

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
(ВлГУ)

Институт информационных технологий и радиоэлектроники

Кафедра радиотехники и радиосистем

Полушин Петр Алексеевич

Электроника

Конспект лекций  
по дисциплине «Электроника» для студентов ВлГУ,  
обучающихся по направлению 11.03.01 «Радиотехника»

Владимир – 2018

## Оглавление

1. Введение.
  2. Электрофизические свойства основных материалов, используемых в электронной технике. Физические явления в p-n переходе и его свойства.
  3. Основные типы дискретных полупроводниковых элементов. Полупроводниковые диоды, их типы и характеристики. Биполярные и полевые транзисторы, их типы, принципы работы и характеристики. Тиристоры, принципы работы и характеристики.
  4. Технологические основы построения интегральных микросхем. Типы интегральных микросхем и особенности их функционирования. Перспективные пути развития интегральной схемотехники.
  5. Особенности построения логических элементов на интегральных схемах. Типы, конструкции и характеристики базовых логических элементов. Запоминающие логические элементы.
  6. Основные направления развития функциональной электроники и перспективы их развития. Современные радиоэлементы, реализующие принципы функциональной электроники.
  7. Назначение и виды фотоэлектрических и индикаторных приборов. Физические явления, используемые в приборах. Жидкокристаллические и плазменные индикаторы.
  8. Классификация приборов вакуумной техники. Физические явления, используемые в приборах вакуумной техники. Типы и характеристики электронных ламп. Типы и характеристики электронно-лучевых приборов.
  9. Перспективы развития электронной техники.
- Заключение
- Список литературы

## *1. Введение*

Дисциплина "Электроника" обеспечивает подготовку специалиста в области радиотехники применительно к задачам разработки, проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических средств. Дисциплина посвящена практическим вопросам изучения основных активных радиотехнических элементов и компонентов и их свойств.

Содержание учебного курса соответствует требованиям Федерального Государственного образовательного стандарта высшего образования от 6 марта 2015 года.

Целями освоения дисциплины "Электроника" являются:

1. Подготовка в области знания основных средств создания радиоэлектронной аппаратуры.
2. Формирование практических навыков работы с элементной базой.
3. Ознакомление с основами применения современной элементной базы и перспективами ее развития.
4. Подготовка в области радиотехники для разных сфер профессиональной деятельности специалиста, а именно: проектно-конструкторской; производственно-технологической; научно-исследовательской; сервисно-эксплуатационной.

Взаимосвязь с другими дисциплинами:

Курс "Электроники" основывается на знании "Математики", "Физики", "Радиоматериалов и радиокомпонентов".

Полученные знания могут быть использованы при дипломном проектировании, а также в процессе разработки и проектирования радиоаппаратуры.

Самостоятельная (внеаудиторная) работа студентов включает закрепление теоретического материала при подготовке к выполнению и защите лабораторных заданий, а также при выполнении индивидуальной домашней работы. Основа самостоятельной работы - изучение литературы по рекомендованным источникам и конспекту лекций.

Материалы лекционного курса изложены тезисно, предполагая широкую самостоятельную работу студента с соответствующей учебно-научной литературой.

## 2. Электрофизические свойства основных материалов, используемых в электронной технике. Физические явления в p-n переходе и его свойства.

- 1.1. Токи в полупроводнике
- 1.2. Электронно-дырочный (p-n) переход.
- 1.3. Распределение зарядов и поля в p-n переходе.
- 1.4. Энергетическая диаграмма p-n структуры.
- 1.5. Прохождение тока через p-n переход.
- 1.6. Инжекционный ток.

### Токи в полупроводнике.

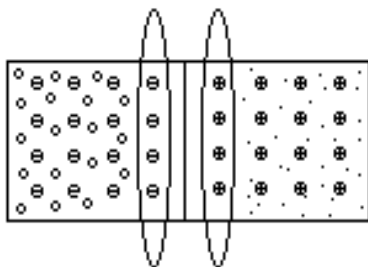
Пока нет внешнего электрического поля свободные заряды перемещаются хаотично. Когда есть энергия, то на хаотичность накладывается доля упорядоченного перемещения вдоль силовых линий энергии, то есть возникает электрический ток (дрейфовый ток). При прохождении дрейфового тока через p-n переход конденсация носителей остаётся постоянной во всех его точках. Но в p-n может возникать и ток другого вида, это составляющая возникает, если есть различные концентрации зарядов в различных точках объёма (диффузионный ток). В полупроводниках могут действовать оба вида токов, что обуславливает многообразие, что придаёт им соответствующие особенности.

2 вида тока:

- 1) Дрейфовый, который обусловлен внешним электрическим полем.
- 2) Диффузионный, который определяется градиентом концентрации свободных зарядов в разных точках. Каждый микрообъём остаётся электрически нейтральным.

### Электронно-дырочный (p-n) переход.

1. Состояние равновесия.



В p-n переходе наблюдается искусственно созданный градиент концентраций. Если есть градиент концентраций, то возникает диффузионный ток. В результате диффузионного тока электроны проникают в одну область, а дырки в другую. За счет этого нарушается электрическая нейтральность

приграничных областей. Следствием является возникновение внутреннего электрического поля.

Рисунок 1.1

А за счет электрического поля появляется дрейфовый ток. Напряженность поля увеличивается до тех пор, пока дрейфовый ток не станет равным диффузионному току. Таким образом, в состоянии равновесия наблюдается равенство плотности диффузионного и дрейфового токов. Разность потенциалов в переходе, обусловленная его собственным

полем, называется контактной разность потенциалов. 
$$\varphi_k = \frac{kT}{e} \cdot \ln \frac{p_p}{p_n}$$

### Распределение зарядов и поля в p-n переходе.

Граничная плоская длинная, чтобы пренебречь приповерхностными краевыми эффектами вне перехода  $E=0$ . Если концентрация электронов и дырок одинаковая, то области имеют одинаковую толщину.

Рассматриваем плоско-параллельный p-n переход, в котором:  $\delta$  - толщина p-n перехода,  $\delta \ll l$ , где  $l$  – ширина p-n перехода. (Рис1.2)

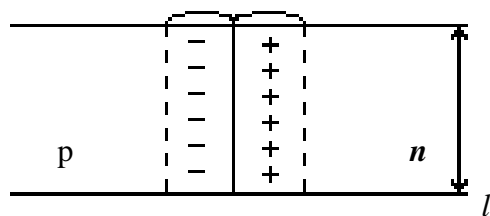


Рисунок 1.2

Рассмотрим резкий переход, т.е. концентрация примесей в области p-n перехода может распределяться неравномерно. Он характеризуется так же распределением неподвижных зарядов. (Рис1.3)

Концентрация примеси много меньше p-n перехода

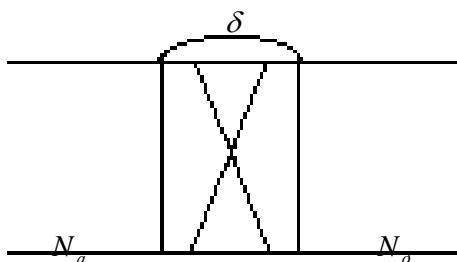


Рисунок 1.3

$N_a$  - акцепторная примесь;  $N_d$  - донорная примесь

Рассмотрим распределение концентрации подвижных зарядов. (Рис1.4)

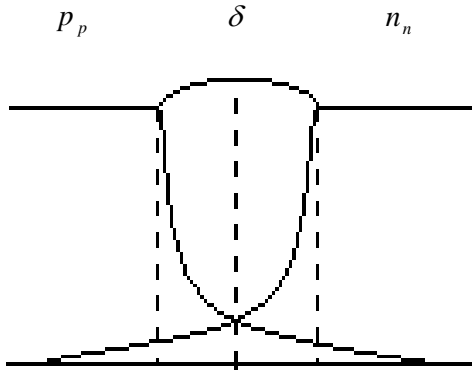


Рисунок 1.4

Рассмотрим распределение нескомпенсированного объемного заряда. Суммарный заряд в каждой точке равен разности подвижных и неподвижных зарядов, это и есть объёмный заряд (Рис 1.5)

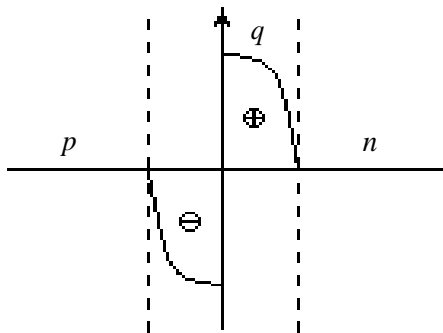
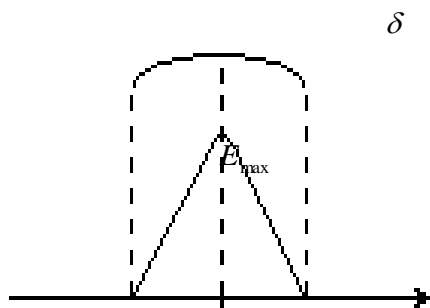


Рисунок 1.5

Рассмотрим распределение внутренней напряженности электрического поля в переходе (Рис1.6)



$$E_{\max} = \frac{e \cdot N \cdot \delta}{2 \cdot \epsilon}$$

Рисунок 1.6

Толщина р-п перехода определяется как  $\delta = \sqrt{\frac{4 \cdot \varepsilon}{e \cdot N} \cdot \varphi_k}$ . Если  $N_e = N_p$  (концентрации электронов и дырок равны), то переход симметричен. Если  $N_e \neq N_p$ , то переход не симметричен.

Если концентрация дырок и электронов одинаковая в обеих областях, то переход симметричный, т.е. есть толщина на половину одинаковая.

Если концентрация разная, то переход становится несимметричным. Когда в одной из областей концентрация свободных зарядов меньше, чем в другой, то проникшие электроны дальше не рекомбинируют с дыркой, поэтому глубина проникновения больше.

Таким образом, чем меньше концентрация свободных зарядов в одной из областей, тем дальше заряды проникшие из другой области рекомбинируют, т.е. есть тем шире соответствие половине перехода.

### Энергетическая диаграмма р-п структуры.

Рассмотрим, как выглядит р-п переход с точки зрения зонной теории (Рис 1.7)

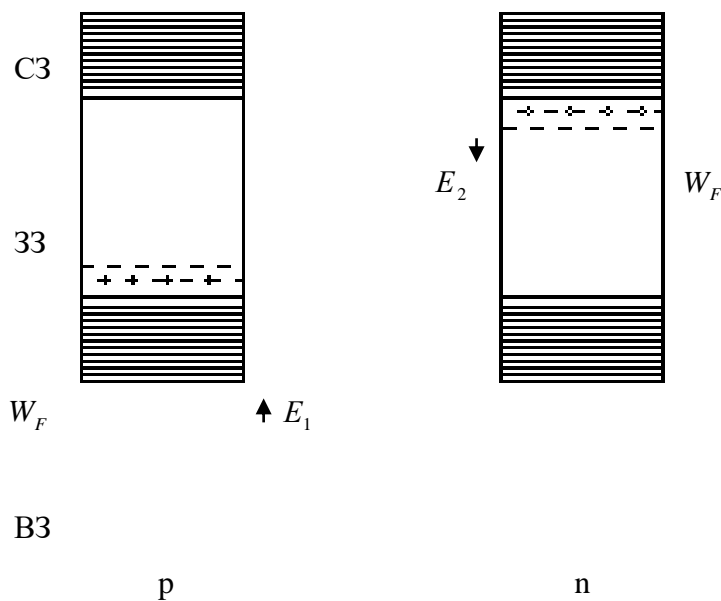


Рисунок 1.7

СЗ – свободная зона  
 ЗЗ – запрещенная зона  
 ВЗ – валентная зона  
 $W_F$  - уровень Ферми

При электрическом контакте n и p полупроводников уровни Ферми одинаковы по всему образцу, по отношению к ВЗ и СЗ он к ним жестко привязан. Это начинает быть возможно за счёт смещения самих зон в p и n области.

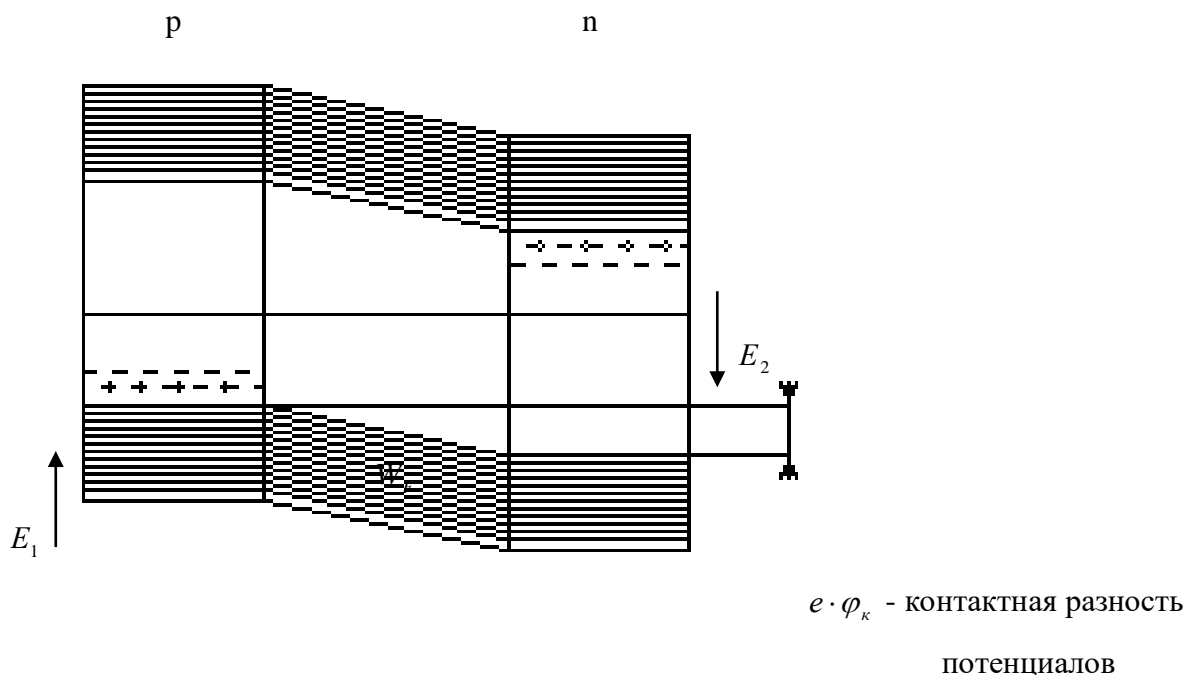


Рисунок 1.8

### Прохождение тока через p-n переход.

Чем больше свободных зарядов, тем больше проводимость (сопротивление маленькое) В p-n переходе свободных зарядов почти нет- его сопротивление большое, поэтому всё внешнее напряжение приложено к концам образца, оказывается приложенным к p-n переходу.

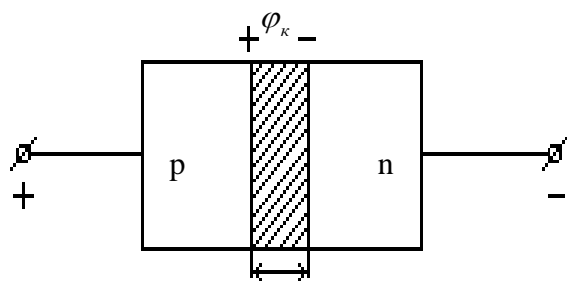
1. Прямое напряжение. (К A+, а к B-)

Прямое напряжение наблюдается, когда внешнее напряжение противоположно внутренней контактной разности потенциалов. (Рис 1.9)

2. Обратное напряжение. (К B+, а к A-)

Внешнее напряжение совпадает с полярностью областей, что приводит к их утолщению.





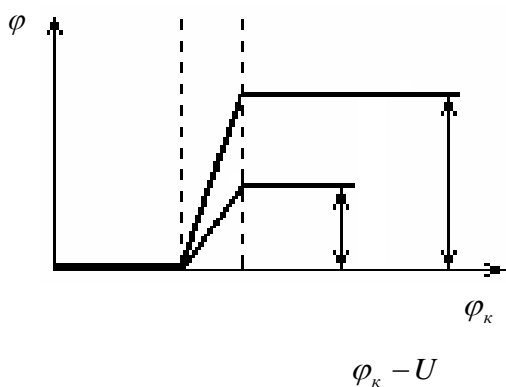
$\delta$  - ширина p-n перехода

$$\delta = \sqrt{\frac{4 \cdot \varepsilon}{e \cdot N} \cdot (\varphi_k - U)}$$

$\delta$

Рисунок 1.9

Пока отсутствует внешнее напряжение, распределение потенциала выглядит следующим образом.



0

Рисунок 1.10

Нарушение равновесия между дрейфовым и диффузионным токами приводит к падению дрейфового тока. Сопротивление перехода не линейное.

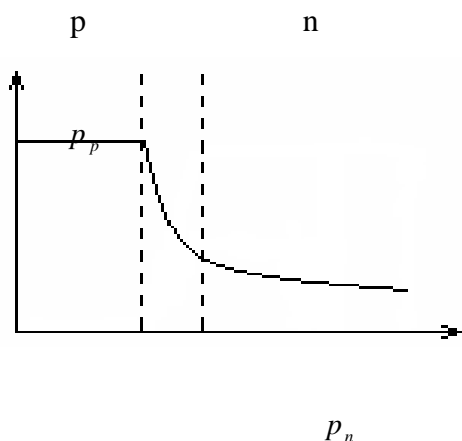
Поскольку сопротивление p и n областей много меньше области p-n перехода, то все внешнее напряжение приходится на p-n переход.

Когда  $\varphi_k = U$  область p-n перехода исчезает и полупроводник становится обычным проводником.

## Инжекционный ток.

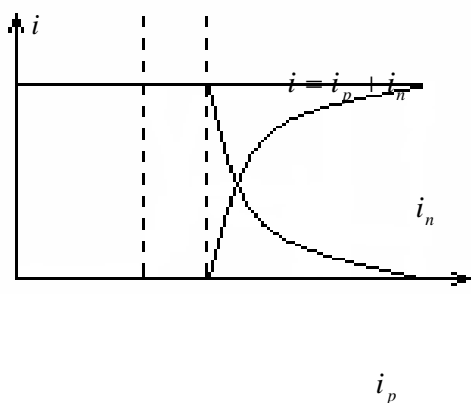
### 1. Прямое напряжение.

Когда р-п переход открыт, дырки диффундируют через него из р-области в п-область, где они являются неосновными носителями заряда. Данный процесс называется инжекцией.



Концентрация дырок убывает до тех пор, пока не станет равной концентрации электронов. Это видно из рисунка 1.11(А)

Рисунок 1.11(А)



Инжекция дырок не нарушает электрической нейтральности, поскольку такое же количество электронов поступает из внешней цепи.

Это видно из рисунка 1.11(Б)

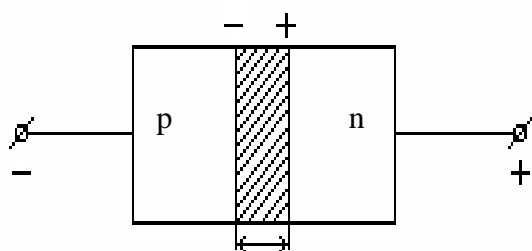
Рисунок 1.11(Б)

x

Все процессы в р-области аналогичны.

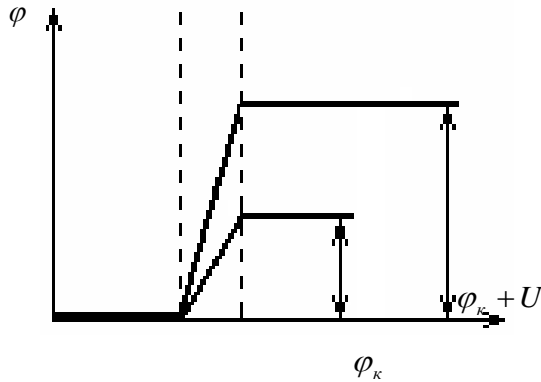
### 2. Обратное напряжение.

Рассмотрим ситуацию, когда приложено запирающее напряжение



$\delta$

Рисунок 1.12(А)



p-n переход утолщается

$$\delta = \sqrt{\frac{4 \cdot \varepsilon}{e \cdot N} \cdot (\varphi_k + U)} \text{ - толщина}$$

0

Рисунок 1.12(Б)

Особенности:

- 1) Поскольку не основных носителей мало, то ток экстракции немного меньше тока инжекции.
- 2) Ток экстракции очень быстро достигает насыщения, а дальше не изменяется.

Теоретическая зависимость тока, проходящего через плоскопараллельный переход, выглядит следующим образом  $I = I_0 (e^{\frac{eU}{kT}} - 1)$ , где  $I_0$  – обратный ток.

Можно считать, что ток от напряжения возрастает по экспоненте.

*Заключение.* В процессе изучения материала лекции студент знакомится с базовыми свойствами электронно-дырочного перехода, как основы функционирования подавляющего большинства современных полупроводниковых приборов. Изучаются свойства перехода в различных режимах работы и процессы, протекающие в нем.

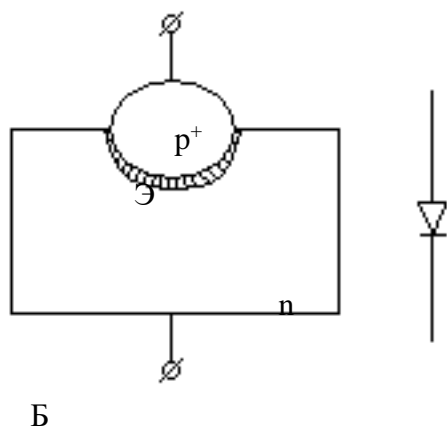
Полученные при изучении данной темы знания будут использованы при дальнейшем изучении особенностей работы полупроводниковых приборов различных видов.

**3. Основные типы дискретных полупроводниковых элементов. Полупроводниковые диоды, их типы и характеристики. Биполярные и полевые транзисторы, их типы, принципы работы и характеристики. Тиристоры, принципы работы и характеристики.**

1. Полупроводниковые диоды.
2. Пробой диодов.
3. Полупроводниковые стабилитроны
4. Емкость p-n перехода.
5. Высокочастотные диоды.
6. Переключающие (импульсные) диоды.
- 7 Транзисторы
- 8 Статический режим работы транзистора.
- 9 Статические характеристики в схеме с общей базой.
11. Характеристики в схеме с ОЭ
12. МДП-транзисторы. МОП-транзисторы.
134. Тиристоры.

**Полупроводниковые диоды.**

Схема полупроводникового диода показана на рисунке 1.13



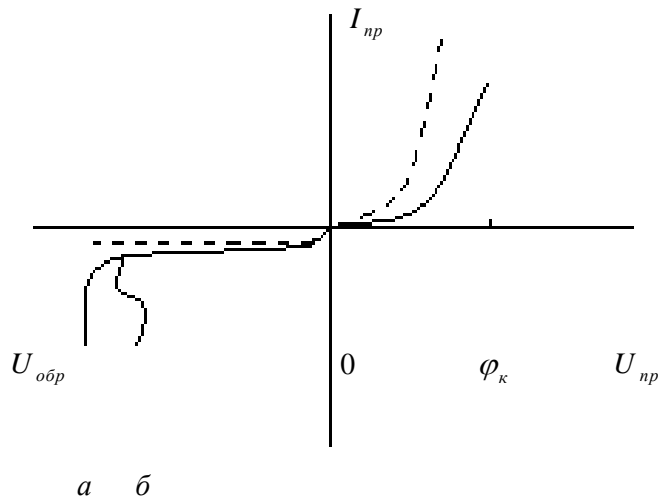
Э - эмиттер (анод)

Б - база (катод)

Концентрация примеси в эмиттере много больше концентрации примеси в базе.

Рисунок 1.13

Вольт-амперная (ВАХ) характеристика диода. (Рис. 1.14)



Пунктиром обозначена теоретическая характеристика; сплошной линией - реальная.

Рисунок 1.14

Причины отличия прямой области в теоретическом случае не учитывают сопротивление р-п областей. При больших прямых токах на различных сопротивлениях р и п областей тоже падает какое-то напряжение, на долю самого перехода остаётся меньше напряжения => ток меньше.

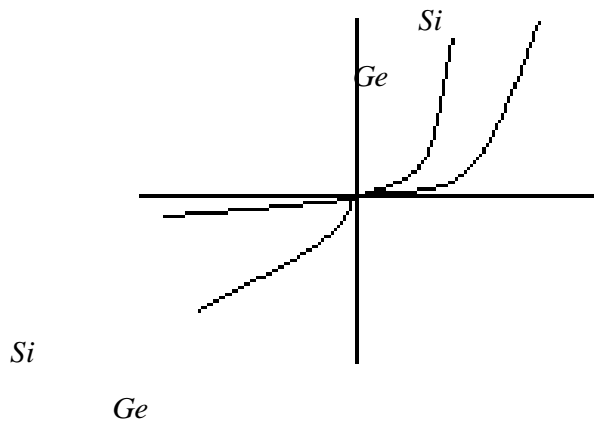


Рисунок 1.15

Когда растёт обратное напряжение реальная характеристика отличается от идеальной, так как ток обратный больше. Причины:

- 1) Термическая генерация носителей в переходе.
- 2) Образование ионной плёнки.

## Пробой диодов.

Когда  $U_{обр}$  достигает определенной величины, в диодах происходит пробой. Явление не обратимо, если возникает чрезмерным перегревом диода, который изменяет свойства **p-n** перехода. Если мощность, выделяемая на диоде, поддерживается на допустимом уровне, то диод может сохранять работоспособность и после пробоя. Пробои делятся на три вида:

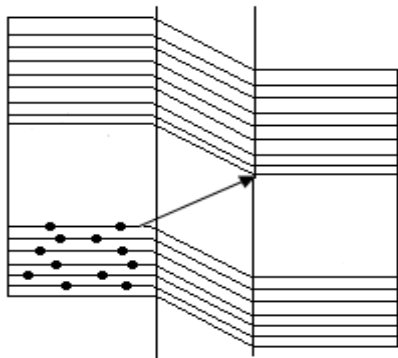
- Электрический пробой (Лавинный, обратимый)
- Туннельный пробой
- Тепловой пробой (необратимый)
- 

### Электрический пробой (Лавинный)

За счет сильного внешнего электрического поля в переходе растет количество носителей, которые под действием поля начинают двигаться. Если за время свободного пробега электрон набирает достаточную энергию, чтобы выбить другой электрон возникает ударная ионизация, то ведет к лавинному размножению носителей, поэтому этот вид пробоя еще называют лавинным. Пробой наступает при определенном напряжении  $U_{л}$ , лавинный пробой широко применяется в стабилитронах.

### Туннельный пробой:

Электрическое поле действует на атомы, придавая дополнительную энергию.



Основан пробой на квантовомеханическом, туннельном эффекте. Эффект заключается в том, что микрочастица не имея достаточной энергии для преодоления потенциального барьера имеет вероятность оказаться за барьером. Диоды, основанные на туннельном пробое, называются туннельными, на их основе делают генераторы, усилители и т. д.

Рисунок 1.16

Для диодов вводится понятие дифференциальное сопротивление:

$$R_{\partial} = \frac{\partial U}{\partial I}$$

Это означает, что сопротивление для переменного тока оказывается меньше нуля, следовательно, он может служить источником энергии переменного сигнала. Туннельный

диод применяется как для усиления, так и для генерации. Так как туннельный эффект быстродействующий, используется в ВЧ и СВЧ генераторах. В той или иной мере в диодах могут существовать и лавинный и туннельный пробой. Величина  $U_{np}$  зависит от состояния поверхности p-n перехода. Пробивное напряжение на поверхности в несколько раз меньше чем внутри.

### Тепловой пробой:

Возникает из-за разогрева p-n перехода при недостаточном охлаждении. Подводимая мощность определяется соотношением:

$$P_{подв} = U_{обр} I_{обр}$$

С ростом температуры повышается концентрация носителей в переходе. С ростом концентрации растет обратный ток ( $I_{обр}$ ), с ростом тока растет и температура. Тепло отводимое за счет теплопроводности:

$$P_{отв} = \frac{T_{п} - T_{ос}}{R_T}$$

$[R_T] = \left[ \frac{град}{Вт} \right]$  - характеристика диода.  $R_T = \frac{\delta_T}{\lambda \Pi_T}$   $\delta_T$  - толщина слоя отводящего тепло.

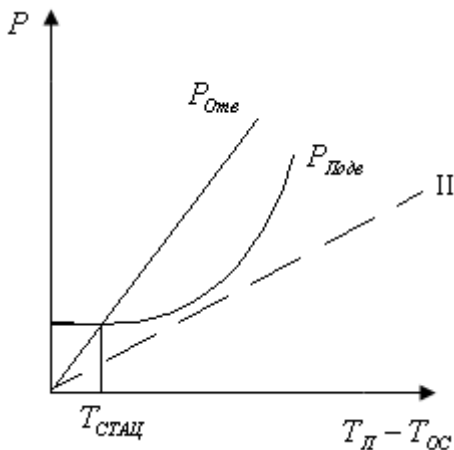


Рисунок 1.17

$\Pi_T$  - площадь теплоотвода

$\lambda$  - теплоемкость материала.

В установившемся режиме:  $P_{отв} = P_{подв}$ .

При неправильном теплоотводе может проходить, как показано на рисунка (II), то есть  $T_{стац}$  не существует.

Так как в германии энергия ионизации ниже, следовательно, температура растет быстрее.

### Полупроводниковые стабилитроны

Служит для стабилизации напряжения. Изготавливаются преимущественно из кремния, так как используется лавинный пробой, так как в германии сначала наступает тепловой пробой. Пробой наступает при токе в интервале 1мА-100мкА. Минимальный и максимальный ток - справочные параметры. Максимальный ток определяется условиями охлаждения. Всё это можно рассмотреть на рисунке 2.1

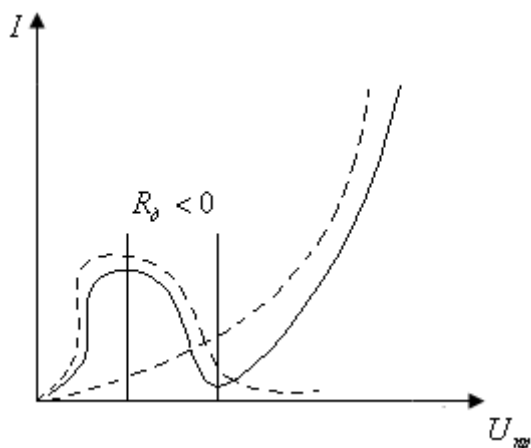
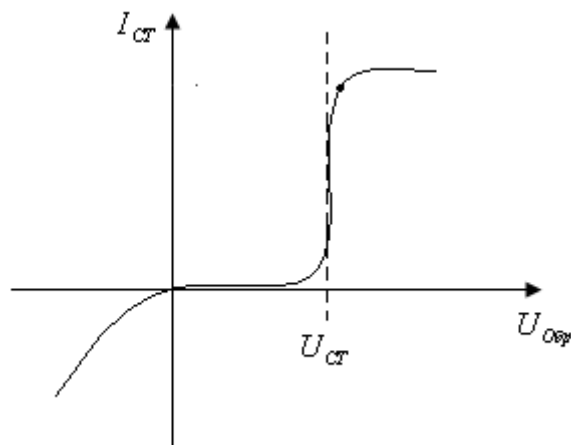


Рисунок 2.1

### Вольтамперная характеристика стабилитрона:

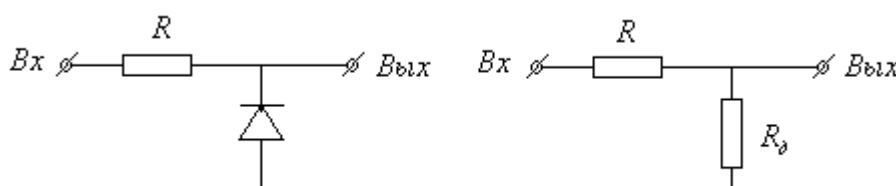


Вольтамперная характеристика стабилитрона  
Изображена на рисунке 2.2

$U_{ст}$  - напряжение стабилизации, основной параметр стабилитрона.

Рисунок 2.2

### Простейшая схема стабилизатора:



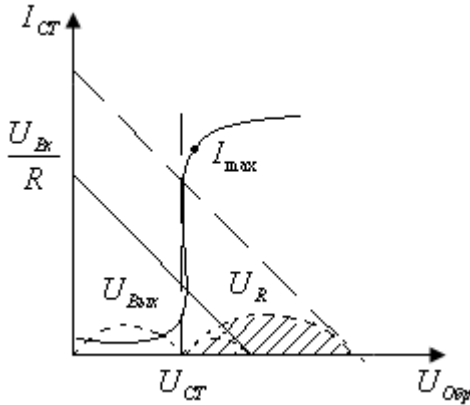
Пусть  $U_{вх}$  меняется. Их меняется, а  $U_{вых}$  остается неизменным. За счет того, что прямая



не совсем вертикальная, напряжение  $U_{CT}$  немного меняется. Чем вертикальнее проходит характеристика, тем лучше стабилизация. Мера качества стабилизатора:

$$\frac{\Delta U}{\Delta I} = r_o - \text{дифференциальное сопротивление стабилизатора.}$$

Чем меньше  $r_o$ , тем лучше стабилизирующие качества прибора.



Выпускаются стабилизаторы с  $U_{CT}$  от 3 В до 200 В. Меньше этого значения не выпускаются, так как при меньшем напряжении невозможен лавинный пробой. Эту проблему решают стабилитроны работающие на прямой ветви ВАХ.  $U_{CT}$  - достаточно сильно зависит от температуры. Используется ТКН  $= \frac{1}{U_{CT}} \cdot \frac{\Delta U}{\Delta T}$ . У

типовых стабилизаторов  $\pm 0,1\%$ , причем в зависимости от различных условий может быть отрицательным и положительным. Так как это эталонные источники, применяются различные способы термокомпенсации.

1. Последовательно ставят терморезистор.
2. Последовательно ставят диоды в прямом направлении.

### Емкость p-n перехода.

Полупроводниковый диод обладает емкостными свойствами, т.е. способностью накапливать и соответственно отдавать заряд при увеличении или уменьшении приложенного напряжения.

*Барьерная емкость.*

$$c_o = \frac{dQ}{dU} - \text{барьерная емкость}$$

$$Q \approx \sqrt{2 \cdot \varepsilon \cdot e \cdot N(\varphi_k + U)}$$

Зависимость барьерной емкости от температуры выглядит следующим образом:

$$c_o \approx \sqrt{\frac{e \cdot \varepsilon \cdot N}{4 \cdot (\varphi_k + U)}} = \frac{c_0}{\sqrt{1 + \frac{U}{\varphi_k}}}$$

С увеличением обратного напряжения ширина перехода увеличивается. Это соответствует раздвижению пластин конденсатора.

$c = \frac{\varepsilon \cdot S}{d}$ ,  $d$  (расстояние между пластинами) увеличивается, следовательно, емкость уменьшается.

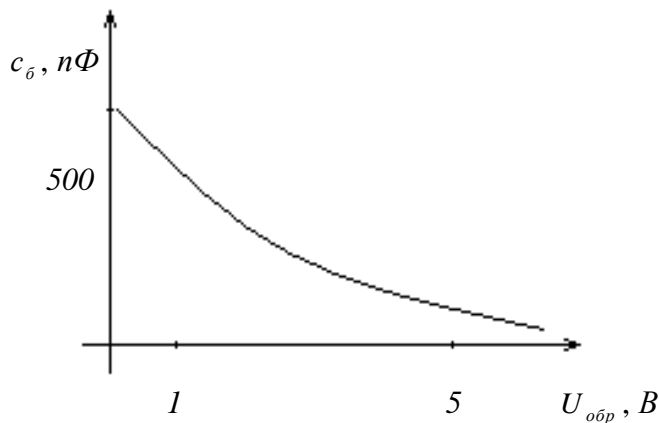
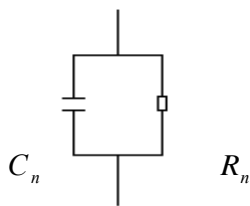


Рисунок 3.1

Барьерную емкость для плавного перехода можно найти из следующего соотношения:

$$c_{\bar{o}} = \frac{c_0}{\left(1 + \frac{U}{\varphi_k}\right)^{\gamma}}, \quad \gamma = \frac{1}{2} \dots \frac{1}{3}$$

Когда переход открыт в р и п областях значительно возрастает количество неосновных носителей заряда. Они диффундируют, следовательно, емкость является *диффузионной*. Диффузионная емкость много больше барьерной, но ее влияние на внешнюю цепь существенно меньше.



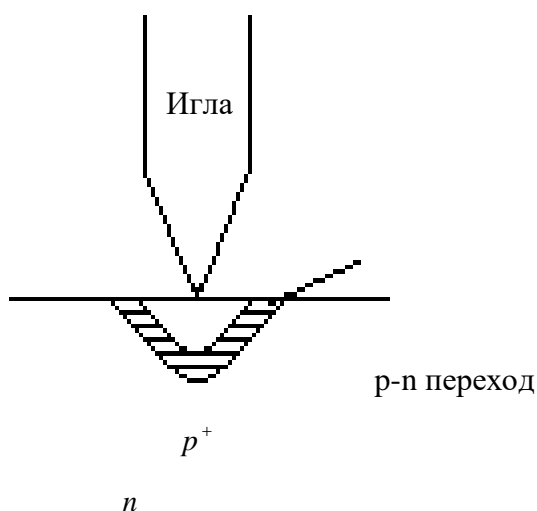
В открытом состоянии сопротивление очень мало. Сопротивление шунтирует емкость.

Поскольку емкость зависит от напряжения, то диод можно использовать как электрически управляемый конденсатор (*варикап*). Варикапы изготавливают в основном из кремния, поскольку обратные токи кремния малы, а значит их добротность лучше. У мощных варикапов ограничена мощность.

## Высокочастотные диоды.

Для того чтобы диод мог работать на высоких частотах, необходимо уменьшить его емкость – это является главным условием. Также нужно уменьшать сопротивление р и n областей и сопротивление р-п перехода в открытом состоянии. Достигается это с помощью различных конструкторских приемов и решений.

Для того чтобы уменьшить емкость уменьшают площадь р-п перехода. Одной из первых таких конструкций был точечный диод.



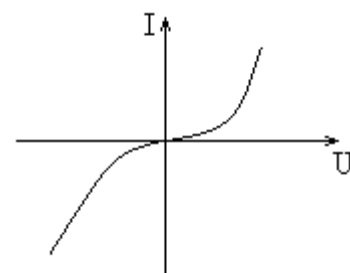
Диаметр острия иглы 20-30 мкм.

Игла содержит атомы примеси и касается  $n$  – подложки.

Площадь р-п перехода очень мала. В лучших конструкциях емкость удавалось уменьшать до долей пФ. Мощность таких диодов не велика.

*Особенности ВАХ точечного диода.*

Для точечных диодов характерен большой разброс прямого сопротивления и обратного тока. Поэтому диоды подвергают искусственному старению для выравнивания характеристик.



## Переключательные (импульсные) диоды.

Обратное сопротивление таких диодов должно быть высоким, а прямое низким. Важно чтобы время переключения из одного состояния в другое было минимальным.

Два отрицательных фактора:

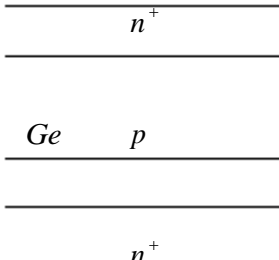
- емкость перехода
- время закрытия много больше времени закрытия

Причина второго фактора в следующем: в открытом состоянии в базе находится большой неравновесный заряд. Этот заряд придает инерционные свойства переходу. Т.е. после подачи запирающего напряжения проходит определенное время, которое необходимо для рекомбинации зарядов. Пока этот заряд существует, диод находится в открытом состоянии. Поэтому диоды изготавливают с очень тонкой базой, и ставят его таким образом, чтобы прямой ток был маленьким, а обратный большим. Это ухудшает его переключательные свойства. *Время установления прямого сопротивления* – это переходный процесс, в течение которого прямое сопротивление перехода достигает стационарного значения, после того как диод быстро включают. Парный ему показатель – *восстановление обратного сопротивления перехода*. Это процесс в течение, которого обратное сопротивление достигает стационарного значения, после быстрого переключения напряжения с прямого на обратное. В качестве переключающих диодов используют мезадиоды и планарно-эпитаксиальные диоды.

*Мезадиоды.*

По сравнению с точечными диодами скорость их переключения выше, прямой ток больше, прямое сопротивление меньше, электрическая прочность выше. У них более стабильные параметры.

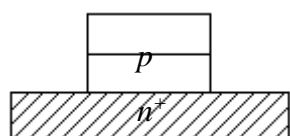
*Создание p-n перехода на примере германиевого диода.*

- 

Подвергают обработке сурьмой и золотом. При высоких температурах атомы сурьмы диффундируют.

Рисунок 4.1

- Верхний слой полностью стравливают и припаивают пластину к электроду.



электрод

Рисунок 4.2

3. Вплавляют шарик индия.

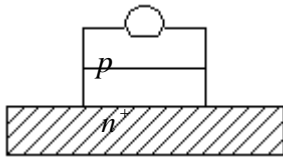


Рисунок 4.3

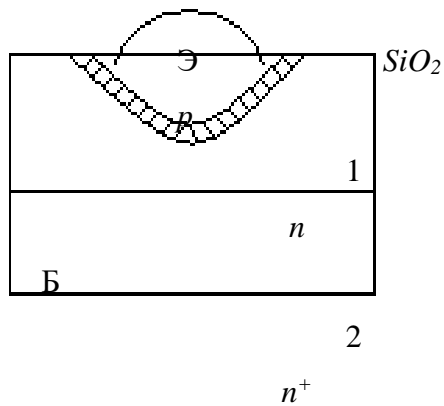
4. Подвергают очень глубокому травлению.



Рисунок 4.4

Примеси располагаются специфически. Время восстановления мало.

*Планарно-эпитаксиальные диоды.*



Э – эмиттер; Б - база

База состоит из двух слоев:

1 - низкоомная часть

2 - высокоомная часть

Рисунок 4.5

1 – подложка, на нее наносится слой 2 с помощью эпитаксиального наращивания. При таком наращивании наносимая структура начинает повторять структуру подложки. В этой подложке протравливается окно, в которое проходят атомы акцептора.

## Транзисторы

Принцип работы транзистора изображён на рисунке 5.1

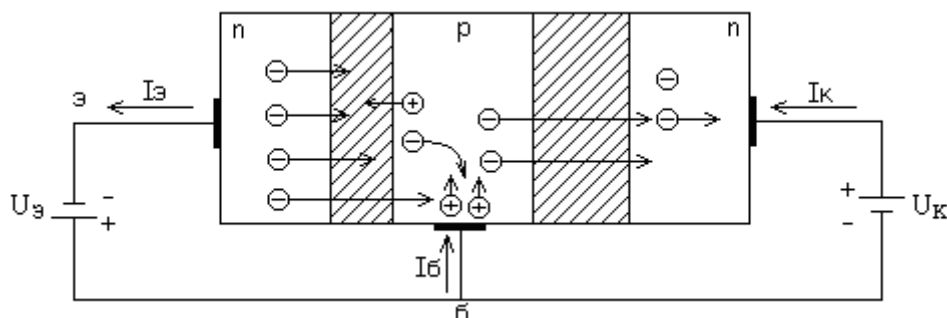


Рисунок 5.1

Транзистор имеет 4 основных рабочих режима:

- 1)  $U_{к}$  и  $U_{э} > 0$  - режим отсечки
- 2)  $U_{к}$  и  $U_{э} < 0$  - режим насыщения
- 3)  $U_{к} < 0$ ,  $U_{э} > 0$  - инверсный режим (не используется)
- 4)  $U_{э} < 0$ ,  $U_{к} > 0$  - активный режим

Эмиттер и коллектор очень сильно отличаются друг от друга (размер, легированность т.д.)

Подадим напряжение на эмиттер. Пока потенциал недостаточен, все остается неизменным, ток основных носителей течь не будет. Через КП течет небольшой ток не основных носителей.

При определенном напряжении ЭП открывается, и электроны эмиттера устремляются в область базы. Для электронов попавших в базу КП оказывается открытым, и они попадают в коллектор. Часть электронов при прохождении через базу рекомбинируют с дырками. Так как база остается электрически нейтральной, рекомбинировавшие дырки пополняются из внешней цепи.

Коэффициент передачи  $\alpha$  :

$$i_{к} = \alpha \cdot i_{э}, \text{ при этом } 0,95 < \alpha < 1.$$

Так как база тонкая, область влияния напряжения коллектора охватывает ее большую часть, поэтому электроны эмиттера почти полностью попадают в коллектор.

### Статический режим работы транзистора.

Под статическим режимом работы транзистора подразумевается безинерционное изменение тока. Мы рассматриваем одномерную модель, т.е. пренебрегаем краевыми эффектами.

Концентрация атомов примеси постоянна. Будем считать, что сопротивление областей по сравнению с сопротивлением самого перехода мало. То есть все внешние напряжения приложены непосредственно к самим переходам. При увеличении коллекторного напряжения растет толщина коллекторного перехода, и, следовательно, база становится еще тоньше, что в свою очередь отражается на коэффициенте  $\alpha$  (*коэффициент передачи тока эмиттера*).

*Ток эмиттера* (рассматриваем *n-p-n* транзистор).

$I_{\text{Э}} = I_{\text{ЭP}} + I_{\text{ЭN}}$  из формулы видно, что ток эмиттера имеет дырочную и электронную составляющие. Зависимость тока от напряжения определяется следующим образом:

$I_{\text{Э}} = I_{11} \cdot (e^{\frac{e \cdot U_{\text{Э}}}{k \cdot T}} - 1) - I_{12} \cdot (e^{\frac{e \cdot U_{\text{К}}}{k \cdot T}} - 1)$  где  $I_{11}$  - обратный ток эмиттера, при  $U_{\text{К}} = 0$ ;  $I_{12}$  - обратный ток эмиттера при  $U_{\text{Э}} = 0$ , он вызывается обратным коллекторным напряжением, создавая градиент концентраций носителей заряда у эмиттерного перехода.

Оба тока не велики и имеют порядок тока закрытого p-n перехода. Полезной для нас является электронная составляющая эмиттерного тока, поскольку она является управляемой.

Коэффициент инжекции:  $\gamma = \frac{I_{\text{ЭN}}}{I_{\text{ЭN}} + I_{\text{ЭP}}}$  Чем ближе этот коэффициент к единице, тем лучше.

Концентрация неосновных носителей заряда в эмиттере должна быть значительно меньше, чем концентрация неосновных носителей в базе. Для этого эмиттер необходимо легировать сильнее, чем базу.

*Общий ток коллектора.*

$I_{\text{К}} = \alpha \cdot I_{\text{Э}} - I_{\text{К}_0} \cdot (e^{\frac{e \cdot U_{\text{К}}}{k \cdot T}} - 1)$  где  $I_{\text{К}_0}$  - неуправляемый ток коллектора.

В рабочем режиме  $U_{\text{К}} \gg \frac{k \cdot T}{e}$  отсюда следует, что  $e^{\frac{e \cdot U_{\text{К}}}{k \cdot T}} \approx 0$ . Значит  $I_{\text{К}} = \alpha \cdot I_{\text{Э}} + I_{\text{К}_0}$ .

$I_{\text{К}} = I_{21} \cdot (e^{\frac{e \cdot U_{\text{Э}}}{k \cdot T}} - 1) - I_{22} \cdot (e^{\frac{e \cdot U_{\text{К}}}{k \cdot T}} - 1)$  где  $I_{21}$  - начальный ток коллектора, при  $U_{\text{К}} = 0$ ;  
 $I_{21} = \alpha \cdot I_{11}$ ;  $I_{22}$  - обратный ток коллектора, при  $U_{\text{Э}} = 0$ ;  $I_{22} = I_{\text{К}_0} + \alpha \cdot I_{12}$ .

### **Статические характеристики в схеме с общей базой.**

При исследовании работы транзистора в качестве независимых переменных выбирают токи.

Используются следующие виды характеристик:

*Входные характеристики*  $I_{\text{Э}} = f(U_{\text{Э}})$  при  $U_{\text{К}} = \text{const}$

*Характеристики передачи*  $I_{\text{К}} = f(I_{\text{Э}})$  при  $U_{\text{К}} = \text{const}$

$$I_{\text{К}} = f(U_{\text{Э}}) \text{ при } U_{\text{К}} = \text{const}$$

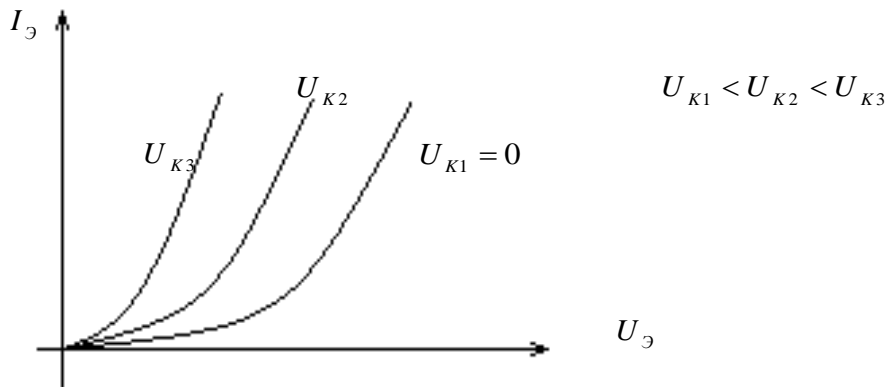
Выходные характеристики  $I_K = f(U_K)$  при  $I_{\mathcal{O}} = const$

$$I_K = f(U_K) \text{ при } U_{\mathcal{O}} = const$$

Иногда применяют характеристики обратного действия (обратной связи):  $U_{\mathcal{O}} = f(U_K)$  при

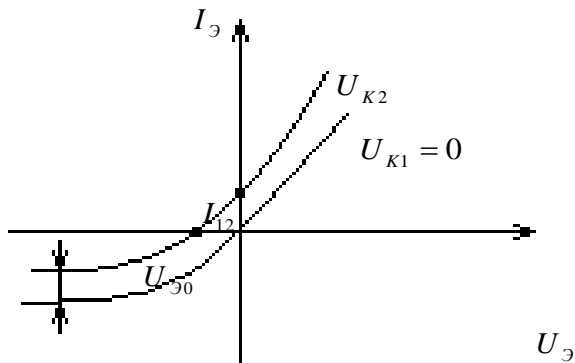
$$I_{\mathcal{O}} = const$$

**Входные характеристики.**



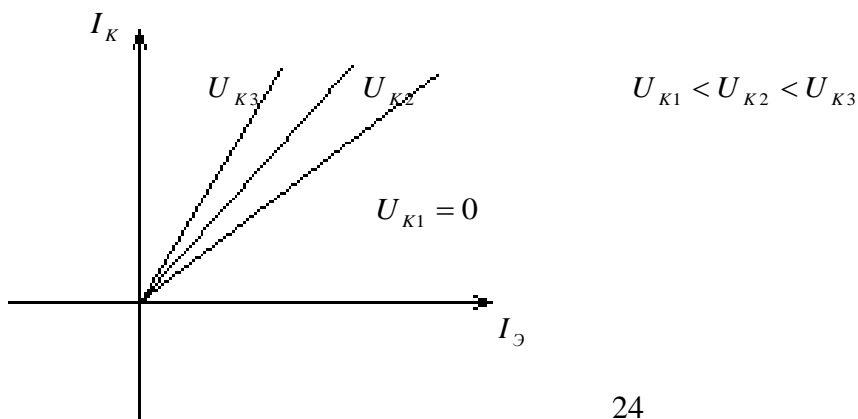
$I_{\mathcal{O}} = I_{11} \cdot (e^{\frac{eU_{\mathcal{O}}}{kT}} - 1) - I_{12} \cdot (e^{\frac{eU_K}{kT}} - 1)$  из формулы видно, что входные характеристики изменяются по экспоненте.

Начальная область характеристики имеет следующий вид:



$I_{11}$

**Характеристики управления.**

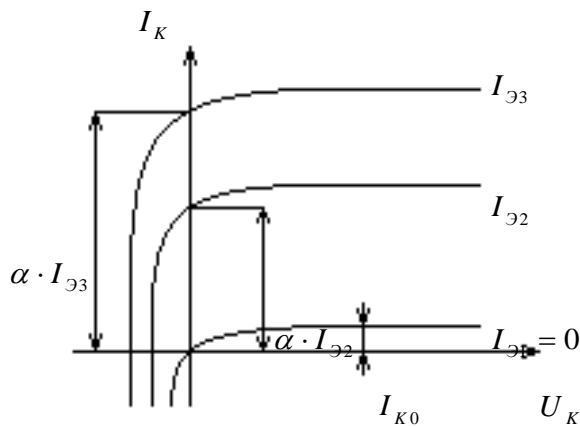




Наклон характеристик определяется коэффициентом  $\alpha$ . Отсюда следует, что угол наклона характеристик приблизительно равен  $45^\circ$ . С увеличением коллекторного напряжения характеристики немного поднимаются. С ростом коллекторного напряжения растет толщина коллекторного перехода, толщина базы уменьшается, следовательно, ток выше. Если в транзисторе большая плотность тока в базе, то сопротивлением тела базы пренебрегать уже нельзя.

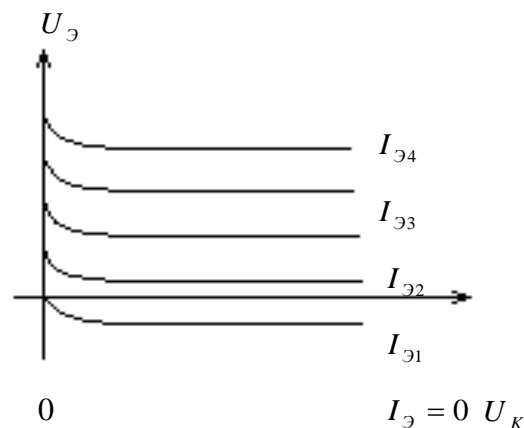
При больших плотностях тока эффективная площадь эмиттерного перехода может заметно уменьшаться. Разность потенциалов в различных точках различна. С ростом тока эмиттера инжекция уменьшается, и коэффициент передачи тока эмиттера начинает быстро падать. Чтобы уменьшить этот эффект применяются электроды специальной формы (электроды, которые имеют большое отношение периметра к площади).

### Выходные характеристики.



Теоретически  $I_K = \alpha \cdot I_E - I_{K0} \cdot (e^{\frac{e \cdot U_K}{k \cdot T}} - 1)$ . Когда  $I_E = 0$ , характеристика становится обыкновенной вольт-амперной характеристикой p-n перехода. Если  $I_E > 0$ , то в цепи продолжает течь ток.

### Характеристики обратного действия.

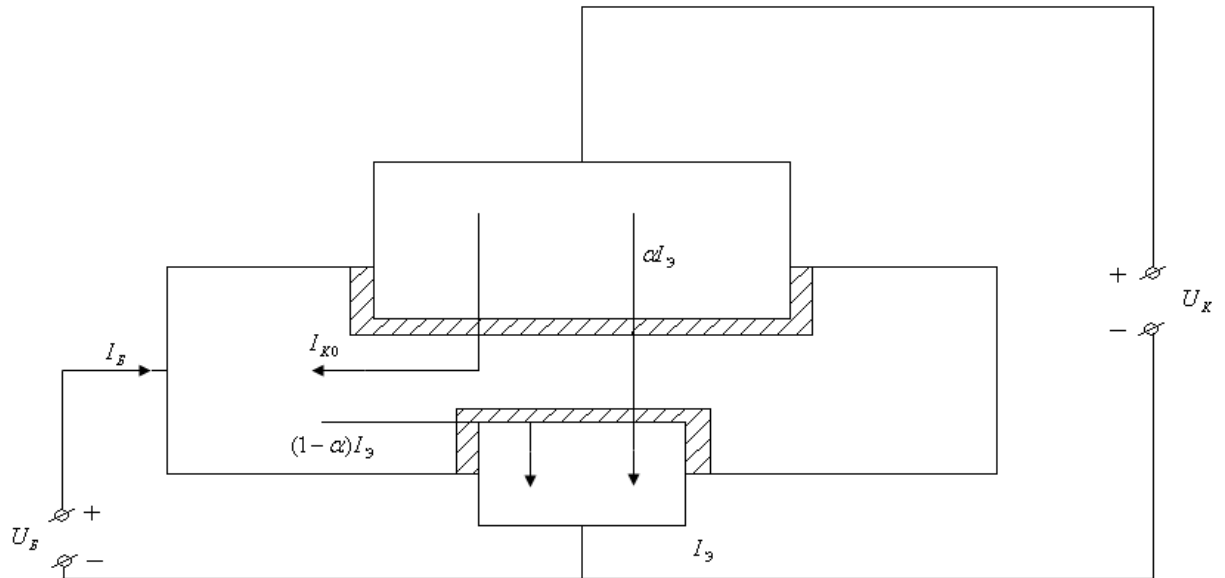


$U_E(U_K)$  при  $I_E = const$

$I_{C1} < I_{C2} < I_{C3} < I_{C4}$

Характеристики снимаются при  $I_{\mathcal{C}} = const$ , но рост коллекторного напряжения приводит к утоньшению базы, которое в свою очередь приводит к росту градиента концентраций. А он привел бы росту эмиттерного тока. Чтобы ток эмиттера не рос, снижается эмиттерное напряжение. Также существуют токи утечки по поверхности, которые могут исказить ход характеристик.

### Характеристики в схеме с ОЭ.

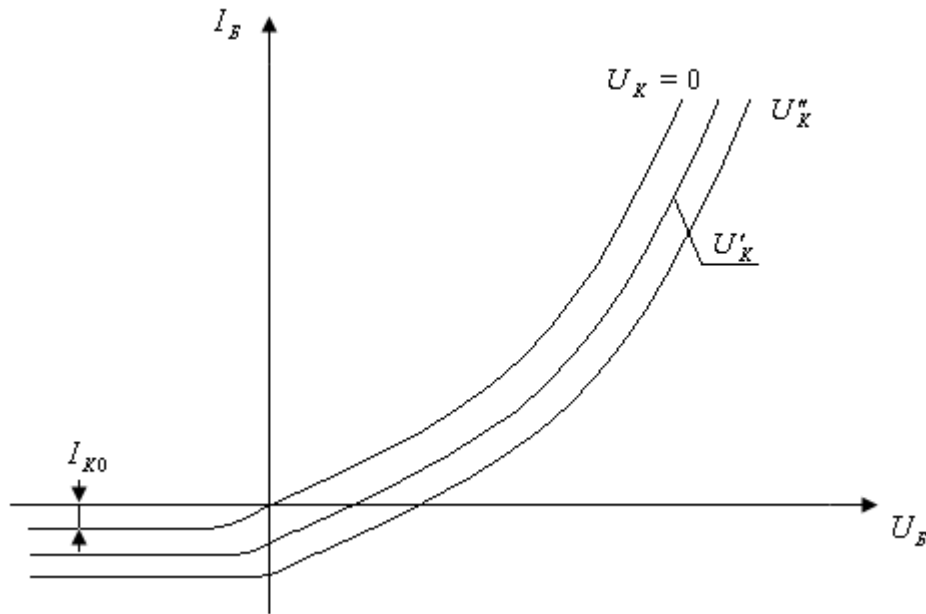


Управляющим током, в данной схеме является ток базы.

$$I_B = I_{\mathcal{C}} - I_K = (1 - \alpha)I_{\mathcal{C}} - I_{K0}$$

Если  $I_B = 0$ , тогда  $I_{\mathcal{C}} = \frac{I_{K0}}{1 - \alpha}$

Выходные характеристики в схеме с ОЭ: Зависимость тока базы от напряжения базы, при постоянном напряжении на коллекторе.



$$I_B = f(U_B) \Big|_{U_K = \text{const}}$$

$$U_{K0} < U'_K < U''_K$$

Коллекторное напряжение  $U_K$  на ток базы  $I_B$ , так как при росте коллекторного напряжения растет ток утечки. При  $U_B < 0$ , ток в цепи равен тепловому току коллекторного перехода  $I_{K0}$ .

Уравнение тока коллектора:

$$I_K = \alpha I_{\text{э}} + I_{K0} = \alpha(I_K + I_B) + I_{K0}$$

$$I_K = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{1}{1-\alpha} I_{K0}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} - \text{коэффициент передачи тока базы.}$$

Коэффициент передачи тока базы сильно зависит от коллекторного напряжения, так как при изменении коллекторного напряжения меняется толщина базы  $\delta$ .

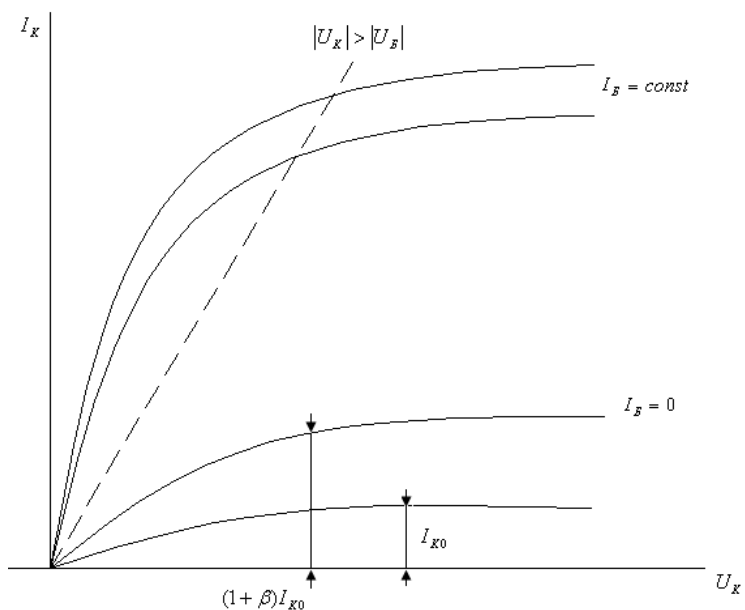
Уравнение коллекторного тока можно записать в следующем виде:

$$I_K = \beta I_B + (1 + \beta) I_{K0}$$

Или

$$I_K = I_{21} \left( e^{\frac{eU_B}{kT}} - 1 \right) - I_{22} \left( e^{\frac{-e(U_K - U_B)}{kT}} - 1 \right)$$

Выходные характеристики в схеме с ОЭ: Зависимость тока коллектора от напряжения на коллекторе при постоянном токе базы.

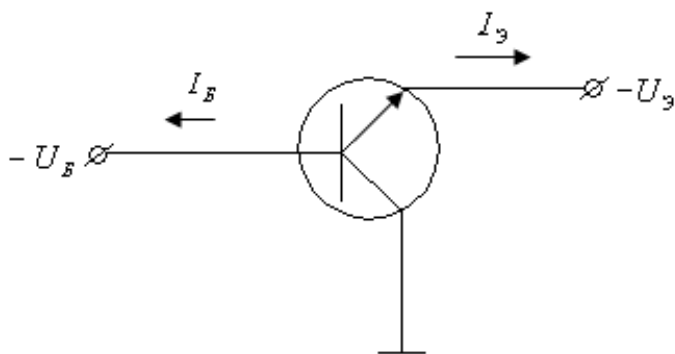


Ток закрытого транзистора:

$$I_K = \alpha I_{Э0} + I_{K0}$$

Если  $|U_K| > |U_B|$ , то открывается коллекторный переход, следовательно, резко увеличивается базовый ток, но так как ток базы поддерживается постоянным, базовое напряжение убывает. Это приводит к резкому снижению коллекторного тока.

Характеристики в схеме с ОК:



Входное напряжение:

$$U_{БК} = U_{БЭ} + U_{ЭК} = U_{БЭ} - U_{КЭ} .$$

Таким образом, входные характеристики в схеме с ОК: Зависимость тока базы от напряжения базы при постоянном напряжении коллектора.

Входные характеристики имеют тот же вид, что и в схеме с ОЭ, но их начало сдвинуто на значение  $U_{КЭ}$ .

Выходные характеристики: Зависимость тока эмиттера от напряжения на эмиттере при постоянном токе базы.

Данные характеристики так же практически совпадают с характеристиками в схеме с ОЭ.

Влияние температуры на характеристики транзистора:

Схема с ОБ:

Известно, что:  $I_K = \alpha I_{\mathcal{O}} + I_{K0}$ .

Температурный дрейф в схеме с ОБ невелик, так как относительное изменение коэффициента передачи тока эмиттера невелико.

$$\frac{d\alpha}{\alpha} \sim 0,03 \div 0,05 \%$$

Как следствие коллекторный ток мало меняется при  $I_{\mathcal{O}} = const$ .

Ток  $I_{K0}$  сильно зависит от температуры: у германия происходит удвоение тока через каждые  $9^\circ$ , а у кремния через  $6^\circ$ . Но доля этого тока невелика, поэтому он слабо влияет на характеристики.

В схеме с ОЭ:

$$I_K = \beta I_B + (1 + \beta) I_{K0}$$

$$\left. \frac{dI_K}{I_K} \right|_{OЭ} = (\beta + 1) \left. \frac{dI_K}{I_K} \right|_{OБ}$$

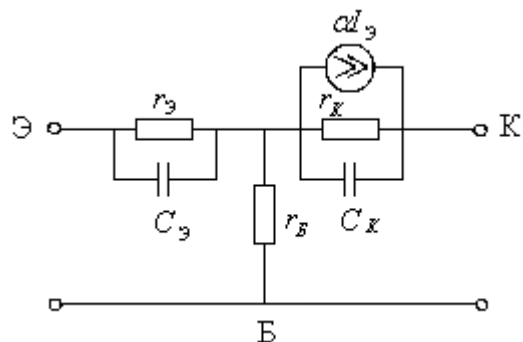
Дрейф очень велик, данная схема включения очень чувствительна к изменениям температуры.

Эквивалентные схемы транзисторов.

Так как транзистор сугубо нелинейный элемент, его описание очень усложняется.

По малому переменному сигналу:

Характеристики транзистора могут быть линеаризованы, то есть хоть транзистор нелинейный элемент, он может быть приближенно описан при помощи линейных участков цепи.



Все сопротивления дифференциальные,  $r_{\mathcal{O}}$  сопротивление эмиттерного перехода. (1-100 Ом);  $r_K$  - сопротивление коллекторного перехода. (10-100 кОм)  $r_B$  - объемное сопротивление базы (100 Ом).

$C_K, C_{\mathcal{O}}$  - емкости переходов.

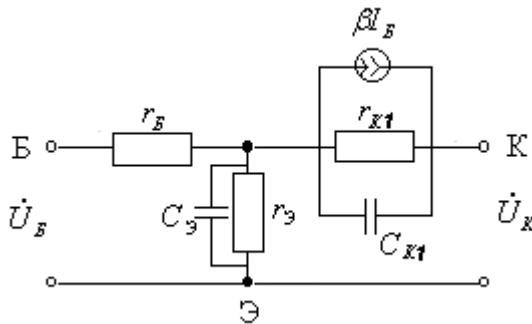
Транзистор в схеме с ОБ – трансформатор сопротивления.

$C_{\vartheta}$  шунтируется малым сопротивлением  $r_{\vartheta}$ , поэтому эту емкость часто не учитывают.

$$\alpha(j\omega) = \frac{I_K}{I_{\vartheta}} \Big|_{U_K=0} = \frac{\alpha_0}{1 + j\omega\tau_{\alpha}}$$

$\tau_{\alpha}$  - постоянная времени для схемы с ОБ, паспортный параметр транзистора. Иногда в качестве параметра дается частота  $f_{\alpha} = \frac{1}{2\pi\tau_{\alpha}}$

В схеме с ОЭ:



$r_B, C_E, r_E$  остаются неизменными.

$$r_{K1} = r_K(1 - \alpha)$$

$$C_{K1} = C_K(1 - \alpha)$$

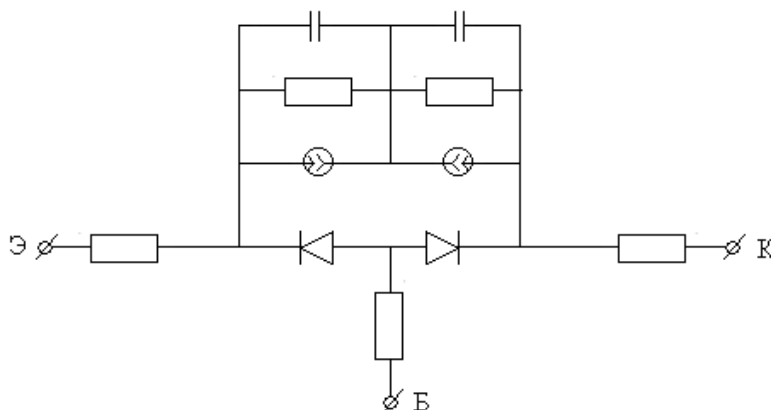
$$\beta(j\omega) = \frac{\beta_0}{1 + j\omega\tau_{\beta}}, \text{ где}$$

$$\tau_{\beta} = \frac{\tau_{\alpha}}{1 - \alpha}$$

Схема с ОЭ на высоких частотах работает хуже, чем схема с ОБ.

По этой причине на высоких и сверхвысоких частотах усилительные каскады строятся на транзисторах включенных по схеме с общей базой.

Модель транзистора Эберса – Молла

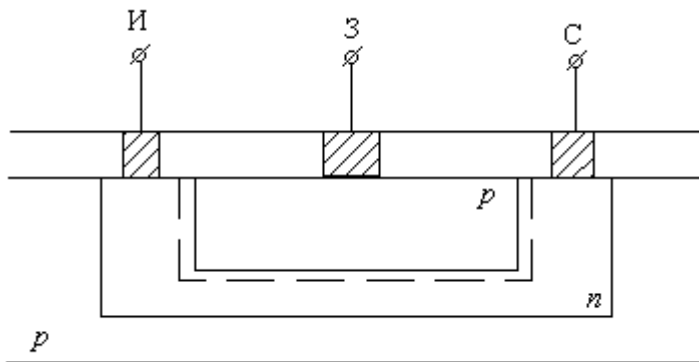


$$\alpha = \left. \frac{\partial i_K}{\partial i_E} \right|_{U_{KB} = \text{const}} = h_{21B}$$

$$\beta = \left. \frac{\partial i_K}{\partial i_B} \right|_{U_{KB} = \text{const}} = h_{21Э}$$

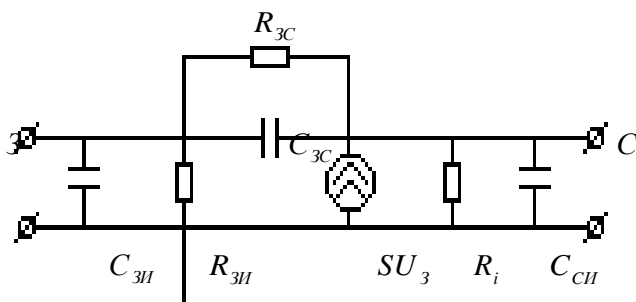
### Полевые транзисторы

Ток полевого транзистора обусловлен потоком основных носителей протекающих по приграничному слою полупроводника. Полевые транзисторы различают на три класса: С управляющим  $p-n$  переходом, с изолированным затвором (МДП-транзисторы с индуцированным и встроенным каналом).



На затвор подается напряжение, чтобы переход был закрыт, в результате, зона около перехода обеднена свободными носителями. По этой причине ток может протекать только по оставшейся части, меняя  $U_{ЗИ}$ , можно менять ширину закрытого  $p-n$  перехода, а следовательно и ширину той части канала по которой может протекать ток. В результате меняется сопротивление канала. Таким образом, полевой транзистор – управляемое сопротивление.

Основная схема включения полевых транзисторов – схема с общим истоком. Эквивалентная схема выглядит следующим образом:

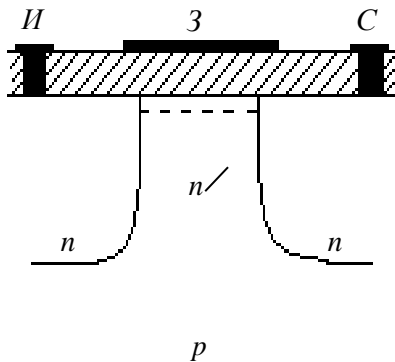


*И*

$U_3$  - управляющее напряжение затвора.  $S$  - крутизна (измеряется в единицах проводимости).  $S = \frac{\Delta i_c}{\Delta U_3}$  при  $U_c = const$ .  $R_i = \frac{\Delta U_c}{\Delta i_c}$  при  $U_3 = const$ .

### **МДП-транзисторы. МОП-транзисторы.**

Выделяют транзисторы с индуцированным каналом и со встроенным каналом. Рассмотрим полевые транзисторы с индуцированным каналом.

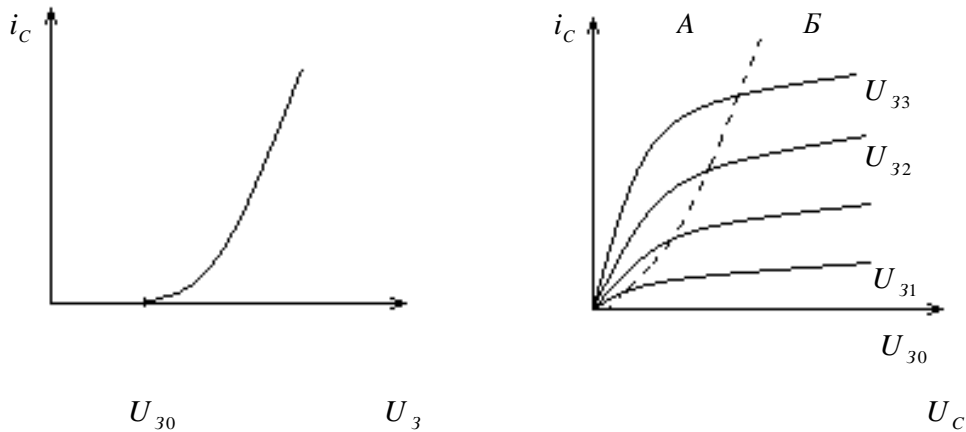


#### *Принцип работы:*

Если на затвор не подано напряжение, то один из p-n переходов оказывается закрытым. Ток между крайними электродами не течет. При подаче на затвор положительного напряжения и постепенном его увеличении, это напряжение отталкивает дырки в глубь вещества и притягивает в приповерхностную область электроны. Постепенно вдоль поверхности диэлектрика образуется тонкий n-слой, который называется инверсным. Начиная с того момента, когда инверсный слой становится сплошным, между крайними электродами начинает течь ток. По мере увеличения напряжения затвора ток увеличивается.



*ВАХ имеет вид:*



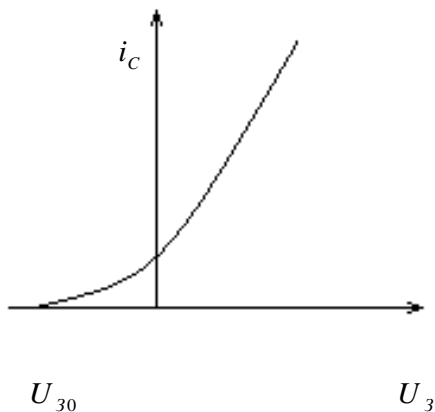
При этом  $U_{30} < U_{31} < U_{32} < U_{33}$ .

*Особенности характеристик:*

По управляющему сигналу имеется некоторая не чувствительная область характеристики – «пятка». В области насыщения (область Б) характеристики идут круче. Имеется достаточно большая область А, где наблюдаются триодные характеристики, т.е. сильная зависимость от  $U_3$  и от  $U_C$ .

Рассмотрим полевые транзисторы со встроенным каналом.

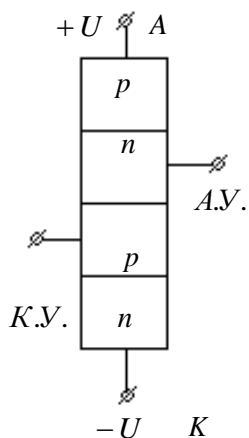
Приповерхностная область n (область вблизи диэлектрика) введена заранее. Это делают для ликвидации «пятки».



Канал может быть и р-типа, но по сравнению с электронами дырки менее подвижны, поэтому высокочастотные свойства МДП-транзисторов с р-каналом значительно хуже. Входное сопротивление таких транзисторов по сравнению с транзисторами с р-n затвором

на порядок выше ( $\approx 100 \text{ МОм}$ ). К достоинствам можно отнести возможность усиления маломощных сигналов. К недостаткам – большую чувствительность к помехам и наводкам.

### Тиристоры.

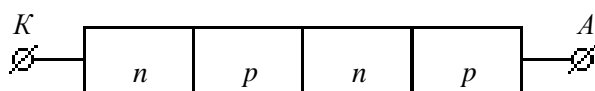


К.У. – катодное управление

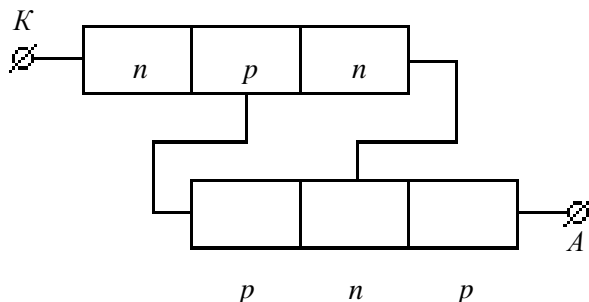
А.У. – анодное управление

В данном случае управление может быть либо катодным, либо анодным.

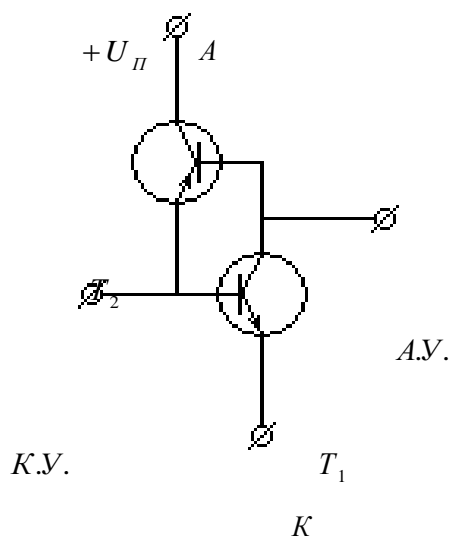
При такой ориентации напряжения центральный p-n переход оказывается закрытым. Но если временно подать управляющее напряжение, открывающее центральный переход (положительное на катодное управление или отрицательное на анодное управление), то центральный переход открывается. Развивается лавинообразный процесс, открывающий весь тиристор. После этого он остается открытым независимо от напряжения на управляющем электроде. Управляющим напряжением можно только открыть тиристор, закрыть тиристор им нельзя.



Данный тиристор можно представить в виде двух транзисторов, соединенных следующим образом:



Это соединение можно представить в виде следующей схемы:

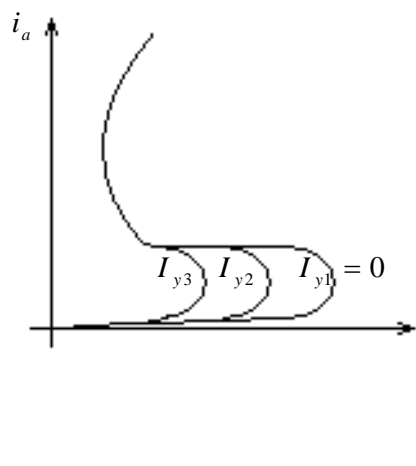


$U_{II}$  - напряжение питания

$T_1$  и  $T_2$  - первый и второй транзистор соответственно

В первый момент времени закрыты оба транзистора. Чтобы открыть транзисторы, на катодное управление подаем небольшое положительное напряжение. Первый транзистор начинает приоткрываться, отрицательное напряжение через его эмиттер и коллектор начинает поступать на базу второго транзистора. Поскольку второй транзистор является транзистором р-п-р типа, то отрицательное напряжение на базе для него является открывающим. Он тоже начинает приоткрываться. В результате положительное напряжение с анода через второй транзистор поступает на базу первого транзистора. Первый транзистор открывается еще больше и т.д. В результате развивается лавинообразный процесс, открывающий оба транзистора. Закрыть их можно, сняв напряжение питания.

*ВАХ тиристора.*



$$I_{y1} < I_{y2} < I_{y3}$$

ВАХ тиристора похожа на ВАХ диода.

*Заключение.* Знакомясь со сведениями изученной темы студент изучает основные типы активных дискретных элементов диодов, транзисторов и тиристоров, включая их отдельные виды. Рассмотренные вопросы имеют определяющее значение в понимании принципов работы узлов и установок, созданных на принципах дискретной электроники, а также особенностей функционирования интегральной микросхемотехники.

***4. Технологические основы построения интегральных микросхем. Типы интегральных микросхем и особенности их функционирования. Перспективные пути развития интегральной схемотехники.***

- 4.1. Интегральные микросхемы.
- 4.2. Классификация ИМС и система условных обозначений.
- 4.3. Классификация микросхем
- 4.4. Особенности полупроводниковых ИМС.
- 4.5. Микросхемы на МДП-структурах.
- 4.6. Многокристальные ИМС.
- 4.7. Пленочные и гибридные ИМС.
- 4.8. Микросборки.
- 4.9. Формирование структуры ИМС.
- 4.10. Особенности реализации радиоэлектронных схем на ИМС.
- 4.11. Резисторы в полупроводниковых ИМС.
- 4.12. Изготовление полупроводниковых конденсаторов.

**Интегральные микросхемы.**

Общеприняты два метода изготовления

Полупроводниковые

Пленочные

1. Локальная обработка участков полупроводниковой подложки с целью придания им свойств отдельных радиоэлементов. Все элементы и межэлементные соединения выполняются в приповерхностном объеме подложки. Особенностью технологии является возможность группового представления.
2. Метод основан на послойном нанесении тонких пленок на основание (подложку), которая чисто пассивная.

Основной недостаток первого: трудность выдержать требуемые параметры.

Основной недостаток второго: невозможность создания активных элементов в виде пленок.

При комбинации этих методов создаются гибридные микросхемы.

Перспективным является метод функциональной электроники. Он заключается в создании приборов реализующих функции сложных электронных схем не за счет соединения элементов, а за счет использования специальных физических явлений.

Совершенствуются ИМС по направлениям:

1. Прогресс электронного материаловедения
2. Развитие технологического и контрольного оборудования
3. Овладение новыми технологиями
4. Переход к электродинамическому подходу в проектировании микросхем.

Определение: Интегральная микросхема - микроэлектронное изделие, выполняющее определенные функции по преобразованию и обработке сигналов, имеющее высокую плотность упаковки элементов и компонентов, которые с точки зрения требований к испытаниям, приемке и эксплуатации рассматриваются как единое целое.

Элемент – часть ИМС реализующая функцию какого либо простого радиоэлемента, и неотделимая от кристалла ИМС.

Компонентом ИМС можно отделить от ИМС, перед созданием ИМС он был самостоятельным комплектующим изделием.

Технологии:

Самой распространенной является планарная технология, но она ограничивает микроминиатюризацию.

Особенности:

Диффузионные процессы нанесения вещества достаточно длительны, причем в течении этого времени приходится поддерживать высокую температуру ( $\sim 1000^{\circ}\text{C}$ ) с точностью до долей градуса в течении многих часов.

Большее число разнотипных технологических операций и трудность промежуточного контроля.

Необходимость многократного совмещения различных масок и шаблонов с большей точностью.

Явление дифракции света ограничивает предельные размеры элементов, то есть ограничивается применение оптики.

Основные классы физико-химических процессов при изготовлении ИМС.

Процессы нанесения вещества в виде слоев и пленок на поверхность твердой подложки.

Процессы удаления вещества

Перераспределение атомов примесей в объеме подложки.

Металлические пленки как конструктивный элемент ИМС.

В микроэлектронике выполняются следующие элементы:

Токопроводы и электроды

Пленочные резисторы

Вспомогательные элементы

Металлы должны удовлетворять следующим требованиям:

Высокая удельная проводимость, высокая адгезия, ТКЛР близкий к ТКЛР подложки.

Используются: *Au, Ni, Cu, Al, Mo, Pd*.

Для резистивных пленок используются сплавы (нихром, тантал + хром и т. д.)

Металлические пленки, как правило, получают термовакuumным напылением.

Ионно-плазменное распыление (для любого металла)

При нанесении пленки на поверхность, проводимость возникает не сразу, а зависит от некоторых условий. При попадании на подложку атомы сохраняют некоторое время подвижность, поэтому они некоторое время перемещаются по поверхности подложки, в результате образуются микроостровки и электропроводность возникает только тогда, когда микроостровки начинают смыкаться. Такая толщина называется критической. После напыления подложку прогревают, чтобы снять остаточное напряжение.

Диэлектрические пленки

Используют в качестве изоляционных слоев и защитных покрытий.

Основные изоляционные материалы:  $SiO_2$ ,  $Sb_2S_3$ ,  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $GeO$ ,  $Ta_2O_5$ ,  $Al_2O_3$  и другие.

Кроме того, используются специальные стекла, кварцевые покрытия и полимеры.

Методы получения

1. Термовакuumное напыление
2. Реактивное ионно-плазменное распыление
3. Распыление в высокочастотном разряде
4. Термическое окисление
5. Анодное окисление металлических пленок наносимых на подложку
6. Химическое осаждение из газообразной фазы
7. Получение из пленок из растворов

Независимо от способа получения все пленки характеризуются следующими параметрами:

- Диэлектрическая проницаемость
- Тангенс угла диэлектрических потерь
- Пробивное напряжение
- Высота потенциального барьера на границе с металлическими проводниками.

## **Классификация ИМС и система условных обозначений.**

Для классификации ИМС (интегральных микросхем) используются следующие критерии:

- степень интеграции ИМС
- физические принципы работы активных элементов
- выполняемая функция
- быстродействие
- потребляемая мощность
- применяемость в аппаратуре

Наиболее распространена классификация по конструктивно-технологическим признакам, поэтому используется такой конструктивный признак как тип подложки. Соответственно выделяют ИМС с активной подложкой и ИМС с пассивной подложкой.

Для защиты от внешнего воздействия все микросхемы подвергаются герметизации. По типу герметизации микросхемы делятся на:

- корпусные
- бескорпусные

К корпусным относятся микросхемы, кристаллы которых помещаются в корпуса, где находится либо инертный газ, либо вакуум. Сюда же относятся ИМС, кристаллы которых опрессованы в пластмассу. В бескорпусных микросхемах кристаллы покрыты либо лаком, либо специальными смолами.

По функциональному назначению микросхемы делятся на:

- аналоговые
- цифровые
- аналого-цифровые (комбинированные)

По применяемости в аппаратуре:

- специальные (по заказу потребителя)
- коммерческие

Также по применяемости микросхемы можно подразделить следующим образом:

- массово изготавливаемые
- изготавливаемые крупными сериями
- изготавливаемые мелкими сериями
- индивидуального изготовления

Для построения РЭА (радиоэлектронной аппаратуры) микросхемы объединяют в серии, т.е. в функционально полные системы. *Серия ИМС* – совокупность микросхем, выполняющих

различные функции, имеющих единую конструктивно-технологическую основу и предназначенных для совместного использования в РЭА. *Типоминал* – ИМС, имеющая конкретное функциональное назначение и свое условное обозначение. *Тип ИМС* – совокупность типоминалов, выполняющих схожие функции.

Состав серии определяется удобством изготовления отдельных микросхем. В новую серию заключаются новые идеи (питание, технологии и др.). Внутри одной серии микросхемы удовлетворяют одинаковым требованиям. То есть из них можно собирать сложные системы, не задумываясь о совместимости. Общие параметры: напряжение питания, согласование входных и выходных сопротивлений. Микросхемы разных серий, как правило, несовместимы.

### **Классификация микросхем**

До сих пор не существует международной классификации. Рассмотрим отечественную классификацию микросхем:

Классификация состоит из букв и цифр:

I. 1-я цифра: 1,5 – полупроводниковые, корпусные.

7 – бескорпусные

2,4,6,8 – гибридные микросхемы

3 – все прочие

II. Две или три цифры: порядковый номер разработки

III. Две буквы: 1-я буква это код группы, вторая буква - пояснение внутри группы.

Группы делятся по функциям:

Г – генераторы

Д – декодеры

К – коммутаторы и ключи

Л – логические элементы

Х – многофункциональные

М – модуляторы

Н – наборы элементов

П – преобразователи

Е – источники питания

Б – схемы задержки

С – селекторы

Т – триггеры



У – усилители

Ф – фильтры

А – формирователи

Р – запоминающие устройства

И – арифметико-логические

В – процессоры

2-я буква:

Примеры: ФВ – фильтр высокой частоты

ФЕ – полосовые фильтры

ФР – реджекторные фильтры

Эти две буквы и есть типонаминал.

IV. 1 или 2 цифры: Порядковый номер ИМС в данной серии.

Иногда в конце стоит буква:

- технологический разброс параметров

Иногда в начале стоит одна или две буквы:

К – коммерческое использование. КМ – в керамическом корпусе. КБ – бескорпусной вариант.

Для бескорпусных ИМС через дефис есть продолжение, еще цифра. Она обозначает модификацию конструктивного использования:

1 – с гибкими выводами

2 – с ленточными выводами

3 – с жесткими выводами

4 – разделенные на общей пластине

5 – разведенные, но без потери взаимной ориентации.

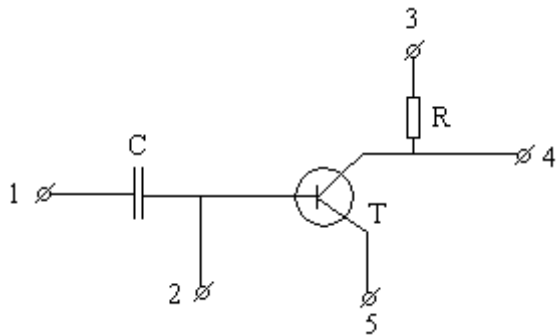
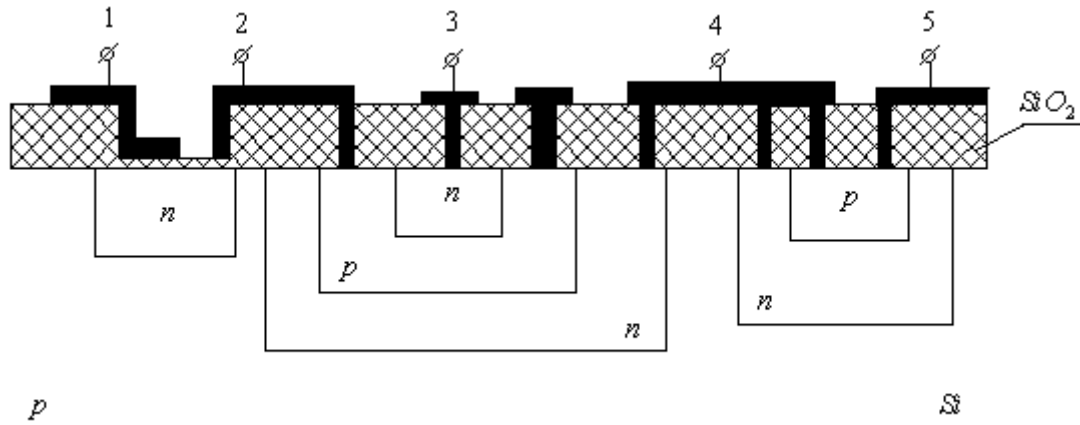
6 – вообще без выводов, с контактными площадками

   ?  ?                  ?                  ?  ?                  ?  
|Б|Б|Ц|Ц|Ц|Ц|Б|Б|Ц|Ц|Б| — |Ц|

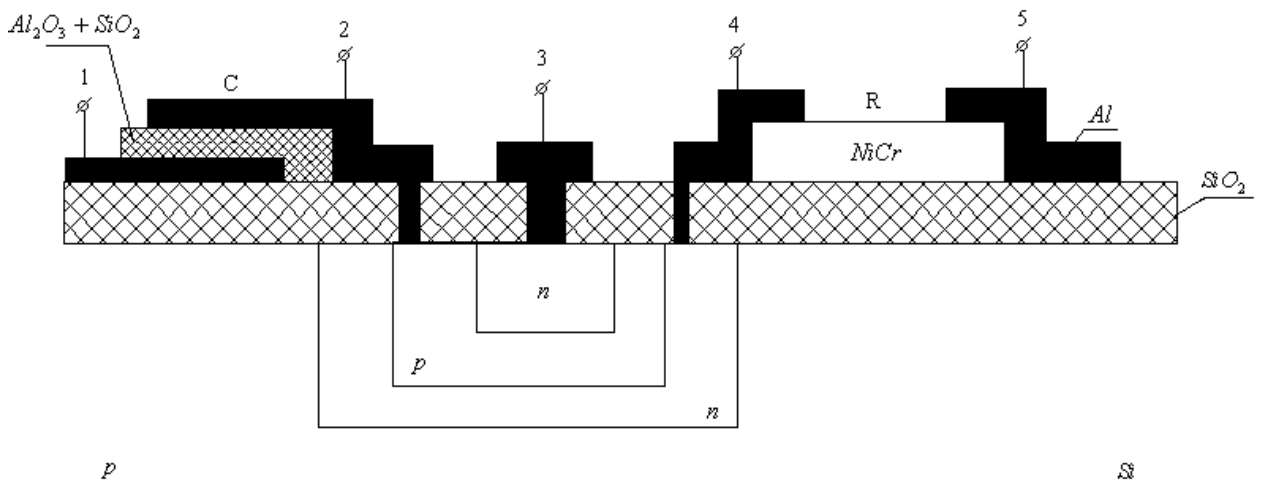
### Особенности полупроводниковых ИМС.

Все ИМС изготавливаются по планарной технологии, одновременно, в одном технологическом цикле, на одной подложке. Среди микросхем существует четыре типа:

1. Планарно-диффузионные микросхемы на биполярных структурах (однокристалльные). С помощью однотипной технологии изготавливаются транзисторы, резисторы и конденсаторы.

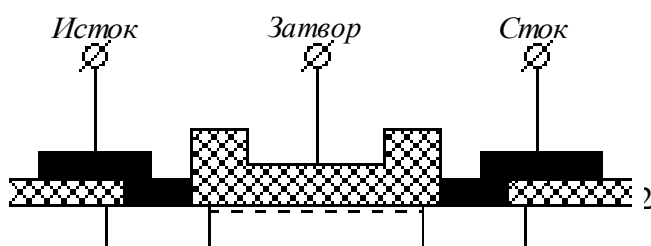


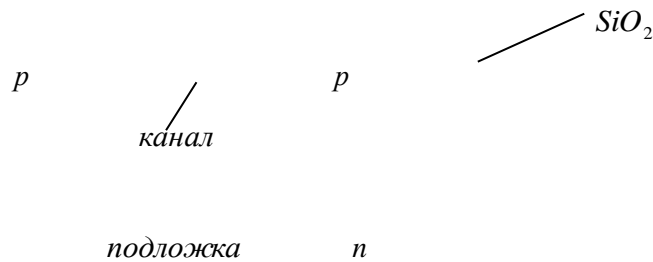
2. Совмещенные ИМС



Более точные номиналы резисторов и конденсаторов.

#### 4.5. Микросхемы на МДП-структурах.





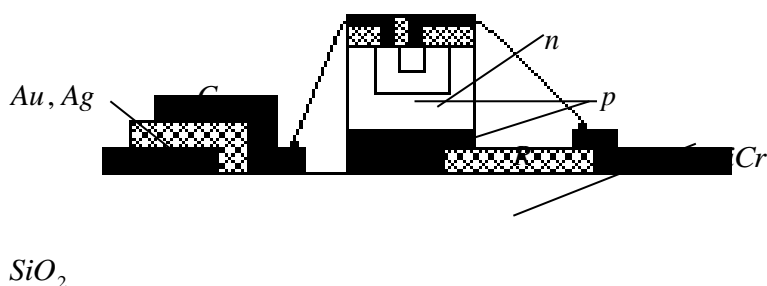
Микросхемы на МДП-структурах можно использовать как в качестве активных элементов (транзисторов), так и в качестве пассивных элементов (резисторов). Это обеспечивает максимальную повторяемость и технологичность. Микросхемы на МДП-транзисторах имеют большую степень интеграции.

### Многокристалльные ИМС.

Многокристалльная ИМС состоит из отдельных компонентов, расположенных на общей подложке, и соединенных либо печатными проводниками, либо маленькими проводами. Изготовление таких ИМС требует меньшего числа технологических операций. Поскольку сборку таких ИМС сложно автоматизировать, то их изготовление получается дорогим. На многокристалльных ИМС можно реализовать более качественные характеристики, потому что в них меньше паразитных связей.

### Пленочные и гибридные ИМС.

В пленочных ИМС все элементы изготавливаются в виде пленок различной конфигурации. В зависимости от толщины выделяют тонкопленочные и толстопленочные ИМС. Все элементы наносятся через набор трафаретов. Активные элементы, в отличие от пассивных, в виде пленок изготавливать пока не научились. Поэтому активные элементы находятся в схеме в виде навесных бескорпусных элементов. Такая технология называется гибридной.



Подложка в данном случае выполняет исключительно технологические, а не электрические функции. Активные элементы выполняются бескорпусными. Общим корпусом закрывают всю конструкцию. При толстопленочной технологии некоторые пассивные элементы изготавливают отдельно, а затем крепят на общей подложке.

*Достоинства и недостатки.*

Достоинства:

- небольшая сложность и стоимость оборудования, и малые затраты на его эксплуатацию
- лучшие возможности для массового производства
- возможность изготовления резисторов в широком диапазоне номиналов (в том числе и высокоомные)
- большая точность изготовления
- возможность создания новых классов оборудования при коротком цикле разработки
- сравнительно высокий процент годных микросхем при выходе с производства
- возможность в одной микросхеме компоновать разнородные активные элементы

Недостатки:

- невозможность организовать очень большую степень интеграции

### **Микросборки.**

Микросборками называют изделия, выполняющие определенную функцию, и состоят из элементов и компонентов микросхем в определенном сочетании. По технологии микросборки похожи на гибридные микросхемы, но микросхема – законченное изделие общего применения, а микросборка – полуфабрикат для конкретной аппаратуры.

Компоненты ГИМС

Навесные элементы:

1. Микроминиатюрные транзисторы
2. Микроминиатюрные диоды
3. Бескорпусные полупроводниковые микросхемы

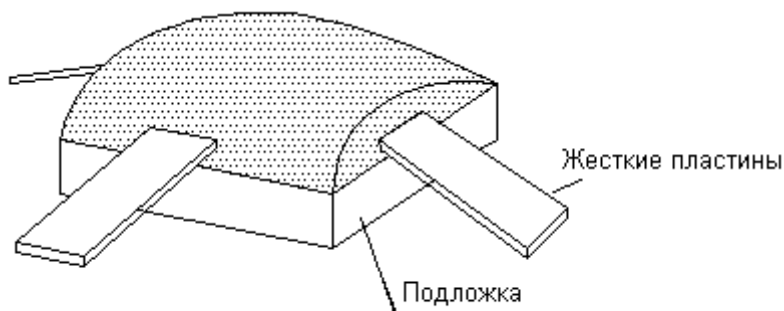
Доминирующими являются три вида конструкций, отличающихся по выводам:

1. С гибкими выводами

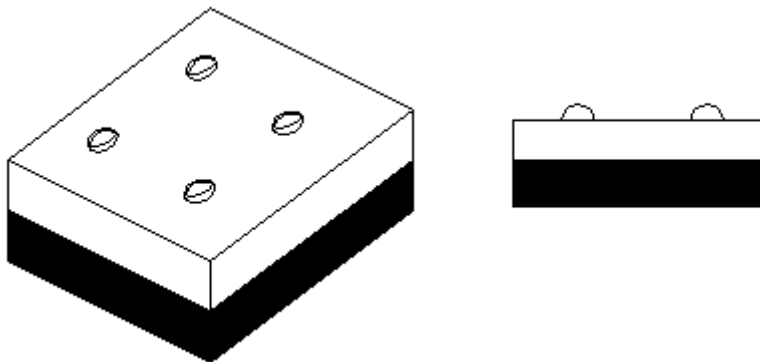


Из-за такой конструкции трудно автоматизировать сборку, поэтому подобная конструкция применяется редко.

2. С балочными выводами:



3. С шариковыми выводами:



Основным недостатком второго и третьего является то, что контактные площадки занимают много места.

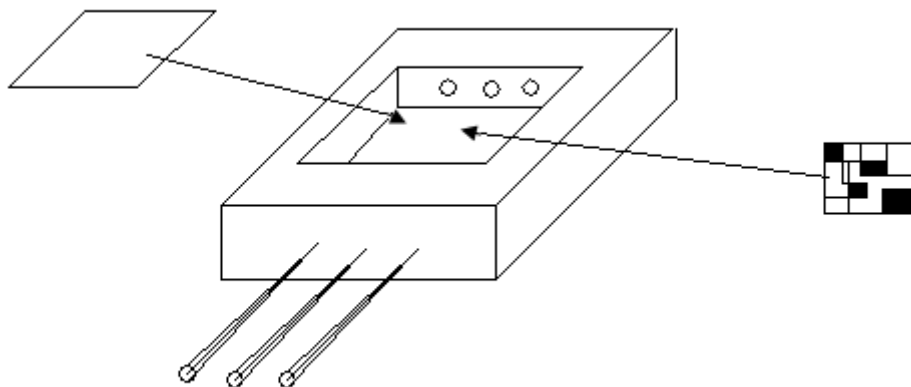
## Корпуса ИМС

Требования к корпусам:

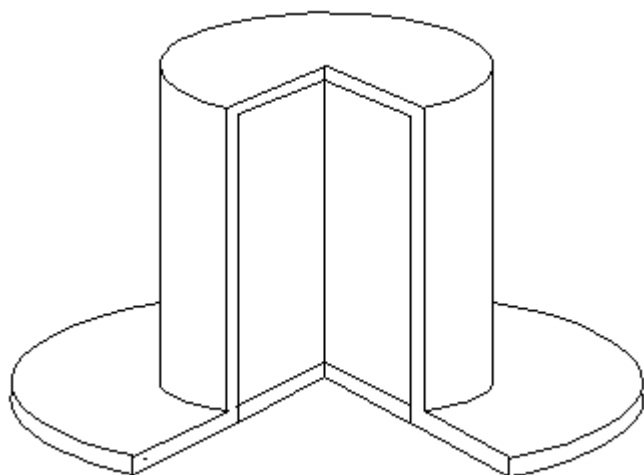
1. Достаточная механическая прочность
2. Малые размеры и форма удобная для соединения с другими деталями.
3. Паразитные индуктивности и емкости как внутри микросхемы, так и выводов должны быть минимальными.
4. Минимальное тепловое сопротивление

Конструкции:

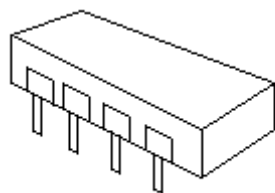
1. Плоский корпус:



2. Круглометаллический корпус

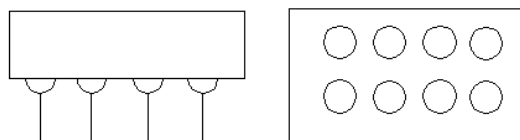


3. Пластмассовый корпус:

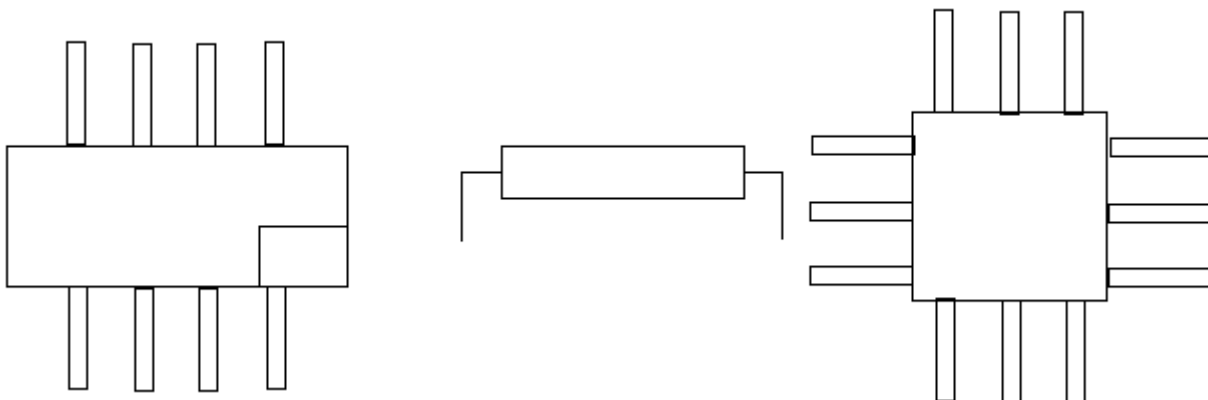


В системе условных обозначений корпуса делятся на 4 типа:

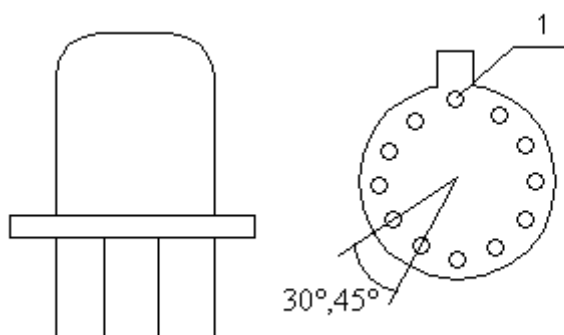
1. Ножки направлены вниз:



## 2. Ножки в стороны:

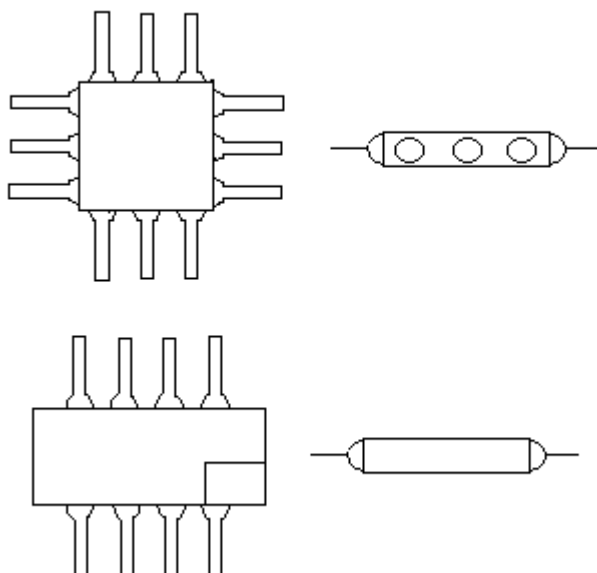


## 3-й тип:



Выступ на против первой ножки. Расстояние между ножками 2,5 ; 1,25; 0,625 мм.

## 4-й тип:



## Классификация корпусов:

1-я цифра: от 1 до 4 – номер корпуса

2 и 3 цифры: от 0 до 99 – типоразмер (номер разработки)

Две или три цифры: количество ножек.

Через дефис: модификация

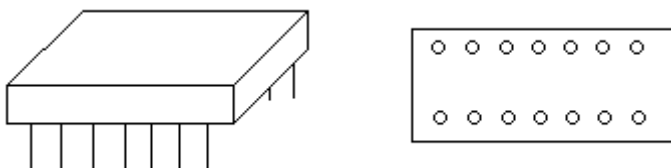
Таким образом, обозначение корпуса выглядит следующим образом:



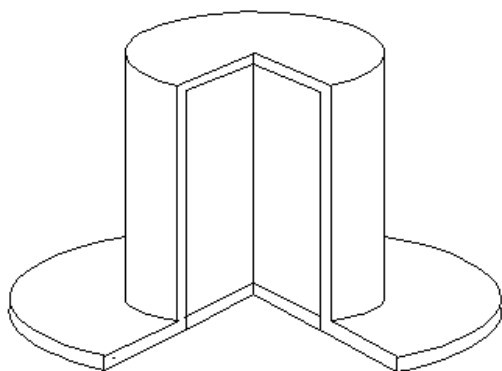
Корпуса ГМС

Выделяют три вида корпусов:

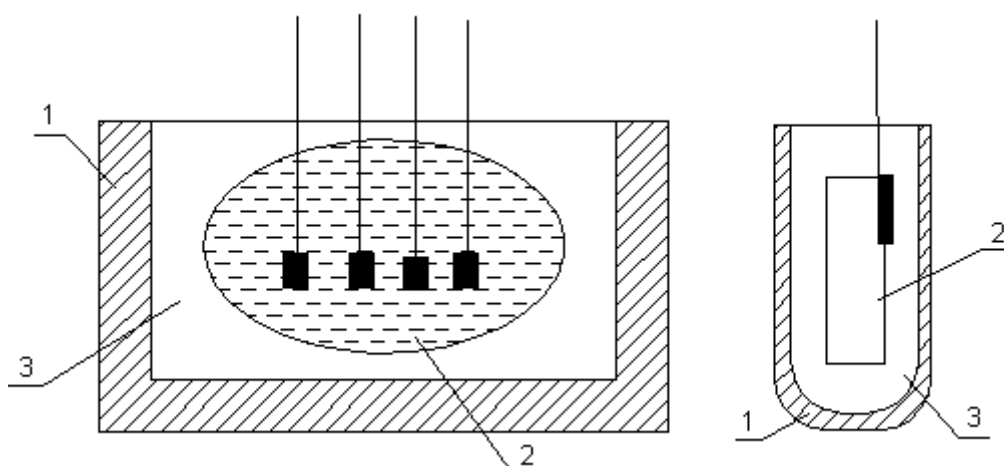
1. Металлостеклянный квадратный корпус:



2. Шляпка



3. Пенальный корпус



1- металлический пенал

2- подложка с кристаллом, к которому проведены выводы

3- компаунд



## **Формирование структуры ИМС.**

Формирование структуры ИМС основано на локальной обработке с помощью контактных либо съемных масок. Контактные маски непосредственно контактируют с обрабатываемой поверхностью, съемные маски находятся на некотором расстоянии. Съемные маски наносятся с помощью литографии. Литография основана на свойствах вещества (фоторезист или просто резист):

- изменять свои характеристики под воздействием облучения
- быть не чувствительным к другим воздействиям на кристалл

*Этапы литографии:*

- на поверхность кристалла наносится резист
- через маску или трафарет он облучается, при этом облученные участки изменяют свой химический состав
- кристалл подвергается травлению, и облученные участки удаляются (в зависимости от механизма могут растворяться не облученные участки)
- на поверхности кристалла образуется рисунок, соответствующий топологии схемы
- образец подвергается легированию
- легированными оказываются те участки поверхности, где удален фоторезист
- после этого удаляется сам фоторезист

Подобная операция может производиться многократно с разными трафаретами. Через маски можно производить не только легирование, но и наносить пленочные структуры. Данная последовательность операций достаточно длительна, поэтому в процессе массового изготовления маски получают с помощью съемных трафаретов.

В зависимости от типа облучения фоторезиста выделяют следующие виды литографии:

- оптическая (чаще всего ультрафиолетовая)
- рентгенолитография
- электронно-лучевая литография
- ионно-лучевая литография

Минимальные размеры микродеталей рисунка определяются длиной волны излучения.

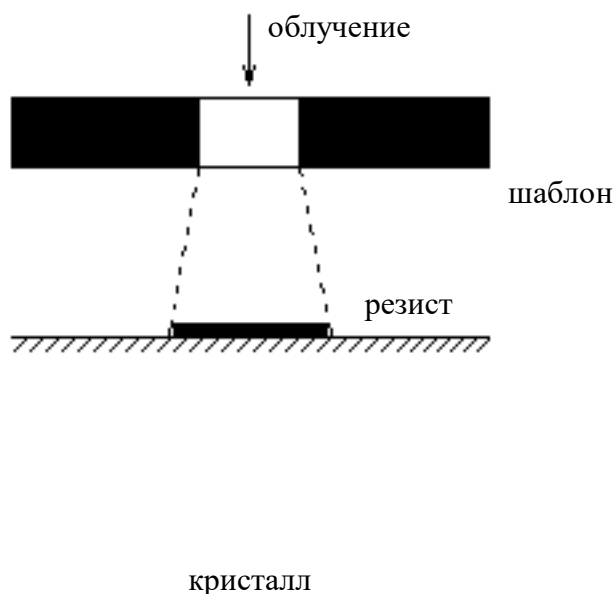
Рентгенолитография позволяет создавать наиболее маленькие рисунки.

*Достоинства литографии:*

- гибкость метода (от рисунка к рисунку можно перейти, просто сменив шаблон)
- хорошая повторяемость результатов
- универсальность для разнородных технологических процессов
- хорошая производительность из-за групповых процессов обработки

### Недостатки литографии:

- жесткие требования к точности шаблонов
- высокие требования к качеству фоторезиста (чем он толще, тем легче выдерживает химическую обработку, но с другой стороны фоторезист не должен быть очень толстым)



- необходимость точного совмещения трафаретов с уже нанесенным рисунком

### Надежность ИМС.

Теория надежности стала развиваться с появлением первых ЭВМ.

*Надежностью* называется свойство изделия сохранять значения установленных параметров функционирования в определенных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям эксплуатации, обслуживания и транспортировки.

*Критерий годности* – параметр, по значению которого ИМС считают годной или отказавшей.

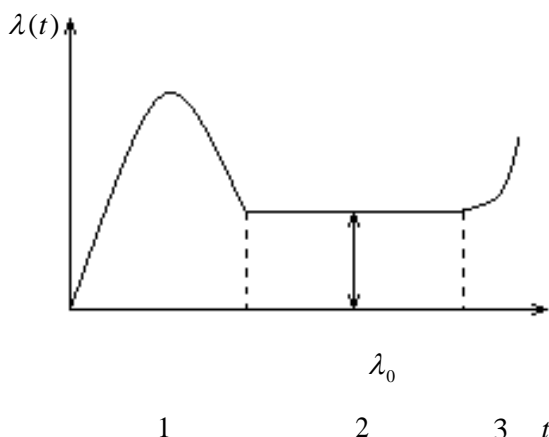
*Отказ* – либо полная утрата работоспособности, либо уход основных параметров за пределы норм.

*Гарантийная наработка на отказ* – интервал времени, до которого изготовитель гарантирует работу ИМС в соответствии с техническими условиями.

*$P(t)$  - вероятность безотказной работы* – вероятность того, что в определенных условиях эксплуатации за время  $t$  не произойдет ни одного отказа.

*$\lambda(t)$  - интенсивность отказов* – среднее число отказов в единицу времени.

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right)$$



- первый участок объясняется выявлением заводского брака
- второй участок характеризуется постоянной интенсивностью отказов  $\lambda_0$
- третий участок характеризуется значительным повышением  $\lambda(t)$  по причине старения

Первый участок в расчетах надежности не учитывают, поскольку производитель сам должен выявлять и устранять брак. При расчетах  $\lambda$  полагают постоянной во времени. Таким образом  $P(t) = e^{-\lambda_0 t}$ , где  $\lambda_0$  - интенсивность отказов всего прибора. Время наработки на отказ принято вычислять по следующей формуле  $T_0 = \frac{1}{\lambda_0}$ .

Пусть имеется  $N$  различных деталей, представляющих собой  $M$  групп. В каждой группе  $n_i$  деталей, т.е.  $N = \sum_{i=1}^M n_i$ . Предполагается что устройство выйдет из строя если выйдет из строя любая из деталей. Интенсивность отказов не зависит от режимов работы.

Получим следующую таблицу

$i$ (цифрам соответствуют радиотехнические детали: резисторы, конденсаторы, и т.д.)	$n_i$ (количество деталей данного типа)	$\lambda_i$ (интенсивность отказов деталей; табличное значение)	$n_i \cdot \lambda_i$
1	$n_1$	$\lambda_1$	$n_1 \cdot \lambda_1$

2	$n_2$	$\lambda_2$	$n_2 \cdot \lambda_2$
...	...	...	...
$m$	$n_m$	$\lambda_m$	$n_m \cdot \lambda_m$

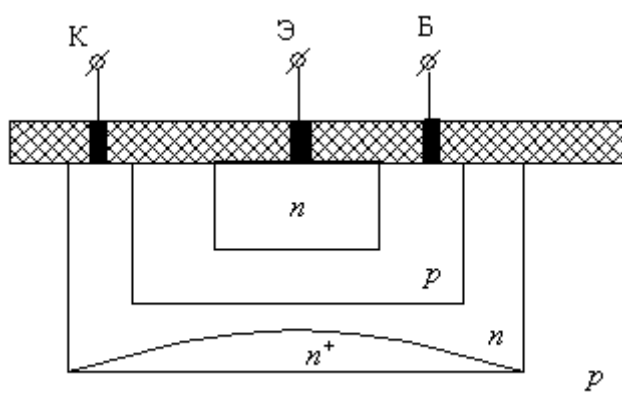
Интенсивность отказа всего прибора найдем по следующей формуле  $\lambda_0 = \sum_{i=1}^M n_i \cdot \lambda_i$ .

### Особенности реализации радиоэлектронных схем на ИМС.

Синтез электронных схем на ИМС имеет следующие особенности:

- в ИМС можно реализовать НЕ любые из дискретных элементов. Не реализуются следующие элементы: трансформаторы и катушки с большой индуктивностью; конденсаторы большой емкости; настроечные и коммутационные элементы.
- не все элементы, которые можно реализовать в МС (микросхемах) имеют дискретные аналоги
- параметры элементов, которые можно реализовать в дискретных элементах и МС могут существенно различаться. В МС можно реализовать такие элементы, которые в дискретном состоянии не имеют смысла по причине плохих параметров.
- поскольку в ИМС имеется общая подложка, то существует больше паразитных связей

### Особенности биполярного транзистора в схемах на ИМС.



Необходимо изолировать область коллектора от подложки закрытым переходом.

- Увеличивается сопротивление коллектора, следовательно, область легируют больше.

- $p-n-p$  паразитный транзистор, хотя и закрыт, но влияет на свойства.

Конфигурация областей сильно влияет на свойства транзистора. Чем больше площадь наружной поверхности коллектора, тем больше емкость на землю. Чем длиннее область коллектора, тем выше сопротивление. Те же изменения происходят и в базе.

Периметр эмиттера влияет на частотные свойства. Большое влияние оказывают расположения основных контактов в зонах. При изготовлении узких областей, учитывают, что диффузия атомов примесей идет не только в глубину, но и вширь.

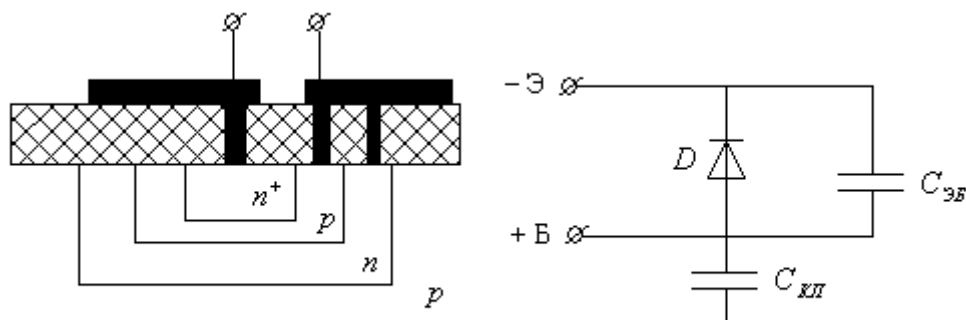
### Интегральные диоды.

Интегральные диоды чаще всего изготавливаются на основе транзисторов.

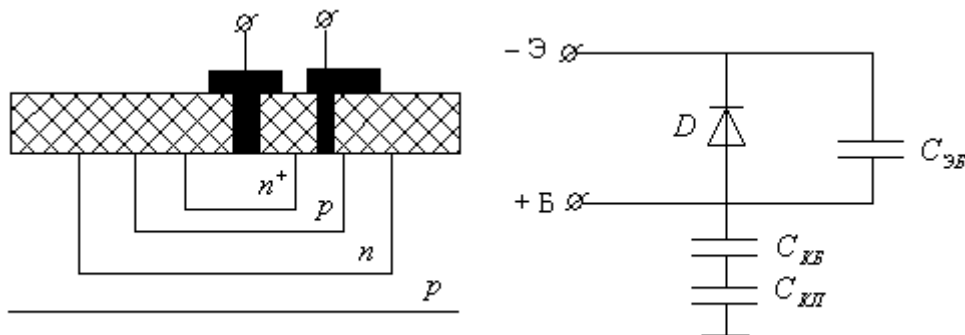
- С целью унификации технологии
- С целью расширения возможностей.

Существует пять вариантов интегральных диодов на основе транзисторов:

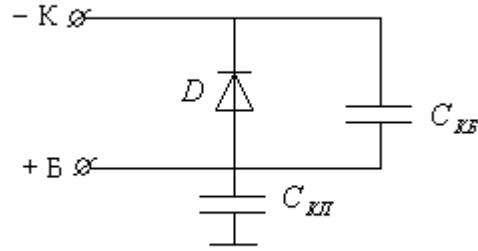
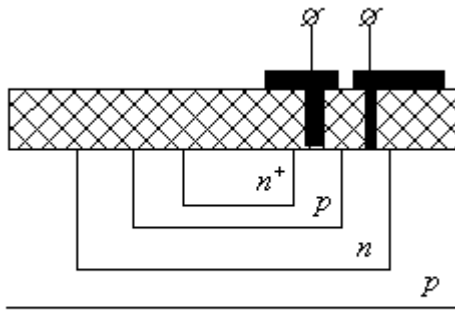
1.



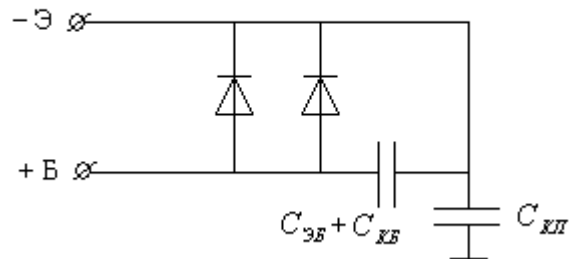
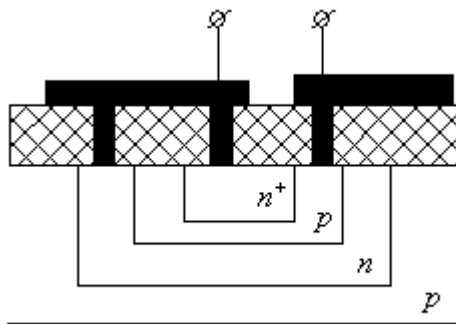
2.



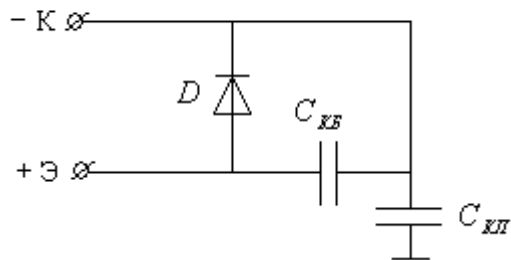
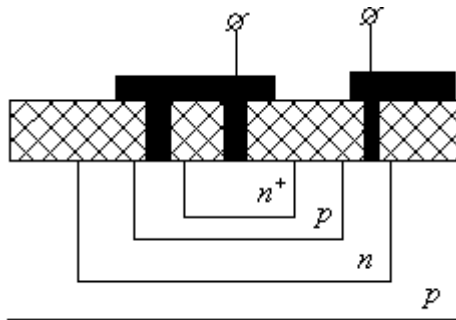
3.



4.



5.



Чтобы  $p-n$  переходы на подложку были закрыты, подложка соединяется с наиболее отрицательным элементом схемы (земля или отрицательное напряжение). Тем не менее, через закрытый  $p-n$  переход течет, в подложке создаются потенциалы, за счет чего характеристики диода могут изменяться. Так как свойства КП и ЭП различные, то различные комбинации дают различные свойства. Быстродействие определяется емкостями, они максимальны у 4-й схемы и минимальны во 2-й схеме, но быстродействие так же определяется временем рассасывания заряда, у 2-й хуже, чем у 1-й, хуже всех у 4-й схемы.

1-я схема чаще применяется в ЛИМС, где важно быстродействие

2-я схема чаще применяется в ЛИМС, но в качестве накопительных элементов.

3-я и 4-я схемы имеют максимальную величину пробоя, используются в качестве диодов общего назначения.

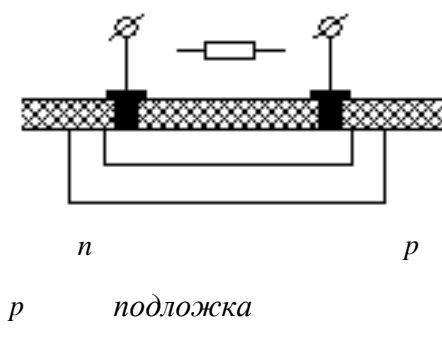
5-я схема обладает наилучшими токовыми свойствами.

### Резисторы в полупроводниковых ИМС.

В полупроводниковых ИМС наибольшее распространение получили диффузионные резисторы (резисторы данного типа получают диффузией примеси в кристалл подложки). При этом сопротивление резистора определяется удельным сопротивлением вещества. Чем сильнее легирован полупроводник, тем больше в нем свободных носителей зарядов, а, следовательно, меньше сопротивление. В радиоэлектронике нужны резисторы с широким диапазоном номиналов. Чем меньше легировано вещество, тем больше удельное сопротивление зависит от внешних факторов, а также преобладает собственная проводимость. То есть чем более высокоомный резистор, тем больше нестабильность его параметров. Поэтому резисторы изготавливают на основе высоколегированных областей.

Для расчета сопротивления материала известна следующая формула  $R = \rho \cdot \frac{l}{S}$ . Для

получения высокоомных резисторов чаще всего увеличивают длину  $l$ . Резисторы и транзисторы изготавливают на одной подложке. В качестве резистора чаще всего используют базовую область транзистора. Если использовать коллекторную область (которая легирована слабо), то это приводит к нестабильности параметров. Если использовать эмиттерный слой (который легирован сильно), то для получения нужного сопротивления пришлось бы значительно увеличить размеры занимаемой площадки.



В области резистора имеет место  $p - n - p$  структура (паразитный транзистор).

Чтобы влияние паразитного транзистора сказывалось наименьшим образом необходимо, чтобы он находился в закрытом состоянии. Для этого в  $n$ -область подают самый большой в схеме положительный потенциал. Подложку подключают либо к «земле», либо к отрицательному потенциалу. С ростом площади поверхности растут площади  $p-n$  переходов. Паразитная емкость возрастает. Высокоомные резисторы обладают наибольшей паразитной емкостью.

Резисторы, сопротивление которых зависит от толщины, называются *пинч-резисторами*.

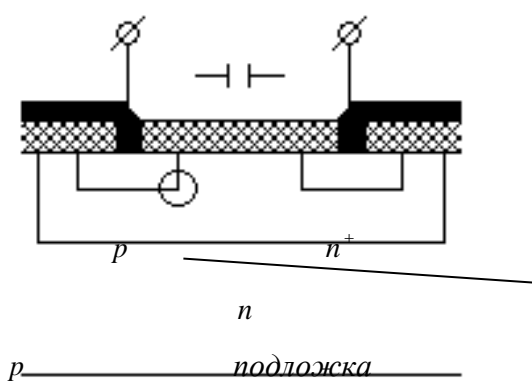
Поскольку диффузионные резисторы изготавливаются параллельно с транзисторами, то в больших пределах технологию изготовления менять мы не можем. Следовательно все резисторы диффузионными изготавливать не получается и часть из них изготавливают с помощью пленочной технологии.

### Изготовление полупроводниковых конденсаторов.

В ИМС используются два типа полупроводниковых конденсаторов:

- на основе закрытых  $p-n$  переходов
- на основе МДП-структур

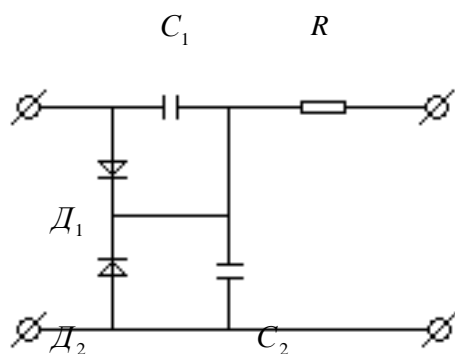
Первый тип не требует особенных технологических операций и создается параллельно с транзисторами.



по сути, конденсатором является этот  $p-n$  переход



Эквивалентная схема выглядит следующим образом:



$C_1$  - полезная емкость

$C_2$  - паразитная емкость на подложку

$D_1$  и  $D_2$  - соответствующие  $p$ - $n$  переходы

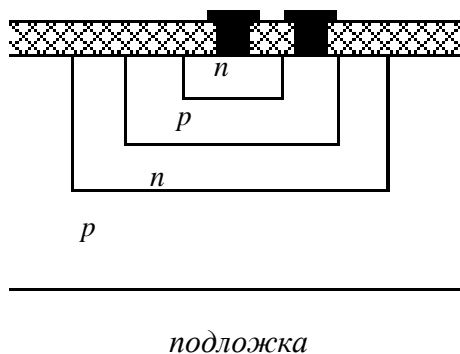
$R$  - омическое сопротивление  $n$  - слоя

Эта структура существует только при определенной ориентации напряжения. Применение таких конденсаторов ограничено паразитной емкостью  $C_2$  и паразитным сопротивлением

$R$ . Емкость конденсатора зависит от напряжения следующим образом:  $C \approx \left(\frac{1}{U}\right)^m$ , где

$$\frac{1}{3} < m < \frac{1}{2}.$$

Роль емкостей также могут играть и другие  $p$ - $n$  переходы (например, Эмиттер - База).



Когда конденсатор на переходе Эмиттер - База имеет наибольшую емкость, то пробивное напряжение у него достаточно низкое (не более 10 В). На переходе Коллектор - База конденсатор обладает сравнительно высоким пробивным напряжением (до 50 В), но такие конденсаторы обладают плохой добротностью из-за достаточно большого сопротивления тела коллектора.

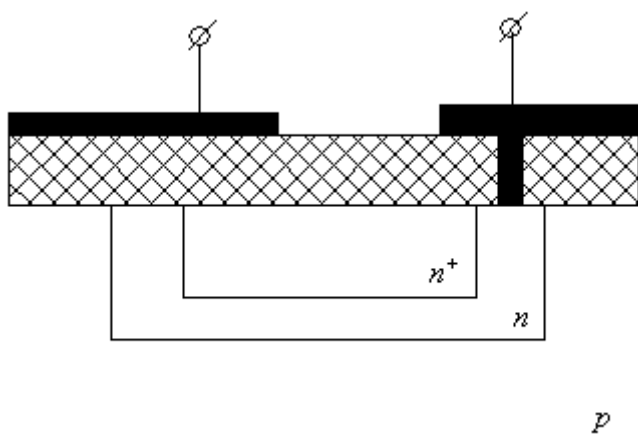
Диффузионные конденсаторы имеют три основных недостатка:

- невозможно получить большие значения емкостей, т.к. при этом занятой оказалась бы большая площадь кристалла
- плохая добротность
- конденсаторы полярные и их емкость зависит от напряжения

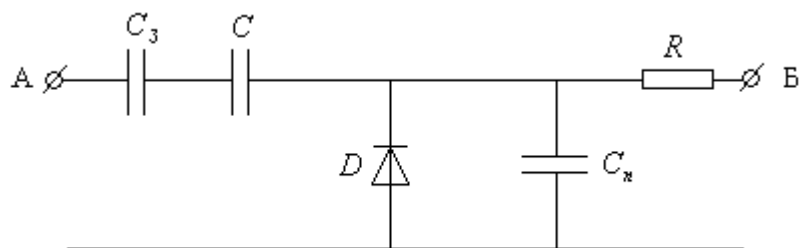
Многие недостатки устраняются, когда применяются МДП-структуры. Вплоть до того, что соответствующие конденсаторы могут использоваться в аналоговых ИМС. К конденсаторам в цифровой технике предъявляют гораздо более мягкие требования. Обратная ситуация с аналоговыми ИМС. МДП конденсатор делают в одном технологическом цикле с транзисторами, в разрезе такой конденсатор выглядит следующим образом:

1-я обкладка  $n^+$

2-я обкладка – металл



Эквивалентная схема:



$C_n$  - емкость перехода на подложку

$R$  - сопротивление  $n^+$  области для уменьшения  $R$  легируют сильнее.

$C_3$  - приповерхностная емкость

$C_3 \gg C$  поэтому  $C_3$  не учитывают

$R_{C3} \ll R_C$

Такой конденсатор обладает большим пробивным напряжением: ( $U_{пр} > 80V$ ).

Емкость на единицу площади поверхности выше, чем на основе замкнутого  $p-n$  перехода.

Высокая добротность ( $Q \approx 1000$  ).

Конденсатор неполярный

Емкость не зависит от приложенного напряжения.

### **ИМС на МДП-структурах.**

МДП широко применяются в схемах большей и средней степени интеграции.

Положительные качества:

- НЕ требуется дополнительной изоляции в схемах на МДП-транзисторах.
- Геометрические размеры меньше, чем у биполярных транзисторов, следовательно, выше степень интеграции.
- МДП могут работать в одной схеме с биполярными транзисторами, при этом они дополняют друг друга.
- Сложность технологии у МДП-транзисторов примерно на 30% меньше чем у биполярных транзисторов.
- Так как площадь элементов меньше, легче произвести разводку соединений между элементами.
- Так как суммарное число технических операций меньше, то нужно меньше предусматривать допуски под разброс размеров элементов.
- За счет лишней площади возможна более плотная упаковка
- МДП технология позволяет осуществить два вида межэлементных соединений. (внутренние приповерхностные и внешние металлические).

За счет изменения геометрии легче менять электрические свойства.

- Устройство на МДП дешевле, за счет малости размеров.
- Используются в DRAM, хорошо хранит заряд.
- Большое входное сопротивление позволяет получить большой коэффициент по выходу.
- Простота разработки, что ускоряет процесс разработки новых микросхем.

Отрицательные качества:

- Так как входное сопротивление больше, то паразитные емкости влияют гораздо сильнее, именно эти емкости и определяют частотные свойства. Следовательно, схем на МДП существенно ниже. На них организованны микро мощные серии.

Другие особенности МДП-структур

Четко выражены управляющие и управляемые цепи, кроме того структуры симметричны. Уровень шумов в МДП-структурах меньше и выше теплостабильность параметров.

*Заключение.* Современные тенденции развития электроники указывают на все большую долю использования интегральной электроники при создании разнообразных приборов и установок. По этой причине изучение вопросов данной темы представляет собой особую важность. Студент знакомится с особенностями технологии интегральных микросхем и принципами их построения. Уделяется внимание важным отличиям синтеза и функционирования радиотехнических схем, созданных на базе дискретной элементной базы и на базе интегральной элементной базы.

## **5. Особенности построения логических элементов на интегральных схемах. Типы, конструкции и характеристики базовых логических элементов. Запоминающие логические элементы.**

5.1. Типовые схемы на МДП-транзисторах

5.2. Способы уменьшения влияния паразитных транзисторов

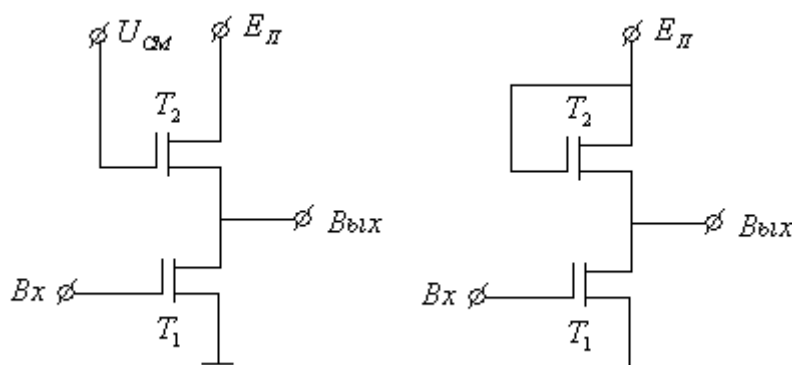
5.3. Цифровые интегральные схемы.

5.4. Схемотехническая реализация основных логических функций.

5.5. Логические ИМС на МДП-транзисторах.

### **Типовые схемы на МДП-транзисторах**

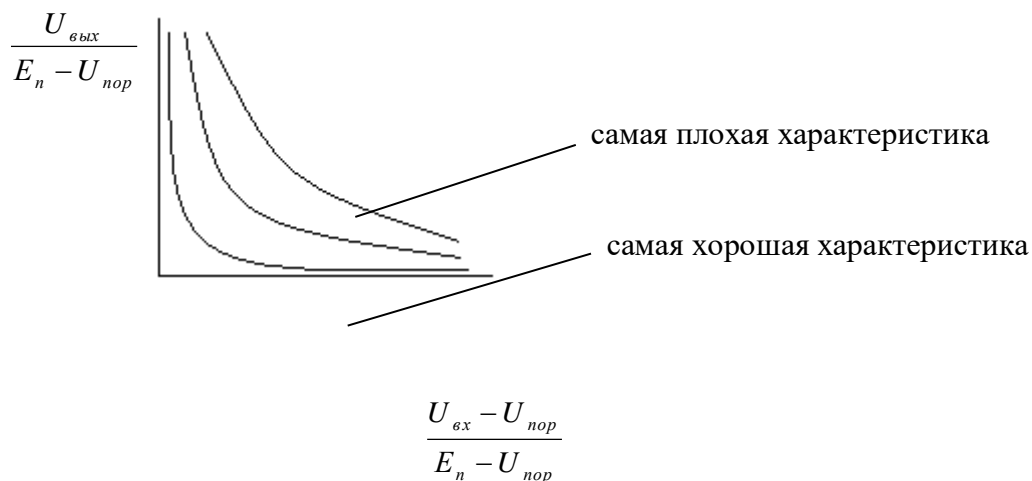
Базовый элемент всех логических схем это инвертор.



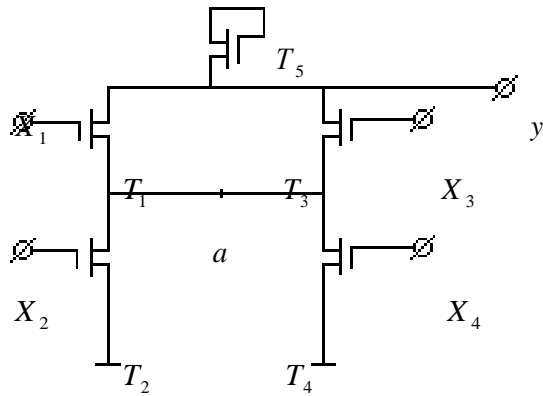
Чаще используются каналы  $p$  - типа, так как легирование примесей технологически проще.

В данной схеме активным является транзистор  $T_1$ , а транзистор  $T_2$  выполняет роль резистора.

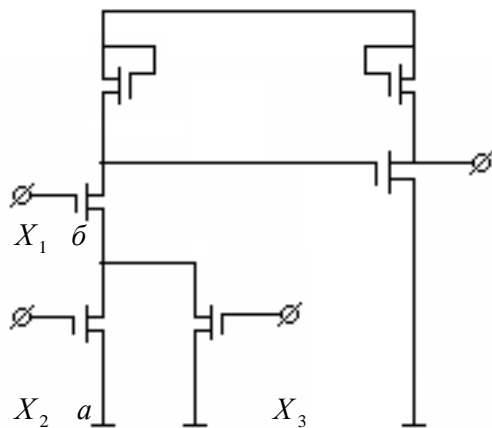
В схеме А резистор является линейным, а в схеме Б – нелинейным. Площадь резистора соответствующего транзистору  $T_2$  примерно в двадцать раз больше, именно поэтому используется транзистор, а не резистор. Сопротивление второго транзистора в 10-20 раз больше сопротивления первого транзистора. Данная схема является эквивалентом резистивного делителя. Когда на входе первого транзистора низкое напряжение он закрыт, и его сопротивление много больше сопротивления второго транзистора. Когда на входе первого транзистора высокое напряжение он открыт и все напряжение падает на втором транзисторе (поскольку сопротивление  $T_1$  меньше сопротивления  $T_2$ ). Помехоустойчивость инвертора тем выше, чем больше отношение крутизны первого транзистора к крутизне второго транзистора.



Чем больше отношение крутизн, тем лучше. Большое соотношение достигается тем, что канал второго транзистора в несколько раз длиннее канала первого транзистора. Переключающие свойства инвертора ухудшаются паразитными емкостями. Время переключения из одного состояния в другое (в последовательности переключений) не одинаково. Это является основным недостатком. На основе инверторов формируются базовые логические схемы.



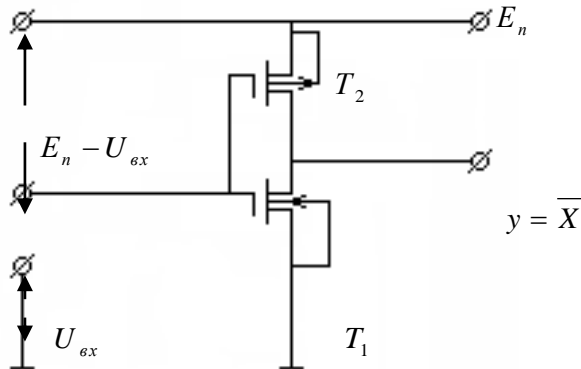
Если подать высокий уровень хотя бы на один из транзисторов, он откроется. В точке  $a$  сопротивление будет низким.  $y = \overline{(X_2 V X_4)(X_1 V X_3)}$ , где  $V = \text{или}$ .



Чтобы в точке  $b$  был низкий уровень необходимо, чтобы был открыт транзистор  $X_1$  и один из  $X_2$  или  $X_3$ .  $X_b = \overline{X_1(X_2 V X_3)}$   $y = \overline{X_b} = X_1(X_2 V X_3)$

Теоретически на любом каскаде можно реализовать логическую функцию любой сложности, но этого не делают. Количество последовательно соединяемых транзисторов не превышает четырех, потому что при большем количестве транзисторов резко повышается уровень логического нуля. По той же причине параллельно не соединяют большое количество транзисторов. Большое количество параллельных соединений транзисторов мешает получить хороший высокий уровень (логическую единицу). Если в одном каскаде соединить много транзисторов, возрастет паразитная емкость, которая ухудшает быстродействие.

Инверторы изготавливают на основе комплементарных транзисторов (транзисторы с противоположным типом проводимости).



Преимущества схем на комплементарных транзисторах:

- малая потребляемая мощность в статическом режиме
- высокое быстродействие
- высокая помехоустойчивость за счет большого различия уровней логического нуля и логической единицы

Оба транзистора находятся в активном режиме работы. Это дает выигрыш по мощности. Все паразитные емкости заряжаются и разряжаются большим током, поэтому оба фронта всегда короткие. Энергия потребляется только в динамическом режиме и расходуется только на переключение. Динамическую мощность можно найти по следующей формуле:

$$P_{\partial} = C_n \cdot f_{раб} \cdot E_n^2.$$

### Способы уменьшения влияния паразитных транзисторов

1. Увеличить толщину оксидного слоя, при этом снижается крутизна паразитного транзистора.
2. На границе между подложкой и изоляционным оксидным слоем создают нужную конфигурацию примесей.
3. Выбирают нужную конфигурацию проводников.
4. Под металлизацией повышают концентрацию носителей того же типа, что и подложка. (Охранная диффузия), область с хорошей проводимостью можно использовать для других целей, например, провести дополнительную шину.

Приборы с зарядовой связью (ПЗС)

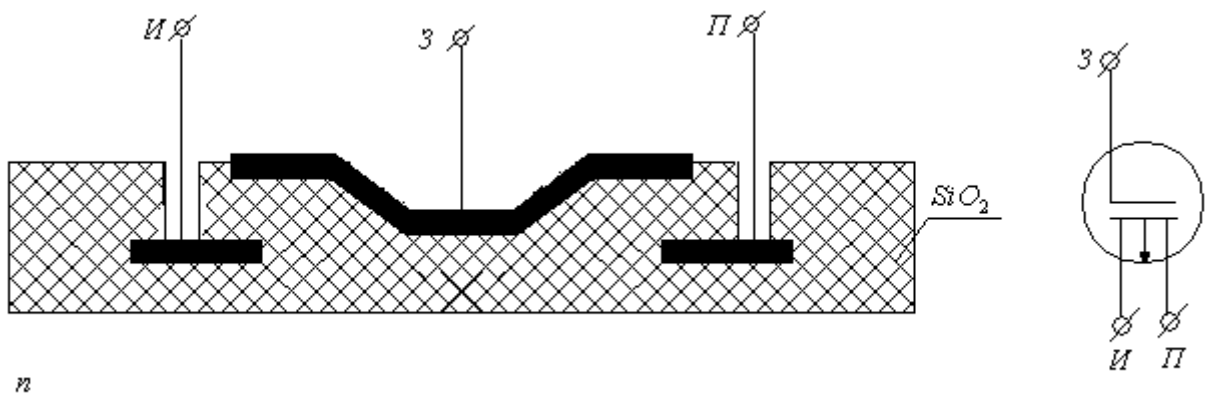
Этот компонент реализовывается только в микросхемах, при этом принцип работы заключается в хранении не основных носителей заряда в потенциальных ямах. Эти ямы возникают вблизи поверхности проводника под воздействием внешнего электрического поля. Перемещение зарядов происходит вдоль поверхности, при перемещении потенциальных ям. При этом особенность заключается в том, то представление информации в виде плотности заряда. Одна из быстро разбегающихся областей.

Применение среди аналоговых микросхем:

Устройство фазовой коррекции, линии задержки и фильтры, преобразователи масштаба времени.

Применение среди цифровых ИМС:

Разнообразные логические схемы в оптоэлектронике. ПЗС – матрица. Возможны различные способы потенциальных ям. Наиболее распространенный способ – способ с использованием МДП-структур. В качестве примера рассмотрим ПЗС транзистор.



Структура гораздо проще, чем в обыкновенном транзисторе. В схеме нет областей, куда внедрены примеси другого типа. Можно изготовить не только на основе кремния но и на основе арсенида галлия и др. Гораздо выше требования к чистоте обработки поверхности. Для ПЗС характерны два режима работы.

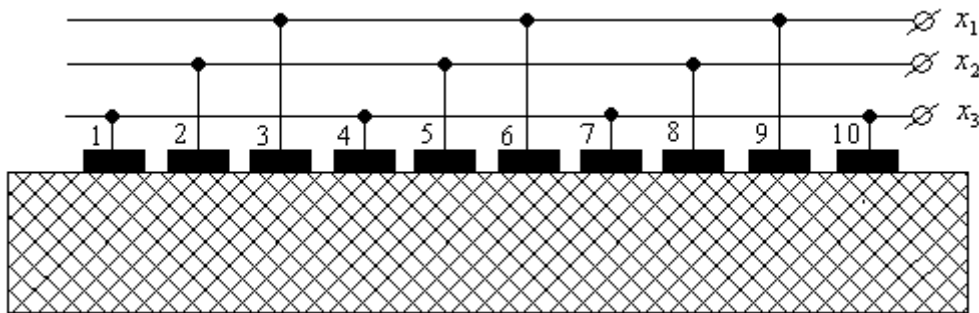
1. Хранение информационного заряда
2. Передача информационного заряда

К истоку прикладывается напряжение, отталкивающие основные заряды подложки. В результате образуется область, обедненная основными носителями. Эта область является как бы ловушкой для не основных носителей, она и называется потенциальной ямой. Под электродом образуется подвижный приповерхностный заряд.

При подаче в приемник такого же знака под ним тоже образуется потенциальная яма, если они туда попадут.



Временно на  $\Pi$  подают заряд и на затвор того же знака напряжение. В результате возникает канал, и носители перемещаются в более глубокую яму. В результате получаем:



Пусть в какой-то момент времени на  $x_2$  подано отрицательное напряжение  $U_2$ , в результате образовалась потенциальная яма под 2; 5; 8 электродами.

Под 2-м и 8-м есть заряды, а под 5-м зарядов нет.

В какой-то момент времени на  $x_3$  отрицательное напряжение, при этом  $|U_3| > |U_2|$  в результате под 3; 6; 9-м электродами образуются более глубокие потенциальные ямы.

В следующий момент времени с  $x_2$  убирается напряжение, а на  $x_3$  вместо  $U_3$  подается  $U_2$ . В результате, опять наступает режим хранения, но под 3; 9-м, а не под 2-м и 8-м электродами.

В правильной последовательности, подавая напряжение на шины, можно перемещать заряд.

### Цифровые интегральные схемы.

Изначально цифровая техника изготавливалась на лампах (с 40<sup>х</sup> годов XX века). Появление цифровых интегральных схем было обусловлено изучением и развитием ядерных реакций (необходимость просчетов ядерных реакторов), и космических технологий (расчеты траекторий полета ракет).

### Основные параметры цифровых ИМС.

- реализуемая логическая функция
- нагрузочная способность (коэффициент разветвления по выходу)
- коэффициент объединения по входу
- среднее время задержки и передачи сигнала

- статическая помехоустойчивость
- потребляемая мощность
- предельная рабочая частота

*Основной особенностью цифровых ИМС является то, что активные элементы реализовать намного проще, чем пассивные.*

*Логический перепад* – разность напряжений на выходе соответствующая логическому нулю и логической единице.

Цифровые ИМС по виду сигнала, с которым они работают, делятся на три группы:

- потенциальные
- импульсные
- импульсно-потенциальные

В целом любая логическая функция может быть построена из более простых функций, вплоть до наименьших далее неделимых функций. Основные элементы логических функций: И; ИЛИ; НЕ; И-НЕ; ИЛИ-НЕ. Логическая обработка реализована в логическом базисе.

*Логический базис* – минимальный набор логических функций, с помощью которого можно реализовать логическую обработку любой сложности.

Примером логического базиса могут служить комбинации следующих логических функций: ИЛИ и НЕ; И и НЕ, а также сами логические функции: И-НЕ; ИЛИ-НЕ. Комбинация И и ИЛИ логическим базисом не является.

*Нагрузочная способность ( $n$ )* – характеризует максимальное число ИМС, аналогичных рассматриваемой, которые можно подключить к ее выходу без искажения передаваемой информации.

Чем выше нагрузочная способность, тем шире возможности, поскольку логическая обработка реализуется меньшим числом ИМС. Но с другой стороны при высокой нагрузочной способности наблюдается плохая помехоустойчивость и плохое быстродействие. Поэтому в разных сериях встречаются микросхемы с разными значениями  $n$ .

*Коэффициент объединения по входу ( $m$ )* – характеризует максимальное число логических входов функционального элемента ИМС.

С одной стороны, чем выше коэффициент объединения по входу, тем проще схема, тем меньше в ней элементов. Но с другой стороны, чем выше  $m$ , тем хуже помехоустойчивость и быстродействие. Поэтому в разных сериях существуют логические расширители.

*Среднее время задержки сигнала* – характеризует среднее время прохождения сигнала через ИМС в устройстве.

- в насыщенном состоянии переключение происходит медленно, а в ненасыщенном быстро
- чем выше мощность, тем быстрее переключение

*Средняя помехоустойчивость* – максимально допустимое напряжение статической помехи, не вызывающее перехода ИМС из одного состояния в другое.

*Статическая помеха* – это такая величина, которая всегда остается постоянной в течение интервала времени много большего длительности переходных процессов.

К воздействию помех наиболее чувствительны ИМС, имеющие разброс входных характеристик и низкий перепад логических уровней. Иногда для того чтобы характеризовать помехоустойчивость используют коэффициент помехоустойчивости

следующего вида:  $K_n^{0,1} = \frac{U_{n\max}^{0,1}}{\Delta U_{c\min}}$ , где 0,1 - стоит цифра соответствующая уровню (на входе

либо 0, либо 1);  $U_{n\max}$  - максимальное значение помехи, которая еще не вызывает перехода из одного состояния в другое;  $\Delta U_{c\min}$  - значение помехи которая вызывает переход.

### **Мощность потребляемая ИМС от источника питания.**

Значение мощности потребляемой ИМС от источника питания можно найти по следующей

формуле:  $P = \sum_{j=1}^n U_j \cdot I_j$ .

Потребляемая мощность зависит от состояния микросхемы. Поэтому используется понятие как максимальной, так и усредненной мощности. Это имеет место, если средняя мощность больше мощности в момент переключения. Если же это не так, то в качестве показателя используется потребляемая мощность при максимальной частоте переключения.

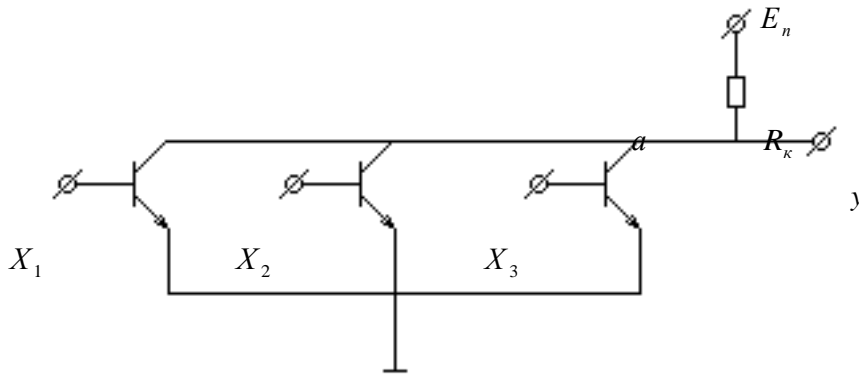
По потребляемой мощности микросхемы принято делить на следующие группы:

- мощные  $25\text{ мВт} < P < 250\text{ мВт}$
- средней мощности  $3\text{ мВт} < P < 25\text{ мВт}$
- маломощные  $0,3\text{ мВт} < P < 3\text{ мВт}$
- микромощные  $1\text{ мкВт} < P < 0,3\text{ мВт}$
- нановатные  $P_{cp} < 1\text{ мкВт}$

### **Схемотехническая реализация основных логических функций.**

Схемы на биполярных транзисторах.

Транзисторная логика с непосредственной связью (ТЛНС).



$$y = \overline{X_1 X_2 X_3}$$

Транзисторы и  $R_k$  выбирают таким образом, чтобы в открытом состоянии сопротивление транзистора было много меньше  $R_k$ , а в закрытом много больше. Таким образом, если на всех входах низкий уровень, то все транзисторы закрыты. Общее сопротивление между точкой  $a$  и землей много больше сопротивления  $R_k$ , поэтому на выходе будет напряжение питания. Если хотя бы на один из входов подан высокий уровень, этот транзистор открывается и шунтирует остальные транзисторы. Именно поэтому сопротивление между точкой  $a$  и землей становится много меньше сопротивления  $R_k$ . Следовательно, на выходе мы будем иметь низкий уровень напряжения.

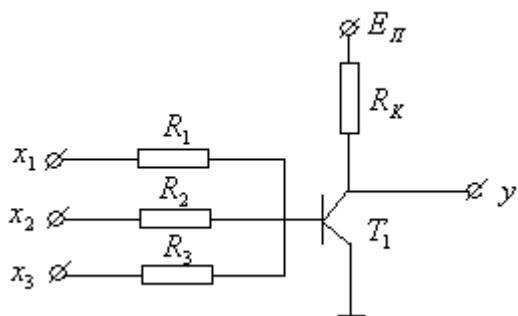
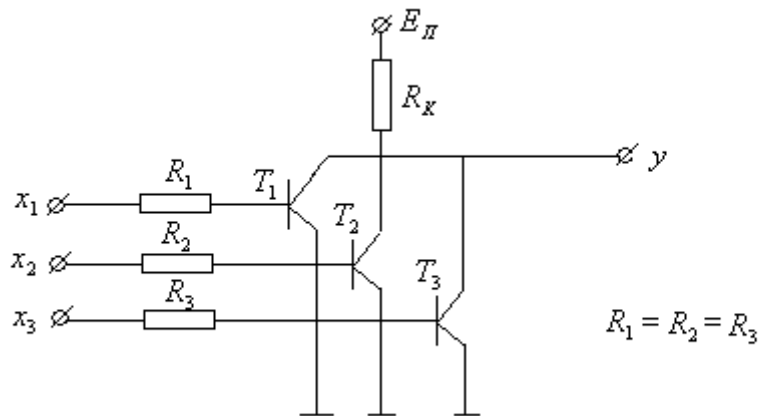
*Достоинства:*

- простота
- высокое быстродействие
- относительно малая потребляемая мощность

*Недостатки:*

- из-за разброса параметров транзисторов, у разных входов разное напряжение срабатывания
- низкая помехоустойчивость

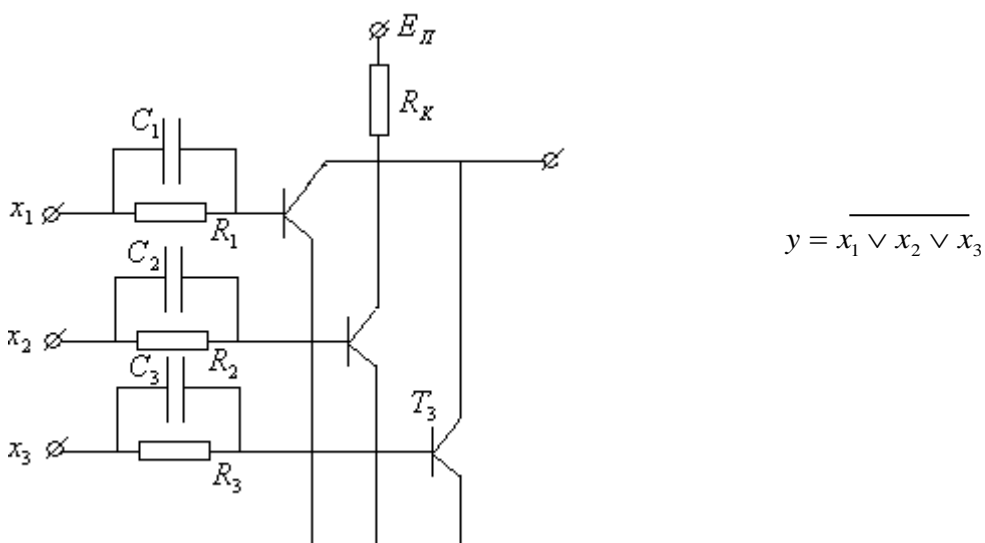
**РТЛ (резисторно-транзисторная логика).**



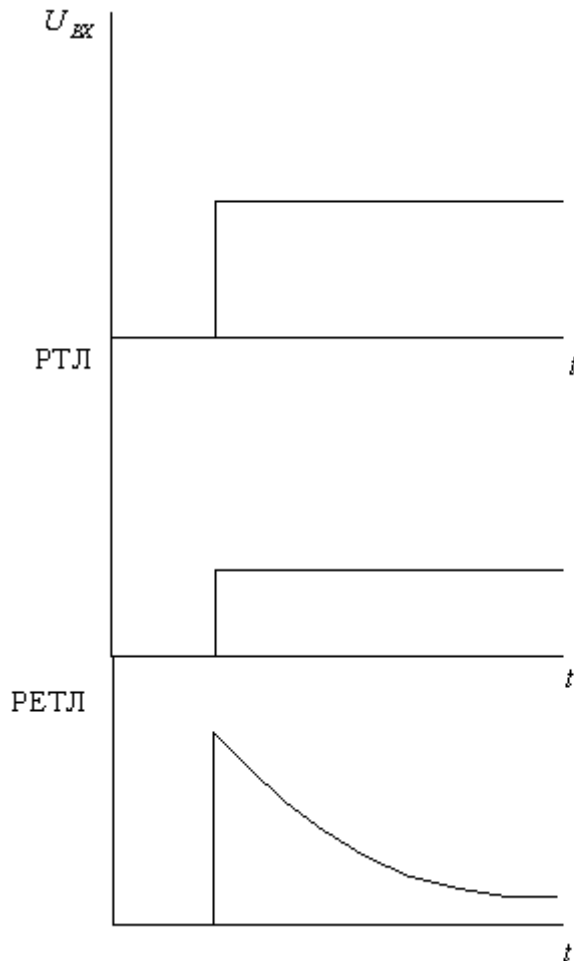
Данная логическая схема является усовершенствованием ТЛНС, основная цель – выровнять входные характеристики. Резисторы можно сделать более идентичными, чем входные сопротивления транзисторов.

Основной минус данной схемы заключается в том, что из-за введения сопротивлений резко ухудшается быстродействие. Это обусловлено медленным рассасыванием зарядов в базе транзистора. Схемы этого типа обладают большой помехоустойчивостью, большими коэффициентами  $m$  и  $n$ .

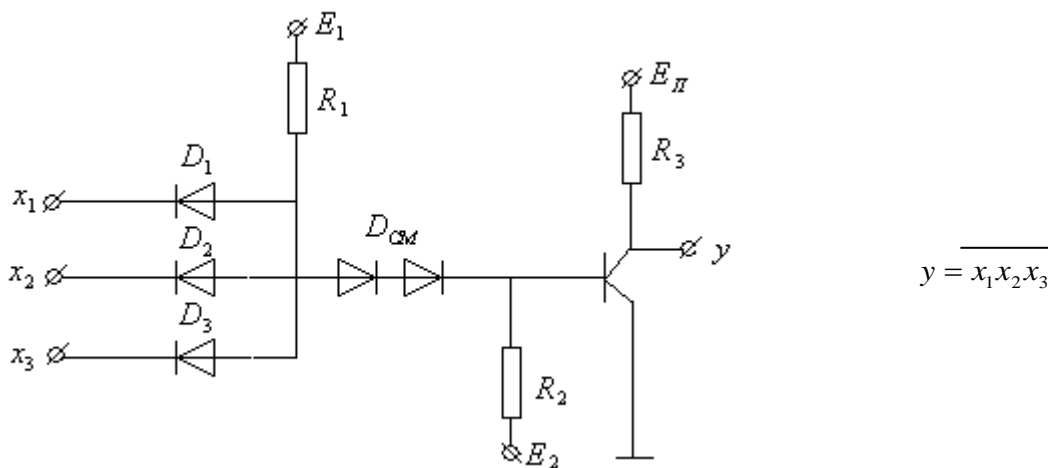
**РЕТЛ (резистивно-емкостная транзисторная логика)**



C – ускоряющая емкость.



ДТЛ (диодно-транзисторная логика)



Если на всех входах высокий уровень, то все диоды закрыты, в результате на транзистор через открытый диод  $D_{CM}$  подается полное напряжение и транзистор открывается.

Если хотя бы на одном из выходов 0, то диод открывается, в результате потенциал точки «а» будет близок к земле. Таким образом, на базе транзистора будет низкое напряжение, транзистор закрывается.

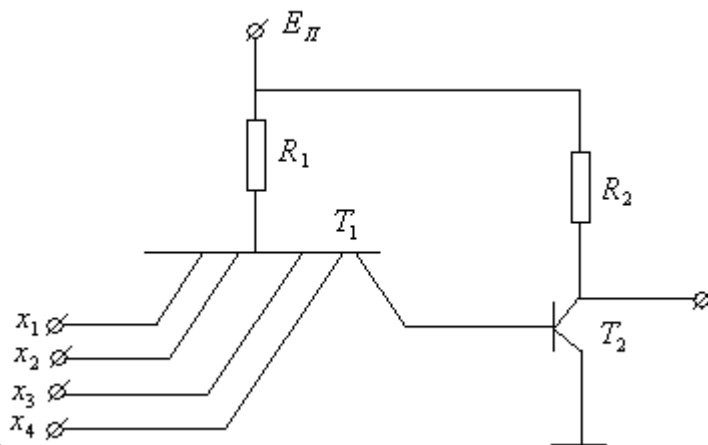
$D_{CM}$  ставится для компенсации остаточного напряжения.

$E_2$  - необходим для обеспечения стабильной работы диодов смещения, увеличивая быстродействие.

Данная схема обеспечивает хорошее быстродействие, хорошую помехоустойчивость, малая потребляемая мощность.

ТТЛ

(транзисторно-транзисторная



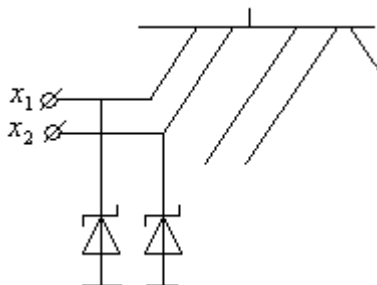
логика)

Схема похожа на ДТЛ, роль диода играет коллекторный переход, роль диодов смещения играет коллекторный переход.

Схеме свойственно большое быстродействие, малая потребляемая мощность и занимают малую площадь.

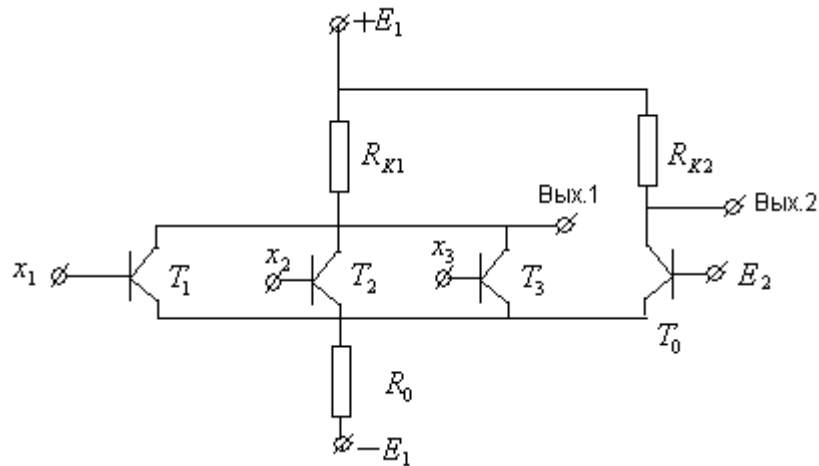
ТТЛШ (транзисторно-транзисторная логика диодом Шоттки)

Схема почти такая же как и в ТТЛ, Параллельно КП ставится диод Шоттки, используя в качестве ограничительного диода. Открывающее напряжение диода несколько меньше, чем у КП, поэтому переход открывается, но не входит в насыщение, а отводится диодом Шоттки. Следовательно, транзистор легко включается и выключается.



Остальные параметры близки к ТТЛ.

ЭСЛ (эмиттерно-связанная логика) Обладает почти самым высоким



быстродействием.

Вых. 1 – ИЛИ-НЕ

Вых. 2 – ИЛИ

$T_1, T_2, T_3$  - пер-ли тока,  $T_0$  - эмиттерный повторитель

За счет  $R_0$  транзисторы находятся в ненасыщенном режиме, малые перепады логического уровня (0,8 В), малое  $R_{вх}$ , то есть малое влияние паразитных емкостей. Вследствие этого высокое быстродействие, высокая нагрузочная способность, нестандартные логические уровни. Нельзя непосредственно соединять ТТЛ и ЭСЛ, для этого используются переходные микросхемы.

Диодные матрицы.

Набор быстродействующих диодов соединяемых по определенной схеме, их как правило используют как фрагменты.

Плюсами являются быстродействие и идентичность параметров.

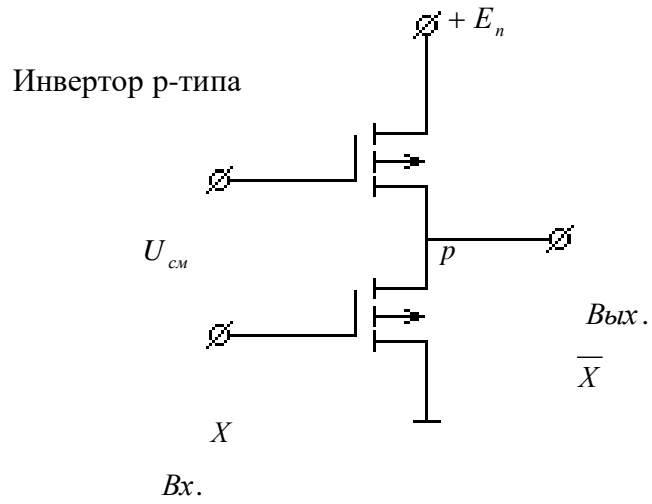
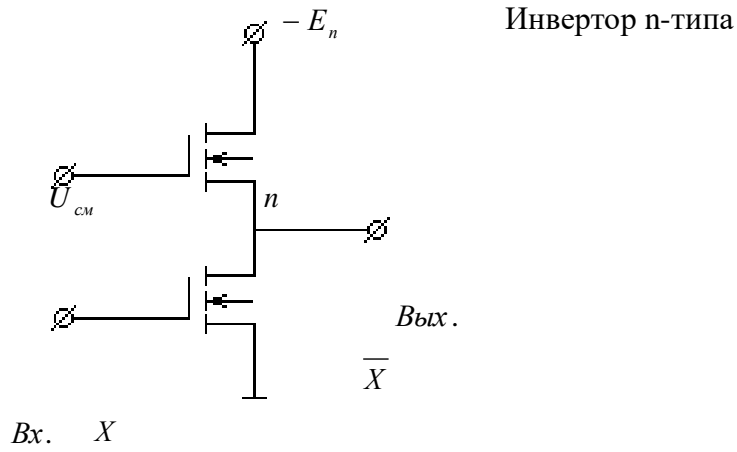
### **Интегрально-инжекционная логика (И<sup>2</sup>Л).**

Интегрально-инжекционная логика представлена интегральными микросхемами на базе биполярных транзисторов. Энергия необходимая для обработки сигналов вводится инжекцией неосновных носителей заряда. По сути это комбинация многоколлекторных  $n-p-n$  транзисторов в инверсном режиме и транзисторов типа  $p-n-p$ . Поскольку в схеме отсутствует резистор, изолирующие области не нужны. Следовательно, схемы занимают меньшую площадь по сравнению со схемами содержащими резисторы; выше плотность упаковки; выше быстродействие; ниже потребляемая мощность. Интегрально-инжекционная логика находит основное применение в БИС и СБИС.

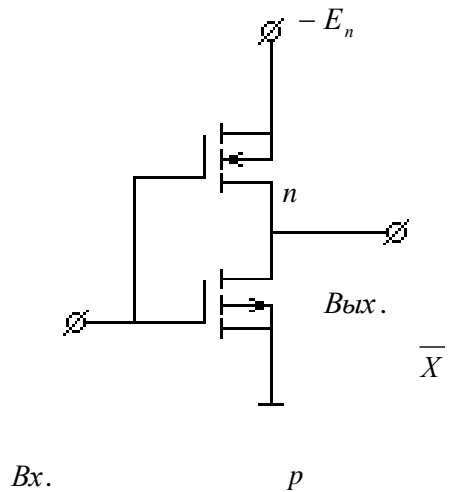


## Логические ИМС на МДП-транзисторах.

Схемы инверторов

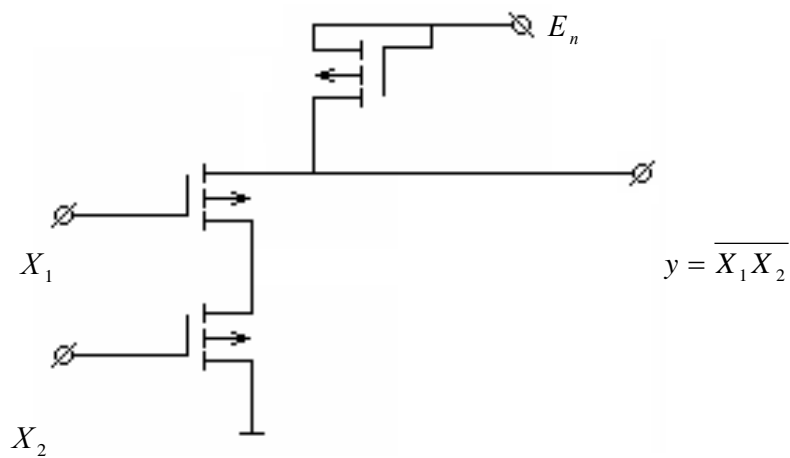
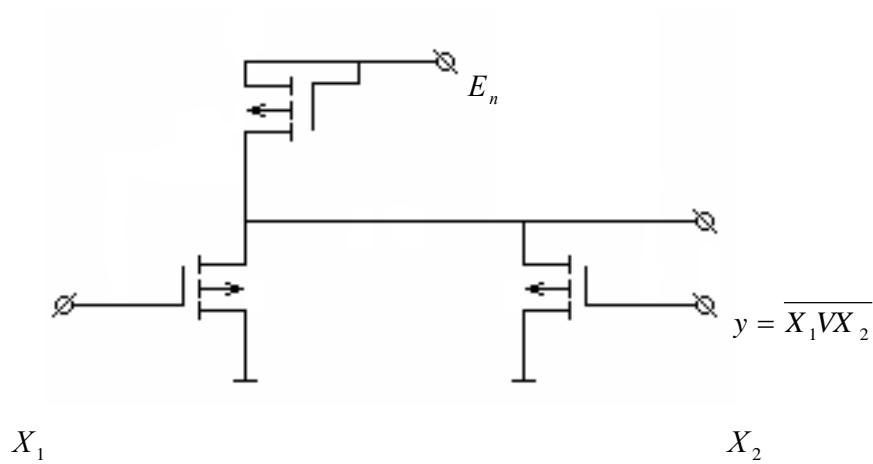


Также используются инверторы комбинированного типа



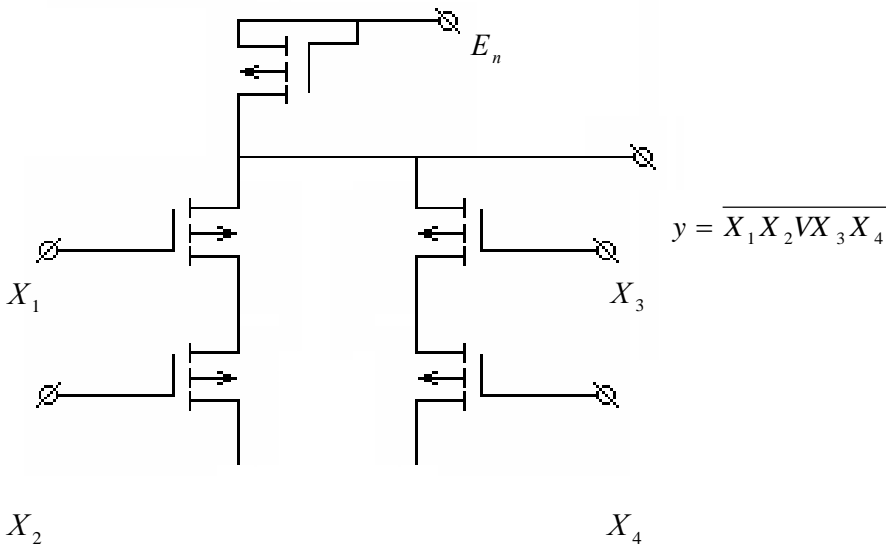
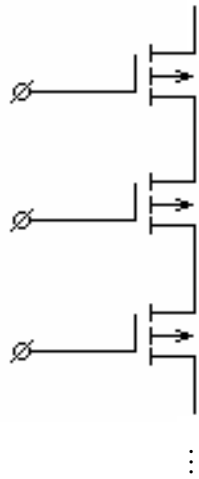
Принципы построения логической обработки аналогичны принципам построения логической обработки в схемах на основе биполярных транзисторов.

Схема ИЛИ-НЕ

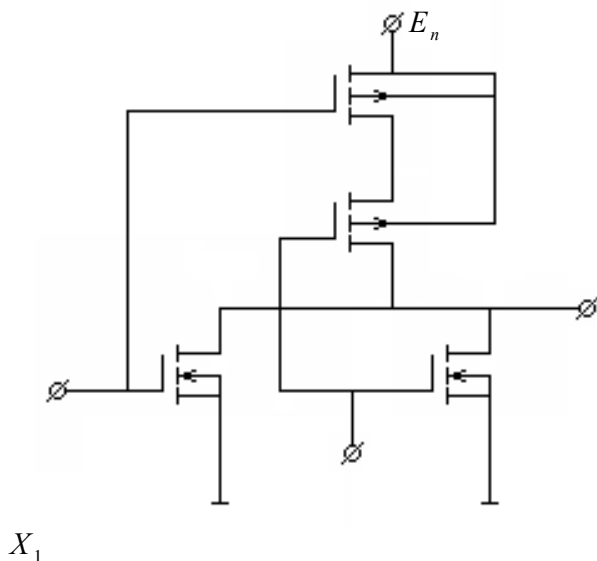


Для реализации схемы И используется ярусное включение, при этом должна быть реализована большая крутизна.

⋮

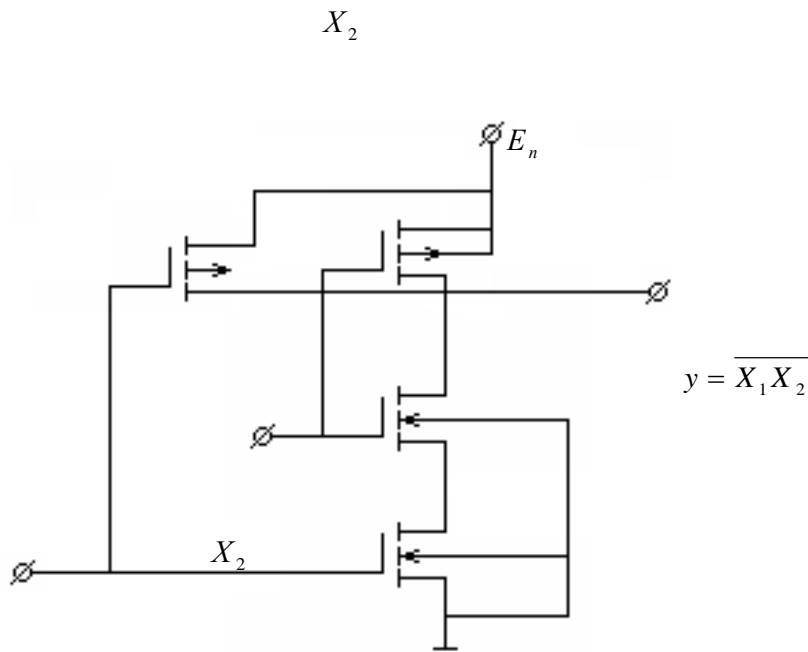


В отличие от схем на биполярных транзисторах, здесь можно реализовать большие каскады. Ограничением является лишь точная выделяющаяся мощность, именно поэтому используются транзисторы с каналами с противоположным типом проводимости. Это позволяет существенно снизить выделяющуюся мощность.



Экономия мощности.  
Противоположная логика управления.  
С уменьшением мощности уменьшается локальная температура кристалла.

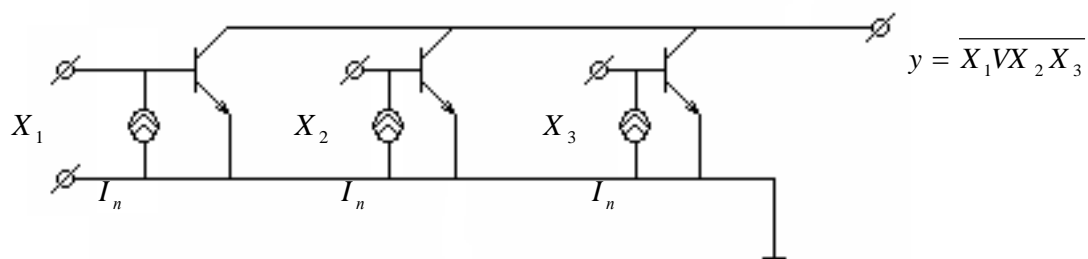
$$y = \overline{X_1 V X_2}$$



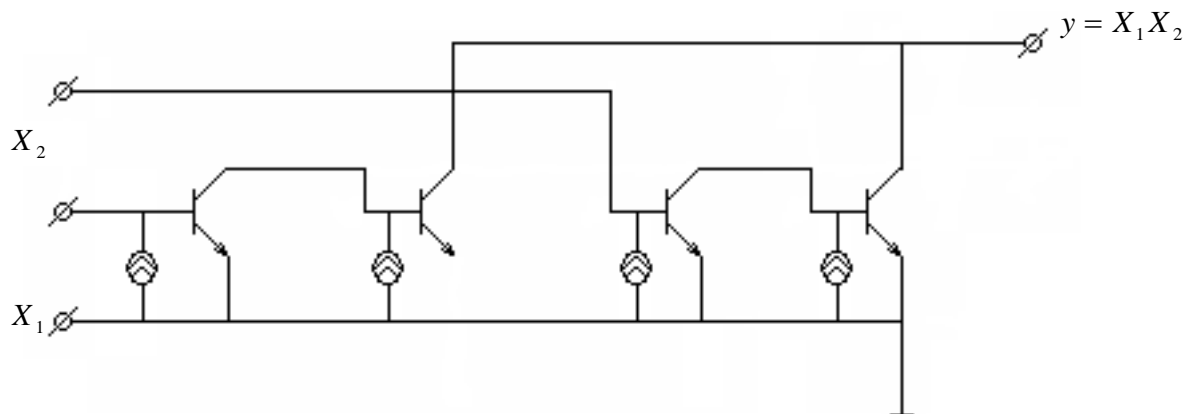
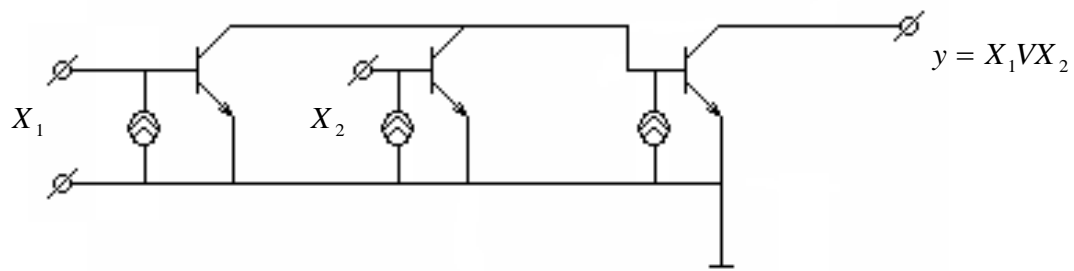
$X_1$

**ИМС на элементах инжекционной логики.**

Основой являются транзисторы с инжекционным питанием, которые представляют собой комбинацию генераторов тока инжекции и так называемые транзисторы с открытым коллекторным выходом.



Если ни на один из элементов не подан сигнал, то сигналом является закорачивание. Если ни один из входов базы не закорочен, то все транзисторы открыты. Если один из входов базы закорочен, то закорачивается соответствующий генератор тока и этот транзистор закрывается. Таким образом, все транзисторы будут закрыты, и на выходах будет высокий уровень сигнала (логическая единица), если на всех входах будет низкий уровень сигнала (логический ноль).



У инжекционной логики также есть ряд недостатков:

- малый перепад между логическими уровнями
- невозможность непосредственного сопряжения с логическими элементами других типов.

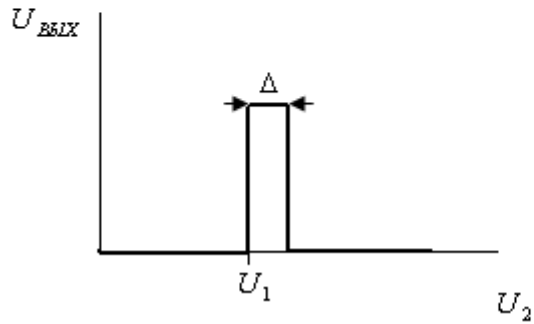
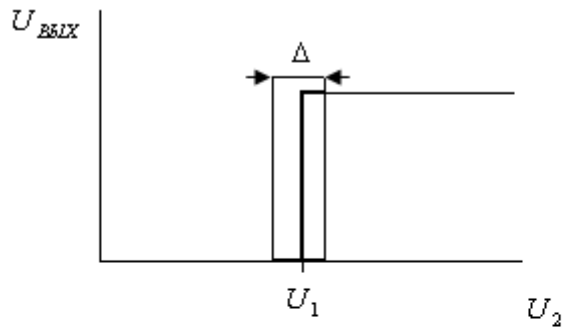
Однако если внутри схемы вся логика только инжекционная, то эти недостатки не имеют смысла. Поэтому внутри схем (особенно в БИС) вся логика инжекционная, а на выходе идет сопряжение с другими логиками.

### **Аналоговые ИМС.**

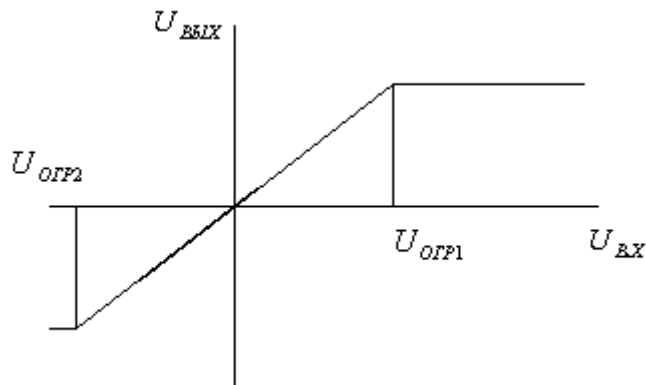
Аналоговые ИМС предназначены для обработки аналоговых сигналов, т.е. непрерывного сигнала. Другие названия – линейные ИМС. Если разбить все потребности в обработке на классы, то можно выделить пять:

1. Усиление сигнала
2. Функции сравнения (сопоставление двух аналоговых величин с определенной точностью).

К ним относятся компараторы.



### 3. Ограничение (ограничители)



Существуют ограничители мгновенных значений и ограничители амплитуд.

### 4. Перемножители

$$U_{\text{ВЫХ}} = KU_1U_2 \quad [K] = \left[ \frac{1}{B} \right]$$

### 5. Фильтрация

Номенклатура очень широкая (см. ранее)

## Особенности схемотехники построения ИМС

Наблюдается два принципа, которые не используются в дискретной схемотехнике.

1. Принцип взаимного согласования структур и цепей. Все элементы одной ИМС располагаются на одном кристалле, и изготавливаются по одной технологии. У микросхем выше идентичность характеристик, не только при изготовлении, но и при

эксплуатации. Такой подход позволяет изготовить такие схемы, которые невозможно или дорого изготовить. По этому принципу изготавливают дифференцирующие каскады и эталоны тока.

## 2. Принцип схемотехнической избыточности

Так как элементы очень маленькие, как следствие, увеличение их количества не сказывается. Можно реализовать лучшие характеристики и минимальную чувствительность к другим параметрам.

## **Номенклатура аналоговых ИМС.**

В зависимости от выполняемой функции разделяются на несколько типов.

### 1. Многоцелевые усилители

Предназначены для усиления сигнала в широком диапазоне частот

УВЧ (на входах)

УПЧ

УНЧ (звуковой частоты)

Широкополосные усилители

Усилители УПТ (постоянного тока). Все остальные не предназначены для усиления постоянного тока.

### 2. Операционные усилители.

Это базовые усилители для реализации очень широкого класса различных нелинейных устройств.

#### 3. Компараторы напряжения

#### 4. Ограничители

#### 5. Перемножители (для реализации смесителя)

#### 6. Активные и пассивные фильтры

#### 7. АЦП и ЦАП (аналого-цифровой преобразователь, цифровой аналоговый преобразователь)

#### 8. Коммутаторы и ключи. (Коммутаторы распределяют по различным входам)

#### 9. Формирователи.(преобразуют параметры сигнала)

#### 10. Генераторы (изготавливаются с различными параметрами), работают с навесными элементами.

#### 11. Модуляторы и детекторы.

Параметры:

У аналоговых ИМС нельзя выделить общее для всех классов микросхем, надо рассматривать отдельно параметры у каждого класса.

## Особенности схемотехники аналоговых ИМС.

Взаимное согласование структур и цепей. АИМС зависят от точных параметров элементов.

1. Точность номиналов существенно важнее чем цифровой ИМС, поэтому параметры ИМС зависят сильно.
2. Эксплуатируются в широких диапазонах. Например, широкий диапазон частот.

ИМС проектируются так чтобы изменение номиналов элементов происходило согласовано, чтоб, в конечном счете, конечный результат менялся мало:

1. правильный выбор схемотехники
2. важные элементы размещаются как можно ближе друг к другу. (Результат – высокоточная аналоговая структура)
3. Принцип схемотехнической избыточности

На маленьких площадях можно реализовать сложные схемы. В микросхемах схемы транзисторов меньше чем резисторов и конденсаторов. В ИМС распространены многотранзисторные схемы с очень большой избыточностью активных элементов. Можно реализовать много дополнительных факторов.

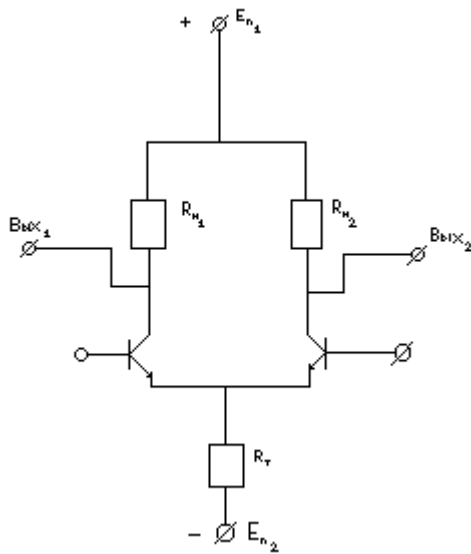
Отрицательная обратная связь резко улучшает все характеристики, но уменьшает коэффициент усиления.

Широко используются не догруженные режимы работы, не достигается показатель усиления по мощности (повышается надежность прибора).



## Примеры каскадов аналоговой схемотехники.

### Дифференциальный каскад.



Здесь парафазные входы и выходы (один + другой -).

На выходах всегда возникают парафазные напряжения.  $R_T$  всегда большое по величине ( $R_{Э}$ ) и они выступают как генераторы тока. Когда один транзистор открывается, другой закрывается. Парафазные сигналы на оба входа независимо.

Напряжение на выходе пропорционально разности входных сигналов.

#### Реальность.

Одинаковые (симметричные) обе половины, тем более каскад ближе приближается к идеальному алгоритму работы.

Здесь 2 коэффициента напряжения:

К усиления диф. сигнала;

К усиления синфазного сигнала;

#### *К диф. сигнала:*

Диф. сигнал как разность между входами. Однако сигнал можно прикладывать по-другому, например, относительно земли. Если бы диф. каскады были бы одинаковые, то выходной сигнал был бы равен 0, но они ассиметричны, на входе есть сигнал (они характеризуют К усиления синфазного сигнала). Он вреден.

Коэффициент ослабления синфазного сигнала.

$K_{осс} = K_{ус.диф.}/K_{ус. синф.}$

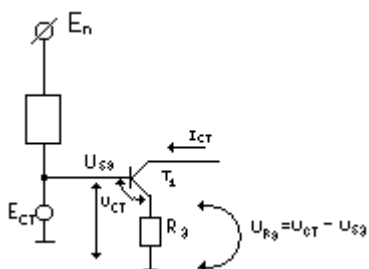
$K_{осс} = R_T/r_{гТ}$

$R_T$  стремятся сделать большое.

Вместо  $R$  ставят источники стабильного тока, которые приближены к теоретическим.

## Источники стабильного тока.

### «Токовое зеркало»



**Принцип работы:** Когда транзистор открыт  $U_{бэ} = \text{const}$ . Тогда  $U_{гэ} = U_{сг} - U_{бэ}$

$$U_{гэ} = U_{сг} - U_{бэ} = R_3 \cdot I_{сг}$$

Причины стабилизации тока:

-  $I_{сг}$  уменьшается тогда и  $U_{гэ}$  тоже уменьшается.

$U_{сг} = \text{const}$ , то увеличивается  $U_{гэ}$ , который открывает  $T1$  и увеличивает ток.

-  $I_{сг}$  увеличивается.  $U_{гэ}$  возрастает, транзистор закрывается и уменьшает ток.

### Составные транзисторы.

Для увеличения характеристик

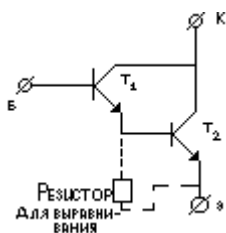


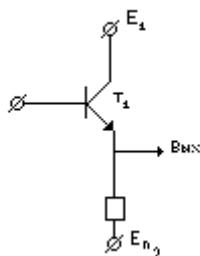
Схема Дарленгтона.  $T1$  – базовый ток  $T2$ .  $\beta_0 = \beta_1 \cdot \beta_2$

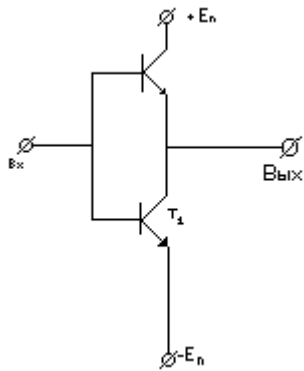
### Примеры фрагментов выходных каскадов.

#### Эмиторный повторитель

Мощность может увеличиваться за счет тока.

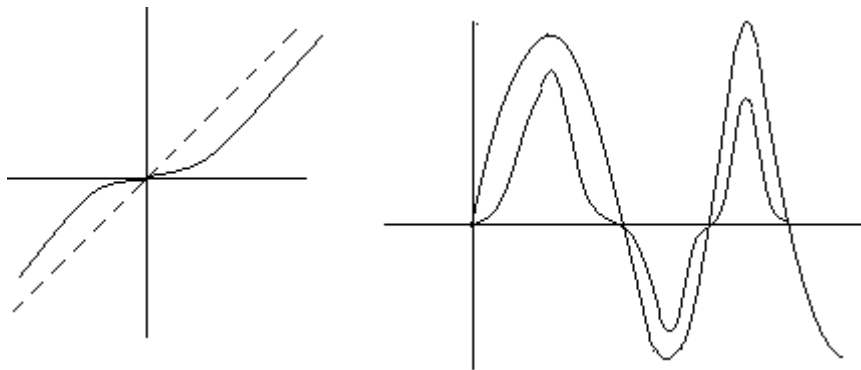
При биполярном питании. Двукантактная схема выхода. Происходит искажение сигнала (звука) типа «Ступенька»



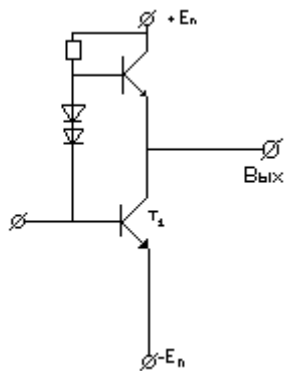


**Характеристики:**

Имеет в районе 0 изгиб зону не чувствительности. Это приводит к тому что сигнал:

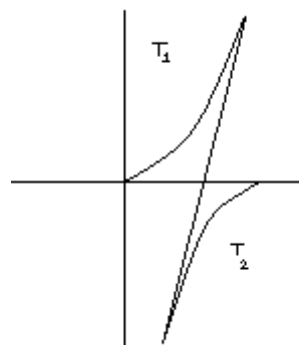


**Способ избавления:**



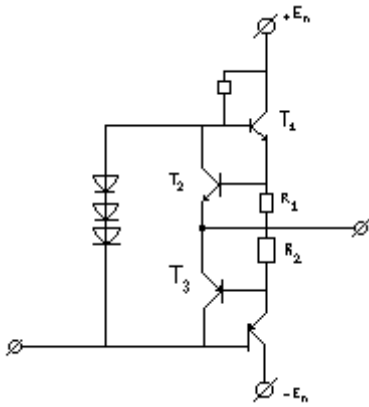
Между базами постоянное смещение + постоянное напряжение.

Искажение типа «Ступенька» исчезает.



**Защита по току.**

Защита мощных транзисторов по току.



Если ток большой то на R1 создается большое падение напряжения которое открывает транзистор T3. T3 берет большую часть тока T1 для препятствия его увеличения тока.

### ИМС операционных усилителей.

Операционные усилители - однокристальные ИМС, в одной ИМС 2-4 усилителя .

Операционный усилитель – это ИУ пост. тока (усилитель с непосредственными связями) предназначенный для построения аналоговых узлов РЭА.

Отличия операционного усилителя:

1. Он имеет гигантские усиления по напряжению до 10 млн.
2. Они имеют два входа прямой и инвертирующий.
3. Он имеет большое входное сопротивление (МОм) и малое выходное сопротивление от 10 до 1 Ом.
4. Чем больше К усиления тем меньше св-ва устройства на ее основе зависят от усилителя (Т, влажность)
5. Усилитель, если имеет большое включение, то подключение не меняется .

Параметры операционного усилителя.

$$K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}; U_{\text{вых}} = K_u U_{\text{вх}}$$

$$U_{\text{вых}} = K_u (U_1 - \beta U_{\text{вых}}) = K_u U_1 - \beta K_u U_{\text{вых}}$$

$$U_{\text{вых}} = (1 + \beta K_u) = K_u U_1$$

$$U_{\text{вых}} = U_1 \frac{K_u}{1 + \beta K_u} = \frac{1}{\beta}$$

K<sub>u</sub>- не зависят от св-в усилителя, а определяется только устройством подключенным к усилителю. K<sub>u</sub> падает с частотой, требуется чтоб усилители были широкополосными либо с внутренней или наружной коррекцией.

Внутренняя: не надо ни чего навешивать.

Наружная: влияет на характеристики.

Частота единичного усиления:

Частота по которой K<sub>u</sub> = 1 без всяких обратных связей.

Входные и выходные сопротивления. Они характеризуют способность делителя к подключению к другим устройствам.

Во входных различают:

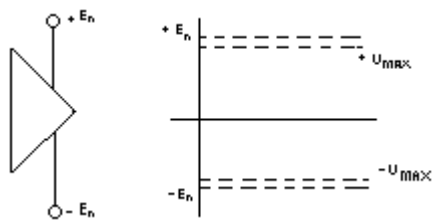
$R_{вх.диф.}$  входное сопротивление между прямым и инвертными входами усилителя.

$R_{вх.синф.}$  между входом и землей.

*Мощность* у усилителя ограничена, входное сопротивление потребителя не сможет быть меньше некой величины. Если входное сопротивление меньше усилитель сгорит или изменит характеристики.

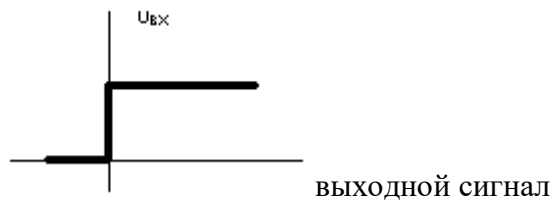
### Динамический диапазон усилителя

Они все биполярные.

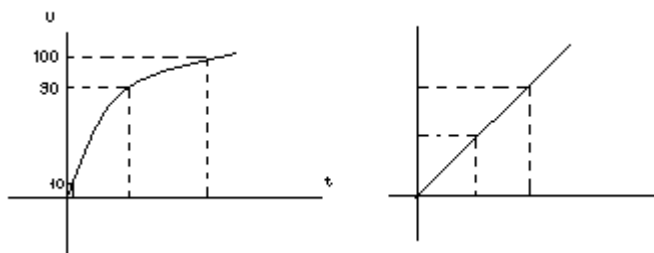


Сигнал будет в пределах от  $U_{max}$  до  $-U_{max}$

Импульсная характеристика:



Время нарастания (Иногда более удобнее является скорость нарастания)

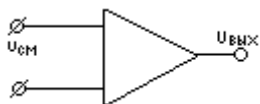


Иногда есть время установления. Это интервал времени, когда  $U_{вых}$  входит в зону перед заданной ошибки.

### Точностные свойства.

Характеризуют симметричность входов

КОСС (коэффициент ослабления синфазной составляющей), либо такая характеристика как смещение нуля



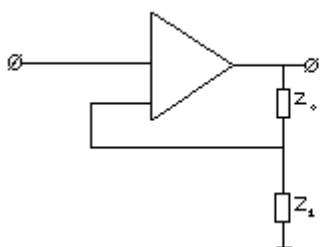
В реальности входы не одинаковы а следовательно  $U_{вых}=0$  при замыкании. Надо замкнуть  $U_{см}$  чтоб получить  $U_{вых}=0$ .

Температурный дрейф нуля: это проявляется в том, что напряжение не зависит от температуры.

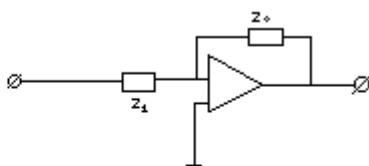
Группы и типы ОУ.

1. ИМС ОУ общего назначения на построение узлов РЕА имеющую суммарную погрешность не более 1%.
2. ИМС прецизионных усилителей, они предназначены для использования в измерительных устройствах.  $K_u$  больше смещения и дрейф у них меньше. (дорогие)
3. ИМС быстродействующих ОУ они широкополосные и высокая скорость нарастания. В них выстраивается ВХ сигнал.
4. Микромощные ОУ. Характерны очень малой мощностью потребления для устройств работающих в режиме ожидания и батарейного питания. (Проигрыш в быстродействии).
5. Мощные (выходной ток более 1А) и высоковольтные (выходное напряжение 20 В) ИМС. Нуждаются в радиаторах и мощных источниках питания.

**Примеры использования усилителей:**

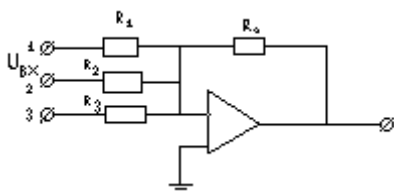


Не инверт. усилитель.



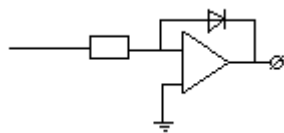
Инвертирующий усилитель.

**Сумматор.**



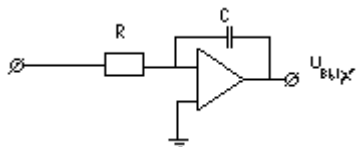
$$U_{вых} = -\frac{R_0}{R_1}(U_{вх1} + U_{вх2} + U_{вх3})$$

**Логарифмический усилитель**



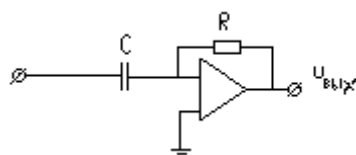
$$U_{\text{вых}} = K1 \ln(K2 U_{\text{вх}})$$

### Аналоговый интегратор.



$$U_{\text{вых}} = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{\text{вх}}(t) dt$$

### Устройство дифференцирования:



$$U_{\text{вых}} = -RC \frac{dU_{\text{вх}}}{dt}$$

*Заключение.* В данной теме студент расширяет знания в области интегральной микросхемотехники, полученные при изучении предыдущей темы. В области цифровой микросхемотехники определяются принципы построения логических схем и обработки цифровых сигналов. В области аналоговой схемотехники изучаются основные виды операций и их особенности. Полученные знания дадут возможность проектировать различные цифровые и аналоговые устройства с использованием интегральной элементной базы.

## **6. Основные направления развития функциональной электроники и перспективы их развития. Современные радиоэлементы, реализующие принципы функциональной электроники.**

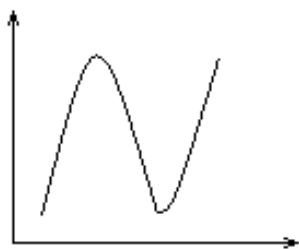
- 6.1. Функциональная электроника.
- 6.2. Оптоэлектроника.
- 6.3. Акустоэлектроника.
- 6.4. Магнетоэлектроника.
- 6.5. Диэлектрическая электроника
- 6.6. Криоэлектроника.

## Функциональная электроника.

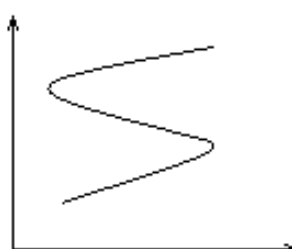
Функциональная электроника – одно из наиболее перспективных направлений *всей* электроники. В устройствах функциональной электроники реализуются целые схемы, но здесь невозможно соотнести отдельные области с дискретными элементами. При проектировании устройств этап создания эквивалентной схемы отсутствует. При этом для обработки информации могут использоваться физические явления вообще не связанные с электропроводностью. В настоящее время используются следующие физические явления:

- оптические (наиболее развитые)
- явления взаимодействия потока электронов с акустической волной в твердом теле
- новые магнитные материалы
- использование покоящихся или движущихся неоднородностей (доменов и шнуров)
- явления, связанные с изменением структуры конденсирующих сред на молекулярном уровне
- элементы на основе эффекта Ганна
- явление холодной эмиссии
- ПЗС структуры
- использование биологических структур на молекулярном уровне
- использование аморфных веществ с нелинейными характеристиками

N-образные характеристики



S-образные характеристики



## Оптоэлектроника.

Это такой прибор в котором для обработки информации происходит преобразование сигнала в оптический и обратно.

Главные особенности:

- элементы оптически связаны
- электрически изолированы

Результат:



Легко согласуются, высоковольтные и низковольтные цепи, ВЧ и НЧ.

Основные свойства светового потока:

1. Зарядовая нейтральность.
2. однонаправленность
3. Двухмерность потока информации
4. Высокая несущая частота, позволяет передавать широкополосный сигнал
5. Возможность пересечения пучков без взаимодействия
6. Большая функциональная нагрузка

Направления ОЭ:

- оптическое взаимодействие твердого тела с излучением.
- Электрооптическое. Внутренние эффекты.

Замена гальванических и магнитных связей на оптические. (коммутаторы, усилители)

Оптопара (оптрон)

Представляет собой: оптический излучатель и фоточувствительный прибор, в качестве которого лежит фоторезистор, фотодиоды, фототеристор.

Основные параметры:

1. Сопротивление развязки по постоянному току
2. коэффициент передачи тока
3. время переключения
4. проходная емкость
5. Когда 2-ой типичный фототранзистор, тогда возможен двойной способ управления.

### **Акустоэлектроника.**

Это направление функциональной электроники связано с использованием механических резонансных эффектов, пьезоэффектов, акустических волн и эффектов взаимодействия электрических токов с акустическими волнами.

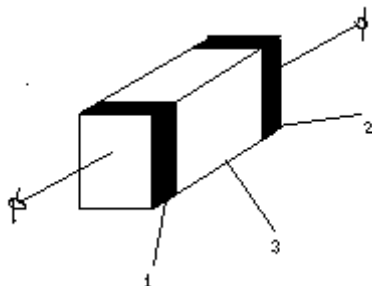
ПАВ (поверхностно-акустические волны) нашли наибольшее применение в акустических преобразователях. Существует достаточно много типов ПАВ. При нанесении на поверхность, по которой распространяется волна, узора, становится возможным подвергать волну различным преобразованиям.

*Пьезоэффект (прямой или обратный)* высокая механическая добротность. Используется в фильтрах и стабильных генераторах. Элемент – кварц.

Обратный Пьезоэффект:

1. входные колебания превращаются в механические колебания кварцевой пластины.
2. Кристалл кварца, как механизм колебательной системы обладает высокой добротностью

1. Резанистор
2. Ультразвуковые линии задержки



ОЛЗ на объёмных акустических волнах.

1. Входной преобразователь
2. выходной
3. кристалл

ОЛЗ на ПАВ

Волна распространяется не в объеме, а вдоль границы.

Излучатели и приемники можно реализовывать в виде достаточно сложных рисунков. В поверхностной зоне можно осуществлять довольно сложную обработку сигнала.

Устройства:

Широкополосные устройства

Фильтры с заданными частотными характеристиками.

### **Магнетоэлектроника.**

В магнетоэлектронике используются тонкие магнитные пленки. Их толщина порядка одного домена. Магнитные свойства тонких пленок можно использовать для запоминания и обработки информации. В связи с этим в магнетоэлектронике возникло отдельное направление — *магнитные интегральные микросхемы*, главным практическим результатом которого явилось создание СБИС ПЗУ на *цилиндрических магнитных доменах* (ЦМД). Последние используются как носители информации. Цилиндрические магнитные домены появляются в тонких эпитаксиальных пленках специальных материалов — *гранатов*, имеющих химическую формулу типа  $R_3Fe_5O_{12}$ , где R — редкоземельный элемент (Y, Cd и др.)

### **Магнитные полупроводники.**

Проявляются полупроводниковые свойства, а так же магнитные свойства. Шириной п-н перехода можно управлять магнитным способом. СВЧ микросхемы – монолитные на магнитной полупроводниковой подложке. Обработка информации внутри среды.

## Диэлектрическая электроника

Взяла + от ламп и + от транзисторов.

При переходе к очень диэлектрическим пленкам их свойства начинают меняться (которые в массивных образцах отсутствуют).

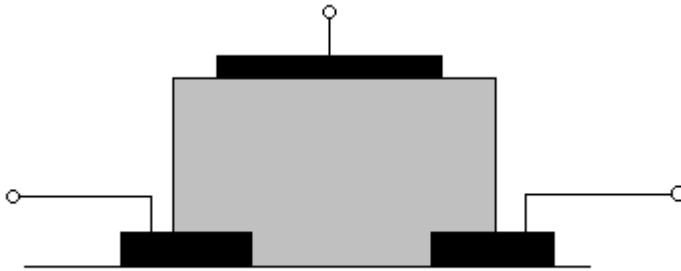
Так надо подобрать вещества, что работа выхода  $\phi$  меньше у металла чем у диэлектрика, то  $\phi$  металла проникает в диэлектрик. Используется толстая диэлектрическая пленка. Толщина пленки соизмерима с толщиной проникновения  $\phi$  из металла в диэлектрик.

Выбирается 2 металла  $M_1$  ( $\phi$  работа)  $\phi$  меньше чем у  $M_2$  следовательно ток течет в одну сторону. Получаем вентильные свойства. Этими явления не занимается не одна область в физике.

Различия тока 10 в 4 раз

На эти свойства реализуются свойства как у транзистора.

3 электрода управляют потенциалом в диэлектрике.



+ Маленькие размеры. Простота в технологии.

1. очень хорошие частотные характеристики.
2. низкий уровень шумов
3. малая чувствительность к T
4. малая чувствительность к радиации.

## Криоэлектроника.

Это связано с использованием взаимодействия электромагнитных полей с электронами в твердых телах при сверх низких температурах.

0 – 80 K

Свойства:

Сверх проводимость металлов и сплавов скачкообразно.

Зависимость электрической проницаемости от напряжения электрического поля

Низкий уровень шумов

У некоторых металлов появляются аномальная подвижность зарядов

Криоэлектроника использует свойства сверхпроводников скачкообразно менять проводимость. Можно реализовывать переключательные элементы.

Минус: необходимость глубокой заморозки.

### **Хемоэлектроника.**

Это область науки изучающая построение информационных систем на основе процессов протекающих в жидкостях или на разделе двух фаз.

Возможно построение многофункциональных устройств. Одновременно несколько физико – химических процессов.

*Виды элементов:*

Диоды выпрямители

Интеграторы

Усилители

Преобразователи

Ячейки памяти

Конденсаторы Супер большой емкости до единиц фарад.

### **Молекулярная электроника.**

Это область электроники в которой функционально электронные элементы организованы на уровне отдельных молекул или молекулярных комплексов.

### **Биоэлектроника**

Бионика. Решает задачи электроники на основе анализа структуры жизнедеятельности живых организмов.

+ КПД

Исключительная надежность функционирования

Самовосстановление.

*Заключение.* Знания, получаемые студентом в данном разделе, имеют особую важность, так как функциональная электроника считается начинающимся и особенно перспективным четвертым поколением развития электроники. Дальнейшее ее развитие даст возможность проектировать радиотехнические устройства обработки сигналов на принципиально новой основе, в результате чего знания в данной области необходимы для квалификации специалиста на уровне мировых стандартов.

**8. Классификация приборов вакуумной техники. Физические явления, используемые в приборах вакуумной техники. Типы и характеристики электронных ламп. Типы и характеристики электронно-лучевых приборов.**

**Электровacuумные приборы**

- Мощные ВЧ усилители.
- Супер высоко качественное усиление.

Называется устройство, в котором рабочие пространство изолировано газонепроницаемой оболочкой. В лампах используется вакуум высокого разрежения, либо наполнен газами.

Действие приборов основано на движение частиц, электронов.

Семейство приборов огромное.

Любой электровacuумный прибор содержит систему электродов, которые соединяет внутреннее пространство баллонов с внешним миром.

Есть различные системы электродов, но некоторая общая.

Виды электродов:

- Катоды, электроды или электроны.
- Аноды, электроды собирающие электроны.
- Сетки электрода соединяющие специальное распределение полей которое управляет движением электрода.

Экраны- визуальное изображение информации.

Некоторые виды сеток называют экраны.

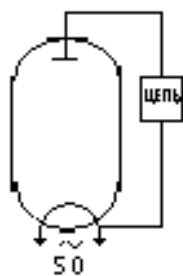
Электроны появляющиеся в вакууме за счёт эмиссии.

Виды эмиссий:

- термоэмиссия (Электроны за счёт нагрева) более чистая.
- фотоэмиссия (За счёт бомбардировки фотонами)
- электростатическая эмиссия (За счёт сильного положительного поля которое может вызывать электроны из вещества)
- Вторая электронная эмиссия. За счёт бомбардировки быстрыми электронами.

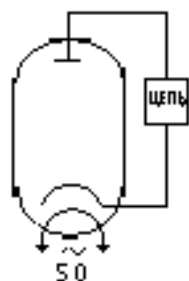
Катоды:

Прямого и косвенного канала.



Прямой накал

Напряжение и ток определяется типом лампы. У такого прямого канала, одновременно подключаются напряжение канала и внешняя цепь.



Косвенный накал

Катод канала и цепь не соединенные.

Плюсы:

1) Простота (прямой канал)

Минусы:

1) Объединение цепей

2)

Электронны имеют разную энергию и разную скорость

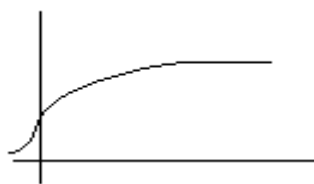
Косвенный канал

- Большая сложность

- Малая долговечность

Отсутствие минусов или у прямого канала.

Первой электромагнитной лампой был электровакуумный диод.



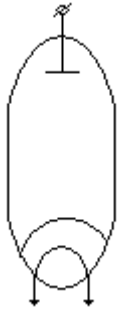
1) Ток может течь при нулевых и отрицательных значениях.

2) Рост ток определяется пространственным зарядом.

3) Когда анод потребляется вылетевшие электроны- режим насыщения.

### Триод.

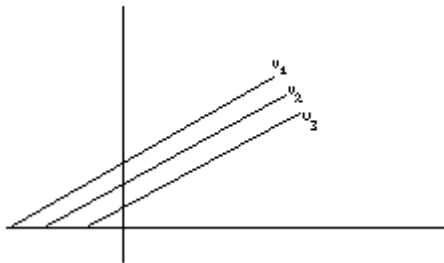
Это ЭВП между катодом и анодом имеется управляющая сетка.



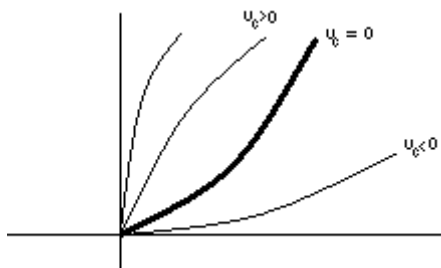
Сетка для управления потенциалом величина потенциала сетки существенно сильнее, так как она расположена гораздо ближе.

Как правило потенциал сетки делается меньше нуля.

Поэтому сеточные токи отсутствуют, управление осуществляется чисто потенциалом (похоже на полевой транзистор) В мощных лапах используется режим с сеточными токами.



Анодно-сеточные характеристики



анодные характеристики

Параметры:

- 1) Крутизна управление лампой по сеточному напряжению.
- 2) Внутреннее сопротивление.
- 3) Коэффициент усиления.
- 4) Проницаемость.

Недостатки:

- 1) Анодное напряжение влияет на ток, это снижает эффективность управления.
- 2) Достаточно большая ёмкость анод-катод, что уменьшает устойчивость усилителя (используется в генераторах)

Появилось много разновидностей ламп.

### **Тетрод.**

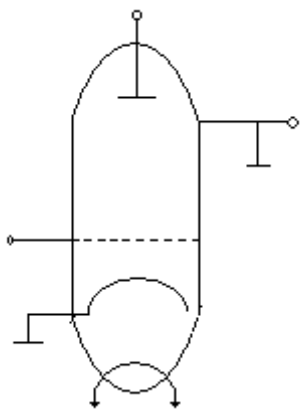
Появилась новая сетка- экранная сетка.

По переменному они заземлены.

Эта сетка играет роль, как электростатического сигнала, что даёт:  
-уменьшение всей ёмкости.

-резко снижается влияние анодного напряжения.

Лучевые тетроды: делают для того чтобы вторые электроны не улетали. Установки специальных электронов.



*Заключение.* В процессе изучения материала лекции студент приобретает знания в области использования мощных электронных средств, необходимых для построения соответствующих установок и комплексов, таких, как мощные радиопередающие и телевизионные центры. Знания в этой области необходимы специалистам, проектирующим и эксплуатирующим данную аппаратуру.



## *Заключение*

Полученные студентом при изучении данной дисциплины знания могут быть применены при изучении последующих курсов радиотехнического направления, а также при проектировании и разработке нового радиоэлектронного оборудования в дальнейшей трудовой деятельности.

## *Список литературы*

- Бобровников Л.З. Электроника. Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2004. – 557с.
- Герасимов С.М и др. Физические основы электронной техники. – Киев, Высш.шк., 2006. – 433с.
- Гусев в.г., Гусев Ю.М. Электроника. – М.: Высш.шк., 2005 – 495с.
- Лачин В.И. Электроника. – Ростов н/Д, Феникс. 2008. – 572с.
- Прянишников В.А. Электроника. Курс лекций. – СПб.: Корона, 2009, - 415с.
- Мильвидский М.Г. Полупроводниковые материалы в современной электронике. – М.: Наука, 1996, 143с.
- Электрорадиоматериалы. /Под роед. Б.М.Тареева. – М.: Высш. шк., 2005. – 400с.
- Яманов С.А. Химия и радиоматериалы. – М.: Высш.шк., 2005. – 400с.
- Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники: Учебник. – СПб.: Изд-во «Лань», 2004. – 368 с.
- Антипов Б.Л., Сорокин В.ЧС., Терехов В.А. Материалы электронной техники: Задачи и вопросы. Учебное пособие для вузов. – СПб. Изд-во «Лань», 2007. – 208 с.
- Шишкин Г.Г., Электроника: Учебник для вузов / Г.Г. Шишкин, А.Г.Шишкин. – М.: Дрофа, 2009. – 703 с.