

Лекция № 9. Компоненты оптоэлектроники и технические средства отображения информации

Общие сведения о компонентах оптоэлектроники

Источник света, световой поток или яркость которого являются одной из функций электрического сигнала, поступающего на его вход, называют *управляемым источником света*.

Общими требованиями к управляемым источникам света оптоэлектронных цепей являются: *стабильность и линейность характеристики преобразования, миниатюрность, малая потребляемая мощность, большой срок службы, высокая надёжность, высокая эффективность, быстроедействие, возможность изготовления в виде интегральных микросхем, возможность смещения спектральных характеристик в любую заданную часть области спектра, механическая прочность и технологичность*.

Оптоэлектроникой называют научно-техническое направление, в котором для передачи, обработки и хранения информации используются электрические и оптические методы.

В оптоэлектронике оптический луч выполняет те же функции управления, преобразования и связи, что и электрический сигнал в электрических цепях.

Устройства оптоэлектроники имеют ряд преимуществ перед чисто электронными приборами.

В них обеспечивается практически полная развязка между входной и выходной цепями. Отсутствует обратное влияние приёмника сигнала на его источник. Легко согласуются между собой электрические цепи с разными входными и выходными импедансами (полными сопротивлениями). Оптоэлектронные устройства имеют широкую полосу пропускания и преобразования сигналов, большое быстроедействие и высокую информационную ёмкость оптических каналов связи (до $10^{13} \dots 10^{15}$ Гц). В связи с тем, что в оптической цепи носителями заряда являются электрически нейтральные фотоны, которые в световом потоке не взаимодействуют между собой, не смешиваются и не рассеиваются, на подобные цепи практически не влияют всевозможные электромагнитные поля. В электронных и электрических цепях, где носителями заряда являются электроны, имеющие определённый электрический заряд, всегда наблюдается «взаимодействие» носителей заряда с электрическими и магнитными полями, вследствие чего информационные сигналы искажаются.

К недостаткам оптоэлектронных компонентов относятся: плохая временная и температурная стабильность характеристик; сравнительно большая потребляемая электрическая мощность; сложности изготовления универсальных устройств для обработки информации; меньшие функциональные возможности по сравнению с интегральными микросхемами; жёсткие требования к технологии изготовления. Вследствие этого компоненты оптоэлек-

троники и электроники существуют не отрицая друг друга и каждый из них используется в той области, где применение его более целесообразно.

Оптоэлектронными приборами называют устройства, излучающие и преобразующие излучение в инфракрасной, видимой или ультрафиолетовой областях спектра или использующие для своей работы электромагнитные излучения, частоты которых находятся в этих областях.

Для осуществления элементарного преобразования в оптоэлектронике необходимо иметь управляемый источник света (фотоизлучатель), яркость свечения которого однозначно определяется электрическим сигналом, а также фотоприёмник, сопротивление или ЭДС которого зависят от степени его освещённости.

Полупроводниковые светодиоды и фотодиоды

Светоизлучающие диоды

Светодиоды предназначены для преобразования электрической энергии в энергию электромагнитного излучения инфракрасного (ИК) или видимого диапазона. Светодиод представляет собой излучающий *p-n-переход*, свечение в котором возникает вследствие рекомбинации носителей заряда (электронов и дырок. Действие светодиода основано на явлении инжекционной электролюминесценции, т. е. генерации оптического излучения в *p-n-переходе*, находящемся под прямым внешним напряжением электрического тока. Под воздействием внешней энергии электроны в атомах переходят в возбуждённое состояние с более высоким уровнем энергии, чем энергия, необходимая для выхода электрона из атома. Такой уровень энергии называется *метастабильным уровнем возбуждения* (зона проводимости 2 на рис.13). При возвращении таких электронов с метастабильного уровня 2 на исходный низкий энергетический уровень 1 происходит испускание фотонов с длиной волны $\lambda = 1, 23 (W_2 - W_1)$, где W_1 – низкий уровень энергии 1, а W_2 – высокий уровень энергии 2.

Показатель преломления активного слоя выше 2 показателя преломления ограничивающих пассивных слоев 1, благодаря чему рекомбинационное излучение может распространяться в пределах активного слоя, испытывая многократное отражение, что значительно повышает КПД источника излучения.

Гетеродинные (неоднородные) для изготовления светодиода структуры могут создаваться на основе разных полупроводниковых материалов. Обычно в качестве подложки используются GaAs (галлий, мышьяк) и In P (индий, фосфор). Соответствующий композиционный состав активного материала выбирается в зависимости от длины волны излучения и создаётся посредством напыления на подложку.

Длину волны излучения λ_0 определяют как значение, соответствующее максимуму спектрального распределения мощности, а ширину спектра излуче-

ния $\Delta\lambda_{0,5}$ – как интервал длин волн, в котором спектральная плотность мощности составляет половину максимальной. Яркость свечения пропорциональна прямому току светодиода.

Светодиоды изготавливают как в виде отдельных индикаторов, так и в виде сегментных или точечных матриц. На основе точечных матриц можно синтезировать любое изображение.

Основные параметры и характеристики светодиодов

1. Сила света I_V – световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в заданном направлении; выражается в канделах (обычно $0,1 \div 10$ мКд).

2. Цвет свечения или длина волны излучения.

3. Постоянное прямое напряжение – падение напряжения при заданном токе ($2 \div 4$ В).

4. Угол излучения α – плоский угол, в пределах которого сила света составляет не менее половины её максимального значения.

5. Характеристики зависимостей: силы света от величины тока; спектральной плотности излучения $I_V(\lambda) / I_V(\lambda)_{\max}$ от длины волны; постоянного прямого тока от постоянного прямого напряжения и др.

Для получения повышенной мощности излучения применяют *суперлюминесцентные* диоды, занимающие промежуточное положение между инъекционными светодиодами и полупроводниковыми лазерами. Они обычно представляют собой конструкции, работающие на том участке ВАХ, на котором наблюдается оптическое усиление (стимулированное излучение). Этот участок характеризуется тем, что внешний квантовый выход на нём существенно больше, чем у обычного светодиода. Суперлюминесцентные диоды имеют уменьшенную спектральную ширину полосы излучения и требуют для работы больших плотностей тока (при мощности излучения 60 мВт плотность тока 3 КА/см²). Их применяют при работе с волоконно-оптическими линиями связи.

В ряде случаев в качестве управляемых источников света применяют инжекторные лазеры. Они отличаются от светодиодов тем, что излучение сконцентрировано в узкой спектральной области и является когерентным. Лазеры имеют высокий КПД и большое быстродействие.

Полупроводниковые лазеры широко применяются при создании световодных линий связи большой протяжённости и в измерительных устройствах различного назначения.

Система обозначений светодиодов аналогична обозначениям обычных диодов, только вместо буквы *Д* используют *Л*, например АЛ302В.

Оптоэлектронные преобразователи

Фотоприёмники предназначены для преобразования светового излучения в электрические сигналы. Так как функциональные возможности Элек-

тролюминесцентных источников света ограничены, то многообразие возможных характеристик оптронов реализуется за счёт фотоприёмников.

В качестве фотоприёмников могут быть использованы фоторезисторы, фотодиоды, фототиристоры и т. д.

При подборе фотоизлучателей и фотоприёмников необходимо согласовывать их спектральные характеристики. В противном случае вследствие несовершенства существующих источников света сложно получить удовлетворительные результаты.

Фоторезисторы. В фоторезисторах используется явление изменения сопротивления вещества под действием инфракрасного, видимого или ультрафиолетового излучения. Основным элементом их является п/п пластина, сопротивление которой при освещении изменяется. В полупроводнике при облучении светом концентрация подвижных носителей заряда увеличивается и проводимость его резко возрастает.

В качестве исходного материала фоторезистора чаще всего используется сернистый таллий, сернистый теллур, сернистый висмут, сернистый свинец, теллуристый свинец, сернистый кадмий и т. д.

Характеристики фоторезисторов

1. ВАХ – зависимость тока I через фоторезистор от напряжения U , приложенного к его выводам, при различных значениях светового потока Φ (рис. 48,а)

2. Энергетическая (люкс-амперная) характеристика – зависимость фототока фоторезистора от светового потока при $U = const$ (рис.48, б).

3. Чувствительность – отношение входной величины к выходной. Для фоторезисторов чаще всего используют токовую чувствительность S , под которой понимают отношение фототока (или его приращения) к длине световой волны (рис.48,в).

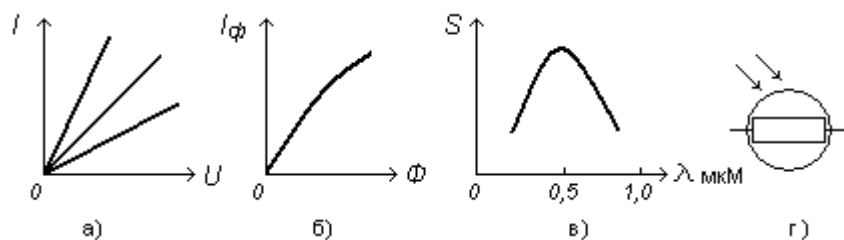


Рисунок 48 – Характеристики фоторезисторов:

а) вольт-амперная, б) энергетическая, в) спектральная, г) условное обозначение -

4. Абсолютная $S_{ABC}(\lambda)$ и относительная $S(\lambda)$ спектральные характеристики – это значения чувствительности в полосе частот. Абсолютная спектральная характеристика представляет собой зависимость монохроматической чувствительности, выраженной в абсолютных единицах, от длины волны регистрируемого потока излучения.

Относительная спектральная характеристика – зависимость монохроматической чувствительности от длины волны, отнесённая к значению максимальной чувствительности: $S(\lambda) = S_{ABC}(\lambda) / S_{ABC\max}(\lambda)$.

5. Граничная частота $f_{ГР}$ – частота синусоидального сигнала, модулирующего световой поток, при котором чувствительность фоторезистора уменьшится в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с чувствительностью при немодулированном потоке ($10^3 \div 10^5$ Гц).

6. Температурный коэффициент фототока – коэффициент, показывающий изменение параметров фоторезистора с изменением температуры:

$$\alpha_r = \left. \frac{\partial I_\phi}{\partial T} \cdot \frac{1}{I_\phi} \right|_{\phi_{const}}$$

У промышленных фоторезисторов $\alpha_T \approx -10^{-3} \div -10^{-4}$ град⁻¹

Фотодиоды. Простейший фотодиод представляет собой п/п диод, в котором обеспечивается возможность воздействия оптического излучения на *p-n-переход*.

При воздействии излучения в направлении, перпендикулярном поверхности *p-n-перехода*, в результате поглощения фотонов, с энергией, большей, чем ширина запрещённой зоны, в *n-области* возникают электронно-дырочные пары. Эти электроны и дырки называют *фотоносителями*. При диффузии фотоносителей в глубь *n-области* основная доля дырок и электронов не успевает рекомбинировать и доходит до границы *p-n-перехода*. Здесь фотоносители разделяются электрическим полем *p-n-перехода*, причём дырки переходят в *p-область*, а электроны не могут преодолеть поле перехода и скапливаются у границы *p-n-перехода* в *n-области*.

Таким образом, ток через *p-n-переход* обусловлен дрейфом неосновных носителей – дырок. Дрейфовый ток фотоносителей называется *фототоком* I_ϕ . Фотоносители – дырки – заряжают *p-область* положительно относительно *n-области*, а фотоносители – электроны – заряжают *n-область* отрицательно по отношению к *p-области*. Возникающая разность потенциалов называется *фотоЭДС* – E_ϕ . Генерируемый ток в фотодиоде – обратный, он направлен от катода к аноду. Причём его величина пропорциональна степени освещённости фотодиода.

Фотодиоды используют для получения электроэнергии (солнечные батареи).

Характеристики фотодиодов

Свойства фотодиода можно охарактеризовать следующими характеристиками:

Вольт-амперная характеристика фотодиода представляет собой зависимость светового тока при неизменном световом потоке и темнового тока I_m от напряжения.

Световая характеристика фотодиода обусловлена зависимостью фототока от освещённости. При увеличении освещённости фототок возрастает.

Спектральная характеристика фотодиода – это зависимость фототока от длины волны падающего света на фотодиод. Она определяется для больших длин волн шириной запрещённой зоны, а при малых длинах волн большим показателем поглощения и увеличением влияния поверхностной рекомбинации носителей заряда с уменьшением длины волны квантов света. То есть, коротковолновая граница чувствительности зависит от толщины базы и от скорости поверхностной рекомбинации. Положение максимума в спектральной характеристике фотодиода сильно зависит от степени роста коэффициента поглощения.

Постоянная времени – это время, в течение которого фототок фотодиода изменяется после освещения или после затемнения фотодиода в e раз (63%) по отношению к установившемуся значению.

Темновое сопротивление – сопротивление фотодиода в отсутствие освещения.

Интегральная чувствительность определяется формулой:

$$K = I_{\phi} / \Phi$$

где I_{ϕ} – фототок, Φ – освещённость.

Инерционность

Существует три физических фактора, влияющих на инерционность:

1. Время диффузии или дрейфа неравновесных носителей через базу t ;
2. Время пролёта через p - n -переход – t_{p-n} ;
3. Время перезарядки барьерной ёмкости p - n -перехода, характеризующееся постоянной времени $\tau = RC_{\text{БАР}}$.

Толщина p - n перехода, зависящая от обратного напряжения и концентрации примесей в базе, обычно меньше 5 мкм, а значит, $t_{p-n} \approx 0,1$ нс. $RC_{\text{БАР}}$ определяется барьерной ёмкостью p - n -перехода, зависящей от напряжения и сопротивления базы фотодиода при малом сопротивлении нагрузки во внешней цепи. Величина $\tau = RC_{\text{БАР}}$ обычно составляет нескольких наносекунд.

Расчёт КПД фотодиода и мощности

КПД вычисляется по формуле:

$$\eta = \frac{I \cdot U}{P_{\text{осв}}} \cdot 100\% ,$$

где $P_{\text{осв}}$ – мощность освещённости; I – сила тока;

U – напряжение на фотодиоде.

Расчёт мощности фотодиода иллюстрирует рис. 49 и таблица 4.

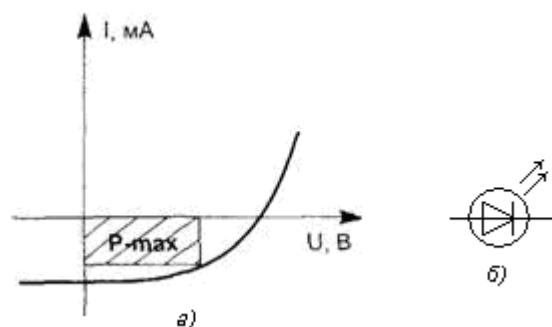


Рисунок 49 – ВАХ светодиода (а), его условное обозначение (б)

Максимальная мощность фотодиода соответствует максимальной площади данного прямоугольника (P-max).

Зависимость мощности от КПД

Таблица № 3

Мощность освещенности, мВт	Сила тока, мА	Напряжение, В	КПД, %
1	0,0464	0,24	1,1
3	0,1449	0,41	2,0
5	0,248	0,26	1,3
7	0,242	0,45	1,6

Применение фотодиодов в оптоэлектронике

Фотодиод является составным элементом во многих сложных оптоэлектронных устройствах.

Фотодиод может обладать большим быстродействием, но его коэффициент усиления фототока не превышает единицы. Благодаря наличию оптической связи оптоэлектронные интегральные микросхемы обладают рядом существенных достоинств, а именно: *почти идеальная гальваническая развязка управляющих цепей от силовых при сохранении между ними сильной функциональной связи.*

Фототранзисторы. В качестве фотоприёмников применяются транзисторные структуры. Простейший фотоприёмник (рис.50,а) имеет два *p-n-перехода*: эмиттерный и коллекторный. Фототранзистор можно рассматривать как комбинацию фотодиода и транзистора. Его характеристики аналогичны характеристикам фотодиода, но соответствующие токи оказываются усиленными, поэтому масштаб по оси токов увеличен в соответствующее число раз (рис.50,б).

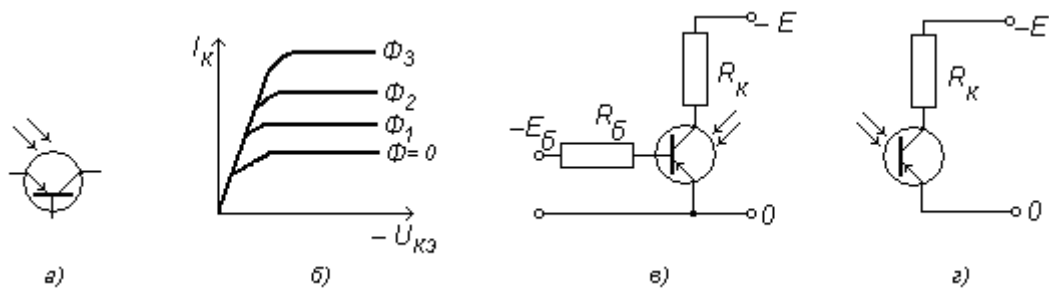


Рисунок 50 – Обозначение фототранзистора (а); вольт-амперные (выходные) характеристики (б); схемы включения с подключенной базой (в) и со свободной базой (г)

Напряжения питания на транзистор подают так же, как и на обычный биполярный транзистор (рис.50,в). Часто применяют включение, когда напряжение прикладывается только между коллектором и эмиттером, а вывод базы остаётся оторванным (рис.50,г). Такое включение называется включением *с плавающей базой* и характерно только для фототранзисторов. При включении с плавающей базой фототранзистор всегда находится в активном режиме, однако при $\Phi = 0$ протекающий через него ток невелик.

Конструктивно фототранзистор выполнен так, что световой поток облучает область базы. В результате собственного поглощения энергии в ней генерируются электронно-дырочные пары. Неосновные носители заряда в базе (дырки) диффундируют к коллекторному переходу и перебрасываются электрическим полем перехода в коллектор, увеличивая ток последнего. Этот процесс аналогичен процессу в фотодиоде. Если база разомкнута, то основные носители заряда (электроны), образовавшиеся в результате облучения, не могут покинуть базу и накапливаются в ней. Объёмный заряд этих электронов снижает потенциальный барьер электронного перехода, в результате чего увеличивается диффузионное движение дырок через эмиттерный переход. Инжектированные дырки, попав в базу, движутся, как и в обычном транзисторе, к коллекторному переходу и, переходя в область коллектора, увеличивают его ток. Таким образом, носители заряда, генерируемые в результате облучения светом, непосредственно участвуют в создании фототока.

Основные характеристики и параметры фототранзисторов

1. ВАХ фототранзистора напоминают выходные характеристики биполярного транзистора в схеме с ОЭ (рис. 35,б), только параметром служит не ток базы, а световой поток Φ или *фототок* (при $I_B = const$).

2. Энергетические и спектральные характеристики (подобны характеристикам фотодиодов).

3. Токовая чувствительность – отношение изменения электрического тока на выходе фототранзистора к изменению «входного» светового потока при холостом ходе на входе и коротком замыкании на выходе.

4. Коэффициент усиления по фототоку $K_{УФ} = (1 + h_{21Э})$. В промышленных фототранзисторах он достигает $(1 \div 6)10^2$ и определяется как отношение

фототока коллектора фототранзистора со свободной базой к фототоку коллекторного *p-n-перехода*, измеренному в диодном режиме (при отключённом эмиттере) при том же значении светового потока.

Кроме фототранзисторов *p-n-переходами* в качестве высокочувствительных фотоприёмников используют полевые фототранзисторы. Они имеют высокую фоточувствительность (до нескольких ампер на люмен), широкую полосу пропускания ($10^6 \div 10^8$ Гц), значительную мощность рассеяния. По своим характеристикам они ближе к фоторезисторам, чем к биполярным транзисторам. Полевой фототранзистор выполняется с управляющим *p-n-переходом* и, так же как обычный полевой транзистор, имеет три электрода: исток, сток и затвор. Объём полупроводника между стоком и истоком образует проводящий канал. Затвор отделён от канала *p-n-переходом*, область объёмного заряда которого модулируется потенциалом затвор – исток. Переход затвор – канал можно рассматривать как фотодиод, фототок которого вызывает падение напряжения на резисторе R_3 , включённом в цепь затвора (рис.51,а). При $E_3 = const$ это приводит к модуляции потенциала затвора за счёт световой энергии и соответствующим изменениям сопротивления канала.

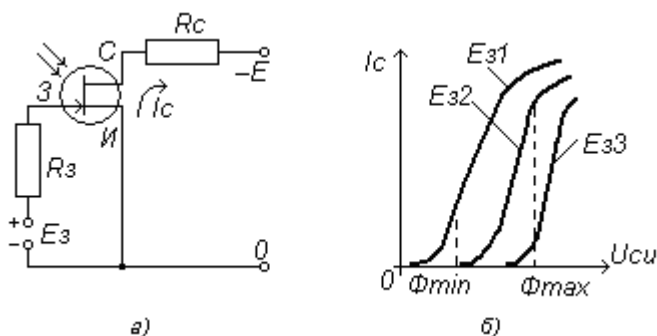


Рисунок 51 – Фототранзистор на базе полевого транзистора (а); его энергетические характеристики (б)

Энергетические характеристики полевого фототранзистора показаны на рис.51,б. При малом световом потоке $\Phi < \Phi_{min}$ и $E_3 = E_{31} = const$ транзистор практически заперт и ток стока практически равен нулю. При $\Phi > \Phi_{min}$ в цепи стока протекает ток, значение которого зависит от светового потока. До $\Phi = \Phi_{max}$ энергетическая характеристика близка к линейной. При большом световом потоке $\Phi \gg \Phi_{max}$ влияние напряжения затвора на величину тока в канале становится незначительным и он близок к максимальному значению.

Инерционность полевого фототранзистора определяется инерционностью фотодиода в области затвора и временем пролёта носителей заряда через канал и оценивается значениями $10^{-6} \div 10^{-9}$ секунды. Граничная частота полевых фототранзисторов находится в пределах $10^7 \div 10^8$ Гц.

Фототиристоры. Фототиристоры используются для коммутации световым сигналом электрических цепей большой мощности. Они представляют

собой фотоэлектрические аналоги управляемого тиристора. Схема подключения напряжения к фототиристор и его ВАХ-ки показаны на рис.52.

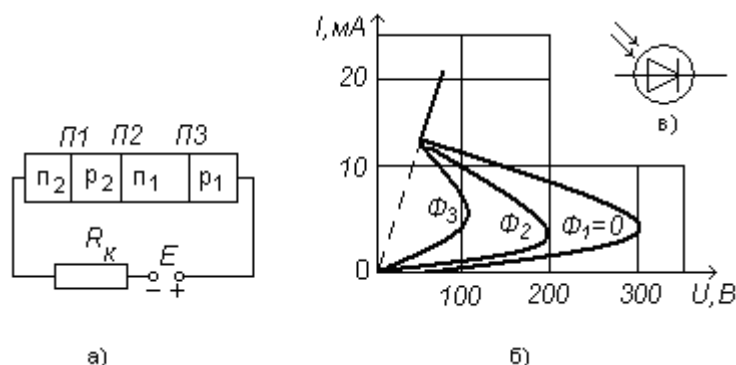


Рисунок 52 – Схема подключения к фототиристор напряжения (а); его ВАХ (б) и условное обозначение (в)

Фототиристор имеет четырёхслойную *p-n-p-n-структуру*, у которой переходы Π_1 и Π_3 смещены в прямом направлении, а коллекторный переход Π_2 – в обратном. Свет обычно попадает на обе базы тиристора – слои p_2 и n_1 . При этом с ростом освещённости возрастают эмиттерные токи, что приводит к возрастанию тока через тиристор. ВАХ типового фототиристора имеет вид, показанный на рис.52,б . Сопротивление фототиристора изменяется от 10^8 Ом (в запертом состоянии) до 0,1 Ом в открытом состоянии. Время переключения тиристора лежит в пределах $10^{-5} \div 10^{-6}$ секунды.

Таким образом, фототиристоры позволяют с помощью светового луча управлять значительными мощностями в электроцепях.

Многоэлементные фотоприёмники.

Эти приборы (сканистор, фотодиодная матрица с управлением на МОП-транзисторе, фоточувствительные приборы с зарядовой связью и другие) относятся к числу наиболее быстро развивающихся и прогрессирующих изделий электронной техники. Опто-электрический «глаз» на основе фотодиода способен реагировать не только на яркостно-временные, но и на пространственные характеристики объекта, то есть воспринимать его полный зрительный образ. Число фоточувствительных ячеек в приборе является достаточно большим, поэтому кроме всех проблем дискретного фотоприёмника (чувствительность, быстродействие, спектральная область) приходится решать и проблему считывания информации. Все многоэлементные фотоприёмники представляют собой сканирующие системы, то есть устройства, позволяющие производить анализ исследуемого пространства путём последовательного его просмотра (поэлементного разложения).

Как происходит восприятие образов?

Распределение яркости объекта наблюдения превращается в оптическое изображение и фокусируется на фоточувствительную поверхность. Здесь световая энергия переходит в электрическую, причём отклик каждого элемента (ток, заряд, напряжение) пропорционален его освещённости. Яр-