

Глава 6

Оптоэлектронные приборы.



Оптоэлектронные приборы предназначены для приема, излучения и преобразования сигналов электромагнитных волн оптического диапазона. Обычно используют следующие диапазоны длин волн: инфракрасного $\lambda > 1 \text{ мкм}$; видимого $(0,35-0,4) < \lambda < (0,7-0,75) \text{ мкм}$; ультрафиолетового $\lambda < 0,3 \text{ мкм}$. Максимальная чувствительность человеческого глаза приходится на длину волны $\lambda = 0,55 \text{ мкм}$ (зеленый цвет). Оптоэлектронные приборы делятся на:

1. светоизлучающие (электросветовые);
2. светопринимающие (фотоэлектрические - фотоприемники);
3. оптроны.

Основные достоинства оптоэлектронных систем передачи информации по сравнению с электронными:

- полная гальваническая развязка между входом и выходом;
- широкая полоса пропускания ($10^{13} - 10^{15}$) Гц;
- легкое согласование устройствами с разным входным и выходным сопротивлением;

поскольку носителями света являются электрически нейтральные фотоны, то в таких цепях отсутствуют электромагнитные помехи и наводки.

7.1. Фотоприемные устройства

Фотоприемные устройства предназначены для преобразования светового излучения в электрические сигналы. В основу работы фотоприемников положены следующие физические явления:

1.внутренний фотоэффект – изменение электропроводности вещества при его освещении;

2.фотоэффект в запирающем слое – возникновение ЭДС на границе двух материалов под действием света;

3.внешний фотоэффект или фотоэлектрическая эмиссия – испускание веществом электронов под действием света.

7.1.1. Фоторезистор

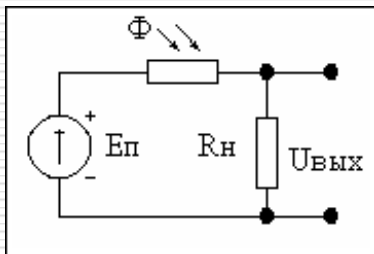
Фоторезистор - двухполюсный полупроводниковый прибор (фотоприемник) без *p-n*-перехода, сопротивление которого зависит от светового потока. В затемненном полупроводнике имеется относительно небольшое число свободных носителей заряда. Его сопротивление достаточно велико.

Принцип работы основан на явлении внутреннего фотоэффекта: энергия светового потока передается электронам, что вызывает генерацию пар свободных носителей заряда. При этом электроны из валентной зоны переходят в зону проводимости. Рост концентрации носителей приводит к уменьшению сопротивления полупроводника. При этом длина волны λ ($\lambda = c/\nu$) или частота ν поглощаемого светового излучения должна соответствовать условию $h\nu > \Delta W$ или $\lambda \leq ch/\Delta W$,

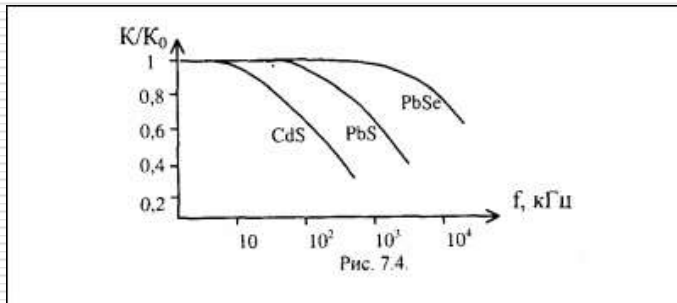
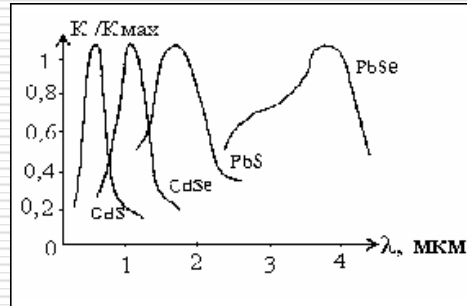
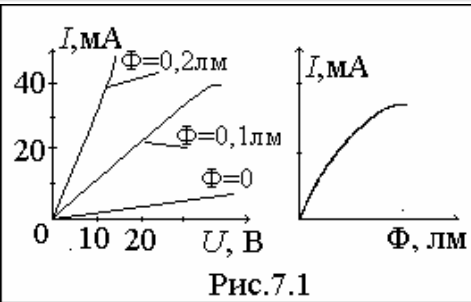
где h - постоянная Планка, ΔW - ширина запрещенной зоны.

В качестве светочувствительного слоя используют сернистый кадмий CdS, сернистый свинец, PbS селенид свинца PbSe, селенид кадмия CdSe.

Условное обозначение и схема включения фоторезистора показаны на рис. 7.1.



Основные характеристики и параметры оптронов:



Основные характеристики и параметры :

1. Семейство вольт-амперная характеристик фоторезистора $I=f(U)|\Phi=\text{const.}$ приведено на рис. 7.2. При $\Phi=0$ ток называется темновым I_t , при $\Phi>0$ через фотосопротивлении протекает общий ток $I_{\text{общ}}$. Разность этих токов называется фототоком: $I\phi=I_{\text{общ}}-I_t$.

2. Передаточная характеристика (рис. 7.2) или энергетическая характеристика фоторезистора $I\phi=f(\Phi)$.

В области малых Φ она линейная, а при больших Φ скорость нарастания фототока уменьшается, что связано с возрастанием вероятности рекомбинации носителей заряда. Ее параметром

является чувствительность к белому (дневному) свету и называется интегральной

чувствительностью: $S\Phi=I\phi/\Phi$, [mA/лм] Здесь $I\phi$ - фототок, Φ - световой поток, U - напряжение. Обычное значение $S\Phi$ от 1 до 20 mA/лм, рабочее напряжение - десятки вольт.

3. R_T - темновое сопротивление фоторезистора, при $\Phi=0$ - единицы МОм, поэтому темновой ток очень мал

4. R_T/R_{min} - величина, показывающая во сколько раз изменяется сопротивление.

5. *Спектральная характеристика* - зависимость чувствительности от длины световой волны. Она зависит от материала фоторезистора (рис. 7.3).

6. Частотные характеристики фоторезисторов показаны на рис. 7.4.

Основной недостаток: малое быстродействие. Фоторезисторы - сравнительно низкочастотные приборы. На данном рисунке f -частота изменений (модуляции) светового потока. Граничная частота, порядка 102-105Гц.

7.1.2. Фотодиоды

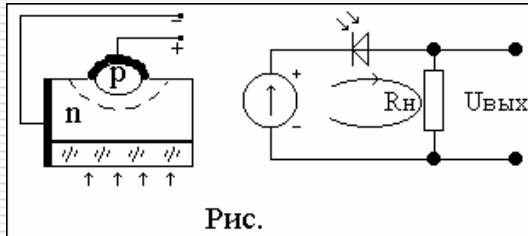


Рис.

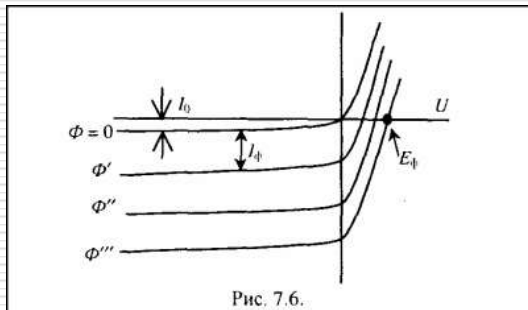
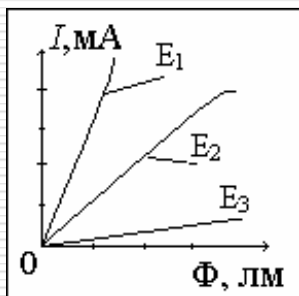


Рис. 7.6.



Фотодиоды (ФД) это фотоприемники на основе *p-n* перехода. ФД может работать в двух режимах – фотодиодном и фотогальваническом.

А) Фотодиод, в фотодиодном режиме - это полупроводниковый диод, смещенный внешним источником напряжения в обратном направлении. Принцип его работы основан на внутреннем фотоэффекте. Конструкция (рис.) предусматривает окно для попадания света на *p-n* переход. Условное обозначение, схема включения и семейство ВАХ приведены на (рис. 7.5).

При $\Phi=0$, через *p-n* переход протекает обратный ток $I_{обр}=I_0$, связанный с неосновными носителями заряда возникающими за счет термогенерации.

Это темновой ток.

При освещении *p-n* перехода ($\Phi>0$) концентрация неосновных носителей заряда растет и соответственно растет обратный ток. Появляется добавочная составляющая – фототок I_{Φ} , который зависит от светового потока $I_{\Phi}=S\Phi$. Общий ток равен $I_{общ}=I_{\Phi} - I_0(eU/\varphi_t - 1)$ Это уравнение ВАХ фотодиода.

Основные параметры и характеристики.

1. Передаточная или энергетическая характеристика $I_{\Phi}=f(\Phi)|U=\text{const}$. Это практически линейные зависимости. С увеличением напряжения U на диоде фототок

возрастает, что связано с расширением *p-n* перехода и уменьшением толщины базы, в результате чего в ней рекомбинирует меньшая часть неосновных носителей при движении к *p-n* переходу.

2. $S_{\Phi}=I_{\Phi}/\Phi$ – интегральная чувствительность. Она составляет 15 -20 мА/лм.

3. Спектральная характеристика- $S=f(\lambda)$, аналогична соответствующим характеристикам фоторезистора и зависит от материала и примесей. Максимум спектральной характеристики кремниевых фотодиодов приходится на длину волны около 1 мкм, для германиевых 1.4 мкм.

Спектральные характеристики захватывают всю видимую и инфракрасную области спектра.

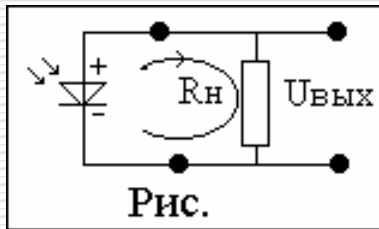
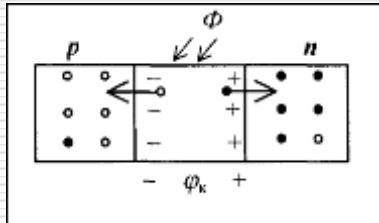


Рис.

4. Частотная характеристика $S=f(\omega)$. Граничная частота быстродействующих кремниевых диодов достигает 107 Гц. Она ограничена скоростью диффузии неосновных носителей заряда через базу.

Повышение быстродействия и увеличения чувствительности достигают в диодах: со встроенным электрическим полем, на основе $p-i-n$ -структуры, с барьером Шоттки, с лавинным пробоем.

Гораздо, большую чувствительность имеют фототранзисторы и фототиристоры, в которых световой поток проникает к базе и коллекторному переходу.

Б) Фотодиод, в фотогальваническом режиме - это $p-n$ переход, используемый для прямого преобразования световой энергии в электрическую. Фотодиод в фотогальваническом режиме называют **фотогальваническим элементом**. Он работает без внешнего источника э.д.с., сам, являясь источником э.д.с.

При отсутствии освещения ($\Phi=0$) $p-n$ переход находится в равновесном состоянии напряжение E_f на выводах фотодиода равно нулю ($E_f=0$).

При освещении светом ($\Phi>0$) непосредственно $p-n$ перехода в нем происходит генерация пар носителей заряда. Под действием существующей в переходе контактной разности потенциалов эти пары разделяются: электроны переходят в n -область, а дырки - в p -область (рис. 7.7). В результате такого разделения p -область приобретает положительный потенциал, а n -область отрицательный. Это уменьшает высоту потенциального барьера и приводит к образованию на выводах фотодиода напряжения - фото э.д.с., а при подключении резистора - тока во внешней цепи. Вольтамперная характеристика фотодиода с учетом фототока запишется в виде: $I_{\text{общ}}=I_f - I_0(eU/\varphi_t - 1)$.

При коротком замыкании, когда $R_n=0$ ($U=U_{\text{вых}}=0$), из ВАХ следует, что $I_{\text{общ}}=I_f=S\Phi$ т.е. зависимость фототока от потока линейная. При произвольном сопротивлении нагрузки, когда напряжении на $p-n$ переходе равно напряжению на выходе, т.е. $U=U_{\text{вых}}=I_{\text{общ}}R_n$ общий ток определяется из выражения

$$I_{\text{общ}}=I_f - I_0(eU_{\text{вых}}/\varphi_t - 1), \text{ а напряжение на выходе } U_{\text{вых}}=\varphi_t \ln(1+(I_f-I_{\text{общ}})/I_0)$$

В режиме холостого хода, когда $R_n=0$ ($I_{\text{общ}}=0$), выходное напряжение есть фото-ЭДС ($U_{\text{вых}}=E_f$).



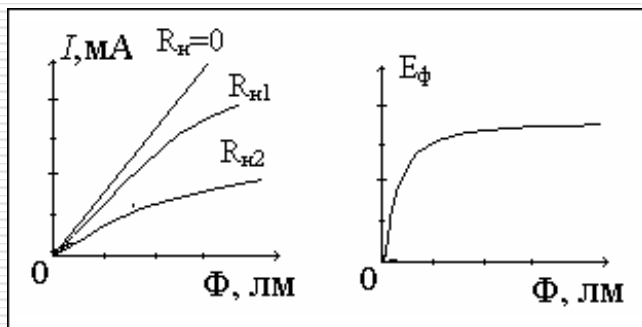
Оно определяется из выражения:

$$E_{\phi} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{\phi}}{I_0} + 1 \right) = \varphi_T \ln \left(\frac{k_{\Sigma} \Phi}{I_0} + 1 \right)$$

де $S_{\phi} = I_{\phi} / \Phi$ - интегральная чувствительность. Зависимость $E_{\phi} = f(\Phi)$ приведена на рис. Фото-эдс кремниевых фотоэлементов составляет 0,5В при токе короткого замыкания 25мА, при освещаемой площади 1см². К сожалению, КПД фотогальванических элементов не превышает 15...20%

при удельной мощности порядка 1...2 кВт/м². Тем не менее, фотогальванические элементы, соединенные в последовательные и параллельные цепи изготавливают в виде плоских конструкций, называемых солнечными батареями.

Солнечные батареи широко применяют для питания аппаратуры на космических объектах.



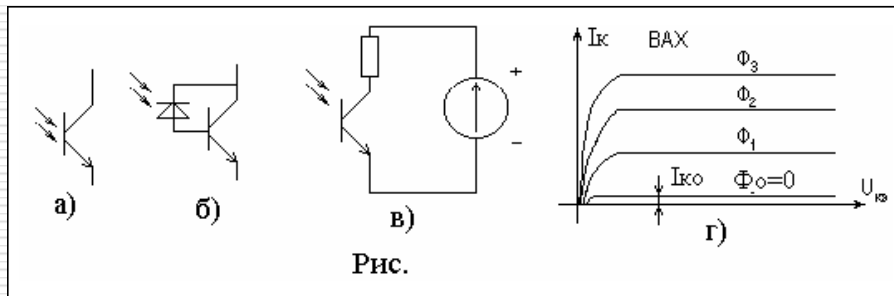
7.1.2. Фототранзисторы

По своей структуре фототранзистор (ФТ) аналогичен биполярному, в котором переход коллектор – база представляет собой фотодиод. На рис. приведены условное обозначение, эквивалентная схема, схема включения и семейство ВАХ фототранзистора. Конструктивно ФТ выполнен так, что световой поток освещает область базы. В результате поглощения световой энергии, в ней генерируются электронно-дырочные пары. При этом неосновные носители втягиваются в коллекторный переход, увеличивая ток коллектора, а в базе остаются основные носители заряда. Это создает их избыточный заряд, что увеличивает прямое смещение на эмиттерном переходе. Это приводит к росту инжекции неосновных носителей заряда в базу из области эмиттера. Сравнивая, вольтамперные характеристики фотодиода видим, что они ничем не отличаются от выходных характеристик биполярного транзистора в схеме с общей базой. Это не случайно. Характеристики

фотодиода при $\Phi = 0$ и характеристики транзистора при $I_{\text{Э}} = 0$ - это характеристики запертого p - n перехода (в транзисторе – коллекторного перехода). При $I_{\text{Э}} \neq 0$ в базе биполярного транзистора растет концентрация неосновных носителей и соответственно растет ток коллектора (обратный ток коллекторного перехода). Разница же только в том, что в транзисторе концентрация неосновных носителей в базе растет за счет инжекции их из эмиттера, а в фотодиоде - за счет генерации носителей под действием света. При включении ФТ по схеме с ОБ уравнение для токов имеет вид $I_{\text{Бобщ}} = h_{21\text{Б}} I_{\text{Э}} + I_{\text{К0}} + I_{\text{Бфк}}$. При включении ФТ по схеме с ОЭ уравнение для токов имеет вид $I_{\text{Бобщ}} = h_{21\text{Э}} I_{\text{Э}} + I_{\text{К0}} + (1 + h_{21\text{Э}}) I_{\text{Бфк}}$.

Так как, $h_{21\text{Э}}$ -десятки, сотни единиц, то ток фотодиода $I_{\text{Бфк}}$ увеличивается в соответствующее число раз. Основные параметры и характеристики ФТ и фотодиода аналогичны.

Основные достоинства фототранзисторов – высокая световая чувствительность, электрическая и технологическая совместимость с биполярными транзисторами. Недостатки фототранзисторов: 1. Малое быстродействие, граничная частота $f_{\text{гр}} = 10^3$ - 10^5 Гц. 2. Высокая зависимость от температуры темнового тока.



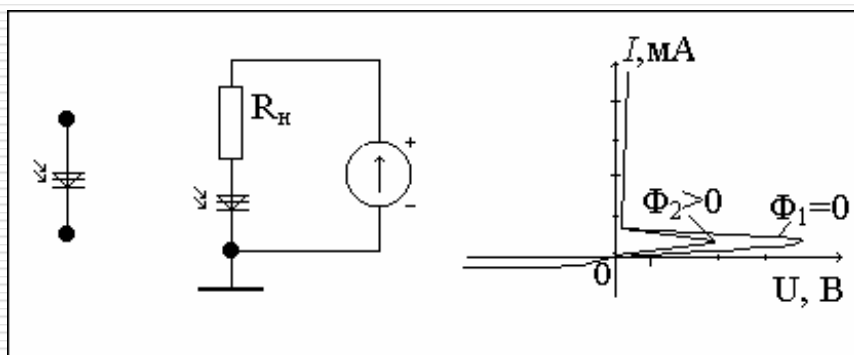
7.1.3. Фототиристоры

Это полупроводниковые приборы используемые для коммутации световым сигналом электрических цепей большой мощности.

Условное обозначение, схема включения и ВАХ приведены на рис. .

Конструктивно выполнено так, что свет попадает на обе области базы тиристора. При этом с ростом освещенности возрастают эмиттерные токи, что приводит к возрастанию коэффициентов α и включению тиристора.

Темновое сопротивление – 108 Ом (запертое состояние), сопротивление во включенном, открытом состоянии до 10-1 Ом. Время переключения 10-5 – 10-6 сек.



7.2. Светоизлучающие приборы

Светоизлучающие приборы используются как управляемые источники света или как индикаторные устройства отображения информации.

Все источники света можно разделить на активные и пассивные. Активные - сами создают световой поток, а пассивные можно использовать только в режиме внешней подсветки.

В основе работы всех излучателей света лежат следующие физические явления:

1. температурное свечение – свечение нагретого тела (накальные индикаторы);
 2. излучение, сопровождающее газовый разряд в газах (газоразрядные индикаторы);
 3. электролюминесценция – это световое излучение, возникающее при воздействии электрического поля или тока;
 4. индуцированное излучение.
-

7.2.1. Светоизлучающие диоды

Это приборы на основе р-п-перехода. Они относятся к электролюминесцентным источникам света, их называют инжекционными светодиодами или просто светоизлучающими диодами (СИД).

СИД – представляет собой р-п-переход, свечение в котором возникает при протекании прямого тока.

Протекании прямого тока сопровождается инжекцией неосновных носителей заряда в базу с последующей их рекомбинацией. При рекомбинации электрон из зоны проводимости переходит в валентную зону, что сопровождается выделением энергии. Обычно это безизлучательный процесс с выделением энергии, за счет соударений электрона с атомами решетки, в виде тепла, которое идет на нагревание кристалла (Ge, Si). Однако, в ряде случаев (в определенных материалах GaAs, GaSb, InAs, InSb и т.д.), такой переход происходит без соударений и сопровождается выделением кванта света с длиной волны $\lambda = K/\Delta E$, где K – постоянный коэффициент; ΔE – ширина запрещенной зоны.

Цвет излучения зависит от материала примесей т.е. ΔE . Светодиоды изготавливают из фосфида галлия, арсенида галлия и карбида кремния. Основные характеристики и параметры светодиода:

Вольтамперные характеристики светодиодов показаны на рис. 7.9. Ее параметры: прямой номинальный ток, $I_{пр.ном.}$, постоянное прямое напряжение.

2. *Яркостная характеристика* - зависимость яркости от тока имеет вид рис. 7.10. Максимально излучаемая мощность, $P_{изл.макс}$

3.. Типичный вид спектральных характеристик диодов зеленого, желтого и красного свечения показан на рис. 7.11. Длина излучаемой волны λ -

Светодиоды широко используют в качестве индикаторов в устройствах визуального отображения информации, а также в качестве источников света в оптических системах передачи информации. Бывают:

1. В виде отдельных одиночных элементов.

2. В виде полупроводниковых знаковых табло, состоящих из нескольких светодиодов. Наиболее часто они представляют собой семисегментные знаковые индикаторы.

7.2.2. Полупроводниковые лазерные диоды

Светоизлучающие диоды имеют спонтанное некогерентное излучение. Оно складывается из фотонов которые независимы друг от друга.. Мощность его относительно мала. Для повышения мощности излучения применяют полупроводниковые лазерные диоды. Их излучение сконцентрировано в узком диапазоне частот и является когерентным.

Когерентное излучение возникает при высокой концентрации инжектированных в полупроводник носителей заряда и наличие оптического резонатора. Поэтому объем зоны, где происходит излучательная рекомбинация, ограничивают с помощью конструктивных и технологических мер и эту активную область выполняют из материала с другим показателем преломления, чем у окружающей среды. В итоге получают световод, торцы которого с обеих сторон ограничены зеркальными гранями. Он, выполняет роль резонатора. Благодаря резонатору фотоны появившиеся в процессе рекомбинации многократно проходят через световод, отражаясь от его зеркальных граней, прежде чем выйти за пределы кристалла через полупрозрачное зеркало. Это позволяет получить монохроматическое когерентное излучение.

При токе инжекции ниже порогового значения $I_{пор}$, наблюдается спонтанное излучение, как в обычном светодиоде. При увеличении тока до $I_{пор}$ ($I_{пор}=50-150\text{мА}$) и выше возникает когерентное излучение и резкое возрастание выходной мощности, например с 5 мВт/мА до 200 мВт/мА .

Полупроводниковые лазерные диоды широко применяются при создании волоконно оптических линий связи и в измерительных устройствах различного назначения.

7.3. Оптроны

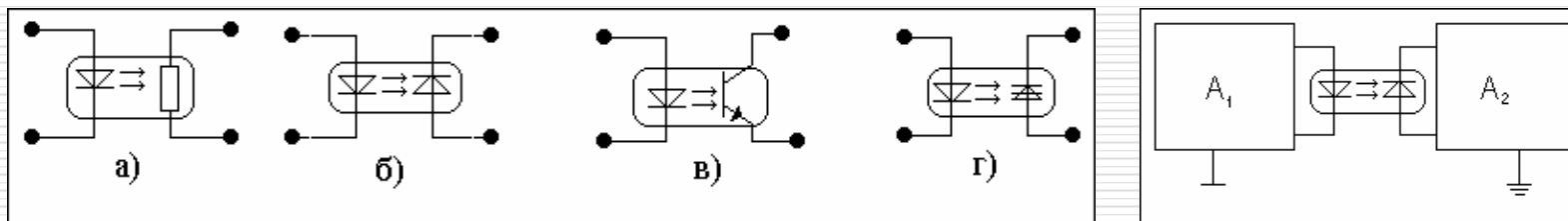
Это полупроводниковые приборы, состоящие из заключенного в один корпус светоизлучающего прибора и фотоприемника, между которыми, обычно, существует прямая оптическая связь.

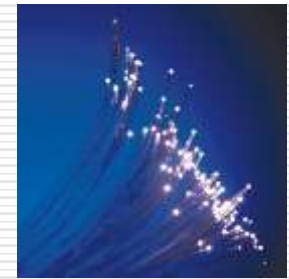
Входной электрический сигнал подводится к излучателю и преобразуется им в световой, он через оптическую среду воздействует на фотоприемник и преобразуется им вновь в электрический. Смысл этого преобразования состоит в том, что входная и выходная цепи электрически полностью развязаны, а оптическая связь существует только в прямом направлении от входа к выходу. Основное назначение оптронов – гальваническая развязка электрических цепей между, которыми должна существовать связь для передачи информации.

В простейшем оптроне излучателем является лампочка накаливания, но обычно это инжекционный светодиод, что позволяет обеспечить высокое быстродействие оптронов.

Разновидности оптронов и их условно графические обозначения приведены на рисунке : диод-резисторный оптрон (а); диод-диодный оптрон (б); диод-транзисторный (в); диод-тиристорный оптрон (г). В диод-диодных оптронах излучателем является светодиод из арсенида галлия оптрон, а фотоприемником кремниевый фотодиод. Оптроны используются в качестве ключа и могут коммутировать ток с частотой 106-107Гц. Темновое сопротивление $R_t=108-1010\text{Ом}$, а сопротивление в открытом состоянии порядка $102-103\text{Ом}$. Сопротивление изоляции вход выход порядка $10^{13}-10^{15}\text{Ом}$. Диод-транзисторные оптроны

благодаря большей чувствительности фотоприемника экономичнее диодных, однако их частота коммутации не превышает 105Гц. Диод-тиристорные оптроны благодаря фототиристорам позволяют коммутировать токи до 5А при входном, управляющем, токе менее 10мА и времени включения 10-5сек. Аналоговые оптроны обычно реализуют на основе фоторезисторов и применяют для различных бесконтактных регулировок. Быстродействие резисторных оптронов невелико, не превышает 105 кГц. Схема гальванической развязки устройств А1 и А2 приведена на рис. В ней устройство управление А1 и А2 должны иметь точки нулевого потенциала, которые не должны быть гальванически связаны, т.е сопротивление между ними должно быть по возможности большим.





7.4 Световоды

Световоды это оптические волокна – среда распространения оптического излучения. Они находят широкое распространение в оптоволоконных каналах связи. Их главным достоинством является отсутствие помех вызванных электромагнитным воздействием. Световоды можно разделить на две группы: стеклянные и пластмассовые. Пластмассовые дешевле, не ломаются при изгибах, обеспечивают простоту соединения.

Распространение света в световоде достигается использованием материалов с разным коэффициентом преломления n ($n_1 > n_2$). Коэффициент преломления материала сердцевины больше коэффициента преломления материала оболочки. Этим достигается полное внутреннее отражение и распространение света вдоль волокна.

Основные параметры световодов:

1. широкополосность;
2. малые потери (0,15дБ/км);
3. малый диаметр;
4. малая масса;
5. отсутствие интерференции, (т.е. отсутствие перекрестных помех);
6. безиндуктивность, отсутствие влияния электромагнитной индукции;
7. высокая коррозионная стойкость ;
8. высокая элластичность (минимальный радиус изгиба примерно 2 мм.)

