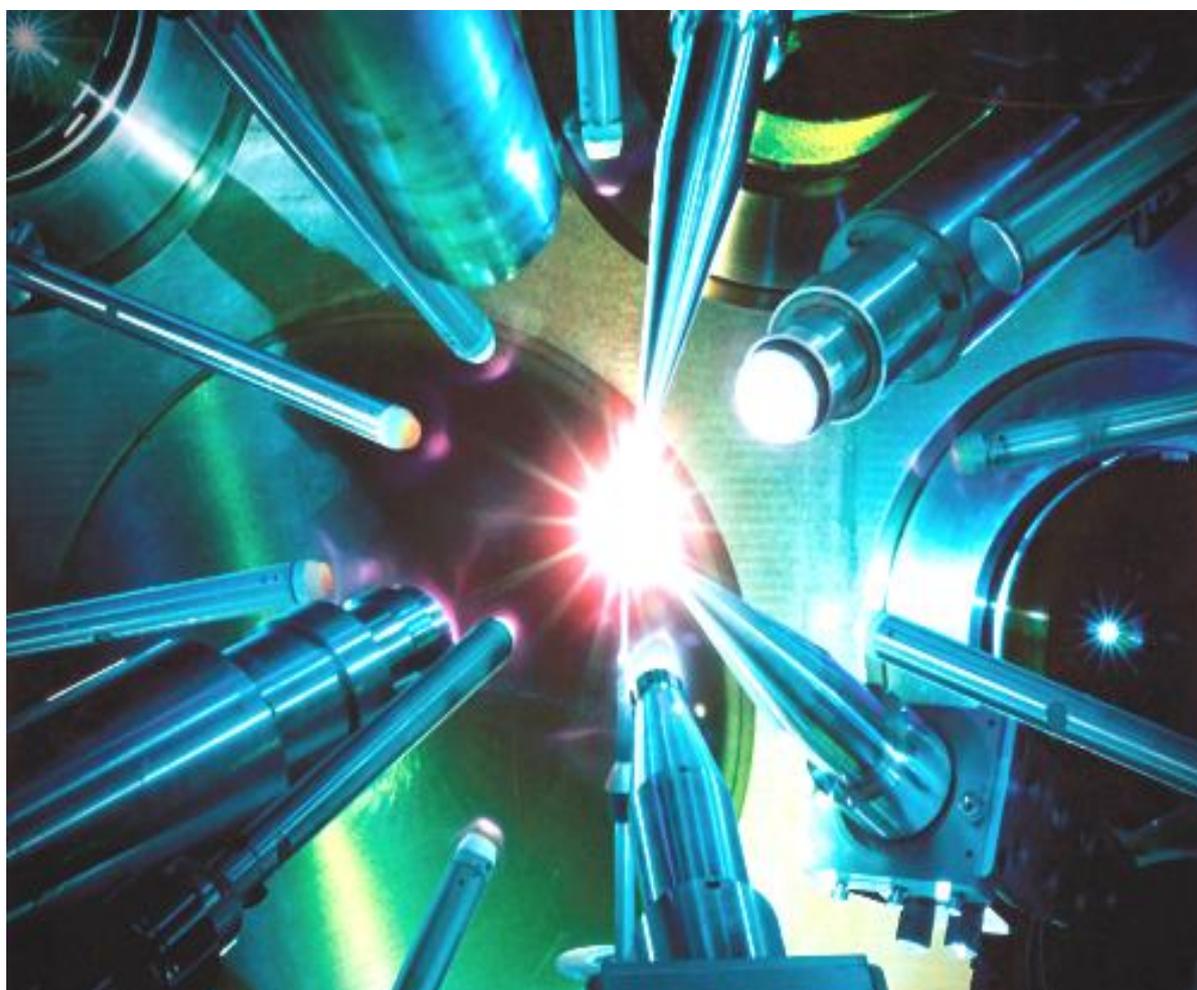


В. И. Светцов

# ОПТИЧЕСКАЯ И КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие



Иваново

2010

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Ивановский государственный химико-технологический  
университет

В. И. Светцов

ОПТИЧЕСКАЯ И КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие

2-е издание, исправленное и дополненное

Допущено учебно-методическим объединением по образованию в области химической технологии и биотехнологии в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Химическая технология монокристаллов, материалов и изделий электронной техники»

Иваново 2010

УДК 621.38

Светцов, В.И. Оптическая и квантовая электроника: учеб. пособие / В. И. Светцов; Иван. гос. хим.-техн. ун-т; - 2-е изд., исправл. и доп. - Иваново, 2010. 196 с. ISBN 978-5-9616-0386-6

Учебное пособие подготовлено на основе курсов лекций "Физическая электроника и электронные приборы", "Оптическая и квантовая электроника", читаемых автором студентам специальности «Химическая технология материалов и изделий электронной техники» и направления «Электроника и микроэлектроника» и содержит полное изложение материала по дисциплине «Оптическая и квантовая электроника». Оно включает две сравнительно независимых главы, каждая из которых сопровождается контрольными вопросами и набором заданий и задач для практических занятий и самостоятельной работы.

Предназначено для студентов специальностей «Микроэлектроника и твердотельная электроника» и «Химическая технология монокристаллов, материалов и изделий электронной техники».

Табл. 5. Ил. 100. Библиогр. 9 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Ивановского государственного химико-технологического университета.

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор В.Е. Мизонов (Ивановский государственный энергетический университет);

доктор химических наук, профессор Г.В. Гиричев (Ивановский государственный химико-технологический университет);

ISBN 978-5-9616-0386-6

© Светцов В.И., 2010

© Ивановский государственный  
химико-технологический  
университет, 2010

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Квантовая и оптическая электроника являются в настоящее время важнейшими направлениями развития электроники и электронной техники. Поэтому изучение физики явлений и физических основ работы приборов квантовой и оптической электроники является необходимым элементом подготовки инженеров - технологов электронной техники.

Данное пособие предназначено для студентов специальности "Химическая технология монокристаллов, материалов и изделий электронной техники", изучающих дисциплину "Физическая электроника и электронные приборы" и студентов направления "Электроника и микроэлектроника" при изучении дисциплины "Оптическая и квантовая электроника". Пособие может быть полезно и для студентов других приборных и технологических специальностей, а также практических инженеров.

Учебное пособие подготовлено на основе курсов лекций "Физическая электроника и электронные приборы", "Оптическая и квантовая электроника", читаемых автором студентам специальности «Химическая технология материалов и изделий электронной техники» и направления «Электроника и микроэлектроника». Оно включает две сравнительно независимых главы, каждая из которых сопровождается контрольными вопросами и набором заданий и задач для практических занятий и самостоятельной работы. При подготовке пособия использована учебная и монографическая литература, список которой приведен, а также периодические издания по электронной технике. Во втором издании пособия добавлен раздел «Волоконные лазеры» и расширен раздел по системам отображения информации. Замечания и предложения по содержанию данного пособия направлять по адресу: 153000, г. Иваново, пр. Ф.Энгельса, 7. ИГХТУ. Светцову В.И.

# Глава 1. Основы квантовой электроники

## 1.1. Этапы и перспективы развития квантовой электроники

**Квантовая электроника** – это область науки и техники, посвященная исследованию и применению квантовых явлений для усиления, генерации и преобразования когерентных электромагнитных волн. Отметим основные этапы развития квантовой электроники.

**1917 г.** А. Эйнштейн выдвинул гипотезу о существовании стимулированного излучения. Строгое обоснование существования индуцированного излучения и наличия когерентности в элементарном акте излучения проведено Дираком в созданной им квантово-механической теории излучения.

**30-е годы.** Р. Ладенбург и сотрудники сделали попытку обнаружить стимулированное излучение в газовом разряде.

**1940 г.** В. А. Фабрикант сформулировал условия экспериментального обнаружения стимулированного излучения в газовом разряде.

**1950 г.** Е. Парсел, Р. Паунд получили стимулированное излучение в результате инверсии ядерных спинов.

**1951 г.** В. А. Фабрикант, М. М. Вудынский, Ф. И. Бутаева подали заявку на авторское свидетельство на способ усиления излучения с помощью стимулированного излучения. К сожалению, материалы были опубликованы только в 1959 году, поэтому практического влияния на создание ОКГ эта заявка не оказала.

**1953–1954 гг.** Н. Г. Басов, А. М. Прохоров, Дж. Вебер, Дж. Гордон, Х. Цайгер, Ч. Таунс (США) получили генерацию на пучке молекул аммиака в сантиметровом диапазоне с использованием их сортировки в магнитном поле (первый мазер).

**1958 г.** Ч. Таунс, А. Шавлов (США), А. М. Прохоров показали возможность использования вынужденного излучения в оптическом диапазоне.

**1960 г.** Т. Мейман создал рубиновый ОКГ. А. Джаван создал газовый лазер на смеси гелия и неона.

**1958–1961 гг.** Н. Г. Басов, Б. М. Вул, Ю. М. Попов и другие сотрудники ФИАН им. Лебедева разработали теоретические основы

и в 1962-1963 г. в ФИАНе были созданы практические конструкции полупроводниковых лазеров.

**1962 г.** Р. Холл создал лазер на арсениде галлия с использованием n-p-перехода.

**1964 г.** В. Бриджес разработал ионные газовые ОКГ с повышенной мощностью.

**1965 г.** К. Пейтел разработал мощные молекулярные газовые ОКГ на смеси углекислого газа, азота и гелия.

Термин "Лазер" образован из полного английского названия: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, что означает "усиление света с помощью вынужденного испускания излучения". Необходимо помнить, что термин "свет" означает в данном случае не только излучение в видимой области (0,38–0,77 мкм), но также в ультрафиолетовой (0,01–0,38 мкм) и инфракрасной (0,77–340 мкм) областях электромагнитных колебаний. В отечественной литературе наряду с термином "лазер" часто используется название "оптический квантовый генератор" или сокращенно ОКГ.

Лазеры – это принципиально новые источники оптического излучения. В отличие от теплового излучения и люминесценции излучение лазеров обладает высокой монохроматичностью, когерентностью, направленностью и высокой спектральной плотностью мощности.

Перспективы применения лазеров настолько широки, что трудно назвать область науки или техники, где ОКГ не применяются или не будут применяться. По словам создателя первого лазера американского ученого Меймана, когда будет решена задача управления лучом ОКГ и обеспечения приемлемого КПД, их применение будет ограничено, в сущности, лишь воображением и изобретательностью инженеров.

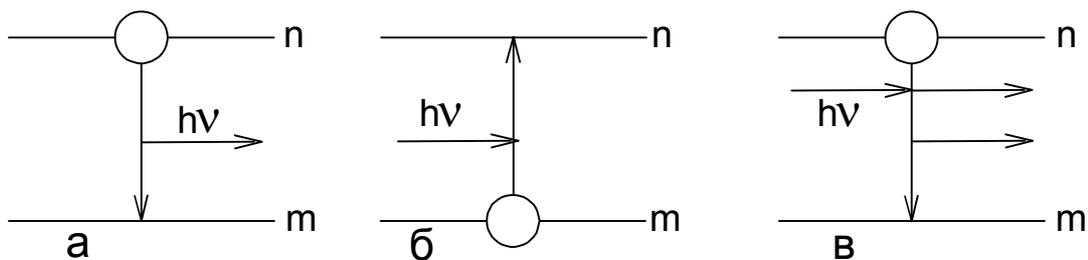
Дальнейшее развитие науки, техники и производства в настоящее время неразрывно связано с использованием открытий и достижений в области лазерной техники. Уже в настоящее время лазеры широко применяются в метрологии и измерительной технике, мониторинге окружающей среды, космической технике, технологии обработки материалов, химической технологии и химическом анализе, медицине, сельском хозяйстве, строительстве, военной технике, интегральной и волоконной оптике, информационных системах, и везде их использование дает

поразительные результаты. Так, без лазеров невозможно развитие и применение практической голографии.

Однако это только начало использования свойств лазерного излучения. В будущем лазеры найдут еще более широкое применение. Создаются все более совершенные лазерные системы с различными принципами работы, использующие в качестве активного вещества новые материалы, смеси различных веществ. В ближайшее время можно ожидать широкого распространения портативных, сравнительно экономичных, надежных в эксплуатации и достаточно мощных полупроводниковых, жидкостных и химических лазеров, излучающих энергию в широком диапазоне волн. Уже решается вопрос о получении лазерного излучения в рентгеновской области, а также в области  $\gamma$ -излучения.

## **1.2. Физические основы взаимодействия излучения с веществом**

Существует три возможных процесса взаимодействия квантовых систем и электромагнитного излучения, которые схематически показаны на рис. 1.1.



*Рис. 1.1. Квантовые переходы при взаимодействии с фотоном:  
 а – спонтанный переход с испусканием фотона; б – вынужденный переход с поглощением фотона; в – вынужденный переход с испусканием фотона*

Рассмотрим переходы частицы из одного состояния в другое с выделением или поглощением энергии электромагнитного поля. Возбужденная частица в произвольный момент времени может самопроизвольно перейти в более низкое энергетическое состояние,

излучив при этом квант света. Такое излучение называется спонтанным.

Скорость спонтанного перехода с уровня  $n$  на уровень  $m$  определяется выражением:

$$\frac{dN_n}{dt} = A_{nm}N_n, \quad (1.1)$$

где  $N_n$  – концентрация частиц на уровне  $n$ . Коэффициент  $A_{nm}$  есть вероятность перехода или коэффициент Эйнштейна для спонтанного излучения,  $[c^{-1}]$ . Величина, обратная  $A_{nm}$ , называется спонтанным временем жизни.

Значение коэффициента Эйнштейна для спонтанных переходов в оптическом диапазоне может изменяться от  $10^8 c^{-1}$  для разрешенных переходов до  $1 c^{-1}$  для запрещенных переходов.

Случайность спонтанных переходов приводит к тому, что различные атомы излучают независимо и несинхронно. Поэтому спонтанное излучение ненаправленно, некогерентно, неполяризовано и немонахроматично. Такое естественное излучение испускают все обычные источники света.

Другим оптическим процессом является поглощение излучения частицей, переходящей в результате этого в возбужденное состояние. Скорость поглощения:

$$\frac{dN_m}{dt} = -B_{mn}\rho(\nu)N_m, \quad (1.2)$$

где  $B_{mn}$  – коэффициент Эйнштейна для вынужденного поглощения,  $\rho(\nu)$  – спектральная плотность излучения,  $N_m$  – концентрация частиц на уровне  $m$ .

Однако эти два процесса не объясняют всех закономерностей взаимодействия излучения со средой. При взаимодействии возбужденной частицы с фотоном возможен переход частицы в состояние с меньшей энергией – при этом излучается дополнительный фотон. Этот процесс носит название вынужденного или стимулированного излучения. Скорость этого процесса:

$$\frac{dN_n}{dt} = -B_{nm}\rho(\nu)N_n, \quad (1.3)$$

где  $B_{nm}$  – коэффициент Эйнштейна для вынужденного излучения,  $P(\nu)$  – спектральная плотность излучения,  $N_n$  – концентрация

частиц на уровне  $n$ . Произведение  $B \cdot \rho(\nu)$  имеет размерность, обратную времени. Следует отметить, что  $B_{nm} = B_{mn}$  с точностью до постоянного множителя. Связь между коэффициентами спонтанного и вынужденного испускания определяется соотношением:

$$\frac{A_{nm}}{B_{nm}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}. \quad (1.4)$$

Стимулированное излучение является процессом, составляющим физическую основу работы ОКГ. Существует весьма интересная особенность стимулированного излучения – вторичный фотон неотличим от первичного, стимулирующего фотона. Оба фотона характеризуются одинаковыми параметрами: частотой, фазой, импульсом и поляризацией. В инверсной среде, используемой в ОКГ, стимулированное излучение становится процессом, который определяет механизм размножения фотонов.

Предположим, что на систему, содержащую частицы  $m$  и  $n$ , падает электромагнитная волна с частотой  $\nu$  и со спектральной плотностью  $\rho(\nu)$ . При этом единицей объема среды в процессе вынужденного поглощения поглотится мощность, равная:

$$W_n = h\nu B_{nm} \rho(\nu) N_m. \quad (1.5)$$

В то же время в процессе вынужденного излучения выделится мощность:

$$W_{изл} = h\nu B_{mn} \rho(\nu) N_n. \quad (1.6)$$

Разность этих мощностей представляет собой мощность излучения, вышедшую из активной среды:

$$W_{изл} - W_n = h\nu B_{nm} \rho(\nu) [N_n - N_m]. \quad (1.7)$$

В уравнении 1.7 учтено, что  $B_{mn} = B_{nm}$ . Очевидно, что если  $W_{изл}$  больше  $W_n$ , то мощность волны будет увеличиваться по мере прохождения среды. В противном случае среда поглощает волну.

Таким образом, при выполнении условия  $N_n$  больше  $N_m$ , то есть при наличии в системе инверсной заселенности уровней, можно получить оптический квантовый усилитель света. Инверсия заселенностей является необходимым, но недостаточным условием для получения усиления в данной среде. Необходимо так же, чтобы усиление за счет процессов вынужденного излучения превышало все возможные потери.

Рассмотрим подробнее вопрос о коэффициенте усиления системы. Изменение интенсивности излучения при прохождении оптически активной среды описывается уравнением:

$$dI_\nu = -x_\nu I_\nu dx, \quad (1.8)$$

представляющим собой закон Бугера в дифференциальной форме. Здесь  $x_\nu$  – коэффициент поглощения.

Если в рассматриваемой среде существует инверсная заселенность, то коэффициент поглощения меньше нуля, то есть волна не затухает, а усиливается. В этом случае о среде с инверсной заселенностью можно говорить как о среде с отрицательным коэффициентом поглощения.

Установим связь между коэффициентом поглощения и инверсной заселенностью уровней. Перепишем уравнение (1.8) в виде:

$$x_\nu = \frac{dI_\nu}{I_\nu dx}. \quad (1.9)$$

Очевидно, что смысл  $x_\nu$  – это относительное приращение потока энергии на единице пути. Энергия, выделяемая в единице объема в единицу времени, определяется уравнением (1.9) и представляет собой производную интенсивности излучения по расстоянию. С учетом изложенного можно записать:

$$x_\nu = -\frac{h\nu B_{nm}(N_n - N_m)\rho(\nu)}{P(\nu)c},$$

$$x_\nu = -\frac{h\nu B_{nm}(N_n - N_m)}{c}. \quad (1.10)$$

Для лазерных сред отрицательный коэффициент поглощения получил название коэффициента усиления. Он непосредственно характеризует усилительные свойства среды.

При распространении волны в инверсной среде часть ее интенсивности теряется за счет различных потерь. Этот процесс так же можно описать уравнением Бугера:

$$dI_\nu = -x_n I_\nu dx, \quad (1.11)$$

где  $x_n$  – коэффициент потерь. Учитывая потери в среде и усилительные ее свойства, окончательное уравнение изменения интенсивности волны можно представить в виде:

$$dI_\nu = (x_\nu - x_n) I_\nu dx. \quad (1.12)$$

Очевидно, что усиление будет иметь место при  $x_v \gg x_n$  то есть необходимо иметь некоторую критическую или пороговую инверсную заселенность, определяемую выражением:

$$x_n = \frac{h\nu B_{nm} \Delta N_{nop}}{c},$$

$$\Delta N_{nop} = (N_n - N_m). \quad (1.13)$$

Усилительные свойства среды можно улучшить, если использовать положительную обратную связь, то есть возвращать часть сигнала в активную среду, обеспечивая многократное прохождение его. При этом достигается гораздо большее усиление. Если усиление существенно перекрывает потери среды и системы обратной связи, то произойдет самовозбуждение усилителя, начнется генерация излучения.

Интегральное усиление сигнала в инверсной среде характеризуется коэффициентом усиления, представляющим отношение величины выходного сигнала к входному:

$$K = \frac{P_{вых}}{P_{вх}}. \quad (1.14)$$

В случае, когда усиление значительно, указывают коэффициент усиления в децибелах:

$$K = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_{вых}}{P_{вх}}\right), \text{ дБ}. \quad (1.15)$$

Мы рассмотрели влияние инверсной среды на характеристики проходящего излучения. Однако изменения происходят и в инверсной среде. Увеличение плотности излучения в среде вызовет уменьшение плотности инверсии, так как баланс процессов изменится в сторону обеднения верхнего уровня и дополнительного заселения нижнего уровня. Этот процесс называется насыщением усиления и определяет нелинейный характер усиления излучения инверсной средой.

### ***1.2.1. Форма и ширина спектральной линии***

В предыдущем рассмотрении не учитывалась ширина спектральной линии. Но любая спектральная линия имеет конечную ширину, связанную с вероятностями переходов. Поэтому вопрос о

форме и ширине спектральной линии целесообразно рассмотреть подробнее.

Энергетическому переходу между двумя бесконечно узкими энергетическими уровнями должна соответствовать бесконечно узкая спектральная линия поглощения или излучения на строго фиксированной частоте. Реально такая идеализированная монохроматическая волна существовать не может, поскольку уровни энергии имеют конечную ширину. Поэтому излучение происходит в некотором интервале частот около  $\nu_0$ . На этой частоте мощность излучения максимальна и убывает на частотах, больших или меньших чем  $\nu_0$ . Частотный интервал, в пределах которого интенсивность убывает вдвое по сравнению с максимальным значением, называется шириной спектральной линии  $\Delta\nu_N$ . Ширина спектральной линии, определяемая спонтанными переходами, называется естественной шириной, которая прямо пропорциональна вероятности спонтанного перехода:

$$\Delta\nu_N = \frac{A_{nm}}{2\pi} = \frac{32\pi^3\nu_{nm}^3}{3hc^3g_m} |D_{nm}|^2, \quad (1.16)$$

где  $g_m$  – кратность вырождения уровня  $|D_{nm}|$  – матричный элемент дипольного момента перехода

Форма спектральной линии с естественной шириной описывается функцией Лоренца, которую иногда называют форм-фактором:

$$F_\nu = \frac{\Delta\nu_N}{\pi(\nu - \nu_0)^2 + \Delta\nu_N^2}. \quad (1.17)$$

Эта функция нормируется: 
$$\int_{-\infty}^{+\infty} F_\nu d\nu = 1 \quad (1.18)$$

С естественной шириной спектральной линии тесно связано время жизни частицы в возбужденном состоянии. Как уже отмечалось, время жизни есть величина, обратная вероятности перехода. Время жизни, в соответствии с принципом неопределенности Гейзенберга, определяет и ширину энергетического уровня:

$$\Delta E_{nm} = \frac{h}{2\pi\tau_{nm}}. \quad (1.19)$$

Наиболее широкими оказываются уровни с малым временем жизни и большой вероятностью перехода. Соотношение ширины линии и ширины перехода наглядно иллюстрируется рис.1.2.

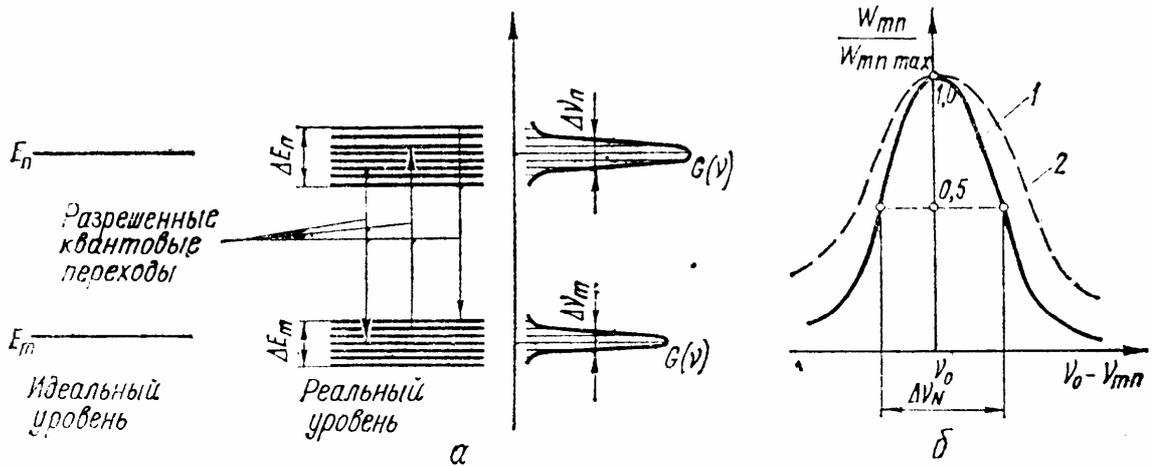


Рис. 1.2. Представление реального и идеального энергетического уровня.

Форму спектральной линии можно выразить и как функцию длины волны:

$$\Delta\lambda = 2\pi c \frac{\Delta\nu}{\nu^2}. \quad (1.20)$$

Для классического осциллятора естественная ширина линии, выраженная в длинах волн и называемая также радиационной шириной, является универсальной постоянной:

$$\Delta\lambda = \frac{e^2}{3\epsilon_0 c^2 m} = 1,2 \cdot 10^{-14} \text{ м} . \quad (1.21)$$

В реальных условиях существует ряд факторов, приводящих к увеличению ширины спектральной линии по сравнению с естественной шириной. Рассмотрим некоторые из них.

### 1. Доплеровское уширение

Эффект Доплера есть изменение частоты (длины волны), наблюдаемое при движении источника излучения относительно приемника. Частота излучения увеличивается, если источник приближается к наблюдателю. Частота электромагнитных волн, которую воспринимает наблюдатель, движущийся относительно объекта со скоростью  $v$ , может быть найдена из уравнения:

$$\nu = \nu_0 \left( 1 + \frac{v}{c} \cos \theta \right) \text{ при } v \ll c . \quad (1.22)$$

Хаотичность теплового движения молекул в газе дает форму спектральной линии, описываемой функцией Гаусса:

$$G_\nu = \frac{\sqrt{\ln 2 / \pi}}{\Delta\nu} \exp\left\{-\ln 2 \left[(\nu - \nu_0)^2 / \Delta\nu^2\right]\right\} \quad (1.23)$$

с шириной  $\Delta\nu_D = \nu_0 \sqrt{\frac{2kT \cdot \ln 2}{mc^2}}$ .

Доплеровское уширение в газовых активных средах достигает 1000 МГц, тогда как в твердых телах оно незначительно из-за жесткой связи ионов активатора с решеткой.

## 2. Уширение при столкновениях

Столкновения атомов с другими частицами или со стенками сосуда в газе, а также взаимодействие атомов с решеткой в твердых телах приводят к увеличению скорости обмена энергией между частицами и, следовательно, к уменьшению времени жизни атома в возбужденном состоянии. Форма спектральной линии, уширенной за счет столкновений, будет описываться функцией Лоренца, как и при естественном уширении. Но время жизни атома в возбужденном состоянии будет определяться временем столкновения. Из кинетической теории газов время столкновения равно:

$$\tau_{cm} = \frac{(MkT / \pi)^{0.5}}{16a^2P}, \quad (1.24)$$

где  $a$  – эффективный боровский радиус атома,  $P$  – давление газа.

Оценки показывают, что при пониженных давлениях уширение за счет столкновений в газе меньше доплеровского (например, в условиях работы гелий-неонового лазера), а при давлениях порядка атмосферного это уширение может быть преобладающим (некоторые типы лазеров на углекислом газе).

## 3. Уширение в твердых телах

В твердых активных веществах важной причиной уширения спектральных линий являются неоднородности кристалла и тепловые колебания решетки. Чем выше температура кристалла, тем сильнее колебания. При этом активные ионы оказываются расположенными в переменных полях, модулирующих положение энергетических уровней и тем самым уширяющих спектральную линию. Так, например, ширина спектральной линии

люминесценции рубина при 300 К составляет 330 ГГц, а при 77 К 10 ГГц. Кроме того, из-за возможного неоднородного окружения активного иона, обусловленного неоднородностями кристалла или посторонними дефектами, возникает дополнительное уширение спектральной линии. Последнее особенно заметно проявляется в активированных стеклах, где окружение каждого из активных ионов различно.

#### **4. Уширение линий в магнитных и электрических полях**

При воздействии внешнего магнитного поля на квантовую систему происходит расщепление энергетического уровня  $E_m$  на несколько подуровней  $g_m$ . Это расщепление, сопровождающееся уширением спектральной линии, называется эффектом Зеемана, а число  $g_m$  различных состояний – кратностью (степенью) вырождения уровня.

Расщепление и смещение энергетических уровней под действием внешнего электрического поля называется эффектом Штарка. Различают линейный и квадратичный эффект Штарка в соответствии с зависимостью расщепления от напряженности внешнего электрического поля.

Различают однородное и неоднородное уширение. Уширение называется однородным, если линии каждого отдельного атома и системы в целом уширяются одинаково (естественное уширение, столкновительное уширение). Форма однородно уширенных линий хорошо описывается функцией Лоренца.

При неоднородном уширении резонансные частоты отдельных атомов не совпадают и распределяются в некоторой полосе частот, приводя к уширению линии системы в целом при существенно меньшем уширении линии отдельных атомов. К неоднородному относится Доплеровское уширение, уширение за счет неоднородностей среды. Форма линии при неоднородном уширении описывается функцией Гаусса.

### **1.3. Устройство и принципы работы лазеров**

Общая схема оптического квантового генератора (лазера) приведена на рис. 1.3.

Необходимыми элементами любого лазера являются:

- 1) рабочее вещество, в котором может быть осуществлена инверсия (активная среда);
- 2) устройство, в котором используется какое-либо физическое воздействие на рабочее вещество, позволяющее осуществить инверсию населенности (система накачки);
- 3) элемент, при помощи которого осуществляется интенсивное взаимодействие излучения с веществом и происходит отбор энергии от возбужденных молекул (оптический резонатор);
- 4) устройство, обеспечивающее вывод энергии;
- 5) дополнительные элементы, зависящие от цели лазера. (Приборы управления лучом, модуляторы и т.д.)

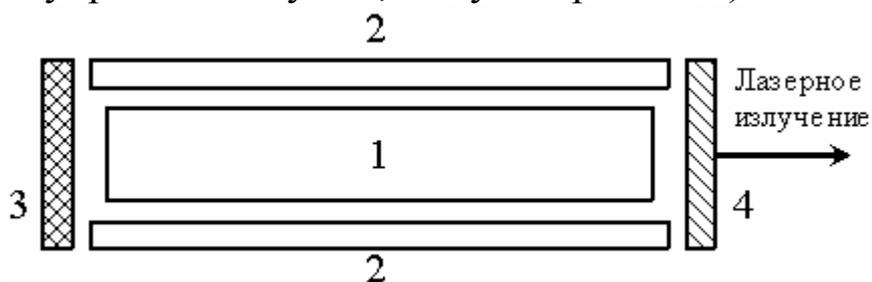


Рис. 1.3. Принципиальная схема лазера: 1 – активный элемент; 2 – устройство накачки; 3 – зеркало со стопроцентным отражением; 4 – полупрозрачное зеркало.

Рассмотрим подробнее некоторые из элементов лазера.

### 1.3.1. Рабочее вещество

Активная среда лазера может быть различна по агрегатному состоянию. Именно по этому признаку различают лазеры на твердом теле, газовые лазеры, жидкостные. Соответственно различается и устройство активных элементов лазеров, относящихся к разным группам. Активный элемент твердотельного лазера представляет собой стержень с кристаллической или аморфной структурой. В газовых лазерах активный элемент имеет вид трубки, заполненной газом или их смесью. В жидкостных лазерах активный элемент находится в кювете.

### 1.3.2. Создание инверсии

Возбуждение активного вещества или накачка могут осуществляться несколькими методами.

1. **Оптическая накачка.** Это достаточно универсальный и широко используемый метод накачки твердотельных и

жидкостных лазеров, иногда он применяется и для накачки полупроводниковых и газовых лазеров. Сущность метода заключается в облучении активной среды излучением, которое поглощается активным веществом и переводит активные центры из основного в возбужденное состояние. В качестве источника излучения могут быть использованы разнообразные источники света, в том числе ксеноновые лампы-вспышки низкого давления (около 100 мм рт. ст.), вольфрам-иодные, криптоновые и ртутные капиллярные лампы высокого давления, обычные лампы накаливания, лазеры.

2. **Накачка с помощью газового разряда** осуществляется путем пропускания тока через газ. При этом возбуждение активных состояний атомов и молекул осуществляется при неупругих столкновениях электронов с тяжелыми частицами, а также при вторичных процессах в газе. В настоящее время для накачки используются тлеющий и дуговой разряды на постоянном токе, высоких и сверхвысоких частотах.
3. **Возбуждение электронным пучком.** Этот метод накачки используется для полупроводниковых и газовых лазеров.
4. **Инжекция неосновных носителей заряда через  $n$ - $p$  переход** – это самый распространенный способ накачки полупроводниковых лазеров, который позволяет непосредственно, без промежуточных стадий, преобразовывать электрическую энергию в лазерное излучение.
5. **Химическая накачка** применяется главным образом в газовых лазерах и использует химические реакции, сопровождающиеся образованием возбужденных продуктов.
6. **Газодинамическая накачка.** Этот метод применяется в газовых лазерах и заключается в резком охлаждении рабочего газа, в результате чего может быть достигнута инверсная населенность.

### ***1.3.3. Условия создания инверсной населенности***

Условия получения инверсной населенности уровней можно получить из анализа балансных уравнений кинетики заселения и тушения конкретных энергетических уровней в активной среде при

наличии накачки. При этом нет необходимости рассматривать все возможные элементарные процессы в системе, достаточно ограничиться лишь теми, которые вносят наиболее существенный вклад в изменение населенности рабочих уровней под действием накачки. В общем случае достаточно рассмотреть двух-, трех- и четырехуровневую схемы возбуждения активного вещества, соответствующие количеству энергетических уровней, участвующих в создании инверсной населенности.

### 1.3.4. Двухуровневая система

Рассмотрим простейшую двухуровневую систему, в которой активная среда имеет уровень  $E_1$  – основное состояние и уровень  $E_2$  – возможное возбужденное состояние (рис. 1.4).

В такой системе достаточно учесть три основных процесса: возбуждение уровня  $E_2$  в результате накачки и спонтанный и вынужденный излучательные переходы в основное состояние  $E_1$ .

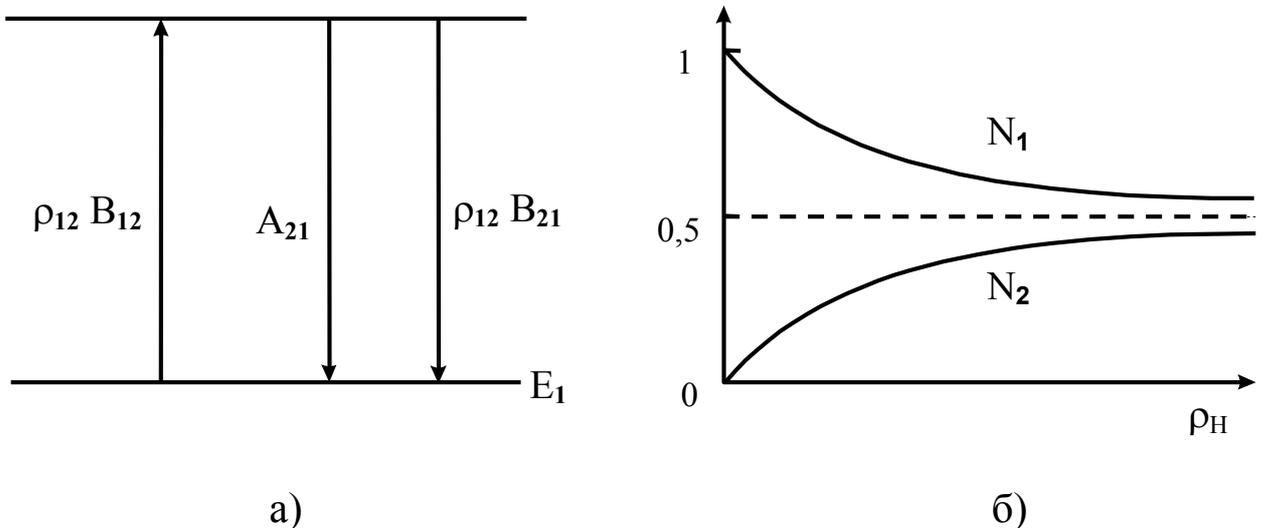


Рис. 1.4. Схема энергетических состояний двухуровневой квантовой системы (а) и зависимость относительной населенности рабочих уровней от плотности накачки (б).

В стационарном состоянии скорости населения и расселения уровня  $E_1$  равны и уравнение баланса можно записать следующим образом:

$$\rho \cdot e_{12} N_1 = (\rho \cdot e_{21} + A_{21}) N_2 . \quad (1.25)$$

Обозначив общее количество частиц в системе  $N = N_1 + N_2$ , получим:

$$N_2 = \frac{\rho \cdot e_{21}}{A_{21} + 2\rho \cdot e_{21}} N, \quad N_1 = \frac{A_{21} + \rho \cdot e_{21}}{A_{21} + \rho \cdot e_{21}} N, \quad (1.26)$$

где  $\rho_n$  – плотность излучения накачки. При отсутствии возбуждения все частицы находятся на энергетическом уровне  $E_1$ . С увеличением плотности накачки населенность уровня  $E_1$  уменьшается, а  $E_2$  растет (рис 16.4,б). В предельном случае, при бесконечно большой плотности накачки, населенности обоих уровней выравниваются:

$$\lim N_1 = \lim N_2 = N/2. \quad (1.27)$$

Такое состояние называется "просветлением" среды, так как показатель поглощения при этом стремится к нулю. Но ни при каких условиях, используя оптическую накачку, в двухуровневой системе нельзя достичь инверсии, а следовательно, и усиления. Аналогичный результат получается и для других способов накачки. Инверсную населенность в двухуровневой системе можно получить только методом сортировки частиц. Пример – мазер на пучке молекул аммиака.

### 1.3.5. Трехуровневые системы

На рис. 1.5 приведены два варианта трехуровневых систем. В первом из них рабочий переход заканчивается в основном состоянии, а во втором – на возбужденном. Накачка в обоих случаях осуществляется по возможности селективно на уровень  $E_3$ .

Рассмотрим зависимость населенности уровней от плотности накачки для трехуровневой системы первого типа. Предположим, что накачка системы осуществляется оптическим путем только по каналу 1 – 3, а внешним возбуждением в каналах 1 – 2 и 2 – 3 можно пренебречь.

Кинетические уравнения для стационарного случая будут иметь вид:

$$\begin{aligned} dN_3/dt &= \rho_n B_{13} N_1 - (\rho_n B_{31} + S_{32} + A_{31}) N_3 = 0, \\ dN_2/dt &= S_{32} N_3 - S_{21} N_2 = 0, \\ N_1 + N_2 + N_3 &= N, \end{aligned} \quad (1.28)$$

где  $S$  – частота релаксации при излучательных и безизлучательных переходах,  $s^{-1}$ .

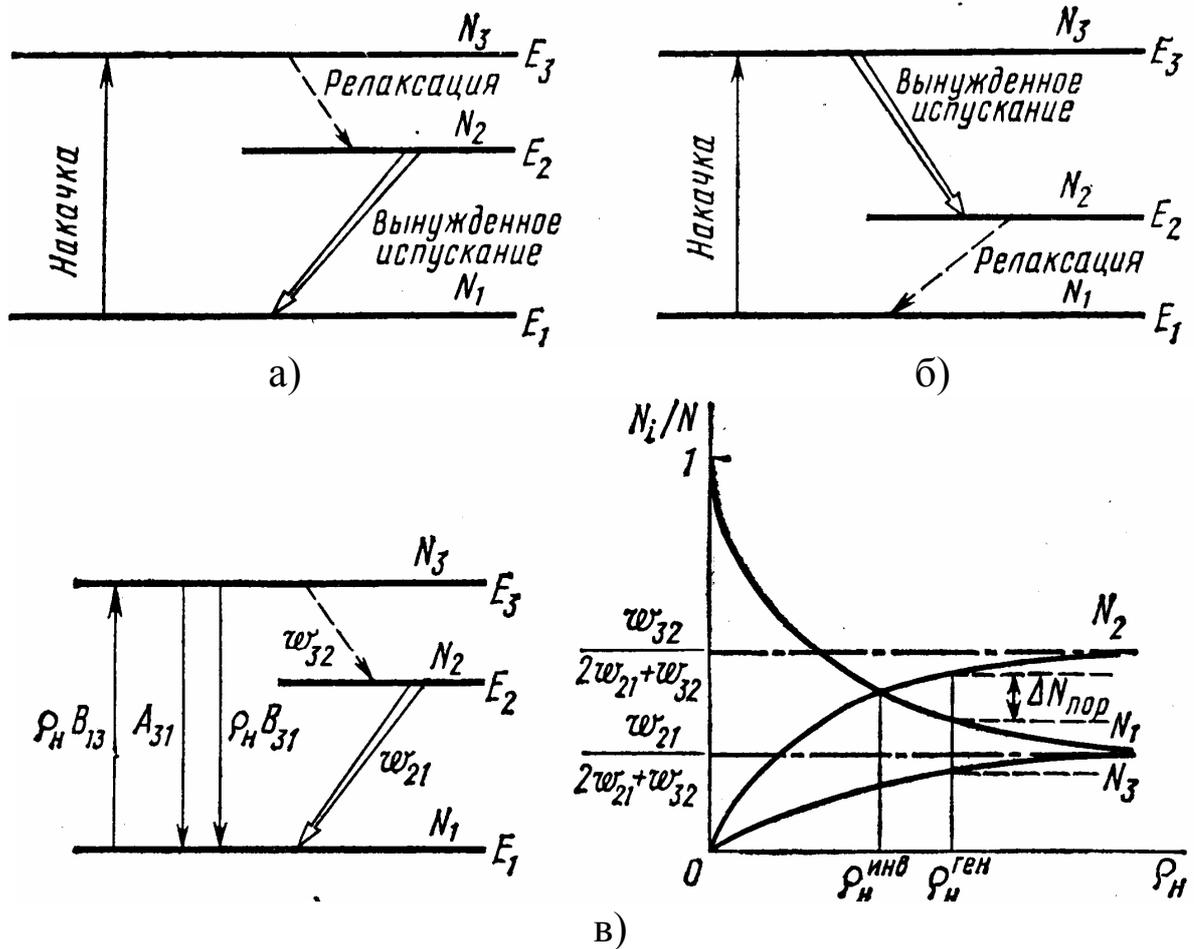


Рис. 1.5. Трехуровневые схемы первого (а) и второго (б) типов и зависимость относительной населенности уровней от плотности накачки (в)

Полагая кратности вырождения всех уровней равными единице, находим следующие выражения для населенности уровней:

$$\begin{aligned}
 N_1 &= \frac{S_{21}(A_{31} + S_{32} + \rho_H B_{31})}{S_{21}(S_{32} + A_{31}) + (2S_{21} + S_{32})\rho_H B_{31}} N, \\
 N_2 &= \frac{S_{32}\rho_H e_{31}}{S_{21}(S_{32} + A_{31}) + (2S_{21} + S_{32})\rho_H B_{31}} N, \\
 N_3 &= \frac{S_{21}\rho_H e_{31}}{S_{21}(S_{32} + A_{31}) + (2S_{21} + S_{32})\rho_H B_{31}} N.
 \end{aligned} \quad (1.29)$$

Зависимость относительной населенности уровней от плотности накачки показана на рис. 1.5, в. При больших плотностях накачки населенности основного и верхнего состояний выравниваются и стремятся к:

$$\lim N_1 = \lim N_3 = \frac{S_{21}}{2S_{21} + S_{32}} N, \quad (1.30)$$

а населенность уровня  $E_2$  при  $\rho \rightarrow \infty$  стремится к

$$\lim N_2 = \frac{S_{32}}{2S_{21} + S_{32}} N. \quad (1.31)$$

При некотором значении плотности накачки, называемым пороговым, возникает инверсия населенности между уровнями  $E_2$  и  $E_1$  ( $N_2 > N_1$ ). С увеличением плотности накачки выше порогового значения инверсия увеличивается. Отметим, что порог накачки по инверсии обычно меньше порога накачки по генерации. Приравнивая выражения для концентраций  $N_1$  и  $N_2$ , получим выражение для пороговой плотности накачки по инверсии:

$$\rho_{\text{инв.}} = \frac{S_{21}(S_{32} + A_{31})}{B_{31}(S_{32} - S_{21})}. \quad (1.32)$$

Из рассмотренных выше соображений следует, что для создания максимального уровня инверсии наиболее выгодны системы, в которых переход  $3 - 2$  должен быть быстрым, уровень  $E_2$  – долгоживущим, а коэффициент Эйнштейна для перехода  $1 - 3$  – большим.

В режиме генерации происходит изменение населенностей рабочих уровней, сопровождающееся насыщением инверсии и коэффициента усиления. Увеличение поступления частиц на уровень  $E_2$ , вызываемое ростом плотности накачки, компенсируется возрастанием числа активных переходов  $2 - 1$ . Поэтому в режиме генерации инверсия остается приблизительно постоянной и близкой к пороговому значению плотности накачки по генерации.

### **1.3.6. Четырехуровневая система**

В четырехуровневой системе каналы накачки и генерации полностью разделены, что позволяет получать инверсию населенностей при минимальных уровнях накачки. Механизм создания инверсии между рабочими лазерными уровнями  $E_3$  и  $E_2$  показаны на рис. 1.6. Так же, как и в трехуровневой системе, накачка переводит атомы из основного  $E_1$  в верхнее возбужденное состояние  $E_4$ . Инверсия достигается между уровнями  $E_3$  и  $E_2$ . Для этого необходимо, чтобы процессы  $E_4 - E_3$  и  $E_2 - E_1$  были

быстрыми. Возможные переходы  $4 - 1$ ,  $4 - 2$ ,  $3 - 1$ ,  $1 - 2$ ,  $3 - 4$  приводят к уменьшению инверсии.

Так же, как и в предыдущих случаях, для четырехуровневой системы может быть проведен кинетический анализ, результаты которого показаны на рис. 1.6,б. Сами балансные уравнения из-за их громоздкости не приводятся.

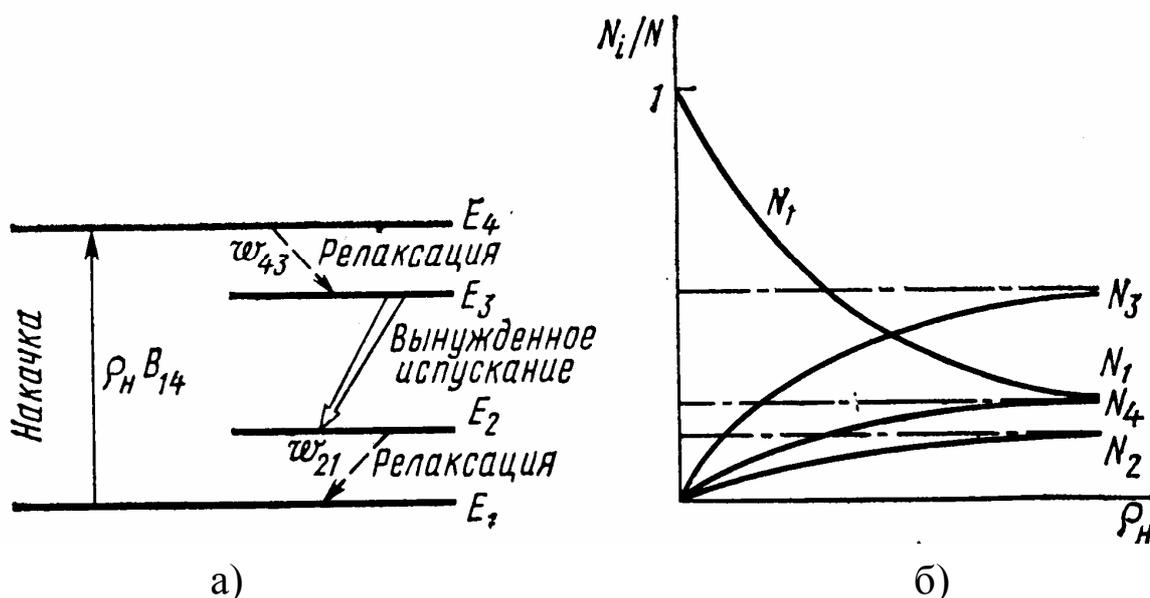


Рис. 1.6. Схема четырехуровневой системы (а) и зависимость относительной населенности уровней от плотности накачки (б)

Из рис. 1.6,б следует, что пороговая плотность накачки по инверсии в четырехуровневой системе мала даже при учете потерь в активном веществе. В режиме генерации за счет интенсивных вынужденных переходов происходит насыщение уровня инверсии и коэффициента усиления.

В заключение отметим ряд моментов, относящихся и к трех-, и к четырехуровневым системам.

1. Для исключения термического заселения необходимо, чтобы разности энергий между уровнями  $E_4 - E_3$  и  $E_2 - E_1$  были больше  $kT$ . Но следует иметь в виду, что при увеличении указанных разностей энергий уменьшается коэффициент полезного действия системы.
2. Для исключения самопоглощения, приводящего к переходам  $E_1 - E_2$  и  $E_3 - E_4$ , желательно расселение уровней  $E_2$  и  $E_4$  путем безизлучательных переходов.
3. Вероятность безизлучательных переходов с верхнего лазерного уровня должна быть минимальной.

### 1.3.7. Оптические резонаторы

В реальных лазерных системах при однократном прохождении луча через инверсную систему достигается весьма небольшое усиление. Поэтому принимаются меры для обеспечения многократного прохождения пучка через активную среду. Это достигается использованием в ОКГ оптического резонатора, при наличии которого за счет многократного прохождения излучения достигается наиболее полное взаимодействие последнего с активной средой. Обеспечивая положительную обратную связь, резонатор влияет на диаграмму направленности и спектральный состав излучения. Важной характеристикой любого резонатора является *добротность*, представляющая собой отношение энергии, запасенной в резонаторе, к средней энергии, теряемой за период колебаний или в единицу времени. Оптический резонатор является открытым, то есть отражающие стенки его не замкнуты.

В объемном резонаторе могут возбуждаться колебания только с определенными длинами волн, образующие стоячую волну. Частоты этих колебаний называются резонансными, а колебания – собственными. Собственный тип колебаний резонатора называется модой. Если длина волны излучения составляет 1 мкм, а длина резонатора 1 м, то на его длине будут укладываться  $2 \cdot 10^6$  полувольт. При этом расстояние между двумя ближайшими типами колебаний будет много меньше ширины спектральной линии, то есть в пределах одной спектральной линии укладывается много собственных типов колебаний или мод. Такой резонатор называется многомодовым.

Моды резонатора обозначаются  $TEM_{mnp}$ . Индексы указывают число полувольт, укладываемых в каждом из ребер прямоугольного параллелепипеда. В оптическом резонаторе число полувольт на его длине очень велико и обычно не указывается, а моды резонатора обозначаются  $TEM_{mn}$ . Для аксиальных колебаний  $m = n = 0$ . Неаксиальные моды также могут иметь место, но их добротность уменьшается с увеличением угла отклонения от оси. Добротность оптических резонаторов велика и достигает  $10^8$ . От добротности зависит и полуширина линии:

$$\Delta\nu = \frac{\nu}{Q}. \quad (1.33)$$

При этом ширина линии лазерного излучения может быть меньше естественной ширины линии.

Простейший оптический резонатор образуют два плоских зеркала, расположенные строго параллельно друг другу (рис. 1.7). Электромагнитные волны, распространяющиеся вдоль оптической оси резонатора, будут отражаться от зеркал и интерферировать между собой. Те из них, для которых выполняется условие резонанса, интерферируют на максимум, образуя в резонаторе стоячую волну, как показано на рис. 1.7. За счет многократного прохождения таких волн резко увеличивается эффективность их взаимодействия с активным веществом. Волны, распространяющиеся под не слишком малым углом к оптической оси, после нескольких отражений выходят из резонатора.

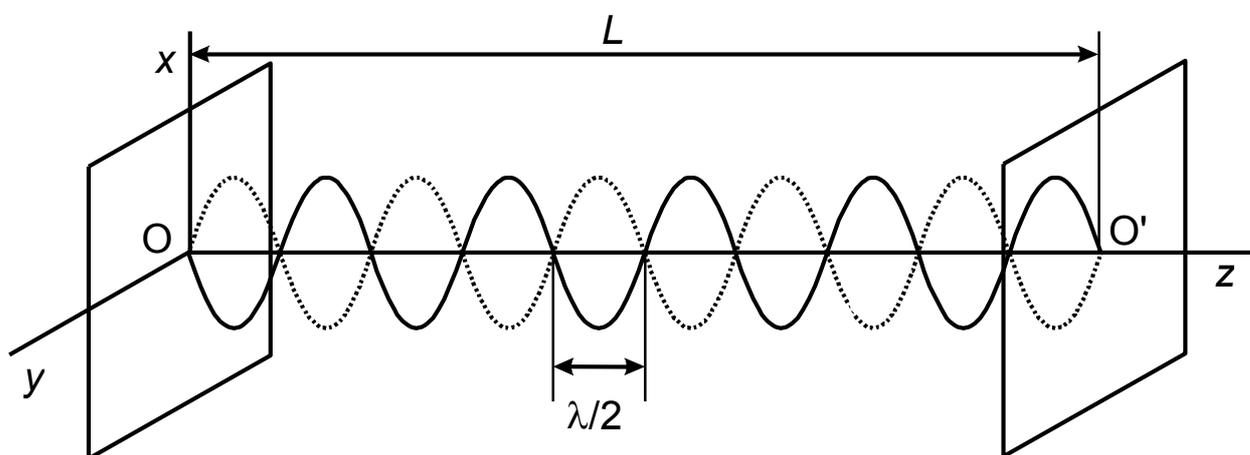


Рис. 1.7. Схема плоского оптического резонатора.

Для вывода излучения наружу одно из зеркал резонатора делается полупрозрачным. Это определяет необходимые полезные потери резонатора (потери на излучение). Добротность резонатора, определяемая потерями на излучение, может быть найдена из уравнения:

$$Q = \frac{2\pi L}{\lambda(1-R)}, \quad (1.34)$$

где  $R$  – коэффициент отражения зеркала;  $L$  – длина резонатора.

Из других видов потерь отметим следующие:

1. Дифракционные потери, связанные с дифракцией электромагнитной волны на зеркалах, имеющих конечные размеры. Чем меньше поперечные размеры зеркала, тем

больше потери. Дифракционные потери минимальны для аксиальных мод и велики для неаксиальных.

2. Потери на несовершенства зеркал обусловлены возможным поглощением в зеркалах, рассеянием на шероховатостях, отклонением геометрии зеркала от заданной и т. д. Для их исключения к зеркалам предъявляются очень высокие требования. Так, погрешность в обработке не должна превышать 0,1 от длины волны.
3. Потери на разъюстировку резонатора. Угол между плоскостями зеркал не должен превышать несколько угловых секунд.
4. Потери в активном веществе связаны с поглощением и рассеянием энергии на различных дефектах в активной среде.

В плоском резонаторе фронт волны на его зеркале практически плоский, что позволяет получить малую расходимость луча.

На рис. 1.8 показаны различные типы резонаторов оптического диапазона со сферическими зеркалами.

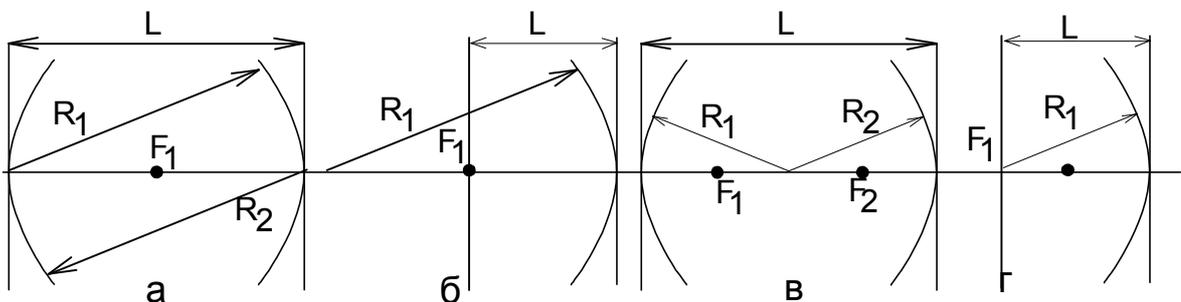


Рис. 1.8. Схемы различных типов резонаторов со сферическими зеркалами:

*а* – конфокальный ( $R_1 = R_2 = L$ ),

*б* – полуконфокальный ( $R_1 = 2L, R_2 = \infty$ ),

*в* – концентрический ( $R_1 = R_2 = L/2$ ),

*г* – полуконцентрический ( $R_1 = L, R_2 = \infty$ )

Преимущество сферических зеркал перед плоскими заключается в том, что требуется значительно меньшая точность их установки.

Конфокальный резонатор образован двумя одинаковыми сферическими зеркалами, оси и фокусные расстояния которых совпадают. Поле в таком резонаторе более плотно сконцентрировано около его оси, поэтому дифракционные потери в

нем значительно меньше. Резонатор менее чувствителен к разъюстировке зеркал, но в нем хуже используется объем активного вещества.

Полуконфокальный резонатор образован одним плоским и одним сферическим зеркалом, радиус кривизны которого равен удвоенной длине резонатора. Его свойства аналогичны свойствам конфокального резонатора с удвоенной длиной.

Концентрический резонатор образован двумя одинаковыми сферическими зеркалами, оси и центры кривизны которых совпадают. Дифракционные потери в нем быстро возрастают для неаксиальных мод, что используется для селекции неаксиальных колебаний. Полуконцентрический резонатор имеет свойства, аналогичные концентрическому.

Кроме рассмотренных выше, можно назвать еще ряд специальных резонаторов. К ним относятся:

**Кольцевой резонатор.** Кольцевым называют открытый резонатор, зеркала которого обеспечивают движение луча по замкнутому контуру (рис. 1.9). Замкнутый контур образует система из четырех или трех зеркал. Если одно из зеркал сделать полупрозрачным и поставить дополнительное зеркало, то можно перейти от режима стоячей волны к режиму бегущей волны, при котором поле в среднем более однородно, что позволяет полнее использовать активное вещество.

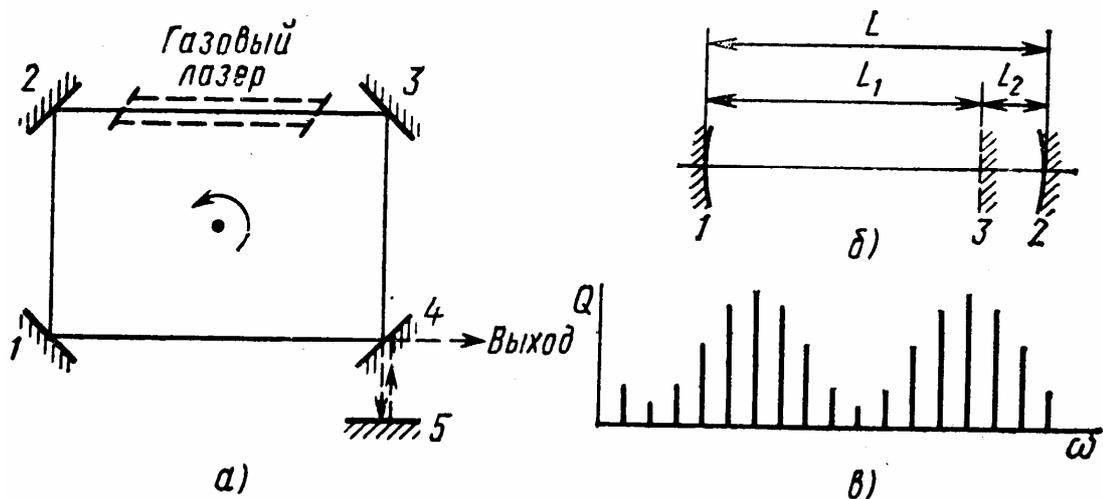


Рис. 1.9. Схемы кольцевого (а) и составного (б) резонаторов

**Составной резонатор** представляет собой два или более связанных между собой резонатора (рис. 1.9, б), в котором зеркало 3 является полупрозрачным. Такой резонатор можно использовать

для селекции аксиальных колебаний, так как наибольшей добротностью будут обладать те типы колебаний, для которых условие резонанса наилучшим образом выполняется в каждой из его составных частей.

**Резонатор с брэгговским зеркалом.** В таком резонаторе вместо одного из зеркал устанавливается дифракционная решетка под некоторым углом к оптической оси резонатора. Падающая на решетку аксиальная электромагнитная волна будет отражаться в противоположном направлении при выполнении условия Вульфа-Брэгга:

$$b \sin \theta = m \frac{\lambda}{2}, \quad (1.35)$$

где  $b$  – период дифракционной решетки;  $\theta$  – угол между нормалью к плоскости решетки и оптической осью резонатора;  $m = 1, 2, 3, \dots$  – порядок дифракции.

Изменяя угол  $\theta$ , можно изменять длину волны, соответствующую максимуму отражения в направлении оптической оси. Такие резонаторы применяются в жидкостных лазерах с перестройкой частоты.

### **1.3.8. Условия самовозбуждения и насыщения усиления**

Как было показано выше, условием усиления электромагнитных колебаний является наличие инверсной населенности. Для генерации необходимо, чтобы усиление за один проход в активном веществе превысило все потери, в том числе связанные с выводом излучения наружу, дифракционными и неактивными потерями в рабочем веществе и др. Это может быть обеспечено уровнем инверсии, при котором показатель усиления на данной частоте превысит суммарный показатель потерь.

Показатель усиления связан с населенностью уровней соотношением:

$$\alpha = \frac{h\nu n B_{nm}}{2\pi c} g_v \left( \frac{g_n}{g_m} N_n - N_m \right). \quad (1.36)$$

Потери в оптическом резонаторе определяются его добротностью:

$$-\frac{\delta I}{I} = \frac{vndz}{Qc}. \quad (1.37)$$

При этом условие превышения усиления над потерями запишется в виде:

$$\alpha > \frac{v\eta}{Qc} \quad (1.38)$$

или, с учетом уравнения (1.31), условие самовозбуждения можно переписать следующим образом:

$$\frac{\pi^2 c^3 A_{nm}}{v^2} \left( N_n - \frac{g_n}{g_m} N_m \right) g_v \geq \frac{v}{Q}. \quad (1.39)$$

В этих уравнениях  $N_n$  и  $N_m$  – число частиц на верхнем и нижнем лазерных уровнях, а функция  $g_v$  есть нормированный контур спектральной линии, который является лоренцевым при однородном уширении и гауссовым при неоднородном. Энергия или мощность накачки, при которой достигается пороговая инверсия для генерации, называется пороговой энергией или мощностью для генерации.

Условие самовозбуждения будет выполняться в первую очередь для колебаний, обладающих наивысшей добротностью, при этом система, состоящая из активного вещества в оптическом резонаторе, будет перекачивать энергию в моды резонатора с малыми потерями.

При увеличении интенсивности накачки выше порога генерации происходит насыщение инверсии населенностей и усиления. Характер насыщения усиления в лазере зависит от типа уширения спектральной линии. При однородном уширении контур спектральной линии в режиме насыщения не изменяется. При неоднородном уширении увеличение показателя усиления будет происходить не равномерно по всему контуру, а преимущественно вблизи частоты  $\nu$ , то есть в общем спектре образуется характерный пик. Количественно эффект насыщения описывается формулами

$$\alpha_{одн} = \frac{\alpha_{одн}^{\circ}}{1 + I / I_s} \quad (1.40)$$

для однородно уширенной линии и

$$\alpha_{неодн} = \frac{\alpha_{неодн}^{\circ}}{(1 + I / I_s)^{1/2}} \quad (1.41)$$

для неоднородно уширенной линии. Здесь  $\alpha^{\circ}$  – ненасыщенный показатель усиления или показатель усиления слабого сигнала,

когда интенсивность излучения лазера  $I$  мала. Величина  $I_s$  называется параметром насыщения и зависит от вероятности всех переходов, участвующих в создании инверсии.

При достижении порога генерация начинается на одной моде, обладающей наивысшей добротностью и расположенной ближе всех к максимуму спектральной линии. Это режим одномодовой генерации. При увеличении интенсивности накачки появляется генерация и на модах с меньшей добротностью, при этом лазер работает в режиме многомодовой генерации. Для получения одномодовой генерации при высоких мощностях накачки принимают специальные меры для селекции мод.

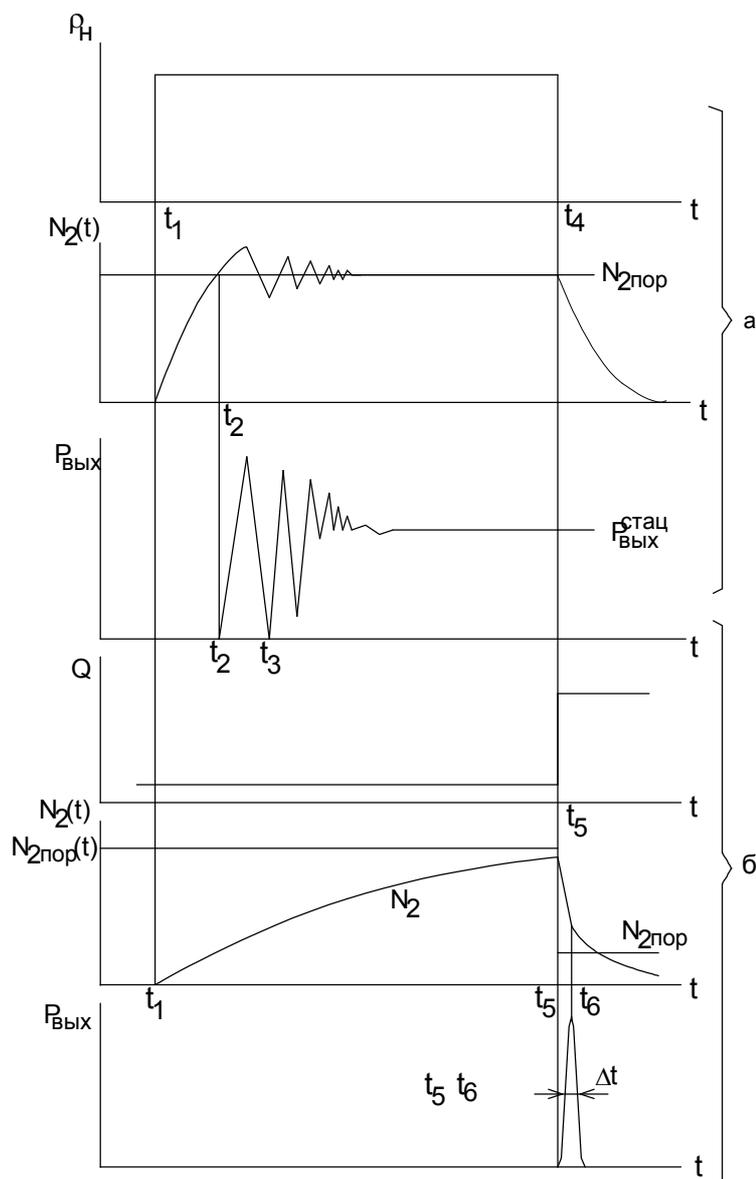
### ***1.3.9. Импульсная генерация, модуляция добротности и синхронизация мод***

В нестационарном режиме работы лазеров уровень инверсии и выходная мощность представляют собой определенную последовательность импульсов. На рис. 1.10 представлена картина развития импульсов излучения при прямоугольном импульсе накачки.

За время  $t_2$  после включения накачки достигается пороговая населенность, необходимая для генерации. При наличии генерации происходит снижение уровня инверсии и появляется первый всплеск мощности излучения. При генерации на одной моде создается последовательность лазерных импульсов, амплитуда которых затухает по экспоненте. Такую генерацию называют режимом затухающих пичков. На больших временах и при отсутствии дополнительных источников флуктуаций режим регулярных пичков переходит в стационарный. Основной причиной возникновения релаксационных колебаний является взаимодействие поля в резонаторе с активной средой. Отметим, что такие колебания могут развиваться не только в начале импульса накачки, но и в стационарном режиме при появлении внезапного возмущения. Характерный период таких колебаний составляет 0,1 – 10 мкс.

Режим регулярных затухающих колебаний возникает лишь при одномодовой генерации и неизменности параметров лазера во времени. В реальных условиях, особенно в твердотельных и полупроводниковых лазерах, наблюдается режим нерегулярных

пиков, интенсивность которых во времени не затухает и меняется хаотично (рис. 1.10).



*Рис. 1.10. Развитие импульсов излучения при прямоугольном импульсе накачки*

Причиной таких колебаний могут быть нестабильность параметров лазера и взаимодействие различных мод при многомодовой генерации. Рассмотренные выше эффекты соответствуют режиму свободной генерации, когда добротность резонатора и пороговая заселенность постоянны во времени. Очень интересные результаты можно получить при работе лазера в режиме модуляции добротности. Режим модуляции добротности позволяет получать лазерную генерацию в виде импульсов с малой

длительностью и высокой пиковой мощностью (гигантские импульсы).

Принцип работы лазера в режиме модуляции добротности состоит в следующем. Предположим, что внутри лазерного резонатора помещен затвор. Если затвор закрыт, то генерация не возникает и, следовательно, инверсия населенности может достигнуть очень высокого значения. Если теперь очень быстро открыть затвор, то усиление в лазере будет существенно превышать потери и накопленная энергия выделится в виде короткого (порядка нескольких наносекунд) и интенсивного импульса света. Поскольку в данном случае происходит изменение добротности резонатора от низких до высоких значений, то такой режим называется режимом модуляции добротности.

Режим модуляции добротности лазера характеризуется следующими основными параметрами: временем задержки генерации  $t_{зад}$ , длительностью гигантского импульса  $t_{имп}$ , пиковой мощностью  $P_{max}$  и энергией излучения импульса  $W$  (рис. 1.10).

Существует ряд методов модуляции добротности.

1. Одно из двух зеркал резонатора вращается. Потери резонатора будут очень высокими в течение всего периода вращения за исключением момента времени, соответствующего параллельности зеркал.
2. Внутри резонатора имеется оптический модулятор, свойства которого можно менять с помощью внешних воздействий. Чаще всего используют электрооптические эффекты в кристаллах.
3. Внутри резонатора имеется насыщающийся поглотитель, показатель поглощения которого уменьшается при увеличении мощности излучения, например, просветляющийся краситель.

Для получения еще более коротких импульсов с более высокой пиковой мощностью применяют режим синхронизации мод. При многомодовой генерации зависимость интенсивности выходного излучения лазера от времени часто имеет вид нерегулярных пиков (рис. 1.10), так как моды обычно не генерируют одновременно, а их фазы более или менее случайны. Однако если моды вынуждены генерировать одновременно с примерно одинаковыми амплитудами и их фазы синхронизованы, то происходит очень интересное

явление. Моды интерферируют, в результате чего генерация имеет вид коротких световых импульсов.

Чтобы получить очень короткие импульсы, требуется большая ширина генерируемого спектра. Это реализуется в ряде твердотельных лазеров, однако невозможно для типичных газовых лазеров. Так в газоразрядных лазерах можно получить импульсы длительностью порядка 1 нс, а в твердотельных порядка 1 пс и менее. Кроме этого, синхронизацией мод можно получать большие пиковые мощности. Пиковая мощность увеличивается пропорционально числу синхронизованных мод, которое в твердотельных лазерах может составлять порядка 1000-10000.

Синхронизация мод достигается как с помощью активного модулятора, управляемого внешним воздействием, так и нелинейной среды. В то же время средняя мощность по существу не зависит от синхронизации мод. Синхронизация мод позволяет получать импульсы с пиковой мощностью порядка  $1 \cdot 10^{13}$  Вт и длительностью менее 1 пс. Каждый из режимов имеет свои особенности. В режиме свободной генерации обеспечиваются наиболее высокие уровни энергии излучения, при наибольших значениях КПД, в режиме модулированной добротности – наиболее высокие уровни импульсной мощности, при более низких значениях КПД и т. д.

## **1.4. Свойства лазерного излучения**

### **1.4.1. Монохроматичность**

Ширина спектра излучения является одной из основных его характеристик. Для оценки ширины спектра пользуются понятием ширины спектральной линии на уровне 0,5 от ее максимума и степени монохроматичности (спектральной чистотой излучения).

В случае спектральной линии степень монохроматичности  $m$  равна:

$$\mu = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}. \quad (1.42)$$

Идеально монохроматического излучения с шириной спектра  $\Delta\lambda$  равной нулю не может быть по самой природе излучения, поэтому обычно монохроматическим считается излучение, имеющее достаточно узкий спектральный интервал, который

можно охарактеризовать одной длиной волны или частотой. Можно выделить монохроматическую составляющую и из обычного излучения с помощью спектральных приборов. Однако в этом случае степень монохроматичности получается не менее  $10^{-6}$ , в то время как степень монохроматичности лазерного излучения достигает  $10^{-10}$ . Весьма важно отметить, что с помощью спектральных приборов нельзя получить мощное монохроматическое излучение (чем больше монохроматичность излучения, тем меньше мощность). Это связано с тем, что в обычных источниках излучения мощность распределена в широком спектральном диапазоне, а в ОКГ вся излучаемая мощность сосредоточена в одной или нескольких чрезвычайно узких линиях. Очень высокая степень монохроматичности может быть получена в газовых лазерах, работающих в одномодовом режиме.

Теоретический предел ширины спектральной линии определяется тепловыми шумами и шумами спонтанного излучения, причем в оптическом диапазоне последние преобладают. Ширина спектральной моды, выделяемая резонатором, определяется его добротностью:

$$\Delta\nu_c = \frac{\nu_o}{Q}. \quad (1.43)$$

При этом спектральная ширина линии лазерного излучения, имеющей лоренцеву форму, может быть найдена из выражения:

$$\Delta\nu = \frac{2h\nu_o(\Delta\nu_c)^2}{\pi P}, \quad (1.44)$$

где  $P$  – выходная мощность лазерного излучения.

Расчеты показывают, что для гелий-неонового лазера с мощностью 1 мВт и добротностью резонатора порядка  $10^8$ , ширина спектральной линии составляет 0,2 Гц, что соответствует спектральной чистоте  $5 \cdot 10^{16}$ . Для того чтобы получить такую величину реально, необходимо очень жестко стабилизировать длину резонатора. Так при длине резонатора 1 м допустимое отклонение составляет  $5 \cdot 10^{-7}$  нм. Поэтому только в лучших лабораторных образцах достигнут разброс частоты в несколько десятков герц.

Отметим, что ширина спектра лазерного излучения может быть существенно меньше естественной ширины спектральной линии, которая для рассмотренного выше случая составляет 20 МГц.

На первый взгляд это может показаться парадоксальным, ибо естественная ширина линии определяется соотношением неопределенностей:

$$h\Delta\nu_{\text{ест}}\tau_{\text{cn}} \sim h, \quad (1.45)$$

где  $\tau_{\text{cn}}$  – время жизни атома в возбужденном состоянии, определяемое спонтанными переходами.

Но в режиме генерации все активные атомы и резонатор выступают как единое целое и при непрерывном поступлении энергии извне время жизни такой системы в возбужденном состоянии может быть сколь угодно большим.

Все предыдущие рассуждения относились к одномодовой генерации в стационарном режиме. При анализе ширины лазерной линии необходимо учитывать, что ширина одной моды существенно отличается от ширины участка спектра, перекрываемого лазером. Многие лазеры работают сразу на нескольких продольных модах, и общая ширина линии излучения будет приближаться к естественной ширине линии данного вещества. При этом в лазерном излучении присутствуют все моды, для которых излучение больше потерь, поэтому ширина линии излучения лазера все-таки меньше ширины линии флюоресценции. Так, в гелий-неоновом лазере по расчету укладывается 10 мод, а реально наблюдаются 3 – 4 моды. На рис. 1.11 показаны равномерно разнесенные моды резонатора. Частотный интервал между ними равен  $\frac{c}{2d}$ , где  $d$  – расстояние между зеркалами. Это соответствует разнесению длин волн на интервал  $\frac{\lambda^2}{2d}$ .

При генерации в импульсном режиме спектр излучения будет уширен до величины, обратной длительности импульса. Спектр лазерного излучения может быть уширен и из-за неоднородности активного материала, что особенно характерно для твердотельных лазеров.



Рис. 1.11. Естественная ширина линии и моды резонатора

### 1.4.2. Когерентность

Понятие когерентности в применении к колебаниям относится к связи или согласованности между фазами колебаний в различных точках пространства в один и тот же момент времени или между фазами колебаний в одной и той же точке пространства, но в различные моменты времени. Тепловые источники света не являются когерентными и не могут давать явления интерференции. Однако и от некогерентного источника можно получить почти когерентный пучок конечного сечения, но при этом будет использована только очень малая часть энергии источника (приблизительно в  $10^{13}$  раз меньше плотности излучения источника). В отличие от обычных источников излучение лазеров обладает высокой степенью пространственной и временной когерентностью.

Когерентность характеризуется степенью или функцией когерентности, которая изменяется от 1 (полная когерентность) до 0 (полная некогерентность). Степень когерентности можно определить экспериментально путем наблюдения интерференционной картины, образуемой при расщеплении светового пучка на два и последующего их сложения после прохождения оптических путей разной длины. Контрастность полос интерференционной картины и, следовательно, степень когерентности определяются из выражения:

$$V = \frac{(I_{max} - I_{min})}{(I_{max} + I_{min})}. \quad (1.46)$$

Когерентность излучения имеет значение в тех применениях лазера, где происходит расщепление и последующее сложение составляющих лазерного пучка. К этим применениям относятся интерферометрическая лазерная дальнометрия, голография. С когерентностью излучения связана "пятнистая" или "зернистая" картина лазерного излучения при наблюдении его рассеяния от экрана. Это явление обусловлено интерференцией волн, рассеиваемых экраном.

В пространственной когерентности можно убедиться, исследуя соотношения фаз в двух точках пространства в одинаковые моменты времени. Если в этих двух точках разность фаз электромагнитных волн в момент времени  $t = 0$  равна нулю и эта разность сохраняется через некоторый промежуток времени  $t$ , то существует идеальная пространственная когерентность волнового фронта в этих двух точках.

Если электромагнитное поле в некоторой точке пространства имеет одинаковые фазы во времени  $t$  и  $t + n$ , то в этой точке существует идеальная временная когерентность. Если соотношение фаз сохраняется в течение некоторого конечного времени, то последнее называется временем когерентности. Время когерентности равно  $\frac{1}{\Delta\nu}$ , где  $\Delta\nu$  – ширина линии в герцах. Время когерентности, умноженное на скорость света, представляет собой длину когерентности. Последняя характеризует глубину резкости в голографии и предельные дистанции, на которых возможны интерферометрические измерения.

Временная и пространственная когерентность – независимые параметры: один вид когерентности может существовать в отсутствие другого. Пространственная когерентность зависит от поперечной выходной моды лазера. Лазер непрерывного действия, работающий на одной поперечной моде, обладает почти идеальной пространственной когерентностью. Импульсный лазер в многомодовом режиме имеет ограниченную пространственную когерентность. Временная когерентность непосредственно связана с монохроматичностью, как уже было показано. Одночастотные (одномодовые) лазеры непрерывного действия имеют высокую степень временной когерентности. Так, например,

стабилизированный по частоте He-Ne-лазер с  $\Delta\nu = 1$  МГц имеет  $n = 10^{-6}$ с, многомодовый He-Ne-лазер  $\Delta\nu = 1.5$  ГГц,  $n = 6.6 \cdot 10^{-10}$ с.

### 1.4.3. Поляризация излучения

Векторы напряженности электромагнитной световой волны расположены в плоскости, перпендикулярной направлению ее распространения и периодически изменяются по величине и направлению. Поляризация света это характеристика неравномерности распределения по направлению амплитуд колебаний этих векторов. Если излучение монохроматическое, векторы колеблются с некоторой постоянной частотой и их можно представить как сумму двух взаимно перпендикулярных составляющих  $X$  и  $Y$ . Если разность фаз колебаний по этим направлениям равна нулю, то суммарный вектор колеблется в одной плоскости. Ситуация, соответствующая разности фаз  $n\pi$ , где  $n$  – целое число, называется линейной поляризацией, а плоскость, перпендикулярная направлению колебаний – плоскостью поляризации.

Если разность фаз по направлениям  $X$  и  $Y$  не равна  $n\pi$ , то конец вектора напряженности электрического поля описывает поверхность эллиптического цилиндра. Этот случай называется эллиптической поляризацией. Частным случаем ее является круговая поляризация, разность фаз при которой составляет  $\frac{(2n-1)\pi}{2}$ .

В естественном свете направление электрического вектора изменяется случайным образом и поляризация отсутствует. Лазерное излучение поляризовано. Если угол между преломленным и отраженным лучами прямой, то отраженный свет поляризован полностью. Угол падения света в этом случае называется углом Брюстера, а само явление используется для линейной поляризации света в резонаторе лазера.

Для поляризации света используются поляроиды, поляризационные призмы. Поляроид представляет собой пластину из одинаково ориентированных анизотропных кристаллов. Поляризация света в них происходит за счет поглощения колебаний с определенным направлением электрического вектора. Если входящий свет поляризован в направлении, составляющем угол  $45^\circ$

с оптической осью, то из-за разницы коэффициентов преломления  $X$  и  $Y$  составляющих, при выходе из вещества становятся разными фазы их колебаний, а это приводит к изменению поляризации света. Если на выходе разность фаз составит  $90^\circ$ , то линейно поляризованный свет меняет поляризацию на круговую. Плоскопараллельную пластинку анизотропного кристалла, дающую такую разность фаз, называют четвертьволновой.

#### ***1.4.4. Направленность и возможность фокусирования излучения***

Направленным называют излучение, распространяющееся в пределах очень небольшого телесного угла. Иными словами, направленность характеризуется телесным углом, в котором распространяется большая часть излучения. Обычные источники обладают очень низкой направленностью излучения (в пределах телесного угла от  $2\pi$  до  $4\pi$ ).

От обычных источников можно получить почти параллельные лучи, если на большом расстоянии установить диафрагму или поместить источник в фокальной плоскости коллиматора. Однако энергия такого пучка будет весьма мала. ОКГ излучают в очень небольшом телесном угле. Излучение лазеров является когерентным и поэтому фронт волны представляет собой, как правило, почти плоскость или сферу очень большого радиуса, т.е. лазер можно рассматривать как источник почти параллельных лучей с очень небольшой расходимостью. В принципе эта расходимость определяется дифракцией на выходном отверстии. Причем направленность излучения лазеров достигается не в результате каких-то специальных приемов, а благодаря когерентности излучения. Необходимо отметить, что создание идеально параллельного пучка света невозможно и при помощи лазеров, можно лишь добиться очень малого угла расхождения. Нижний предел для расходимости пучка, определяемый дифракцией, может быть оценен из выражения:

$$\theta = \frac{K\lambda}{d}, \quad (1.47)$$

где  $d$  – диаметр отверстия или диаметр пучка в наиболее узкой его части,  $K$  – коэффициент, зависящий от формы пучка. Для плоского пучка  $K = 2,44$ , для гауссова  $K = 1,27$ .

Используя любую оптическую систему, увеличивающую телесный угол пучка, можно получить значительное увеличение плотности излучения. Когерентное излучение ОКГ можно сфокусировать в пятно чрезвычайно малых размеров, где плотность энергии будет очень большой. Теоретическим пределом минимального диаметра лазерного пучка является длина волны. В реальной ситуации этот предел трудно достижим из-за неидеальности пространственных характеристик лазерного пучка и искажений в линзах. Для промышленных лазеров размеры сфокусированного светового пятна составляют 0,001 – 0,01 см. В настоящее время с помощью лазеров достигнуты плотности мощности излучения  $10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> (плотность излучения Солнца составляет только  $7 \cdot 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>).

#### ***1.4.5. Яркость и мощность излучения***

Яркость  $B$  определяется, как мощность на единицу площади и на единицу телесного угла. Для луча круглого сечения радиусом  $R$ , расходимостью  $Q$  и полной мощностью  $P$  имеем:

$$B = \frac{P}{\pi R^2 \theta^2}. \quad (1.48)$$

Спектральная яркость  $B_\nu = \frac{B}{\Delta\nu}$ , где  $\Delta\nu$  – ширина лазерной линии в герцах. Лазер даже небольшой мощности имеет яркость, которая на несколько порядков превосходит яркость обычных источников. Это свойство является следствием высокой направленности лазерного пучка. Согласно одной из теорем оптики, яркость источника нельзя повысить с помощью оптической системы. Поэтому для повышения яркости необходимо улучшать модовый состав излучения и снижать угловую расходимость пучка.

Мощность излучения или лучистый поток представляет собой энергию, переносимую излучением за единицу времени. Если энергия излучается в виде импульсов, то пользуются понятием импульсной и средней мощности.

Средняя мощность излучения ОКГ обычно невелика, хотя существуют генераторы, развивающие в непрерывном режиме мощность до десятков киловатт. По своей импульсной мощности и спектральной плотности мощности лазеры значительно

превосходят все существующие источники в оптическом диапазоне спектра.

Из лазеров, работающих в непрерывном режиме, наибольшую мощность имеют CO<sub>2</sub>-лазеры (десятки киловатт для промышленных образцов). Очень высокие уровни мощности имеют импульсные твердотельные лазеры на неодимовом стекле (до 10<sup>11</sup> – 10<sup>13</sup> Вт при наносекундной длительности импульса).

## **1.5. Типы лазеров**

Существует большое количество типов лазеров, классифицируемых по самым различным признакам – агрегатному состоянию рабочего вещества, рабочей длине волны, способу накачки, мощности излучения, режиму генерации и т.д. Рассмотрим основные типы лазеров, основываясь на классификации по агрегатному состоянию активной среды. С этих позиций можно выделить лазеры: твердотельные, газовые, включая газодинамические, химические и эксимерные, полупроводниковые, лазеры на красителях. Хотя полупроводниковые лазеры по агрегатному состоянию твердотельные, их целесообразно рассмотреть отдельно из-за специфики в механизмах генерации.

### **1.5.1. Твердотельные лазеры**

Активными центрами в лазерах этого типа являются ионы, введенные в кристаллическую или аморфную матрицу. Среди лазерных материалов наиболее представительной является группа ионных кристаллов с примесями. Кристаллы неорганических соединений фторидов (CaF<sub>2</sub>, LaF<sub>3</sub>, LiYF<sub>4</sub>), оксидов (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и сложных соединений (CaWO<sub>4</sub>, Y<sub>3</sub>Al<sub>15</sub>O<sub>12</sub>, Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>F) содержат в кристаллической решетке ионы активных примесей, редкоземельных (самария Sm<sup>2+</sup>, диспрозия Dy<sup>2+</sup>, тулия Tm<sup>2+</sup>, Tm<sup>3+</sup>, празеодима Pr<sup>3+</sup>, неодима Nd<sup>3+</sup>, эрбия Er<sup>3+</sup>, гольмия Ho<sup>3+</sup>), переходных (хрома Cr<sup>3+</sup>, никеля Ni<sup>2+</sup>, кобальта Co<sup>2+</sup>, ванадия V<sup>2+</sup>) элементов или ионов урана U<sup>3+</sup>. Концентрация активных примесей в кристаллах составляет от 0,05 до нескольких процентов (по массе). Активные элементы (кристаллическая основа + активные ионы) изготавливаются в виде стержней с отполированными торцевыми поверхностями, с нанесенными зеркальными

покрытиями и также с обработанной поверхностью для эффективного введения излучения накачки (табл. 1.1).

Таблица 1.1

### Размеры коммерческих лазерных стержней

Материал	Длина, мм		Диаметр, мм	
	максимальная	типичная	максимальный	типичный
Рубин	300	100	25	10
Nd – стекло	1000	300	75	14
Nd – ИАГ	150	75	10	5

Излучение накачки создается в импульсном или непрерывном режиме с помощью ламп различной формы и газового наполнения, а также с помощью лазера. Накачка с помощью лазера особенно эффективна. В качестве источников накачки применяются лампы: ксеноновые, криптоновые, ртутные высокого давления, галогенные. Используемые для накачки импульсные лампы имеют стержневую ( $l = 10 - 50$  мм,  $d = 5 - 20$  мм) или спиральную форму. В лазерах с полупроводниковой (диодной) накачкой вместо ламп используются мощные лазерные диоды, излучающие свет именно той длины волны (808 нм), которая необходима для генерации лазерного излучения кристаллом Nd:YAG лазера. Главное отличие этих лазеров от лазеров с ламповой накачкой заключается в значительно более высокой (на порядок) эффективности преобразования излучения мощных лазерных диодов, что позволяет избежать высокого электропотребления и обойтись без интенсивного внешнего водяного охлаждения (внутренний контур водяного охлаждения активного тела лазера все же необходим). Все это делает системы записи изображения с такими лазерами более удобными в эксплуатации.

Различные твердотельные лазеры генерируют излучение в широкой спектральной области: 0.3 – 3 мкм в импульсном режиме; 0.69 – 2.6 мкм в непрерывном режиме. Излучение происходит в виде одиночных, спектрально относительно узких линий, которые не являются перестраиваемыми. Само излучение характеризуется малой длиной когерентности  $L$  (менее одного метра); большими колебаниями интенсивности излучения; слаборегулярным

распределением интенсивности по поперечному сечению пучка. Более высокое качество пучка возможно в непрерывном режиме при возбуждении моды  $TEM_{00}$ .

Для излучения импульсного лазера характерны пиковые режимы. При работе в импульсном режиме длительность импульса накачки равна примерно 5 мс. Генерация лазерного излучения начинается после примерно 0.5 мс. Длительность пиков примерно 1 мс. Многие из твердотельных лазеров работают по четырехуровневой схеме. Поскольку нижний уровень почти не заселен, этот тип лазеров обладает низкой пороговой мощностью (т.е. минимально возможная выходная мощность). Из указанных лазеров особо следует выделить рубиновый, Nd-ИАГ и лазеры на неодимовом стекле.

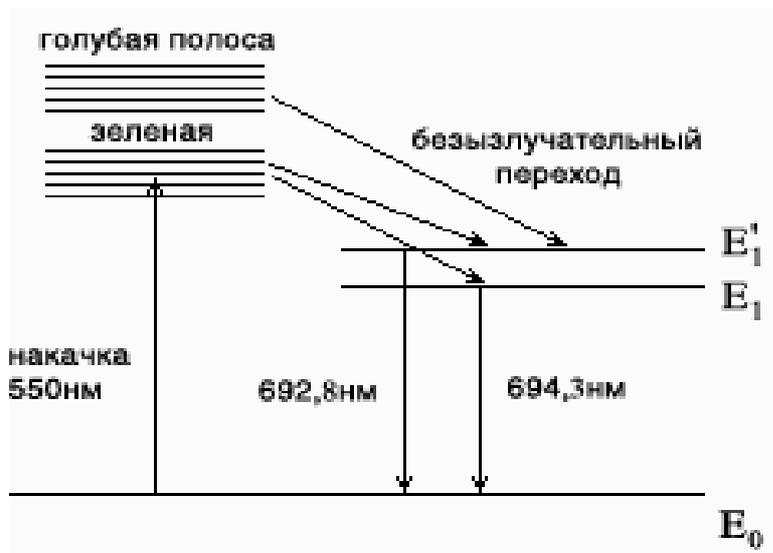
### 1.5.2. Рубиновый лазер

Рубиновый лазер был создан Т. Мейманом в 1960 году. Рабочим веществом является рубин - кристалл оксида алюминия  $Al_2O_3$  (корунд), в который при выращивании введена примесь - оксид хрома  $Cr_2O_3$ . Красный цвет кристалла рубина обусловлен излучением иона хрома  $Cr^{3+}$ , который в кристаллической решетке замещает ион  $Al^{3+}$ . Густота красного цвета рубина зависит от концентрации ионов  $Cr^{3+}$ , в темно-красном рубине концентрация  $Cr^{3+}$  достигает 1%.

Характерные концентрации ионов  $Cr^{3+}$  в рубине – 0.01 – 0.5%. Так как система  $Cr^{3+}: Al_2O_3$  работает по трехуровневой схеме, инверсия населенности достигается только при возбуждении 50% ионов  $Cr^{3+}$ . Это приводит к высокому порогу генерации. В кристалле рубина имеются два узких энергетических уровня  $E_1$  и  $E_1'$  (рис.1.12), при переходе с которых на основной уровень атом излучает свет с длинами волн 694,3 нм и 692,8 нм. Ширина этих линий около 0,4 нм, вероятность вынужденных переходов для линии 694,3 нм больше, чем для 692,8 нм.

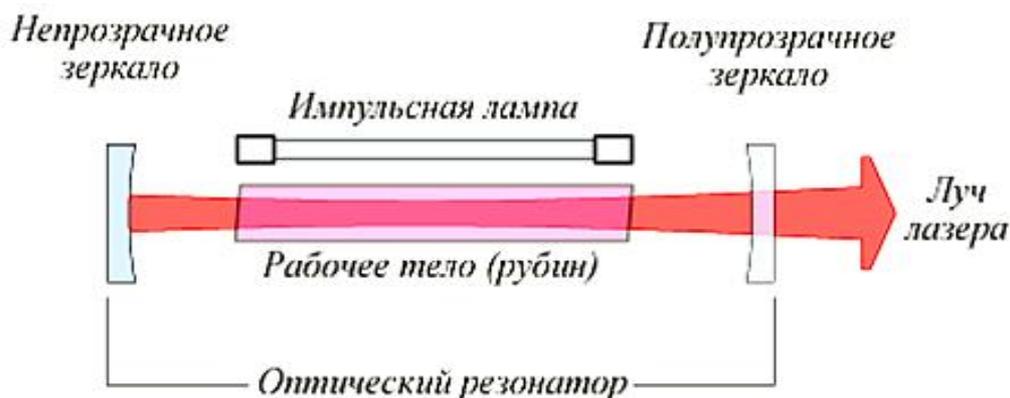
Рубиновые лазеры могут работать в импульсном или непрерывном режиме. Из-за низкого КПД (около 0.1%) рубиновый лазер непрерывного действия неэкономичен по сравнению с другими твердотельными лазерами непрерывного действия. При работе в импульсном режиме без модуляции добротности выходное

излучение лазера состоит из повторяющихся пиков длительностью около 1 мкс с большой мощностью в максимумах.



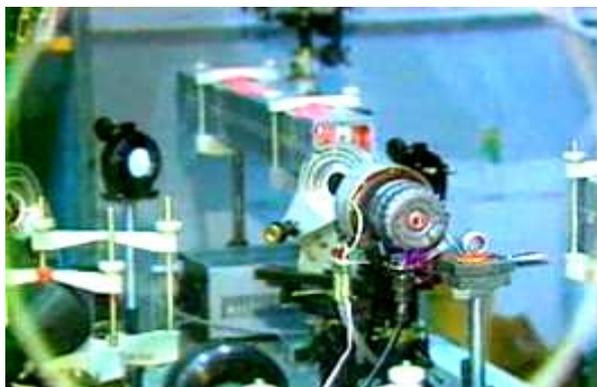
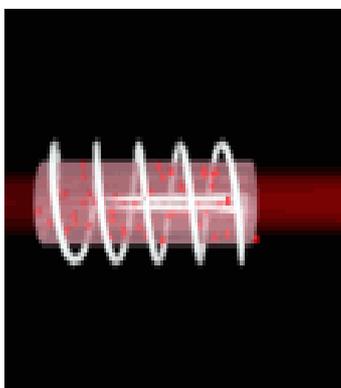
*Рис. 1.12. Схема энергетических уровней хрома в кристалле рубина*

Типичная схема конструкции рубинового лазера приведена на рис. 1.13.



*Рис. 1.13. Конструкция рубинового лазера*

Излучение рубинового лазера характеризуется большой мощностью при невысоком качестве излучения (неоднородное распределение по поперечному сечению, пиковый характер излучения). Излучающий элемент и внешний вид одной из конструкций рубинового лазера приведены на рис.1.14.



*Рис.1.14 Излучающий элемент и внешний вид рубинового лазера*

### **1.5.3. Неодимовый стеклянный лазер**

Этот лазер излучает в ближайшем ИК-диапазоне ( $\lambda = 1.06$  мкм). В качестве активных ионов в стекло, используемое в качестве матрицы, вводят ионы  $\text{Nd}^{3+}$  с массовым содержанием 0.5 – 8%. Nd-лазер работает по четырехуровневой схеме. Поскольку нижний лазерный уровень почти не заселен, то этот тип лазеров обладает относительно низкой пороговой мощностью (200 Вт), в результате чего нетрудно осуществить непрерывный режим работы. Для оптической накачки преимущественно применяют стержневые импульсные лампы с эллиптическим отражателем и полупроводниковые лазерные диоды.

Из-за особой структуры активного вещества лазеры на неодимовом стекле лучше всего подходят для генерации пикосекундных импульсов в режиме синхронизации мод. В этом режиме достигнуты максимальные мощности  $10^{12} - 10^{13}$  Вт. Лазеры со стеклянной матрицей имеют ряд преимуществ – большие размеры стержней, простота изготовления, высокая оптическая однородность. В то же время по сравнению с ионными кристаллами стекла имеют низкую теплопроводность и более высокий коэффициент термического расширения, что ограничивает сверху частоту повторения импульсов. Кроме неодима, лазеры на стекле могут быть активированы и другими редкоземельными ионами (иттербий, эрбий, гольмий, европий и др.). В стеклах из-за неоднородности локальных электростатических полей линия люминесценции 1,06 мкм сильно уширена (до  $\approx 30$  нм; неоднородное уширение). Сильное неоднородное уширение приводит к тому, что неодимовое стекло имеет меньшее усиление, а

соответствующие лазеры - более богатую модовую структуру, чем гранат, активированный неодимом. Вместе с тем стекло допускает большее введение активных центров.

#### *1.5.4. Nd – АИГ – лазеры*

В настоящее время лазер на алюмо-иттриевом гранате является важнейшим твердотельным лазером. Он характеризуется тем, что при относительно простой конструкции достигаются высокие мощности в импульсном режиме при высокой частоте следования импульсов (до 10 кГц) или даже в непрерывном режиме. Лазер работает по четырехуровневой схеме, поэтому имеет сравнительно низкую пороговую мощность накачки. Алюмо-иттриевый гранат является уникальным лазерным материалом, так как обладает высокой теплопроводностью, большой твердостью и хорошими оптическими характеристиками. Кристалл граната является матрицей, которая может быть активирована перечисленными выше редкоземельными элементами. Физический принцип получения инверсии населенности в этом лазере совпадает с лазером на неодимовом стекле. Отличие заключается в использовании кристаллической матрицы ( $Y_3Al_5O_{12}$ ), а не аморфной (стекло). Активирование  $Y_3Al_5O_{12}$  ионами  $Nd^{3+}$  составляет 0.5 – 3.5%.

Возбуждение среды происходит с помощью оптической накачки: в импульсном режиме – ксеноновыми импульсными лампами с цилиндрическим отражателем; в непрерывном режиме – галогенными лампами и криптоновыми дуговыми лампами с эллиптическими отражателями. В последние годы активно используется полупроводниковая лазерная накачка. Пороговая энергия составляет менее 5 Дж. Максимальная мощность лазерного излучения в импульсном режиме достигает  $10^9$  Вт, в непрерывном режиме – 500 Вт. КПД составляет примерно 1%. В кристаллах ИАГ однородное уширение составляет примерно 0,7 нм.

Оптические умножители частоты позволили существенно расширить область применения лазеров. Эффект генерации оптических гармоник широко используется для преобразования излучения длинноволновых лазеров в излучение коротковолновых диапазонов. Промышленность многих стран выпускает оптические умножители частоты на неодимовом стекле или на

алюмоиттриевом гранате с примесью неодима ( $\lambda = 1,06$  мкм), позволяющие получить мощное когерентное излучение на волнах  $\lambda = 0,53$  мкм (2-я гармоника),  $\lambda = 0,35$  мкм (3-я гармоника) и  $\lambda = 0,26$  мкм (4-я гармоника).

Области применения неодимовых лазеров на гранате и стекле существенно различны. В силу большей теплопроводности и однородности гранатовые лазеры легко работают в непрерывном и импульсно-периодическом режимах. Достигнуты средние мощности  $\sim 10^2$  Вт. Неодимовое стекло в силу больших объёмов и более высокой концентрации активатора хорошо накапливает энергию. Поэтому именно стекло служит активной средой импульсных лазеров высокой энергии. Достигнуты значения импульсной энергии в десятки кДж.

Неодимовые лазеры работают в широком диапазоне режимов генерации, от непрерывного до существенно импульсного с длительностью, достигающей 0,5 пс. Последняя достигается методом синхронизации мод в широкой линии усиления, характерной для лазерных стёкол.

При создании неодимовых лазеров реализованы все характерные методы управления параметрами лазерного излучения, разработанные квантовой электроникой. В дополнение к свободной генерации, продолжающейся в течение практически всего времени существования импульса накачки, широкое распространение получили режимы модулированной добротности и синхронизации (самосинхронизации) мод.

В режиме свободной генерации длительность импульсов излучения составляет 0,1 -10 мс, энергия излучения в схемах усиления мощности достигает многих кДж. Характерная длительность импульсов модулируемой добротности составляет около 10 нс при использовании для модуляции добротности электронно-оптических устройств. Дальнейшее укорочение импульсов генерации достигается применением просветляющих фильтров как для модуляции добротности (0,1-10 нс), так и для синхронизации мод (1-10 пс). Области применения неодимовых лазеров - технология, медицина, метеорология, дальнометрия, лазерный термоядерный синтез, физические исследования.

Внешний вид одного из типов неодимовых лазеров приведен на рис.1.15.



*Рис. 1.15. Внешний вид одного из типов неодимовых лазеров*

### **1.5.5. Волоконные лазеры**

Логическим развитием твердотельных лазеров стали волоконные лазеры, где в качестве систем накачки используются лазерные диоды. Эти источники были разработаны для телекоммуникационных систем волоконной связи, где они применяются в качестве усилителей сигналов. Представьте себе, что кристалл, в котором происходит генерация полезного лазерного излучения, как бы растянут на несколько десятков метров и представляет собой сердцевину волокна диаметром несколько микрон, которая находится внутри кварцевого волокна. Излучение диодов направляется в кварцевое волокно, и на всем его протяжении происходит оптическая накачка сердцевины.

Применение лазерного стекла в качестве активного элемента в твердотельных лазерах известно давно. В отличие от кристаллов, лазерные стекла имеют неупорядоченную внутреннюю структуру. Наряду со стеклообразующими компонентами  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{BeF}_2$ , в них содержатся  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,

$\text{Sb}_2\text{O}_3$ . Активными примесями чаще всего служат ионы неодима  $\text{Nd}^{3+}$ ; используются также гадолиний  $\text{Gd}^{3+}$ , эрбий  $\text{Er}^{3+}$ , гольмий  $\text{Ho}^{3+}$ , иттербий  $\text{Yb}^{3+}$ . Концентрация ионов неодима  $\text{Nd}^{3+}$  в стеклах доходит до 6% (по массе).

В лазерных стеклах достигается высокая концентрация активных частиц. Другим достоинством таких стекол является возможность изготовления активных элементов больших размеров практически любой формы и с очень высокой оптической однородностью. К недостаткам использования стекол в качестве лазерных материалов следует отнести относительно широкую полосу генерации и низкую теплопроводность, препятствующую быстрому отводу тепла при мощной оптической накачке.

Волоконные лазеры были разработаны сравнительно недавно, в 1980-х годах прошлого столетия. В настоящее время известны модели волоконных технологических лазеров мощностью до 30 кВт. Эти устройства имеют невысокую стоимость, компактны, удобны для сопряжения с магистральным волокном при минимуме вносимых потерь. Сегодня эти устройства достигли уровня характеристик, в первую очередь, мощности, надежности, позволяющих с успехом использовать их для решения различных задач лазерной обработки материалов. Они представляют собой практически идеальные преобразователи световой энергии лазерных диодов накачки в лазерное излучение с рекордным эффективным КПД, достигающим 65 %.

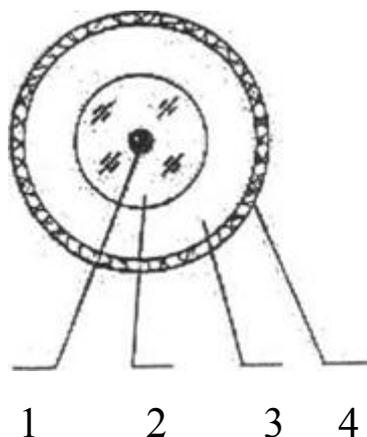
Основой волоконных лазеров является активное волокно, то есть волокно, легированное редкоземельными элементами.

Первые волоконные лазеры были созданы на кварцевых волокнах, легированных ионами неодима.

Лазерное волокно длиной до нескольких десятков метров, как правило, состоит из двух волокон: центрального и внутреннего. Волокно в разрезе представлено на рис. 1. 16.

Внутреннее волокно 1, содержащее активные ионы (например, ионы иттербия), имеет диаметр несколько десятков мкм и находится внутри кварцевого (центрального) волокна 2 диаметром 400-600 мкм. Внутренние стенки волокна покрыты светоотражающим слоем, поэтому движущийся поток квантов претерпевает многократное отражение.

Все световые волны, многократно отражаясь, накладываются, тем самым образуя стоячую волну.



*Рис. 1.16. Сечение волокна:*

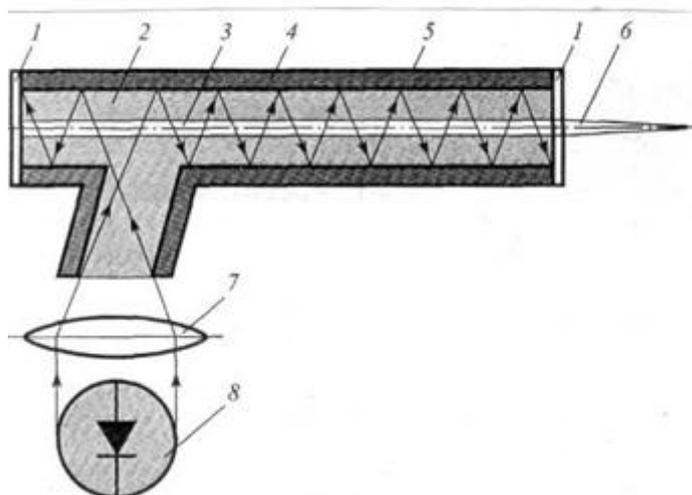
*1 - сердцевина, легированная редкоземельным элементом; 2 - кварцевое волокно; 3 - полимерная оболочка; 4 - внешнее защитное покрытие*

Длина волны излучения определяется типом легирующих ионов, а ширина спектра генерации зависит от материала, в который они введены. Используя различные редкоземельные элементы в качестве добавок и подбирая состав волокна, можно получить большой набор генерируемых длин волн, в том числе 1,3 и 1,5 мкм, а также перспективный в будущем диапазон среднего ИК-излучения – 2-3 мкм. Для увеличения мощности излучения волоконных лазеров следует увеличивать концентрацию ионов легирующей примеси.

В волоконном лазере накачка осуществляется лазерными полупроводниковыми диодами с одномодовым излучением.

Схема конструкции волоконного лазера приведена на рис. 1.17.

Излучение лазерных диодов накачки (8) вводится в кварцевое волокно (2), через которое осуществляется накачка активных ионов, на которых происходит генерация лазерного излучения. На торцах волокна размещен оптический резонатор (два зеркала, одно из которых полупрозрачное). Через полупрозрачное зеркало выходит идеальный одномодовый лазерный пучок с весьма равномерным распределением мощности, что позволяет сфокусировать излучение в пятно малого размера.



*Рис. 1.17. Схема волоконного лазера:*

*1 – торцевое зеркало; 2 – оптическое кварцевое волокно; 3 – активированное световедущее волокно; 4 – светоотражающее покрытие; 5 – защитная оболочка; 6 – лазерный луч; 7 – фокусирующая линза; 8 – светодиоды*

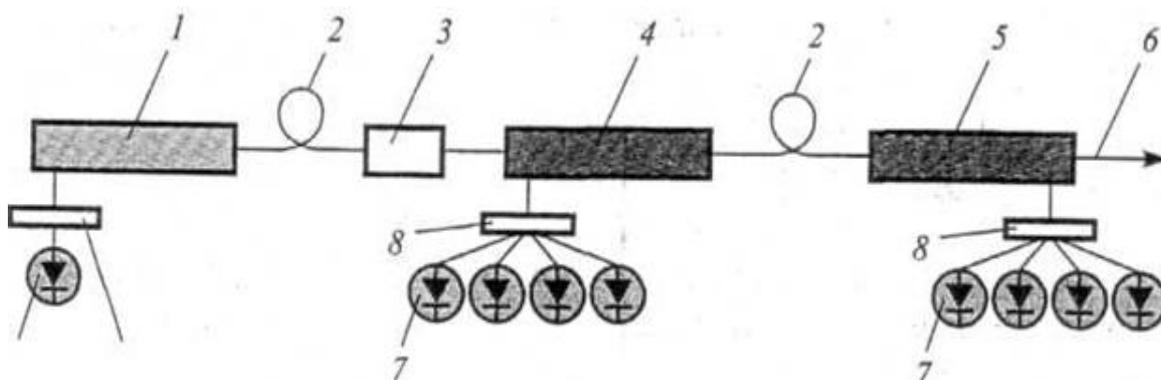
Главная особенность этого лазера состоит в том, что излучение здесь рождается в тонком, диаметром всего 68 мкм, волокне (сердцевине), которое находится внутри кварцевого волокна диаметром 400 - 600 мкм. Излучение лазерных диодов накачки вводится в кварцевое волокно и распространяется вдоль всего сложного составного волокна, имеющего в длину несколько десятков метров.

Общую длину волокна и количество лазерных диодов выбирают, исходя из требуемой мощности и эффективности. Стоит также отметить, что ряд таких свойств излучения волоконных лазеров, как, например, характер поляризации пучка, делает удобным и надежным управление этим излучением с помощью акустооптических устройств и позволяет реализовать многолучевые схемы записи изображений.

Поскольку оптическая накачка идет по всей длине волокна, то отсутствуют такие свойственные обычным твердотельным лазерам эффекты, как термолинза в кристалле, искажения волнового фронта вследствие дефектов самого кристалла, нестабильность луча во времени и др., которые всегда препятствовали достижению максимальных возможностей твердотельных систем. Сами принципы строения и работы волоконного лазера гарантируют

высокие эксплуатационные характеристики и делают данные устройства совершенными преобразователями светового излучения в лазерное.

Мощность волоконного лазера, применяемого для технологических целей, должна составлять от 100 ватт до десятков киловатт. Излучение такой мощности получают сочетанием многокаскадного усиления в волокнах с набором мощности излучения от нескольких лазеров с меньшей мощностью. Волоконный лазер со ступенчатым усилением показан на рис. 1.18.



*Рис. 1.18. Схема многокаскадного усиления в волокнах путем набора мощности излучения от нескольких лазеров с меньшей мощностью:*

*1 – задающий волоконный лазер; 2 – соединяющее световое волокно; 3 – изолятор; 4 – мощный усиливающий волоконный лазер первой ступени; 5 – мощный усиливающий волоконный лазер второй ступени; 6 – лазерный луч; 7 – светодиоды; 8 – фокусирующие системы светодиодов*

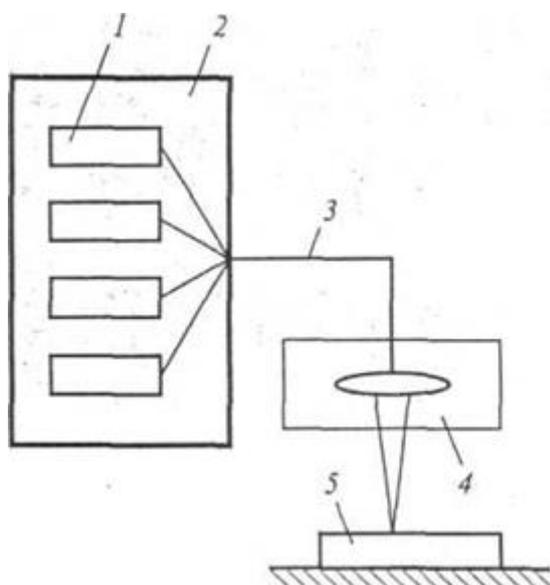
Принцип работы такого лазера заключается в следующем. Сначала накачивается задающий волоконный лазер 1 с помощью излучения светодиодов 7, пропущенного через фокусирующие системы светодиодов 8. Затем световое излучение передается по световому волокну 2 к изолятору. От изолятора излучение передается мощному волоконному лазеру первой ступени 4, накачивая его, а от лазера первой ступени соответственно к мощному волоконному лазеру второй ступени 5, который тоже накачивается. После фокусировки из лазера второй ступени выходит конечный лазерный луч 6.

С помощью такого лазера можно получить мощность излучения до 100 ватт. При этом КПД лазера составляет до 23 %. В этом случае наблюдается весьма малое тепловыделение (около

8...10 ватт). Это дает возможность использовать воздушное охлаждение и исключить применение сложных систем водяного охлаждения, что присуще другим типам технологических лазеров.

Для получения мощностей 2, 4, 6 и 10 киловатт создают блочные системы, в которых излучение отдельных одномодовых волоконных лазеров 1 мощностью 100 ватт собирается в одном волокне 3. И после прохождения через фокусирующую систему 4 лазерный луч попадает на обрабатываемую деталь 5. Схема такого волоконного лазера приведена на рис. 1.19.

При длине волны 1,06 мкм такое излучение весьма эффективно при обработке различных материалов и в совокупности с простотой и надежностью волоконного лазера делает всю систему наиболее целесообразной для технологического применения.



*Рис. 1.19. Схема мощного волоконного лазера:*

*1 – волоконные лазеры мощностью 100 Вт; 2 – мощный волоконный лазер; 3 – волокно, передающее суммированное излучение; 4 – фокусирующая система; 5 – обрабатываемая деталь*

Лазеры на оптических волокнах, легированных ионами редкоземельных элементов, с оптической накачкой обладают рядом преимуществ:

– благодаря волоконной структуре волоконные лазеры имеют низкие пороги генерации;

– их удобно использовать в качестве источников излучения ВОЛС из-за простоты сопряжения с волокном линии;

– эффективно использование направленных разветвителей для расщепления пучка, так как при этом исключаются дифракционные потери на апертурах объемных элементов.

- излучение лазера можно фокусировать с помощью стеклянных линз;

- излучение может передаваться по волокну на большие расстояния, при этом сама лазерная установка может находиться в удобном для работы месте, а волокно от лазерной установки уже непосредственно протягивается на рабочее место;

- возможность создания излучателей высокой мощности (десятки киловатт) путем объединения излучений нескольких волоконных лазеров в одно;

- излучение эффективно поглощается металлами;

- для волоконных лазеров практически не требуется такое техническое обслуживание, как настройка, юстировка, чистка и др.;

- допускает размещение в обычных рабочих помещениях цехов без учета специальных требований;

- срок работы до 100000 часов;

Волоконный лазер является наилучшим преобразователем лазерной энергии, он эффективен, технологичен, имеет существенные преимущества перед другими лазерными установками и наивысший эффективный КПД. В последнее время волоконные лазеры активно вытесняют традиционные лазеры из таких областей применения лазерной техники, как, например, лазерная резка и сварка материалов, маркировка и обработка поверхностей, полиграфия и скоростная лазерная печать. Их используют в лазерных дальномерах и трехмерных локаторах, аппаратуре для телекоммуникаций, в медицинских установках и других сферах промышленных и военных комплексов. Так же, как и в случае твердотельных неодимовых лазеров, в волоконных лазерах может использоваться эффект умножения частоты, позволяющей работать на второй и третьей гармониках.

Сравнение параметров различных типов лазеров приведено в таблице 1.2. Видно, что по большинству технологических параметров волоконные лазеры сравнимы с другими типами лазеров или обладают существенными преимуществами, что делает их весьма перспективными для технологических применений.

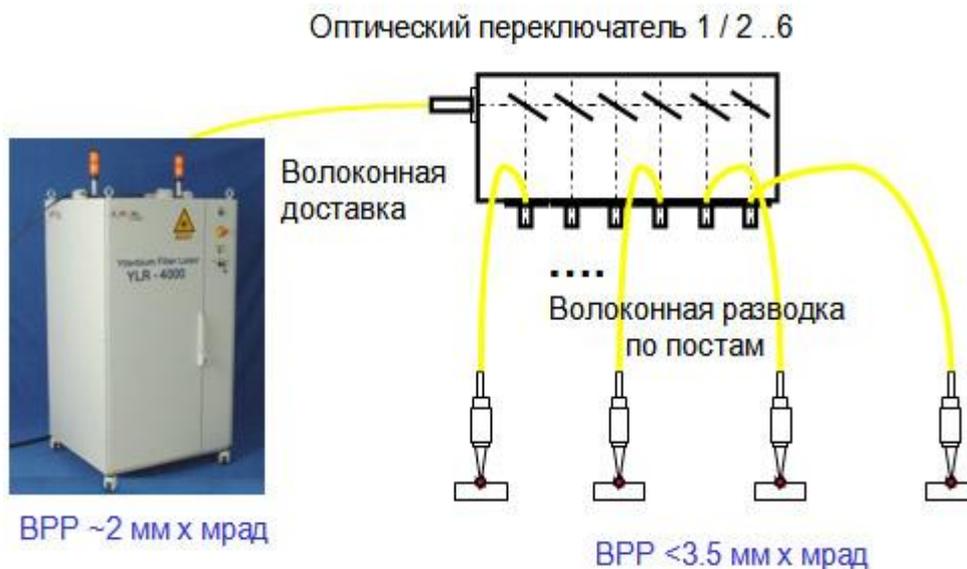
Таблица 1.2. Сравнение параметров технологических лазеров

Параметр	Требуется для использования в промышленности	CO <sub>2</sub>	YAG-Nd с диодной накачкой	Волоконные лазеры	Диодные лазеры
Выходная мощность, кВт	1...30	1...30	1...4	1...30	1...4
Длина волны, мкм	Как можно меньше	10,6	1,064 или 1,03	1,07	0,8...0,98
КПД, %	> 20	8...10	4...6	20...25	25...30
Стабильность выходной мощности	Как можно выше	Низкая	Низкая	Очень высокая	Высокая
Чувствительность к обратному отражению	Как можно ниже	Высокая	Высокая	Низкая	Низкая
Занимаемая площадь, кв.м	Как можно меньше	10...20	9	0,5	4
Стоимость монтажа, отн.ед.	Как можно меньше	1	0,8	< 0,05	0,2
Стоимость эксплуатации, отн.ед.	Как можно меньше	0,5	0,6	0,13	0,2
Стоимость обслуживания, отн.ед.	Как можно меньше	1...1,5	4...12	0,1	4...10

*Рис. 1.20. Фемтосекундный волоконный эрбиевый лазер, модель "Эрбиус-Фемто"*



Мощный волоконный лазер, в случае оснащения его оптическим переключателем, может обслуживать сразу несколько (2...6) технологических установок (рис. 1.21).



*Рис. 1.21. Схема волоконного лазера с оптическим переключателем*

В таком комплексе эффективнее используется большой ресурс работы волоконного лазера и его способность быстро переключаться на различные режимы работы. А общая стоимость комплекса существенно ниже, если сравнивать его с набором установок, оснащенных каждая своим лазером.



*Рис. 1.22. Внешний вид волоконного лазера*

### 1.5.6. Газовые лазеры

В качестве активных сред для газовых лазеров пригодны все газообразные при комнатной температуре элементы, большое число элементов в парообразном состоянии (например, пары металлов), большое число молекул. При создании инверсии населенности широко используется ударное возбуждение излучающих состояний при столкновениях атомов и молекул с электронами в газовых разрядах и электронных пучках. При этом большую роль обычно играют ступенчатые процессы с участием метастабильных атомов и молекул. Для лазеров, работающих на колебательных переходах в молекулах, может быть использована химическая или газодинамическая накачка.

Примерная конструкция газового лазера приведена на рис. 1.23.

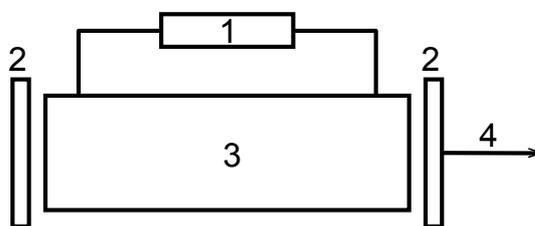


Рис. 1.23. Принципиальная схема газоразрядного лазера: 1 – источник питания разряда; 2 – оптический резонатор; 3 – активный элемент; 4 – лазерное излучение

Активная среда находится в пределах лазерной трубки, длина зоны возбуждения достигает от нескольких сантиметров до 200 м (типично 0.3 – 1.5 м), а диаметр лазерной трубки 0.1 – 50 см (типично 0.1 – 2 см), наполнение газа стационарное или в проточной системе. Охлаждение газа, т. е. отвод тепловых потерь, происходит с помощью воздушного охлаждения при малой мощности; водяного охлаждения при средней и высокой мощности; быстрой замены газа при очень высокой мощности. По сравнению с твердотельным лазером, газовый лазер, благодаря лучшей однородности активной среды и более узкой ширине лазерной линии, имеет более высокие параметры излучения относительно длины когерентности, стабильности интенсивности излучения, расходимости пучка и однородности по поперечному сечению.

Предельные физико-технические параметры газовых лазеров приведены в табл. 1.3. Спектральные свойства лазерного излучения в основном определяются сильным неоднородным (доплеровским)

уширением. При этом изменение доплеровской ширины в зависимости от длины волны равно:

$$\Delta\nu = 50 \text{ МГц для } \lambda = 10.6 \text{ мкм (CO}_2\text{-лазер);}$$

$$\Delta\nu = 1.5 \text{ ГГц для } \lambda = 0.633 \text{ мкм (He-Ne-лазер);}$$

$$\Delta\nu = 3.5 \text{ ГГц для } \lambda = 0.448 \text{ мкм (Ar}^+\text{-лазер).}$$

Таблица 1.3

### Пределные параметры газовых лазеров

Параметр	Значение	Тип лазера
Мощность в непрерывном режиме, кВт	400	Газодинамический CO <sub>2</sub> -лазер
Энергия импульса излучения, кДж	70	Быстропроточный CO <sub>2</sub> -лазер
Импульсная мощность, ТВт	20	ТЕА-лазер на CO <sub>2</sub>
Длительность импульса, пс	30	ТЕА-лазер на CO <sub>2</sub>
КПД, %	50	Лазер на галогенидах инертных газов
Минимальная длина волны, нм	116	H <sub>2</sub> -лазер
Максимальная длина волны, мм	1,965	CH <sub>3</sub> Br-лазер

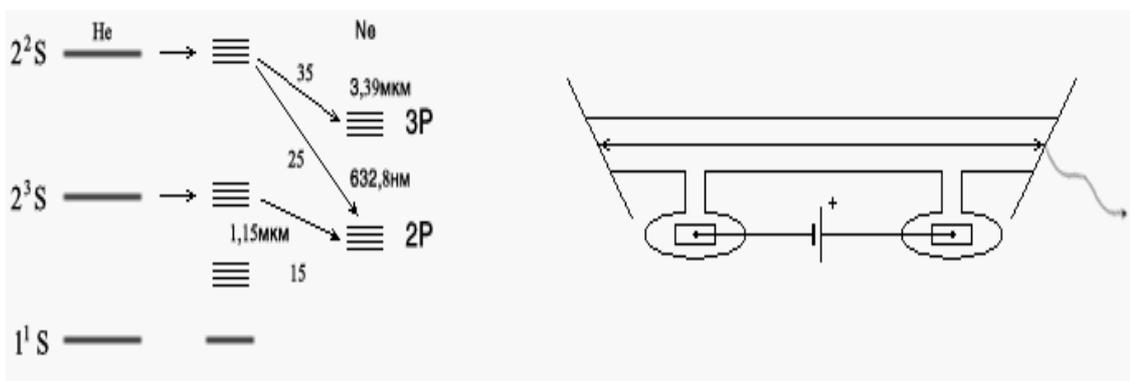
Неоднородное уширение приводит к тому, что газовый лазер излучает на большом числе собственных мод и в результате образуется спектрально относительно широкая линия. Одномодовый режим работы лазера может быть достигнут, наряду с применением частотно-селективных элементов, с помощью коротких резонаторов.

В зависимости от типа частицы, на переходах которой осуществляется генерация, различают атомные, ионные и молекулярные газовые лазеры.

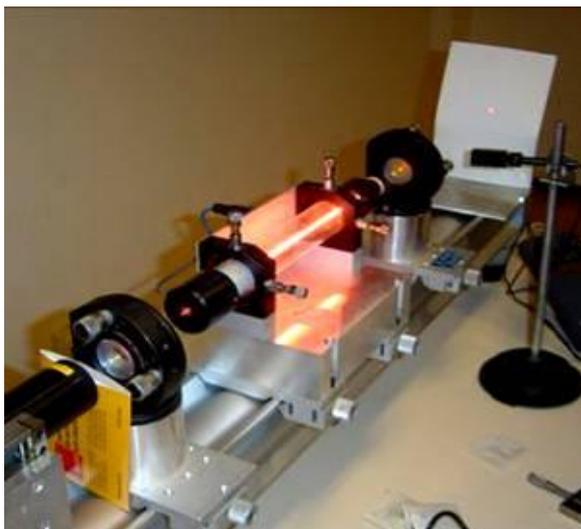
#### 1.5.7. Атомные лазеры

Самым распространенным лазером на атомных переходах является He-Ne-лазер. Этот лазер может работать в непрерывном режиме с малыми выходными мощностями. Он отличается небольшими размерами, простой и надежной конструкцией.

В He-Ne-лазере возможна генерация на многочисленных переходах между электронными уровнями атома неона. Наиболее употребительны лазеры с длиной волны излучения 632,8 нм. Создание инверсной населенности происходит в электрическом газовом разряде, причем заселение верхних уровней в основном происходит за счет неупругих столкновений с метастабильными атомами гелия, которые возбуждаются при столкновениях с электронами. Схема уровней атомов неона и гелия показана на рис. 1.24.



*Рис. 1.24. Схема уровней атомов неона и гелия, участвующих в генерации лазерного излучения*



*Рис. 1.25. He-Ne-лазер*

Свойства He-Ne-лазера типичны для газовых лазеров и характеризуются большой длиной когерентности, высокой монохроматичностью, хорошим качеством пучка. Мощность гелий – неоновых лазеров обычно составляет 0,5 – 100 мВт и их

использование связано, в основном, с измерительной техникой, голографией и т.д.

### ***1.5.8. Лазеры на парах металлов***

Среди лазеров на переходах в атомах лазеры на парах металлов занимают важное место. Дело в том, что металлы обладают наиболее подходящей структурой энергетических уровней с точки зрения получения высокого квантового КПД. В качестве лазерного обычно используется переход из резонансного в метастабильное состояние. Такие лазеры могут работать только в импульсном режиме, так как время жизни нижнего состояния больше, чем верхнего, поэтому они получили название лазеров на самоограниченных переходах.

Впервые генерация на таких переходах была получена в парах марганца (зелёная и инфракрасная области спектра) и парах свинца (красная область спектра) в 1965 г. Несколько позже была получена генерация и в парах меди. Исследования этих, да и других, полученных впоследствии, генераций на самоограниченных переходах в парах различных металлов подтвердили все ожидаемые характеристики и особенности такого класса лазеров. Из них можно выделить следующие:

- Высокую эффективность генерации. Так коэффициент преобразования электрической энергии в световую для этих лазеров в десять раз выше, чем для таких широко известных лазеров как аргоновый и гелий-неоновый.

- Сугубо импульсный характер генерации, что связано с метастабильностью нижнего уровня лазерного перехода. Обычно длительность импульсов излучения не превышает 10-30 нс.

- Жёсткие требования к системе импульсного питания таких лазеров, которая должна обеспечивать мощные высоковольтные наносекундные импульсы с крутизной нарастания тока  $10^9$ - $10^{10}$  А/с.

- Высокое (рекордное) усиление света активными средами этих лазеров. Обычно усиление столь велико, что мощное вынужденное излучение формируется активной средой либо только с одним зеркалом резонатора, либо совсем без зеркал. Усиление в линейном режиме может достигать величин 400-600 дБ/м. Поэтому требования на качество зеркал резонатора для этих лазеров существенно ниже, чем для всех других лазеров. Обычно в качестве

выходного зеркала резонатора в этих лазерах используется прозрачная стеклянная пластинка с отражением 4- 8%.

В настоящее время получена генерация на парах многих металлов – меди, золота, свинца, марганца, таллия, висмута, железа, бария, кальция, стронция и других. Промышленное значение имеют в основном лазеры на парах меди и меди-золота. Лазеры на парах меди дают излучение в зеленой (510,6 нм) и желтой (578,2 нм) областях спектра. В присутствии паров золота появляется красная линия (627,8 нм), т.е. излучение лазера становится трехцветным. Такие лазеры имеют среднюю мощность излучения до 20 ватт, а импульсную – до 200 киловатт при длительности импульса 20 – 30 нс.

Так как рабочее давление паров атомов металлов составляет в этих лазерах 0,3-0,5 мм рт.ст. (плотность атомов около  $10^{15}$  см<sup>-3</sup>), то температуры стенок газоразрядных трубок, соответствующие такому значению насыщенного давления паров, должны достигать от 650-950<sup>0</sup>С для лазеров на парах таллия и свинца до 1500-1600<sup>0</sup>С для лазеров на парах меди и золота.

Первые лазеры на парах меди имели громоздкую и непрактичную конструкцию. Основными элементами были: высокотемпературная электропечь и керамическая газоразрядная трубка (ГРТ). Для ГРТ использовалась высокотемпературная вакуумноплотная керамика, которая плохо "держит тепловые удары". Поэтому время разогрева до рабочей температуры, также как и время остывания до комнатной температуры для этих ГРТ было очень большим, около 8 часов.

Кроме этого, использование высокотемпературной печи с высокой электрической мощностью существенно снижало эффективность всего лазера.

Существенный прорыв в плане разработки лазеров на парах меди для практических применений был сделан сотрудниками Физического института им. П.Н.Лебедева АН СССР в 1972 г. Ими был разработан лазер на парах меди в так называемом саморазогревном режиме работы. В конструкции такого лазера нагревательная печь отсутствовала, а рабочая температура ГРТ достигалась за счёт энергии импульсного разряда, который возбуждал генерацию.

Выходная средняя мощность ( $P_{\text{вых}}$ ) этого лазера 15 ватт, частота повторения импульсов 15-18 кГц. Энергия в импульсе излучения достигала 1 мДж при пиковой (импульсной) мощности 100 киловатт. Практическая эффективность генерации, рассчитанная из энергопотребления от источника питания, достигала 1%. По мере разогрева трубки плотность атомов меди в разряде увеличивается, увеличивается также и мощность генерации. Оптимальная плотность атомов меди в плазме разряда, при которой мощность генерации максимальна, достигается обычно при  $T_1=1500-1550^{\circ}\text{C}$ . Такая температура создается в течение 30 – 60 минут.

Большие средние мощности (более 100 Вт) могут быть получены в лазерах на парах меди двумя способами. Увеличение выходной мощности можно достичь за счёт: во-первых, увеличения активного объёма газоразрядной трубки как при увеличении её диаметра, так и длины; а во-вторых, использования схем "генератор-усилитель", когда небольшая мощность генератора усиливается в одном или нескольких каскадах. Так была получена выходная мощность 550 Вт с одной газоразрядной трубкой, которая имела диаметр активной зоны 8 см и длину 350 см. Режимы "генератор-усилитель" более предпочтительны для достижения очень высоких мощностей, так как в них достигается более эффективный (на 30-40%) съём мощности.

По такой схеме созданы самые мощные лазеры на парах металлов с суммарной мощностью в несколько киловатт, которые используются в системах разделения изотопов. На рис. 1.26 показан лазер на парах меди со средней мощностью 40 Вт.

Кроме лазеров на парах чистой меди, в настоящее время получили распространение лазеры на парах химических соединений меди, обычно это галогениды меди:  $\text{CuBr}$ ,  $\text{CuCl}$ ,  $\text{CuJ}$ . В этих лазерах атомы меди поступают в плазму разряда за счёт диссоциации молекул галогенидов в электрическом разряде. Так как рабочее давление паров галогенидов достигается при меньшей температуре, чем для металлической меди, то рабочая температура газоразрядной трубки у этих лазеров существенно ниже -  $450-550^{\circ}\text{C}$ . Поэтому газоразрядная трубка этих лазеров имеет существенно меньшую тепловую инерцию, что позволяет сократить время разогрева до рабочего режима до 5-10 мин. Эффективность работы таких лазеров примерно вдвое превышает

эффективность лазеров на парах меди. Это достигается за счёт небольших добавок (0,3 мм.рт.ст.) молекулярного водорода в плазму разряда.



Задающий генератор

#### Параметры лазерного излучения

- Длина волны 510,6 нм и 578,2 нм
- Частота следования импульсов 10 кГц
- Длительность импульсов от 10 до 20 нс
- Расходимость излучения  $10^{-3}$  рад
- Мощность излучения 40 Вт
- Соотношение мощностей для длин волн 510,6 нм и 578,2 нм - 1 : 1
- Диаметр пучка 20 мм

*Рис. 1.26. Внешний вид и параметры излучения лазера на парах меди со средней мощностью 40 Вт*

Существенный недостаток этих лазеров состоит в трудностях создания прибора с большим сроком службы. Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, трудно поддерживать длительное время неизменным химический состав плазмы при наличии в ней химически активных молекул галогенов. Во-вторых, из-за более высокой летучести галогенидов меди по сравнению с атомами меди их концентрация вблизи выходных окон лазера достаточно высока, что приводит к осаждению меди на окна. Из-за этого процесса окна прибора довольно быстро теряют свою прозрачность. Конструкция активного элемента лазера на парах бромида меди приведена на рис. 1.27.

Основные технические характеристики лазера на парах бромида меди:

Рабочие длины волн 510.6 нм и 578.2 нм.

Средняя мощность генерации 25 - 27 Вт.

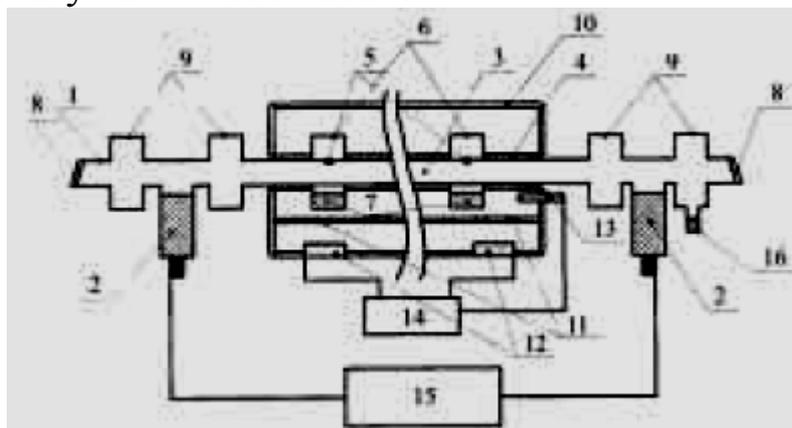
Рабочий режим импульсно-периодический.

Частота повторения импульсов 20 - 25 кГц.

Длительность импульса 30 - 50 нс.

КПД лазера ~1 %.

Срок службы >1000 часов.



*Рис.1.27. Конструкция активного элемента лазера на парах бромида меди.*

*1 -вакуумно-плотная оболочка; 2 -электроды; 3 -рабочий канал; 4 - теплоизолятор; 5 - отверстия в рабочем канале; 6 . контейнеры; 7 - галогенид меди; 8 - выходные окна; 9 - ловушки; 10 - тепловая камера; 11 - отверстия во внутренней стенке тепловой камеры; 12 - вентиляторы; 13 - терморара; 14 - электронный блок стабилизации температуры контейнеров; 15 - импульсный источник питания; 16 -генератор HBr*

Самая высокая эффективность генерации на переходах атома меди была получена недавно в так называемом "гибридном" лазере. Рабочая плотность атомов меди в этом лазере достигается за счёт химической реакции молекулярного бромида водорода с металлической медью.

Для этого смесь буферного газа Ne с HBr достаточно медленно прокачивают через газоразрядную трубку, содержащую металлическую медь. В таком лазере была получена средняя мощность генерации 200 Вт при КПД свыше 3%. Недостатки этого лазера, в плане создания практического прибора, примерно те же, что и для лазеров на парах химических соединений меди.

В целом развитие лазеров на парах меди шло от идеи и лабораторных макетов до серийных промышленных приборов и масштабных применений, что обеспечило им первенство в качестве наиболее мощного лазера в видимой области спектра. Последние исследования позволяют надеяться на дальнейшее развитие как самого лазера, так и его практических применений.

### ***1.5.9. Ионные лазеры***

В ионных лазерах генерация осуществляется на электронных переходах в ионах. Из ионных лазеров наибольшее распространение получил аргоновый лазер, в котором генерация может происходить на нескольких длинах волн в диапазоне от 454 до 528 нм. Заселение верхнего лазерного уровня происходит при электронных ударах. Накачка осуществляется мощным дуговым разрядом для создания высокой степени ионизации. Нижний лазерный уровень обладает очень коротким временем жизни, что обеспечивает высокую инверсность населенности. Мощность аргоновых лазеров достигает 500 Вт в непрерывном режиме при КПД порядка 0,1%. Выпускаются также криптоновые лазеры и лазеры на смеси аргона с криптоном. Ниже приведены параметры таких лазеров и области их применения.

#### **Ar-Kr лазеры малой и средней мощности**

Ионные лазеры с малой (до 100 мВт в сине-зеленой и 50 мВт в красной области спектра) и средней (до 5 Вт в сине-зеленой, 1,5 Вт в красной и белой областях спектра) мощности применяются в качестве источников высокоинтенсивного монохроматического когерентного лазерного излучения.

Малогабаритный ионный лазер с водяным охлаждением ЛГН-514 предназначен для использования в качестве высокостабилизированного источника лазерного излучения в сине-зеленой области спектра с мощностью до 100 мВт. Обладает высокой стабильностью оси диаграммы направленности, низкой расходимостью пучка лазерного излучения.

Этот лазер находит широкое применение в медицине и биологии для экспресс-анализа различных заболеваний, в том числе на клеточном уровне. Газоразрядная трубка выполнена в стеклокерамическом исполнении.

ЛГ-106М4 – самый популярный ионный лазер с газоразрядной трубкой в стеклокерамическом исполнении. Мощность лазерного излучения до 4 Вт в сине-зеленом (Ar), 1,5 Вт в красной (Kr) и белой (Ar-Kr) областях спектра. Эти лазеры применяют в научных исследованиях, технологии, медицине, стереолитографии, голографии, лазерных шоу, автомобильной и авиационной промышленности и лазерных дальномерах.

## **Ar-Kr лазеры с мощностью излучения более 5 Вт**

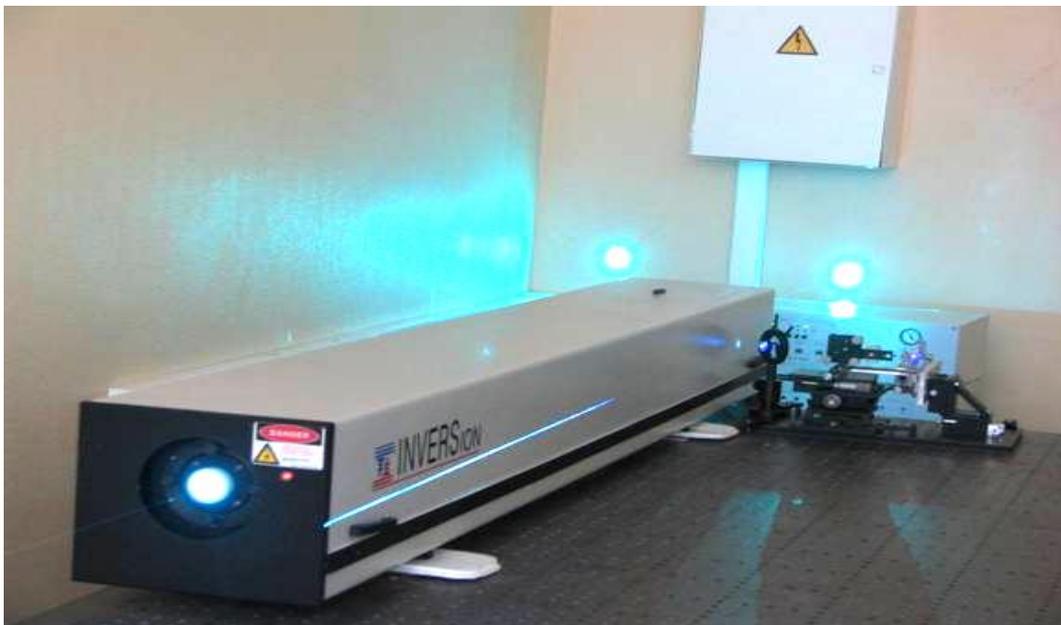
Мощные ионные аргоновые и криптоновые лазеры с мощностью лазерного излучения до 20 Вт в сине-зеленой (Ar), до 4 Вт в красной (Kr), 4 Вт в белой (Ar-Kr), 1,5 Вт в ультрафиолетовой (Kr) области спектра применяются в качестве источников высокоинтенсивного монохроматического поляризованного когерентного лазерного излучения в различных областях народного хозяйства.

Стабилизированные лазеры с арговым и криптоновым наполнением, с низкой расходимостью пучка лазерного излучения и высокой стабильностью диаграммы направленности применяются в оборудовании для производства сверх больших интегральных микросхем, в научных исследованиях, фотолитографии, голографии, хирургии и термоядерном синтезе.

Газоразрядные активные элементы лазеров выполнены в металлостеклянном варианте и герметизированы окнами Брюстера, что обеспечивает высокую степень поляризации лазерного излучения и позволяет получать многолинейный, однолинейный или одночастотный режим работы.

Нестабилизированные лазеры с арговым, криптоновым и смешанным наполнением и мощностью лазерного излучения соответственно 10 и 4 Вт предназначены для использования в лазерных шоу. Внешний вид аргонового лазера показан на рис. 1.28.

Из других ионных лазеров следует отметить гелий-кадмиевые. Заселение верхнего лазерного уровня иона кадмия осуществляется при столкновениях метастабильных атомов гелия с атомами кадмия. Возможны два лазерных перехода с длинами волн 325 и 441,6 нм. Лазеры работают в непрерывном режиме, просты и надежны в эксплуатации, не требуют водяного охлаждения, отличаются низким энергопотреблением. Длины волны генерации He-Cd лазеров соответствуют максимуму чувствительности большой группы фотоматериалов и фоторезиста.



*Рис. 1.28. Внешний вид аргоновых лазеров*

Излучение He-Cd лазеров отличается высокой плотностью энергии, высокой когерентностью, высокой стабильностью характеристик, низкой расходимостью, отличным качеством пучка (очень чистой модой TEM<sub>00</sub>). Лазеры с генерацией на длине волны 0,44 мкм имеют мощность линейно-поляризованного излучения в диапазоне от 60 до 150 мВт.

Лазеры с генерацией на длине волны 0,32 мкм имеют мощность излучения в диапазоне от 10 до 35 мВт. Внешний вид гелий-кадмиевого лазера показан на рис. 1.29.



*Рис. 1.29. Внешний вид гелий – кадмиевого лазера*

### ***1.5.10. Молекулярные лазеры***

Генерация лазерного излучения была получена на большом количестве молекул и их излучение охватывает ультрафиолетовый, видимый и инфракрасный диапазон спектра. Рассмотрим некоторые наиболее часто используемые типы молекулярных лазеров.

*Газовые лазеры в УФ-диапазоне ( $N_2$  и  $H_2$  лазеры).* Азотный лазер является высокомоощным лазером с коротким временем нарастания импульса и высокой частотой следования импульсов. Вследствие неблагоприятного соотношения вероятностей радиационного распада рабочих уровней молекулы азота инверсию, т.е. генерацию на рассматриваемых переходах можно получить только в нестационарном (импульсном) режиме на фронте импульса возбуждения. Таким образом, азотный лазер, является лазером на самоограниченных переходах.

К настоящему времени разработаны и успешно выпускаются импульсно-периодические азотные лазеры с продольным возбуждением. Благодаря своим уникальным характеристикам

(короткой длине волны, малой длительности импульса (порядка 10 нс.), высокой импульсной мощности излучения азотные лазеры широко и эффективно применяются в микроэлектронике и при изготовлении и ретушировании фотошаблонов, гибридных интегральных микросхем и пленочных резисторов, их подгонке. Для достижения высоких энергий в импульсе требуется большая электрическая мощность возбуждения. Благодаря очень быстрому усилению в активной среде, из-за чего вся инверсная населенность снимается в один проход, N<sub>2</sub>-лазер может работать без резонатора. Рабочая длина волны азотного лазера составляет 337,1 нм. Возможна также генерация на длинах волн 315,9 нм и 357,7 нм. Внешний вид азотного лазера показан на рис. 1.30.



*Рис. 1.30. Внешний вид одного из типов азотных лазеров.*

N<sub>2</sub>-лазер является мощным импульсным лазером в вакуумном УФ-диапазоне (рабочие длины волн 116, 123, 160 нм) с малой длительностью импульса. По принципу действия он аналогичен азотному.

### ***1.5.11. Эксимерные лазеры***

Класс импульсных газовых лазеров, объединенных названием "эксимерные", возник сравнительно недавно. Лазеры этого класса работают на переходах между двумя термами молекулы, нижний из которых является отталкивательным и составлен обычно из атомов

в основном состоянии. Верхний терм лазерного перехода имеет потенциальный минимум (рис. 1.31). Такие молекулы существуют только в возбужденном состоянии, откуда и происходит название этого типа лазеров. Особенности работы этого лазера состоят в следующем.

В результате процессов в возбужденном газе образуется эксимерная молекула в электронно-возбужденном состоянии на некотором колебательном уровне. Линия излучения такой молекулы относительно широка. Ширина линии испускания перехода в эксимерном лазере на несколько порядков превышает значение этой величины для других типов лазеров.

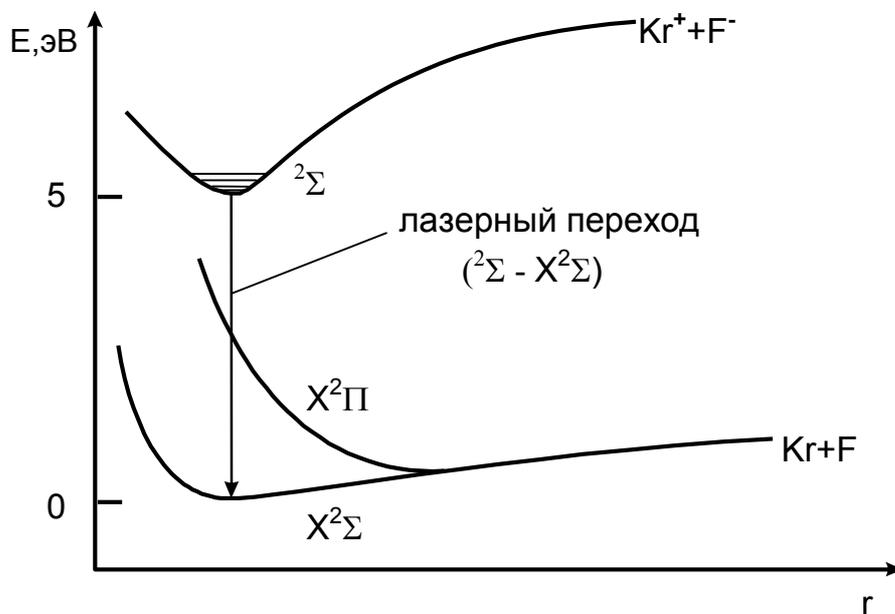


Рис. 1.31. Схема потенциальных кривых эксимерных молекул

Таким образом, сечение индуцированного излучения для перехода в эксимерном лазере весьма мало и этот лазер может работать только при относительно высокой интенсивности накачки. Поэтому существующие эксимерные лазеры работают только в импульсном режиме. По той же причине эксимерные лазеры появились значительно позже других типов лазеров.

Впервые описанный механизм создания инверсной заселенности был реализован Н.Г. Басовым с сотрудниками в жидком ксеноне, на переходах между возбужденным (метастабильным) и основным (отталкивательным) термами молекулы  $\text{Xe}_2$ . В дальнейшем генерацию на молекулярном ксеноне осуществили в плотном газе при давлении, в десятки раз

превышающем атмосферное. Интерес к эксимерным лазерам резко возрос с 1975 года, когда, с одной стороны, было показано, что возбужденные эксимерные молекулы моногалогенидов инертных газов могут интенсивно образовываться при тушении метастабильных атомов инертного газа галоидосодержащими молекулами, а с другой стороны, были созданы первые мощные эксимерные лазеры с выходной мощностью импульса несколько джоулей. В настоящее время существуют эксимерные лазеры с энергией импульса до 300 Дж при длительности импульса порядка 50 нс и КПД = 10% (эти лазеры могут работать на переходах с длинами волн 193,3; 248,4 и 353 нм). Указанные параметры являются рекордными для всех лазеров видимого и ультрафиолетового диапазонов.

Эксимерные лазеры являются, как правило, ультрафиолетовыми лазерами и перекрывают широкую область спектра. В таблице 1.4 представлены длины волн для центров линий перехода возбужденных молекул, составляющих основу существующих эксимерных лазеров.

Таблица 1.4.

#### Параметры переходов в эксимерных лазерах

Молекула, переход в которой создает лазерное излучение	Длина волны в центре линии перехода, нм	Эквивалентный электронный переход в атоме	Ширина спектра усиления, нм
Ar <sub>2</sub>	126.1	Ar(P)→Ar( <sup>1</sup> S)	8
Kr <sub>2</sub>	146.7	Kr(P) →Kr( <sup>1</sup> S)	13.8
Xe <sub>2</sub>	172	Xe(P)→Xe( <sup>1</sup> S)	20
ArF	193.3	Ar(P)→Ar( <sup>1</sup> S)	1.5
KrCl	222	Kr(P) →Kr( <sup>1</sup> S)	5
KrF	248.4	Kr(P) →Kr( <sup>1</sup> S)	4
XeBr	281.8	Xe(P)→Xe( <sup>1</sup> S)	1
XeCl	308	Xe(P)→Xe( <sup>1</sup> S)	2.5
XeF	351.1	Xe(P)→Xe( <sup>1</sup> S)	1.5
XeO	540	Xe(P)→Xe( <sup>1</sup> S)	25
KrO	557.7	O( <sup>1</sup> S) →O( <sup>3</sup> P)	1.5
ArO	558	O( <sup>1</sup> S) →O( <sup>3</sup> P)	4

Кроме того, из-за большой ширины линии перехода эксимерные лазеры могут работать как перестраиваемые в достаточно широкой области спектра. Можно надеяться, что на основе эксимерных лазеров будет создан класс перестраиваемых лазеров, длина волны которых плавно перекроет всю область длин волн, начиная от границы видимого спектра (~400 нм) до 200 нм.

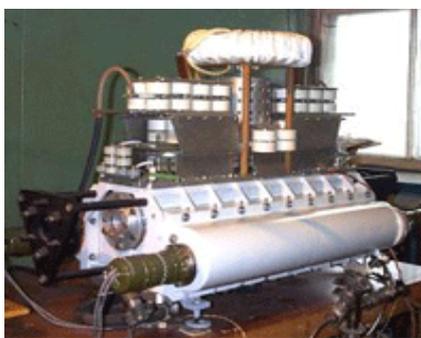
Приведенные выше параметры эксимерных лазеров ставят их вне конкуренции среди лазеров видимого и ультрафиолетового диапазонов с точки зрения перспективы применений в нелинейной оптике, фотохимии, фотолитографии, технологии, в качестве источника накачки перестраиваемых жидкостных лазеров, а, возможно, и в экспериментах по лазерному нагреву.

Активная среда эксимерного лазера состоит из инертного газа при атмосферном или несколько большем давлении с возможными малыми добавками галогенсодержащих молекул (давление порядка  $10^{-2}$  атм). Эксимерные молекулы образуются в результате протекания следующего процесса:



где R — атом инертного газа,  $X_2$  — молекула галогена (звёздочка означает электронно-возбуждённое состояние). В силу малых времён жизни активных молекул ( $\sim 10^{-8}$  с), малости яркости и большой ширины линии усиления для осуществления генерации требуется создать достаточно высокую концентрацию эксимерных молекул. Это достигается за счёт использования мощных импульсных источников возбуждения — мощных электронных пучков или импульсного поперечного разряда, который обычно для обеспечения объёмной однородности предварительно иницируют маломощным электронным пучком или фотоионизирующим УФ излучением.

Наиболее эффективны и хорошо изучены эксимерные лазеры на молекулах  $ArF^*$ ,  $KrF^*$ ,  $XeF^*$ . Ниже приведены внешний вид и параметры эксимерного лазера «Светлана» (рис. 1.32).



Электроразрядный эксимерный KrF- и ArF-лазер "Светлана" с бестиратронной системой питания, генерирующий импульсы излучения в ультрафиолетовом диапазоне спектра, предназначен для использования в технологических и исследовательских целях, а также в составе установок для контроля состояния окружающей среды.

### Основные параметры лазера

Лазерная среда	ArF	KrF
Длина волны излучения, нм	193	248
Максимальная энергия в импульсе, мДж	250	680
Максимальная частота следования импульсов, Гц	200	300
Максимальная средняя мощность, Вт	40	115
Длительность импульса излучения (по полувысоте), нс	30	33
Сечение светового пучка на выходе из резонатора, мм	27x6	27x11
Стабильность излучения, %	2	
Расходимость излучения, мрад	4,0x1,5	
Максимальная потребляемая мощность, кВт	8	

*Рис. 1.32. Внешний вид и параметры эксимерного лазера «Светлана»*

#### **1.5.12 Газовые лазеры в инфракрасной области спектра**

Эти газовые лазеры наряду с характерными для всех газовых лазеров свойствами характеризуются, прежде всего, незначительной шириной линии и ограниченными возможностями перестройки при высокой мощности.

Вынужденное излучение в ИК-области спектра можно получить на переходах между:

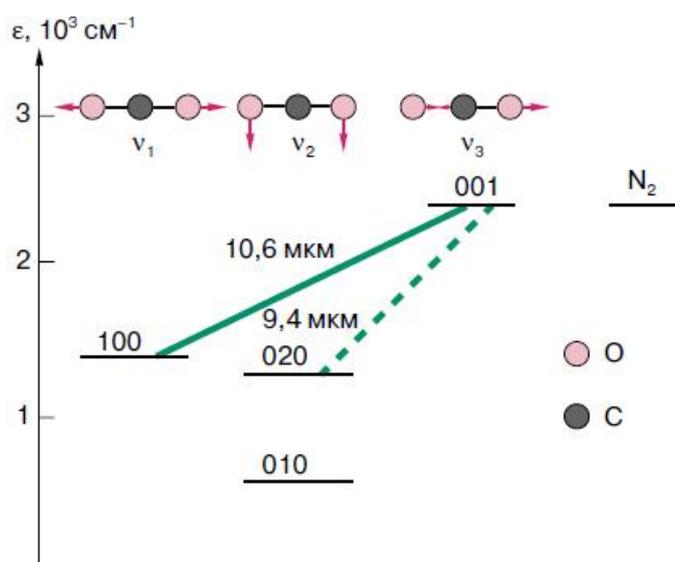
- колебательно-вращательными уровнями молекул в основном электронном состоянии в средней и дальней ИК-области (HF-, CO-, CO<sub>2</sub>-лазеры, H<sub>2</sub>O-, SO<sub>2</sub>-лазеры);

- вращательными уровнями в основном электронном состоянии в дальней ИК-области (HF-, CH<sub>3</sub>F-лазеры).

## СО<sub>2</sub> - МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ГАЗОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

Одним из важнейших типов газовых лазеров, излучающих в инфракрасной области, является СО<sub>2</sub>-лазер. В этих генераторах используется смесь газов СО<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> и He. Генерация происходит на переходе между двумя колебательными уровнями молекулы СО<sub>2</sub>, а N<sub>2</sub> и He служат для повышения КПД. Эти лазеры сейчас являются одними из самых мощных (примерно 80 кВт) и наиболее эффективных (КПД ~ 15 - 20%). Длины волн генерации составляют 10,6 и 9,4 мкм.

На рис.1.33 приведена схема энергетических уровней основных электронных состояний молекулы СО<sub>2</sub>. Эта молекула имеет три невырожденные колебательные моды (рис.1.33): 1) симметричную валентную ( $\nu_1$ ), 2) деформационную ( $\nu_2$ ), 3) асимметричную валентную ( $\nu_3$ ).



*Рис. 1.33. Схема энергетических уровней основных электронных состояний молекул СО<sub>2</sub> и N<sub>2</sub>, участвующих в генерации лазерного излучения*

В газоразрядных СО<sub>2</sub> - лазерах инверсия населённостей достигается возбуждением молекул электронным ударом и резонансной передачей возбуждения. Для передачи энергии возбуждения служат молекулы азота N<sub>2</sub>, возбуждаемые, в свою

очередь, электронным ударом. Обычно в условиях тлеющего разряда около 90-95% молекул азота переходит в возбуждённое состояние, время жизни которого очень велико. Молекулярный азот хорошо аккумулирует энергию возбуждения и легко передаёт её молекулам  $\text{CO}_2$  в процессе неупругих соударений, поскольку энергия первого колебательного уровня молекулы азота очень близка к энергии уровня 001 молекулы углекислого газа. Высокая инверсия населённостей достигается при добавлении в разрядную смесь He, который, во-первых, облегчает условия возникновения разряда и, во-вторых, в силу своей высокой теплопроводности, охлаждает разряд и способствует эффективному расселению нижних лазерных уровней молекулы  $\text{CO}_2$ .

$\text{CO}_2$  - лазер обеспечивает высокую мощность излучения в непрерывном режиме. При возбуждении молекул углекислого газа электронным разрядом такой лазер излучает мощность до 10 кВт. Данные лазеры обладают большим КПД, составляющим 15-20% при теоретическом КПД  $\sim 40\%$ .  $\text{CO}_2$  - лазеры эффективно действуют и в импульсном режиме.

Одним из основных условий работы  $\text{CO}_2$  - лазера является недопустимость нагрева лазерной смеси выше температуры 600-700 К из-за ухудшения условий расселения нижнего лазерного уровня, а следовательно, необходимо ее эффективное охлаждение. Отвод тепла от рабочей смеси лазера может осуществляться либо за счет диффузии тепла к охлаждаемой стенке разрядной трубки, либо путем замены нагретой порции газа на новую. Поэтому по способу охлаждения рабочей смеси газоразрядные  $\text{CO}_2$  - лазеры принято делить на лазеры с диффузионным и конвективным охлаждением.

Принцип диффузионного охлаждения рабочей смеси газового лазера заключается в отводе тепла, выделяющегося в процессе лазерной генерации, вследствие процесса молекулярной теплопроводности газа к охлаждаемым стенкам трубки или камеры.

$\text{CO}_2$  - лазер с диффузионным охлаждением рабочей смеси (рис. 1.34) состоит из охлаждаемой водой разрядной трубки 1, внутри которой с помощью системы электродов 2 создается газоразрядная плазма 4. По торцам разрядной трубки размещаются зеркала резонатора: глухое вогнутое 7 и полупрозрачное выходное 8 из GaAs, расположенное под углом Брюстера.

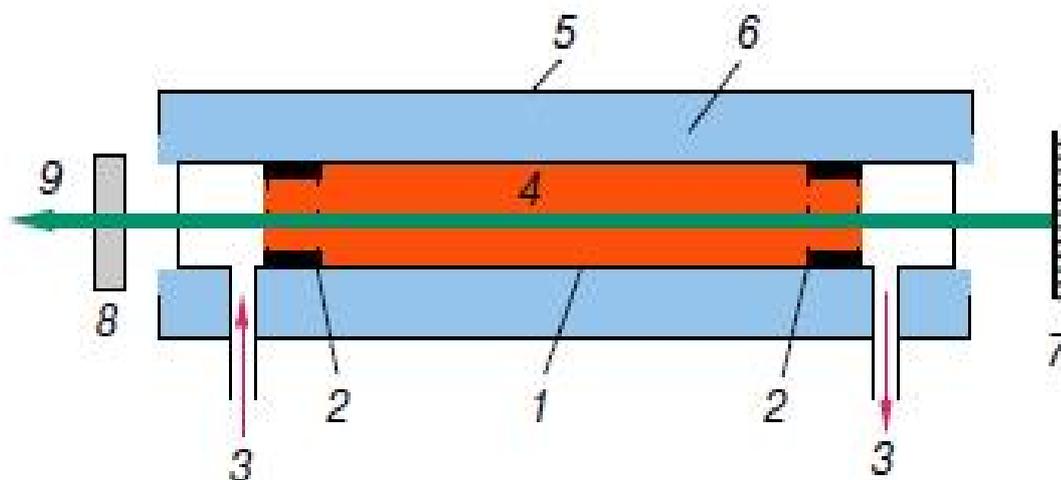
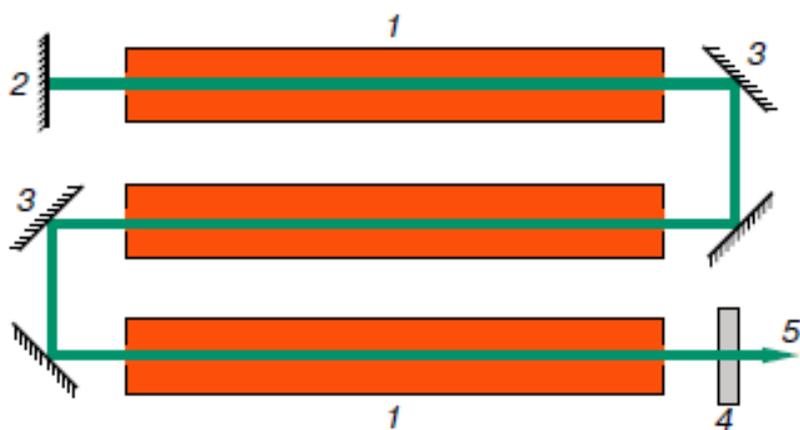


Рис. 1.34. Схема  $\text{CO}_2$  лазера с диффузионным охлаждением

В электрическом разряде в углекислом газе происходит диссоциация молекул  $\text{CO}_2$  с образованием молекул  $\text{CO}$  и атомов кислорода. Последние могут химически связываться материалами электродов и поглощаться стеклом. В результате концентрация молекул  $\text{CO}_2$  уменьшается и генерация срывается. В отпаянных лазерах стабильность усилительных свойств среды в течение длительного времени поддерживается размещением внутри лазера регенерирующего элемента, являющегося обычно источником кислорода, который инициирует реакцию взаимодействия молекул  $\text{CO}$  с кислородом с образованием исходных молекул  $\text{CO}_2$ . В диффузионных лазерах, как правило, используется смесь  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$  в соотношении, близком к 1:1:3 или 1:1:6.

Основным фактором, ограничивающим объемный энерговыход в диффузионных  $\text{CO}_2$  лазерах, является охлаждение рабочей смеси. Практически в 1 м длины трубки нельзя вкладывать мощность более 1 киловатт. Поэтому излучение с одного метра трубки составляет обычно величину порядка 100 Вт. Чтобы не выходить за разумные пределы длины лазера, например 2 м, для получения мощностей излучения в несколько сотен Вт, в резонатор включают последовательно несколько трубок (рис. 1.35).

Отпаянные  $\text{CO}_2$  лазеры имеют выходную мощность до нескольких сотен Вт при сроке службы порядка 10 000 часов.



*Рис. 1.35. Последовательное включение нескольких разрядных трубок в резонатор. 1 – трубки; 2 – глухое зеркало; 3 – поворотные зеркала; 4 – выходное полупрозрачное зеркало; 5 – выходящее излучение*

Внешний вид отпаянных  $\text{CO}_2$  лазеров показан на рис. 1.36.



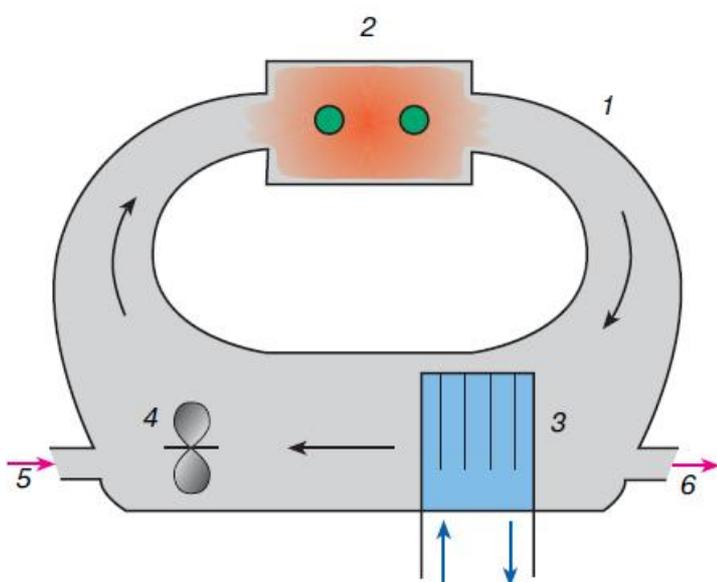
*Рис. 1.36. Внешний вид отпаянных лазеров на молекулах  $\text{CO}_2$*

В лазерах мощностью более нескольких сотен ватт диффузионное охлаждение не может обеспечить эффективное охлаждение среды, поэтому используется прокачка рабочих газов через разрядный объем.

В конвективных лазерах с продольной прокачкой стабилизация разряда, как правило, тоже осуществляется диффузией заряженных частиц к стенкам трубки, но поток выделяющегося в разряде тепла уносится газом. В лазерах с поперечной прокачкой стабилизация разряда, как и охлаждение рабочей смеси, обеспечивается за счет

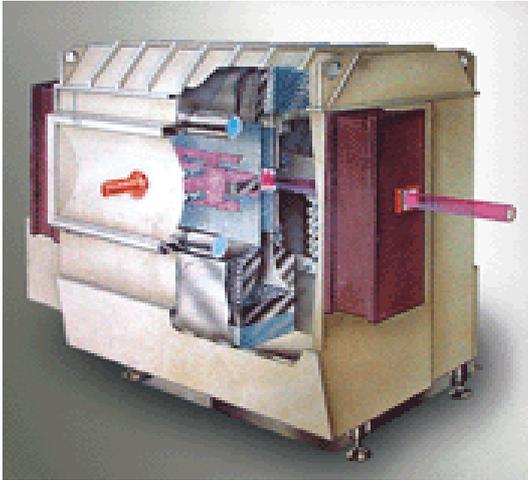
выноса газа из зоны возбуждения; при этом за время прохождения газом зоны возбуждения неустойчивость разряда развиваться не успевает. Для экономии газов их смесь прокачивают по замкнутому контуру (рис. 1.37). Смесь в контуре медленно обновляют для обеспечения стабильности ее химического состава. Наиболее высокие выходные мощности дают лазеры с поперечной прокачкой, удельный энергосъем в которых может достигать десятков кВт/м.

Наибольшее применение в технологии находят лазеры с мощностью от 1 до 10 кВт, но с высоким качеством излучения (одномодовый луч с малой угловой расходимостью, позволяющий добиться острой фокусировки).



*Рис. 1.37. Схема быстропроточного лазера на замкнутом цикле: 1 – газовый контур; 2- разрядная камера; 3 – теплообменник; 4 – вентилятор; 5 – медленный напуск свежей смеси; 6 – медленная откачка отработанной смеси*

Внешний вид и характеристики одного из типов технологического проточного CO<sub>2</sub> лазера приведены ниже (рис. 1.38).



Технологический  $\text{CO}_2$ -лазер МАКСИМ-2 предназначен для промышленного применения. Замкнутый газовый контур с регенератором газовой смеси обеспечивает возможность непрерывной работы лазера в течение восьми часов. Система автоматизированного контроля позволяет контролировать выходные параметры лазера в режиме реального времени.

Длина волны излучения, мкм	10,6
Средняя мощность излучения, кВт	до 10
Частота следования импульсов, Гц	до 200
Длительность импульса, мкс	от 10 до 20
Расходимость излучения, мрад	1,5
Потребляемая мощность, кВт	100
Габариты (без системы питания), м	2×2×1,5

*Рис. 1.38. Внешний вид и характеристики одного из типов технологического проточного  $\text{CO}_2$  лазера*

### **1.5.13. Химические лазеры**

Инверсия населенности уровней обусловлена неравновесным распределением энергии химической реакции по степеням свободы молекул продукта. Для создания химических лазеров используют реакции, скорость которых превышает скорость установления равновесного распределения выделяющейся энергии. Как правило, это реакции с участием химически активных атомов или радикалов. Среди них особое место занимают цепные и разветвленные цепные реакции, в которых химически активные центры (атомы и свободные радикалы) воспроизводятся (в разветвленных реакциях - размножаются) в ходе реакции. Для создания некоторого

начального числа активных центров (инициирования цепной реакции) необходимо затратить энергию. Поэтому чем больше длина цепи реакции, тем большее количество химической энергии переработается в лазерное излучение и тем меньшую роль будут играть затраты энергии на создание активных центров. При этом решающее значение имеет хемолазерная длина цепи, определяемая как отношение скорости продолжения цепи к скорости релаксации возбужденных молекул, используемых для генерации когерентного излучения (но не к скорости гибели активных центров). Чем больше хемолазерная длина цепи, тем выше эффективность лазера по отношению к затратам энергии на инициирование реакции. Начальная концентрация активных центров может быть создана с помощью нехимических видов энергии либо чисто химическим способом, например, в результате термодиссоциации молекул газовой смеси, нагреваемой до высокой температуры за счет энергии протекающей в ней химической реакции, или путем использования разветвленной цепной реакции.

На рис. 1.39 показана схема фтор-водородного лазера с нехимическим инициированием.

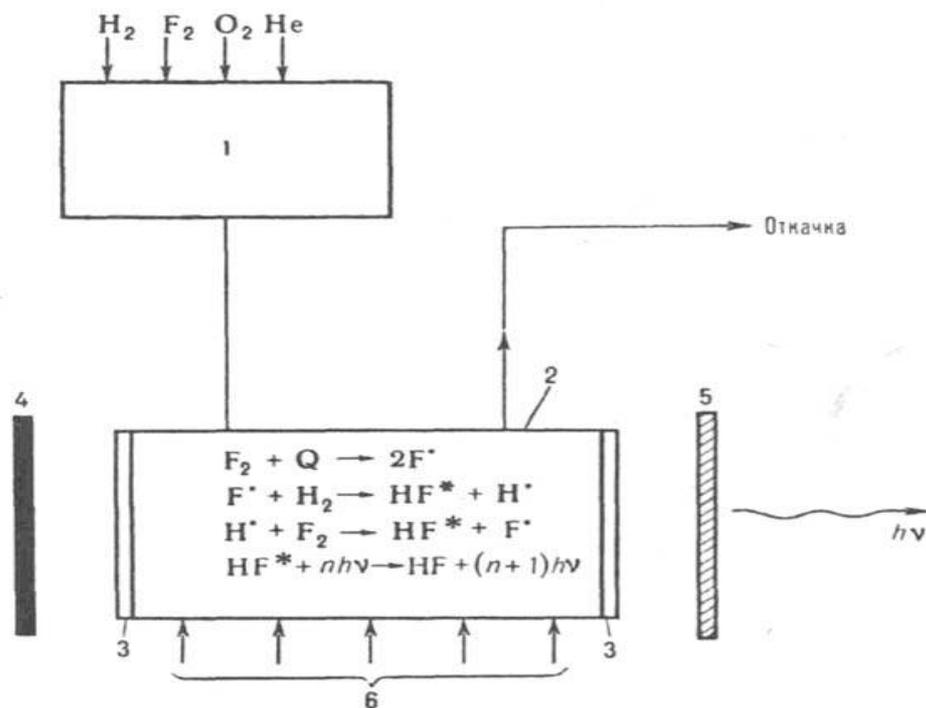


Рис. 1.39. Схема фтор-водородного лазера с нехимическим инициированием: 1 - смеситель; 2 - активная зона (реактор); 3 - окна для выхода излучения; 4 и 5 - зеркала (непрозрачное и частично отражающее); 6 - иницирующий агент Q (УФ излучение или пучок электронов)

Из смесителя 1 (рис. 1) рабочая смесь поступает в реактор 2, где под действием УФ облучения или пучка электронов (инициирующий агент) инициируется быстрая молекулярно-радикальная реакция, высвобождающая запасенную в смеси энергию в виде короткого импульса когерентного излучения. При одной и той же степени инициирования чем больше хемолазерная длина цепи реакции, тем выше энергия лазерного импульса. Наиболее употребительны смеси, содержащие молекулярные фтор и водород (дейтерий), стабилизированные кислородом. Эти смеси обладают наибольшей хемолазерной цепью. Генерирующими молекулами в них являются колебательно - возбужденные  $\text{HF}^*$  ( $\text{DF}^*$ ). На рис. 1.40 представлена схема химического лазера с чисто химическим способом инициирования, работающего на основе нецепной реакции атомарного фтора с молекулярным водородом (или дейтерием).

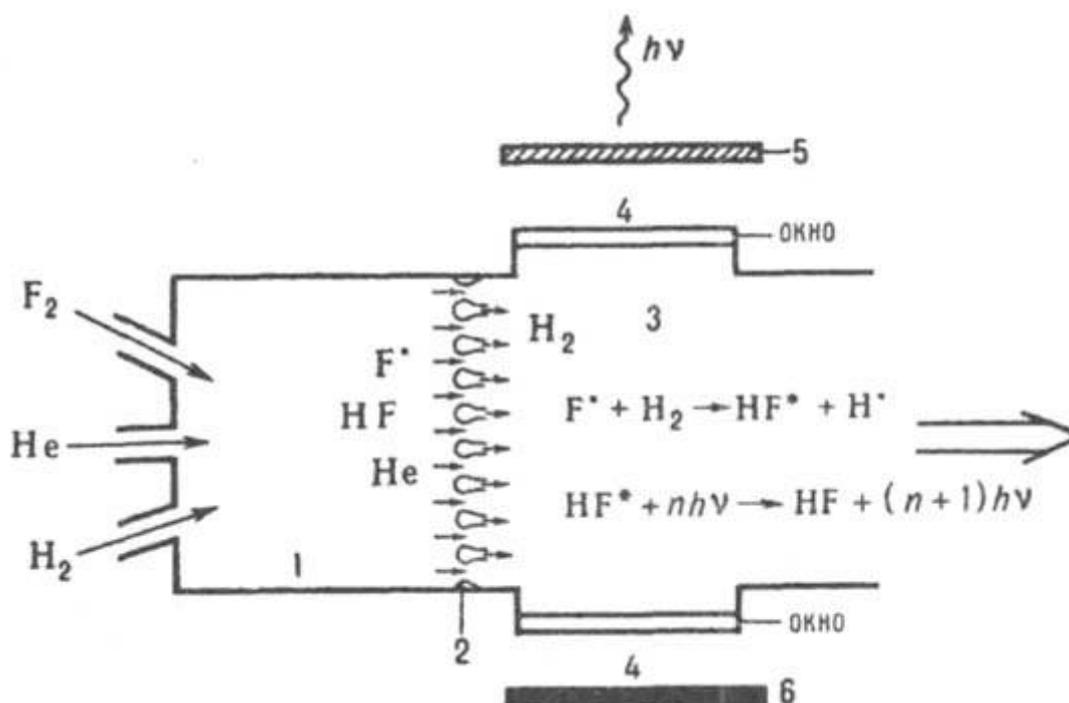


Рис. 1.40. Схема фтор-водородного лазера с химическим инициированием (термодиссоциацией); 1 - камера сгорания; 2 сопловый блок; 3 активная зона (реактор); 4 - окна для выхода излучения; 5 и 6 - зеркала

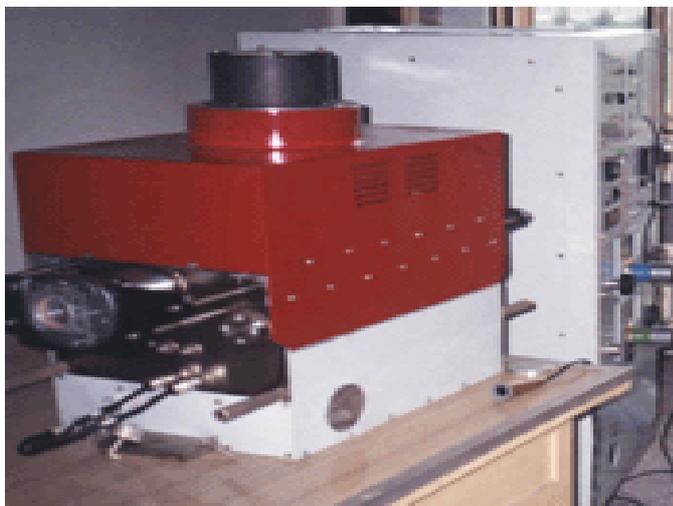
Активные центры - атомы фтора - нарабатываются в камере сгорания в результате тепловой диссоциации избыточного  $\text{F}_2$ , который одновременно служит окислителем горючего. Из камеры сгорания 1 атомарный фтор выпускается через сопловую решетку 2,

в которой он разгоняется до сверхзвуковых скоростей и разбивается на мелкие струи для эффективного смешения с  $H_2$ , который подается в активную зону лазера. Реакция между атомарным фтором и водородом приводит к образованию колебательно - возбужденных молекул  $HF^*$ , которые генерируют излучение с длиной волны в диапазоне 2,7-3,2 мкм. Замена водорода дейтерием дает возможность получить когерентное излучение в диапазоне длин волн 3,8 - 4,2 мкм. Высокая температура в камере сгорания ( $\sim 1800$  K) позволяет создать высокоскоростной сверхзвуковой поток реагентов, что увеличивает мощность лазера. Гелий выполняет роль газа-разбавителя, препятствующего повышению температуры в лазерной зоне, срыву генерации и тепловому запираению сверхзвукового потока. При непрерывной подаче и откачке компонентов такие химические лазеры работают в непрерывном режиме. Решающим обстоятельством при их создании является разделение в пространстве процессов наработки химически активных центров и получения возбужденных частиц, генерирующих излучение. Высокотемпературную камеру сгорания можно заменить низкотемпературной, если использовать цепную реакцию фтора с дейтерием. Атомарный фтор для инициирования цепного процесса нарабатывается при низкотемпературной реакции  $NO + F_2 = F + NOF$ , начинающейся сразу при смешении их потоков. Истечение газов из камеры инициирования в лазерную зону происходит с дозвуковой скоростью, хотя возможны и сверхзвуковые варианты. Генерирующая молекула -  $CO_2$ , которая возбуждается путем передачи колебательной энергии от  $DF^*$ . Возбужденная молекула  $CO_2$  релаксирует медленнее, чем  $DF^*$ , что обеспечивает большую хемолазерную длину цепи. Замена дейтерия на водород приводит к снижению генерируемой мощности, т. к.  $HF^*$  передает энергию  $CO_2$  менее эффективно, чем  $DF^*$ . По своим мощностным и энергетическим показателям фторводородные химические лазеры импульсного и непрерывного действия пока не имеют равных. Среди других типов химических лазеров следует отметить кислород-йодный лазер, в котором генерирующая частица - атомарный йод в состоянии  $^3P_{1/2}$ . Возбуждается он в это состояние путем передачи энергии от молекул  $O_2$  в возбужденном синглетном состоянии, которые образуются при реакции  $Cl_2$  с водным

раствором  $\text{H}_2\text{O}_2$  и  $\text{NaOH}$ . Длина волны генерируемого когерентного излучения 1,315 мкм.

Химические лазеры широко применяют в научных экспериментах в химической кинетике, лазерной химии и спектроскопии. Это обусловлено прежде всего тем, что в диапазоне длин волн, равных 3-4 мкм, нет других достаточно интенсивных источников когерентного излучения. Спектр излучения фтор-водородных и кислород-йодных лазеров перекрывает диапазон поглощения огромного числа различных молекул. Возможность генерации большого набора частот в одном лазерном импульсе делает эти лазеры перспективными для создания систем диагностики и контроля состава газовых смесей, в том числе дистанционных локаторов состава и состояния атмосферы - лидаров.

Ниже приведен внешний вид одного из типов химических лазеров (рис. 1.41).



*Рис. 1.41. Внешний вид одного из типов химических лазеров*

Импульсно-периодический электроразрядный нецепной химический HF/DF-лазер с замкнутым газодинамическим контуром предназначен для генерации когерентного излучения в среднем инфракрасном диапазоне спектра. Компоненты газовой смеси -  $\text{SF}_6$ ,  $\text{H}_2$  ( $\text{D}_2$ ) не токсичны, не агрессивны, продукты реакции поглощаются в газодинамическом контуре, давление в котором меньше атмосферного, что обеспечивает экологическую чистоту и безопасность эксплуатации. Области применения:

- научные исследования;

- контроль загрязнения атмосферы окисными, агрессивными, взрывоопасными веществами (HF, HCl, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, ...);
- микрохирургия;
- реставрация произведений искусства.

#### **Параметры HF-лазера**

Спектральный диапазон генерации 2,6 - 3,0 мкм

Энергия генерации в моноимпульсе 70 мДж

Длительность импульса генерации 50 - 150 нс

Частота повторения импульса 150 Гц

Средняя мощность излучения 7 Вт

Расходимость излучения 3 мрад

Длительность непрерывной работы > 10 мин

Продолжительность замены рабочей смеси > 10 мин

Потребляемая мощность 1,5 кВт

Масса излучателя 100 кг

Масса технологического блока 200 кг

#### ***1.5.14. Газодинамические лазеры***

Активное вещество газодинамического лазера представляет собой смесь азота и двуокиси углерода. Инверсная населенность энергетических уровней в этом лазере создается за счет дифференцированной колебательной релаксации, вызываемой столкновением молекул в процессе сверхзвукового расширения газа. Согласно теоретическим расчетам, газодинамические лазеры способны создавать непрерывное лазерное излучение мощностью в несколько сотен тысяч киловатт в области инфракрасного излучения.

В газодинамическом лазере применяется тепловая накачка за счет сгорания окиси углерода и реактивный принцип истечения активного вещества. Лазерная камера напоминает по внешнему виду камеру сгорания реактивного двигателя. Она снабжена сужающимся и расширяющимся соплом, назначение которого состоит в получении за соплом пониженных температур и давления газа в целях создания инверсной населенности энергетических уровней.

Принцип работы газодинамического лазера основан на расширении газовой смеси и резком снижении ее температуры и

давления за время, гораздо меньшее, чем это требуется для протекания процессов колебательной релаксации верхнего энергетического уровня лазерной системы.

Принцип действия газодинамических лазеров на углекислом газе показан на рис. 1.42.

В смесительной камере 1 лазера находится смесь нагретых газов (углекислого газа – 75%, азота – 22% и водяных паров – 3%). Поскольку в процессе генерации газовая смесь должна постоянно истекать из камеры, то для такого истечения газов могут быть использованы различные способы, и в частности нагревание в газообменном аппарате, сжигание соответствующего топлива и т.д.

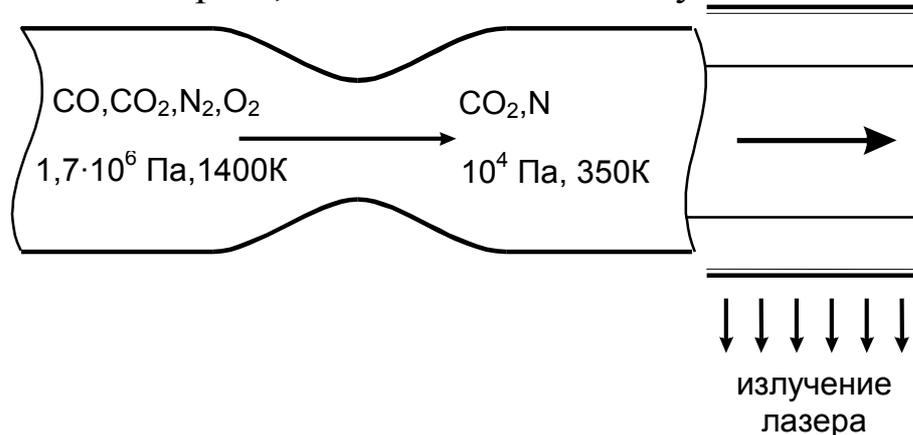


Рис. 1.42. Схема газодинамического лазера на молекулах  $CO_2$

Возбужденные молекулы азота передают колебательную энергию молекулам углекислого газа. Давление и температура в смесительной камере достигают соответственно 1,7 МПа (17 атм) и 1400 К. Скорость истечения смеси газов за соплом составляет 1360 м/с, в результате чего в лазерной камере (область расширения сопла) давление и температура понижаются соответственно до 104 Па (0,1 атм) и 350 К. Вытекающие газы поступают в область генерации, которая находится вне камеры лазера. Температура и давление газовой смеси падают настолько быстро, что энергия колебаний стимулированных молекул "замораживается" в состоянии высокой энергии. Вследствие этого повышается инверсная населенность уровней возбужденных молекул азота в области расширения сопла при сохранении ими энергии колебаний, которой они обладали при первоначальной температуре "замороженного" газового потока до сопла (1400 К).

При дальнейшем снижении давления возбужденные молекулы азота сталкиваются с молекулами углекислого газа и передают им

свою энергию колебаний. Получившие энергию возбужденные молекулы углекислого газа создают когерентное монохроматическое излучение на волне 10,6 мкм.

Генерация лазерного излучения происходит в области оптического резонатора, состоящего из плоских медных зеркал. В газодинамических лазерах зеркала оптического резонатора нуждаются в интенсивном охлаждении из-за довольно большого коэффициента поглощения излучения медных зеркал. Таким образом, в объемном оптическом резонаторе лазера путем возбуждения молекул углекислого газа генерируется излучение с длиной волны 10,6 мкм в режиме непрерывного излучения. Первый газодинамический лазер развивал мощность генерации в непрерывном режиме около 60 кВт. Существуют газодинамические лазеры, мощность которых превышает 200 кВт.

Газодинамические лазеры имеют сравнительно низкий КПД, который в настоящее время достигает 10 – 15%. Это объясняется неэффективностью первоначального нагревания газовой среды. Одним из способов повышения КПД газодинамических лазеров является применение замкнутого цикла, при котором отработавшая (но еще горячая) газовая смесь возвращается обратно в камеру сгорания или другой источник нагревания.

К недостаткам газодинамических лазеров следует также отнести их большие габариты, потребление большого количества горючего, сильный шум при работе, что отрицательно сказывается на обслуживающем персонале.

Дальнейшим развитием газодинамических лазеров являются электроаэродинамические лазеры, в которых накачка осуществляется с помощью дугового разряда. КПД таких лазеров достигает 30%, а выходная мощность – до 100 кВт.

### ***1.5.15. Электроионизационные лазеры***

Накачка в таком лазере создается с помощью электронного пучка высокой энергии (>100 кэВ), вводимого в активную среду через тонкую алюминиевую фольгу. В качестве активной среды обычно используется смесь азота и углекислого газа. В этих лазерах достигается очень высокая энергия в импульсе при КПД до 50%.

### 1.5.16. Полупроводниковые лазеры

Полупроводниковые лазеры на кристалле GaAs были созданы в 1962 в лабораториях Р. Холла, М. И. Нейтена и Н. Холоньяка (США). Основным элементом полупроводникового лазера – *p-n* переход. Действие лазера основано на том, что при прямом смещении электроны инжектируются в *p*-область, где происходит их излучательная рекомбинация с имеющимися там дырками. Для создания состояния с инверсией населенностей необходима большая концентрация дырок в валентной зоне, что достигается увеличением концентрации легирующей акцепторной примеси. Для того чтобы инжекция электронов в *p*-область превышала инжекцию дырок в *n*-область (где рекомбинация безызлучательная, а, следовательно, ток дырок в *n*-область целиком относится к потерям), необходимо, чтобы концентрация донорной примеси в *n*-области была выше концентрации акцепторной примеси в *p*-области. Таким образом, для получения состояния с инверсией населенностей в *p*-области необходима высокая степень легирования примесями обеих областей *p-n*-перехода. Инверсия населенностей достигается при большой плотности прямого тока через диод (порог генерации соответствует плотности тока 1-4 кА/см<sup>2</sup>, а при пониженной температуре ~ 10<sup>2</sup> А/см<sup>2</sup>).

Излучателем является узкая часть *p*-области, прилегающая к *p-n*-переходу. Конструкция лазерного диода показана на рис.1.43. Зеркалами являются гладкие грани самого полупроводникового кристалла, получаемые обычно скалыванием его краев. Вынужденное излучение происходит параллельно *p-n*-переходу (рис.1.43). Типичными размерами лазерного кристалла являются (мкм):

длина 100 – 500, ширина 200 – 400, высота 80 – 100, толщина области рекомбинации 1 – 3.

Изменяя состав активной среды можно варьировать длину волны излучения в широком интервале. Меньшую перестройку длины волны в данном материале можно осуществлять за счет изменения температуры, давления, напряженности магнитного поля.

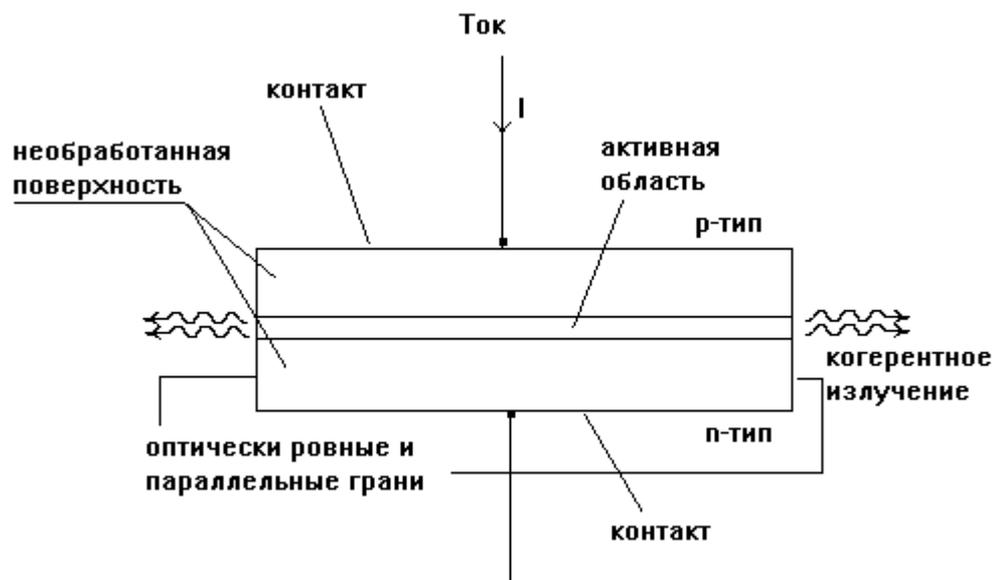


Рис.1.43. Схематическое изображение полупроводникового (инжекционного) лазера

Материалом для полупроводниковых лазеров могут быть соединения типа:  $A^3B^5$  (GaN, GaSb, InP, GaInAs, и т. д.)  $A^4B^4$  (PbS, PbTe, PbSSe, и т. д.)  $A^2B^6$  (ZnO, CdS, ZnCdS и т. д.)  $A^3B^6$  (GaSe, InSe и т. д.).

В таблице 1.5 приведены данные по длинам волн излучения инжекционных лазеров на материалах группы  $A^3B^5$ .

Таблица 1.5

Материал	Примесь или состав	Цвет свечения	Максимум	$h_{вн}$
GaAs	Si	ИК	950	12 – 50
GaAs	Zn	ИК	900	12 – 50
GaP	ZnO	Красный	690	7
GaP	N	Зеленый	550	0.7
$GaAs_{1-x}P_x$	$x = 0.39$	Красный	660	0.5
$GaAs_{1-x}P_x$	$x = 0.5 – 0.75$	Янтарный	610	0.04
$Ga_{1-x}Al_xAs$	$x = 0.05 – 0.1$	ИК	800	12
$Ga_{1-x}Al_xAs$	$x = 0.3$	Красный	675	1.3
$In_{1-x}Ga_xP$	$x = 0.58$	Красный	659	0.2
$In_{1-x}Ga_xP$	$x = 0.6$	Янтарный	617	0.1
$In_{1-x}Ga_xP$	$x = 0.6$	Желто-зеленый	570	
GaN		Синий	410	0.03

В пределах участка непрерывной перестройки частоты инжекционный лазер характеризуется очень высоким спектральным разрешением. Ширина линии достигает  $10^{-5}$  -  $10^{-6}$  см. Мощность излучения в многомодовом режиме составляет несколько милливатт, в одномодовом режиме около 0.1 - 1 мВт. Созданы промышленные полупроводниковые лазеры мощностью несколько Вт и интегральные лазерные решетки мощностью десятки и сотни Вт. Одна из важных проблем полупроводниковых лазеров - создание приборов для коротковолнового диапазона. В настоящее время созданы лазеры для синей области спектра на основе нитрида галлия, материалов группы  $A^2B^6$ . Следует отметить, что в последнем случае имеются значительные трудности при создании *n-p*-перехода, и лазерные диоды реализуются на переходе полупроводник-металл (диоды Шотки).

Инжекционные лазеры по сравнению с другими типами лазеров отличаются высоким КПД (теоретически до 80%), простотой возбуждения, малыми размерами, низким напряжением накачки, высокой надежностью. В настоящее время разработаны и широко внедряются лазеры на материалах GaAs с присадками In, P и др. с  $\lambda = 1,3$  и  $1,6$  мкм, попадающие в окна прозрачности оптического кварца. Уменьшением ширины полоски лазеров с полосковой геометрией удалось довести пороговый ток до 50 мА, КПД до 60 % (величина, рекордная для всех видов существующих в настоящее время лазеров).

С целью уменьшения пороговой плотности тока были реализованы лазеры на гетероструктурах (с одним гетеропереходом — *n-GaAs-p-Ge*, *p-GaAs-n-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As*; с двумя гетеропереходами — *n-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As - p-GaAs - p<sup>+</sup>-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As*. Использование гетероперехода позволяет реализовать одностороннюю инжекцию при слаболегированном эмиттере лазерного диода и существенно уменьшить пороговый ток.

Инжекционные лазеры на гетеропереходе (появились в 1968) представляют собой, например, двусторонние гетероструктуры (рис. 1.44). Активный слой (GaAs) заключён между двумя полупроводниковыми гетеропереходами, один из которых (типа *p-n*) служит для инжекции электронов, а второй (типа *p-p*) отражает инжектированные электроны, препятствуя их диффузионному растеканию из активного слоя (электронное ограничение). При

одинаковом токе накачки в активном слое гетероструктуры достигается большая концентрация электронно-дырочных пар и, следовательно, большее оптическое усиление, чем в полупроводниковых лазерах на  $p-n$ -переходах. Другое преимущество гетероструктуры состоит в том, что образованный активным слоем диэлектрический волновод удерживает излучение, распространяющееся вдоль структуры, в пределах активного слоя (оптическое ограничение), благодаря чему оптическое усиление используется наиболее эффективно. Для полупроводниковых лазеров на гетеропереходе необходимая плотность тока при  $T = 300$  К более чем в 10 раз ниже, чем у полупроводниковых лазеров на  $p-n$ -переходе, что позволяет осуществить непрерывный режим генерации при температуре до 350 К.

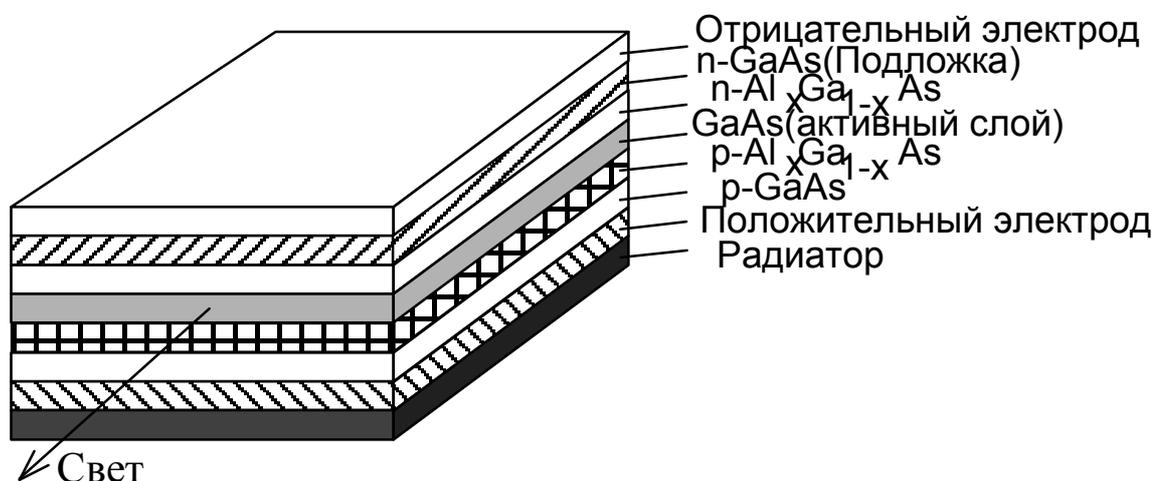


Рис. 1.44. Схема инжекционного лазера на гетеропереходах

В настоящее время созданы полупроводниковые лазеры на основе структур со сверхрешеткой. Такие приборы называются гетеролазерами с квантовыми ямами. Изготавливаются на основе структуры  $\text{Al}(x)\text{Ga}(1-x)\text{As} - \text{GaAs}$  методом химического вакуумного осаждения из металлоорганических соединений. Преимущество лазеров с квантовыми ямами состоит в высокой квантовой эффективности, низком пороговом токе (1 мА и менее) и слабой чувствительности к изменениям температуры.

Инжекционные лазеры находят широкое применение в медицине (терапия, хирургия, онкология, офтальмология, косметология и т.д.), для накачки твердотельных лазеров, в том числе волоконных,

для обработки материалов, в полиграфии, системах беспроводной оптической связи, датчиках и охранных системах, автоматике и робототехнике, спектроскопии, научных исследованиях.

На рис. 1.45 приведен внешний вид одного из типов полупроводниковых инжекционных лазеров.



Рис. 1.45. Внешний вид одного из типов полупроводниковых инжекционных лазеров

Определенный интерес представляют полупроводниковые лазеры с накачкой электронным пучком высокой энергии. Генерация при бомбардировке быстрыми электронами наблюдается во многих полупроводниках. Так, CdS дает зеленое свечение, CdSe – красное, ZnSe – голубое. В ближней ИК области перспективны GaAs и CdTe. Конструктивно полупроводниковые лазеры с электронным возбуждением выполняются в виде электронно-лучевой трубки с полупроводниковым материалом в качестве экрана-мишени. По сравнению с инжекционной накачкой возбуждение электронным лучом имеет следующие достоинства:

- высокие мощности излучения благодаря возбуждению значительной толщины кристалла;
- возможность использования широкого ряда полупроводниковых материалов, так как в этом типе лазеров не требуется *n-p* переход;
- простота двухкоординатного сканирования и высокая скорость модуляции;

- возможность управляемой перестройки длины волны излучения, многоцветность, которую можно реализовать при использовании варизонных полупроводников.

Недостатки лазеров с возбуждением электронным лучом во многом те же, что и у электронно-лучевой трубки: наличие вакуумированного объема, значительные габариты, сложность и громоздкость систем питания. Тем не менее, для проекционного телевидения, для решения ряда задач оптоэлектроники (сверхскоростные системы ввода информации, быстродействующие голографические запоминающие устройства) лазер с электронным возбуждением может оказаться наиболее эффективным.

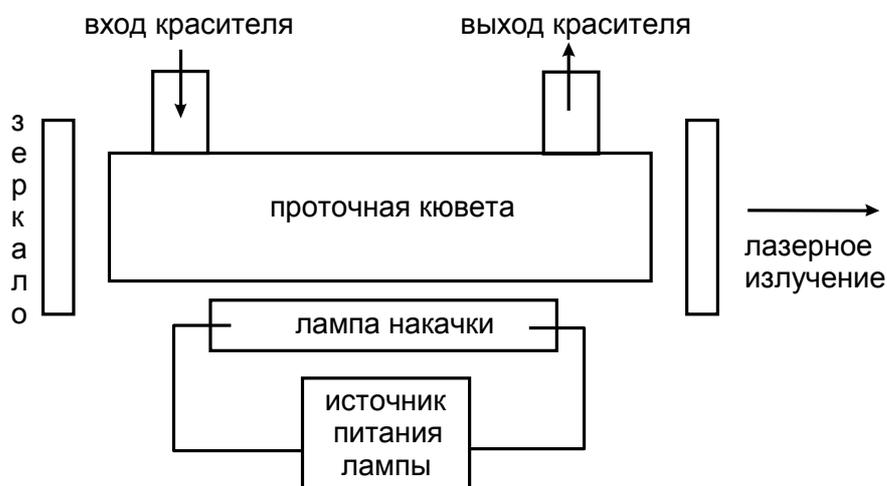
### ***1.5.17. Жидкостные лазеры***

В жидкостных лазерах вынужденное излучение возникает на флуоресцентном переходе в молекулах органического красителя. Концентрация красителя составляет 0,005 – 0,0001 моль/л. Используются такие красители, как кумарен, родамины и др.

Электронные состояния красителей имеют многочисленные колебательные и вращательные уровни, которые за счет взаимодействия друг с другом и соседними молекулами (растворителя) так сильно уширены, что переходы между электронными состояниями в спектре флуоресценции образуют широкие полосы.

Создание инверсии населенностей происходит с помощью оптической накачки. В качестве мощного источника света используют либо импульсные лампы, либо лазеры (азотные, Nd-ИАГ, ионные, полупроводниковые) (рис. 1.46).

Лазеры на красителях генерируют электромагнитное излучение в спектральном диапазоне от 0,32 до 1,22 мкм. КПД этих лазеров порядка 1%. Обычно жидкостные лазеры работают в импульсном режиме. Наиболее важным свойством лазеров на красителях является возможность перестройки частоты излучения в широких пределах (с одним красителем несколько десятков нм). Более широкая перестройка частоты может осуществляться изменением состава, концентрации и температуры раствора.



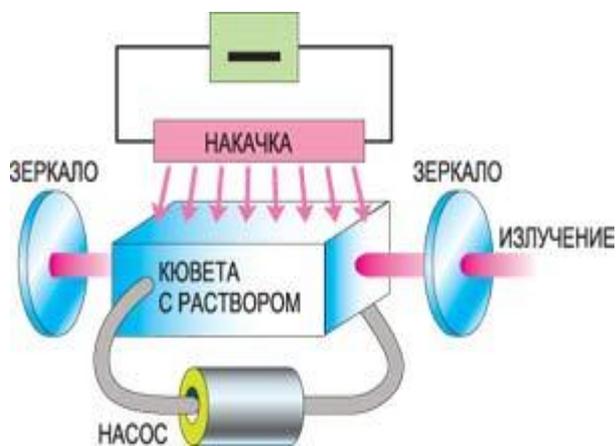
*Рис. 1.46. Примерная конструкция жидкостного лазера*

Так как большинство лазеров на красителях обладают исключительно высоким коэффициентом усиления малого сигнала, требуется лишь небольшой объем активной среды. Однако поглощение интенсивного излучения и последующий нагрев малого объема красителя, а также быстрое заселение триплетного состояния приводят к необходимости непрерывной и быстрой замены вещества в рабочем объеме. Если этого не делать, происходит термическое разложение красителя, что увеличивает, в свою очередь, потери излучения в системе. Для предотвращения разложения красителя жидкостные лазеры обычно работают в проточном режиме.

Схема проточного жидкостного лазера и его внешний вид показаны на рис. 1.47.

Достоинства жидкостных лазеров: возможность перестройки частоты; малая расходимость излучения; высокая степень пространственной когерентности.

Недостатки: малый КПД; малая монохроматичность; низкая степень временной когерентности. Большая ширина линии генерации может быть отнесена и к достоинствам с точки зрения использования их в режиме синхронизации мод: таким образом, получены световые импульсы длительностью около 1 пс.



Жидкостный лазер на красителях. Справа - насос, прокачивающий жидкость через холодильник.

*Рис. 1.47. Схема проточного жидкостного лазера и его внешний вид*

### Контрольные вопросы

1. В чем отличия между спонтанным и вынужденным излучением?
2. Как связаны друг с другом коэффициенты спонтанного и вынужденного излучения и поглощения?
3. Что называется инверсной населенностью и почему она необходима для получения усиления в квантовой системе?
4. От каких факторов зависит пороговая инверсная населенность для излучения?
5. Чем характеризуется усиление сигнала в инверсной среде?
6. От каких факторов зависит ширина спектральной линии?
7. Как оценить естественную ширину спектральной линии?
8. Назовите основные элементы лазера.
9. Назовите и кратко охарактеризуйте основные способы накачки.
10. Каким методом можно получить инверсную населенность в двухуровневой системе?
11. Сформулируйте условия получения максимального уровня инверсии в трехуровневой системе.

12. Почему в четырехуровневой системе можно получать инверсную населенность при минимальном уровне накачки?
13. Укажите условия возникновения генерации излучения в квантовой системе.
14. Что такое насыщение усиления и как оно проявляется?
15. Что такое добротность оптического резонатора?
16. Укажите виды потерь энергии в резонаторе. Какие виды потерь являются полезными.
17. Проведите сравнение свойств плоских и сферических резонаторов.
18. Опишите процесс формирования гигантского импульса в режиме модуляции добротности.
19. Укажите основные методы модуляции добротности.
20. Рассмотрите режим синхронизации мод, укажите причины получения коротких мощных импульсов.
21. Как влияет синхронизация мод на среднюю мощность излучения и почему?
22. Рассмотрите картину развития импульсов излучения при прямоугольном импульсе накачки.
23. Почему ширина линии лазерного излучения может быть меньше естественной ширины линии?
24. Что такое когерентность излучения, и для каких областей применения лазеров она важна?
25. Как можно экспериментально наблюдать когерентность излучения лазера?
26. Какими факторами определяется расходимость лазерного излучения?
27. Что является минимальным пределом диаметра лазерного пучка?
28. Почему плотность мощности излучения лазеров может достигать очень больших величин?
29. Укажите основные параметры и особенности следующих лазеров:
  - рубинового;
  - на неодимовом стекле;
  - на алюмоиттриевом гранате;
  - гелий-неонового;

- на смеси углекислый газ – азот – гелий;
  - газодинамического;
  - химического;
  - на парах металлов;
  - ионно – аргоновых;
  - азотного;
  - эксимерных;
  - полупроводниковых;
  - на красителях.
30. Укажите активные ионы в лазерах на рубине, алюмоиттриевом гранате и неодимовом стекле.
  31. Чем отличаются лазеры на алюмоиттриевом гранате и неодимовом стекле.
  32. В чем состоит принцип действия волоконных лазеров?
  33. Назовите положительные свойства волоконных лазеров.
  34. Укажите функции гелия в гелий-неоновом лазере.
  35. Почему лазеры на парах меди могут работать только в импульсном режиме?
  36. На каких переходах молекул углекислого газа происходит генерация?
  37. Почему активная среда лазера на углекислом газе содержит азот и гелий?
  38. Укажите, в смесях каких газов при разряде могут образовываться эксимерные молекулы.
  39. Проанализируйте схему потенциальных кривых одной из эксимерных молекул.
  40. Сформулируйте принцип работы полупроводникового лазера.
  41. С чем связаны трудности создания полупроводниковых лазеров в синей области спектра?
  42. В чем состоит основное достоинство жидкостных лазеров?

## ЗАДАЧИ И ЗАДАНИЯ

### для практических занятий и самостоятельной работы

1. Определить энергию кванта света, имеющего длину волны 632,8 нм; 1,06 мкм; 10,6 мкм; 228 нм; 330 нм.
2. Лазер мощностью 1 мВт излучает свет с длиной волны 632,8 нм. Вычислить поток квантов излучения.
3. Коэффициент поглощения излучения в активной среде составляет  $0,1 \text{ см}^{-1}$ . Во сколько раз уменьшится интенсивность излучения при прохождении пути  $l$  (10 см, 100 см).
4. Сечение поглощения излучения с длиной волны 330 нм хлором составляет  $2 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$ . Во сколько раз уменьшится интенсивность при прохождении расстояния 1 м.
5. Определить коэффициент и сечение поглощения излучения, если сигнал при прохождении расстояния 20 см ослабляется вдвое.
6. Вычислите коэффициент вынужденного излучения  $B$ , если коэффициент спонтанного излучения  $A$  составляет а)  $10^8 \text{ с}^{-1}$ , б)  $10^6 \text{ с}^{-1}$ , в)  $10^4 \text{ с}^{-1}$ .
7. Во сколько раз усиливается излучение, если коэффициент усиления составляет а) 0,1 дБ, б) 1 дБ, в) 10 дБ.
8. Интегральный коэффициент усиления системы составляет 10 дБ, выходная мощность 1 мВт. Определить входную мощность.
9. Вероятность перехода  $A_{mn}$  составляет  $2 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ . Определить время жизни частицы в возбужденном состоянии и ширину энергетического уровня.
10. Вычислите естественную ширину спектральной линии и ширину энергетического уровня, если коэффициент спонтанного излучения  $A$  составляет а)  $10^8 \text{ с}^{-1}$ , б)  $10^6 \text{ с}^{-1}$ , в)  $10^4 \text{ с}^{-1}$ .
11. Рассчитайте Доплеровскую ширину спектральной линии неона с длиной волны 632,8 нм при температуре газа 100 °С и сравните ее с естественной шириной.
12. Вычислите столкновительное уширение спектральной линии неона 632,8 нм при давлении газа 400 Па и температуре 400 К, сравните с Доплеровским уширением и естественной шириной спектральной линии.

13. Вычислите столкновительное уширение спектральной линии молекулы углекислого газа с длиной волны 10,6 мкм при давлении газа 105 Па и температуре 400 К, сравните с Доплеровским уширением и естественной шириной спектральной линии.
14. Запишите условия, при которых отношение концентраций частиц на верхнем и нижнем уровне в двухуровневой системе будут равны: а) 0,5; б) 1. Как называется состояние среды в последнем случае?
15. Оцените величину коэффициента поглощения излучения в двухуровневой системе при бесконечной мощности накачки.
16. В трехуровневой системе активным является переход 2 – 1. Укажите:
  - а) каким должно быть время жизни уровня 2 – большим или малым,
  - б) каким должен быть коэффициент Эйнштейна для перехода 1 – 3 – большим или малым, в) какова должна быть скорость перехода 3 – 2 -большой или малой для создания максимального уровня инверсии.
17. Почему в четырехуровневой системе инверсия населенностей достигается при минимальном уровне накачки? Проиллюстрируйте ответ графиком.
18. Как влияет разность энергий уровней 4 – 3 и 2 – 1 на коэффициент полезного действия четырехуровневой лазерной системы?
19. Как влияет добротность резонатора на пороговую инверсную населенность по генерации?
20. Определите добротность резонатора гелий-неонового лазера по отношению к потерям на излучение, если длина активной зоны 40 см, а коэффициент отражения зеркала составляет:
  - а) 0,9; б) 0,6; в) 0,4.
21. Определите соотношения максимальной и минимальной интенсивности интерференционных полос, соответствующих степени когерентности излучения 1; 0,8; 0,5.
22. Определите дифракционный предел расходимости лазерного излучения гелий-неонового лазера, дающего плоский пучок диаметром 3 мм.

23. Определить теоретически возможную ширину спектральной линии и степень монохроматичности излучения гелий-неонового лазера на длине волны 632,8 нм, если мощность излучения составляет 1 мВт, добротность резонатора  $10^8$ .
24. Теоретическая ширина спектральной линии гелий-неонового лазера найдена равной 1 Гц. Определить, с какой точностью нужно стабилизировать длину резонатора, составляющую 1 м, чтобы получить такую ширину линии?
25. Для условий предыдущей задачи, полагая, что материал трубки – кварц, а возможные изменения длины резонатора связаны с колебаниями температуры, определить, с какой точностью нужно стабилизировать температуру для получения ширины линии 1 Гц?
26. Оцените максимальное значение степени когерентности лазерного излучения и сформулируйте условия его получения.
27. Вычислите дифракционный предел расходимости плоского и гауссова пучка излучения гелий – неоновом лазера диаметром 3 мм.
28. Оцените минимально возможное сечение сфокусированного пучка лазерного излучения с длиной волны 500, 1060 и 10600 нм.

## Глава 2. Основы оптоэлектроники

### 2.1. Этапы и перспективы развития оптической электроники

**Оптоэлектроника** представляет собой раздел науки и техники, посвященный генерации, переносу, преобразованию, запоминанию, хранению и отображению информации на основе совместного использования электрических и оптических явлений и процессов. В соответствии с этим определением физическую основу оптоэлектроники составляют процессы преобразования электрических сигналов в оптические и оптических в электрические, процессы распространения излучения в различных средах, эффекты взаимодействия электромагнитных излучений оптического диапазона с веществом.

Оптоэлектроника синтезирует достижения ряда областей науки и техники, среди которых следует отметить физику фотоэлектронных приборов, квантовую и полупроводниковую электронику, светотехнику и ИК технику, волоконную и нелинейную оптику.

Принципиальные достоинства оптоэлектронных приборов и устройств определяются следующими факторами.

1. Высокая информационная емкость оптического канала связи, обусловленная тем, что частота световых колебаний ( $10^{13} - 10^{15}$  Гц) на три – пять порядков величины больше максимальных частот радиотехнического диапазона. Так, если для передачи телевизионного изображения требуется полоса частот 5 МГц, то в метровом диапазоне (около 300 МГц) можно передать около десятка телевизионных программ, а в оптическом в миллион раз больше. Малое значение длины волны световых колебаний обеспечивает высокую плотность записи информации в оптических запоминающих устройствах (порядка  $10^8$  бит/см<sup>2</sup>).
2. Острая направленность светового излучения позволяет концентрированно и с малыми потерями передавать информацию в заданную область пространства, фокусировать лазерный луч на фотоприемник в пределах микронных и субмикронных размеров.

3. Возможность двойной – временной и пространственной модуляции светового потока. Минимальная элементарная площадка в перпендикулярной световому потоку плоскости составляет величину порядка квадрата длины волны ( $10^{-8}$  см<sup>2</sup>). Это открывает огромные возможности для параллельной обработки информации.
4. Передача информации с помощью электрически нейтральных фотонов обеспечивает:
  - отсутствие электрических и механических контактов в системе;
  - идеальную гальваническую развязку входа и выхода;
  - однонаправленность потока информации и отсутствие обратного влияния приемника на источник;
  - возможность создания сильно разветвленных коммуникаций, нагруженных на несогласованные разнородные потребители энергии;
  - невосприимчивость оптических каналов связи к воздействию электромагнитных полей, отсутствие взаимодействия в самих каналах связи – отсюда высокая помехозащищенность, отсутствие взаимных наводок.
5. Возможность непосредственного оперирования с зрительно воспринимаемыми образами, визуализация электрических сигналов.
6. Возможность существенного продвижения в область функциональной микроэлектроники, создания функциональных оптоэлектронных устройств и систем.

Необходимость развития оптоэлектроники связана и с тем, что классическая микроэлектроника не может комплексно решить задачу микроминиатюризации радиоэлектронной аппаратуры. Такие элементы и компоненты, как импульсные трансформаторы, реле контакты, кабели, разъемы, электронно-лучевые трубки и т.д., плохо стыкуются с интегральными микросхемами и отличаются громоздкостью, невысокими эксплуатационными характеристиками, малой надежностью и высокой стоимостью. Именно на долю перечисленных компонентов приходится 90 – 95% объема, массы, потребляемой мощности, числа отказов и стоимости современной РЭА.

Оптоэлектроника открывает реальные пути преодоления этих противоречий. Более того, оптоэлектроника позволяет существенно

повысить быстродействие современных ЭВМ и объемы перерабатываемой информации. Таким образом, оптоэлектроника, начав свое развитие с дополнения и усовершенствования современной микроэлектроники, в будущем позволит создать принципиально новые, функциональные средства информационной техники.

Отметим основные исторические этапы развития оптоэлектроники.

**1864 г.** – Дж. К. Максвелл сформулировал основные уравнения электродинамики.

**1887 г.** – Г. Герц открыл и в 1888 году А. Г. Столетов провел исследования внутреннего и внешнего фотоэффектов.

**1917 г.** – А. Эйнштейн показал возможность создания вынужденного (индуцированного) излучения.

**1947 г.** – Д. Габор создал основы голографии.

**1954 г.** – А. М. Прохоров, Н. Г. Басов, Ч. Таунс создали молекулярный генератор на аммиаке, положивший начало развитию квантовой электроники.

**1960–1965 гг.** – разработка и создание целого ряда лазеров – твердотельных, газовых, полупроводниковых.

Промышленное производство конкретных оптоэлектронных приборов и устройств началось сравнительно недавно, в 1965 – 1970 годах. Элементная база современной оптоэлектроники включает в себя следующие основные группы приборов.

1. Источники излучения, в качестве которых чаще всего используются полупроводниковые лазеры (когерентные излучатели) и светодиоды (некогерентные излучатели).
2. Фотоэлектрические приемники излучения – фоторезисторы, фотоприемники с *p-n*-переходом.
3. Приборы и устройства для управления излучением – модуляторы, дефлекторы, управляемые транспаранты и др.
4. Приборы для отображения информации – индикаторы, индикаторные панели.
5. Приборы для электрической изоляции – оптроны.
6. Оптические каналы связи, волоконно-оптические световоды и линии.
7. Оптические системы и устройства для запоминания и хранения информации.

## ***2.2. ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ***

Приборы, в которых осуществляется преобразование электрической энергии в световую, относятся к излучающим. К оптическому диапазону спектра в общем случае относятся электромагнитные волны, длина которых составляет от 1 до  $10^6$  нм. Реально в оптоэлектронике используется обычно более узкий диапазон длин волн, включающий видимую и ближние инфракрасную и ультрафиолетовую области спектра. Для целей оптоэлектроники наиболее подходящими являются полупроводниковые излучающие приборы – светодиоды и инжекционные лазеры. К достоинствам этих приборов относятся малые габариты, низкие рабочие напряжения, малая потребляемая мощность.

Рассмотрим основные типы излучающих твердотельных приборов.

### ***2.2.1. Светодиоды***

Светодиод является полупроводниковым излучающим прибором с одним или несколькими n-p переходами, преобразующий электрическую энергию в энергию некогерентного светового излучения. Излучение возникает в результате рекомбинации инжектированных носителей в одной из областей, прилегающих к n-p переходу. Рекомбинация происходит при переходе носителей с верхних уровней на нижние. Последние могут быть прямыми (без изменения импульса) и непрямыми (с изменением импульса). Межзонные и энергетические переходы из зоны проводимости в заполненную зону дают эффективное излучение, если переходы прямые. При не прямых переходах излучательная рекомбинация может эффективно осуществляться через примесные центры в два этапа: сначала локализация носителя на примесном центре, а затем его рекомбинация со свободным носителем другого знака.

Длина волны излучаемого света зависит от ширины запрещенной полосы полупроводника, поэтому для получения

излучения в видимой области используются широкозонные полупроводники. К ним относятся арсенид галлия, фосфид галлия, карбид кремния, многокомпонентные полупроводниковые соединения, например GaAlAs и другие.

Основным параметром светодиодов является внутренняя квантовая эффективность (отношение числа фотонов к количеству инжектированных в базу носителей) и внешняя эффективность (отношение потока фотонов из светодиода к потоку носителей заряда в нем). Внешняя эффективность в значительной мере определяется технологией и с ростом ее уровня может быть значительно увеличена.

Мощность оптического излучения светодиода может быть найдена из уравнения:

$$P = hv\eta_e\eta_s I/e, \quad (2.1)$$

где  $P$  - излучаемая мощность,  $I/e$  - поток инжектированных носителей через переход,  $\eta_e$  - КПД вывода излучения,  $\eta_s$  - КПД светового излучения. Произведение  $\eta_e\eta_s$  представляет собой внешнюю квантовую эффективность. Для светодиодов с поверхностными излучателями она составляет около 3%, а для приборов с торцевыми излучателями 0,5 - 1%.

Наибольшие сложности возникают при получении коротковолнового излучения из-за технологических проблем создания n-p переходов в соответствующих полупроводниках. Поэтому излучатели с синим цветом свечения часто выполняются в виде МДП-структур на основе нитрида галлия, карбида кремния, сульфидов и селенидов цинка и кадмия.

Одним из способов получения коротковолнового излучения может быть включение диода Шотки в обратном направлении. В начальном участке лавинного пробоя происходит ударная ионизация с образованием электронов и дырок, рекомбинация которых может давать излучение в синей области спектра.

Создание эффективного светодиода для синей области позволяет получать любые цвета излучения путем нанесения на поверхность соответствующих люминофоров. Коротковолновое излучение может быть получено и при использовании антистоксовых люминофоров, хотя КПД преобразования длинноволнового излучения в коротковолновое мал (порядка 1%), а прибор имеет низкое быстродействие. Основные характеристики светодиодов - вольт-амперные, яркостные и спектральные.

ВАХ светодиодов аналогичны ВАХ обычных диодов. Яркостные (рис.2.1,а) характеризуются некоторым пороговым током и участком насыщения при больших токах из-за усиления вклада безизлучательной рекомбинации.

Спектральные характеристики (рис.2.1,б) имеют максимум, положение и ширина которого зависят от состава и энергетической структуры материала.

Основными параметрами светоизлучающих диодов являются длина волны, полуширина спектра излучения, мощность излучения, рабочая частота и диаграмма направленности излучения. Ширина спектральной полосы излучения светодиода может быть найдена из уравнения:

$$\Delta\lambda = 3kT\lambda^2/hc. \quad (2.2)$$

Для целей оптоэлектроники используются светодиоды в ближней инфракрасной области с длинами волн 0,9 и 1,2 – 1,7 мкм, соответствующие области минимальных потерь в световодах.

Наиболее распространённый в настоящее время инфракрасный источник - это светодиод на основе GaAs. Он обладает наибольшей эффективностью электролюминесценции в основном благодаря тому, что среди всех прямозонных полупроводников GaAs является технологически наиболее освоенным.

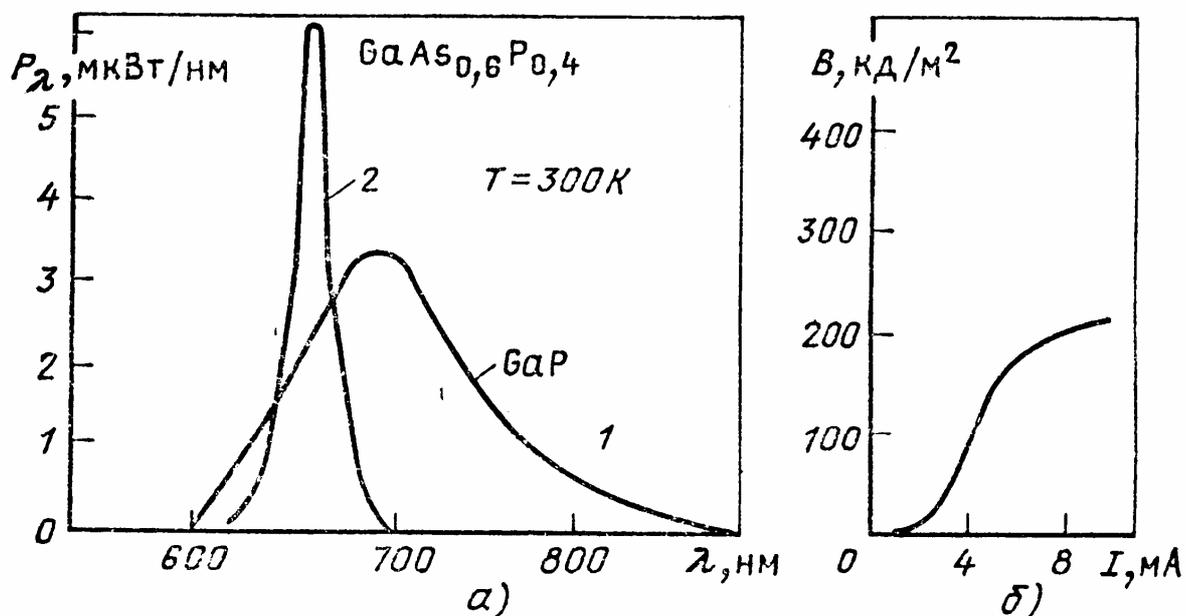


Рис.2.1. Спектральные (а) и световая (б) характеристики светодиодов

Для изготовления инфракрасных светодиодов используются многие другие полупроводники, имеющие запрещённую зону шириной менее 1,5 эВ. К ним относятся твёрдые растворы, в состав которых входят три или четыре элемента III и V групп периодической системы.

Специально для соединения с волоконным световодом разработан светодиод с двойным гетеропереходом. Область рекомбинации расположена вблизи хладопровода, а в подложке из GaAs протравлена ямка, в которую вставляется световод. Конструируются светодиоды как с выводом излучения через поверхность, ограничивающую переход сверху (плоскостные СД), так и с выводом энергии в направлении, параллельном плоскости p - n -перехода (торцевые СД).

Светодиоды по сравнению с лазерами имеют как преимущества, так и недостатки. К последним относятся меньшая яркость, более низкие частоты модуляции и большая спектральная ширина линии излучения, типичное значение которой составляет 100-500 ангстрем, тогда как лазеры характеризуются шириной линии 0,1-1 ангстрем. Различают два основных типа светодиодов, обеспечивающих ввод излучения в оптические волокна малого диаметра: светодиоды с излучающей поверхностью (рис.2.2,а) и с излучающей гранью (рис.2.2,б).

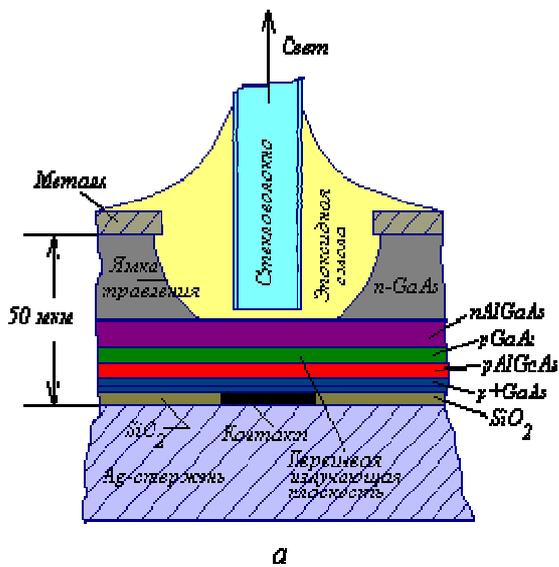


Рис. 2.2,а. Светодиоды с излучающей поверхностью

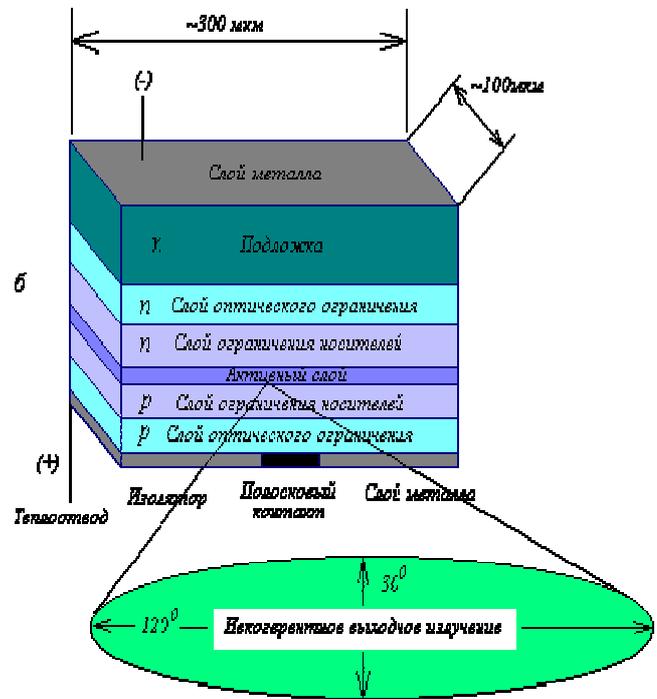


Рис. 2.2,б. Схема светодиода с излучающей гранью

Внешний вид некоторых типов светодиодов показан на рис. 2.3.



### 2.2.2. Полупроводниковые лазеры на $n-p$ переходе

В основе работы лазеров на  $n-p$  переходе, так же как и в светодиодах, лежит излучательная рекомбинация инжектированных  $n-p$  переходом носителей заряда. Но для генерации лазерного излучения необходимо создать инверсную заселенность энергетических уровней, то есть ситуацию, при которой концентрация носителей на верхнем энергетическом уровне перехода больше, чем на нижнем. Для этого необходима высокая степень легирования примесями обеих областей  $n-p$  перехода, при

которой полупроводники вырождены и уровень Ферми оказывается в разрешенных зонах. Схема лазера на  $n$ - $p$  переходе (а) и спектр его излучения (б) показаны на рис. 2.4.

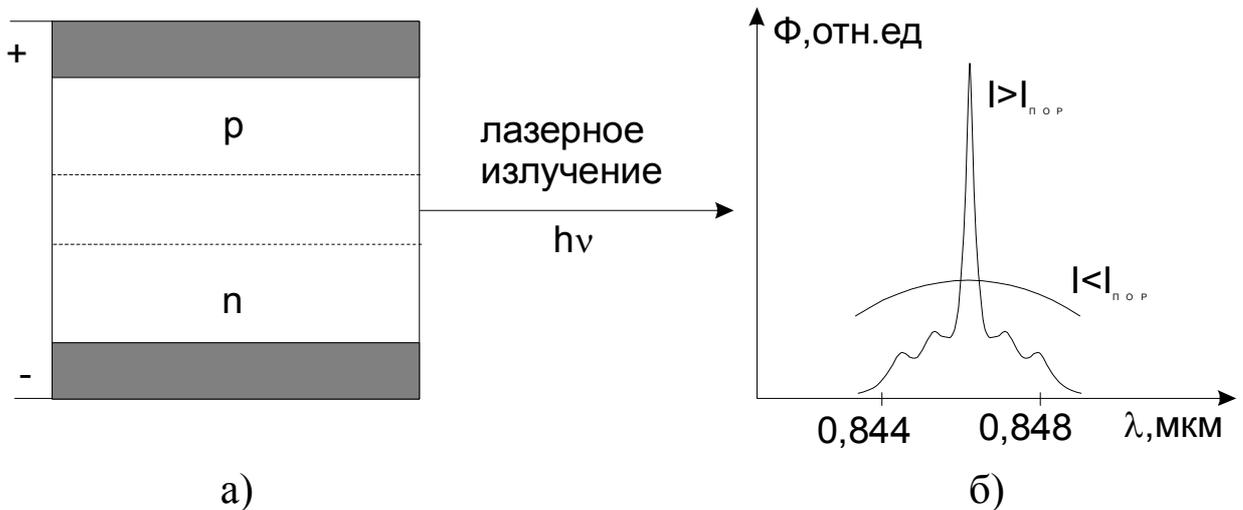


Рис. 2.4. Схема (а) и спектральная характеристика (б) лазера на  $n$ - $p$  переходе

При малых токах через  $n$ - $p$  переход уровень инжекции невелик и генерации нет. С ростом тока создается инверсная заселенность и при некотором пороговом токе возникает индуцированное излучение. Момент начала генерации может быть зарегистрирован по резкому сужению спектральной линии и увеличению интенсивности излучения. Оптический резонатор в полупроводниковом лазере формируется за счет специальным образом сколотых граней кристалла и внешних зеркал. Лучшими материалами для рассматриваемых лазеров в настоящее время являются арсенид галлия, арсенид галлия-алюминия и другие соединения типа  $A^3B^5$ .

Толщина излучающей области составляет порядка 2 мкм. Хотя теоретический КПД таких лазеров очень велик, реально он составляет 2–3% при комнатной температуре из-за многочисленных каналов потерь и высокой дефектности сильнолегированных полупроводников. Пороговые плотности тока обычно составляют величину порядка нескольких  $\text{kA}/\text{cm}^2$ . Так, пороговая плотность тока лазера на  $\text{GaInAsP}/\text{InP}$  равна  $1 \text{ kA}/\text{cm}^2$  при ширине активной области 0,1 – 0,15 мкм. Мощность полупроводниковых лазеров в непрерывном режиме при комнатной температуре обычно составляет единицы – десятки милливольт.

Весьма перспективны лазеры на  $p-i-n$  ( $p-n-n^+$ ) структурах с гетеропереходами, так как последние отличаются высоким отношением инжекционных токов из широкозонного полупроводника в узкозонный к обратному. В последние годы разработаны ряд лазеров для синей области спектра. Так, лазер на нитриде галлия имеет пороговую плотность тока  $4 \text{ кА/см}^2$ , мощность более 200 мВт при квантовом выходе до 13%. Длина волны излучения составляет 417 нм, ширина линии излучения 1,6 нм. Перспективным материалом для лазеров в синей области является карбид кремния, ширина запрещенной зоны в котором составляет 2,9 – 3,3 эВ. Создание лазерных гетероструктур и разработка приборов на их основе позволили резко снизить пороговые плотности тока, увеличить КПД инжекционных лазеров.

Определенный интерес представляют полупроводниковые лазеры с накачкой электронным пучком высокой энергии. Генерация при бомбардировке быстрыми электронами наблюдается во многих полупроводниках. Так, CdS дает зеленое свечение, CdSe – красное, ZnSe – голубое. В ближней ИК области перспективны GaAs и CdTe. Конструктивно полупроводниковые лазеры с электронным возбуждением выполняются в виде электронно-лучевой трубки с полупроводниковым материалом в качестве экрана-мишени. По сравнению с инжекционной накачкой возбуждение электронным лучом имеет следующие достоинства:

- высокие мощности излучения благодаря возбуждению значительной толщины кристалла;
- возможность использования широкого ряда полупроводниковых материалов, так как в этом типе лазеров не требуется  $n-p$  переход;
- простота двухкоординатного сканирования и высокая скорость модуляции;
- возможность управляемой перестройки длины волны излучения, многоцветность, которую можно реализовать при использовании варизонных полупроводников.

Недостатки лазеров с возбуждением электронным лучом во многом те же, что и у электронно-лучевой трубки: наличие вакуумированного объема, значительные габариты, сложность и громоздкость систем питания. Тем не менее, для проекционного

телевидения, для решения ряда задач оптоэлектроники (сверхскоростные системы ввода информации, быстродействующие голографические запоминающие устройства) лазер с электронным возбуждением может оказаться наиболее эффективным.

Для целей оптоэлектроники наибольший интерес представляют лазеры, излучающие в ближней инфракрасной области, в которой кварцевые световоды имеют наименьшие потери. В этом плане для лазеров справедливо все то, что было рассмотрено выше для светодиодов.

В интервале длин волн вблизи 0,9 мкм в качестве источников излучения используется гетеролазеры на основе GaAs-Al(x)Ga(1-x)As. Вблизи длины волны 1,3 мкм в волоконно-оптических линиях связи волокно имеет низкие потери (0,6 Дб/км) и слабую дисперсию, а в окрестности длины волны 1,55 мкм потери достигают минимального значения (0,2 дБ/км), поэтому в качестве источников излучения могут использоваться лазеры на основе Ga(x)In(1-x)As(y)P(1-y)-InP.

Создание лазерных гетероструктур и разработка приборов на их основе позволили резко снизить пороговые плотности тока, увеличить КПД инжекционных лазеров. В лазерах с распределенной обратной связью удачно решены задачи селекции типов колебаний, улучшения диаграммы направленности излучения.

Источники излучения волоконно-оптических систем передачи (ВОСП)ку должны обладать большой выходной мощностью, допускать возможность разнообразных типов модуляции излучения, иметь малые габариты и стоимость, большой срок службы, КПД и обеспечить возможность ввода излучения в оптическое волокно с максимальной эффективностью. Для ВОСП потенциально пригодны твердотельные лазеры, в которых активным материалом служит иттрий-алюминиевый гранат, активированный ионами ниодима с оптической накачкой (например СИД), у которого основной лазерный переход сопровождается излучением с длиной волны 1,064 мкм. Узкая диаграмма направленности и способность работать в одномодовом режиме с низким уровнем шума являются плюсами данного типа источников. Однако большие габариты, малый КПД, потребность во внешнем устройстве накачки являются основными причинами, по которым этот источник не

используется в современных ВОСП. Практически во всех волоконно-оптических системах передачи, рассчитанных на широкое применение, в качестве источников излучения сейчас используются полупроводниковые светоизлучающие диоды и лазеры. Для них характерны в первую очередь малые габариты, что позволяет выполнять передающие оптические модули в интегральном исполнении. Кроме того, для полупроводниковых источников излучения характерны невысокая стоимость и простота обеспечения модуляции.

Сопоставление основных типов лазеров показывает, что базовым для оптоэлектроники является инжекционный полупроводниковый лазер. В последние годы широкое применение в качестве источников излучения в оптоэлектронике находят волоконные лазеры, принципы работы которых описаны в главе 1. Длина волны излучения этих лазеров составляет 1,06 – 1,07 мкм, что вполне приемлемо с точки зрения потерь в кварцевых и стеклянных световодах, и они прекрасно сочетаются с волоконно-оптическими кабелями.

### ***2.3. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ***

Взаимодействие оптического излучения с полупроводниками может сопровождаться преобразованием световой энергии в электрическую на основе фоторезистивного или фотогальванического эффектов. Созданные на этом принципе приборы являются приемниками излучения.

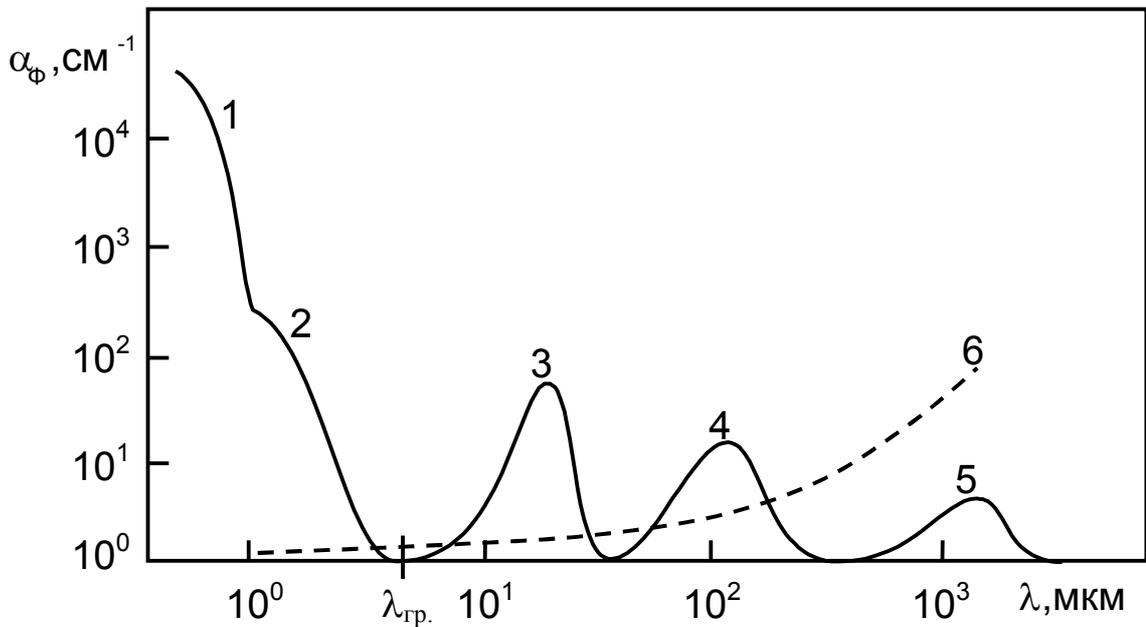
#### ***2.3.1. Поглощение оптического излучения полупроводниками***

Оптическое излучение при взаимодействии с кристаллом полупроводника частично поглощается, частично отражается от его поверхности или проходит через кристалл. Мощность излучения по мере прохождения через кристалл убывает по экспоненциальному закону:

$$I_x = I_0(1-R)\exp(-\alpha x), \quad (2.3)$$

где  $I_0$  -падающая мощность светового излучения,  $R$  - коэффициент отражения,  $\alpha$  - коэффициент поглощения.

Зависимость коэффициента поглощения от длины волны падающего излучения называется спектром поглощения. Типичный спектр поглощения полупроводников показан на рис 2.5.



*Рис.2.5. Типичный спектр поглощения полупроводника: 1 - собственное поглощение в результате прямых переходов; 2 - собственное поглощение при непрямых переходах; 3, 4 - примесное поглощение; 5 - решеточное поглощение; 6 - поглощение свободными носителями заряда*

В полупроводниках реализуются несколько механизмов поглощения светового излучения:

- при собственном поглощении (участки 1 и 2 спектра) происходит разрыв валентной связи и переход электрона из заполненной зоны в зону проводимости под действием кванта света. Условие этого процесса  $h\nu > \Delta E$ , где  $\Delta E$  - ширина запрещенной зоны.

Эта часть спектра имеет четко выраженную "красную" границу, которая для большинства полупроводников приходится на видимую или инфракрасную области оптического диапазона. Граница собственного поглощения сдвигается в красную область при увеличении температуры, уменьшении концентрации примесей, возрастании внешнего электрического поля. Абсолютное значение коэффициентов поглощения достигает  $10^6 \text{ см}^{-1}$ .

- примесное поглощение (области 3, 4 спектра) связано с ионизацией атомов примеси. Поскольку энергия ионизации примеси меньше ширины запрещенной зоны полупроводника, примесное поглощение проявляется в инфракрасной области спектра, а величина коэффициента поглощения обычно не превышает  $10^3 \text{ см}^{-1}$  и уменьшается с увеличением температуры.

- экситонное поглощение возможно, если и электрон в валентной зоне возбуждается, образуя с дыркой связанную кулоновским взаимодействием пару - экситон. Влияние экситонного поглощения на электропроводность полупроводника может быть только косвенным.

- спектр решеточного поглощения (область 5) расположен в дальней инфракрасной области и сопровождается повышением температуры полупроводника.

- Поглощение энергии свободными носителями (область 6) сопровождается энергетическими переходами последних в пределах разрешенных зон, что дает непрерывный спектр поглощения в инфракрасной области.

В полупроводниковых фотоприборах чаще всего используются эффекты, связанные с собственным поглощением света.

### ***2.3.2. Фоторезистивный эффект и приборы на его основе***

При фоторезистивном эффекте происходит изменение электропроводности полупроводника под действием света, связанное с генерацией неравновесных носителей заряда (собственное или примесное поглощение). Фоторезистивный эффект используется в одноименных приборах, применяемых в оптоэлектронных парах, приемниках инфракрасного излучения и т.д.

Тепловое сопротивление фоторезисторов обычно составляет  $10^6 - 10^7$  Ом и экспоненциально уменьшается с увеличением температуры, поэтому приборы на основе узкозонных и примесных полупроводников для инфракрасной области спектра необходимо охлаждать жидким азотом. В качестве материала фоторезисторов используются в основном сульфиды, теллуриды и селениды кадмия, висмута, свинца. Спектральные характеристики ФС имеют максимум, положение которого на шкале длин волн зависит от природы полупроводникового материала. Световые характеристики их в общем случае описываются уравнением:

$$I = k\Phi^n . \quad (2.4)$$

Рабочая область выбирается в диапазоне условий, при которых  $n = 1$  (сравнительное небольшое отношение фотопроводимости к тепловой). Вольт-амперные характеристики

фотосопротивлений линейны в широком диапазоне условий. Отклонения наблюдаются только при малых или очень больших напряжениях.

Оптимальная толщина фоточувствительного слоя обычно близка обратной величине коэффициента поглощения света. Последняя составляет  $10^5 - 10^6 \text{ см}^{-1}$  для собственного и около  $10^3 \text{ см}^{-1}$  для примесного поглощения. К преимуществам фоторезисторов следует отнести относительную простоту и дешевизну изготовления, широкий диапазон номиналов сопротивлений, возможность формирования фоточувствительных элементов сложной конфигурации. Основные недостатки - значительная инерционность, температурная и временная нестабильность параметров, сравнительно большой темновой ток, достаточно высокие рабочие напряжения.

### ***2.3.3. Фотозлектрический эффект в n-p-переходе***

Рассмотрим идеализированный n-p переход, облучаемый светом с энергией фотонов, превышающей ширину запрещенной зоны полупроводника. При собственном поглощении в переходе и прилегающих к нему областях происходит образование неравновесных носителей заряда, которые разделяются полем n-p перехода. Под действием этого поля дырки переходят в p-область, а электроны - в n-область полупроводника.

Процессу разделения подвержены только те носители заряда, которые генерируются под действием света в самом n-p переходе и на расстоянии от него порядка диффузионной длины неосновных носителей. При этом через переход течет ток неравновесных неосновных носителей заряда, так как равновесные основные носители не могут преодолеть потенциальный барьер перехода и остаются в области генерации. В результате разделения оптически генерируемых носителей концентрация дырок в p-области и электронов в n-области возрастает, что приводит к компенсации объемного заряда и, следовательно, уменьшению потенциального барьера на переходе.

Это приводит к увеличению диффузионного тока основных носителей заряда, направленного навстречу фототоку. В стационарном состоянии при постоянном световом потоке ток диффузии равен дрейфовому току:

$$I = I_{\text{дф}} - I_{\text{ф}} - I_0 = 0 . \quad (2.5)$$

Потенциальный барьер снижается на величину фотоЭДС, которая при разомкнутой внешней цепи называется напряжением холостого хода.

$$\text{Тогда} \quad I_{\text{ф}} = I_0(\exp[U_{\text{хх}}/\varphi_{\text{T}}] - 1) \quad (2.6)$$

$$\text{или} \quad U_{\text{хх}} = \varphi_{\text{T}} \ln(1 + I_{\text{ф}}/I_0) . \quad (2.7)$$

В этих уравнениях

$I_{\text{дф}}$  - диффузионный ток основных носителей заряда,

$I_{\text{ф}}$  - фототок,

$I_0$  - тепловой ток через переход

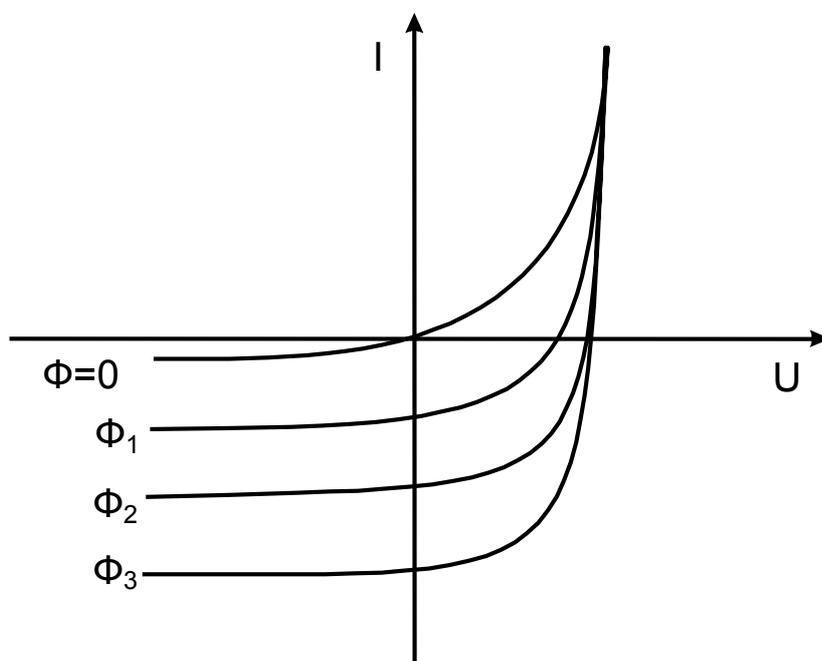
$\varphi_{\text{T}}$  - контактная разность потенциалов

$U_{\text{хх}}$  - напряжение холостого хода.

Отметим, что напряжение холостого хода не может быть больше контактной разности потенциалов, ибо в противном случае поле в переходе компенсируется полностью и разделение зарядов прекращается. При замыкании освещенного n-p перехода во внешней цепи появляется фототок короткого замыкания, пропорциональный скорости генерации неравновесных носителей. При малых световых потоках фототок меньше темнового тока и разложение уравнения (2.7) в ряд дает прямопропорциональную связь между напряжением холостого хода и световым потоком.

При больших световых потоках единицей в уравнении (2.7) можно пренебречь, тогда напряжение холостого хода увеличивается со световым потоком по логарифмическому закону.

Вольт-амперные характеристики освещенного идеализированного n-p перехода приведены на рис.2.6. Как видно из ВАХ, фотоэлектрические приборы с n-p переходом могут работать в двух режимах - фотовентильном (при отсутствии внешнего напряжения происходит генерация фотоЭДС) и фотодиодном (на переход подается обратное напряжение и освещение вызывает увеличение тока).



*Рис.2.6. Вольт-амперные характеристики идеализированного p-р перехода при различных интенсивностях падающего света*

#### **2.3.4. Фотоэлектронные приборы в вентильном режиме**

Приборы, работающие в режиме генерации фотоЭДС, находят широкое применение в системах контроля и управления с использованием световых потоков. При этом рабочей величиной является либо ток короткого замыкания, либо напряжение холостого хода.

Весьма интересной областью использования таких приборов является преобразование световой энергии в электрическую (солнечные элементы). Важнейшими параметрами солнечного преобразователя являются выходная мощность, коэффициент полезного действия и интервал рабочих температур. Выходная мощность определяется током короткого замыкания и напряжением холостого хода. КПД зависит от коэффициента поглощения света, ширины запрещенной зоны полупроводника и других параметров. В полупроводниках с малой шириной запрещенной зоны полнее используется большая часть спектра излучения Солнца, но напряжение холостого хода и интервал рабочих температур невелики. В широкозонных полупроводниках можно получить малые обратные тепловые токи и высокие значения  $U_{xx}$ , но при малом КПД.

На рис.2.7 приведены расчетные данные по зависимости КПД и выходной мощности от ширины запрещенной зоны в полупроводнике.

Рис.2.7 характеризует участки ВАХ солнечных элементов на основе кремния и арсенида галлия и оптимальные нагрузочные сопротивления для соответствующих элементов.

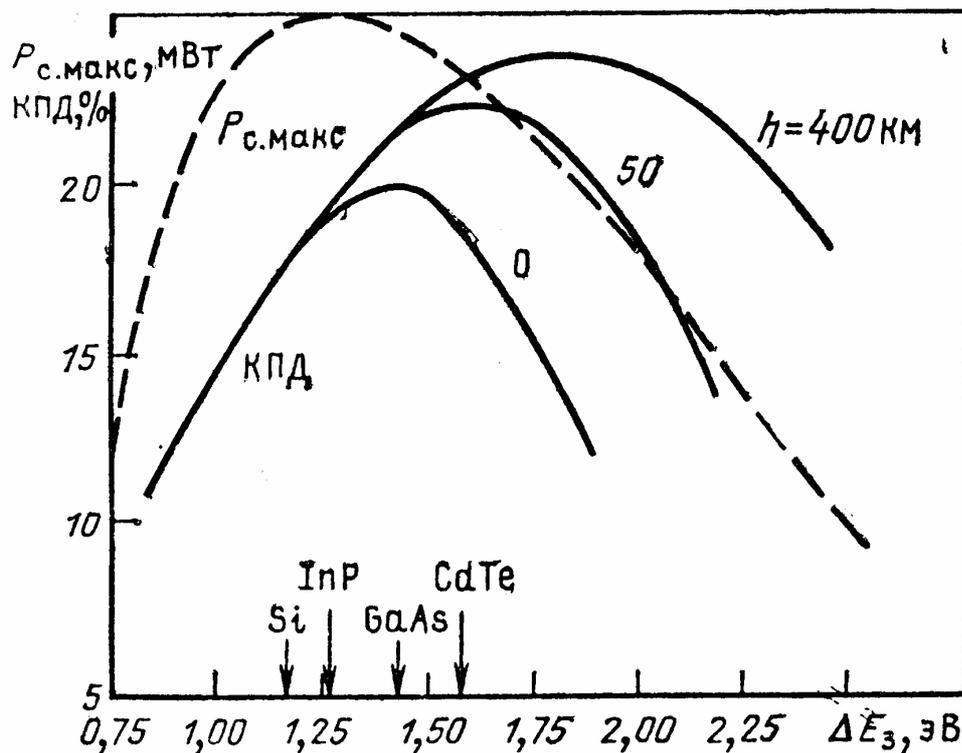


Рис.2.7. Влияние ширины запрещенной зоны на КПД и выходную мощность солнечных элементов на основе кремния и арсенида галлия.

Для повышения КПД прибора на фронтальную поверхность наносят просветляющее покрытие из монооксида кремния или оксида титана. Основным материалом солнечных элементов в настоящее время является кремний. КПД реальных преобразователей на его основе уже приближается к 20%. Особенно перспективны солнечные элементы на аморфном кремнии, исследованию которого посвящено большое количество работ. Кроме того, в последние годы значительное внимание уделяется солнечным элементам на основе органических полупроводников. Последние имеют сравнительно низкую стоимость и высокий КПД. Проблемным для данной области является вопрос деградации органических полупроводников во времени.

### 2.3.5. Фотодиоды

Простейший фотодиод представляет собой n-p переход, на который подано обратное напряжение, и ток через структуру является функцией интенсивности света (рис.2.8).

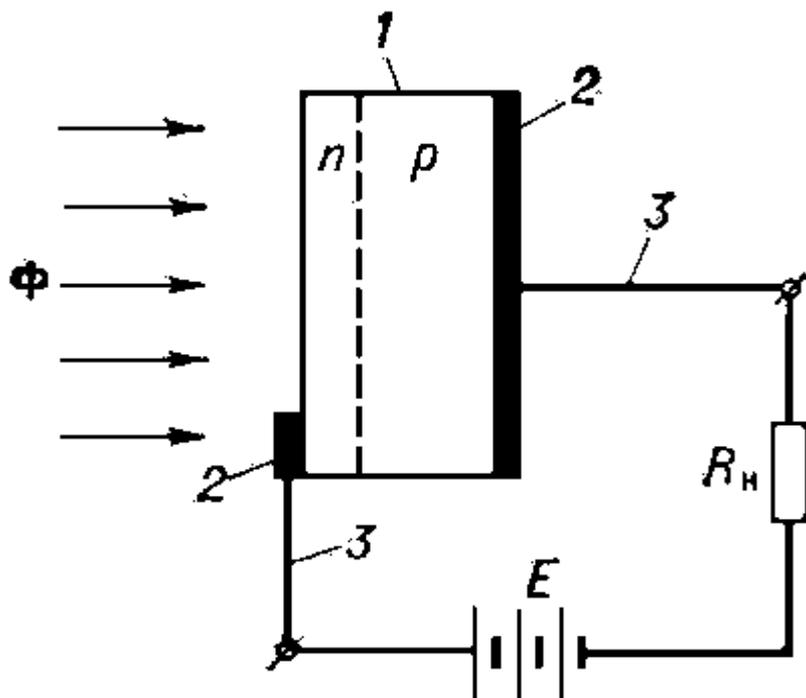


Рис. 2.8. Структурная схема фотодиода и схема его включения при работе в фотодиодном режиме: 1 — кристалл полупроводника; 2 — контакты; 3 — выводы;  $\Phi$  — поток электромагнитного излучения; n и p — области полупроводника соответственно с донорной и акцепторной примесями; E — источник постоянного тока;  $R_n$  — нагрузка.

Световые характеристики фотодиодов линейны в широком диапазоне условий, что выгодно отличает их от фоторезисторов. Темновое сопротивление фотодиода может быть больше, чем у фоторезистора, поскольку оно определяется обратным током n-p перехода, имеющим, особенно для кремния, малую величину.

Спектральная характеристика фотодиодов имеет максимум. Длинноволновая граница спектральной чувствительности определяется шириной запрещенной полосы полупроводника, а коротковолновая зависит от ширины базы и скорости поверхностной рекомбинации и может быть расширена за счет конструктивно-технологических решений. Параметры фотодиодов зависят от эффективности генерации и разделения

зарядов, а также от возможности усиления фототока непосредственно в приборе. Рассмотренный выше простейший фотодиод работает на сплавном или диффузионном n-p переходе. Существуют также диоды на многослойных структурах (p-i-n), гетероструктурах, поверхностно-барьерных структурах (диоды Шотки), с лавинным умножением фототока и др.

Рассмотрим некоторые из этих диодов подробнее.

Для увеличения чувствительности фотодиода может быть использован эффект лавинного умножения носителей в области объемного заряда n-p перехода (лавинный фотодиод). При напряжении, близком к пробойному, происходит лавинное умножение носителей заряда. Коэффициент умножения  $M$  определяется выражением

$$M = 1 - [(U_0 - I_r)/U_{\text{проб}}]c \quad (2.8)$$

и составляет  $10^3 - 10^4$  для кремния и 300-400 для германия.

К недостаткам лавинных диодов относятся зависимость коэффициента умножения от фототока и жесткие требования к стабильности питающего напряжения (0,01 - 0,02%), так как  $M$  сильно зависит от напряжения.

Высокое быстродействие достигается в фотодиодах с p - i - n структурой, в которых поглощение света осуществляется в области с собственной проводимостью, а создаваемое в ней электрическое поле обеспечивает высокую эффективность собирания зарядов. Аналогичные эффекты достигаются в p<sup>+</sup>-n-p структурах и фотодиодах на основе гетеропереходов.

Высоким быстродействием и высокой (в ряде случаев избирательной) чувствительностью обладают фотодиоды на основе барьера Шотки. В таком диоде свет проходит через тонкую металлическую пленку и поглощается в слое полупроводника. Образующиеся при этом дырки, попадая в металл, мгновенно рекомбинируют. Используя металлические пленки с резонансным спектром пропускания, можно создавать фотодиоды, чувствительные в узком диапазоне длин волн.

Все рассмотренные фотодиоды (кроме лавинных) обладают сравнительно малой чувствительностью, а лавинные диоды отличаются очень жесткими требованиями к стабильности напряжения питания и температуры.

Этих недостатков лишены инжекционные фотодиоды, разработанные в последние годы. Инжекционный фотодиод представляет собой диод с длинной базовой областью из высокоомного полупроводника. Длина базы в несколько раз превышает диффузионную волну неосновных носителей заряда. Переход р-п типа включается в прямом направлении, при этом проводимость базовой области определяется инжектированными р-п переходом носителями. Освещение приводит к изменению сопротивления базы как за счет непосредственного увеличения концентрации носителей (фоторезистивный эффект), так и за счет изменения параметров, определяющих распределение неравновесных носителей в базовой области, таких как время жизни и биполярная подвижность носителей заряда. Поскольку п-р-переход включен в прямом направлении последовательно с сопротивлением базы, то изменение последнего приводит к увеличению тока инжекции и дальнейшему снижению сопротивления базы. Таким образом обеспечивается усиление первичного фототока, причем вклад инжектированных носителей в увеличение интегральной проводимости во много раз превышает вклад носителей, генерируемых световым облучением. В качестве базы используются высокоомные скомпенсированные полупроводники (полуизоляторы), например германий, компенсированный золотом, ртутью, медью или кремний, содержащий глубокие уровни цинка, бора и др. Усиление фототока в инжекционных фотодиодах может достигать нескольких порядков величины, а чувствительность 100 А/лм.

### ***2.3.6. Фототранзисторы и фототиристоры***

Фототранзистор - это полупроводниковый фотоприбор с двумя или более п-р переходами. Области применения фототранзисторов - чувствительные элементы оптопар и фотоприемников, в том числе элементы приемного модуля волоконно-оптических линий связи и т.д. Различают биполярные и полевые фототранзисторы. Устройство биполярного фототранзистора и его выходные характеристики показаны на рис. 2.9.

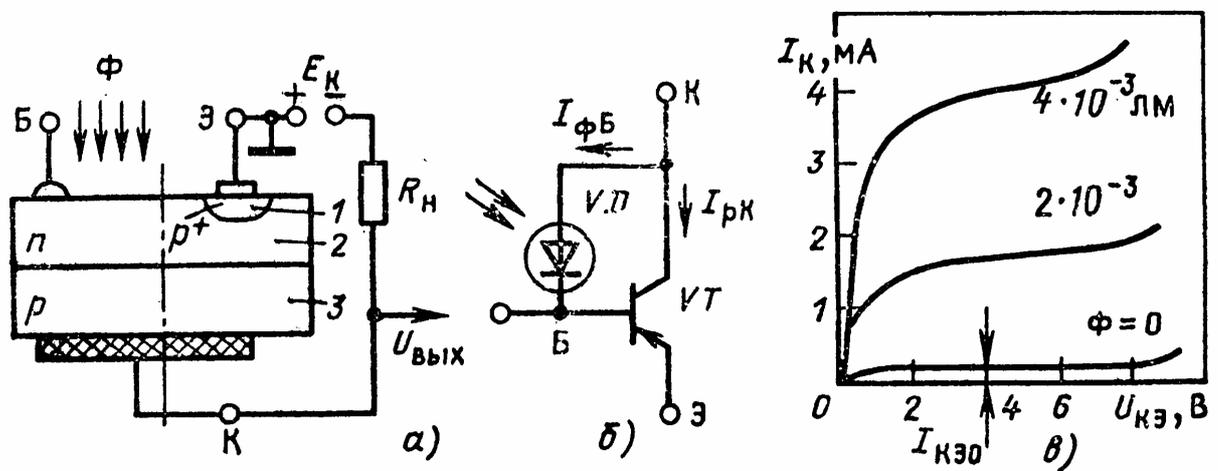


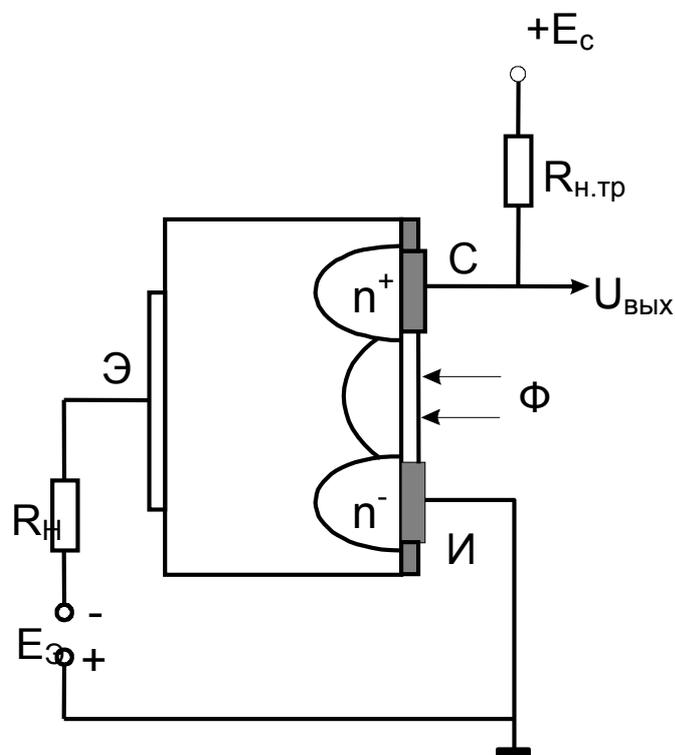
Рис 2.9. Устройство (а), схема (б) и выходные характеристики (в) биполярного фототранзистора

Фототранзистор обычно включается по схеме с общим эмиттером, база свободна. Световое облучение вызывает генерацию носителей заряда в области базы коллекторного перехода. Эти носители разделяются полем коллекторного перехода следующим образом: неосновные носители проходят через переход и создают коллекторный фототок, а основные накапливаются в базе, частично компенсируя заряд неподвижных ионов примесей вблизи эмиттерного перехода. При этом потенциальный барьер эмиттерного перехода снижается и происходит инжекция носителей из эмиттера в базу.

Инжектированные носители диффундируют через базу и проходят коллекторный переход, создавая ток, многократно превышающий первичный фототок. Общий ток коллектора - это сумма фототока неосновных носителей заряда и тока, создаваемого инжектированными эмиттером носителями. Общий коэффициент усиления транзистора соответствует статическому коэффициенту передачи по току в схеме с общим эмиттером. Световые характеристики биполярных фототранзисторов линейны только в ограниченной области световых потоков.

К фототранзисторам может быть отнесен и фототиристор - четырехслойная структура, работающая в ключевом режиме и управляемая световым потоком.

Существует много различных структур полевых фототранзисторов с n-p переходом или МДП - типа. Один из вариантов показан на рис.2.10.



*Рис.2.10. МДП-фототранзистор со встроенным затвором*

Световой поток генерирует неравновесные носители в области затвора и n-p перехода канал-затвор. В цепи затвора в результате разделения зарядов появляется фототок, и ток через канал возрастает. При этом уменьшается напряжение на стоке, которое и является выходным сигналом прибора. В общем случае фототранзистор можно представить себе как сочетание фотодиода с усилительным транзистором в одном приборе.

### **2.3.7. Оптоэлектронные пары**

Оптоэлектронная пара содержит светоизлучатель и фотоприемник, связь между которыми осуществляется оптически, а элементы ее гальванически полностью развязаны. Оптопары используются как элемент электрической развязки в цифровых и импульсных устройствах, системах передачи аналоговой информации, системах автоматики. Они являются составным элементом оптических микросхем. Устройство оптопары показано на рис 2.11.



*Рис.2.11. Схема оптопары. 1 - металлические электроды; 2 – светоизлучатель; 3 - прозрачные электроды (оксид олова); 4 - оптическая среда (стекло или полимер); 5 – фотоприемник*

В качестве светоизлучателей в оптопаре могут быть использованы светодиоды или лазерные диоды, а в качестве фотоприемников - фотодиоды, фототранзисторы и другие приборы.

Оптоэлектрические пары обеспечивают почти идеальную гальваническую развязку, невосприимчивы к воздействию электрических помех, хорошо совместимы с интегральными микросхемами и имеют широкие функциональные возможности.

Имеется ряд пар источник-фотоприемник, достаточно хорошо согласующихся друг с другом. В качестве примера можно привести следующие пары:

1) кремниевый p-i-n фотодиод хорошо согласуется со светодиодами GaAs(Zn), GaAlAs, GaAsP и спектрально, и по быстродействию.

2) кремниевые фототранзисторы и фототиристоры хорошо согласуются с излучателями на основе GaAlAs.

3) фоторезисторы на основе CdS, CdSe спектрально хорошо согласуются с излучателями GaP, GaAsP, но имеют сравнительно невысокое быстродействие.

В зависимости от типа фотоприемника оптопары могут быть резисторными, диодными, транзисторными, тиристорными. Наряду с дискретными оптопарами активно разрабатываются цифровые и аналоговые оптоэлектронные интегральные микросхемы. К специальным оптоэлектронным устройствам можно отнести приборы с гибким световодом, многоканальные, с открытым и управляемым оптическим каналом.

## **2.4. Модуляция лазерного излучения**

Использование лазерного излучения в оптоэлектронике требует наложения на несущий луч сигнала, содержащего передаваемую информацию. Модуляция лазерного излучения это изменение одного или нескольких параметров излучения по заданному закону в пространстве и/или во времени. Закон изменения модулируемого параметра обычно соответствует передаваемой информации. Введение информации в лазерное излучение возможно различными способами. Можно модулировать информационным сигналом интенсивность излучения, частоту, фазу и поляризацию. Наибольшее применение имеет амплитудная модуляция из-за простоты конструкции соответствующих устройств. Одним из важных параметров модулятора является глубина модуляции, определяемая амплитудным значением выходного сигнала:

$$m = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} \quad (2.9)$$

Среди модуляционных устройств можно выделить:

- 1) модуляторы – устройства для изменения по заданному закону во времени одного или нескольких параметров лазерного излучения.
- 2) дефлекторы – устройства для изменения во времени положения пучка лазерного излучения.
- 3) пространственно-временные модуляторы – устройства для изменения во времени пространственного распределения интенсивности, фазы или поляризации пучка лазерного излучения.

### **2.4.1. Физические основы модуляции лазерного излучения**

В модуляционных устройствах когерентной оптоэлектроники используются электрооптические, магнитооптический и фотоэффекты.

Электрооптические эффекты характеризуются возникновением оптической анизотропии в веществе под воздействием внешнего электрического поля, в результате чего изменяется диэлектрическая проницаемость и показатель преломления вещества. Электрооптические эффекты сопровождаются явлением двойного лучепреломления, то есть расщеплением проходящего света на два

луча. Эти лучи, называемые обыкновенным и необыкновенным, распространяются с различными скоростями и по разному поляризованы. Если в кристалле выделить два взаимно-перпендикулярных направления  $X$  и  $Y$ , то показатели преломления света вдоль каждого из них могут быть различными. Такие кристаллы называют двухосными. Кристаллы, в которых показатели преломления в указанных направлениях одинаковы, называются одноосными. При распространении света вдоль оси  $Z$  в одноосном кристалле скорость света не зависит от характера поляризации. Если же к кристаллу приложить электрическое поле, то равенство показателей преломления нарушается и кристалл становится двухосным. Показатель преломления для обыкновенной волны по оси  $Z$  изменяется линейно с напряженностью электрического поля:

$$n_{o(E)} = n_o + r_n E, \quad (2.10)$$

где  $r_n$  – электрооптическая постоянная Погкельса,  $n_o$  – показатель преломления в отсутствие поля,  $E$  – напряженность электрического поля.

Это явление называется *линейным электрооптическим эффектом* или *эффектом Погкельса*. Под влиянием внешнего поля одноосный кристалл приобретает свойства двухосного и при прохождении в нем световой волной некоторого расстояния  $l$  возникает разность фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi n^3 r_n E l}{\lambda} . \quad (2.11)$$

В результате поляризация входных и выходных сигналов оказывается различной.

Находит применение в электронике и *оптоэлектронный эффект Керра*, согласно которому показатель преломления пропорционален квадрату напряженности электрического поля:

$$n_{o(E)} = n_o + r_k E^2, \quad (2.12)$$

где  $r_k$  – электрооптическая постоянная Керра.

Сдвиг фаз между оптическими сигналами на расстоянии  $l$  описывается выражением:

$$\Delta\varphi = 2\pi r_k E^2 l . \quad (2.13)$$

**Магнитооптический эффект** – это изменение оптических свойств вещества под действием магнитного поля. Линейно поляризованная волна может быть представлена в виде суммы двух волн различной поляризации. В магнитном поле показатели преломления этих двух волн отличаются, поэтому после прохождения некоторого расстояния  $l$  возникает разность фаз этих волн, равная:

$$\Delta\varphi = \frac{\omega l}{c}(n_1 - n_2) \quad (2.14)$$

Разность показателей преломления пропорциональна индукции магнитного поля.

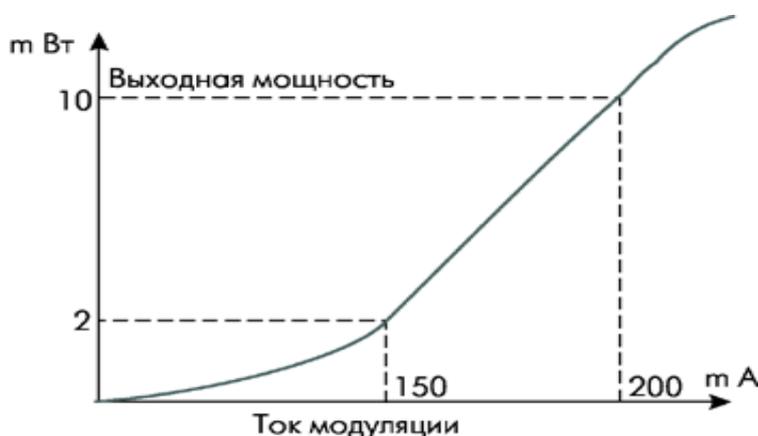
Среди фотоэффектов, приводящих к изменению оптических характеристик вещества, можно выделить фотохромный эффект (изменение окраски или прозрачности вещества под действием света); фотокристаллический эффект (кристаллизация аморфного вещества под действием света) и эффект фотопроводимости, рассмотренный выше.

#### **2.4.2. Оптические модуляторы**

Поскольку фотоприемники реагируют на интенсивность излучения, наиболее простым типом модуляции является модуляция интенсивности излучения. Одна из причин, по которой полупроводниковые лазеры нашли широкое применение в волоконно-оптических системах связи, — это очень простая и удобная схема модуляции. В полупроводниковых лазерах модуляция излучения осуществляется модуляцией тока накачки. Такой способ особенно эффективен в цифровых системах передачи, когда требования к линейности модуляционной характеристики не очень жесткие. Это так называемая внутренняя (или прямая) модуляция. Поскольку токи, протекающие через р-п переход, малы, то осуществить ВЧ управление ими относительно несложно. Однако, с возрастанием скоростей передачи до нескольких Гбит/с, прямая модуляция становится неэффективной, что можно проиллюстрировать рис.2.12.

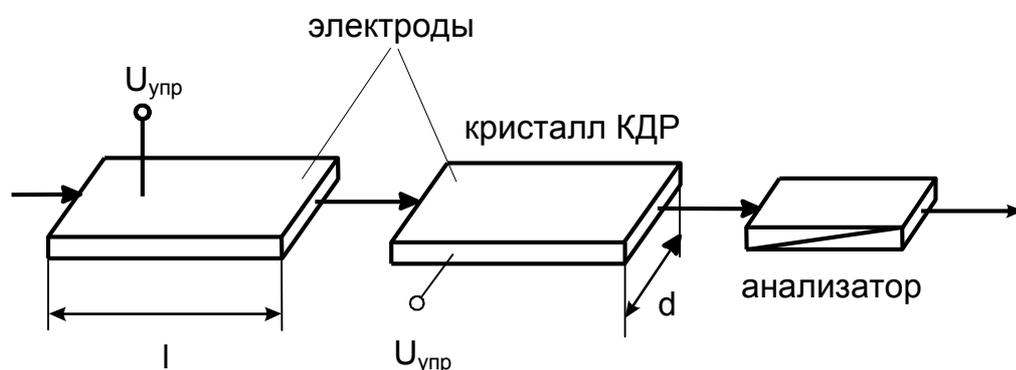
Если ток накачки через излучатель остается постоянным, то его выходная мощность также остается постоянной, и рассеиваемая кристаллом мощность будет неизменной. Частота генерации излучателя определяется, прежде всего, стабильностью параметров

резонатора. А она во многом зависит от стабильности его теплового режима. Выше было сказано, что зеркалами резонатора очень часто являются поверхности кристалла. При СВЧ накачке трудно обеспечить постоянный тепловой режим рабочего вещества. В результате параметры резонатора «плывут», что приводит к ухудшению стабильности частоты и к уширению линии генерации излучателя. Это не очень существенно для систем, в которых передача информации осуществляется на одной длине волны. Но с переходом к системам со спектральным уплотнением, а тем более к системам с плотным спектральным уплотнением этот недостаток прямой модуляции начинает существенно влиять на помехоустойчивость передачи из-за возникновения перекрестных помех.



*Рис. 2.12. Ватт-амперная характеристика полупроводникового излучателя*

При использовании других типов модуляторов необходимо преобразование сигнала в модулированный по интенсивности. Рассмотрим устройство электрооптического модулятора (рис. 2.13).



*Рис. 2.13. Устройство электрооптического модулятора*

Основу его составляют два кристалла одинаковых размеров с взаимно перпендикулярными кристаллографическими осями. Это обеспечивает компенсацию температурных эффектов. Изменяя управляющее напряжение на кристаллах, можно регулировать фазу выходного сигнала по отношению к входному.

Для преобразования изменения фазы в изменение интенсивности используется анализатор. Интенсивность излучения на выходе модулятора без учета поглощения определяется выражением:

$$E_{\text{вых}} = E_{\text{вх}} \sin^2 \left( \frac{\pi U_{\text{упр}}}{2U_{\lambda/2}} \right), \quad (2.15)$$

где  $E_{\text{вх}}$ ,  $E_{\text{вых}}$  – интенсивность излучения на входе и выходе;  $U_{\text{упр}}$  – напряжение управления;  $U_{\lambda/2}$  – полуволновое напряжение управления.

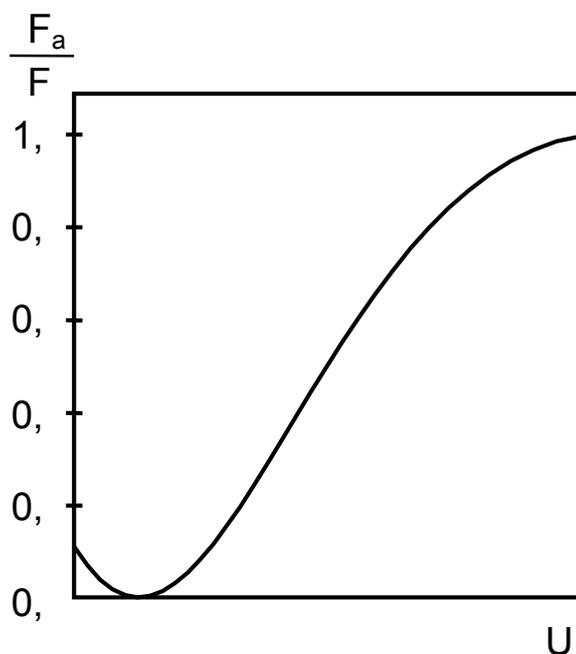
Полуволновое напряжение представляет собой важнейший параметр модулятора. Это напряжение управления, при котором достигается максимальное изменение коэффициента пропускания модулятора, соответствующее сдвигу лучей на половину длины волны или сдвигу фаз на полупериод колебаний. Величина полуволнового напряжения может быть найдена из уравнения:

$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{2n^3 r_n} \frac{d}{l} \quad (2.16)$$

Обычно величина полуволнового напряжения составляет от сотен вольт до нескольких киловольт. График зависимости интенсивности излучения на выходе модулятора от управляющего напряжения показан на рис. 2.14.

Как видно из рисунка, эффективная модуляция достигается при приложении к модулятору постоянного смещения порядка полуволнового напряжения управления, при этом модулятор работает на крутом участке управляющей характеристики. Граничная частота электрооптического модулятора составляет  $10^8 - 10^9$  Гц.

Магнитооптические модуляторы на основе эффекта Фарадея применяются редко, так как имеют малое быстродействие, малую глубину модуляции и заметно поглощают оптическое излучение.



*Рис. 2.14. Влияние управляющего напряжения на интенсивность излучения на выходе электрооптического модулятора*

Для применения в микрооптоэлектронике наиболее перспективны тонкопленочные модуляторы, которые отличаются от массивных более высоким быстродействием и малыми управляющими напряжениями (порядка нескольких вольт), что делает их хорошо совместимыми с микроэлектронными устройствами. Такие модуляторы изготавливаются из ниобата и танталата лития.

В качестве тонкопленочных электрооптических модуляторов применяются и полупроводники. Линейный электрооптический эффект в полупроводниковых  $n$ - $p$  переходах возникает при приложении обратного напряжения из-за изменения концентрации свободных носителей, что приводит к изменению диэлектрической проницаемости и коэффициента преломления. В тонкопленочных структурах на основе арсенида галлия или фосфида индия управляющее напряжение составляет единицы вольт.

В полупроводниковых структурах реализуется и принцип модуляции интенсивности излучения. Интенсивность излучения в полупроводнике затухает экспоненциально, при этом глубина модуляции 0,6 – 0,7 достигается при изменении коэффициента поглощения в 10 раз. В полупроводниковых модуляторах, основанных на поглощении излучения свободными носителями заряда, концентрация носителей регулируется инжекцией

носителей через  $n$ - $p$  переход. Преимущества таких модуляторов состоят в малых рабочих напряжениях, простоте, надежности и высокой технологичности конструкции. К недостаткам следует отнести влияние изменения концентрации носителей при модуляции на другие электрофизические параметры структуры.

### 2.4.3. Дефлекторы

Дефлектор представляет собой устройство для изменения пространственного положения лазерного луча. Наибольшее применение в оптоэлектронике находят электрооптические и акустооптические дефлекторы. Схема электрооптического дефлектора показана на рис. 2.15.

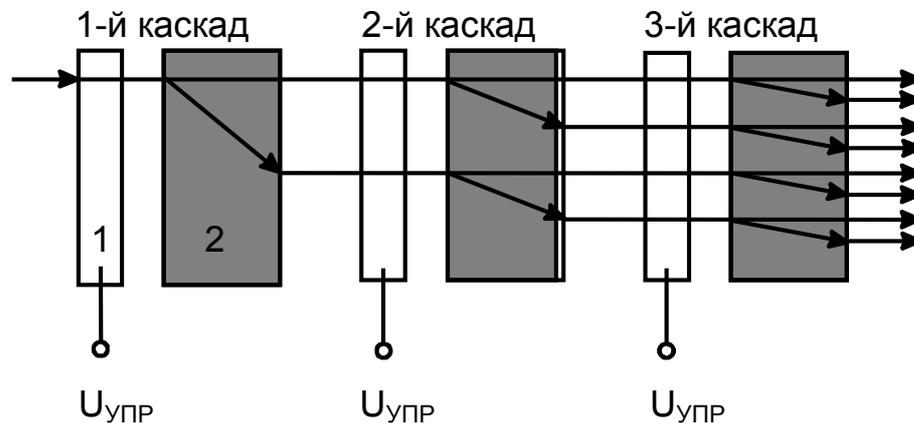


Рис. 2.15. Схема электрооптического дефлектора

Он представляет собой многокаскадное устройство. Каждый каскад состоит из оптического модулятора поляризации 1 и двулучепреломляющего кристалла 2. С помощью модулятора обеспечивается плавное изменение поляризации излучения по заданному закону. В кристалле 2 излучение раздваивается, и эти процессы повторяются в каждом каскаде.

В зависимости от комбинации управляющих напряжений можно получить  $2i$  дискретных положений в пространстве луча на выходе дефлектора ( $i$  – число каскадов). Общее число положений луча в пространстве, достижимое в электрооптическом дефлекторе, составляет

$$N = \frac{\varphi d}{\lambda}, \quad (2.17)$$

где  $N$  – число положений луча,  $\varphi$  – максимальный угол отклонения луча,  $\lambda$  – длина волны.

Важным достоинством такого дефлектора является высокое быстродействие: при  $N = 1000$  время переключения составляет около 0,1 мкс. При увеличении  $N$  быстродействие ухудшается. Оптимальной является такая конструкция дефлектора, в которой при заданном  $N$  обеспечивается минимальная мощность управления и минимальное время переключения. Оптимизация достигается фокусировкой лазерного луча и уменьшением паразитной емкости электрооптических кристаллов. В дефлекторах применяются те же материалы, что и в модуляторах, например, ниобат лития. Наличие многих кристаллов в приборе выдвигает повышенные требования к качеству и параметрам исходных материалов и конструкции в целом.

### 2.5. Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС)

С возникновением лазеров появилась возможность использования электромагнитных колебаний оптического диапазона в системах связи. Но открытые линии лазерной связи недостаточно надежны и потенциальные возможности оптической связи стали эффективно реализовываться после появления в середине шестидесятых годов волоконных световодов. Волоконные световоды являются основой современных ВОЛС. Структурная схема волоконно-оптической линии связи показана на рис. 2.16.

Она включает в себя следующие основные элементы: входное кодирующее устройство КУ, передатчик, оптический кабель, ретранслятор Р, приемник, выходное декодирующее устройство ДКУ.

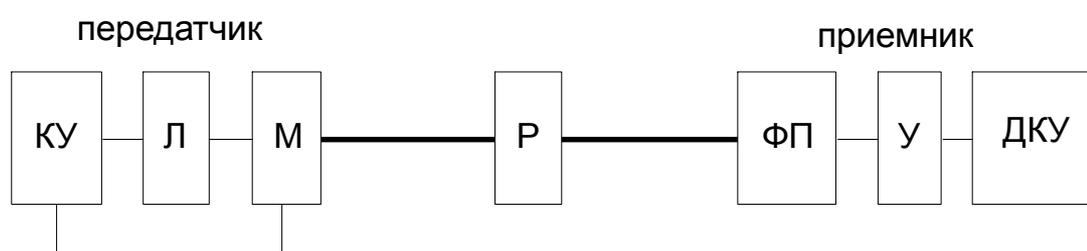


Рис. 2.16. Структурная схема волоконно-оптической линии связи

Кодирующее устройство преобразует исходную информацию в форму, удобную для передачи. Главная часть передатчика – лазер Л (обычно полупроводниковый). Закодированная в электрическом сигнале информация поступает на модулятор, который управляет интенсивностью излучения лазера.

Далее модулированный оптический сигнал передается по оптическому кабелю к приемнику. В длинных линиях связи могут быть использованы промежуточные ретрансляторы для восстановления уровня передаваемого сигнала. Фотоприемник ФП преобразует оптический сигнал в электрический, который затем усиливается и после декодирования поступает на устройство отображения информации.

Основные отличительные особенности ВОЛС:

- 1) высокая помехозащищенность по отношению к электромагнитным воздействиям.
- 2) малые габариты и масса по сравнению с линиями проводной связи (выигрыш в 3 – 5 раз).
- 3) широкий диапазон рабочих частот, позволяющий в принципе передавать по одной линии связи одновременно десять миллиардов телефонных разговоров или миллион телевизионных программ.
- 4) секретность передачи информации: ВОЛС не дает излучения в окружающее пространство, а подключение отводов оптической энергии без разрушения кабеля невозможно.
- 5) потенциально низкая стоимость и высокая долговечность оптических линий связи по сравнению с проводными.

### ***2.5.1. Элементная база ВОЛС***

Элементная база волоконно-оптических систем включает в себя активные оптоэлектронные элементы (излучатели, приемники, оптические усилители, модуляторы и др.). Эти элементы были рассмотрены выше. К оптическим элементам ВОЛС относятся кабели, оптические разъемы, устройства ввода и вывода излучения. Остановимся на этих элементах подробнее.

Основу волоконно-оптической линии связи составляют оптические кабели, изготавливаемые из отдельных световодов. Передача оптической энергии по световоду осуществляется с помощью эффекта полного внутреннего отражения, принцип которого иллюстрируется рис. 2.17.

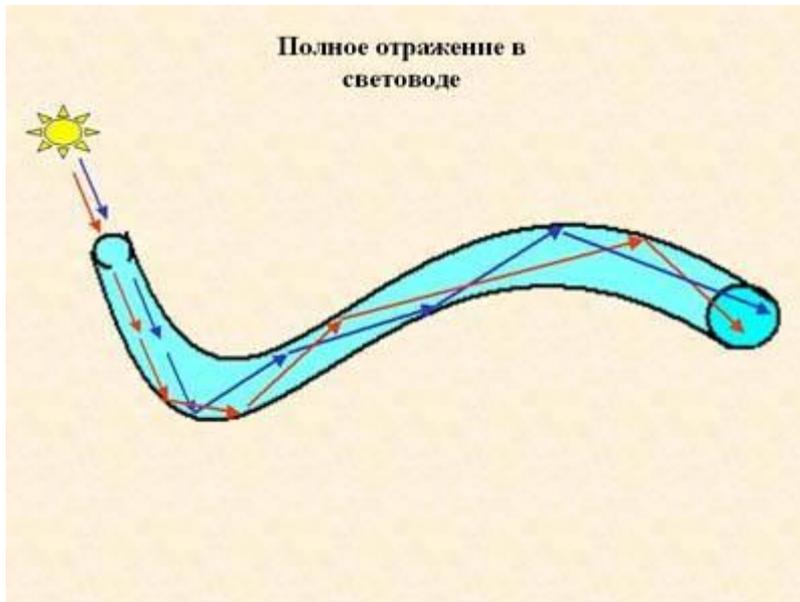


Рис. 2.17. Эффект полного внутреннего отражения в световоде

Рассмотрим цилиндрический двухслойный световод (рис. 2.18).

Пусть показатель преломления внутренней жилы составляет  $n_1$ , а внешней оболочки  $n_2$ .

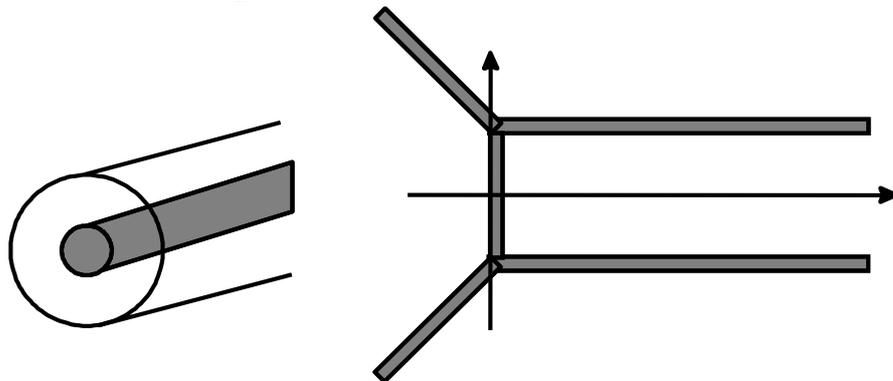


Рис. 2.18. Цилиндрический двухслойный световод.

При этом  $n_1 > n_2$ , то есть материал жилы оптически более плотен. Для излучения, входящего в световод под малыми углами к оси, выполняется условие полного внутреннего отражения: при падении излучения на границу с оболочкой вся энергия излучения отражается внутрь жилы световода.

То же самое происходит и при всех последующих отражениях, и в результате излучение распространяется вдоль оси световода, не выходя за его пределы. Максимальный угол отклонения от оси, при котором наблюдается полное внутреннее отражение, определяется выражением:

$$A_0 = \sin \varphi_0 = \left( n_1^2 - n_2^2 \right)^{1/2} . \quad (2.18)$$

Величина  $A_0$  называется числовой апертурой световода и учитывается при согласовании его с излучателем. Излучение, падающее на торец под более высокими углами (внеапертурные лучи) при взаимодействии с оболочкой не только отражается, но и преломляется, а часть оптической энергии уходит из световода. В конечном итоге после многократных встреч с границей жила – оболочка такое излучение полностью рассеивается из световода.

Излучение распространяется вдоль оси световода и в том случае, если уменьшение показателя преломления от центра к краю происходит плавно. В таких световодах лучи, входящие в торец, фокусируются в осевом направлении. Любой отрезок такого световода действует как короткофокусная линза, вызывая эффект самофокусировки. Такие световоды называются градиентными (английский термин *self focus*).

Основное требование к световодам – минимальные потери излучения. Эти потери определяются значением коэффициента ослабления оптического сигнала  $B$ :

$$B = \frac{1}{l} 10 \lg \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых}}} \text{ дБ/км}, \quad (2.19)$$

где  $P_{\text{вх}}$ ,  $P_{\text{вых}}$  – мощность оптического сигнала на входе и выходе световода,

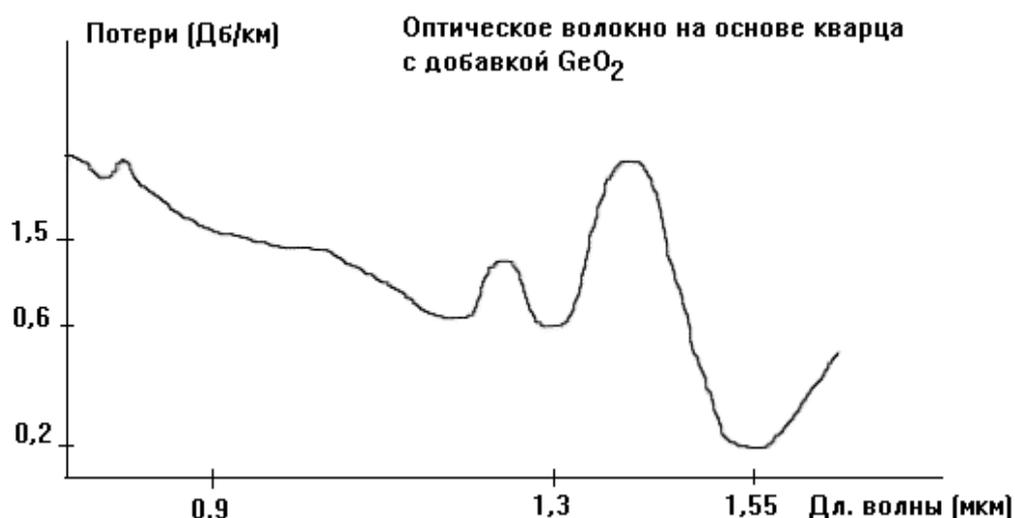
$l$  – длина световода.

Ослабление оптического сигнала обычно измеряется в децибелах на километр и составляет в современных световодах около 0,5 дБ/км, что близко к теоретическому пределу (около 0,2 дБ/км).

Потери в световоде связаны с поглощением и рассеянием оптического излучения. Поглощение излучения чаще всего связано с примесями. Так заметное поглощение в кварце и стекле дают ионы меди, хрома, кобальта, железа и другие. Сильно поглощающие центры образуют гидроксил-ионы, неизбежно присутствующие в материале световода.

Потери рассеяния зависят от наличия в материале световода пузырьков, кристаллических включений и других технологических дефектов. Возможно также рассеяние, вызванное неоднородностью плотности или состава материала по объему. Последнее и определяет нижний предел потерь в световодах.

На рис. 2.19 приведена зависимость потерь в оптическом волокне на основе кварца в зависимости от длины волны излучения.



*Рис.2.19. Зависимость потерь в оптическом волокне на основе кварца в зависимости от длины волны излучения*

Видно, что наименьшие потери характерны для излучения с длинами волн 1,3 и 1,55 мкм. Именно на такие длины волн, как было показано выше, и разрабатываются полупроводниковые светодиоды и лазеры.

Лучшие образцы российского волокна имеют затухание 0,22 дБ/км на длине волны 1,55 мкм, что позволяет строить линии связи длиной до 100 км без регенерации сигналов. Для сравнения, лучшее волокно Sumitomo на длине волны 1,55 мкм имеет затухание 0,154 дБ/км. В оптических лабораториях США разрабатываются еще более «прозрачные», так называемые фтороцирконатные волокна с теоретическим пределом порядка 0,02 дБ/км на длине волны 2,5 мкм. Лабораторные исследования показали, что на основе таких волокон могут быть созданы линии связи с регенерационными участками через 4600 км при скорости передачи порядка 1 Гбит/с. По назначению волоконные световоды можно разделить на пять основных групп:

Одномодовые световоды для скоростных систем передачи и фазовых волоконно-оптических датчиков (ВОД). Эти световоды отличаются предельно низкими потерями (0,2 ... 1 дБ/км) и широкой полосой пропускания (1 ... 100 ГГц-км). Сюда же можно

отнести волокна с сохранением поляризации, необходимые для целого ряда датчиков и перспективных систем передачи с когерентным приемом. Типичные размеры световодов первой группы: диаметр сердцевины 5... 10 мкм, оболочки 125 мкм, числовая апертура 0,15 ... 0,2.

Многомодовые световоды с градиентным профилем показателя преломления, предназначенные для использования в системах передачи на расстояния в несколько километров с полосой пропускания 100 ... 1000 МГц-км. Потери в таких волокнах лежат в пределах 0,5 ... 5 дБ/км, стандартные размеры: диаметр сердцевины 50 мкм, оболочки 125 мкм, типичное значение числовой апертуры около 0,2.

Многомодовые световоды со ступенчатым профилем показателя преломления, предназначенные для использования в локальных сетях, объектовых системах передачи с весьма умеренной полосой пропускания (10... 100МГц-км) и потерями 3 ... 10 дБ/км. Такие световоды имеют повышенную числовую апертуру (0,3 ... 0,6) и диаметр сердцевины 80 ... 400 мкм, допускающие эффективное сопряжение с дешевыми и надежными источниками излучения.

Волоконные световоды со специальными свойствами, к которым относятся волокна целевого назначения для датчиков и других волоконно-оптических функциональных устройств: лазерные волокна, активированные редкоземельными ионами, волокна с пьезоэлектрической или магнитострикционной оболочкой и т. п.

Полимерные световоды со ступенчатым или градиентным профилем показателя преломления, отличающиеся высокой гибкостью, прочностью и низкой стоимостью. Область их применения ограничивается высокими потерями (100...500 дБ/км), поэтому используются они для передачи данных внутри ЭВМ, в роботах, в автомобильных датчиках и т. п.

В оптических кабелях световоды дополняются элементами, обеспечивающими эластичность и прочность системы. Обычно каждый световод покрывается индивидуальной тонкой защитной пленкой, затем жгут световодов объединяется общей оболочкой, и помещается в защитную оплетку, обеспечивающую механическую

прочность и устойчивость к внешним воздействиям. Все защитные оболочки выполняются из полимеров.

Определенный интерес представляют трубчатые капиллярные световоды с жидкостным или газовым наполнением. Достоинством их являются возможности получения малых потерь, большого диаметра световедущей области, использования дешевого низкосортного стекла для оболочки. Но такие световоды имеют более сложную конструкцию и отличаются меньшей стабильностью параметров по сравнению с кварцевыми и стеклянными. Безусловно, наиболее дешевым материалом для световодов являются полимерные волокна. Хотя они имеют довольно высокие потери и плохую спектральную характеристику в ближней инфракрасной области, применение их в коротких линиях связи возможно.

Ввод излучения в световод представляет собой достаточно сложную задачу. Наименьшие потери на входе достигаются при использовании твердотельного лазера с узкоколлимированным лучом. В этом случае потери на отражение не превышают 0,4 дБ. Полупроводниковые лазеры обладают худшей направленностью излучения, поэтому потери при сопряжении лазера с волокном достаточно велики. Так, для кабеля с затуханием 200 дБ/км эффективность ввода излучения составляет 70%, 50 дБ/км – 60%, и при 20 дБ/км – 30%. Отметим, что переход от стеклянного волокна с большими потерями к кварцевому с малыми вполне оправдан, ибо потери на ввод увеличиваются на несколько децибел, а выигрыш при километровой длине составляет десятки децибел.

Наиболее сложно обстоит дело при соединении оптических кабелей со светодиодами, имеющими широкую диаграмму направленности. Потери в этом случае могут составлять до 10 дБ. Увеличение эффективности ввода излучения достигается при использовании фокусировки излучения. Одним из удобных вариантов входного линзового устройства является оплавление концов световодов до придания им полусферической формы.

**Оптические усилители.** Лет 10-15 назад для того, чтобы обеспечить передачу сигнала по волокну на большие расстояния, строили специальные ретрансляционные пункты. Ретранслятор — это последовательно соединенные оптический приемник, формирователь сигналов и оптический передатчик. Расстояние

между ретрансляторами выбиралось исходя из обеспечения минимума ошибок на его выходе с учетом энергетического потенциала пары передатчик-приемник и полосы сигнала.

Гораздо эффективнее вместо ретрансляторов использовать оптические усилители. При этом расстояние между регенераторами можно будет увеличить в несколько раз. Оптический усилитель — это тот же лазер: резонатор, активное вещество, система накачки, но у него уровень накачки такой, что стимулированное излучение не возникает. (В противном случае начнется самовозбуждение усилителя, и он будет работать как генератор. То есть в усилителе условие положительной обратной связи по амплитуде до поступления информационного сигнала не выполняется.) Первые образцы усилителей, используемые в линиях конца 1980-х гг., были полупроводниковые. Затем в конце 1980-х—начале 1990-х гг. были разработаны и освоены волоконные усилители на основе кварца, легированного редкоземельными элементами — эрбием и ниобием. Они получили наиболее широкое распространение.

Активный элемент волоконно-оптического усилителя представляет собой отрезок кварцевого волокна, легированного эрбием. Накачка осуществляется полупроводниковыми лазерами.

**Пассивные элементы ВОЛС.** Можно иметь прекрасные излучатель и приемник, отличное волокно в прочном кабеле. Но если не соединить их воедино с минимумом потерь, то передать сигнал более чем на несколько километров затруднительно. Поэтому, как только было получено первое приемлемое волокно, начались поиски конструкции оптического разъема.

Оптический разъем предназначается для многократного соединения и разъединения отрезков оптических кабелей между собой. Разъем должен быть прост, надежен, и давать минимальные потери. В простейшей конструкции разъема торцы оптических кабелей подводятся вплотную друг к другу, юстируются и механически закрепляются.

На первых порах разъемы были очень не совершенны. Потери в них были до 2 дБ и более. Причина этого в том, что переход излучения из одного волокна в другое происходит через их торцы. Чтобы соединить торцами два волокна диаметром по 9 мкм, их под микроскопом фиксируют в специальных металлокерамических трубках, а торцы полируют алмазным инструментом. Делают это

для того, чтобы свести к минимуму потери на отражение. Все эти ухищрения позволяют сделать потери в разъеме не более 0,2 дБ. А чтобы еще больше уменьшить потери на отражение, торцы волокон шлифуют так, чтобы их поверхность имела некоторый угол по отношению к оси волокна. Соединение двух участков кабеля при этом осуществляется с помощью специальных муфт.

Наиболее эффективным способом соединения кабелей, особенно при прокладке длинных линий, является сварка. Разработаны и серийно выпускаются сварочные аппараты для сварки оптических волокон, производящие практически все операции от начальной юстировки до измерения потерь в сварном соединении автоматически. Качество сварки современных аппаратов таково, что потери в стыке не превышают 0,05 дБ.

Как и в электрических кабельных линиях, в ВОЛС также требуется ответвлять часть оптической мощности от основного волокна или делить ее на равные части. В настоящее время используются практически только ответвители сварного типа. Обычно коэффициент деления мощности в оптических ответвителях выражают в процентах. Например, 35/65%. Обычно шаг деления составляет 5%.

Оптическими элементами ВОЛС являются также оптические смесители. Оптический смеситель представляет собой отрезок моноволоконного световода с посеребренным торцом. Благодаря многократному отражению излучения этот световой поток может быть равномерно распределен между другими световодами, соединенными со смесителем. Схема разветвления волоконно-оптической линии связи показана на рис. 2.20, виды гибких световодов – на рис. 21.

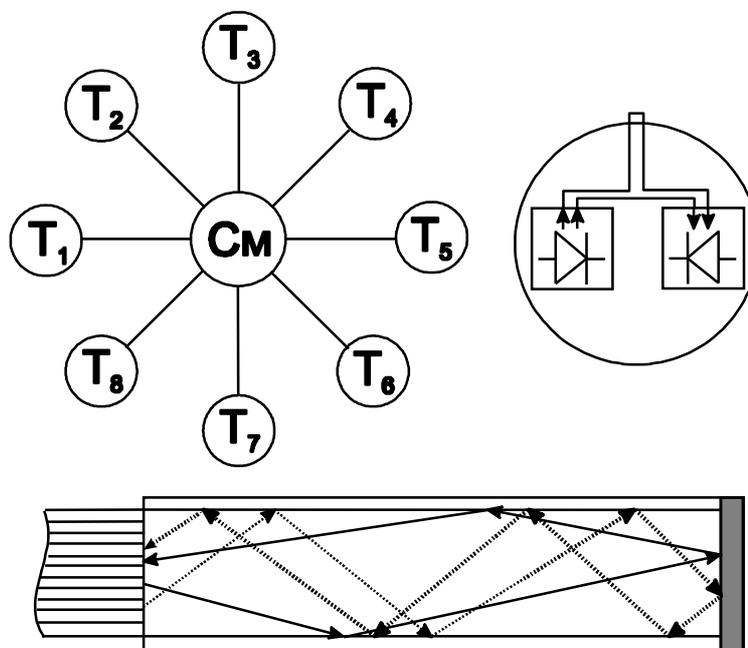


Рис. 2.20. Разветвление волоконно-оптических линий связи.

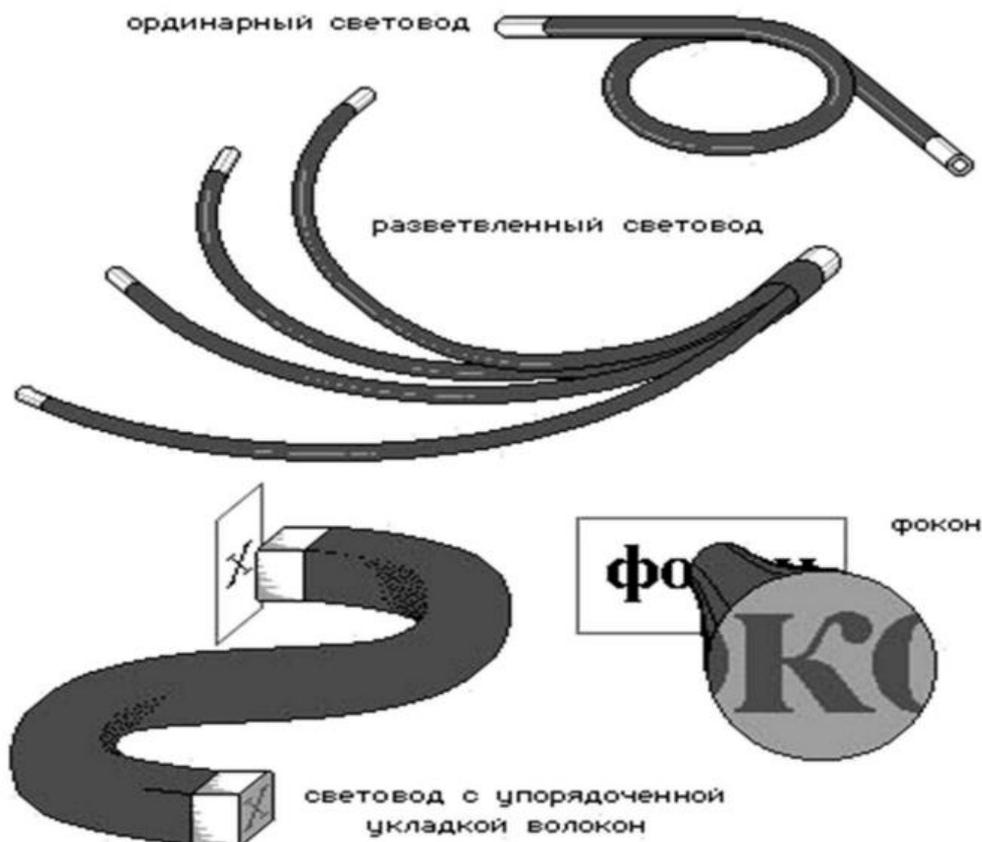


Рис. 2.21. Виды гибких световодов

**Оптические мультиплексоры и демультиплексоры**  
 Оптический мультиплексор служит для введения в один световод множества оптических сигналов различных длин волн, а демультиплексор разделяет смешанное оптическое излучение на

сигналы, соответствующие различным длинам волн. Оптические мультиплексоры и демультиплексоры объединяют в своей конструкции стержневую линзу с градиентом показателя преломления и многослойный диэлектрический фильтр. Благодаря использованию дифракционной решетки мультиплексоры позволяют передавать до 6 оптических сигналов различных длин волн при низких потерях излучения при вводе и выводе, а так же исключают паразитное смешивание полезных сигналов с сигналами других длин волн.

### ***2.5.2. Классификация ВОЛС***

Волоконно-оптические линии связи классифицируются по их протяженности и включают три основные группы:

1. Линии большой протяженности или магистральные. Эти линии, предназначенные для обеспечения дальней связи, должны обладать высокой пропускной способностью (порядка  $10^8$  бит/с) и большим расстоянием между ретрансляторами (на уровне 10 км). С учетом этих требований в качестве источника излучения используется только лазер, а кабель должен обладать минимальными потерями.
2. Линии средней протяженности или внутригородские имеют среднюю длину порядка нескольких километров и предназначены для обеспечения телефонной связи, систем кабельного телевидения, задач специальной связи. Для этих линий могут быть использованы полупроводниковые лазеры в качестве источника излучения и кабели с затуханием порядка 20 дБ/км.
3. Короткие линии обеспечивают связь внутри объектов на расстояниях до сотен метров. Эти линии обычно включают полупроводниковый светодиод и приемник излучения и не содержат таких сложных элементов, как лазеры, модуляторы, оптические разъемы, что обеспечивает их достаточно низкую стоимость при высокой надежности и долговечности. Интересным представляется использование коротких волоконно-оптических кабелей в качестве линий задержки гигагерцевого диапазона.

Как и в случае электрической связи, в волоконно-оптической связи применяют две системы модуляции – аналоговую и цифровую, блок-схемы которых показаны на рис. 2.22.

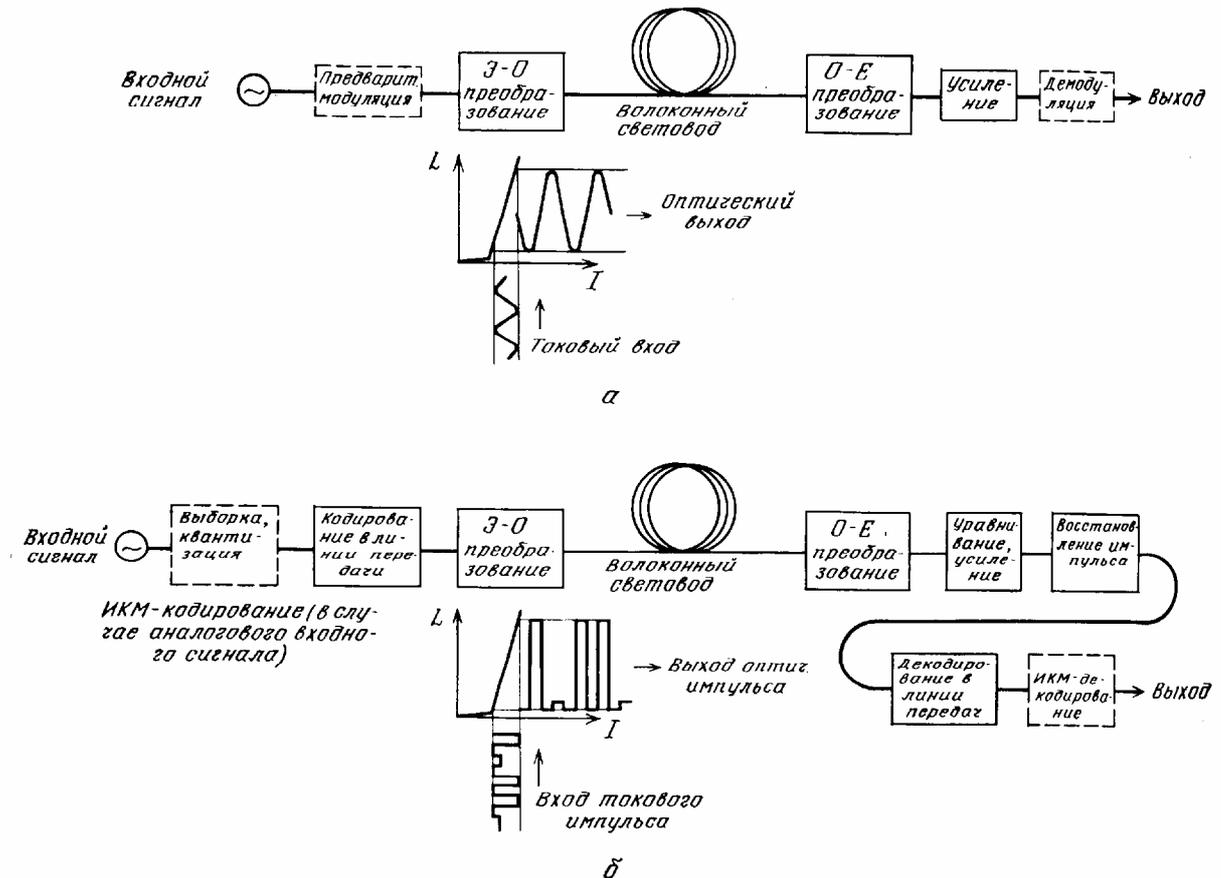


Рис. 2.22. Блок-схемы аналоговой (а) и цифровой (б) систем модуляции

Аналоговая система проста и заключается в модуляции интенсивности излучения. Она не требует использования кодирующих схем. Но такая система может применяться лишь при передаче ограниченных объемов информации на небольшие расстояния. Цифровая система модуляции предусматривает кодирование исходного аналогового сигнала методом импульсно-кодовой модуляции (ИКМ), затем мультиплексирование, кодирование в передающей схеме и модуляцию интенсивности излучения. Волоконно-оптические линии связи являются широкополосными, но из-за нелинейности вольт-амперных характеристик светоизлучающих элементов для реализации широкополосной связи более удобны линии, передающие цифровые данные. Для повышения объема передаваемой информации и обеспечения двусторонней связи по одной линии используется мультиплексная передача оптических сигналов

различных длин волн, излучаемых разными оптическими источниками.

## **2.6. Оптические методы запоминания и хранения информации**

### **2.6.1. Оптические (лазерные) диски**

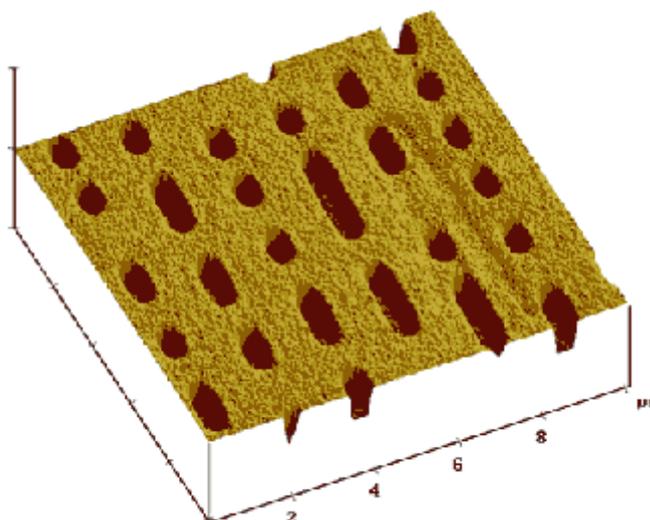
Начиная с 80-х годов, широкое распространение получили *оптические (лазерные) диски*. Это пластиковые или алюминиевые диски, предназначенные для записи и воспроизведения информации при помощи лазерного луча.

Впервые оптическая запись звуковых программ для бытовых целей была осуществлена в 1982 г. фирмами «Sony» и «Philips» в лазерных проигрывателях на компакт-дисках, которые стали обозначаться аббревиатурой CD (Compact Disc). В середине 1980-х годов были созданы компакт-диски с постоянной памятью – CD-ROM (Compact Disc – Read Only Memory). С 1995 стали использоваться перезаписываемые оптические компакт-диски: CD-R (CD Recordable) и CD-E (CD Erasable).

Во второй половине 1990-х годов появились *цифровые универсальные видеодиски DVD* (Digital Versatile Disk) типа DVD-ROM, DVD-RAM, DVD-R с большой емкостью (до 17 Гбайт). Увеличение их ёмкости связано с использованием лазерного луча меньшего диаметра, а также двухслойной и двусторонней записи.

Оптические диски имеют обычно поликарбонатную или стеклянную термообработанную основу. Рабочий слой оптических дисков изготавливают в виде плёнок легкоплавких металлов (теллур) и сплавов (теллур-селен, теллур-углерод, теллур-селен-свинец и др.) или органических красителей. Информационная поверхность оптических дисков покрыта миллиметровым слоем прочного прозрачного пластика (поликарбоната). В процессе записи и воспроизведения на оптических дисках роль преобразователя сигналов выполняет лазерный луч, сфокусированный на рабочем слое диска в пятно диаметром около 1 мкм. При вращении диска лазерный луч следует вдоль дорожки диска, ширина которой также близка к 1 мкм. Возможность фокусировки луча в пятно малого размера позволяет формировать на диске метки площадью 1-3 мкм. В качестве источника света используются лазеры. Под действием лазерного излучения на поверхности формируются чередующиеся цепочки углублений –

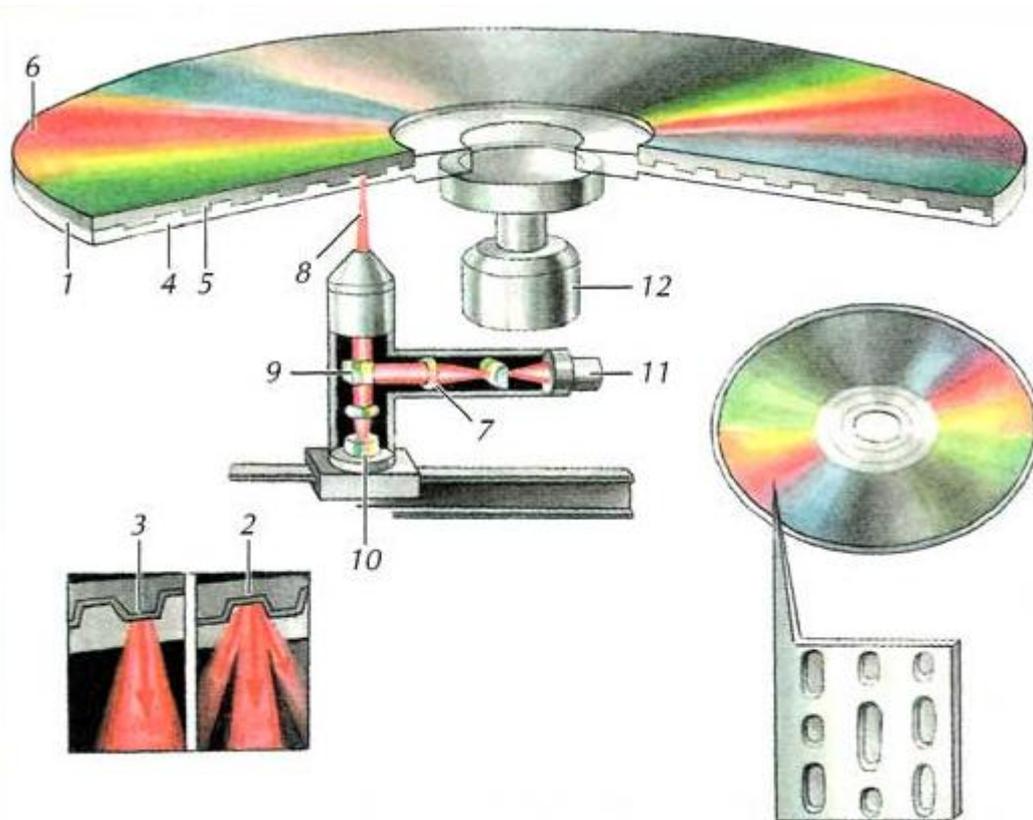
«питы» (от английского pit – ямка, впадина) и возвышенности – «ленды» (от английского land – равнина, земля) (рис. 2.23). Ленды отражают большую часть падающего на них света лазерного излучателя, а питы в силу своей удаленности от точки фокуса не отражают практически ничего.



*Рис. 2.23. Поверхность лазерного диска под электронным микроскопом*

В отличие от магнитных способов записи и воспроизведения, оптические методы являются бесконтактными. Лазерный луч фокусируется на диск объективом, отстоящим от носителя на расстоянии до 1 мм, что исключает возможность механического повреждения оптического диска. Для хорошего отражения лазерного луча используется зеркальное покрытие дисков алюминием или серебром.

Широкое применение в качестве носителя информации получили также *магнитооптические компакт-диски* типа RW (Re Writeble). На них запись информации осуществляется магнитной головкой с одновременным использованием лазерного луча. Лазерный луч нагревает точку на диске, а электромагнит изменяет магнитную ориентацию этой точки. Считывание же производится лазерным лучом меньшей мощности (рис. 2.24).



*Рис. 2.24. Считывание информации с компакт-диска: 1 – компакт-диск; 2 – впадина; 3 – островок; 4 – светопрозрачное покрытие, защищающее нанесенную на CD информацию от повреждения; 5 – отражающее покрытие (записывающая поверхность); 6 – защитный слой; 7 – фокусирующий объектив; 8 – лазерный луч; 9 – преломляющая призма; 10 – фотодетектор; 11 – лазерное устройство; 12 – двигатель, вращающий диск.*

По технологии применения оптические, магнитооптические и цифровые компакт-диски делятся на 3 основных класса:

- Диски с постоянной (нестираемой) информацией (CD-ROM). Это пластиковые компакт-диски диаметром 4,72 дюйма и толщиной 0,05 дюйма. Они изготавливаются с помощью стеклянного диска-оригинала, на который наносится фоторегистрирующий слой. В этом слое лазерная система записи формирует систему пиков (меток в виде микроскопических впадин), которая затем переносится на тиражируемые диски-копии. Считывание информации осуществляется также лазерным лучом в оптическом дисковом персональном компьютере. CD-ROM обычно обладают ёмкостью 650 Мбайт и используются для записи

цифровых звуковых программ, программного обеспечения для ЭВМ и т.п.;

- Диски, допускающие однократную запись и многократное воспроизведение сигналов без возможности их стирания (CD-R; CD-WORM–Write-Once, Read-Many – один раз записал, много раз считал). Используются в электронных архивах и банках данных, во внешних накопителях ЭВМ. Они представляют собой основу из прозрачного материала, на которую нанесён рабочий слой;
- Реверсивные оптические диски, позволяющие многократно записывать, воспроизводить и стирать сигналы (CD-RW; CD-E). Это наиболее универсальные диски, способные заменить магнитные носители практически во всех областях применения. Они аналогичны дискам для однократной записи, но содержат рабочий слой, в котором физические процессы записи являются обратимыми.

Оптические технологии хранения данных от традиционных *красных* лазеров переходят к *синим*, с меньшей длиной волны, позволяющим добиться более высокой плотности записи данных. Емкость дисков, информация на которые записана с помощью синего лазера (Blu-Ray Discs), достигает 200 Гбайт.

Одним из примеров новых разработок является двухфотонная трехмерная технология записи оптических дисков, которая в отличие от традиционных оптических носителей, включая диски DVD, Blu-ray и HD DVD, предлагает создавать носители не с двухмерной, а с трехмерной матрицей битов, формирование которой осуществляется двухфотонным лазером в 3D-пространстве диска. Общее число слоев в диске 2-photon 3D может быть эквивалентно 250 слоям DVD, а емкость такого слоя может быть в 5 раз выше, чем емкость слоя современного накопителя высокой четкости. Записать на такой диск можно 1 ТБ данных.

Активно ведутся работы по созданию ещё более компактных носителей информации с использованием нанотехнологий. Плотность упаковки элементов, собранных из атомов, в тысячи раз больше, чем в современной микроэлектронике. Такой компакт-диск может заменить тысячи лазерных дисков.

## ***2.6.2. Голографические системы хранения и обработки информации***

### ***2.6.2.1. Принцип голографии***

Попытайтесь, разглядывая фотографию, заглянуть за предметы, находящиеся на переднем плане. Это, конечно, не удастся, так как фотография – плоское изображение, полученное из определенной точки наблюдения. Голография же позволяет это сделать. Световые волны, записанные и восстановленные голограммой, создают полную иллюзию реальности наблюдаемых предметов – объемность, цвет, возможность изменения точки наблюдения. Голография это способ регистрации и последующего восстановления световых волн, получивший развитие благодаря оптоэлектронике и, прежде всего лазерам.

Для записи информации об объекте необходимо каким-либо образом зафиксировать как амплитуду, так и фазу отраженной от объекта пространственной волны. Наблюдать изменение фазы волн можно только в результате интерференции данной волны с другой, когерентной ей волной.

В основе принципа голографии лежит интерференция когерентных волн: волны, отраженной от объекта, и некоторой вспомогательной (опорной) когерентной ей волны. Фиксируя на фотопластинке амплитуду результирующей волны, т. е. интерференционную картину, получающуюся при сложении двух когерентных волн, записывают полную информацию (амплитудно-фазовую) об отраженной от объекта волне. Полученную картину называют голограммой. Чтобы восстановить записанное на голограмме изображение объекта, надо осветить ее опорной световой волной. При этом происходит дифракция опорной волны на интерференционной картине и исходная волна полностью восстанавливается. Это означает, что на стадии восстановления (считывания) голограмма обеспечивает формирование точно такой же световой волны, которая на стадии записи отражалась от объекта. Таким образом, когерентные оптические сигналы позволяют осуществлять обработку многомерной информации, например анализ изображений, графиков, чертежей, или одновременную параллельную обработку информации – многоканальную обработку.

### 2.6.2.2. Голографическое запоминающее устройство

Простейшая схема записи информации голографическим запоминающим устройством представлена на рис. 2.25.

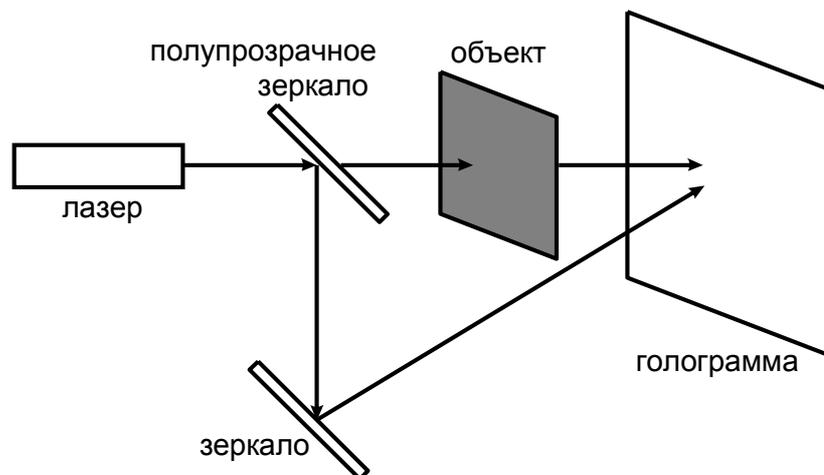


Рис. 2.25. Схема голографической записи информации

Лазерный луч проходит через делитель и распадается на два луча: сигнальный и опорный. Сигнальный луч проходит через объект, которым может быть модулятор или система модуляторов, и поступает на голограмму. Опорный луч проходит через отклоняющее устройство и также поступает на голограмму. При этом информация, заключенная в фазе и амплитуде световых волн в результате их первичной модуляции, записывается на голограмме в виде интерференционной картины, возникающей при взаимодействии опорной и сигнальной волн. Применяя систему модуляторов (на рисунке не показаны) и поочередно закрывая или открывая отдельные модуляторы, можно изменять направление опорного луча, выходящего из отклоняющего устройства.

Таким образом, на одну и ту же голограмму может быть записано множество различных двумерных комбинаций светящихся точек. Они являются носителями определенной цифровой информации. Для считывания этой информации необходимо осветить голограмму лучом, полностью соответствующим опорному лучу, который был использован при записи. В рассмотренном примере информация записывалась сразу на всю голограмму. Для записи новой информации изменялось направление опорного луча. Более высокая плотность записи информации обеспечивается, если всю площадь голограммы разбить на небольшие участки. Такой участок можно представить

себе как элементарную голограмму. В этом случае говорят о матрице элементарных голограмм или, проще, о матрице голограмм. Отклоняющее устройство обеспечивает сканирование сигнального луча по матрице, и в каждом элементе матрицы записывается определенный объем информации.

Таким образом, в голографическом запоминающем устройстве имеется матрица голограмм, или запоминающая матрица. В каждом элементе матрицы записывается двумерная картина интерференции двух световых волн: опорной волны и волны, промодулированной информационным сигналом.

### 2.6.2.3. Голографические схемы записи и считывания информации

Схема записи (рис. 2.26,а) содержит лазер 1, дефлектор 2, вспомогательную матрицу голограмм 3, собирающие линзы 4, пространственно-временной модулятор 5 и запоминающую матрицу голограмм 6.

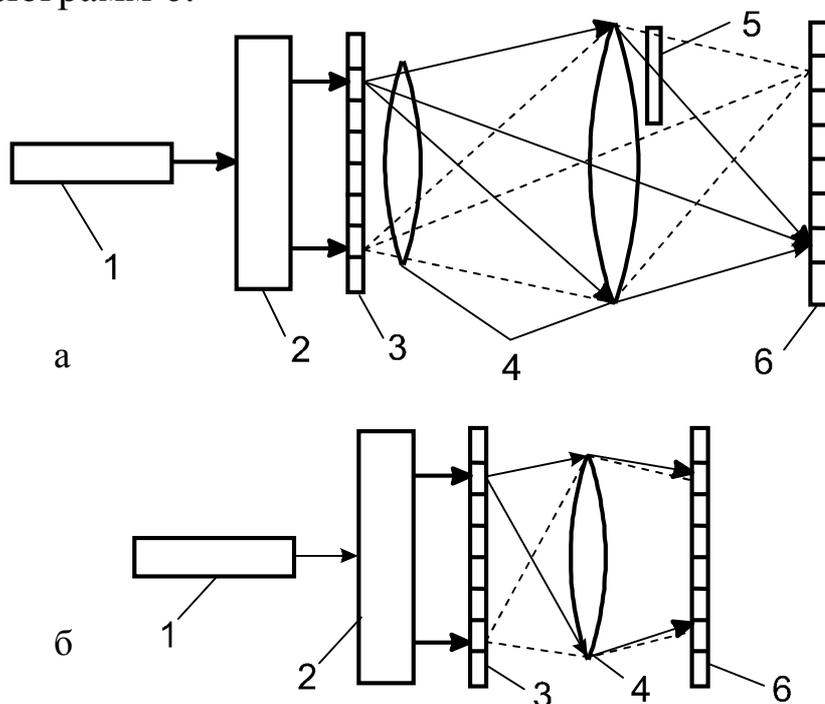


Рис. 2.26. Голографическая схема записи (а) и считывания информации (б).

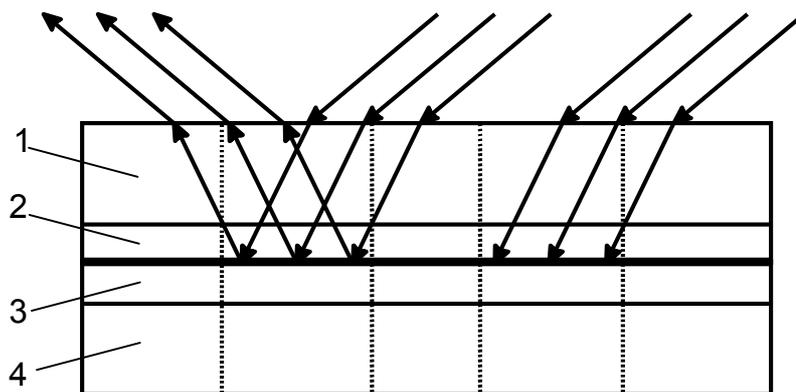
Пусть дефлектор 2 направляет лазерный луч (сплошная линия) на голограмму вспомогательной матрицы 3. После голограммы возникнут две волны: одна, пройдя через линзу 4, попадает на голограмму запоминающей матрицы 6 – это опорная волна; другая,

пространственно-модулированная, также попадет на голограмму запоминающей матрицы – это сигнальная волна. Если отклоняющее устройство направит луч на другую голограмму вспомогательной матрицы, то информация будет записана соответственно в другой голограмме запоминающей матрицы (пунктир на рис. 2.26).

Рассмотренная схема используется для вывода информации из ЭВМ с последующей записью этой информации в оптическом запоминающем устройстве. Выводимая из ЭВМ информация поступает в пространственно-временной модулятор в виде управляющих электрических сигналов.

Голографическая схема считывания информации представлена на рис. 2.26,б. Она содержит лазер 1, дефлектор 2, систему линз 4, запоминающую матрицу 3 и матрицу фотоприемников 6. При считывании информации дефлектор 2 направляет луч на определенную голограмму в запоминающей матрице 3. Восстановленное изображение проецируется на матрицу фотоприемников 6. В итоге оптический сигнал (изображение), записанный в данной голограмме, превращается в совокупность электрических сигналов.

В современных голографических схемах функции матрицы ввода данных и матрицы фотоприемников обычно объединяют в одном устройстве, так называемой «латрице». Структура «латрицы» представлена на рис. 2.27.



*Рис. 2.27. Структура голографической «латрицы»: 1 – стекло; 2 – прозрачный проводник; 3 – жидкий кристалл; 4 – кремниевая пластина.*

На кремниевой пластине изготавливается матрица оптических ключей, каждый из которых состоит из фотоприемника и триггера. Если такой ключ открыт, то он рассеивает свет, если закрыт, то

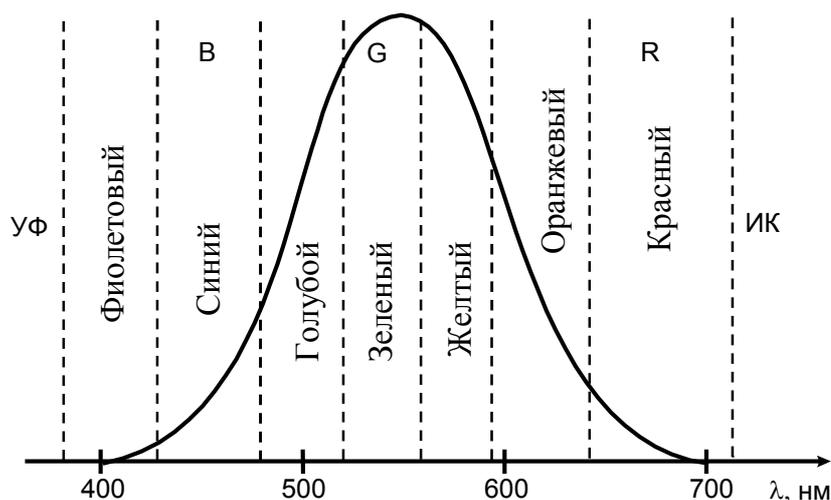
отражает. Управление оптическими ключами обеспечивается напряжением, которое подается на соответствующий участок жидкого кристалла: напряжение подано – ключ открыт, напряжение отсутствует – ключ закрыт. На стадии записи информации управляющие электрические сигналы задают определенную комбинацию открытых и закрытых оптических ключей.

В результате информационная волна излучения пространственно модулируется. При считывании все ключи открыты, излучение свободно проходит через слой жидкого кристалла и попадает на фотоприемники. Каждый фотоприемник связан с определенным триггером, который запоминает состояние фотоприемника.

## ***2.7. Системы отображения информации***

### ***2.7.1. Особенности зрительного восприятия информации***

Отображение информации – одна из важнейших задач электроники, ибо более 70% информации человек воспринимает с помощью зрения. Видимая область составляет очень малую часть оптического диапазона длин волн, чувствительность глаза максимальна в центре этой области и резко спадает к ее краям. Это свойство зрения характеризуется кривой видности (рис. 2.28).



*Рис. 2.28. Кривая видности глаза.*

В максимуме спектральной чувствительности при 555 нм 1 Вт мощности излучения эквивалентен световому потоку 680 лм, для широкополосного белого цвета эта величина составляет 360 лм/Вт. Динамический диапазон воспринимаемых глазом яркостей очень

широк – от  $10^{-7}$  кд/м<sup>2</sup> (в темноте) до  $10^5$  кд/м<sup>2</sup> при яркой внешней засветке. При яркости менее 1 кд/м<sup>2</sup> обычно работает «сумеречный» механизм зрения и цветового восприятия нет. Разные по яркости источники вызывают различные зрительные восприятия. Обычно человек различает не более 8 – 10 градаций яркости или полутонов.

Поэтому если информация передается путем изменения яркости индикаторного устройства, то нельзя использовать более 4 – 5 градаций, а для надежной передачи – только две. Разрешающая способность глаза (угловая) составляет около 1 минуты, что соответствует различению на расстоянии 10 м двух штрихов, расположенных на расстоянии 3 мм друг от друга. Для быстрого и безошибочного восприятия простого объекта (цифры, буквы) нужно, чтобы угловые размеры его составляли около 1 градуса. При этом оптимальная высота знака составляет около 0,05 – 0,01 расстояния между глазом и индикатором. Полный угол зрения человека составляет 120 градусов по горизонтали и 90 по вертикали, а обзор для зоны максимального разрешения имеет соответствующие углы 20 и 15 градусов. Поэтому и размеры экранов обычно имеют соотношение сторон 4:3. В последние годы проводится введение экранов с размерами 16:9. Кроме яркости и размеров индикатора большое значение имеет контрастность, величина которой характеризуется отношением разности яркостей источника и фона к яркости источника излучения.

Особое значение имеет восприятие человеческим глазом цвета излучения. Сетчатка глаза содержит рецепторы трех видов – повышенной чувствительностью в красной, зеленой и синей областях спектра. Это означает, что цветовое излучение можно рассматривать как вектор в трехмерном пространстве, осями которого являются красный, зеленый и синий векторы (700, 546 и 436 нм соответственно). Упрощенная цветовая характеристика объекта возможна и в двумерном виде – точкой на цветовом графике МКО (рис. 2.29).

Значение цветовых индексов источника (координаты  $x$  и  $y$ ) позволяет найти две его важнейшие характеристики: цветовую тональность, определяемую преобладающей длиной волны излучения ( $\lambda_F$  для источника  $F$ ) и цветовую насыщенность, определяемую чистотой цвета (выраженное в % отношение отрезков  $W - F$  и  $W - \lambda_F$  на рис. 2.29).

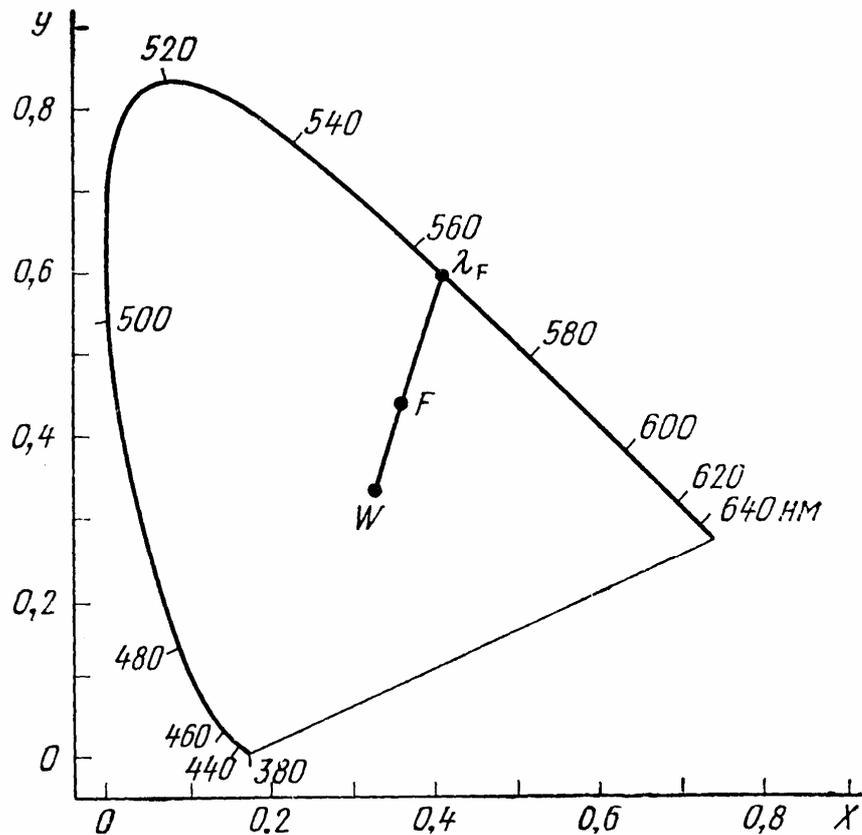


Рис. 2.29. Цветовой график МКО.

Опорная точка цветового графика –  $W$  ( $x = y = 1/3$ ) соответствует белому цвету, для которого характерны отсутствие тональности и нулевая чистота цвета. Оптимальный белый цвет получается при смешении трех цветов с длиной волны 450, 540 и 610 нм. Лучше всего глаз человека различает следующие цвета: белый, черный, красный, желтый, зеленый, синий. Поэтому и многоцветные индикаторы должны использовать 3 – 6 цветов. При сильной внешней засветке белым светом удобны красный, желтый, синий цвета. При слабой засветке к ним можно добавить белый и зеленый. Для индикаторов с малым размером изображения оптимальны белый и желтый цвета. Наиболее контрастные области для красного, желтого и зеленого цветов лежат в диапазоне 610-630, 588-598 и менее 548 нм соответственно.

Временной отклик или быстродействие зрения сравнительно невелико, поэтому для восприятия непрерывного изображения необходимы определенные частоты подачи сигнала. При низких частотах ощущается мерцание, что резко ухудшает восприятие. Эффект мерцания обычно пропадает при частоте смены кадров более 30 Гц.

Кроме соответствия характеристикам зрения человека к системам отображения информации предъявляется и ряд других требований, в частности:

- минимальное отношение площади к глубине,
- экономичность,
- быстроедействие,
- хорошая сочетаемость с современной элементной базой электроники,
- минимальное вредное воздействие на организм человека и т.д.

### **2.7.2. Физические эффекты, используемые для отображения информации**

Рассмотрим основные физические эффекты, которые могут быть использованы для отображения информации.

1. Возбуждение излучения люминофора электронным лучом (электронно-лучевые приборы).
2. Излучение газового разряда и люминофоров, возбуждаемых газовым разрядом (газоразрядные индикаторы и индикаторные панели).
3. Возбуждение люминофоров в переменном электрическом поле (электролюминесцентные индикаторы).
4. Инжекционная люминесценция монокристаллических полупроводников с  $n$ - $p$  переходами (полупроводниковые светодиоды и лазеры).
5. Возбуждение люминофоров полупроводниковыми излучателями, включая антистоксовый люминофор, нанесенный на ИК-излучатель, и обычный люминофор на излучателе сине-фиолетового диапазона.
6. Электролюминесценция тонких поликристаллических полупроводниковых пленок (тонкопленочные электролюминесцентные индикаторы).
7. Низковольтная катодолуминесценция (вакуумные люминесцентные индикаторы).
8. Низковольтная катодолуминесценция на основе автоэлектронной эмиссии.
9. Электрооптические эффекты в жидких кристаллах (жидкокристаллические индикаторы).

10. Изменение окраски вещества при пропускании через него электрического тока (электрохромные индикаторы).
11. Электрооптические эффекты в сегнетоэлектриках с двойным лучепреломлением (сегнетоэлектрические индикаторы).
12. Перемещение заряженных коллоидных частиц под действием электрического поля (электрофоретические индикаторы).
13. Обратимые электрохимические процессы (электрохимические индикаторы).

Все указанные выше индикаторы можно разделить на две группы: активные индикаторы, использующие эффекты генерации света, и пассивные, требующие внешней подсветки.

Рассмотрим физические основы работы наиболее распространенных и перспективных систем отображения информации.

### 2.7.3. Электронно-лучевые трубки.

Кинескопы и вакуумные дисплейные трубки – это наиболее распространенные и массовые в настоящее время системы отображения информации. Черно-белые (монохромные) электронно-лучевые трубки используют электростатическую фокусировку и магнитное отклонение луча. Электронно-оптическая система – трехлинзовая, включает в себя иммерсионный объектив, иммерсионную и одиночную линзы (рис. 2.30). Электрический сигнал поступает в прибор через цепь катод – модулятор. В приборе осуществляется непрерывная построочная развертка луча (625 строк). Максимальный угол отклонения луча составляет  $110^\circ$ .

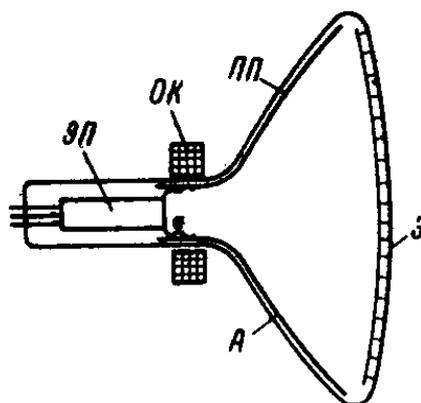


Рис.2.30. Черно-белый кинескоп.

Кинескопы цветного телевидения имеют две разновидности – с дельтообразной электронно-оптической системой и мозаичным экраном или с планарной электронно-оптической системой и линейчатым экраном (рис. 2.31).

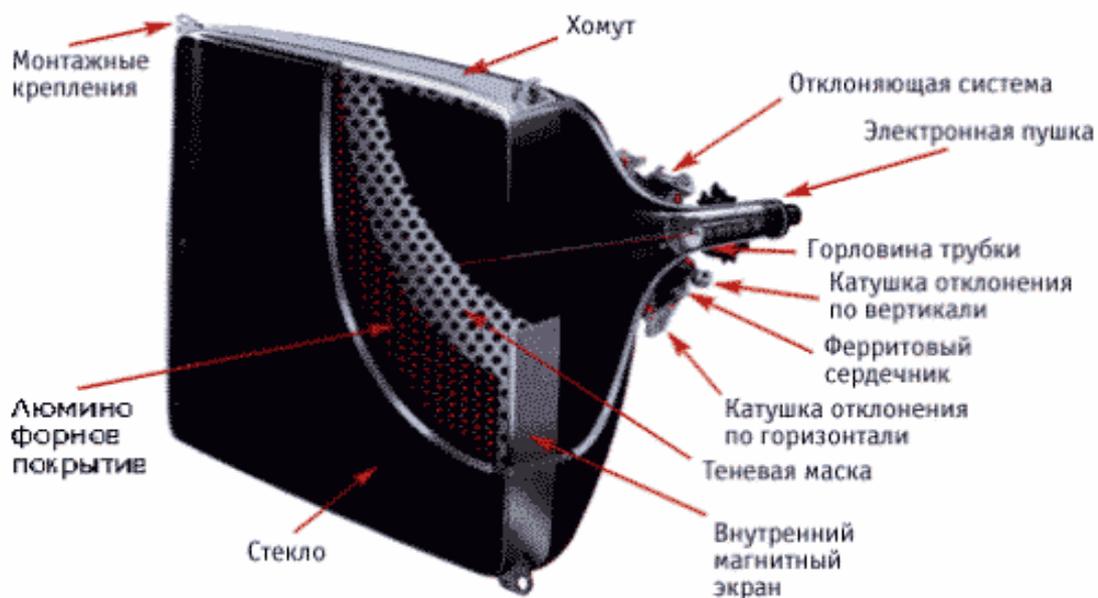


Рис. 2.31. Устройство цветного кинескопа

Кинескоп с теневой маской и точечным экраном имеет люминесцентное покрытие из серии триад люминофоров красного, синего и зеленого цвета. Перед экраном на расстоянии 10 мм располагается цветоделительная маска, которая обеспечивает прохождение лучей только на «свои» точки люминографа и представляют собой фольгу с отверстиями, количество которых равно числу триад на экране ( $\approx 500000$ ). Принцип цветоделения ясен из рис. 2.32.

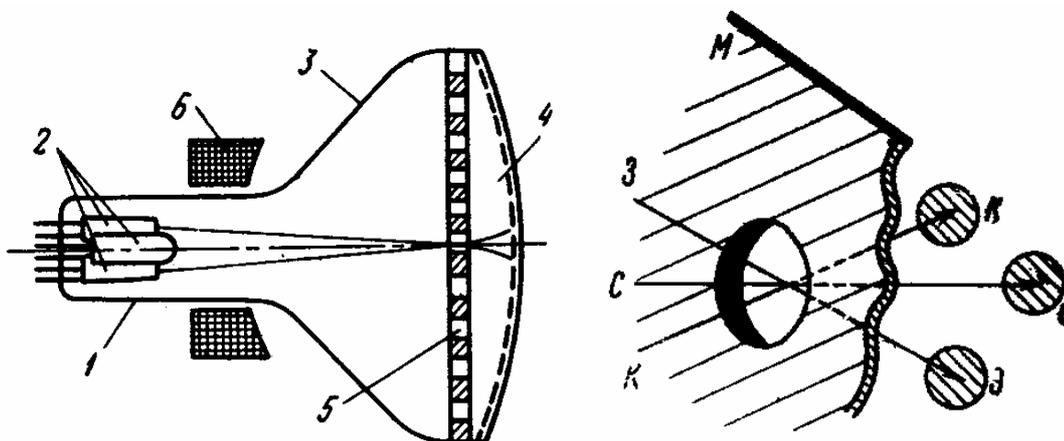
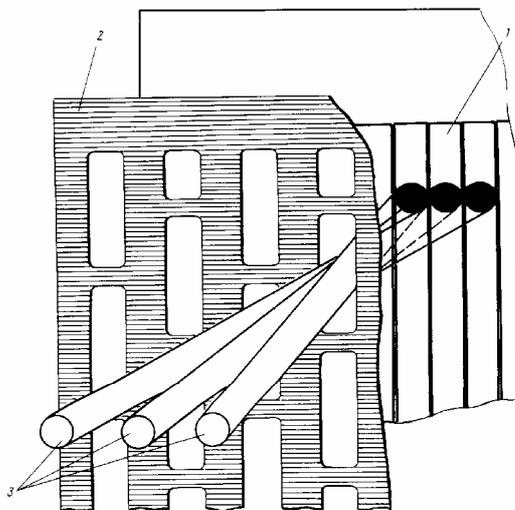


Рис. 2.32. Цветной кинескоп (принцип цветоделения)

Электронно-оптическая система состоит из трех электронных прожекторов, оси которых образуют равносторонний треугольник. Снаружи трубки на горловине устанавливается система электромагнитного управления, служащая для совмещения лучей, а также отклоняющая система. Недостатки такого кинескопа – малая прозрачность маски (~15%), сложность коррекции сходимости электронных пучков и обеспечения чистоты цветов. Такие кинескопы промышленностью уже не выпускаются и представляют лишь исторический интерес.

Недостатки мозаичных экранов устраняются в кинескопе со щелевой маской и планарной ЭОС (рис. 2.33). Экран такого кинескопа имеет линейчатую структуру в виде сплошных вертикальных полос люминофоров красного, зеленого и синего цветов. Маска имеет щелевидные отверстия сравнительно небольшой длины. Основные преимущества кинескопа – повышенная на 15-20% яркость изображения, высокая чистота цветов, меньшая чувствительность к воздействию внешних магнитных полей, возможность самосведения лучей.



*Рис. 2.33. Кинескоп со щелевой маской и планарной ЭОС:  
1 – люминесцентный экран, 2 – щелевидная цветоделительная  
маска, 3 – электронные лучи.*

Кинескопы с повышенной разрешающей способностью имеют 1000-1200 линий на экране, маску меньшей толщины (до 0,1 мм) с большей площадью отверстий, антибликовое покрытие на экране, прецизионные отклоняющие системы.

В кинескопах с апертурной решеткой в качестве маски используется вертикальная проволочная сетка (апертурная решетка), люминофор наносится в виде вертикальных полос трех основных цветов. Для гашения поперечных колебаний и придания проволочной сетке дополнительной жесткости применяются горизонтальные проволочки, которые называются Damper Wire — демпферные нити.

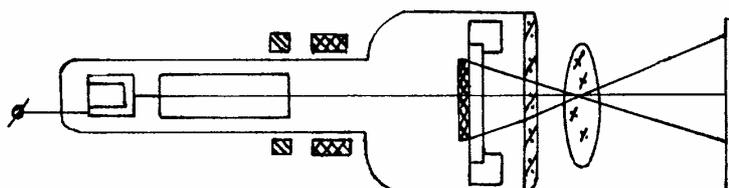
Качество воспроизведения изображения на экране кинескопа (монитора) характеризуется разрешающей способностью. Разрешение монитора 1024×768 означает возможность различить до 1024 точек по горизонтали при числе строк до 768. Под шагом точки (величиной «зерна») монитора понимается расстояние между соседними точками одного цвета. Размер одной точки на экране современного кинескопа составляет 0,25 – 0,27 мм.

Необходимо отметить, что электронно-лучевые приборы для отображения информации плохо сочетаются с конструктивно-технологическими принципами и элементной базой оптоэлектроники из-за больших габаритов, наличия вакуумного объема, высоких электрических напряжений, высокого энергопотребления. Однако эти приборы сохраняют свои позиции как средство отображения информации по двум основным причинам. Во-первых, для них характерно высокое качество изображения, полностью соответствующее требованиям со стороны органов зрения человека. Современные вакуумные дисплеи имеют плоский экран с достаточно большими размерами, спрямленные углы, высокую разрешающую способность. Во-вторых, средства отображения информации на электронно-лучевых трубках дешевле, чем их ближайшие конкуренты – жидкокристаллические экраны.

#### **2.7.4. Проекционные ЭЛТ и системы**

Для получения телевизионных изображений на большом экране используются устройства с проекционными кинескопами. Катодолюминесцентные кинескопы применяются для создания черно-белого и цветного изображения на экранах средних размеров (1-2 м<sup>2</sup>). Для получения хорошего изображения на экране яркость свечения проекционной трубки, с учетом потерь света в оптической системе и ослабления изображения за счет разницы площадей экрана кинескопа и проекционного экрана, должна в сотни раз

превышать яркость экрана обычного кинескопа. Это достигается главным образом за счет повышения рабочих токов и анодных напряжений (до 25-80 кВ) при размере экрана кинескопа 6-18 см по диагонали. Лазерные кинескопы (квантоскопы) имеют полупроводниковый экран, в материале которого под действием электронного луча происходит генерация лазерного излучения (рис. 2.34).



*Рис. 2.34. Квантоскоп.*

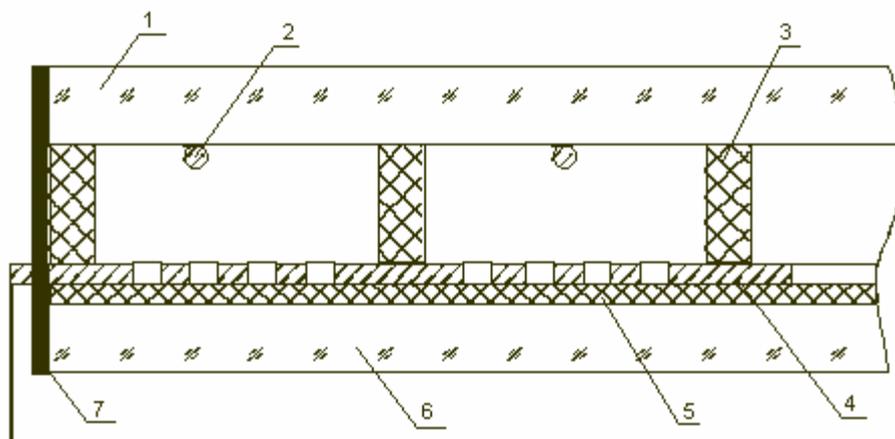
Основным элементом квантоскопа является лазерный экран, представляющий собой полупроводниковую пластину с сформированными на ней лазерами в оптическом резонаторе. Изображение создается при сканировании электронного луча. Использование полупроводниковых лазеров красного, зеленого и синего цветов позволяет получать цветное изображение. Средняя яркость такого экрана (до  $10^8$  Кд/м<sup>2</sup>) на три порядка выше, чем люминесцентного. Особенности таких приборов является необходимость эффективного отвода тепла от экрана и применение специальных средств защиты от рентгеновского излучения.

### **2.7.5. Плазменные дисплеи**

Плазменные дисплеи или газоразрядные индикаторные панели в последние годы находят достаточно широкое применение как средство отображения информации.

Газоразрядная индикаторная панель представляет собой две стеклянные пластины, расположенные параллельно друг другу и загерметизированные по периметру тонким слоем специального герметика. На внутренних поверхностях стеклопластин расположены люминофорные элементы и электродные системы, образующие матричную триадную систему управления отображением информации. Приборы наполнены смесью инертных газов, обычно ксенона и неона, при давлениях близких к атмосферному.

Различают панели постоянного и переменного тока. Принципиальная схема ГИП постоянного тока показана на рис. 2.35.

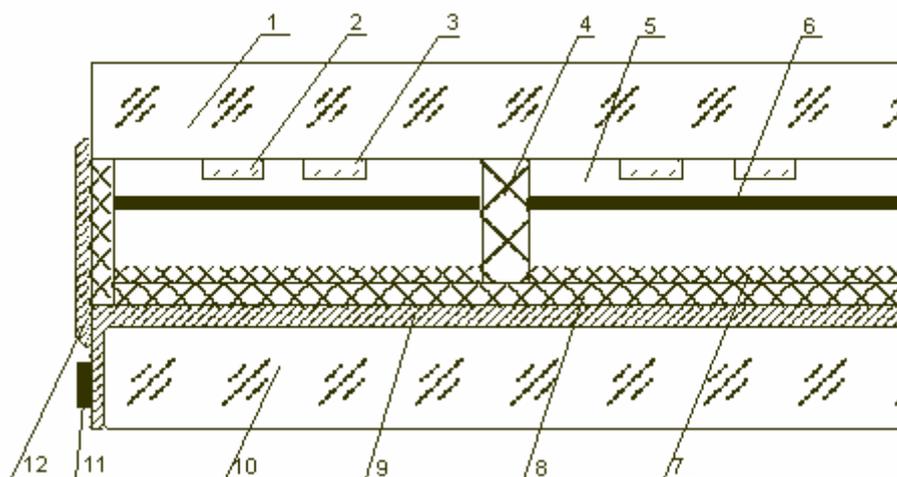


*Рис. 2.35. Принципиальная схема газоразрядной индикаторной панели постоянного тока: 1 – лицевая стеклопластина; 2 – анод; 3 – диэлектрическая матричная решетка; 4 – катод; 5 – люминофор; 6 – тыльная стеклопластина; 7 – шов герметизации*

Между электродами на внутренних поверхностях стеклопластин сформирована диэлектрическая матричная решетка, которая задает одинаковый во всех индикаторных ячейках зазор между электродами. Кроме того, матричная решетка предотвращает раздавливание индикатора под действием атмосферного давления. Стенки матричной решетки препятствуют проникновению излучения из одной ячейки в другую, что обеспечивает высокий детальный контраст газоразрядных индикаторов. На внутренней поверхности стеклопластины расположен тонкий слой люминофора, который преобразует ультрафиолетовое свечение газового разряда в видимое излучение. Как и у кинескопов, основные цвета свечения ячеек – красный, зеленый и синий. В совокупности три ячейки образуют триаду, которая обеспечивает полноцветную цветопередачу изображения.

Панели постоянного тока, а также панели с самосканированием не могут полностью запоминать информацию, что ограничивает размеры их индикаторного поля и требует внешнего запоминающего устройства.

Наиболее широкое применение находят газоразрядные индикаторные панели переменного тока, принципиальная схема которых показана на рис. 2.36.



*Рис. 2.36. Принципиальная схема ГИП переменного тока:  
 1, 10 – стеклопластины; 2,3 – электроды индикации;  
 4 – диэлектрические барьеры; 5,8 – диэлектрик; 6 – защитный  
 слой; 7 – люминофор; 9 – адресный электрод; 11 – контактная  
 площадка; 12 – шов герметизации*

Панель, конструкция которой схематически показана на рис. 2.36, состоит из двух толстых стеклянных пластин, с внутренней стороны которых расположены системы взаимно-перпендикулярных металлических электродов. Поверхность электродов покрыта слоем окиси магния, который выполняет изолирующую функцию и одновременно обеспечивает вторичную эмиссию при бомбардировке положительными ионами газа.

Зазор между пластинками фиксируется с помощью прокладок и заполняется газом под давлением, близким к атмосферному. Рассмотрим принцип действия панели.

Между системой вертикальных и горизонтальных электродов приложено переменное напряжение  $U_{on}$ , амплитуда которого недостаточна для зажигания, но достаточна для поддержания разряда. Для возбуждения разряда в данной ячейке на соответствующую пару вертикальных и горизонтальных электродов подаются во временной интервал импульсы записи ( $U_{zan}$ ), суммарная амплитуда которых достаточна для зажигания (двухкоординатная выборка).

В результате прохождения разрядного тока на конденсаторной структуре, представляющей собой изолирующие слои стекла на проводниках, возникают электрические заряды, создающие напряжение  $U_c$  с полярностью, противоположной  $U_{zan}$ , возбуждившей

разряд. Возникновение напряжения на структуре приводит к самогашению разряда, т.е. к ограничению длительности протекания разрядного тока. Так как время стекания возникших на диэлектрике зарядов велико, то в следующий временной интервал созданное им  $U_c$  суммируется с изменившим знак  $U_{on}$ , и напряжение, приложенное к ячейке, оказывается достаточным для зажигания. Этот процесс повторяется во времени.

Таким образом, ячейка оказывается бистабильным элементом, так как при приложении одинакового опорного напряжения она может находиться в одном из двух состояний: проводящем или непроводящем. Для гашения разряда на ячейку подают стирающий импульс  $U_{ст}$ , который, вызывая частичный разряд конденсатора, понижает напряжение на нём, вследствие чего повторные зажигания разряда в ячейке становятся невозможными. Для полного стирания изображения можно отключить опорное напряжение на время, достаточное для рассасывания накопленного в диэлектрических слоях заряда.

Описанные выше режимы работы газоразрядных панелей используются при воспроизведении однотонных монохромных изображений. При воспроизведении полутоновой информации важной проблемой становится модуляция яркости. При модуляции яркости в ГИП переменного тока применяется метод временной модуляции яркости с полным или частичным кадровым запоминанием.

В большей части существующих ГИП излучение создаётся областью отрицательного свечения разряда. При этом неон даёт оранжево-красное свечение. Для получения разных цветов и многоцветного изображения в качестве газового наполнения используются смеси на основе ксенона, в которых основная часть излучения приходится на УФ область спектра. Для преобразования УФ излучения в видимое используются фото или, иногда, катодлюминофоры. При этом целесообразно вместо тлеющего свечения использовать положительный столб разряда, который более богат УФ излучением.

В заключение можно отметить, что ГИП – один из наиболее перспективных электронных приборов для отображения информации. Быстрое развитие универсальных ГИП делает их серьёзным конкурентом ЭЛТ при отображении больших массивов

буквенно-цифровой, графической и полутоновой информации. С помощью ГИП получено цветное телевизионное изображения с характеристиками, близкими к достигаемым в устройствах с ЭЛТ.

Так, одна из отечественных компаний – Инкотекс, (ООО Микроэлектронные системы, при НИИ ядерной физики МГУ им. М.В. Ломоносова), представила на выставке СеВIT 2002 ряд цветных наборных плазменных экранов коллективного пользования с большой диагональю и качеством телевизионного или компьютерного изображений.

Экраны представляют собой новое поколение подобных устройств, основаны на разряде переменного тока, способны отображать полноцветное динамическое видео изображение, ранее не выпускались как в СНГ, так и за рубежом.

По сравнению с выпускавшимися ранее экранами на разряде постоянного тока, новинки имеют существенно более высокую яркость, контрастность и долговечность. В частности, типичная яркость панели на постоянном токе 100 – 150 кд/м<sup>2</sup>, яркость экранов от «Инкотекс» на разряде переменного тока 400 – 600 кд/м<sup>2</sup>, что в два раза превосходит ближайшие зарубежные аналоги. Ресурс панелей на постоянном токе – порядка тысячи часов, на переменном токе – десятки тысяч часов.



*Рис. 2.37. Наборная плазменная панель диагональю более 3-х м.*

Основными достоинствами плазменных цветных экранов, по сравнению с основанными на других технологиях, являются: возможность показа полноцветного телевизионного и

компьютерного изображений высокого качества, широкий угол обзора, малая толщина (около 10 см), отсутствие геометрических искажений, вредных излучений, проблем с чистотой цвета и мерцанием изображения.

Ввиду особенностей применяемого алгоритма управления, невозможно несанкционированное считывание отображаемой информации. Экраны не требуют юстировки и обслуживания в процессе эксплуатации.

Поле экрана коллективного пользования состоит из отдельных плазменных панелей размером 200×200 мм, содержащих 64×64 цветных точек размером 3×3 мм. Типовым является следующий ряд экранов:

- базовый с разрешением 768×576 полноцветных точек, собранный из 12×9 панелей; имеет размеры 2,4×1,8 м (диагональ 3 м). Оптимален для отображения как компьютерного, так и телевизионного изображений в стандартах PAL, SECAM и NTSC.
- с разрешением 640×512 полноцветных точек, собранный из 10×8 панелей, имеющий размеры 2×1,6 м (диагональ 2,6 м). Оптимален для отображения телевизионного изображения в стандарте NTSC и компьютерного изображения.

Плазменная технология нового поколения идеально подходит для создания больших экранов. Она позволяет выпускать плоские и достаточно легкие мониторы глубиной до 10 см. Поэтому, несмотря на большой экран, они могут быть установлены в любом месте – на стене, под потолком, на столе.

Благодаря широкому углу обзора изображение видно с любой точки. И что самое главное, плазменные мониторы способны передать цвет и резкость, которые раньше были недостижимы при таком размере экрана.

Преимуществами таких мониторов являются высокая яркость (до 500 кд/м<sup>2</sup>) и контрастность (до 400:1) наряду с отсутствием дрожания, большой угол обзора. Высокая четкость изображения сохраняется на всей рабочей поверхности экрана. Плазменные панели не создают электромагнитных полей, не страдают от вибрации, а их небольшое время регенерации позволяет использовать их для отображения видео- и телесигнала. Необходимо отметить и стойкость плазменных экранов к

электромагнитным полям, что позволяет использовать их в промышленных условиях.

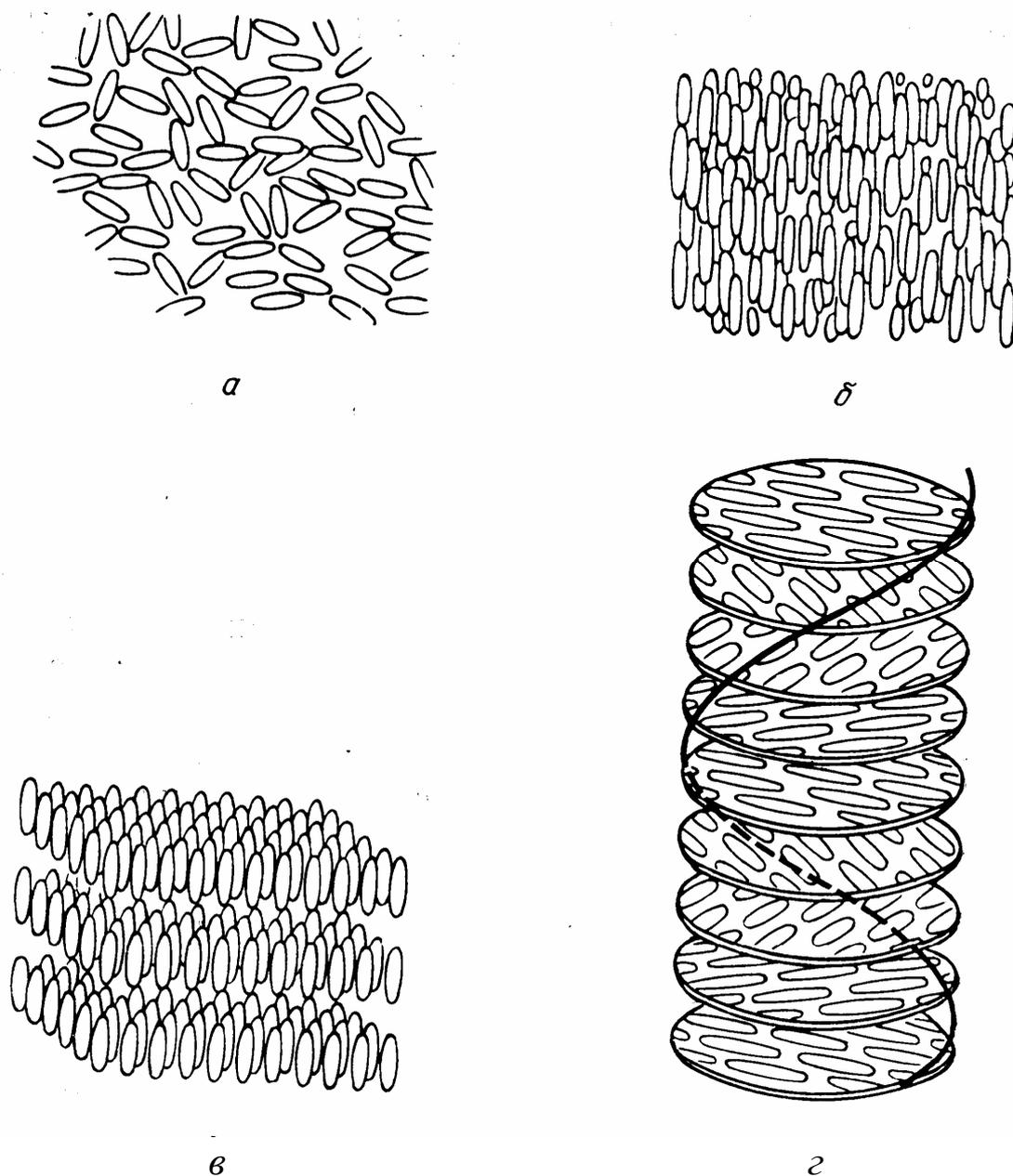
Главными недостатками такого типа мониторов является довольно высокая потребляемая мощность, возрастающая при увеличении диагонали монитора, и низкая разрешающая способность, обусловленная большим размером элемента изображения.

Разработаны дисплеи, сочетающие в себе преимущества жидких кристаллов (яркость и сочность цветов, контрастность) с большим углом видимости и высокой скоростью обновления плазменных панелей. В качестве регулятора яркости в этих дисплеях используются газоразрядные плазменные ячейки, а для цветовой фильтрации применяется ЖК-матрица. При этом осуществляется адресация каждого пикселя дисплея по отдельности, что обеспечивает высокую управляемость и качество изображения.

Наиболее распространенными являются плазменные экраны с диагональю 42 дюйма и наборные плазменные панели, диагональ которых может превышать три метра.

#### ***2.7.6. Жидкокристаллические индикаторы***

Жидкие кристаллы занимают промежуточное место между твердым телом и жидкостью. Молекулы жидкого кристалла движутся подобно молекулам в жидкости, но при этом сохраняется определенная упорядоченность в их расположении. Жидкокристаллические молекулы имеют удлиненную форму и в зависимости от вида их взаимной ориентации различают нематические, смектические и холестерические жидкие кристаллы (рис. 3.25). В индикаторах чаще применяются нематические ЖК, например МБА [н-(п-метоксибензилиден) – п-(н-бутиланилин)] и ЭБА [н-(п-этоксибензилиден) – п-(н-бутиланилин)]. Широкое применение нематических жидких кристаллов связано с тем, что они имеют наименьшую вязкость, а, следовательно, наименьшее время переориентации молекул.



*Рис. 2.38. Структура жидких кристаллов: а-неупорядоченное состояние, б – нематический, в- смектический, г – холестерический жидкий кристалл.*

Взаимная ориентация молекул жидкого кристалла изменяется под действием электрического поля, температуры и других факторов, что сопровождается изменением его оптических свойств. Богатство функциональных возможностей жидких кристаллов заключено в анизотропии их физических свойств – коэффициента преломления, диэлектрической проницаемости, проводимости, магнитной проницаемости, вязкости и др.

Особенно важными с точки зрения оптоэлектроники является оптическая и электрическая анизотропия: значения

показателей преломления и диэлектрической постоянной в направлении вдоль больших осей молекул и перпендикулярно ему различны, то есть жидкие кристаллы обладают свойством двойного лучепреломления.

В зависимости от знака величины  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$  различают положительную и отрицательную диэлектрическую анизотропию.

При приложении внешнего поля молекулы с положительной анизотропией ориентируются вдоль поля, а с отрицательной – поперек поля. Наличие анизотропии и возможность перестройки структуры проявляются в двух разновидностях электронно-оптических эффектов: в изменении характера поляризации проходящего или отраженного света и в изменении величины коэффициента пропускания или отражения света.

**Жидкокристаллические индикаторы не излучают свет.** В них индикация информации осуществляется в результате изменения оптических свойств, что приводит к модуляции светового потока.

Недостатками жидких кристаллов с точки зрения отображения информации являются их пассивность, малая контрастность, низкое быстродействие. В то же время жидкокристаллические индикаторы обладают рядом важных достоинств, которые делают их одним из наиболее перспективных. Это возможность исполнения в виде плоской конструкции, низкое управляющее напряжение, простота управляющей схемы, исполняемой в виде ИС, малая потребляемая мощность и др. Жидкокристаллические индикаторы обычно работают на переменном токе. При использовании постоянных управляющих напряжений проявляются электролитические эффекты, существенно снижающие долговечность прибора.

В большинстве жидкокристаллических индикаторов используются электрооптические эффекты, которые подразделяются на токовые (динамическое рассеяние, электрическое управление двулучепреломлением, «твист-эффект») и полевые (фазовый переход, эффект «гость-хозяин»).

Рассмотрим эти эффекты подробнее.

**Динамическое рассеяние света.** Если через слой нематического жидкого кристалла пропустить постоянный ток или переменный низкой частоты, то прозрачный слой ЖК мутнеет –

происходит рассеяние света. Поскольку жидкокристаллическая ячейка имеет толщину порядка 6 мкм, требуется достаточно высокое напряжение для разрушения упорядоченного состояния и перевода жидкости в состояние турбулентности, при котором происходит эффективное рассеяние света. На этом принципе работают ряд индикаторных приборов. Рассмотрим индикатор отражающего типа. При отсутствии внешнего напряжения слой жидкого кристалла прозрачен и наблюдатель видит свет, отраженный от нижнего зеркального электрода. При приложении внешнего напряжения в слое жидкого кристалла происходит направленное движение ионов, вызывающее турбулентность, которая сопровождается рассеянием света. Свет рассеивается в прямом направлении и отражается от нижнего электрода, что приводит к увеличению яркости в направлении наблюдателя. Участки жидкого кристалла, находящиеся в состоянии динамического рассеяния, кажутся ярко светящимися по сравнению с соседними невозбужденными участками. После снятия напряжения жидкий кристалл некоторое время остается в режиме динамического рассеяния, а затем переходит в исходное упорядоченное состояние и изображение пропадает. Это индикатор сегментного типа, поэтому схема управления им достаточно сложна, а выпадение одного из сегментов, образующих знак, может привести к неверному считыванию информации.

Более простыми и надежными являются ЖКИ проекционного типа. При этом обычно используют пакетный способ выполнения буквенно-цифровой панели. Панель состоит из набора отдельных пластин ЖКИ ячеек, каждая из которых является отдельным знакоместом. С тыльной стороны каждой из пластин наносится проводящий слой диоксида олова, имеющий форму цифры или буквы. Промежутки между пластинами заполняются жидким кристаллом, а за пакетом или в торце его располагается источник подсветки. Приложение к электродам напряжения вызывает эффект динамического рассеяния по всей площади цифры, которая кажется ярко светящейся. Эти индикаторы имеют простую схему управления, малые габариты, низкую стоимость. Источник подсветки обычно включают только на время индикации.

В индикаторах, использующих динамическое рассеяние света, обычно используется жидкий кристалл, легированный

токопроводящей примесью. Типичные параметры индикатора: потребляемый ток  $5 \text{ мкА/см}^2$ , время включения 7 мс, время выключения 80 мс, контрастность изображения 14, управляющее напряжение 15 В.

На базе этого эффекта разработаны матричные жидкокристаллические панели, управляемые интегральными микросхемами. При минимальной толщине ячейки 5 мкм разрешающая способность жидкокристаллического раstra составляет 50 линий на миллиметр.

В зависимости от состояния поверхности пластин жидкокристаллической ячейки можно получить гомеотропную ориентацию молекул (перпендикулярно пластинам) или гомогенную (параллельно пластинам). На основе молекул с отрицательной диэлектрической анизотропией создают ЖК с гомеотропной упаковкой. При приложении внешнего поля ориентация молекул становится гомогенной, при этом возникает эффект двойного лучепреломления. Если поместить вне ЖК ячейки скрещенные поляризатор и анализатор, можно управлять интенсивностью проходящего через ячейку света с помощью внешнего электрического поля. Примером прибора, использующего этот эффект, является часовая индикатор с планарной структурой. Планарный слой ЖК, находящийся между стеклянными пластинами с рисунком на прозрачных электродах из оксида олова, дополнительно помещают между поляроидными пленками в скрещенном положении так, чтобы направление ориентации составляло угол в 45 градусов с плоскостью поляризации анализатора. За анализатором помещают зеркало, если прибор работает в отражательном режиме. В отсутствии напряжения свет свободно проходит через скрещенные поляроиды и отражается от зеркала из-за приобретения дополнительной разности хода в жидком кристалле. ЖК панель при этом выглядит светлой, изображение отсутствует. При подаче напряжения выше порогового направление ориентации совпадает с направлением поля, дополнительная разность хода в жидком кристалле исчезает, и свет через сегменты не проходит. Сегменты выглядят темными на светлом фоне. Можно получить и негативное изображение – светлые знаки на темном фоне.

«Твист – эффект» реализуется при помощи однонаправленного натирания пластин во взаимно перпендикулярных направлениях и введении между ними нематического жидкого кристалла с положительной диэлектрической анизотропией. Молекулы жидкого кристалла в этом случае оказываются закрученными на 90 градусов, при этом на нижней подложке молекулы параллельны одному направлению, а на верхней – направлению, повернутому на 90°, что приводит к повороту плоскости поляризации линейно поляризованного света, прошедшего через ячейку. Если к электродам приложить внешнее напряжение, то ориентация молекул становится гомеотропной, перпендикулярной пластинам, и изменения плоскости поляризации не происходит. Если плоскости поляризации поляризатора и анализатора, установленных по обе стороны ЖК-ячейки, параллельны, приложение напряжения приводит к прохождению света, а в отсутствие его свет не проходит. В случае перпендикулярного расположения плоскостей поляризации поляризатора и анализатора получается обратная картина (рис. 2.39).

Рабочее напряжение на такой ячейке обычно не превышает 1 В. Твист – эффект также применяется в часовых индикаторах. Закрученная на 90 градусов нематическая жидкокристаллическая пленка помещается между скрещенными поляроидами. Свет свободно проходит через такую структуру, ибо, пройдя поляризатор и войдя в жидкий кристалл, плоскополяризованный свет повернет плоскость поляризации на 90 градусов благодаря оптическому вращению, которым обладает искусственно закрученный нематический слой.

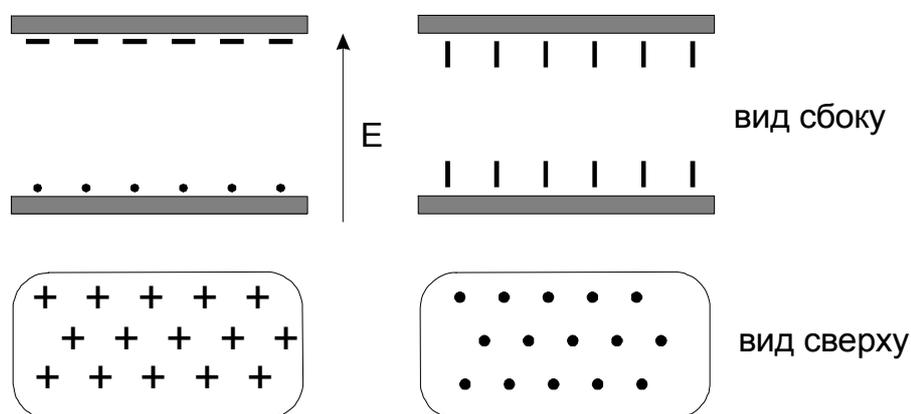


Рис. 2.39. Твист-эффект в жидких кристаллах

Если нижний электрод отражающий, то свет отразится от зеркала и выйдет обратно. При подаче внешнего напряжения закрученная структура исчезает, и свет не проходит. Наблюдатель видит темные знаки на светлом фоне. Чтобы получить негативное изображение, достаточно сделать поляризаторы параллельными. При этом поле зрения выглядит темным, а знаки светлыми. Твист-структура обладает низкими пороговыми напряжениями (от 0,5 до 3 В), что существенно при изготовлении индикаторов с автономным питанием.

Достоинствами твист-эффекта являются относительно высокая крутизна вольт-контрастной характеристики, достаточно высокое быстродействие и слабая зависимость электрооптических характеристик от длины волны падающего света в видимой области спектра. В настоящее время устройства на твист-эффекте являются самыми распространенными жидкокристаллическими системами. Они применяются в панелях управления автомобилей и самолетов, в счетчиках бензоколонок и кассовых аппаратов, в индикаторах радиоаппаратуры и измерительных приборов, микрокалькуляторах и электронных играх. Наиболее высокими темпами роста отличается производство ЖК-дисплеев для персональных компьютеров и портативных телевизоров (порядка 50% в год). Особое место занимает твист-эффект в системах оптической обработки и преобразования информации – в управляемых транспарантах, структурах фотопроводник – жидкий кристалл, фильтрах оптических изображений, модуляторах света, четвертьволновых пластинах и т.д.

**Фазовый переход.** Жидкокристаллическая ячейка с примесью холестерического жидкого кристалла с положительной диэлектрической анизотропией рассеивает свет, образуя жидкокристаллическую непрозрачную ячейку молочного цвета. При увеличении электрического поля молекулы жидкого кристалла ориентируются в направлении поля, и ячейка становится прозрачной.

**Оптический эффект «гость – хозяин».** Краситель, обладающий свойством менять спектр проходящего света в зависимости от ориентации молекул, называется плеохроическим. Если такой краситель смешать с жидким кристаллом, то появляется возможность с помощью электрического поля менять как

ориентацию жидкого кристалла, так и молекул красителя, то есть изменять цвет жидкокристаллической ячейки. В такой ячейке жидкий кристалл называется «хозяином», а краситель – «гостем».

### 2.7.7. Жидкокристаллические индикаторные панели

Жидкокристаллическая индикаторная панель представляет собой двухмерную матрицу XY управляющих электродов, точки пересечения которых образуют жидкокристаллические ячейки, каждая из которых может воспроизводить один элемент изображения при приложении напряжения к соответствующим электродам. На рис. 2.40 приведена электрическая характеристика такой ячейки.

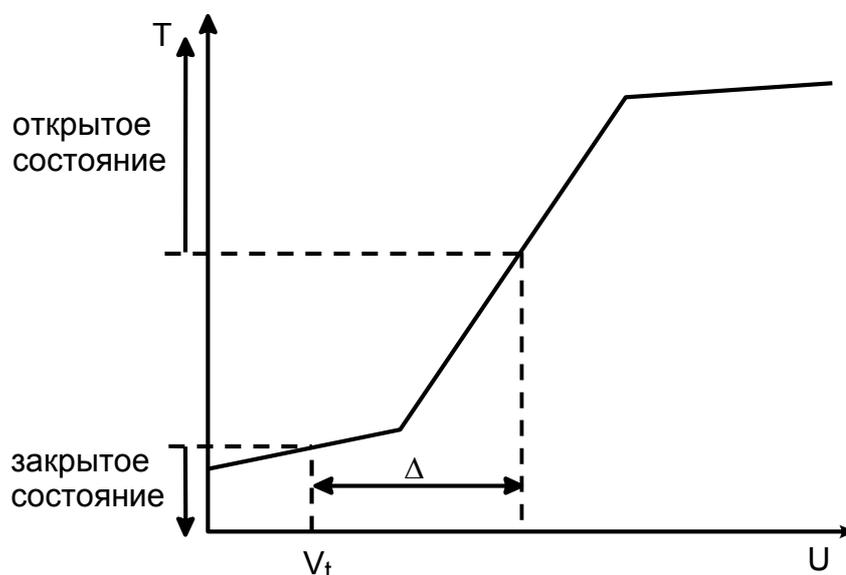


Рис. 2.40. Электрическая характеристика ЖКИ ячейки

При приложении напряжения меньше порогового ячейка закрыта, т.е. не пропускает свет. Если приложенное напряжение превышает пороговое, ячейка переходит в открытое состояние (возбуждается).

Так как в жидкокристаллических индикаторах используется переориентация крупных органических молекул, быстродействие их сравнительно невелико и составляет около 10 мс. При динамическом возбуждении к столбцам электродов прикладывают стробированное напряжение, а к строкам – импульсное. При этом пороговое напряжение и число строк разложения зависят от частоты внешнего напряжения.

Активным матричным индикатором называется прибор, в котором каждая индикаторная ячейка возбуждается независимо

от других. Для практической реализации активного матричного индикатора с большим экраном применяется интеграция ячеек со схемой управления. В таком индикаторе используется матрица МОП-транзисторов, затворы и стоки которых соединяются с X и Y шинами возбуждения матрицы адресации. При возбуждении какой-либо затворной шины отпираются МОП-транзисторы этого столбца и через шины, к которым присоединены стоки транзисторов, осуществляется инжекция зарядов в накопительную емкость, напряжение на которой определяет оптические свойства ячейки. Так как интенсивность отраженного света можно изменять в зависимости от потенциала шин, к которым подсоединены стоки транзисторов, то оказывается возможной индикация тоновых изображений. На рис. 2.41 приведен пример активного матричного индикатора на тонкопленочных транзисторах из аморфного кремния, которые образуют на стеклянной подложке коммутационную матрицу адресации.

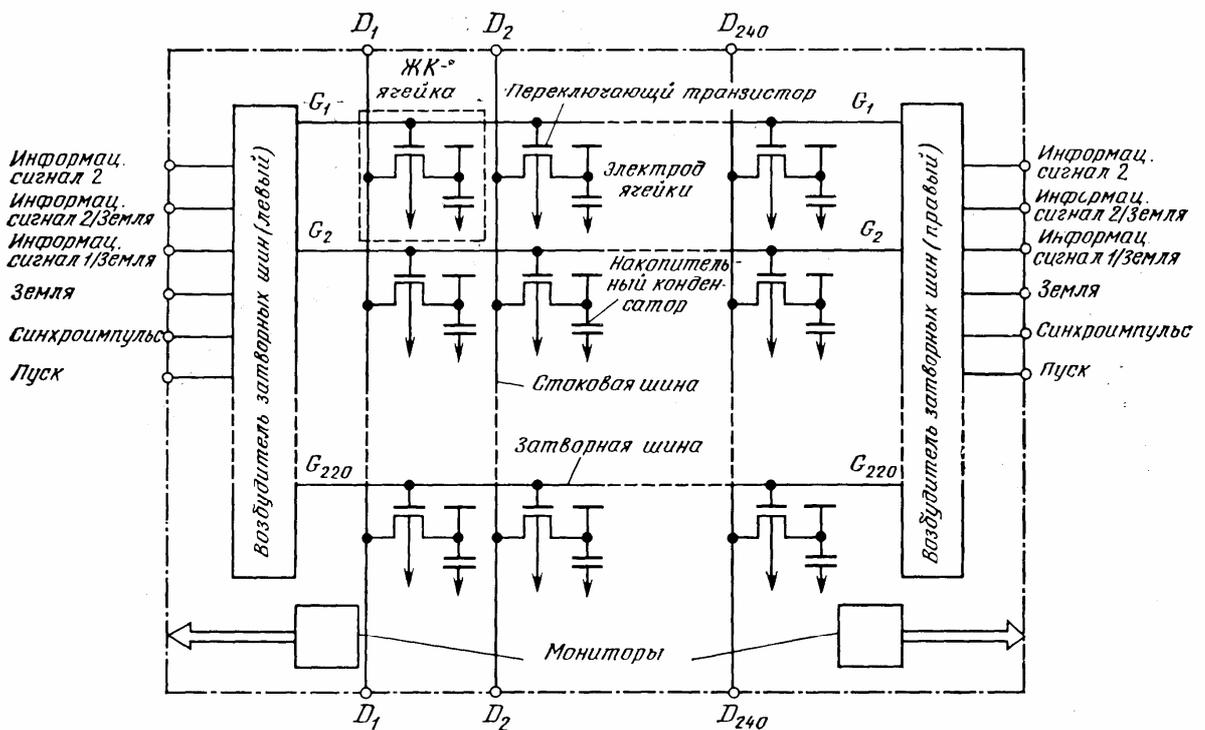


Рис. 2.41. Схема активного матричного индикатора

Жидкокристаллические ячейки могут быть построены на эффекте «гость-хозяин». Использование транзисторов, изготовленных из аморфного кремния на стеклянной подложке,

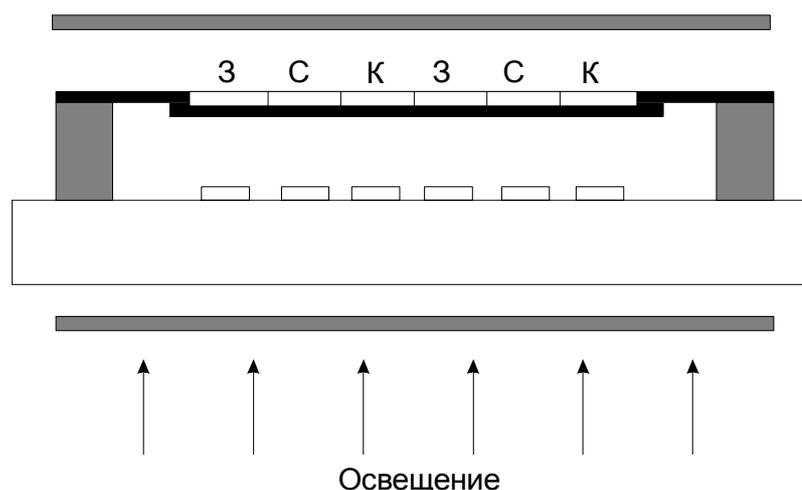
снимает ограничения на площадь экрана, которые имеют место при использовании монокристаллических кремниевых пластин.

### **Воспроизведение цветного изображения**

Для воспроизведения цветного изображения на жидкокристаллических экранах могут быть использованы следующие приемы.

1. При двойном лучепреломлении, управляемом электрическим полем, интенсивность прошедшего через анализатор света зависит от угла между направлением поляризации падающего света и направлением проекции оси ориентации молекул жидкого кристалла поверхность стекла. Поскольку угол поворота направления поляризации зависит от длины волны, появляется возможность цветного воспроизведения. На первом месте по простоте конструкции в этом случае стоят ЖКИ на эффекте управляемого электрическим полем шага спирали холестерических жидких кристаллов. Изменение шага спирали приводит к изменению цвета плоскостной холестерической структуры. Для понижения рабочего напряжения добавляют некоторое количество нематического жидкого кристалла с большой величиной положительной анизотропии. Недостатками таких индикаторов являются узкий температурный интервал работы и сравнительно высокие рабочие напряжения (до 100 В).
2. В индикаторах с эффектом «гость-хозяин» цветное воспроизведение можно осуществлять, используя дихроизм красителя. Краситель в этом случае определяет только цвет изображения. Для обеспечения приемлемой контрастности концентрация красителя обычно не превышает 1%. Управляющие напряжения составляют 8 – 10 В. В цветных индикаторах, работающих на смесях ЖК с плеохроичными красителями, необходимо использовать поляризованный свет, поэтому в практических конструкциях предусматривается установка поляризатора. Недостатками индикаторов на эффекте «гость-хозяин» являются малая контрастность изображения и бледные ненасыщенные цвета.
3. Цветное отображение произвольного изображения любого цвета можно осуществить на основе комбинации трех

основных цветов, управляя цветом в каждой ячейке. Для этого применяются цветные светофильтры, обеспечивающие цвет излучения, а жидкий кристалл управляет только интенсивностью проходящего света. На рис. 2.42 показана возможность воспроизведения цветного телевизионного изображения на основе «твист-эффекта» в нематическом жидком кристалле.



*Рис. 2.42. Принцип воспроизведения цветного изображения*

Трудности создания больших ЖК панелей связаны с тем, что при увеличении размеров в возрастающей степени проявляются такие недостатки, как низкий контраст, ограниченный угол обзора, невысокое разрешение. Решение этих проблем возможно двумя путями: созданием новых жидкокристаллических материалов и использованием более совершенных методов адресации.

Первые серийные жидкокристаллические панели на стандартных нематических жидких кристаллах с твист-эффектом имели следующие параметры:

- информационная емкость 640 на 200,
- диагональ экрана до 30 см,
- быстродействие 30 – 50 мс,
- угол обзора менее 30 градусов,
- контраст 1:3,
- диапазон рабочих температур 273 – 323 К,
- потребляемая мощность 0,2 Вт,
- долговечность 50000 часов,
- толщина 15 – 20 мм.

В последние годы разработаны новые жидкокристаллические материалы, например, усовершенствованные нематические ЖК с твист-эффектом, сегнетоэлектрические ЖК, нематические ЖК с супертвист-эффектом, смектические ЖК. Их использование позволило улучшить ряд параметров жидкокристаллических экранов. Так, угол обзора увеличен до 170 градусов, контраст – до 1:100 – 1:800. Для сегнетоэлектрических ЖК достигнуто быстродействие порядка 0,1 мс, что позволяет использовать их в телевизорах плоской конструкции. Панели на ЖК с супертвист-эффектом характеризуются исключительно высоким качеством изображения и могут конкурировать с другими системами отображения информации в дисплеях с высоким разрешением. Панели на смектических ЖК отличаются очень высокой информационной емкостью (420 на 780) и широким углом обзора – до 180 градусов, но имеют низкое быстродействие около 0,3 мс, что ограничивает их широкое применение.

Современные ЖК панели работают на активных матрицах. Активные матрицы изготавливаются на тонкопленочных транзисторах или диодных структурах из поликристаллического и аморфного кремния. Использование транзисторных структур позволяет получать высокое качество изображения и высокое разрешение, что важно для дисплеев специального назначения. Диодные матрицы представляются предпочтительными для экранов больших размеров.

В цветных дисплеях использование микрофильтров позволяет обеспечить полный набор цветов в панелях с мультиплексной адресацией и с активными матрицами. В последнем случае качество изображения близко к получаемому на ЭЛТ. Основные недостатки цветных ЖК панелей – необходимость достаточно эффективной подсветки для компенсации потерь света из-за использования фильтров, что заметно увеличивает потребление электроэнергии, и сложность технологии изготовления, а следовательно, и более высокая стоимость по сравнению с монохромными панелями.

В качестве примера современных цветных жидкокристаллических экранов приведем 22-дюймовый ЖК-монитор фирмы DELL модели E228WFP.



Монитор работает с разрешением UXGA (1680×1050 пикселей). Видимая область изображения соответствует видимой области стандартного 21-дюймового ЭЛТ-монитора. В устройстве используется матрица с максимальной контрастностью 800:1, яркостью 300 кд/м<sup>2</sup>, шаг пикселя – 0,282 мм, время отклика – 5 мс. Угол обзора как по горизонтали, так и по вертикали составляет 170 градусов.

Жидкокристаллические дисплеи успешно выступают и на рынке больших экранов. Уже создан ЖК дисплей с диагональю 102 дюйма.

### 2.7.8. Электролюминесцентные индикаторы

Электролюминесценция – это явление светового излучения при приложении электрического поля к полупроводнику, в частности к люминофору. Это явление наблюдается и в порошкообразном люминофоре и в пленочных структурах.



Рис. 2.43. Внешний вид электролюминесцентной панели: 1 – электролюминесцентная панель, 2 – соединительная клемма, 3 – блок питания

Панели на основе порошкообразных люминофоров отличаются простотой изготовления, но длительность этой люминесценции мала, а надежность невелика.

Тонкопленочная люминесценция на переменном токе обеспечивает хорошую стабильность и долговечность приборов, но требует довольно высоких рабочих напряжений. Люминофор представляет собой сульфид цинка, активированный марганцем (около 5 %) и наносится в виде пленки толщиной около 1 мкм между двумя слоями изоляции, в качестве которой используется нитрид кремния. Излучение возникает при напряженности поля порядка миллиона вольт на сантиметр и для указанного выше люминофора имеет желтый цвет свечения. Электролюминесцентные панели отличаются компактностью, высокой яркостью, надежностью.

Основные характеристики первых серийных ЭЛ панелей: информационная емкость 640 на 640, диагональ экрана 15 – 30 мм,

- разрешение 25 – 40 линий на см,
- контраст до 30:1,
- угол обзора 120 – 160 градусов,
- яркость до 400 Кд/м<sup>2</sup>,
- потребляемая мощность 5 – 25 Вт,
- толщина 9 – 25 мм,
- долговечность 30 – 40 тысяч часов.

Созданы опытные образцы ТВ экранов с диагональю 40 см, разрешением 512 на 640 элементов изображения, воспроизводящие 16 оттенков шкалы яркостей. Разрабатываются панели с информационной емкостью 1024 на 512 элементов.

Основными направлениями совершенствования электролюминесцентных панелей являются:

- создание нового поколения схем управления, обеспечивающих снижение потребляемой мощности и стоимости;
- снижение управляющего напряжения с 150–200 до 100 В;
- расширение цветовых возможностей;

Современные серийные панели имеют оранжево-желтый цвет свечения. Разработаны панели с красным, зеленым и голубым цветом свечения. Главные трудности в создании цветных панелей связаны с получением синего свечения.

Преимущества электролюминесцентной панели:

небольшая толщина;

маленький вес;

гибкость (EL-панель формата А1 можно легко свернуть в трубочку, это дает возможность размещать панель на изогнутых поверхностях, например, обернуть вокруг колонны);

яркость свечения;

возможность установки динамического (мигающего) режима свечения;

равномерное свечение по всей поверхности панели;

экономичность в электропотреблении;

возможность подключения как к бытовой сети электроснабжения, так и к бортовой сети автомобиля;

возможность применения в широком температурном диапазоне,

устойчивость к агрессивной городской среде;

исключительно легкий монтаж (например, на двухсторонний скотч);

возможность наносить на EL-панель изображение методом цифровой печати, используя сольвентные чернила с УФ-защитой;

длительный срок службы (в режиме постоянного свечения - 10000 часов сохраняется 100% яркости, в интервале от 12000 до 14000 часов работы теряется до 50% яркости, после этого интенсивность свечения остается неизменной, панель не перегорает);

возможность изготовления под заказ светящихся панелей любой формы - буквы, логотипы и т.д.; возможность поставки под заказ панелей с прозрачным проводом для более незаметного крепления на прозрачных поверхностях.

Электролюминесцентные панели находят широкое применение в рекламе. Панель подходит для внутреннего и наружного применения. Может использоваться для организации рекламных мест, изготовления информационных табло, указателей, настенных панно, для оформления мест продаж, для рекламы на транспорте и т. д. Уникальные возможности монтажа - практически нет мест, куда нельзя прикрепить EL-панель. Можно наклеить панель на стекло, подвесить на тонких лесках к потолку, обернуть вокруг колонны, сделать световым носителем в виде флажка. Информацию

на панель можно наносить полиграфическим способом, при помощи самоклеящейся пленки.

### 2.7.9. Дисплеи с полевой (автоэлектронной) эмиссией

Одним из технологических направлений в области создания мониторов является технология FED (Field Emission Display). Физика работы мониторов FED основана на явлении автоэлектронной эмиссии. В FED-мониторе каждый пиксель изображения формируется за счет испускания электронов с нескольких тысяч нанометровых остроконечных элементов поверхности (до  $10^4$  острий в каждом пикселе). Благодаря этому достаточный для возбуждения люминофора ток автоэлектронной эмиссии создается при весьма умеренных рабочих напряжениях – до 100 В.

Принцип работы автоэмиссионного дисплея ясен из рисунка 2.44.

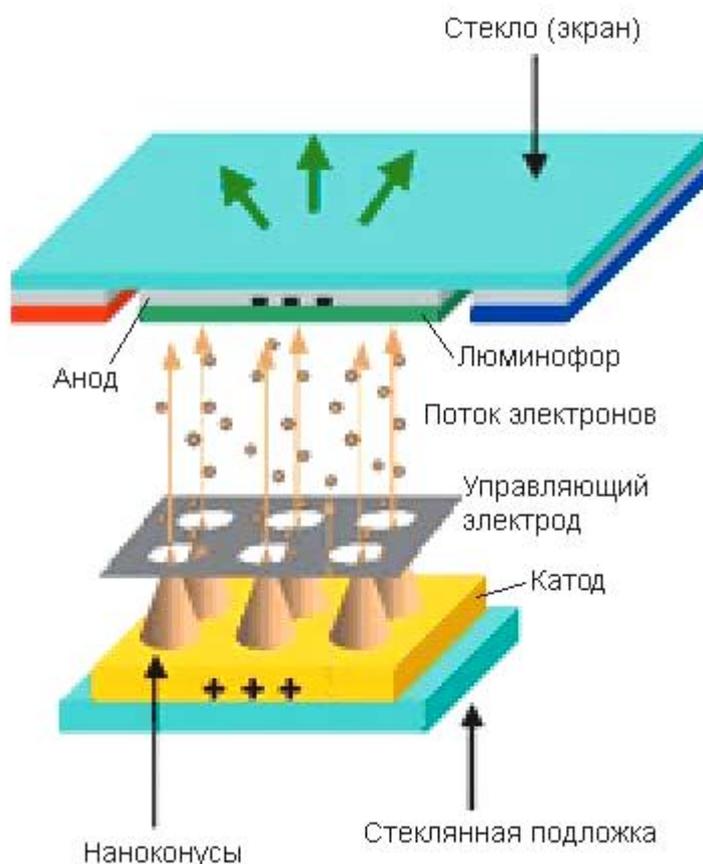


Рис. 2.44. Схема автоэмиссионного дисплея

Материалом для изготовления матричных автоэлектронных эмиттеров являются молибден, кремний, а в последние годы – углеродные нанотрубки.

FED дисплей практически по всем основным характеристикам превосходит существующие плоские панели: по яркости (600 - 800 кд/м<sup>2</sup>), по уровню собственного контраста, по цветопередаче (как у электронно-лучевой трубки). Энергопотребление в два раза меньше, чем у плазменных панелей и в 1,5 раза меньше жидкокристаллических, малое время отклика пикселя (около 2 мс), небольшой вес, малая толщина панели.

Благодаря этому дисплеи с матричными автоэлектронными эмиттерами являются весьма перспективными приборами и могут успешно конкурировать с жидкокристаллическими и плазменными экранами.

Так, компания Sony продемонстрировала FED дисплей с диагональю 19,2 дюйма, разрешением 1280 x 960 точек, яркостью 400 канделл на квадратный метр, контрастом 20 тысяч к одному и шагом пикселей 0,306 миллиметра. Ниже приведена фотография FED дисплея фирмы Sony (рис. 2.45).



Рис. 2.45. Фотография FED дисплея фирмы Sony

Проблемы FED-дисплеев - поддержание вакуума в экранах большого размера (конструкция должна быть достаточно прочной, чтобы противостоять сжимающему атмосферному давлению), обеспечение нужной долговечности.

Всё многообразие приборов и устройств, где наиболее целесообразно применение полевого эмиссионного дисплея условно можно разбить на четыре категории:

- бытовая техника (встроенные экраны видеомаягнитофонов, телевидение высокой четкости, видеотелефоны, многофункциональные электронные часы-органайзеры, видеокамеры, карманные и настенные телевизоры, сложные бытовые приборы, электронные игры);
- техническая аппаратура (компьютеры, индикаторные панели для автомобилей, мониторы медицинских диагностических комплексов, контрольно-измерительная аппаратура, комплексы телемеханики АЭС);
- специальная аппаратура (крупноформатные информационные табло, сверхминиатюрные дисплеи, устройства воспроизведения изображения с высокой плотностью информации, космическая техника);
- военная техника (радиолокационные системы, авиационные бортовые индикаторы, авиационные дисплеи в нагнемном варианте, приборы ночного видения, электронные прицелы).

### ***2.7.10. Отражающие дисплеи (электронная бумага)***

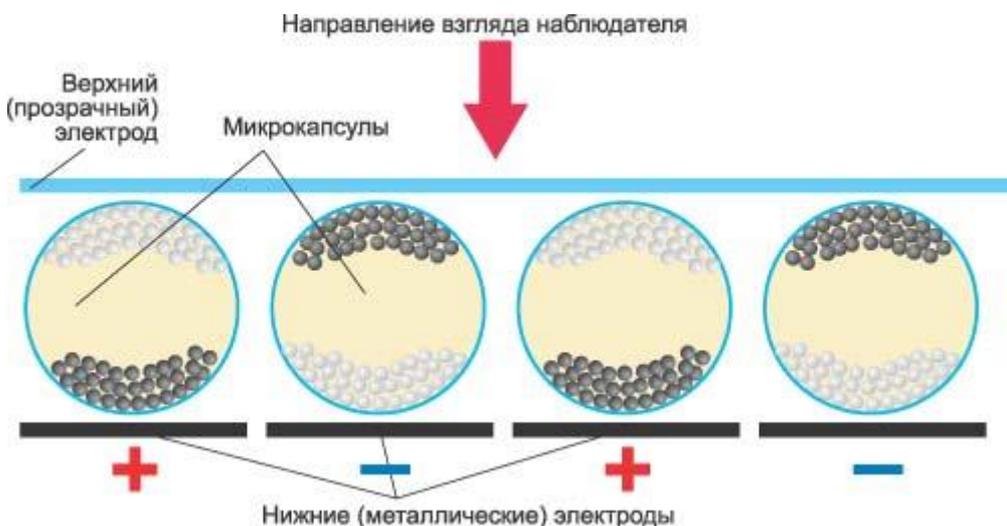
В основе отражающих дисплеев лежит электрохромный эффект, проявляющийся при использовании электронных чернил. Структурными элементами отражающих дисплеев на базе электронных чернил являются микрокапсулы, диаметр которых не больше толщины человеческого волоса. Дисплей состоит из нескольких слоев. Два "рабочих" слоя формируют изображение: внешний отражающий слой, состоящий из наночастиц диоксида титана белого цвета, и электрохромный слой с красящим пигментом. Как только на слои подается разность потенциалов, электрохромный слой перемещается ближе к отражающему, и пользователь видит четкую картинку с высокой контрастностью. А если изменить полярность напряжения, то слой "переключится" в такое состояние, при котором будет виден только отражающий пигмент диоксида титана.

Так достигается формирование картинки. Благодаря высокой мобильности пигментного слоя на основе электрохромных наночастиц достигается высокая скорость переключения, что, в свою очередь, позволяет добиться высокой частоты смены кадров - до 60 кадров в секунду.



*Рис. 2.46. Микрокапсула — основной структурный элемент дисплеев на базе электронных чернил*

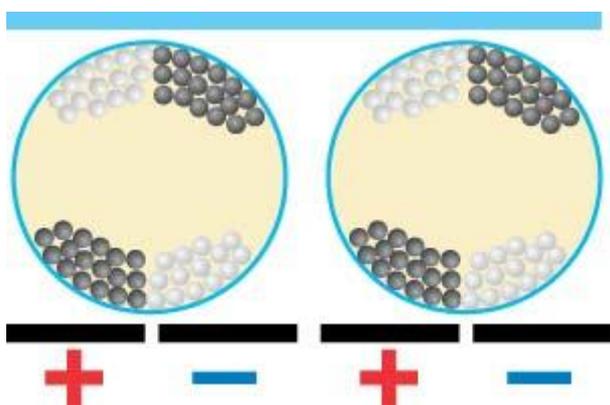
Слой микрокапсул (рис. 2.47) расположен между двумя рядами взаимно - перпендикулярных гибких электродов (сверху — прозрачных, снизу — непрозрачных), образующих адресную сетку. При подаче напряжения на два взаимно - перпендикулярных электрода в точке их пересечения возникает электрическое поле, под действием которого в расположенной между ними микрокапсуле группируются пигментные частицы.



*Рис. 2.47. Схематическое изображение структуры дисплея на базе электронных чернил*

Частицы с одним зарядом собираются в верхней части микрокапсулы, а с противоположным — в нижней.

Для того чтобы поменять цвет точки экрана с белого на темный или наоборот, достаточно изменить полярность напряжения, поданного на соответствующую пару электродов. Таким образом, пиксел экрана, соответствующий данной микрокапсуле, окрасится в темный либо в белый цвет; при этом пигментные частицы, сгруппировавшиеся в верхней части микрокапсулы, скроют от взгляда наблюдателя все частицы, сосредоточенные в ее нижней части. Описанная модель позволяет создавать монохромные дисплеи с однобитной разрядностью, то есть каждый из пикселей экрана может быть либо белым, либо темным. Если же один управляющий состоянием микрокапсулы электрод заменить двумя, то станет возможным формирование полутонов за счет закрашивания одной половины микрокапсулы в белый цвет, а другой половины — в черный (рис. 2.48).

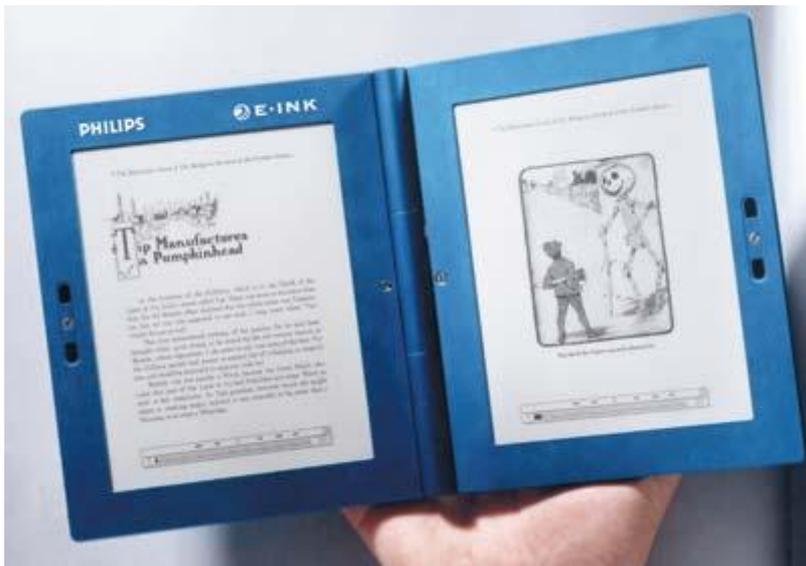


*Рис. 2.48. Принцип повышения разрешающей способности дисплея за счет увеличения количества управляющих электродов*

В настоящее время технологически достижимо создание отражающих дисплеев с очень высокой разрешающей способностью. В качестве подложки для создания дисплея на основе электронных чернил можно использовать практически любые материалы: стекло, пластик, ткань и даже бумагу. А это, в свою очередь, открывает перспективы создания ультратонких гибких дисплеев, максимально близких по своим механическим и оптическим характеристикам к обычной бумаге.

В отличие от излучающих дисплеев, которые постоянно потребляют энергию для свечения экранного изображения,

отражающие дисплеи на базе электронных чернил нуждаются в подаче питания лишь в случае изменения картинки, и изображение на экране такого дисплея сохранится даже при полном отключении питания. Вследствие этого энергопотребление отражающих дисплеев на основе электронных чернил, как минимум, на порядок ниже даже по сравнению с наиболее экономичными ЖК-моделями. Завершая перечисление достоинств отражающих дисплеев, стоит отметить их малую толщину и небольшой вес.



*Рис. 2.49. Прототип устройства для чтения электронных книг, оснащенный двумя отражающими дисплеями на базе электронных чернил*

Естественно, дисплеи на базе электронных чернил не лишены недостатков. Так, эти устройства пока позволяют воспроизводить лишь монохромные (1- или 2-битные) изображения. По этой причине использовать их можно только для вывода статичных изображений. Кроме того, содержащиеся в микрокапсулах пигментные частицы со временем выцветают под воздействием солнечных лучей.

С учетом эксплуатационных характеристик дисплеев на базе электронных чернил основной областью их применения могут стать портативные устройства для чтения книг и иных электронных изданий. Так, в мае 2004 года фирма Philips представила готовый к коммерческому использованию активно-матричный дисплейный модуль на базе электронных чернил. При размере экрана 6 дюймов (152,3 мм) по диагонали дисплей имеет разрешение 800-600 пикселей и способен отображать четыре градации серого. Толщина

этого модуля — 4,25 мм, вес — 35 г. Время отклика пикселей — 300 мс. При напряжении питания 3 В пиковое энергопотребление (в момент изменения изображения) составляет всего 1,5 Вт.

Тот факт, что дисплей не потребляет энергии для формирования картинки длительное время (энергия нужна только для переключения слоев пигмента), позволит создать на базе NCD "жидкокристаллические обои" или другие декоративные элементы.

Все дисплеи такого типа пока монохромны (черные, синие, зеленые), но возможно дальнейшее развитие этой технологии для создания цветных дисплеев - необходимо будет добавить к одному пигментному слою еще два, других цветов.



*Рис.2.50. Часы с новым дисплеем*



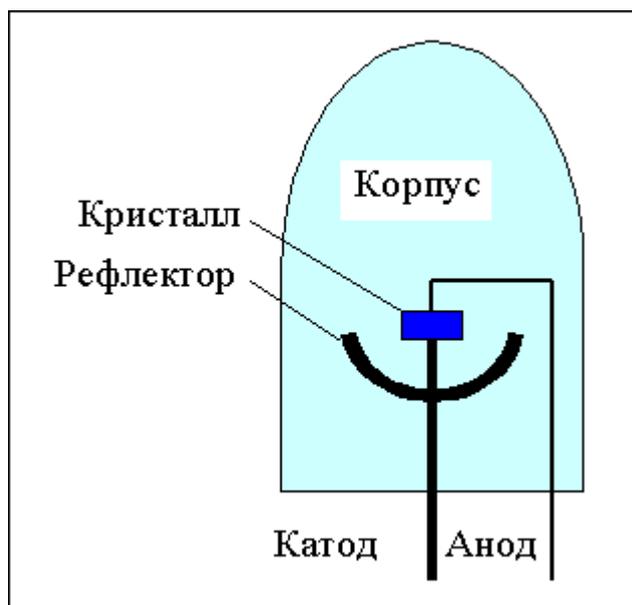
*Рис. 2.51 Жидкопорошковый дисплей*

Одним из направлений работы по совершенствованию отражающих дисплеев является создание жидкопорошковых экранов на основе наноструктурированных порошков, которые при определенных условиях ведут себя как жидкости. Поэтому новый дисплей называется "Liquid Powder" (т.е. "жидкопорошковый"). Этот наноматериал реагирует на электрическое поле очень быстро благодаря своим электрическим свойствам. За счет этого достигается высокая скорость отклика. А то, что наноматериал проявляет свойства жидкости, позволяет делать гибкую "электронную бумагу" на основе новой технологии. Такой дисплей отражает более 45% падающего на него света. Это значит, что "электронная бумага" будет похожа на обычную ярко-белую.

### ***2.7.11. Системы отображения информации на основе полупроводниковых светодиодов*** **Экраны больших размеров**

Такие системы строятся из отдельных светодиодов, которые группируются сначала в пиксели, а затем в матрицу пикселей. Такой принцип построения приводит к тому, что размер пикселя оказывается достаточно большим (от 3 до 50 мм).

На рисунке 2.52 показана упрощенная структура светодиода, применяемого в экранах больших размеров.



*Рис. 2.52. Структура светодиода*

Свет, излучаемый полупроводниковым кристаллом, отражается от рефлектора и проходит через прозрачный или полупрозрачный корпус.

Современные светодиоды, применяемые в экранах, имеют следующие длины волн: синий 430 - 470 нм, зеленый 515 - 530 нм, красный 630 - 670 нм.

Выходная диаграмма направленности светового потока формируется как формой рефлектора, так и формой корпуса светодиода. Варьируя параметры рефлектора и корпуса можно создавать различные диаграммы направленности шириной от 4 - 5 до 160°. Значение силы света экранов, применяемых на улице, составляет 3000 - 3500 канделл/м<sup>2</sup>. Применяя экраны с указанным значением силы света с единицы площади и выше, можно получить изображение хорошего качества при солнечной засветке экрана.

Способность работать при очень высокой освещенности и в широком диапазоне температур – те качества, которые сделали светодиодные технологии основными при производстве экранов наружного пользования. На базе герметичных светодиодных модулей можно создать экран практически любого размера, формата и разрешения.

Полноцветные светодинамические табло на полупроводниковых светодиодах сочетают в себе все основные преимущества существующих визуальных рекламных технологий. Единственным их недостатком может считаться довольно высокая стоимость по сравнению с другими технологиями рекламы. Внешний вид светодиодного экрана показан на рисунке 2.53.



Рис. 2.53. Внешний вид светодиодного экрана

## Экраны на основе органических светодиодов

Одной из самых перспективных технологий отображения информации является технология органических светодиодов (Organic Light Emitting Diodes - OLED), запатентованная в начале 80-х годов прошлого столетия компанией Eastman Kodak. Повышенный интерес к OLED объясняется такими их достоинствами, как высокие яркость и контрастность, а также отсутствие необходимости подсветки и, соответственно, низкое энергопотребление.

Органический светодиод представляет собой многослойную структуру, состоящую из нескольких органических слоев (дырочной инжекции, переноса дырок, светоизлучающего и переноса электронов) толщиной 100–150 нм, заключенных между прозрачным анодом, нанесенным на стеклянную или пластмассовую подложку, и осажденным поверх органических пленок металлическим катодом.

Каждый пиксел формируется из трех органических светодиодов с синим, зеленым и красным цветами свечения.

**Пассивно-матричные OLED** просты по своему исполнению и представляют собой матрицу элементов изображения, образуемую пересекающимися анодными и катодными линиями. При подаче с помощью внешнего контроллера на определенные столбцы и строки входного напряжения и сигнала передачи видеоданных высвечиваются соответствующие элементы изображения. Чем больше проходящий ток, тем ярче пиксел.

Панели этого типа просты в изготовлении, но требуют применения достаточно дорогостоящих внешних схем управления. К тому же они потребляют большую мощность. На их основе целесообразно выполнять дисплеи с диагональю не больше 2–3" и числом строк до 100. Такие дешевые дисплеи с малым информационным содержанием находят достаточно широкое применение в сотовых телефонах, MP3-плеерах и портативных электронных играх.

**Активно-матричные OLED** выполняются на стеклянных подложках, поверх которых изготовлены тонкопленочные транзисторы (TFT), обеспечивающие индивидуальную адресацию каждого пиксела дисплея и позволяющие тем самым снизить потребляемую им мощность. Для формирования TFT-матрицы

наиболее перспективен метод низкотемпературной обработки поликристаллического кремния (Low-Temperature Polycrystalline Silicon – LTPS). Подложки из поликристаллического кремния обеспечивают высокое разрешение (до 200 пикселей/дюйм и выше) и малое энергопотребление. Число пикселей, разрешение и размер активно-матричных OLED практически ничем не ограничены. Панели этого типа перспективны для реализации СОИ с высоким разрешением и информационным содержанием, в том числе средств отображения видеоинформации и графических устройств.

Основные рабочие характеристики дисплея, к которым относятся длина волны излучения (цвет), срок службы и эффективность, определяет в первую очередь органический материал многослойной структуры. В настоящее время органические светодиоды в основном выполняются либо на базе низкомолекулярных материалов, либо на основе специального класса полимеров, способных излучать свет при возбуждении.

В полимерных органических светодиодах, как правило, используются полимеры двух семейств – поли р-фениленвинилен (PPV) и полифлуорен (PF). Полимер наносится на подложку методом струйной печати. На их основе могут быть изготовлены полноцветные дисплеи с диагональю до 40 дюймов.

К достоинствам органических светодиодов на основе низкомолекулярных материалов относится их совместимость с большинством операций производства полупроводниковых приборов. Они существенно превосходят полимерные светодиоды по сроку службы и эффективности, но метод их изготовления не приемлем для создания дисплеев больших размеров. Поэтому сейчас низкомолекулярные органические дисплеи считаются наиболее серьезным конкурентом ЖКД в области дисплеев малых размеров.

В последнее время внимание разработчиков привлекают органические светодиоды на основе растворимого в полимере фосфоресцирующего низкомолекулярного материала. Фосфоресцирующие OLED по эффективности в четыре раза превосходят обычные органические светодиоды. К достоинствам фосфоресцирующих OLED относятся возможность формирования на их основе экранов больших размеров (благодаря малой

потребляемой мощности и большой светоотдаче), а также совместимость технологии с процессами формирования активных матричных структур с TFT на базе аморфного или поликристаллического кремния.

Разработаны и прозрачные органические светодиоды, формируемые с прозрачными электродами на тонких прозрачных стеклянных или пластмассовых подложках. Такие светодиоды излучают свет верхней, нижней или обеими поверхностями. Поскольку в нерабочем режиме такие панели прозрачны на 70%, они могут монтироваться на стеклах очков, лобовом стекле автомобиля или на окнах.

К основным достоинствам OLED можно отнести:

- чрезвычайно малые толщину и массу, гибкость конструкции, которую можно реализовать на пластмассовой тонкопленочной подложке в виде "электронной бумаги", что делает такие средства отображения перспективными для применения в разнообразных портативных устройствах;
- более высокие, по сравнению с ЖКД, значения яркости и контрастного отношения; высокое разрешение; широкий угол обзора (до 170°);
- отсутствие подсветки и хорошую видимость даже при ярком освещении;
- высокую частоту обновления изображения (в три раза выше, чем требуется для воспроизведения телевизионного изображения);
- малую потребляемую мощность, что, помимо увеличения срока службы батарей портативных устройств, обеспечивает высокую эффективность диодов и позволяет минимизировать выделяемое тепло и вносимые помехи.

Не за горами и появление телевизионных OLED-экранов. Так, в 2005 году компания Samsung экспонировала опытный образец AMOLED-экрана с диагональю 21" (53 см) и разрешением 1920x1080 пикселей, при изготовлении которого использовалась освоенная в производстве ЖКД TFT-технология. А на Международном симпозиуме, семинаре и выставке Общества информационных дисплеев 2005 года компания представила опытный образец OLED-панели с диагональю 40" (1 м). Разрешение панели 1280x800 пикселей для каждого цвета (всего 3,07 млн. пикселей), максимальная яркость экрана 600 кд/м<sup>2</sup>, контрастное

отношение может достигать 5000:1. Толщина панели всего 2,2 см. Выполнен экран на стеклянной подложке размером 730x920 мм по технологии, совместимой с процессами изготовления активных ЖКД дисплеев.

При массовом производстве органических светодиодных экранов возникает ряд проблем. Это трудности в создании долговечного синего светодиода, пока еще недостаточный срок службы органических панелей, чувствительность органических материалов к воздействию паров воды, кислорода и УФ облучению.

Несмотря на эти проблемы, преимущественно технические, дисплеи на основе органических светодиодов являются весьма перспективными системами отображения информации.

### **Контрольные вопросы**

1. Сформулируйте основные принципиальные достоинства оптоэлектронных систем.
2. Какой принцип преобразования электрической энергии в световую используется в светодиодах?
3. От чего зависит длина волны излучения светодиода?
4. Какие материалы используются для изготовления светодиодов?
5. Какова причина насыщения яркостных характеристик светодиодов?
6. Как зависит мощность излучения инжекционного лазера от плотности тока через переход?
7. Каковы размеры излучающей области полупроводникового лазера?
8. В чем трудности создания инжекционных лазеров для синей области спектра?
9. Какую ширину имеет линия излучения полупроводникового лазера?
10. Перечислите основные механизмы поглощения излучения в полупроводниках.
11. Проанализируйте достоинства и недостатки фоторезистора как приемника излучения.
12. Рассмотрите принцип действия фотодиодов.

13. Какова предельная величина напряжения холостого хода в фотодиоде?
14. Нарисуйте и проанализируйте вольт-амперную характеристику идеализированного перехода при облучении его светом.
15. Чем определяется длинноволновая граница спектральной чувствительности фотодиода?
16. Рассмотрите возможности усиления тока в фотодиоде.
17. В чем особенности работы фотодиодов с барьером Шоттки?
18. Каков принцип работы фототранзисторов и фототиристоров?
19. Для каких целей используются оптопары?
20. По каким параметрам согласуются элементы оптопар?
21. В чем суть электрооптических эффектов в кристаллах?
22. В чем различие электрооптических эффектов Поккельса и Керра?
23. В чем заключается магнитооптический эффект?
24. Рассмотрите устройство и принцип работы электрооптического модулятора.
25. Что такое полуволновое напряжение?
26. Какие материалы используются в электрооптических модуляторах?
27. Проанализируйте возможности прямой модуляции интенсивности излучения полупроводникового лазера.
28. Что такое дефлектор и как он устроен?
29. Рассмотрите принципиальную структуру волоконно-оптической линии связи.
30. Сформулируйте основные отличительные особенности ВОЛС.
31. Как устроен цилиндрический двухслойный световод?
32. Какие факторы определяют потери излучения в световоде?
33. Рассмотрите особенности ввода излучения в световод.
34. Как можно разделить или сложить световой поток в световодах?
35. Как классифицируются ВОЛС?
36. В чем принцип голографии?
37. Поясните принципы записи и считывания информации в голографических системах.

38. Сравните возможности голографических и магнитных запоминающих систем.
39. Рассмотрите возможности зрения человека с точки зрения восприятия информации.
40. Какие требования предъявляются к системам отображения информации?
41. Какие физические эффекты могут быть использованы для отображения информации?
42. Что представляют собой жидкие кристаллы, и каковы их возможности в области отображения информации?
43. Рассмотрите принцип работы жидкокристаллических индикаторных приборов.
44. Что представляет собой твист-эффект?
45. Как можно получить цветное изображение на жидкокристаллических индикаторных панелях?

### **Задачи для практических занятий и самостоятельной работы**

1. Рассчитайте изменение показателя преломления в ячейке Поккельса (кристалл  $\text{KN}_2\text{PO}_4$  толщиной 2 мм) при напряжениях 100, 1000 и 10000 В.
2. Для условий предыдущей задачи рассчитайте угол сдвига фаз излучения гелий-неонового лазера (632,8 нм).
3. Рассчитайте изменение показателя преломления в ячейке Керра (кристалл  $\text{KTaO}_3$  толщиной 2 мм) при напряжениях 100, 1000, 10000 В.
4. Для условий предыдущей задачи определите угол сдвига фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами.
5. Рассчитайте полуволновое напряжение электрооптического модулятора на эффекте Поккельса (кристалл  $\text{KN}_2\text{PO}_4$  толщиной 2 мм) для излучения длиной волны 1,3 мкм.
6. Покажите, что при управляющем напряжении, равном полуволновому, достигается максимальная глубина модуляции.
7. Постройте и проанализируйте зависимость отношения входного и выходного сигналов от управляющего напряжения при полуволновом напряжении 1000 В.

8. Проведите анализ зависимости числовой апертуры световода от величины показателя преломления внутренней жилы и оболочки, используя конкретные справочные данные.
9. Во сколько раз ослабнет сигнал в световоде длиной 500 м, если коэффициент затухания составляет 2 дБ/км.
10. Пользуясь цветовым графиком МКО, определите для координат  $X = 0,4$ ,  $Y = 0,3$  цветовую тональность и цветовую насыщенность излучения.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Пихтин, А.Н. Оптическая и квантовая электроника: Учебник для вузов /А.Н. Пихтин.-М.: Высш. шк., 2001 г. -573 с.
2. Оокоси, Т. Оптическая электроника и связь /Т. Оокоси.-М.:Мир,1988. -96 с.
3. Носов, Ю.Р. Оптоэлектроника /Ю.Р. Носов.- М.:Сов.радио, 1977, -232 с.
4. Полупроводниковые фотоприемники. / Под ред. В.И.Стафеева. - М.: Радио и связь,1984. -216 с.
5. Дьюли, У. Лазерная технология и анализ материалов /У Дьюли. -М.: Мир,1986. -504 с.
6. Физические величины. Справочник. / Под ред. И.С.Григорьева, Е.З.Мейлихова. -М.:Энергоатомиздат,1991.
7. Основы оптоэлектроники. / Пер. с японского. -М.:Мир, 1988, 284 с.
8. Щука А.А. Нанoeлектроника /А.А. Щука33333.-М: Физматкнига, 2007, - 464с.
9. Шишкин Г.Г., Шишкин А.Г. Электроника. Учебник для вузов /Г.Г. Шишкин, А.Г.Шишкин. –М: Дрофа, 2009, 704 с.

## Содержание

Предисловие	3
<b>Глава 1. Основы квантовой электроники</b>	<b>4</b>
1.1. Этапы и перспективы развития квантовой электроники	4
1.2. Физические основы взаимодействия излучения с веществом	6
1.3. Устройство и принципы работы лазеров	14
1.3.1. Рабочее вещество	15
1.3.2. Создание инверсии	15
1.3.3. Условия создания инверсной населенности	17
1.3.4. Двухуровневая система	17
1.3.5. Трехуровневая система	18
1.3.6. Четырехуровневая система	20
1.3.7. Оптические резонаторы	22
1.3.8. Условия самовозбуждения и насыщения усиления	26
1.3.9. Импульсная генерация, модуляция добротности и синхронизация мод	28
1.4. Свойства лазерного излучения	31
1.4.1. Монохроматичность	31
1.4.2. Когерентность	34
1.4.3. Поляризация излучения	36
1.4.4. Направленность и возможность фокусирования излучения	37
1.4.5. Яркость и мощность излучения	38
1.5. Типы лазеров	39
1.5.1. Твердотельные лазеры	39
1.5.2. Рубиновый лазер	41
1.5.3. Неодимовый стеклянный лазер	43
1.5.4. Nd-ИАГ лазеры	44
1.5.5. Волоконные лазеры	46
1.5.6. Газовые лазеры	55
1.5.7. Атомные лазеры.	56
1.5.8. Лазеры на парах металлов	58
1.5.9. Ионные лазеры	63
1.5.10. Молекулярные лазеры	66
1.5.11. Эксимерные лазеры	68
1.5.12. Газовые лазеры в инфракрасной области спектра	71
1.5.13. Химические лазеры	77

1.15.14. Газодинамические лазеры	82
1.15.15. Электроионизационные лазеры	84
1.15.16. Полупроводниковые лазеры	85
1.15.17. Жидкостные лазеры	90
Контрольные вопросы	92
Задачи для практических занятий и самостоятельной работы	95
<b>Глава 2. Основы оптоэлектроники</b>	<b>98</b>
2.1. Этапы и перспективы развития физической электроники	98
2.2. Источники излучения для оптоэлектроники	101
2.3. Фотоэлектронные приемники излучения	109
2.4. Модуляция лазерного излучения	122
2.5. Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС)	129
2.5.1. Элементная база ВОЛС	130
2.5.2. Классификация ВОЛС	139
2.6. Оптические методы запоминания и хранения информации	141
2.6.1. Оптические (лазерные) диски	141
2.6.2. Голографические системы хранения и обработки информации	145
2.7. Системы отображения информации	149
2.7.1. Особенности зрительного восприятия информации	149
2.7.2. Физические эффекты, используемые для отображения информации	152
2.7.3. Электронно-лучевые трубки	153
2.7.4. Проекционные ЭЛТ и системы	156
2.7.5. Плазменные дисплеи	157
2.7.6. Жидкокристаллические индикаторы	163
2.7.7. Жидкокристаллические индикаторные панели	170
2.7.8. Электролюминесцентные индикаторы	175
2.7.9. Дисплеи с полевой (автоэлектронной) эмиссией	178
2.7.10. Отражающие дисплеи (электронная бумага)	180
2.7.11. Системы отображения информации на основе полупроводниковых светодиодов	185
2.8. Контрольные вопросы	190
2.9. Задачи для практических занятий и самостоятельной работы	192
Рекомендуемая литература	193
Содержание	194

Учебное издание

Светцов Владимир Иванович

## ОПТИЧЕСКАЯ И КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие

Редактор В.Л. Родичева

Подписано в печать 26.11..2010. Формат 60x64<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Бумага писчая. Усл.печ.л. 11,39. Уч.-изд.л. 12,64.

Тираж 100 экз. Заказ

ГОУ ВПО Ивановский государственный  
химико-технологический университет

Отпечатано на полиграфическом оборудовании  
кафедры экономики и финансов ГОУ ВПО «ИГХТУ»

153000, г. Иваново, пр. Ф. Энгельса, 7