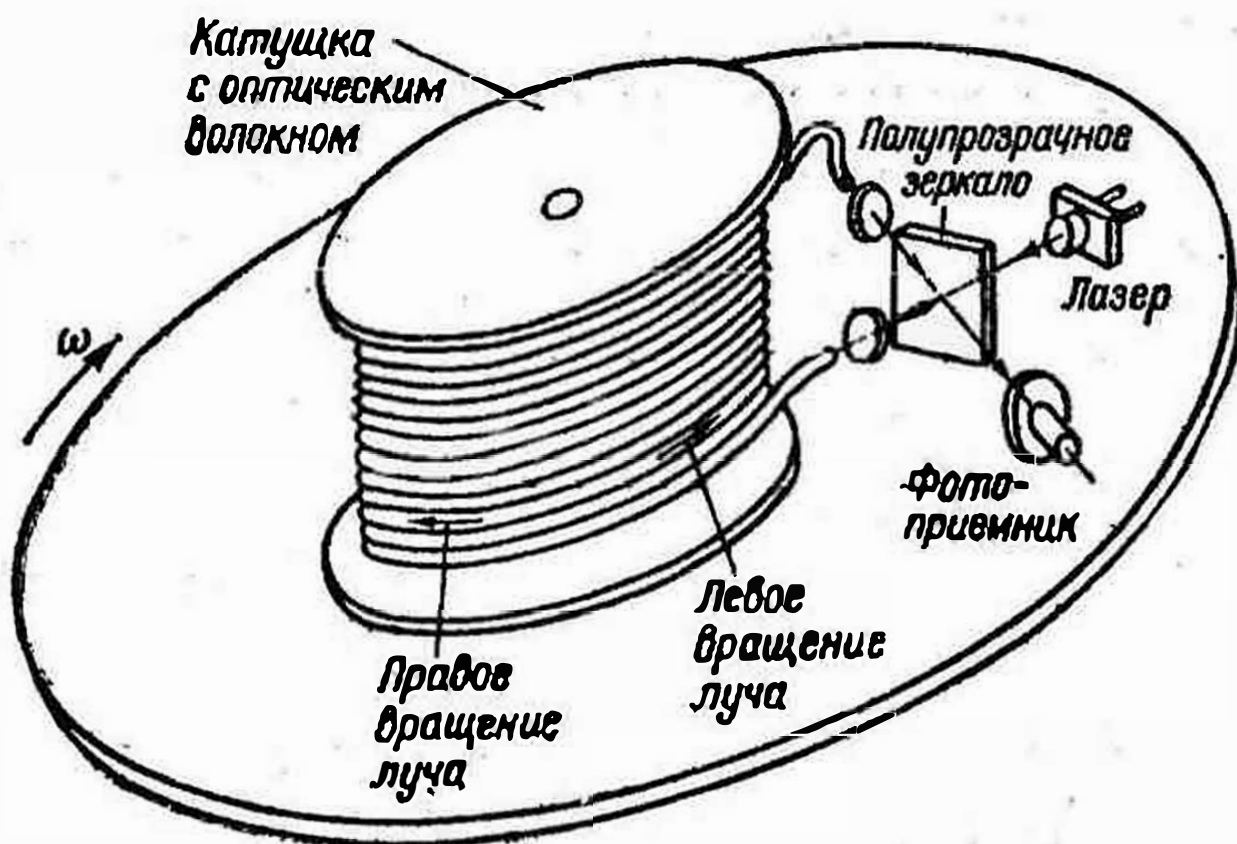


Рис. 139. Волоконно-оптический гироскоп

и движутся навстречу друг другу. В состоянии покоя, так как длина резонатора для правого и левого луча одинакова, одинакова и частота излучения. Но если система вращается в какую-либо сторону, длина резонатора становится разной для лучей, что приводит к различию частот. Разность этих частот пропорциональна угловой скорости гироскопа. Если оба луча, пришедшие от одного и того же полупрозрачного зеркала, наложить друг на друга, то по разности их частот (частоте биений) можно определять угловую скорость. Этот способ называют *активным*, так как сам лазер входит в кольцевой волновод. При низкой угловой скорости возникают резонансные явления, ограничивающие нижний порог чувствительности значением 10^{-4} рад/с.

В *волоконно-оптическом гироскопе*, показанном на рис. 139, граница чувствительности снижена отсутствием резонансных явлений. Измеряется разность хода между правым и левым лучом в витке из оптических волокон. При вращении витка появится разность фаз между лучами, а при сложении их на полупрозрачном зеркале результирующая сила света изменяется в соответствии с угловой скоростью. Разность фаз тем выше, чем больше площадь витка, а чувствительность возрастает с увеличением числа витков. Этот способ *пассивный*, так как используется независимый лазерный источник. Прибор позволяет определять угловые скорости до 10^{-8} рад/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акаев А. А., Майоров С. А. Оптические методы обработки информации. М.: Высшая школа, 1988.
2. Пространственные модуляторы света/А. А. Васильев, Д. Касасент, И. Н. Компанец, А. В. Парфенов. М.: Радио и связь, 1987.
3. Голубков В. С., Евтихий Н. Н., Папуловский В. Ф. Интегральная оптика в информационной технике. М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. Индикаторные устройства на жидких кристаллах/Под ред. В. Ю. Готры. М.: Сов. радио, 1981.
5. Носов Ю. Р., Сидоров А. С. Оптроны и их применение. М.: Радио и связь, 1981.
6. Применение оптоэлектронных приборов: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1981.
7. Свечников Г. С. Элементы интегральной оптики. М.: Радио и связь, 1987.
8. Сирухалидзе Д. Г., Чнлая Г. С. Преобразователи изображений типа МДП — электрооптический материал. М.: Радио и связь, 1986.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие переводчика	3
Предисловие авторов	4
Что такое оптоэлектроника?	5
Что такое оптоэлектронный прибор?	7
Что такое люминесценция?	10
Что такое вынужденное излучение и усиление света?	12
Что такое синхротронное орбитальное излучение?	15
Что такое поляризация?	18
Что такое когерентность?	20
Что такое электрооптический эффект?	23
Что такое акустооптический эффект?	26
Что такое магнитооптический эффект?	28
Что такое нелинейный оптический эффект?	31
Что такое эффект Рамана?	33
Что такое хромизм?	36
Что такое фотопроводимость?	38
Что такое фотоэлектродвижущая сила?	41
Что такое пироэлектрический эффект?	43
Что такое полупроводниковое соединение?	45
Что такое аморфное вещество?	48
Что такое гетеропереход и гетероструктура?	50
Что такое эпитаксия?	53
Что такое графоэпитаксия?	55
Что такое лазер?	57
Что такое химическое осаждение с помощью лазера?	59
Что такое лазерный отжиг?	62
Что такое полупроводниковый лазер?	64
Что такое полосковый лазер?	67
Что такое полупроводниковый лазер с распределенной обратной связью?	70
Что такое квантовый колодец в полупроводниковом лазере?	72
Что такое газовый лазер?	75
Что такое эксимерный лазер?	77
Что такое твердотельный лазер?	80
Что такое лазер на красителях?	82
Что такое дисплей?	84
Что такое светодиод?	87
Что такое электролюминесценция?	89
Что такое жидкий кристалл?	92
Что такое фотоэлемент и фотоэлектронный умножитель?	94
Что такое фотодиод и $p-i-n$ -фотодиод?	97
Что такое лавинный фотодиод и что такое фототранзистор?	100
Что такое фототиристор?	102
Что такое солнечная батарея?	105
Что такое фотодатчик?	109
Что такое передающая телевизионная трубка?	110
Что такое прибор с зарядовой связью?	113
Что такое модулятор света и оптическая отклоняющая система?	115
Что такое преобразователь некогерентного изображения в когерентное?	118
Что такое оптический бистабильный элемент?	121
Что такое оптро́д?	123

Что такое оптический вентиль?	125
Что такое оптическое волокно?	128
Что такое оптическое волокно, не искажающее поляризацию?	130
Что такое инфракрасное оптическое волокно и оптическое волокно со сверхнизкими потерями?	133
Что такое оптический волновод?	136
Что такое оптическая память?	138
Что такое оптическая и оптоэлектронная интегральная схема?	141
Что такое новые функциональные элементы оптоэлектроники?	144
Что такое оптические средства связи?	146
Что такое оптическая обработка информации?	148
Что такое оптический компьютер?	151
Как используют оптику для измерений?	154
Что такое голография?	159
Что такое оптический диск?	161
Что такое лазерный радар?	163
Как передают световую энергию?	166
Что такое лазерная технология обработки материалов?	168
Как работает лазер в медицине?	170
Что такое лазерный скальпель?	173
Что такое лазерная печать?	176
Что такое лазерный гироскоп?	178
Список литературы	180