# 1. Зонная модель полупроводника.

К полупроводникам (ПП) относятся вещества, занимающие по величине удельной электрической проводимости промежуточное положение между металлами и диэлектриками. Их удельная электрич. проводимость лежит в пределах от 10-8 до 105 см/м и в отличие от металлов она возрастает с ростом темпер-ры.

ПП представляют собой достаточно многочисленную группу веществ. К ним относятся химич. элементы: германий (*Ge*), кремний (*Si*), бор, углерод, фосфор, сера, мышьяк, селен, серое олово, теллур, йод, некоторые химич. соед-ния и многие органич. вещества.

В электронике находят применение ограниченное кол-во полупроводниковых материалов. Это, прежде всего *Si*, *Ge*, и арсенид галлия.

Применяемые в электронике ПП имеют весьма совершенную кристаллическую структуру. Их атомы размещены в пространстве в строго периодической последовательности на постоянных расстояниях друг от друга, образуя кристалл-ую решетку. Решетка наиболее распространенных в электронике полупроводников – *Ge* и *Si* – имеет структуру алмазного типа. В такой реш. каждый атом вещества окружен четырьмя такими же атомами, находящимися в вершинах правильного тетраэдра.

Каждый атом, находящийся в кристаллической решетке, электрически нейтрален. Силы, удерживающие атомы в узлах решетки, имеют квантово-механический характер; они возникают за счет обмена взаимодействующих атомов валентными электронами. Подобная связь атомов носит название ковалентной связи, для ее создания необходима пара электронов.

В *Ge* и *Si*, являющихся 4х-валентными элементами, на наружной оболочке имеется по четыре ковалентные связи с четырьмя ближайшими, окружающими его атомами.

 

рис. 1. рис. 2.

На рис. 1 показ. условн. изображ. кристалич. решетки *Si* на плоскости:

1 – атом кремния, 2 – ковалентная связь, образованная одним электроном.

На рис. 2 показ. образование свободного электрона под действием тепловой энергии:

1 – нарушенная ковалентн. связь, 2 – свободный электрон, 3 – незаполненная связь (дырка).

 рис. 3.

*EV* – энергетич. уровень (max энергия связанного электрона), *Ed* – энергия донора, *Ec* – зона проводимости (min энергия свободного электрона), *Eg* – ширина запрещенной зоны.

*EF* – уровень Ферми, вероятность заполнения кот. равна ½.

# 2. Электропроводность полупроводников.

К полупроводникам (ПП) относятся вещества, занимающие по величие удельной электрической проводимости (ЭП) промежуточное положение между проводниками (металлы) и диэлектриками. Значения удельной ЭП этих трех классов веществ приведены в табл.



Основным признаком, выделяющим ПП как особый класс веществ, явл. сильное влияние температуры и концентрации примесей на их ЭП. Так, например, даже при сравнительно небольш. повыш. темп-ры проводимость ПП резко возрастает (до 5 – 6% на 1ºС).

У большинства ПП сильное изменение ЭП возникает под действием света, ионизирующих излучений и др. энергетич. воздействий. Т.о ПП – это вещество, удельная проводимость кот. существенно зависит от внешн. факторов.

Электропроводность ПП определяется направленным движением электронов под действием внешнего электрического поля.

В ПП валентная зона и зона проводимости разделены не широкой запрещенной зоной. Под действием внешнего эл. поля возможен переход электронов из валентной зоны в зону проводимости. При этом в валентной зоне возникают свободные энергетические уровни, а в зоне проводимости появляются свободные электроны, называемые электронами проводимости. Этот процесс наз. генерацией пар носителей, а не занятое электроном энергетич. состояние в валентной зоне – дырка.

Электропроводность, обусловленную генерацией пар носителей заряда электрон-дырка, называют собственной электропроводностью. Возвращение возбужденных электронов из зоны проводимости в валентную зону, в рез. которого пара носителей заряда электрон-дырка исчезает, называют рекомбинацией.

*Дрейфовый ток.*Электроны и дырки в кристалле нах-ся в сост. хаотического теплового движ-ия. При возникновении эл. поля на хаотич. движение накладывается компонента направленного движ., обусловленного действием этого поля. В рез. электроны и дырки начин. перемещ-ся вдоль кристалла – возникает эл. ток, кот. называется *дрейфовым током*.

*Диффузионный ток* обусловлен перемещением носителей заряда из области высокой концентрации в область более низкой концентр.

Одним из главных принципов, лежащих в основе многих физических процессов, явл. принцип электрической нейтральности полупроводника, заключающийся в том, что в сост. равновесия суммарный заряд в ПП равен нулю. Он выражается уравнением электронейтральности:

.

# 3. p-n переход в условиях термодинамического равновесия.

Основная часть полупроводниковых приборов – это *p-n* переход. *p-n* переход – это граница раздела между двумя ПП с разным типом электропроводности – *p* и *n*.



Мы знаем, в *р*-области дырок много, а в *п*-области их мало, и соответственно в *п*-области электронов много, а в *р*-области их мало. В результате такой разности концентрации возникает процесс диффузии. В результате чего возникают диффузионные токи дырок и электронов. Эти токи явл. токами основных носителей зарядов. Дырки из *р*-области переходят в *п*-область и рекомбинируют с электронами. Также электроны переходят из *п*-области в *р*-область и рекомбинируют с дырками. В рез. в *р-п* переходе образуется слой без подвижных носителей заряда, имеющий большое *R*, и кот. называется запирающим слоем. В этом слое имеются только отриц. заряды ионов, кот. создают отрицательный заряд *–q*, и положительный заряд ионов *+q*. Эти заряды создают эл. поле *Eвн*, направленное от + к – с отриц. потенциалом в *р*-области и положит. потенциалом в *п*-области. Эта разность потенциалов наз. контактной разностью потенциалов.

Эти заряды *+q* и *–q* препятствуют дальнейшему прохождению основных носителей ч/з *р-п* переход. Дырки отталкиваются от *+q*, а электроны отталкиваются от *–q*. Т.е. процесс диффузии приостанавливается и *Iдиф* дальше не растет. Поэтому мы говорим, что в *р-п* переходе возникает потенциальный барьер для основных носителей. В то же время эти объемные заряды *+q* и *–q* своим эл. полем *Е* действуют ускоряюще на неосновные носители зарядов (электроны из *р*-области притягиваются к *+q,* а дырки из *п*-области к *–q*). В результате неосновные носители под действием эл. поля *Е* легко перейдут ч/з *р-п* переход и создадут дрейфовые токи. Дрейфовые токи – это токи неосновных носителей. В какой-то момент времени дрейфовый и дифф. ток ч/з *р-п* переход становятся равными и противоположными, тогда *Iобщ=Iдр+Iдиф=0*.



Энергетическая диаграмма *р-п* перехода в состоянии термодинамического равновесия.

# 4. Переход металл-полупроводник.

Уровни энергии валентных электронов образуют валентную зону (ВЗ), а следующий уровень энергии, находящийся выше ВЗ образ. зону проводимости (ЗП). ЗП и ВЗ разделены запрещенной зоной (ЗЗ), ширина кот. различна у разных материалов.



У проводников-металлов – ВЗ заполнена частично, электроны занимают нижнюю часть зоны, а верхние уровни ВЗ не заполнены. Под действием слабого внешн. электр. поля валентные электроны приобрет. доп. энергию – кинетическую, заполняя в ВЗ занятые более высокие уровни энергии. Это означает, что электроны под действ. электр. поля приобрет. скорость и участвуют в перенесении электр. заряда, т.е. протекает электрический ток. Возможна и другая зонная структура проводника, при кот. ВЗ целиком заполнена валентными электронами, но ВЗ и ЗП перекрываются, т.е. ЗЗ отсутствует. В этом случае электроны под действием электр. поля могут приобретать дополнительную кинетич. энергию, занимая свободные уровни энергии в ЗП. Валентные электроны в металле принадлежат одновременно всем атомам кристалла и явл. свободными носителями заряда.

Если ВЗ заполнена целиком и ширина ЗЗ не равна 0, то валент. электроны не могут приобретать дополнит. кинетич. энергию и не явл. свободными. Если же вал. электрону собщить энергию, способную преодолеть ЗЗ, то он переходит из ВЗ на один из незанятых уровней ЗП и станов. свобод. носителем заряда. Одновременно в ВЗ появляется один свобод. уровень, соответствующий дырке, что позволяет электронам ВЗ перемещаться. Переход электрона из ВЗ в ЗП может произойти под действием тепловой энергии или какого либо другого источника энергии.

Если ширина ЗЗ относительно велика то тепловой энергии электронов недостаточно, чтобы перейти им из ВЗ в ЗП. Свободных носителей заряда в таких материалах нет и их относят к диэлектрикам.

# 5. p-n переход при прямом смещении.

Электронно-дырочным *p-n* наз. такой переход, кот. образован двумя областями ПП с разными типами проводимости: электронный и дырочный. Включение при кот. к *p-n* переходу прикладывается внешн. напряж. *Uпр* в противофазе с контактной разностью потенц. наз. прямым (см. рис. 1.). Как видно из потенциальной диаграммы (рис. 2) высота потенциального барьера уменьшается:

Uб=Uк-Uпр

Ширина *p-n* перехода также уменьшается *h’<h*. Дрейфовый ток уменьшается, диффузионный ток резко возрастает. Динамическое равновесие нарушается и ч/з *p-n* переход протекает прямой ток:

Iпр=Iдиф - Iдр ≈ Iдиф=Iобр ехр·(qeUпр / кТ).

Из формулы видно, при увелич. *Uпр* ток может возрасти до больших значений, т.к. он обусловлен движением основных носителей, концентрация которых в обеих областях ПП велика.



рис. 1.

ВАХ *p-n* перехода наз. зависимость тока, протекающего ч/з *p-n* переход, от величины и полярности приложенного *U*. Аналитич. выраж. ВАХ *p-n* перехода имеет вид:

*I=Iобр*[*ехр·*(*qeU / кТ*)*-1*], где *Iобр* – обратный ток насыщения *p-n* перехода, *U* – напряж., приложенное к *p-n* переходу

Хар-ка, построенная с использованием этого выражения, имеет 2 характерных участка (рис. 2).



рис. 2.

1. участок соответствующий прямому управляющему напряжению; 2. участок соответствующий *Uобр*.

При больших *Uобр* наблюдается пробой *p-n* перехода, при кот. *Iобр* резко увеличивается. Различают два вида пробоя: электрический и тепловой.

# 6. p-n переход при обратном смещении. Пробой p-n перехода.

Электронно-дырочным *p-n* наз. такой переход, кот. образован двумя областями ПП с разными типами проводимости: электронный и дырочный.

Включение, при кот. к *p-n* переходу прикладывается внешнее напряж. *Uобр* в фазе с контактной разностью потенциалов, наз. обратным (рис. 1.).



рис. 1.

Под действием эл. поля, создаваемого внешним источником *Uобр*, основные носители оттягиваются от приконтактных слоев вглубь полупроводника. Как видно из рис. 2 это приводит к расширению *p-n* перехода (*h’>h*). Потенциальный барьер возрастает и становится равным *Uб=Uк+Uобр*. Число основных носителей, способных преодолеть действие результирующего поля, уменьшается. Это приводит к уменьшению диффузионного тока, кот. может быть определен по формуле:

Iдиф=Iобр ехр·(-qeUобр / кТ).

При обр. включении преобладающую роль играет дрейфовый ток. Он имеет небольшую величину, т.к. создается движение неосновных носителей. Этот ток наз. обратным и определяется по формуле: *Iобр=Iдр – Iдиф*.

*Пробоем* наз. резкое увелич. *I* ч/з переход в области обратных напряж. превышающих *U*, называемое *Uпроб*. Существуют 3 основных вида пробоя: *туннельный*, *лавинный* *и тепловой*.



рис. 2.

# 7. Полупроводниковый диод.

Полупроводниковый диод (ПД) представляет собой 2х-электродный прибор, действие кот. основано на использовании эл-ских свойств *p-n* перехода или контакта металл-полупроводник. К этим св-вам относятся: односторонняя проводимость, нелинейность ВАХ, наличие участка ВАХ, обладающего отрицательным сопротивлением, резкое возрастание обратного тока при эл-ком пробое, существование емкости *p-n* перехода. В завис. от того, какое из свойств *p-n* перехода используется, ПД могут быть применены для целей выпрямления, детектирования, преобразования, усиления и генерирования эл. колебаний, а также для стабилизации напряжения в цепях постоянного тока и в качестве переменных реактивных элементов.

В большинстве случаев ПД отличается от симметричного *p-n* перехода тем, что *p-* область диода имеет значительно большее количество примесей, чем *n-*область (несимметричный *p-n* переход), т.е. в этом случае *n-* область носит название базы диода. При подаче на такой переход обратного напряжения ток насыщения будет состоять почти только из потока дырок из базы в *p-* область и будет иметь меньшую величину, чем для симметричного перехода. При подаче прямого напряжения прямой ток тоже почти полностью будет состоять из потока дырок из *p-*области в базу, и уже при небольших прямых напряжениях будет возрастать экспоненциально. Уравнение ВАХ *p-n* перехода имеет вид:

.

Применение ПД для тех или иных целей определяет требования, предъявляемые к его хар-кам, к величинам преобразуемых мощностей, токов и напряжений. Эти требования могут быть удовлетворены с помощью соответствующего выбора материала, из кот. изготовляется диод, технологией изготовления *p-n* перехода и конструкцией диода.

В соответствии с этим ПД разделяются на ряд основных типовых групп. Существующая классификация подразделяет ПД следующим образом:

а) по назначению (выпрямительные, детекторные, преобразовательные, стабилитроны, варикапы и др.);

б) по частотным свойствам (низкочастотные, высокочастотные, СВЧ);

в) по типу перехода (плоскостные, точечные);

г) по исходному материалу (германиевые, кремниевые, арсенид-галлиевые и т.д.);

Кроме того, существует разделение ПД внутри одной группы в соответствии с электрическими параметрами.

Кроме специфических параметров, характеризующих данную типовую группу, существуют параметры общие для всех ПД независимо от их специального назначения. К ним относятся: рабочий интервал температур, допустимое обратное напряжение, допустимый выпрямленный ток, допустимая мощность рассеивания.

# 8. Выпрямительные диоды.

Выпр. диод (ВД) применяются для преобразования переменного *I* НЧ (до *50 кГц*) в *I* одного направления (выпрямление переменного *I*). Обычно рабочие частоты ВД малой и средней мощности (*P*) не превышают *20 кГц*, а диодов большой мощности – *50 Гц*.

Возможность применения *p-n* перехода для целей выпрямления обусловлено его свойством проводить *I* в одном направлении (*I* насыщения очень мал).

В связи с применением ВД к их характеристикам и параметрам предъявляются следующие требования:

а) малый обратный ток *I0*;

б) большое обратное напряжение;

в) большой прямой ток;

г) малое падение напряжения при протекании прямого тока.

Для того чтобы обеспечить эти требования, ВД выполняются из полупроводниковых материалов с большой шириной запрещенной зоны (*ЗЗ*), что уменьшает обр. *I*, и большим удельным *R*, что увеличивает допустимое обр. *U*. Для получения в прямом направлении больших *I* и малых падений *U* следует увеличивать площадь *p-n* перехода и уменьшать толщину базы.

ВД изгот-ся из германия (*Ge*) и кремния (*Si*) с большим удельным *R*, причем *Si* является наиболее перспективным материалом.

*Si* диоды, в результате того, что *Si* имеет большую ширину *ЗЗ*, имеют во много раз меньшие обратные *I*, но большее прямое падение *U*, т.е. при равной *P* отдаваемой в нагрузку, потеря энергии у *Si* диодов будет больше. *Si* диоды имеют большие обратные *U* и большие плотности *U* в прямом направлении.

Зависимость ВАХ кремниевого диода от температуры (t) показана на рисунке.



Из рис. следует, что ход прямой ветви ВАХ при изменении (t) изменяется незначительно. Это объясняется тем, что концентрация основных носителей заряда при изменении температуры (t) практически почти не изменяется, т.к. примесные атомы ионизированы уже при комнатной t.

Количество неосновных носителей заряда определяется t и поэтому ход обратной ветви ВАХ сильно зависит от t, причем эта зависимость резко выражена для *Ge* диодов. Величина *U* пробоя тоже зависит от t. Эта зависимость определяется видом пробоя *p-n* перехода. При электрическом пробое за счет ударной ионизации возрастает при повышении t. Это объясняется тем, что при повышении t увелич-ся тепловые колебания решетки, уменьш-ся длина свободного пробега носителей заряда и для того, чтобы носитель заряда приобрел энергию достаточную для ионизации валентных связей, надо повысить напряженность поля, т.е. увеличить приложенное к *p-n* переходу обратное *U*. При тепловом пробое *Uпроб* при повышении t уменьшается.

В некотором интервале t для *Ge* диодов пробой чаще всего бывает тепловым (ширина ЗЗ *Ge* невелика), а для *Si* диодов – электрическим. Это определяет значения при заданной t. При комнатной t значения для *Ge* диодов обычно не превышают *400В*, а для *Si* – 1500В.

# 9. Стабилитрон.

 

рис.1. рис. 2.

Обратная ветвь ВАХ, показанной на рис. 1, т.е. явление пробоя *p-n* перехода, можно использовать для целей стабилизации *U*, пользуясь тем обстоятельством, что до тех пор пока пробой носит электрический характер характеристика пробоя полностью обратима. Полупроводник. диоды, служащие для стабилизации *U*, называются стабилитронами (С).

Как видно из ВАХ, в области пробоя незначительные изменения обратного *U* приводят к резким изменениям величины обратного *I*.

Предположим, что диод, имеющий такую характеристику, включен в простейшую схему, показанную на рис. 2, причем рабочая точка находится в той области ВАХ, где при изменении тока *U* практически остается постоянным.

В этом случае, если изменяется входное напряжение *U*, то изменяется *I* в цепи, но т.к. *U* на диоде при изменении *I* остается постоянным (изменяется *R* диода), то и *U* в точках а, б – постоянно. Если параллельно к диоду к точкам а, б подключить *R* нагрузки, то *U* на нагрузке тоже не изменится.

С изготовляются из кремния (*Si*). Это связано с тем, что в C может быть использована только электрическая форма пробоя, которая явл. обратимой. Если пробой перейдет в необратимую тепловую форму, то прибор выйдет из строя. Поэтому величина *Iобр* в C ограничена допустимой мощностью рассеивания *Pрас = Uобр·Iобр*.

Т.к. ширина запрещенной зоны *Si* больше, чем у германия, то для него электрическая форма пробоя перейдет в тепловую при больших значениях обратного *I* – отсюда целесообразность выполнения C из *Si*. Степень легирования *Si*, т.е. величина его удельного сопротивления *ρ*, зависит от величины стабилизируемого *U*, на которое изготовляется диод. С для стабилизации низких *U* изгот-ся из *Si* с малым удельным *R*; чем выше стабилизируемое *R*, тем из более высокоомного материала выполняется диод. Изменение стабилизируемого *U* от нескольких вольт до десятков вольт может быть достигнуто изменением удельного *R* *Si*.

Основным параметром C явл. *U* стабилизации *Uстаб* и температурный коэффициент *U* ТКН, характеризующий изменение *U* на C при изменении температуры (t) на 1˚С, при постоянном токе.

ТКН может принимать, как положит., так и отриц. значения в зависимости от влияния t на *U* пробоя *Uпроб*. Для низковольтных С, кот. выполняются из низкоомных полупроводников, пробой имеет туннельный характер, а т.к. вероятность туннельного перехода электронов возрастает с увеличением t, т.е. *Uпроб* падает, то низковольтные C имеют отриц. ТКН.

Для высокоомных стабилитронов ТКН положителен.



где *U* – напряж. на диоде, *T* – температура.

# 10. Варикап.

Действие варикапов (В) основано на использовании емкостных свойств *р-п* перехода.

Обычно используется зависимость величины барьерной емкости *Сзар* от *U* в области обратных напряжений. В общем виде зависимость величины зарядной емкости от *U* имеет вид;

Сзар≈А(φк-U)-υ,

где *А* – постоянная,

*φк* – высота потенциального барьера,

*U* – внешнее напряжение,

*υ* = 1/2 – для резких переходов,

*υ* = 1/3 – для плавных переходов.

 рис. 1.

Эта зависимость изображена на рис. 1, где сплошной линией показана характеристика плавного перехода, а пунктирной – резкого перехода.

(В) могут быть использованы для различных целей как конденсаторы с переменной емкостью. Иногда их используют в параметрических усилителях. В принципе работы параметрического усилителя лежит частичная компенсация потерь в колебательном контуре, состоящем из катушки индуктивности *L* и конденсатора *C*, при периодическом изменении емкости конденсатора или индуктивности катушки (при условии, что изменение будет происходить в определенных количественных и фазовых соотношениях с частотой колебаний контура). В этом случае увеличение мощности электрических колебаний (сигнала) происходит за счет энергии того источника, который будет периодически изменять величину реактивного параметра. В качестве такого переменного реактивного параметра и используется В, емкость которого меняется в результате воздействия гармонического *U* подаваемого от специального генератора накачки. Если с помощью *U* и генератора накачки полностью скомпенсировать все потери контура, т.е. довести его до состояния самовозбуждения, то такая система носит название параметрического генератора.

Очевидно, что в качестве управляемой емкости может работать любой полупроводниковый диод, при условии, что величина его зарядной емкости достаточно велика. К специальным параметрическим диодам, работающим в параметрических усилителях на высоких и сверхвысоких частотах, предъявляются повышенные требования: они должны обладать сильной зависимостью емкости от *U* и малым значением сопротивлением базы для повышения максимальной рабочей частоты.

# 11. Высокочастотные диоды.

В высокочастотных полупроводниковых диодах так же, как и в выпрямительных диодах, используется несимметричная проводимость *p-n* перехода.

Они работают на более высоких частотах, чем выпрямительные диоды (до сотен *МГц*), и подразделяются на универсальные и импульсные. Универсальные ВЧ диоды применяются для получения высокочастотных колебаний тока одного направления, для получения из модулированных по амплитуде высокочастотных колебаний – колебаний с частотой модуляции (детектирование), для преобразования частоты. Импульсные диоды применяются как переключающий элемент в импульсных схемах.

При работе полупроводникового диода на высокой частоте большую роль играет емкость перехода, обусловливающая инерционность диода. Если диод включен в выпрямительную схему, то влияние емкости приводит к ухудшению процесса выпрямления

Кроме того, эффективность выпрямления снижается за счет того, что часть подведенного к *p-n* переходу внешнего напряжения падает на сопротивлении базы диода. Отсюда следует, что *p-n* переходы полупроводниковых диодов, работающих на высокой частоте должны обладать малой емкостью и малым сопротивлением базы.

Для уменьшения емкости уменьшают площадь перехода, а для уменьшения сопротивления базы уменьшают толщину базы.

Требования уменьшения инерционных свойств в.ч. диода и, в связи с этим уменьшения площади перехода, времени жизни неравновесных неосновных носителей заряда и толщины базы становится особенно важным в том случае, если диод работает в импульсной схеме в качестве переключателя. Переключатель имеет два состояния: открытое и закрытое. В идеальном случае переключатель должен иметь нулевое сопротивление в открытом состоянии, бесконечно большое – в закрытом, и мгновенно переходить из одного состояния в другое. В реальном случае при переключении ВЧ диода из закрытого состояния в открытое и обратно стационарное состояние устанавливается в течение некоторого времени, которое называется временем переключения и характеризует инерционные свойства диода. Наличие инерционных свойств при быстром переключении приводит к искажению формы переключаемых импульсов.

При изготовлении импульсных диодов в исходный полупроводник вводятся элементы, являющиеся эффективными центрами рекомбинации (*Au*, *Cu*, *Ni*), что снижает время жизни неравновесных носителей заряда. Толщина *n-*области (базы) уменьшается до значений меньших, чем значение диффузионной длины пробега дырок *Zр*. Это одновременно уменьшает и время жизни неравновесных носителей, и сопротивление базы. Конструктивно в.ч. диоды выполняются в виде точечной конструкции или плоскостной с очень малой площадью перехода.

# 12. Биполярный транзистор.

Бип. тр-ром (БТ) наз-ся электропреобразовательный полупроводниковый (ПП) прибор, имеющий два взаимодействующих перехода. Тр-р представляет собой кристалл ПП, содержащий 3 области с поочередно меняющимися типами проводимости. В зависимости от порядка чередования областей различ. БТ типов *p-n-p* и *n-p-n*. Принцип действия БТ различных тип. одинаков. Тр-ры получили назв. бипол., т.к. их работа обеспеч-ся носителями зарядов двух типов основными и неосновн.

Схематическое устр-во и условн. графич. обознач. *p-n-p* и *n-p-n* тр-ров показ. на рис. 1.



рис. 1.

Одну из крайних областей тр-ной структуры создают с повыш. концентрацией примесей, используют в режиме инжекции и наз. *эмиттером*. Среднюю область наз. *базой*, а крайнюю обл. – *коллектором*. Два перехода БТ наз. *эмиттерным* и *коллекторным*.

В завис. от того, какой электрод имеет общую точку соедин-я со вх. и вых. цепями, различ. 3 способа включ. тр-ра: с ОБ, ОЭ и ОК. Электрич. парам-ры и хар-ки БТ существенно различ-ся при разных схемах вкл.

По режимам работы *p-n* перехода различают 4 режима работы тр-ра:

1. *Активный режим* – эмиттерный переход открыт, коллекторный закрыт. Этот режим работы явл. обычным усилительным, при котором искажения сигнала min.

2. *Режим насыщения* – оба перехода откр. Падение *U* на откр. эмит. и колл. переходах напр. встречно, однако *I* в цепи Э-К проходит в одном напр., напр. от К к Э в тр-ре *n-p-n* типа (рис. 2.а). Тр-р работает в реж. насыщ. при относит. больших токах базы. Инжекции электронов в Б при этом становится столь сильной, что цепь К становится неспособной извлекать избыточные электроны из Б также эффективно, как в активном режиме. Концентрация электронов в Б у колл. перехода становится сравнимой с концентр. их у эмитт. перехода (рис. 2.b), что соотв-ет прямой полярности *U* на колл. переходе.



рис. 2.

3. *Режим отсечки* оба перехода закрыты. Он характ-ся очень малыми *I* ч/з запертые переходы тр-ра.

4. В *инверсном реж.* эмитт. переход закр., а колл. откр., т.е. Т вкл. «наоборот»: К работает в качестве Э, Э в качестве К.

*Параметры БТ.*

В справочниках приводятся основные и предельные параметры тр-ра.

К основным пар. относятся:

1. Емкость колл. перехода *Ск*;

2. Коэфф. усиления (передачи) по току h21Э;

3. Обратный *I* колл. перехода при включенном эмитт. *Iкб*0;

4. Предельная частота *fa*;

5. Сопротивление базы *Rб*.

# 13. Статические ВАХ биполярного тр-ра включенного по схеме с ОБ.

Статические хар-ки представляют собой графики экспериментально полученных зависимостей между *I*, протекающими в транзисторе, и *U* на его *p-n*-переходе при *Rн = 0*.

Вх. и вых. *I* и *U* различны для различных схем включения транзистора. Каждая из схем включения может быть охарактеризована четырьмя семействами статич. хар-тик. Практически обычно пользуются вх. и вых. характеристиками для схем с ОБ и ОЭ.

Рассм. ход статических выходных характеристик транзистора, включенного по схеме с ОБ, ход которых показан на рис. 1





рис. 1.

Вид хар-ки, снятой при *Iэ=0*, соответствует обратной ветви ВАХ одиночного *p-n*-перехода. В этом случае *Iк=Iк*0, где *Iк*0– нулевой коллекторный ток.

Если *Iэ > 0*, то значения *I* коллектора увеличиваются за счет носителей заряда, инжектированных из эмиттера в базу. В этом случае коллекторный *I* протекает и при *Uкб = 0*. Для того, чтобы уменьшить значение колл-го *I* до 0, необходимо подать на колл-ный переход прямое *U*, при этом потенциальный барьер перехода снизится, и навстречу потоку неосновных носителей заряда потечет поток основных носителей заряда; при равенстве этих потоков колл-ный ток *Iк* равен нулю.

При увеличении обратного *U* на коллекторе снятые хар-ки, имеют небольшой подъем, т.е. *Iк*, возрастает при увеличении *U* на коллекторе. Это объясняется тем, что с увеличением обратного коллекторного *U* растет ширина коллекторного перехода (в основном в сторону базы), уменьшается рекомбинация неосновных носителей в толще базы, уменьшается рекомбинационная составляющая *I* базы, и *I* коллектора *Iк=Iэ - Iб* при *Iэ=const* несколько растет. Хар-ки, снятые ч/з равные интервалы изменения *I* эмиттера, располагаются неравномерно: чем больше значения *I* эмиттерного перехода, тем ближе друг к другу располагаются хар-ки. Это объясняется тем, что возрастание эмиттерного *I* приводит к увеличению рекомбинации, а значит к уменьшению *Iк*.

При больших значениях *Iк* коллекторное напряжение возрастает за счет лавинного умножения носителей заряда в коллекторном переходе.

Большую роль в работе транзистора играет обратный неуправляемый *I* коллекторного перехода *Iк*0, кот. явл. частью *Iк* при любом значении *Iэ*. Т.к. *Iк*0 представляет собой ток неосновных носителей заряда, число которых непосредственно зависит от температуры, то его существование предопределяет температурную нестабильность работы транзистора.

# 14. Статические ВАХ бип. тр-ра вкл. по схеме с ОБ.

Рассм. ход статических вх. хар-ик транзистора, вкл. по схеме с ОЭ *Iб=F*(*Uбэ*)|*Uкэ=const*.

В этом случае они имеют вид, показанный на рис. 1.

 рис. 1

Рассм. ход хар-ки, снятой при *Uкэ=0*. Если на коллекторную *p*-область подан нулевой, а на базовую *n*-область – отрицательный потенциал (т.е. |*Uкэ*| < |*Uбэ*|), то коллекторный переход находится под прямым *U*, и через него протекает диффузионная составляющая *I* (ток основных носителей заряда), которая замыкается через базу.

Через эмиттерный переход, на кот. от батареи подается прямое *U*, также протекает диффузионная составляющая *I*, причем, т.к. подача *Uкэ=0* для схемы с ОЭ означает короткое замыкание между колл. и эмитт., *I* эмиттера тоже замыкается через базу. При изменении *Uбэ* каждый из этих токов изменяется в соответствии с ходом прямой ветви ВАХ *p-n*-перехода. В базовом выводе эмиттерный и коллекторные токи протекают в одном направлении, т.е. *Iб = Iэ + Iк* и вх. хар-ка, снятая при *Uкэ = 0*, представляет собой прямую ветвь ВАХ двух параллельно включенных *p-n*-переходов.

Если вх. хар-ка снимается при каком-то значении обратного коллекторного *U* |*Uкэ*| > |*Uбэ*|, то на коллекторный переход подается обратное *U*. В этом случае *I* коллектора меняет свое направление, *I* эмиттера замыкается через цепь коллектора, и *I* базы является суммой двух противоположно направленных составляющих, рекомбинационной и тока *I’к*0.

При *Uбэ=0* рекомбинационная составляющая тока базы *Iэ*(*I-α()*)=0 и в цепи базы протекает только ток *I’к*0. После того, как на эмиттерный переход подано прямое напряжение *Uбэ>0*, появляются эмиттерный ток и рекомбинационная составляющая тока базы по величине меньшая, чем ток *I’к*0. В цепи базы протекает разностный ток. При увеличении *Uбэ* рекомбинационная составляющая растет, разностный ток *I’к*0 *-* *Iэ*(*I-α()*) уменьшается, и при *Iэ*(*I-α()*)*=I’к*0 ток базы равен нулю. При дальнейшем увеличении *Uбэ* ток базы меняет свое направление, и в цепи базы протекает разностный ток уменьшается и при *Iэ*(*I-α()*)*-I’к*0.

При увеличении обратного *U* коллекторного перехода вх. хар-ки сдвигаются от начала координат вправо и вниз.

Сдвиг хар-стик вниз объясняется тем, что значения *I’к*0 растут при увеличении обратного напряжения коллекторного перехода т.к. расширение перехода в сторону базы уменьшает рекомбинацию, в результате чего, увеличивается коэффициент передачи эмиттерного тока *α()*, и значения *I’к*0 растут.

Сдвиг хар-стик вправо объясняется тем, что уменьшение рекомбинационной составляющей тока базы и равенство *Iэ*(*I-α()*)*=I’к*0 достигается при больших значениях *Uбэ*.

# 15. Динамический режим работы биполярного транзистора.

При работе транзистора с нагрузкой имеет место взаимное влияние друг на друга токов *Iэ, Iк, Iб*. Этот режим носит название *динамического*, а его характеристики – *динамических*.

Рассмотрим динамический режим транзистора, работающего по схеме с ОЭ(рис.1).

 рис. 1.

При работе транзистора совместно с нагрузкой *Rн*, включенной в цепь коллектора, напряжение источника питания *Ек* распределяется между нагрузкой и переходом коллектор-эмиттер *(Uкэ)*: *Ек=Uкэ+Iк·Rн*, поэтому ток коллектора изменяется по линейному закону в соответствии с выражением *Iк=(Ек-Uкэ)/Rн*. Графическая зависимость *Iк=f (Uкэ)* представляет собой прямую линию, которая называется нагрузочной прямой. Для исследования свойств транзистора нагрузочную кривую наносят на семейство выходных характеристик (рис.2). Точка пересечения нагрузочной прямой с осью токов совпадает с точкой, для которой удовлетворяется условие *Iк·Rн=Ек*.



рис. 2.

# 17. Т-образная схема биполярного тр-ра.

Параметры Z, У и Н наз-ся внешними параметрами, так как кроме свойств самого транзистора они зависят еще и от схемы включения (ОБ, ОЭ и ОК). Поэтому иногда более удобно при расчетах использовать схемы замещения.

Тр-р в этом случае представляется эквивалентной схемой, состоящей из определенного кол-ва электрических элементов (сопротивления, индуктивности, емкости и т.д.). Однако одними пассивными элементами нельзя описать усилительные свойства тр-ра. Поэтому в эквивалентную схему вводится еще генератор ЭДС или тока.

Т-образную эквивалентную схему замещения легко получить из уравнений четырехполюсника для Z-параметров на низких частотах. Заменив в уравнениях:

*Uвх=r11Iвх+r12Iвых*;    *Uвых=r21Iвх+r22Iвых*.

*Uвх* и *Iвх* через *U1* и *I1*, а *Uвых* и *Iвых* соответственно через *U2* и *I2*, будем иметь:

*U1=r11I1+r12I2*;    *U2=r21I1+r22I2*.

Прибавив и отняв во втором уравнении *r21I1*, что не изменит равенства и, выполнив несложные преобразования, получим:

U1=r11I1+r12I2;   U2=r21I1+r22I2+(r21-r12)·I1.

Первое уравнение и два первых члена второго уравнения являются уравнениями пассивного четырехполюсника. Т-образная схема замещения для него имеет вид, показанный на рис. 1.а.



рис. 1. Т-образная схема транзистора.

Усилительные свойства тр-ра определяются последним членом второго равенства *EГ=*(*r21-r12*)·*I1*. Величина этого ЭДС пропорциональна вх. току и не зависит от свойств внешн. цепи.

Эквив-ная схема с учетом последнего члена второго равенства представлена на рис. 1.b.

Иногда вместо генератора ЭДС в эквивалентную схему включают генератор тока. Несомненно, что создаваемый генератором ток также должен быть пропорционален току *I1*: *IГ=a·I1*, где *a* – коэфф. пропорциональности.

Эквивалентная схема с генератором тока показана на рис. 1.c.

Так как действия генератора тока и генератора напряжения равноценны, можно определить коэфф. *a* из схем рис. 1.b и 1.c при холостом ходе на выходе. Условие эквивалентности этих генераторов заключается в том, что падение напряж., создаваемого генератором тока на сопротивлении (*r21-r12*) (рис. 1.c), должно быть равно ЭДС генератора схемы на рис. 1.b:

(r21-r12)·I1=a·(r22-r12)·I1,

отсюда *a=*(*r21-r12*)/(*r22-r12*).

# 20. Основные параметры биполярных транзисторов.

Приводимые в справочниках параметры транзисторов делятся на электрические и предельные эксплуатационные.

К электрическим параметрам относятся:

граничная частота *fГр* при заданных напряжении *Uкэ* и токе эмиттера;

статический коэффициент передачи тока в схеме ОЭ *h21Э* при заданных напряжении *Uкэ* и *Iэ*;

обратные токи переходов *Iкб*0, *Iэб*0 при заданных обратных напряжениях соответственно *Uкб* и *Uэб*;

обратный ток коллекторного перехода *IкэR* при заданных напряжении *Uкэ* и сопротивлении *Rбэ* резистора, включенного между базой и эмиттером;

емкости переходов *Сэ*, *Ск* при заданных обратных напряжениях (емкость *Сэ* часто приводится также при *Uбэ=0*).

Корме перечисленных выше общих электрических параметров в зависимости от назначения транзистора указывают ряд специфических параметров.

Для усилительных и генераторных транзисторов помимо граничной частоты обычно приводятся постоянная времени цепи обратной связи *τк* при заданных напряжении *Uкб*, токе *Iэ* и частоте *f*, а также максимальная частота генерации *fmax* при заданных напряжении *Uкб*, токе *Iэ*.

Зная значение *τк*, можно оценить коэффициент обратной связи |*h21Э*( *f* )|=*2 π f τк*.

Для переключающих и импульсных транзисторов указывают напряжения в режиме насыщения *Uбэ нас*, и *Uкэ нас*, и время рассасывания *tрас*, при заданных токах *Iк нас*, и *IБ*.

* Под током *IБ* надо понимать включающий ток базы *IБ1*. Запирающий ток *IБ2*, если он не указан особо, равен току *IБ1*.

Для СВЧ-транзисторов часто указывают коэффициент усиления мощности *КР* на заданной частоте, а также индуктивности и емкости выводов.

*Предельные эксплуатационные параметры* – это максимально допустимые значения напряжений, токов, мощности и температуры, при которых гарантируются работоспособность транзистора и значения его электрических параметров в пределах норм технических условий. К предельным эксплуатационным параметрам относятся:

максимально допустимые обратные напряжения на переходах *Uкб*max, *Uэб*max, максимально допустимое напряжение *Uкэ*max в схеме ОЭ при заданном сопротивлении *Rбэ* внешнего резистора, подключенного между базой и эмиттером;

максимально допустимая рассеиваемая мощность *P*max;

максимально допустимый ток коллектора *Iк*max;

максимально допустимая температура корпуса *TКmax*.

Помимо этого указывается диапазон рабочих температур.

# 21. Тиристоры.

Тиристорами (Т) назыв. большое семейство полупроводн. приборов, кот. обладают бистабильными характ-ками и способны переключаться из одного сост. в другое. В одном сост. Т имеет высокое *R* и малый *I* (закр., или выключ. состояние), в другом – низкое *R* и большой *I* (откр., или вкл. сост.). Принцип действия Т тесно связан с принципом действия бип. транз-ра, в кот. и электроны, и дырки участвуют в механизме проводимости. Название «тиристор» произошло от слова «тиратрон», поскольку электрические хар-ки обоих приборов во многом аналогичны.

Благодаря наличию двух устойчивых состояний и низкой мощности рассеяния в этих состояниях Т обладают уникальными полезными св-вами, позволяющими использовать их для решения широкого диапазона задач (от регулирования мощности в домашних бытовых электроприборах до переключения и преобразования энергии в высоковольтных линиях электропередачи). В настоящее время созданы Т, работающие при *I* от нескольких *mA* до *5000А* и выше и при напряжениях, превышающих *10000В*.

*Параметры тиристора:*

Напряж. включения *Uвкл* – это прямое анодное *U*, при котором Т переходит из закр. в откр. состояние при разомкнутом управляющем выводе.

Ток включ. *Iвкл* – это такое значение прямого анодного *I* ч/з Т, выше которого Т переключ-ся в откр. сост. при разомкнутой цепи управляющего вывода.

Отпирающий ток управления *Iу.вкл* – наименьший *I* в цепи управляющего вывода, кот. обеспечивает переключение Т в откр. сост. при данном *U* на Т.

Время задержки *tз* – время, в течение кот. анодный *I* через Т возрастает до величины *0,1* установившегося значения с момента подачи на тир-р управляющего импульса.

Время включения *tвкл* – время, в течение кот. *I* ч/з Т возрастает до *0,9* установившегося значения с момента подачи на Т управляющего импульса.

Остаточное напряжение *Uпр* – значение напряж. на Т, находящемся в откр. сост., при прохожд. ч/з него максимально допустимого *I*. *Uпр* обычно не превышает *2В*.

Ток выключения *Iвыкл* – значение прямого *I* ч/з Т при разомкнутой цепи управления, ниже кот. тир-р выключается.

Время выключения *tвыкл* – время от момента перемены *I*, проходящего ч/з Т, с прямого на обратный до момента, когда Т полностью восстановит запирающую способность в прямом направлении.

Т широко прим. в радиолокации, уст-вах радиосвязи, автоматике, как приборы с отрицательной проводимостью, управляемые ключи, пороговые элементы, триггеры, не потребляющие *I* в исходном состоянии.

# 23. Однопереходный транзистор.

Однопереходный тр-р представляет собой полупроводниковый прибор с одним *р-п* переходом, в котором модуляция сопротивления полупроводника вызвана инжекцией носителей *р-п* переходом.

ОТ изготавливают из пластины высокоомного полупроводника с электропроводностью *п*-типа, он имеет 2 невыпрямляющих контакта к *п*-области и *р-п* переход, расположенный между ними.



рис. 1. Схема включения однопереходного тр-ра.

Согласно схеме структуры ОТ принимается следующая терминология: электрод от выпрямляющего контакта – *эмиттер*, электрод от нижнего невыпрямляющего контакта - *первая база* (Б1) и электрод от верхнего невыпр. контакта - *вторая база* (Б2). В некоторых случаях ОТ наз. базовым диодом.

На рис. 2 приведем ВАХ ОТ.



рис. 2. Входная ВАХ однопереходного тр-ра (1 – характеристика при отключенной базе).

При откл. Б2 хар-ка выглядит аналогично хар-ке обычного диода.

В триодном включении при большом *U* между невыпрямляющими контактами Б1 и Б2 переход заперт как при отриц. так и при положит. напряж. *Uэ*, не превышающих величины внутреннего напряжения *UэБ1*. Этому режиму соотв. участок хар-ки *А-Б* на рис. 2, аналогичный хар-ке обрат. вкл. *р-п* перехода.

При напряж на вх. *Uэ=UэБ1* переход отпирается. Падающий участок ВАХ соответств. резкому падению напряж. на вх. *Uэ* при возрастающем токе *Iэ* (участок Б-В на рис. 2). Напряжение в точке максимума определяется из выражения *Umax ≈*(*Eб·R1*)*/*(*R1+R2*).

# 24. Полевой транзистор с р-n переходом.

Полевым тр-ром (ПТ) наз. полупроводн. прибор, усилительные св-ва кот. обусловлены потоком основных носителей, протекающим ч/з проводящий канал, управляемый электрическим полем. Действие ПТ обусловлено носителями заряда одной полярности.



Характерной особенностью ПТ явл. высокий коэфф. усиления по напряж. и высокое *Uвх*.

*Исток* (И) – это вывод ч/з кот. основные носители входят в канал.

*Сток* (С) – вывод ч/з кот. основные носители выходят из канала.

И и С соед-тся токопроводящим каналом.

*Затвор* (З) – ч/з него создается эл. поле, кот. управляет шириной канала, а значит током. В ПТ З выполнен в виде обратно включенного *р-п* перехода.

На С прилагается *U* такой полярности, чтобы основные носители из канала двигались от истока к стоку.

На З прилагается *U* такой полярности, чтобы *р-п* переход был вкл. в обр. направл. Если *U* на З равно 0, канал имеет некоторую ширину ч/з кот. основные носители – дырки переходят от И к С и создается *Ic*. Если обратн. *U* на З увеличивать, тогда ширина *р-п* перехода увелчив-ся, а канал сужается, и до С дойдет меньшее кол-во основн. носит. *Ic* уменш-ся.

Чем больше *U* затвора, тем больше ширина *р-п* перехода, канал сужается, и ток С уменьшается. При большом *U* затвора канал может перекрыться и ток С равен нулю.

*ВАХ полевого тр-ра*.

1. Стоко-затворные (проходные хар-ки).

Iс = f (Uз) при Uс = const.



Рис. 1. Входная характеристика.

ПТ имеют большие *Rвх*, т.к. во входной цепи имеется затвор с очень большим сопрот.

*Uз = 0*, канал самый широкий и *Iс* самый большой. Если *Uз* увеличивается, то канал сужается и *Iс* уменьшается. *Uз* при кот. канал перекрывается и *Ic = 0* наз. напряж. отсечки.

2. Стоковые (выходные хар-ки).

Iс = f (Uс) при Uз = 0.



Рис. 2. Выходная характеристика.

*Uз = 0* канал самый широкий *Ic* самый большой и ВАХ располагается выше. Если *Uз* растет, то канал сужается и ВАХ пойдут ниже, т.к. *Ic* уменьшается. Если *Uc = 0*, то *Ic = 0* и ВАХ начинаются с нуля. Если *Uc* увеличивается, то *Ic* сначала резко возраст., потом рост тока замедляется.

ПТ хар-ся следующими основн. параметрами: *крутизна проходной характеристики – S*

S = ΔIc / ΔUз,

*сопротивление С-И – Rси,*

*максимальная частота* – *fmax*.

# 25. Полевой тр-р с изолированным затвором с индуцированным каналом.

ПТ с изолир. затвором – это такие тр-ры, затвор которых изолирован от проводящего канала материалом диэлектрика или окисью кремния. Т.о. по структуре конструктивно получается, затвор – металлический слой, проводящий канал – полупроводник, изолятор – диэлектрик. По технологическому принципу изготовления различают 2 типа таких тр-ров: с индуцированным и со встроенным каналом.

ПТ с индуц. каналом – это такие тр-ры, в начальный момент которого проводящий канал между стоком и истоком отсутствует. Такой канал образуется в результате приложения напряжения на затворе (индуцируется) (рис. 1).



рис. 1.

Ic=f (Uз), при Uc=const.

*Uз=0*, канал между С и И отсутствует, а значит ток стока очень маленький приблизительно равен нулю. Пусть на затворе подается отриц. напряж., тогда электроны из *п*-области отталкиваются от отриц. затвора, а дырки притягиваются. В результате между С и И появляется слой с электропроводностью *р*-типа, кот. служит каналом, а значит ток ч/з канал растет. Чем больше отриц. напряж. (*-Uз*), тем больше дырок притягивается к каналу, канал расширяется, *Ic* увеличивается. Хар-ки смещаются вверх.

Режим работы при котором канал расширяется и *Ic* увеличивается, наз. режимом обогащения. Т.о. в таком ПТ канал появляется только в определенных условиях, поэтому тр-р называется и индуцированным каналом.

*Параметры полевого транзистора.*

1. внутреннее сопротивление:

Ri = ΔUc / ΔIc, при Uз = const.

2. крутизна характеристики:

S = ΔIc / ΔUз, при Uс = const.

3. коэффициент усиления:

K = Ri·S.

4. мощность рассеивания:

Pc = Ic рт·Uc рт.

# 26. Полевой тр-р с изолированным затвором с встроенным каналом.

ПТ с изолир. затвором – это такие тр-ры, затвор которых изолирован от проводящего канала материалом диэлектрика или окисью кремния. Т.о. по структуре конструктивно получается, затвор – металлический слой, проводящий канал – полупроводник, изолятор – диэлектрик. По технологическому принципу изготовления различают 2 типа таких тр-ров: с индуцированным и со встроенным каналом.

ПТ со встроенным каналом – это такие тр-ры, у кот. при их изготовлении уже проводящий канал между истоком и стоком есть.



рис. 1.

В таком тр-ре канал выполняется уже в процессе изготовления.

Uз = 0, U > 0(+), U < 0(-).

*Uз = 0*, – между стоком и истоком уже существует канал и *Ic* имеет некоторое значение.

*U < 0*, – электроны из канала отталкиваются, а дырки притягиваются. В результате канал обедняется основными носителями - *режим обеднения*. Канал сужается, *Ic* уменьшается и хар-ки смещаются вниз.

*U > 0*, – дырки отталкиваются от канала, а электроны притягиваются. Канал обогащается основными носителями. Он расширяется и *Ic* увеличивается, характеристики смещаются вверх.

*Параметры полевого транзистора.*

1. внутреннее сопротивление:

Ri = ΔUc / ΔIc, при Uз = const.

2. крутизна характеристики:

S = ΔIc / ΔUз, при Uс = const.

3. коэффициент усиления:

K = Ri·S.

4. мощность рассеивания:

*Pc = Ic рт·Uc рт*.

# 27. Триод.

Триодом (Т) называют трехэлектродный электровакуумный прибор, имеющий катод, анод и сетку. Сетка – это электрод, кот. обычно выполнен в виде проволочной спирали и располагается в непосредственной близости от поверхности катода. Основное назначение С воздействовать на значение объемного заряда у катода и управлять электронным потоком, поэтому ее часто называют управляющей. На С относительно катода может подаваться как положит. так и отриц. потенциал. В качестве общего электрода, в триоде может выступать катод, сетка или анод. В соответствии с этим и схемы включения Т называются схемой с заземленным (общим) катодом, сеткой или анодом.



*+Uc*, электроны ускоряются и дойдут быстрее до анода. Ток анода растет.

*-Uc*, электроны тормозятся, не все дойдут до анода. Ток анода уменьшается.

Триоды можно применять как мощные усилители и генераторы в передающих устройствах, энергетических и электротехнических промышленных установках.

# 30. Кинескопы.

Кинескоп – это электронно-лучевая телевизионная трубка, предназначенная для приема изображений. Электронный прожектор, используемый в кинескопах строится по 3х-линзовой схеме. Первый анод имеет больше диаметр, чем рядом расположенные, ускоряющий электрод и второй анод. Благодаря такой конструкции ток первого анода близок к нулю, что не изменяет фокусировку электронного луча при регулировании напряжения на модуляторе.

Для покрытия экранов в кинескопах обычно используют механическую смесь желтого и голубого люминофоров. Баллон (колба) кинескопа – весьма ответственная часть конструкции, определяющая, многие эксплуатационные характеристики трубки. Давление воздуха на экран очень велико, поэтому для обеспечения высокой механической прочности в целях безопасности экран выполняют из стекла толщиной до *10 мм*.

Для подачи высокого напряжения на второй анод прожектора внутреннюю поверхность колбы покрывают аквадагом (проводящим графитовым слоем). Наружная поверхность трубок в широкой части часто тоже покрывают аквадагом. Внутреннее и внешнее покрытие электрически изолированы друг от друга, и образуют конденсатор фильтра высоковольтного выпрямителя.

# 28. Электронн. лампы. Тетрод. Принцип действия. Основные характеристики и параметры. Применение.

Многоэлектродные лампы (МЛ) – это электронные лампы с общим электронным потоком, содержащие анод, катод и сетки. К МЛ относят тетроды, в том числе и лучевые, пентоды, частотопреобразовательные лампы и лампы специального назначения.



рис. 1.

В тетроде на характеристике имеется завал, который называется динатронным эффектом (ДЭ). ДЭ возникает при *Ua < Uc2*. Он обусловлен потоком вторичных электронов с анода на экранирующую сетку, в результате чего анодный ток тетрода уменьшается, а ток экранирующей сетки увеличивается. ДЭ приводит к качественному изменению характеристик *Ia = f (Ua)* и *Ic2 = φ (Ua)* тетрода.

Дальше, когда *Ua* становится больше *Uc2*, то вторичные электроны остаются на аноде и характеристика выпрямляется.

Тетрод применяется для усиления электрических сигналов. Сетка С2 уменьшает проходную емкость, значит можно использовать лампу на более высоких частотах.

*Параметры многоэлектродных ламп*.

1. *крутизна анодно-сеточной характеристики* отражает зависимость анодного тока тетрода или пентода от напряжения *Uc1*, при условии постоянства всех остальных напряжений

S = dIa / dUc1, (Uc2, Ua = const)

(для пентода так же *Uc3 = const*).

2. *дифференциальное (внутреннее) сопротивление.* При его определении должны поддерживаться постоянными напряжения на управляющей и экранирующей сетках:

Ri = dUa / dIa, (Uc1, Uc2 = const)

(для пентода так же *Uc3 = const*).

3. *статический коэффициент усиления* характеризует относительное влияние напряжении *Uc1* и *Ua* на анодный ток

μ = dUa / dUc1, (Ia, Uc2 = const)

(для пентода так же *Uc3 = const*).

# 29. Электронные лампы Пентод. Принцип действия Основные характеристики и параметры. Применение.

Многоэлектродные лампы (МЛ) – это электронные лампы с общим электронным потоком, содержащие анод, катод и сетки. К МЛ относят тетроды, в том числе и лучевые, пентоды, частотопреобразовательные лампы и лампы специального назначения.

Динатронный эффект можно устранить созданием тормозящего поля для вторичных электронов с анода с помощью сетки С3, вводимой в пространство А – С2, которая называется защитной. На сетку С3 подаем отрицательное напряжение. Назначение анода, катода, С1 и С2 то же самое, что и в других лампах. Вторичные электроны, которые выходят из анода не дойдут до С2, возвращаются обратно на анод, т.к. отталкиваются от отрицательно заряженной сетки С3. В результате этого динатронный эффект исчезает.



рис. 1.

В таких лампах проходная емкость еще меньше и они применяются на более высоких частотах.

*Параметры многоэлектродных ламп*.

1. *крутизна анодно-сеточной характеристики* отражает зависимость анодного тока тетрода или пентода от напряжения *Uc1*, при условии постоянства всех остальных напряжений

S = dIa / dUc1, (Uc2, Ua = const)

(для пентода так же *Uc3 = const*).

2. *дифференциальное (внутреннее) сопротивление.* При его определении должны поддерживаться постоянными напряжения на управляющей и экранирующей сетках:

Ri = dUa / dIa, (Uc1, Uc2 = const)

(для пентода так же *Uc3 = const*).

3. *статический коэффициент усиления* характеризует относительное влияние напряжении *Uc1* и *Ua* на анодный ток

μ = dUa / dUc1, (Ia, Uc2 = const)

(для пентода так же *Uc3 = const*).

# 31. Гибридные микросхемы. Принцип построения. Технологические приемы реализации. Применение.

Гибридная микросхема (ГМ) выполняется на диэлектрической пластинке (керамика, органическое стекло, текстолит). Элементы выполняются по пленочной и полупроводниковой технологии, поэтому такие микросхемы называются гибридными. Активные элементы (диоды, транзисторы) выполняются по обыкновенной полупроводниковой технологии, при помощи таких процессов, как диффузия, фотолитография, окисление. Эти элементы разрезаются отдельно, покрываются лаком, и присоединяются к остальной части схемы при помощи сварных соединений. Пассивные элементы (R, L, C) выполняются в виде тонких пленок из вольфрама, тантала, сплава МЛТ. Обкладки конденсаторов выполняются из таких же материалов, а диэлектрическая прокладка наносится ч/з трафарет из диэлектрической пасты. Такой метод нанесения элементов в виде тонких пленок ч/з трафарет, называется пленочной технологией.

*Достоинства ГМ:*

1. возможность выбора элемента с разными параметрами.

2. хорошая электроизоляция элемента.

*Недостатки:*

1. большие размеры, вес, стоимость.

2. больше сварных соединений, а значит меньше надежность.

3. меньше степень интеграции.

# 43. Компараторы.

Компаратор (К) – устройство, предназначенное для сравнения двух напряжений. На выходе К устанавливается *U*, соответствующее логической единице: *uвых = U1*, если напряжение неинвертирующего входа *u+вх* больше напряжения инвертирующего входа *u-вх*. В противоположном случае, когда *u-вх > u+вх*, на выходе устанавливается напряжение соотв. логическому нулю: *uвых = U0*.

В качестве К можно использовать операционный усилитель. Однако уровни выходного *U* ОУ определяются напряжениями питания и не соответствуют уровням логических сигналов цифровых интегральных схем.

Как и в ОУ, в К входной каскад – дифференциальный. Для повышения чувствительности за диф. каскадом следует каскад усиления напряжения. Выходной каскад К отличается от соотв. каскада ОУ и представляет собой электронный ключ.

Вход. показатели компаратора:

*Rвх*, входной ток сдвига *Iвх сд = Δiвх = j+ - j-*, напряжение смещения *Есм*, дифф. коэфф усиления *Кд*, полоса пропускания – аналогичны соотв. параметрам ОУ.

Выходные показатели:

Уровни сигналов *U0*, *U1*, коэфф разветвления N – анлогичны показателям цифровых ИС.

Специфическим параметром К явл. зона неопределенности *ΔUн*, равная разности входных напряжений, которой соотв. выходные напряжения между *U1* и *U0*:

ΔUн = (U1-U0) / KД.

К часто используют в качестве пороговых устройств, предназначенных для выделения сигналов, значения которых больше или меньше некоторого заданного. В таких устройствах на один вход подается сигнал, на другой – опорное напряжение – порог сравнения.

# 32. Интегральные микросхемы. Принцип построения. Технологические приемы реализации. Применение.

Интегральной микросхемой (ИМС) является многоэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования и обработки сигнала, и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов и (или) кристаллов.

Элементом ИМС называют часть ИМС, реализующую функцию какого-либо электрорадиоэлемента, которая выполнена нераздельно от кристалла или подложки. Обычно все элементы ИМС изготавливают одновременно в ходе единого технологического цикла. Полупроводниковые ИМС выполняются на кремниевых пластинках диаметром *30 – 60 мм*, при помощи таких технологических процессов как резка, шлифовка, очистка, окисление, травление, фотолитография, диффузия. На одной пластине помещаются до *1000* микросхем и одновременно технологический процесс идет на несколько десятков пластин, поэтому стоимость одной пластины небольшая.

Основная структура полупроводниковой ИМС – это транзистор. На структуре транзистора выполняются все остальные элементы схемы. Для диода используются эмиттерный или коллекторный *p-n*-переходы, в таком случае лишний третий вывод присоединяется к выводу базы. Такое подключение называется транзистор в диодном включении.

*Конденсатор*. В качестве него применяется емкость *p-n*-перехода.

*Резистор*. В качестве резистора применяется область эмиттер или база, или коллектор, для чего только от этих областей делается 2 вывода.

Изоляция между элементами выполняется при помощи обратно включенных *p-n*-переходов, которые образуются между подложкой микросхемы и элементом. Такой *p-n*-переход имеет большое сопротивление, а значит выполняется изоляция.

*Достоинства ИМС:*

1. высокая степень интеграции.

2. малое количество сварных соединений, а значит высокая надежность.

3. малый размер, вес.

4. низкая себестоимость.

*Недостатки ИМС:*

1. один из больших недостатков – трудно получить большое количество элементов с разными параметрами.

2. существуют какие-то паразитные связи между элементами.

3. такие микросхемы, как правило, маломощные.

# 34. Принцип построения усилительных каскадов на транзисторах.

В качестве базового узла предварительных усилителей наиболее широко применяется усилительный каскад на биполярном транзисторе, включенный по схеме с ОЭ. Простейшая схема такого каскада приведена на рис. 1.



рис. 1.

Графики, поясняющие его работу на рис. 2.



рис. 2.

Для получения наименьших нелинейных искажений усиливаемого сигнала, рабочую точку *А* выбирают посередине рабочего участка характеристик (участок *ВС* на рис. 2.b). Выбранный режим обеспечивается требуемой величиной *IбА*, задаваемого *Rб*.

При подаче на вход транзистора напряж. сигнала *Uвх* происходит изменение ток базы, а, следовательно, и изменение *Iк*, и напряжения на *RН*. Амплитуда выходного тока *Iкm* примерно в *βБТ* раз больше амплитуды базового тока *Iбm*, а амплитуда коллекторного напряж. *Uкm* во много раз больше амплитуды *Uвх*:

Uкm >> Uвх.m = Uбэ.m.

Т.о каскад усиливает *I* и *U* входного сигнала, что иллюстрирует рис. 2.a и b.

Пользуясь графиками нетрудно определить основные параметры каскада:

1. *входное сопротивление* *Rвх = Uбэm / Iбm*.

2. *коэффициент усиления по току* *Hi = Iкm / Iбm*.

3. *коэффициент усиления по напряжению* *Hu = Uкm / Uбэm*.

4. *коэффициент усиления по мощности* *Hp = HuHi*.

Обычно каскады предварительных усилителей работают в режиме усиления слабых сигналов. Это особенность позволяет использовать аналитические методы расчета параметров каскадов по известным H-параметров транзисторов.

# 37. Обратная связь в усилителях. Применение обратной связи для коррекции характеристик усилителей.

Цепь, через которую часть выходного сигнала подается из выходной цепи обратно во входную цепь,.назыв. цепь обрат связи.

*Uсв* – та часть выходного напряжения которое подается обратно.

*β = Uсв / Uвых* – коэфф. обратной связи, который показывает какая часть выходного напряжения подается во входную цепь.

*Uвх* – входное напряжение без обратн. связи.

*U* – входное напряжение с обратной связью *U = Uвх ± Uсв*.



Рис. 1.

Положительная обратная связь имеет место, когда *Uсв* и *Uвх* совпадают по фазе, тогда *U = Uвх + Uсв*. Усиление увеличивается, но ухудшаются все остальные свойства усилителя. Есть опасность самовозбуждения.

Отриц. обратная связь – *Uсв* и *Uвх* противоположны по фазе. Тогда *U = Uвх - Uсв*.

Усиление уменьшается, но улучшаются все остальные свойства усилителя. Поэтому в усилителе применяется ООС.

Виды обратной связи по способу подключения ко входной и выходной цепи:



Рис. 2.

1. ООС по напряжению – когда цепь обратной связи подключена параллельно нагрузке, тогда *Uсв* прямо пропорционально *Uвых* (рис. 2.a)

2. ООС по току. Имеет место, когда цепь ООС подключается последовательно с нагрузкой, тогда *Uсв* прямо пропорционально *Iвых* (рис. 2.b).

3. Смешанная по выходу ОС. Имеет место, когда *Uсв* пропорционально *Iвых* и пропорционально *Uвых* (рис. 2.с).

Эти три вида ОС определяются по способу «как мы снимаем».



Рис. 3.

1. Последовательная ООС, когда цепь ОС подключена последовательно с источником сигнала (рис. 3.a).

2. Параллельная ООС, когда цепь ОС подключена параллельно источнику сигнала (рис. 3.b).

3. Смешанная по входу ООС, когда ОС пропорциональна току и напряжению источника сигнала (рис 3.с).

# 41. Операционные усилители.

ОУ – это схема, разработанная и впервые применяемая для выполнения разных алгебраических операций. ОУ имеют широкое применение для усиления сигнала, в схемах коррекции АЧХ, в фильтрах, генераторах.

ОУ – это усилитель с непосредственными связями, большим коэффициентом усиления, большим входным сопротивлением, дифференциальным входом, несимметричным выходом с малым выходным сопротивлением.



Рис. 1.

ОУ имеет 2 входа и 1 выход, питается от двухполярного источника питания.

Вх.1 назыв. неинвертирующим, т.к. входной и выходной сигнал совпадает по фазе.

Вх.2 – инвертирующий, т.к. выходной сигнал противоположный по фазе входному.

Параметры:

1. коэфф усиления очень большой

*К = 10з - 106*.

2. вых сопротивление очень маленькое *Rвых ≈ 10 Ом.*

3. входное сопротивление очень большое *Rвх ≈ 100 кОм – 10 МОм*.

4. широкая полоса пропускания *fн = 10 Гц, fв = 10 МГц.*

5. Маленькие искажения, фоны, помехи и дрейф нуля.



Рис. 2. Структурная схема ОУ.

1 каскад – дифференциальный каскад. 2 входа, 2 выхода. Обеспечивает большое *Rвх* ОУ, усиление сигнала, малый дрейф 0 и искажения.

2 каскад – дифференциальный. Выполняет те же функции, но имеет 2 входа и 1 выход, а значит обеспечивает переход к обыкновенному каскаду с одним входом.

3 каскад – схема сдвига уровня – эмиттерный повторитель, обеспечивающий компенсацию питающего *U* предыдущего каскада и усиление сигнала по току.

4 каскад – эмиттерный повторитель, обеспечивающий кроме усиления сигнала, маленькое *Rвых*, маленькие искажения, фоны, помехи, хорошую АЧХ.

# 16. Импульсный режим работы биполярного транзистора.

Работа тр-ра в качестве усилит. малых имп-ных сигн. в принципе ничем не отлич. от работы тр-ра как усилит. малых синусоид-ных сигналов. Импу-с можно представить в виде Σ ряда гармонич-ких составл-щих и, зная частотные св-ва тр-ра, определить искажения формы имп-са, кот. могут происх. при усилении. Особый реж. работы имеет место, когда рабочая точка перемещ-ся в значительной области вых. хар-тик от одного края области к другому. Тр-р может при этом работать в трех основных режимах:

1. *Режим насыщения* (точка А). В этом режиме тр-р полностью открыт и протекающий *I* равен макс. значению: *Iк = Eк / Rн*.

2. *Режим отсечки* (точка В). В этом режиме тр-р заперт и ток его близок к нулю.

3. *Активный режим* – режим работы, при кот. тр-р обладает активными св-вами, т.е. способен обеспечивать усил. по мощности. В этом реж. рабоч. точка лежит между точк. А и В.

Скорость перехода тр-ра из откр. сост. в закр. и обратно зависит от переходных процессов в базе, связанных с накоплением и рассасыванием неравновесных носителей зарядов. На вх. тр-ра подаётся управляющий сигнал в виде скачков напряжения, замыкающих и размык. тр-ный ключ.

Рассм. процессы, происх-щие в тр-ре, вкл. по схеме с ОБ при подаче ч/з эмит. имп-са длительностью *tимп*, в прямом направл. с последующ. изменением полярности (рис. 2.а).



В исх. сост. тр-рный ключ заперт, т.е. эмит. и колл. переходы заперты, и тр-р работает в реж. отсечки. После подачи ч/з эмитт. имп-са в прямом направл., *Iк* появл-ся не сразу из-за конечного времени пролета инжектированных носителей до колл. перехода и наличия барьерных емкостей (рис. 1). Время, на кот. появление *Iк* отстает от *Iэ*, наз. временем задержки *tзд*. Процесс установления *Iк* характ-ся временем нарастания *tнр*. Это время затрачивается на диффузионное перемещ-е ч/з базу инжектированных в неё носителей. *tзд* относительно мало и при приближенных расчетах им пренебрегают.

При *Iэ>0* с увеличением *Iэ* быстро возрастает и *Iк* – это акт. реж. работы тр-ра. Наконец, когда рабоч. точка на нагрузочной хар-ке достигает точки перегиба статических вых. хар-тик, дальнейшее увеличение *Iэ* не вызывает роста *Iк*, тр-ный ключ полностью открылся и тр-р работает в режиме насыщения.



рис.2.

Ч/з интервал времени, равный *tимп* меняется полярность *U*, подаваемого на эмиттер. При этом тр-р в течение некоторого времени *tрас* (время рассасывания) продолжает находиться в режиме насыщения.

Рассасыв. заряда происходит вследствие ухода дырок из базы ч/з колл. и эмитт. переходы. До тех пор пока в процессе рассасывания концентрации неосновных носителей около *р-n*-переходов не достигнут нуля, обратные токи через соответствующие *р-n*-переходы будут оставаться постоянными, т.е. токи *Iэ* и *Iк* будут неизменными, пока тр-р наход-ся в реж. насыщ. В момент времени *tрас* избыточная концентрация неосновных носителей в базе около колл. *р-n*-перехода достигает нуля. С этого момента *Iк* и *Iэ* будут уменьшаться. Время рассас. *tрас* определяется как интервал времени с момента выкл. вх. имп-са и связанного с этим изменением направл. *Iб* до момента, когда концентрация дырок у колл. перехода уменьшится до нуля. Величина его зависит от конструкции эмиттера, величины его *I* и длит-сти имп-са *tимп*. Для уменьшения *tрас* на вх. цепи в момент окончания действия имп-са создают *I* обратного направления *Iэ2*, что ускоряет рассас. дырок в базе. По истечении времени *tрас*, рабочая точка тр-ра переходит на границу активной области и нач-ся спад вых-го *I*. Длительность спада *tсп* опред-ся как время, в течение которого ток уменьшается от *0,9* до *0,1* тока насыщения.

# 18. h-параметры биполярного транзистора.

В настоящ. время, гл. образом при расч. на НЧ применяются h-параметры. Однако значения этих парам. в справочниках приводятся для типового режима. Для опред. h-пар. в нетиповом реж. пользуются хар-ками. Мы рассм., как опр-ются h-парам. по хар-кам.

Определим для примера h-парам. тр-ра, включенного по схеме с ОЭ. При этом способе включения

Iвх = Iб, Uвх = Uбэ, Iвых = Iк, Uвых = Uкэ.

Вх. и вых. хар-ки для схемы с ОЭ приведены на рис. 1. Для опред. парам. должна быть определена (задана) рабочая точка (точка покоя). Точку покоя в тр-рах обычно задают постоянным вых. напряж. *Uкэ*0 и постоян. вх. током *Iб*0. На семействе харак-тик отмечают эту точку (точка *О* на вх. харак-ке и точка *О'* на вых. характеристике).

РИСУНОК ОТДЕЛЬНО

рис.1. Определение h-параметров тр-ра.

Пар-ры *h11* и *h12* определяются по вх., a *h21* и *h22* по вых. характеристикам. Параметр



и представляет абсолютное значение приращения *ΔUбэ* при изменении вх. тока *ΔIб* при постоянном вых. напряж. *Uкэ*0. Другими словами, это вх. сопрот. тр-ра при постоян. вых. *U*. Параметр *h11* измеряется в омах и в схеме с ОЭ составляет сотни *Ом* и единицы *кОм*.

На семействе вх. харак-тик вблизи точки *О* строим характеристический треугольник *abc* так, чтобы точка *О* лежала примерно на середине гипотенузы. Проектируя точки *а, b, с* на оси координат, определяем *ΔIб* и *ΔU'бэ*. Тогда *h11=ΔU'бэ / ΔIб*.

Значение *h11* в рабочей точке можно определить точнее, если провести ч/з нее касательную к кривой и определить как котангенс угла наклона касательной с осью абсцисс (угол *α* на рисунке). Параметр



представляет абсолютное значение приращения *ΔUбэ* при изменении вых. напряж. *ΔUкэ* при постоянном вх. токе *Iб*0. Другими словами, *h12* –коэфф. обратной связи по напряж. и показывает, какая часть вых. напряж. попадает на вход; *h12* – безразмерная величина и в схеме с ОЭ составляет 10-3 – 10-4. Для определения *h12* параллельно оси абсцисс ч/з точку покоя проводим прямую до пересечения с соседней характеристикой. Приращение коллекторного напряж. может быть определено как разность и *Uкэ*0 при *Iб=Iб*0 - const, а приращение напряж. на базе соответствует разности абсцисс точек пересечения. Тогда



Параметр



представляет абсолютное влияние изменения вых. тока *ΔIк* при изменении вх. тока *ΔIб* при постоянном *Uкэ=Uкэ*0. Другими словами, *h21* – коэфф. усиления по току при постоянном вых. напряж., т.е. показывает, во сколько раз изменение *Iк* больше изменения *Iб*; *h21* – безразмерная величина и в схеме с ОЭ составляет десятки и сотни. Для определения *h21* через рабочую точку *О'* проводят прямую, параллельную оси ординат до пересечения с соседними харак-ками. Точки пересечения с соседними харак-ками *АВ* проектируют на ось ординат и определяют *ΔI'к*, приращение тока базы *ΔIб* определяется как разность значений тока базы в точках *АВ.* Тогда *h21=ΔI'к / ΔIб*.

Параметр



показывает абсолютное влияние изменения вых. тока *ΔIк* при изменении вых. напряжения при постоянном вх. токе. Другими словами, *h22* – вых. проводимость тр-ра при постоянном входном токе.

В большинстве случаев в расчетах применяется вых. сопротивление *Rвых=1/h22*. В схемах с ОЭ *Rвых* составляет единицы и десятки *кОм*.

Для определения *h22* вблизи точки *О'* изменяют *Uкэ* в обе стороны от точки покоя на величину *ΔUкэ* и определяют соответствующее изменение *ΔI''к* при постоянном токе базы *Iб=Iб*0; тогда *h22=ΔI''к/ΔUкэ*, *1/h22=ΔUкэ/ΔI'к*.

Следует обратить внимание, что *ΔI'к* и *ΔI''к* в общем случае не равны между собой: *ΔI'к* вызвано изменением *ΔIб* при постоянном *Uкэ*, а *ΔI''к* вызвано изменением *ΔUкэ* при постоянном токе базы*Iб*.

# 19. Работа биполярного транзистора на высоких частотах.

Св-ва тр-ра на ВЧ удобно анализировать по схеме замещения. На работу бип. тр-ра вредное влияние оказывает емкостное *R* колл. перехода *Cк*. На НЧ емкостное *R* этого перехода *1/WCк* велико. Велико и сопрот. *rк*, поэтому весь ток эквивалентного генер-ра *Iэ=aIэ* идет ч/з нагрузку, роль которой выполняет резистор *RН*.

С увеличением (↑) частоты сопрот. *1/WCк* начинает уменьшаться и при некоторой частоте часть *I*, создаваемого генерр-ом, начинает отделяться в емкость *Ск* и ток через *RН* начинает падать. Это явл. равносильно уменьшению коэфф-та усиления тр-ра, т.к. полезная вых. мощность уменьшается (↓) с уменьшением *I* нагрузки. Сл-но, с ↑ частоты ↓ коэффициенты усиления *a* и *B*.

С ↑ частоты сопротивление *1/WCэ* также ↓, но влияние *Cэ* не проявляется так сильно, как влияние *Cк*. Это объясняется тем, что емкость *Cэ* зашунтирована *Rэ* (*R* эмиттерного перехода), имеющим очень малую величину. Сопрот. *1/WCэ* начинает оказывать влияние на очень высоких. частотах, где оно становится соизмеримым с *Rэ*. На этих частотах тр-р обычно не работает, т.к. емкость *Cк* почти полностью шунтирует генератор тока *IГ*. Следовательно, влиянием *Cэ* можно пренебречь.

2ой причиной, вызывающей ум-↓ коэфф-та усиления, явл. инерционность процесса перемещения носителей ч/з базу от Э перехода к К, в результате чего появляется запаздывание по фазе между изменением величин *Iэ* и *Iк*. Это запаздывание. опред-ся временем переноса неосновных носителей ч/з базу и зависит от ее толщины.

Частота, на кот. модуль коэфф-та передачи, *a* ум-↓ в корень из 2х раз по сравнению с его значением на НЧ, наз. граничной частотой *fГр*. Величина *fГр* для схемы с ОБ определяется из соотношения *fГр=m/tD*, где *tD=W·*(*W/2Dp*) – среднее время диффузии носителей.

Коэфф. передачи *Iэ* *a* зависит от частоты следующим образом: *a*(*iW*)=*1/*(*1+iW/Wa*), где *Wa=2n·fГр* – угловая граничная частота, *i* – мнимая единица.

Комплексное число, стоящее в знаменателе указ-ет, что измен. коэфф. передачи опред-ся физич. процессами, эквивалентными изменению комплексного (емкостного) *R*. Модуль коэфф-та передачи зависит от угловой частоты *W=2nt* W следующим образом:



Угол запаздывания по фазе между *Iэ* и *Iк* можно определить как *γ(a)= - W/Wa*.

Чтобы охарактеризовать частотные св-ва тр-ра широко используются частотные хар-тики; представляющие собой зависимость модуля коэфф. передачи *a* от частоты (АЧХ) и фазы *γ(α)* (ФЧХ) (см. рис.).

С ув-↑ частоты *W*, ув-↑ сдвиг по фазе *γ*, обусловленный влиянием инерционных процессов при прохождении неоснавных носителей ч/з Б; и, в конечном счете, уменьшается коэффициент *a*. В схеме с ОЭ величина коэфф. передачи *Iб* в более сильной степени зависит от частоты, что приводит к уменьшению граничной частоты в схеме с ОЭ.



Уменьшение коэфф. *a* происходит в результате того, что с повышением частоты *Iк* отстает от *Iэ*. Граничные частоты для схемы с ОБ и ОЭ связаны формулой:

Wб=W·(1-a0)=Wa/1+B0,

где B – модуль коэффициента передачи тока базы при W=0. Граничная частота в схеме с ОЭ в *1+B*0 раз меньше чем в схеме с ОБ.

# 33. Основные показатели усилителей. Линейные и нелинейные искажения. Эквивалентная схема усилителя.

Принцип действия усилителя (У) основывается на преобразовании энергии источника питания в энергию сигнала. Основную функцию преобразователя энергии в У выполняет активный усилительный элемент, способный с небольшой входной энергией управлять значительно большей энергией источника питания.

Минимальную часть У, сохраняющую основную функцию – способность усиливать сигналы, называют каскадом усиления (КУ). КУ состоит из усилительного элемента и цепей, обеспечивающих заданный режим элемента и согласование с источником сигнала и нагрузкой.

*Источник сигнала* – это источник энергии, от которого полезные сигналы поступают на вход усилителя. Это микрофон, звукоснимающая головка, отрезок линии связи, предыдущий каскад.

*Нагрузка* – это устройство, которое является потребителем усилительных электрич. сигналов, т.е. выходная мощность усилителя выделяется на нагрузке. Это может быть следующий каскад, отрезок линии, громкоговоритель, измерительный прибор.

*Источник питания* – это источник энергии, за счет которого имеет место усиление элекрич. сигналов. От источника питания У отбирает мощность, которую превращает в мощность усиленных сигналов.

*Усилительный элемент* – транзистор или лампа. При помощи них имеет место преобразования энергии источника питания в энергию усиленных сигналов.

К основным показателям У относятся коэффициенты усиления напряжения, тока и мощности.

К входным показателям относятся: *Iвх*, *Uвх*, *Pвх*, *Rвх*.

Rвх = Uвх / Iвх, Pвх = UвхIвх.

К выходным показателям относятся: *Iвых*, *Uвых*, *Pвых*, *Rвых*.

Iвых = IН, Uвых = UН, Pвых = IвыхUвых.

Коэффициенты усиления – это важнейший показатель У.

Кu = Uвых / Uвх, Кi = Iвых / Iвх,

Кp = Pвых / Pвх.

Как правило, коэфф. усиления измеряются в безразмерных величинах, или в децибелах.

Кi (дБ) = 20lgКi, Кu (дБ) = 20lgКu,

Кp (дБ) = 10lgКp.

Коэфф. полезного действия *η* показывает, какая часть потребляемой мощности от источника питания затрачивается на полезный выходной сигнал *η = Pвых / P0* , где *Pвых* – полезная мощность выходного сигнала, *P0* потребляемая мощность от источника питания.

Хотя У должны усиливать колебания без искажений, в действительности формы входного и выходного колебаний не совпадают. Уровень искажений формы сигналов оценивается коэфф. искажений. Искажения разделяют на линейные и нелинейные. Линейные искажения обусловлены непостоянством АЧХ и ФЧХ. Линейные искажения оцениваются только по АЧХ.

Нелинейные искажения обусловлены нелинейностью ВАХ. При подаче гармонического колебания на вход У на его выходе будет не только усиленный входной сигнал, но и его высшие гармоники. Эти нелинейные искажения оцениваются коэфф. гармоник



где *Um1*, *Um2*, *Um3* – амплитуды гармоник 1, 2, 3… на выходе У при гармоническом колебании на его входе.

# 39. Дифференциальные усилители.

Усилитель постоянного тока, выход. U которого пропорционально разности напряжений входных сигналов, назыв. дифференциальным усилителем (ДУ).

Основными параметрами ДУ являются:

1. коэфф. усиления напряжения *КU = Uвых / Uвх*.

2.коэфф ослабления синфазных входных напряжений *Кос. сф*, равный отношению коэфф усиления напряжения *КU*к коэфф передачи синфазного входного напряжения и характеризующий неидеальность ДУ по синфазной помехе; у идеального ДУ д.б. *Кос. сф* равно бесконечности.

3. *U* смещения, характеризующее несимметричность входного каскада ДУ, связанную с несовершенством технологии его изготовления, и равное постоянному диф. напряжению которое необходимо подать на вход, чтобы сбалансировать ДУ, т.е. сделать его выходное направление *Uвых* равным 0.

4. разность входных токов, также связанная с несимметрией входного каскада ДУ и равная току, который необходимо подать на один из входов, чтобы выходное напряжение установилось равным 0

5. входное сопротивление (дифференциальное) *Rвх*, определяемое на входных выводах ДУ и равное отношению изменения входного (дифференциального) напряжения к изменению входного тока.

6. выходное сопротивление *Rвых* (сотни *Ом*), определяемое на выходных выводах ДУ и равное отношению изменения выходного напряжения к изменению выходного тока.

7. максимальное выходное напряжение *Uвых*max (единицы вольт), при котором не искажается форма выходного сигнала

8. верхняя граничная частота полосы пропускания *fв* (около *1 МГц*).



Рис. 1.

В такой схеме должно соблюдаться условие *Uвх* и *Uвых = 0*.

1. Пусть *Uвх = 0* и подключен только источник питания, тогда по цепям протекает пост. ток, устанавливается пост. *U*, но т.к. обе половины схемы идентичны то *Iк01 = Iк02*, *Uк01 = Uк02*.

Значит, потенциал точки *А* равняется потенциалу точки *В* и *Uвых = 0*, условие выполняется.

2. Пусть на вход мы подаем 2 одинаковые по величине и по фазе сигнала (синфазные). Тогда *Iк* и *Uк* двух транзисторов изменяются на одинаковую величину, в результате потенциал точки *А* остается равным потенциалу точки *В* и *Uвых* = 0. Значит, ДУ не усиливает, не пропускает на выход синфазный сигнал.

3. Пусть на вход подаем одинаковые по величине, но противофазные сигналы. Тогда, на VT1 положительная полуволна, транзистор закрывается, *Iк*, *Uк* падают. На VT2 отрицательная полуволна, VT открыв., *Iк*, *Uк* возрастает. Потенциал точки *А* отличается от потенциала точки *В* и получаем *Uвых*, которое является напряжением усиленного сигнала.

Вывод: ДУ усиливает дифференциальный сигнал.

Такое функционирование схемы приводит к следующим положительным моментам.

1. Тот факт, что обе половины идентичны, приводит к тому, что постоянные токи питания в *Rэ* имеют одинаковые направления и слагаются, в результате *Uэ* удвоится, ООС по пост. току глубокая, что приводит к стабилизации рабочего режима.

2. Т.к. на вход подаются два противофазных сигнала, токи этих сигналов через *Rэ* имеют противоположное направление и компенсируются. В результате ООС для полезных сигналов минимальна и не влияет на усиление.

Все помехи, фоны, искажения, дрейф 0 относится к синфазным сигналам. Поэтому ДУ не пропускает их на выходе.

# 45. RC-генераторы.

Различают *RC*-генераторы с инвертирующим и неинвертирующим усилителями.

Инвертир. усилитель вносит фазовый сдвиг *φк = π*. Поэтому фазосдвигающая *RC*-цепь ОС на частоте генерируемых колебаний также должна вносить фазовый сдвиг *φн = ± π*. Пример такого генератора с трехфазной *RC*-цепью показан на рис. 1.a.



Рис. 1.

Распространена схема *RC*-генератора с так называемым мостом Вина (рис. 1.b).

В современных *RC*-генераторах часто применяют операционные усилители, коэффициент усиления которых значительно больше трех. Для уменьшения коэфф. усиления используют ООС. Эту же ООС используют и для динамического управления коэффициентом усиления, обеспечивающего выполнение баланса амплитуд без захода на нелинейные участки проходной ВАХ усилителя. Заметим, что в *RC*-генераторах работа усилительного элемента на нелинейном участке ВАХ создает неустранимые нелинейные искаж.



Рис. 2.

На рис. 2 показана схема *RC*-генератора на операционном усилителе. На неинвертирующий вход усилителя ч/з мост Вина подается напряжение частотно-зависимой положительной ОС. На инвертирующий вход ч/з делитель *R1*, *R2* подается напряжение частотно-независимой ООС. Резистор *R2* шунтирован сопротивлением канала полевого транзистора *VT1*. Сопротивление канала управляется напряжением затвора, равным выпрямленному *U* с входа генератора.

Когда колебаний нет, напряжение на затворе равно нулю, сопротивление канала мало. При этом глубина ООС минимальна, а коэффициент усиления усилителя максимальный. При росте амплитуды колебаний напряжение на выходе выпрямителя растет и запирает канал. Вследствие этого увеличивается глубина ОС и уменьшается коэфф. усиления до тех пор, пока не будет достигнут баланс амплитуд.

Перестройка *RC*-генератора выполняется с помощью сдвоенного переменного резистора, одновременно изменяющего величины обоих резисторов моста Вина. Минимальная частота ограничивается конструктивно допустимыми емкостями и максимальными сопротивлениями *R*, при которых они остаются еще значительно меньше входного сопротивления усилителя. Максимальная частота ограничивается паразитными емкостями и минимальными сопротивлениями, при которых усилитель способен обеспечить нужный коэффициент усиления.

# 46. LC-генераторы.

Генераторы с внешней ОС наиболее часто реализуют по 3х-точечной схеме (рис. 1) с применением интегральных усилителей на одном транзисторе. Элементы *Z1*, *Z2* и *Z3* образуют резонансный *LC*-контур и создают частотно-зависимую ОС. В генераторах используются катушки индуктивности и конденсаторы с малыми потерями, поэтому в первом приближении можно учитывать только их реактивные сопротивления. Полагая, что входное сопротивление усилителя значительно больше |*Z1*|, получаем коэффициент ОС

 = Z1 / (Z1 + Z3) = X1 / (X1 + X3).



Рис. 1.

Если применен инвертирующий усилитель, как показано на рис. 1, то на резонансной частоте контура, для которой *X1 + X2 + X3 = 0*, усилитель вносит фазовый сдвиг *φк (ω0) = π*. При этом для выполнения условия баланса фаз цепь ОС также должна внести фазовый сдвиг, равный *π*. Очевидно, это имеет место, когда *X1* и *X2* – реактивные сопротивления с противоположными знаками и |*X1*| < |*X2*|. Условие баланса фаз может быть выполнено, если *X1* и *X2* – индуктивные сопротивления, а *X3* емкостное (рис 2.a), либо наоборот *X1* и *X2* – емкостные сопротивления, а *X3* – индуктивное (рис. 2.b).



Рис. 2.

Если же усилитель генератора неинвертирующий, то на резонансной частоте контура он не вносит фазового сдвига и *φк (ω0) = 0*, поэтому в такой схеме условие баланса фаз будет выполнено, если *φ (ω0) = 0*. Это возможно, если знаки *X1* и *X2* одинаковы, а знак *X2* – противоположный. Получаемые при этом варианты схим показаны на рис 2.с.d.

На частоту генерируемых колебаний оказывает влияние не только цепь ОС, но и параметры усилителей, такие, как входное и выходное сопротивления, ФЧХ коэффициента усиления.

Если помог, напишите rivlad@yandex.ru ©