

Министерство образования Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Ивановский государственный химико-технологический университет»

Светцов В. И.

ОПТИЧЕСКАЯ И КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие

Допущено учебно-методическим объединением по химико-технологическому образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений по специальности 251000 – «Химическая технология монокристаллов, материалов и изделий электронной техники».

Иваново 2004

УДК 621.38

Оптическая и квантовая электроника: Учебное пособие / В. И. Светцов;
Иван. гос. хим.-техн. ун-т; Иваново, 2004. 122 с. ISBN № 5-9616-0024-6

Учебное пособие «Оптическая и квантовая электроника» предназначено для студентов, изучающих соответствующие разделы в дисциплинах «Физическая электроника и электронные приборы» и «Квантовая и оптическая электроника». Его содержание соответствует стандартам специальностей 251000 и 200100.

Табл. 13. Ил. 42. Библиогр. 8 назв.

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

Рецензенты:

кафедра молекулярной физики ИвГУ. Зав. кафедрой доктор химических наук, профессор В. В. Зайцев (Ивановский государственный университет);
кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроника и микропроцессорные системы» ИГЭУ А. И. Терехов (Ивановский государственный энергетический университет).

ISBN № 5-9616-0024-6

© ГОУВПО Ивановский
государственный химико-
технологический университет,
2004

ГЛАВА 1. ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

1.1. ВВЕДЕНИЕ. 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 г.-1954 г. 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 г.-1961 г. Н. Г. Басов, Б. М. Вул, Ю. М. Попов и другие сотрудники ФИАН им. Лебедева разработали теоретические основы полупроводниковых лазеров 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 γ -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.

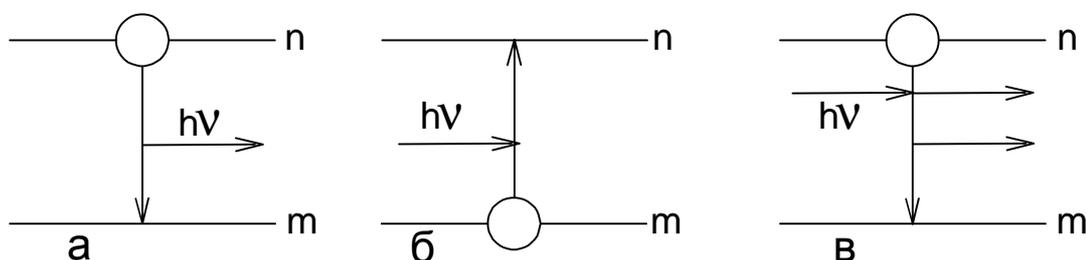


Рис.1.1. Квантовые переходы при взаимодействии с фотоном:

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, [s^{-1}]. Величина, обратная A_{nm} , называется спонтанным временем жизни.

Значение коэффициента Эйнштейна для спонтанных переходов в оптическом диапазоне может изменяться от 10^8 с^{-1} для разрешенных переходов до 1 с^{-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, $\rho(\nu)$ - 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 ν 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:

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

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

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

В уравнении 1.7 учтено, что $B_{mn} = B_{nm}$. Очевидно, что если $W_{\text{изл.}}$ 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_ν - 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_v - 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:

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

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

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:

$$dI_v = -x_{\Pi} I_v dx, \quad (1.11)$$

где x_{Π} - коэффициент потерь. Учитывая потери в среде и усилительные ее свойства, окончательное уравнение изменения интенсивности волны можно представить в виде:

$$dI_v = (x_v - x_{\Pi}) I_v dx. \quad (1.12)$$

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

$$x_{\Pi} = \frac{h\nu B_{nm} \Delta N_{\text{пор}}}{c},$$

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

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:

$$K = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}}. \quad (1.14)$$

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

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

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 ν_0 . На этой частоте мощность излучения максимальна и убывает на частотах, больших или меньших чем ν_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 прямопропорциональна вероятности спонтанного перехода:

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

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: $\int_{-\infty}^{+\infty} F_{\nu} d\nu = 1$ (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.

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 так же радиационной шириной, является универсальной постоянной:

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

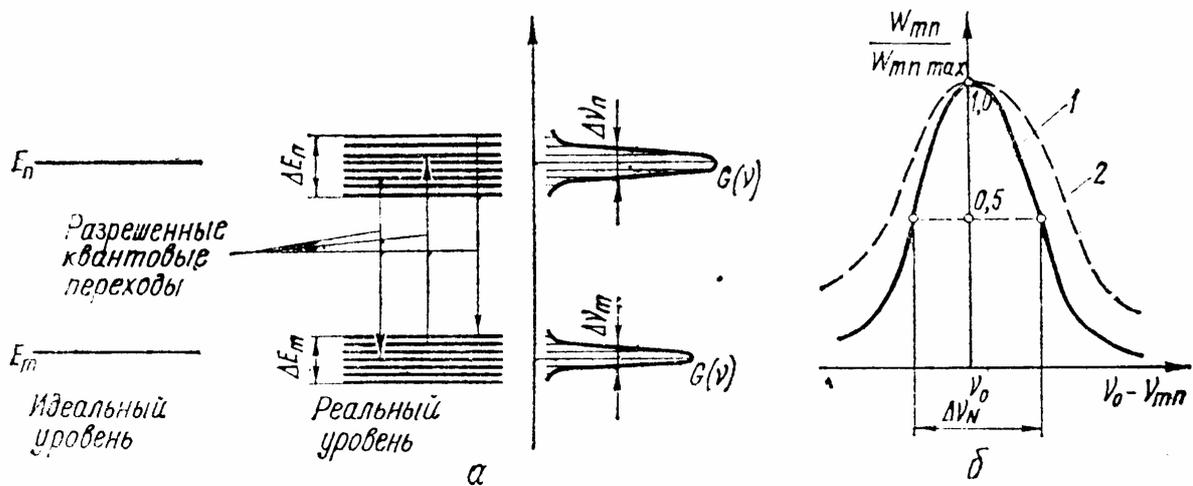


Рис.1.2. Представление реального и идеального энергетического уровня.

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, относительно которого он движется со скоростью v , может быть найдена из уравнения:

$$v = v_0 \left(1 + \frac{v}{c} \cos \theta \right) \text{ при } v \ll c \quad (1.22)$$

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

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

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

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 так же 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:

$$\tau_{ст} = \frac{(MkT / \pi)^{0,5}}{16a^2P} \quad (1.24)$$

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.)

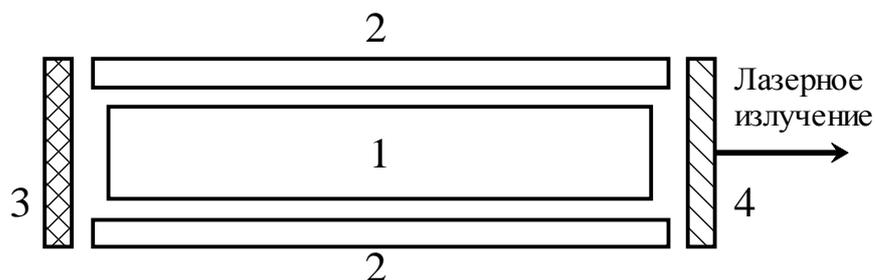


Рис.1.3. Принципиальная схема лазера

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-йодные, 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 так же 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 заселенность.

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).

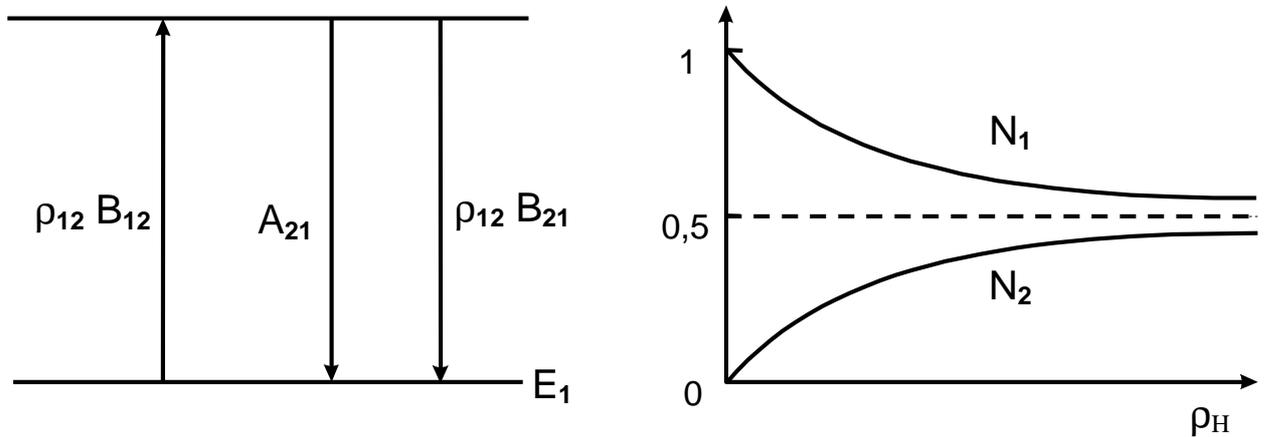


Рис.1.4. Схема энергетических состояний двухуровневой квантовой системы (а) и зависимость относительной населенности рабочих уровней от плотности накачки (б).

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

$$\rho_H B_{12} N_1 = (\rho_H B_{21} + A_{21}) N_2 \quad (1.25)$$

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

$$N_2 = \frac{\rho_H B_{21}}{A_{21} + 2\rho_H B_{21}} N \quad N_1 = \frac{A_{21} + \rho_H B_{21}}{A_{21} + \rho_H B_{21}} N \quad (1.26)$$

ρ_H - 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 4б). 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:

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

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

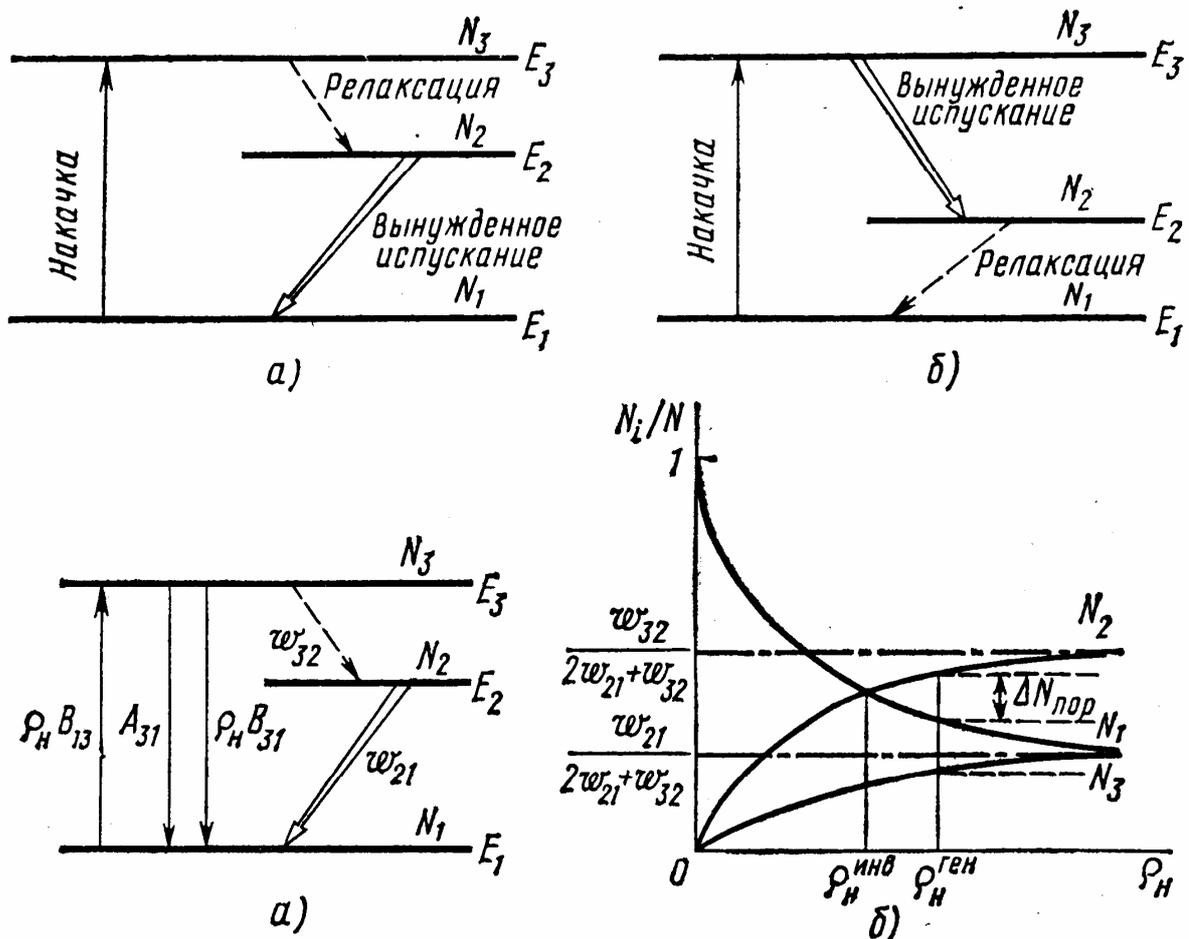


Рис.1.5. Трехуровневые схемы первого (а) и второго (б) типов и зависимость относительной населенности уровней от плотности накачки (в).

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

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

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

$$\lim N_1 = \lim N_3 = \frac{S_{21}}{2S_{21} + S_{32}} N \tag{1.30}$$

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

$$\lim N_2 = \frac{S_{32}}{2S_{21} + S_{32}} N \tag{1.31}$$

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:

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

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.1.6б. Сами балансные уравнения из-за их громоздкости не приводятся.

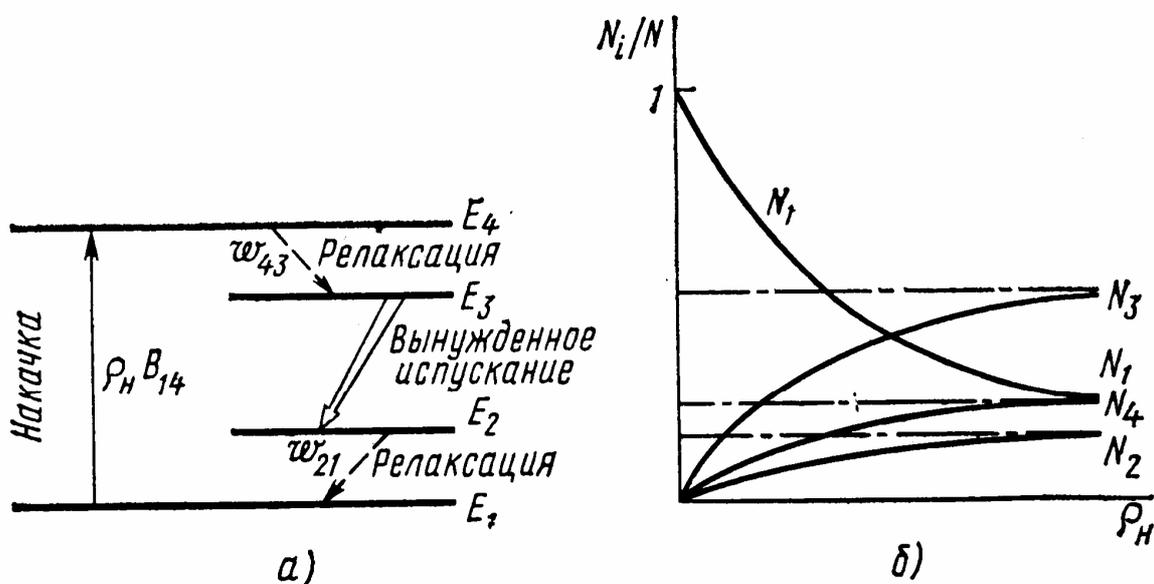


Рис.1.6. Схема четырехуровневой системы (а) и зависимость относительной населенности уровней от плотности накачки (б).

Из рис.1.6б 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, укладывающихся 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 так же 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:

$$\Delta\nu = \nu/Q \quad (1.33)$$

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.

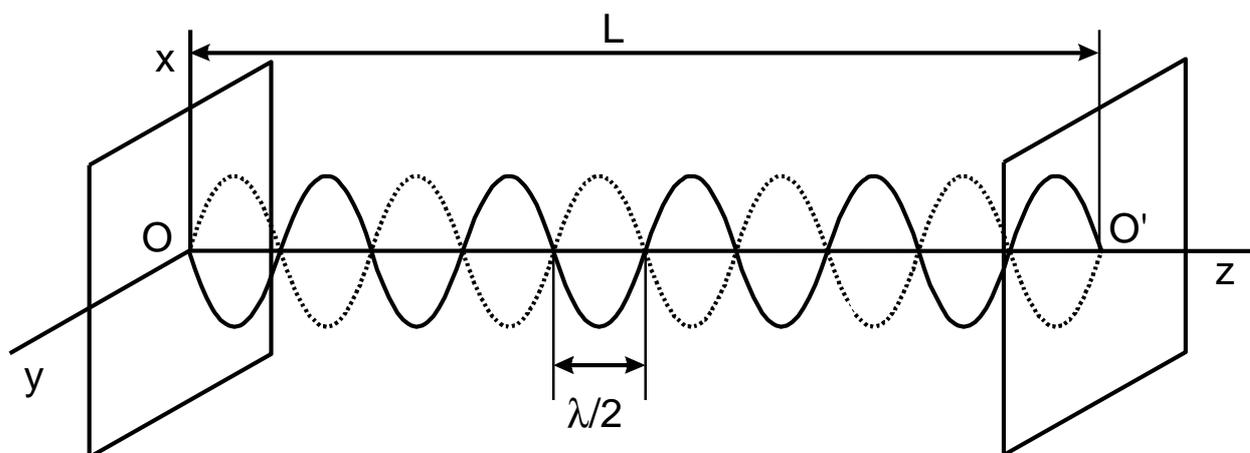


Рис.1.7. Схема плоского оптического резонатора.

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.

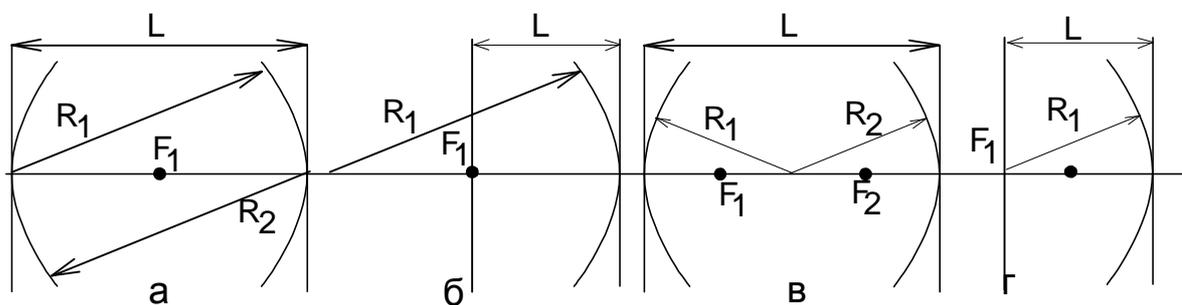


Рис.1.8. Схемы различных типов резонаторов со сферическими зеркалами:

- 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 полностью использовать активное вещество.

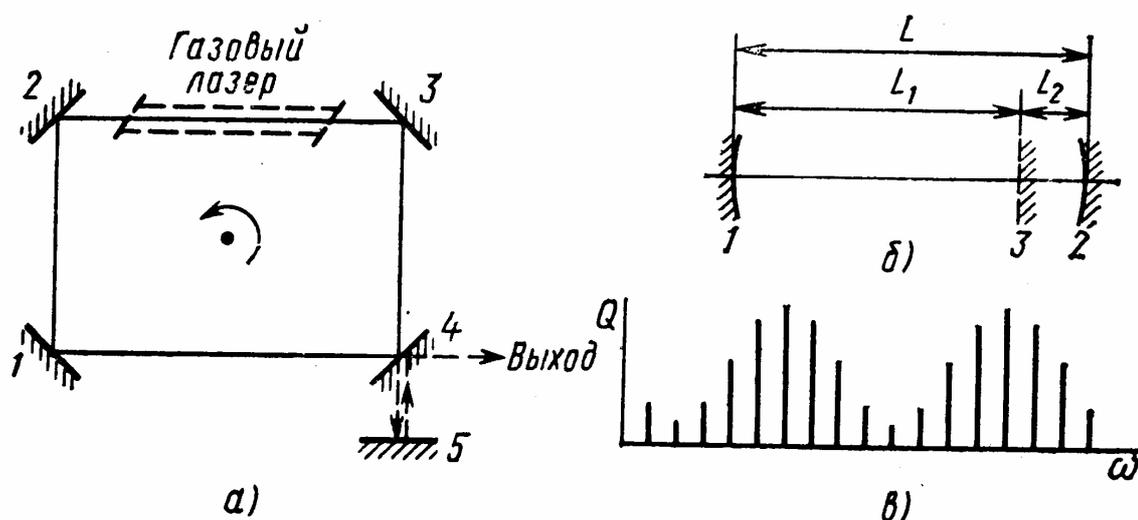


Рис.1.9. Схемы кольцевого (а) и составного (б) резонаторов.

Составной резонатор представляет собой два или более связанных между собой резонатора (Рис.1.9б), 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:

$$b \sin\theta = m\lambda/2 \quad (1.35)$$

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

Изменяя угол θ , 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:

$$-\delta I/I = \nu n d z / Q c \quad (1.37)$$

При этом условие превышения усиления над потерями запишется в виде:

$$\alpha > \nu n / Q c \quad (1.38)$$

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

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

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 ν , то есть в общем спектре образуется характерный пик. Количественно эффект насыщения описывается формулами

$$\alpha_{\text{одн}} = \frac{\alpha_{\text{одн}}^0}{1 + I/I_s} \quad (1.40)$$

для однородно уширенной линии и

$$\alpha_{\text{неодн}} = \frac{\alpha_{\text{неодн}}^0}{(1 + I/I_s)^{1/2}} \quad (1.41)$$

для неоднородно уширенной линии. Здесь α^0 - 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.

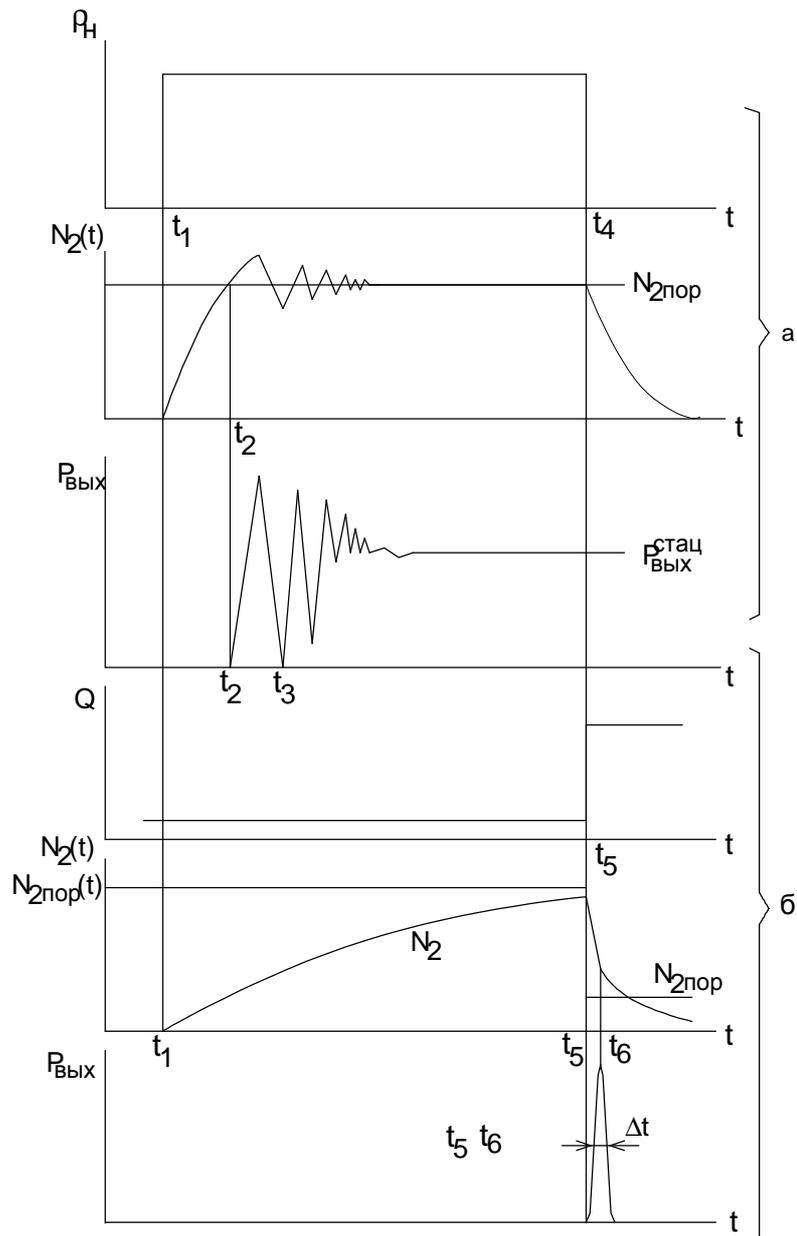


Рис.1.10. Развитие импульсов излучения при прямоугольном импульсе накачки

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

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 $t_{\text{зад}}$, длительностью гигантского импульса $t_{\text{им}}$, 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 1пс 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 1пс. 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 μ 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:

$$\Delta\nu_c = \nu_0/Q \quad (1.43)$$

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

$$\Delta\nu = \frac{2h\nu_0(\Delta\nu_c)^2}{\pi P} \quad (1.44)$$

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:

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

где $\tau_{\text{сп}}$ - 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 флуоресценции. Так, в гелий-неоновом лазере по расчету укладывается 10 мод, а реально наблюдаются 3 - 4 моды. На рис.1.12 показаны равномерно разнесенные моды резонатора. Частотный интервал между ними равен $c/2d$, где d - расстояние между зеркалами. Это соответствует разнесению длин волн на интервал $\lambda^2/2d$.

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.

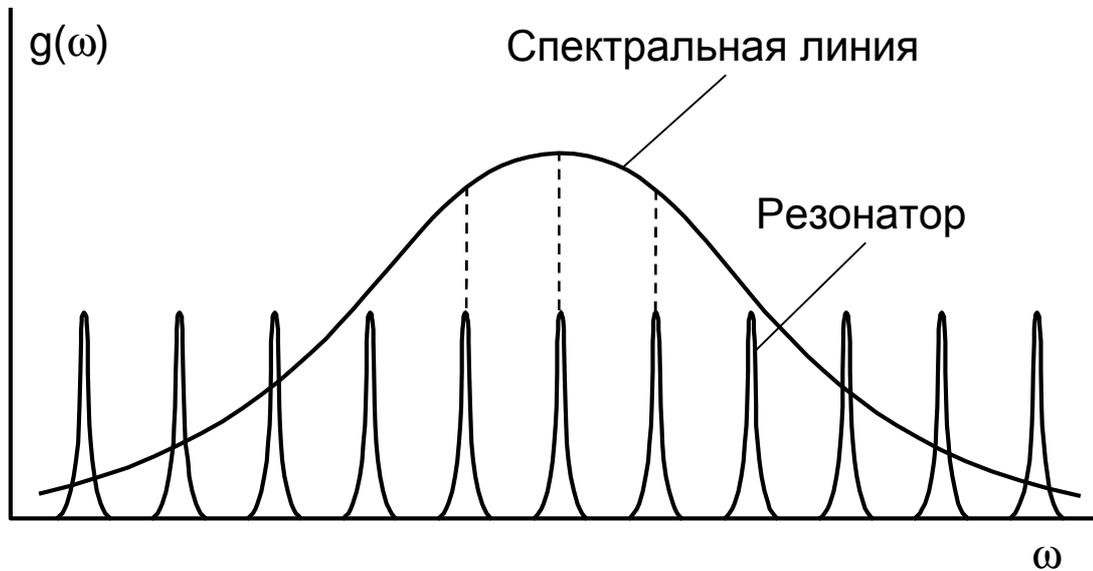


Рис.1.12. Естественная ширина линии и моды резонатора.

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 $t + \tau$, 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 $1/\Delta\nu$, где $\Delta\nu$ - ширина линии в Гц. 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 $\Delta\nu = 1\text{МГц}$ имеет $\tau = 10^{-6}\text{с}$, многомодовый He-Ne-лазер $\Delta\nu = 1.5\text{ГГц}$, $\tau = 6.6 \cdot 10^{-10}\text{с}$.

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 $(2n-1)\pi/2$.

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° 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° , 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 2π до 4π).

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/см² (плотность излучения Солнца составляет только $7 \cdot 10^3$ Вт/см²).

1.4.5. Яркость и мощность излучения

Яркость V 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 $B_\nu = B/\Delta\nu$, где $\Delta\nu$ - ширина лазерной линии в Гц. 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 кВт. 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 CO₂-лазеры (десятки киловатт для промышленных образцов). Очень высокие уровни мощности имеют импульсные твердотельные лазеры на неодимовом стекле (до 10¹¹ - 10¹³ 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: твердотельные лазеры; газовые лазеры, включая газодинамические, химические и эксимерные; полупроводниковые лазеры; 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 среду. 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: ксеноновые лампы, криптоновые лампы, ртутные лампы высокого давления, галогенные лампы. Используемые для накачки импульсные лампы имеют стержневую ($l = 10 - 50$ мм, $d = 5 - 20$ мм) или спиральную форму.

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

Характерные концентрации ионов Cr^{3+} в рубине - 0.01 - 0.5%. Так как система $\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ работает по трехуровневой схеме, инверсия населенности достигается только при возбуждении 50% ионов Cr^{3+} . Это приводит к высокому порогу генерации. 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. Излучение рубинового лазера характеризуется большой мощностью при невысоком качестве излучения (неоднородное распределение по поперечному сечению, пиковый характер излучения).

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 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.

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 более 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.).

1.5.4. Nd – ИАГ – лазеры

В настоящее время лазер этого типа является важнейшим твердотельным лазером. Он характеризуется тем, что при относительно простой конструкции достигаются высокие мощности в импульсном режиме при высокой частоте

следования импульсов (до 10кГц) или даже в непрерывном режиме. Аллюмиттриевый 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 стекле с неодимом. 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. 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%.

1.5.5. 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.1.13.

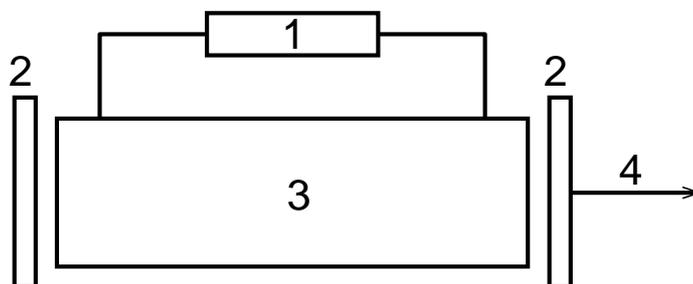


Рис.1.13. Принципиальная схема газоразрядного лазера. 1 - источник питания разряда. 2 - оптический резонатор. 3 - активный элемент. 4 - лазерное излучение.

Активная среда находится в пределах лазерной трубки, длина зоны возбуждения достигает от нескольких сантиметров до 200м (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.1.6. Спектральные свойства лазерного излучения в основном определяются сильным неоднородным (доплеровским) уширением. При этом изменение доплеровской ширины в зависимости от длины волны равно:

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

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

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

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.

Таблица 1.1.

Предельные параметры газовых лазеров

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

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

1.5.6. 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 He, которые возбуждаются при столкновениях с электронами.

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 - 50 мВт и их использование связано, в основном, с измерительной техникой, голографией и т.д.

1.5.7. 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 и получили название лазеров на самоограниченных переходах.

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 Вт, а импульсную - до 200 КВт при длительности импульса 20 - 30 нс. Трудности создания лазеров на

парах металлов обусловлены высокой рабочей температурой (до 1700 К) активного объема и необходимостью обеспечения мощных коротких импульсов накачки в газовом разряде при частоте повторения в десятки килогерц.

1.5.8. 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%. Из других ионных лазеров следует отметить криптоновые и 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.

1.5.9. 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, с высокой частотой следования импульсов. Из-за незначительного времени жизни верхнего уровня инверсия заселенности достигается только при возбуждении короткими импульсами (<15 нс). 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_2 -лазер может работать без резонатора. Рабочая длина волны азотного лазера составляет 337,1 нм.

H_2 -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.

1.5.10. 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.1.14). 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.

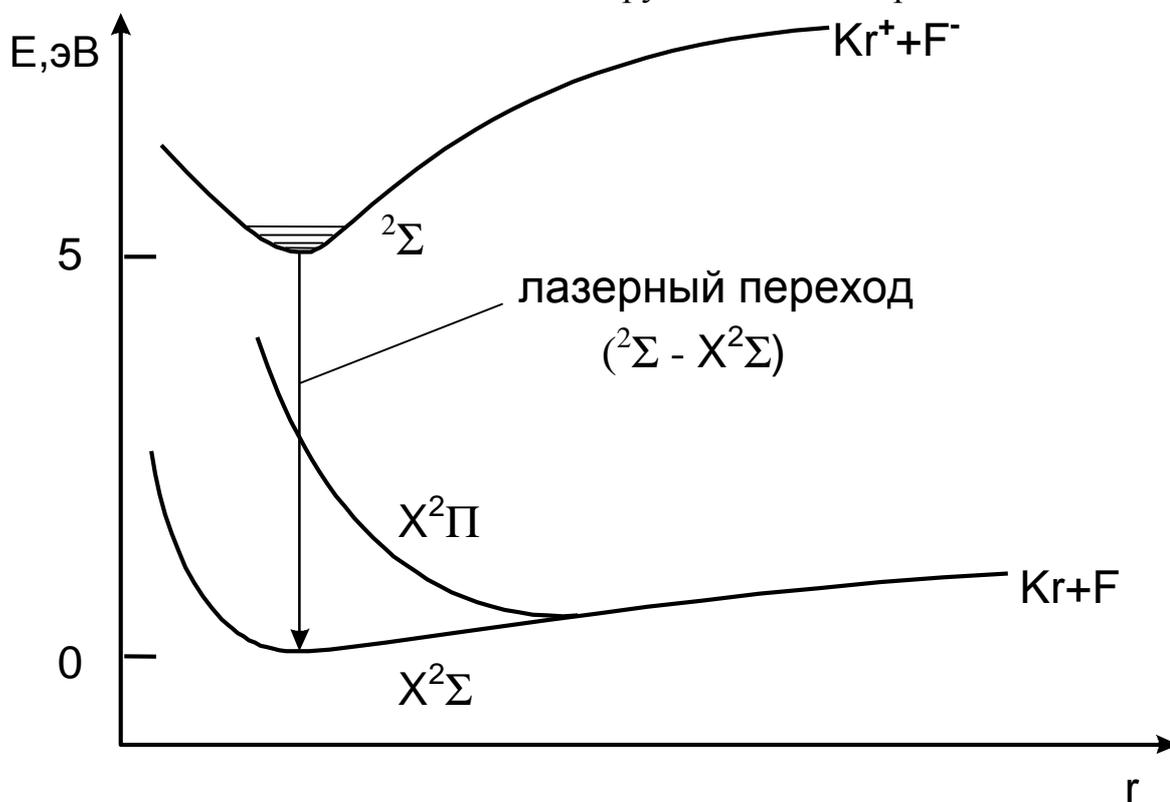


Рис.1.14. Схема потенциальных кривых эксимерных молекул.

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 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 1.3 представлены длины волн для центров линий перехода возбужденных молекул, составляющих основу существующих эксимерных лазеров.

Таблица 1.3.

Параметры переходов в эксимерных лазерах.

Молекула, переход между состояниями которой создает лазерное излучение	Длина волны в центре линии перехода, нм	Эквивалентный электронный переход в атоме	Ширина спектра усиления, нм
Ar_2	126.1	$\text{Ar}(P) \rightarrow \text{Ar}(^1S)$	8
Kr_2	146.7	$\text{Kr}(P) \rightarrow \text{Kr}(^1S)$	13.8
Xe_2	172	$\text{Xe}(P) \rightarrow \text{Xe}(^1S)$	20
ArF	193.3	$\text{Ar}(P) \rightarrow \text{Ar}(^1S)$	1.5
KrCl	222	$\text{Kr}(P) \rightarrow \text{Kr}(^1S)$	5
KrF	248.4	$\text{Kr}(P) \rightarrow \text{Kr}(^1S)$	4
XeBr	281.8	$\text{Xe}(P) \rightarrow \text{Xe}(^1S)$	1
XeCl	308	$\text{Xe}(P) \rightarrow \text{Xe}(^1S)$	2.5
XeF	351.1	$\text{Xe}(P) \rightarrow \text{Xe}(^1S)$	1.5
XeO	540	$\text{Xe}(P) \rightarrow \text{Xe}(^1S)$	25
KrO	557.7	$\text{O}(^1S) \rightarrow \text{O}(^3P)$	1.5
ArO	558	$\text{O}(^1S) \rightarrow \text{O}(^3P)$	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.

1.5.11. 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-, CO₂-лазеры, H₂O-, SO₂-лазеры);

вращательными уровнями в основном электронном состоянии в дальней ИК-области (HF-, CH₃F-лазеры).

Одним из важнейших типов данного класса приборов является CO₂-лазер. Его КПД (больше 20%) превышает КПД почти всех лазеров. В CO₂-лазере получены самые малые для газовых лазеров длительности импульсов (<30пс). При непрерывном режиме достигается очень высокая стабильность частоты $\Delta\nu/\nu = 0.001$. Кроме того, для CO₂-лазеров достигнуты рекордно высокие мощности генерации как в непрерывном, так и в импульсном режимах.

Лазерное излучение возникает при переходах между колебательно-вращательными уровнями молекулы в основном электронном состоянии. Длины волн генерируемого излучения находятся в интервале 9,2 - 11,4 мкм, а наиболее интенсивное излучение получено на длине волны 10,6 мкм. Заселение верхнего лазерного уровня может происходить за счет всех характерных для газовых лазеров способов создания инверсии. Однако наиболее часто используется накачка в газовом разряде. Активная среда газоразрядного лазера

представляет собой смесь углекислого газа, азота и гелия. Заселение верхнего лазерного уровня происходит при прямых электронных ударах, ступенчато - за счет резонансной передачи энергии от колебательно возбужденных молекул азота и при каскадных переходах.

1.5.12. Химические лазеры

В химических лазерах генерация электромагнитного излучения происходит в результате протекания химических реакций. Так при взаимодействии фтора и водорода (дейтерия), активированном нагретым в дуговом разряде азотом, создается инверсная населенность возбужденных молекул HF или DF, обеспечивающая лазерное излучение на длинах волн 2,6 - 3,5 или 3,6 - 5 мкм. В хемолазерах с переносом энергии возбужденные молекулы фтористого водорода или дейтерия передают свою энергию молекулам углекислого газа, и наблюдается лазерное излучение последних на длине волны 10,6 мкм. Известны химические лазеры, работа которых инициируется ударной или взрывной волной, а так же электрическим разрядом.

Фотодиссоционные лазеры так же являются частным случаем химических лазеров. Основным процессом, приводящим к появлению инверсной заселенности в хемолазере является химическая реакция, в результате которой образуются атомы, молекулы или радикалы в возбужденном состоянии. Наиболее известный хемолазер - на фотодиссоциации молекул CF_3I .

1.5.13. 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 сот 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.1.15.

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.

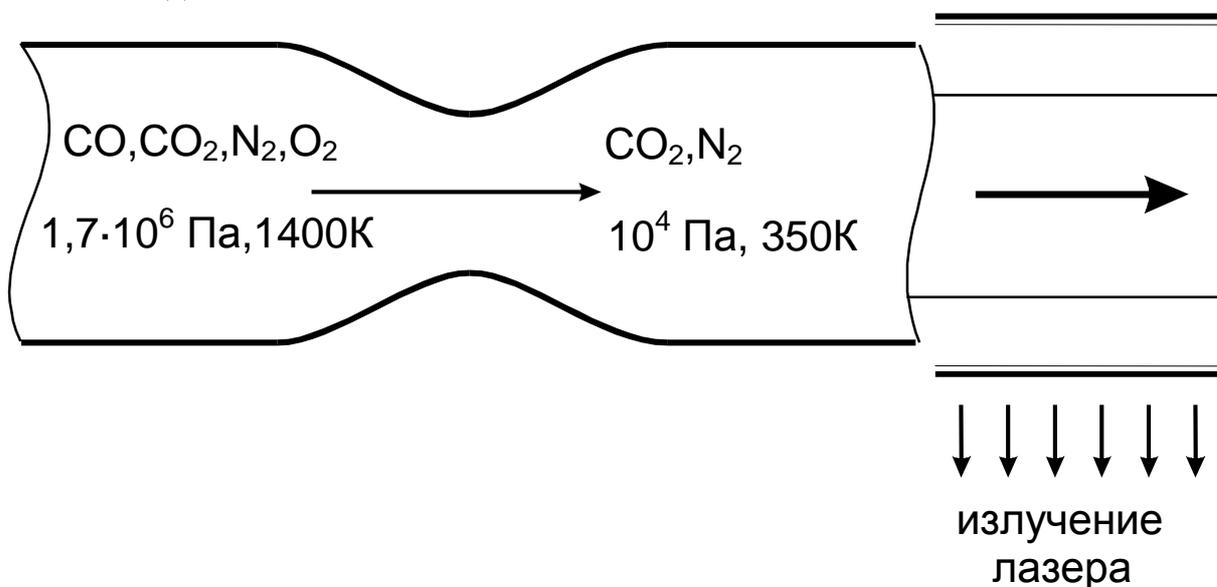


Рис.1.15. Схема газодинамического лазера на молекулах CO_2 .

Возбужденные молекулы азота передают колебательную энергию молекулам углекислого газа. Давление и температура в смесительной камере достигают соответственно 1,7 МПа (17атм) и 1400 К. Скорость истечения смеси газов за соплом 2 составляет 1360 м/с, в результате чего в лазерной камере 3 (область расширения сопла) давление и температура понижаются соответственно до 104 Па (0,1 атм) и 350 К. Вытекающие газы поступают в область генерации 4, 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 3 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 4, где расположен резонатор, состоящий из плоских медных зеркал 5. 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 4 и 5 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 возбуждение молекул азота осуществляется в электрической дуге. КПД таких лазеров достигает 30%, а выходная мощность - до 100 кВт.

1.5.14. 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%.

1.5.15. Полупроводниковые лазеры

P-n-(полупроводниковый)-диод - основной элемент полупроводникового лазера. 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.

Излучателем является узкая часть p-области, прилегающая к p-n-переходу. Конструкция лазерного диода показана на рис.1.16. Зеркалами являются гладкие грани самого полупроводникового кристалла, получаемые обычно скалыванием его краев. Вынужденное излучение происходит параллельно p-n-переходу (рис.1.16). Типичными размерами лазерного кристалла являются (мкм):

длина 100 - 500 ширина 200 - 400 высота 80 - 100 толщина области рекомбинации 1 - 3

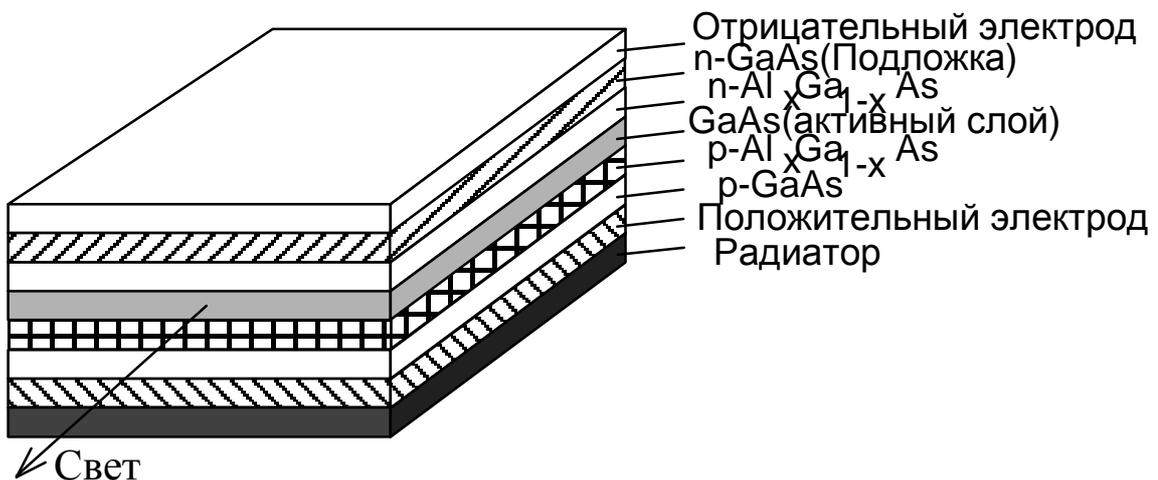


Рис.1.16. Схематическое изображение конструкции полупроводникового (инжекционного) лазера.

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.)

Инжекционные лазеры по сравнению с другими типами лазеров отличаются высоким КПД (до 80%), простотой возбуждения, малыми размерами, низким напряжением накачки, высокой надежностью.

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.

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 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 p-n-перехода, и лазерные диоды реализуются на переходе полупроводник-металл (диоды Шотки).

1.5.16. Жидкостные лазеры

В жидкостных лазерах вынужденное излучение возникает на флуоресцентном переходе в молекулах органического красителя. Концентрация красителя составляет 0,005 - 0,0001 моль/л. лазеров.

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) (рис.1.17).

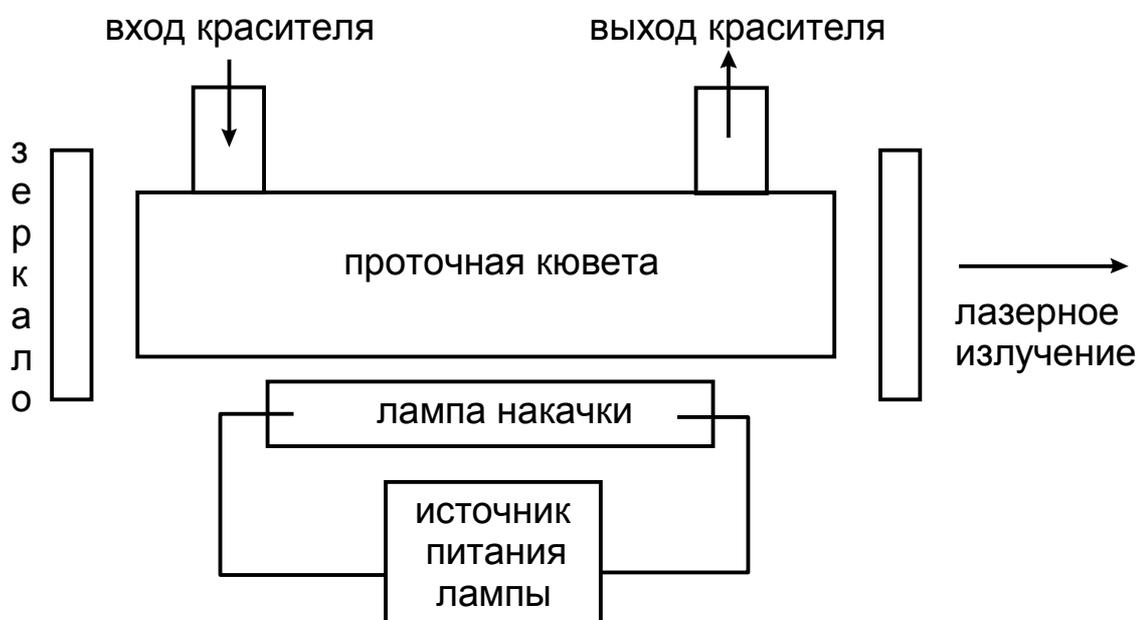


Рис.1.17. Примерная конструкция жидкостного лазера

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.

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 1пс.

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.

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. Укажите функции гелия в гелий-неоновом лазере.

33. Почему лазеры на парах меди могут работать только в импульсном режиме.

34. На каких переходах молекул углекислого газа происходит генерация?

35. Почему активная среда лазера на углекислом газе содержит азот и гелий?

36. Укажите, в смесях каких газов при разряде могут образовываться эксимерные молекулы.

37. Проанализируйте схему потенциальных кривых одной из эксимерных молекул.
38. Сформулируйте принцип работы полупроводникового лазера.
39. С чем связаны трудности создания полупроводниковых лазеров в синей области спектра?
40. В чем состоит основное достоинство жидкостных лазеров?

ЗАДАЧИ 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 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 2·10⁻¹⁹ см². 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 В, если коэффициент спонтанного излучения А составляет а) 10⁸ с⁻¹, б) 10⁶ с⁻¹, в) 10⁴ 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_{np} составляет 2·10⁸ 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 А составляет а) 10⁸ с⁻¹, б) 10⁶ с⁻¹, в) 10⁴ 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. Определить соотношения максимальной и минимальной интенсивности интерференционных полос, соответствующих степени когерентности излучения 1; 0,8; 0,5.

22. Определить 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. ВВЕДЕНИЕ. 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/см²).

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} см²). 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 год - Дж. К. Максвелл сформулировал основные уравнения электродинамики.

1873 год - У. Смит открыл и в 1888 году А. Г. Столетов провел исследования внутреннего и внешнего фотоэффектов.

1917 год - А. Эйнштейн показал возможность создания вынужденного (индуцированного) излучения.

1947 год - Д. Габор создал основы голографии.

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

1960 - 1964 годы - 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. Рассмотрим основные типы излучающих твердотельных приборов.

2.2.1. Светодиоды

Светодиод является полупроводниковым излучающим прибором с одним или несколькими p-n переходами, преобразующий электрическую энергию в энергию некогерентного светового излучения. Излучение возникает в результате рекомбинации инжектированных носителей в одной из областей, прилегающих к p-n 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, η_e - КПД вывода излучения, η_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 p-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.

Некоторые данные по внешней эффективности светодиодов на различных материалах сведены в таблице 2.1. 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.

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.

Таблица 2.1.

Материалы и параметры светодиодов

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 _x As	x = 0.05 - 0.1	ИК	800	12
Ga _{1-x} Al _x As	x = 0.3	красный	675	1.3
In _{1-x} Ga _x P	x = 0.58	красный	659	0.2
	x = 0.6	янтарный	617	0.1
In _{1-x} Ga _x P		желто-	570	0.03
GaN		зеленый	410	
		синий		

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. Весьма важным является вопрос создания излучателей для области 1,1 - 1,3 мкм. Дело в том, что именно при длине волны 1,3 мкм имеют место минимальные потери в световодах.

Основные характеристики светодиодов - вольт-амперные, яркостные и спектральные.

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

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

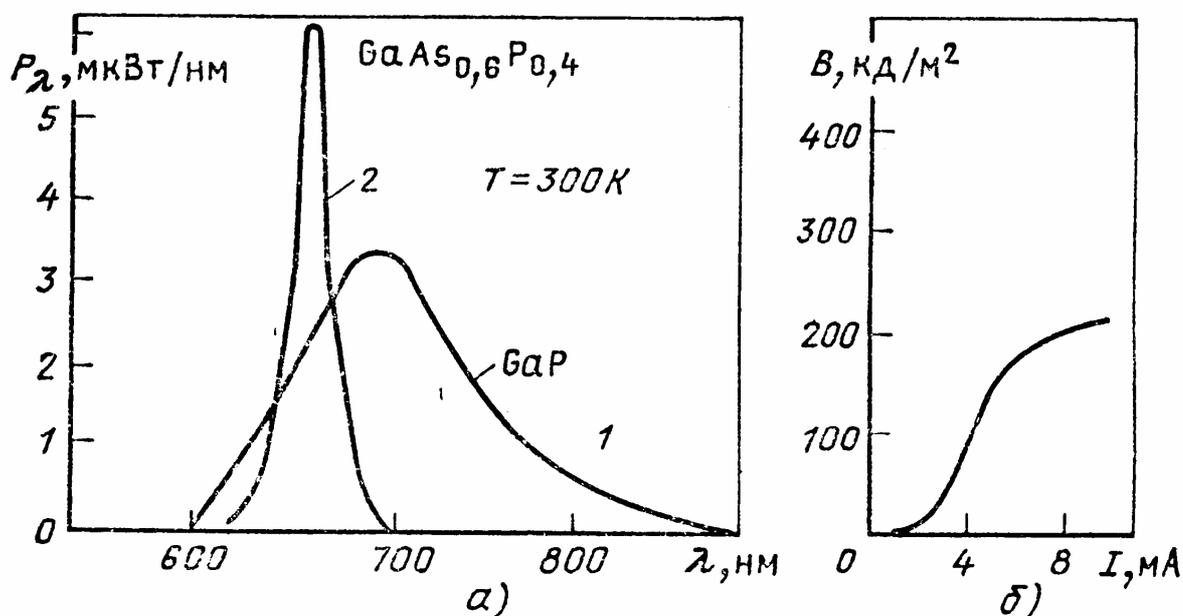


Рис.2.1. Спектральные (а) и световая (б) характеристики светодиодов

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:

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

Светодиоды находят широкое применение в цифровых индикаторах, световых табло, устройствах оптоэлектроники. Принципиально возможно формирование на их основе экрана цветного телевидения.

2.2.2. Полупроводниковые лазеры на p-p переходе

В основе работы лазеров на p-p переходе, так же как и в светодиодах, лежит излучательная рекомбинация инжектированных p-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 p-p перехода, при которой полупроводники вырождены и уровень Ферми оказывается в разрешенных зонах. Схема лазера на p-p переходе (а) и спектр его излучения (б) показаны на рис.2.2.

При малых токах через p-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 .

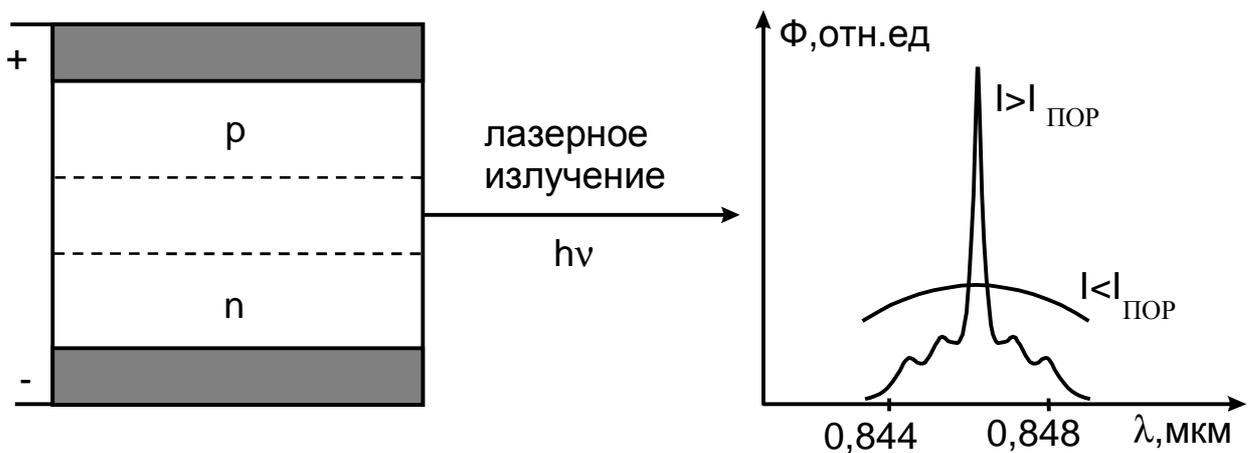


Рис.2.2. Схема (а) и спектральная характеристика (б) лазера на p-p переходе

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 kA/cm^2 . Так, пороговая плотность тока лазера на GaInAsP/InP равна 1 kA/cm^2 при ширине активной области $0,1 - 0,15 \text{ мкм}$. Мощность полупроводниковых лазеров в непрерывном режиме при комнатной температуре обычно составляет единицы - десятки милливатт.

Весьма перспективными могут быть 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 kA/cm^2 , мощность более 200 мВт при квантовом выходе до 13% . Длина волны излучения составляет 417 нм , ширина линии излучения $1,6 \text{ нм}$. Перспективным материалом для лазеров в синей области является карбид кремния, ширина запрещенной зоны в котором составляет $2,9 - 3,3 \text{ эВ}$.

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.

Сопоставление основных типов лазеров показывает, что базовым для оптоэлектроники является инжекционный полупроводниковый лазер. 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.

В применениях, требующих большой импульсной мощности излучения, наилучшие перспективы имеют твердотельные лазеры. Газовые лазеры неизменно остаются вне конкуренции во всех устройствах и системах, где определяющим фактором является высокая монохроматичность излучения.

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, α - коэффициент поглощения.

Зависимость коэффициента поглощения от длины волны падающего излучения называется спектром поглощения. Типичный спектр поглощения полупроводников показан на рис 2.3.

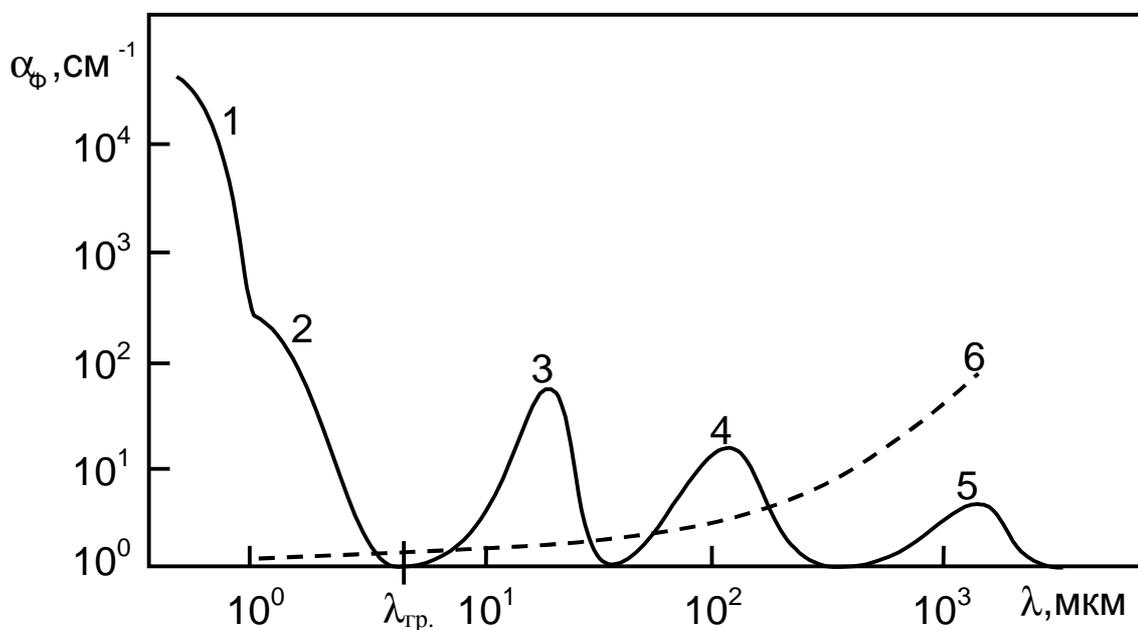


Рис.2.3. Типичный спектр поглощения полупроводника

1 - собственное поглощение в результате прямых переходов; 2 - собственное поглощение при не прямых 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 ΔE - 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 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 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 $10^5 - 10^6$ см⁻¹ для собственного и около 10^3 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.

2.3.3. Фотоэлектрический 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 неравновесные 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:

$$I = I_{дф} - I_{ф} - I_o = 0 \quad (2.5)$$

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

Тогда

$$I_{ф} = I_o(\exp[U_{xx}/\varphi_T] - 1) \quad (2.6)$$

Или

$$U_{xx} = \varphi_T \ln(1 + I_{ф}/I_o) \quad (2.7)$$

В этих уравнениях

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

$I_{ф}$ - фототок,

I_o - тепловой ток через переход

φ_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 (2.4) в ряд дает прямопропорциональную связь между напряжением холостого хода и световым потоком.

При больших световых потоках единицей в уравнении (2.4) можно пренебречь, тогда напряжение холостого хода увеличивается со световым потоком по логарифмическому закону.

Вольт-амперные характеристики освещенного идеализированного n-p перехода приведены на рис.2.4. Как видно из ВАХ, фотоэлектрические приборы с n-p переходом могут работать в двух режимах - фотопентильном (при отсутствии внешнего напряжения происходит генерация фотоЭДС) и фотодиодном (на переход подается обратное напряжение и освещение вызывает увеличение тока).

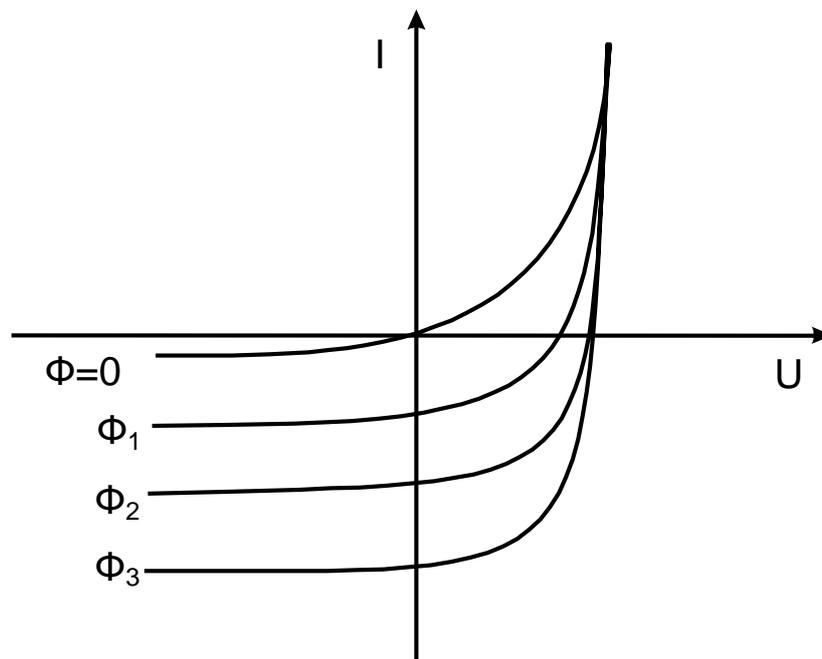


Рис.2.4. Вольт-амперные характеристики идеализированного n-p перехода при различных интенсивностях падающего света.

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 (рис.2.4). 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 $U_{\text{хх}}$, но при малом КПД.

На рис.2.5 приведены расчетные данные по зависимости КПД и выходной мощности от ширины запрещенной зоны в полупроводнике.

Рис.2.5 характеризует участки ВАХ солнечных элементов на основе кремния и арсенида галлия и оптимальные нагрузочные сопротивления для соответствующих элементов.

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.

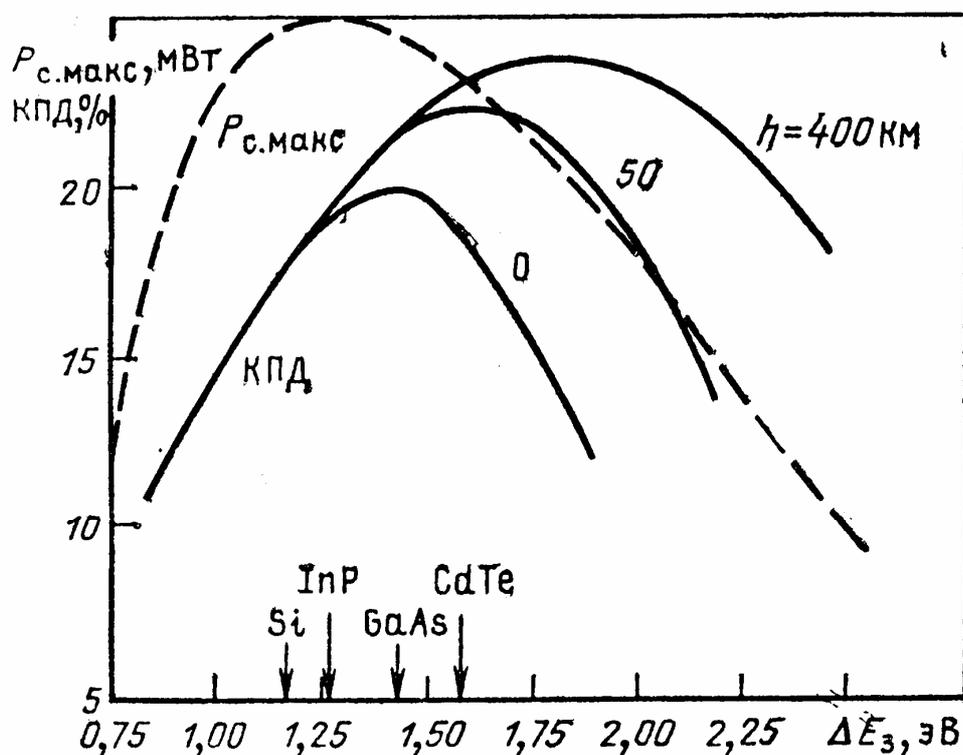


Рис.2.5. Влияние ширины запрещенной зоны на КПД и выходную мощность солнечных элементов на основе кремния и арсенида галлия.

2.3.5. Фотодиоды

Простейший фотодиод представляет собой p-n переход, на который подано обратное напряжение, и ток через структуру является функцией интенсивности света (рис.2.4). 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 p-n 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 p-n 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 p-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⁺-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 p-n типа включается в прямом направлении, при этом проводимость базовой области определяется инжектированными p-n 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 p-p-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 p-p-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 2.6.

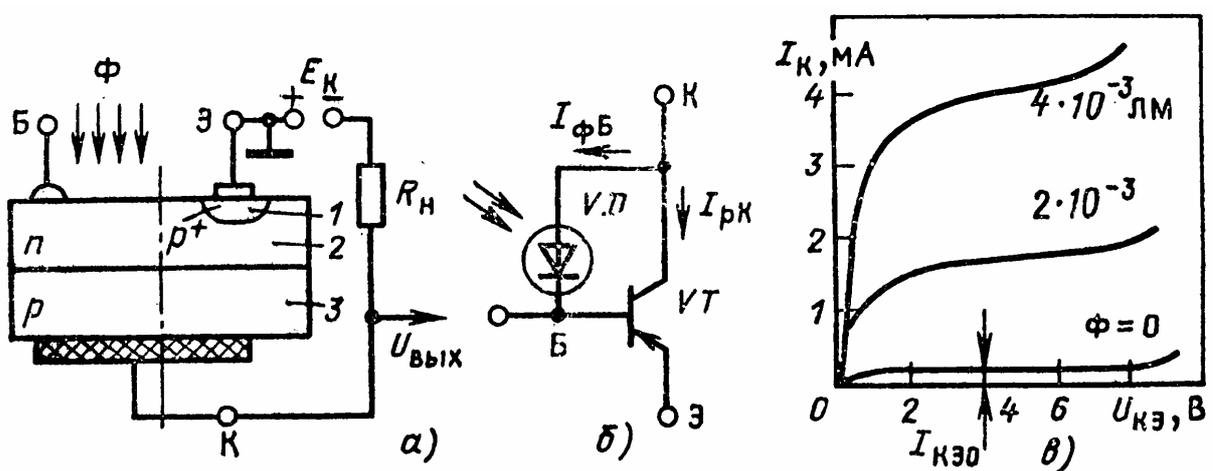


Рис 2.6. Устройство (а), схема (б) и выходные характеристики (в) биполярного фототранзистора

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 О.Э. 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.2.7.

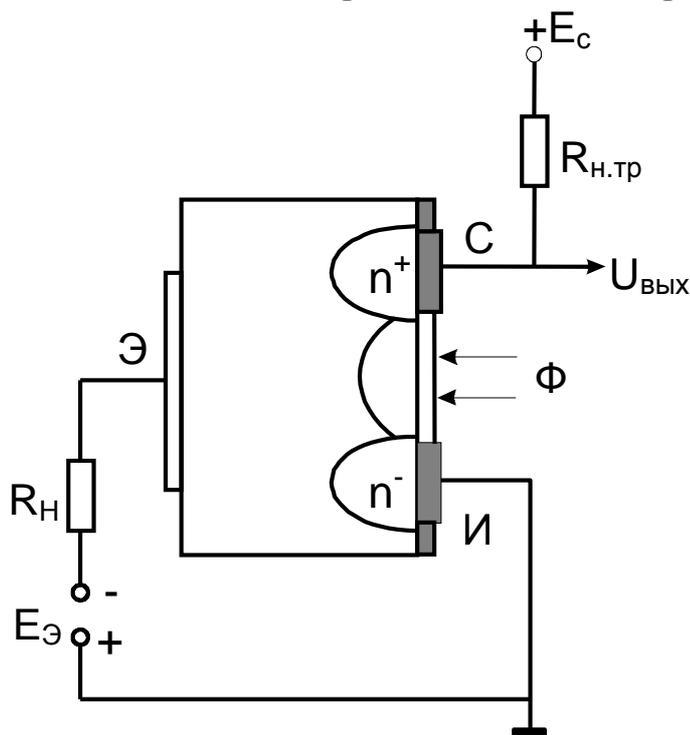


Рис.2.7. МДП-фототранзистор со встроенным затвором

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 2.8.



Рис.2.8. 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:

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

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 взаимноперпендикулярных 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 Поккельса,

n_o - показатель преломления в отсутствие поля,

E - напряженность электрического поля.

Это явление называется линейным электрооптическим эффектом или эффектом Поккельса. 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:

$$\Delta\varphi = 2\pi n^3 r_n E l / \lambda \quad (2.11)$$

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. При использовании других типов модуляторов необходимо преобразование сигнала в модулированный по интенсивности. Модуляция лазерного излучения может быть внешней и внутренней. Внутренняя модуляция в полупроводниковых лазерах осуществляется за счет изменения режима накачки. Она очень проста и эффективна, но приводит к некоторому ухудшению параметров лазерного излучения.

Рассмотрим устройство электрооптического модулятора (Рис.2.9). 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.

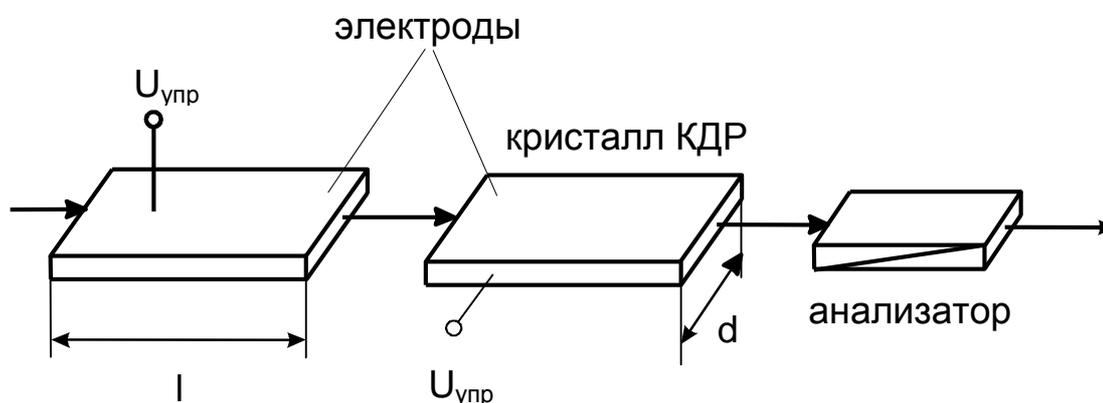


Рис.2.9. Устройство электрооптического модулятора

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:

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

Обычно величина полуволнового напряжения составляет от сотен вольт до нескольких киловольт. График зависимости интенсивности излучения на выходе модулятора от управляющего напряжения показан на рис.2.10.

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.

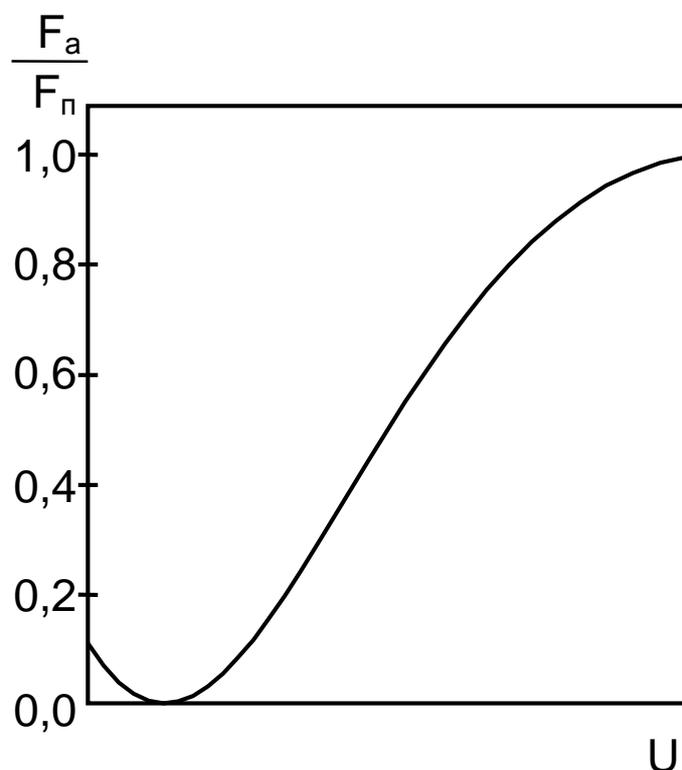


Рис.2.10. Влияние управляющего напряжения на интенсивность излучения на выходе электрооптического модулятора

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.

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.2.11. 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.

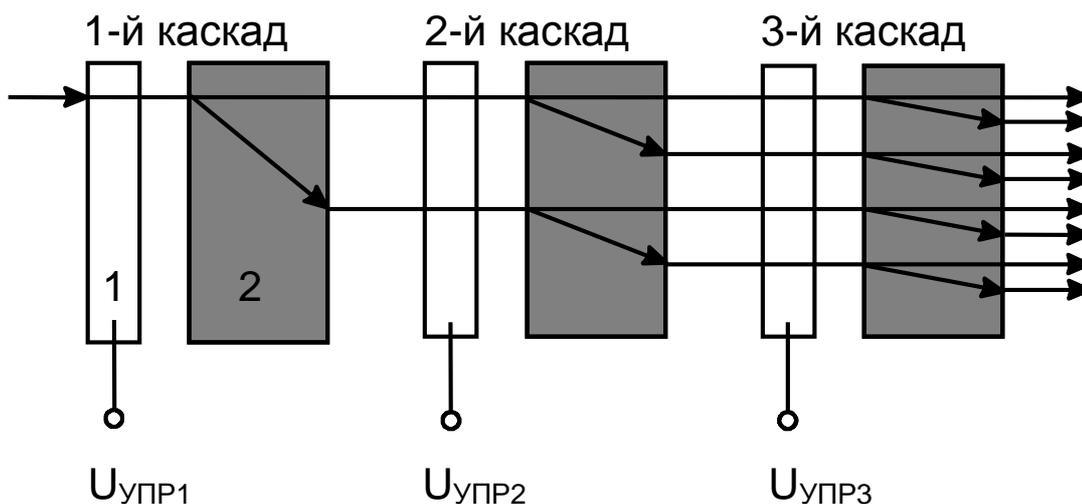


Рис.2.11. Схема электрооптического дефлектора

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

$$N = \varphi D / \lambda, \quad (2.17)$$

где N - число положений луча,

φ - максимальный угол отклонения луча,

λ - 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 появлением 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.2.12.

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

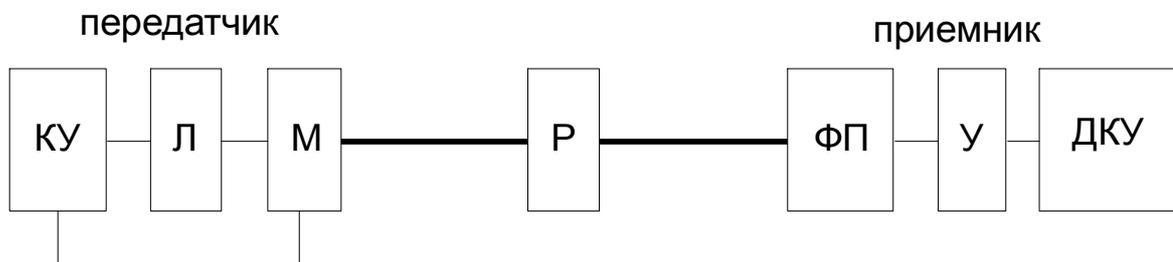


Рис.2.12. Структурная схема волоконно-оптической линии связи.

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. В качестве примера рассмотрим цилиндрический двухслойный световод (рис.2.13).

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

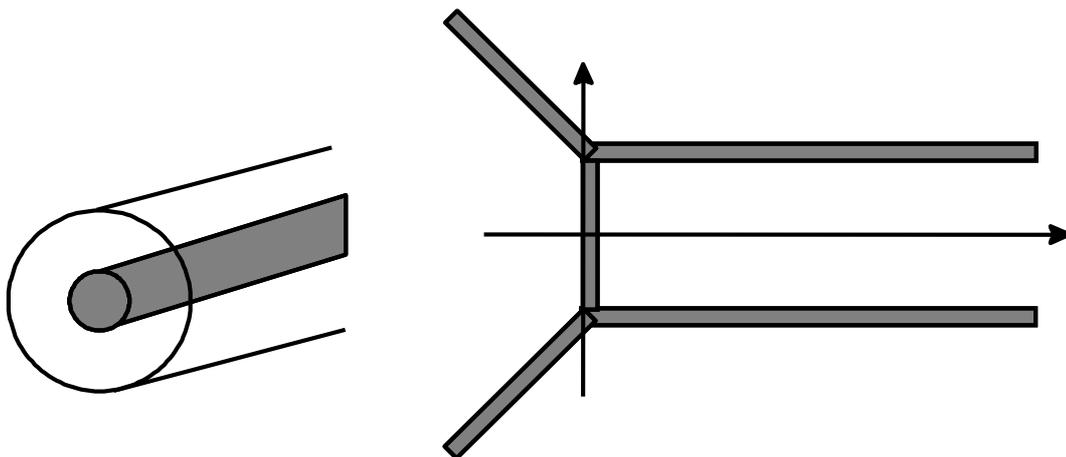


Рис.2.13. Цилиндрический двухслойный световод.

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:

$$A_0 = \sin \varphi_0 = \left(n_1^2 - n_2^2 \right)^{1/2} \quad (2.19)$$

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 :

$$B = \frac{1}{l} 10 \lg \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых}}} \text{ дБ/км} \quad (2.20)$$

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 так же рассеяние, вызванное неоднородностью плотности или состава материала по объему. Последнее и определяет нижний предел потерь в световодах.

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.

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. Переходные потери при этом составляют несколько децибел. Уменьшение потерь достигается при индивидуальном сочленении отдельных волокон. Уменьшение потерь за счет геометрических факторов (конечное расстояние между торцами, перекосы) получается при введении в место соединения капли вязкой иммерсионной жидкости. Общие потери при индивидуальной стыковке могут быть менее 1дБ.

Оптическими элементами ВОЛС являются так же оптические разветвители и 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.2.14.

Широкое применение в практике находят различные способы неразъемного соединения световодов (сваривание, склеивание и др.).

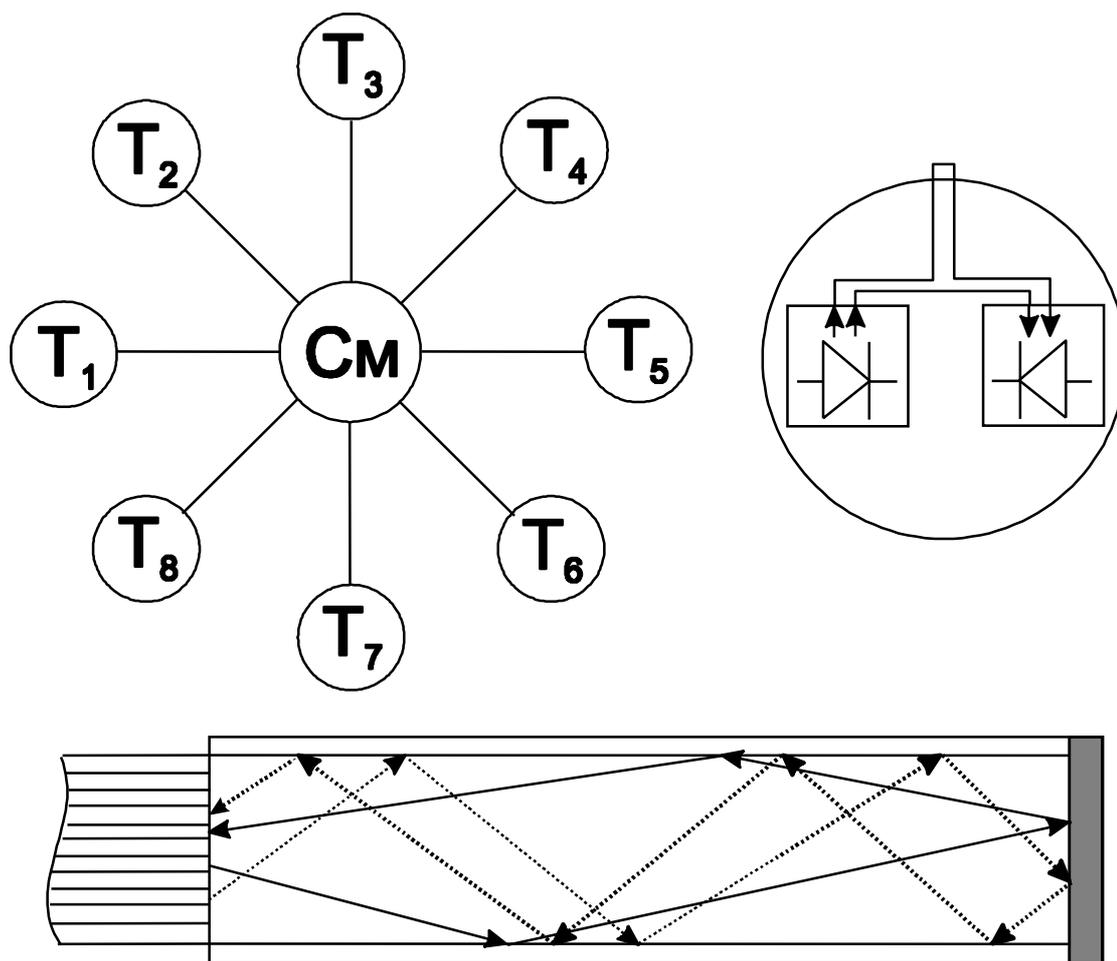


Рис.2.14. Разветвление волоконно-оптических линий связи.

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.2.15.

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.

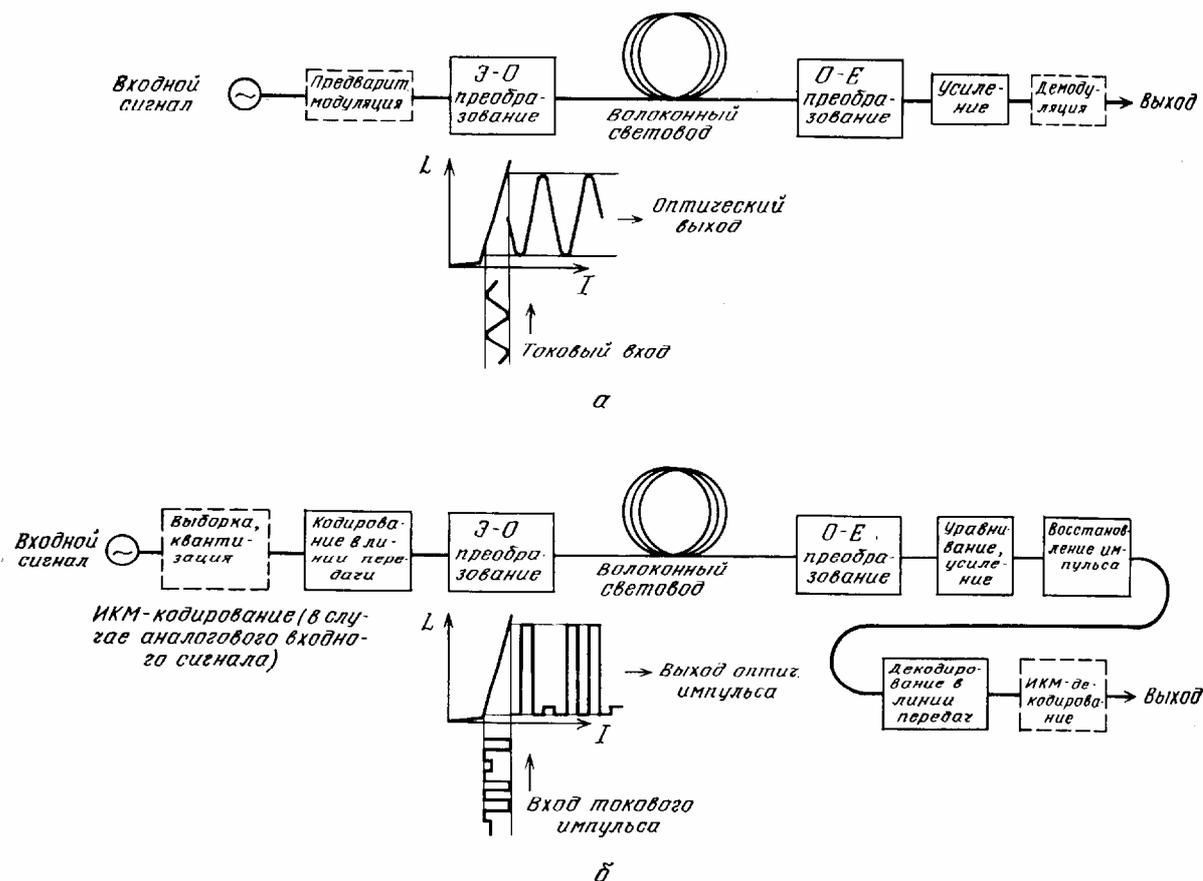


Рис.2.15. Блок-схемы аналоговой (а) и цифровой (б) систем модуляции.

2.6. ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

2.6.1. 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. Голографическое запоминающее устройство

Простейшая схема записи информации голографическим запоминающим устройством представлена на рис.2.16.

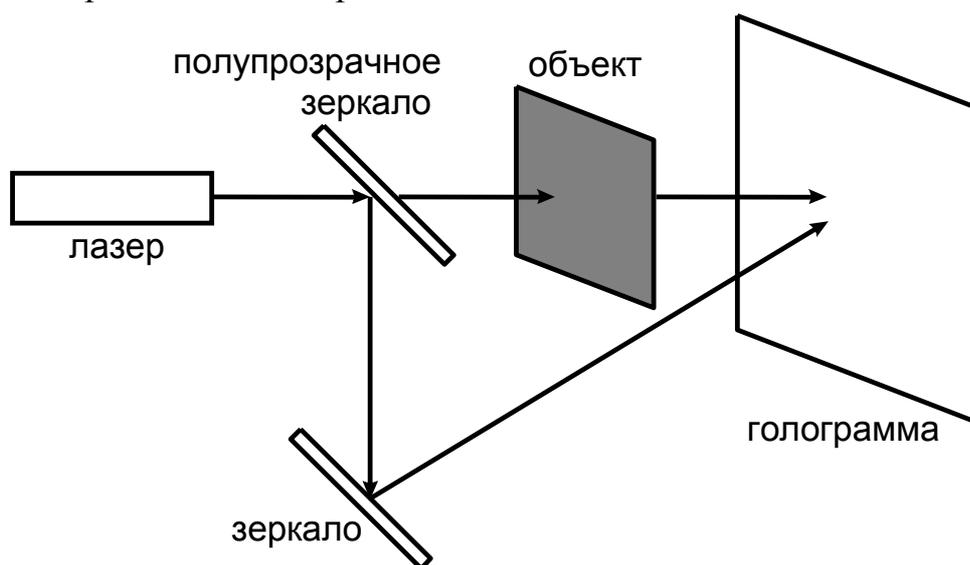


Рисунок 1

Рис.2.16. 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.

2.6.3. Голографические схемы записи и считывания информации

Схема записи (рис.2.17.) содержит лазер 1, дефлектор 2, вспомогательную матрицу голограмм 3, собирающие линзы 4, пространственно-временной модулятор 5 и запоминающую матрицу голограмм 6.

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.2.17).

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.

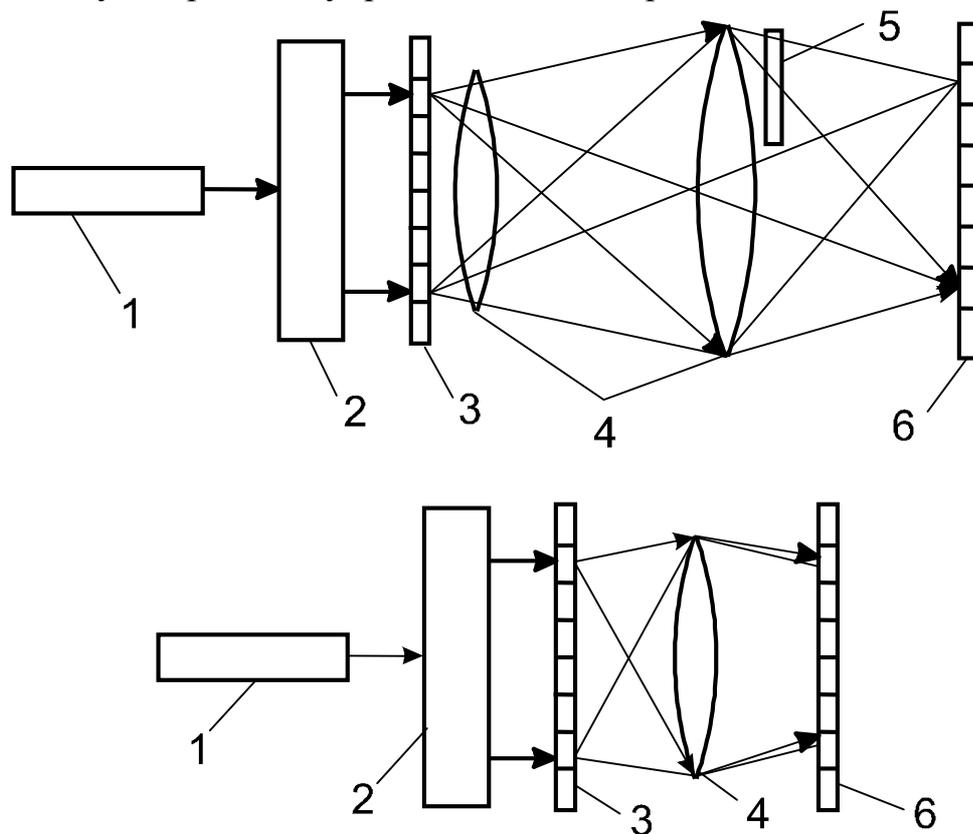


Рис.2.17. Голографическая схема записи и считывания информации

Голографическая схема считывания информации представлена на рис.2.17. 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.2.18. Здесь: 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.

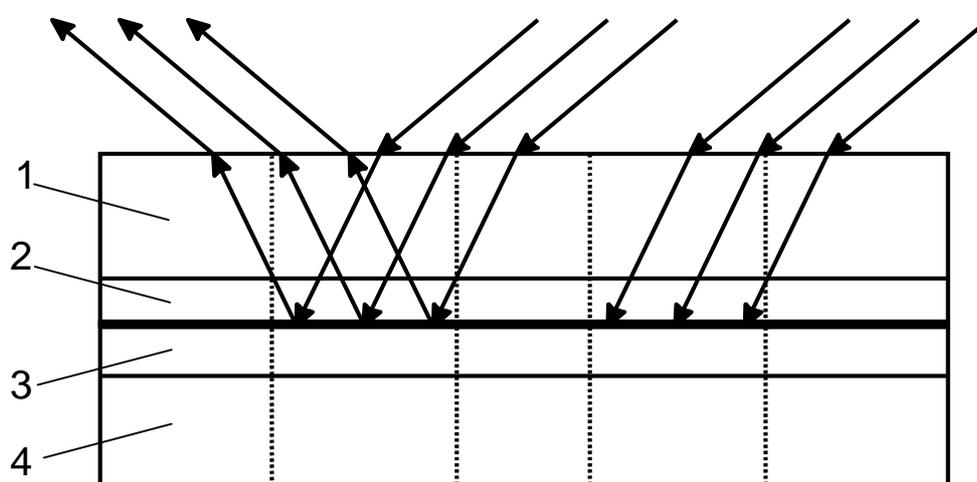


Рис.2.18. Структура голографической "латрицы"

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 падает к ее краям. Это свойство зрения характеризуется кривой видности (рис.2.19).

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/м² (в темноте) до 10^5 кд/м² при яркой внешней засветке. При яркости менее 1 кд/м² 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.

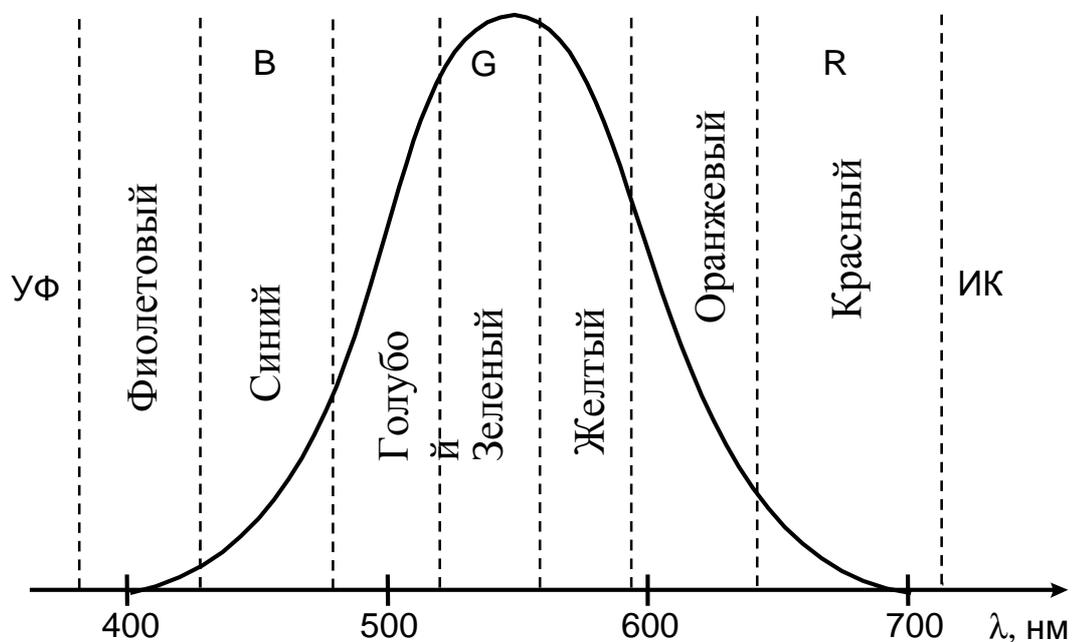


Рис.2.19. Кривая видности глаза

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.2.20).

Значение цветовых индексов источника (координаты x и y) позволяет найти две его важнейшие характеристики: цветовую тональность, определяемую преобладающей длиной волны излучения (λ_F для источника F) и цветовую насыщенность, определяемую чистотой цвета (выраженное в % отношение отрезков $W - F$ и $W - \lambda_F$ на рис.2.20).

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.

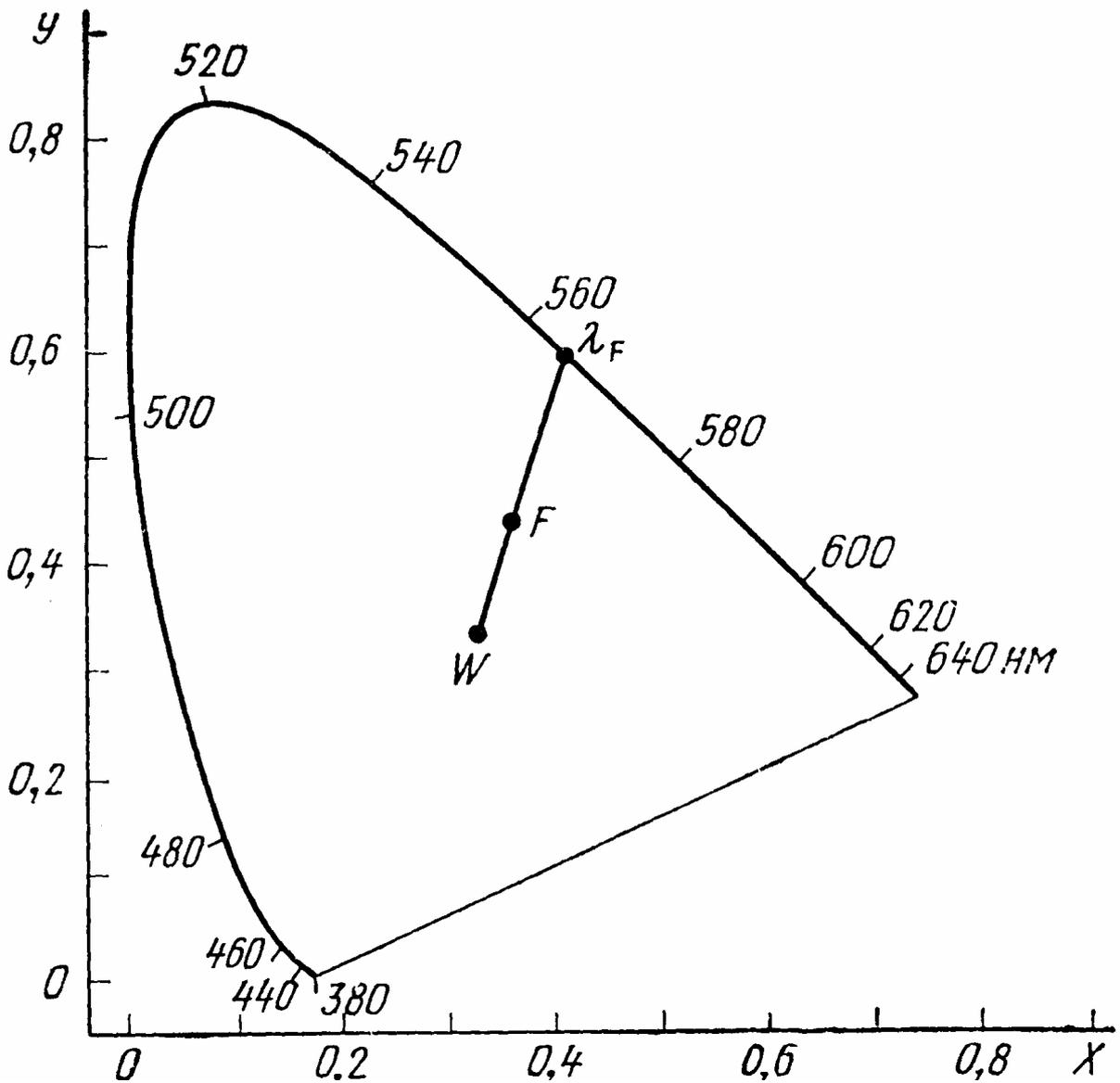


Рис.2.20. Цветовой график МКО

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

- минимальное отношение площади к глубине,
- экономичность,
- быстродействие,
- 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). Это наиболее распространенные и массовые в настоящее время системы плохо сочетаются с конструктивно-технологическими принципами и элементной базой оптоэлектроники из-за больших габаритов, наличия вакуумного объема, высоких электрических напряжений.

2. Тепловое излучение нагретых тел (накальные индикаторы).

3. Излучение газового разряда и люминофоров, возбуждаемых газовым разрядом (газоразрядные индикаторы и индикаторные панели).

4. Возбуждение люминофоров в переменном электрическом поле (электролюминесцентные индикаторы).

5. Инжекционная люминесценция монокристаллических полупроводников с p-n переходами (полупроводниковые светодиоды и лазеры).

6. Возбуждение люминофоров полупроводниковыми излучателями, включая антистоксовый люминофор, нанесенный на ИК-излучатель и обычный люминофор на излучателе сине-фиолетового диапазона.

7. Электролюминесценция тонких поликристаллических полупроводниковых пленок в постоянном и переменном электрических полях (тонкопленочные электролюминесцентные индикаторы).

8. Низковольтная катодолюминесценция (вакуумные люминесцентные индикаторы).

9. Низковольтная катодолюминесценция на основе автоэлектронной эмиссии.

10. Электрооптические эффекты в жидких кристаллах (жидкокристаллические индикаторы).

11. Изменение окраски вещества при пропускании через него электрического тока (электрохромные индикаторы).

12. Электрооптические эффекты в сегнетоэлектриках с двойным лучепреломлением (сегнетоэлектрические индикаторы).

13. Перемещение заряженных коллоидных частиц под действием электрического поля (электрофоретические индикаторы).

14. 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.

Из активных индикаторов, как уже отмечалось выше, в настоящее время наиболее широкое распространение находят электронно-лучевые приборы. Физика их работы подробно рассмотрена в учебном пособии "Вакуумная и плазменная электроника". Широко используемые для отображения информации газоразрядные индикаторные панели описаны в разделе "Вакуумная и плазменная электроника". Полупроводниковые системы для отображения информации рассмотрены ранее. Поэтому в данной главе мы остановимся подробнее только на жидкокристаллических и электролюминесцентных индикаторах, которые наряду с указанными выше, часто применяются в системах отображения информации.

2.7.3. 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.2.21). 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. 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.

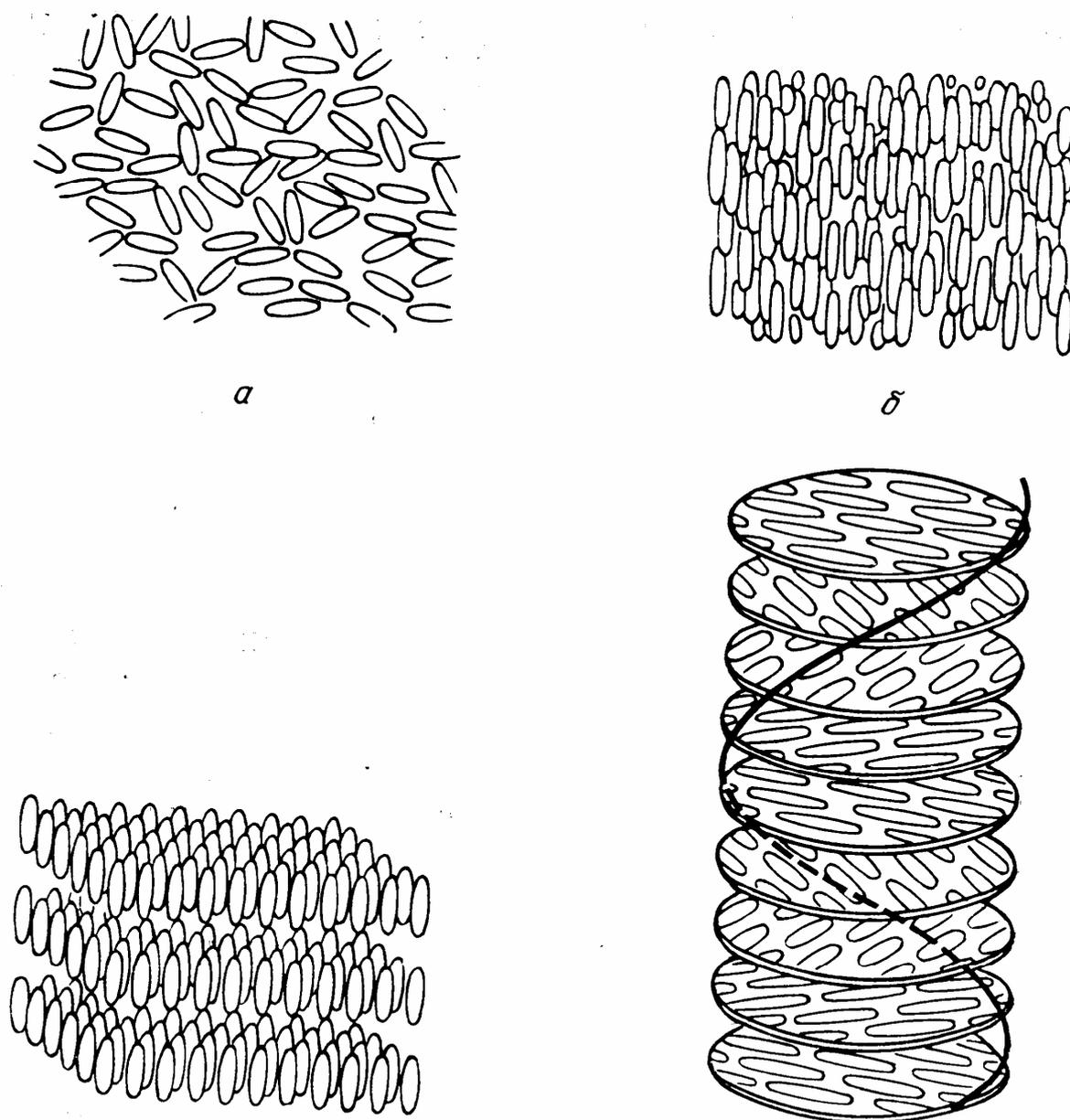


Рис. 2.21. Структура жидких кристаллов

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 мкА/см², 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 отсутствии его свет не проходит. В случае перпендикулярного расположения плоскостей поляризации поляризатора и анализатора получается обратная картина (рис.2.22).

Рабочее напряжение на такой ячейке обычно не превышает 1 В. Твист - эффект так же 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.

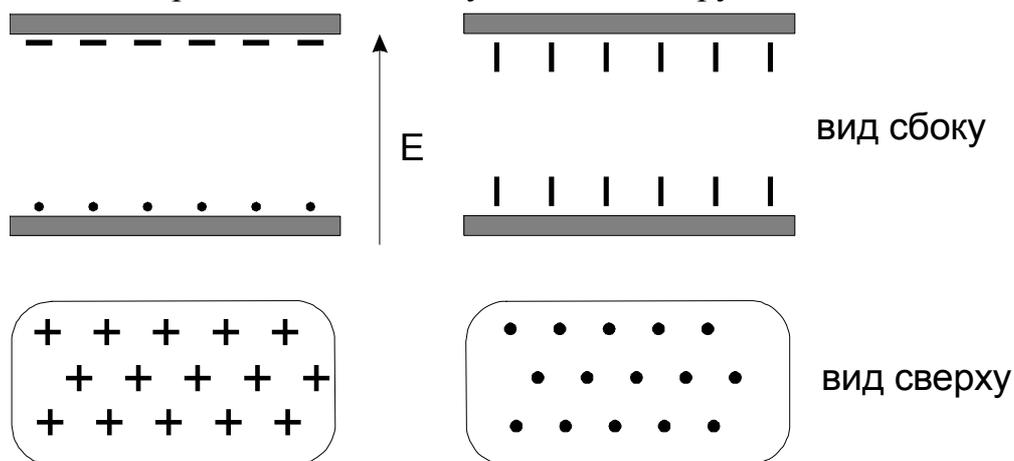


Рис.2.22. Твист-эффект в жидких кристаллах

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".

2.7.4. 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.2.23 приведена электрическая характеристика такой ячейки.

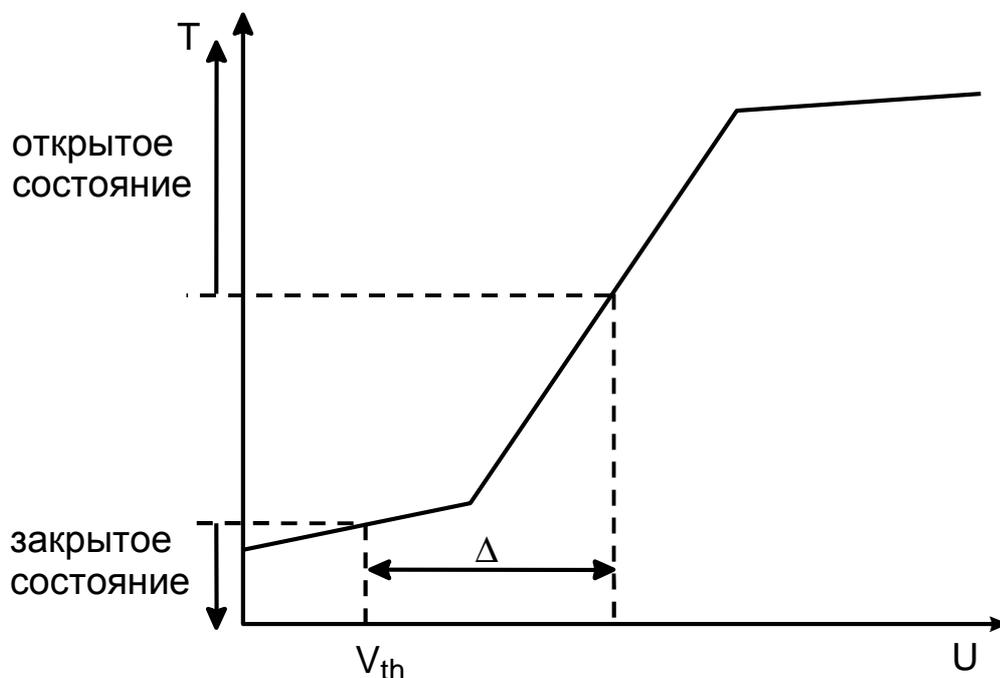


Рис.2.23. Электрическая характеристика ЖКИ ячейки

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.2.24 приведен пример активного матричного индикатора на тонкопленочных транзисторах из аморфного кремния, которые образуют на стеклянной подложке коммутационную матрицу адресации.

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.

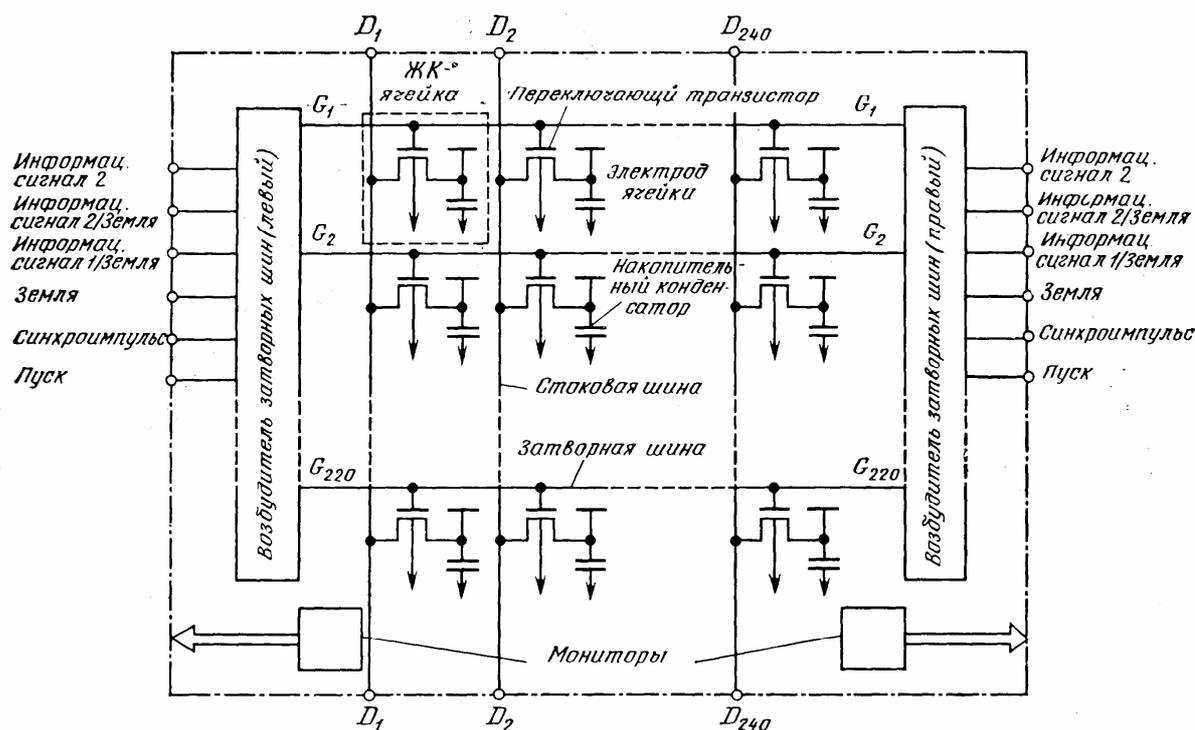


Рис.2.24. Схема активного матричного индикатора

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.2.25 показана возможность воспроизведения цветного телевизионного изображения на основе "твист-эффекта" в нематическом жидком кристалле.

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.

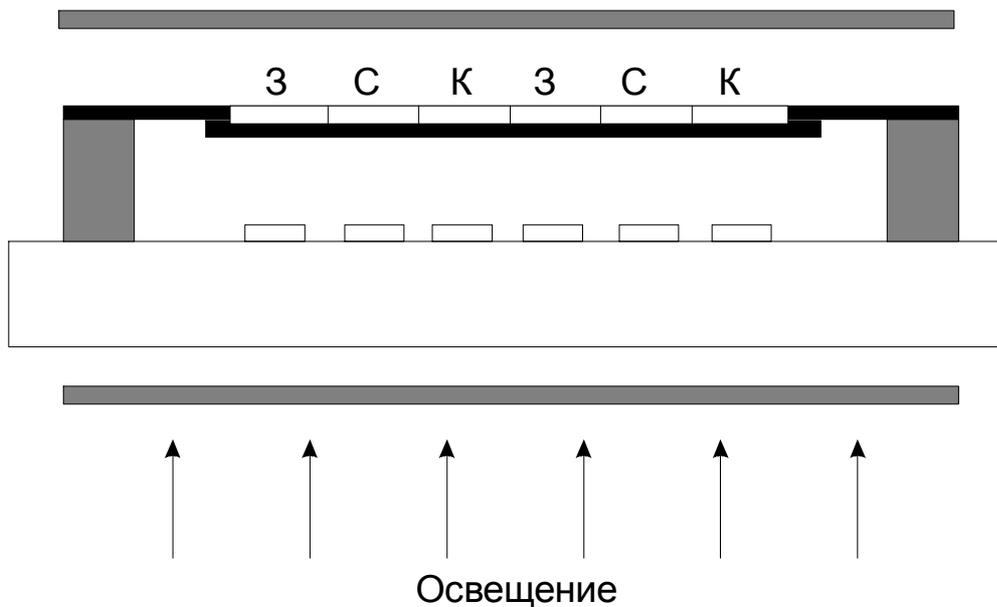


Рис.2.25. Принцип воспроизведения цветного изображения.

Серийные жидкокристаллические панели на стандартных нематических жидких кристаллах с твист-эффектом имеют 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 0 323 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 60 - 180 градусов, контраст - до 1:5 - 1:10. 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.

Ведутся активные работы по созданию ЖК панелей 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. Согласно прогнозу, жидкокристаллические панели с активными матрицами будут основными выпускаемыми приборами.

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 достижений в области создания цветных жидкокристаллических экранов приведем 20,1-дюймовый ЖК-монитор IBM ThinkVision L200p.

Японское подразделение американской компании [IBM](#) представило новый 20,1-дюймовый жидкокристаллический монитор ThinkVision L200p. Новый монитор ThinkVision L200p работает с разрешением UXGA (1600 x 1200 пикселей). Видимая область изображения соответствует видимой области стандартного 21-дюймового ЭЛТ-монитора. В устройстве используется матрица с максимальной контрастностью 300:1, яркостью 250 кд/м², шаг пикселя - 0,255 мм, время отклика - 30 мс. Угол обзора как по горизонтали, так и по вертикали составляет 170 градусов. Дисплей имеет встроенную систему автоматической настройки и подавления шумов изображения. Монитор снабжен аналоговым видеоинтерфейсом D-Sub и цифровым видеоинтерфейсом DVI-I. Габаритные размеры монитора - 467,5 x 259 x 471,7 мм, вес - 8,35 кг.



Оптрон с управляемым оптическим каналом на жидком кристалле.

Оптрон с управляемым оптическим каналом на жидком кристалле отличается от обычной оптопары наличием еще одного входа, по которому осуществляется управление оптическими показателями среды, связывающей источник и приемник излучения. Простейшая жидкокристаллическая ячейка представляет собой два прозрачных электрода с помещенной между ними пленкой жидкого кристалла и работает на эффекте динамического рассеяния. Для использования полевых эффектов слой жидкого кристалла помещают между двумя поляроидами.

2.8. 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. 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 серийных ЭЛ панелей: информационная емкость (максимальная) 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/кв.м,
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.

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 Шотки.
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.

Что представляют собой жидкие кристаллы, и каковы их возможности в области отображения информации.

42. Рассмотрите принцип работы жидкокристаллических индикаторных приборов.

43. Что представляет собой твист-эффект.

44. Как можно получить цветное изображение на жидкокристаллических индикаторных панелях.

ЗАДАЧИ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ И САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Интегральная чувствительность фоторезистора $K_0 = 5000$ мкА/лм при напряжении $U = 10$ В. Определить его удельную чувствительность K_0' . Ответ: $K_0' = 500$ мкА/лм.В.

2. В каких пределах изменится фототок при изменении светового потока от $\Phi_1 = 0.01$ лм, до $\Phi_2 = 0.015$ лм. Напряжение на фоторезисторе $U = 100$ В. Удельная чувствительность $K_0 = 2500$ мкА/лм.В. Ответ: От $I_{\Phi 1} = 2.5$ мА до $I_{\Phi 2} = 3.75$ мА.

3. При напряжении на фоторезисторе $U = 80$ В протекает темновой ток $I_T = 10$ А. Определить световое сопротивление R_c , если отношение темнового сопротивления к световому $R_T/R_c = 10000$. Ответ: $R_c = 80000$ Ом.

4. Определить начальное статическое сопротивление германиевого фотодиода R , если темновой ток $I_T = 25$ мкА. Ответ: $R = 40000$ Ом.

5. Определить полный ток фотодиода, если на него падает световой поток $\Phi = 0.015$ лм, интегральная чувствительность $K_0 = 10$ мА/лм, а темновой ток $I_T = 15$ мкА. Ответ: $I = 0.165$ мА.

6. Определите глубину, на которой мощность светового потока уменьшится в 2 раза. Коэффициент отражения $K = 0.3$, коэффициент $\alpha = 2000$ м⁻¹. Ответ: $x = 0.168$ мм.

7. Определите коэффициент отражения, если для слоя образца, толщиной $x = 0.2$ мм мощность светового излучения падает в 10 раз. $a = 30$ м⁻¹. Ответ: $R = 0.9$.

8. Рассчитайте изменение показателя преломления в ячейке Поггеля (кристалл KN_2PO_4 толщиной 2 мм) при напряжениях 100, 1000 и 10000 В.

9. Для условий предыдущей задачи рассчитайте угол сдвига фаз излучения гелий-неонового лазера (632,8 нм).

10. Рассчитайте изменение показателя преломления в ячейке Керра (кристалл KTaO_3 толщиной 2 мм) при напряжениях 100, 1000, 10000 В.

11. Для условий предыдущей задачи определите угол сдвига фаз между обычным и необычным лучами.

12. Рассчитайте полуволновое напряжение электрооптического модулятора на эффекте Поггеля (кристалл KN_2PO_4 толщиной 2 мм) для излучения длиной волны 1,3 мкм.

13. Покажите, что при управляющем напряжении, равном полуволновому, достигается максимальная глубина модуляции.

14. Постройте и проанализируйте зависимость отношения входного и выходного сигналов от управляющего напряжения при полуволновом напряжении 1000 В.

15. Проведите анализ зависимости числовой апертуры световода от величины показателя преломления внутренней жилы и оболочки, используя конкретные справочные данные.

16. Во сколько раз ослабнет сигнал в световоде длиной 500 м, если коэффициент затухания составляет 2 дБ/км.

17. 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. Физические основы квантовой электроники и оптоэлектроники.- М.:Высш.шк., 1983. - 304 с.
2. Окоси Т. Оптическая электроника и связь.- М.:Мир,1988. -96 с.
3. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника.- 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. -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. Светцов В.И. Вакуумная и плазменная электроника. Учеб. пособие. Иван. гос. хим.-технол. ун-т.- Иваново, 2003. -172 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 1. ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ.....	4
1.1. ВВЕДЕНИЕ. ЭТАПЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ	6
1.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ.....	8
1.2.1. Форма и ширина спектральной линии.....	12
1.3. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ЛАЗЕРОВ.....	16
1.3.1. Рабочее вещество	17
1.3.2. Создание инверсии.....	17
1.3.3. Условия создания инверсной населенности.....	18
1.3.4. Двухуровневая система.....	18
1.3.5. Трехуровневые системы	20
1.3.6. Четырехуровневая система	22
1.3.7. Оптические резонаторы.....	23
1.3.8. Условия самовозбуждения и насыщения усиления	27
1.3.9. Импульсная генерация, модуляция добротности и синхронизация мод	29
1.4. СВОЙСТВА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	32
1.4.1. Монохроматичность	32
1.4.2. Когерентность.....	34
1.4.3. Поляризация излучения.....	35
1.4.4. Направленность и возможность фокусирования излучения	36
1.4.5. Яркость и мощность излучения	37
1.5. ТИПЫ ЛАЗЕРОВ	38
1.5.1. Твердотельные лазеры.....	38
1.5.2. Рубиновый лазер.....	40
1.5.3. Неодимовый стеклянный лазер	40
1.5.4. Nd – ИАГ – лазеры	40
1.5.5. Газовые лазеры	41
1.5.6. Атомные лазеры	43
1.5.7. Лазеры на парах металлов	43
1.5.8. Ионные лазеры.....	44
1.5.9. Молекулярные лазеры	44
1.5.10. Эксимерные лазеры.....	45
1.5.11. Газовые лазеры в инфракрасной области спектра.....	47
1.5.12. Химические лазеры	48
1.5.13. Газодинамические лазеры	48
1.5.14. Электроионизационные лазеры.....	50
1.5.15. Полупроводниковые лазеры	51
1.5.16. Жидкостные лазеры	52
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	54

ЗАДАЧИ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ И САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	56
ГЛАВА 2. ОСНОВЫ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ.....	59
2.1. ВВЕДЕНИЕ. ЭТАПЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ	59
2.2. ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ.....	61
2.2.1. Светодиоды	62
2.2.2. Полупроводниковые лазеры на p-n переходе	65
2.3. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ.....	67
2.3.1. Поглощение оптического излучения полупроводниками	67
2.3.2. Фоторезистивный эффект и приборы на его основе	69
2.3.3. Фотоэлектрический эффект в p-n-переходе	70
2.3.4. Фотоэлектронные приборы в вентильном режиме	72
2.3.5. Фотодиоды	73
2.3.6. Фототранзисторы и фототиристоры	75
2.3.7. Оптоэлектронные пары.....	77
2.4. МОДУЛЯЦИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	78
2.4.1. Физические основы модуляции лазерного излучения	79
2.4.2. Оптические модуляторы.....	80
2.5. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ (ВОЛС).....	84
2.5.1. Элементная база ВОЛС.....	85
2.5.2. Классификация ВОЛС	90
2.6. ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ.....	91
2.6.1. Принцип голографии	91
2.6.2. Голографическое запоминающее устройство	92
2.6.3. Голографические схемы записи и считывания информации	93
2.7. СИСТЕМЫ ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ.....	95
2.7.1. Особенности зрительного восприятия информации	95
2.7.2. Физические эффекты, используемые для отображения информации	99
2.7.3. Жидкокристаллические индикаторы	100
2.7.4. Жидкокристаллические индикаторные панели	106
2.8. ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ИНДИКАТОРЫ.....	112
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	113
ЗАДАЧИ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ И САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	116
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	117

Светцов Владимир Иванович

ОПТИЧЕСКАЯ И КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие

Техн. редактор Г.В. Куликова

Подписано в печать 23.04.04. Формат 60x84¹/₁₆. Бумага писчая. Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,74. Уч.-изд. л. 7,48. Тираж 100 экз. Заказ Ивановский государственный химико-технологический университет. 153000, г. Иваново, просп. Ф.Энгельса, 7.

Типография ГОУСПО «Ивановский энергетический колледж». 153025, г. Иваново, ул. Ермака, 41.