

УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

М.К.САМОХВАЛОВ

ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Учебное пособие

Ульяновск 2002

Рассматриваются основные оптоэлектронные элементы и устройства: источники и приемники оптического излучения, оптроны и оптоэлектронные микросхемы, индикаторные устройства, волоконно-оптические системы. Изложены физические основы работы, конструкции и технологии изготовления, основные параметры и области применения оптоэлектронных приборов.

Для студентов и инженерно-технических работников, занимающихся проектированием, производством и применением оптоэлектронных устройств.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение
Сведения из фотометрии
Свойства и характеристики оптического излучения
Источники излучения
Приемники излучения
Оптроны
Индикаторы
Основы волоконной оптики
Заключение
Список литературы

ВВЕДЕНИЕ

Электроника – наука о взаимодействии электронов с электромагнитными полями и о методах создания электронных приборов и устройств, в которых это взаимодействие используется для преобразования электромагнитной энергии, в основном для передачи, обработки и хранения информации.

Оптика – раздел физики, в котором изучается природа оптического излучения, его распространение и явления, наблюдаемые при взаимодействии света и вещества.

Оптоэлектроника – направление электроники, охватывающее вопросы использования оптических и электрических методов обработки, хранения и передачи информации. Оптоэлектроника представляет собой этап развития радиоэлектроники и вычислительной техники, отличительной чертой которого является использование для обработки информации оптического излучения.

К оптическому излучению относится электромагнитное излучение в видимом диапазоне (с длиной волны 0,4 - 0,8 мкм), инфракрасном (0,8 - 10^3 мкм) и ультрафиолетовом (10^{-3} - 0,4 мкм).

К основным элементам оптоэлектронных устройств относятся источники излучения (некогерентного или когерентного), оптические среды и приемники излучения. Эти элементы в разных устройствах применяются как в виде различных комбинаций, так и в виде автономных устройств и узлов с самостоятельными частными задачами.

Оптоэлектроника отличается от вакуумной и полупроводниковой электроники наличием в цепи сигнала оптического звена (оптической связи). Поэтому достоинства оптоэлектроники определяются, в первую очередь, преимуществами оптической связи по сравнению с электрической, а так же теми возможностями, которые открываются в результате использования разнообразных физических явлений, обусловленных взаимодействием излучения с веществом.

Оптоэлектроника синтезирует достижения ряда областей науки и техники: полупроводниковой электроники, квантовой электроники, физики фотоэлектронных приборов, электрооптики, нелинейной оптики, волоконной оптики, голографии, ИК техники и светотехники.

Принципиальные достоинства оптоэлектронных приборов и устройств определяется следующими основными особенностями:

1. Частота электромагнитных колебаний в оптическом диапазоне много больше, чем в радиодиапазоне, а именно 10^{13} - 10^{15} Гц, что обуславливает высокую скорость передачи информации и высокую информационную емкость оптического канала связи. Для передачи обычного телевизионного сигнала требуется полоса частот $\Delta\nu \geq 8$ МГц. В метровом диапазоне при значении несущей частоты $\nu_0 \leq 300$ МГц, можно передать около десятка ТВ программ. В оптическом диапазоне при том же соотношении $\Delta\nu/\nu_0$ их число возрастает в миллион раз.
2. Оптическое излучение имеет малую длину волны (≤ 1 мкм). Следствием этого является: высокая плотность значения информации в оптических ПЗУ

($\sim 10^8$ бит/см²); высокая концентрация оптического излучения в пространстве, так как минимальный объем, в котором может быть сфокусировано электромагнитное излучение составляет $\sim \lambda^3$. По этой причине световоды могут быть на несколько порядков меньше волноводов СВЧ. Угловая расходимость луча $\sim \lambda$, для оптического диапазона нетрудно сформировать узкую диаграмму направленности с угловым расхождением $\sim 1'$. И если в СВЧ ($\lambda = 1$ м) для этого необходима антенна диаметром – 100 м, то в оптическом - сферическое зеркало или линза меньших размеров.

3. Возможность двойной – временной и пространственной модуляции светового луча, что позволяет проводить параллельную обработку информации и получать объемное голографическое изображение.

4 Передача информации осуществляется фотонами – электрически нейтральными частицами, вследствие чего реализуется: А) Идеальная гальваническая развязка входа выхода. Б) Однонаправленность потока информации и отсутствие обратной связи. В) Невосприимчивость оптических каналов к воздействию электромагнитных полей, т.е. помехозащищенность, исключение наводок и паразитных связей. Г) Многоканальность связи. Д) Малое затухание сигналов.

5. Возможность непосредственного оперирования со зрительно воспринимаемыми образами, восприятия на входе и визуализации на выходе.

История оптоэлектроники опирается на ряд фундаментальных физических открытий в области генерации, приема и преобразования светового излучения. К основным вехам в предыстории и развитии оптоэлектроники можно отнести следующие:

1864 – Дж. Максвелл получил основные уравнения электродинамики, позволивших успешно объяснить совокупность опытных данных по оптике – явлениям дифракции, интерференции, рефракции и др., полученных ранее Х.Гюйгенсом, И.Ньютоном, О.Френелем, М.Фарадеем и др.

1873 – У.Смит экспериментально обнаружил явление фотопроводимости (внутренний фотоэффект).

1875 – Керр обнаружил электрооптический эффект.

1888 – А.Г.Столетов получил полное описание внешнего фотоэффекта, Уль-янин обнаружил ЭДС в Se при облучении.

1905 – А.Эйнштейн предложил квантовую теорию фотоэффекта.

1905 – Гертель и Эльстед создали фотоэлемент.

1917 – А.Эйнштейн теоретически предсказал возможность получения вынужденного (индуцированного) излучения.

1917 – Начато промышленное производство фотоприемников на основе TaS.

1922 - О. Лосев обнаружил свечение в контакте металл – SiC (инжекционную электролюминесценцию).

1936 – Ж.Дестрио обнаружил свечение в кристалле ZnS по действием электрического поля (предпробойную электролюминесценцию).

1940 – В. А. Фабрикант сформулировал условия создания отрицательного поглощения (усиления излучения).

1947 - Д.Габор обосновал основные принципы голографии.

Начало 50-х. Созданы фотодиоды и фототранзисторы на р-п переходах

1954 – А.М.Прохоров, Н.Г.Басов и Ч.Таунс (США) создали молекулярный генератор на аммиаке (мазер).

1955 – Лебнер предложил объединить источники и приемники оптического излучения в одном корпусе (оптрон). Им же было предложено название - оптоэлектроника.

1956 – Открыта инжекционная электролюминесценция в р-п переходах на арсениде галлия.

1960 – Создан твердотельный лазер на рубине.

1961 – Создан газовый гелий-неоновый лазер.

1962 – Н.Г.Басовым предсказана возможность создания полупроводникового лазера.

1963 – И.Холлом (США) реализован арсенидгаллиевый лазер.

1962-1963 – Записаны лазерные голограммы на поверхности (Э.Лейт и Ю.Упатниекс) и в объеме вещества (Ю.Н.Денисюк).

1962 – Созданы инфракрасные излучающие диоды на основе GaAs.

1964 – Созданы светодиоды на GaP, излучающие в видимом диапазоне (красные, зеленые).

1963-1967 – Ж. И. Алферов с сотрудниками создали полупроводниковые лазеры на полупроводниковых гетеропереходах.

1965-1967 – Началось промышленное производство оптронов.

1966-1967 – Получены первые образцы низковольтных катодолуминесцентных индикаторов.

1966-1968 – Начался выпуск светодиодных и жидкокристаллических индикаторов.

1969 г – Созданы многоэлементные матричные фотоприемники (ПЗС).

1966 – Као, Хокхем (Англия) показали возможность малого поглощения оптического излучения в стекле.

1970 – Капрон, "Корнинг глас компани", (США) начали выпуск промышленных световодов с малым поглощением - 20 ДБ/км.

1974 – Иногучи (Шарп) создан первый тонкопленочный электролюминесцентный экран.

1978 – Показана возможность осуществления волоконно-оптической связи.

1997-1998 – Созданы и начали выпускаться светодиоды с синим, фиолетовым и белым цветом свечения.

На сегодняшний день реализована лишь небольшая часть перечня преимуществ оптоэлектроники. К перспективным направлениям развития оптоэлектроники можно отнести разработку оптических и оптоэлектронных микросхем, источников и приемников излучения на основе квантовых точек и ям в полупроводниковых структурах, волоконно-оптических датчиков и линий связи, голографических устройств, квантовых компьютеров и др.

Данное пособие подготовлено на основе курса лекций по дисциплине “Оптоэлектроника” для студентов, обучающихся по направлению “Проектирование и технология электронных средств” в Ульяновском государственном техническом университете.

СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Оптический диапазон в соответствии с определением Международной комиссии по освещению (МКО) включает в себя электромагнитные излучения с длиной волны λ от 1 мм до 1 нм. Указанный диапазон достаточно широк, длинноволновая его часть – 0,1-1 мм перекрывается с субмиллиметровыми радиоволнами, коротковолновая часть – 1-10 мм включает в себя мягкое рентгеновское излучение. Оптическое излучение подразделяется на видимое инфракрасное (ИК) и ультрафиолетовое (УФ). Инфракрасное излучение иногда разделяют на ближнюю ($\lambda < 3$ мкм) и дальнюю ($\lambda > 3$ мкм) область.

Оптическое излучение характеризуется как волновыми, так и корпускулярными свойствами, что позволяет различным образом описывать его характеристики. При описании излучения как электромагнитной волны световой вектор (напряженности электрического поля) зависит от следующих параметров:

$E = e \cdot E_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - \omega \cdot n \cdot x / c + \varphi_0)$, где e – единичный вектор, характеризующий направление поляризации волны, E_0 – амплитуда напряженности поля волны, $\omega = 2\pi\nu$ – циклическая частота электромагнитной волны, n – показатель преломления среды, c – скорость света в вакууме, φ_0 – начальная фаза. Скорость распространения света в данной среде ($v = c/n$) зависит от величины показателя преломления ($n^2 = \epsilon \cdot \mu$). Каждый из параметров электромагнитной волны – E_0 , e , ω , v – может быть использован для модуляции оптического излучения.

При использовании корпускулярных свойств света для описания оптического излучения световой поток представляют как поток фотонов с энергией $E_\phi = h\nu$.

Для описания взаимосвязи параметров оптического излучения используются следующие соотношения, выражающие частоту и энергию фотонов через длину волны: $\nu = 3 \cdot 10^{14} / \lambda$, $E_\phi = 1,23 / \lambda = 4,1 \cdot 10^{-15} \nu$. В этих соотношениях размерность: ν в Гц, λ в мкм, E_ϕ в эВ. Плотность потока фотонов связана с плотностью мощности излучения $N_\phi = 5 \cdot 10^{15} \lambda P_{\text{изл}}$, где размерность $[N_\phi] = 1/c \cdot \text{см}^2$, а $[P_{\text{изл}}] = \text{мВт}/\text{см}^2$.

Оптическое излучение может быть когерентным и некогерентным. В общем случае луч света является суперпозицией электромагнитных волн. Некогерентное излучение возникает, когда каждый атом генерирует излучение независимо, направления поляризации и фазы волн (e , φ_0) различны. Для когерентного излучения, когда колебания излучающих атомов согласованы, эти параметры постоянны. Для когерентного излучения возможно наблюдение явлений интерференции излучения, когда в результате сложения волн их амплитуда зависит от разности фаз. Для некогерентного излучения суммарное значение амплитуды не зависит от разности фаз.

Для описания возникновения и распространения излучения, а также взаимодействия излучения с веществом используются различные разделы оптики. Геометрическая оптика использует понятие световых лучей для анализа процессов отражения и преломления. Волновая оптика использует описание света, как электромагнитных волн, для явлений интерференции, дифракции, рассеяния и др. Квантовая оптика рассматривает световой поток как поток фотонов для описания явлений фотоэффекта, лазерной генерации, фотохимии и др.

СВЕДЕНИЯ ИЗ ФОТОМЕТРИИ

Исторически сложилось так, что за фотометрические единицы принимались такие характеристики излучения, которые связаны с его воздействием на глаз человека. Однако часто для описания свойств излучения и его взаимодействия с веществом пользуются энергетическими единицами. Измерение же энергетических характеристик излучения входит в задачи радиометрии. Таким образом, в электронике пользуются двумя системами единиц: фотометрической и энергетической. Например, КПД излучателя определяют энергетическими единицами, а зрительное ощущение от его излучения — фотометрическими. В табл. 1.1 приведены основные энергетические и соответствующие им фотометрические единицы.

Таблица 1.1 Основные энергетические и фотометрические единицы

Энергетическая величина	Обозначение	Единицы	Фотометрическая величина	Обозначение	Единицы
Энергия излучения	Q_e	Дж	Световая энергия	Q_ϕ	лм*с
Поток излучения (мощность)	Φ_e, P	Вт	Световой поток	Φ_ϕ	лм
Энергетическая светимость	R_e	Вт/м ²	Светимость	R_ϕ	лм/м ²
Энергетическая освещенность	E_e	Вт/м ²	Освещенность	E_ϕ	лк
Сила излучения	I_e	Вт/ср	Сила света	I_ϕ	кд
Энергетическая яркость	V_e	Вт/м ²	Яркость	V_ϕ	кд/м ²

В отечественной и зарубежной литературе широко используется внесистемный термин — интенсивность излучения (intensity). Английскому "intensity" соответствует русское "сила света", и согласно ГОСТу, это понятие относится к характеристике излучателя. Однако этот термин часто применяют и к излучению, падающему на поверхность фотоприемника. Поэтому единицами измерения могут быть Вт/(ср*м²) (это совпадает с единицей яркости) или Вт/см² (и тогда это соответствует единице светимости или освещенности).

Иногда при работе с излучением сложного спектрального состава под ин-

тенсивностью понимают спектральную плотность мощности излучения $\partial P/\partial \lambda$ (Вт/нм).

Между величинами, приведенными в табл. 1.1, существует строгая связь. Рассмотрим эти величины подробнее.

Поток излучения $\Phi_{e,\phi}$ - полная энергия, излучаемая источником во всех направлениях в единицу времени.

Освещенность $E_{e,\phi} = d\Phi_{e,\phi} / dA$ - величина потока излучения, приходящаяся на единицу освещаемой поверхности.

За единицу светимости $R_{e,\phi} = d\Phi_{e,\phi}/dA$ принимают поток излучения в 1 Вт (1 лм), отдаваемый поверхностью источника в 1 м^2 .

Сила света (излучения) в данном направлении $I_{e,\phi} = d\Phi_{e,\phi}/d\Omega$ определяется отношением величины потока излучения к величине телесного угла, в котором данный поток распространяется. Если источник излучает во все стороны равномерно, то полный поток $\Phi = 4\pi I$. В том случае, когда $\Phi = 4\pi$ (Вт или лм), источник имеет типичную силу света 1 Вт/ср или 1 лм/ср = 1 кд. Кандела – сила света, излучаемая эталоном перпендикулярно поверхности с площади $1/60 \text{ см}^2$. Воспроизводимый условный световой эталон – абсолютно черное тело при температуре затвердевания платины 2046,6 К под давлением 1 атм.

За единицу яркости $V_{e,\phi} = dI_{e,\phi}/dA$ принимают количество излучения, равномерно испускаемого плоской поверхностью площадью 1 м^2 в перпендикулярном к ней направлении при энергетической силе света 1 Вт/ср (1 лм/ср).

Согласно определению, сила света и яркость источника излучения зависят от направления наблюдения. Действительно, как следует из рис. 1.1 сила света от элемента поверхности dA источника в направлении s , перпендикулярном его поверхности, равна $dI = V dA$, а в направлении s' $dI = V dA \cos \Theta$ (здесь Θ - угол между нормалью к излучающей поверхности и направлением наблюдения). Отсюда яркость $V = (1/\cos \Theta) dI/dA$. В нашем случае I - это сила света, посылаемого элементом поверхности, видимой в данном направлении.

Для поверхности, излучающей диффузно, справедлив закон Ламберта, согласно которому сила света источника пропорциональна $\cos \Theta$. Поэтому его яркость не зависит от угла наблюдения.

Связь между световым потоком Φ_ϕ (лм) и энергетическим потоком Φ_e (Вт) для видимой области спектра определяется зависимостью: $\Phi_\phi(\text{лм}) = k_\lambda \Phi_e(\text{Вт})$, где k_λ (лм/Вт) - фотометрический эквивалент излучения, зависящий от длины волны. В относительных единицах эта величина обозначается как V_λ и называется функцией видности.

На рис. 1.2 представлена спектральная зависимость k_λ . Эта кривая соответствует усредненной спектральной чувствительности человеческого глаза. Максимум величины k_λ , расположен при $\lambda = 550 \text{ нм}$ (зеленый свет) и составляет 680 лм/Вт. Приведенная кривая характеризует источник излучения как слабый или яркий в зависимости от его длины волны при одинаковой мощности излучения.

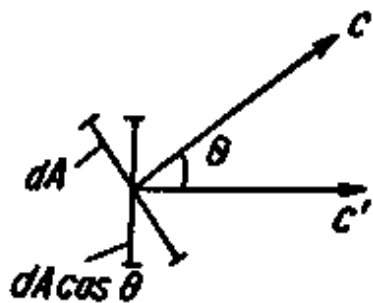


Рис. 1.1. К выводу выражения для яркости источника излучения

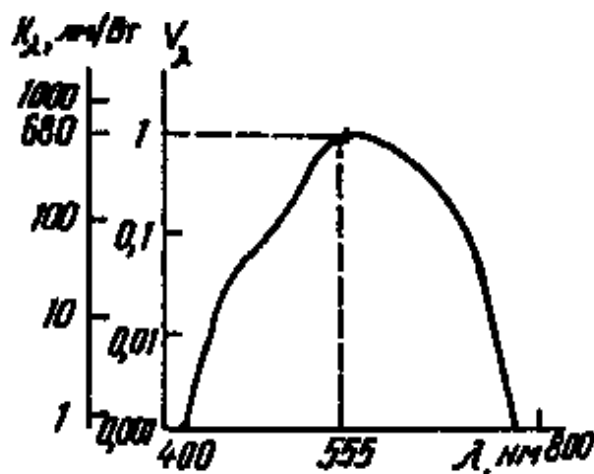


Рис. 1.2. Спектральная зависимость фотометрического эквивалента излучения и функции видности

Согласно современным определениям, оптический диапазон спектра составляют электромагнитные колебания с длиной волны от 0,1 мкм до 1 мм. Однако большинство оптоэлектронных приборов работают в значительно более узком интервале длин волн 0,2 -10 мкм. В табл. 1.2 представлены условные границы частей оптического диапазона.

Таблица 1.2 Условные границы областей оптического спектрального диапазона

Диапазон	УФ-С	УФ-В	УФ-А	Фиолетовый	Синий	Зеленый
λ (мкм)	<0,28	0,28-0,32	0,32-0,40	0,40-0,44	0,44-0,49	0,49-0,55
Диапазон	Желтый	Оранжевый	Красный	ИК-А	ИК-В	ИК-С
λ (мкм)	0,55-0,59	0,59-0,63	0,63-0,80	0,80-1,30	1,30-1,50	>1,50

ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Приборы, преобразующие электрическую энергию возбуждения в оптическое излучение заданного спектрального состава и пространственного распределения. Источники – основа любой оптоэлектронной системы, они определяют ее функциональные возможности, эксплуатационные и стоимостные характеристики, свойства остальных элементов – фотоприемников, пассивных оптоэлектронных элементов.

Возбуждение оптического излучения.

Любое излучение тела, в том числе и оптическое, сопровождается потерей энергии. Для обеспечения непрерывности излучения необходимо пополнять убыль энергии. По виду восполнения убыли энергии различают два вида излучения: тепловое и люминесценцию.

Тепловое излучение возникает тогда, когда энергия, уносимая излучением, пополняется сообщением телу соответствующего количества тепла. Тепловое излучение существует для всех тел, температура которых отлична от нуля ($T \neq 0$), но интенсивность и спектр излучения зависят от их температуры.

Для абсолютно черного тела спектральная плотность светимости описывается законом Стефана-Больцмана: $\epsilon_T = \sigma T^4$, где $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-12}$ Вт/см²*К⁴. Для серых тел спектральная плотность светимости $E_T = A_T \cdot \epsilon_T$, где коэффициент $A_T < 1$. Длина волны, соответствующая максимуму интенсивности излучения абсолютно черного тела, определяется температурой излучающего тела в соответствии с законом смещения Вина — $T \cdot \lambda_{\max} = b = 2898$ мкм*К. Если излучающий материал не соответствует абсолютно черному телу, то величина постоянной b имеет меньшее значение, зависящее от температуры. Для вольфрамовой нити в лампах накаливания - $b_w = 2660$ мкм.

Спектральная плотность светимости (Вт/см³) определяет распределение интенсивности излучения в зависимости от его спектрального состава и в соответствии с ним в диапазоне от $0,5\lambda_{\max}$ до $3\lambda_{\max}$ сосредотачивается 90% всей мощности теплового излучения.

Полное описание свойств и характеристик теплового излучения основывается на использовании формулы Планка для спектральной плотности светимости абсолютно черного тела: $E_{\lambda T} = 2\pi h c^2 \lambda^{-5} / (\exp hc/\lambda kT - 1)$, с учетом эмпирических параметров, учитывающих отклонение свойств используемых материалов от абсолютно черных тел.

Тепловое излучение широко используется в лампах накаливания, которые относительно редко используются в качестве источников излучения в оптоэлектронных устройствах. В то же время лампы накаливания являются до сих пор наиболее распространенными осветительными приборами. В вакуумной колбе источником теплового излучения является вольфрамовая нить, нагретая до температуры ~ 2450 К, ограниченной началом интенсивного испарения нити. При этой температуре максимум интенсивности излучения соответствует ин-

фракрасной области $\lambda_{\max}=1,1$ мкм, т.е. лампы накаливания больше греют, чем светят. В связи с этим, они имеют сравнительно низкую светоотдачу ~ 10 лм/Вт и КПД 1,6%. Более высокую эффективность имеют газонаполненные лампы накаливания, в которых стеклянные колбы заполнены инертным газом (N_2 , Ar_2). В них замедляется распыление нити, поэтому температура накала может быть повышена до 2700-2900 К, что обеспечивает смещение длины волны максимальной светимости и повышение светоотдачи до 20 лм/Вт и КПД до 3,5%.

К достоинствам ламп накаливания можно отнести низкую стоимость, высокую температурную и радиационную стойкость, высокую интегральную яркость $\sim (1-10) \cdot 10^6$ кд/м² (для сравнения – яркость поверхности солнца – $1,5 \cdot 10^{10}$ кд/м²). Недостатками ламп накаливания являются наличие вакуумной системы, широкий спектр излучения, значительная инерционность (10^{-2} - 10^{-1} с), низкий КПД.

Более распространенным в оптоэлектронных источниках излучения является использование нетепловых источников излучения, использующих различные виды люминесценции.

Люминесценция — излучение, избыточное над тепловым и имеющее длительность значительно больше периода колебаний световой волны. Первая часть определения отделяет люминесценцию от теплового излучения, т.е. люминесценция является «холодным свечением» — энергия для излучения может подводиться любым нетепловым способом. В то же время необходимо учитывать, что любой вид люминесценции сопровождается и тепловым излучением тела, температура которого всегда отлична от нуля. Вторая часть определения позволяет отделить люминесценцию от процессов отражения света от поверхности и рассеяния излучения.

Люминесценция сопровождается передачей энергии телу нетепловыми способами, когда энергия частиц, в частности, электронов увеличивается, и этот избыток энергии расходуется на излучение фотонов. В веществе за счет энергии внешнего воздействия часть электронов с нижних равновесных уровней переходит на более высокие, затем возвращаются с испусканием фотонов, длина волны излучения определяется разностью энергий электронов – $\lambda(\text{мкм})=1,23/(E_2-E_1)$ (эВ). Люминесценция подразделяется по способу подвода энергии на фотолюминесценцию, катодолюминесценцию, электрولюминесценцию, радиолюминесценцию, хемилюминесценцию и др. В оптоэлектронике в источниках излучения используются в настоящее время в основном процессы электро-, катодо- и фотолюминесценции.

Явление электрولюминесценции используется в твердотельных источниках излучения, где в качестве материалов применяются полупроводниковые вещества. В полупроводниках ширина запрещенной зоны, определяющей энергию перехода электронов, соответствует энергии квантов оптического диапазона. Соответственно, энергия возбужденных электронов должна совпадать по порядку величины с энергией возбуждения и энергией излучаемых фотонов. Частое возбуждение электронов происходит в одном месте кристалла или во всем его объеме, а их квантовые переходы с излучением – в другом, поэтому в общем случае процессов люминесценции рассматриваются 3 основных процесса:

1. Возбуждение внешним воздействием, перевод электронов в возбужденное состояние,

2. Передача энергии центрам свечения, связанная с изменением пространственного и (или) энергетического положения возбужденных электронов, сопровождающийся излучением фотона.

К основным электронным переходам с излучением относятся следующие (рис. 2.1):

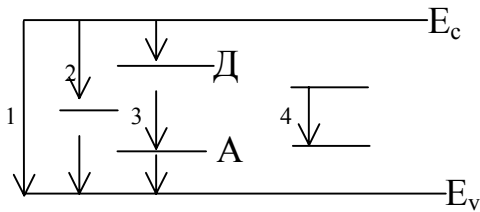


Рис. 2.1. Излучательные переходы электронов в запрещенной зоне полупроводника.

Межзонные излучательные переходы (1) с излучением возможны лишь в прямозонных полупроводниках (например, GaAs и другие соединения A_3B_5 и их твердые растворы). Излучательные переходы 2, 3, 4 возможны в любых полупроводниках, но с участием примесных уровней. Примеси в этом случае носят название центров свечения или активаторов и в общем случае включают в себя системы, состоящие из комплексов дефектов и примесей, обеспечивающих излучательные переходы электронов. Излучательные переходы 1, 2, 3 включают в себя участие свободных носителей (электронов и дырок) в зонах проводимости и валентной, т.е. связаны с изменением проводимости полупроводника. Данные процессы объединяются названием рекомбинационная люминесценция. Излучательные переходы электронов с возбужденного на основной уровень (4) происходят только лишь в пределах одного примесного центра, т.е. не связаны с изменением концентрации свободных носителей и проводимости полупроводника. В этом случае говорят о внутрицентральной люминесценции. Различные виды рекомбинационной и внутрицентральной люминесценции обладают разными характеристиками.

Кроме центров свечения в полупроводниках могут существовать примеси, образующие центры тушения (гашения), которые могут служить центрами безызлучательной рекомбинации, снижающими эффективность процессов излучения. Вероятность излучательных процессов с участием примесных центров возрастает с ростом их концентрации до определенного предела, с превышением которого эффективность генерации излучения уменьшается (концентрационное тушение). С ростом температуры полупроводника выход излучения также уменьшается (температурное тушение). При высоких уровнях возбуждения возможно появление Оже-рекомбинации, когда энергия электрона передается другим электронам в зоне проводимости, они переходят на более высокий уровень энергии без изменения их общей концентрации и значения проводимости полупроводника. Вероятность Оже-рекомбинации возрастает с увеличением концентрации свободных носителей заряда полупроводника.

Соотношение между числом излучательных и безызлучательных переходов определяет внутренний квантовый выход η_k , равный отношению числа фотонов к числу электронов, прошедших через полупроводник. Для некоторых видов люминесценции внутренний квантовый выход приближается к единице, особенно при достаточно низких температурах. Так как не все фотоны выходят из источника излучения, он характеризуется внешним квантовым выходом $\eta_{ке} = \eta_k * K_0$, где коэффициент K_0 учитывает потери, связанные с отражением и поглощением света. Внутренний квантовый выход определяется тремя составляющими - $\eta_k = N * \gamma * P$, где γ - доля рекомбинаций, происходящих в люминесцирующей области полупроводника, P - доля излучательных рекомбинаций, N - число рекомбинаций, вызываемых одним электроном. Величина внутреннего квантового выхода уменьшается с ростом температуры. Внешний энергетический выход (КПД) люминесценции, определяется как $\eta_e = \eta_{ке} hv / eV$, где hv - энергия фотонов (Дж), eV - энергия электронов (Дж), прошедших разность потенциалов V . Аналогичный параметр - светоотдача характеризует эффективность источников излучения в видимом диапазоне - $\eta_L = \Phi_L / W$, где Φ_L - световой поток излучения (лм), W - потребляемая источником мощность (Вт).

Основные параметры источников излучения.

Система параметров источников излучения логически следует из функционального назначения и физических принципов работы двух их основных разновидностей: излучающих диодов и лазеров.

Интенсивность излучения характеризует мощность излучения $P_{изл}$ (мВт) (для лазеров и инфракрасных излучающих диодов); сила света J_v (мккд, мкд) (для светоизлучающих диодов). Оба параметра измеряются при заданном номинальном или рабочем токе возбуждения $J_{раб}$ лазеров и прямом токе $J_{пр}$ излучающих диодов. В связи с сильной зависимостью $P_{изл}$ ($J_{раб}$) при измерении лазеров во избежание вывода их из строя устанавливается требуемая мощность и измеряется ток накачки.

Спектральные свойства источников излучения определяются длиной волны, соответствующей максимальной интенсивности спектра излучения λ_{max} , (мкм, нм); шириной спектральной полосы $\Delta\lambda$, (нм), определяемой по 50%-ному уровню спада интенсивности. Для излучающих диодов и лазеров этих параметров обычно достаточно, для некоторых применений иногда требуется задавать спектральное распределение $P_{изл}(\lambda)$ или координаты цветности x, y .

Для характеристики направленности измеряют угол излучения α , опр. по 50% уровню спада интенсивности или диаграмму направленности $P_{изл}(\varphi)$ - зависимость мощности излучения от угла обзора.

Быстродействие определяется импульсными параметрами: временем нарастания (спада) импульса излучения при скачкообразном включении (выключении) импульса возбуждения $t_{нар(сп)}$, (нс), и временем задержки импульса излучения $t_{зад}$, (нс). Эти параметры измеряются по уровню 0,1 и 0,9 фронта и спада импульса излучения. Иногда используется постоянная времени релаксации

(спада) свечения $\tau_{\text{рел}}$, определяемая как время изменения интенсивности в e раз (при экспоненциальном спаде).

Как элемент электрической цепи источник излучения характеризуется падением прямого напряжения (или напряжением возбуждения) $V_{\text{пр}}$ при заданном токе $J_{\text{пр}}$, а так же максимально допустимым режимами (непрерывным и импульсным) по току, обратного напряжения, мощности рассеивания.

Основные конструкторские параметры: размеры излучающего окна, тепловое сопротивление $R_{\text{т}}$ (К/Вт).

Основные эксплуатационные показатели: максимальная и минимальная рабочая температура ($T_{\text{max}}, T_{\text{min}}$), гарантированная долговечность $t_{\text{д}}$ (определяется по 10, 30 или 50% - му спаду интенсивности излучения).

Для описания источников излучения могут использоваться так же и другие параметры.

Светодиоды

Светоизлучающий диод (СИД) представляет собой p-n переход, контакт металл-полупроводник, МДП или другую диодную структуру, прохождение тока через которую сопровождается некогерентным оптическим излучением. Если генерация света происходит в результате инжекции неосновных носителей заряда с их последующей рекомбинацией, то СИД называется инжекционным. Наиболее распространены инжекционные излучающие диоды с гомо- или гетеро- p-n переходом.

При прямом смещении p-n перехода происходит инжекция электронов в p-область и дырок в n-область. Неосновные носители заряда рекомбинируют с основными в ОПЗ и прилегающих областях, поэтому толщина n- и p-областей должна быть больше диффузионных длин неосновных носителей заряда ($L_{n,p}$).

Генерируемый диодом поток излучения (число квантов в единицу времени) зависит от приложенного напряжения следующим образом (с использованием выражения для ВАХ p-n перехода и условием преимущественной рекомбинации вне ОПЗ):

$$\Phi = S * K_0 (P_n * D_n * n_p / L_n + P_p * D_p * n_n / L_p) * [\exp (eV / kT) - 1],$$

где S – площадь p-n перехода, K_0 – оптический выход, p_p и p_n – квантовый выход. Квантовый выход $P_{n,p} = \gamma \cdot r$, где $\gamma = J_{\text{инж}(n,p)} / J_{\text{полн}}$ — коэффициент инжекции, который характеризует эффективность перехода, $r = R_i / (R_i + R_n)$ — вклад (доля) излучательной рекомбинации в общем рекомбинационном процессе (R_i, R_n – скорости излучательной и безызлучательной рекомбинации).

Обычно вклад инжекции электронов и дырок сильно различается, т.е. имеет место почти односторонняя инжекция неосновных носителей заряда в ту область кристалла, где условия для излучательной рекомбинации более благоприятны (например, для электронов), тогда зависимость потока излучения от приложенного напряжения, тока и температуры имеет следующий вид:

$$\Phi = S * K_0 * P_n * D_n * n_p / L_n * \exp (eV / kT).$$

(Единица опущена, т.к. $eV \gg kT$).

Для излучения, близкого к монохроматическому, мощность излучения находится умножением потока на энергию генерируемых квантов.

Поток излучения инжекционного СИД сильно зависит от напряжения, тем резче, чем ниже температура. Отсюда следует необходимость стабильности рабочего напряжения. Так как поток излучения линейно зависит от тока ($\Phi \sim J$), целесообразно СИД питать от источника, работающего в режиме генератора тока. При больших токах возрастает падение напряжения на последовательно включенных участках, поэтому реальная зависимость потока излучения от напряжения становится менее резкой, отставая от экспоненты. Предполагается, что квантовый выход ρ_n – постоянная величина. На практике постоянство наблюдается в узком интервале изменения значений тока, поэтому для данного СИД (заданной площади) существует оптимальный (с точки зрения эффективности) режим работы. Если рекомбинация носителей происходит в основном в области пространственного заряда (ОПЗ) p-n перехода выражение для потока излучения усложняется. При увеличении напряжения относительный вклад излучательной рекомбинации в ОПЗ уменьшается. При этом может измениться и спектральный состав излучения (обычно увеличивается доля коротковолнового излучения).

Особенности инжекционной электролюминесценции гетероструктур.

Инжекционные излучающие диоды на основе гетероструктур создаются последовательным эпитаксиальным наращиванием 2-х и более слоев полупроводников с разной шириной запрещенной зоны. Необходимыми требованиями при этом являются близость кристаллической структуры, постоянных решетки, температурных коэффициентов линейного расширения и т.п. Соединения A^3B^5 удовлетворяют большинству требований, поэтому на их основе изготавливаются излучающие гетероструктуры. Соотношение между токами инжекции электронов и дырок определяется различием в ширине запрещенной зоны полупроводников в гетероструктуре: $J_n/J_p \sim \exp(E_{g1} - E_{g2})/kT$.

В гетеропереходах инжекция носителей происходит практически всегда в узкозонный полупроводник, где и происходит излучательная рекомбинация.

В гетероструктурах может происходить явление суперинжекции, когда при прохождении прямого тока через p-n переход концентрации неосновных носителей заряда превышает концентрацию основных носителей в данной области, что позволяет получить потоки излучения высокой интенсивности.

Другие типы инжекционных СИД.

Поверхностно-барьерные структуры металл-полупроводник. В них излучение может генерироваться при прямом смещении выпрямляющего контакта и инжекции неосновных носителей заряда в полупроводник с последующей излучательной рекомбинацией (эффект Лосева).

МДП-диоды. В них используется инжекция неосновных носителей заряда через туннельно-тонкий диэлектрик с последующей излучательной рекомбинацией.

Помимо инжекционных излучающих диодов возможно использование для генерации излучения предпробойной электролюминесценции при обратном смещении диода. В достаточно сильном электрическом поле обратного р-п перехода происходит ускорение, ударная ионизация и размножение носителей, возбуждающих центры свечения в полупроводнике.

Такие излучающие диоды могут быть созданы на основе полупроводниковых соединений A^2B^6 , где эффективность инжекционной электролюминесценции невысока.

Материалы СИД

Наиболее распространенными материалами являются соединения A^3B^5 и их твердые растворы.

GaAs - прямозонный полупроводник, на котором впервые наблюдалась инжекционная электролюминесценция в р-п переходе ($E_g = 1.43$ эВ, $\lambda = 0.86$ мкм). Большинство GaAs-излучателей деградируют, поэтому они не получили заметного промышленного распространения, за исключением р-п переходов, легированных кремнием. При эпитаксии при высоких температурах Si внедряется в вакансии галлия и является донором, при более низких температурах Si внедряется в вакансии мышьяка и является акцептором. Активная область р-п перехода составляет 20-40 мкм, генерируемое излучение имеет длину волны $\lambda = 0.95$ мкм, сдвинуто вправо от красной границы поглощения арсенида галлия, поэтому излучение проходит через толщу GaAs без потерь. Быстродействие таких светодиодов относительно мало ~ 1 мкс. В основном GaAs используется в качестве подложек при выращивании гетероэпитаксиальных структур A^3B^5 и их твердых растворов.

Для GaP ширина запрещенной зоны составляет $E_g = 2.26$ эВ. Фосфид галлия - непрямозонный полупроводник, но имеет высокую эффективность излучательной рекомбинации через изоэлектронные ловушки и прозрачен для генерируемого излучения. Для этого материала характерна высокая химическая стабильность, технологичность получения и обработки. На основе GaP изготавливают светодиоды зеленого, желтого, оранжевого и красного цветов свечения при легировании фосфида галлия (Zn – зеленый, Zn,O – красный, N – зеленый, желтый и оранжевый цвет свечения получают при совместном легировании – N, Zn, O). Для фосфида галлиевых светодиодов наблюдается насыщение мощности излучения при росте тока до $1-5$ А/см².

$GaAs_{1-x}P_x$. Важнейший светодиодный материал. Изменение состава позволяет получать свечение от зеленого до красного цветов. Оптимальный состав ($x \leq 0.4$) используется для генерации излучения с длиной волны $\lambda \approx 660$ нм). Данный материал является прямозонным полупроводником. Для светодиодов на его основе характерна высокая яркость свечения, ненасыщенность люксам-

перной характеристики. В то же время он непрозрачен для собственного излучения.

$\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$. Важнейший материал для ИК-излучателей. Достоинством его является возможность получения высококачественных гетероструктур из-за малого рассогласования постоянных решетки ($\Delta a/a < 0.1\%$). Изменяя состав твердого раствора можно получить полупроводники с шириной запрещенной зоны $E_g = 1.4 - 1.85$ эВ, соответственно, длина волны излучения - $\lambda_{\text{изл}} \approx 0.82 - 0.87$ мкм. Светодиоды на основе $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ имеют высокий внутренний квантовый выход. Малая толщина активной области и время жизни обуславливают высокое быстродействие. Основным недостатком заключается в том, что производятся эти светодиоды с помощью жидкофазной эпитаксии. Особенности технологии обуславливают получение структур ограниченной площади, сравнительно высокую стоимость, поэтому СИД красного цвета $\lambda \approx 700$ нм с очень высокой яркостью ограничено распространены.

$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$. $E_g = 1.1 - 0.7$ эВ, $\lambda_{\text{изл}} = 1.3 - 1.6$ мкм. Используется для изготовления излучающих диодов для ВОЛС.

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Ширина запрещенной зоны до $E_g \approx 3,5$ эВ (GaN). Получают методом газофазной эпитаксии. Спектр излучения зависит от условий выращивания (состава твердого раствора), изготавливаются СИД различных цветов свечения: синий, зеленый, желтый, красный, УФ. Эти светодиоды имеют высокую эффективность.

SiC. $E_g \approx 3$ эВ. На основе карбида кремния возможно изготовление светодиодов желтого, зеленого и голубого цветов свечения с помощью диффузии, эпитаксии, ионной имплантации. Технологические трудности получения SiC обуславливаются его высокой температурой плавления, поэтому температуры выращивания и диффузии относительно велики – 2000 - 2500°C.

Разновидности инжекционных излучающих диодов

Простейшая p-n-структура в гомогенном полупроводнике характерна для наиболее распространенных GaP и GaAsP-светодиодов. Структура с достаточно широкой промежуточной областью, близкой по свойствам к собственному (i) полупроводнику, реализуется в GaAs(Si)-излучателях, а также в GaP- и GaAs-приборах с полуизолирующими областями, создаваемыми главным образом диффузией хрома. Эти структуры используются в диодах с перестраиваемым цветом свечения и в других функционально интегрированных излучающих приборах.

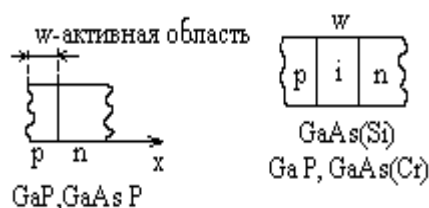


Рис. 2.5. Энергетические диаграммы излучающих p-n структур.

В гетероструктурах введение дополнительного переходного слоя с плавно изменяющимся значением ширины запрещенной зоны обусловлено технологическими задачами: благодаря постепенному изменению состава меньше сказываются механические напряжения из-за несогласованности кристаллографических постоянных (рис.2.6).

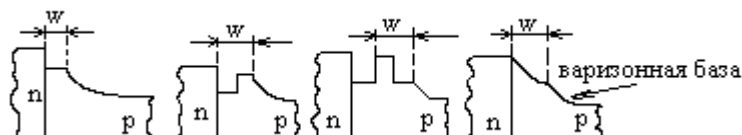


Рис. 2.6. Энергетические диаграммы излучающих гетероструктур.

На рис. 2.6 представлены односторонние и двусторонние гетероструктуры (ОДС и ДГС). Если в ДГС широкозонные “обкладки” активной области сделать достаточно толстыми (или хотя бы одну из них), то подложку можно удалить (сравить), и тогда лучи света, распространяющиеся вправо, не будут поглощены, а после отражения от нижней границы кристалла направятся к левой поверхности и при попадании в апертурный угол выйдут наружу. Процесс отражения от границ может повторяться многократно до тех пор, пока световой луч не придет под нужным углом к левой поверхности, при этом нежелательного поглощения излучения в широкозонных областях не происходит. В таких многопроходных структурах с удаленной подложкой коэффициент вывода излучения может достигать десятков процентов.

Введение второго активного слоя с шириной запрещенной зоны, меньшей, чем у основного, приводит к тому, что фотоны, распространяющиеся к подложке, поглощаются в этом слое, порождая свободные электроны, которые рекомбинируют, генерируя более длинноволновое излучение. Такие структуры с переизлучением или фотоэлектrolюминесцентные, так же как и многопроходные структуры, обладают повышенным внешним квантовым выходом. Излучатель с варизонной базой представляет собой разновидность фотоэлектrolюминесцентной структуры: здесь переизлучение идет непрерывно во всей активной области.

Оптический выход излучения

Оптический выход излучения показывает, какая часть полного излучения, генерируемого в активной области излучающего диода, выходит во внешнюю среду. Его величина определяется потерями, связанными с поглощением в полупроводнике и отражением от внешней границы.

1. Потери на поглощение.

Поглощение излучения в веществе описывается законом Бугера - Ламберта: $\Phi = \Phi_0 \exp(-\alpha \cdot x)$, где Φ_0 - генерируемый световой поток, Φ - выходящий световой поток, α - коэффициент поглощения. В излучающих диодах толщина слоя поглощения x определяется толщинами p- и n-областей (d_1 и d_2).

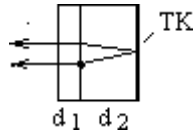


Рис. 2.7. Схема прохождения световых лучей в плоском светодиоде.

Излучение распространяется в разные стороны от p-n перехода, поэтому

$K_{\text{погл}} = (1 + R_{\text{ТК}} \cdot \exp(-2\alpha_1 d_1)) \cdot \exp(-\alpha_2 d_2)$, где $R_{\text{ТК}}$ - коэффициент отражения от тылового контакта.

2. Потери на отражение от поверхности полупроводника.

а) Френелевские потери. Нормально падающие лучи частично отражаются от границы раздела полупроводник – внешняя среда. Коэффициент отражения от границы полупроводник - воздух: $r_0 = (n_0 - 1)^2 / (n_0 + 1)^2$ где n_0 - коэффициент преломления полупроводника. Для соединений A^3B^5 $n_0 = 3,3-3,8$. Для GaAs $n_0 = 3,3$ и $r_0 = 0,285$, доля выходящего излучения: $1 - r_0 = 4 n_0 / (n_0 + 1)^2 = 0,715$. При увеличении угла падения r_0 несколько возрастает.

б) Потери, связанные с полным внутренним отражением.

Излучение, генерируемое в p-n переходе, распространяется под различными углами к внешней поверхности полупроводника. При достижении некоторого угла падения световых лучей θ_0 происходит полное внутреннее отражение света от границы полупроводника с внешней средой. θ_0 - угол полного внутреннего отражения: $\theta_0 = \arcsin(1 / n_0)$. Если излучение выходит не в воздух, то вместо 1 подставляется коэффициент преломления данной среды. Для GaAs $\theta_0 = 16^\circ$.

Коэффициент выхода излучения, учитывающий все потери, связанные с отражением, записывается в следующем виде: $K_{\text{отр}} = 4 n_0 / (n_0 + 1)^2 \cdot (1 - \cos \theta_0)$.

Из-за потерь на отражения для СИД на GaAs выход излучения составляет около 1,3%, на GaP – 1,6%.

Полная эффективность выхода излучения с учетом потерь на поглощение и отражение дается выражением:

$$K_0 = \frac{4 \cdot n}{(n + 1)^2} \cdot (1 - \cos \theta_0) \cdot \frac{\int \phi(\lambda) \cdot (1 + R_{\text{ТК}} \cdot e^{-2\alpha(\lambda) \cdot d_1}) e^{-\alpha_2(\lambda) \cdot d_2} d\lambda}{\int \phi(\lambda) d(\lambda)},$$

где $\phi(\lambda)$ - скорость генерации фотонов.

Снижение френелевских потерь обеспечивается нанесением на поверхность излучающего диода просветляющего слоя. Показатель преломления слоя:

$n_c = (n_0 n_{\text{среды}})^{1/2}$, где n_0 - показатель преломления полупроводника, $n_{\text{среды}}$ - показатель преломления среды, в которую выходит излучение (для воздуха $n=1$).

Толщина слоя d_c выбирается такой, чтобы чтобы световые лучи, отраженные от границ раздела слоя с внешней средой и полупроводником, гасили друг друга вследствие интерференции. Для этого используется условие:

$n_c \cdot d_c = (2m - 1) \cdot \lambda / 4$, $m = 1, 2, 3 \dots$. Планарный излучающий диод помещают в среду с коэффициентом преломления промежуточным между воздухом и полупроводником. В качестве такой среды используют прозрачные пластмассы (эпоксидные, кремнийорганические – $n = 1,4 - 1,8$), при этом коэффициент вы-

хода увеличивается примерно в 3 раза. Применяются также легкоплавкие стекла ($n = 2,4 - 2,9$), но они поглощают свет в коротковолновой части видимого диапазона, поэтому их применяют для диодов с красным и ИК-излучением.

Снижение потерь, связанных с явлением полного внутреннего отражения, обеспечивается также тем, что излучающему кристаллу придают такую форму, чтобы выходящее излучение попадало на поверхность в заданном направлении под углом к нормали, меньшим, чем θ_0 .



Рис. 2.8. Конструкции излучающих диодов.

Использование усложненной конструкции излучателя дает значительный эффект увеличения выхода излучения (силы света в определенном направлении). В то же время это приводит к увеличению расхода материала и усложнению технологии. Значительное усиление интенсивности света (в несколько раз) достигается, если излучающий элемент установлен в корпусе с рефлектором.

Для применения в волоконно-оптических линиях связи, оптронах и волоконно-оптических датчиках требуются излучающие диоды, имеющие узкую диаграмму направленности излучения. С этой целью используют диоды специальной конструкции, например, с параболической или сферической внешней поверхностью, рефлекторы, торцевые излучатели, а также фокусирующие устройства (линзы).

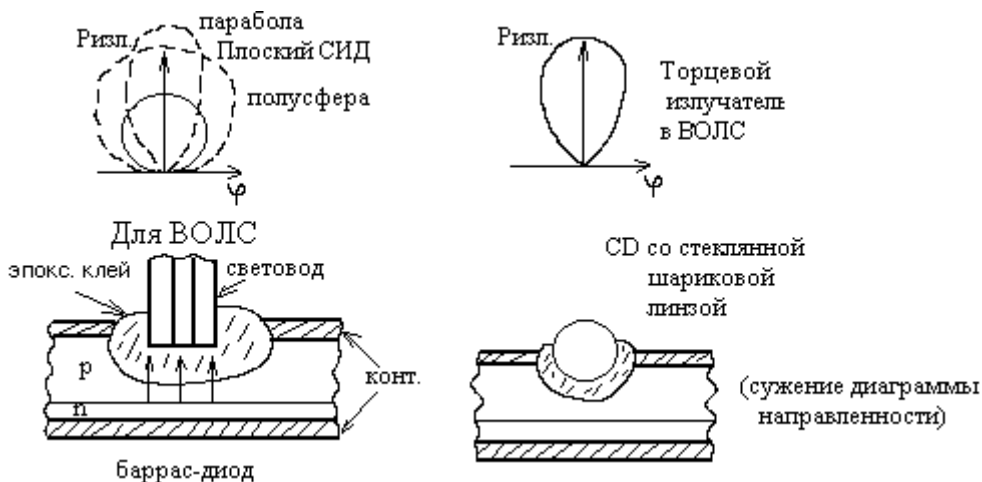


Рис. 2.9. Диаграммы направленности излучения светодиодов и примеры конструкций излучающих диодов, применяемых в ВОЛС.

В индикаторных приборах используются светодиоды, в которых излучающая поверхность имеет покрытие из антистоксова фотолуминофора. В этом люминофоре излучаемое диодом длинноволновое излучение преобразуется в

более коротковолновое, т.е. ИК-излучение может быть преобразовано в излучение видимого диапазона. В качестве антистоксовых люминофоров используют фториды, оксисульфиды лантана, легированные Yb, Er, Ho, Tm, и другие соединения. Однако это преобразование требует дополнительного расхода энергии, поэтому эффективность такого преобразования от 0,1 до 10%.

Свойства и особенности инжекционных излучающих диодов.

К основным спектральным параметрам инжекционных излучающих диодов относятся длина волны, соответствующая максимальной интенсивности излучения λ_{\max} и полуширина спектра $\Delta\lambda$ (~ 40-100 нм). Полуширина спектра зависит от рабочей температуры ($\Delta\lambda \sim kT$). Длина волны, соответствующая максимальной интенсивности излучения λ_{\max} увеличивается с ростом температуры - $d\lambda_{\max}/dT = \text{const}$ (~ 0.3 нм/град). С изменением температуры изменяется и мощность $P_{\text{изл}}$ при заданном токе $J_{\text{пр}}$. Мощность уменьшается в 2-3 раза при увеличении температуры от -60° до $+70^\circ$. $P_{\text{изл}}$ линейно зависит от величины прямого тока $J_{\text{пр}}$ до 10^2 - 10^3 А/см² (для GaP до 10 А/см²). При уменьшении тока до 0.5–0.1 А/см² мощность излучения падает. Время переключения инжекционных излучающих диодов составляет 15-20 нс (максимальная частота до 500 МГц).

Достоинства инжекционных излучающих диодов:

1. Малые размеры – бескорпусные (до 1.5-2 мм), корпусные (~5-6 мм).
2. Малые рабочие напряжения - до 3 В (рабочий ток 5-20 мА).
3. Достаточно большая светоотдача (до 10-20 лм/Вт). Сила света 0.1-100 мКд.
4. Яркость ~ 100-500 кд/м².

Перспектива развития инжекционных излучающих диодов: Использование в качестве излучающих элементов сверхмалых структур с квантовые ямами и точками, а также на основе сверхрешеток. Уменьшение размеров активных зон до ~ 10 нм приведет к изменению зонной диаграммы, уменьшению рассеяния излучения и расширению возможностей инжекционных излучающих диодов.

Лазеры

Лазер - прибор (устройство), генерирующий оптическое когерентное излучение на основе эффекта вынужденного, стимулированного излучения. Термин образован по первым буквам фразы Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Наиболее общими являются принципы классификации лазеров по виду активной среды – газовые, жидкостные, твердотельные (отдельно полупроводниковые), и по способу ее возбуждения (накачки).

Полупроводниковые инжекционные лазеры

Инжекционный лазер представляет собой полупроводниковый двухэлектродный прибор с p-n переходом (поэтому часто как равноправный используется термин лазерный диод), в котором генерация когерентного излучения связа-

на с инжекцией носителей заряда при протекании прямого тока через р-п переход.

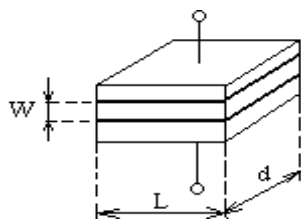


Рис. 2.10. Схема полупроводникового инжекционного лазера.

Особенности инжекционных лазеров:

1. Наличие активной среды, способной обеспечить протекание вынужденного излучения (р-п переход или гетероструктура на основе вынужденного излучения, главным образом типа A^3B^5).

2. Использование возбуждения активной среды (накачка) – для создания инверсии населенности энергетических уровней в полупроводнике. Для этого используется инжекция носителей заряда в р-п переходе.

3. Наличие оптического резонатора, создающего положительную обратную связь, когда часть усиленного выходного сигнала возвращается в кристалл. Обычно применяется резонатор Фабри-Перо – 2 параллельных зеркала, обеспечивающих многократное прохождение волны через активное вещество, одно из них полупрозрачное для вывода излучения. В полупроводниковых лазерах в качестве зеркал используются параллельные грани кристалла (30% - 40% отражения), создаваемые методом скола.

4. Обеспечение электрического (а), электронного (б) и оптического (в) ограничений:

а) электрическое ограничение состоит в том, чтобы максимальная доля тока проходила через активную среду;

б) электронное ограничение требует сосредоточения электронов в активной среде (предотвращение “расплывания” в пассивные области);

в) оптическое ограничение должно удерживать лазерный луч в активной среде, предотвращать его “растекание” при многократных проходах через кристалл. В инжекционных лазерах зона удержания луча характеризуется несколько большим значением показателя преломления, чем соседние области кристалла ($n > n_0$), что обеспечивается соответствующим выбором материалов или повышением концентрации носителей вследствие инжекции.

Следует отметить, что области электронного и оптического ограничения в полупроводниковых лазерах могут не совпадать.

5. Превышение порога возбуждения. Необходимо восполнение потерь на поглощение в среде, разогрев кристалла, неидеальность зеркал, спонтанные и безызлучательные переходы.

Модуляция излучения в инжекционных лазерах осуществляется изменением тока накачки.

Структура лазера с резонатором Фабри-Перо допускает существование большого числа продольных мод, разделенных интервалами частот $\Delta\nu = c/2L$ и нарушающих монохроматичность излучения, и поперечных мод, искажающих однородность пространственного распределения интенсивности. Избирательность модового состава генерируемого излучения должна обеспечиваться элементами, которые встраиваются в резонатор или располагаются вне его.

Для того, чтобы в прямозонном полупроводнике было усиление излучения с частотой ν энергетический зазор между квазиуровнями Ферми для n и p должен быть больше ширины запрещенной зоны E_g ($h\nu > E_g$), тогда при распространении волны могут индуцироваться переходы из заполненных состояний зоны проводимости в незаполненные состояния валентной зоны. Это условие реализуется только в вырожденных полупроводниках или (чаще) в гетероструктурах.

В однородной одномерной среде пороговое значение коэффициента усиления генерируемого излучения: $\alpha_{\text{пор}} = \alpha_0 - (1/2L) \ln(\rho_1 \rho_2)$, где α_0 - коэффициент поглощения полупроводникового материала, $\rho_{1,2}$ - коэффициент отражения от границы резонатора, L - длина резонатора. Коэффициент усиления α зависит от степени инверсии населенностей, т.е. от концентрации избыточных носителей, определяемой величиной плотности тока накачки: $\alpha_{\text{пор}} = \alpha(J_{\text{пор}})$, где $J_{\text{пор}}$ - пороговая плотность тока. При плотности тока, незначительно превышающей $J_{\text{пор}}$, зависимость $\alpha(J_{\text{пор}})$ хорошо аппроксимируется прямой: $\alpha = \alpha_{\text{пор}} + \beta(J + J_{\text{пор}})$, где β - коэффициент усиления света по току.

При росте J зависимость $\alpha(J)$ насыщается из-за уменьшения времени жизни неравновесных носителей заряда. Эффект насыщения усиления описывается формулой $\alpha \approx \alpha_0 (1 + \Phi/\Phi_{\text{нас}})^{-\gamma}$, где Φ - световой поток, $\gamma = 0.5-1$.

Плотность порогового тока $J_{\text{пор}} = J_0 + \alpha_0/\beta + 1/(2\beta L) \ln(1/\rho_1 \rho_2)$, где J_0 - плотность тока, обеспечивающая инверсию населенностей. С уменьшением длины резонатора значение плотности порогового тока увеличивается (до $L \approx 30$ мкм). В то же время с уменьшением L расширяется спектр генерации (при $L \leq 100$ мкм $\Delta\nu \sim 1/L$). Минимальные значения толщины и ширины активной области составляют около 0,15 мкм, при дальнейшем уменьшении толщины существенным становится просачивание носителей и света в пассивные области. Зависимость порогового тока от температуры имеет вид: $J_{\text{пор}} = J_0(T_0) \cdot \exp(-T/T_0)$, где $T_0 \approx 50$ К - при комнатной температуре, $T_0 \approx 100$ К - при пониженной, близкой к температуре жидкого азота. С ростом температуры лазерную генерацию получить сложнее.

Временные параметры инжекционных лазеров в режиме переключения определяются большим из двух параметров - времени жизни инжектированных носителей заряда (связанной с вероятностью индуцированных переходов) или времени жизни фотонов (в общем случае $\leq 10^{-10} - 10^{-11}$ с).

Разновидности инжекционных лазеров

1. Инжекционные лазеры на основе гомогенных полупроводников имеют не совершенное электронное ограничение, границы электронного и оптического ограничения в них не определены и меняются при изменении режима накачки.

Все эти несовершенства, проявляющиеся в конечном счете в высоком значении плотности порогового тока, предопределили бесперспективность лазеров на однородных полупроводниках.

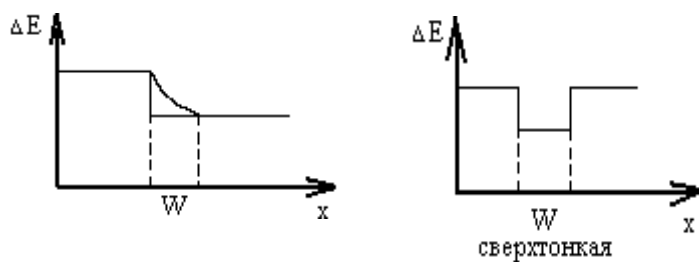


Рис. 2.11. Энергетическая диаграмма односторонней и двойной гетероструктуры.

2. В односторонней гетероструктуре (ОГС) электронное ограничение идеально с одной стороны, с другой – как у гомоперехода. Достоинством ОГС является простота технологии.

3. ДГС – двойная (двухсторонняя) гетероструктура – классическая. Достоинства ОГС: малые пороговые плотности тока, большие выходные мощности.

4. 4-х, 5-ти слойные структуры позволяют реализовать большие возможности: $J_{\text{пор}} \leq 10^2 \text{ А/см}^2$, $P_{\text{вых}} \approx 0,1 \text{ Вт}$. Недостаток: сложнее технология из-за необходимости введения переходных слоев.

Конструкции инжекционных лазеров

1. Наиболее распространена полосковая геометрия активной области, реализуемая с помощью мезотехнологии. Применяются также различные планарные конструкции. Полосковая геометрия наиболее простая, позволяет получить малый объем генерации и малый пороговый ток, эффективные резонаторные свойства (стабилизация одномодового режима, подавление паразитных поперечных мод), хороший теплоотвод, высокую долговечность и надежность.

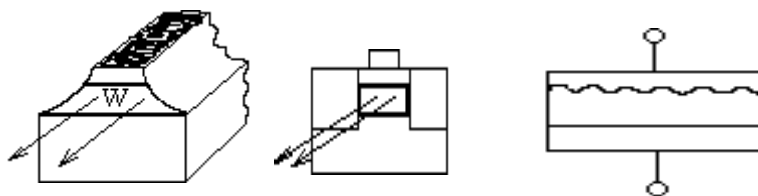


Рис.2.12. Гетеролазеры с полосковой мезаструктурой, с «зарощенной» активной областью и с распределенной обратной связью.

2. Гетеролазеры с «зарощенной» активной областью (нитевидная форма активной области) позволяет уменьшить пороговый ток, обеспечить высокую когерентность. Ограничение с боков может осуществляться гетерограницами, диэлектрическими слоями, ионно-имплантированными карманами.

3. Лазеры с распределенной обратной связью в активной области. Гофрирование одного эпитаксиального слоя создается химическим вытравливанием с шагом 0.15-0.45 мкм. С помощью такой дифракционной решетки выделяется одна продольная мода и обеспечивается высокая монохроматичность и когерентность. Достоинством таких лазеров является частотная избирательность, сужающая спектр генерации до $\Delta\lambda/\lambda \approx 10^{-6}$ - 10^{-7} . Нет необходимости в резонаторе Фабри-Перо; изменяя шаг решетки, можно внешний луч направить под любым углом к внутреннему (до прямого).

Достоинства инжекционных лазеров

1. Малые размеры. Теоретически минимальная длина ~ 10 мкм, площадь поперечного сечения ~ 1 мкм².

2. Высокий КПД преобразования энергии накачки в излучение, приближающийся к теоретическому пределу.

3. Удобное управление: низкие напряжения и токи возбуждения, совместимые с ИС, возможность изменения мощности излучения (V , J), работа в непрерывном режиме.

4. Возможность генерации требуемой спектральной линии (выбор материала с необходимой шириной запрещенной зоны).

5. Твердотельная микроэлектронная групповая технология обеспечивает высокую производительность, использование массового производства, низкую стоимость, долговечность.

6. Совместимость с технологией микроэлектроники открывает принципиальную возможность создания интегрированных лазерных излучателей.

Недостатки инжекционных лазеров:

1. Невысокая когерентность излучения (по сравнению с газовыми лазерами), большая ширина спектральной линии и угловая расходимость луча.

2. Относительно малая генерируемая мощность.

3. Уменьшение мощности при повышении температуры и при воздействии радиации.

Газовые лазеры

В газовых лазерах в качестве активной среды используется смесь газов, обычно включающих инертный газ, в которой создается электрический (тлеющий) разряд. Активный элемент газового лазера представляет собой герметизированную трубку (стеклянную, металлическую, металлокерамическую) с прозрачным световыводящим окном в торце. В трубке имеются элементы для возбуждения газового разряда (наибольшая долговечность и стабильность обеспечивается при использовании холодного алюминиевого катода). Зеркала на торцах трубки заданного размера образуют резонатор.

Наиболее широко используются He-Ne лазеры. В качестве рабочего газа используется смесь гелия и неона при давлении $p = 1$ -5 мм рт.ст., причем массовая доля гелия в смеси в 5-10 раз больше, чем неона. Для описания процессов возбуждения и генерации используется четырехуровневая схема. В рабочей смеси при зажигании тлеющего газового разряда происходит возбуждение сво-

бодными электронами атомов гелия в электрическом поле, энергия которых при соударении разнородных атомов передается атомам неона. В них происходят излучательные переходы с длинами волн 0.633; 1.15; 3.39 мкм (полное число линий около 20). С помощью резонатора выделяется излучение с необходимой длиной волны (обычно 632,8 нм).

Особенности газовых лазеров:

1. Низкий КПД вследствие неэкономичного возбуждения атомов He (полезно используется не более 5% энергии электронов газовой плазмы).
2. Невысокая мощность излучения.
3. Исключительно узкая ширина полосы генерации (в разреженном газе отсутствует взаимодействие излучающих атомов).

Параметры типичного He-Ne-лазера с трубкой длиной $L \sim 30-40$ см и диаметром в несколько сантиметров следующие: выходная мощность излучения $\sim 1-10$ мВт, КПД – 0.1-0.5 %, $\Delta\lambda/\lambda - 10^{-7}-10^{-9}$ (до 10^{-12} у отдельных образцов), диаметр луча 0.3 - 2 мм.

Основной недостаток: высокое напряжение возбуждения (~ 1 кВт при горении и до 10 кВт при возбуждении разряда); вследствие этого габаритные размеры источника питания в несколько раз больше, чем у активного элемента, а общая их масса составляет обычно несколько килограммов. Попытки миниатюризации этих лазеров показали, что их длина не может быть намного меньше 10 см, что обуславливается малым значением коэффициента усиления разреженных газов.

Кроме гелий-неоновых лазеров определенный интерес для оптоэлектроники представляют также газовые лазеры с аргоновым ($\lambda_{\text{изл}} = 0.488$ и 0.515 мкм), криптоновым ($\lambda_{\text{изл}} = 0.568$ мкм) и гелий-кадмиевым ($\lambda_{\text{изл}} = 0.442$ мкм) наполнением, однако они отличаются еще большей громоздкостью и высокой стоимостью.

Твердотельные лазеры

К этой группе относятся лазеры, активной средой которых являются твердотельные диэлектрики (кристаллические или аморфные), легированные активаторами (3d, 4f, 5f элементами). С точки зрения оптических, физико-химических, механических и технологических свойств оптимальной совокупностью параметров обладают следующие активные среды: $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$ (рубин), $\text{CaF}_2:\text{Nd}^{3+}$, стекло с неодимом и др. Для целей оптоэлектроники наибольший интерес представляют лазеры на кристаллах иттрий-алюминиевого граната, легированного неодимом (ИАГ: Nd, АИГ: Nd – $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$). Ионы Nd^{3+} замещают в решетке часть атомов Y (1-3%). Основа - активный элемент - представляет собой стержень ИАГ длиной 10 см с зеркалами на торцах и расположенная параллельно ему дуговая криптоновая лампа такой же стержневидной формы (оптическая накачка). Два элемента помещают внутрь светособирающей системы. Основная длина волны излучения $\lambda=1,06$ мкм.

Достоинствами этих лазеров являются: высокая прочность, теплопроводность, температурная и радиационная стабильность, однородность, высокий ко-

ээффициент усиления (по сравнению с лазерами на рубине и неодимовом стекле).

По сравнению с газовыми для твердотельных лазеров лазеров: на порядок выше КПД (из-за большей эффективности оптической накачки), существенно большая выходная мощность (1 Вт и более); хуже когерентность: $\Delta\lambda/\lambda \approx 10^{-4} \div 10^{-5}$.

Миниатюризация твердотельных лазеров основывается на двух конструктивных усовершенствованиях. Во-первых, это замена криптоновой лампы GaAlAs-светодиодом (или линейкой светодиодов), согласованным с основной полосой поглощения активатора ($\lambda \approx 0.81$ мкм для Nd^{3+}). Габаритные размеры лазера могут быть уменьшены до 10 мм, но при этом выходная мощность уменьшается и угловая расходимость луча увеличивается. Во-вторых, замена активного вещества: тетрафосфат лития-неодима $\text{Nd}_x\text{Li}_{1-x}(\text{PO}_3)_4$, пентафосфат неодима-лантана $\text{Nd}_x\text{La}_{1-x}\text{P}_5\text{O}_{14}$, гексаалюминат лантана-неодима-магния $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{MgAl}_{11}\text{O}_{19}$ с большей концентрацией ионов неодима, чем в алюмоиттриевом гранате. Концентрация ионов Nd увеличивается в 30-40 раз, длина стержня может быть уменьшена до 1 мм, пороговая мощность накачки уменьшается до 1 мВт и менее.

Полупроводниковые лазеры с электронным возбуждением

В полупроводниковых лазерах с электронным возбуждением инверсия населенностей создается при воздействии потока электронов с высокой энергией (20-200 кэВ). Длина пробега электронов составляет десятки мкм, при этом происходит ионизация атомов с последующей излучательной рекомбинацией. Теоретически предельное значение КПД достигает $\sim 30-40\%$.

Конструктивно лазер выполняется в виде электронно-лучевой трубки с экраном-мишенью из полупроводника. По характеру взаимной ориентации электронного и светового лучей различают приборы с поперечной и продольной накачкой: в первых мишень представляет собой монокристалл, боковые грани которого образуют резонатор; во вторых – это тонкая полупроводниковая пленка, состыкованная с внешним полупрозрачным зеркалом.

Достоинства полупроводниковых лазеров с электронным возбуждением:

1. Высокая выходная мощность (особенно в импульсном режиме).
2. Возможность лазерной генерации практически для любых прямозонных полупроводников (в том числе и таких, которые не удается получить в виде монокристаллов и в которых трудно получить p-n переход).
3. Простота двухкоординатного высокоскоростного сканирования и высокочастотная модуляция.

По сравнению с электронно-лучевыми трубками лазеры с электронным возбуждением благодаря большему КПД и меньшей угловой расходимости генерируемых лучей имеют большую яркость (до 10^6 кд/м²). Эти приборы называются квантоскопами и применяются в проекционных дисплеях.

Лазерное оборудование

Механизм возбуждения и кинетика генерации газовых и твердотельных лазеров не позволяют осуществить модуляцию выходного излучения через систему накачки, как в инжекционных лазерах. Для них необходимы внешние модуляторы – приборы, изменяющие интенсивность проходящего через них непрерывного излучения по заданному временному закону. Они могут быть предназначены для работы с дискретной информацией (оптический ключ или переключатель) или с аналоговой (собственно модулятор). В модуляторах обычно используются электрооптические или магнитооптические эффекты.

В ряде случаев необходимо управлять направлением распространения лазерного луча. Для этой цели используют отклоняющие устройства – дефлекторы. Дефлекторы подразделяются на непрерывные (сканеры – с произвольным положением отклоняемого луча в пространстве) и дискретные, осуществляющие перевод луча в одно из N возможных положений. В дефлекторах используются электрооптические и акустооптические эффекты.

ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Фотоприемник – приемник оптического излучения – прибор, в котором под действием оптического излучения происходят изменения, позволяющие обнаружить и измерить характеристики излучения. В основном в основе работы полупроводниковых фотоприемников лежит использование внутреннего фотоэффекта, но могут быть использованы и другие эффекты.

Поглощение света в твердых телах

При прохождении света через вещество его интенсивность понижается. Взаимодействие света с веществом может происходить без изменения энергии фотонов и с изменением. Процессы взаимодействия без изменения энергии фотонов включают в себя отражение, преломление, рассеяние, пропускание света, вращение плоскости поляризации и др.).

Процессы взаимодействия с изменением энергии фотонов включают в себя различные виды поглощения. Часть энергии излучения поглощается в веществе, следовательно, увеличивается энергия электронов в нем.

В общем случае необходимо учитывать 7 механизмов поглощения оптического излучения (рис. 3.1а): 1 – фотогенерация электронно-дырочных пар (собственное поглощение), 2,3 – примесное поглощение, 4 – внутрицентровое поглощение, 5 – экситонное поглощение, 6 – электронное поглощение, вызывающее увеличение энергии электронов без увеличения их концентрации, 7 – фоновое поглощение, т.е. поглощение кристаллической решеткой.

Для всех видов поглощения должны выполняться законы сохранения энергии и импульса. В зависимости от строения зон полупроводника электронные переходы подразделяются на прямые и непрямые (рис. 3.1б), поглощение фотонов сопровождается только лишь прямыми переходами электронов.

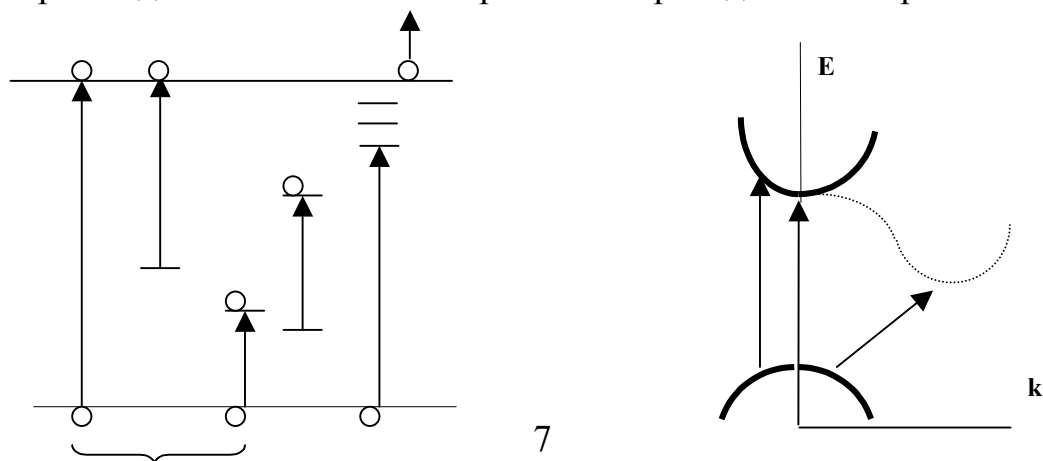


Рис. 3.1. Основные электронные переходы при поглощении света в полупроводнике (а), прямые и непрямые межзонные переходы (б).

Ширина запрещенной зоны E_g полупроводника определяет минимальные значения энергии поглощаемых фотонов: GaAs - 1.4 эВ, CdSe - 1.8 эВ, CdS - 2.5 эВ, ZnS - 3,7 эВ, Ge - 0.7 эВ, Si - 1.1 эВ, GaP - 2.3 эВ, SiC - 2.4-3.1 эВ. Для собственного поглощения должно выполняться условие $h\nu \geq E_g$, т.е. энергия

фотона должна быть не меньше ширины запрещенной зоны. Необходимо учитывать, что для полупроводников в сильном электрическом поле проявляется эффект Франца–Келдыша, приводящий к уменьшению ширины запрещенной зоны $E_g(E)$. Для примесного поглощения энергия фотонов должна быть не меньше глубины залегания примесного уровня в запрещенной зоне.

Количественное описание процессов поглощения света проводится с использованием закона Бугера-Ламберта: Если величина светового потока, падающего на полупроводник - Φ_0 , то на глубине x его величина составляет - $\Phi(x)$. Изменение величины светового потока на расстоянии dx составляет $d\Phi/dx = \alpha * \Phi(x)$, где α коэффициент поглощения света. Тогда $d\Phi/\Phi = -\alpha * dx$, т.е. световой поток спадает по экспоненте вглубь полупроводника $\Phi(x) = \Phi_0 * \exp(-\alpha * x)$. Величина, обратная коэффициенту поглощения, $1/\alpha$ называется длиной поглощения света ($\Phi(x^*) = \Phi_0/e$). При собственном поглощении величина коэффициента поглощения значительна $\alpha = 10^5 \text{ см}^{-1}$, а длина поглощения очень мала $x^* = 0,1 \text{ мкм}$. Для примесного поглощения значения этих параметров зависят от концентрации примеси, для $N = 10^{17} \text{ см}^{-3}$; $\alpha = 10 \text{ см}^{-1}$; $x^* = 0.1 \text{ см}$.

Для 1, 2, 3 (рис. 3.1а) механизмов поглощение сопровождается изменением количества свободных носителей, т.е. изменением проводимости и тока. В фотоприемниках обычно используется собственное поглощение. Примесное поглощение используется редко, например, для расширения спектральной характеристики в длинноволновой области. Экситонное – 5 и внутрицентровое – 4 поглощение, а также поглощение свободными носителями - 6, поглощение кристаллической решеткой – 7 в фотоприемниках практически не используется.

Внутренний фотоэффект в полупроводниках характеризуется квантовым выходом η_1 , т.е. числом неравновесных носителей (пар), создаваемых каждым поглощенным фотоном. Чувствительность фотоприемника зависит от скорости генерации G , которая зависит от величины квантового выхода η_1 .

Получим выражение для скорости генерации носителей. Пусть на единичную площадку приемника по направлению x перпендикулярно поверхности падает поток излучения, имеющий плотность $\Phi_1(x)$. Изменение плотности потока с расстоянием - $d\Phi_1/dx = \alpha * \Phi_1(x)$. Тогда выражение для энергии, поглощенной в единичном объеме на толщине dx - $d\Phi_1 = \alpha * \Phi_1(x) * dx$. Число фотонов Q_1 , поглощенных за 1 секунду в единичном объеме на глубине x : $Q_1 = \alpha * \Phi_1 / h\nu$. Число неравновесных носителей, возникающих за 1 с в единичном объеме, $G(x) = \eta_1 * Q_1 = \eta_1 * \alpha * \Phi_1(x) / h\nu$. В области собственного поглощения $\eta_1 = 1$, тогда $Q_1 \sim 1/\nu$. Если величина светового потока постоянна, скорость генерации носителей G падает с ростом частоты излучения, фототок $\sim G \sim 1/\nu$.

В одних типах приемников (например, фотодиоды) I_Φ определяется величиной произведения $G(x) * V$ (V - объем материала). В других типах (лавинный фотодиод, фоторезистор, фототранзистор) - $I_\Phi = e * G(x) * Z(E)$, где $Z(E)$ – коэффициент усиления, зависящий от электрического поля ($Z - 10^2 - 10^6$).

Чувствительность фотоприемника определяется тем, на сколько сильно изменяются его электрические характеристики при облучении светом, т.е. зависит от квантового выхода и коэффициента усиления.

Основные характеристики и параметры фотоприемников

Спектральная характеристика чувствительности отображает реакцию приемника на воздействие излучения с разной длиной волны, она определяет спектральную область применения прибора.

Энергетическая (световая) характеристика отображает зависимость фотоответа прибора от интенсивности возбуждающего потока излучения (ампер-ваттная, вольт-ваттная, люкс-амперная). Энергетической характеристикой называют также зависимость интегральной или спектральной чувствительности приемника от интенсивности облучения.

Пороговые характеристики – показывают способность фотоприемника регистрировать излучение малой интенсивности. В основном они определяются уровнем собственных шумов прибора – флуктуаций тока в отсутствие облучения или при немодулированном световом потоке.

Вольт-амперная характеристика отображает зависимость тока фотоприемника от приложенного напряжения.

Частотные характеристики описывают зависимость чувствительности от частоты модуляции излучения или длительности импульсов и характеризуют инерционность прибора.

Температурные характеристики определяют зависимость параметров прибора от температуры окружающей среды. Рабочий температурный интервал указывают в паспорте прибора, при этом указывают значения основных параметров в крайних точках интервала.

К основным параметрам фотоприемников относят рабочее и максимально допустимое напряжение, мощность рассеивания, тепловое сопротивление.

Чувствительность фотоприемников описывается токовой или вольтовой чувствительностью. Токовая чувствительность (А/лм или А/Вт) определяет значение фототока, создаваемого единичным потоком излучения: $S_I = I_\Phi / \Phi$.

Вольтовая чувствительность характеризует значение фотонапряжения, отнесенное к единице потока излучения (В/лм или В/Вт): $S_V = V_\Phi / \Phi$.

В общем случае зависимости $I_\Phi(\Phi)$ и $V_\Phi(\Phi)$ являются нелинейными, то есть чувствительность может зависеть от величины потока излучения.

Коротковолновая (длинноволновая) граница спектральной чувствительности определяется наименьшей (наибольшей) длиной волны монохроматического излучения, при которой монохроматическая чувствительность прибора равна 0,1 от ее максимального значения.

Динамический диапазон линейности (в децибелах) характеризует область значений светового потока Φ (от Φ_{\min} до Φ_{\max}), в которой энергетическая (световая) характеристика является линейной: $\Delta = 10 \lg \Phi_{\max} / \Phi_{\min}$.

Инерционность фотоприемника характеризуют постоянные времени нарастания τ_n и спада $\tau_{сп}$ фотоотклика для импульса излучения. Рост и спад фототока обычно описывается экспоненциальными зависимостями:

$$J_\Phi = J_{\max} (1 - \exp(-t/\tau_n)), J_\Phi = J_{\max} \exp(-t/\tau_{сп}).$$

Постоянные времени определяют предельные значения рабочей частоты модуляции светового потока, при котором еще не заметно уменьшение фотоот-

клика. Обычно $\tau_n < \tau_{сп}$, но имеют одинаковый порядок. При синусоидальной модуляции светового потока быстродействие приборов характеризуют граничной частотой, на которой фотоотклик уменьшается до уровня 0,7 стационарного значения.

Токи в фотоприемнике при отсутствии и наличии освещения испытывают случайные отклонения ΔJ от среднего значения. Отклонения имеют различные знаки, поэтому среднее значение отклонения их среднего значения $\Delta J_{ср}=0$. Мера случайного отклонения (флуктуации.) – среднее значение квадрата отклонения ΔJ^2 . Фототок, соответствует световому сигналу, наблюдается на фоне этих отклонений (шумов), определяющих наименьший световой сигнал, который может быть зафиксирован. Шумы могут иметь различное происхождение. Тепловой шум (Джонсона-Найквиста) обусловлен хаотичностью теплового движения электронов, концентрация их в различных участках полупроводников изменяется со временем. Отклонения тока $\Delta J^2_{ср} = \Delta f kT/R$, где Δf - полоса наблюдаемых частот колебаний (разложение Фурье), R - сопротивление образца, T - температура. Дробовый шум обусловлен отклонением от среднего значения числа электронов, проходящих через прибор при постоянном внешнем напряжении. $\Delta J^2_{ср} = 2e J \Delta f$. Причинами его возникновения могут служить случайные процессы генерации, рекомбинации и диффузии и др. Существуют и другие виды шумов: фотонный, фоновый, технологический и т.д. Пороговая чувствительность – уровень светового потока $\Phi_{п}$, при котором сигнал равен шуму, то есть $\Delta J^2_{ф} = \Delta J^2_{ср}$. Так как $(\Delta J^2)^{1/2}$ и $\Phi_{п}$ могут зависеть от площади S приемника и полосы частот пропускания Δf , то при оценке способности фотоприемника регистрировать слабые световые потоки в качестве параметра используется приведенный пороговый поток $\Phi_{п}^* = \Phi_{п} / (S \Delta f)^{1/2}$ или обнаружительная способность $D^* = 1 / \Phi_{п}^*$. Значение D^* относят обычно к λ_{max} , соответствующей максимальной спектральной чувствительности приемника, к определенной частоте модуляции (прерывания) светового потока и полосе Δf , (обычно 1 Гц), включающей f , - размерность $[D^*(\lambda_{max}, f, \Delta f)] = м*Гц / Вт$.

Оптическая информация в оптоэлектронных устройствах практически сводится к двум видам: дискретные сигналы (во времени, пространстве и в спектральной области) и световые образы.

К приемникам дискретных сигналов предъявляют следующие требования:

1. Высокая чувствительность на заданной длине волны, задаваемой источником (лазером, излучающим диодом и др.), т.е. высокий КПД.
2. Высокое быстродействие, которое может быть обеспечено выбором физических принципов работы, уменьшением значений емкости и сопротивления.

К фотоприемникам световых образов предъявляются следующие требования:

1. Многоэлементность – пространственная разрешающая способность возрастает, при увеличении числа ячеек.
2. Совместимость фоточувствительного раstra с электронной схемой считывания (сканирования) и воспроизведения информации, в оптимальном случае обе части устройства конструктивно и технологически объединены.
3. Широкий спектр (например, видимый диапазон).

4. Режим фотонного накопления – смена воспроизводимых образов достаточно инерционна ($\sim 1/25$ с), но каждая ячейка должна быть быстродействующей.

5. Широкий рабочий динамический диапазон, т.е. приемник должен воспринимать как яркие, так и бледные области.

6. Минимальный уровень шумов.

Болометры

Приборы для изменения энергии излучения, основанные на изменении сопротивления термочувствительного элемента при нагревании вследствие поглощения измеряемого потока излучения. Используется для измерения мощности интегрального (суммарного) излучения. Данный вид приемников оптического излучения является одним из первых, ‘дооптоэлектронных’, но используемых до сих пор.

Термочувствительный элемент в болометрах представляет собой тонкий слой (0,1–1 мкм) металла (Ni, Au, Bi и др.), поверхность которого покрыта слоем черни, имеющим большой коэффициент поглощения в широкой области спектра, или полупроводник с большим температурным коэффициентом сопротивления $\sim 0,04 - 0,06 \text{ K}^{-1}$. Размер и форма термочувствительного элемента определяется природой источника. Обычно он представляет собой две одинаковые полоски, вторая используется для компенсации в основном температурных помех. Разность температур ΔT_{12} преобразуется в разность сопротивлений ΔR , проявляемую в разности токов ΔJ и разности напряжений ΔV на нагрузочном сопротивлении.

Металлические элементы в виде фольги или пленки из никеля, золота или висмута, имеют следующие значения параметров:

	Ni	Bi
R	5–10 Ом	150–200
Чувств.	7–10 В/Вт	13–15
τ	0,02 с	0,02

Полупроводниковые элементы из NiO, MnO, CoO, изготавливаются по толстопленочной технологии. Также используются тонкие пленки полупроводников: кремния, арсенида галлия и др. Для них $R \sim 1-10 \text{ МОм}$, чувствительность $\sim 50-10^3 \text{ В/Вт}$, $\tau \sim 1-5 \text{ мс}$. Чувствительность при охлаждении растет, но в то же время возрастает инерционность. Перспективными считаются болометры на основе сверхпроводниковых материалов.

Болометры относятся к приемникам ИК-излучения. Их основное достоинство и основной недостаток заключается в том, что они являются широкополосными приемниками излучения постоянной интенсивности.

Пироэлектрические приемники

В этом виде приемников оптического излучения используется пироэлектрический эффект, использующий температурную зависимость спонтанной поля-

ризации сегнетоэлектрических материалов, т.е. они являются также тепловыми приемниками. Тепловые приемники излучения на основе пироэлектриков можно рассматривать как генераторы напряжения, внутреннее сопротивление которых носит емкостной характер, поэтому они пригодны для регистрации потоков излучения переменной интенсивности. Чувствительный элемент в пироэлектрических приемниках представляет собой тонкую пластину пироэлектрика (триглицинсульфат, BaTiO_3 , PbTiO_3 и др.) с электродами на поверхности перпендикулярной полярной оси. Электрод со стороны источника покрыт слоем поглотителя (0,2 – 12 мкм). Наиболее высокое значение пирокоэффициента из распространенных пироэлектриков имеет керамика на основе цирконата-титаната свинца, легированного лантаном (ЦТСЛ) - до $400 \text{ мкКл/м}^2 \cdot \text{К}$, но материал имеет и существенный недостаток – низкую температурную стабильность.

Чувствительность пироэлектрических приемников постоянна в широком диапазоне частот, поэтому они могут быть использованы при высоких частотах модуляции излучения (до 50 МГц), тогда как другие теплоприемники используются до 100 Гц. Пироэлектрические приемники применяются для регистрации излучения с частотой от 10^{10} до 10^{20} Гц, т.е. от инфракрасного до γ -излучения, диапазон регистрируемой мощности $10^{-9} - 10^9$ Вт. Они могут использоваться при измерении быстро меняющихся тепловых процессов: в тепловидении, лазерной технике, в медицинских и космических приборах, преобразователях энергии, в частности, в пироконах, преобразующих распределение температуры неравномерно нагретых поверхностей в световые образы.

Фоторезисторы

Фоторезистор – фотоэлектрический полупроводниковый приемник излучения, принцип действия которого основан на эффекте фотопроводимости. Фоторезистор представляет собой обычно тонкую полоску полупроводника с омическими контактами на концах. В основе его используется явление внутреннего фотоэффекта (фотопроводимости), открытого У.Смитом в 1873 г. Эффект заключается в том, что при освещении однородного полупроводника его электропроводность увеличивается.

Основные параметры фоторезисторов: фоточувствительность S_f , коэффициент внутреннего усиления фототока (Z), обнаружительная способность (D^*) и др., а также специфические параметры: сопротивление в темновом R_T и засвеченном $R_{св}$ состояниях, их отношение $R_T/R_{св}$, постоянные времени релаксации фотопроводимости τ .

Упрощенная теория фоторезисторов, позволяющая связать параметры приборов с параметрами используемых материалов, использует следующие основные допущения:

- 1) Геометрически резистор представляет собой параллелепипед (рис. 3.2).
- 2) Излучение полностью поглощается в полупроводнике, квантовый выход внутреннего фотоэффекта $\eta = 1$.
- 3) Пленка освещена равномерно и генерация однородна по толщине.

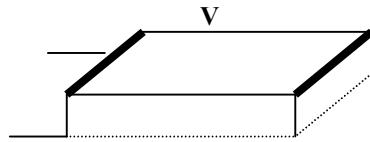


Рис. 3.2. Упрощенная схема фоторезистора.

4) Поверхностными и контактными эффектами пренебрегают.

5) Дрейф и рекомбинация в объеме характеризуются некоторыми усредненными постоянными значениями μ_n , μ_p и τ_n , τ_p .

6) В засвеченном состоянии реализуется высокий уровень возбуждения ($n_\phi \approx p_\phi \gg n_0, p_0$).

7) Полупроводник имеет монополярную проводимость, обычно электронную, т. е. неосновные носители заряда сразу же захватываются ловушками.

Эти ограничения позволяют легко определить все основные параметры.

Ток через фоторезистор – $J_\phi = V_R / R_{св}$, где V_R - напряжение, приложенное к фоторезистору. Отношение темнового сопротивления к световому:

$R_T / R_{св} = \rho_0 * \mu_n * \tau_n * e * \lambda * P_{изл} / (hc * V)$, где $P_{изл}$ - мощность излучения, падающего на фоторезистор, V – объем фоторезистора.

Чувствительность $S_V = \mu_n * \tau_n * (e * \lambda / hc) * (V_R / I^2)$.

Коэффициент усиления $Z = \mu_n * \tau_n * V_R / I^2 = \tau_n / t_{пр}$. $t_{пр} = I^2 / \mu_n * V_R$ - время пролета электрона через фоторезистор.

К особенностям данных соотношений относится то, что значения всех параметров возрастают, когда $\mu_n * \tau_n$ возрастает, то есть, для фоторезисторов лучше использовать полупроводники с большими подвижностями μ_n и временами жизни носителей τ_n , что является редко совместимым. Поскольку $R_T / R_{св} \sim 1/V$, то выгодно уменьшать объем полупроводника. Коэффициент усиления и чувствительность Z и S_ϕ возрастают $\sim V_R / I^2$, но при высоких напряженностях поля в полупроводнике образуется пространственный заряд, и когда он захватывает всю область между контактами, тогда $t_{пр} = \tau_M$ – времени диэлектрической релаксации, не зависящем от приложенного напряжения.

Предельное теоретическое значение коэффициента усиления $Z_{max} = \tau_n / \tau_M$ для высокоомных полупроводников достигает $10^6 - 10^7$. В низкоомных полупроводниках с ростом напряжения уменьшается μ_n и происходит ограничение скорости носителей заряда, приводящее к насыщению коэффициента усиления

$$Z_{max} = \tau_n * V_{max} / l.$$

С ростом величины приложенного напряжения V_R и мощности падающего излучения $P_{изл}$ происходит разогрев фоторезистора и увеличение шумов, тогда R_T уменьшается, $R_{св}$ - увеличивается. Максимальная рабочая температура связана с шириной запрещенной зоны применяемого полупроводника и длиной волны оптического излучения следующими соотношениями: $T_{max} = C_1 * E_g = C_2 * \lambda$, где E_g измеряется в эВ; λ - в мкм. $C_1 - 400 - 800$ К/эВ для примесного и собственного поглощения в полупроводниках; $C_2 - 500 - 1000$ К/мкм.

Инерционность фоторезистора, определяемая значениями постоянной времени релаксации полупроводника, $\tau_{рел} = C_3 * \tau_n$, где обычно $C_3 = 1$, зависит от степени возбуждения и типа фотопроводника.

Добротность фоторезистора характеризуется произведением коэффициента усиления на полосу частот, $-Q = Z / \tau_{\text{дел}} = \mu_n * V_R / I^2$.

Основными материалами, используемыми для изготовления фоторезисторов, являются полупроводниковые соединения: CdS, CdSe, PbS, получаемые по толсто- и тонкопленочной и тонкопленочной технологии, а также - Si, Ge, GaAs, используемые в полупроводниковой технологии. Фоторезисторы на основе соединения CdSe характеризуются следующими значениями параметров: $R_T \sim 10^6$ Ом, $\lambda_{\text{max}} \sim 0,7$ мкм, $V_{\text{раб}} \sim 20$ В, $S_I \approx 600$ мА/лм ($E \approx 200$ лк). Для фоторезисторов на основе PbS - $R_T / R_{\text{св}} \approx 10^5 - 10^6$, $\tau \sim 0,1$ мс. Для фоторезисторов на основе GaAs инерционность приборов значительно ниже $\tau \sim 10^{-12}$ с - для мощного лазерного излучения, $\tau \sim 10^{-9}$ с для обычной засветки. На основе твердых растворов A^3B^5 могут быть изготовлены сверхрешетки, для которых $Z > 10^4$, $V_R < 1$ В.

Достоинствами фоторезисторов являются линейность вольтамперной характеристики, отсутствие выпрямления и внутренней ЭДС, основным недостатком – невысокое быстродействие.

Фотодиоды

Фотодиод – фоточувствительный полупроводниковый диод с p-n переходом. При освещении p-n перехода в нем возникают электронно-дырочные пары, которые разделяются электрическим полем (фотовентильный режим). Если фотодиод включен на бесконечно большую нагрузку, то в нем реализуется фото-вольтаический эффект. В p-n переходе возникает фотоЭДС в результате накопления зарядов – $V_{\text{ф}}$. Если внешняя цепь замкнута, то в ней при освещении фотодиода протекает фототок $J_{\text{ф}}$. Направление тока совпадает с направлением обратного тока перехода. $V_{\text{ф}}$ – смещает p-n переход в прямом направлении, снижая величину потенциального барьера.

Вольт-амперная характеристика фотодиода описывается выражением:

$J = J_0 (\exp (eV / kT) - 1) - J_{\text{ф}}$. Если $J = 0$, $V = V_{\text{ф}} = kT * \ln (J_{\text{ф}} / J_0 + 1)$, таким образом - $V_{\text{ф}}$ - напряжение холостого хода, нелинейно зависит от Φ .

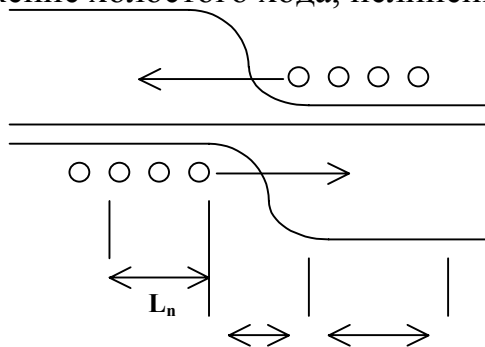


Рис. 3.3. Энергетическая диаграмма p-n перехода.

Если сопротивление внешней цепи бесконечно мало - $V_{\text{ф}} = 0$, в ней протекает ток $J = J_{\text{ф}}$ - ток короткого замыкания. Если весь свет поглощается вблизи p-n перехода, $J_{\text{ф}} = e * \eta * \Phi / h\nu$. Если часть света поглощается за пределами, то вме-

сто квантового выхода η подставляется величина $\eta_0 = \eta * K_C$, где K_C - коэффициент собирания фотоэлектронов и дырок (<1).

Время пролета электронами и дырками области поля в p-n переходе определяется скоростью дрейфа и составляет $\sim 10^{-10}$ с. Однако значительная часть излучения поглощается за пределами области пространственного заряда, фотогенерированные носители попадают в ОПЗ вследствие диффузии. Диффузионная длина неосновных носителей заряда в кремнии $L_{n,p}$ составляет $\sim 5 * 10^{-3}$ см, что ограничивает время диффузионного переноса - $\tau \sim 10^{-6} - 10^{-7}$ с.

Область спектральной чувствительности определяется зависимостью коэффициента поглощения от длины волны оптического излучения $\alpha(\lambda)$. Длинноволновая граница λ_{max} определяется шириной запрещенной зоны используемого полупроводника и составляет 1.1 мкм для кремния и 1.7 мкм для германия, для больших длин волн поглощение резко уменьшается. Коротковолновая граница λ_{min} определяется резким увеличением коэффициента поглощения $>10^5 \text{ см}^{-1}$, тогда поглощение происходит очень близко к поверхности, где велика скорость рекомбинации ($\lambda_{min} \sim 0.3$ мкм для Si и Ge).

Частотные характеристики фотодиодов определяются тремя факторами: диффузией, дрейфом и емкостью ОПЗ. Для уменьшения длительности диффузионных процессов переход располагают близко к поверхности. В фотодиодах с p-n переходом основное поглощение излучения происходит не в ОПЗ, а в p- или n-области. Так как, обычно, $D_n > D_p$, в качестве внешней используют p-область. Для уменьшения длительности процессов перезарядки емкости ОПЗ уменьшают емкость p-n перехода, оптимизируя его толщину, $d_{opt} \sim 5$ мкм. Фотодиод не обладает внутренним усилением ($Z=1$).

Для снижения потерь на отражение света от поверхности используют просветляющее покрытие, обычно пленки ZnS ($n=2.3$).

Достоинства фотодиодов:

1. Простая технология, однородность параметров, изготавливаемых структур (что особенно важно для многоэлементных приемников).
2. Малое сопротивление базы обеспечивает высокие значения фотоЭДС (для Si до 0.7-0.8 В).
3. Совместимость технологии с технологией ИС, что дает возможность изготавливать интегральные фотоприемники.

P-i-n фотодиоды

P-i-n фотодиоды представляют собой наиболее типичные фотоприемники на основе p-n переходов с большим обедненным слоем. Структура этих диодов включает n^+ -основу, достаточно широкую слаболегированную i-область и тонкую p^+ -область. Оптимальное сочетание высокой чувствительности и быстрого действия в них обуславливается малым влиянием процессов диффузии носителей.

Изготовление структур производится с использованием планарно-эпитаксиальной технологии. В качестве базовой подложки используется высокоомный

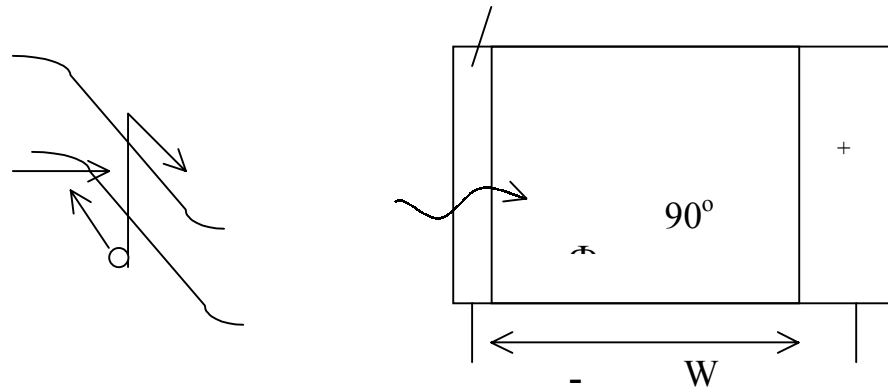


Рис. 3.4. Энергетическая диаграмма p-i-n фотодиода при освещении под обратным смещением (а) и относительные размеры p-i-n областей структуры (б).

слабелегированный кремний p-типа проводимости (π -Si, $\rho > 10^4$ Ом*см) толщиной 200 мкм. На ней с помощью эпитаксии выращивается пленка n^+ -Si с $\rho < 0,01$ Ом*см толщиной 30-70 мкм. Затем производится подшлифовка пластины со стороны высокоомной области до ее толщины 30-70 мкм. (Прямая эпитаксия слабелегированного кремния $\rho > 100-1000$ Ом*см на низкоомной подложке затруднительна, так как процесс должен протекать очень долго, при этом образуется повышенная плотность дефектов.) На высокоомной стороне пластины с помощью диффузии формируется низкоомная p^+ -область толщиной – 0,2-0,3 мкм.

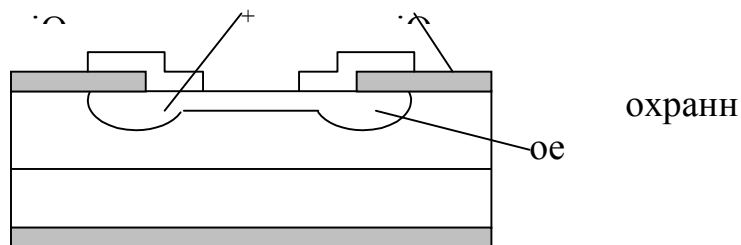


Рис. 3.5. Структура p-i-n фотодиода.

К достоинствам p-i-n фотодиодов относятся следующие:

1. Высокая фоточувствительность (для $\lambda \approx 0,9$ мкм $S_{J_{max}} \approx 0,7$ А/Вт) и высокое быстродействие ($10^{-9} - 10^{-10}$ с).
2. Высокая фоточувствительность в длинноволновой части спектра (обусловлена широкой i-областью).
3. Малая барьерная емкость.
4. Высокая эффективность при малых обратных напряжениях.

К недостаткам p-i-n фотодиодов относятся:

1. Малая фотоЭДС ($\leq 0,35-0,45$ В).
2. Повышенные токи утечки.
3. Невысокая воспроизводимость.
4. P-i-n диоды не совместимы с ИС.

Фотодиоды с барьером Шоттки

Фотоприемники с поверхностным барьером Шоттки также обладают высоким быстродействием и эффективностью. Барьеры на контакте металла с полупроводником, могут быть получены и на полупроводниковых материалах, в которых невозможно создать р-п переходы. Если электронный полупроводник контактирует с металлом, у которого работа выхода меньше работы выхода полупроводника, то определенное число электронов переходит из полупроводника в металл. Ионизированная донорная примесь в полупроводнике образует слой положительного пространственного заряда, обладающий высоким сопротивлением. При включении диода в обратном направлении (минус на металле) ширина ОПЗ увеличивается в соответствии с формулой

$$d_{\text{ОПЗ}} = [2\epsilon\epsilon_0 (\phi_{\text{к}} + V) / eN_{\text{D}}]^{1/2},$$

где $\phi_{\text{к}}$ – контактная разность потенциалов. Если $N_{\text{D}} = 10^{17} \text{ см}^{-3}$; $V \approx 1-5 \text{ В}$; то $d \approx (1 - 10) * 10^{-5} \text{ см}$.

Тонкий слой металла толщиной 0,01 мкм наносится на полупроводник вакуумным напылением. Для уменьшения потерь излучения, вызываемых отражением света от поверхности металла, на него наносят просветляющее покрытие (ZnS).

Излучение направляют сквозь эту почти прозрачную пленку (слой Au пропускает 95% потока излучения с $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$). Если $d > x^*$, основная часть излучения поглощается в ОПЗ. Возникающие электронно-дырочные пары быстро разделяются полем и время пролета носителей может быть очень малым ($10^{-11} - 10^{-10} \text{ с}$). Таким образом, фотодиод с барьером Шоттки является аналогом р-і-п фотодиода в коротковолновой части спектра, когда все излучение поглощается в ОПЗ. В этих фотодиодах с уменьшением длины волны излучение так же поглощается в слое пространственного заряда, но ближе к металлу. Поэтому коротковолновая граница спектральной области смещается в сторону меньших значений и они могут использоваться как эффективные приемники ультрафиолетового излучения. Длинноволновая граница определяется величиной потенциального барьера контакта металл-полупроводник и расположена дальше, так как высота барьера всегда меньше ширины запрещенной зоны. Таким образом, спектральная область фотодиодов с барьером Шоттки значительно шире в обе стороны, чем у р-п переходов.

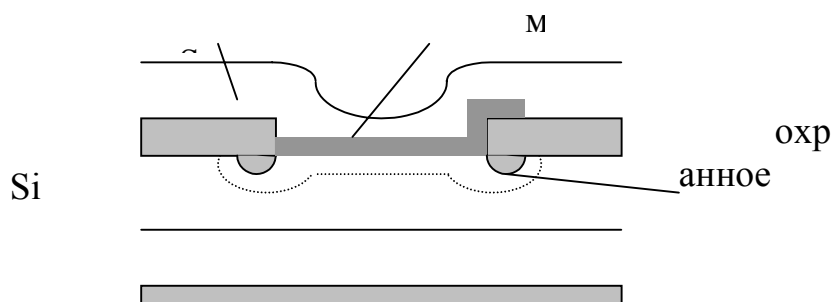


Рис. 3.6. Структура фотодиода с барьером Шоттки.

По сравнению с p-n переходами сопротивление диодов Шоттки намного меньше, поэтому время перезарядки мало и инерционность обусловлена только временем пролета носителей через область пространственного заряда. Величина τ может быть порядка 10^{-10} - 10^{-11} с, что позволяет использовать фотодиоды при СВЧ модуляции излучения. Чувствительность диодов достигает 0,5 А/Вт.

Достоинства фотодиодов с барьером Шоттки:

1. Простота изготовления и разнообразие полупроводников (даже те, на которых не удастся создать p-n переход: Si, Ge, A^3B^5 , A^2B^6).
2. Высокая чувствительность и быстродействие.
3. Совместимость с технологией ИС.

Гетерофотодиоды

Гетерофотодиоды являются перспективными фотоприемниками, сочетающими высокую чувствительность и быстродействие. Для изготовления фотодиодов используют гетероструктуры на основе соединений A^3B^5 . Типичная структура гетерофотодиода показана на рис. В ней создаются две области: широкозонное окно и фоточувствительный p-n переход. Окно из широкозонного сильнолегированного полупроводника обеспечивает малое сопротивление и высокую прозрачность для принимаемого излучения, которое поглощается в слое узкозонного полупроводника, толщина p-слоя обычно соответствует длине поглощения излучения.

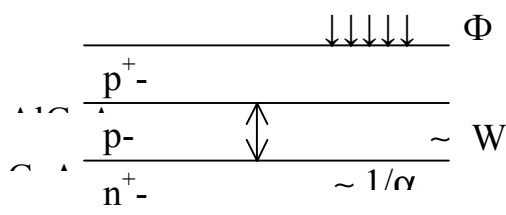


Рис. 3.7. Расположение слоев в гетерофотодиоде.

Процессы поглощения излучения и разделения фотоносителей в гетерофотодиодах аналогичны явлениям, происходящим в p-i-n фотодиодах и фотодиодах с барьером Шоттки. Их инерционность также определяется временем пролета носителей через область пространственного заряда.

Для приема излучения с длиной волны $\lambda = 0,85$ мкм используются p-n переходы на основе GaAs или GaAsP, для $\lambda = 1,3 - 1,55$ мкм – InGaAs и InGaAsP.

Достоинства гетерофотодиодов:

1. Высокое быстродействие ($\sim 10^{-10}$ с) и фоточувствительность при малых рабочих напряжениях.
2. Высокие значения фотоЭДС (для GaAs – $V_{xx} = 0,8 - 1,1$ В).
3. Высокий КПД, близкий к 100%.
4. Меньшие, чем у обычных фотодиодов, темновые токи и шумы.
5. Большой температурный диапазон и радиационная стойкость.
6. Технологическая совместимость с устройствами интегральной оптики.

В то же время используемые материалы являются более дорогими и технология изготовления более сложная.

МДП – фотодиоды

В них для приема излучения используется фоточувствительная МДП-структура. В области пространственного заряда вблизи поверхности происходит фотогенерация и разделение носителей. Вследствие этого происходит модуляция проводимости, возникает наведенная фотоЭДС (для МДП-ИС внутреннее сопротивление очень велико). Для регистрации излучения может использоваться также фотоёмкостный эффект. В МДПДМ-фотоприемниках необходимо применять динамический режим работы к границе раздела, диэлектрикам). Достоинствами МДП-фотодиодов являются функциональная и конструктивно-технологическая гибкость, малые шумы и темновые токи, совместимость с МДП-ИС. В то же время технология изготовления таких приемников сложнее (высокие требования

Лавинные фотодиоды

В лавинных фотодиодах происходит усиление первичного фототока вследствие лавинного умножения неравновесных носителей в сильном электрическом поле слоя пространственного заряда p-n перехода при условии, что ширина ОПЗ превышает длину свободного пробега носителей заряда. Процесс умножения происходит следующим образом. При увеличении обратного напряжения на p-n переходе до определенной величины $V_{п}$ носители заряда в сильном электрическом поле ($E \sim 10^4 - 10^5$ В/см) начинают набирать достаточную скорость для ионизации атомов с образованием пары электрон-дырка. Образовавшиеся носители сами принимают участие в дальнейшей ионизации. Процесс нарастания концентрации носителей, а следовательно и тока, носит лавинный характер. Скорость нарастания тока зависит от коэффициентов ударной ионизации электронов и дырок.

Коэффициент умножения носителей $M = J / J_0 = n / n_0$, где n_0 - число электронов, вошедших в область сильного поля, n - число электронов, вышедших из этой зоны. Величина M отражает общее число ионизаций, совершенных как первичными, так и вторичными электронами. $N = (n - n_0) / n$ - выход процесса ионизации, связан с коэффициентом умножения соотношением $M = 1 / (1 - N)$, где N - число ионизаций, приходящихся на один электрон, прошедший область поля. Выход ионизации зависит от коэффициентов ударной ионизации (числа пар, созданных носителем на 1 см пути) для электронов (α_i) и дырок (β_i), а также от ширины области поля (d). Если $\alpha_i = \beta_i$ и электрическое поле однородное - $N = \alpha_i \cdot d$, для неоднородного поля $N = \int_0^d \alpha_i \cdot dx$. N изменяется от 0 для слабых полей до 1 для $V_{п}$, когда ток резко возрастает и $M \rightarrow \infty$. Значение коэффициента умножения M определяет величину коэффициента внутреннего усиления фотодиода (Z до 10^3). Инерционность процесса лавинного умножения очень мала $< 10^{-9}$ с.

Аналогичным образом происходит и умножение носителей заряда, возникающих при освещении фотодиода. Коэффициент умножения $V = J / J_p$ определя-

ется отношением полного тока на выходе к начальному току, состоящему из фототока и темнового тока ($J_p = J_\Phi + J_S$). Выходной ток также состоит из умноженного фототока и умноженного темнового тока $J = J_{\Phi y} + J_{Sy}$. Следовательно, $M = (J_{\Phi y} + J_{Sy}) / (J_\Phi + J_S)$. Обычно коэффициент умножения определяется по эмпирической формуле $M = [1 - (V/V_n)^c]^{-1}$, где $c=2-6$ - постоянный коэффициент для каждого полупроводникового материала.

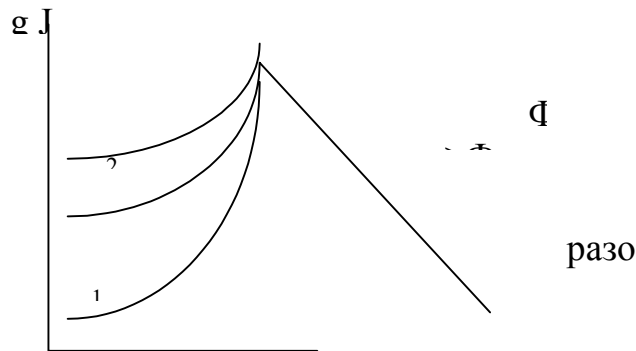


Рис. 3.8. Вольт-амперные характеристики лавинного фотодиода без освещения ($\Phi=0$) и при разных уровнях освещения ($\Phi_2 > \Phi_1$).

Очевидно, что большие значения коэффициента умножения и фоточувствительности могут быть получены только при малом темновом токе. $V_{\text{раб}}$ близко к V_n , поэтому лавинные фотодиоды имеют «внутреннее» усиление, которое не сопровождается снижением быстродействия.

Высокое усиление и быстродействие фотоприемников можно получить, если p-i-n фотодиоды подключить к электронной схеме с любым большим коэффициентом усиления, но шумы входных каскадов усилителей обычно на несколько порядков больше шумов качественного p-i-n фотодиода (у которого шумы малы, а квантовая эффективность велика), поэтому реализовать все потенциальные возможности p-i-n фотодиода не удастся вследствие низкого порога чувствительности). Введение внутреннего усиления, воздействующего и на сигнал и на шум, приводит к возрастанию отношения сигнал/шум при условии, что усиленный шум фотоприемника меньше шумов входного каскада усилителя, поэтому лавинные фотодиоды имеют преимущества перед p-i-n фотодиодами в условиях приема слабых, минимально различимых сигналов.

Оптимальной структурой кремниевых лавинных фотодиодов является n-p-i-p структура, или ЛФД с проникновением (проколом):

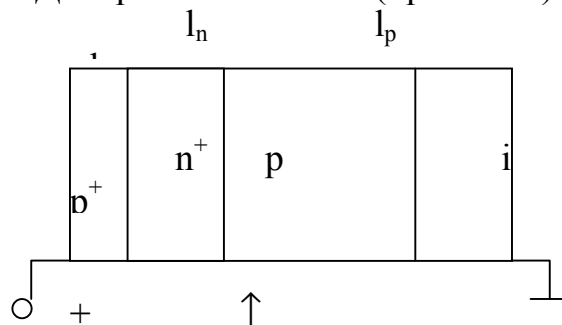


Рис. 3.9. Простая геометрическая модель лавинного фотодиода.

В этом случае максимальное значение напряженности электрического поля E_{\max} , достаточное для возникновения и поддержания лавинного размножения, создается в n^+ - p переходе. Фотоносители быстро вытягиваются из i -области и размножаются в p -области.

Изготовление лавинных фотодиодов производится с использованием обратной эпитаксии, аналогично технологии изготовления p - i - n фотодиодов. Необходимо точно задать распределение примесей, n^+ -область должна иметь малое удельное сопротивление, тогда ОПЗ имеет малый размер в n^+ -области и пространственный заряд распределяется почти полностью в p - и i -областях.

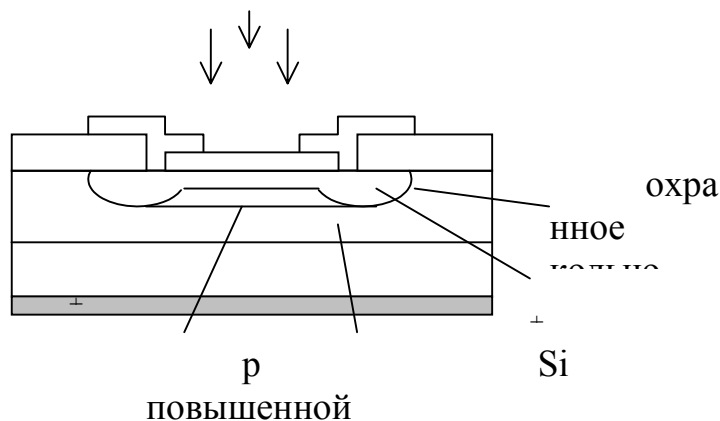


Рис. 3.10. Структура лавинного фотодиода.

Типичные значения: $\Phi=20-300$ мкм, $l_i=20-70$ мкм, $l_p=2-5$ мкм, $l_n / l_p=0.1-0.3$. Концентрация примесей в i -области: $N_A=(0.2\div 1)\cdot 10^{13}$ см⁻³, $E_{\max}=(3-5)\cdot 10^5$ В/см, $E_i=10^3 - 10^4$ В/см, $\delta D_A / D_A \leq 3\%$. Рабочее напряжение должно быть достаточным для того, чтобы ОПЗ распространялось на всю p - и i -область.

Лавинные фотодиоды изготавливаются с середины 60-х годов на основе германия, затем на основе кремния, и с конца 70-х на A^3B^5 .

Особенности лавинных фотодиодов:

1. Сложность, уникальность изготовления, высокая стоимость.
2. Высокое рабочее напряжение, расход мощности, следовательно, они не совместимы с ИМС.
3. Необходимость стабилизации рабочего напряжения и температуры.
4. Отсутствие конструкций матричного типа.

Основные достоинства лавинных фотодиодов: большое усиление, высокое быстродействие и малые шумы. Поэтому эти фотоприемники широко используются в ВОЛС. К недостаткам лавинных фотодиодов следует отнести, во-первых, зависимость коэффициента умножения от интенсивности света и соответствующее нарушение линейности зависимости $I(\Phi)$, во-вторых, высокие требования к стабильности питающего напряжения (0,01- 0,02 %), поскольку коэффициент умножения сильно зависит от напряжения.

Фототранзисторы

Фототранзистор – фоточувствительный полупроводниковый приемник излучения, по структуре подобный транзистору и обеспечивающий внутреннее усиление сигнала. Его можно представить состоящим из фотодиода и транзистора.

Фотодиодом является освещаемая часть перехода база-коллектор. Транзистором – часть структуры, расположенная непосредственно под эмиттером. Так как фотодиод и коллекторный переход транзистора конструктивно объединены, то фототок суммируется с коллекторным током. Напряжение питания подводят так, коллекторный переход был закрыт, а эмиттерный – открыт. База может быть отключенной.

При освещении базы в ней возникают электронно-дырочные пары. Так же как и в фотодиоде, пары, достигшие в результате диффузии коллекторного перехода, разделяются полем перехода, неосновные носители из базы движутся в коллектор, при этом его ток увеличивается. Основные носители остаются в базе, понижая ее потенциал относительно эмиттера. При этом на эмиттерном переходе создается дополнительное прямое напряжение, вызывающее дополнительную инжекцию из эмиттера в базу и соответствующее увеличение тока коллектора.

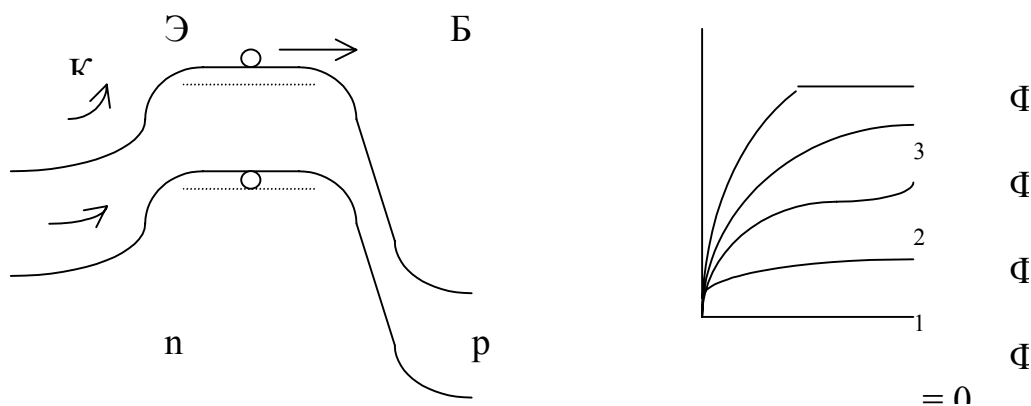


Рис. 3.11. Энергетическая диаграмма фототранзистора (а) и вольт-амперные характеристики фототранзистора при разных уровнях освещения (б).

Рассмотрим, например, работу фототранзистора в схеме с общим эмиттером при отключенной базе. Фототок коллекторного перехода суммируется с обратным током коллектора, поэтому в формуле для тока транзистора вместо J_{K0} следует поставить $J_{K0} + J_{\Phi}$: $J = (J_{K0} + J_{\Phi}) / (1 - \alpha)$. При $J_{K0} \gg J_{\Phi}$ $J = J_{\Phi} / (1 - \alpha) \approx \beta J_{\Phi}$, т.е. фототок фототранзистора усиливается в β раз по сравнению током фотодиода. Соответственно в β раз увеличивается и чувствительность. Ток может быть усилен в 1000 раз, поэтому чувствительность фототранзистора во много раз больше чувствительности фотодиода. Однако поскольку произведение коэффициента усиления на полосу частот величина постоянная, то предельная частота уменьшается в β раз.

Наличие диффузии носителей обуславливает значительную инерционность прибора $\tau = 10^{-5} - 10^{-6}$ с. При сужении базы диффузии уменьшается, поэтому уменьшается и чувствительность. Для германиевых фототранзисторов $S_1 = 0.2 - 0.5$ А/мм, $V_{раб} = 3$ В, $I_{темн} = 300$ мкА, $\tau = 0,2$ мс. В корпусе прибора предусмотрено

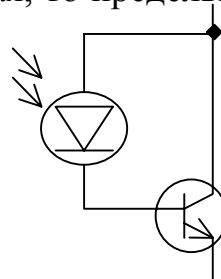


Рис. 3.12. Эквивалентная схема фототранзистора.

прозрачное окно, через которое световой поток попадает обычно на базовую область фототранзистора. Площадь фоточувствительной площадки составляет 1-3 мм².

Существует две разновидности конструкций фототранзисторов: поперечная и продольная. Продольные транзисторы имеют более простую конструкцию и технологию, удобны для включения в интегральные схемы, но уступают по своим функциональным параметрам.

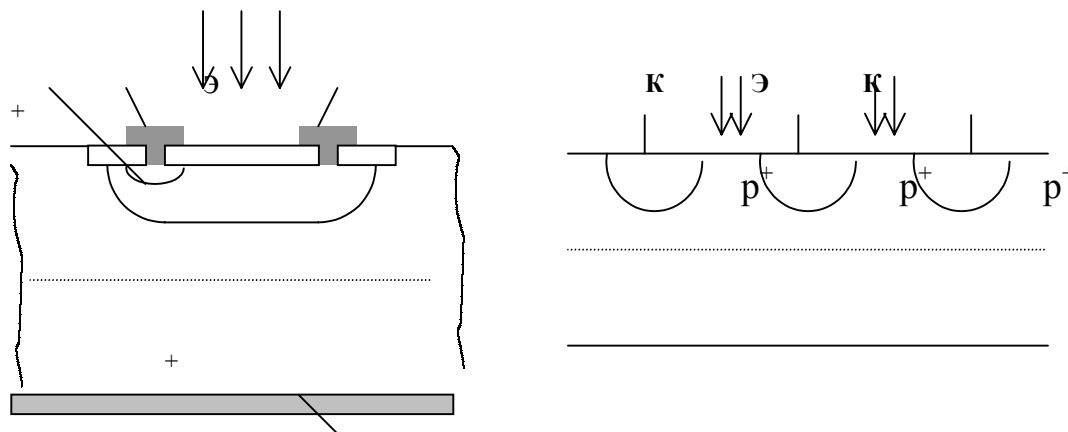


Рис. 3.13. Структура стандартного поперечного (а) и продольного (б) фототранзисторов.

Достоинства фототранзисторов: наличие механизма внутреннего усиления, т.е. высокая фоточувствительность, схемотехническая гибкость, связанная с наличием третьего электрода.

Основные недостатки: ограниченное быстродействие и температурная зависимость параметров.

МДП – фототранзисторы

МДП-фототранзистор представляет собой полевой транзистор с изолированным затвором, в котором поглощаемый в подзатворной области световой поток приводит к изменению проводимости канала между истоком и стоком. Вызванное светом увеличение тока приводит к изменению порогового напряжения и крутизны передаточной характеристики. Электрод затвора должен быть изготовлен из прозрачного или полупрозрачного материала. МДП-фототранзистор, таким образом, является аналогом фоторезистора, но может быть использован в любом режиме подзатворного канала: обогащении, обеднении, инверсии.

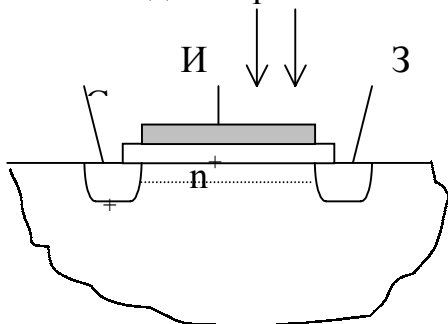


Рис. 3.14. Структура МДП-фототранзистора.

При использовании в качестве фотоприемников МДП-транзисторов их целесообразно применять в сочетании с фотодиодом на основе р-п перехода. Технологически фотодиод и МДП-транзистор изготавливаются на одной пластине полупроводника и фотодиод подключается к истоку и затвору. Так как ток через затвор не протекает, то фотодиод работает в режиме генерации фотоЭДС. При одновременном освещении р-п перехода и МДП-транзистора меняется как напряжение отсечки, так и фотонапряжение р-п перехода. Фото ЭДС р-п перехода изменяет потенциал затвора, поэтому изменяется ток в цепи исток-сток.

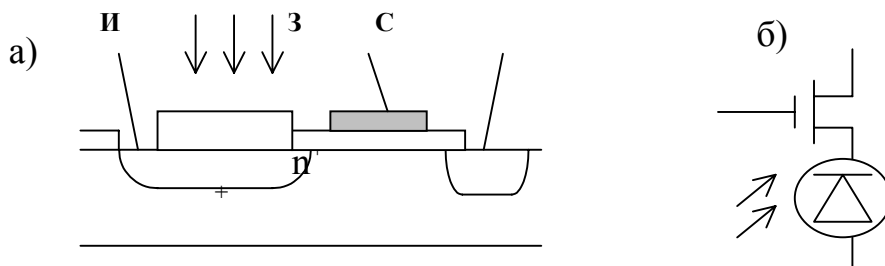


Рис. 3.14. Структура (а) и эквивалентная схема (б) МДП-транзистора с фотодиодом на основе р-п перехода.

МДП-фототранзисторы являются удобными фоточувствительными элементами для создания многоэлементных фотоприемников.

Гетерофототранзисторы

Гетерофототранзисторы используют принцип действия обычного фототранзистора в сочетании с достоинствами гетероструктур. В гетероструктурах используются широкозонные эмиттерные и коллекторные окна, что позволяет применять прямую и обратную засветку. Тонкая фотоактивная базовая область, обусловленная идеальностью гетерограниц, обеспечивает накопление основных носителей заряда в базе и отсутствие просачивания неосновных носителей в эмиттер.

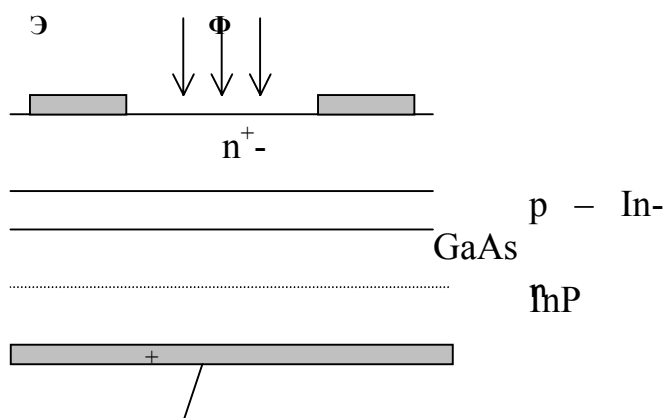


Рис. 3.15. Структура гетерофототранзистора.

Гетерофототранзисторы имеют высокую фоточувствительность и быстродействие ($10^{-9} - 10^{-10}$ с), низкое напряжение питания, возможность выбора спектральной области чувствительности.

Но в то же время гетерофототранзистор используется обычно в диодном включении (вывод от узкой базы сложно сделать), поэтому не реализуются схемотехнические возможности фототранзистора.

Фототиристоры

Фототиристор – полупроводниковый приемник излучения, содержащий структуру тиристора, которая обеспечивает переключающие свойства прибора. Прибор представляет собой четырехслойную p-n-p-n структуру, содержащую соответственно, три p-n перехода, из которых средний называют коллекторным, а два крайних – эмиттерными. Внешние области называются эмиттерами, внутренние – базами. Тиристор включается так, чтобы коллекторный переход был включен в обратном направлении, а оба эмиттерных – в прямом. При таком включении переходов тиристор можно представить в виде двух последовательно включенных транзисторов p-n-p и n-p-n с положительной обратной связью через общие базы и коллекторы. Сильная положительная обратная связь является причиной появления на вольт-амперной характеристике прибора участка с отрицательным динамическим сопротивлением.

Тиристор может находиться в одном из двух устойчивых состояний, закрытом высокоомном и открытом низкоомном. Переход из одного устойчивого состояния в другое происходит скачком (на отрицательном участке ВАХ состояние прибора неустойчиво), когда напряжение на управляющем электроде или освещенность превышают некоторое пороговое значение. При этом переходе сопротивление тиристора и ток через него изменяются в 10^6 - 10^7 раз: примерно от 10^8 Ом (ток около 10^{-6} А) в закрытом состоянии до 10^{-1} Ом (ток – 10^{-1} - 10^0 А) – в открытом. Таким образом, фототиристор имеет очень высокий коэффициент усиления по току и по мощности.

Излучение в фототиристоре поглощается в обеих базах: с ростом освещенности увеличиваются токи эмиттеров, происходит накопление положительных и отрицательных зарядов, необходимых для перевода для перевода во включенное состояние. С ростом освещенности напряжение переключения уменьшается. Таким образом, свет играет роль управляющего электрического сигнала у тиристора с третьим выводом (от базы) и позволяет бесконтактным способом управлять токами в различных электрических цепях.

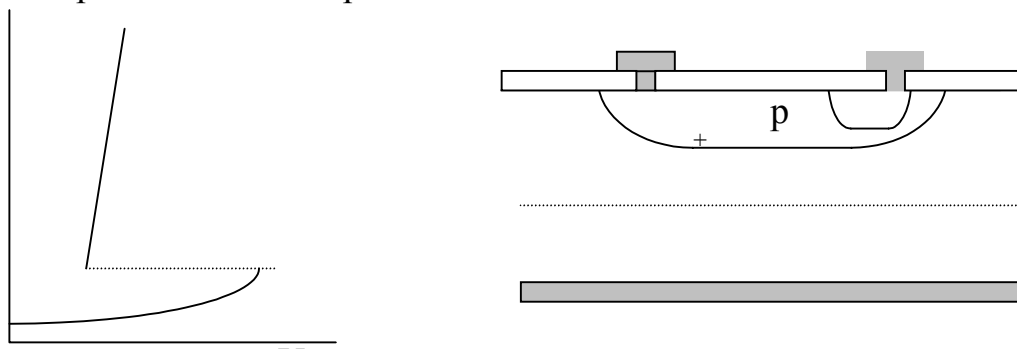


Рис. 3.16. Вольт-амперная характеристика тиристора и структура фототиристора.

Минимальное время, необходимое для переключения, называется временем задержки t_3 . Оно равняется сумме времен диффузии неосновных носителей заряда через базы. Экспериментально величина t_3 определяется минимальной длительностью импульса света, включающей фототиристор. С ростом интенсивности света время задержки уменьшается, одной из причин этого является увеличение коэффициента диффузии при высоких уровнях инжекции носителей заряда. Для повышения значения фоточувствительности и уменьшения времени задержки при переключении целесообразно уменьшать толщину баз. Однако при этом увеличиваются коэффициенты усиления составляющих транзисторов, что приводит к большему росту тока с увеличением напряжения и уменьшению напряжения переключения. Главным достоинством фототиристоров как фотоприемников с ВАХ S-типа является внутреннее усиление фототока, что значительно увеличивает фоточувствительность.

По сравнению с фототранзисторами фототиристоры обеспечивают большое значение коммутируемых токов и напряжений, выше быстродействие (10-30 мкс). Фототиристоры используются для управления большими токами в «силовой» оптоэлектронике.

Похожие фоточувствительные приборы: однопереходные транзисторы, S-диоды, диоды Ганна и др. – пока не получили заметного распространения.

Фотоприемники световых образов

Для ряда применений необходимо не только обнаружить наличие оптического сигнала или измерить его интенсивность, но и зафиксировать фотоэлектрическим способом оптическое изображение, имеющее определенное распределение интенсивности света по плоскости (световой образ). Этого можно достигнуть, изготовив матричное или мозаичное приемное устройство, состоящее из множества миниатюрных фотоприемников, которые преобразуют распределение светового потока в соответствующие электрические сигналы. Записанная таким образом оптическая информация некоторое время сохраняется, а затем «считывается» тем или иным способом. Электрические сигналы от различных ячеек воспринимающего устройства могут быть последовательно переданы в другое устройство и использованы для воссоздания изображения объекта (фототелеграфия, телевидение и др.).

По сравнению с приемниками дискретных оптических сигналов к приемникам световых образов предъявляются более жесткие требования.

В ряде систем приема световых образов предложено применять полупроводниковые устройства, а при считывании информации использовать электронный луч, быстро оббегающий миниатюрные фотодетекторы (кремниконы). Более целесообразно использование многоэлементных фотоприемников, в которых запись, хранение и считывание информации осуществляется одними и теми же твердотельными элементами.

В качестве многоэлементных приемников наибольшее распространение получили фоточувствительные приборы с зарядовой связью, МДП-фотодиодные матричные приемники и сканисторы.

Фоточувствительные приборы с зарядовой связью

Фоточувствительный прибор с зарядовой связью (ФПЗС) представляет собой специфическую ИМС на основе МДП-структур с регулярной системой электродов, расположенных на поверхности диэлектрика быстро друг от друга, так что становится существенным их взаимное влияние (перекрывание полей электродов внутри кристалла). МДП-структуры создаются на поверхности окисленного кремния, толщина окисла – 0,1- 0,2 мкм. Размеры электродов составляют 1-5 мкм, расстояние между электродами – 1-2 мкм.

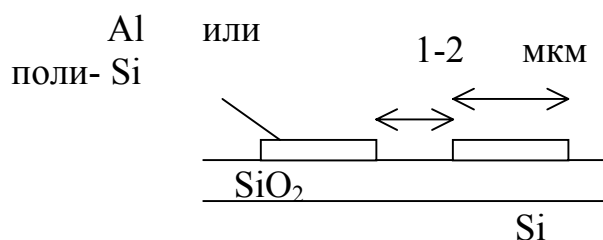


Рис. 3.18. Схема участка ПЗС.

Число электродов достигает 500-2000 в линейном приборе с зарядовой связью и 10^4 – 10^6 в матричном приборе с зарядовой связью. Строки разделяются между собой диффузионными областями. Принцип действия приборов с зарядовой связью заключается в том, что на электроды подаются импульсы напряжения, создающие в приповерхностной области неравновесное обеднение основными носителями заряда. В зависимости от соотношения амплитуд импульсов напряжения на соседних электродах реализуется режим хранения или переноса вдоль поверхности зарядового пакета неосновных носителей в подэлектродных областях.

В фоточувствительных приборах с зарядовой связью неосновные носители в области обеднения создаются при освещении вследствие фотогенерации элект-

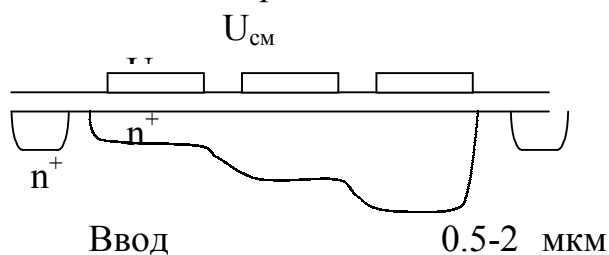


Рис. 3.19. Распределение потенциала в приповерхностном слое трехтактового ПЗС.

тронно-дырочных пар. Функционально фоточувствительный прибор с зарядовой связью – это прибор, воспринимающий изображение, осуществляющий его разложение на элементарные фрагменты, поэлементное электронное считывание (сканирование) и формирование на выходе видеосигнала, адекватного изображению. Пространственное распределение интенсивности излучения преобразуется в рельеф электрических зарядов, локализованных в приповерхностной области. Время хранения зарядовых пакетов составляет 1-100 мс, соответствующая длительности одного кадра. Затем зарядовые пакеты перемещаются от элемента

к элементу, выводятся наружу и дают последовательность видеоимпульсов, соответствующую распределению излучения, то есть осуществляется стандартный ТВ алгоритм восприятия образа. Для приема цветного изображения используется система фильтров.

Фоточувствительные приборы с зарядовой связью имеют некоторые особенности устройства. Функции фоточувствительных приборов с зарядовой связью обычно пространственно разделены: секции накопления, хранения, выходной регистр. Единичный кадр возбуждается в секции накопления ($1/25$ с - ТВ-стандарт), затем быстро ($0.1-100$ мкс) параллельно движется в секцию хранения, из которой в течение времени накопления следующего кадра последовательно построчно переносится в выходной регистр.

Существует два основных способа считывания из секции накопления. Строчно-кадровый – зарядовый пакет пробегает всю строку, адресный (координатный) – пакет от каждого элемента матрицы накопления передается в соседний с ним элемент матрицы хранения, обе матрицы вставлены одна в другую (фоточувствительные приборы с зарядовой инжекцией). В матричных фоточувствительных приборах с зарядовой связью весь кадр образуется одновременно, в однострочных - последовательно за счет дополнительной механической развертки на второй координате.

Простейшие структуры – приборы с поверхностным каналом, использующие трехтактное управление. Технологически более сложные фоточувствительные приборы с зарядовой связью с двумя (тремя) уровнями электродов или со скрытыми электродами используют более простое двухтактное управление. Еще более сложную структуру имеют фоточувствительные приборы с зарядовой связью с объемным (скрытым) каналом. В них максимум потенциала находится на глубине $x_k = 0.5-2$ мкм от поверхности. Накопление, хранение и передача зарядов происходит в объеме, в связи с чем имеет место уменьшение влияния поверхностных эффектов – рекомбинации, захвата и рассеяния носителей заряда.

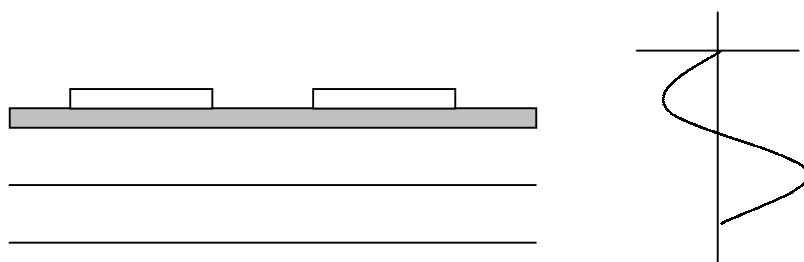


Рис. 3.20. Структура и распределение потенциала для фоточувствительных приборов с зарядовой связью с объемным (скрытым) каналом.

К разновидностям ФПЗС относятся приборы, управляемые р-п переходами, барьерами Шоттки, многоуровневые р-п-р приборы с зарядовой связью и др.

Основные параметры ФПЗС:

1. Амплитуды импульсов напряжения хранения и считывания - $10-30$ В; фронты управляющих импульсов $10-100$ нс.

2. Относительные потери при единичном акте передачи $10^{-3}-10^{-5}$.

3. Максимальная тактовая частота 1–5 МГц для поверхностных и 10–50 МГц для объемных.

4. Максимальная и минимальная плотность зарядового пакета 50 нКл/см² и 50 пКл/см² и динамический диапазон $D = 20 \lg (Q_{\max} / Q_{\min})$ (60 дБ).

5. Плотность темнового тока 5–20 нА/см².

6. Чувствительность - 0.1-0.4 А/Вт и спектральный диапазон - 0.4 - 1.1 мкм.

7. Частотно-контрастная характеристика (разрешающая способность) – 10-50 линий/мм.

Основные области применения приемников световых образов на основе ФПЗС: ТВ-техника, фототелеграфия, оптические измерения, распознавание образов, ночное видение и др. Особенности ФПЗС заключаются в том, что они являются приборами динамического типа, поскольку носителями информации служат зарядовые пакеты. Для их изготовления требуется высокий уровень развития полупроводниковой технологии, обеспечивающий однородность, регулярность системы электродов, высокое качество диэлектрической пленки и границы раздела полупроводник-диэлектрик, отсутствие р-п переходов в фоточувствительной зоне. Высокие требования предъявляются к кремниевой подложке: однородность, большое время жизни и высокая подвижность неосновных носителей заряда

МДП-фотодиодный многоэлементный приемник

В данных фотоприемниках каждый элемент представляет собой МДП-фототранзистор с возбуждаемой светом истоковой областью. Элементы объединяются в строки, с которых соответствующие электрические сигналы передаются в схемы управления.

Достоинствами данных фотоприемников являются:

1. Большая функциональная гибкость: возможность применения режимов накопления и мгновенного действия.

2. Большой динамический диапазон.

3. Более высокая устойчивость к температурным и радиационным воздействиям.

К недостаткам таких приборов относятся:

1. Невысокая плотность упаковки и разрешающая способность, т.к. к каждому элементу необходимы контакты.

2. Использование в одном элементе диода и МДП-транзистора, что возможно пока только для кремния.

3. Большие собственные шумы.

Сканистор

Сканисторы представляют собой линейный фотоприемник на основе кремниевой подложки с двумя р-п переходами. На верхний электрод подается отрицательное напряжение, чтобы первый переход находился при обратном, а нижний при прямом смещении. Этот электрод должен быть прозрачным. Верхний

p-n переход является мелким, т.е. толщина низкоомного p-слоя мала, так что излучение поглощается в нем и в области пространственного заряда.

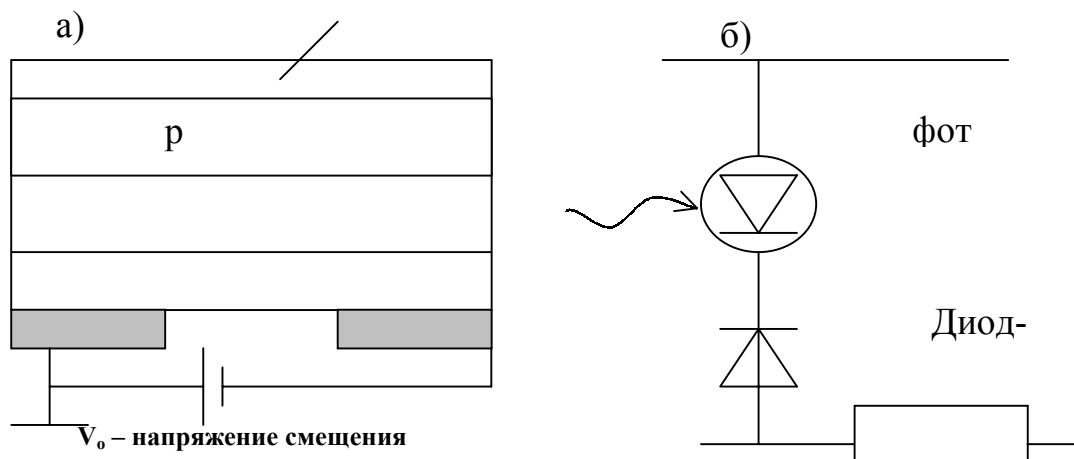


Рис. 3.21. Структура (а) и эквивалентная схема (б) сканистора.

Толщина базовой n-области достаточно велика и фотоносители не доходят до нижнего p-n перехода. На верхний электрод подается линейно-возрастающее напряжение развертки $V_{разв} = V_0 * t / T$. Когда оно повышается, эквипотенциальная линия, соединяющая верхнюю и нижнюю плоскости, перемещается слева направо, слева открываются диоды считывания. Возрастание выходного тока происходит в соответствии с распределением освещенности вдоль строки. Дифференцирование ступенчатого выходного сигнала дает последовательность видеоимпульсов, соответствующих картине освещенности.

Конструкция и технология сканисторов более простая, чем для ФПЗС и МДП-фотодиодных приемников. Но по сравнению с этими фотоприемниками сканисторы имеют меньшую чувствительность, поэтому используются в основном в оптико-механических приборах и фототелеграфии.

Кремниконы

Кремниконы представляют собой приемники световых образов на основе полупроводниковых устройств, в которых при считывании информации используется электронный луч, быстро оббегающий миниатюрные фотодетекторы.

Фотоприемным устройством является кремниевая фотодиодная матрица с нанесенными на нее резистивной пленкой, имеющей уменьшенную толщину вблизи p^+ -областей, и сплошным металлическим электродом. На p^+ -области подается положительное напряжение $V = 5-10$ В, так что фотодиоды являются обратно-смещенными, происходит зарядка их емкостей. При воздействии освещения происходит их разрядка. Сканирование электронным лучом приводит к дозарядке емкостей p-n переходов, при этом ток через последовательно включенный резистор R_H формирует видеосигнал.

В кремниконах используется режим накопления: $T_{кадра} = 1/25$ с, цикл опроса на 2-3 порядка меньше (0.5- 0.05 мс). Достоинствами данных приборов является

простота, регулярность структуры, отсутствие межсоединений, что позволяет создавать матрицы, содержащие до 10^8 ячеек.

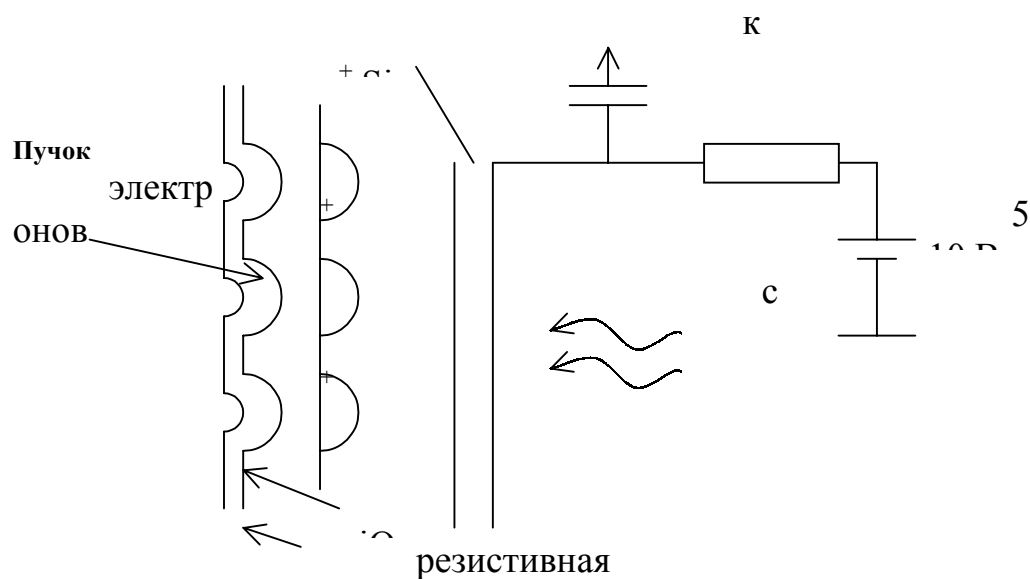


Рис. 3.22. Схема устройства кремникона.

Однако устройство сканирования электронным лучом находится вне кристалла, использование электронных пучков обуславливает необходимость применения вакуумных объемов с высоковольтными блоками для управления электронным лучом, которые плохо согласуются с низковольтными полупроводниковыми схемами.

Солнечные батареи

Солнечные преобразователи, солнечные элементы. Фотодиоды, оптимизированные для прямого преобразования излучения солнца в электрическую энергию – работают только в фотovoltaическом режиме.

Для создания эффективных солнечных преобразователей необходимо учитывать особенности солнечного излучения. Его спектральная область лежит в пределах длин волн 0.22-3 мкм. Максимум интенсивности соответствует длине волны ~ 0.55 мкм. (По уровням 10-90% полной мощности можно ограничиться интервалом 0.4-1.7 мкм). В космосе солнечное излучение совпадает с излучением абсолютно черного тела ($T \sim 5800$ К), на земной поверхности необходимо учитывать резонансное избирательное поглощение в атмосфере.

В гелиоэнергетике принято следующее обозначение солнечных воздействий: AM0 – в космосе; AM1 – на поверхности Земли, когда Солнце в зените; AM2 – на поверхности Земли, Солнце под углом в 30° к горизонту (цифры 1-2 показывают, сколько раз излучение проходит толщину атмосферы). Условию AM1 соответствует поток плотностью 0.1 Вт/см² (на экваторе), AM2 – 0.075 Вт/см².

Основные параметры:

1. Максимальная отдаваемая в нагрузку электрическая мощность $P_{ЭМАХ}$.
2. КПД = $P_{ЭМАХ}/P_C$; $P_C = \rho_C * S$ - интегральная мощность солнечного излучения на элементе. ρ_C - плотность интегральной мощности солнечного излучения; S - площадь фоточувствительной поверхности.

3. ФотоЭДС – V_{XX} .

4. I_{K3} – максимальный фототок.

5. Последовательное сопротивление $R_{Посл}$.

6. Коэффициент формы $P_{ЭМАХ} / V_{XX} * I_{K3}$
(отклонение от прямоугольника).

7. Максимальная степень концентрации излучения, при котором элемент сохраняет эффективность преобразования $K_{Cmax} = \rho_{ск} / \rho_c$, где $\rho_{ск}$ – плотность мощности концентрированного солнечного излучения.

Другие параметры фотодиодов: τ , шумы для солнечных элементов несущественны.

Наиболее распространенные солнечные элементы на основе монокристаллического кремния представляют собой $n^+ - p$ ($p^+ - n$) фотодиоды с максимальной площадью фоточувствительного окна и с оптимальными значениями толщины и сопротивления базовой области, обеспечивающими поглощение фотонов и собиранье фотоносителей. К необходимым условиям относится также высокое время жизни неосновных носителей заряда в базовой области для снижения рекомбинационных потерь, наличие антиотражающих покрытий, малая толщина контактных слоев для уменьшения паразитного поглощения в коротковолновой области, использование гребенчатой или сетчатой конструкции токосъемных электродов для снижения паразитного сопротивления.

Расчет параметров солнечных элементов основывается на анализе процессов фотогенерации носителей заряда в $p - n$ переходах. Если поглощаемое оптическое излучение достигает базовой области, выражение для максимального фототока имеет вид: $J_{K3} = e S \int N_C(\lambda) \eta(\lambda) Q(\lambda) d\lambda$, где $N_C(\lambda)$ – спектральная плотность потока фотонов солнечного излучения, ($см^{-2} * мкм^{-1}$), Q – коэффициент собиранья фотоносителей, η – квантовый выход. Если $Q = 1$ и $\eta = 1$ для $\lambda < \lambda_{тр}$ $J_{K3} = 8 \cdot 10^{-4} \int \lambda (dp/d\lambda) d\lambda$, $A/см^2$. Для солнечного излучения с плотностью мощности $\rho_c = 0.1$ Вт/ $см^2$ теоретическое значение $J_{K3} = 40$ мА/ $см^2$ для кремниевых фотодиодов. Напряжение на солнечном элементе $V_{раб} = (kT/e) * \ln [(J_{K3} - J_{раб}) / J_{темн}]$ зависит от величин I_{K3} и $I_{раб}$, определяемых значением последовательного сопротивления. Для кремниевых фотодиодов максимальная величина фотонапряжения $V_{xx} \approx 0.5 - 0.6$ В ($K_C = 1$). Рост фототока J_{K3} прекращается, когда плотность фотогенерированных неосновных носителей $n_{изб}$ в n -области достигает плотности основных носителей в p^+ -области, что происходит при высокой степени концентрации солнечного излучения $K_C \approx 20 - 40$. Увеличение концентрации излучения сопровождается разогревом полупроводника, а разогрев вызывает рост темнового тока J_T , т.е. снижение КПД. В гетероструктурах на основе соединений A^3B^5 наблюдается рост фототока $J_{K3} \sim K_C$ при более высоком значении максимальной степени концентрации солнечного излучения - $K_C \sim 10^3 - 10^4$.

Аналогичные эффекты происходят в $p - i - n$ -фотодиодах, гетероструктурах, барьерах Шоттки, МДП-фотодиодах. КПД солнечных элементов зависит от величины ширины запрещенной зоны полупроводникового материала E_g . Если E_g

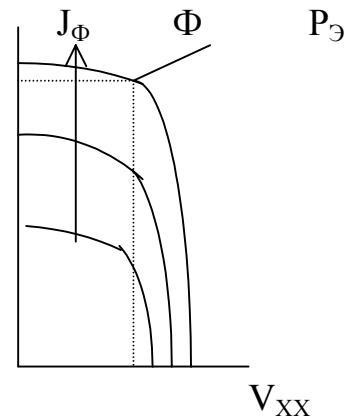


Рис. 3.23. Вольт-амперные характеристики фотоэлемента.

велика – часть спектра не поглощается, если E_g мала – мало значение фотоЭДС ($V_{XX} \leq E_g$). Максимальное значение КПД наблюдается для полупроводников с шириной запрещенной зоны ~ 1.4 эВ (GaAs). Максимальное значение КПД достигает 22-24% для Si, InP, GaAs, и др. Ограничение КПД вызывают такие отрицательные факторы, как поглощение света в металлических электродах, отражение от рабочей поверхности, поглощение свободными носителями в p^+ -области, рекомбинация потери, омические потери мощности на последовательном сопротивлении, разогрев полупроводника.

Разновидности солнечных батарей:

1. Наибольшее развитие получили солнечные элементы на основе монокристаллического кремния. Это связано со следующими причинами: отработанная технология получения кремния и создания p - n переходов, высокие значения параметров (надежность, стабильность, КПД до 20 % при прямой засветке, до 26 % при $K_C \sim 10^3$, для промышленных изделий 14-17 %). Для солнечных элементов из более дешевого поликристаллического кремния КПД достигает 12-14 %.

2. Тонкопленочные солнечные элементы на основе аморфного кремния. Аморфный гидрогенизированный кремний (α -Si:H) в настоящее время является одним из основных перспективных материалов солнечной энергетики. Солнечные батареи из α -Si:H обладают рядом преимуществ: большое значение напряжения холостого хода V_{XX} до 0.8-1.1 В вследствие большей ширины запрещенной зоны $E_g \sim 1,6$ эВ, возможность нанесения на большие площади, использование в качестве подложек различных материалов (стекло, нержавеющая сталь, полиамид), низкая стоимость. КПД достигает 13-14 %.

3. Солнечные элементы на основе GaAs и других соединений A^3B^5 . GaAs имеет оптимальное значение E_g , поэтому V_{XX} достигает 1 В при прямой солнечной засветке, КПД до 25 % для AM0 и до 21 % для AM1, если $K_C \sim 10^3$, до 25 %.. Эти материалы более нагревостойкие - $T_{раб}$ до 300^0 С. Но в то же время эти соединения более дорогие, сложнее технология изготовления структур.

4. Для тонкопленочных поликристаллических и аморфных солнечных элементов используют соединения CdS, CdTe, CuInSe. Простота технологии и низкая стоимость материала позволяют получать солнечные элементы по толсто-пленочной и тонкопленочной технологии. Подложки могут быть гибкими, полимерными. КПД этих элементов достигает 14-16 %, для промышленных образцов ~ 8 %. Основные направления разработок связаны с созданием такой технологии, которая обеспечила бы высокую стабильность параметров и возможность нанесения пленок на поверхности больших размеров.

5. Солнечные батареи с повышенным КПД (>30%) включают в себя каскадные фотопреобразователи, обычно два последовательных фотоэлемента с p - n переходами из различных полупроводников, $E_{g1} > E_{g2}$ (например, GaAs – Si), или гетероструктуру с варизонной базой.

6. Для сравнения: КПД преобразования в цикле «растительный фотосинтез - органическое топливо - тепловая машина - электрический генератор» составляет $\sim 10^{-3}$ %.

ОПТРОНЫ

Оптроны - взаимосвязанные пары излучатель-приемник и соответствующая схмотехника - предложены в 1955 Лебнером (Loebner), США. Первые образцы оптронов были созданы в 1961 г., промышленный выпуск для электрической развязки начат с 1965 г.

Оптрон представляет собой прибор, содержащий источник и приемник излучения, которые оптически и конструктивно связаны.

Источниками излучения могут быть лампы накаливания, неоновые лампы, электролюминесцентные излучатели, но чаще всего используются светодиоды.

Приемник – фоторезистор, фотодиод, фототранзистор, фототиристор.

Среда оптического канала – воздух, стекло, пластмасса или другое прозрачное вещество.

Элементарный оптрон содержит 1 источник и 1 приемник, поэтому носит название оптопара, более сложные оптроны, объединенные в ИМС с одним или несколькими согласующими или усиливающими устройствами называют опто-электронными ИМС.

Особенность оптронов заключается в двойном преобразовании энергии, обычно электрической в оптическую и обратно с электрическим входом и выходом.

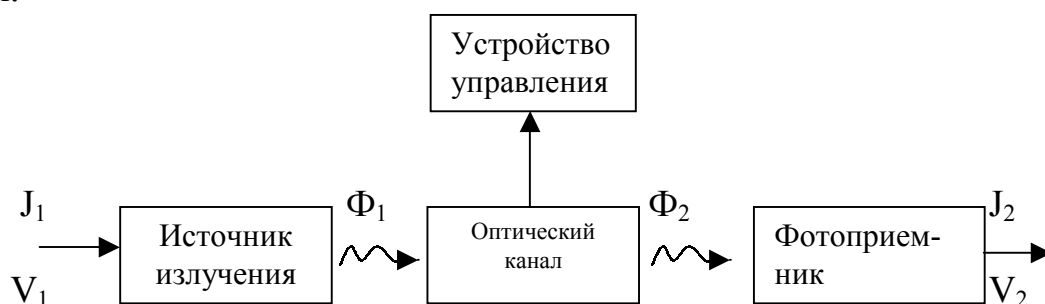


Рис. 4.1. Схема оптрона с электрическим входом и выходом.

Для согласования параметров оптронов с другими элементами электронных схем используются дополнительные входные и выходные устройства.

Если источник и приемник электрически не соединены, то реализуется гальваническая развязка входа и выхода. Введение электрической и (или) оптической обратной связи существенно расширяет возможности генерирования, усиления оптических и электрических сигналов, ЗУ и др.

Достоинствами оптронов являются: высокая помехозащищенность и однонаправленность передачи сигналов; широкая частотная полоса пропускания (возможность передачи как импульсных, так и постоянных сигналов); совместимость с другими изделиями микроэлектроники.

К недостаткам приборов относятся: низкий КПД, связанный с двойным преобразованием энергии; чувствительность параметров к изменению температуры; высокий уровень собственных шумов; гибридная технология.

Элементы оптопары

Основными элементами оптопар являются источники и приемники оптического излучения, а также среды оптических каналов. Элементы оптопар должны быть согласованы по спектральным характеристикам, быстродействию, температурным свойствам, габаритам.

Источниками обычно являются инжекционные диоды, излучающие в инфракрасном диапазоне. Требования к ним включают высокий КПД, необходимое быстродействие, узкая направленность излучения для снижения потерь энергии, малые входные токи для согласования с микроэлектронными схемами управления, постоянство квантового выхода в широком диапазоне входных токов. Для некоторых устройств в качестве источников можно использовать лазеры, которые могут иметь большие токи управления, не всегда высокую долговечность и более высокую стоимость). Для изготовления излучающих диодов применяют такие материалы, как GaAs, GaAlAs, GaAsP и другие полупроводниковые соединения, позволяющие генерировать излучение с длиной волны 0,8-1,6 мкм. В отличие от светодиодов, применяемых в индикаторах, для источников в оптронах необходима малая площадь высвечивания для уменьшения потерь излучения и обеспечения согласования с приемным окном фотоприемника. Значения электрических параметров источников обычно составляют $V_{ном} \sim 1,2-1,7$ В, $P_{ном} \sim 1-50$ мВт.

Оптический канал. Требования к материалу среды: 1) минимальные потери света, т.е. спектральное согласование с излучателем и фотоприемником, $n \sim n_{ист}, n_{пр}$; 2) высокий уровень электрической изоляции между входом и выходом (сопротивление изоляции $\sim 10^{12}$ Ом). Материал оптического канала может выполнять дополнительные функции, такие как конструкционная основа, защита от механических, климатических и радиационных воздействий.

Используется 3 варианта оптических сред: 1 - полимерные оптические клеи, лаки, вязкие вещества (незасыхающие силиконовые составы), некоторые марки стекол (например, халькогенидные). Они имеют невысокую электрическую прочность изоляции - $V_{из} \sim 100-500$ В. 2 - воздушный канал, в котором дополнительно могут использоваться фокусирующие системы из стеклянных линз (в устройствах оптического считывания информации). $V_{из} \sim 1-5$ кВ. 3 - волоконные световоды. Они имеют высокое сопротивление изоляции, $V_{из} \sim 50-150$ кВ.

К недостаткам полимеров относятся провалы спектра пропускания в ближней ИК-области вследствие поглощения радикалами OH, CH₃, CH₂, NH₂, NH, температурная нестабильность и деградация. К недостаткам стекол относятся низкая устойчивость к перепадам температуры и плохая адгезия.

Приемники. Как элемент электрической схемы оптрон характеризуется не излучателем, а типом используемого фотоприемника, соответственно, различают оптопары резисторного, диодного, транзисторного и тиристорного типов. Основной материал при изготовлении фотоприемников - кремний, а фоторезисторы обычно изготавливаются из CdS, CdSe или других халькогенидов. Быстродействие оптопары ограничивается параметрами фотоприемника.

Основные параметры оптронов.

Элементарный оптрон представляет собой четырехполюсный прибор, поэтому имеет 3 основные характеристики – входную, передаточную и выходную.

Входная характеристика представляет собой ВАХ излучателя. Выходная – соответствующая характеристика фотоприемника (при заданном токе на входе оптрона). Передаточная характеристика – зависимость тока на выходе J_2 от тока на входе J_1 (в общем случае нелинейная).

Статический коэффициент передачи по току $K_J = J_2 / J_1$. Если темновой ток J_T значительный, $K_J = (J_2 - J_T) / J_1$. Для большинства оптронов K_J является паспортным параметром (от 0,5% для диодных до 100% для транзисторных).

Суммарное быстродействие оптрона часто характеризуют временем переключения $t_n = t_1 + t_2$, t_1 и t_2 – времена нарастания и спада сигнала на выходе оптрона. t_n неодинаково у разных типов оптронов, зависит от режимов работы и лежит в пределах 10^{-9} - 10^{-1} с. Быстродействие также может характеризоваться граничной частотой, $f_{гр}$ – 5 кГц - 10 МГц.

Параметры изоляции: максимально допустимое напряжение между входом и выходом $V_{из}$ статическое или пиковое (при работе с переменными сигналами). Высокое сопротивление изоляции - $R_{из} \sim 10^{12}$ Ом – исключает обратную связь по току. Однако, наличие проходной емкости $C_{пр}$ (между входом и выходом оптрона) обуславливает связь по переменному току, т.е. скачок напряжения ΔV_2 на выходе за время Δt приводит к появлению емкостного тока $J \sim C_{пр} \Delta V_2 / \Delta t$. Значение проходной емкости обычно составляет ~ 1 пФ.

Конструктивно-технологическое оформление производится с учетом оптимизации функциональных, стоимостных и других параметров. Основным требованием является обеспечение эффективной оптической связи и электрической изоляции между источником и приемником. На рис. 4.2 показаны наиболее типичные конструкции оптопар.

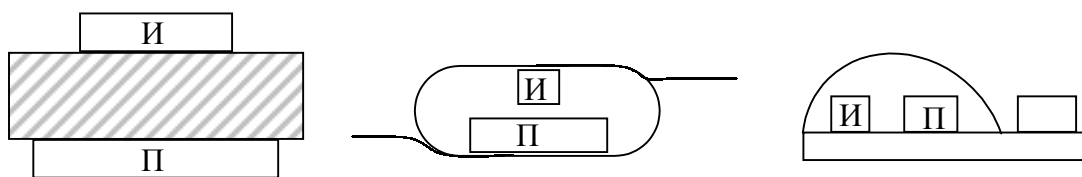


Рис. 4.2 Примеры типичных конструкций оптопар.

Для увеличения эффективности передачи светового потока от источника к приемнику используют более сложные конструкции оптронов.



Рис. 4.3. Конструкции оптопар с более эффективной передачей излучения.

Оптоэлектронные микросхемы могут включать в себя бескорпусные излучающие диоды, бескорпусные оптроны и ИМС.

Применяемые в настоящее время оптроны являются гибридными устройствами, что относится к конструктивным недостаткам. Разрабатываются также монолитные оптопары, которые представляют собой интегрированные твердотельные излучающие и приемные структуры, изготавливаемые в одном технологическом процессе. На рис. 4.4 показаны варианты монолитных устройств.

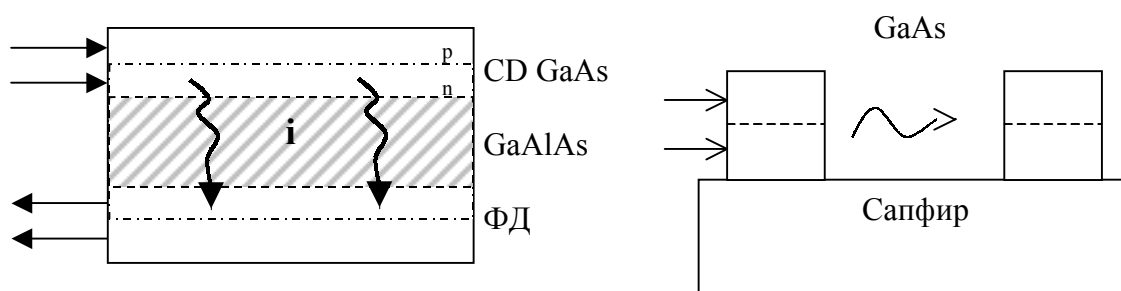


Рис. 4.4 Примеры конструкций оптронов на основе монолитных устройств.

Однако до сих пор ни в одном варианте монолитных оптронов не удалось добиться сочетания всех необходимых параметров: долговечности, надежности, и устойчивости к внешним факторам. Основными нерешенными проблемами остаются низкая эффективность излучательной и фоточувствительной структур, плохая светопередача и изоляция, неудовлетворительная совместимость используемых материалов.

Резисторные оптроны

В резисторных оптронах в качестве приемников оптического излучения используются фоторезисторы на основе пленок CdS и CdSe. Особенностью фоторезисторов является сравнительно большая инерционность ($t_{\text{п}} \sim 10^{-1}$ с), поэтому источниками излучения в этих оптронах могут быть лампы накаливания. Используются также светодиоды на основе GaP, согласованные по спектру излучения.

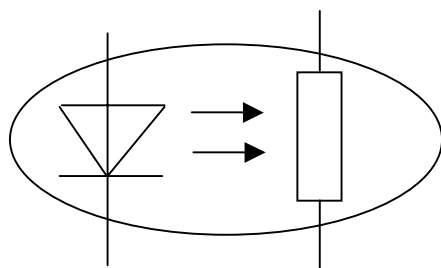


Рис. 4.5. Обозначение резисторных оптопар

Достоинства резисторных оптопар: воспроизводимость, большой срок службы, малая стоимость, линейность и симметричность выходной характеристики, отсутствие фотоЭДС, высокое значение $V_{\text{вых}}$ (до 250 В), высокое значение $R_{\text{т}} \approx 10^6 \div 10^{11}$ Ом.

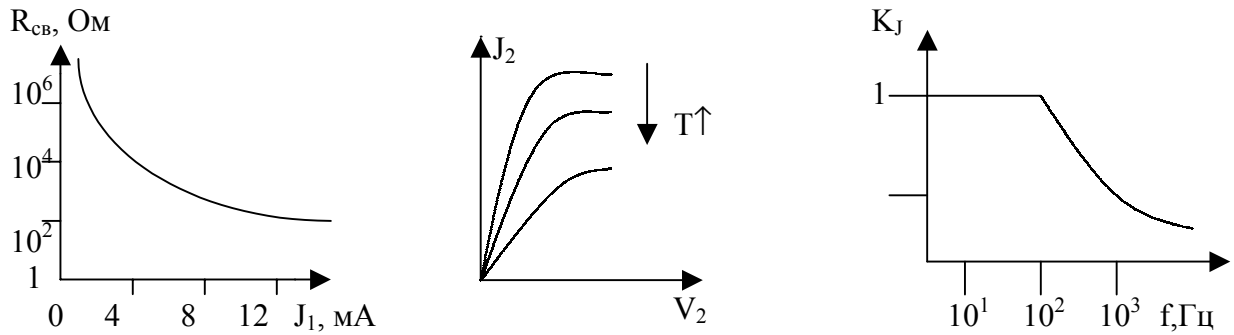


Рис. 4.6. Основные характеристики резисторных оптопар: зависимость светового сопротивления от входного тока, зависимость выходной ВАХ от температуры и зависимость коэффициента передачи по току от частоты.

Диодные оптопары.

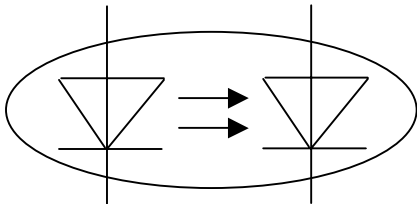


Рис. 4.7 Обозначение диодных оптопар.

Обычно диодные оптопары изготавливаются на основе кремниевых pin-фотодиодов и арсенидгаллиевых излучающих диодов.

Значение статического коэффициента передачи по току диодного оптрона определяется преобразованием входного тока J_1 в излучение Φ_1 , передачей светового потока Φ_1 к приемнику Φ_2 и преобразованием излучения Φ_2 в выходной ток J_2 .

$$\Phi_1 = \eta_{\text{сд}} h\nu * J_1 / e, \quad J_2 = e * \eta_{\text{фд}} \Phi_2 / h\nu.$$

Квантовый выход излучающего диода $\eta_{\text{сд}}$ является постоянной величиной в широком диапазоне входных токов, а квантовый выход фотодиода $\eta_{\text{фд}}$ также постоянная величина в широком диапазоне выходных токов. Тогда выражение для коэффициента передачи по току имеет вид: $K_J = \eta_{\text{фд}} * \eta_{\text{сд}} * J_2 / J_1$. Здесь коэффициент K_J характеризует эффективность передачи излучения от источника к приемнику. Таким образом, значение коэффициента передачи по току определяется величинами квантовых выходов источника и приемника. Для приемника $\eta_{\text{фд}} \approx 100\%$, для светодиода $\eta_{\text{сд}} \leq 10\%$, поэтому величина коэффициента передачи по току $K_J \sim$ несколько %. Малая величина K_J диодных оптопар обуславливает относительно низкие значения выходного тока, $J_2 \leq 1-2$ мА. Зависимость K_J от температуры определяется температурной зависимостью характеристик излучателя.

Быстродействие диодных оптопар определяется быстродействием светодиода и фотодиода. Но из-за малости выходных токов оптрона включают на большую нагрузку и существенным становится время перезарядки $R_n * C_2$, R_n – сопротивление нагрузки, C_2 – выходная емкость оптрона. Обычно $R_n = 2-20$ кОм, $C_2 = 50$ нФ, и время перезарядки t_n может достигать 0,1-10 мкс.

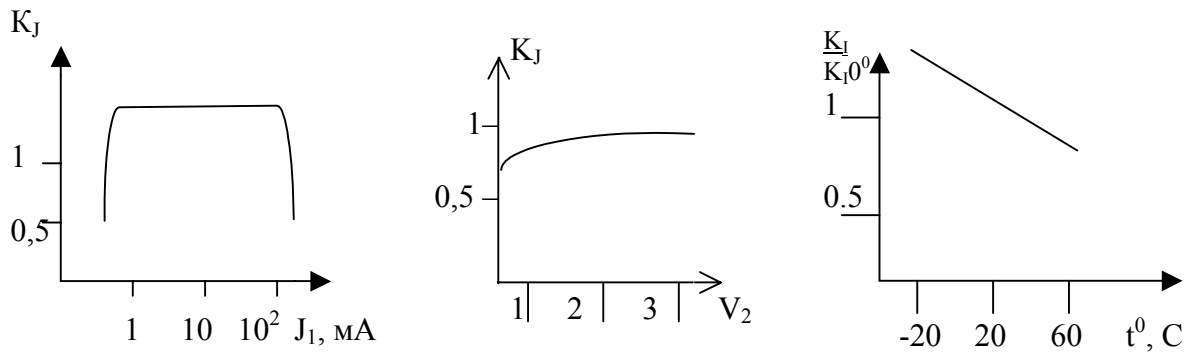


Рис. 4.8. Зависимости коэффициента передачи по току от входного тока, выходного напряжения и температуры.

Оптроны могут работать в вентильном режиме, когда фотодиод служит источником питания, тогда $K_J \sim 3-4\%$, а КПД имеет значения $\sim 1\%$. Оптический канал может быть выполнен в виде световода длиной до 30-100 мм, что обеспечивает высокое сопротивление изоляции и малую проходную емкость ($V_{из} \approx 20-50$ кВ, $C_{пр} \approx 0.01$ нФ).

Транзисторные оптроны

В транзисторных оптронах используются арсенидгаллиевые излучающие диоды и кремниевые фототранзисторы, иногда составные. Оптоны с составным транзистором обладают наилучшими передаточными характеристиками по току (в результате внутреннего усиления K_J может достигать 1000%).

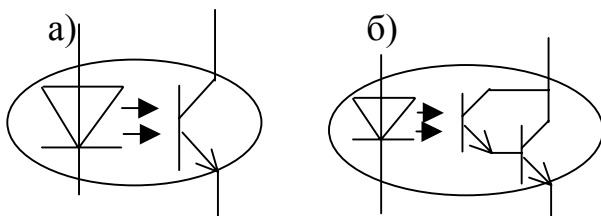


Рис. 4.9. Обозначение оптопар транзисторных (а) и с составным транзистором (б).

Быстродействие транзисторных оптопар ограничивается быстродействием фототранзисторов и составляет $t_{пр} = 2-4$ мкс. Иногда в качестве параметра оптопар используют отношение коэффициента передачи по току к времени переключения $K_J/t_{пр} = D$ – добротность. Значение этого параметра постоянно в широком интервале входных токов. Добротность зависит от параметров излучателя ($V_{из}$). Для транзисторных оптопар $V_{из} \approx 1-5$ кВ добротность составляет $0,1-1\%$ мкс⁻¹, для диодных оптопар добротность до $0,001\%$ мкс⁻¹).

К достоинствам транзисторных оптронов относится возможность управлять величиной выходного тока как оптическими, так и электрическими методами, а также сравнительно высокие значения K_J и J_2 при удовлетворительном быстродействии.

Повышение температуры приводит к возрастанию инерционности транзисторных оптронов и повышению темнового тока. Особенно сильно это прояв-

ляется для оптронов с составным транзистором, при повышении температуры от 25° до 100° С темновой ток возрастает в 10^4 - 10^5 раз, а для транзисторных оптронов - 10^2 - 10^3 раз.

Тиристорные оптроны

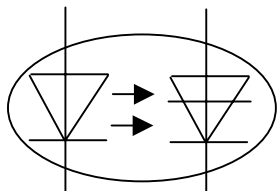


Рис. 4. 10. Обозначение тиристорных оптронов.

Тиристорные оптроны используются в качестве ключей для коммутации сильноточковых и высоковольтных цепей радиоэлектронного и электротехнического назначения (РЭ - $V_2= 50$ - 600 В, $J_2= 0,1$ - 10 А, ЭТ - $V_2= 100$ - 1300 В, $J_2= 5$ - 350 А). Тиристорные оптроны позволяют осуществлять управление значительными мощностями в нагрузке, а по входу совместимы с ИМС.

Существует большое число групп оптронов, различающихся по значению выходных напряжений и токов и быстродействию. Так как тиристорные оптроны работают в ключевом режиме, коэффициент передачи по току K_J не используется в качестве параметра. Оптроны характеризуются номинальным значением входного тока J_1 , при котором открывается фототиристор и максимальным допустимым входным током помехи (максимальный J_1 , при котором еще не включился фототиристор). $J_{1ном}=20$ - 200 мА, максимально допустимое значение $J_{помехи} \sim 1$ мА.

Обозначение оптронов: 1-я буква или цифра - материал излучателя (А или 3 – GaAs или GaAlAs); 2-я буква - О – оптроны; 3-я буква - тип фотоприемника: Д- фотодиод, Т – фототранзистор, У – фототиристор; Цифры – место в соответствующей группе (по параметрам).

Резисторные оптроны (исторически первый тип оптронов) имеют отличающееся обозначение – ОЭП (оптоэлектронный прибор). Некоторые оптроны могут иметь обозначения, отличающиеся от указанных.

Разновидности оптронов.

Дифференциальные оптроны – один излучатель воздействует на два идентичных фотоприемника. Подобие входных характеристик двух каналов позволяет использовать их для передачи нескольких аналоговых сигналов: первый канал для непосредственной передачи, второй канал для цепи обратной связи – корректировки температурных, деградационных и других изменений мощности излучения.

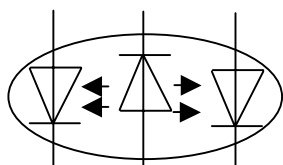


Рис. 4.11. Обозначение дифференциальных оптронов.

Оптроны могут быть с приемниками на основе полевых фототранзисторов, МДП – фотоварикапов, однопереходных транзисторов, функциональных фоторезисторов и других.

Оптоэлектронные микросхемы отличаются тем, что содержат одну или несколько оптопар, согласующие элементы или ИС, объединенные в один корпус по гибридной технологии.

Иногда выделяют 3 группы оптоэлектронных микросхем:

1. Переключательные оптоэлектронные микросхемы. Они имеют два статических состояния (обычно диодный оптрон и ключевое устройство, согласованное по уровням входных и выходных сигналов со стандартными логическими элементами).

2. Линейные оптоэлектронные микросхемы, которые осуществляют аналоговые преобразования сигналов.

3. Оптоэлектронные МС релейного типа коммутируют силовые цепи, по входным параметрам согласованы с ИС.

Регенеративные оптроны отличаются наличием обратной связи между излучающими и фотоприемными элементами. Регенеративные оптроны используются как бистабильные элементы, заданному значению напряжения U_1 соответствует два значения выходного тока J_2 , т.е. они имеют S-образную ВАХ. Данные оптроны используются как переключатели, усилители, генераторы.

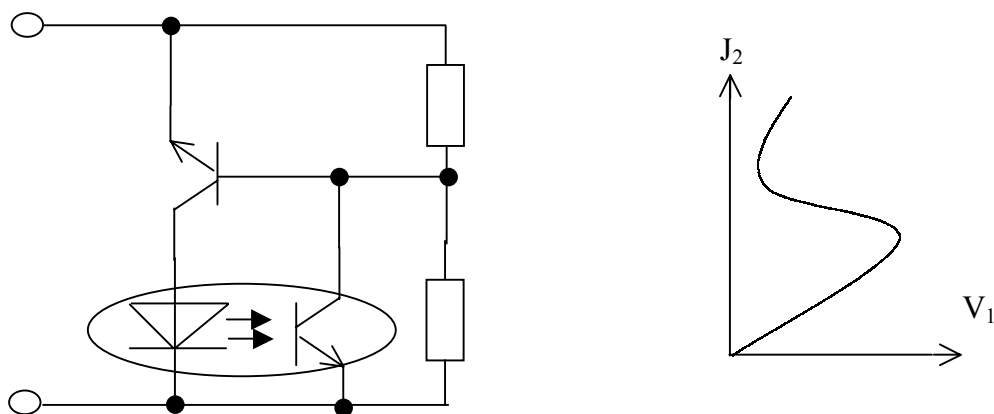


Рис. 4.12. Типичная схема регенеративного оптрона и зависимость выходного тока от входного напряжения.

Широко применяются также оптроны с открытым оптическим каналом, в которых в зазор между излучателем и приемником имеется доступ извне. Они используются в бесконтактной дистанционной технике в качестве индикаторов положения объектов и состояния их поверхности и др.

Выделяют два типа оптронов с открытым оптическим каналом:

1. Оптопрерыватели, которые реагируют на попадание в оптический канал непрозрачных предметов и прерывают (или изменяют) световой поток, падающий на приемник.

2. Отражательные оптроны, которые регистрируют световой поток, отраженный от исследуемой поверхности.

Наличие воздушного зазора в оптическом канале приводит к тому, что коэффициент передачи по току K_J мал, его значение зависит от свойств поверхности и расстояния до нее (обычно менее нескольких миллиметров). Для этих оптронов необходимо установить влияние посторонней засветки и обеспечить точную пространственную ориентацию излучателя и фотоприемника. Задача облегчается при использовании волоконных световодов.

Относительно ограниченное распространение получили приборы, использующие преобразование по схеме: излучение – электрический сигнал – излучение, т.е. оптроны с оптическим входом и выходом. Пример такого преобразователя представлен на рис. 4.13.

Слои фотопроводника, непрозрачного диэлектрика или проводника и электролюминофора здесь размещаются между двумя прозрачными электродами, на которые подается высокое напряжение. Фотопроводник имеет высокое темновое сопротивление, поэтому в отсутствие падающего излучения на него приходится большая часть падения напряжения. При освещении сопротивление фотопроводника значительно уменьшается и происходит перераспределение напряжения, поле в электролюминофоре возрастает, что приводит к генерации излучения.

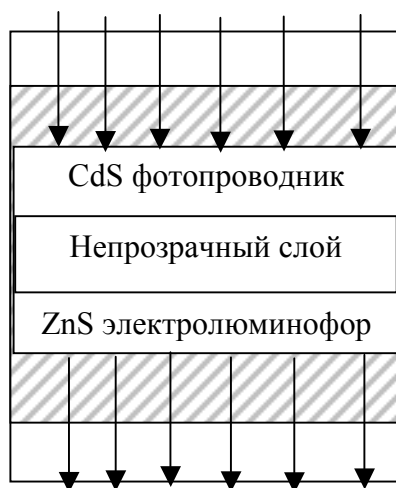


Рис. 4.13. Устройство оптрона с оптическим входом и выходом.

Оптроны с оптическим входом и выходом целесообразно использовать для создания усилителей и преобразователей изображения (например, ИК в видимое, когерентное в некогерентное).

ИНДИКАТОРЫ

Индикаторы являются составными частями средств отображения информации (СОИ). В соответствии с ГОСТом средство отображения информации - устройство обеспечивающее отображение информации в виде, пригодном для зрительного восприятия.

В состав средств отображения информации входят две функционально различные части: 1. Светоконтрастный растр, который непосредственно воздействует на наблюдателя. 2. Схема управления - комплекс средств электронного обрамления, осуществляющих необходимую обработку поступающей в электрической форме информации и эффективное управление светоконтрастным растром. Светоконтрастный растр входит в состав индикатора, который представляет собой прибор, отображающий ход процесса или состояние объекта наблюдения в форме, удобной для зрительного восприятия человеком.

Индикатор - оптоэлектронный прибор для преобразования электрических сигналов в адекватное или пространственное распределение яркости (контраста). Согласно этому определению индикатор функционально противоположен фотосчитывающему устройству. В соответствии с ГОСТом индикатор - окончное устройство средства отображения информации, осуществляющее преобразование электрических сигналов в видимое изображение.

По роду отображаемой информации все индикаторы делятся на две группы:

1. Знакосинтезирующие индикаторы (ЗСИ) для воспроизведения единичных точек, цифр, букв, шкал измерительных приборов, графиков, мнемосхем.

2. Экраны для воспроизведения как перечисленной выше информации, так и подвижных картин телевизионного типа.

Простейший элемент знаковосинтезирующего индикатора или экрана называют знакоместом. Экраны содержат существенно большее число знакомест, чем знаковосинтезирующие индикаторы.

Для получения изображения в знаковосинтезирующих индикаторах используют несколько способов:

- непосредственное создание на поверхности растра требуемого символа;
- набор цифр или букв из отдельных элементов;
- набор требуемой информации из отдельных точек, размещенных на поверхности растра в виде прямоугольной матрицы;
- в индикаторе без фиксированных знакомест (например, в электронно-лучевых трубках) символы "рисуются" при сканировании растра возбуждающим воздействием (электронным лучом).

Физиологические основы восприятия излучения.

При выработке рекомендаций инженерно-психологического характера используют параметры и свойства, присущие некоторому идеализированному, статистически усредненному оператору потребителю визуальной информации индикатора.

Особенности зрения заключаются в том, что глаз человека природой оптимизирован для восприятия отраженного солнечного света с длиной волны от 380 до 760 нм ($h\nu \sim 1.6 - 3.2$ эВ). Солнце дает спектр излучения абсолютно черного тела ($T \approx 6000$ К - $\lambda_{\max} = 0.5$ мкм). В атмосфере Земли поглощается излучение с $\lambda < 0.3$ мкм (УФ), доля ИК-излучения увеличивается с 43 до 59 %; УФ уменьшается с 5 до 1 %, максимум интенсивности солнечного излучения на поверхности Земли соответствует 555 нм. Глаз является селективным приемником. Особенности светового восприятия заключаются в том, что одна и та же мощность в различных областях спектра вызывает различные зрительные ощущения яркости. Связь световой мощности, спектра излучения субъективного зрительного ощущения показывает характеристика спектральной световой эффективности $V(\lambda) = \Phi_{\lambda} / P_{\lambda}$ (лм/Вт). Стандартная зависимость $V(\lambda)$ является среднестатистической (- 5% мужчин и 0.5% женщин имеют аномалии цветового зрения). $V(\lambda) = \max$ для $\lambda = 555$ нм. Относительная спектральная световая эффективность $K(\lambda) = V(\lambda) / V(555)$ носит название коэффициента видности.



Рис. 4.1. График относительной спектральной световой эффективности излучения $K(\lambda)$ (точки с, з и к соответствуют синему, зеленому и красному цветам).

Относительная чувствительность глаза обратно пропорциональна мощности монохроматического излучения, дающей одинаковое зрительное ощущение. $V(555) = 683$ лм/Вт - фотометрический эквивалент излучения; $1 / V(555) = A = 0.00147$ Вт/лм - механический (энергетический) эквивалент света. Для широкополосного белого света $V \approx 360$ лм/Вт. Кривая $K(\lambda)$ довольно условна, в представленном виде она отражает восприятие для сравнительно высоких освещенностей (более 100 лк), в сумерках максимум восприятия смещается в область более коротких волн - эффект Пуркинье ($\lambda_{\max} = 510$ нм). Детский глаз способен воспринимать ультрафиолетовое излучение от $\lambda = 315$ нм. Увеличение яркости раздвигает границы видимости, так концентрированное ИК-излучение GaAs-лазера с длиной волны $\lambda = 860$ нм может восприниматься как красное. Цвета начинают различаться с освещенности $E \approx 1$ лк.

Требования к яркости свечения изменяются в очень широких пределах в зависимости от условий работы оператора, внешней освещенности, состояния фона, наличие других излучателей, требований к скорости считывания, утомляемости при продолжительной работе и др. Крайние значения яркости - 10-30

кд/м² в полумраке комнаты и $(2-5) \cdot 10^5$ кд/м² при прямой солнечной засветке индикатора.

Способность глаза приспособливаться к восприятию резко различных по светимости объектов характеризуется логарифмическим законом Вебера-Фехнера, связывающим фотометрическую яркость источника V с его физиологически ощущаемой яркостью: $V_{\text{фзл}}: V_{\text{фзл}} = a \ln V + b$, где a и b – константы. Динамический диапазон восприятия глазом яркостей очень широк $10^{-7} - 10^5$ кд/м², (до 1 кд/м² работает сумеречный механизм зрения без цветового восприятия). Практически человек различает не более 8-10 градаций яркости (полутонов), надежно < 4-5, минимально 2 (черное-белое).

Пространственные характеристики источника определяет разрешающая способность глаза (угловая) $> 1'$, что соответствует возможности различения на расстоянии 10 м двух штрихов, разделенных промежутком в 3 мм. Для быстрого и безошибочного восприятия простого объекта (цифры, буквы и т.п.) необходимо, чтобы угловые размеры этого объекта были $\geq 1^\circ$. Относительная высота знака определяется по формуле $H = (0.5-1)10^{-2} * R$, где R – расстояние от глаза до знака (для наручных часов $H \sim 3$ мм, для дисплея $H \sim 10-20$ мм). Полный угол зрения близок к 120° по горизонтали, 90° по вертикали. Обзор для зоны максимального разрешения, соответственно, 20° и 15° , поэтому стандартный формат экрана 4 : 3.

Кроме яркости и размеров источника решающую роль в его восприятии играет контрастность светящейся поверхности. Яркостный контраст $K = (V - V_{\text{ф}})/V$, где V – яркость источника, $V_{\text{ф}}$ – яркость фона. Практически для качественного восприятия важна не столько величина K , сколько ее превышение над пороговой для данных условий контрастностью зависящей от яркости, освещенности, угла зрения и т.д. Необходимо, чтобы $K/K_{\text{пор}} \geq 15-30$.

Рекомендации по каждой величине – яркости, геометрическим размерам, контрасту – даются при ориентации на наихудшее сочетание двух остальных характеристик. Практически, однако, при восприятии индикатора все факторы действуют совместно, поэтому предельные требования могут быть несколько ослаблены.

Инерционность зрения (~ 0.1 с) влияет на оценку временных характеристик светового сигнала: при достаточно высокой частоте вспышек глаз перестает ощущать мерцание. Закон Ферри-Портера устанавливает минимальную частоту повторений, при которой глаз оператора не ощущает мельканий: $f_{\text{кр}} = a \lg V_{\text{ср}} + b$ (в зависимости от разрешающей способности глаза $a=1.5-12.5$, $b=30-40$, обычно, $f_{\text{кр}} = 45-65$ Гц). В соответствии с законом Тальбота физиологически воспринимаемая (кажущаяся) яркость ощущается глазом как усредненная яркость за период изменения: $V_{\text{кажущаяся}} = V_{\text{ср}} = T^{-1} \int V(t)dt$. Указанные закономерности инерционности зрения должны учитываться при построении схем управления индикаторами, в частности, при выборе режимов мультиплексного управления.

Описание восприятия цвета является более сложным. Цветовые каталоги включают до 10 различных оттенков. Трехцветная теория Гельмгольца восприятия цветов основывается на том, что в сетчатке глаза имеется три светочувств-

вительных приемника с различными областями спектральной чувствительности: красной, зеленой и синей. Этим элементам соответствуют определенные длины волн с максимальной чувствительностью: красный - R ($\lambda = 700$ нм), зеленый - G ($\lambda = 546$ нм), синий - B ($\lambda = 436$ нм). Любой другой цвет может быть получен смешением этих основных цветов. Таким образом для описания цвета необходимо трехмерное пространство. Цветовой график МКО (Международной комиссии по освещению) использует двухкоординатное представление цветов (x, y). На этом цветовом графике представлены все цветовые оттенки, связанные с длинами волн источников излучения.

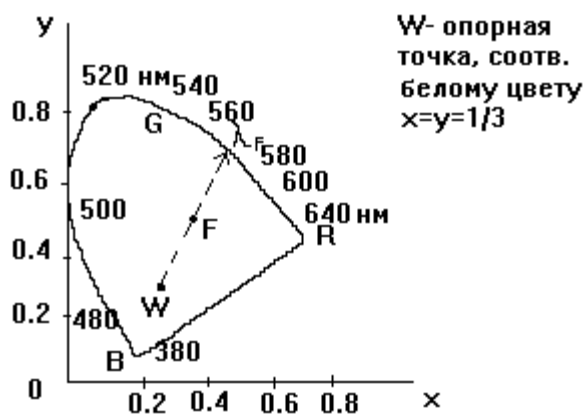


Рис. 4.2. Цветовой график МКО.

Цветовой график МКО позволяет определить две основные цветовые характеристики: цветовую тональность, определяемую доминирующей длиной волны излучения, - $\lambda-F$, как продолжение прямой линии, проведенной из точки W через точку F, соответствующую выбранному оттенку; цветовую насыщенность, определяемую чистотой цвета, - $(W-F) / (W-\lambda) * 100$ %. Кривая линия (локус) В-Г-Р характеризует насыщенные цвета, создаваемые монохроматическим излучением с соответствующей длиной волны, а прямая В-Р - искусственные цвета, создаваемые смешением синего и красного (пурпурные). Все многообразие реальных цветов лежит внутри локуса. Два цвета, которые в смеси могут дать белый цвет, называются дополнительными цветами. Основополагающая точка цветового графика W (белый цвет) характеризуется тем, что она не имеет ни цветового тона, ни цветовой насыщенности. Такие цвета (вернее, объекты такого цвета) называют еще серыми, бесцветными; единственной их характеристикой является светлота, т.е. количество света.

Цветовой треугольник, имеющий своими вершинами основные цвета системы RGB для данного многоцветного индикатора, показывает, какие цвета могут быть синтезированы путем их смешения (область внутри треугольника).

Использование в индикаторах цветовой гаммы существенно расширяет их возможности. Цветом можно дополнительно кодировать информацию, при этом наиболее различимы красный, белый, желтый, зеленый и пурпурный цвета. Цвет может служить для подчеркивания свойств объекта. Использование цвета оказывается важнейшим свойством индикатора при стремлении возбу-

дить особое психофизическое состояние оператора, например, красный цвет – символ опасности.

Многообразии индикаторов.

Существует ряд факторов, обуславливающих многообразие индикаторов.

1. Множество представленных объектов: цифры, тексты, графики, мнемосхемы, двумерные картины. Изображение может быть статическим и движущимся, резким и полутоновым, черно-белым и цветным, плоским и объемным.

2. Широта областей применения, в соответствии с которыми индикаторы отличаются требованиями к характеристикам восприятия, условиям эксплуатации, стоимости. Существенное значение при выборе индикатора имеет совместимость с используемыми схемами управления. Определяющим является деление индикаторов на устройства коллективного (информационное табло стадиона или вокзала), группового (экран телевизор или дисплея) и индивидуального пользования (циферблат часов или индикатор калькулятора).

3. Преобладание методов неявной оценки качества отображающих систем посредством субъективных испытаний, а так же те различия в зрительном восприятии, присущие людям.

4. Не удается найти единого физического принципа и конструктивно-технологического решения, которые могли бы удовлетворить всю совокупность требований к индикаторам.

Но в то же время для оценки применяемых и разрабатываемых индикаторов эти требования можно сгруппировать по некоторым общим признакам:

1. Качество восприятия: яркость свечения, контрастность, допустимый угол обзора, восприятие на свету и в темноте, минимальные и максимальные геометрические размеры элементов.

2. Цветность: возможность генерации 3-х основных цветов R-G-B и получение любого света, чистота цвета, возможность управляемой перестройки цвета свечения и создание многоцветного и полноцветного информационного поля.

3. Схемы управления: способ смены знака (механический, электронный), электрическая совместимость с элементной базой микроэлектроники, форма возбуждения сигнала (переменный или постоянный ток), значение напряжения или тока питания, возможность работы в мультиплексном режиме и микропроцессорного управления.

4. Высокая информативность: возможность создания экранов с большим числом элементов разложения: простота реализации многоэлементных, матричных и мозаичных структур, малая потребляемая мощность, воспроизведение градаций яркости, полутонов; высокая разрешающая способность и быстродействие элементов; простота развертки (сканирование) изображения; наличие встроенной памяти; возможность создания экранов большой площади.

5. Эксплуатационные характеристики: диапазон рабочих температур, механическая прочность (вибрационная, ударная и т.д.), влагостойкость, радиационная стойкость, долговечность, надежность, габаритные размеры и масса, плоскостность (малая толщина).

6. Технологичность: обеспеченность необходимыми материалами со стабильными свойствами; возможность использования стандартных процессов планарной технологии (эпитаксии, диффузии, фотолитографии, напыления и др.) и групповых методов обработки; простота применяемых деталей конструкции; малое число деталей и внешних выводов; отсутствие вакуумных объемов; низкая стоимость.

Данное перечисление не всегда полное, но позволяет оценить перспективность разработки того или иного индикаторного устройства.

Оптоэлектронные индикаторы.

Оптоэлектронными индикаторами являются приборы, соответствующие функциональному назначению индикатора и удовлетворяющие концепциям оптоэлектроники в части интегрируемости, технологичности, совместимости с микроэлектроникой, начали развиваться как альтернатива электронно-лучевым трубкам (недостатки ЭЛТ - наличие вакуумного объема, громоздкость, высоковольтность, большая потребляемая мощность).

По физическому принципу отображения информации выделяют индикаторы с активным и пассивным растром. Индикаторы с активным растром используют светогенерационный эффект - преобразование электрической энергии в световое излучение (различные виды люминесценции и тепловое излучение).

В индикаторах с пассивным растром управляющие электрические сигналы модулируют внешний световой поток (электрооптические эффекты - изменение коэффициента поглощения или отражения участков растра, вращение плоскости поляризации проходящего света, изменение цвета поверхности и др.).

Индикаторы с активным растром включают в себя вакуумные накальные, газоразрядные, вакуумные люминесцентные, полупроводниковые и электролюминесцентные. К индикаторам с пассивным растром относятся жидкокристаллические, электрохромные, электрофоретические, электролитические, магнетомеханические, дипольные и др.

Вакуумные накальные индикаторы.

Вакуумные накальные индикаторы являются одними из первых применяемых "дооптоэлектронных" индикаторов, разновидностей ламп накаливания. В вакуумном стеклянном баллоне из вольфрамовых нитей сформированы цифры, высвечивающиеся при пропускании тока. Эти индикаторы имеют все достоинства и недостатки источников теплового излучения, они громоздкие, сложные. Но в то же время для них характерны рекордно высокая яркость и отличные эксплуатационные свойства (температурная и радиационная стойкость), долговечность. Но в целом вакуумные накальные индикаторы малоперспективны.

Газоразрядные индикаторы

Действие газоразрядных индикаторных приборов обусловлено свечением при

электрическом разряде в газовой среде. Обычно используется режим тлеющего разряда (с холодным катодом). Стекланный баллон индикатора заполнен инертным газом (давление > 0.1 атм. - до 100 атм. и более). При достаточно высоком напряжении энергия электронов достигает значений, необходимых для ионизации атомов газа. Столкновения электронов с атомами становятся неупругими, происходит возбуждение и ионизация атомов. В результате ионизации образуются добавочные электроны и положительно заряженные ионы, в газе создается самостоятельный разряд. Излучение возникает в результате рекомбинации и перехода атомов в невозбужденное состояние.

Газоразрядные приборы обладают значительной инерционностью. Время запаздывания импульса тока в разрядном промежутке относительно импульса управляющего напряжения определяется как статистическими закономерностями вылета электронов из катода, так и временем формирования электронной лавины. В то же время после прекращения действия анодного напряжения электроны и ионы рекомбинируют не мгновенно, что обуславливает существование некоторого времени запаздывания. В результате быстродействие подобных индикаторов, как правило, не превышает 1 мсек.

Основной газовой смесью, используемой в газоразрядных индикаторах, является смесь гелия с неоном (к ним иногда в малых количествах добавляются и другие инертные газы). Видимое излучение электрического разряда в этой смеси принадлежит красно-оранжевой области спектра (добавление аргона приводит к сдвигу спектра в более коротковолновую область). Светоотдача индикаторов этого типа составляет $\sim 0.2-0.3$ лм/Вт; в красной области спектра, где

1 Вт соответствует примерно 100 лм, энергетический выход оказывается равен $\sim 0.2-0.3$ %. В то же время яркость индикаторов может достигать $10\,000$ кд/м². Температурный диапазон работы составляет от -60° до $+70^{\circ}$ С.

Среди существующих газоразрядных индикаторов можно выделить следующие основные типы приборов: сигнальные индикаторы - точка или малая светящаяся область (например, неоновая лампочка); знаковые и линейные (шкальные) индикаторы; индикаторные тиратроны; матричные индикаторные панели.

Знаковые индикаторы используют слабое свечение тлеющего разряда вблизи катода (свечение покрывает весь катод, который имеет форму отображаемого символа). Совокупность независимых катодов позволяет получать различные изображения. Возникающее излучение выходит через сетчатый анод.

Индикаторные тиратроны имеют несколько управляющих электродов: сеток и анодов, что позволяет более эффективно управлять электрическим разрядом.

Для повышения светоотдачи и обеспечения многоцветности используют фотолуминофоры, преобразующие коротковолновое (обычно ультрафиолетовое) излучение газового разряда в видимое. Аналогичный механизм формирования светового потока используется в лампах дневного света, светоотдача которых может достигать 100 лм/Вт. В одном стеклянном баллоне могут размещаться несколько ячеек, свечение фотолуминофора в каждой имеет свой цвет. Светоотдача газоразрядных индикаторных приборов, использующих свечение фотолуминофоров, ниже ($\sim 0.5-1$ лм/Вт), энергетический выход $< 1\%$.

Газоразрядные индикаторы обладают значительным ($\sim 10\ 000$ часов) сроком службы, который может быть еще повышен, например, введением в состав газовой смеси паров ртути.

Вакуумные люминесцентные индикаторы

В основе работы приборов этого типа лежит явление катодолюминесценции, возникающей при возбуждении люминофора ускоренными электронами. Если энергия электронов сравнительно невелика (до нескольких десятков электрон-вольт), то говорят о низковольтной катодолюминесценции, которая используется в вакуумных люминесцентных индикаторах. Катодолюминесценция, возникающая в электронно-лучевых трубках, характеризуется гораздо большей энергией электронных пучков (десятки килоэлектрон-вольт).

При облучении люминофора часть первичных электронов, попадающих на поверхность кристаллов, испытывает упругое или неупругое отражение, другая часть проникает в глубь люминофора на некоторую глубину, тем большую, чем больше их кинетическая энергия. Эта энергия расходуется на создание элементарных возбуждений кристаллической решетки - экситонов, электронно-дырочных пар, плазмонов (коллективных колебаний свободных электронов) и т. д., которые, мигрируя по кристаллу, могут возбуждать центры свечения. Кроме того, электроны больших энергий могут ионизировать атомы, выбивая на своем пути вторичные электроны, способные также принять участие в создании элементарных возбуждений решетки. В результате область, в которой происходит миграция экситонов и электронно-дырочных пар, а также возникает люминесценция, оказывается заметно шире области, в которую проникают электроны из падающего луча.

Зависимость яркости катодолюминесцентных устройств от условий возбуждения (плотности тока j электронного пучка и ускоряющего напряжения V) описывается соотношением: $B \sim j (V - V_n)^m$, где V_n — пороговое напряжение, при котором начинается свечение люминофора; m - коэффициент, зависящий как от свойств самого люминофора, так и от величины ускоряющего напряжения. Обычно m уменьшается с увеличением V от 1,5 до 0,8, причем в случае низковольтной катодолюминесценции с хорошей точностью можно считать, что $m = 1$.

Наличие порогового напряжения V_n вызвано возникновением потенциального барьера у поверхности зерен люминофора, связанного с появлением поверхностного заряда, который отталкивает первичные электроны. Стабильную катодолюминесценцию удастся получить только при таких ускоряющих напряжениях, когда число вторичных электронов, выбиваемых из кристалла и уносящих избыток заряда, становится равным числу первичных, проникающих в глубь люминофора. У материалов, составляющих группу высоковольтных катодолюминофоров, пороговое напряжение V_n составляет обычно сотни вольт; в результате ускоряющее напряжение V оказывается очень высоким (5- 50 кВ), что является одним из основных недостатков приборов, в которых используют такие люминофоры. Люминофоры, используемые в низковольтных катодолю-

минесцентных индикаторах, обладают повышенной электропроводностью, в результате заряд, скапливающийся у их поверхности, оказывается меньше, и V_n снижается до единиц вольт.

Зависимость яркости катодолюминесценции от плотности тока возбуждающих электронов линейна в широком диапазоне значений плотности тока j . При больших плотностях возбуждения, однако, эта зависимость выходит на насыщение, что может быть обусловлено насыщением центров свечения, увеличением тормозящего поля, создаваемого заряженной поверхностью люминофора, а также температурным тушением (при увеличении плотности тока температура бомбардируемого электронами кристалла возрастает). Одновременно начинает падать энергетический выход - все большая часть подводимой энергии уходит в теплоту. Практически яркость свечения катодолюминесцентных устройств не превышает $200-700$ кд/м², при этом рабочий диапазон изменения плотности тока составляет $0,5-20000$ мкА/см².

Основные потери энергии при катодолюминесценции связаны с тем, что возникающие в люминофоре горячие электроны и дырки быстро (за $1 \cdot 10^{-12}$ с) теряют часть энергии, превращаясь в обычные тепловые электроны зоны проводимости и дырки валентной зоны. Доля энергии, переходящей при этом в тепловые колебания решетки, довольно велика и составляет $65-70\%$ от всей энергии. Таким образом, энергетический выход катодолюминесценции вряд ли может превышать $\eta_e = 0,35$; реально достижимые значения η_e составляют $0,2-0,25$ (люминофор ZnS: Cu).

Яркость, энергетический выход, цвет свечения зависят от химического состава люминофора. В качестве примера можно привести некоторые из тех, которые выпускаются для цветных телевизионных кинескопов: люминофоры на основе ZnS:Ag (цвет свечения синий), ZnCdS: Cu, AL (цвет свечения зеленый), Y₂O₃: Eu (цвет свечения красный). Яркость свечения соответствующих устройств составляет $50-300$ кд/м². В вакуумных люминесцентных индикаторах используют кристаллофосфоры на основе оксида и сульфида цинка (ZnO: Zn, ZnS: Ag, ZnS:Cu +ZnO) диоксида олова (SnO₂:Eu), смесь SnO₂ и Y₂O₃:Eu, а также некоторые другие. Эти люминофоры характеризуются низким потенциалом начала катодолюминесценции (для ZnS он равен $6-7$ В, для ZnCdS - $4-5$ В), поэтому общее напряжение, прикладываемое к таким индикаторам, не превышает $50-70$ В. Яркость при этом может быть довольно велика (до 1000 кд/м²).

От состава люминофора зависит и время послесвечения устройства: оно может составлять от 10 мкс до нескольких минут (у электронно-лучевых трубок с длительным послесвечением, используемых в запоминающих осциллографах)

Вакуумный люминесцентный индикатор (ВЛИ) представляет собой вакуумный прибор диодной или триодной конструкции. Наиболее распространенной является триодная конструкция, состоящая из катода прямого накала, сетки и нескольких анодов, покрытых низковольтным люминофором, заключенных в вакуумный баллон (рис. 4.3).

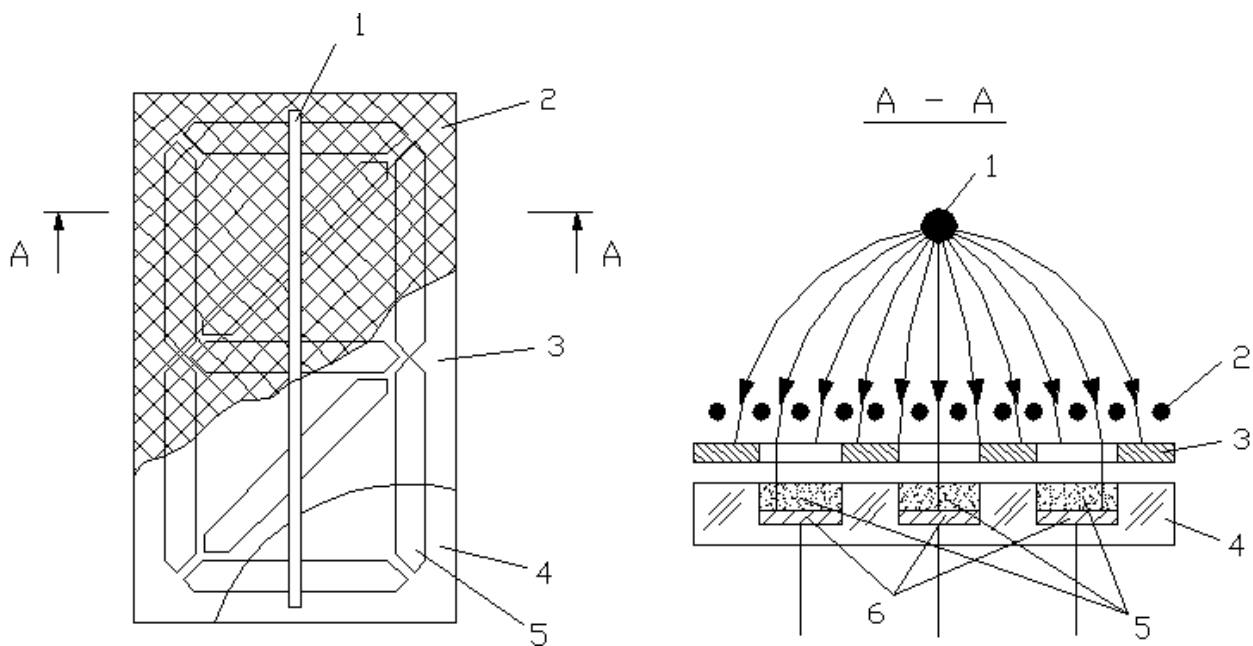


Рис. 5.3. Устройство вакуумного люминесцентного индикатора: 1 – катод, 2 – сетка, 3 – экран, 4 – подложка, 5 – люминофор, 6 – анод.

Функции анода выполняют несколько электродов, покрытых люминофором. Электроны, вылетая с катода 1, имеющего температуру 900-1000 К., ускоряются электрическим полем сетки 2 и сегментов анода 6. Достигая этих сегментов, электроны возбуждают люминофор 5, вызывая его свечение. Для управления индикатором напряжение подается лишь на те сегменты анода, которые формируют требуемое изображение. Остальные сегменты находятся под тем же напряжением, что и катод; электроны, отражаясь от них, попадают на экран 3, соединенный с сеткой. На этот же экран попадает та часть электронов, которая не достигает положительно заряженных сегментов анода. Сетка 2 необходима для того, чтобы поток электронов в области анода был более равномерным, ее потенциал обычно равен потенциалу анода. В исходном состоянии, когда управляющее напряжение не подано, для предотвращения нежелательного свечения сетка имеет отрицательный потенциал из несколько вольт ниже, чем катод. Всю систему электродов вместе с подложкой 4 помещают в вакуумированный стеклянный баллон.

Применение в вакуумных люминесцентных индикаторах катодолуминофоров разных типов позволяет получать свечение от синей ($\text{ZnS:Ag} + \text{In}_2\text{O}_3$) до красной ($\text{ZnCdS:Ag} + \text{In}_2\text{O}_3$) областей спектра. У некоторых люминофоров спектр излучения оказывается зависящим от ускоряющего напряжения, при больших энергиях первичных электронов возбуждаются более глубокие центры свечения. Так, при увеличении анодного напряжения от 20 до 60В цвет свечения индикаторов с $\text{SnO}_2:\text{Eu}$ и ZnS:Cl, Ag - люминофорами меняется от оранжевого до желто-зеленого. На практике наибольшее распространение получил сравнительно дешевый люминофор на основе ZnO:Zn , дающий интенсивное излучение в сине-зеленой области спектра (максимум спектра соответствует

длине волны 510 нм). Применение специально подобранных светофильтров позволяет несколько разнообразить цвет свечения индикаторов.

В индикаторах на керамической либо стеклянной изолирующей плате нанесены аноды и токоведущие шины, обеспечивающие вывод на контактные площадки. Аноды, называемые анодами-сегментами, могут иметь различную форму. Они могут быть в виде круглых или квадратных элементов матриц и мозаик, в виде штрихов, шкал, цветовых полей и мнемосхем.

Вакуумные люминесцентные индикаторы характеризуются знаковосинтезирующим способом формирования изображения из упомянутых выше анодов, являющихся светоизлучающими элементами (СИЭ). В цифровых индикаторах в качестве СИЭ используются вытянутые сегменты специальной формы. Набор сегментов образует на информационной (анодной) плате прибора некоторую обобщенную фигуру - пилигримму. Из семисегментной пилигриммы можно синтезировать любую цифру, восемнадцатисегментная - позволяет отобразить любую букву латинского и русского алфавитов, то же позволяет и тридцатипятиточечная матрица. Графические информационные модели формируются на точечных элементах отображения. Видимое изображение в индикаторе создается одновременным высвечиванием нескольких светоизлучающих элементов, каждый из которых имеет самостоятельное управление.

Для формирования светоизлучающих элементов и токопроводящих шин в зависимости от информационной емкости индикатора используется многослойная трафаретная печать либо прецизионная фотолитография. Обе технологии базируются на процессах, принятых в массовом производстве толсто пленочных и тонко пленочных гибридных интегральных схем. Сетки изготавливаются методом химического фрезерования из металлической фольги. Оксидный катод представляет собой тонкую вольфрамовую нить, покрытую тройной смесью окислов BaO, SrO, CaO. Технологии вакуумной обработки материалов, герметизации, откачки, формирования параметров вакуумных люминесцентных индикаторов базируются на процессах, широко используемых в массовом производстве электровакуумных приборов.

По виду отображаемой информации и способам управления вакуумные люминесцентные индикаторы можно разделить на две группы: цифровые, буквенно-цифровые сегментные, шкальные, знаковые (мозаичные) индикаторы со статическим управлением; матричные индикаторы (экраны) с динамическим (мультиплексным) управлением.

Статическое управление обычно используется для одnorазрядных индикаторов. Каждый электрод индикатора (аноды-сегменты, сетка, катод) отдельно подключается к источникам питания (постоянного или импульсного напряжения для анодов и сетки). Управление может осуществляться по любой из трех цепей.

В динамическом режиме управления могут работать как одnorазрядные, так и многоразрядные индикаторы. Режим характеризуется тем, что соответствующие аноды-сегменты каждого одnorазрядного индикатора и каждого знака места в многоразрядных индикаторах имеют общее подключение к источникам питания (импульсного напряжения). Управление осуществляется по цепям сет-

ки и анодов. При этом по цепям сетки производится включение выбранного индикатора (знакоместа), а по цепям анодов - включение анодов-сегментов в выбранном индикаторе.

Эффект низковольтной катодолюминесценция (НВКЛ) вот уже на более чем двух десятилетий о успехом используется в вакуумных люминесцентных индикаторах (ВЛИ) – приборах, получивших широкое распространение во многих классах видеотерминальных устройств. Они применяются в качестве цифровых и буквенно-цифровых дисплеев в АСУ и диспетчерских пультах, электронных калькуляторах и часах, системах единого времени телецентров, морских судов. Их используют в качестве аналого-цифровых и мнемонических дисплеев в автомобилях, самолетах, космических кораблях, в видео- и аудиоманитофонах, лазерных проигрывателях, тюнерах и телевизорах. Созданы полноформатные низковольтные экраны для отображения универсальной знакографической информации.

Эффективность использования вакуумных люминесцентных индикаторов в устройствах, построенных на современных интегральных схемах (ИС), определяется комплексом их функциональных и потребительских свойств. ВЛИ непосредственно сопрягаются с ИС, обладают высокой яркостью свечения и большим углом обзора, экономичны, многоцветны, работоспособны в условиях экстремальных воздействий внешних факторов.

К числу недостатков вакуумных люминесцентных индикаторов следует отнести невысокую контрастность (что особенно сказывается при больших уровнях внешней освещенности), ограниченный угол обзора и - несмотря на отмеченные выше успешные разработки в этой области - трудность получения достаточно яркого свечения синего, желтого и красного цветов. Существенным обстоятельством, ограничивающим развитие высокоинформативных крупноформатных вакуумных люминесцентных индикаторов, является также эффект снижения энергетической эффективности индикатора при увеличении количества светоизлучающих элементов. При использовании построчной развертки эффективность индикатора снижается с ростом количества строк. Единственной мерой, снимающей это ограничение, является использование ненакаливаемого катода, потребляющего энергию лишь в момент токоотбора.

Полупроводниковые индикаторы

Полупроводниковые индикаторы изготавливаются на основе светоизлучающих диодов с конца 60-х годов и являются исторически первыми оптоэлектронными индикаторами. В них используется явление инжекционной электролюминесценции в прямосмещенных p-n переходах на основе таких полупроводников, как GaP, GaAsP, GaAlAs, GaN, InGaN, SiC. Выбор материала определяется необходимостью получения заданных цветов свечения.

Расчет основных характеристик полупроводниковых индикаторов производится так же, как и для инжекционных излучающих диодов.

Достоинства светодиодов:

1. Возможность перекрытия всего видимого диапазона.

2. Совместимость по напряжению с ИС управления ($V < 1.5-3.5$ В).
3. Долговечность (более 10^5 часов).
4. Быстродействие ($10^{-8} - 10^{-9}$ с).
5. Широкий температурный диапазон ($-60 + 125$ °С).
6. Компактность.
7. Технологичность.

Конструкции полупроводниковых индикаторов:

1. Монолитная. Сегменты с типичным размером 2x3 мм создаются методами фотолитографии на полупроводниковом кристалле.
2. Гибридная. Каждый сегмент - отдельный излучающий кристалл на керамическом основании.

Размеры светящихся областей относительно малы, что является одним из недостатков полупроводниковых индикаторов. Но высокая яркость светодиодов позволяет использовать различные способы увеличения изображения:

1. В многоразрядных монолитно-гибридных индикаторах используется пластмассовая моноблочная линза.



Рис. 5.4. Конструкция индикатора с моноблочной линзой.

2. Кристаллы помещают в основание конически расширяющихся прорезей в пластмассовом корпусе.



Рис. 5.5. Структура индикатора со светорассеивающим материалом.

Яркость лицевой поверхности светодиода намного меньше яркости кристалла. Но при относительно малых размерах светящихся элементов индикатора для зрительного восприятия важна не яркость, а сила света - основной фотометрический параметр светодиодов (0.02-100 кд). Эти способы позволяют обеспечить увеличение размеров знака до 10 мм и снижение потерь на полное внутреннее отражение. Крупноформатные полупроводниковые индикаторы группового использования (размеры знаков до 100 мм) набирают из дискретных светодиодов с увеличенной площадью свечения каждого.

Светодиоды иногда используются для создания крупноформатных многоэлементных экранов. В этих индикаторах необходимо решать проблемы обес-

печения идентичности параметров всех элементов экрана, связанные с высокой крутизной ВАХ диодов и сильной зависимостью яркости от температуры.

Особое место в разработках занимают многоцветные светодиоды с электрическим управлением цветом свечения.

1. В первом варианте два кристалла с p-n переходами, создающими свечение разного цвета (например, красное и зеленое), включены встречно-параллельно и помещены в светорассеивающий компаунд. Для получения необходимого цвета свечения подачей напряжения разной полярности включается один или другой светодиод.

2. Во втором варианте используется p-n-p гетероструктура с различным цветом свечения на каждом p-n переходе, которые подключены к независимым источникам питания. Цвет свечения может управляться соотношением токов, возможно управление двухполярным импульсным напряжением.

Порошковые электролюминесцентные индикаторы

Явление предпробойной электролюминесценции в настоящее время применяется в пленочных источниках света: порошковых и тонкопленочных, возбуждаемых постоянным и переменным напряжением. Первые промышленные образцы электролюминесцентных излучателей на основе порошкообразных люминофоров были получены в конце 50-х годов. Они применяются до настоящего времени в источниках света различного назначения в качестве электролюминесцентных панелей: светильники, световые указатели, цифробуквенные индикаторы, мнемосхемы и др.

Порошковый светоизлучающий элемент представляет собой многослойную структуру на прозрачном основании: стеклянной пластине или полимерной пленке. Источник излучения состоит из прозрачного электрода на основании, люминесцентного слоя и второго электрода, непрозрачного. Излучение выходит через прозрачный электрод и основание.

Люминесцентный слой состоит из порошкообразного люминофора с органическим или неорганическим связующим. Толщина люминесцентного слоя составляет 30-100 мкм, содержание связующего для излучателей, возбуждаемых переменным напряжением, составляет 30-50%, а для излучателей, возбуждаемых постоянным током, 5-25%. Эти излучатели отличаются также размером зёрен люминесцентных порошкообразных материалов: люминофоры, возбуждаемые переменным напряжением, имеют среднюю величину частиц от 1 до

10 мкм, а люминофоры для постоянного тока более мелкозернистые - от 0,2 до 2 мкм.

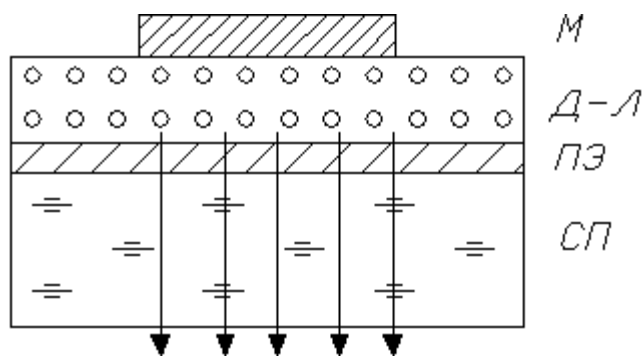


Рис. 5.6. Типичная конструкция электролюминесцентного конденсатора: М - электрод; Д –Л - люминесцентный слой с диэлектрическим связующим; ПЭ – прозрачный электрод; СП - стеклянная подложка.

В основном в качестве люминофоров используются порошки сульфида цинка и кадмия и сульфоселенидные соединения. В последние годы разработаны люминесцентные материалы на основе сульфидов кальция и стронция. В качестве активаторов используются медь, марганец, галлий, серебро, свинец и другие вещества, которые вводятся в люминофоры в количестве от единиц до сотых долей процента. Присутствие меди в этих люминофорах является обязательным, поскольку она образует отдельную фазу (сульфид меди) на поверхности зёрен при прокаливании шихты. Для образования отдельной фазы медь вводят в количествах, превышающих ее предел растворимости в материале люминофора. Контакт этих фаз приводит к появлению на поверхности зёрен люминофора гетеропереходов, обуславливающих концентрацию электрического поля в поверхностных барьерах. Легирование медью приводит к увеличению яркости излучения и повышению эффективности электролюминесценции.

Цвет свечения люминофоров определяется типом и количеством вводимой примеси, промышленностью выпускаются люминесцентные материалы, излучающие во всем видимом диапазоне. Наиболее высокие значения яркости получены для люминофоров на основе сульфида цинка, легированного марганцем, с желтым цветом свечения. Перспективными считаются люминофоры на основе сульфидов щелочноземельных металлов, легированных галогенидами редкоземельных элементов. Соответствующие электролюминесцентные составы обозначаются ЭЛ, ЭЛС- 455, 510, 670 и др., где число показывает длину волны в нм, соответствующую максимальной интенсивности излучения.

В качестве связующего в люминесцентном слое используются диэлектрические лаки на основе эпоксидных смол (ЭП-96), цианэтилцеллюлозы, цианэтилового эфира поливинилового спирта (ВС-530) и др., а также стеклоэмалевое связующее (цинковоборосиликатное стекло).

Светотехнические характеристики излучателей зависят от конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов. К конструктивно-

технологическим относят тип люминофора, размер зёрен порошка, тип связующего, толщину и содержание люминесцентного слоя и др. К эксплуатационным факторам относят амплитуду и частоту возбуждающего напряжения, температуру, влажность среды и др.

Вольт-яркостная характеристика электролюминесцентных конденсаторов обычно аппроксимируется степенной зависимостью от напряжения и частоты:

$V = V_0 * V^n * f^m$, где $n = 3-4$, $m = 0,7-0,8$. Обычно возбуждение свечения в порошковых излучателях производится напряжением величиной 50-300 В, изменяющимся с частотой 50-5000 Гц. Яркость излучения электролюминесцентных панелей составляет от 5 до 500 кд/м². Интервал рабочих температур лежит в пределах от -60° до 50° С. Дальнейший рост температуры приводит к снижению яркости свечения. Отечественной промышленностью выпускаются электролюминесцентные индикаторы типа ИТЭЛ, ИЭМ, МЭЛ и другие, используемые в качестве источников света, цифровых индикаторов, мнемонических и графических малоформатных экранов.

Основным достоинством порошковых электролюминесцентных индикаторов является возможность получения больших площадей свечения и твердотельная конструкция. К недостаткам порошковых электролюминесцентных индикаторов относят ограниченные значения яркости и небольшой срок службы, который во многом обусловлен диффузией меди и других примесей. Несмотря на исследования деградационных явлений в порошкообразных светоизлучающих структурах долговечность приборов не превышает нескольких тысяч часов.

Тонкопленочные электролюминесцентные индикаторы

Исследования тонкопленочных источников излучения были начаты несколько позже, чем изучение порошковых люминофоров. Долгое время пленки рассматривались в основном как удобный объект для исследования физики электролюминесценции. Интерес к тонкопленочным электролюминесцентным индикаторам резко возрос после того, как в 1974 г. исследователями японской фирмы "Sharp" был представлен первый тонкопленочный плоский экран, обладающий высокими функциональными характеристиками. Успехи в технологии получения тонких пленок, а также разработка структур, в которых слой люминофора толщиной около 1 мкм расположен между двумя более тонкими слоями диэлектрика, позволили создать излучатели, возбуждаемые переменным напряжением, которые имеют более высокую яркость и срок службы по сравнению с порошковыми.

Тонкопленочные электролюминесцентные структуры типа МДЛДМ (прозрачный электрод-диэлектрик-люминофор-диэлектрик-металл) обычно состоят из пяти последовательно нанесённых на стеклянную под-

подложку слоёв с использованием методов тонкоплёночной технологии. Такая структура представлена на рис. 5.7.

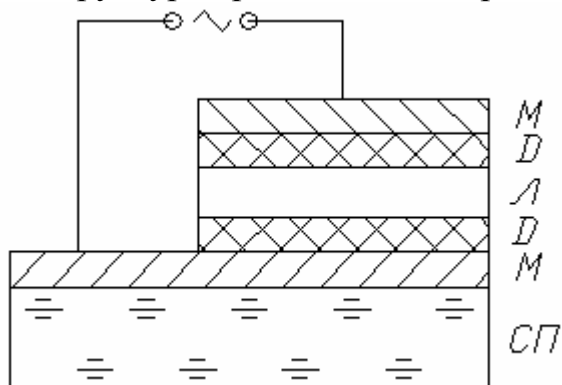


Рис. 5.7. Типичная конструкция тонкоплёночного электролюминесцентного конденсатора: М - электрод; Д - диэлектрическая плёнка; Л - люминесцентный слой; СП - стеклянная подложка.

Толщина пленок проводников составляет 0.1- 0.2 мкм, диэлектрических пленок - 0.2- 0.5 мкм и пленок люминофора - 0.5-1.5 мкм. Кроме перечисленных плёнок в состав электролюминесцентного конденсатора могут входить дополнительные слои, например, светопоглощающего контрастного материала. Кроме того, каждый из функциональных слоёв может быть неоднородным, например, состоять из нескольких плёнок. Прозрачным может быть и второй электрод, тогда контрастный слой помещается за пределами тонкоплёночной структуры и может совмещаться по своим функциям с защитным покрытием. В качестве подложки и одновременно первого диэлектрика может быть использована керамическая пластина, тогда верхний электрод должен быть прозрачным.

В качестве люминесцентных слоёв обычно используют сульфид цинка, легированный марганцем или фторидами редкоземельных элементов. Перспективными люминофорами показали себя сульфиды стронция и кальция, легированные фторидами редкоземельных металлов. Все использованные люминофоры являются широкозонными полупроводниками с высоким удельным сопротивлением, легирующие примеси образуют центры свечения, мало воздействующие на электрические свойства материалов люминофора. Кристаллическая структура люминесцентных плёнок зависит от их химического состава и условий получения. В большинстве случаев эти плёнки являются поликристаллическими со столбчатой формой кристаллитов, продольные размеры которых порядка толщины плёнки, а поперечные в зависимости от температуры подложки и последующего отжига лежат в пределах от сотых до десятых долей микрометра.

В качестве подложек при получении структур используются пластины бесщелочного термостойкого стекла толщиной 2 - 3 мм с нанесенным слоем прозрачного электрода, для создания которого применяют сильно

легированные оксиды индия или олова, являющиеся вырожденными широкозонными полупроводниками. Для получения непрозрачных электродов используют алюминий, индий, олово, тугоплавкие металлы. Иногда для увеличения проводимости тонких протяженных электродов в матричных панелях поверх прозрачных электродов наносят более узкие полоски металлов с более высокой электропроводностью.

Для создания диэлектрических пленок в электролюминесцентных структурах применяют оксиды кремния, алюминия, иттрия и редкоземельных металлов, нитрид кремния и др., их композиции, сегнетоэлектрические материалы. Поскольку эти пленки работают в условиях сильных электрических полей, к их электрическим параметрам предъявляют высокие требования. Используемые диэлектрические слои должны иметь высокие электрические и технологические свойства, стабильность и воспроизводимость.

Наличие двух диэлектрических слоев, отделяющих пленку люминофора от электродов, превращает данное устройство в электролюминесцентный конденсатор, что определяет необходимость использовать переменное напряжение для возбуждения электролюминесценции. Для МДЛДМ-структур с малой плотностью свободных носителей заряда в люминофоре в слабых полях приложенное напряжение распределяется между пленками люминофора и диэлектриков в соответствии со значениями их геометрических емкостей. Таким образом, чем больше емкость диэлектриков, тем большая часть общего напряжения падает на слое люминофора.

Главная роль диэлектрических слоев заключается в ограничении заряда, проходящего через люминофор в рабочих режимах. Необходимость применения таких слоев обусловлена физической природой процесса переноса заряда в люминесцентной пленке. Электролюминесценция в тонких слоях сульфида цинка и других материалов связана с электрическим пробоем полупроводника. При малых электрических полях материал обладает очень низкой проводимостью, но при некоторой пороговой напряженности поля, которая составляет от $5 \cdot 10^5$ до $2 \cdot 10^6$ В/см, одновременно наблюдается ускорение роста тока и возникновение люминесценции. Небольшие неоднородности поликристаллических люминесцентных пленок могут привести к тому, что после приложения высокого напряжения возникнут области с быстрым нарастанием тока, которые войдут в режим постоянного короткого замыкания, и ток может достигнуть величин, достаточных для разрушения структуры. При возбуждении пульсирующим или переменным напряжением структур с изолирующими слоями через люминесцентный слой проходит только ограниченный заряд. В этом случае нагрев пленки люминофора ограничивается до приемлемого уровня и катастрофического разрушения не происходит. Электрический пробой люминесцентного слоя носит обратимый характер и сопровождается электролюминесценцией.

Другая важная роль диэлектрических слоев заключается в формировании поляризационного заряда на границах раздела люминофор - диэлек-

трик. По мере накопления зарядов у противоположных границ люминесцентного слоя созданное ими поляризационное поле уменьшает напряженность электрического поля в люминофоре и пробой прекращается. Поляризационное поле усиливает действие последующего импульса напряжения противоположной полярности. При подаче на электролюминесцентный конденсатор импульса напряжения противоположной полярности поляризационное поле добавляется к внешнему полю, поэтому возбуждение свечения в этих индикаторах производится знакопеременным напряжением.

Для описания физических основ работы этих приборов необходимо учитывать следующие основные процессы, протекающие в слое люминофора в сильном электрическом поле (рис. 5.8.):

1. Эмиссия электронов поверхностными состояниями границы раздела люминофор-диэлектрик в зону проводимости люминофора.
2. Ускорение электронов электрическим полем в люминесцентном слое.
3. Возбуждение центров свечения ускоренными электронами.
4. Излучательные и безызлучательные переходы возбужденных центров в основное состояние.
5. Захват свободных носителей ловушками границы раздела люминофор-диэлектрик.

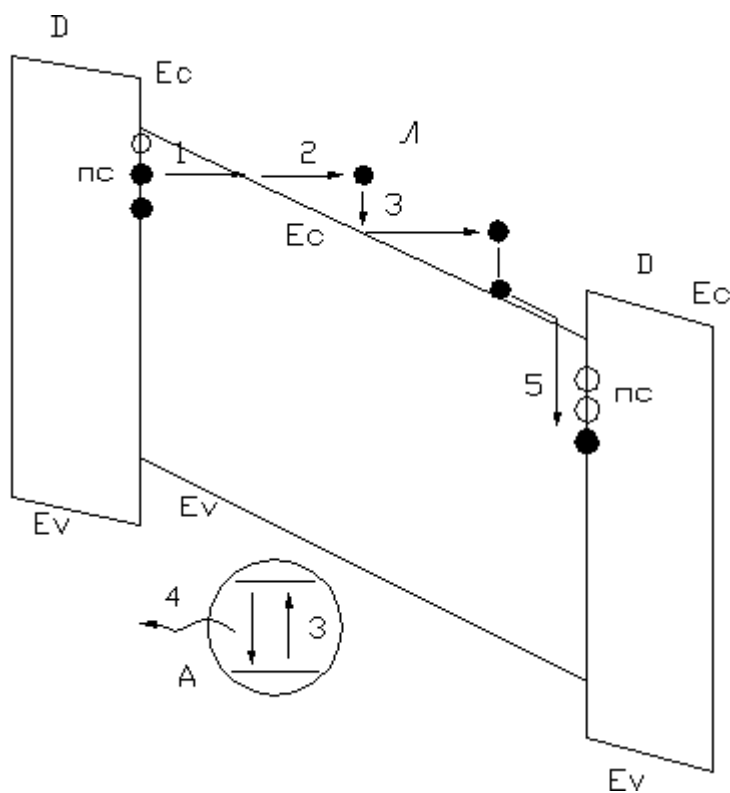


Рис. 5.8. Энергетическая диаграмма структуры диэлектрик-люминофор-диэлектрик при подаче напряжения: Д - диэлектрик; Л - люминофор; А -

активаторный центр свечения; ПС - поверхностные состояния; E_c и E_v - зона проводимости и валентная зона.

Наиболее важными техническими характеристиками тонкопленочных электролюминесцентных источников излучения являются: яркость и спектр излучения, рабочее напряжение, потребляемая мощность, световая отдача, время нарастания и спада яркости и др. Величины характеристических параметров и их зависимость от управляющих воздействий и внешних факторов определяют применение этих излучателей в различных индикаторных устройствах.

Основной характеристикой электролюминесцентных источников света является зависимость яркости излучения от приложенного напряжения (вольт-яркостная характеристика). На рис. 5.9 представлены типичные вольт-яркостные характеристики тонкопленочных электролюминесцентных структур на основе сульфида цинка, легированного марганцем, измеренные для разных частот гармонического напряжения. Эти зависимости являются линейными при малых напряжениях и частотах, с повышением этих параметров графики зависимости являются сублинейными. Общепринято изображать графики вольт-яркостных характеристик в полулогарифмическом масштабе, т.е. по оси абсцисс напряжение обозначают в линейном масштабе, а по оси ординат показывают яркость в логарифмических координатах. Использование логарифмического масштаба для яркости излучения связано с субъективностью восприятия ее величины органами зрения человека, увеличение яркости источника света на порядок человек воспринимает как увеличение в 2 раза.

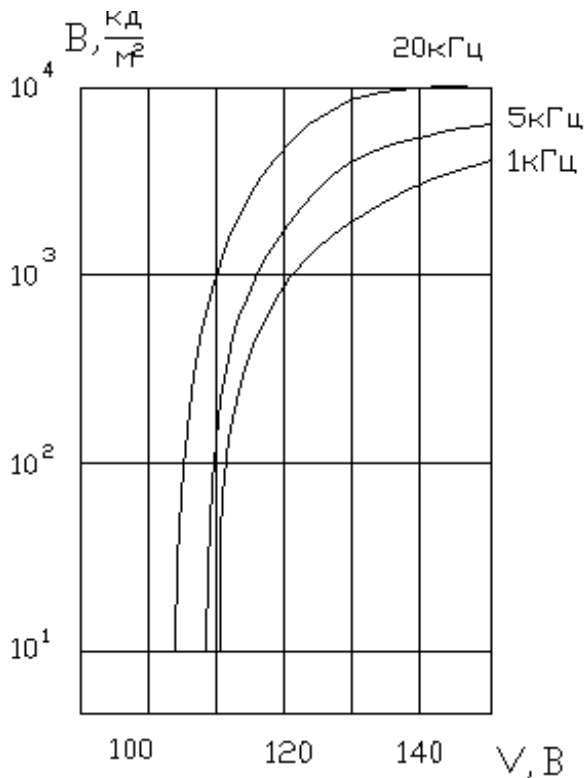


Рис. 5.9. Вольт-яркостные характеристики тонкопленочных электролюминесцентных конденсаторов при разных частотах возбуждающего напряжения.

Вольт-яркостная характеристика тонкопленочных излучателей имеет пороговый характер, рост яркости происходит, когда напряжение превышает некоторое значение. Величина порогового напряжения определяется в первую очередь свойствами материала люминофора, а именно, пороговой напряженностью электрического поля, а также величиной и соотношением емкостей люминесцентного и диэлектрического слоев. Значение пороговой напряженности электрического поля в пленках люминофора, изолированных от электродов, определяется механизмом генерации свободных носителей заряда $\approx 10^5 \div 10^6$ В/см.

Принято определять значение порогового напряжения по определенному уровню яркости, чаще всего яркости 10 или 1 кд/м². Однако зависимость яркости от условий возбуждения может приводить к изменению соответствующего напряжения, поэтому определяемая таким образом величина порогового напряжения применима для оценки светотехнических свойств. Для анализа электрических характеристик более корректным является определение порогового напряжения с помощью измерений заряда или мощности.

Величина порогового напряжения определяет минимальное рабочее напряжение тонкопленочных светоизлучающих приборов. Несмотря на то, что увеличивая емкость диэлектрических слоев и уменьшая толщину люминофора, удастся получать структуры с пороговым напряжением 40-60 В, для излучателей, применяемых в индикаторных устройствах с высокой надежностью, его величина составляет обычно более 100 В. Одной из задач разработчиков тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов является снижение рабочего напряжения для уменьшения потребляемой устройством электрической мощности. Величина максимальной яркости тонкопленочных электролюминесцентных излучателей зависит как от свойств люминофора и конструктивных параметров светоизлучающей структуры, так и от условий возбуждения. С увеличением приложенного напряжения для вольт-яркостных характеристик наблюдается насыщение яркости. С ростом частоты возбуждающего напряжения насыщение происходит при меньших его значениях и величина максимальной яркости возрастает. Значение максимальной яркости излучения для тонкопленочных конденсаторов на основе сульфида цинка, легированного марганцем, достигает $3.4 \cdot 10^4$ кд/м². Средняя яркость свечения электролюминесцентного конденсатора В связана с величиной рассеиваемой в люминофоре электрической мощности Р следующим соотношением: $V = \eta \cdot V_0 \cdot P / (V_0 + \eta \cdot P)$, где η и V_0 - максимальные значения светоотдачи и яркости для данного люминофора.

Цвет свечения тонкопленочных электролюминесцентных источников излучения, так же как у порошковых излучателей зависит от материала основы люминофора, природы и концентрации активаторов, условий возбуждения электролюминесценции. При выборе активаторной примеси желательно, чтобы она образовывала центры свечения, излучающие в видимом диапазоне, обладающие высокой эффективностью свечения, хо-

рошо растворяющиеся в материале основы и изовалентные или нейтральные по отношению к основному веществу. Лучшими спектральными характеристиками обладают излучатели, в которых в качестве люминофора использован сульфид цинка, кальция или стронция, легированный марганцем или фторидами редкоземельных элементов, где люминесценция носит внутрицентральной характер.

Кинетические характеристики для яркости излучения определяются скоростями возбуждения и спада люминесценции. Время нарастания свечения обуславливается скоростью возбуждения активаторов, которая зависит от интенсивности вынуждающего сигнала - плотности тока и напряжённости поля и составляет от 1-2 до 10-20 мкс. Длительность спада излучения определяется временем релаксации активаторов из возбуждённого состояния, излучательных и безызлучательных, которое зависит от типа активатора, его концентрации, наличия других примесей и структурных дефектов. При относительно малых концентрациях примеси спад носит экспоненциальный характер, постоянная времени для разных активаторов имеет значение от 50 мкс до 1.3 мс.

Эффективность процессов преобразования электрической энергии в световое излучение характеризуется коэффициентом светоотдачи тонкоплёночного электролюминесцентного излучателя, определяемого как отношение излучаемого светового потока к потребляемой активной мощности. Для электролюминесцентных конденсаторов на основе сульфида цинка, легированного марганцем, этот параметр может достигать значений $\eta \approx 10 \div 12$ лм/Вт. Величина светоотдачи зависит от состава и толщины плёнки люминофора, параметров диэлектрических слоёв, амплитуды, частоты и формы возбуждающего напряжения.

Тонкоплёночные электролюминесцентные индикаторы обладают высокими значениями функциональных параметров и высокой надёжностью. Впервые представленные в 1974 году фирмой "Sharp" промышленные тонкоплёночные электролюминесцентные экраны имели наработку на отказ около 20 000 часов, современные плоские индикаторы имеют долговечность свыше 100 000 часов.

Кроме указанной конструкции разработаны и исследованы другие типы источников излучения, имеющих меньшее число диэлектрических слоев. К достоинствам индикаторных устройств таких типов относятся, как правило, меньшие значения управляющего напряжения, а к недостаткам - более низкая яркость и светоотдача, меньшая надёжность. Поэтому тонкоплёночные светоизлучающие устройства, в которых люминесцентный слой не изолирован от обоих электродов, не нашли широкого практического применения.

Для обеспечения надёжности функционирования и увеличения долговечности тонкоплёночных электролюминесцентных индикаторов необходима их тщательная герметизация. Герметизация конструкций индикаторных устройств осуществляется чаще всего следующими способами. В первом варианте используются вакуумноплотные стеклянные корпуса,

заполненные инертным газом или диэлектрической жидкостью. Во втором варианте слой герметика наносится непосредственно на поверхность тонкопленочной структуры. Вторым вариантом герметизации имеют несомненные преимущества, заключающиеся в более простом технологическом процессе герметизации, возможности одновременного использования герметика в качестве контрастного слоя, лучших массогабаритных показателях герметизированного индикатора, устойчивости к механическим воздействиям. Для герметизации тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов применяются различные неорганические и органические материалы, чаще всего кремнийорганические, смолы, лаки, клеи, масла и компаунды.

Область светящегося поля индикатора определяется размерами, формой и взаимным расположением верхних и нижних электродов, свечение люминофора возникает в местах пересечения этих электродов в плоскости поверхности индикаторов. В зависимости от формы и расположения светоизлучающих элементов различают мнемонические, знаковые, шкальные и матричные индикаторы. Мнемонические индикаторные устройства показывают светящиеся фигуры простой или сложной формы. Знаковые индикаторы высвечивают различные буквы, цифры и другие символы. Шкальные индикаторы обычно используются в измерительных приборах для непрерывной регистрации уровня сигнала. Матричные индикаторные устройства являются наиболее сложными и позволяют отображать самую различную информацию. Наиболее высокие требования предъявляются к матричным индикаторам большого формата, или экранам, предназначенным для отображения динамической информации на статистическом фоне.

Для получения пленок в многослойных электролюминесцентных структурах применяются методы, используемые в тонкопленочной технологии. Особенностью применяемых технологий получения слоев являются жесткие требования к однородности и структурному состоянию тонких пленок. Высокие требования к однородности слоев обуславливаются необходимостью получения индикаторов как малой, так и большой площади (до 1 м^2). Необходимость обеспечения равномерной яркости свечения всех элементов индикаторных устройств требует получения пленок одинаковой толщины с равномерным по площади распределением активаторной примеси. Для получения свечения высокой яркости необходимо получение люминесцентных слоев поликристаллической структуры с размером кристаллитов, соответствующим толщине пленок. Формирование поликристаллической структуры и размер зерен определяется условиями осаждения и последующей термообработки слоев. Указанные особенности ограничивают круг методов, которыми можно наносить люминесцентные и другие пленки для многослойных индикаторов.

Применяемые методы нанесения тонких пленок люминофора можно разделить на три группы: вакуумное напыление, химическое осаждение и ионно-плазменное напыление.

Жидкокристаллические индикаторы

Жидкокристаллические индикаторы относятся к оптоэлектронным индикаторам с пассивным растром, в которых используются электрооптические и термооптические эффекты.

В индикаторах используются в основном нематические жидкие кристаллы, которые имеют следующие особенности:

1. Межмолекулярные взаимодействия слабы, поэтому структура жидкости (характер взаимной ориентации молекул) может легко изменяться под влиянием внешних воздействий.

2. Вязкость незначительна, переориентация происходит достаточно быстро.

3. Оптическая и электрическая анизотропия: показатель преломления и диэлектрическая проницаемость в направлении вдоль больших осей молекул (n_{\parallel} и ϵ_{\parallel}) и перпендикулярно им (n_{\perp} и ϵ_{\perp}) имеют разные значения, в таких материалах наблюдается двойное лучепреломление.

4. В зависимости от знака величины различают положительную ($\Delta\epsilon > 0$) и отрицательную ($\Delta\epsilon < 0$) диэлектрическую анизотропию, т.е. молекулы ориентируются вдоль или поперек электрического поля.

5. Сильная анизотропия свойств и возможность перестройки структуры проявляются в ряде электрооптических эффектов.

Используемые в индикаторах жидкие кристаллы представляет собой смеси сложных органических соединений с очень высоким удельным сопротивлением (до 10^{16} Ом·см). Такие материалы применяются в приборах, управляемых электрическим полем и имеющих малое энергопотребление. Введение специальных добавок ("легирование" ЖК) позволяет снизить значение сопротивления до 10^{10} - 10^8 Ом·см, что необходимо для использования в индикаторах, управляемых электрическим током.

Жидкокристаллическое состояние используемых материалов реализуется в ограниченных диапазонах температур, что определяет значения $T_{\min} = -30 - 0^{\circ}\text{C}$ и $T_{\max} = 50-80^{\circ}\text{C}$.

Основные эффекты, используемые в жидкокристаллических индикаторах:

1. Эффект динамического рассеяния. Он заключается в том, что в сильном электрическом поле жидкокристаллический материал становится непрозрачным. Эти индикаторы управляются электрическим током.

2. Твист-эффект. Он заключается в изменении электрическим полем ориентации молекул жидкого кристалла, что приводит к изменению направления плоскости поляризации света. Для управления поляризацией света дополнительно используются поляроидные пленки.

Ориентация структуры жидкого кристалла вблизи электродов обеспечивается ориентирующим действием их поверхности, что создается с помощью механического натирания пластин; косоугольного напыления пленок GeO_2 или SiO_2 , нанесения ориентированных слоев органического поверхностно-активного вещества (ПАВ).

Твист-эффект является полевым эффектом, наиболее часто используемым в жидкокристаллических индикаторах. Такие индикаторы имеют большой угол обзора и более высокую разрешающую способность. Возможность отображения цветных изображений осуществляется при использовании необходимых светофильтров и подсветкой белым светом.

3. Эффект «гость-хозяин» (G-H). В структуру жидкого кристалла встраиваются протяженные молекулы красителя. При изменении электрическим полем ориентации молекул жидкокристаллического материала происходит переориентация молекул красителя, вследствие чего изменяется окраска поверхности.

4. Термооптический эффект фазового перехода в смектических жидких кристаллах. При прохождении через жидкий кристалл импульса тока происходит его нагревание и переход в изотропную, беспорядочно ориентированную фазу. Охлаждение ее в электрическом поле обеспечивает прозрачную структуру, при охлаждении в отсутствие поля материал непрозрачен. Это состояние сохраняется длительное время, что используется также в устройствах памяти. Для стирания памяти пропускается дополнительный импульс тока.

Конструкции и технология изготовления жидкокристаллических индикаторов достаточно простые и отработанные. Выпускаются две разновидности конструкций индикаторов, работающие на отражение и на просвет. Они отличаются расположением источника света относительно пользователя.

Достоинства жидкокристаллических индикаторов: малая потребляемая мощность (до 10 мВт/см^2), низкое напряжение возбуждения (2-20 В), что обуславливает совместимость с МДП ИС; высокий контраст в условиях сильной внешней засветки ($K \geq 0.9$), простота реализации малых (1.5-3 мм) и больших (до 500 мм) знаков, панельная плоская конструкция, широкий выбор исходных жидкокристаллических соединений, простота технологического процесса и низкая стоимость.

К недостаткам жидкокристаллических индикаторов относятся: ограниченный диапазон рабочих температур, невысокое быстродействие (до 0.1 с), необходимость внешней засветки, небольшой угол обзора ($< 50^\circ$).

Электрохромные индикаторы

Электрохромные индикаторы также относятся к индикаторам с пассивным растром. В них под действием внешнего электрического поля изменяется окраска поверхности материала. В качестве электрохромных материалов используют в основном WO_3 (триоксид вольфрама), а также иридиево-оксидные пленки, органические вещества, в том числе некоторые жидкие кристаллы.

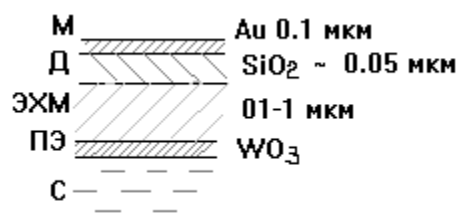


Рис. 5.10. Структура электрохромного индикатора.

Если на прозрачный электрод подать отрицательное напряжение, происходит инжекция электронов в WO_3 , в приповерхностном слое возникают центры окрашивания, поверхность пленки окрашивается в синий цвет. Реакция обратима - при перемене полярности напряжения желтый цвет поверхности восстанавливается. Диэлектрик необходим для предотвращения инжекции электронов из металлического электрода.

Рабочее напряжение составляет десятые доли вольта, контраст 2:1 достигается примерно за секунду. Особенность - наличие памяти, окраска активного слоя может сохраняться в течение многих часов. Значение заряда, необходимого для изменения цвета, мало ≤ 5 мкКл/см². Эти индикаторы более экономичны, чем жидкокристаллические, угол обзора больше (до 160°), температурный диапазон от -20 до +150 °С.

К недостаткам электрохромных индикаторов относится значительная инерционность ($\tau \sim 1$ с), недолговечность (до 10^7 переключений - в часах ресурс работы секундных цифр < 3000 часов). Быстродействие повышается, если использовать в качестве рабочего материала жидкости, но срок службы таких индикаторов снижается.

Электрофоретические индикаторы

В электрофоретических индикаторах используется электрофорез - направленное движение заряженных частиц одного цвета, взвешенных в диэлектрической жидкости другого цвета. В зависимости от полярности напряжения электрическое поле перемещает частицы пигмента (чаще всего порошки TiO_2) к одному или другому электроду ячейки. На прозрачном электроде появляется или исчезает светлое изображение. Подбор пигментов и диэлектрической жидкости обеспечивают большой набор сочетаний цветов. Индикаторы обладают памятью. Типичные характеристики: толщина рабочего слоя - 50 мкм; управляющее напряжение -30 В; рабочий ток - 1мкА/см²; инерционность - 100 мс; ресурс работы - 10^7 - 10^8 циклов; диапазон рабочих температур - -15 +50 °С.

К недостаткам электрофоретических индикаторов относятся сравнительно большое управляющее напряжение (десятки вольт) и малое быстродействие (0.1-1 с).

Электролитические индикаторы

В них используется явление обратимого осаждения на поверхности электрода пленки металла из электролита. При осаждении металла (Ag) на прозрачном электроде тонкая пленка (0.01 мкм) поглощает свет, элемент кажется темным. Напряжение обратной полярности просветляет электрод. Рабочее напряжение составляет единицы вольт, ресурс работы $\sim 10^7$ циклов, рабочий диапазон тем-

ператур - $-40 +60$ °С, память - несколько суток. Инерционность - время записи и стирания - 0.2-1 с.

В стадии разработки находятся магнитомеханические и дипольные (электро-механические) индикаторы с пассивным растром, в которых мелкие намагниченные или электрически заряженные (гириконы) шарики в зависимости от внешнего магнитного или электрического поля поворачиваются окрашенной или не окрашенной стороной. Возможно создание полутонного цветного изображения при использовании шариков трех цветов и отдельного поворота их неоднородным полем.

Экраны.

Экраны представляют собой многоэлементные индикаторы, отображающие световые образы - цветное, движущееся изображение. Экраны и схемы электронного обрамления объединяют понятием дисплеи. Физические принципы работы экранов аналогичны соответствующим знаковосинтезирующим индикаторам.

В то же время к экранам предъявляются специфические требования, связанные с согласованием характеристик СОВ-оператор (качество изображения на экране):

1. Яркость изображения должна плавно регулироваться от 0 до 150-200 кд/м², необходимо обеспечить заданное число градаций яркости.

2. Контраст изображения при освещенности 300-500 лк должен составлять от 1:8 до 1:15.

3. Для реализации возможностей глаза различать детали с угловыми размерами не менее 1', размеры отдельных светящихся точек экрана не должны быть более 0.3 мм, на отображаемый символ по высоте должно приходиться не менее 10-12 точек, чтобы не была видна зернистая структура.

4. Для получения слитных фаз движения зафиксированного на соседних кадрах движущегося изображения необходимо обеспечить показ от 16 и более кадров в секунду, для экранов большой площади и высоких яркостей до 100 Гц.

5. Желательно использовать многоцветные экраны, рекомендуется предоставлять самому оператору выбор удобного сочетания цветов. Для монохромных экранов утомляемость оператора меньше при отображении информации темными символами на светлом фоне, а не наоборот.

6. Желательна плоская панельная конструкция с возможностью увеличения габаритных размеров (до 1-1.5 м по диагонали).

7. Совместимость раstra с микроэлектронными схемами управления: малые напряжения и токи возбуждения, возможность мультиплексного режима, наличие памяти у светоконтрастных ячеек, пороговый характер вольт-яркостных или вольт-контрастных характеристик.

В качестве экранов в настоящее время используются электронно-лучевые трубки, газоразрядные, жидкокристаллические и электролюминесцентные панели. Важнейшей особенностью различных видов экранов является способ

формирования изображения. В электронно-лучевых трубках применяются два основных способа формирования изображения: функциональный (векторный) и растровый (ТВ). Векторный способ использовался для создания изображения в графических дисплеях. Основной недостаток - невозможность создания сплошных областей, достоинство - меньше требуемый объем памяти. Телевизионный (строчно-кадровый) способ является основным применяемым в кинескопах и дисплеях.

Плоские экраны имеют свои особенности управления. Коммутация элементов экрана путем изменения потенциалов на отдельных полосках управляющих электродов, объединенных в матричную систему из строк и столбцов, что позволяет создавать плоские экраны большой площади. Дискретная матричная адресация на выбранные электроды экрана обеспечивает получение изображения. Адресация может производиться в статическом и мультиплексном режиме.

В статическом режиме на выбранные строки и столбцы одновременно подается постоянное напряжение, переключаемое при изменении изображения. Статический режим не позволяет обеспечить отображение замкнутых фигур ("0").

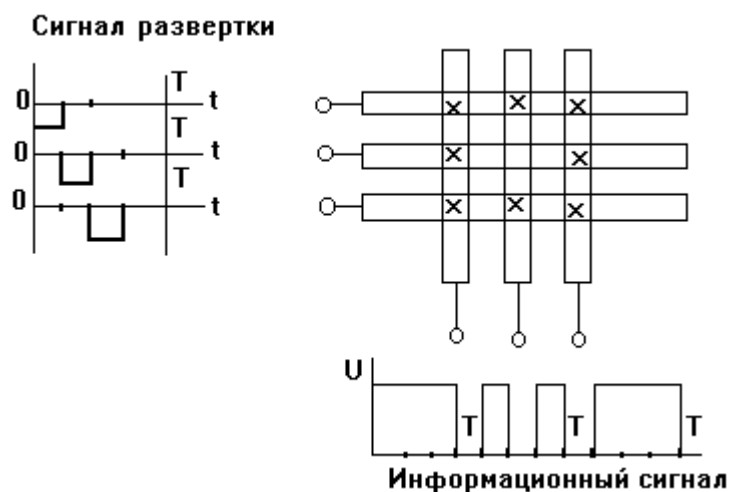


Рис. 5.11. Эпюры напряжений на строках и столбцах матричного индикатора с мультиплексным управлением.

В мультиплексном режиме импульсы напряжения V необходимой длительности подаются поочередно на все строки экрана. В течение каждого импульса поочередно на все выбранные столбцы подаются импульсы напряжения V меньшей длительности, на пересечении строк и столбцов напряжение суммируется $2V$ и происходит высвечивание выбранной ячейки.

Поскольку напряжение V подается на все ячейки вдоль электрода, они также высвечиваются, но не так ярко, что приводит к снижению контраста. Получаемое размытие изображения носит название - эффект "креста". Избежать его можно, используя в качестве светоизлучающих или светоконтрастных ячеек элементы с резко нелинейной зависимостью яркости свечения или контраста от приложенного напряжения.

Электронно-лучевые трубки

Наиболее широко применяемыми экранами в средствах отображения информации в настоящее время являются электронно-лучевые трубки, созданные еще в 1897 (Браун). В значительной мере они сохраняют свои позиции в важнейших по массовости применения СОИ – телевизионных и дисплеях ЭВМ. Их распространенность объясняется следующими их достоинствами: малое число внешних связей (выводов), высокая яркость и достаточная контрастность, что обусловлено значительным КПД высоковольтной катодолюминесценции – (20-30%), что соответствует светоотдаче 5-60 лм/Вт. В ЭЛТ вполне достижимы яркости до 10^4 кд/м² и выше; следует отметить легкость регулировки яркости, возможность воспроизведения большого числа полутонов, хорошую равномерность яркости по площади экрана. Современные электронно-лучевые трубки имеют большие цветовые возможности, малые геометрические искажения, высокую разрешающую способность и быстроедействие, в них используются методы цифровой адресации. Технология этих индикаторов хорошо отработана, стоимость относительно невысока.

На базе существующих кинескопов (размеры шага цветных триад на экране которых удастся снизить до 0,3 мм) могут быть реализованы воспроизводящие устройства с повышенной четкостью изображения – свыше 1000 линий на экран и более. Следует отметить, что, несмотря на большие надежды, связанные с использованием кинескопов со щелевыми масками, по-прежнему широко используются трубки с обычным дельтаобразным расположением источников электронов (каждый из которых ответственен за возбуждение люминофора одного из трех основных цветов свечения). Электронно-лучевые трубки позволяют вывести на экран значительный объем информации. С помощью знакогенераторов можно выводить любую цифро-буквенную информацию, формировать линии и фигуры. Существующие дисплеи с цветным изображением обычно высвечивают 25 строк символов, монохроматические – 32 строки, а телевизионные мониторы повышенной четкости – до 80 строк. Лучшие дисплеи этого типа имеют сейчас 1280*1024 элементов отображения – цветных триад, расстояние между которыми составляет 0,15 мм. Необходимо учитывать, однако, что создание систем с повышенной четкостью изображения требует повышения частоты строчной развертки, что, в свою очередь, приводит к увеличению мощности, расходуемой на нагрев экрана, и в конечном итоге – к снижению срока службы кинескопа.

В то же время для индикаторов на электронно-лучевых трубках характерны следующие недостатки: высокие питающие напряжения, большие габариты и масса, чувствительность к механическим воздействиям, использование магнитных систем фокусировки и отклонения, ограничения на максимальные размеры экрана (например, кинескопы с диагональю экрана больше 0,8-1,0 м нетехнологичны и дорогостоящи). Все это вместе со сложностью схем управления обуславливает неэкономичность экранов на ЭЛТ. Дополнительно можно указать наличие накаливаемого (до 700-800⁰ С) катода, что определяет относительно

малый срок службы (до 10^4 часов) и длительное время подготовки к действию (до нескольких десятков секунд).

Конкуренция со стороны экранов других типов заставила предпринять шаги, направленные к изменению традиционной конструкции электронно-лучевых трубок и, в частности, - к снижению их толщины. Был предложен ряд конструкций плоских ЭЛТ:

1. Электронный прожектор расположен параллельно поверхности экрана, электростатическая система отклоняет луч на 90° . Такие устройства не получили большого распространения из-за сложности конструкции.

2. ЭЛТ с диджисплейной (многоуровневой) адресацией, в которой обеспечивается цифровая адресация, имеет катод с большой эмиссионной поверхностью, равной по размерам экрану. Электронный пучок проходит через ряд управляющих (адресующих и коммутирующих) пластин с апертурными отверстиями и возбуждает люминофор экрана только в участках, определяемых отверстиями в возбужденных частях управляющих пластин. Такой электронно-лучевой трубке также присущи сложность конструкции и неэффективность использования электронного пучка.

3. ЭЛТ с распределенным эмиттером (катодом), в качестве которого могут применяться набор нитей накала (термокатодов) или газовый разряд между системой матричных электродов. Однако необходимость непрерывной работы таких эмиттеров на всей площади обуславливает их низкую эффективность, а термокатоде присуща также низкая механическая прочность.

4. ЭЛТ с микроканальным умножителем использует повышение тока луча до рабочего значения за счет усиления слабого электронного пучка обычной пушки при прохождении отверстий пластины микроканального умножителя. Сложность конструкции, ограниченная разрешающая способность препятствуют широкому использованию таких ЭЛТ.

Несмотря на удовлетворительные результаты, получаемые в ходе разработки таких "плоских" ЭЛТ, экраны этого типа все же не могут иметь по-настоящему плоской поверхности, а значит, - обеспечивать большой угол обзора, одинаковые резкость и цветопередачу как в центре, так и на его периферии. Особенно заметными становятся эти недостатки в связи с попытками создания экранов больших размеров (1,5-2 м по диагонали) и малой (несколько сантиметров) толщины. Низковольтные катодолюминесцентные экраны имеют ограниченный формат - до 10^5 знакомест, вследствие ограничения своих физических возможностей, и используются только лишь для создания матричных панелей малых и средних размеров.

Газоразрядные экраны

Газоразрядные (плазменные) экраны или газоразрядные индикаторные панели (ГИП) делятся на три основные подгруппы: ГИП постоянного тока с внешней адресацией, ГИП постоянного тока с самосканированием и ГИП переменного тока.

Газоразрядные индикаторные панели постоянного тока по существу являются

совокупностью большого числа двухэлектродных газоразрядных ячеек; свечение возникает лишь в ячейках, находящихся на пересечении тех полосок электродов, на которые подано напряжение. Для повышения стабильности работы панели между верхними и нижними электродами располагается диэлектрическая пластина с отверстиями, оси которых совпадают с перекрестиями электродов; разряд происходит в пространстве, ограниченном этими отверстиями. Расстояние между соседними отверстиями определяют разрешающая способность панели (до 1-5 ячеек на 1 мм), размер по диагонали может быть до 1 м и более. Газоразрядные индикаторные панели постоянного тока имеют наиболее высокую светоотдачу и более простое управление яркостью.

В газоразрядных панелях может использоваться как свечение самого разряда, так и излучение слоя люминофора. Для более полного использования светового потока усложняют форму излучающих ячеек и путь тока в них, стараясь расположить светящийся "положительный столб" параллельно светоизлучающей поверхности. При этом значительно ухудшается разрешающая способность ГИП, так как длина разряда не должна быть меньше некоторой критической величины. В противном случае длина "положительного столба" уменьшается и падает светоотдача. S-образная вольт-амперная характеристика газоразрядной ячейки обуславливает наличие эффекта памяти, т.е. возбужденная ячейка индикатора сохраняет разряд и при понижении напряжения на ней. С другой стороны, малый перепад напряжений зажигания и свечения предъявляет требование высокой стабильности к источникам питания. Линейная зависимость яркости ячейки от тока и сильная зависимость тока от напряжения затрудняет регулирование яркости за счет амплитудной модуляции коммутирующего напряжения; при воспроизведении полутоновых изображений необходимо использовать широтно-импульсную модуляцию, что усложняет схему управления. Для стабилизации режима свечения газоразрядной ячейки, компенсации разброса параметров и предупреждения выхода из строя в состав панели вводятся токоограничивающие резисторы.

Угол обзора газоразрядных индикаторных панелей составляет 90-150°, долговечность - до 10⁴ часов. Созданы многоцветные панели, причем максимальную яркость имеют индикаторы зеленого цвета свечения. Управляющее напряжение составляет 100-200 В. Инерционность разряда – не менее 100 мкс, предварительная ионизация ячейки уменьшает инерционность до 5 мкс.

В газоразрядных индикаторных панелях с самосканированием каждая ячейка индикации связана с отдельной ячейкой сканирования, в которой создается поддерживающий разряд. Эта ячейка определяет начальную ионизацию газа в ячейке индикации, облегчает ее зажигание и задает направление сканирования. В диэлектрической пластине создаются специальные отверстия для последовательной передачи возбуждения в соседние ячейки строки. Особенностью ГИП постоянного тока с самосканированием является наличие внутренней развертки. Вдоль каждой строки такой панели периодически пробегает разряд, производящий предварительную ионизацию газового промежутка ячеек; свечение самого разряда незаметно оператору. Если теперь на какую-либо из ячеек подается и управляющее напряжение, то возникает разряд. Такие га-

газоразрядные индикаторные панели имеют более сложную конструкцию. К достоинствам панелей этого типа относятся высокая однородность и стабильность возникающего разряда, относительная простота управления.

В отличие от панелей постоянного тока, электроды в ГИП переменного тока покрывают тонким слоем диэлектрика, предохраняющим электроды от ионной бомбардировки. В связи с этим через панель может протекать лишь переменный ток. На поверхности диэлектрика, осуществляющего емкостную связь между электродами и газом, способен накапливаться заряд. Под действием ионной бомбардировки поверхность диэлектрического покрытия заряжается. Напряженность электрического поля, возникающего за счет поляризации, может уменьшать или увеличивать напряженность поля, создаваемую внешним приложенным напряжением. Если возбуждающее напряжение V складывается с разностью потенциалов V_H , создаваемой накопившимся зарядом, (при соответствующем выборе V таком, чтобы $V < V_T < V + V_H$, где V_T – напряжение зажигания тлеющего разряда) в ячейке возникает электрический разряд, который в итоге приведет к локальной перезарядке диэлектриков. Общее напряжение в газовом промежутке уменьшится до значения $V - V_H < V_T$. После перемены полярности напряжения V процесс повторится, в результате ячейка будет периодически испускать световые импульсы. В то же время те ячейки, которым не было предварительно сообщено напряжение V_H , не будут зажигаться вовсе. Таким образом, рассматриваемая газоразрядная индикаторная панель обладает свойством запоминать информацию, что оказывается важным при разработке матричных экранов.

Для стирания памяти необходимо подать напряжение противоположной полярности. Данный эффект обеспечивает меньшие значения управляющего переменного напряжения частотой около 100 Гц и большую долговечность ГИП. Срок службы $> 10^4$ часов, диапазон рабочих температур $-60+70^\circ\text{C}$. Газоразрядные индикаторные панели переменного тока характеризуются более простой конструкцией, яркостью, не зависящей от информационной емкости. Они пригодны для создания табло коллективного пользования - внеконкурентны среди крупноформатных плоских экранов для отображения цифро-буквенной и графической информации. Выпускаются монохромные ГИП, имеющие до $2048*2048$ элементов разложения при размерах диагонали экрана до 1,5 м и более, и цветные ГИП с диагональю более 0,8 м. Их достоинствами являются простота и отработанность технологии изготовления, надежность и относительная дешевизна.

К недостаткам газоразрядных индикаторных панелей можно отнести невысокий собственный яркостный контраст, вызывающий необходимость использования светофильтров, высокие напряжения питания, что требует применения высоковольтных ключевых транзисторов и затрудняет совместимость ГИП с устройствами обработки сигналов на микросхемах, необходимость в дополнительном источнике питания, наличие вакуумированного объема, невысокая разрешающая способность (размер светящейся точки обычно не менее 0,5 мм), возможность эксплуатации при относительно небольших (примерно до 100 лк) уровнях внешней засветки. Кроме того, у таких экранов имеются проблемы

передачи градаций яркости, что затрудняет их использование для передачи полутоновых картин.

Жидкокристаллические экраны

Жидкокристаллические экраны являются одними из первых, которые составили реальную конкуренцию электронно-лучевым трубкам в системах отображения информации.

Принципиальное устройство наиболее распространенного матричного жидкокристаллического экрана на основе твист-эффекта выглядит следующим образом: слой жидкого кристалла, заключенный между двумя стеклянными пластинами со взаимно перпендикулярными полосками электродов, подсвечивается расположенными сзади (в некоторых моделях – сбоку, с торца экрана) люминесцентными источниками белого света. Стекла одновременно являются поляризаторами; меняя напряжение на отдельном элементе, можно регулировать яркость прошедшего сквозь него света. На лицевой стеклянной пластине располагают триады цветных светофильтров, размеры которых близки к размерам люминофорных триад на экране кинескопа. Ширина полосок электродов подобного экрана может быть уменьшена до 5 мкм, число ячеек может достигать несколько миллионов.

Важной проблемой на пути создания матричных экранов всех типов является эффективное управление каждой из ячеек экрана. Жидкокристаллические экраны позволили обеспечить интеграцию отображающего раstra и схемы управления за счет применения активной матричной адресации. Для этих целей разработана технология получения матриц тонкопленочных транзисторов на основе аморфного гидрогенизированного кремния ($\alpha \cdot \text{Si:H}$). Тонкопленочная технология позволяет наносить пленки аморфного кремния на стеклянные подложки, являющиеся одновременно основой для жидкокристаллического слоя. Таким образом создаются матрицы пленочных МОП-транзисторов, в которых затвор и исток подключаются к X-Y шинам, а сток одновременно является одним из электродов для отдельной жидкокристаллической ячейки.

Технология изготовления жидкокристаллических экранов относительно проста и отработана. Они имеют малое управляющее напряжение, низкое энергопотребление, причем основная мощность расходуется на подсветку экрана. Долговечность их также определяется ресурсом работы подсвечивающей лампы - более 10^3 - 10^4 часов. Коэффициент контрастности свыше 50:1 при угле обзора более 50° .

Недостатки ЖК экранов те же, что и для знаковосинтезирующих жидкокристаллических индикаторов (необходимость внешней подсветки, ограниченный угол обзора, инерционность, ограниченный температурный диапазон и др.).

Электролюминесцентные экраны

К электролюминесцентным экранам относятся матричные панели на основе индикаторных элементов, использующих явления инжекционной и предпробойной электролюминесценции.

Светодиодные индикаторы являются массовыми изделиями современной электронной промышленности. Однако попытки объединения таких индикаторов в светодиодную матрицу, которая могла бы быть использована в качестве экрана, встречают ряд проблем. Вследствие достаточно высокой крутизны вольт-амперной характеристики светодиода, а также из-за сильной зависимости яркости от температуры особую остроту приобретает задача обеспечения идентичности параметров всех элементов экрана. Трудности обеспечения однородности параметров отдельных светодиодов экранных модулей существенным образом сказываются на его стоимости, в результате она оказывается заметно выше стоимости экранов, работа которых основана на иных физических принципах. Кроме того, светоотдача существующих светодиодных экранов относительно невелика (менее 10 лм/Вт), и поэтому рассеиваемая такими экранами мощность (даже без учета затрат на функционирование системы управления) оказывается выше, чем у экранов практически всех других типов (кроме газоразрядных).

На основе светодиодов тем не менее выпускают модули для экранов коллективных систем отображения информации (информационные табло) больших размеров и невысокой разрешающей способности. Число светящихся элементов в таких матричных индикаторах может достигать 100*100 и больше. Перспективными считаются разработки индикаторных панелей на основе органических светоизлучающих диодов. В качестве полупроводников в них используются пленки легированных полимерных материалов. Пленочная конструкция излучающих элементов позволяет использовать в таких индикаторных панелях активную матричную адресацию на основе тонкопленочных МОП-транзисторов. Однако применение органических полимерных материалов ограничивает ресурс работы таких экранов.

Ограниченный срок службы и невысокая яркость не позволили также создать надежные экраны на основе порошковых электролюминесцентных конденсаторов. Наиболее перспективными в этом отношении являются плоские активные экраны на основе тонкопленочных электролюминесцентных конденсаторов, которые в настоящее время выпускаются в ряде стран.

Тонкопленочные электролюминесцентные экраны

Тонкопленочные электролюминесцентные индикаторы наиболее целесообразно использовать для создания плоских активных экранов различной информационной емкости. К достоинствам таких экранов относятся высокая яркость и контрастность, однородность свечения, большой угол обзора (160°), высокая долговечность. Для них легко реализуется матричная адресация (свечение элементов (пикселей) возникает, когда на пе-

ресекающиеся строки и столбцы подается возбуждающее напряжение) и мультиплексное управление (вследствие пороговой вольт-яркостной характеристики). Тонкопленочные конструкции экранов позволяют также использовать активную матричную адресацию с применением тонкопленочных полевых транзисторов.

Разрешающая способность тонкопленочных электролюминесцентных экранов, определенная как максимальное количество элементов информации на линейный размер, обуславливается минимальными размерами светящихся пикселей и минимальным расстоянием между соседними элементами. Эти минимальные размеры ограничиваются возможностями тонкопленочной технологии, в частности, процессов фотолитографии, и для используемых электролюминесцентных экранов эти величины составляют 10-100 мкм.

Информационная емкость электролюминесцентных экранов определяется как максимальное количество различных элементов информации в кадре средства отображения информации. Ее величина определяется размерами индикатора и его разрешающей способностью. В настоящее время информационная емкость электролюминесцентных экранов достигает 330 тысяч элементов, и разрабатываются экраны с числом пикселей до 4-5 миллионов. Размеры индикатора ограничиваются технологическими возможностями получения однородных пленок и их совершенством, в настоящее время созданы экраны с размерами диагонали 50-70 см. Информационная емкость может быть увеличена путем использования экранов, состоящих из нескольких коммутированных блоков.

Для создания полноцветных тонкопленочных электролюминесцентных экранов используются три варианта конструкций плоских индикаторов. В первом варианте используются последовательное нанесение пленок индикаторных элементов различных цветов: на стеклянной подложке располагается источник излучения синего цвета, затем изолированный от него источник зеленого цвета, затем красного цвета. Последовательное расположение индикаторных слоев с уменьшением рабочей длины волны излучения необходимо для уменьшения оптических потерь, связанных с поглощением в слоях люминофоров, и получения устройства с высокой разрешающей способностью. К недостаткам данной конструкции относятся низкая надежность, обусловленная наличием большого числа слоев. Неоднородности, обусловленные наличием ортогональных полос электродов, могут приводить к проколам диэлектрических и люминесцентных пленок. Общее количество наносимых слоев более 15, поэтому выход годных электролюминесцентных панелей будет невысоким.

Второй вариант конструкции, который получил широкое распространение, представляет собой структуру, соответствующую структуре одноцветного экрана, но люминесцентный слой наносится в виде трех располагающихся вдоль плоскости подложки и многократно повторяющихся полосок, состоящих из люминофоров с тремя основными цветами свечения. Данный вариант построения экрана позволяет получить индикатор-

ные панели с более низкой разрешающей способностью, но с более высокой надежностью. Вместе с тем конструкция требует усложнения технологии формирования люминесцентных слоев.

Третий вариант полноцветного экрана предусматривает получение плоского источника излучения с одним слоем люминофора белого свечения, а излучения трех основных цветов формируются с помощью трех светофильтров, наносимых на стеклянную подложку. Однако данный способ построения экрана требует использования люминофора с высокой яркостью свечения, особенно в коротковолновой и длинноволновой областях видимого диапазона.

Для создания полноцветных тонкопленочных электролюминесцентных экранов необходимы определенные соотношения между яркостями излучения источников разных цветов, учитывающие особенности светового восприятия излучения глазом человека. Исходя из минимально возможной яркости активного индикатора в белом цвете (35 кд/м^2) и особенностей восприятия нормальным человеческим глазом (стандартное соотношение интенсивности красного, зеленого и синего цветов - 26,5% , 65,8% и 7,7%), а также с учетом реального коэффициента заполнения экрана свечением данного цвета, установлено, что в рабочем режиме необходимы минимальные значения яркости 37 кд/м^2 для красного, 92 кд/м^2 для зеленого и 11 кд/м^2 для синего цветов. Кроме того, для хорошей цветопередачи яркости максимумы в спектрах излучения элементов должны находиться в диапазонах 450-480, 540-560 и 630-670 нм.

К недостатку тонкопленочных электролюминесцентных индикаторных устройств относится необходимость управления переменным напряжением достаточно большой амплитуды, однако к настоящему времени разработаны высокоэффективные преобразователи напряжения, которые позволяют преобразовывать постоянное напряжение (от 2 В) в знакопеременное с высоким амплитудным значением.

Проекционные системы

Основной прием, используемый при создании проекционных систем отображения информации, - прямая проекция изображения на обычный экран. В качестве источников излучения могут использоваться лазеры трех основных цветов свечения (обычно газовые – аргоновые и криптоновые) или мощные дуговые лампы со светофильтрами. Модуляция интенсивности и отклонение лучей на заданные углы осуществляется модуляторами и дефлекторами, использующими акусто- и электрооптические эффекты. Для модуляции и развертки некогерентного излучения применяют жидкокристаллические светоклапанные устройства и достаточно сложные механические системы.

Достоинством современных лазерных проекционных систем является воспроизведение изображений на экране большой (несколько квадратных метров) площади при значительной (100 кд/м^2) яркости, хороший контраст (до 1:100) и высокая разрешающая способность. К недостаткам систем этого типа следует отнести в первую очередь низкий КПД газовых лазеров, не превышающий де-

сятых долей процента, что приводит к значительному потреблению энергии (несколько кВт для высвечивания 1 м² изображения). В совокупности с устройствами модуляции и отклонения стоимость лазерных проекционных систем оказывается пока довольно высокой.

Основы волоконной оптики

В волоконно-оптических линиях передача информации осуществляется с помощью оптических сигналов по волоконным оптическим волноводам с малыми потерями. В состав линий входят также источник излучения, преобразующий электрические сигналы в оптические, и фотоприёмник, осуществляющий обратное преобразование. Они находят широкое применение в системах связи и передачи информации, а также в волоконно-оптических датчиках.

Световоды

Основным элементом волоконно-оптической системы является световод (волоконный оптический волновод) – тонкая гибкая нить, изготовленная из прозрачного материала таким образом, что её центральная часть оптически более плотная, чем периферийные области. Поэтому световой луч, вводимый с торца волокна, может распространяться вдоль его оси и пройти с малым затуханием значительное расстояние. В простейшем случае оптическое волокно представляет собой тонкую нить круглого сечения из прозрачного в заданной спектральной области материала (стекло, кварц, различные полимеры). Канализование оптического излучения в нём основывается на явлении полного внутреннего отражения.

Явление полного внутреннего отражения наблюдается при выходе света из среды, оптически более плотной, в менее плотную. Распространение света при полном внутреннем отражении и малом затухании прозрачном канале было обнаружено в 1870 г. английским физиком Дж. Тиндалем. Практическое применение стеклянные световоды нашли в 50-х годах 20-го века в эндоскопах, в виде гибких стеклянных жгутов. Стекло, как известно, весьма твёрдый и хрупкий материал. Однако, стеклянные нити с уменьшением толщины до 0,1-0,15 мм становятся гибкими, и не ломаются даже при изгибах с радиусом 2-3 мм. Однако существенным недостатком первых световодов было большое ослабление света для применения в ряде технических областей. Обычное оптическое стекло обладает ослаблением (затуханием) света приблизительно от 3-х до 5-и дБ/м (оконное - 50 дБ/м, кварцевое – 0,2-0,3 дБ/м). Отношение мощностей излучения на входе и на выходе $P_{вых}/P_{вх}$ (коэффициент ослабления) измеряется в децибелах (дБ). Ослабление сигнала в 20 дБ означает уменьшение мощности в 100 раз, ослабление в 3 дБ – уменьшение мощности вдвое.

В 1996 г. английские учёные Као и Хокхем показали возможность значительного уменьшения оптических потерь в стекле. В 1970 г. инженером американской компании «Corning Glass» Капроном с сотрудниками были получены световоды с затуханием 20-30 дБ/км за счёт снижения металлических примесей менее 10^{-7} , что было началом развития волоконно-оптической техники.

Распространение света в световоде

Классическим считается двухслойный ступенчатый световод – цилиндрическое волокно, состоящее из сердцевины с показателем преломления n_c и оболочки с несколько меньшим показателем преломления n_0 . Оптическое излучение вводится в световод через торцевую поверхность из внешней среды с показателем преломления n (для воздуха $n=1$). Рассмотрим распространение световых лучей, падающих на торец световода под разными углами к нормали ϕ (рис. 5.1).

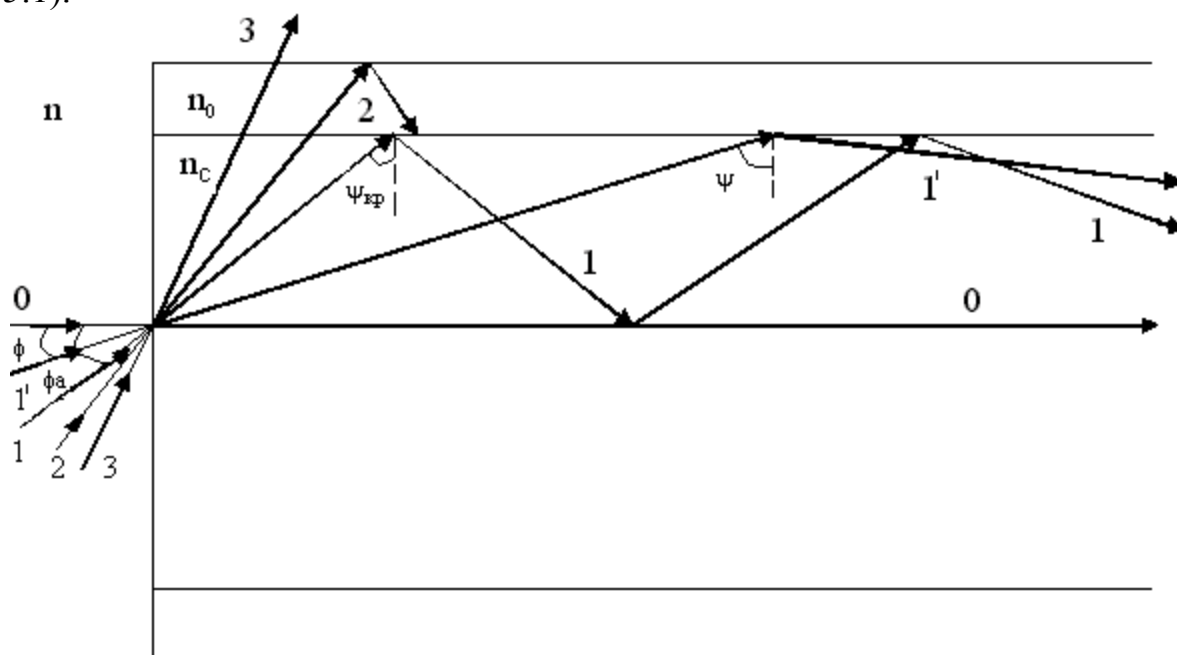


Рис. 5.1. Распространение световых лучей в световоде.

Часть световой энергии отражается от торцевой поверхности, преломленные лучи распространяются в сердцевине. Лучи, падающие на торец под малыми углами $\phi \geq \phi_a$ приходят на границу раздела сердцевина-оболочка под большими углами к нормали $\psi < \psi_{кр}$ и испытывают полное внутреннее отражение. Они многократно отражаются от границы раздела, каналируются в сердцевине и образуют волноводные (канализуемые, направленные) моды – $0, 1, 1', \dots$. Лучи, входящие в световод под большими углами $\phi > \phi_a$, преломляются на границе сердцевина-оболочка, выходят в оболочку и образуют вытекающие или оболочечные моды, достаточно быстро затухающие. Лучи, входящие в торец под ещё большими углами выходят и из оболочки – излучаемые (радиационные) моды.

Критический угол падения луча на границу сердцевина-оболочка $\psi_{кр}$, больше которого происходит полное внутреннее отражение, зависит от соотношения показателей преломления материалов n_c и n_0 : $\psi_{кр} = \arcsin(n_0/n_c)$.

Различие между значениями показателей преломления сердцевины и оболочки обычно очень мало – $n_c - n_0 = \Delta n = 10^{-2} - 10^{-4}$.

Таким образом, удержание излучения внутри оптически более плотной центральной части световода, обеспечивается лишь для той части лучей, которые падают на торец под углом, меньшим некоторого критического значения ϕ_a , связанного со значением угла $\psi_{кр}$. По волокну распространяется излучение, за-

ключённое внутри конуса с углом при вершине φ_a . Величина $NA = \sin \varphi_a$ называется числовой апертурой и является важной характеристикой световода, именно этот параметр входит во многие расчётные формулы. Величина числовой апертуры зависит от показателей преломления сред следующим образом: $NA = \sin \varphi_a = [(n_c^2) - (n_0^2)]^{1/2} / n$. Если излучение попадает в световод из воздуха ($n=1$), тогда $NA = (2n_c \Delta n)^{1/2} = n_c (2\delta)^{1/2}$, $\delta = \Delta n / n_c$.

Изгиб световода приводит к тому, что угол между лучом и границей раздела сердцевина-оболочка возрастает и угловая апертура уменьшается. Используя законы преломления и отражения и учитывая, что радиус изгиба $r_{\text{изг min}}$ много больше диаметра сердцевинки d_c , получаем, что снижение числовой апертуры до 90% от своего первоначального значения произойдет при

$$r_{\text{изг min}} = 2,5 d_c n_1 / \Delta n = 5 d_c (n_1)^2 / (NA)^2.$$

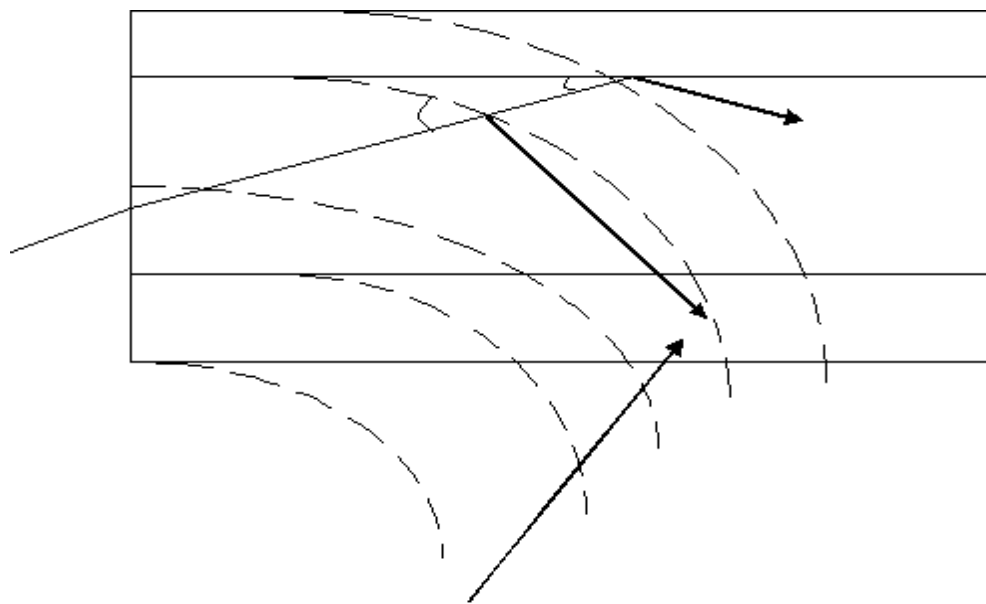


Рис. 5.2. Ход световых лучей в изогнутом световоде.

При типичных значениях $n_1=1.5$, $d_c=50$ мкм и $NA = 0.25$ радиус изгиба имеет значение $r_{\text{изг min}} = 9$ мм. Этот расчёт является условным: за критерий принято $NA_{\text{изг}} = 0.9NA$. В ряде случаев допустимыми являются большие или меньшие отклонения NA для неизогнутого световода. К тому же более чувствительными к изгибу могут оказаться другие характеристики, например, механические.

Анализ решений волнового уравнения для различных волноводных мод показывает, что они описываются функциями, монотонно спадающими (обычно экспоненциально) к периферии сердечника, но в то же время не обрывающимися на границе сердцевина-оболочка. Направляемые моды частично просачиваются в оболочку, т.е. отражение происходит не на геометрической поверхности раздела, а в некоторой приповерхностной области оболочки. Это явление называется нарушенным полным внутренним отражением. Таким образом происходит увеличение эффективной толщины волноводного слоя (эффект Гуса-Хенхена). Поле некоторых мод может проникать в оболочку на глубину порядка d_c . Отсюда следует важность частоты не только сердечника, но и оболочки

для маломодовых волокон, и необходимость достаточно большого диаметра оболочки ($d_0 \geq 2.5-3d_c$).

При зигзагообразном распространении луча в волноводе расстояние, пройденное световой волной вдоль волновода, меньше длины траектории луча и особенно при малых углах ψ . В связи с этим при описании волноводных мод вместо волнового числа $k_\lambda = \omega/\lambda$ для волны в вакууме вводят его составляющую вдоль направления распространения света, которую называют константой распространения – $\beta = (\omega/c) n_c \sin \psi$, а величину $n_{эф} = n_c \sin \psi$ называют эффективным показателем преломления волновода. Максимальное значение $n_{эф}$ равно n_c ($\psi = 90^\circ$), а минимальное – n_0 ($\psi = \psi_{кр}$).

Для образования распространяющейся в световоде световой волны, кроме внутреннего отражения, должно выполняться также условие согласования фаз: фазовые сдвиги, накапливающиеся после двух отражений (на одном зигзаге), должны быть кратными 2π (иначе волны, интерферируя, гасят сами себя). Условие согласованности светового поля в волноводе записывается характеристическим уравнением $2k_\lambda n_c d_c \cos \psi - 2\cos \psi_0 = 2\pi m$, где $m=0,1,2,\dots$, - модовое число а ψ_0 - сдвиг фаз при отражении на границе сердцевина – оболочка. Решение этого уравнения приводит к принципиально важному результату: для данной длины волны и толщины световодного канала возможен дискретный набор значений угла падения световой волны на поверхности раздела $\psi = \psi_{кр}$, т.е. в световоде энергия излучения переносится дискретными модами, каждой из которых соответствует угол ψ_m и значение πm и β_m .

Для данной длины волны λ существует некоторое минимальное (критическое) значение диаметра сердцевин $d_{кр}$, соответствующее только одной волноводной моде:

$$d_{кр} = [(n_c)^2 - (n_0)^2]^{1/2} \lambda / 4 = (2n_c \Delta n)^{1/2} = NA \lambda / 4.$$

Если $d_c < d_{кр}$, канализации света в световоде не происходит; при увеличении d_c появляется возможность существования двух, трёх и т.д. волноводных мод, большему m соответствует мода с меньшим углом ψ_m . В типичном двухслойном световоде с $d_c=50$ мкм и $NA=0.2$ при $\lambda = 0,8$ мкм число направляемых мод составляет $m=2000$. Диаметр одномодовых ступенчатых световодов обычно составляет 3-7 мкм.

Дисперсия световодов

Дисперсия передачи светового сигнала в световодах определяется различием скоростей составляющих оптического излучения, обусловленного механизмом распространения света. Этот эффект вызывается двумя причинами; во-первых, лучи с разными углами падения проходят в световоде различные расстояния и, во-вторых, свойства материала зависят от длины волны излучения, а любой реальный источник не строго монохроматичен. Иными словами, дисперсия волокна, трактуемая более широко, чем это принято в традиционной оптике, зависит не только от степени когерентности излучения, но и от геометрических характеристик волокна.

Согласно сказанному выделяют три составляющие дисперсии: межмодовую (или волноводную), обусловленную различием групповых скоростей различных мод; внутримодовую, обусловленную нелинейной зависимостью постоянной распространения данной моды от длины волны; материальную (дисперсию материала), выражающуюся в зависимости показателя преломления среды от длины волны. Отметим, что модовая дисперсия может иметь место и тогда, когда показатель преломления среды не зависит от длины волны излучения т.е. дисперсия материала $D=0$.

Дисперсия, подобно инерционным процессам в электрических цепях и электронных приборах, проявляется в завале частотной характеристики световода (зависимость интенсивности излучения на выходе от частоты модуляции) и в искажении передаваемых импульсов света (расплывание, уширение). Любой из видов дисперсии тем существеннее, чем протяжённее световод (временное расхождение между двумя лучами «набегает» по мере их распространения); поэтому для характеристики инерционности используют временные параметры, приведённые к единице длины световода: полоса пропускания f_0 , МГц*км; постоянная дисперсии τ_0 , нс/км; уширение импульса σ_0 , нс/км. Величина f_0 определяется по спаду частотной характеристики на 3 дБ, τ_0 - по времени нарастания импульса в e раз, σ_0 - по расплыванию единичного δ -импульса на уровне половины его амплитуды. Между этими параметрами имеется простая взаимосвязь: $f_0\tau_0 = 0,16$, $\sigma_0 = 2,2\tau_0$. Для оценки инерционности световода длиной L величины τ_0 и σ_0 умножаются, а f_0 делится на L .

Полуколичественная оценка межмодовой дисперсии может быть получена с помощью моделей геометрической оптики. Для двухслойного световода разница времени распространения центрального осевого луча и с $\Phi = \Phi_A$ на единичной длине $\Delta t_{\Phi A-0} = \Delta n/c = NA^2/(2n_{cs})$. Для типичного световода с $n_1=1,5$ и

$$NA = 0,2 \text{ получаем } \Delta t_{\Phi A-0} = 40 \text{ нс/км.}$$

Данное выражение определяет верхнюю границу постоянной времени волноводной дисперсии τ_0 (всегда $\tau_0 < \Delta t_{\Phi A-0}$), конкретное значение которой зависит от закона распределения интенсивности свет(т.е. от относительного вклада отдельных лучей).

Более детальную информацию о закономерностях распространения излучения в волокне даёт волновая (или модовая) теория, базирующуюся на строгом решении системы уравнений Максвелла. Наиболее наглядные выражения для дисперсионных характеристик волокон удаётся получить при анализе расплывания δ -импульса. Для многомодового двухслойного ступенчатого световода уширение импульса вследствие межмодовой дисперсии $\sigma_{0B} = \Delta n/(2\sqrt{3} c)$. Используя переводное соотношение, получим $\tau_0 = 0,14\Delta t_{\Phi A-0}$, что согласуется с качественными представлениями лучевой теории.

Межмодовая дисперсия значительно уменьшается в градиентных световодах (граданы, селфоки – self-focusing). В них показатель преломления в плоскости, перпендикулярно оси, монотонно уменьшается от центра к периферии. Лучи, направленные под углом к оси, испытывают рефракционное искривление траектории (явление, подобное рефракции в атмосфере Земли). Рефракция приводит к самофокусировке лучей на осевой линии световода, их траектории пред-

ставляют собой синусоиды, а для немеридианальных лучей – винтовые линии. Если луч введён в волокно под малым углом к его оси, он изгибается сравнительно слабо и возвращается к оси. Лучи, введённые в градиентный световод под большими углами, заходят в области световода, которые отстоят дальше от его оси. Однако они распространяются быстрее, так как при удалении от оси n уменьшается, а $v=c/n$. Возникает возможность уравнивать время распространения лучей, входящих под разными углами, задавая необходимый закон изменения $n(r)$.

Обычно при расчётах задаются следующей формулой, удовлетворительно описывающей практически все возможные типы существующих градиентных световодов:

$$n(r) = n_c [1 - 2\Delta(2r/d_c)^\alpha], \text{ если } r \leq d_c/2; n(r) = n_0, \text{ если } r > d_c/2,$$

где $\Delta = (n_c^2 - n_0^2)/(2n_c^2) \approx (n_c - n_0)/n_c$ - относительная разность показателей преломления: α - постоянный для данного вида световода показатель, которым можно управлять технологически.

Для наиболее распространённого случая параболического изменения показателя преломления (при $\alpha \approx 2$) $\sigma_{0B} = n_c \Delta^2 / (4\sqrt{3} c) = (\Delta n)^2 / (4\sqrt{3} n_c)$. Детальные оценки показывают, что случай $\alpha = 2$ не является оптимальным; наибольшее приближение к самофокусировке достигается при $\alpha = 2 - 12\Delta/5$. При этом

$$\sigma_{0B} = n_1 \Delta^2 / (20 c \sqrt{3}), \alpha = \alpha_{\text{ОПТ}}.$$

Характерно, что для градиентных световодов дисперсионные константы пропорциональны $(\Delta n)^2$, тогда как для волокон со ступенчатым профилем показателя преломления они пропорциональны Δn . При условии $\Delta n \leq 1$ становится очевидным преимущество градиентных волокон. Численные оценки показывают, что при $\Delta n = 0,02$ приведённое уширение импульса составляет 20 нс/км для двухслойного световода, 130 и 15 пс/км для градиентного параболического

($\alpha = 2$) и оптимизированного ($\alpha_{\text{ОПТ}} = 1,97$). Отсюда следует, в частности, что оптимизация достигается лишь при очень высокой точности реализации требуемого значения $\alpha_{\text{ОПТ}}$.

Минимальные приведённые значения экспериментально получить не удаётся из-за дисперсии материала. Приведённая к единице длины постоянная времени материальной дисперсии приблизительно одинакова для всех волноводных мод и зависит лишь от ширины спектра излучения и дисперсионных свойств материала: $\tau_{0M} = -\Delta\lambda (\lambda/c) (\partial^2 n / \partial \lambda^2)$.

При необходимости можно перейти от τ_{0M} к σ_{0M} . Экспериментальная дисперсионная кривая для кварца легированного фосфором (материал сердечника практически всех основных световодов для ВОЛС), показывает, что при $\lambda = 1,3$ $\partial^2 n / \partial \lambda^2 = 0$ и соответственно $\tau_{0M} = 0$. Именно этим прежде всего и определяется значимость спектральной области вблизи $\lambda = 1,3$ мкм.

Расчёт показывает, что в многомодовых световодах эффекты внутримодовой дисперсии оказываются пренебрежимо малыми по сравнению с другими видами искажений и, в частности, с дисперсией материала. Поэтому, переходя к общей оценке, внутримодовую дисперсию не учитываем.

Рассмотренные эффекты – волноводная и материальная дисперсия – действуют одновременно; решение задачи уширения импульса при этом резко ус-

ложняется: наряду с членами, которые приводят к значениям σ_{OB} и σ_{OM} , появляется ещё суперпозиционный член $f(\sigma_{OB}, \sigma_{OM})$. В первом приближении можно считать, что суммарное уширение импульса

$$\sigma_{OS} = (\sigma_{OB}^2 + \sigma_{OM}^2 + f(\sigma_{OB}, \sigma_{OM}))^{1/2}.$$

При учёте двух механизмов дисперсии значение α_{OPT} заметно сдвигается относительно точки $\alpha = 2$; в градиентном световоде, возбуждаемом светодиодом, уширение импульса почти полностью определяется материальной дисперсией и оптимизация профиля n по α заметных преимуществ не даёт; в оптимизированном многомодовом градиентном световоде, возбуждаемом монохроматическим лазером, дисперсионное уширение импульса может быть снижено до 15 пс/км (теоретический предел).

В заключение отметим ещё один очень важный для дисперсионных расчётов эффект - связь мод в многомодовых световодах. Выше предполагалось, что отдельные моды (или лучи с разными углами падения) распространяются по волокну независимо друг от друга и не смешиваются. Естественно, что идеализация и наличие в реальном световоде тех или иных нерегулярностей (флуктуаций состава и соответственно величины n , непостоянства геометрии, микроизгибов, нарушений на границе сердцевина-оболочка и т.п.) приводят к «перекачке» энергии между модами. В представлениях геометрической оптики это значит, что луч с углом падения φ_1 , преломившись на неоднородности, меняет угол распространения на φ_2 . Возможность проявления этого эффекта становится очевиднее, если учесть, что на 1 км пути укладывается около 10^9 длин волн света и в то же время происходит более 10^6 актов отражения светового луча от границы сердцевина-оболочка. Связь или смешение мод приводит к тому, что часть энергии медленных мод переходит в быстрые и наоборот; это ведёт к некоторому выравниванию времён распространения медленных и быстрых мод – в итоге дисперсия уменьшается. Математическое описание явления в общем виде очень сложное, важнейший результат смещения мод состоит в следующем: $\sigma_{OB} \sim (L_0 L)^{1/2}$ или $\sigma_{OB} \sim (L)^{1/2}$, где L_0 – характеристическое расстояние, на котором устанавливается постоянный модовый состав. Дисперсионное размытие светового импульса «набегает» не пропорционально длине световода L , а пропорционально \sqrt{L} , т.е. значительно слабее. Величина L_0 может быть определена лишь экспериментально, она тем больше, чем совершеннее световод, и может достигать десятков километров. Естественно, что при $L \leq L_0$ сохраняется прежний закон: $\sigma \sim L$.

Затухание.

Причинами потерь оптической мощности при распространении сигнала по волокну являются различные виды поглощения, а также обусловленная рассеиванием деформация углового распределения лучевого потока и вытекание возникающих внеапертурных лучей из сердцевины.

Для количественной оценки потерь пропускания используется удельное затухание оптического сигнала, выраженное в дБ/км, $B = (1/L) 10 \lg (P_{BX} / P_{ВХ})$,

где $P_{вх}$, $P_{вых}$ - мощности каналируемого излучения на входе и выходе световода длиной L , км. Если имеются различные невзаимодействующие механизмы потерь, то затухания складываются, т.е. $B = \sum b_i$, где b_i - удельное затухание, вносимое i -м механизмом потерь.

Рассмотрим наиболее существенные из этих механизмов.

1. Фундаментальные потери, присущие материалу и принципиально неустраняемые. Выделяют два вида фундаментальных потерь. Один вид - собственное поглощение в материале световода (потери b_m), которое в УФ-области связано с электронными переходами между разрешёнными энергетическими уровнями атомов, а в ИК-области - с многофотонным и колебательным возбуждением молекул. «Хвосты» полос поглощения могут доходить до рабочего диапазона длин волн световода, что проявится в затухании. Экспериментально установлено, что для кварца уже при $\lambda \geq 0,6$ мкм УФ-поглощение становится меньше

1 дБ/км, а ИК-поглощение, эффективное при $\lambda \geq 8 - 12$ мкм, при $\lambda = 1$ мкм, вообще не сказывается.

Другой вид фундаментальных потерь – релеевское рассеяние на различного рода нерегулярностях, приводящее к потерям $b_{рел} = \chi_{рел} \lambda^{-4}$, где постоянная $\chi_{рел}$ тем меньше, чем ниже температура «замораживания» флуктуаций состава световода, охлаждаемого при изготовлении.

Для кварца при его тщательной обработке экспериментально получено

$\chi_{рел} = 0,7$ дБ/(км мкм⁴), что для $\lambda = 0,82$ мкм даёт $b_{рел} = 15$ дБ/км, а при $\lambda = 1,55$ мкм $b_{рел} = 0,14$ дБ/км. Следует подчеркнуть, что $\chi_{рел}$ не универсальная константа, она зависит и от выбора материала световода, и от технологии его обработки, т.е. принципиально можно ожидать получения меньших, чем достигнуто в кварце, релеевских потерь. Наиболее характерным моментом является сильная зависимость $b_{рел}$ от λ , из чего следует, что в дальнейшей ИК-области релеевские потери становятся пренебрежимо малыми.

2. Примесное поглощение, обусловленное наличием примесей (потери $b_{ион}$). В кварце такими примесями, проявляющимися как центры окраски, являются ионы металлов группы медь - хром, а именно медь, хром, магний, никель, железо. Однако при современных методах очистки роль примесей в кварце оказывается несущественной; значение их как центров окраски сохраняется лишь для многокомпонентных стекол.

Значительное поглощение происходит за счёт гидроксильной группы ОН (потери $b_{он}$), но спектр этого поглощения имеет характер отдельных узких полос, так что в промежутках между ними дополнительное затухание может быть ничтожным. Основной пик колебательного возбуждения связи О-Н наблюдается при $\lambda = 2,72$ мкм, меньшие пики, обусловленные обертонами, - при длинах волн 1.24; 0.94; 0.88; 0.72 мкм. Рабочую длину волны излучателя стремятся поместить между этими пиками.

3. Технологические разбросы определяющих параметров световода (потери $b_{техн}$): эллиптичность сердцевины, статистические флуктуации её диаметра и показателя Δ по длине световода, нарушения выбранного закона распределения показателя преломления по сечению сердцевины (в частности, очень часто на оси световода наблюдается провал кривой $n(r)$). Всё это приводит к рассеянию

и перекачке части энергии распространяющегося излучения в вытекающие моды.

4. Явления, связанные с дефектами эксплуатации, проявляющимися уже после изготовления волокна. Это потери, обусловленные микроизгибами, возникающими в местах контакта волокна с защитными оболочками и упрочняющими элементами кабеля. Практически после укладки волокна в кабель его затухание может на 20 - 50% превысить исходное значение. Дополнительные механические напряжения и микроизгибы возникают также при изменении температуры окружающей среды, причем они тем значительнее, чем шире диапазон рабочих температур $\Delta\Theta_{\text{раб}}$. Характерно, что температурные эффекты обусловлены не только взаимодействием волокна с окружающими элементами, но и внутренними напряжениями, а также изменением величины Δ из-за различия (пусть незначительного) физических свойств сердцевины и оболочки. Оба вида потерь - кабельные $b_{\text{каб}}$ и температурные b_{Θ} - полностью устранить не удастся, однако при оптимальной конструкции волокна и кабеля они могут быть достаточно малыми.

5. Потери b_R , обусловленные воздействием проникающей радиации и принципиально не устранимые. В кварцевых волокнах ионизирующее излучение приводит к разрыву связей в молекуле SiO_2 и появлению свободных связей, которые служат ловушками зарядов, что повышает в конечном счёте затухание сигнала. Детальное описание радиационного воздействия вызывает сложности, наблюдаемые явления не всегда допускают однозначную интерпретацию, однако некоторые общие закономерности для кварцевых световодов все же могут быть сформулированы. Установлено, что при малых дозах, не превышающих 10^7 рад, различные виды радиации (электроны, протоны, нейтроны, альфа-, гамма- и рентгеновское излучения) оказывают на световоды практически одинаковое воздействие. При слабых воздействиях дополнительное поглощение сначала линейно зависит от дозы, а затем наблюдается насыщение. Наведенное поглощение состоит из двух компонентов: стабильного и нестабильного, исчезающего при отжиге или интенсивной засветке. Как правило, оба компонента наведённого поглощения значительно больше для легированного, чем для чистого кварца.

Важная общая закономерность радиационных дефектов проявляется в том, что они тем меньше влияют на затухание, чем больше длина волны излучения: в первом приближении при $\lambda = 1$ мкм наведенные потери пропорциональны $\lambda^{-\tau}$, где $\tau = 5 - 7$.

6. Потери b_D возникающие вследствие временных деградиационных явлений. При вытягивании волокон на их поверхности образуются микротрещины, которые с течением времени могут увеличиваться и вызывать появление дополнительных потерь. Процесс существенно ускоряется при наличии механических деформаций и химическом действии тех или иных реагентов, главным образом влаги и кислорода, устранить влияние которых практически невозможно.

Подводя итоги, можно расписать общее выражение для B следующим образом:

$$B_{\text{полн}} = b_M + b_{\text{рел}} + b_{\text{ион}} + b_{\text{ОН}} + b_{\text{техн}} + b_{\text{каб}} + b_{\Theta} + b_{\tau} + b_D.$$

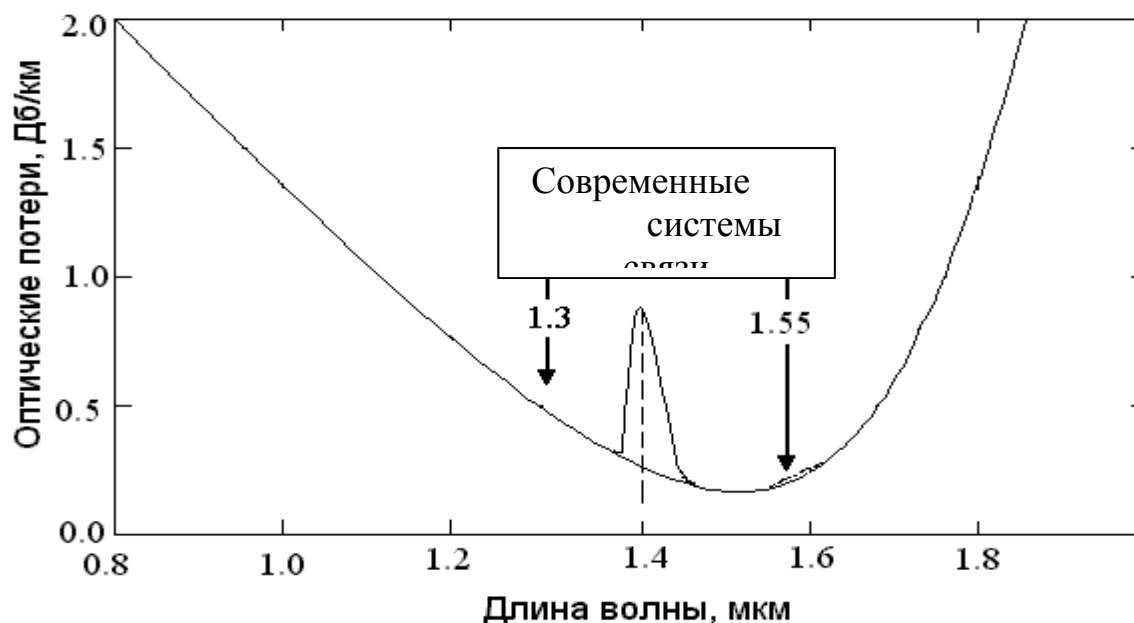


Рис.5.3. Спектр оптических потерь волоконного световода.

Техническая реализация ВОЛС

Элементную базу ВОЛС составляют волоконно-оптические кабели, передающие и приемные оконечные устройства (модули), оптические соединители, разветвители, коммутаторы. Именно из этих аппаратурных средств создаются системы оптической связи. Но каждый из названных элементов представляет собой сложное устройство, в свою очередь состоящее из нескольких комплектующих элементов, свойства и характеристики которых в конечном счете определяют возможности ВОЛС. Эти оптические, опто-, микроэлектронные, оптико-механические элементы (изделия, материалы) также входят в элементную базу ВОЛС.

Оптические волокна.

Определяющими в технике ВОЛС являются кварцевые двухслойные волокна трех основных разновидностей: многомодовые, ступенчатые и градиентные, а также одномодовые (рис. 5.4,а - в). В одномодовых волокнах закон изменения показателя преломления внутри сердцевины неважен, поэтому эти волокна, как правило, близки к ступенчатым. Показанный на рисунке третий наружный слой в механизме светопередачи участия не принимает.

Двухслойные кварцевые световоды изготавливаются способом парофазного осаждения, который получил всеобщее распространение. Этот способ основан на высокотемпературной (1200 - 1600°C) реакции получения чистого кварца SiO_2 из газовой смеси SiCl_4 и O_2 . Смесь пропускают через нагретую кварцевую трубу, и на её внутренней поверхности оседает слой чистого кварца; затем в смесь добавляют окислы бора или германия, при этом оседает легированный кварц (с увеличенным значением n).

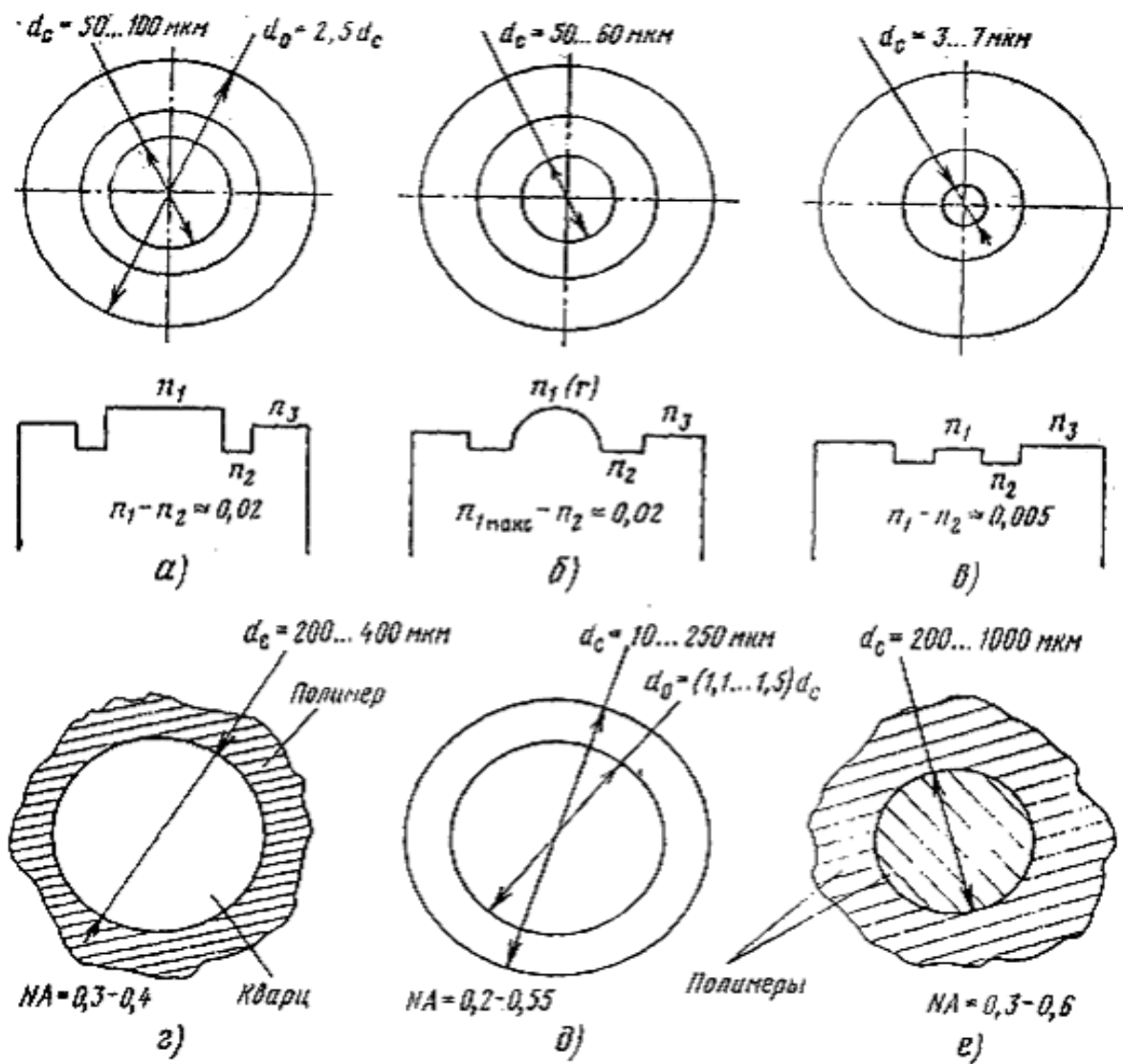


Рис. 5.4. Геометрия и профиль изменения показателя преломления кварцевых двухслойных многомодовых ступенчатых (а), градиентных (о), одномодовых (в) волокон. Геометрия сердцевины и числовые апертуры кварц-полимерных (г), из многокомпонентных стёкол (д) и полимерных (е) световодов.

После получения слоев требуемой толщины трубку нагревают сильнее и обжимают до «схлопывания» - таким образом получается исходная заготовка (рис. 5.5,а). Растягивая разогретую заготовку и меняя скорость вытяжки, получают волокно требуемых геометрических размеров. Одновременно с окончательным этапом протяжки волокно пропускают через экструзер с фильерой и покрывают защитным полимерным покрытием, иногда также многослойным. Назначение этого покрытия - «залечивание» микротрещин в кварце, защита волокна от влаги и смягчение механических воздействий элементов будущего кабеля. Таким образом, в промышленных условиях результатом вытяжки является не волокно, а структура, называемая волоконным модулем (диаметр модуля 0,2 - 0,8 мм) и представляющая собой заготовку для последующего оформления в кабель.

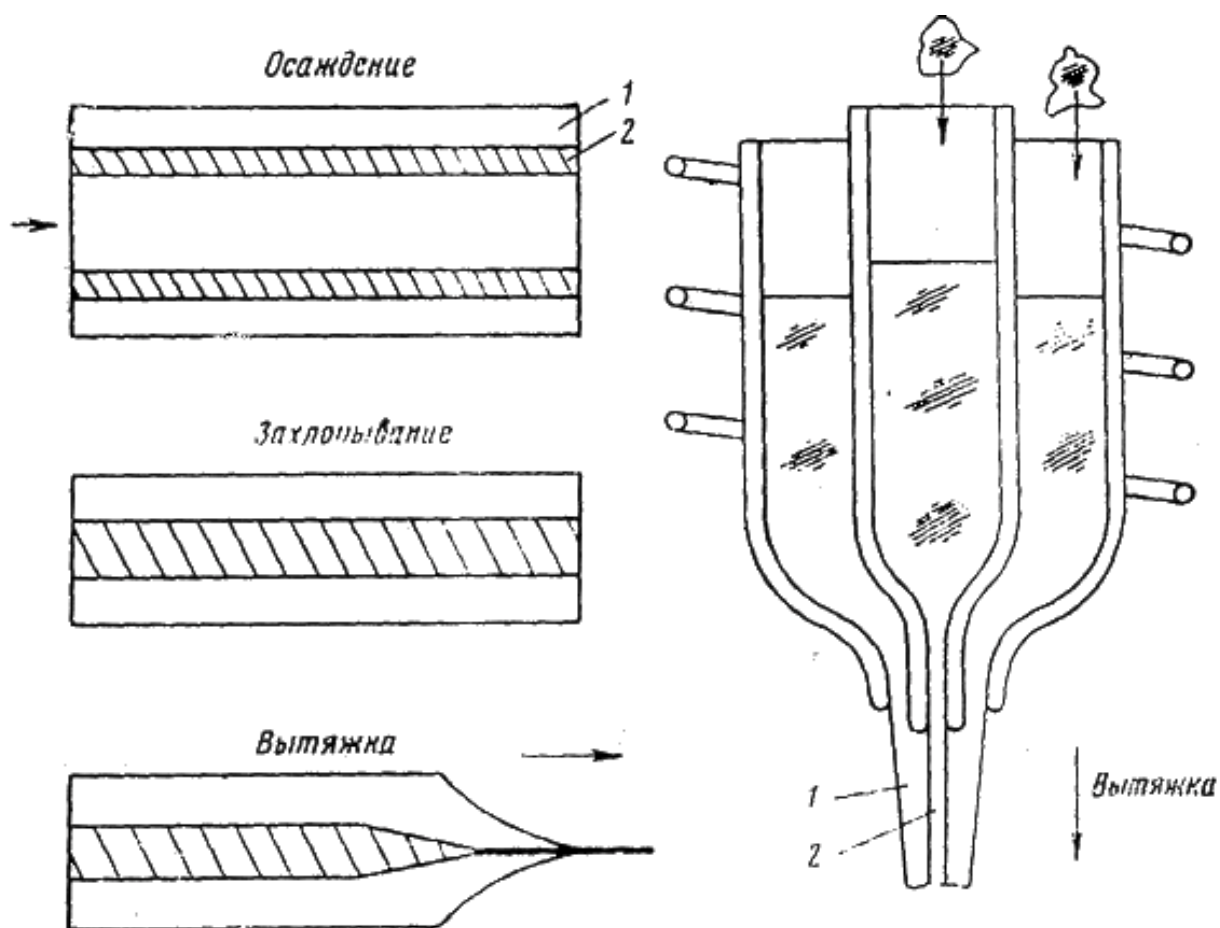


Рис. 5.5 Схема изготовления заготовок для кварцевых двухслойных волокон (а) и изготовления волокон из многокомпонентного стекла (б): 1 – оболочка, 2 – сердцевина.

Развиты многочисленные модификации этого метода — горизонтальное или вертикальное расположение трубы, осаждение внутри трубы или снаружи на кварцевый стержень, легирование оболочки или сердцевины и т.п. Достоинства CVD-процесса заключаются в том, что он позволяет получить наивысшую прозрачность изготавливаемых волокон (близкую к теоретически предельной) и реализовать практически любой требуемый закон изменения показателя преломления, обеспечен сверхчистыми реактивами и оборудованием (в значительной мере заимствованными из техники эпитаксиального выращивания кремния); недостатки - двухстадийность процесса и конечность строительной длины получаемого волокна, а также сложность изготовления исходных кварцевых труб необходимого качества.

Совершенствование двухслойных кварцевых волокон идет по ряду направлений: улучшение характеристик (доведение до теоретического предела затухания и дисперсии) одномодовых волокон как основного типа световода дальней связи; создание многомодовых ступенчатых световодов с увеличенным диаметром сердцевины и повышенной апертурой (для коротких светодиодных ВОЛС), оптимизированных градиентных световодов с уравненными скоростями различных мод в достаточно широком спектральном интервале, волокон с

сердцевиной из легированного чистого кварца в целях повышения устойчивости к радиации; повышение надежности, долговечности, прочности; увеличение строительных длин и снижение стоимости всех видов волокон.

Кварц-полимерные волокна (рис. 5.4,г) изготавливаются из особо чистого промышленного кварца, покрываемого в процессе вытяжки светоотражающим полимером (обычно кремнийорганическим типа СИЭЛ). Эти волокна характеризуются простотой изготовления, непрерывностью и одностадийностью цикла вытяжки, повышенными значениями диаметра сердцевинки и числовой апертуры, а также устойчивостью к воздействию радиации (из-за легированности сердцевинки). Однако им присущ и ряд существенных недостатков: невысокая прозрачность; значительная дисперсия, так как они не могут быть сделаны ни градиентными, ни одномодовыми; ограниченный температурный диапазон (из-за резкой температурной зависимости показателя преломления полимера); сложность армирования торцов, так как при снятии полимера затухание обнаженных участков волокна резко возрастает; недолговечность. Эти недостатки носят принципиальный характер, поэтому кварц-полимерные волокна могут получить лишь ограниченное применение в простейших коротких ВОЛС, используемых в качестве излучателя светодиода.

Волокна из многокомпонентных стекол (рис. 5.4,д) представляют собой сплавы (растворы) двуокиси кремния SiO_2 (как основы в несколько десятков процентов) с несколькими составляющими, такими как Na_2O , CaO , MgO , Al_2O_3 , Li_2O и другими (около 10% каждая); изменением состава варьируется показатель преломления, причем в значительно более широких пределах чем в кварцевых световодах. Эти волокна изготавливаются методом двойного тигля (рис. 5.5.б): навески стекла, предназначенные для создания сердцевинки и оболочки, непрерывно поступают во внутренний и наружный тигли сверху, а снизу из тонкого сопла вытягивается готовое волокно. Процесс характеризуется низкой температурой, простотой, непрерывностью, высокой производительностью, безотходностью; могут изготавливаться ступенчатые и градиентные многомодовые волокна. Однако из-за недостаточной чистоты исходных компонентов эти световоды значительно менее прозрачны, чем кварцевые.

Полимерные световоды (рис. 5.4,е) изготавливаются подобным методом, при этом полимеры сердечника и оболочки поступают к кольцевому фильерному отверстию под давлением из плунжерных цилиндров (плунжерный метод). Полимерные световоды наиболее дешевы и просты в изготовлении, характеризуются повышенной гибкостью и прочностью, могут иметь практически любые значения диаметра сердцевинки и числовой апертуры. Недостаток этих световодов заключается в значительных потерях пропускания, обусловленных загрязнениями и большим числом линий собственного поглощения полимеров.

Еще раз подчеркнем, что из всех рассмотренных волокон только двухслойные световоды из легированного кварца обладают универсальным сочетанием свойств, достаточно полно удовлетворяющих потребности ВОЛС.

Волоконно-оптический кабель (ВОК).

Наиболее широкое распространение получили четыре основные конструкции ВОК (рис.5.6): повивная, в которой волоконные модули обвиваются вокруг центрального упрочняющего элемента; кабели пучковой скрутки, в которых на вивке подвергаются группы (пучки) модулей, предварительно уложенные в трубки; кабели с профильным упрочняющим элементом, в которых волоконные модули свободно укладываются в винтообразные пазы упрочняющего элемента, ленточные кабели, в которых скручиванию подвергаются ленты, содержащие несколько волокон и набранные стопой. Первые две конструкции являются классическими, заимствованными из электротехнической практики.

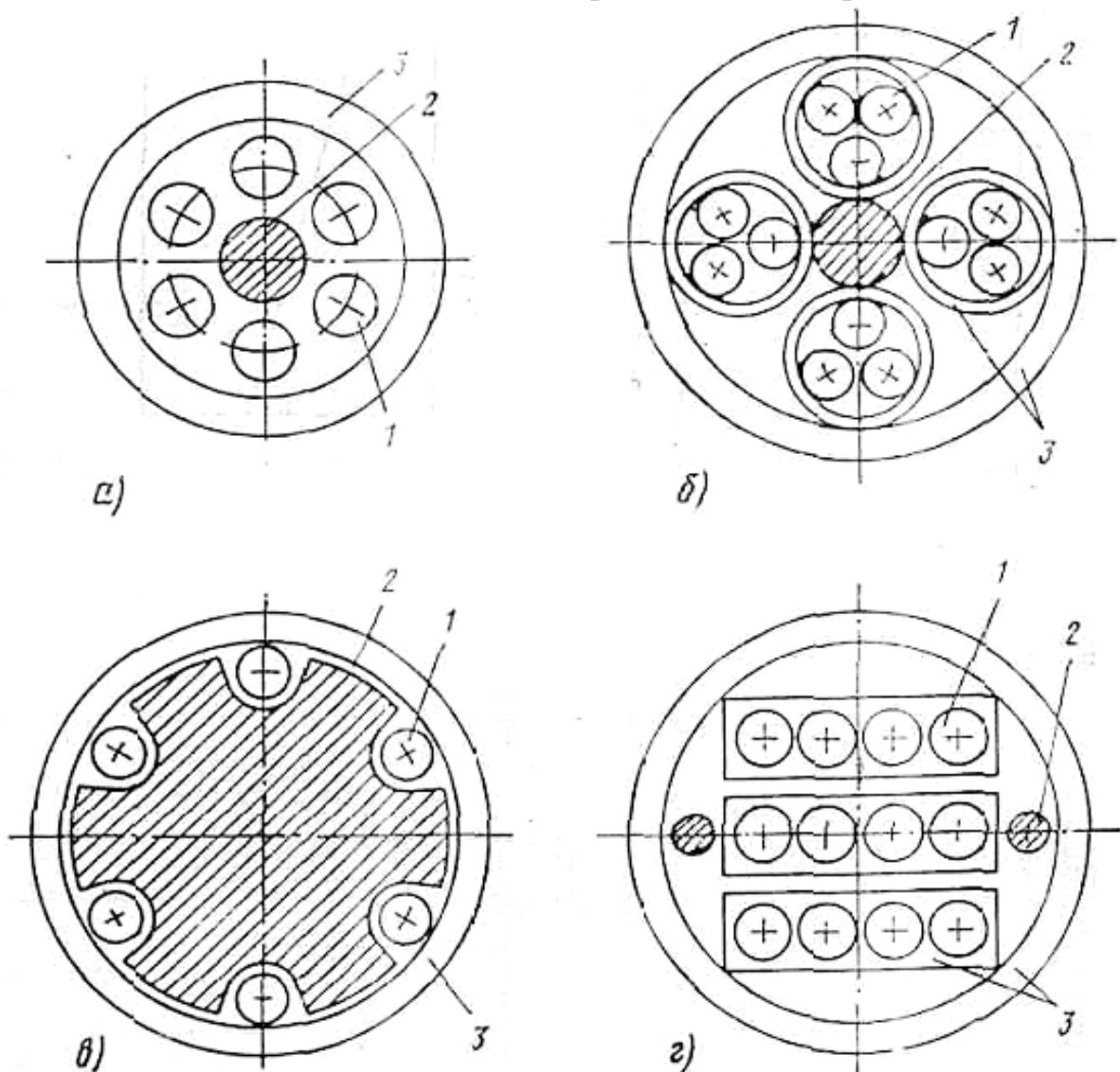


Рис. 5.6. Основные разновидности волоконно-оптических кабелей: повивная конструкция (а), кабели пучковой скрутки (б), с профильным упрочняющим элементом (в), ленточный (г): 1 - волоконно-оптический модуль; 2 - упрочняющий элемент; 3 - защитная оболочка.

Независимо от конкретной конструкции основными элементами кабеля (кроме волоконных модулей) являются (на рис. 5.6 показаны упрощённые

варианты): упрочняющие элементы, обычно полимерные, иногда металлические, служащие для придания кабелю необходимой разрывной прочности и разгрузки волокон от растяжения; наружные защитные покрытия, нередко многооболочечные, предохраняющие от проникновения влаги, паров вредных веществ и от внешних механических воздействий; армирующие элементы, повышающие сопротивляемость кабеля радиальным механическим воздействиям; изолированные металлические провода, монтируемые в кабеле наряду с оптическими волокнами и обеспечивающие электропитание ретрансляторов на линии связи; внутренние разделительные слои и ленты, скрепляющие отдельные группы элементов и уменьшающие давление различных элементов конструкции друг на друга; гидрофобный наполнитель, ослабляющий вредное воздействие влаги на оптические волокна.

Обширные исследования световодных кабелей, создание огромного числа разнообразных конструкций, более чем 15-летний опыт производства и применения этих изделий - все это не привело, однако, к выработке окончательных оптимизированных решений. Появление микроизгибов волокна в составе кабеля, терморассогласование волокна и кабельных материалов, гарантированная защита от воздействия влаги на волокно - эти проблемы по-прежнему далеки от полного разрешения.

Передающие и приемные модули.

Назначение передающего модуля состоит в преобразовании входной информации в виде электрических сигналов в оптические сигналы, согласованные с каналом передачи (волоконным световодом); при этом модуль должен надежно функционировать при всех возможных изменениях внешних воздействующих факторов (температуры, влажности, вибрации, колебаний напряжений питания и т.п.).

В устройстве возбуждения сигнал, поступающий через входной электрический разъем, преобразуется в мощные импульсы накачки, превышающие порог генерации лазера. Это устройство может осуществлять и некоторые дополнительные функции: задание постоянного смещения (предпороговая подпитка); придание импульсу накачки специальной формы, обеспечивающей форсирование начала и обрыва генерации; изменение длительности импульса возбуждения по сравнению с поступающим импульсом (например, для улучшения теплового режима работы лазера) и т.п. В устройство возбуждения могут быть введены и блоки, выполняющие совершенно иные функции: аналого-цифровое преобразование сигнала, кодирование, мультиплексирование и др. В этом случае передающий модуль фактически превращается в оконечное устройство линии передачи информации; его описание выходит за рамки данного рассмотрения. Устройство возбуждения выполняется в виде интегральной монолитной или гибридной микросхемы.

«Центром» передающего модуля является излучатель - именно в нем происходит оптоэлектронное преобразование. Основные излучатели ВОЛС - полу-

проводниковые инжекционные гетеролазеры на основе соединений GaAlAs (для диапазона длин волн 0,8 - 0,9 мкм) и InGaAsP (1,3 - 1,6 мкм). Используются практически все структуры, предназначенные для получения низкого тока накачки и высокой степени когерентности: полосковые лазеры, лазеры с зарощенной структурой, с распределенной обратной связью и сдвоенные лазеры со сколото-связанными резонаторами. Модуль может содержать одновременно несколько лазеров, излучающих на разных длинах волн (для целей спектрального мультиплексирования), в этом случае структурная схема соответственно видоизменяется и усложняется.

Излучение лазера поступает на выходное оптическое устройство, включающее элементы согласования (селективные фильтры или смесители мод; элементы, преобразующие диаграмму направленности излучения к оптимальному для ввода в волокно виду) и оптический соединитель. Часть светового потока лазера с помощью светоделителя (или путем использования внеапертурного излучения) направляется на фотоприемник обратной связи, который через микроэлектронное устройство управления так воздействует на устройство возбуждения и на лазер, чтобы осуществлялась компенсация температурных, деградиционных и других изменений мощности на выходе модуля. Для ослабления температурных эффектов в модуль вводится термоэлектрический охладитель, включающий измеритель и схему автоматической регулировки температуры.

Важнейшей частью, модуля является корпус, выполняемый обычно в виде плоской прямоугольной металлической коробочки с электрическим и оптическим соединителями на противоположных торцах. В тех случаях, когда предполагается монтаж модуля непосредственно на печатную плату, электрический соединитель заменяется системой выводов.

Для коротких ВОЛС с невысокими скоростями передачи информации удобно вместо лазера использовать светодиоды: это повышает надежность и долговечность передающего модуля, снижает его стоимость, резко упрощает структурную схему. В этом случае термоэлектрические охладители не нужны, исключается также цепь фоточувствительной обратной связи.

Передающие модули на основе полупроводниковых инжекционных излучателей (лазеров и светодиодов) характеризуются всеми достоинствами, присущими этим приборам: малыми габаритными размерами, долговечностью и надежностью, экономичностью, малыми питающими напряжениями, простотой модуляции.

Приемный модуль предназначен для обратного преобразования оптического сигнала, поступающего из канала передачи (световода), в электрический и его восстановление до исходного вида; через оптический согласующий элемент (обычно оптический соединитель, а иногда и фокусирующая линза) излучение поступает на чувствительную площадку фотоприемника, в качестве которого практически повсеместно используются фотодиоды: лавинные и с р-і-п-структурой. Для спектрального диапазона $\Delta\lambda = 0,8 - 0,9$ мкм это кремниевые, фотодиоды, для диапазона $\Delta\lambda = 1,3 - 1,6$ мкм - фотодиоды на основе германия и главным образом на основе соединений InGaAs или InGaAsP. Определенные перспективы для фотоприёма в ВОЛС имеют гетерофототранзисторы со сверх-

тонкой базовой областью и планарные фоторезисторы (на основе кремния, арсенида галлия и др.).

Назначение последующих каскадов состоит в обеспечении оптимального (или квазиоптимального) приема, т. е. в реализации такого алгоритма, который позволяет получить наилучшие характеристики (порог чувствительности, полоса частот и др.) при неизбежном действии шумов и искажениях. Конкретное исполнение этих каскадов зависит от типа используемого фотоприемника и вида поступающих информационных сигналов (их амплитуды, частоты следования, кода и др.).

Предварительные усилители обычно выполняются в одном из двух вариантов: высокоимпедансный (интегрирующий) усилитель тока или трансимпедансный усилитель - преобразователь тока в напряжение, охваченный глубокой отрицательной обратной связью. Первый вариант характеризуется наименьшим уровнем шумов и соответственно максимальной пороговой чувствительностью, но вместе с тем и ограниченным динамическим диапазоном, а также сложностью изготовления и индивидуальной настройкой. Для второго варианта, напротив, типичны большой динамический диапазон и широкая полоса частот, но он уступает первому по порогу срабатывания. В широкополосных трансимпедансных усилителях наилучшие шумовые характеристики достигаются при использовании биполярных транзисторов.

Схема обработки сигнала представляет собой специальный электронный фильтр, предназначенный для уменьшения межсимвольной интерференции,

т. е. частичного наложения импульсов на выходе усилителя вследствие дисперсионных явлений в световоде и динамических искажений в приёмопередающих модулях. В схеме принятия решения (как правило, компараторе) сигнал сравнивается с заданным смещением (порогом) и принимается решение об истинности поступившей информации.

Кроме передающих и приемных модулей в линиях дальней связи необходимы также ретрансляторы, в данном случае активные устройства с оптическими входом и выходом, в которых осуществляется регенерация (восстановление) оптических сигналов по мере их затухания при прохождении по световоду. Практически ретранслятор представляет собой объединение приемного и передающего модулей, т. е. оптоэлектронное устройство с двойным преобразованием энергии вида свет – электричество - свет. Развитие интегральной оптики и бистабильных оптических устройств обещает привести к созданию ретранслятора ВОЛС, непосредственно оперирующего с оптическими сигналами во всех звеньях.

Коммутационные элементы

Коммутационные элементы – это элементы связи, представляющие собой пассивные оптические элементы, приборы и устройства, обеспечивающие объединение кабеля (линейного тракта) и активных приёмно-передающих модулей в единую систему передачи с произвольной структурной конфигурацией и с за-

данным алгоритмом распределения световых сигналов в этой системе. Коммутационные элементы содержат несколько групп изделий.

Оптические соединители предназначены для многократного сочленения-расчленения концов двух отрезков кабеля (соединители типа кабель-кабель) или конца кабеля с передающим или приёмным модулем (блочные соединители).

Оптические разветвители представляют собой устройства, в которых излучение, подаваемое на вход (или входы), распределяется по заданному закону между его выходами.

Оптические коммутаторы – устройства, функционально реализующие полностью доступную схему с m входами и n выходами, т.е. с $m \times n$ полюсами. В частном случае при $m=1$ устройство называют оптическим переключателем.

Элементы ввода-вывода излучения выполняют функцию оптического согласования угловых апертур активных элементов (в первую очередь излучателя) и волокна.

Волоконно-оптические линии связи

Создание световодов с малыми потерями, быстродействующих источников когерентного излучения и фотоприёмников сделано возможным практическое применение волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), быстро развивающихся вследствие следующих принципиальных особенностей:

1. Малое линейное затухание и искажение сигнала. Волокна уверенно обеспечивают длину межретрансляционного участка в 30 - 50 км (что на порядок превышает тот же показатель для коаксиальных металлических кабелей), в отдельных случаях - до 200 км и в перспективе - свыше 1000 км. Очень важно, что потери в линии практически не зависят от частоты сигнала.

Непрерывно ищутся пути дальнейшего уменьшения затухания сигнала в волокне. Известно, что неустраняемые потери на релеевское рассеяние имеют спектральную зависимость вида λ^{-4} , поэтому переход от $\lambda = 1$ к $\lambda = 5 - 10$ мкм мог бы привести к снижению затухания до уровня менее 0,001 дБ/км. Уже достигнуты первые успехи в получении относительно чистых волокон (с потерями 10 - 100 дБ/км) для диапазонов $\lambda = 3 - 4$ мкм (флюоридные стекла), $\lambda = 5 - 6$ мкм (халькогенидные стекла) и $\lambda \approx 10$ мкм. Последний диапазон особенно интересен для систем сверхдальней связи, так как излучение $\lambda = 10,6$ мкм генерируется мощными высококогерентными CO₂-лазерами.

Имеются и другие пути уменьшения затухания. В литературе нередко указывается, что $b=0,16$ дБ/км ($\lambda \approx 1,55$ мкм) близко к теоретическому пределу. Но это неточно и справедливо лишь для кварцевых волокон, изготавливаемых известными высокотемпературными методами. При замене материала или технологии обработки ситуация может измениться. Так, для волокон из фторида бериллия коэффициент $\chi_{\text{рел}}$ может быть на два порядка меньше, чем для кварца, а

значит, и предельное затухание уже при $\lambda \approx 1.55$ мкм может быть снижено до 10^{-2} дБ/км.

Не исключено, что овладение совершенной технологией изготовления волокон и свобода в выборе необходимых оптоэлектронных элементов вновь пробудят интерес к «забытым» конструкциям световодов на основе полых капилляров с жидкостным или газовым наполнением. Возможно, что это произойдет при освоении дальнего ИК-диапазона.

Появление принципиально новых видов волокон потребует нового решения задачи минимизации дисперсии: отыскания спектральной области, в которой материальная дисперсия минимальна, расчета оптимальных профилей распределения примесей по сечению и т.п. В решении этой задачи, в том числе для традиционных кварцевых световодов, может оказаться полезным создание многослойных структур, позволяющих осуществить взаимную компенсацию волноводной и материальной дисперсии.

Важным направлением является разработка оптических волокон с сохранением направления плоскости поляризации каналируемого излучения. Эти работы стимулируются развитием волоконно-оптических датчиков, однако после того, как такие волокна будут созданы и освоены промышленностью, они несомненно окажутся полезными и для связи: появится возможность дополнительного (пространственного) мультиплексирования передаваемой оптической информации.

2. Сверхвысокая пропускная способность. Это объясняется прежде всего, широкополосностью всех элементов ВОЛС (излучатель - волоконный тракт - фотоприемник), использованием принципа оптического мультиплексирования и возможностью размещения в кабеле большого числа волокон. Представляется достижимой скорость передачи информации 10^{12} - 10^{13} бит/с по одному кабелю.

Важнейшим путем повышения пропускной способности ВОЛС является использование принципа мультиплексирования во всех его возможных аспектах. Речь идет о технологическом, временном, спектральном, пространственном уплотнении каналов передачи. Первые два аспекта - использование в одном кабеле большого числа невзаимодействующих волокон и временное мультиплексирование - обсуждались выше. Спектральное уплотнение основано на том, что по одному и тому же световоду могут одновременно и не смешиваясь передаваться сигналы, соответствующие оптическому излучению различных длин волн. В простейшем варианте на вход волокна через систему интерференционных фильтров подаются сигналы от нескольких лазеров (например, трёх). На выходе волокна интерференционная система, обратная входной, разделяет различные спектральные потоки, направляя их на три фотоприёмника - в итоге пропускная способность линии утраивается. Оценки показывают, что на существующей элементной базе число информационных каналов реализуемых, в одиночном волокне одновременно на различных оптических несущих, может достигать 10; теоретически предельное число для диапазона $\lambda = 0,8$ - 1.6 мкм превышает 10^2 каналов. Использование всех возможностей спектрального уплотнения требует создания новой, более сложной элементной базы: многочастотных лазеров (образцы двухчастотных лазеров на основе двух разных меза-

структур на одном кристалле уже получены), избирательных фотоприемников, эффективных разветвителей, интерференционных фильтров и др.

Пространственное уплотнение осуществляется двумя способами: при передаче различно поляризованных мод по волокну, сохраняющему направление поляризации, и передаче нескольких мод с различными углами падения. На выходе все эти потоки пространственно разделяются и каждый воспринимается своим фотоприемником. Второй способ - «азимутальное» уплотнение - смыкается с проблемой передачи двумерных изображений по одиночному волокну. Реальные достижения здесь пока невелики: передача трех лучей на расстояние до 250 м с подавлением перекрестных помех на уровне 40 дБ. Для развития пространственного уплотнения также требуется создание принципиально новых, технических средств, в первую очередь волокон с несмешиваемым распространением мод.

Определенные надежды на увеличение скорости передачи информации связываются с использованием нелинейно-оптических явлений.

3. «Электрогерметичность». Волоконный световод не чувствителен к внешним электромагнитным воздействиям и сам практически не излучает в окружающее пространство. Этим обеспечивается помехозащищенность ВОЛС и скрытность передачи информации. Тем самым развитие ВОЛС открывает кардинальный путь решения проблемы электромагнитной совместимости.

4. Малые габариты и масса. Характерными в этой связи являются три момента. Во-первых, диаметр типичного волоконного модуля составляет всего 0,3 - 0,5 мм, а площадь поперечного сечения светоканализируемой области (с учетом необходимых отражающей и защитной оболочек) может быть менее 10^{-5} см². Во-вторых, удельная масса; используемых материалов (кварц) в несколько раз меньше, чем у металлов (медь, свинец); во многих случаях волоконный кабель не имеет защитного металлического экрана или этот экран более лёгкий.

В-третьих, используемые в оконечных устройствах и в ретрансляторах оптоэлектронные элементы миниатюрны, экономичны и легки. В итоге при сравнении с проводными линиями, связи ВОЛС дают выигрыш по массе в 2 - 5 раз, а в отдельных случаях и в 30 - 100 раз.

Малый вес светодиодов обусловлен очень малым их диаметром, к тому же удельный вес кварцевого стекла ($2,3$ г/см³). Вес одного световода длиной 1 км (без пластмассовой оболочки) составляет 27 г, для сравнения - вес одной медной шины такой же длины и диаметром 1 мм равен примерно 7 кг.

Предельное натяжение световодной нити диаметром 125 мкм составляет 68,77 Н (7 кг), примерно в 2 раза больше, чем для фортепианной струны той же толщины.

5. Эксплуатационные преимущества. Оптоэлектронные принципы преобразований и передачи информации в ВОЛС, использование кварца в качестве передающей среды обуславливают наличие электрической развязки между входом и выходом линии; однонаправленность потока информации, отсутствие обратной реакции приемника на передатчик; пожаро- и взрывобезопасность (исключение искрения и самовозгорания); стойкость волокон к коррозии; высокие

прочность волоконных световодов и предельную температуру волокон (до 1000° С); простоту прокладки волоконно-оптического кабеля.

6. Низкая стоимость. Отметим прежде всего неограниченный сырьевой ресурс для производства кварцевых волокон, тогда как запасы меди и свинца непрерывно истощаются. Большая длина межретрансляционного пролета и высокая информационная емкость оптических каналов резко сокращают аппаратные расходы по сравнению с проводными связными системами. Наконец, значительный экономический эффект обуславливается простотой прокладки и эксплуатации ВОЛС.

Области практического применения ВОЛС чрезвычайно широки. В зависимости от протяженности они условно делятся на объектовые, городские (межгородские, зоновые) и магистральные, вплоть до межконтинентальных.

Внутриобъектовые ВОЛС – это относительно короткие (1-100м) бортовые линии на кораблях, самолётах, ракетах и космических аппаратах, внутри учреждений и предприятий в аппаратуре контроля и управления (работающей в условиях сильных помех, с высоковольтными и сильноточными цепями), для передачи световых импульсов большой мощности в лазерной технологии, медицине и т.п. Для внутриобъектной линии связи оптические потери, модовая и хроматическая дисперсия - не очень критические характеристики. Выделяют также так называемые монтажные волоконно-оптические кабели (длиной до 10-30 м), предназначенные для внутриблочных и межблочных соединений в аппаратуре.

Городские ВОЛС имеют среднюю протяженность до 50-100 км, межгородские (зонавые) - до 200-300 км и предназначены для связи ЭВМ отдалёнными терминалами, устройствами сбора данных, телефонной, телеграфной и видеотелефонной связи. Следует оговорить использование ВОЛС для многопрограммного телевидения, что важно как с точки зрения повышения качества и надёжности передачи в условиях сильных помех, экранирования высотными заданиями, рельефом местности, так и радикальной перестройки информационной службы, соединения абонентов с крупными библиотеками, банками данных, информационно-вычислительными центрами и др.

Назначение магистральных ВОЛС - передача информации на большие расстояния (сотни и тысячи километров). При минимальных оптических потерях они должны быть устойчивыми к многолетним воздействиям неблагоприятных внешних факторов (например, при укладке под землёй под водой). В магистральных ВОЛС используют дорогостоящие оптические кабели, содержащие гидроизолирующую оболочку, армирующие элементы и т.п.

Передачу сигналов в ВОЛС осуществляют как в аналоговой, так и в цифровой форме. Широкополосность световолокон делает предпочтительной передачу информации в цифровой форме, как более точной и надёжной, менее чувствительной к шумам и искажениям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптоэлектроника является одним из самых актуальных направлений современной электроники. Оптоэлектронные приборы характеризуются исключительной функциональной широтой, они успешно используются во всех звеньях информационных систем для генерации, преобразования, передачи, хранения и отображения информации. При создании оптоэлектронных приборов используется много новых физических явлений, синтезируются уникальные материалы, разрабатываются сверхпрецизионные технологии. Оптоэлектроника достигла стадии промышленной зрелости, но это только первоначальный этап, так как перспективы развития многих ее направлений практически безграничны. Новые направления чаще всего возникают как слияние – интеграция – ряда уже известных достижений оптоэлектроники и традиционной микроэлектроники: таковы интегральная оптика и волоконно-оптические линии связи; оптические запоминающие устройства, опирающиеся на лазерную технику и голографию; оптические транспаранты, использующие успехи фотоэлектроники и нелинейной оптики; плоские безвакуумные средства отображения информации и др.

Оптоэлектронику как научно-техническое направление характеризуют три отличительные черты:

1. Физическую основу оптоэлектроники составляют явления, методы и средства, для которых принципиальны сочетание и неразрывность оптических и электронных процессов.

2. Техническую основу оптоэлектроники определяют конструктивно-технологические концепции современной микроэлектроники: миниатюризация элементов; предпочтительное развитие твердотельных плоскостных конструкций; интеграция элементов и функций; применение специальных сверхчистых материалов и методов прецизионной групповой обработки.

3. Функциональное назначение оптоэлектроники состоит в решении задач информатики: генерации (формировании) информации путем преобразования внешних воздействий в соответствующие электрические и оптические сигналы; передаче информации; преобразовании информации; хранении информации (включая запись, считывание и стирание); отображении информации.

Для решения перечисленных задач в оптоэлектронных устройствах используются информационные сигналы в оптической и электрической формах, но определяющими являются оптические сигналы – именно этим достигается то качественно новое, что отличает оптоэлектронику. Нередко оптоэлектронное (по форме) устройство фактически является оптическим, а электроника выполняет хотя и необходимые, но все же вспомогательные функции. Иными словами, в этих случаях оптоэлектроника – это оптика, управляемая электроникой.

Рассмотренные в данном пособии сведения об оптоэлектронных элементах и устройствах можно считать минимально необходимыми и достаточными для изучения, проектирования, изготовления и применения в электронных средствах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература

1. Носов Ю. В. "Оптоэлектроника" М. Радио и связь, 1989 – 360 с.
2. Верещагин И. К. Косяченко Л. А., Кокин С. М. "Введение в оптоэлектронику" М. Высшая школа, 1991 – 189с.
3. Мухин Ю.А. Приборы и устройства полупроводниковой электроники. – М.; МЭИ, 1996. – 234 с.

Дополнительная литература

1. Иванов В. И., Аксенов А. И., Юшин А. М., "Полупроводниковые оптоэлектронные приборы". Справочник, М. Энергоатомиздат, 1988.
2. Свечников Сергей Васильевич, "Основы оптоэлектроники", Киев, ВШ, 1989.
3. Самохвалов М.К., "Конструкции и технология тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов". Ульяновск, УлГТУ, 1997. – 56 с.
4. Самохвалов М.К., "Оптоэлектроника". Сборник лабораторных работ. Ульяновск, УлГТУ, 1998. – 39 с.