

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 устройств 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

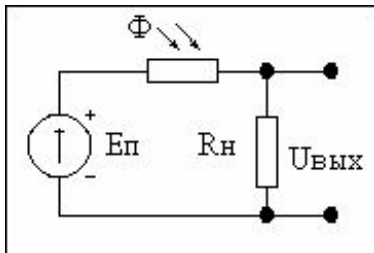
Фоторезистор - двухполюсный полупроводниковый прибор (фотоприемник) без *p-n*-перехода, сопротивление которого зависит от светового потока. В затемненном полупроводнике имеется относительно небольшое число свободных носителей заряда. Его сопротивление достаточно велико.

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 $\lambda \leq ch/\Delta W$,

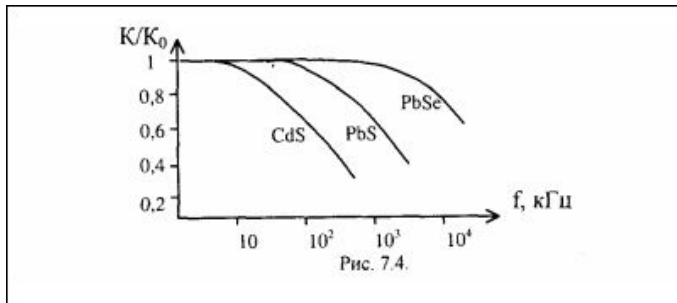
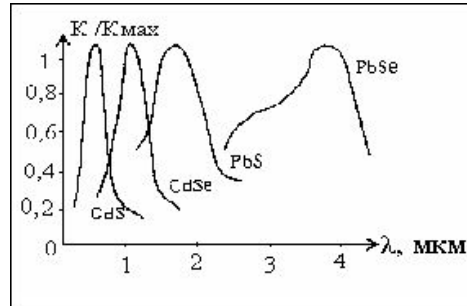
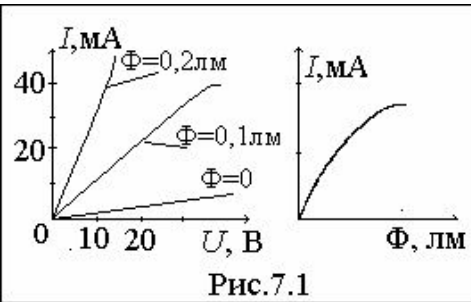
где h - постоянная Планка, ΔW - ширина запрещенной зоны.

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: $S\Phi=I\Phi/\Phi$, [мА/лм] Здесь $I\Phi$ - фототок, Φ - световой поток, U -напряжение. Обычное значение $S\Phi$ от 1 до 20 мА/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

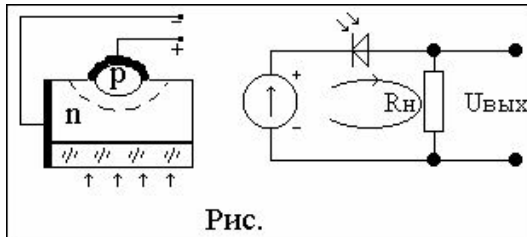
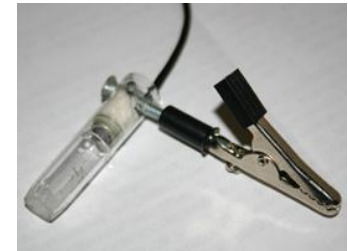


Рис.

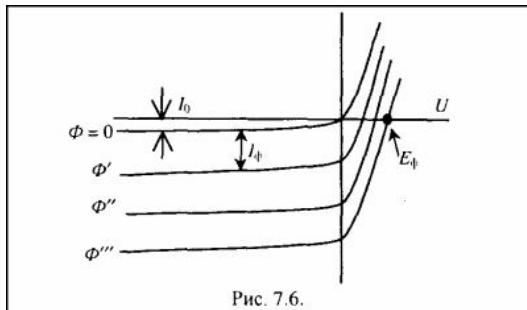
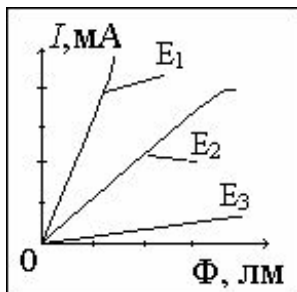


Рис. 7.6.



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_f , который зависит от светового потока $I_f=S\Phi$. Общий ток равен $I_{общ}=I_f - I_0(eU/\phi_t - 1)$ Это уравнение ВАХ фотодиода.

Основные параметры и характеристики.

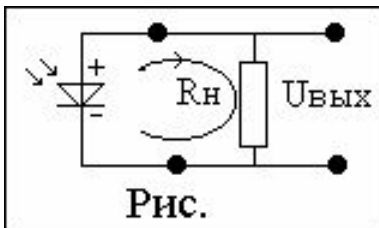
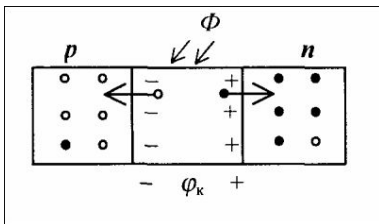
1. Передаточная или энергетическая характеристика $I_f=f(\Phi)|U=\text{const}$. Это практически линейные зависимости.

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. $S_f=I_f/\Phi$ – интегральная чувствительность. Она составляет 15 -20 мА/лм.

3. Спектральная характеристика- $S=f(\lambda)$, аналогична соответствующим характеристикам фоторезистора и зависят 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.



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 $r-i-n$ -структуры, с барьером Шотки, 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 напряжению 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 $R_n=\infty$ ($I_{\text{общ}}=0$), выходное напряжение есть фото-ЭДС ($U_{\text{вых}}=E_f$).

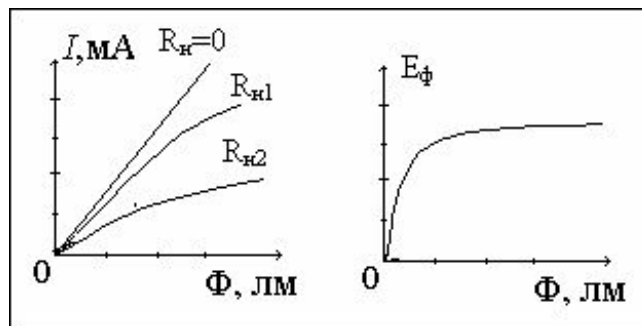


Оно определяется из выражения:
$$E_{\phi} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{\phi}}{I_0} + 1 \right) = \phi_T \ln \left(\frac{k_{\Sigma} \Phi}{I_0} + 1 \right)$$

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.



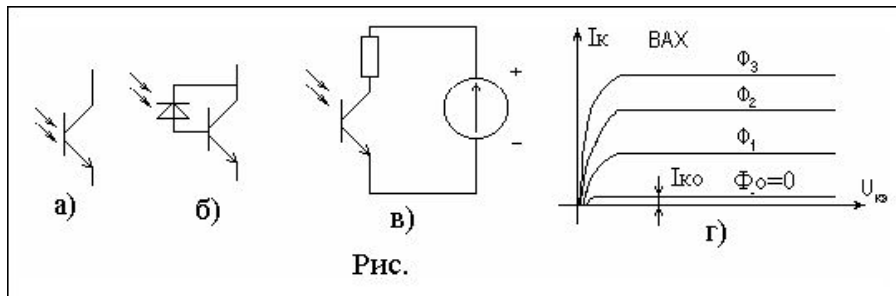
7.1.2. Фототранзисторы

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 $I_{\text{бобщ}} = k h_{21} I_{\text{бЭ}} + I_{\text{к0}} + I_{\text{бфк}}$. При включении ФТ по схеме с ОЭ уравнение для токов имеет вид $I_{\text{бобщ}} = k h_{21} I_{\text{Эб}} + I_{\text{к0}} + (1 + h_{21} \varepsilon) I_{\text{бфк}}$.

Так как, $h_{21} \varepsilon$ - 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 $f_{\text{гр}} = 10^3 - 10^5 \text{ Гц}$. 2. Высокая зависимость от температуры темнового тока.



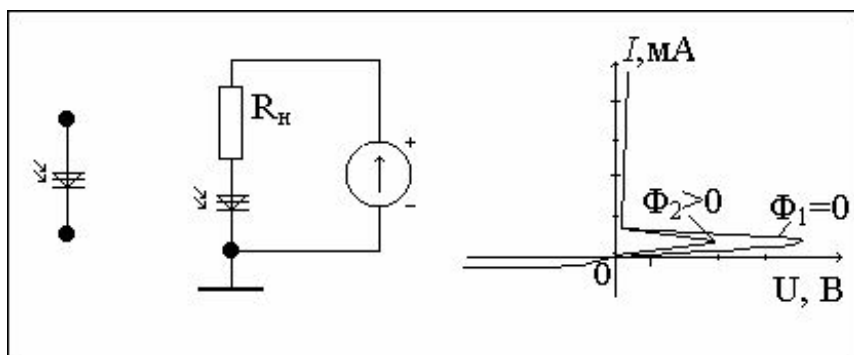
7.1.3. Фототиристоры

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

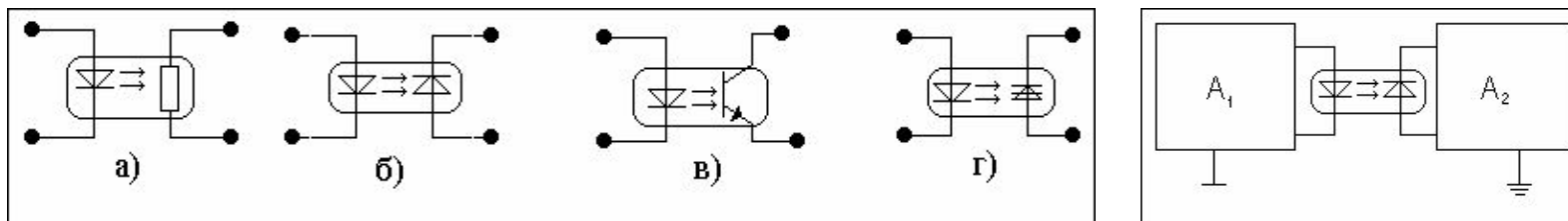
Это полупроводниковые приборы, состоящие из заключенного в один корпус светоизлучающего прибора и фотоприемника, между которыми, обычно, существует прямая оптическая связь.

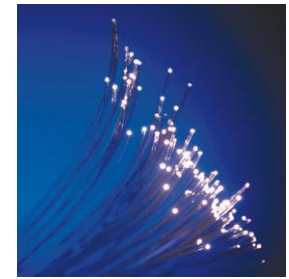
Входной электрический сигнал подводится к излучателю и преобразуется им в световой, он через оптическую среду воздействует на фотоприемник и преобразуется им вновь в электрический. Смысл этого преобразования состоит в том, что входная и выходная цепи электрически полностью развязаны, а оптическая связь 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 102-103Ом. Сопротивление изоляции вход выход порядка 1013-1015Ом. 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 применяются 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.





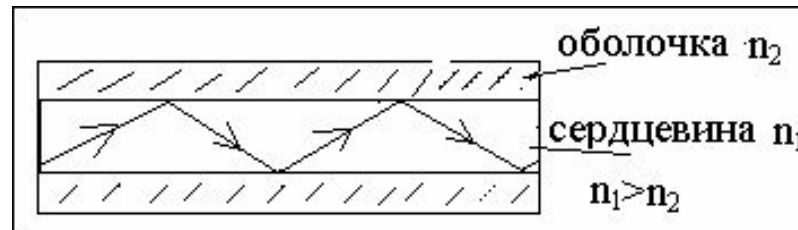
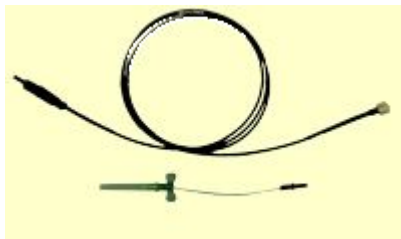
7.4 Световоды

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 эластичность (минимальный радиус изгиба примерно 2 мм.)



ЗНАКОСИНТЕЗИРУЮЩИЕ ИНДИКАТОРЫ

6.5. Виды знаковинтезирующих индикаторов

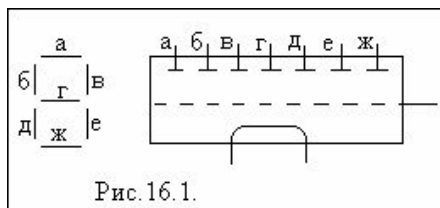


Рис. 16.1.

Знакосинтезирующие индикаторы (ЗСИ) не являются микросхемами. Их можно рассматривать как дискретные элементы, но применяются они совместно с интегральными микросхемами. Здесь будут рассматриваться только те виды ЗСИ, которые совместимы с интегральными микросхемами.

По принципу работы различают: *вакуумные люминесцентные* индикаторы (ВЛИ); *жидкокристаллические* индикаторы (ЖКИ);

полупроводниковые знаковинтезирующие индикаторы (ППЗИ).

По виду информационного поля: *сегментные* и *матричные* индикаторы.

По виду отображаемой информации: *единичные, цифровые, шкальные, мнемонические.*

16.2. Вакуумные люминесцентные индикаторы

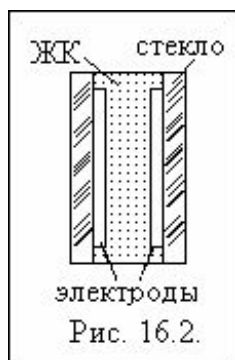
ВЛИ построен по принципу вакуумного триода, анод которого покрыт люминофором, светящимся при попадании на анод электронов.

Для используемых люминофоров характерно низковольтное свечение. Аноды цифровых индикаторов располагаются в виде сегментов, воспроизводящих очертания цифр. Чаще используются семисегментные цифры. Сетка обычно бывает одна, общая для всех анодов (рис. 16.1).

Чтобы исключить ненужную подсветку экрана, на сетку подаётся отрицательное (-2... - 4 В) смещение. Отпирающее импульсное напряжение сетки обычно равно анодному и составляет 30...50 В. Напряжение накала - единицы вольт. ВЛИ обеспечивают хорошую контрастность и высокую яркость (200...500 кд/м²). Срок службы ВЛИ 5...10 тысяч часов.

Управление ВЛИ может быть статическим или динамическим. В первом случае напряжение подаётся сразу на все аноды, участвующие в формировании цифры, т.е. весь знак формируется одновременно. Динамическое управление используется в многоразрядных индикаторах, в которых одноименные аноды (сегменты) соединены параллельно, а сетки - отдельные для каждого разряда. При этом способе на аноды всех разрядов подаются напряжения, необходимые для синтеза первого знака, а остальные разряды блокированы запирающими напряжениями на сетках. В следующем такте формируется знак второго разряда и т.д. Динамический способ позволяет уменьшить число выводов многоразрядного индикатора.

6.6. Жидкокристаллические индикаторы

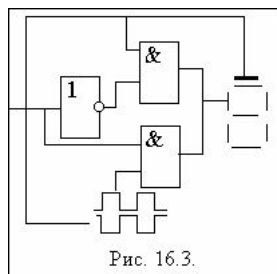


Жидкокристаллические индикаторы (ЖКИ) основаны на использовании электрооптических эффектов в жидких кристаллах: динамического рассеяния (ДР) и твист-эффекта (ТЭ). При ДР воздействие электрического поля напряжённостью около 5 кВ/см переориентирует молекулы так, что материал становится непрозрачным. При использовании ТЭ электрическое поле меняет плоскость поляризации света, проходящего через ЖКИ, в результате ЖКИ также становится непрозрачным.

Схематическое устройство ЖКИ, работающего на просвет, показано на рис. 16.2.

Между двумя стеклянными пластинами помещаются два электрода и жидкокристаллическое вещество. Конструкция ЖКИ, работающего на отражение, отличается тем, что задний электрод делают светоотражающим.

Возбуждение ЖКИ можно осуществлять как постоянным, так и переменным током, однако при возбуждении постоянным током резко снижается срок службы. Возбуждение переменным током осуществляют либо сигналами разных частот, либо фазовым методом. При фазовом методе информацию можно выводить не более 4...5 раз в секунду, что достаточно для большинства применений. Схема возбуждения фазовым методом показана на рис. 16.3. Из рис. 16.3 видно, что в зависимости от управляющего сигнала, напряжение с частотой 20...25 Гц поступает на сегмент либо в фазе, либо в противофазе с напряжением на общем электроде. При различных фазах происходит возбуждение данного сегмента. Основные особенности ЖКИ: малая потребляемая мощность (единицы мкВт/см²); низкие рабочие напряжения (1,5...15 В); хорошая видимость при дневном свете; долговечность (10...15 лет работы). Недостатки: необходимость внешнего освещения и малое быстродействие. Основные области применения: наручные часы, микрокалькуляторы, переносные измерительные приборы и радиоприёмники.



6. 7. Полупроводниковые знакосинтезирующие индикаторы

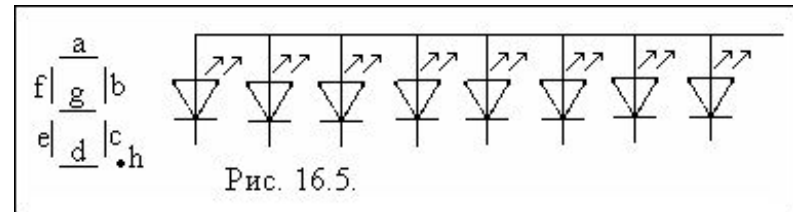
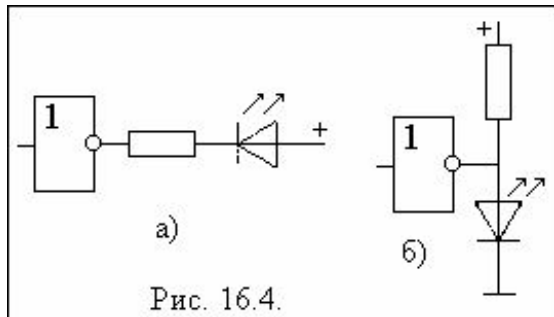
Основой ППЗИ является *светодиод*. Особенностью конструкции светодиода является окошко для выхода света, излучаемого р-п-переходом. Для уменьшения внутреннего отражения над переходом имеется сферическое покрытие или миниатюрная линза. Основные материалы, используемые при изготовлении светодиодов: арсенид галлия и фосфид галлия. В зависимости от примесей получают светодиоды красного, жёлтого, зелёного и синего свечения. Светодиоды могут подключаться к выходам микросхем непосредственно или через сопротивления.

На рис.16.4а и 16.4б показаны схемы включения светодиодов для индикации состояния логического нуля и, соответственно, логической единицы на выходе микросхемы. Знакосинтезирующие индикаторы могут быть одnorазрядными или содержать знаки нескольких разрядов.

Каждый разряд (цифра) состоит из нескольких диодов-сегментов. Наиболее часто используются семисегментные индикаторы, содержащие семь сегментов для воспроизведения цифр и один дополнительный сегмент для десятичной точки (рис. 16.5).

На рисунке показана схема индикатора с общим анодом, но в некоторых типах индикаторов сегменты соединяются по схеме с общим катодом.

Основные параметры светодиодов: сила света 50...500 мккд; прямое напряжение 1,5...3 В; допустимое обратное напряжение 3...7 В; постоянный прямой ток 3...30 мА; срок службы 15...30 тысяч часов.



6.8. ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

6.8.1. Общие сведения

К электровакуумным приборам относятся все электронные лампы. Основой конструкции является баллон (стеклянный, металлический или керамический) из которого выкачивается воздух. В баллоне на траверсах (металлических проволоках) закрепляются электроды, которые могут иметь форму цилиндрическую или коробчатую. Носителями тока являются электроны, которые вводятся в междуэлектродное вакуумное пространство за счет *термоэлектронной эмиссии* из катода и движутся в электрическом поле в сторону анода. По сравнению с полупроводниковыми приборами электровакуумные имеют большие габариты, меньшую надежность, требуют затрат энергии для нагрева катода.

В настоящее время электровакуумные приборы находят ограниченное применение в мощных радиопередатчиках, кроме того, принцип работы вакуумных приборов используется в электролюминесцентных индикаторах и электронно-лучевых трубках. В качестве термокатодов используют однородные катоды из тугоплавких металлов (вольфрам, молибден), активированные катоды, либо полупроводниковые. Активирование состоит в покрытии вольфрама или молибдена слоем металла с меньшей работой выхода. Это позволяет получить большую плотность тока эмиссии j_e , при меньшей температуре. Плотность тока термоэлектронной эмиссии определяется законом Дэшмана-Ричардсона (с ростом температуры T , плотность тока J_e , резко возрастает):

$$J_e = AT^2 \exp(-W_0/kT) \quad (8.1)$$

где k - постоянная Больцмана, W_0 - работа выхода, A - величина, для разных материалов имеющая значения от 10 до 300 А/(см²·К²). В лампах чаще используют катоды косвенного накала (подогревные), в которых нить накала находится внутри цилиндрического катода. Подогревные катоды имеют большую тепловую инерционность, поэтому их накаливают переменным током. Катоды прямого накала нагревают постоянным током во избежание пульсаций тока эмиссии.

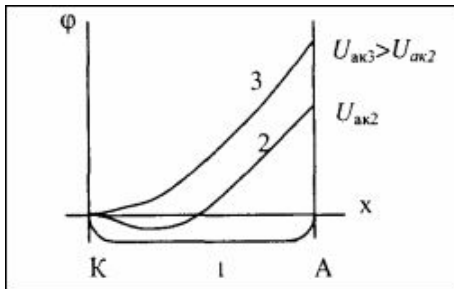
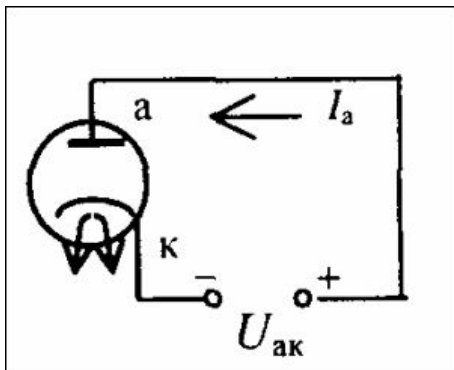
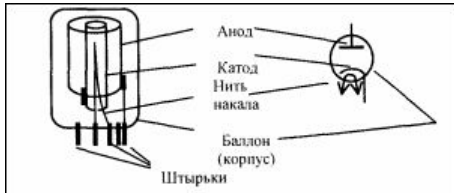
Кроме плотности тока эмиссии катоды характеризуются рабочей температурой, долговечностью и эффективностью.

Эффективность - это отношение тока эмиссии к мощности,

затраченной на нагрев нити накала, т.е. $\eta = I_e/P_n$. Параметры катодов показаны в таблице 8.1

Тип катода	$w_0, \text{эВ}$	$J_e, \text{А/см}^2$	$T, \text{°C}$	$\eta, \text{мА/Вт}$
однородный металлический	2 + 5	< 1	> 2000	< 15
активированный	< 2	< 10	= 1600	20 + 70
полупроводниковый	< 2	< 150	< 1000	80 + 20

6.8.2. Вакуумный диод

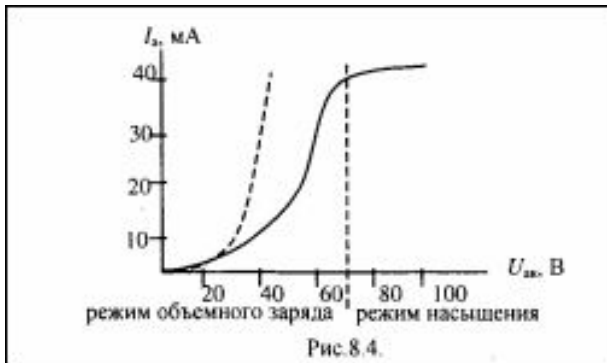


Вакуумный диод - двухполюсный прибор, основные элементы его конструкции схематично показаны на рис. 8.1. Там же показано условное обозначение диода.

Схема включения диода в статическом режиме без нагрузки показана на рис. 8.2. К выводам нити накала подключают напряжение накала L/n (в маломощных лампах - единицы вольт). Ток накала раскаляет нить накала и нагревает катод.

Начинается термоэлектронная эмиссия. Если анодное напряжение $U_{ак}=0$, то выходящие из катода электроны заполняют междуэлектродное пространство. При этом потенциал пространства понижается. Распределение потенциала в пространстве соответствует кривой 1 на рис. 8.3. Между анодом и катодом создается объемный (пространственный) заряд. Потенциал пространства везде отрицателен, анодного тока нет ($I_{a1}=0$).

При положительном анодном напряжении, равном $U_{ак2}$, распределение потенциала соответствует кривой 2. Объемный заряд сохраняется, но область отрицательного потенциала уменьшается в пространстве. Потенциальный барьер уменьшается по величине. Некоторые электроны, выходящие из катода, преодолевают барьер, проходят за точку минимального потенциала, попадают в область, где градиент потенциала положителен, т. е. $d(\Phi/dx) > 0$. Эти электроны ускоряются полем, летят к аноду и создают анодный ток $I_{a1} = 0 > 0$. Однако, часть электронов не может преодолеть потенциальный барьер, ибо вблизи катода поле замедляющее ($d(\Phi/dx) < 0$). Эти электроны возвращаются обратно к катоду. Такой режим работы называется режимом объемного заряда. При этом ток анода меньше тока эмиссии $I_{a1} < I_{э}$. В режиме объемного заряда увеличение анодного напряжения приводит к росту анодного тока. При большом анодном напряжении U_{a3} распределение потенциала соответствует кривой 3. В этом случае объемного заряда практически нет, во всех точках пространства $d(\Phi/dx) > 0$, т.е. поле везде ускоряющее. Все электроны, выходящие из катода, устремляются к аноду. Теперь анодный ток равен току эмиссии: $I_{a1} = I_{э}$. Такой режим называется режимом насыщения. В режиме насыщения дальнейший рост анодного напряжения не приводит к росту анодного тока.



При большом анодном напряжении U_{a3} распределение потенциала соответствует кривой 3. В этом случае объемного заряда практически нет, во всех точках пространства $(d(p/dx) > 0)$, т.е. поле везде ускоряющее. Все электроны, выходящие из катода, устремляются к аноду. Теперь анодный ток равен току эмиссии: $I_{a1} = I_{\alpha}$. Такой режим называется режимом насыщения. В режиме насыщения дальнейший рост анодного напряжения не приводит к росту анодного тока.

Анодной характеристикой диода называется зависимость $I_a = f(U_{aк})$ при $U_n = \text{const}$. Полагая, что скорость электрона у поверхности катода равна нулю, запишем систему уравнений:

$$\text{уравнение} \quad d^2U/dx^2 = -qn/\epsilon_0, \quad (8.1)$$

$$\text{уравнение непрерывности} \quad j = -qnv, \quad (8.2)$$

$$\text{уравнение движения} \quad v^2 = 2qU/m \quad (8.3)$$

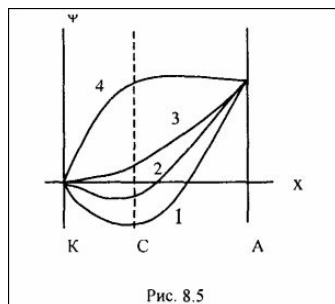
В этих уравнениях x - расстояние от катода, n - плотность электронов, j - плотность тока, v - скорость электронов, q и m - заряд и масса электрона.

Решение этой системы уравнений дает выражение для теоретической вольт-амперной (анодной) характеристики диода: $I_a = GU^3/2$ (8.4)

Здесь $G = 2,33 \cdot 10^{-6} S/r^2$, S - площадь анода, r - расстояние анод-катод. Параметр G - величина постоянная для данного диода, называется *первеансом лампы*. Выражение (8.4) называют *законом степени трех вторых*. Заметим, что закон (8.4) справедлив только для режима объемного заряда. Характеристики реальных диодов по ряду причин идут более полого. На рис. 8.4 показаны теоретическая (пунктир) и реальная характеристики диода.

Параметрами диода являются сопротивление постоянному току $R_0 = U_{aк}/I_a$ и сопротивление переменному току (внутреннее сопротивление) $R_i = dU_a/dI_a$. При отрицательных анодных напряжениях анодного тока практически нет, т.е. диод обладает односторонней проводимостью.

6.8.3. Триод



Триод - трехполюсный прибор. От диода он отличается тем, что имеет еще один электрод-управляющую сетку. Сетка расположена между анодом и катодом, ближе к катоду. Сетка выполняется обычно в виде проволочной спирали, реже в виде проволочной сетки. В любом случае это не сплошной электрод т.е. электронный поток может проникать сквозь сетку к аноду. Все, что говорилось в разделе 1, о трехполюсных приборах, их схемах включения и общих свойствах трехполюсных приборов - все это справедливо для вакуумного триода.

Управляющее действие сетки поясним, рассматривая распределение потенциалов в пространстве между анодом и катодом рис. 8.5). При больших отрицательных напряжениях сетки распределение потенциалов соответствует кривой 1 на рис. 8.5. В пространстве между сеткой и катодом $d(p/dx) < 0$, т.е. поле замедляющее. Электроны, выходящие из катода, не могут преодолеть потенциальный барьер. Они замедляются, останавливаются и возвращаются обратно к катоду. За сетку электроны не проходят и на анод не попадают. Лампа заперта, $I_a = 0$. Тока сетки тоже нет, $I_c = 0$. При небольших отрицательных напряжениях сетки потенциальный барьер снижается (кривая 2) и часть электронов проникает между витками сетки, попадая за сеткой в ускоряющее поле. Эти электроны попадают на анод и образуют ток во внешней цепи анода. Появляется анодный ток $I_{a2} > 0$. Сеточного тока нет, поэтому катодный ток равен анодному $I_k = I_a$.

Принцип работы триода сводится к тому, что меняя напряжение сетки $U_{ск}$, т.е., изменяя высоту потенциального барьера, мы управляем анодным током. При этом малые изменения сеточного напряжения (слабый входной сигнал) приводят к большим изменениям анодного тока. При подаче положительных напряжений на сетку с ростом U_c потенциальный барьер вблизи катода сначала понижается, а затем при определенном U_c (кривая 3) исчезает, поле везде ускоряющее, поэтому электроны не возвращаются к катоду. Большая часть их идет к аноду, но некоторые перехватываются положительно заряженной сеткой. Возникает сеточный ток. Катодный ток равен сумме $I_k = I_a + I_c$. Такой режим называют режимом прямого перехвата.

При больших положительных напряжениях сетки, равных или превышающих анодное напряжение (кривая 4), поле за сеткой становится замедляющим. Тогда анодный ток может уменьшиться, а сеточный возрасти за счет некоторых электронов, которые, пройдя за сетку, замедляются и возвращаются на сетку. Такой режим называется режимом возврата.



Действующее напряжение и характеристики триода. В диоде анодный ток и анодное напряжение связаны законом степени 3/2. В триоде анодный ток является функцией двух напряжений: анодного и сеточного. Полный дифференциал анодного тока равен сумме частных дифференциалов: $dI_a = (dI_a/dU_c)dU_c + (dI_a/dU_a)dU_a$ **(8.5)**

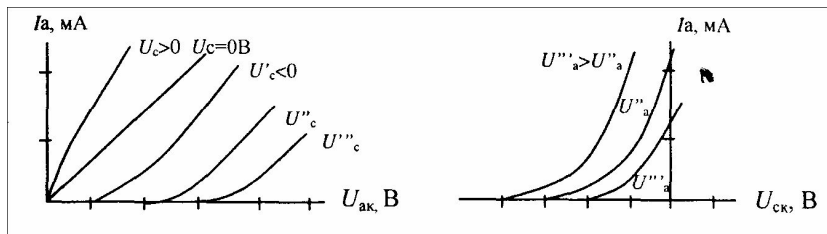
Пусть некоторое приращение сеточного напряжения dU_c увеличивает анодный ток, а приращение анодного напряжения $(-dU_a)$ уменьшает анодный ток так, что в результате $dI_a=0$. Поскольку анод находится от катода дальше, а поле анода экранировано от катода сеткой, то анодное напряжение будет влиять на анодный ток слабее. Приравнявая (8.5) нулю, получим: $(dI_a/dU_c)dU_c = - (dI_a/dU_a)dU_a$ **(8.6)**

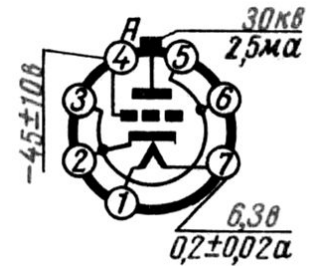
Отсюда $dU_c = - (dU_c/dU_a)dU_a$ **(8.7)** Но $(dU_a/dU_c)|_{I_a=const} = \mu = SRi$ **(8.8)** где μ, Ri, S - знакомые из раздела 1.6 параметры ламп и полевых транзисторов (статический коэффициент усиления, внутреннее сопротивление и крутизна). При отрицательных напряжениях сетки, когда анодный ток равен катодному, параметр μ равен $\mu=1/D$, где D - проницаемость сетки, равная отношению емкостей $D=C_{ак}/C_{ск}$. Из (8.7) и (8.8) следует, что анодное напряжение влияет на катодный ток (а при $U_c < 0$ и на анодный ток) в $1/D$ раз слабее сеточного напряжения. Полное действующее напряжение, учитывающее влияние и сеточного и анодного напряжений, равно: $U_d = U_{ск} + DU_a$, **(8.9)**

По аналогии с диодом можно написать закон степени 3/2 для триода $I_k = GtU_d^{3/2}$ **(8.10)**

где $Gt \approx 2,33 \cdot 10^{-6} SA/R_{ск}^2$, $R_{ск}$ - расстояние сетка-катод, SA - площадь анода. При $U_c < 0$ выражение (8.10) применимо к анодному току. Напряжение сетки, при котором триод запирается ($I_k=0$), называется напряжением запираения U_z . Из (8.9) видно, что $U_z = -DU_{ак}$. **(8.11)** Анодное напряжение, при котором появляется анодный ток, называется анодным напряжением сдвига $t/aс$. Из (8.9) видим, что $U_{ас} = -U_{ск}/D$. **(8.12)**

Заметим, что проницаемость $D < 1$ и для триодов составляет сотые доли. Для ламп обычно используют два вида характеристик: *анодные* $I_a = f(U_{ак})$ при $U_{ск} = const$ и *анодно-сеточные* $I_a = f(U_{ск})$ при $U_{ак} = const$. Семейства анодных и анодно-сеточных характеристик показаны на рис. 8.6.





Параметры триода. Крутизна S , внутреннее сопротивление R_i , и статический коэффициент усиления μ определены в разделе 1. Применительно к триоду в схеме с общим катодом выражения (1.29), (1.30) и (1.31) запишутся так:

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_{ck}}, \text{ при } U_{ак} = \text{const}, \quad (8.13)$$

$$R_i = \frac{\Delta U_{ак}}{\Delta I_a}, \text{ при } U_{ck} = \text{const}, \quad (8.14)$$

$$\mu = \frac{\Delta U_{ак}}{\Delta U_{ck}}, \text{ при } I_a = \text{const}. \quad (8.15)$$

подставляя в (8.13) значения анодного тока (8.10) и заменяя приращения дифференциалами, найдем крутизну как производную:

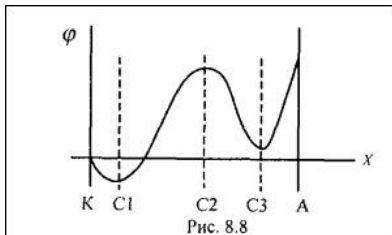
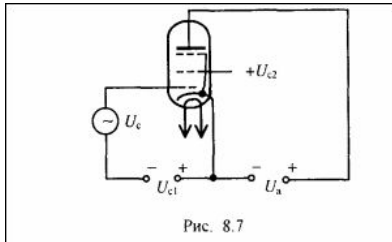
$$S = \frac{dI_a}{dU_{ck}} = \frac{d}{dU_{ck}} \left[G_T (U_{ck} + DU_{ак})^{3/2} \right] = \left(\frac{3}{2} \right) G_T (U_{ck} + DU_{ак})^{1/2} =$$

$$= (3/2) \times 2,33 \cdot 10^{-6} \frac{S_a}{r_{ck}^2} (U_{ck} + DU_{ак})^{1/2} \quad (8.16)$$

Отсюда видно, что для увеличения крутизны нужно уменьшить расстояние сетка-катод. Обычно крутизна триодов составляет единицы мА/В, у некоторых типов ламп до 20...50 мА/В. Внутреннее сопротивление R_i ; триодов имеет значения единицы-десятки килоом.



6.8.4 Тетроды и пентоды



Недостатком триода является большая проходная емкость C_{ac} между анодом и сеткой, которая создает нежелательную обратную связь и ограничивает частотный диапазон. Для уменьшения этой емкости между анодом и управляющей сеткой устанавливают еще одну сетку, которая называется второй или экранирующей сеткой. На экранирующую сетку подается положительный потенциал. В тетрадах резко снижается проходная емкость, но возникает вредный динаatronный эффект: выбиваемые из анода вторичные электроны притягиваются экранной сеткой. При этом в случае $U_{c2} > U_a$ резко растет ток экранной сетки и падает анодный ток, что может приводить к генерации в цепи анода. Динаatronный эффект устраняется в пентодах, которые имеют третью (защитную или антидинаatronную) сетку. Третья сетка соединяется с катодом, т.е. имеет нулевой потенциал (рис. 8.7). Распределение потенциала в пентоде показано на рис. 8.8, из которого видно, что вторичные электроны попадают в замедляющее поле между анодом и третьей сеткой, и поэтому они не достигают экранной сетки и возвращаются на анод. Так устраняется динаatronный эффект.

Приводя пентод последовательно к эквивалентному тетроду, триоду и диоду, можно показать, что действующее напряжение приблизительно равно:

$$U_d = U_{c1} + D1U_{c2}, \quad (8.17)$$

где $D1$ - проницаемость первой сетки.

Из (8.17) видно, что напряжение запираения по первой сетке $U_z = -D1U_{c2}$ зависит от напряжения второй сетки, и не зависит от анодного напряжения. Это результат того, что поле анода экранировано от катода защитной и экранной сетками. Характеристики пентода показаны на рис. 8.9.

Пентод - наиболее совершенная лампа. Его внутреннее сопротивление - сотни килоом - единицы мегом, статический коэффициент усиления 500 - 3000, крутизна 2 - 20 мА / В. В заключение заметим, что динаatronный эффект устраняется также в лучевых тетрадах. За счет специальной конструкции поток электронов собирается в плотные лучи. В результате потенциал пространства между второй сеткой и анодом понижается, и распределение потенциалов имеет вид, подобный рис. 8.9. Параметры лучевых тетродов близки к параметрам пентодов.

