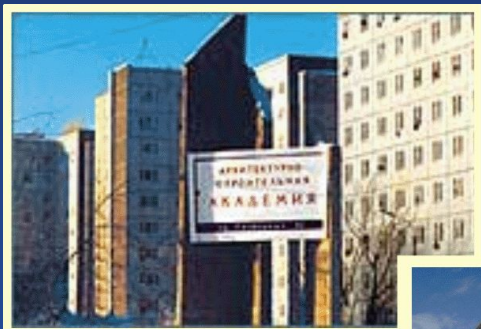




ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Сибирский федеральный университет



Н. М. Егоров

Электроника

УДК 621.38
ББК 32.85
Е30

Электронный учебно-методический комплекс по дисциплине «Электроника» подготовлен в рамках инновационной образовательной программы «Информатизация и автоматизированные системы управления», реализованной в ФГОУ ВПО СФУ в 2007 г.

Рецензенты:

Красноярский краевой фонд науки;

Экспертная комиссия СФУ по подготовке учебно-методических комплексов дисциплин

Егоров, Н. М.

Е30

Электроника. Презентационные материалы. Версия 1.0 [Электронный ресурс]: наглядное пособие / Н. М. Егоров. – Электрон. дан. (30 Мб). – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – (Электроника : УМКД № 48-2007 / рук. творч. коллектива Н. М. Егоров). – 1 электрон. опт. диск (DVD). – Систем. требования : *Intel Pentium* (или аналогичный процессор других производителей) 1 ГГц ; 512 Мб оперативной памяти ; 30 Мб свободного дискового пространства ; привод *DVD* ; операционная система *Microsoft Windows 2000 SP 4 / XP SP 2 / Vista* (32 бит) ; *Microsoft PowerPoint 2003* или выше.

ISBN 978-5-7638-1479-8 (комплекса)

ISBN 978-5-7638-1481-1 (пособия)

Номер гос. регистрации в ФГУП НТЦ «Информрегистр» 0320802735 от 20.12.2008 г. (комплекса)

Номер гос. регистрации в ФГУП НТЦ «Информрегистр» 0320802745 от 22.12.2008 г. (пособия)

Настоящее издание является частью электронного учебно-методического комплекса по дисциплине «Электроника», включающего учебную программу, конспект лекций, учебное пособие «Исследование параметров и характеристик полупроводниковых приборов с применением интернет-технологий», интерактивное электронное техническое руководство к АПК УД «Электроника», демо-версию системы OrCAD 9.1, файлы проектов для математического моделирования полупроводниковых приборов, систему компьютерной проверки знаний тестированием с примерами тестовых заданий, 30-дневную версию LabVIEW 8.5, примеры виртуальных приборов, методические указания по самостоятельной работе, контрольно-измерительные материалы «Электроника. Банк тестовых заданий».

Представлена презентация (в виде слайдов) теоретического курса «Электроника».

Предназначено для студентов направления подготовки бакалавров 210200.62 «Радиотехника» укрупненной группы 210000 «Электроника, радиотехника и связь».

© Сибирский федеральный университет, 2008

Рекомендовано к изданию Инновационно-методическим управлением СФУ

Разработка и оформление электронного образовательного ресурса: Центр технологий электронного обучения информационно-аналитического департамента СФУ; лаборатория по разработке мультимедийных электронных образовательных ресурсов при КрЦНИТ

Содержимое ресурса охраняется законом об авторском праве. Несанкционированное копирование и использование данного продукта запрещается. Встречающиеся названия программного обеспечения, изделий, устройств или систем могут являться зарегистрированными товарными знаками тех или иных фирм.

Подп. к использованию 25.09.2008

Объем 30 Мб

Красноярск: СФУ, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

План лекционного курса

- Модуль 1

Материалы электронной техники
и их электрофизические свойства

- Модуль 2

Полупроводниковые приборы: физические
основы работы, характеристики, параметры,
модели, применение

- Модуль 3

Основы технологии микроэлектронных
изделий и элементы интегральных схем

- Модуль 4

Приборы вакуумной электроники
Перспективы развития электроники



Модуль 1

Материалы электронной техники и их электрофизические свойства

- Тема 1. Предмет электроники. Материалы электронной техники и их электрофизические свойства

Модуль 2

Полупроводниковые приборы: физические основы работы, характеристики, параметры, модели, применение

- Тема 2. p – n -переход. Полупроводниковые диоды
- Тема 3. Биполярные транзисторы
- Тема 4. Тиристоры и симисторы
- Тема 5. Полевые транзисторы
- Тема 6. Фотоэлектрические и излучательные приборы

Модуль 3

Основы технологии микроэлектронных изделий и элементы интегральных схем



Тема 7. Основы технологии микроэлектронных изделий. Базовые ячейки аналоговых и цифровых интегральных схем

Модуль 4

Приборы вакуумной электроники. Перспективы развития электроники

-  Тема 8. Основные типы электровакуумных приборов, их принципы работы и применение
-  Тема 9. Перспективы развития электроники. Нанoeлектроника – исторический этап развития электроники

Тема 1

Предмет электроники. Материалы электронной техники и их электрофизические свойства

Лекция 1



Лекция 2



Лекция 3



Выбор темы

Тема 1

Предмет электроники. Материалы электронной техники и их электрофизические свойства

1. Предмет электроники

1.1. Введение

1.2. Направления развития электроники

1.3. Краткая история развития электроники

1.4. Материалы электронной техники и их электрофизические свойства

1.4.1. Структура кристаллической решетки твердых тел

1.4.2. Кристаллическая структура и типы межатомных связей металлов

1.4.3. Кристаллическая структура и типы межатомных связей полупроводников

1.4.4. Индексы Миллера

1.4.5. Дефекты кристаллической решетки

Тема 1

Предмет электроники. Материалы электронной техники и их электрофизические свойства (продолжение)

- 1.4.6. Классическая физика не может объяснить существования атомов
- 1.4.7. Зонная теория твердого тела и статистика носителей заряда
- 1.4.8. Обратная решетка
- 1.4.9. Волновая механика свободных электронов
- 1.4.10. Движение в пространстве с периодическим потенциалом
- 1.4.11. Зоны Бриллюэна
- 1.4.12. Плотность заполнения энергетических уровней в состоянии термодинамического равновесия
- 1.4.13. Статистика носителей заряда в полупроводниках
- 1.4.14. Зонная структура собственных и примесных полупроводников
- 1.4.15. Зонная структура металлов и диэлектриков
- 1.4.16. Генерация и рекомбинация носителей заряда в полупроводниках

Тема 1

Предмет электроники. Материалы электронной техники и их электрофизические свойства (продолжение)

- 1.4.17. Электропроводность твердых тел
- 1.4.18. Электропроводность металлов и диэлектриков – элементарное представление
- 1.4.19. Электропроводность полупроводников
- 1.4.20. Дрейф носителей заряда в полупроводниках
- 1.4.21. Диффузия носителей заряда в полупроводниках
- 1.4.22. Плотность полного тока
- 1.4.23. Уравнение непрерывности
- 1.4.24. Явления в сильных электрических полях
- 1.4.25. Дрейф носителей заряда в сильных электрических полях
- 1.4.26. Диффузия носителей заряда в сильных электрических полях

Предмет электроники

Целью преподавания дисциплины является подготовка специалистов в области радиотехники в результате изучения студентами физических основ работы, характеристик, параметров и моделей основных типов активных приборов, режимов их работы в радиотехнических цепях и устройствах, основ технологии микроэлектронных изделий и принципов построения базовых ячеек интегральных схем, механизмов влияния условий эксплуатации на работу активных приборов и микроэлектронных изделий.



Направления развития электроники



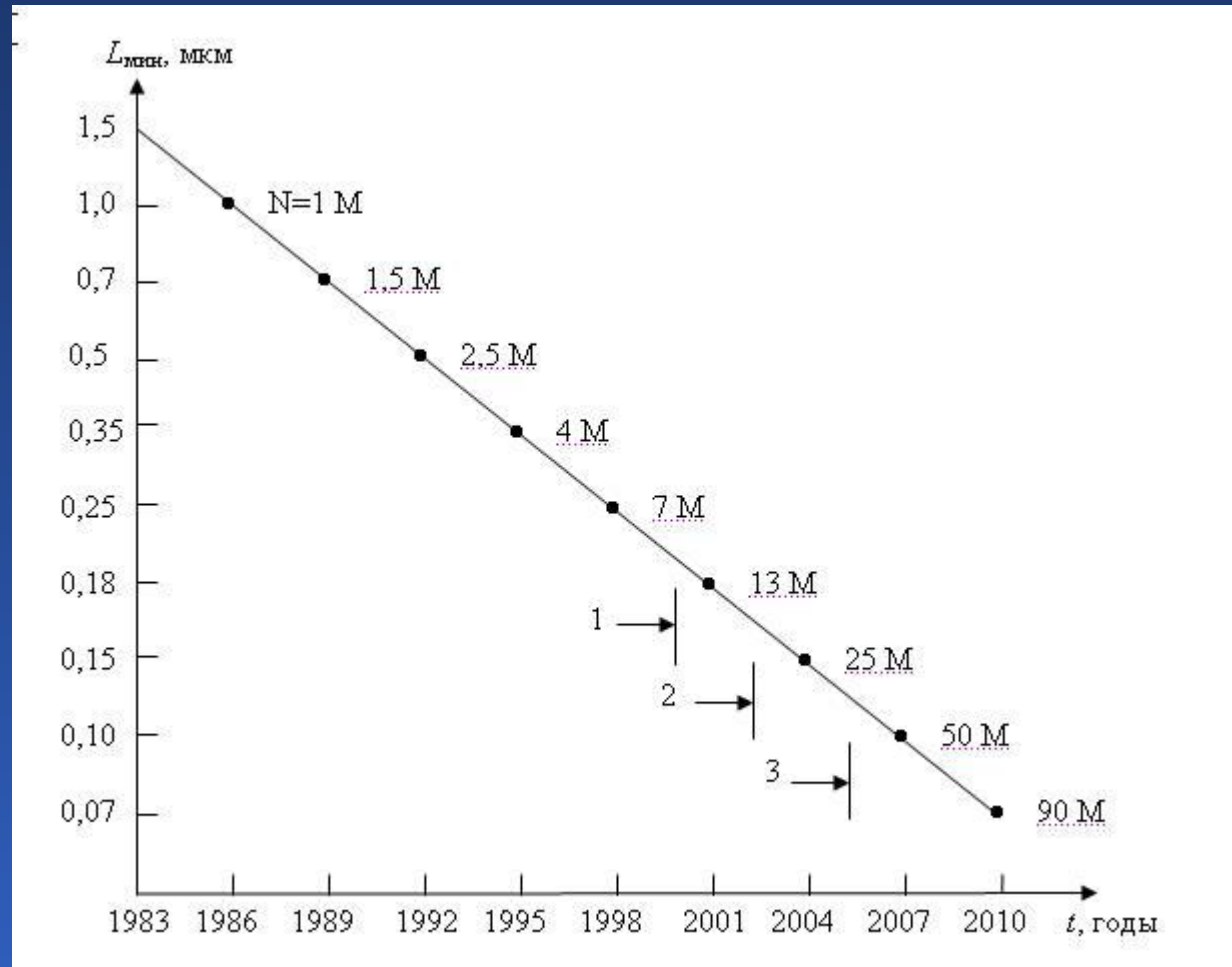
Основные направления развития электроники



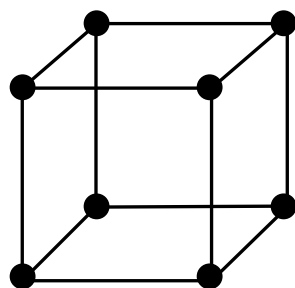
Краткая история развития электроники

Прогресс
и перспективы
промышленных методов
литографии

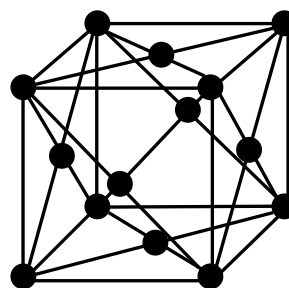
- 1** – оптическая литография с длиной волны 365, 248 и 193 нм;
 - 2** – рентгенолитография или прямое получение рисунка с помощью электронного луча;
 - 3** – электронно-лучевая проекционная литография.
- N – количество логических элементов микропроцессора на 1 см^2 кристалла



Структура кристаллической решетки твердых тел



a



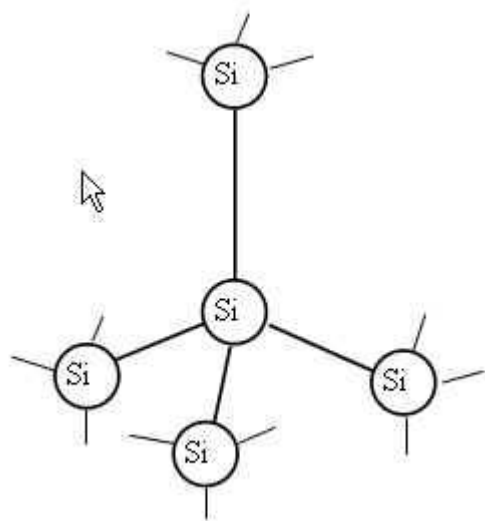
b

Решетки Бравэ:

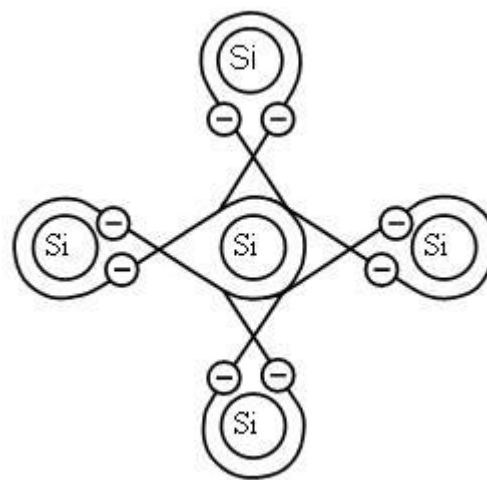
a – простая кубическая; *b* – гранецентрированная кубическая



Кристаллическая структура и типы межатомных связей полупроводников



a

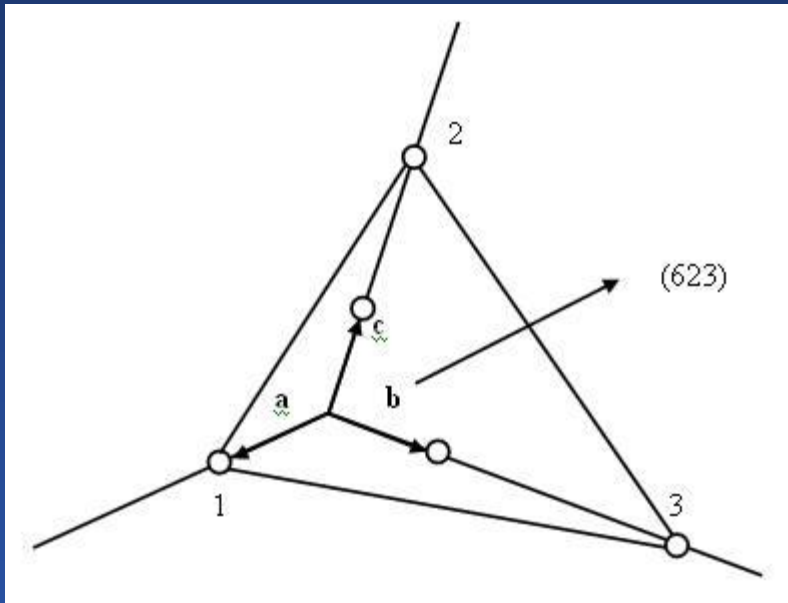


б

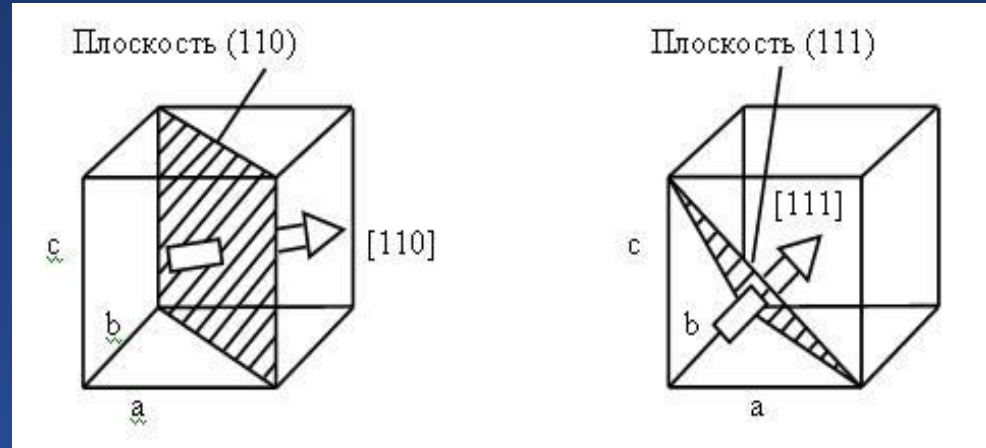
Кристаллическая решетка (а) и структура связей (б)
между атомами кремния



Индексы Миллера



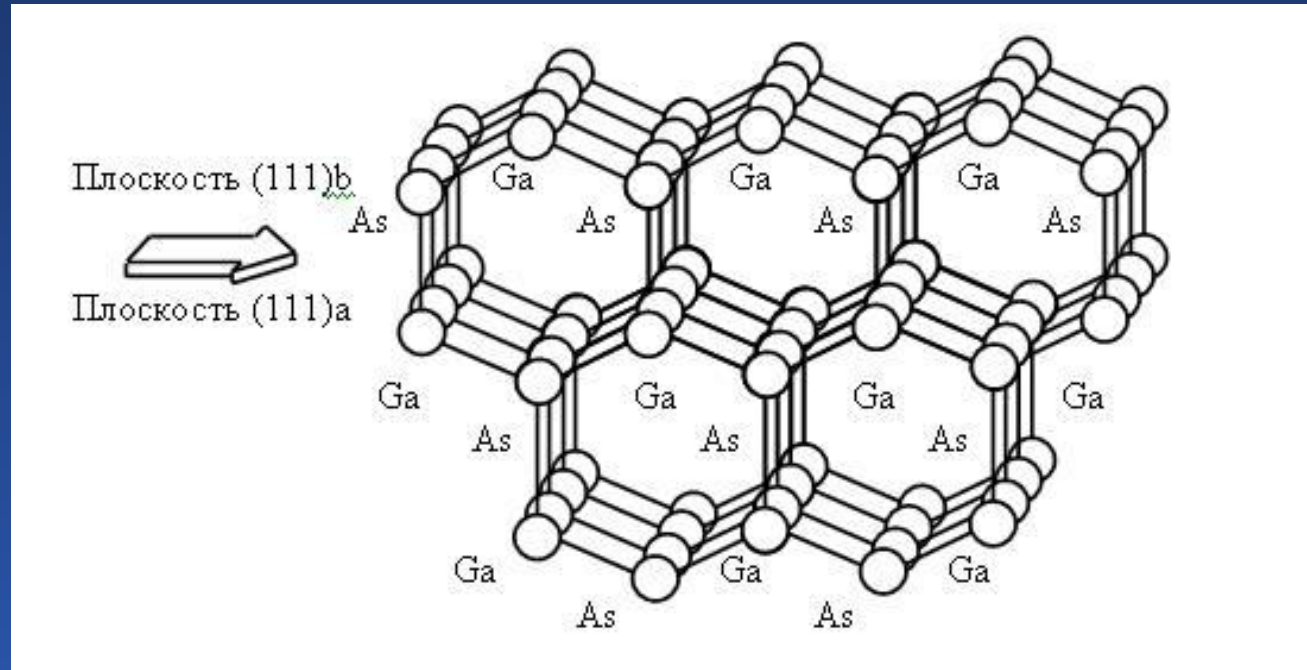
Пояснение понятия
индексов Миллера



Кристаллографические плоскости
(110) и (111) кубической решетки



Индексы Миллера

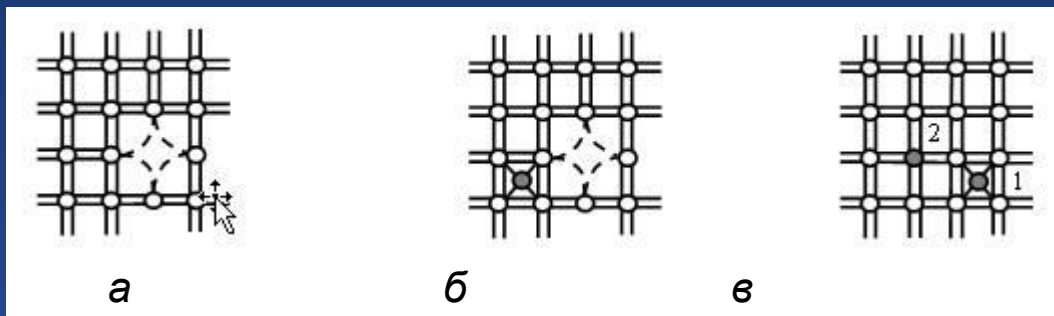


Кристаллическая решетка GaAs в плоскости (111)

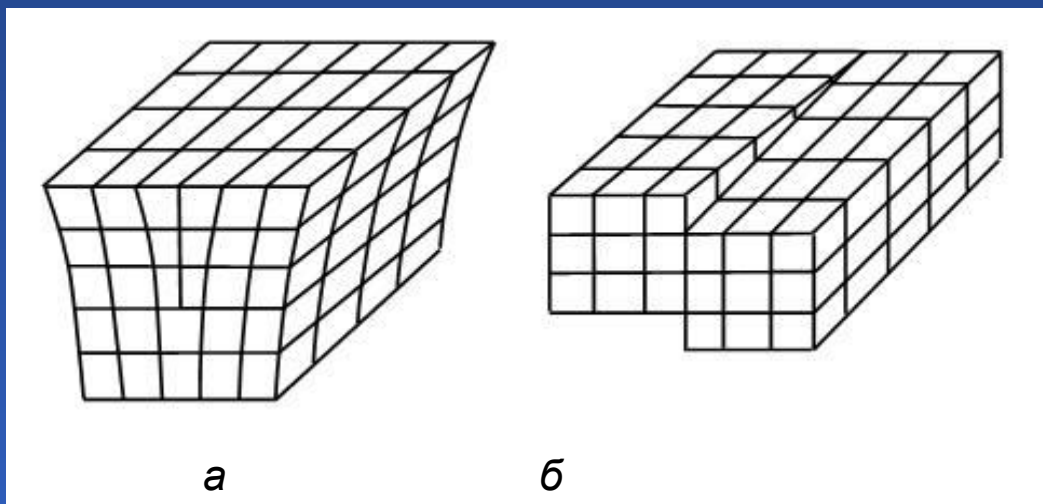


Дефекты кристаллической решетки

Точечные дефекты кристалла:
а – дефект по Шоттки; б – дефект по Френкелю; в – примесные атомы



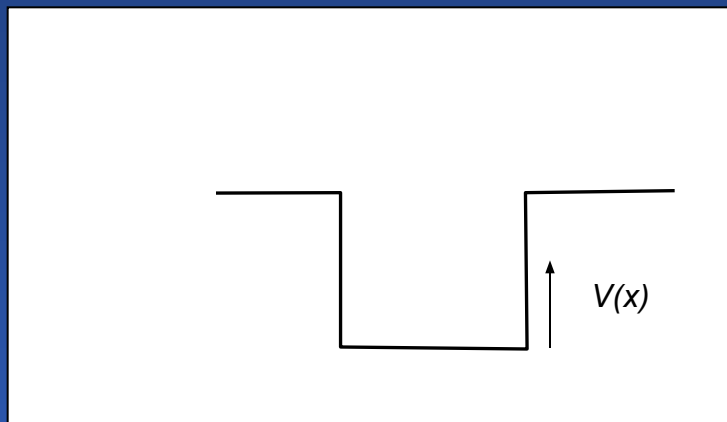
Дислокации в кристаллической
решетке: а – линейные;
б – винтовые



Движение в пространстве с периодическим потенциалом

Электрон может быть описан уравнением плоской волны:

$$\Psi = C \exp[j(\omega t - kr)]$$



Потенциальная энергия электрона в металле.
Модель Зоммерфельда



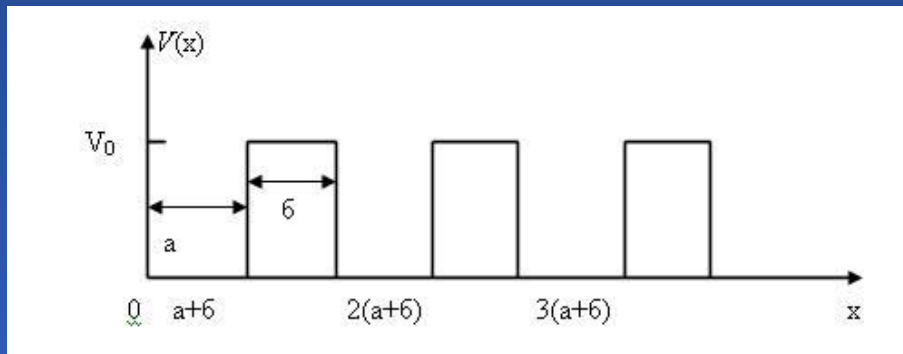
Движение в пространстве с периодическим потенциалом

Уравнение Шредингера для электрона в твердом теле

$$\frac{\partial^2 \Psi(x)}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} [E - V(x)] \Psi(x) = 0,$$

где $V(x)$ – периодический потенциал;

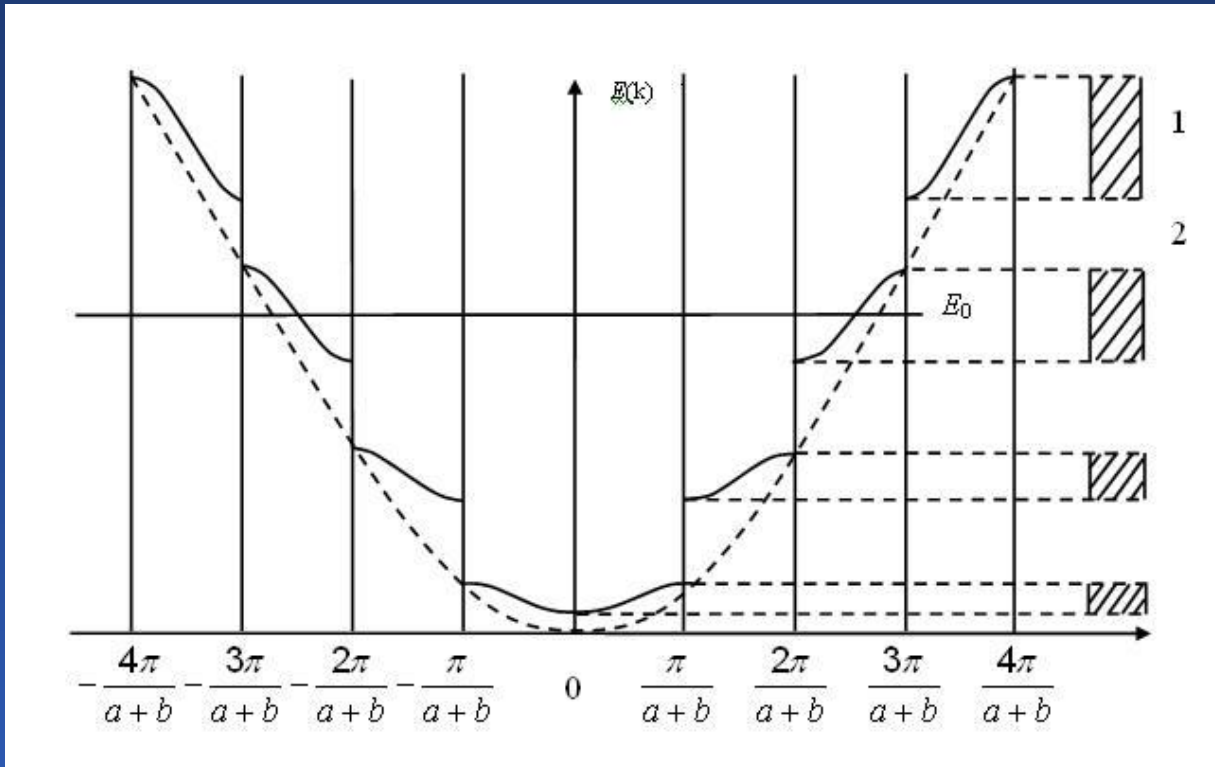
$\Psi(x)$ – волновая функция электрона.



Модель Кронига – Пенни



Движение в пространстве с периодическим потенциалом



Зависимость энергии $E(k)$ электрона от волнового вектора k в потенциале Кронига – Пенни (сплошная линия). Пунктирной линией показана зависимость $E(k)$ для свободного электрона. 1 – разрешенная зона; 2 – запрещенная зона

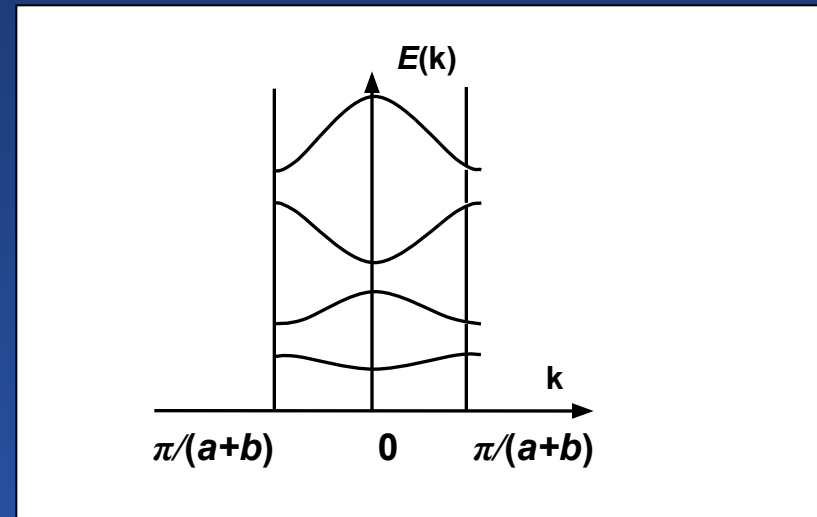


Зоны Бриллюэна

Перенос энергии
невозможен при волновом
векторе, равном

$$-\pi(a+b) \leq k \leq \pi(a+b)$$

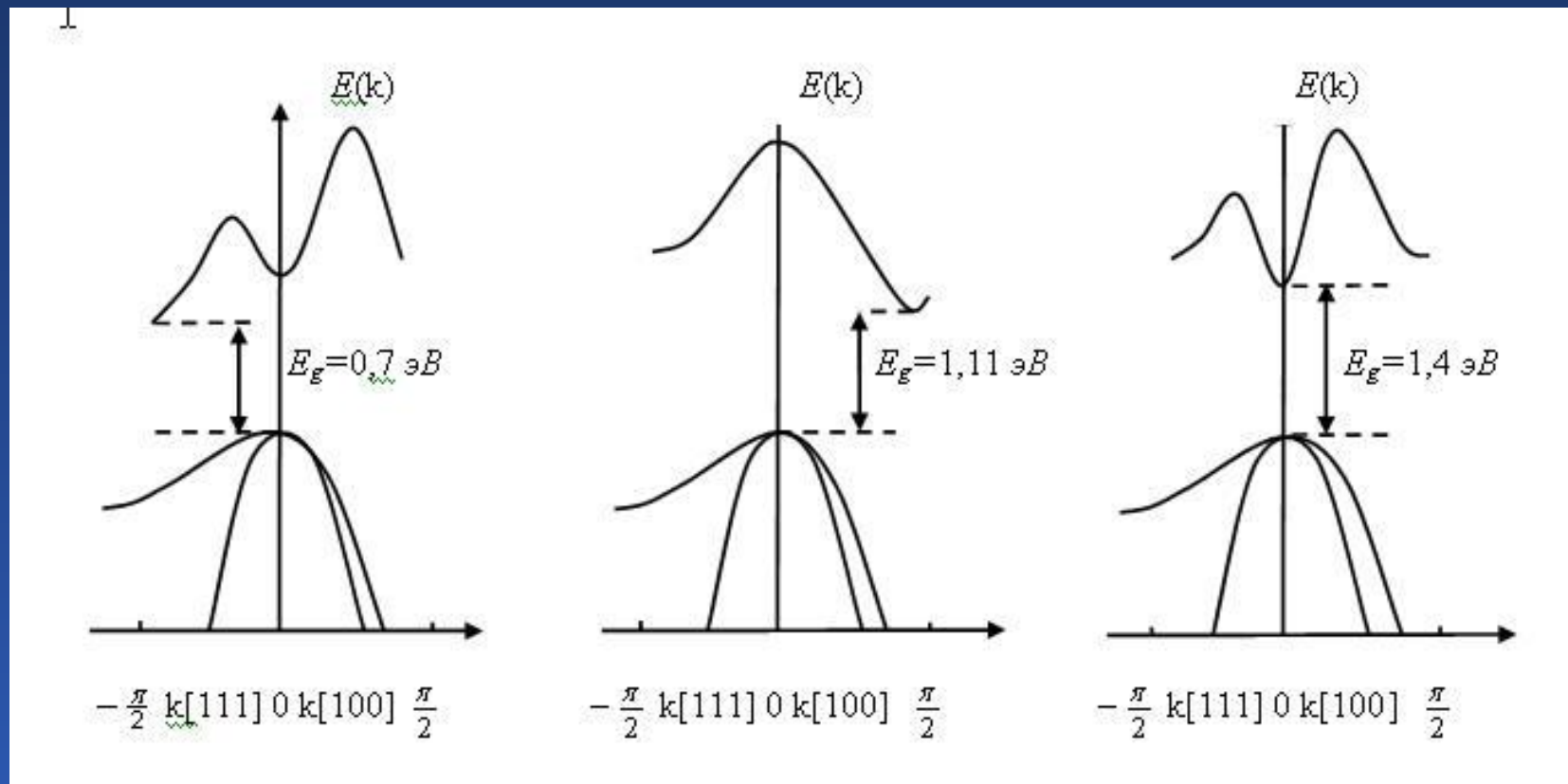
Величина k , при которой волна не распространяется, зависит от направления, поскольку межплоскостные расстояния в кристалле меняются с направлением. Часть k -пространства, ограниченная такими векторами, называется *зоной Бриллюэна*.



Структура энергетических зон
электрона в кристалле,
полученная приведением
к первой зоне Бриллюэна



Зоны Бриллюэна



Энергетические диаграммы Ge, Si и GaAs в k -пространстве



Плотность заполнения энергетических уровней в состоянии термодинамического равновесия

Решение уравнения Шредингера для свободного электрона, находящегося внутри единичного кубического объема, дает некоторые дискретные значения его энергии в k -пространстве:

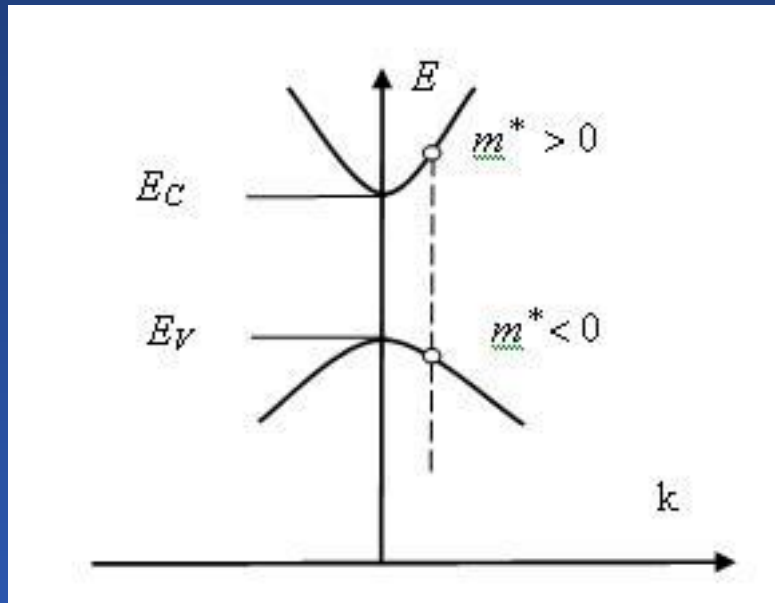
$$E = \frac{\hbar^2}{2m^*a} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$$

m^* – так называемая эффективная масса частицы, сугубо квантовая величина, которую следует отличать от массы свободной частицы в вакууме.

Эффективная масса частицы обратно пропорциональна второй производной энергии по волновому вектору частицы и может принимать как положительные, так и отрицательные значения.



Плотность заполнения энергетических уровней в состоянии термодинамического равновесия



Связь между эффективной массой
частицы m^* , волновым вектором k
и энергией E частицы



Статистика носителей заряда в полупроводниках

Одно из фундаментальных положений в физике полупроводников формулируется следующим образом: *уровень Ферми одинаков во всех частях равновесной системы, какой бы разнородной она не была.* Это положение можно записать в виде двух равносильных выражений:

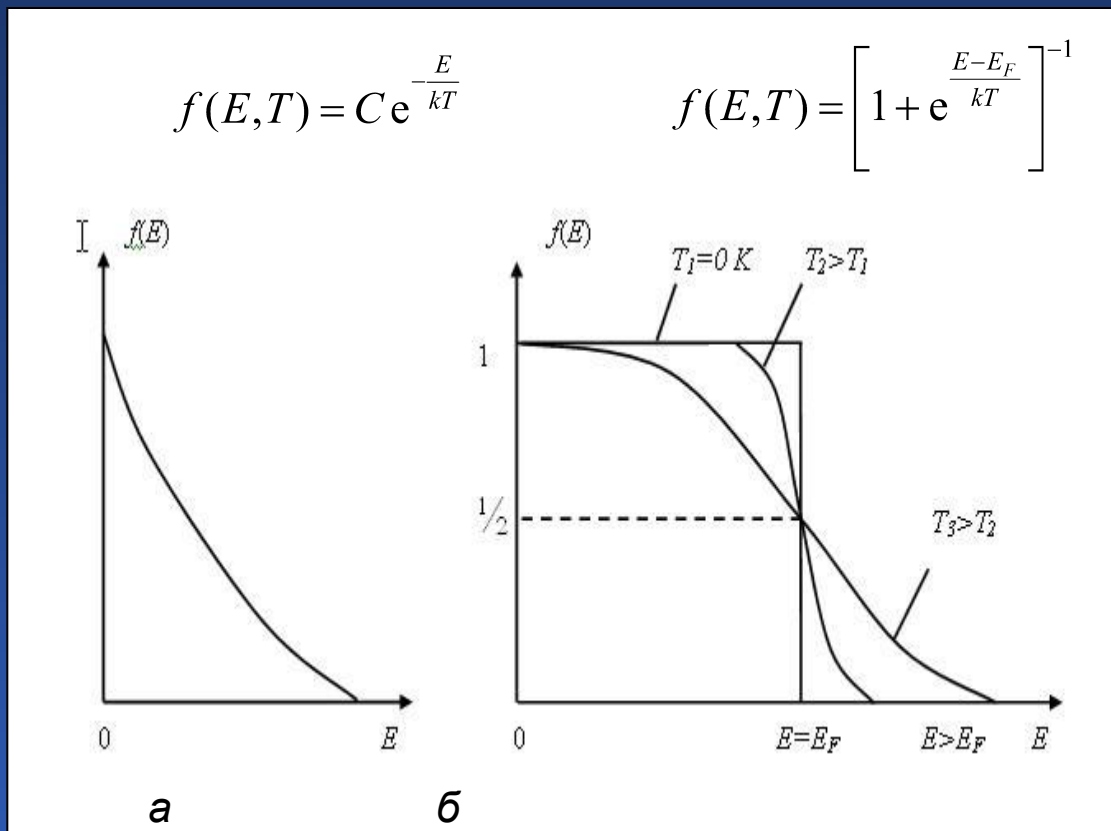
$$\begin{aligned}\phi F &= \text{const}, \\ \text{grad} (\phi F) &= 0.\end{aligned}$$

Из этих условий следует, что если концентрация электронов изменяется с координатой, то возникает электрическое поле:

$$E = \varphi_T \frac{\partial n / \partial x}{n}.$$



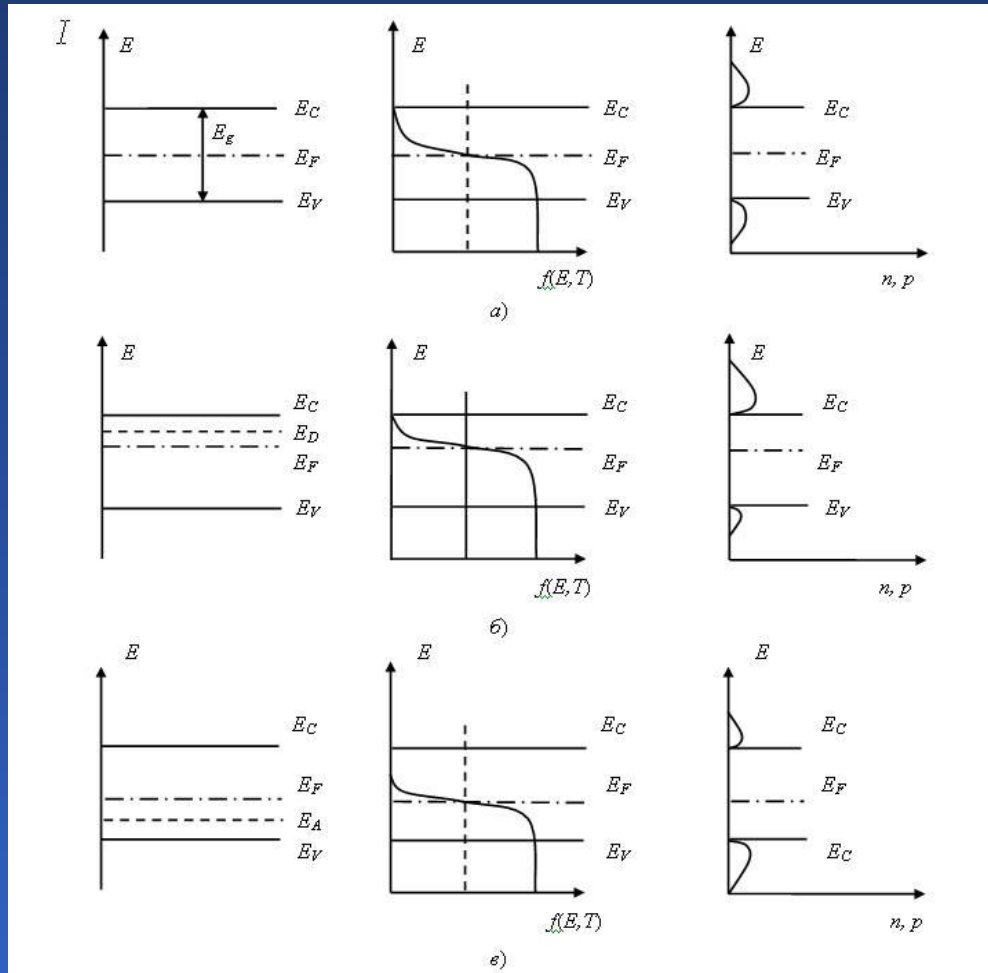
Статистика носителей заряда в полупроводниках



Функции распределения Максвелла –Больцмана (а)
и Ферми – Дирака (б)



Зонная структура собственных и примесных полупроводников



Зонная диаграмма, функция распределения Ферми – Дирака и концентрация носителей в собственном полупроводнике (а), в полупроводнике n -типа (б) и в полупроводнике p -типа (в)



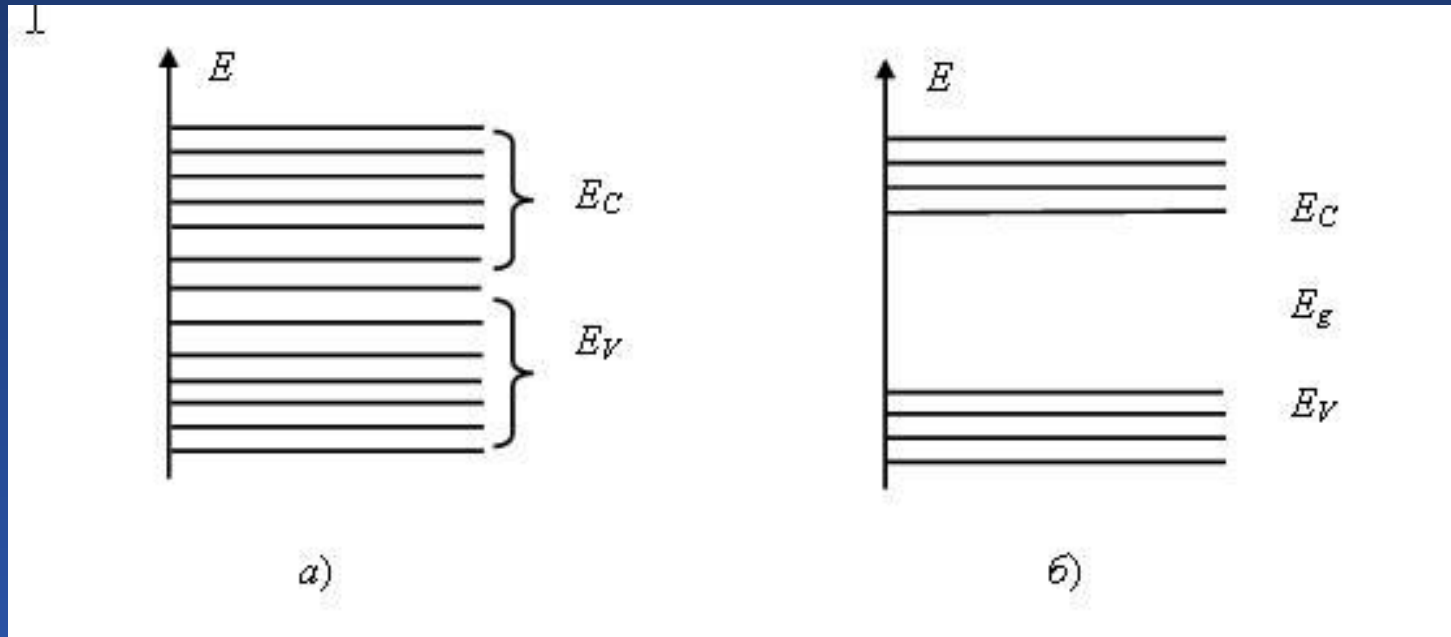
Зонная структура собственных и примесных полупроводников

Значения собственных концентраций свободных носителей заряда и ряд других важных параметров полупроводников

Полупроводник	InSb	Ge	Si	GaAs
Ширина запрещенной зоны E_g , эВ	0,17	0,72	1,1	1,4
Собственная концентрация n_i , см ⁻³	$1,3 \cdot 10^{16}$	$2,4 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^{10}$	$1,4 \cdot 10^7$
Подвижность электронов μ_n , см ² /В·с	8	0,39	0,13	1
Подвижность дырок μ_p , см ² /В·с	0,07	0,19	0,05	0,04



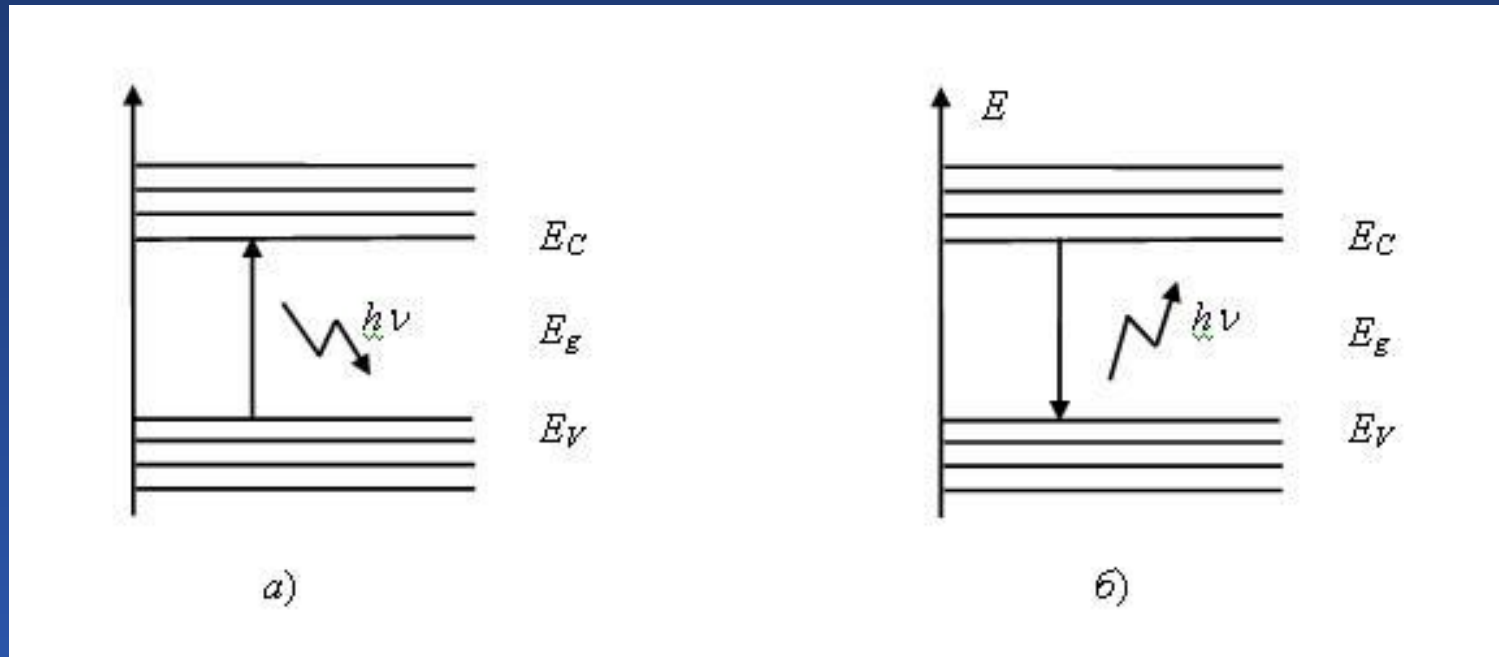
Зонная структура металлов и диэлектриков



Зонная энергетическая структура
металла (а) и диэлектрика (б)



Генерация и рекомбинация носителей заряда в полупроводниках



Генерация и рекомбинация носителей заряда
в полупроводнике



Электропроводность металлов и диэлектриков – элементарное представление

В металлах проводимость σ связывает плотность тока j [А/м²] с напряженностью электрического поля E [В/м] в виде соотношения, известного как закон Ома в дифференциальной форме

$$j = \sigma E.$$

Металлы очень хорошо проводят электрический ток. При комнатной температуре большинство металлов обладает электропроводностью 10^{-6} – 10^{-8} [Ом⁻¹*м⁻¹].

Проводимость диэлектриков (изоляторов) настолько мала, что составляет величину порядка 10^{-16} [Ом⁻¹*м⁻¹].

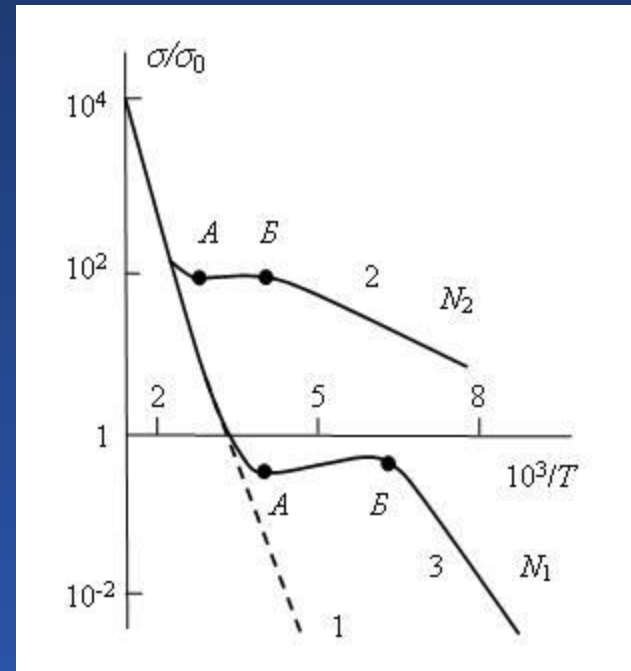


Электропроводность полупроводников

Проводимость полупроводника σ определяется суммой электронной σ_n и дырочной σ_p компонент проводимости: $\sigma = \sigma_n + \sigma_p$, Величина электронной и дырочной компонент в полной проводимости определяется классическим соотношением:

$$\sigma_n = \mu_n n_0 q; \quad \sigma_p = \mu_p p_0 q,$$

где μ_n и μ_p – подвижности электронов и дырок соответственно.



Зависимость относительной удельной проводимости кремния от температуры:

- 1 – собственный кремний;
- 2, 3 – примесный кремний



Дрейф носителей заряда в полупроводниках

$$F = eE,$$

где e – заряд электрона;

E – напряженность электрического поля;

$$a = \frac{E}{m} = \frac{eE}{m},$$

m – масса носителя.

Двигаясь без столкновений, носитель за время t приобретает скорость в направлении поля:

$$v = at = \frac{eE}{m}t,$$

$$v = \frac{e\tau_0}{m}E,$$

v – средняя скорость, приобретаемая носителем;

τ_0 – среднее время между столкновениями.



Дрейф носителей заряда в полупроводниках

Средняя скорость направленного движения свободных носителей заряда в кристалле, или *скорость дрейфа*, пропорциональна напряженности электрического поля. Коэффициент пропорциональности носит название *подвижность*

$$\mu = \frac{e\tau_0}{m} \quad v = \mu E \quad |\mu| = [\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})]$$

Плотность дрейфового тока электронов:

$$j_{\text{др } n} = env = en\mu_n E, \quad \text{где } n - \text{концентрация свободных электронов.}$$

Суммарная плотность дрейфового тока:

$$j_{\text{др}} = j_{\text{др } n} + j_{\text{др } p} = en\mu_n E + ep\mu_p E.$$



Диффузия носителей заряда в полупроводниках

Явление диффузии – от латинского *diffusio* (разлитие) – характерно не только для жидкостей и газов, но и для твердых тел.

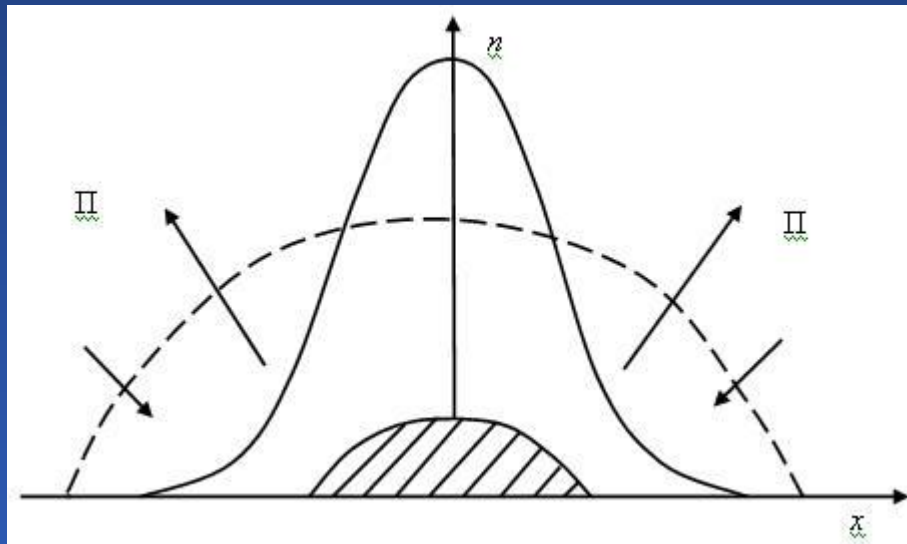


Рис. 1.22. Распределение молекул одеколона над каплей



Диффузия носителей заряда в полупроводниках

Диффузионный поток:

$$\Pi = -D \frac{\partial n}{\partial x},$$

где n – концентрация носителей;
 D – коэффициент диффузии.

$$|\Pi| = 1/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$$

$$|D| = \text{м}^2/\text{с}$$

Коэффициент диффузии зависит от:

l – длина свободного пробега молекул,

v_T – тепловая скорость движения молекул,

τ_0 – время между столкновениями.

$$\tau_0 = l / v_T$$



Диффузия носителей заряда в полупроводниках (продолжение)

$$D = l \cdot v_T$$

Точный расчет дает следующее соотношение:

$$D = \frac{1}{3} l v_T.$$

Плотность диффузионного тока:

$$j_{\text{диф } n} = e\Pi = -eD \frac{\partial n}{\partial x}.$$

Чтобы вычислить диффузионный ток, необходимо знать коэффициенты диффузии электронов и дырок D_n и D_p .



Диффузия носителей заряда в полупроводниках

Коэффициенты диффузии электронов и дырок D_n и D_p

$$D = \frac{1}{3} v_T^2 \tau_0$$

$$v_T = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

$$D\tau = \frac{1}{3} v_T^2 \tau_0 = \frac{kT}{m} \tau_0$$

$$D = \frac{kT}{e} \mu$$



Диффузия носителей заряда в полупроводниках

Для полупроводника, содержащего свободные электроны и дырки, плотность суммарного диффузионного тока:

$$j_{\text{диф}} = j_{\text{диф } n} + j_{\text{диф } p} = -eD_n \frac{\partial n}{\partial x} + eD_p \frac{\partial p}{\partial x}.$$



Плотность полного тока

В большинстве полупроводниковых приборов величины токов обусловлены как дрейфовым, так и диффузионным перемещением свободных носителей заряда – электронов и дырок:

$$j = j_{\text{др}} + j_{\text{диф}} = en\mu_n E + ep\mu_p E + eD_n \frac{\partial n}{\partial x} - eD_p \frac{\partial p}{\partial x}.$$



Уравнение непрерывности

Закон сохранения количества заряда:

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \operatorname{div} j,$$

где ρ – объемная плотность заряда.

Уравнения непрерывности:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p - p_0}{\tau_p} - \frac{1}{q} \operatorname{div} j_p + G_p$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n - n_0}{\tau_n} - \frac{1}{q} \operatorname{div} j_n + G_n$$

Здесь первые члены в правых частях характеризуют процесс рекомбинации частиц (p и n – неравновесные концентрации, p_0 и n_0 – равновесные концентрации (концентрации акцепторов и доноров);

τ_p и τ_n – времена жизни неравновесных носителей заряда);

G_p и G_n характеризуют процессы генерации дырок и электронов под воздействием внешних факторов.



Уравнение непрерывности (продолжение)

$$\frac{1}{e} \operatorname{div} j_p = \frac{1}{e} \frac{\partial}{\partial x} (j_{\text{др } p} + j_{\text{диф } p}) = -p E \frac{\partial p}{\partial x} + p \frac{\partial E}{\partial x} - D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

$$\frac{1}{e} \operatorname{div} j_n = \frac{1}{e} \frac{\partial}{\partial x} (j_{\text{др } n} + j_{\text{диф } n}) = n E \frac{\partial n}{\partial x} + n \frac{\partial E}{\partial x} + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$$



Уравнение непрерывности (продолжение)

Уравнения непрерывности в общем виде:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p - p_0}{\tau_p} - \mu_p E \frac{\partial p}{\partial x} - \mu_p p \frac{\partial E}{\partial x} + D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + G_p,$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n - n_0}{\tau_n} - \mu_n E \frac{\partial n}{\partial x} - \mu_n n \frac{\partial E}{\partial x} + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + G_n.$$

Уравнения непрерывности преобразуются в *уравнения диффузии*:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p - p_0}{\tau_p} + D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2},$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n - n_0}{\tau_n} + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}.$$



Явления в сильных электрических полях

В слабых электрических полях, когда скорость направленного движения мала по сравнению с тепловой, наличие или отсутствие электрического поля не сказывается на характере столкновений носителей заряда с кристаллической решеткой. При этом подвижность является величиной формы: постоянной, не зависящей от напряженности электрического поля E . Произведение представляет собой удельную электропроводность σ и соответственно можно записать соотношение, известное как закон Ома в дифференциальной форме:

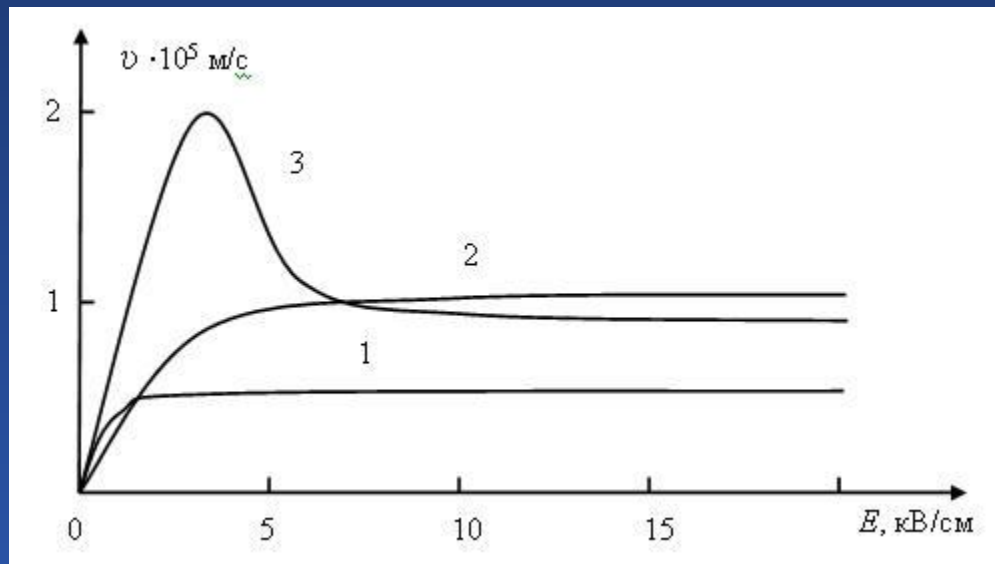
$$j = \sigma E.$$

Во всех практически используемых полупроводниках при комнатной температуре *подвижность в сильных полях падает с ростом напряженности электрического поля E .*

В очень сильных полях величина подвижности становится обратно пропорциональной напряженности поля: $\mu \sim 1/E$. Это означает, что дрейфовая скорость носителей остается постоянной $u = \text{const}$.



Дрейф носителей заряда в сильных электрических полях



Зависимость скорости дрейфа носителей заряда
от напряженности электрического поля
в *Ge* (1), *Si* (2) и *GaAs* (3)



Тема 2

***p-n*-переход. Полупроводниковые диоды**

Лекция 4



Лекция 5



Выбор темы

Тема 2

p – n -переход. Полупроводниковые диоды

2. p – n -переход

2.1. Механизм образования p – n -перехода

2.2. p – n -переход в равновесном состоянии

2.3. Анализ неравновесного p – n -перехода

2.4. Вольт-амперная характеристика идеального диода (формула Шокли)

2.5. p – n -переход при прямом и обратном напряжении. Механизмы пробоя p – n -перехода (туннельный, лавинный, тепловой)

Тема 2

p–n-переход. Полупроводниковые диоды

2.6. Разновидности полупроводниковых диодов

2.6.1. Выпрямительные полупроводниковые диоды.

Характеристики и параметры. Влияние внешних условий на характеристики и параметры

2.6.2. Рабочий режим диода на постоянном токе. Применение диодов для выпрямления переменного тока

2.6.3. Модели выпрямительных диодов

2.6.4. Стабилитроны. Характеристики, параметры, применение

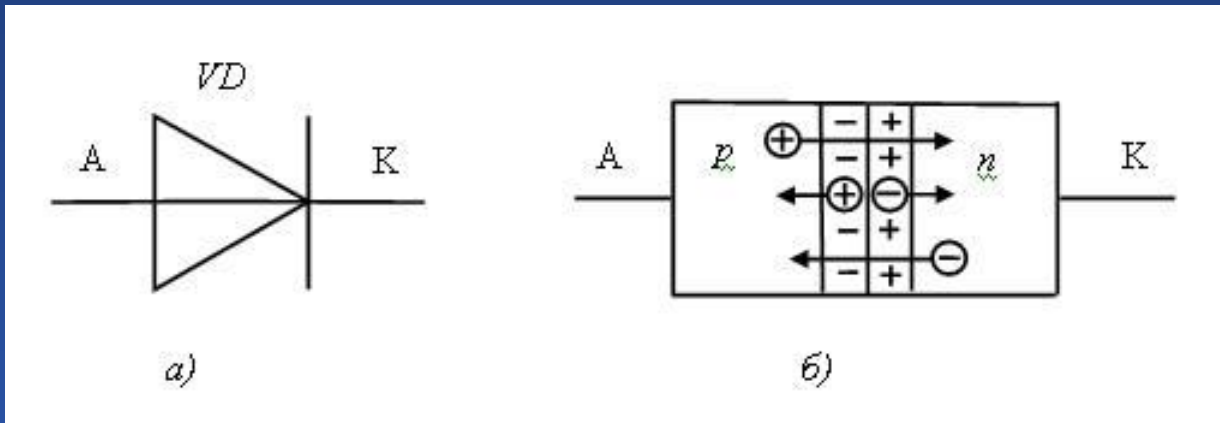
2.6.5. Туннельный диод. Зонная диаграмма и ВАХ, применение

2.6.6. Варикап. Принцип работы, применение

2.6.7. Импульсные диоды. Принцип действия

p-n-переход

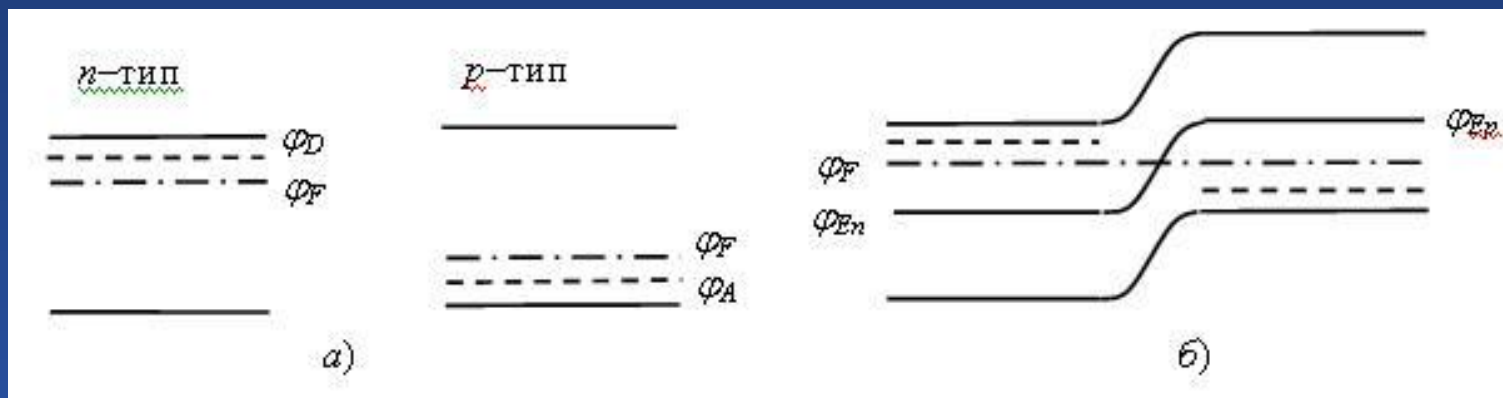
Контакт двух полупроводников одного вида с разным типом проводимости называется *электронно-дырочным* или *p-n-переходом*



Условное обозначение (а) и структура (б)
полупроводникового диода



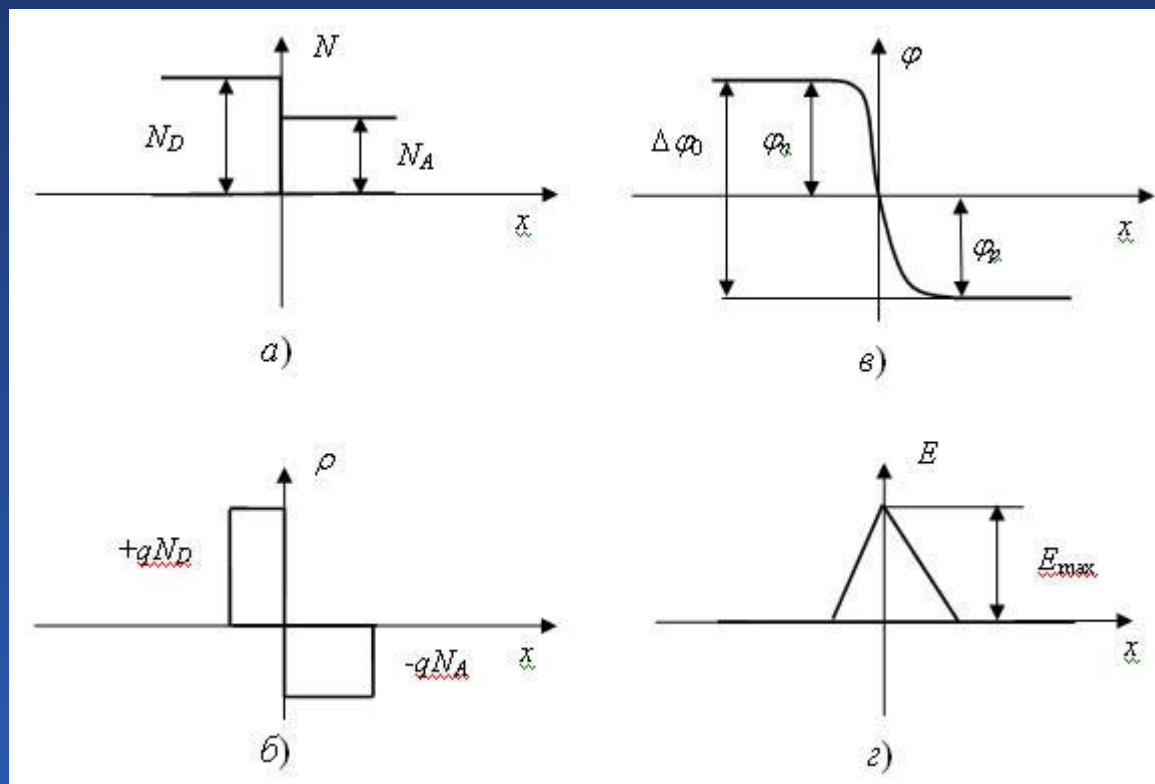
Механизм образования p – n -перехода



Зонная диаграмма полупроводников
и p – n -перехода в равновесном состоянии



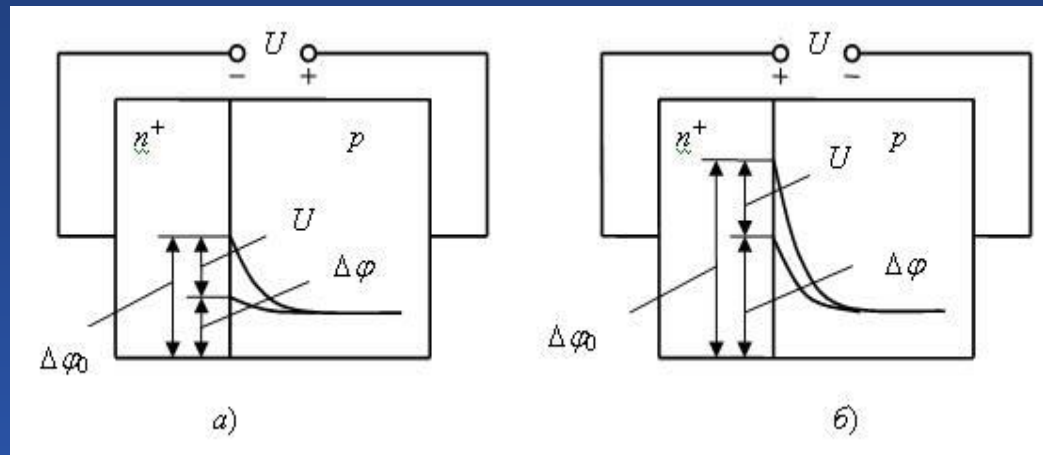
p-n-переход в равновесном состоянии



Распределение концентрации примесей (а), плотности объемного заряда (б), потенциала (в) и напряженности поля (г) в ступенчатом n^+-p -переходе



Анализ неравновесного p – n -перехода



Избыточные концентрации на границах перехода:

$$\Delta n_p = n_{p0} (e^{U/\phi_T} - 1)$$

$$\Delta p_n = p_{n0} (e^{U/\phi_T} - 1)$$

Смещение перехода в прямом (а)
и обратном (б) направлениях



Вольт-амперная характеристика идеального диода (формула Шокли)

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) идеального диода с p – n -переходом, отражающая его основные свойства, была получена У. Шокли. ВАХ была рассчитана путем решения уравнения непрерывности, которое связывает концентрацию носителей заряда в любой части полупроводника с параметрами электрического поля в нем, скоростью генерации и рекомбинации носителей заряда, процессом диффузии носителей и временем. Основными упрощениями, сделанными при построении математической модели диода, были следующие: толщина p – n -перехода равна нулю; генерационные и рекомбинационные процессы, как в области перехода, так и в объеме полупроводника отсутствуют; отсутствуют явления пробоя p – n -перехода и поверхностные состояния; не учитывается омическое сопротивление объема полупроводника.



Вольт-амперная характеристика идеального диода (формула Шокли)

Диффузионное приближение

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n - n_0}{\tau_n} + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$$

$L_n = (D_n \cdot \tau_n)^{1/2}$ – диффузионная длина,

$\Delta n = n - n_0$ – избыточная концентрация

$$\frac{\partial^2(\Delta n)}{\partial x^2} - \frac{\Delta n}{L^2} = \frac{1}{D_n} \frac{\partial(\Delta n)}{\partial t}$$

Если положить, что $\partial(\Delta n)/\partial t = 0$, то

$$\frac{\partial^2(\Delta n)}{\partial x^2} - \frac{\Delta n}{L^2} = 0.$$



Вольт-амперная характеристика идеального диода (формула Шокли)

Общее решение уравнения диффузии

$$\Delta n(x) = A_1 e^{x/L_n} + A_2 e^{-x/L_n},$$

где коэффициенты A_1 и A_2 определяются из граничных условий. При $x \rightarrow \infty$ $\Delta n \rightarrow 0$, т. е. вдали от инжектирующей поверхности избыточная концентрация отсутствует и полупроводник находится в равновесном состоянии. При этом граничном условии $A_1 = 0$. При $x = 0$ получаем $A_2 = \Delta n(0)$; следовательно, распределение избыточной концентрации экспоненциальное:

$$\Delta n(x) = \Delta n(0) e^{-x/L_n}.$$

Из этого выражения следует, что на расстоянии диффузионной длины избыточная концентрация уменьшается в e раз.



Вольт-амперная характеристика идеального диода (формула Шокли)

Граничный градиент концентрации носителей заряда

$$\frac{\partial(\Delta n)}{\partial x} = \frac{\Delta n(0)}{L_n} e^{-x/L_n}.$$

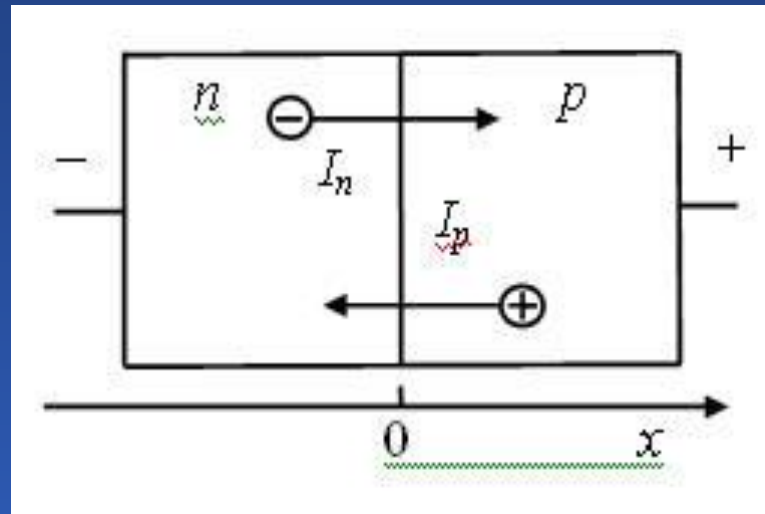
Градиент концентрации, а значит и диффузионный ток, спадают по мере удаления от инжектирующей поверхности. Градиент имеет максимальное (по модулю) значение при $x = 0$, т. е. на инжектирующей поверхности:

$$\left. \frac{\partial(\Delta n)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{\Delta n(0)}{L_n}.$$



Вольт-амперная характеристика идеального диода (формула Шокли)

В общем случае ток через переход состоит из электронной и дырочной составляющих, которые с учетом принятых упрощений являются чисто диффузионными .



Структура тока в p – n -переходе в диффузионном приближении



Вольт-амперная характеристика идеального диода (формула Шокли)

Суммарная плотность диффузионного тока:

$$\left. \frac{\partial(\Delta n)}{\partial x} \right|_{x=0} = -\frac{\Delta n_p}{L_n} ; \quad \left. \frac{\partial(\Delta p)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{\Delta p_n}{L_p} .$$

Электронная и дырочная составляющие тока на границах перехода:

$$j_n = -\frac{qD_n}{L_n} n_{p0} (e^{U/\Phi_T} - 1) ; \quad j_p = -\frac{qD_p}{L_p} p_{n0} (e^{U/\Phi_T} - 1) .$$

Суммируя плотности электронного и дырочного токов j_n и j_p , умножая их на площадь перехода S и опуская знак минус, получаем ВАХ p – n -перехода

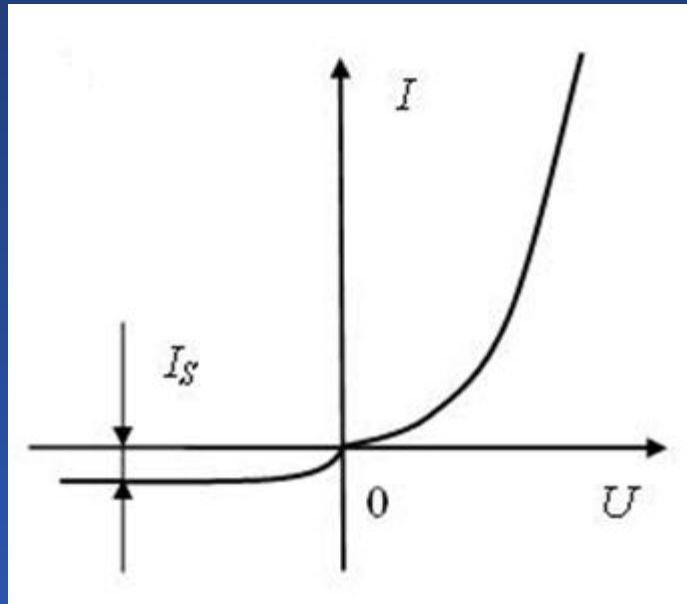
$$I = I_S (e^{U/\Phi_T} - 1)$$

I_S – обратный ток насыщения диода

$$I_S = qS \left(\frac{D_n n_{p0}}{L_n} + \frac{D_p p_{n0}}{L_p} \right)$$



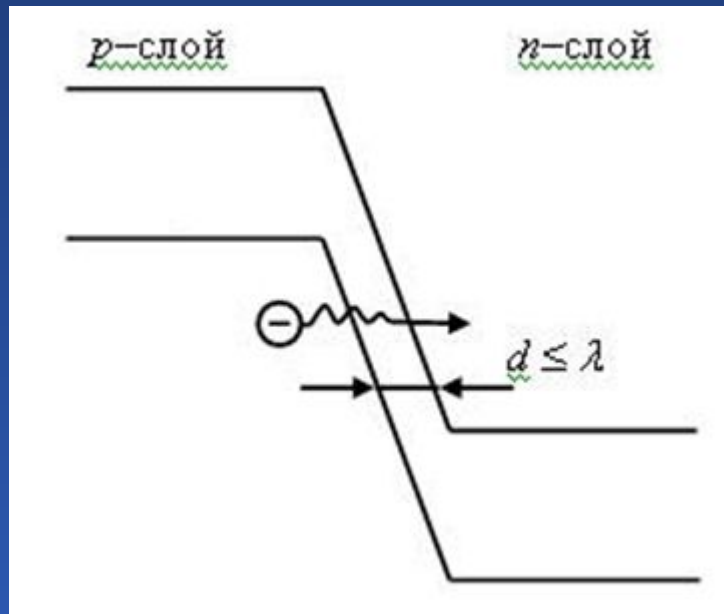
Вольт-амперная характеристика идеального диода (формула Шокли)



Статическая вольт-амперная характеристика идеального диода



p – n -переход при прямом и обратном напряжении. Механизмы пробоя p – n -перехода (туннельный, лавинный, тепловой)



Зонная диаграмма туннельного пробоя



Разновидности полупроводниковых диодов

Прибор, который имеет два электрода и один выпрямляющий p – n -переход, называется полупроводниковым диодом.

Полупроводниковые диоды:

- выпрямительные
- импульсные
- обращенные
- туннельные
- лавинно-пролетные
- опорные или зенеровские (стабилитроны)
- с регулируемой емкостью (варикапы) и т. д.



Выпрямительные полупроводниковые диоды. Характеристики и параметры. Влияние внешних условий на характеристики и параметры

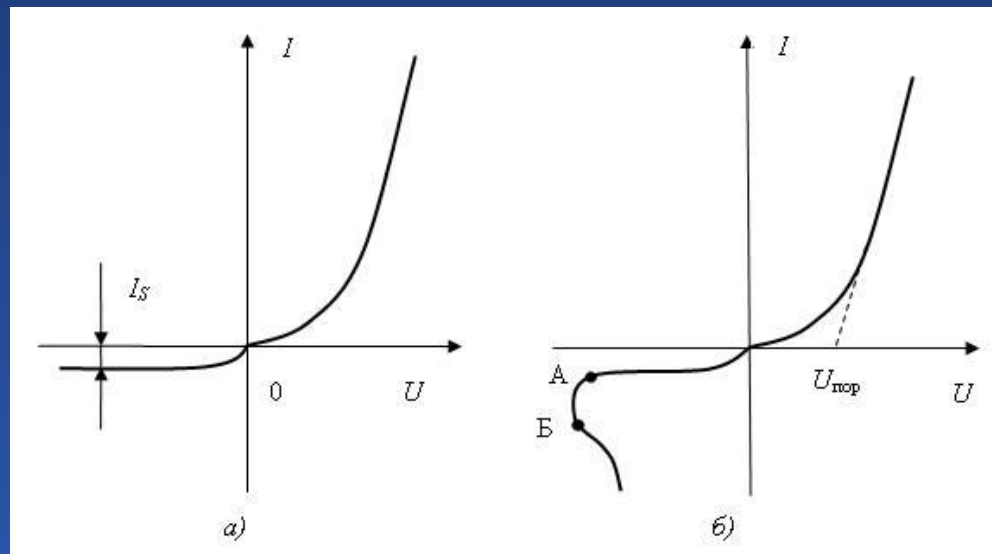
Зависимость тока через диод от напряжения на диоде называется вольт-амперной характеристикой диода. Теоретическое описание ВАХ идеального диода с p - n -переходом, полученное У. Шокли:

$$I = I_S \left(e^{U/\Phi_T} - 1 \right),$$

где U – напряжение на p - n -переходе диода;

I_S – ток насыщения;

$\Phi_T = kT/q$ – тепловой потенциал
при $T = 300$ К, $\Phi_T = 25$ мВ.



Статические вольт-амперные характеристики
идеального p - n -перехода (а)
и реального диода (б)



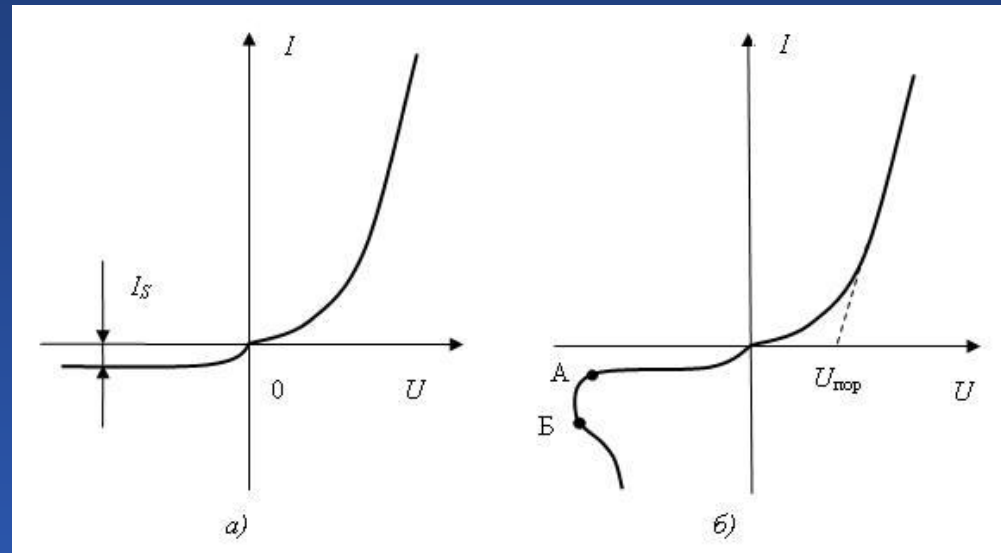
Выпрямительные полупроводниковые диоды. Характеристики и параметры. Влияние внешних условий на характеристики и параметры

При положительных и отрицательных напряжениях U , больших по модулю 0,1 В, ВАХ описывается упрощенным выражением:

$$I = I_S e^{U/\varphi_T}.$$

При протекании большого прямого тока через диод падение напряжения возникает не только на p – n -переходе, но и на объемном сопротивлении полупроводника R . Реальная ВАХ описывается выражением

$$I = I_S e^{(U-IR)/\varphi_T}.$$



Статические вольт-амперные характеристики
идеального p – n -перехода (а)
и реального диода (б)



Выпрямительные полупроводниковые диоды. Характеристики и параметры. Влияние внешних условий на характеристики и параметры

Параметры полупроводникового диода

- Коэффициент выпрямления K_B , который определяется как отношение прямого тока к обратному при одинаковой (по модулю) величине прямого и обратного напряжений (например: $\pm 0,01$; $\pm 0,1$; ± 1 В).

Для идеального диода $K_B = 1$ при $U = \pm 0,01$ В. При $U = \pm 1$ В $K_B = 2,8 \cdot 10^{20}$

- Максимально допустимый прямой ток $I_{пр\ max}$, превышение которого приводит к недопустимому разогреву и тепловому пробое. $I_{пр\ max}$ справочное значение.
- Свойства полупроводниковых диодов сильно зависят от температуры.



Выпрямительные полупроводниковые диоды. Характеристики и параметры. Влияние внешних условий на характеристики и параметры

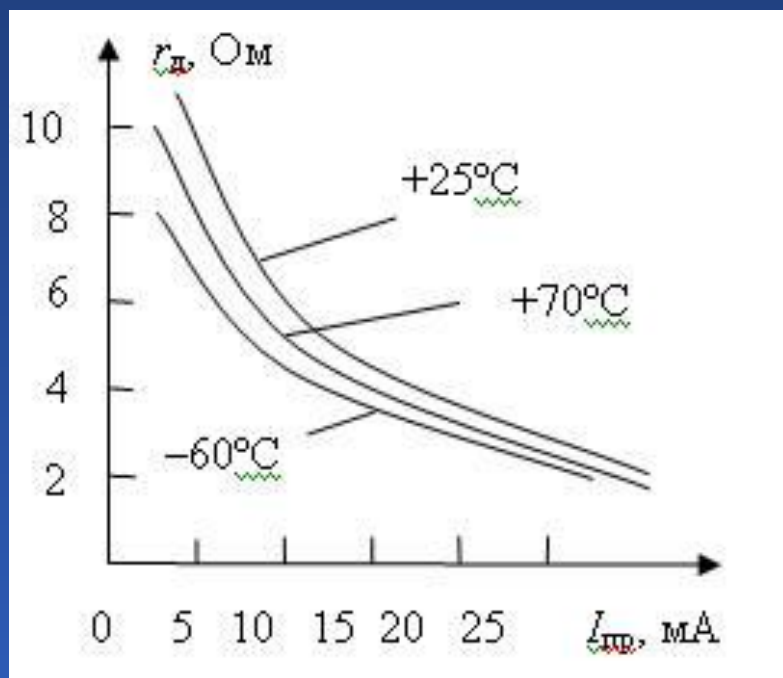
Параметры полупроводникового диода (продолжение)

- Максимально допустимое обратное напряжение $U_{\text{обр max}}$ — важный предельный параметр выпрямительных диодов и составляет для диодов малой мощности десятки-сотни вольт.
- Дифференциальное сопротивление диода: $r_d = dU / dI$.
- Статическое сопротивление диода (сопротивление постоянному току):

$$R_{\text{д.ст}} = U / I.$$



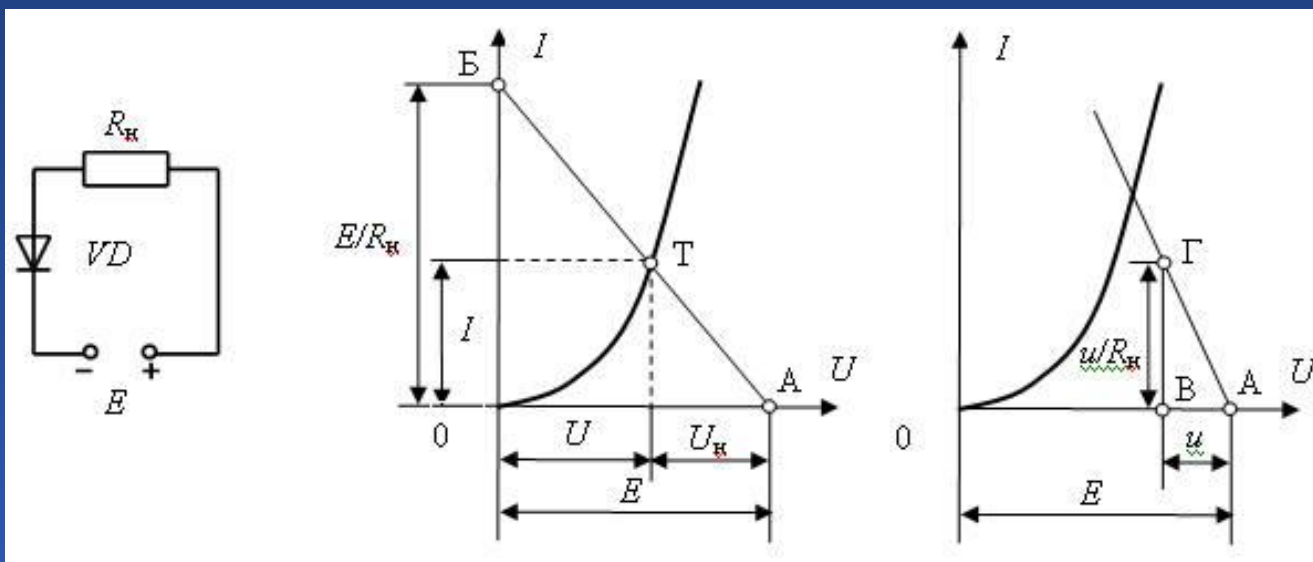
Выпрямительные полупроводниковые диоды. Характеристики и параметры. Влияние внешних условий на характеристики и параметры



Зависимость дифференциального сопротивления диода ГД402
от величины прямого тока



Рабочий режим диода на постоянном токе. Применение диодов для выпрямления переменного тока



$$I = (E - U)/R_{\text{н}}$$

$$E = U + IR_{\text{н}}$$

Схема включения диода с нагрузкой
и построение линии нагрузки



Рабочий режим диода на постоянном токе. Применение диодов для выпрямления переменного тока

Выпрямитель

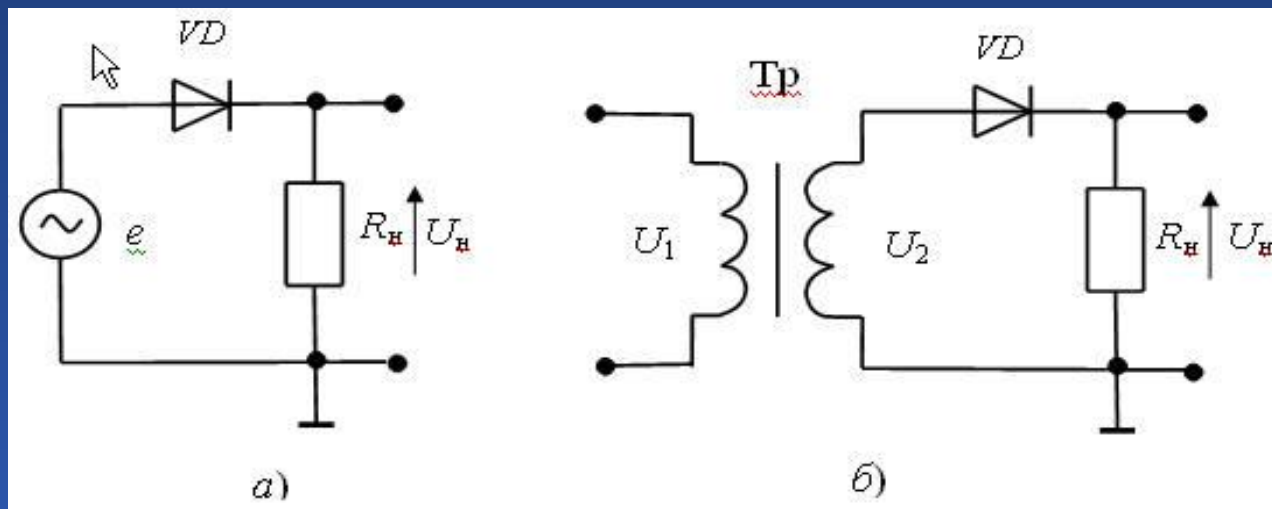


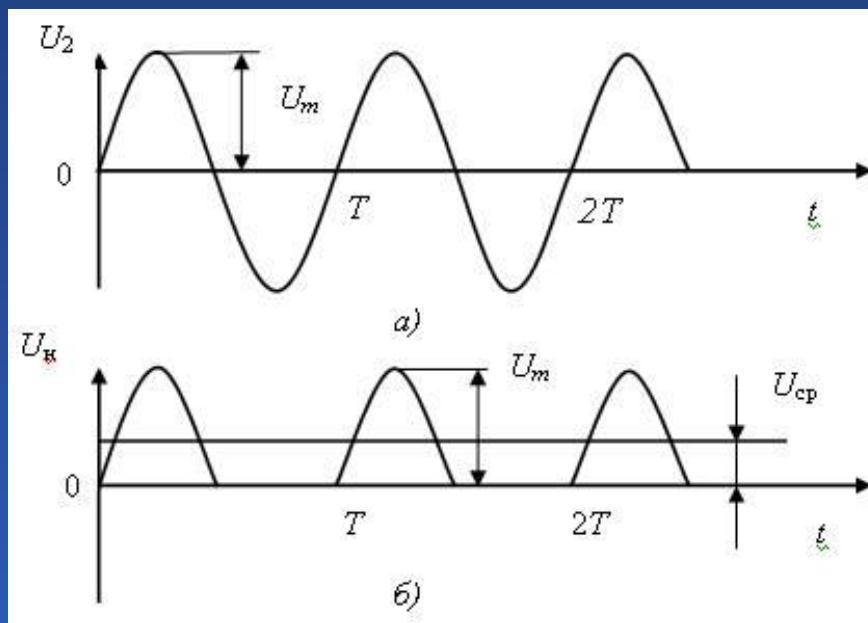
Схема однополупериодного выпрямителя:

e – источник ЭДС, Tr – трансформатор, U_1 , U_2 – напряжение на первичной и вторичной обмотках трансформатора, VD – выпрямительный диод, R_n – сопротивление нагрузки, U_n – напряжение на нагрузке



Рабочий режим диода на постоянном токе. Применение диодов для выпрямления переменного тока

Выпрямитель



Форма напряжений на входе (а) и выходе (б)
однополупериодного выпрямителя



Рабочий режим диода на постоянном токе. Применение диодов для выпрямления переменного тока

Важным параметром, характеризующим работу выпрямителя, является коэффициент пульсаций:

$$k_{\Pi} = U_{m1} / U_{\text{ср}},$$

где U_{m1} – амплитуда первой гармоники переменного напряжения на нагрузке;

$U_{\text{ср}}$ – среднее значение напряжения на нагрузке.

$$U_{m1} = 0,5 \cdot U_m = 1,57 \cdot U_{\text{ср}}$$

– для однополупериодного выпрямителя

$$k_n = 1,57$$



Рабочий режим диода на постоянном токе. Применение диодов для выпрямления переменного тока

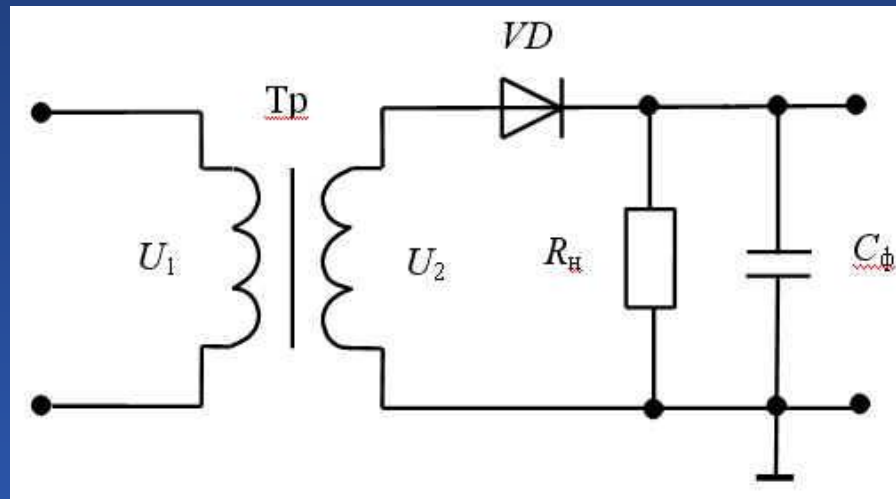


Схема выпрямителя
со сглаживающим фильтром



Рабочий режим диода на постоянном токе. Применение диодов для выпрямления переменного тока

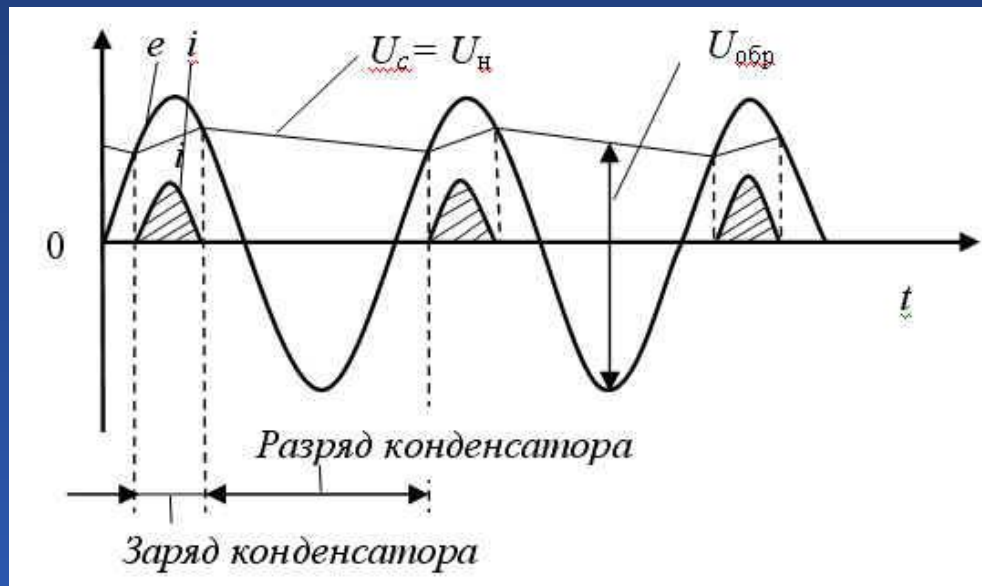
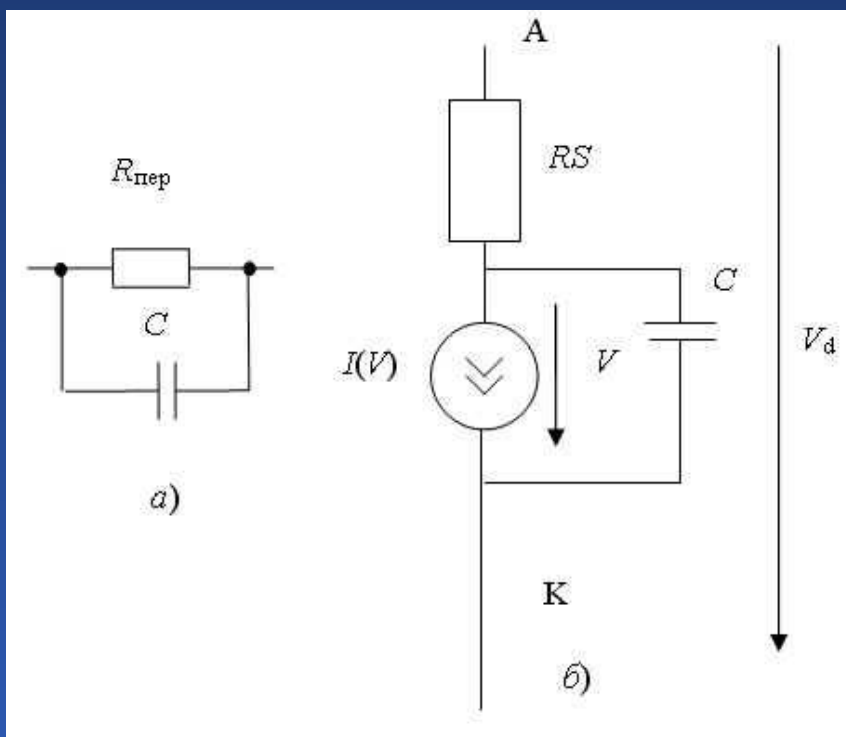


Рис. 2.14. Сглаживание пульсаций
с помощью конденсатора



Модели выпрямительных диодов



Линейная (а) и нелинейная (б) схемы замещения диода

Современные САПР (PSPICE, MICROCAP, OrCAD, DesignLab), как правило, имеют встроенные модели нелинейных компонентов, в том числе диодов, которые позволяют моделировать поведение схемы в широком диапазоне изменения токов и напряжений.

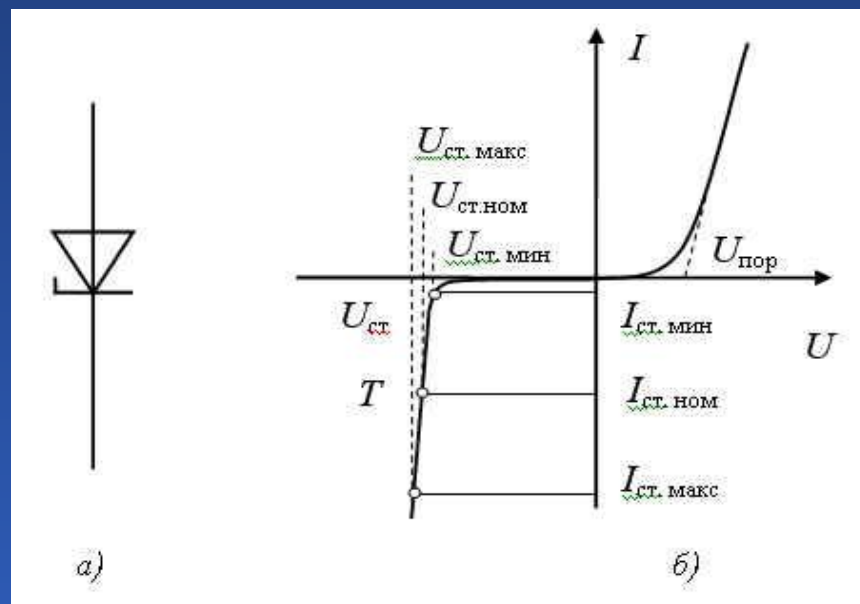
Нелинейный зависимый источник описывается выражением:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{U - IR_6}{m\varphi_T}} - 1 \right).$$



Стабилитроны. Характеристики, параметры, применение

Стабилитрон – это полупроводниковый диод, работающий в режиме электрического пробоя. Такой режим возникает при смещении p – n -перехода в обратном направлении



Схематическое изображение (а)
и вольт-амперная характеристика (б) стабилитрона



Стабилитроны. Характеристики, параметры, применение

В качестве основного материала для полупроводниковых стабилитронов используется кремний, обеспечивающий малую величину обратного тока (тока насыщения). В отличие от выпрямительных диодов, в стабилитроне p - и n -области сильно легированы. Это приводит к тому, что p – n -переход имеет малую ширину, а напряженность электрического поля в нем высокая и при приложении даже небольшого обратного напряжения возникает электрический пробой.

Механизм пробоя в полупроводниковых стабилитронах может быть туннельным, лавинным или смешанным.



Стабилитроны. Характеристики, параметры, применение

К параметрам стабилитрона, определяемым по его ВАХ, относятся:

$U_{\text{ст ном}}$ – номинальное напряжение стабилизации, измеренное при некотором среднем (номинальном) токе стабилитрона $I_{\text{ст ном}}$;

$U_{\text{ст min}}$ – минимальное напряжение стабилизации, измеренное в начале прямолинейного участка обратной ветви ВАХ;

$I_{\text{ст min}}$ – минимальный ток, при котором измеряется $U_{\text{ст min}}$;

$U_{\text{ст max}}$ – максимальное напряжение стабилизации при токе $I_{\text{ст max}}$;

$I_{\text{ст max}}$ – максимально допустимый обратный ток стабилитрона, ограниченный предельно допустимой мощностью рассеяния на стабилитроне $P_{\text{ст max}}$.



Стабилитроны. Характеристики, параметры, применение

Один из важнейших параметров стабилитрона – **дифференциальное сопротивление** – характеризует наклон его ВАХ в области пробоя:

$$r_d = dU_{ст} / dI_{ст} = \text{const.}$$

Влияние температуры на характеристики стабилитрона оценивается **температурным коэффициентом напряжения** стабилизации (ТКН):

$$\text{ТКН} = \Delta U_{ст} / (U_{ст} \cdot \Delta T).$$



Стабилитроны. Характеристики, параметры, применение

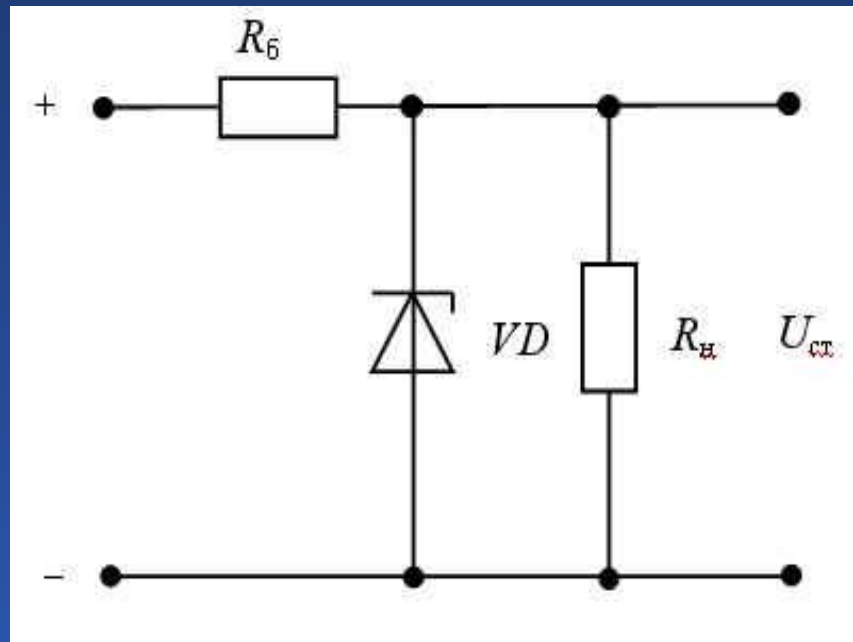
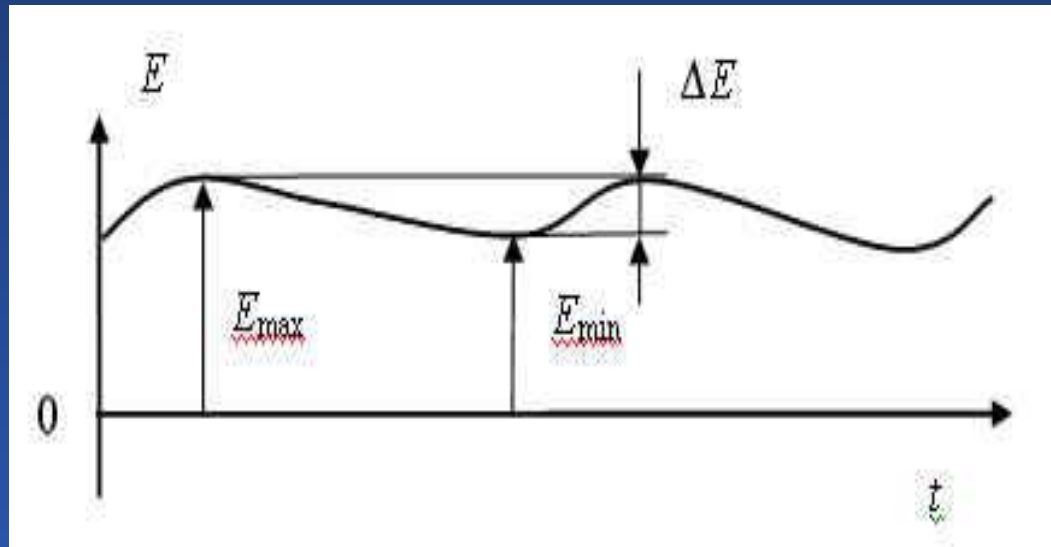


Схема включения стабилитрона:

R_6 – балластное (ограничительное) сопротивление,
 $E_{\text{вх}}$ – входное (нестабилизированное) напряжение,
 $U_{\text{ст}}$ – выходное стабилизированное напряжение



Стабилитроны. Характеристики, параметры, применение



Эпюра изменения
входного напряжения (ЭДС) источника



Стабилитроны. Характеристики, параметры, применение

Балластное (ограничительное) сопротивление:

$$R_{\text{б}} = (U_{\text{ср}} - U_{\text{ст}}) / (I_{\text{ср}} + I_{\text{н}}),$$

где $U_{\text{ср}} = 0,5 \cdot (U_{\text{min}} + U_{\text{max}})$ – среднее значение напряжения источника;
 $I_{\text{ср}} = 0,5 \cdot (I_{\text{min}} + I_{\text{max}})$ – средний ток стабилитрона; $I_{\text{н}} = U_{\text{ст}} / R_{\text{н}}$ – ток через нагрузку.

Стабилизация возможна только при соблюдении условия

$$\Delta U \leq (I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) \cdot R_{\text{б}}.$$

Эффективность стабилизации напряжения характеризуется коэффициентом стабилизации:

$$K_{\text{ст}} = \frac{\Delta U / U}{\Delta U_{\text{ст}} / U_{\text{ст}}}.$$



Стабилитроны. Характеристики, параметры, применение

Второй возможный режим стабилизации, когда входное напряжение источника стабильно, а сопротивление нагрузки меняется от $R_{н\ min}$ до $R_{н\ max}$. Для такого режима сопротивление балластного резистора $R_б$ можно определить по формуле

$$R_б = (U_{ст} - U_{н\ ср}) / (I_{н\ ср} + I_{ст}).$$

$$I_{н\ ср} = 0,5 \cdot (I_{н\ min} + I_{н\ max}),$$

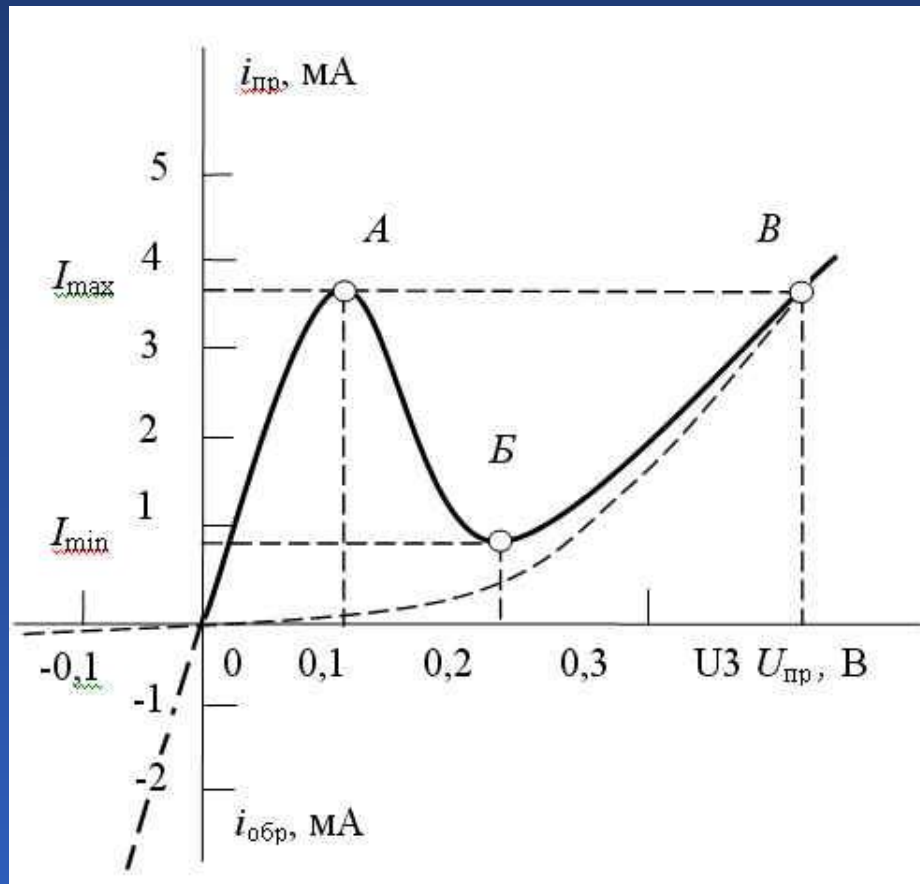
$$I_{н\ min} = U_{ст} / R_{н\ max},$$

$$I_{н\ max} = U_{ст} / R_{н\ min}.$$



Туннельный диод.

Зонная диаграмма и ВАХ, применение



В точке Б получается минимум тока и характеристика имеет *падающий* участок АБ, для которого характерно отрицательное сопротивление переменному току

$$R_i = \Delta U / \Delta i < 0$$

Вольт-амперная характеристика
туннельного диода



Туннельный диод.

Зонная диаграмма и ВАХ, применение

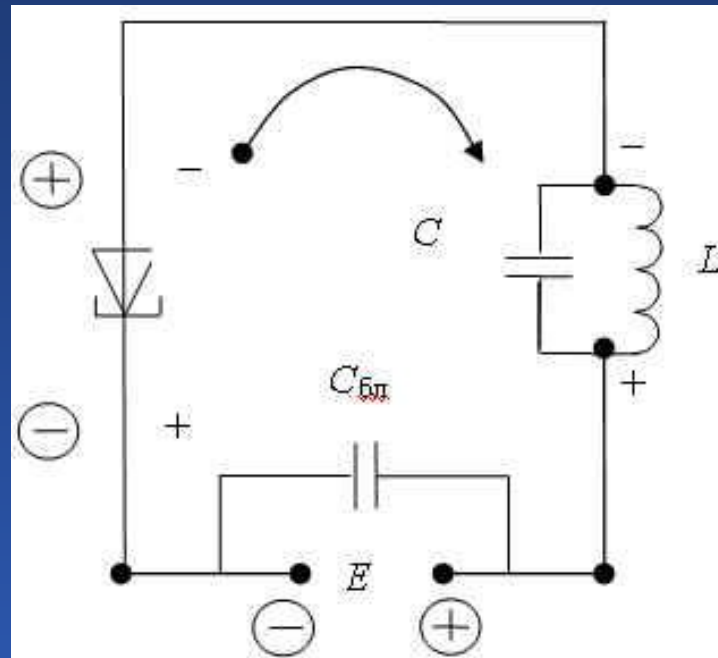
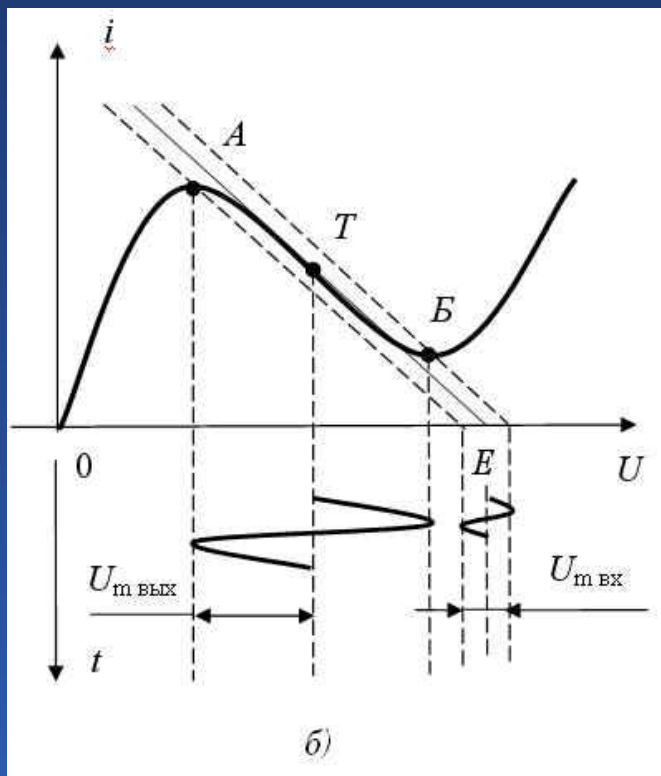
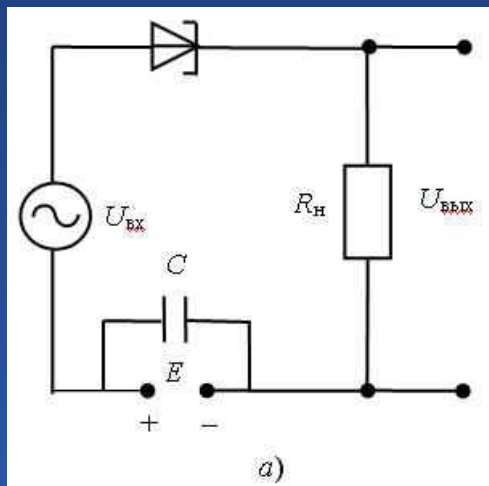


Схема включения
туннельного диода для генерации



Туннельный диод.

Зонная диаграмма и ВАХ, применение

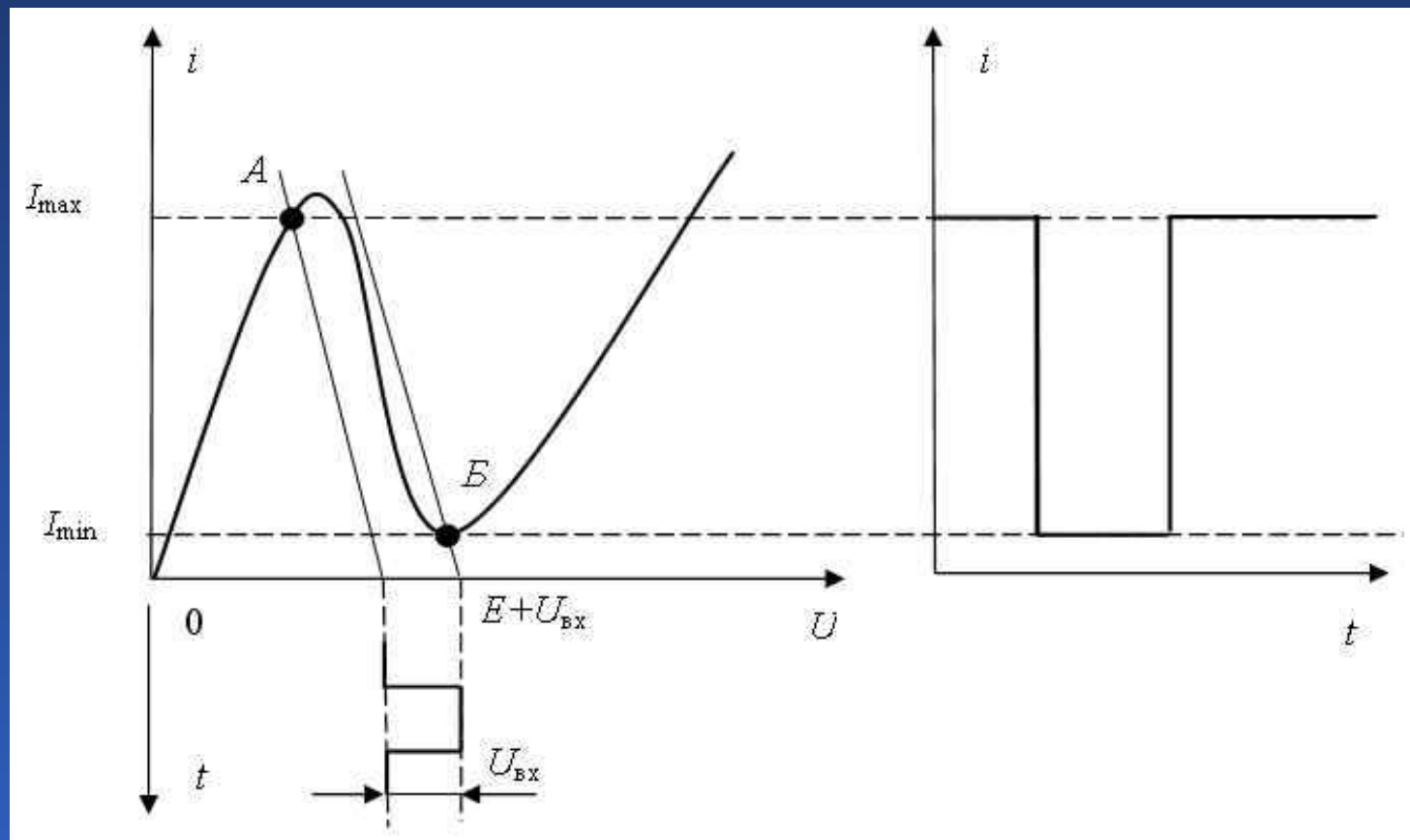


Простейшая схема усилителя с туннельным диодом (а)
и график, поясняющий процесс усиления (б)



Туннельный диод.

Зонная диаграмма и ВАХ, применение

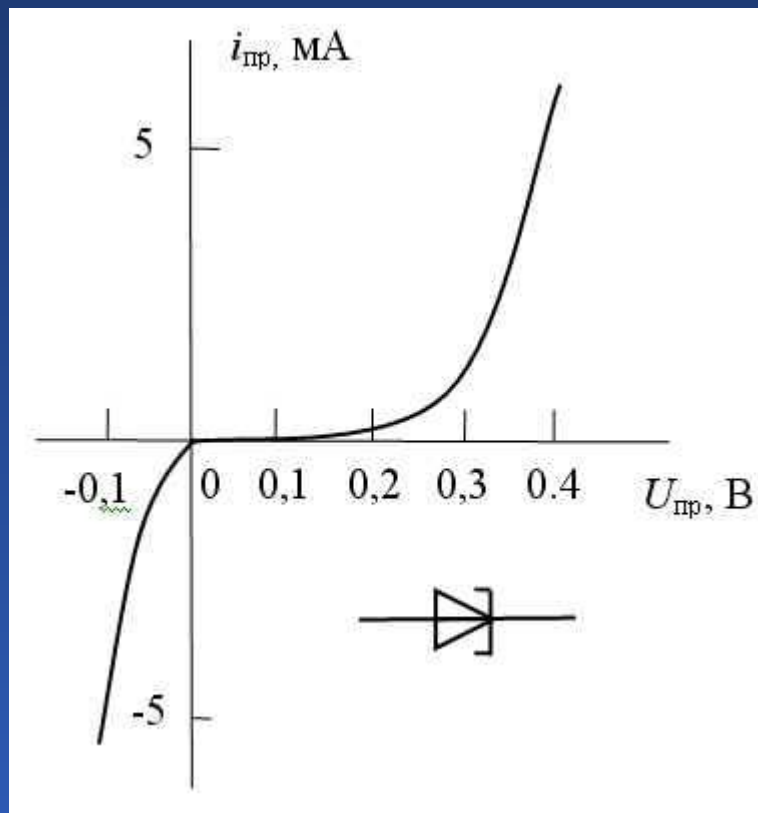


Работа туннельного диода в импульсном режиме



Туннельный диод.

Зонная диаграмма и ВАХ, применение



Вольт-амперная характеристика
и условное графическое обозначение обращенного диода



Варикап. Принцип действия, применение

Варикапы – это плоскостные диоды, иначе называемые параметрическими, работающие при обратном напряжении, от которого зависит барьерная емкость. Таким образом, варикапы представляют собой конденсаторы переменной емкости, управляемые не механически, а электрически, т. е. изменением обратного напряжения.

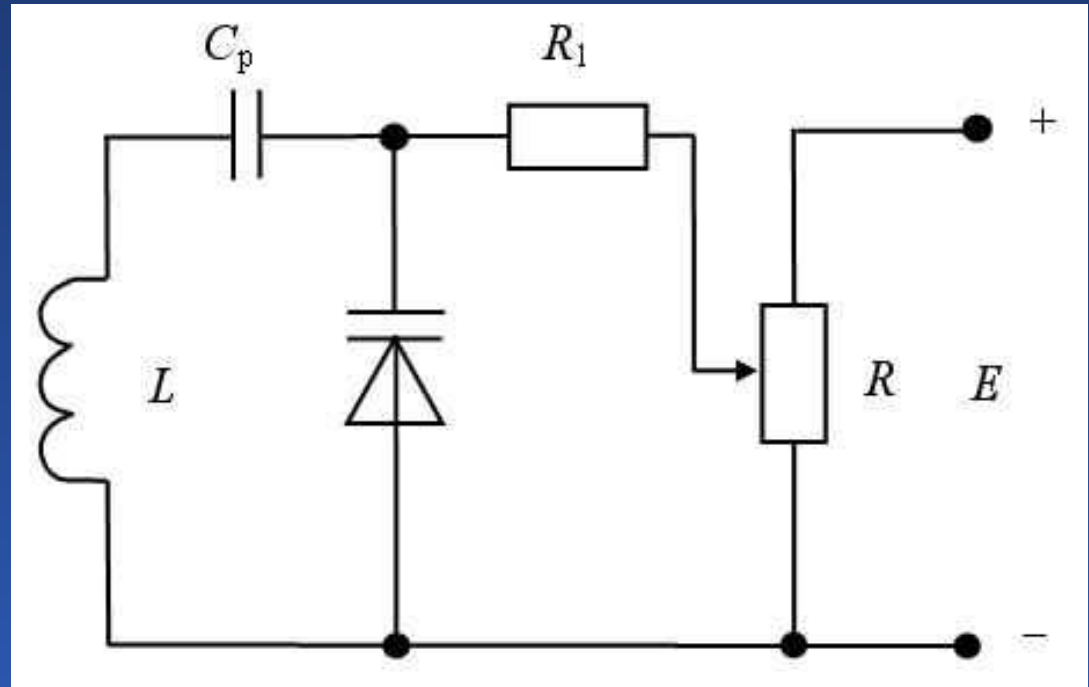
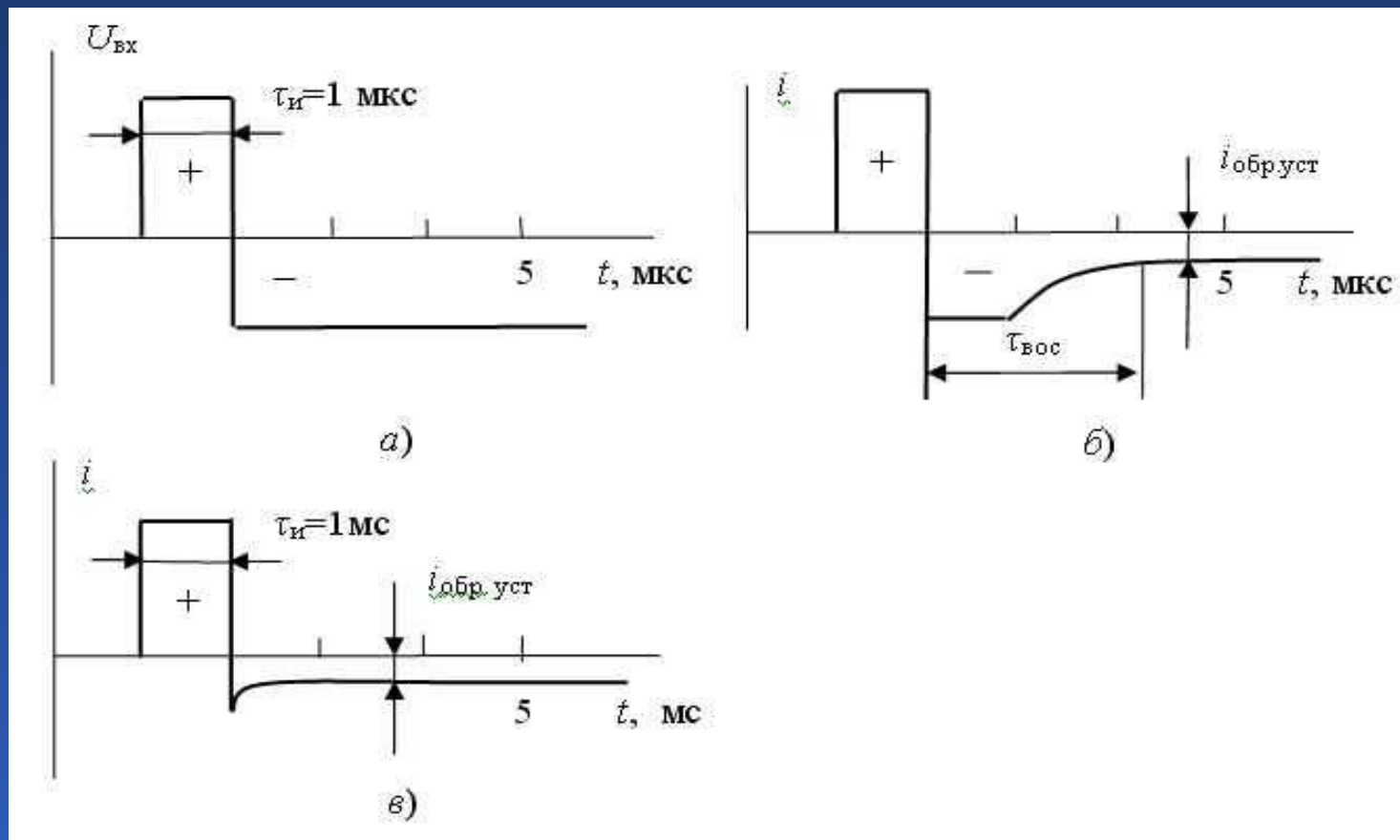


Схема включения варикапа
в колебательный контур
в качестве конденсатора переменной емкости



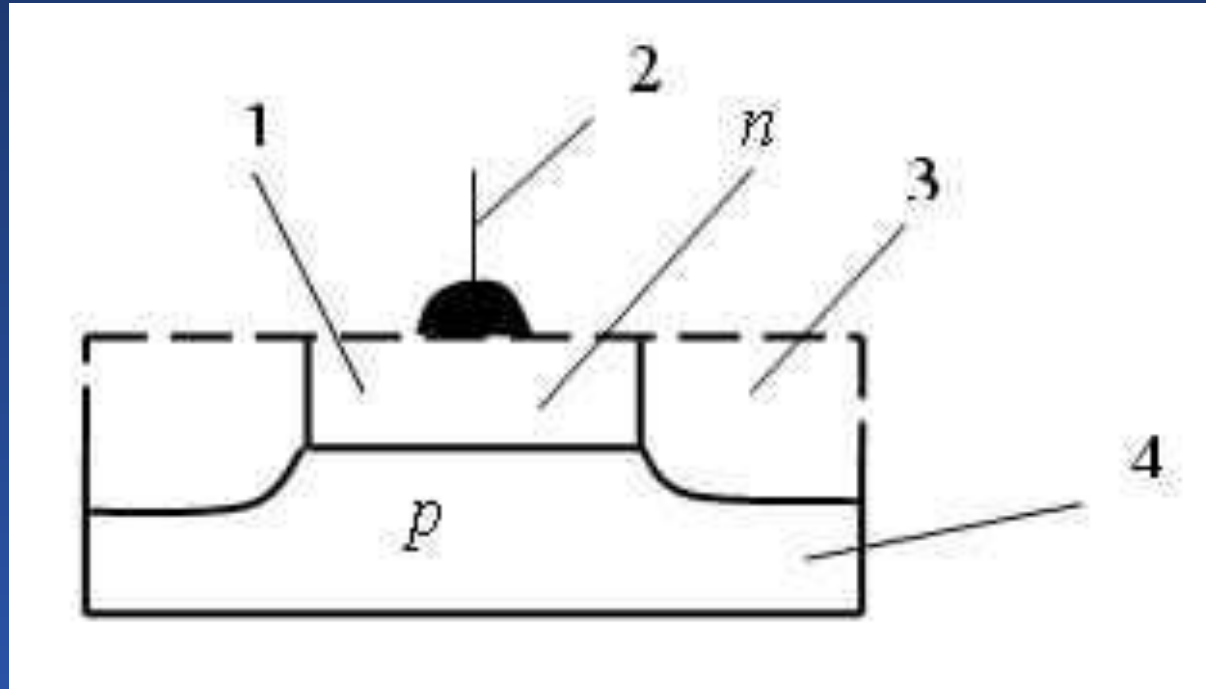
Импульсные диоды



Импульсный режим работы диода



Импульсные диоды



Устройство мезадиода

- 1 – слой с электропроводностью n -типа, полученный диффузией;
- 2 – вывод от n -области; 3 – участок, удаляемый травлением;
- 4 – основная пластинка полупроводника p -типа



Тема 3

Биполярные транзисторы

Лекция 6



Лекция 7



Лекция 8



Лекция 9



Лекция 10



Выбор темы

Тема 3

Биполярные транзисторы

3. Биполярные транзисторы

3.1. Структура и принцип действия биполярного транзистора.
Схемы включения (ОЭ, ОБ, *ОК).

Статические ВАХ и параметры для основных схем включения

3.2. Режимы работы биполярных транзисторов

3.3. Понятие о классах усиления. Работа БТ в ключевом режиме

3.4. Влияние внешних условий на характеристики и параметры БТ. Проблема стабилизации рабочей точки и усиления

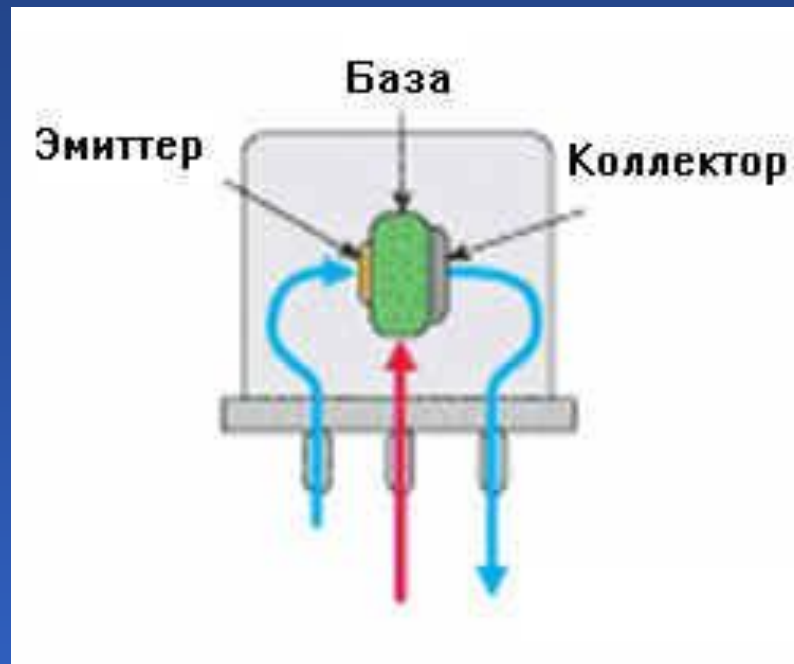
3.5. *Источники собственных шумов в БТ

3.6. Модели биполярных транзисторов. Малосигнальные высокочастотные эквивалентные схемы БТ (П- и Т-образные). Модель Эберса – Молла.

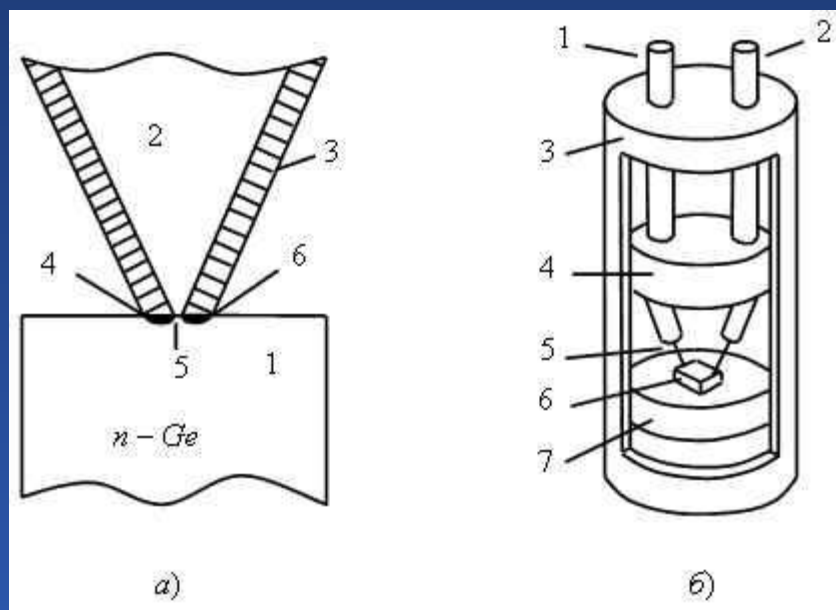
Понятие о нелинейных моделях БТ для высоких и сверхвысоких частот

Биполярные транзисторы

Полупроводниковый прибор, имеющий три электрода и два взаимодействующих между собой p – n -перехода, называется биполярным транзистором.



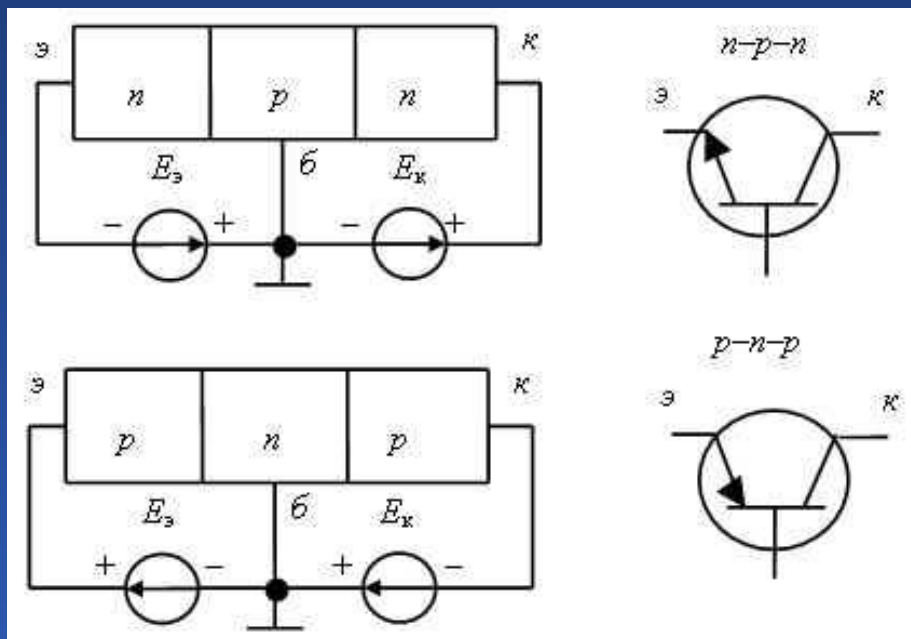
Структура и принцип действия биполярного транзистора. Схемы включения (ОЭ, ОБ, *ОК). Статические ВАХ и параметры для основных схем включения



Конструкция первого биполярного транзистора (а)
и первый промышленный образец (б)



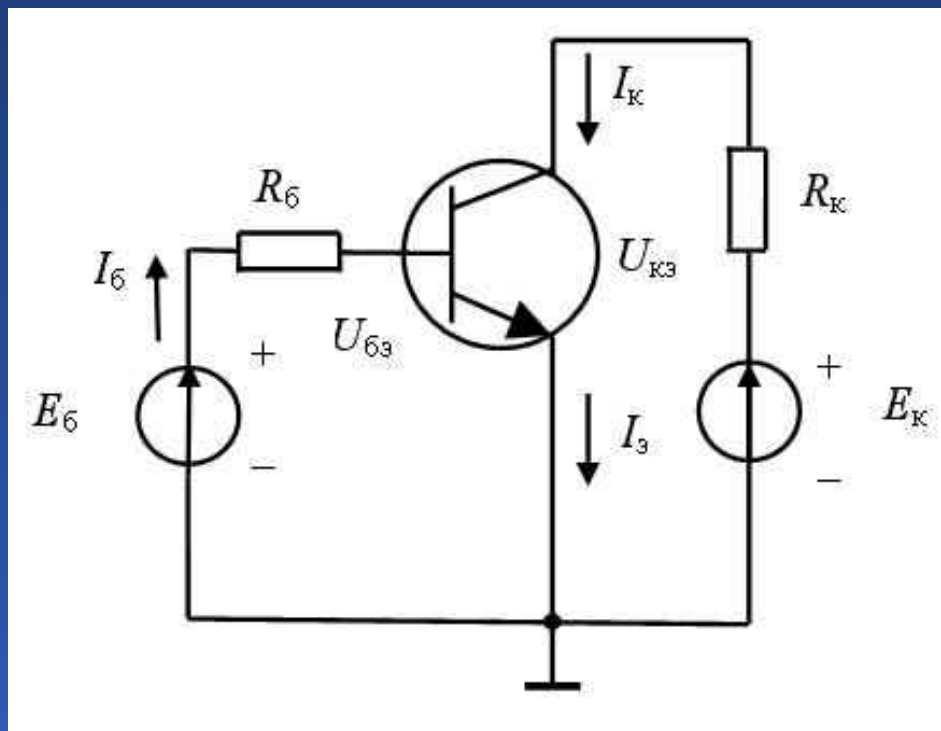
Структура и принцип действия биполярного транзистора. Схемы включения (ОЭ, ОБ, *ОК). Статические ВАХ и параметры для основных схем включения



Устройство, условное обозначение
и включение биполярных
транзисторов в активном режиме



Структура и принцип действия биполярного транзистора. Схемы включения (ОЭ, ОБ, *ОК). Статические ВАХ и параметры для основных схем включения



Включение биполярного транзистора $n-p-n$ -типа
по схеме с общим эмиттером



Структура и принцип действия биполярного транзистора. Схемы включения (ОЭ, ОБ, *ОК). Статические ВАХ и параметры для основных схем включения

Режимы работы биполярного транзистора

В зависимости от того, какие напряжения действуют на переходах, различают 3 режима работы транзистора:

- *активный режим* работы или режим усиления, когда эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный в обратном;
- *режим насыщения*, когда оба перехода смещены в прямом направлении;
- *режим отсечки*, когда оба перехода смещены в обратном направлении.



Структура и принцип действия биполярного транзистора. Схемы включения (ОЭ, ОБ, *ОК). Статические ВАХ и параметры для основных схем включения

Принцип работы биполярного транзистора заключается в том, что незначительный по величине ток базы $I_{\bar{б}}$, возникающий при подаче прямого напряжения $U_{\bar{бэ}}$ на переход эмиттер-база, вызывает значительные изменения тока эмиттера $I_{\bar{э}}$ и тока коллектора $I_{\bar{к}}$

$$I_{\bar{к}} = \beta_{\text{ст}} \cdot I_{\bar{б}}$$

$$I_{\bar{к}} = I_{\bar{к}0} (\exp(U_{\bar{бэ}} / \varphi_T) - 1)$$

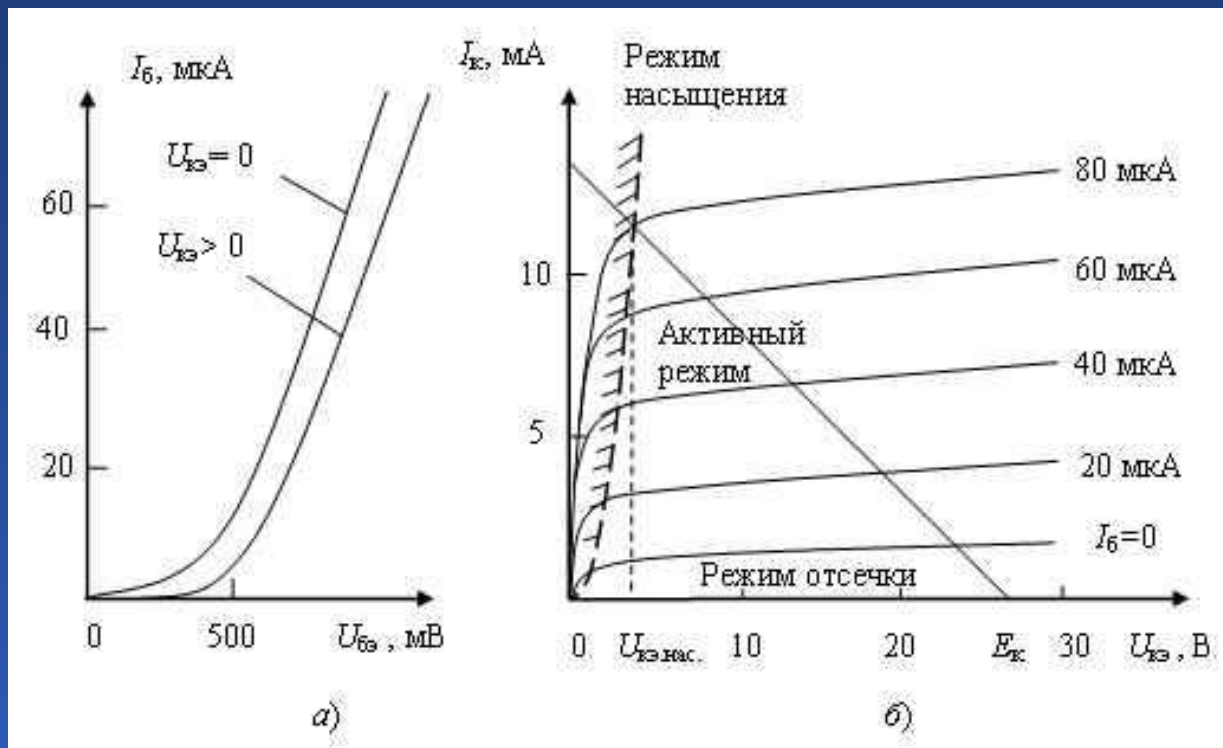
$$I_{\bar{э}} = I_{\bar{к}} + I_{\bar{б}}$$

$\beta_{\text{ст}}$ – статический
коэффициент
передачи тока базы

$I_{\bar{к}0}$ – обратный ток
коллекторного перехода,
 φ_T – температурный
потенциал



Структура и принцип действия биполярного транзистора. Схемы включения (ОЭ, ОБ, *ОК). Статические ВАХ и параметры для основных схем включения



Входные (а) и выходные (б) ВАХ
биполярного транзистора n - p - n -типа в схеме с общим эмиттером



Структура и принцип действия биполярного транзистора. Схемы включения (ОЭ, ОБ, *ОК). Статические ВАХ и параметры для основных схем включения

$$h_{11} = (\Delta U_{\text{бэ}} / \Delta I_{\text{б}}) | U_{\text{кэ}} = \text{const}$$

$$k_U = (\Delta U_{\text{кэ}} / \Delta U_{\text{бэ}})$$

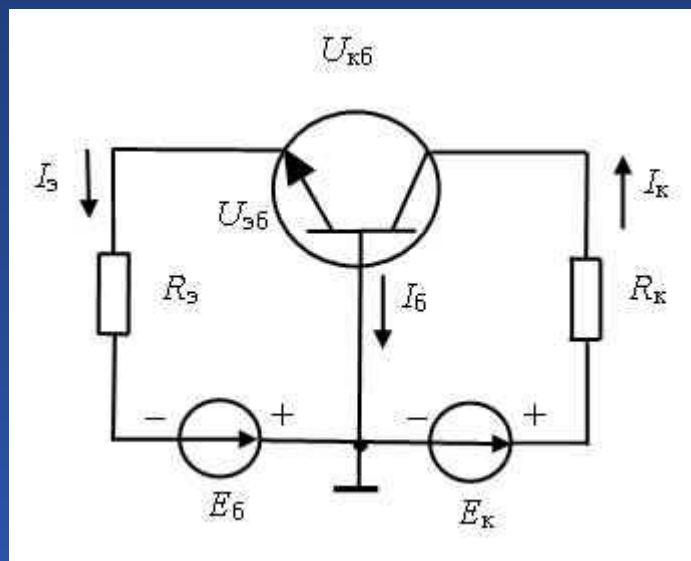
$$h_{12} = (\Delta U_{\text{бэ}} / \Delta U_{\text{кэ}}) | I_{\text{б}} = \text{const}$$

$$h_{21} = (\Delta I_{\text{к}} / \Delta I_{\text{б}}) | U_{\text{кэ}} = \text{const}$$

$$h_{22} = (\Delta I_{\text{к}} / \Delta U_{\text{кэ}}) | I_{\text{б}} = \text{const}$$



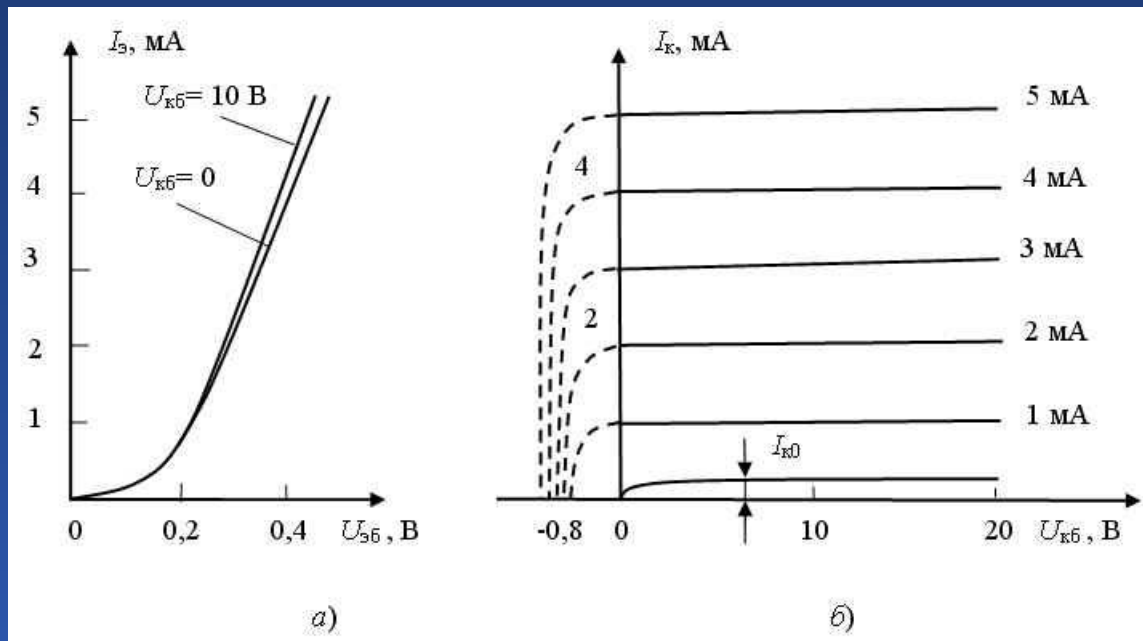
Структура и принцип действия биполярного транзистора. Схемы включения (ОЭ, ОБ, *ОК). Статические ВАХ и параметры для основных схем включения



Включение
биполярного транзистора
n-p-n-типа по схеме с общей базой



Структура и принцип действия биполярного транзистора. Схемы включения (ОЭ, ОБ, *ОК). Статические ВАХ и параметры для основных схем включения



Входные (а) и выходные (б) ВАХ
биполярного транзистора *n-p-n*-типа в схеме с общей базой



Структура и принцип действия биполярного транзистора. Схемы включения (ОЭ, ОБ, *ОК). Статические ВАХ и параметры для основных схем включения

$$h_{11}(\text{об}) = (\Delta U_{\text{эб}} / \Delta I_{\text{э}}) | U_{\text{кб}} = \text{const}$$

$$h_{21}(\text{об}) = (\Delta I_{\text{к}} / \Delta I_{\text{э}}) | U_{\text{кб}} = \text{const}$$

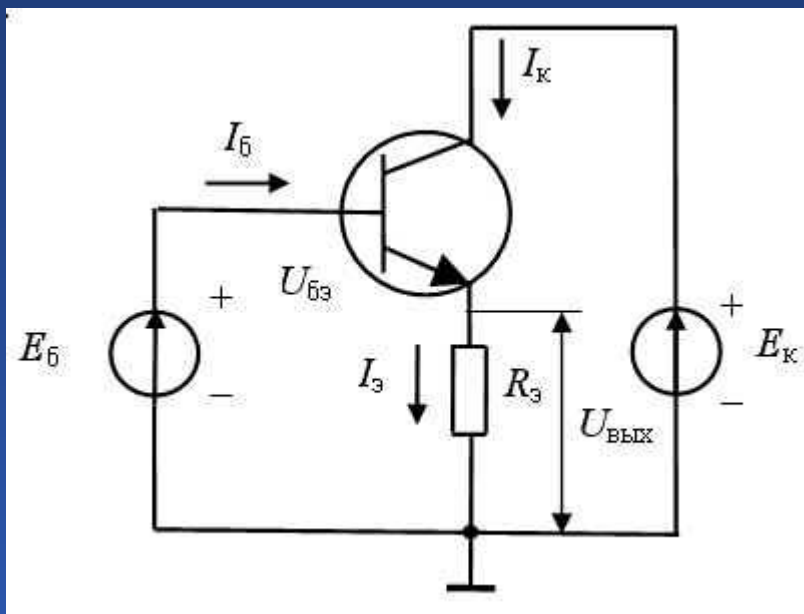
$$h_{12}(\text{об}) = (\Delta U_{\text{эб}} / \Delta U_{\text{кб}}) | I_{\text{э}} = \text{const}$$

$$h_{22}(\text{об}) = (\Delta I_{\text{к}} / \Delta U_{\text{кб}}) | I_{\text{э}} = \text{const}$$

Параметр	Схема ОЭ	Схема ОБ
h_{11}	Сотни ом – единицы килоом	Единицы – десятки ом
h_{12}	$10^{-3} - 10^{-4}$	$10^{-3} - 10^{-4}$
h_{21}	Десятки – сотни	0,95 – 0,98
$1/h_{22}$	Единицы – десятки килоом	Сотни килом – единицы мегаом



Структура и принцип действия биполярного транзистора. Схемы включения (ОЭ, ОБ, *ОК). Статические ВАХ и параметры для основных схем включения



Включение
биполярного транзистора
n-p-n-типа по схеме с общим коллектором

$$R_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}} / I_{\text{б}} = (U_{\text{бэ}} + U_{\text{ВЫХ}}) / I_{\text{б}}$$

$$K_i = I_{\text{э}} / I_{\text{б}}$$

$$K_U = U_{\text{ВЫХ}} / (U_{\text{бэ}} + U_{\text{ВЫХ}}) < 1$$

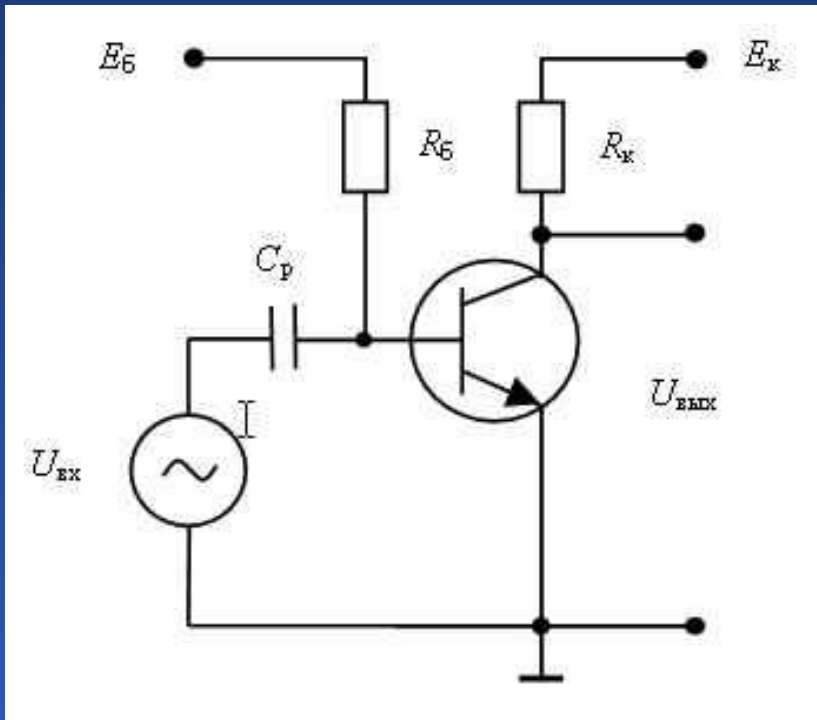


Структура и принцип действия биполярного транзистора. Схемы включения (ОЭ, ОБ, *ОК). Статические ВАХ и параметры для основных схем включения

Параметр	Схема ОЭ	Схема ОБ	Схема ОК
k_i	Десятки – сотни	< 1	Десятки – сотни
K_U	Десятки – сотни	Десятки – сотни	< 1
K_P	Сотни–десятки тысяч	Десятки – сотни	Десятки – сотни
$R_{вх}$	Сотни ом – единицы килоом	Единицы – десятки ом	Десятки – сотни килоом
$R_{вых}$	единицы – десятки килоом	Сотни килоом – Единицы мегаом	Сотни ом – единицы килоом
Фазовый сдвиг ме- жду $U_{вх}$ и $U_{вых}$	180°	0°	0°



Режимы работы биполярных транзисторов



Типовая схема
усилительного каскада
с общим эмиттером

$$I_{\text{к}} = (E_{\text{к}} - U_{\text{кэ}}) / R_{\text{к}}$$

$$P_{\text{вых}} = 0,5 \cdot I_{\text{км}} \cdot U_{\text{кэ м}}$$

$$P_{\text{вх}} = 0,5 \cdot I_{\text{б м}} \cdot U_{\text{бэ м}}$$

$$R_{\text{вх}} = U_{\text{бэ м}} / I_{\text{б м}}$$

$$R_{\text{б}} = (E_{\text{б}} - U_{\text{бэ(0)}}) / I_{\text{б(0)}}$$

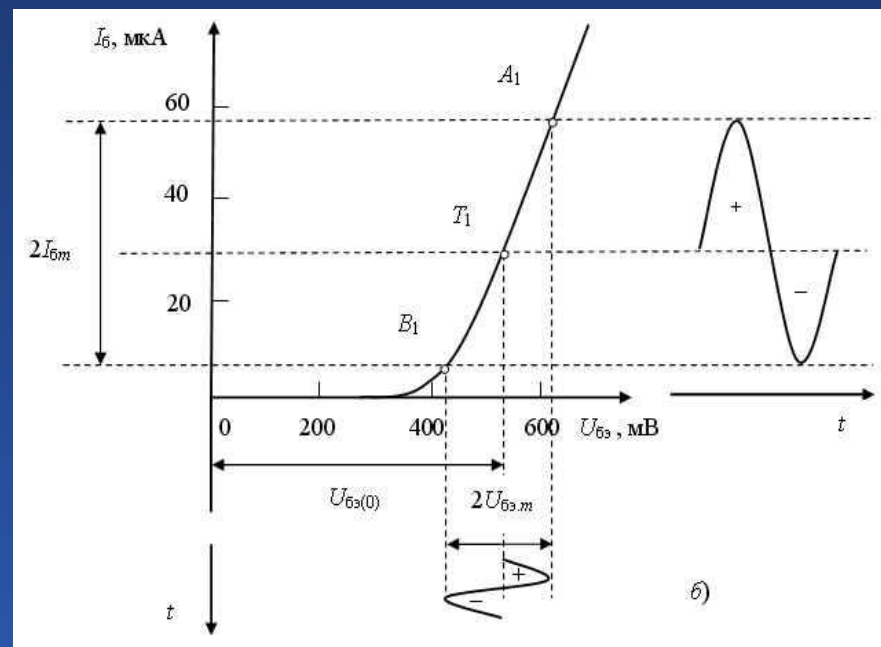
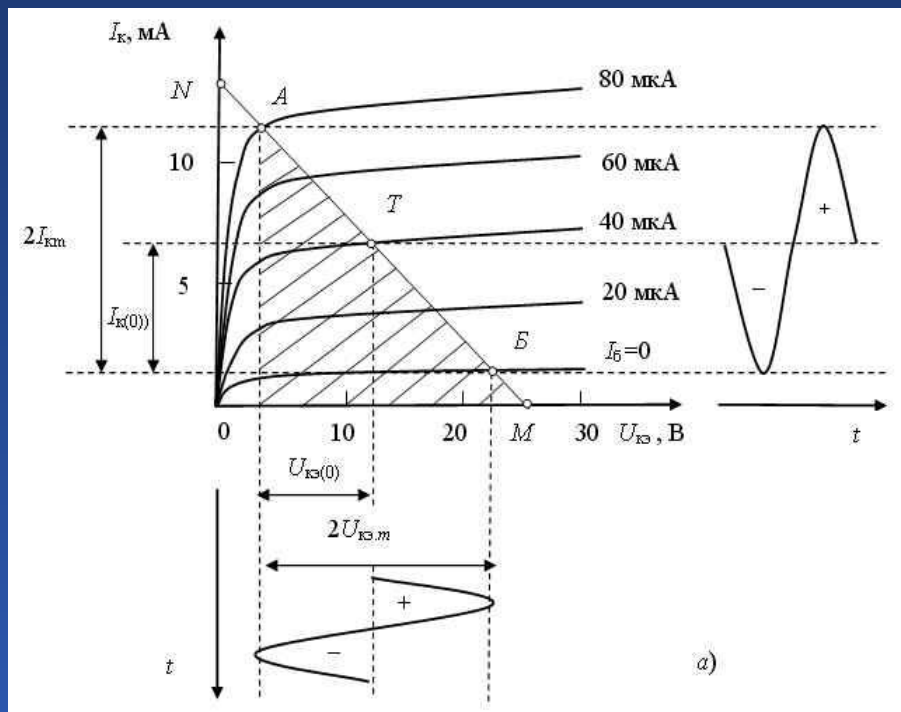
$$K_I = I_{\text{км}} / I_{\text{б м}}$$

$$K_U = U_{\text{кэ м}} / U_{\text{бэ м}}$$

$$K_p = K_I \cdot K_U$$



Режимы работы биполярных транзисторов

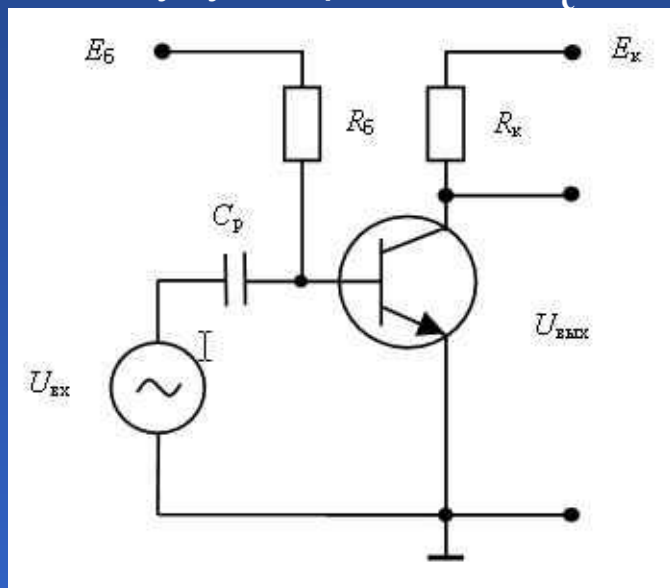


К графоаналитическому методу расчета
и анализу усилительного каскада на биполярном транзисторе



Понятие о классах усиления. Работа БТ в ключевом режиме

Класс усиления А. Режим работы транзисторного каскада, при котором ток в выходной цепи транзистора протекает в течение всего периода изменения напряжения входного сигнала, называется режимом усиления класса А. Характерной чертой этого режима является выполнение условия $\Delta I_{\text{к}} < I_{\text{кп}}$, для обеспечения которого напряжение $U_{\text{см}}$ применительно к схеме на рисунке должно быть положительным и превосходить максимальную амплитуду напряжения $U_{\text{с}}$.



Ток покоя коллектора:

$$I_{\text{кп}} = (I_{\text{к min}} + I_{\text{к max}})/2.$$

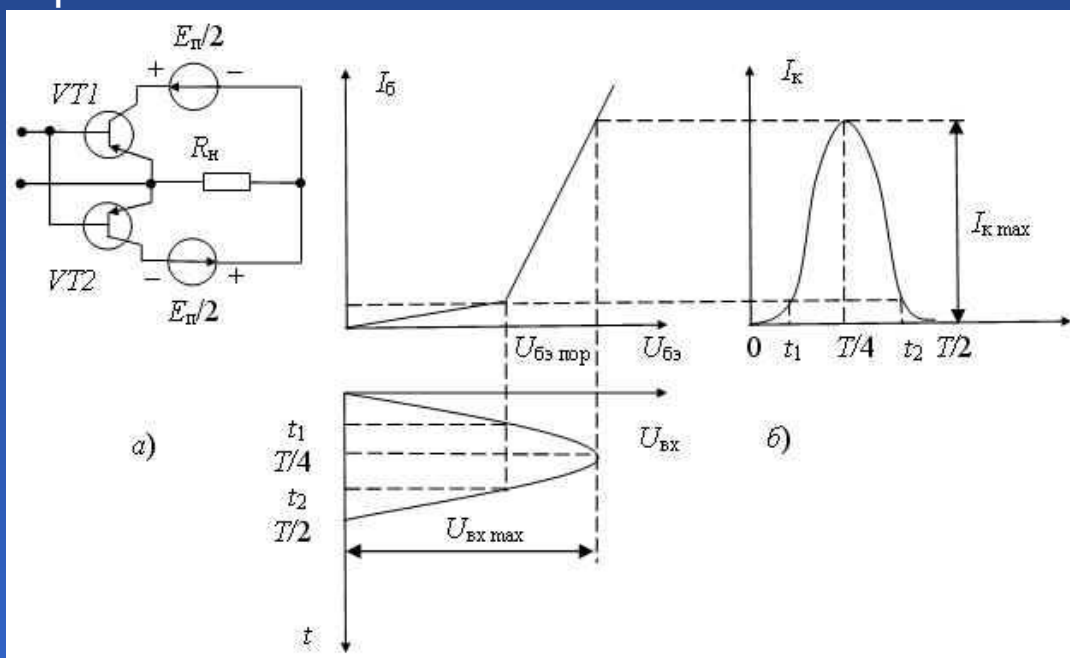
Максимальная амплитуда выходного тока:

$$\Delta I_{\text{к max}} = (I_{\text{к max}} - I_{\text{к min}})/2.$$



Понятие о классах усиления. Работа БТ в ключевом режиме

Класс усиления В. Режим работы транзисторного каскада, при котором ток в выходной цепи транзистора протекает только в течение половины периода изменения напряжения входного сигнала, называется режимом усиления класса В. Данный режим соответствует выбору $U_{см} = 0$. При этом $I_{кп} = I_{к\ min} \approx 0$ и $U_{кэ\ п} = U_{п} - I_{к\ min} R_{к} \approx U_{п}$. Мощность, рассеиваемая в каскаде при условии $U_{с} = 0$, практически также равна нулю, так как транзистор находится в режиме отсечки.



Принципиальная схема двухтактного усилителя мощности (а) и временные диаграммы (б), поясняющие ее работу (VT1 – n–p–n, VT2 – p–n–p)

Понятие о классах усиления. Работа БТ в ключевом режиме

Класс усиления АВ. Режим работы транзисторного каскада, при котором ток в выходной цепи транзистора протекает больше половины периода изменения напряжения входного сигнала, называется режимом усиления класса АВ.

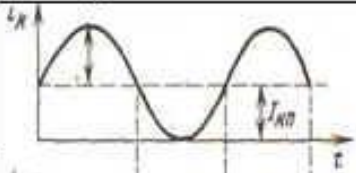
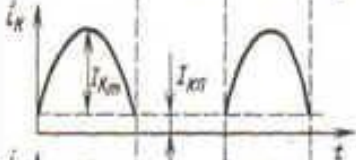
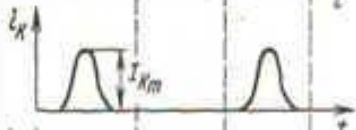
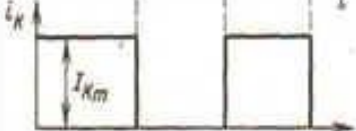
Класс усиления С. Режим работы транзисторного каскада, при котором ток в выходной цепи транзистора протекает на интервале меньшем половины периода изменения напряжения входного сигнала, называется режимом усиления класса С .

Класс усиления D. Режим работы транзисторного каскада, при котором в установившемся режиме усилительный элемент (биполярный транзистор) может находиться только в состоянии «Включено» (режим насыщения биполярного транзистора) или «Выключено» (режим отсечки биполярного транзистора), называется ключевым режимом или режимом усиления класса D.



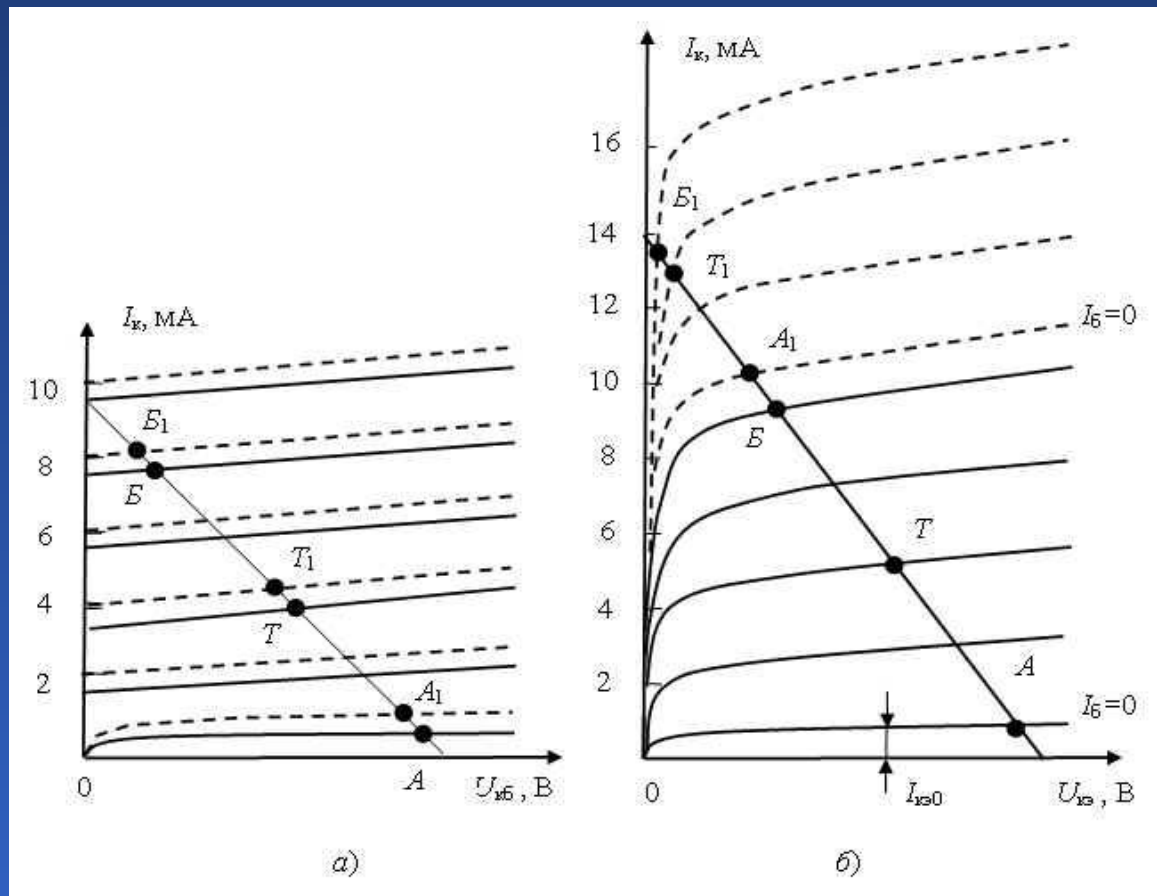
Понятие о классах усиления. Работа БТ в ключевом режиме

Основные параметры усилителей различных классов усиления

Класс усиления	Напряжение смещения	Ток покоя транзистора	Зависимость тока от времени	Примечание
A	> 0	$I_{бп} h_{21Э}$		$I_{К м} < I_{КП}$
AB	> 0	$I_{бп} h_{21Э}$		$I_{К м} < I_{КП}$ $I_{К м} < U_K / R_{КП}$
B	$= 0$	$I_{К нач}$		$I_{К м} \leq U_K / R_{КП}$
C	< 0	$I_{К0}$		$I_{К м} \leq U_K / R_{КП}$
D	< 0	$I_{К0}$		$I_{К м} = U_K / R_{КП}$

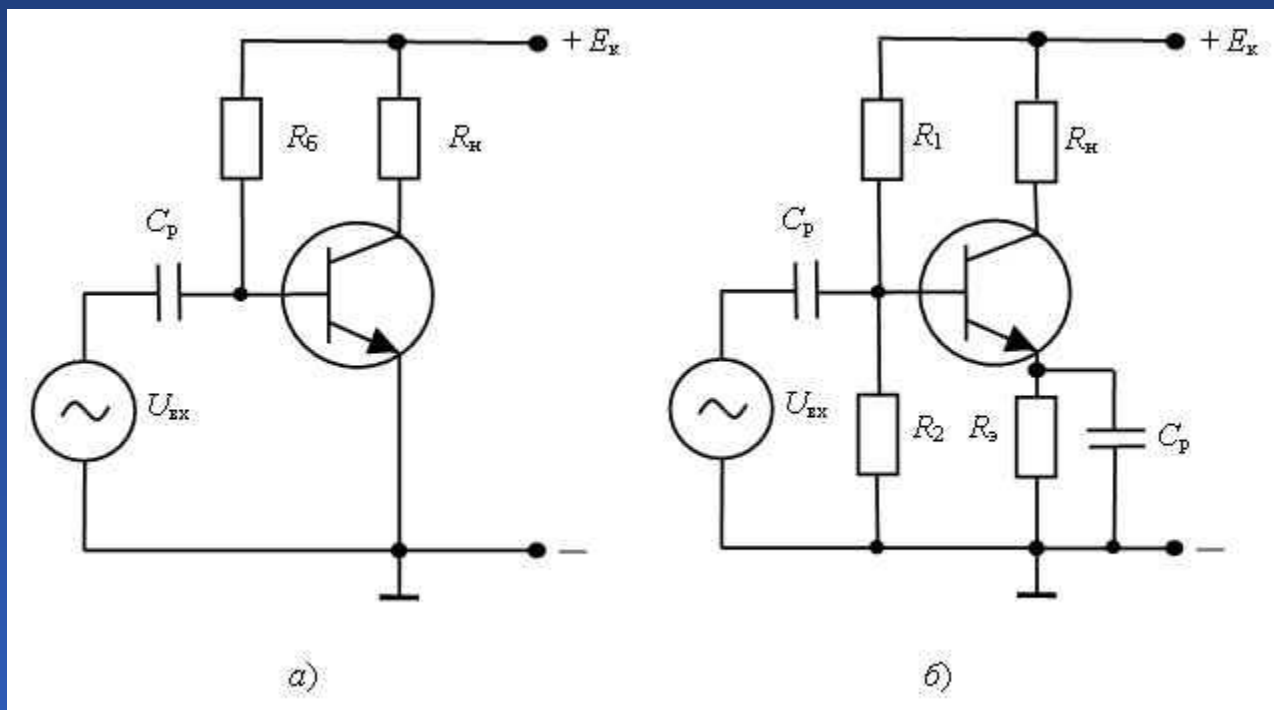


Влияние внешних условий на характеристики и параметры БТ. Проблема стабилизации рабочей точки и усиления



Влияние температуры на выходные характеристики транзистора при включении его по схеме ОБ (а) и ОЭ (б)

Влияние внешних условий на характеристики и параметры БТ. Проблема стабилизации рабочей точки и усиления



Схемы стабилизации рабочего режима усилительного каскада на биполярном транзисторе

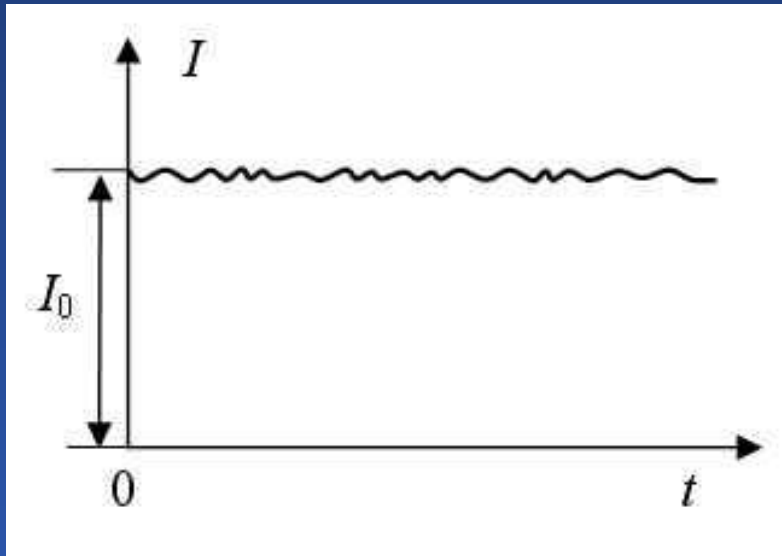
$$R_1 \approx (E_k - U_э) / (I_{60} + I_д)$$

$$R_2 \approx U_э / I_д$$

$$R_3 \approx U_э / I_{э0}$$



Источники собственных шумов в БТ



Флюктуации тока

Формула Найквиста

$$E_{\text{ш}} = \sqrt{4kTR\Delta f},$$

где k – постоянная Больцмана,
 T – абсолютная температура.

Полный шум, возникающий в транзисторе, имеет несколько составляющих:

- тепловые шумы;
- дробовые шумы;
- шумы токораспределения;
- рекомбинационные шумы.

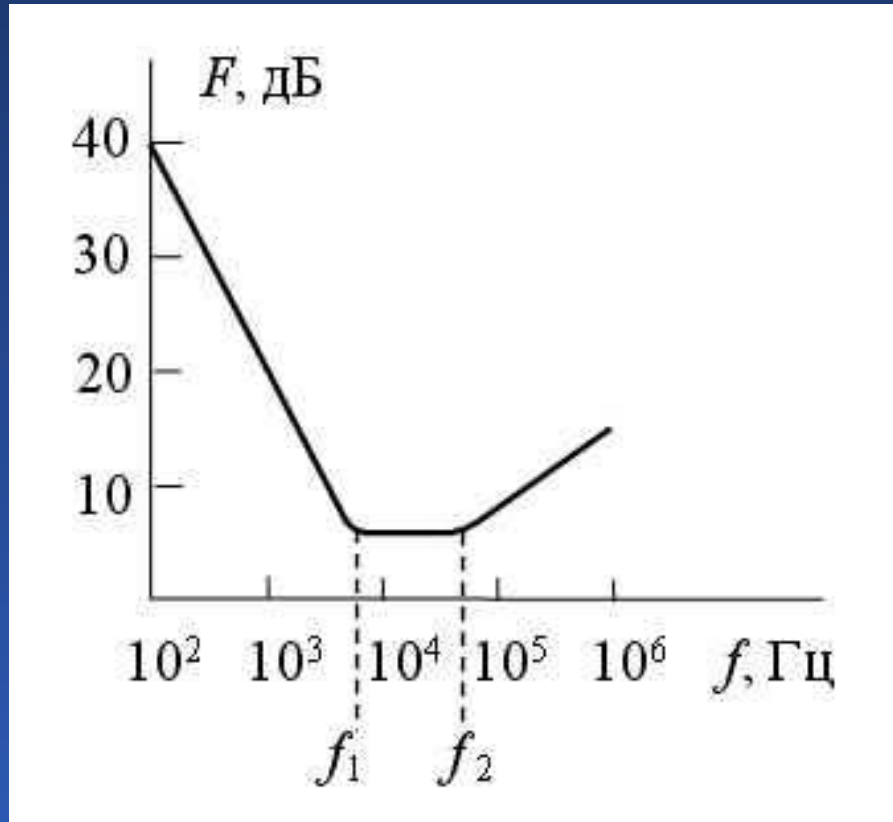
Коэффициент шума:

$$F_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{с.вх}} / P_{\text{ш.вх}}}{P_{\text{с.вых}} / P_{\text{ш.вых}}},$$

$$F = 10 \lg F_{\text{ш}}.$$



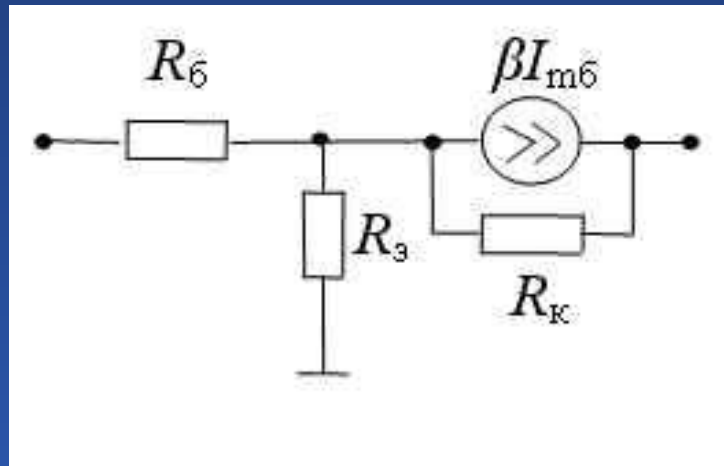
Источники собственных шумов в БТ



Зависимость коэффициента шума транзистора от частоты



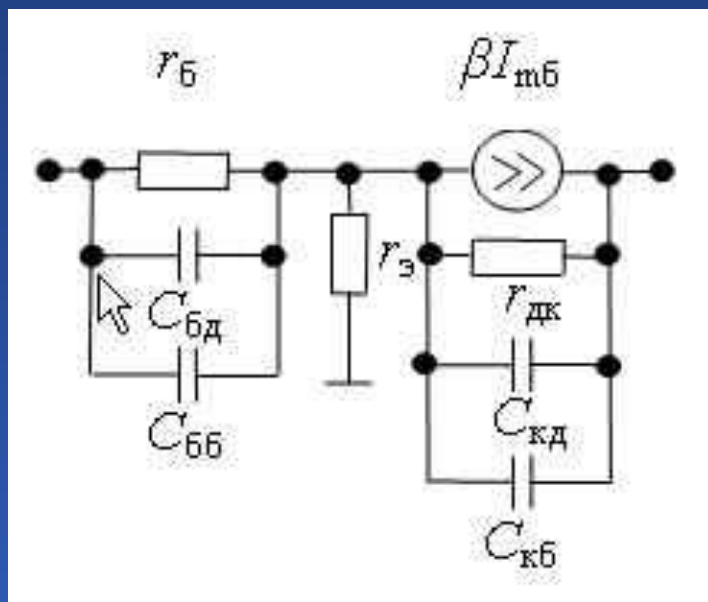
Модели биполярных транзисторов. Малосигнальные высокочастотные эквивалентные схемы БТ (П- и Т-образные). Модель Эберса – Молла. Понятие о нелинейных моделях БТ для высоких и сверхвысоких частот



Эквивалентная
Т-образная схема биполярного транзистора
для области низких частот



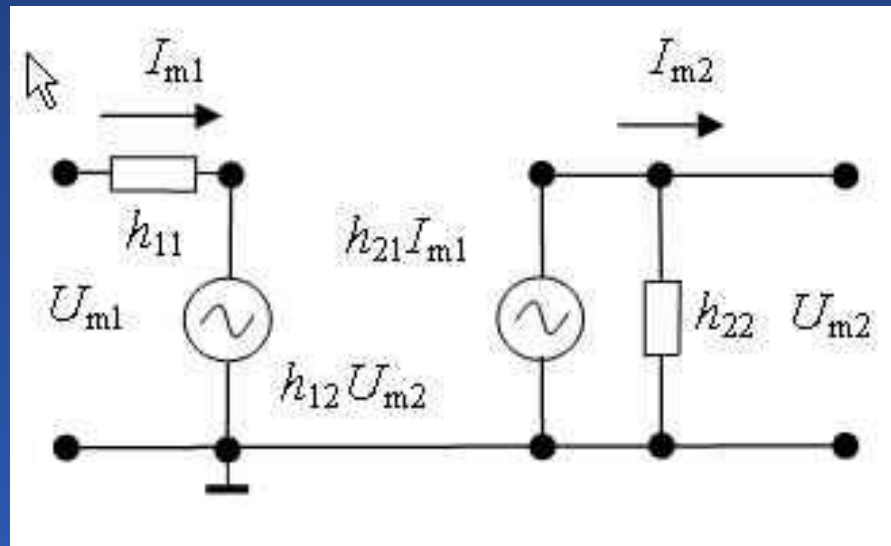
Модели биполярных транзисторов. Малосигнальные высокочастотные эквивалентные схемы БТ (П- и Т-образные). Модель Эберса – Молла. Понятие о нелинейных моделях БТ для высоких и сверхвысоких частот



Эквивалентная Т-образная схема биполярного транзистора
для области высоких частот



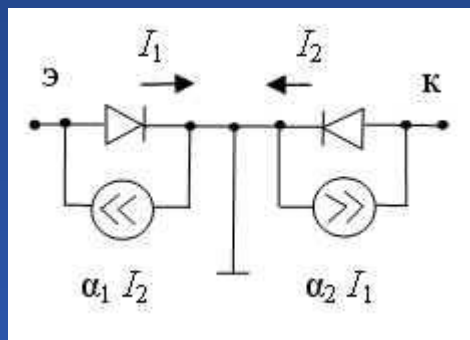
Модели биполярных транзисторов. Малосигнальные высокочастотные эквивалентные схемы БТ (П- и Т-образные). Модель Эберса – Молла. Понятие о нелинейных моделях БТ для высоких и сверхвысоких частот



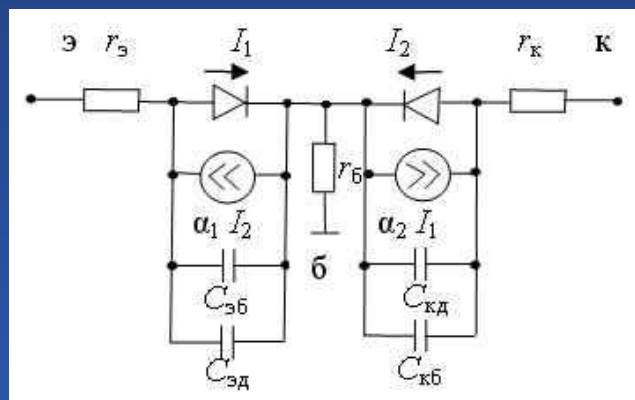
Эквивалентная схема транзистора с использованием h -параметров



Модели биполярных транзисторов. Малосигнальные высокочастотные эквивалентные схемы БТ (П- и Т-образные). Модель Эберса – Молла. Понятие о нелинейных моделях БТ для высоких и сверхвысоких частот



Модель
Эберса – Молла



Динамическая модель
Эберса – Молла

Уравнения Эберса – Молла:

$$I_1 = I_{\text{э}0} (\exp(U_{\text{эб}}/m\varphi_T) - 1),$$

$$I_2 = I_{\text{к}0} (\exp(U_{\text{кб}}/m\varphi_T) - 1).$$



Тема 4

Тиристоры и симисторы

Лекция 11



Выбор темы

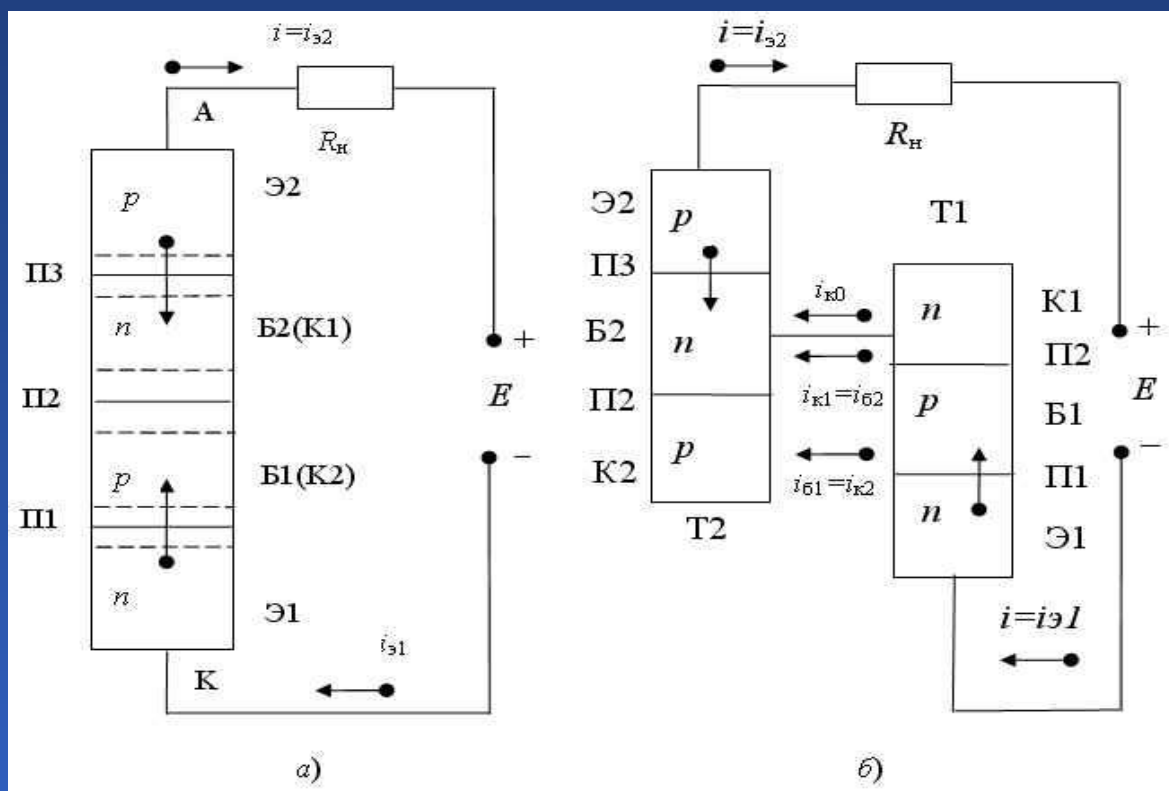
Тема 4

Тиристоры и симисторы

4.1. Тиристоры и симисторы

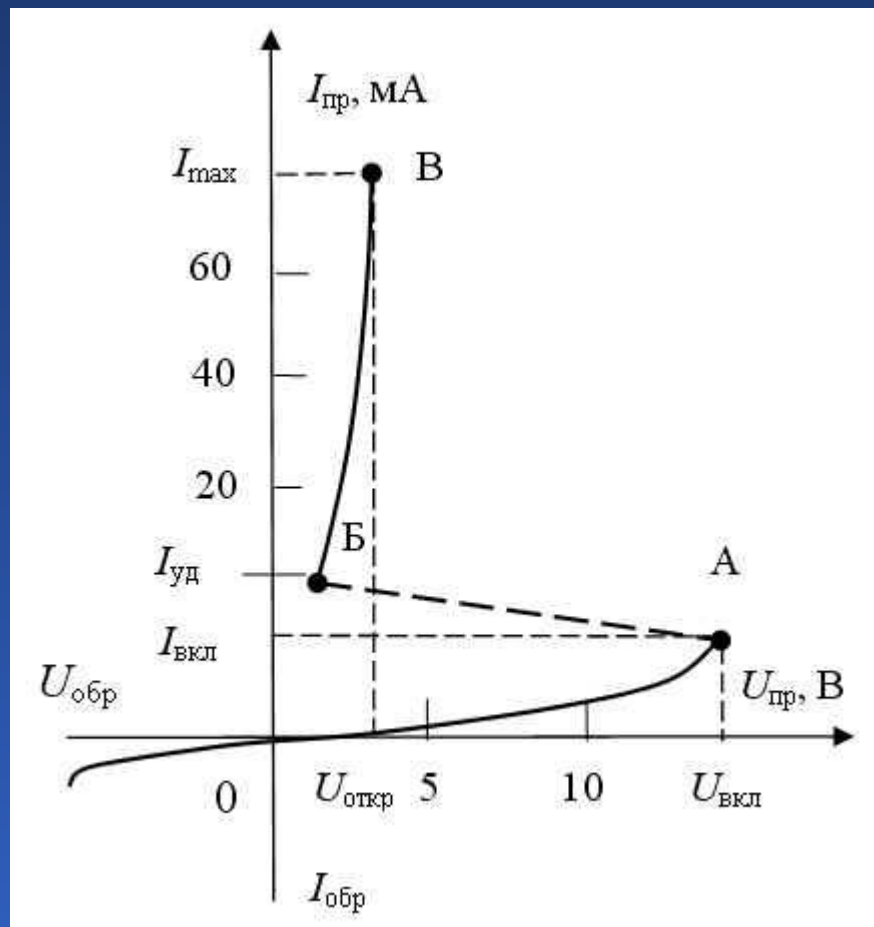
Тиристоры и симисторы

Тиристоры являются переключающими приборами. Их название происходит от греческого слова *thyra* (тира), означающего «дверь», «ВХОД».



Структура диодного тиристора (а)
и его эквивалентная схема в виде двух транзисторов (б)

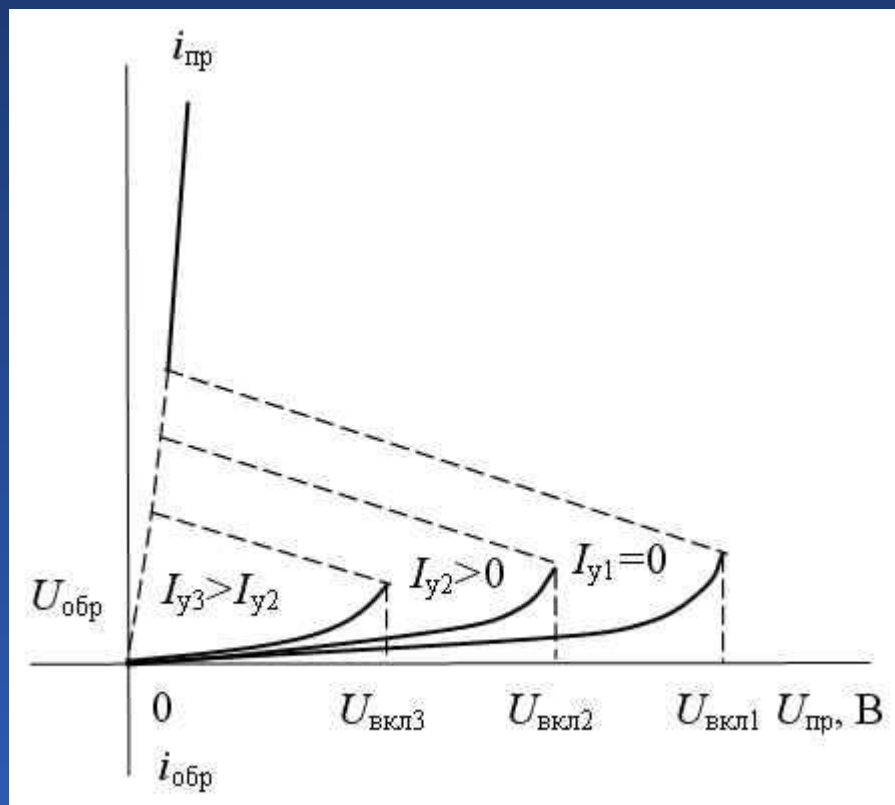
Тиристоры и симисторы



Вольт-амперная характеристика диодного тиристора



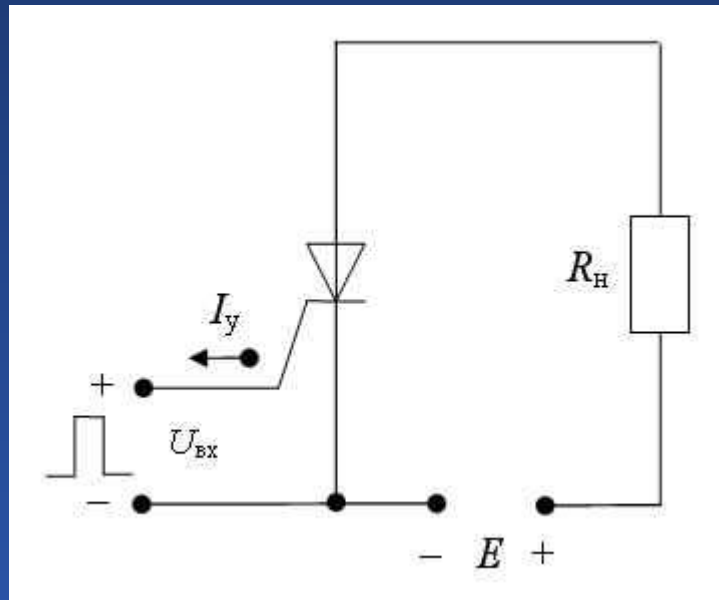
Тиристоры и симисторы



Вольт-амперные характеристики
триодного тиристора
для разных управляющих токов



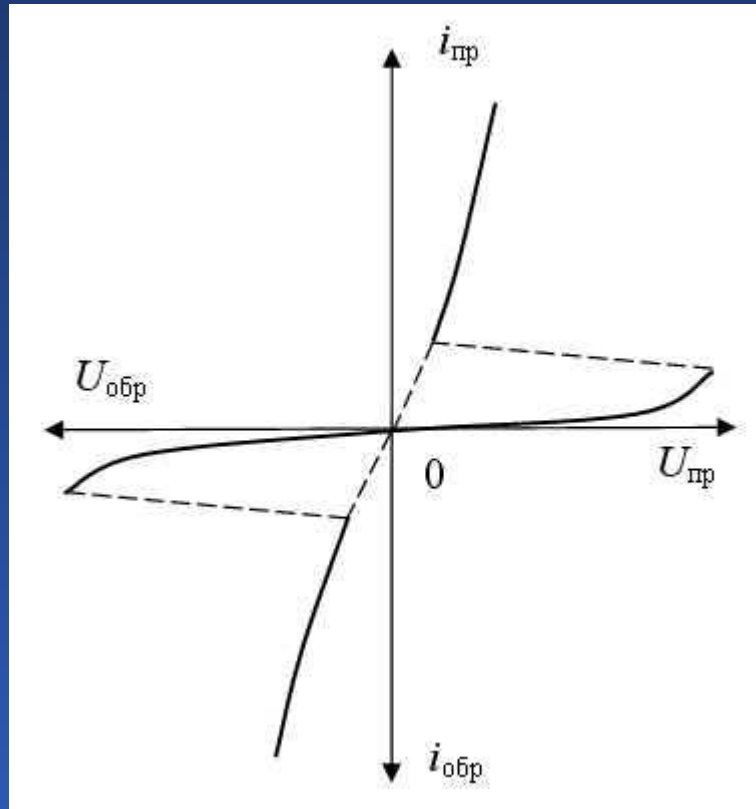
Тиристоры и симисторы



Простейшая схема включения
триодного тиристора
с выводом от p -области



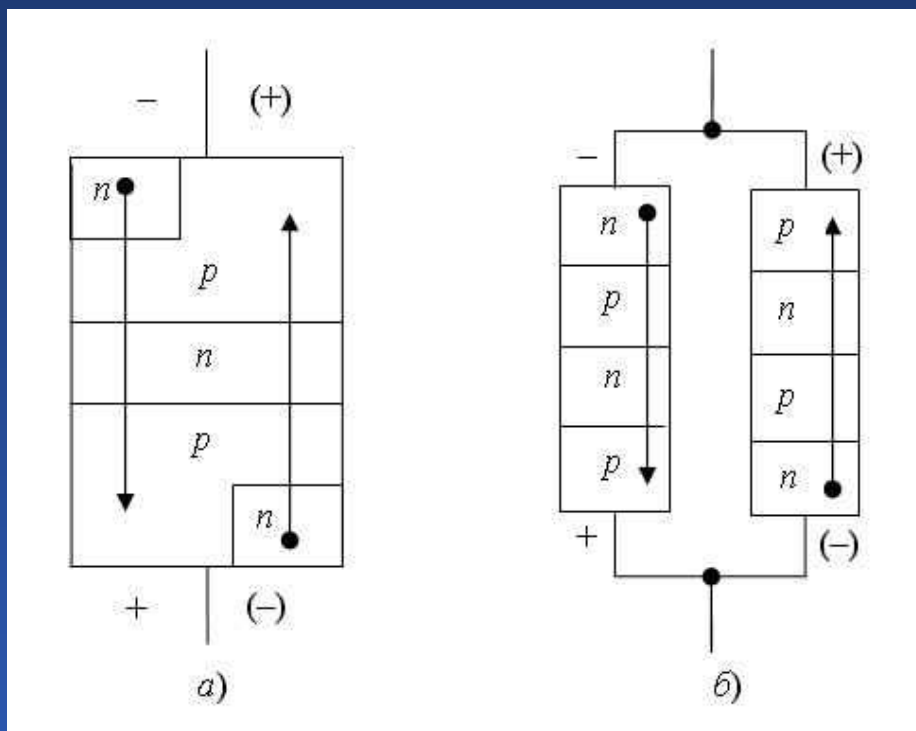
Тиристоры и симисторы



Вольт-амперная характеристика
симметричного тиристора



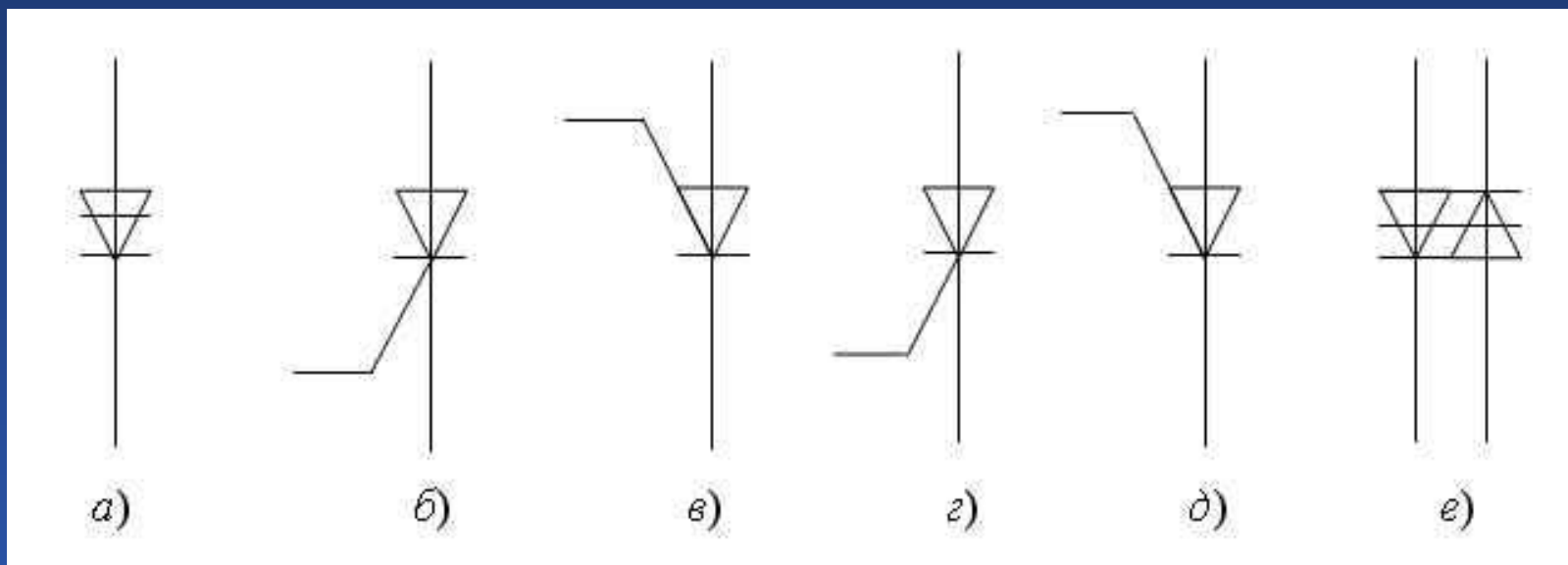
Тиристоры и симисторы



Структура симметричного тиристора (а)
и замена симметричного тиристора
двумя диодными тиристорами (б)



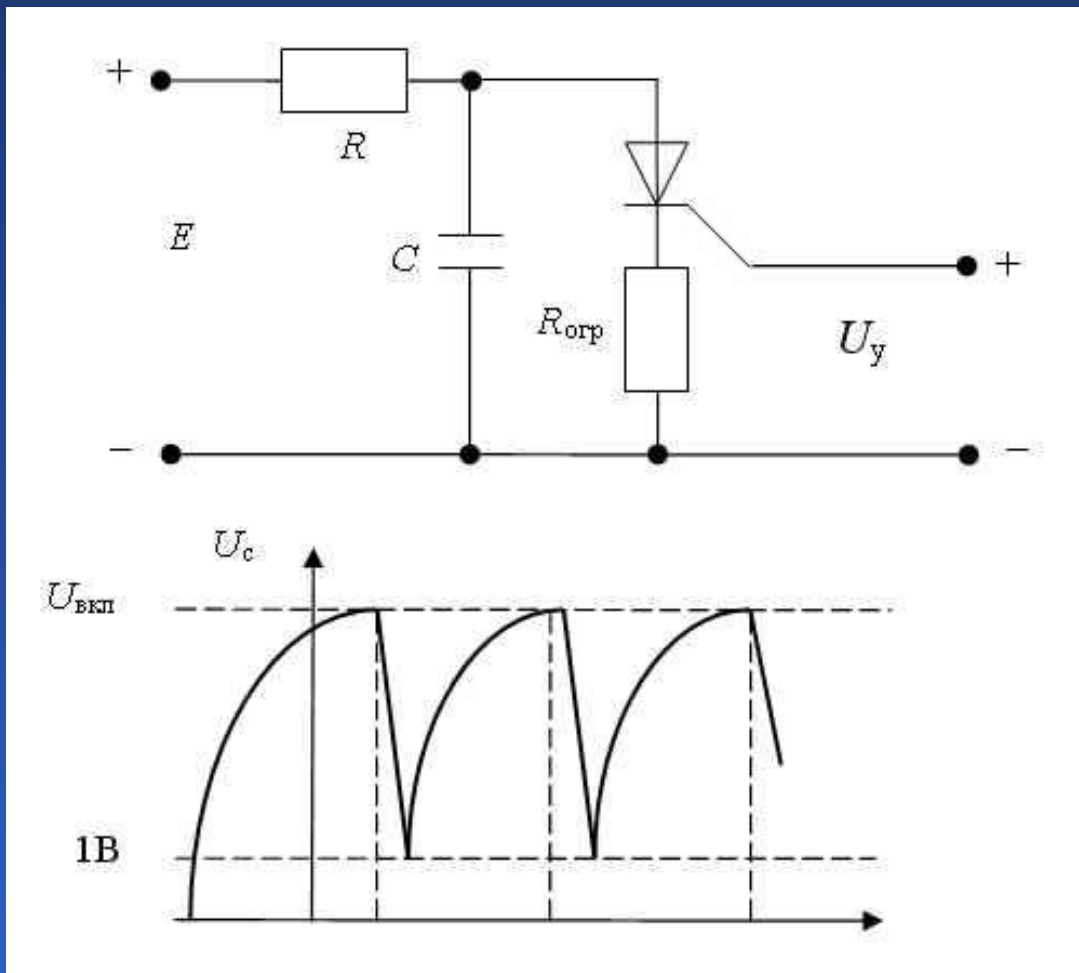
Тиристоры и симисторы



Условные графические обозначения различных тиристоров:
а – диодный тиристор, б и в – незапираемые триодные тиристоры с выводом от p - и n -области, г и д – запираемые триодные тиристоры с выводом от p - и n -области, е – симметричный тиристор



Тиристоры и симисторы



Генератор пилообразного напряжения с тиристором



Тема 5

Полевые транзисторы

Лекция 12



Лекция 13



Лекция 14



Лекция 15



Выбор темы

Тема 5

Полевые транзисторы

- 5.1. Классификация полевых транзисторов. Принцип действия полевого транзистора
- 5.2. Структура и принцип действия ПТ с управляющим $p-n$ -переходом и полевого транзистора с барьером Шоттки. Статические ВАХ и параметры в схеме с общим истоком
- 5.3. Структура и принцип действия МОП-транзистора
- 5.4. Основные схемы включения ПТ. Применение полевых транзисторов в схемах усиления. Работа ПТ в импульсном режиме
- 5.5. Линейные и нелинейные модели ПТ для ВЧ и СВЧ

Классификация полевых транзисторов. Принцип действия полевого транзистора

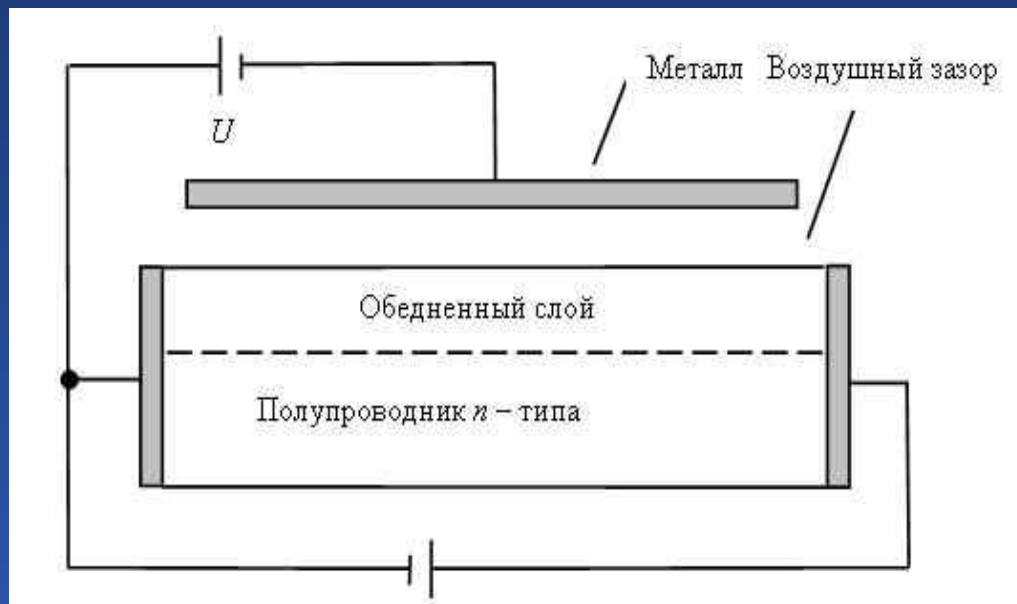
Полевым транзистором называется полупроводниковый прибор, управление током которого основано на зависимости электрического сопротивления токопроводящего слоя от напряженности поперечного электрического поля

В настоящее время существуют три основных разновидности полевых транзисторов:

- полевые транзисторы с управляющим $p-n$ -переходом;
- полевые транзисторы со структурой металл – окисел – полупроводник или МОП-транзисторы;
- полевые транзисторы с барьером Шоттки (ПТШ).



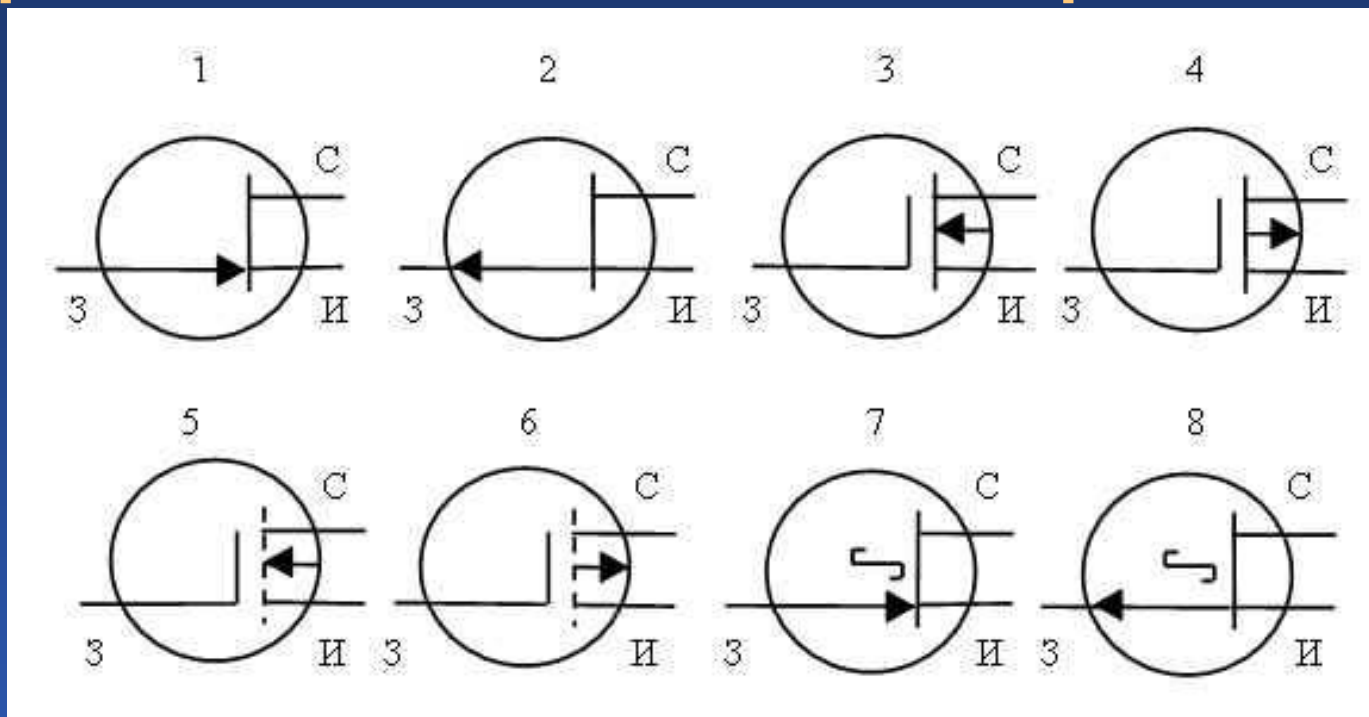
Классификация полевых транзисторов. Принцип действия полевого транзистора



Конструкция прибора, запатентованного
Ю. Лилиенфельдом



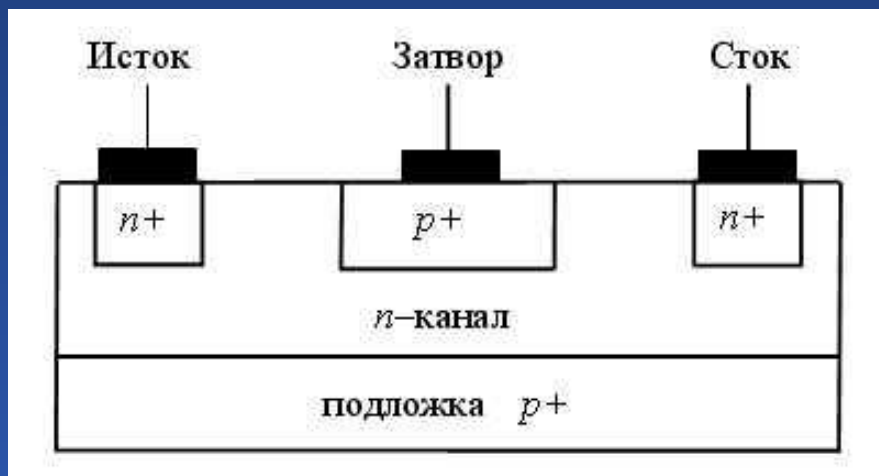
Классификация полевых транзисторов. Принцип действия полевого транзистора



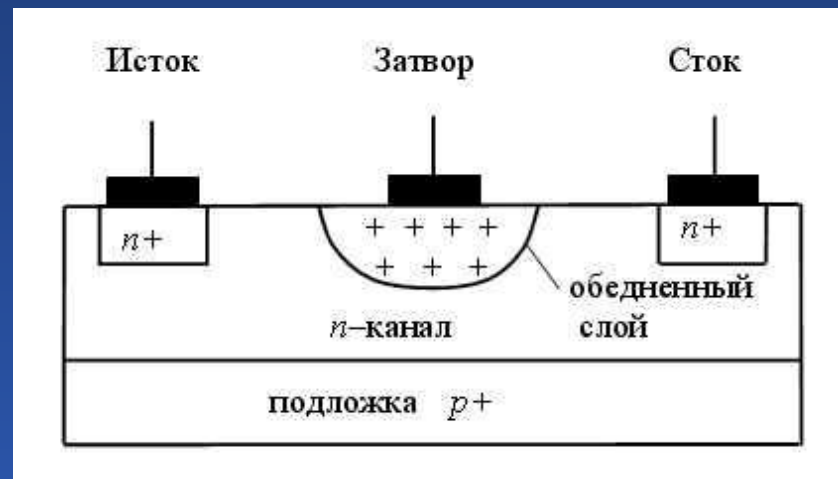
Условные обозначения различных типов полевых транзисторов
(И – исток, С – сток, З – затвор): 1, 2 – транзисторы с управляющим p – n -переходом (1 – с n -каналом, 2 – с p -каналом); 3, 4 – МОП-транзисторы со встроенным каналом (3 – с n -каналом, 4 – с p -каналом); 5, 6 – МОП-транзисторы с индуцированным каналом (5 – с n -каналом, 6 – с p -каналом); 7, 8 – транзисторы с барьером Шоттки (7 – с n -каналом, 8 – с p -каналом)



Структура и принцип действия полевого транзистора с управляющим p – n -переходом и полевого транзистора с барьером Шоттки



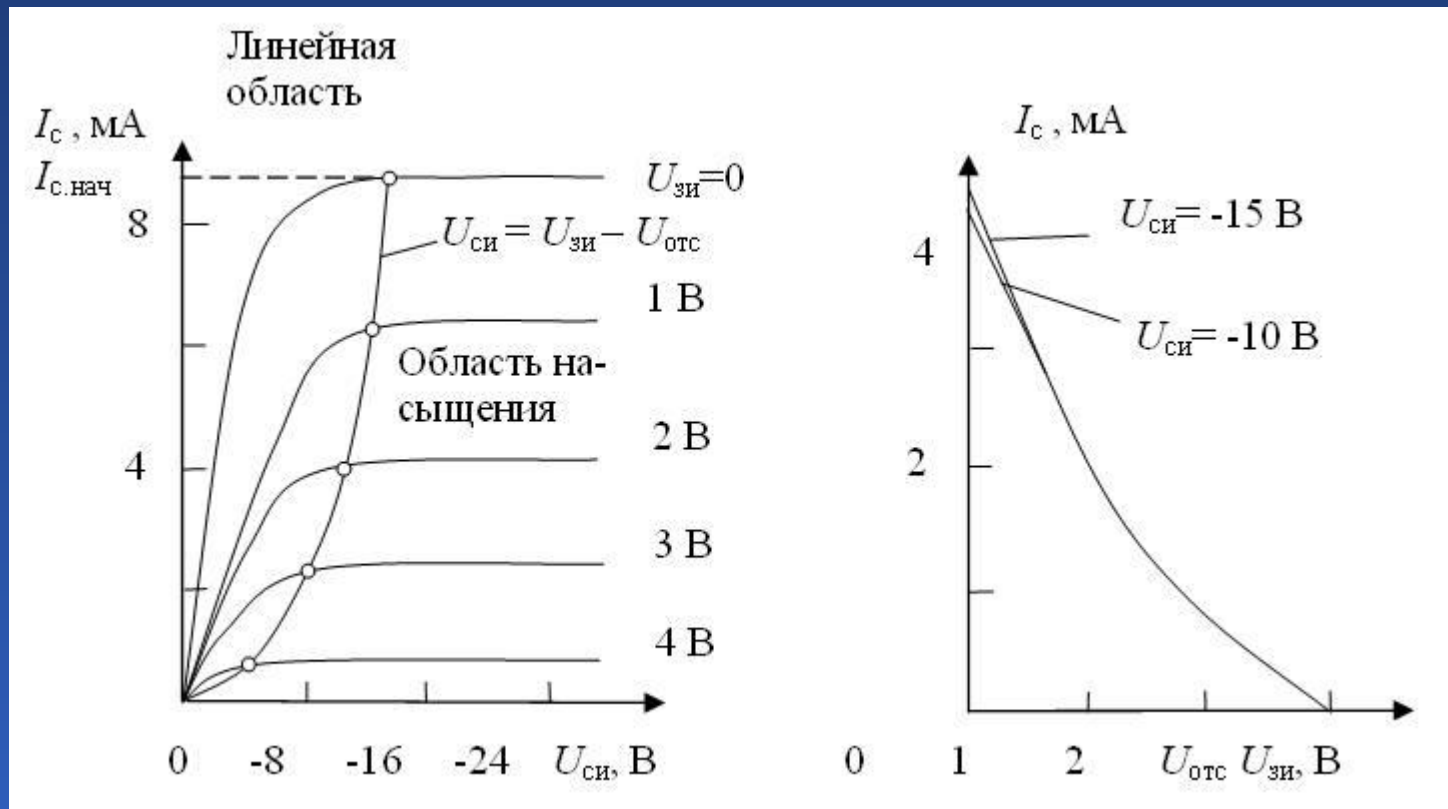
Структура полевого транзистора с управляющим p – n -переходом



Структура полевого транзистора с барьером Шоттки



Структура и принцип действия полевого транзистора с управляющим p – n -переходом и полевого транзистора с барьером Шоттки



Выходные (а) и передаточные (б) характеристики транзистора КР103М с каналом p -типа



Структура и принцип действия полевого транзистора с управляющим p – n -переходом и полевого транзистора с барьером Шоттки

Параметры полевого транзистора

Теоретическое описание ВАХ полевого транзистора с управляющим p – n -переходом в области насыщения получено Уильямом Шокли:

$$I_c = I_{c \max} \left[1 - 3 \frac{U_{зи}}{U_{отс}} + 2 \left(\frac{U_{зи}}{U_{отс}} \right)^{3/2} \right],$$

где $I_{c \max}$ – максимальный ток стока при $U_{зи} = 0$,
называемый также начальным током $I_{c.нач}$



Структура и принцип действия полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом и полевого транзистора с барьером Шоттки

Параметры полевого транзистора

На практике используют более простое описание ВАХ в области насыщения:

$$I_c = k(U_{отс} - U_{зи})^2,$$

где $k = I_{с.нач} / U_{отс}^2$ – постоянный коэффициент, зависящий от геометрических и электрофизических параметров транзистора.

В линейной области ВАХ ПТ описывается выражением

$$I_{отс} = 2k \left[(U_{зи} - U_{си}) \cdot U - \frac{U_{си}^2}{2} \right].$$



Классификация полевых транзисторов. Принцип действия полевого транзистора

Параметры полевого транзистора

Основной параметр ПТ – крутизна – характеризует усилительные свойства полевого транзистора в области насыщения и измеряется в сименсах (Сим) или – как чаще принято называть – в миллиамперах на вольт:

$$S = (\partial I_c / \partial U_{зи})|_{U_{си} = \text{const.}}$$

Выходное (внутреннее) сопротивление R_i , называемое также дифференциальным сопротивлением, представляет сопротивление канала ПТ переменному току:

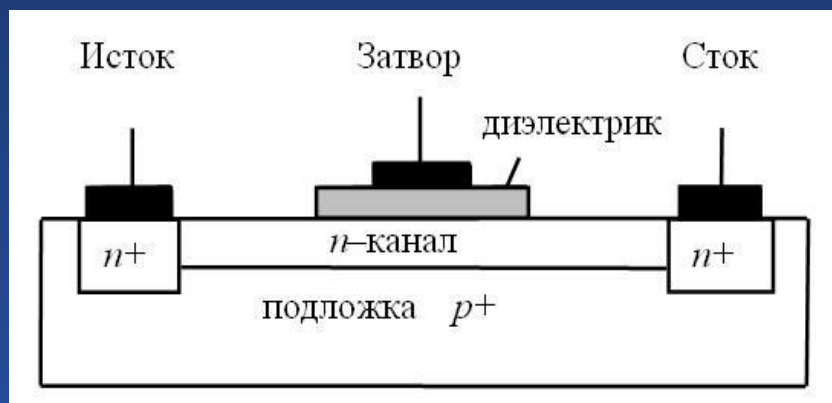
$$R_i = (\partial U_{си} / \partial I_c)|_{U_{зи} = \text{const.}}$$

Входное сопротивление:

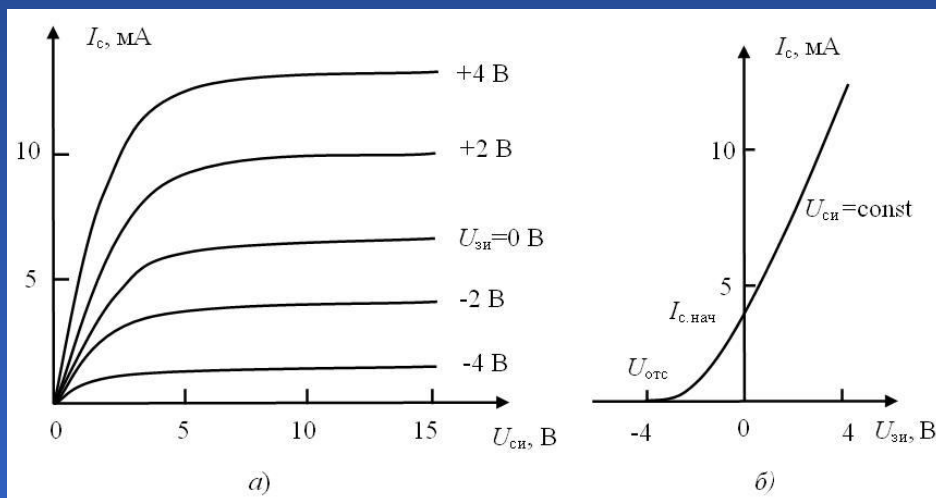
$$R_{вх} = (\partial U_{зи} / \partial I_3)|_{U_{си} = \text{const.}}$$



Структура и принцип действия МОП-транзистора



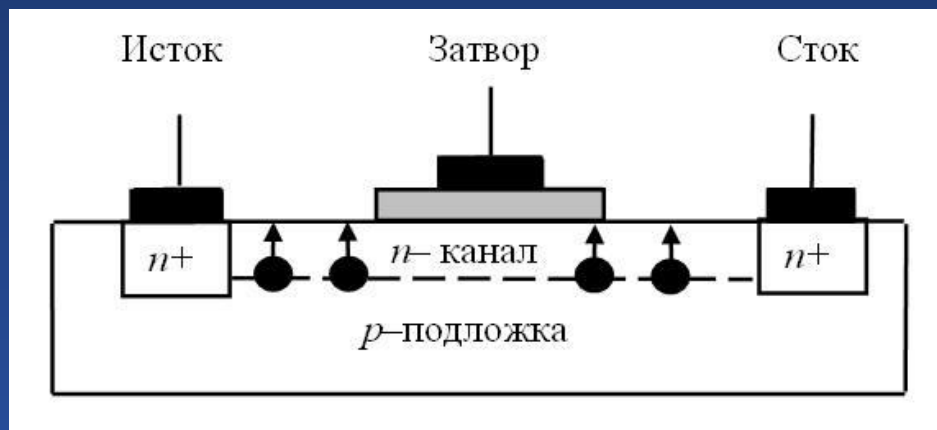
Структура МДП-транзистора
со встроенным n -каналом



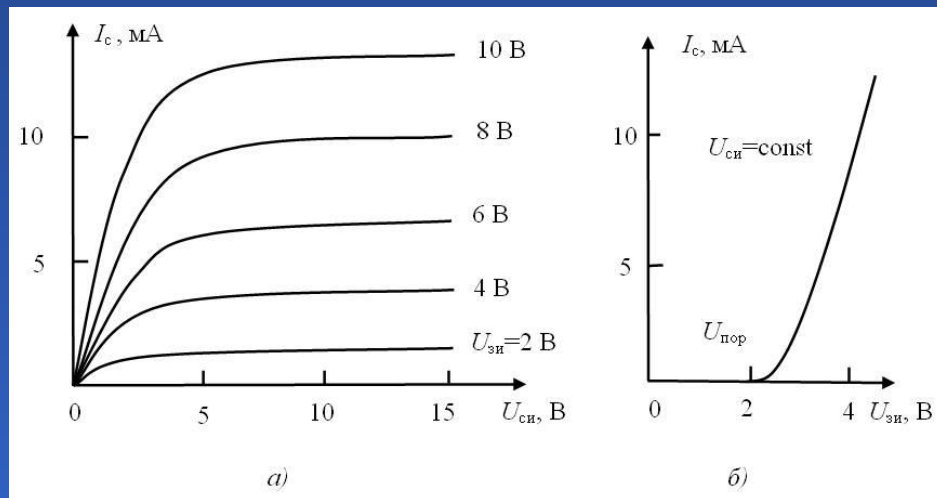
Выходные (а) и передаточные (б)
характеристики МОП-транзистора
со встроенным каналом



Структура и принцип действия МОП-транзистора



Структура МДП-транзистора
с индуцированным n -каналом



Выходные (а) и передаточные (б)
характеристики МОП-транзистора
с индуцированным каналом n -типа



Основные схемы включения ПТ. Применение полевых транзисторов в схемах усиления. Работа ПТ в импульсном режиме

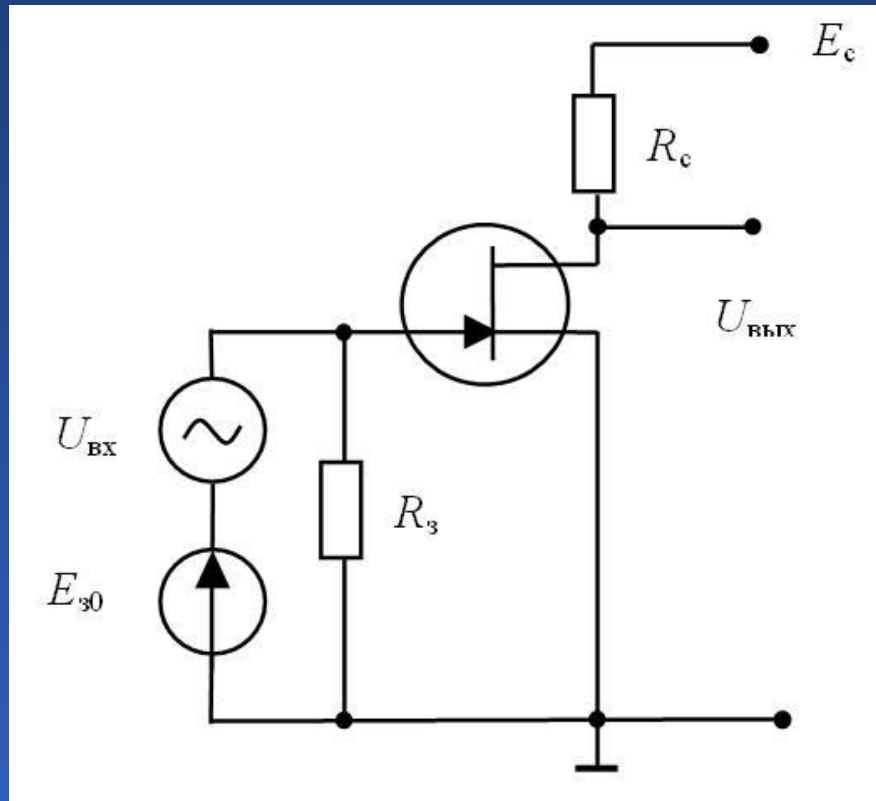
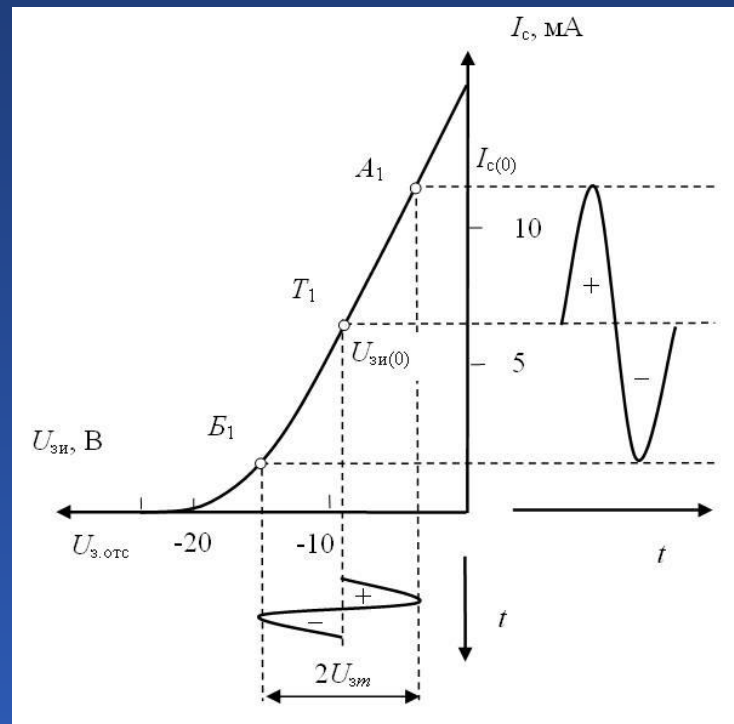
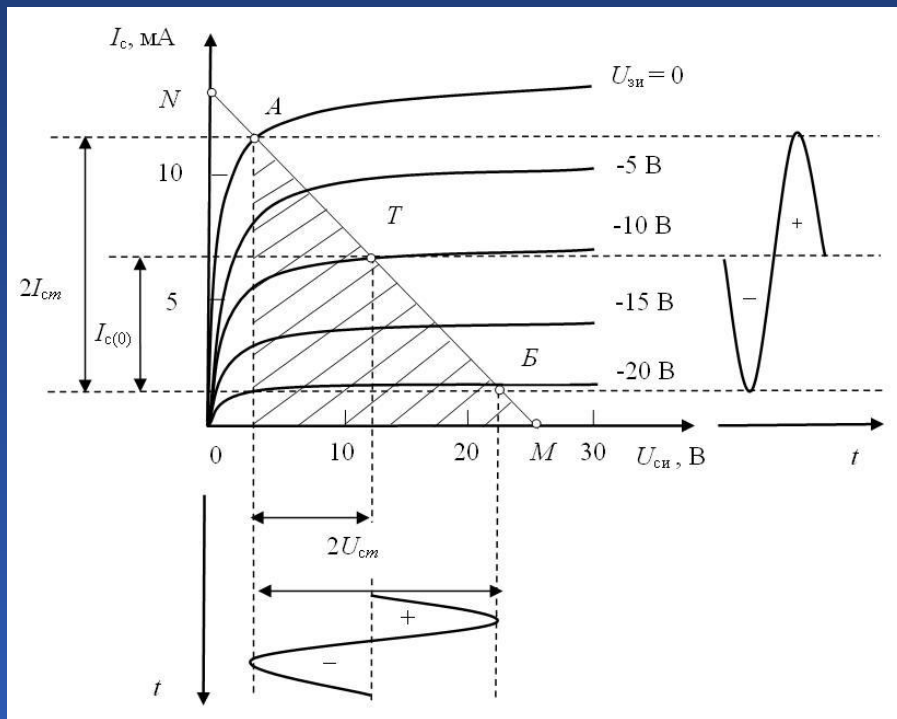


Схема усилительного каскада с общим истоком на полевом транзисторе



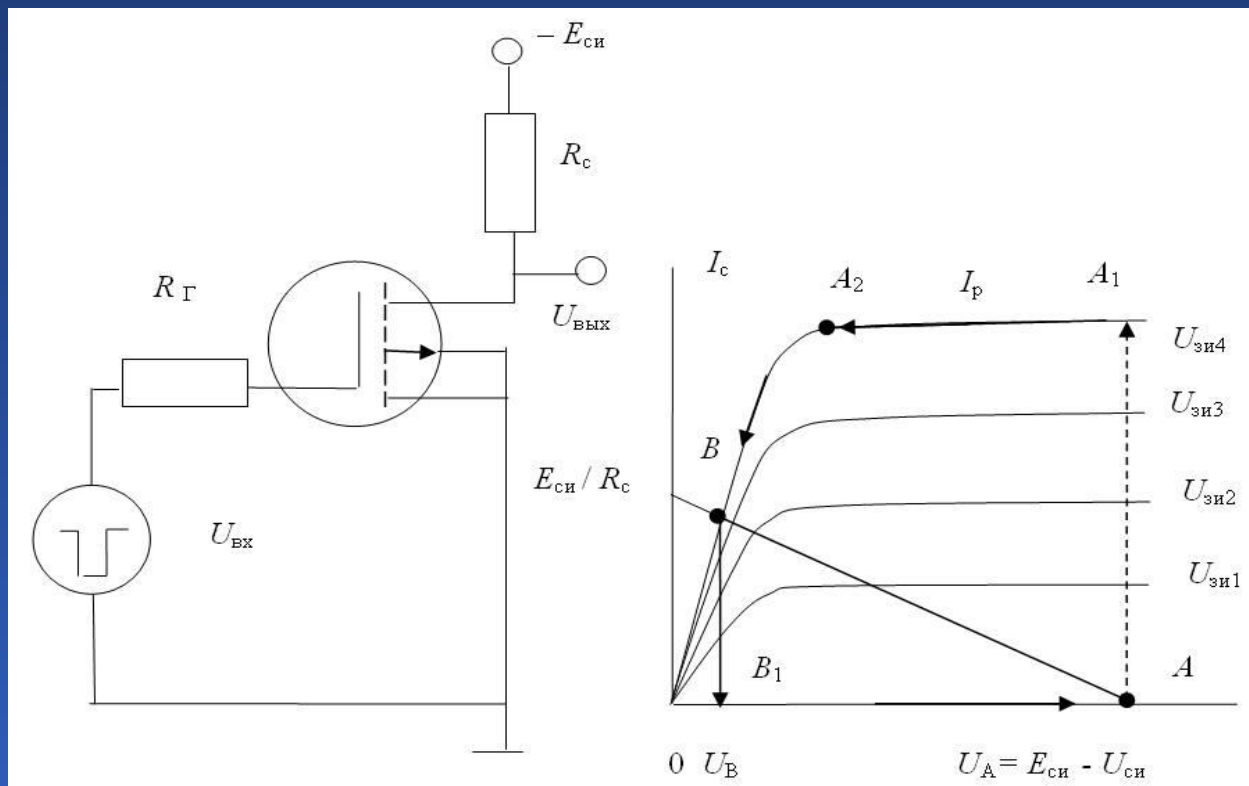
Основные схемы включения ПТ. Применение полевых транзисторов в схемах усиления. Работа ПТ в импульсном режиме



К графоаналитическому расчету и анализу режима усиления полевого транзистора с управляющим p - n -переходом



Основные схемы включения ПТ. Применение полевых транзисторов в схемах усиления. Работа ПТ в импульсном режиме



Статические
состояния ключа

Ключ на основе
МДП-транзистора
с индуцированным p -каналом

Семейство выходных ВАХ
и нагрузочная характеристика
ключа



Основные схемы включения ПТ. Применение полевых транзисторов в схемах усиления. Работа ПТ в импульсном режиме

Процесс включения транзистора

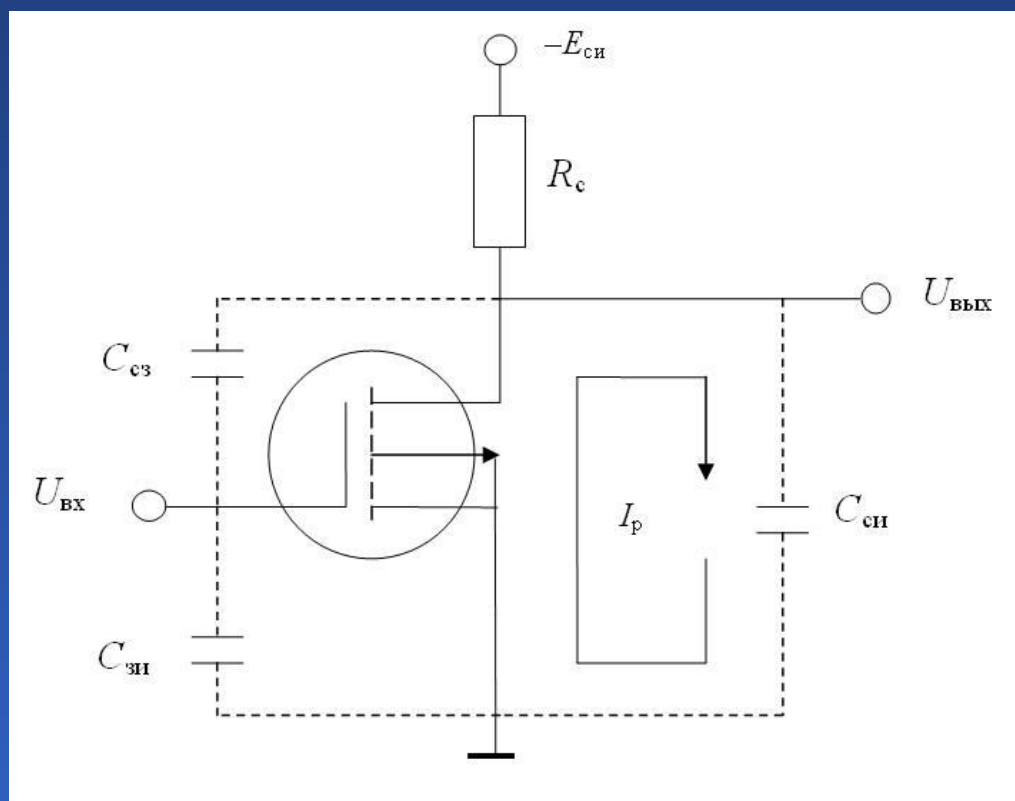
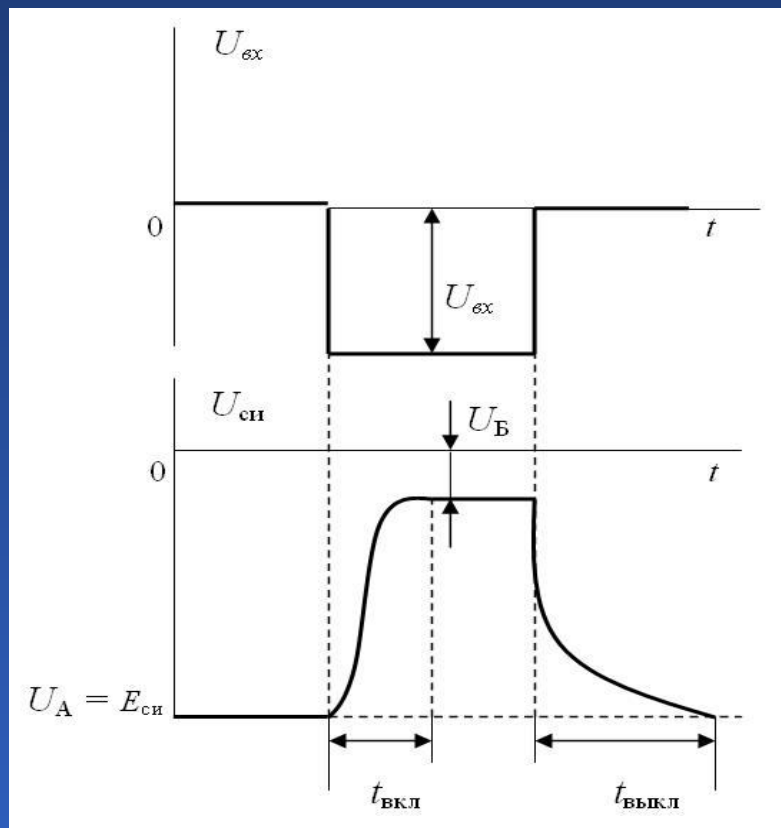


Схема ключа на МДП-транзисторе с учетом паразитных емкостей



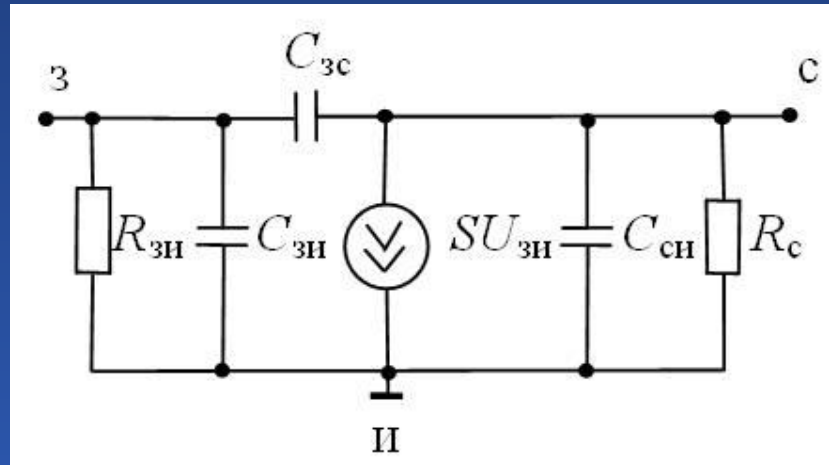
Основные схемы включения ПТ. Применение полевых транзисторов в схемах усиления. Работа ПТ в импульсном режиме



Временные диаграммы
входного и выходного напряжений



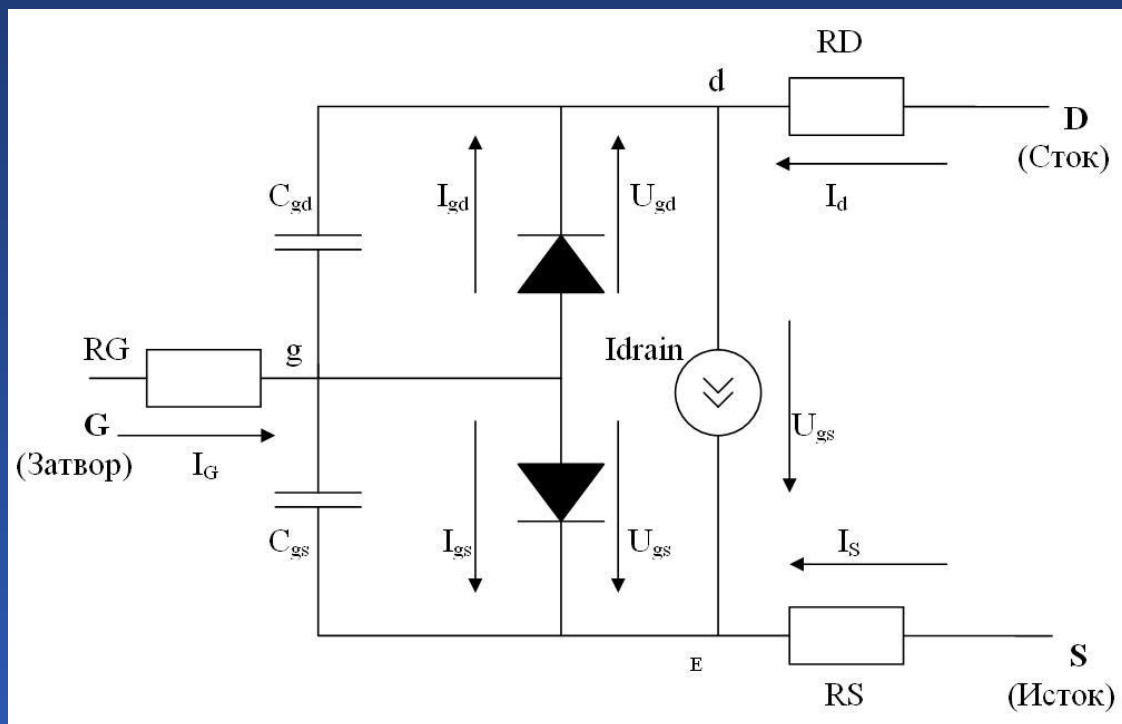
Линейные и нелинейные модели полевых транзисторов для ВЧ и СВЧ



Малосигнальная
эквивалентная схема полевого транзистора



Линейные и нелинейные модели полевых транзисторов для ВЧ и СВЧ



Нелинейная схема замещения полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом



Тема 6

Фотоэлектрические и излучательные приборы

Лекция 16



Лекция 17



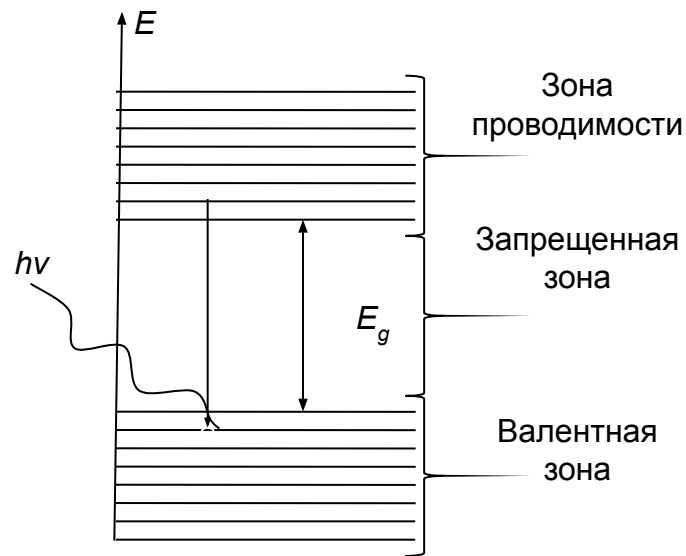
Выбор темы

Тема 6

Фотоэлектрические и излучательные приборы

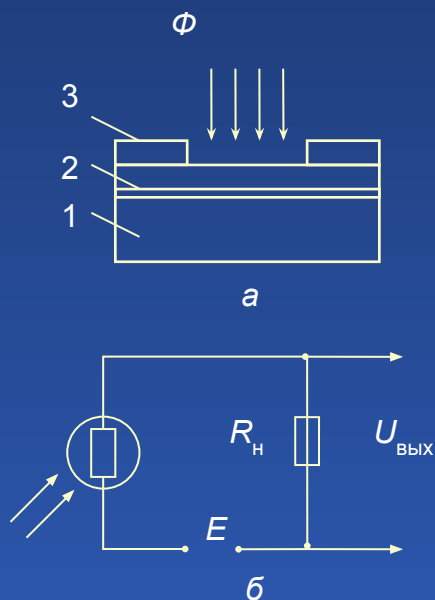
- 6.1. Излучательная генерация и рекомбинация носителей заряда в полупроводниках под действием излучения
- 6.2. Фотосопротивления, фотодиоды, фотоэлементы, фототранзисторы, фототиристоры, оптроны: характеристики, параметры, применение
- 6.3. Гетеропереходы. Зонная модель и инжекционные свойства гетеропереходов
- 6.4. *Приборы на основе гетеропереходов: светодиоды, полупроводниковые лазеры, фотоэлектрические приемники

Излучательная генерация и рекомбинация носителей заряда в полупроводниках под действием излучения

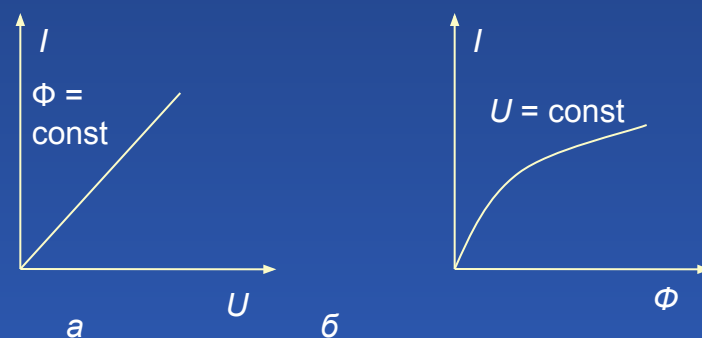


Излучение при рекомбинации

Фотосопротивления, фотодиоды, фотоэлементы, фототранзисторы, фототиристоры, оптроны: характеристики, параметры, применение



Устройство и схема включения фоторезистора



Вольт-амперная (а) и энергетическая (б) характеристики фоторезистора



Фотосопротивления, фотодиоды, фотоэлементы, фототранзисторы, фототиристоры, оптроны: характеристики, параметры, применение

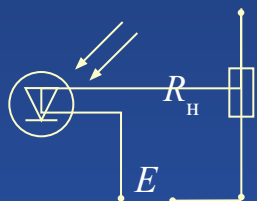
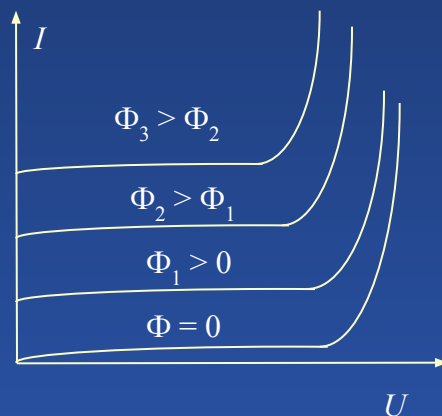
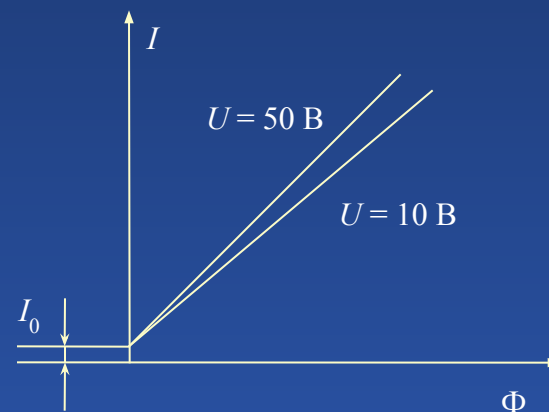


Схема включения фотодиода для работы в фотодиодном режиме



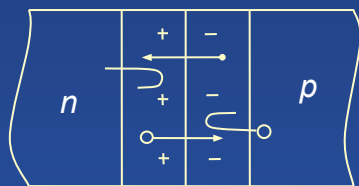
Вольт-амперные характеристики фотодиода для фотодиодного режима



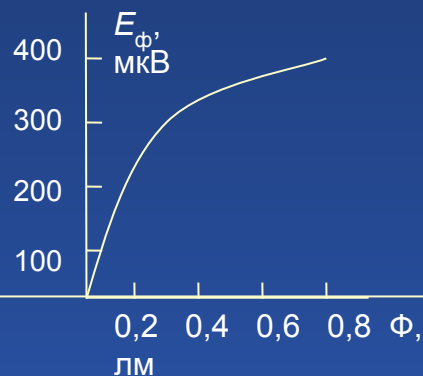
Энергетические характеристики фотодиода



Фотосопротивления, фотодиоды, фотоэлементы, фототранзисторы, фототиристоры, оптроны: характеристики, параметры, применение



Разделение возбужденных светом носителей полем p – n -перехода



Зависимость фотоЭДС от светового потока

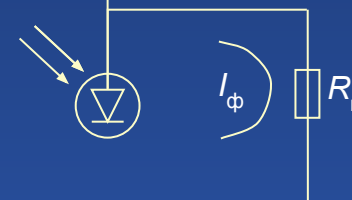
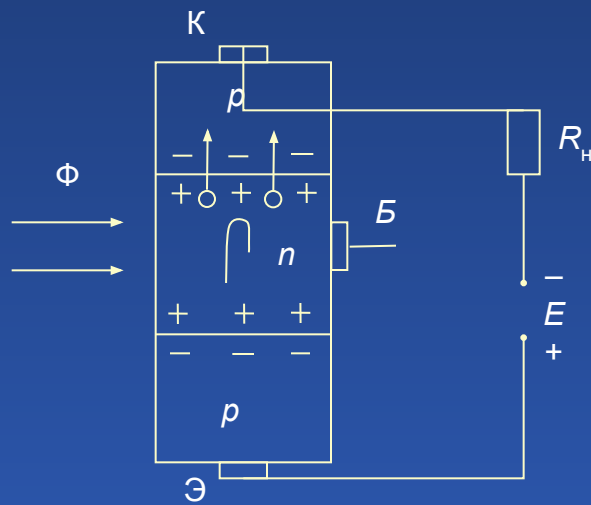


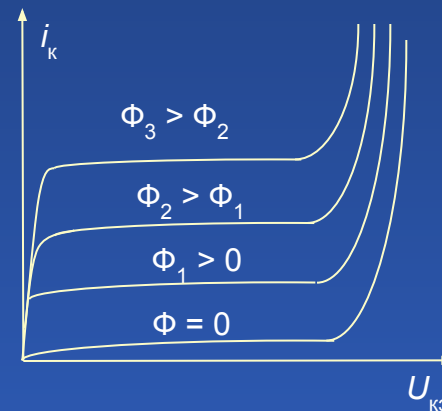
Схема включения фотоэлемента



Фотосопротивления, фотодиоды, фотоэлементы, фототранзисторы, фототиристоры, оптроны: характеристики, параметры, применение



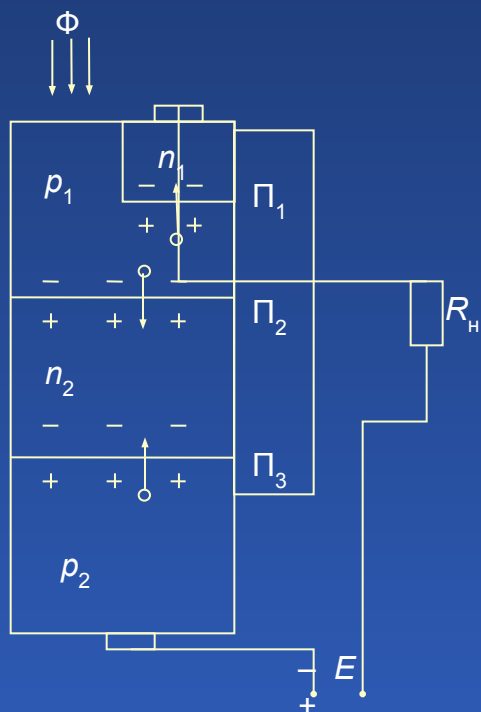
Структура и схема включения фототранзистора со «свободной» базой



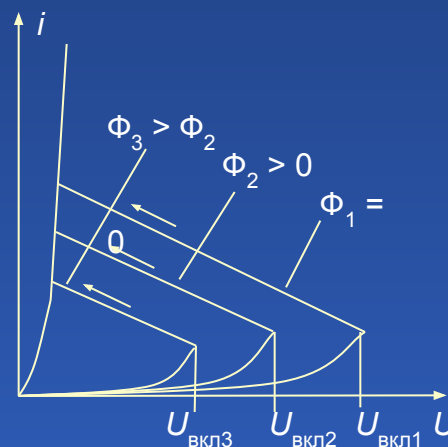
Выходные характеристики фототранзистора



Фотосопротивления, фотодиоды, фотоэлементы, фототранзисторы, фототиристоры, оптроны: характеристики, параметры, применение



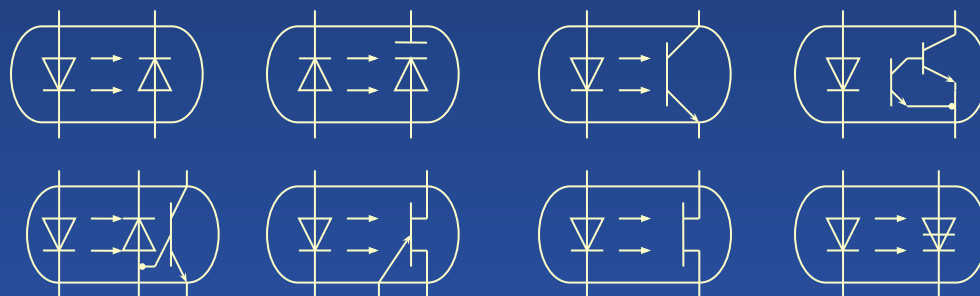
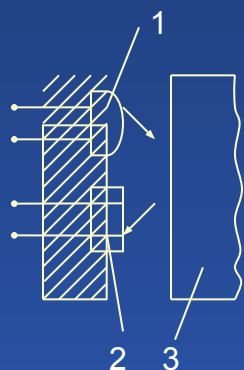
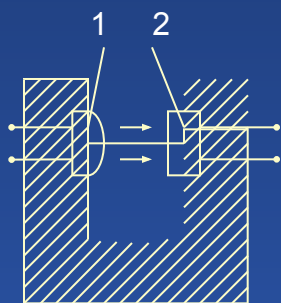
Структура и схема включения фототиристора



Вольт-амперная характеристика фототиристора



Фотосопротивления, фотодиоды, фотоэлементы, фототранзисторы, фототиристоры, оптроны: характеристики, параметры, применение

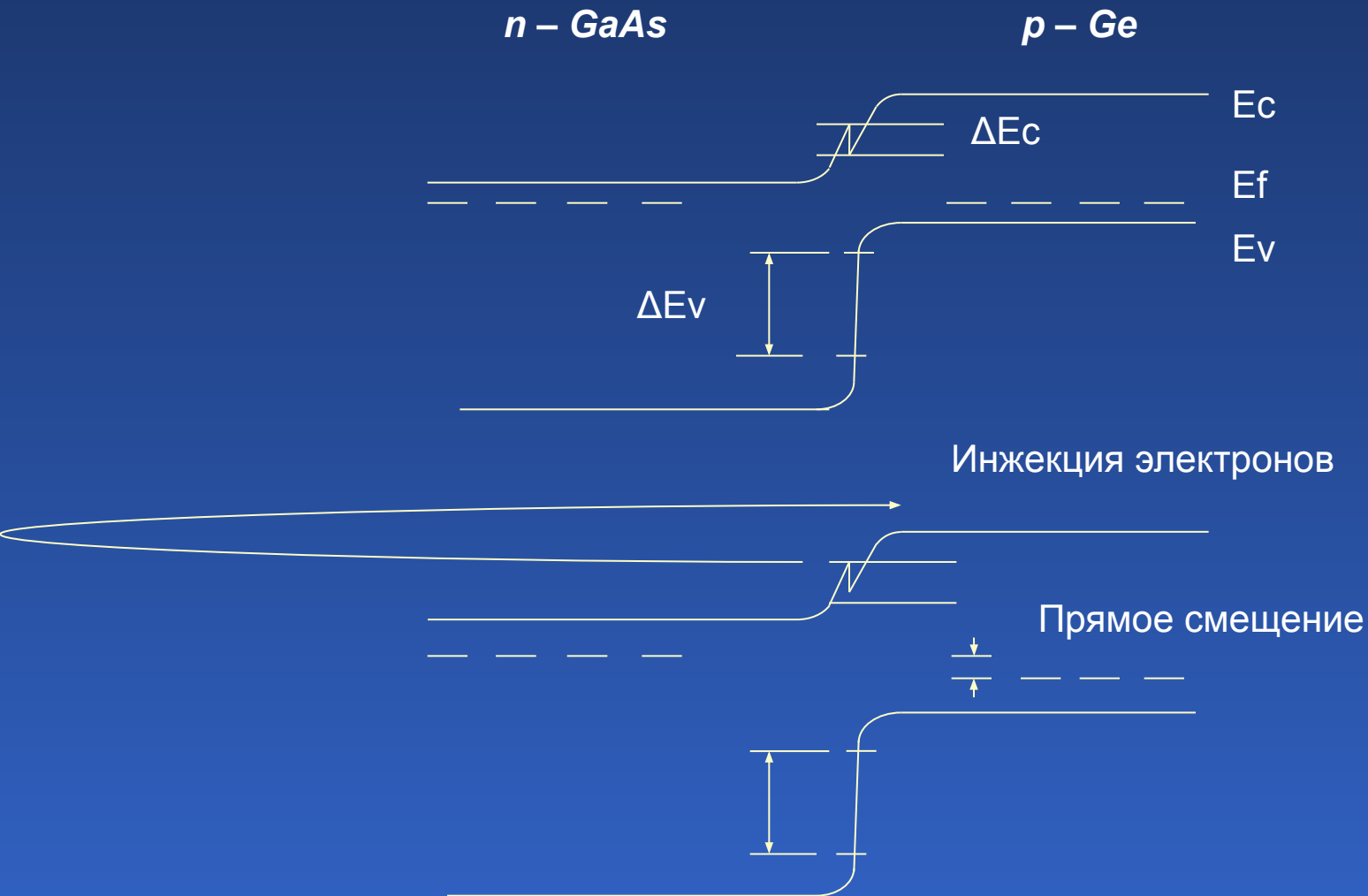


Оптопары с открытым оптическим каналом:
1 – излучатель; 2 – фотоприемник; 3 – объект

Различные типы оптопар



Зонная модель и инжекционные свойства гетеропереходов



Тема 7

Основы технологии микросэлектронных изделий. Базовые ячейки аналоговых и цифровых интегральных схем

Лекция 18



Лекция 19



Выбор темы

Тема 7

Основы технологии микроэлектронных изделий. Базовые ячейки аналоговых и цифровых интегральных схем

- 7.1. Предмет микроэлектроники. Классификация интегральных схем
- 7.2. Технология полупроводниковых интегральных схем
 - 7.2.1. Подготовительные операции
 - 7.2.2. Эпитаксия
 - 7.2.3. Термическое окисление
 - 7.2.4. Легирование
 - 7.2.5. Травление
 - 7.2.6. Техника масок
 - 7.2.7. Нанесение тонких пленок
 - 7.2.8. Металлизация
 - 7.2.9. Сборочные операции
- 7.3. Технология тонкопленочных гибридных интегральных схем
- 7.4. Технология толстопленочных гибридных интегральных схем

Подготовительные операции

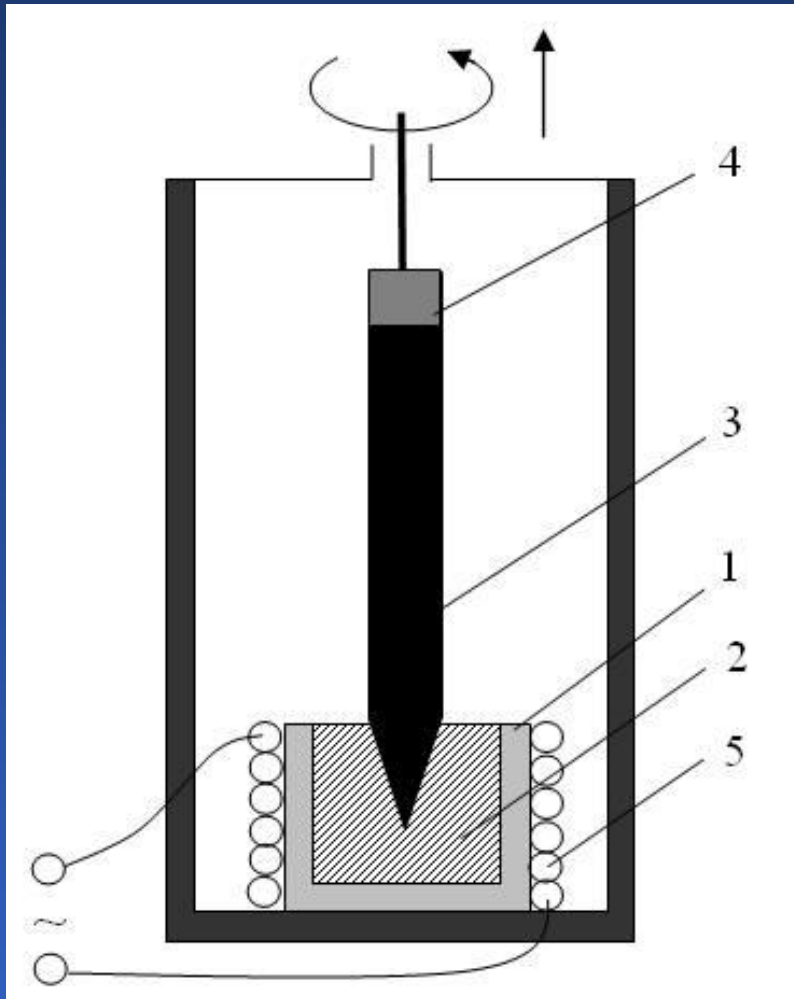
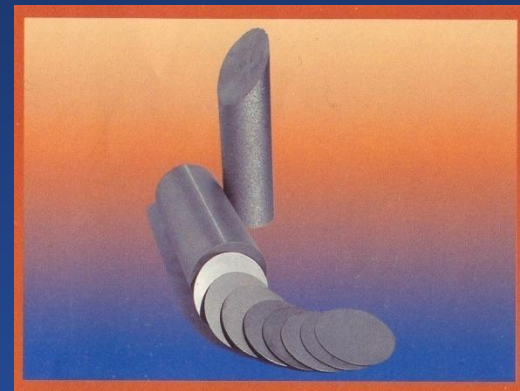
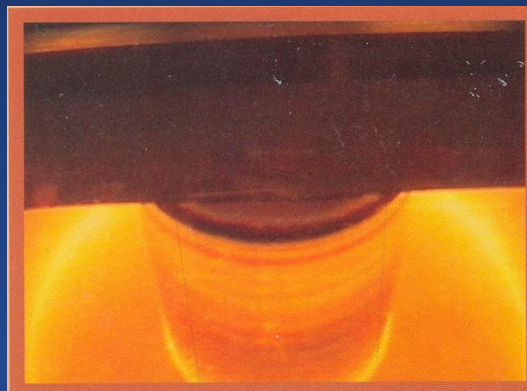


Схема выращивания монокристаллов методом Чохральского: 1 – тигель; 2 – расплав полупроводника; 3 – монокристалл выращиваемого полупроводника; 4 – затравка; 5 – катушка высокочастотного индуктора



Подготовительные операции



Эпитаксия

Эпитаксией называют процесс наращивания монокристаллических слоев на подложку, при котором кристаллографическая ориентация наращиваемого слоя повторяет кристаллографическую ориентацию подложки.

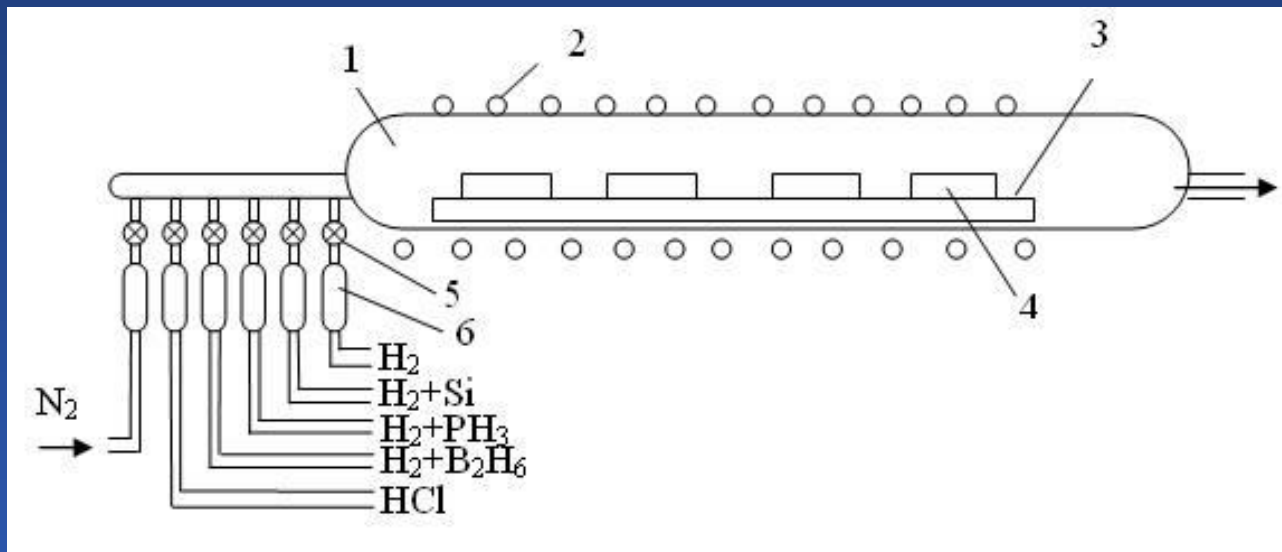
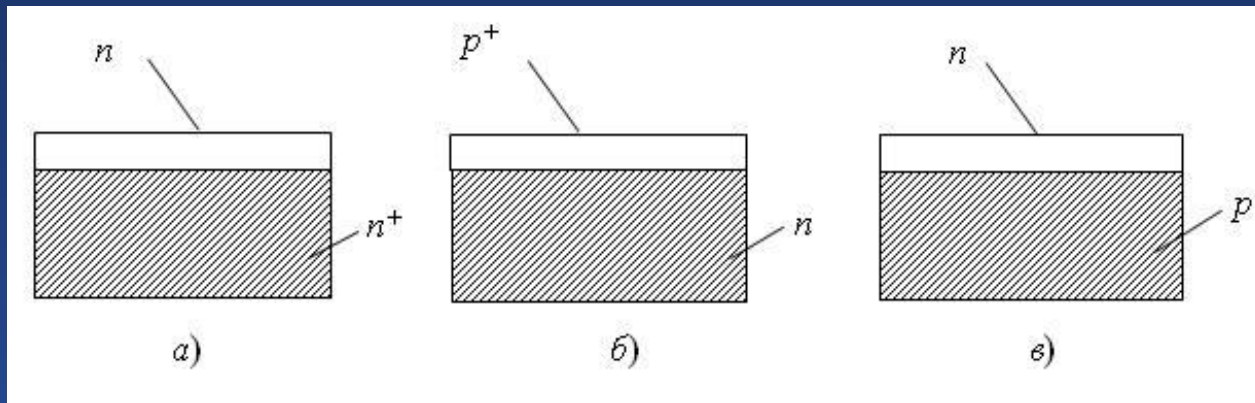


Схема хлоридного процесса эпитаксии: **1** – кварцевая труба;
2 – катушка ВЧ-нагрева; **3** – тигель с пластинами; **4** – пластина кремния;
5 – вентиль для перекрытия соответствующего газа; **6** – измеритель скорости потока





Примеры эпитаксиальных структур:

а – пленка n -типа на n^+ -подложке;

б – пленка p^+ -типа на n -подложке;

в – пленка n -типа на p -подложке



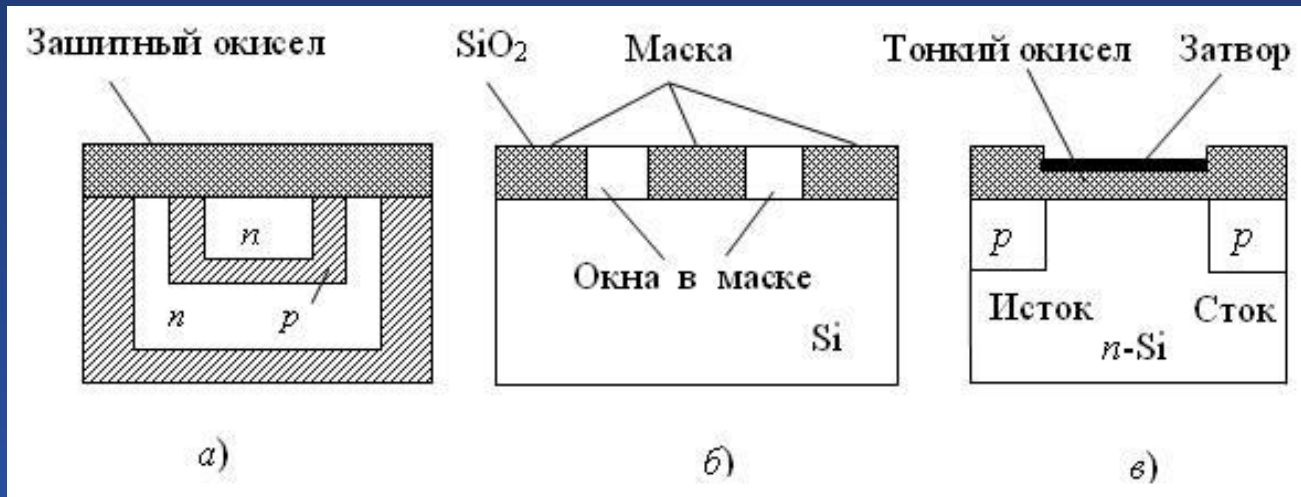
Термическое окисление

Окисление кремния – один из самых характерных процессов в технологии современных ИС. Получаемая при этом пленка двуокиси кремния (SiO_2) выполняет несколько важных функций, в том числе:

- функцию защиты – *пассивации* поверхности и, в частности, защиты вертикальных участков *p-n*-переходов, выходящих на поверхность;
- функцию маски, через окна которой вводятся необходимые примеси;
- функцию диэлектрика под затвором МОП-транзистора.



Термическое окисление



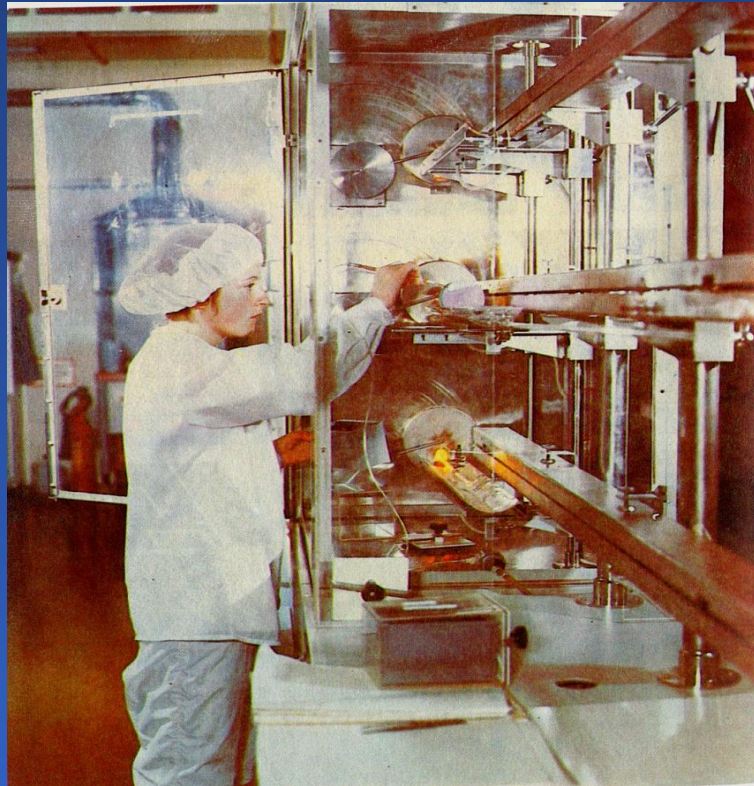
Функции двуокисной пленки кремния:

а – пассивация поверхности; **б** – маска для локального легирования; **в** – тонкий подзатворный окисел



Легирование

Внедрение примесей в исходную пластину (или в эпитаксиальный слой) путем диффузии при высокой температуре является исходным и до сих пор основным способом легирования полупроводников с целью создания диодных и транзисторных структур.



Легирование

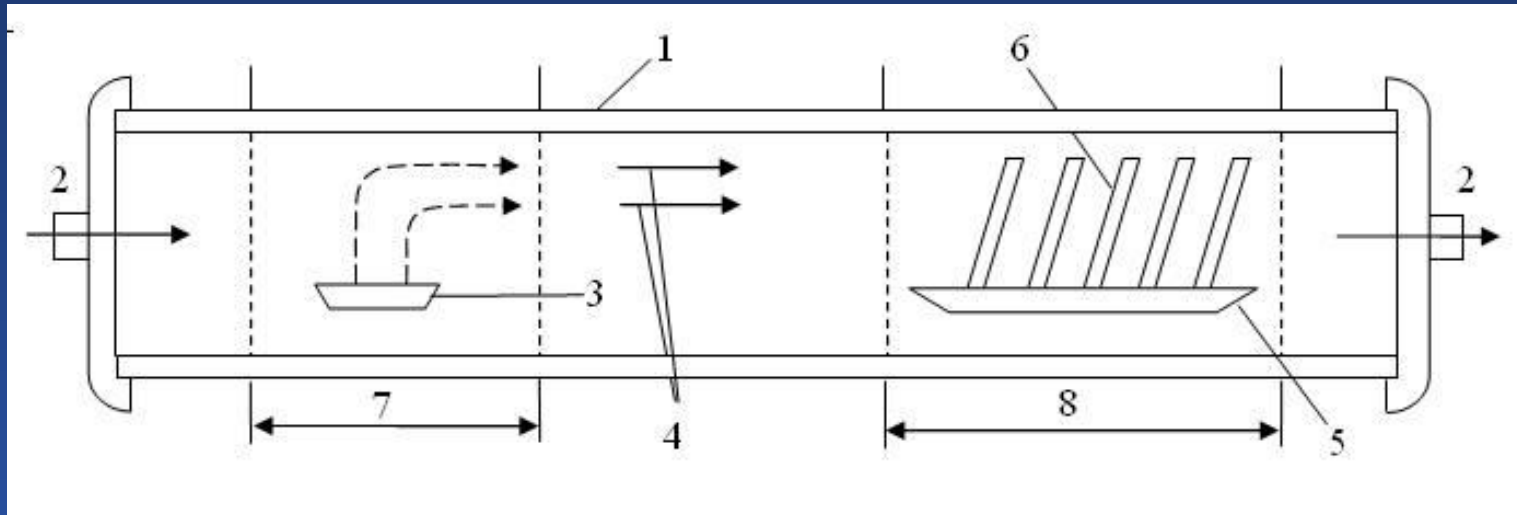
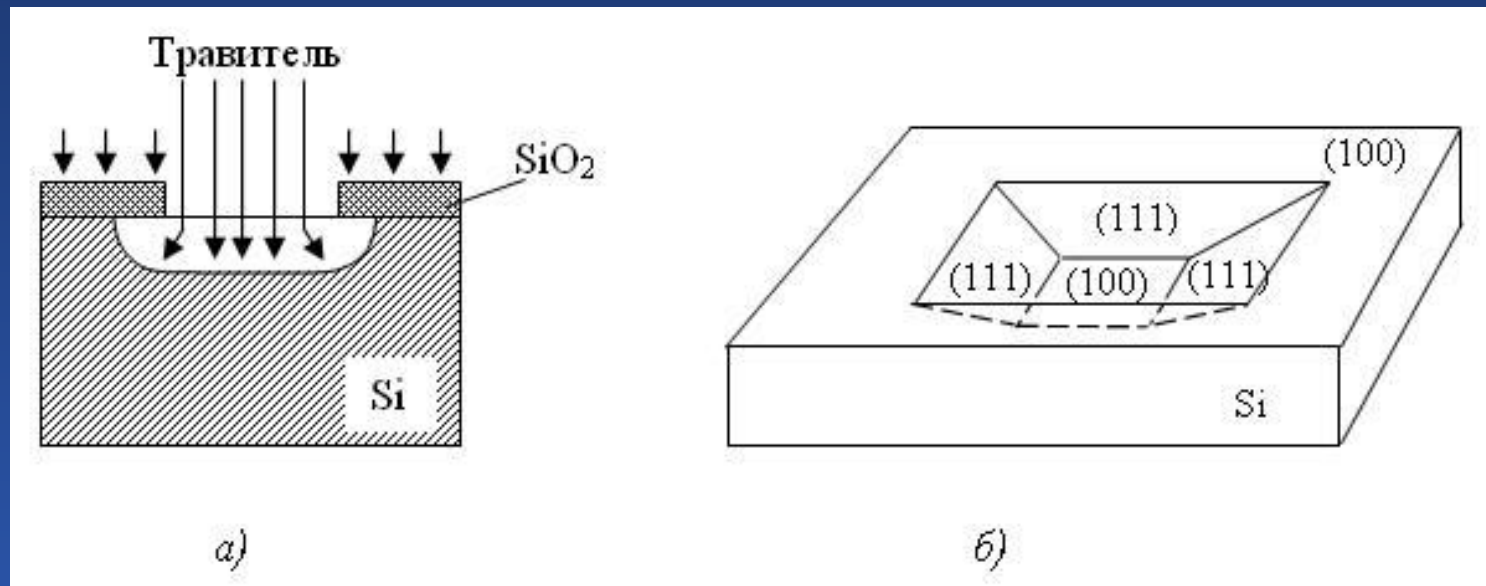


Схема двухзонной диффузионной печи:

- 1 – кварцевая труба; 2 – поток газа-носителя; 3 – источник диффузанта;
- 4 – пары источника диффузанта; 5 – тигель с пластинами;
- 6 – пластина кремния; 7 – первая высокотемпературная зона;
- 8 – вторая высокотемпературная зона



Травление

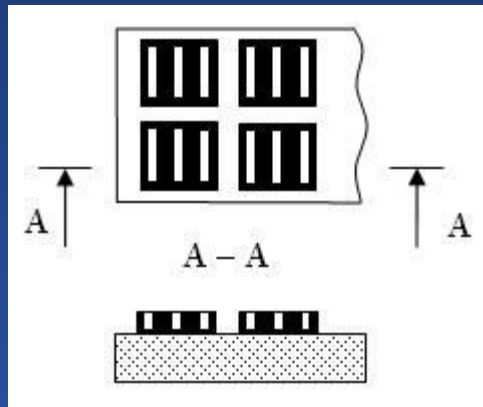


Локальное травление кремния: а – изотропное; б – анизотропное

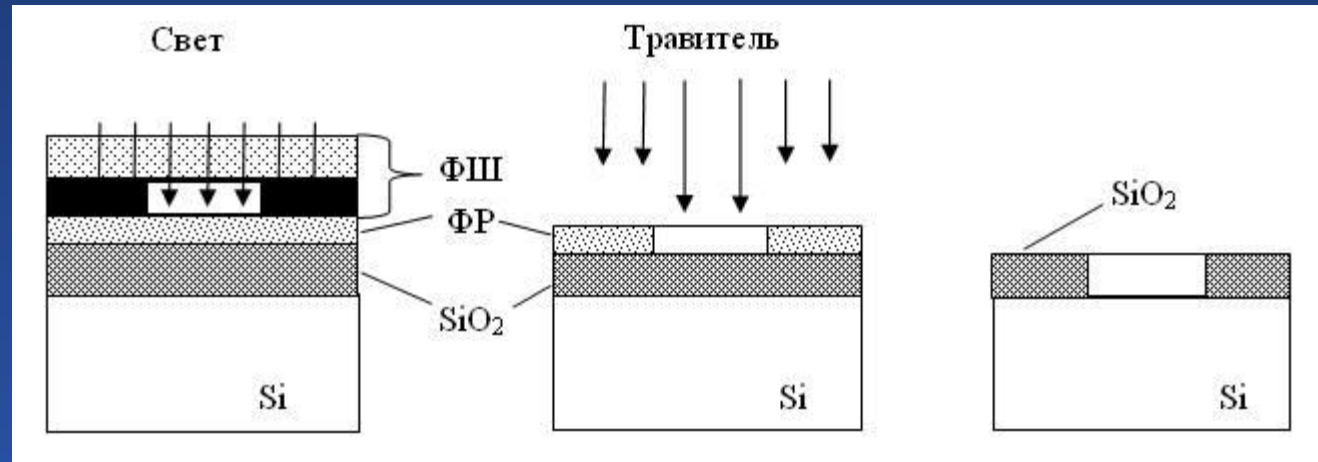


Техника масок

Фотолитография



Фрагмент
фотошаблона



Этапы процесса фотолитографии:

- а** – экспозиция фоторезиста через фотошаблон; **б** – локальное травление двуоксида кремния через фоторезистную маску; **в** – окисная маска после удаления фоторезиста



Нанесение тонких пленок

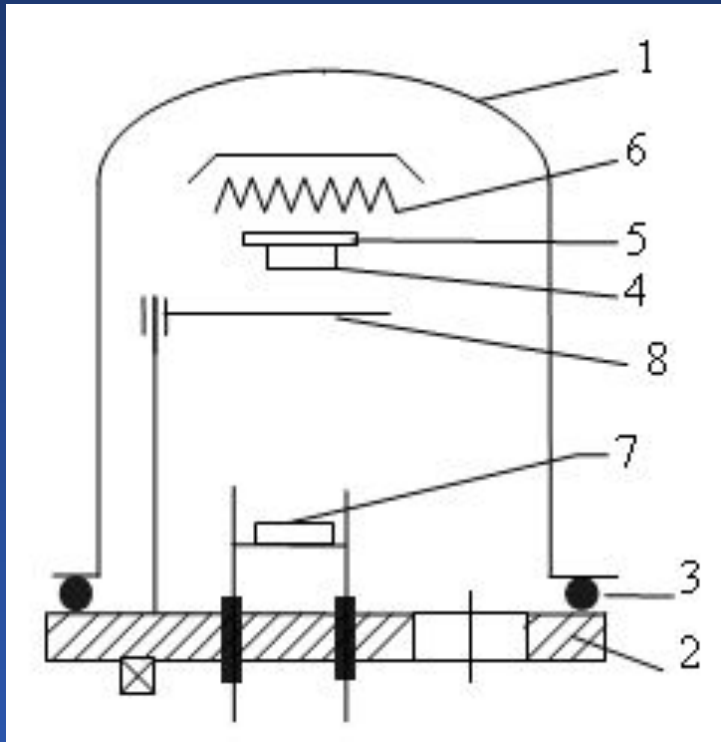


Схема установки
термического напыления

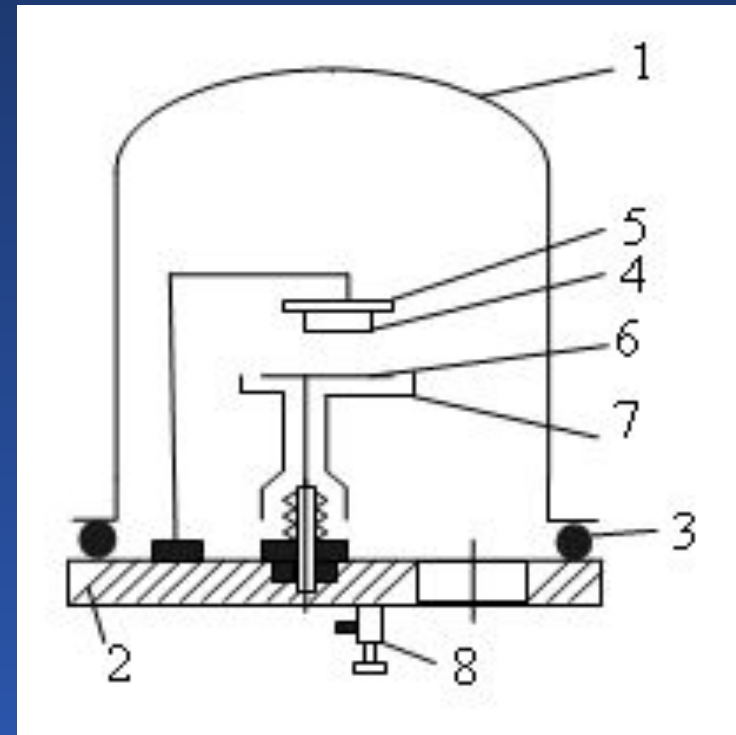


Схема установки
катодного напыления



Нанесение тонких пленок

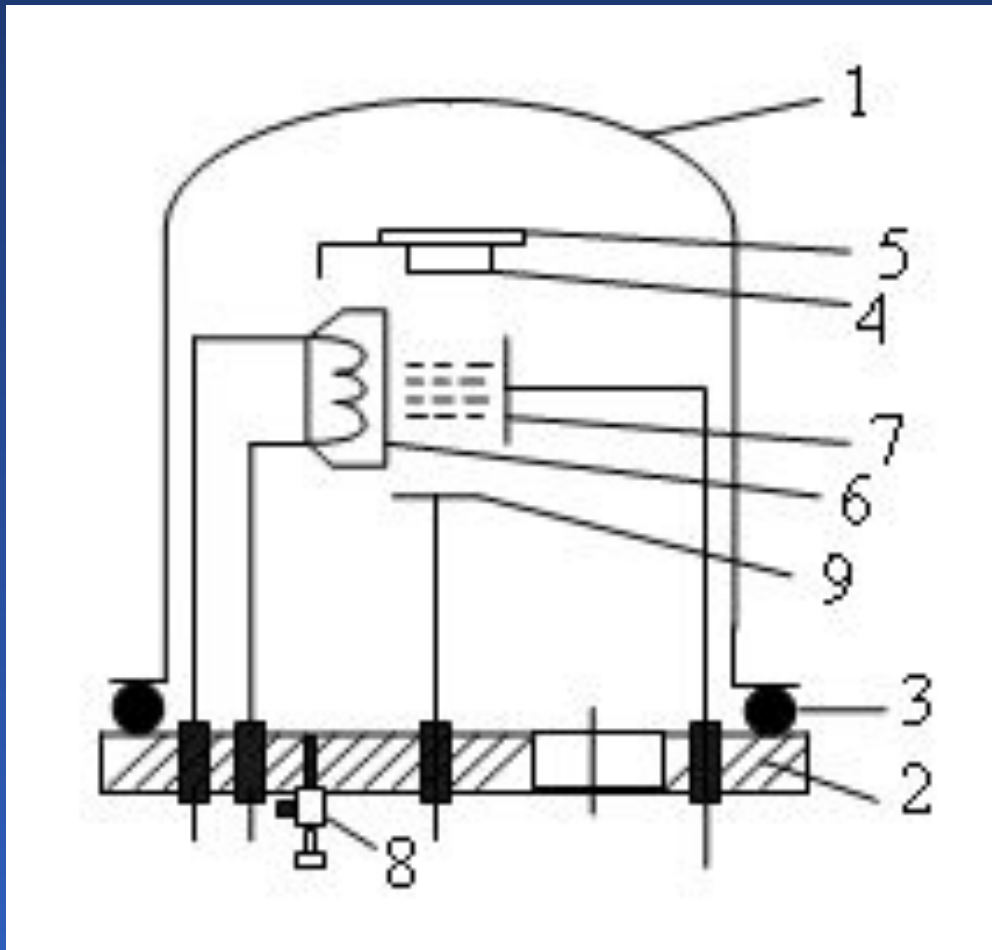
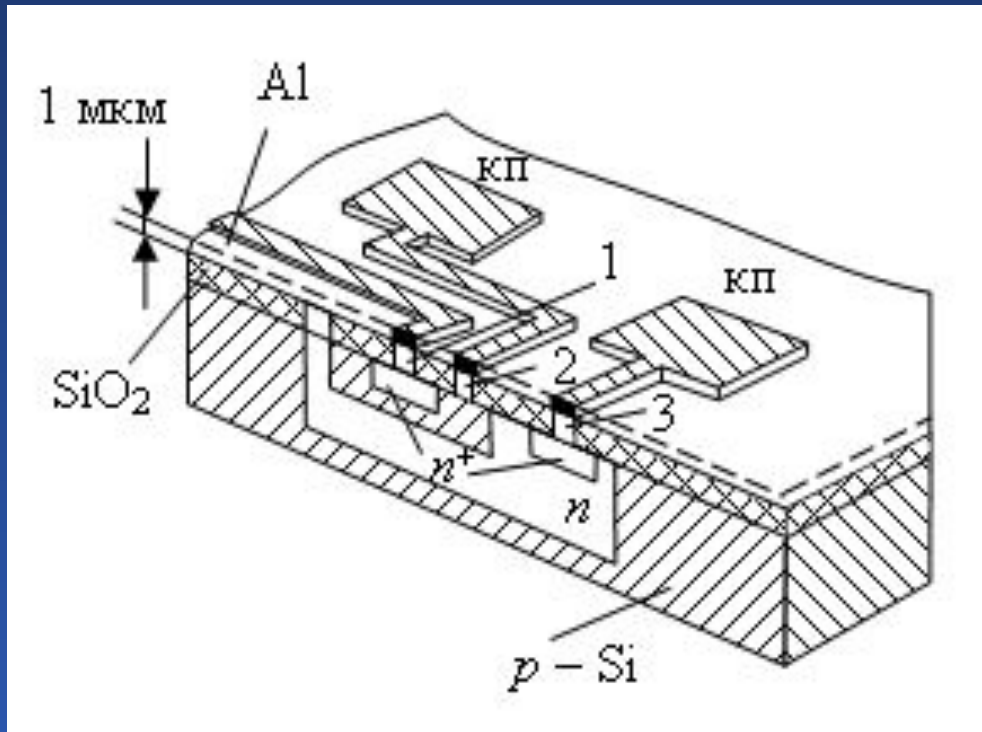


Схема установки ионно-плазменного напыления



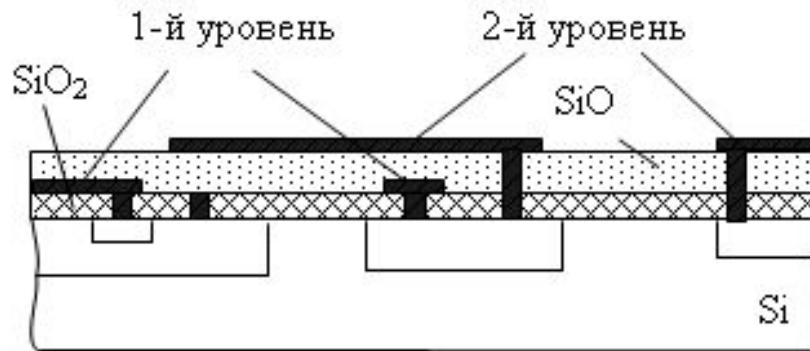
Металлизация



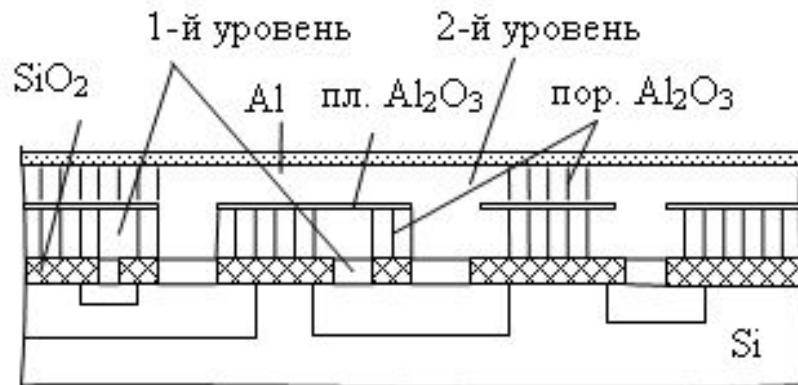
Получение металлической разводки методом фотолитографии



Металлизация



а)



б)

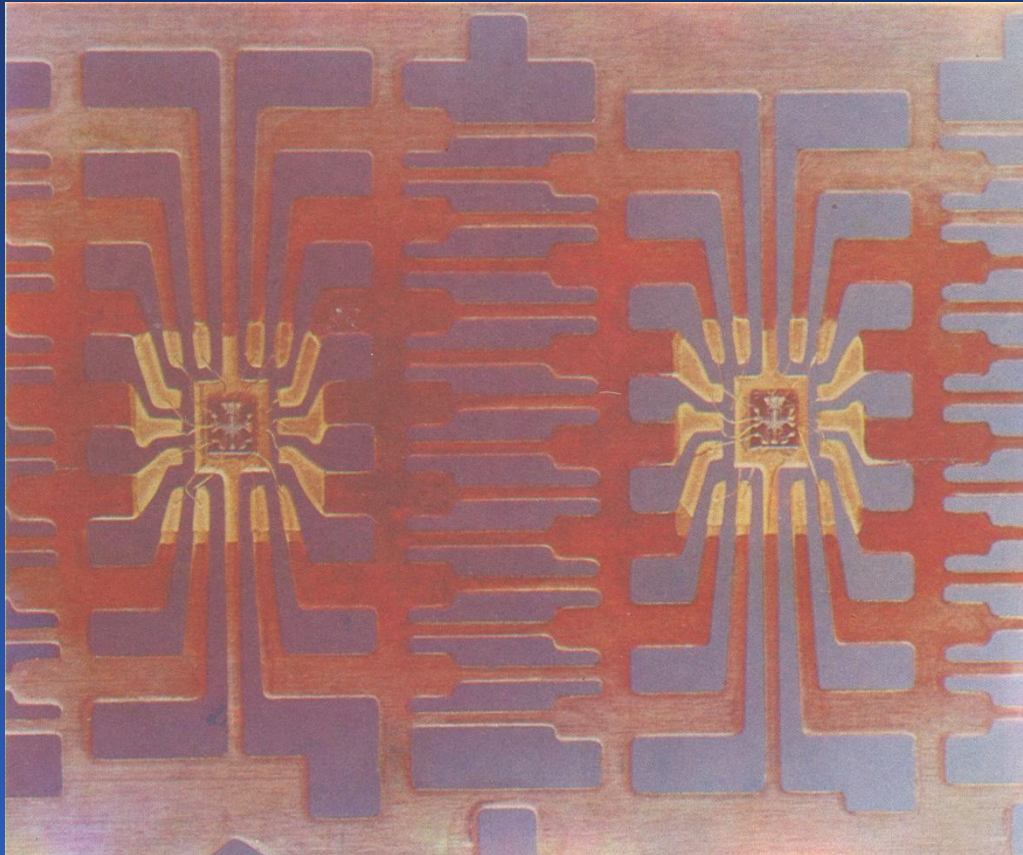
Многослойная металлическая разводка



Сборочные операции



Сборочные операции



Монтаж кристалла
на ножке корпуса



Тема 8

Основные типы электривакуумных приборов, их принципы работы и применение

Лекция 24



Лекция 25



Выбор темы

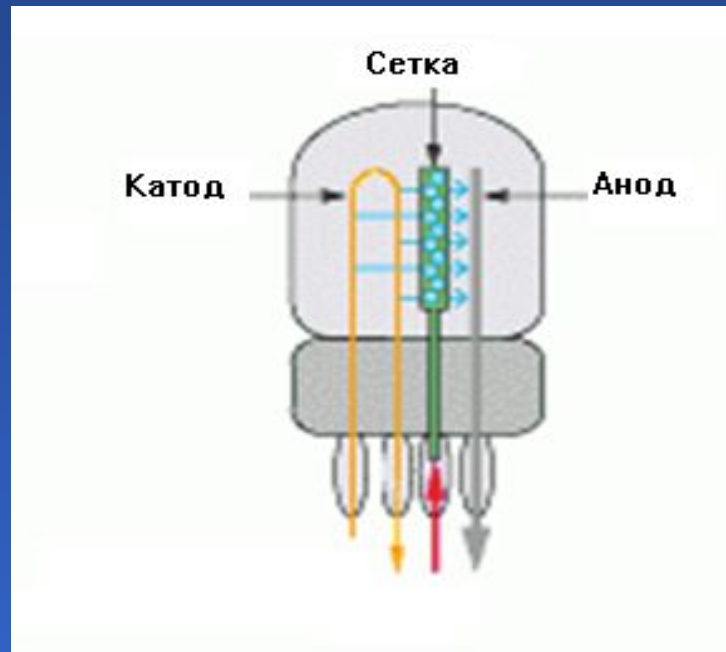
Тема 8

Основные типы электровакуумных приборов, их принципы работы и применение

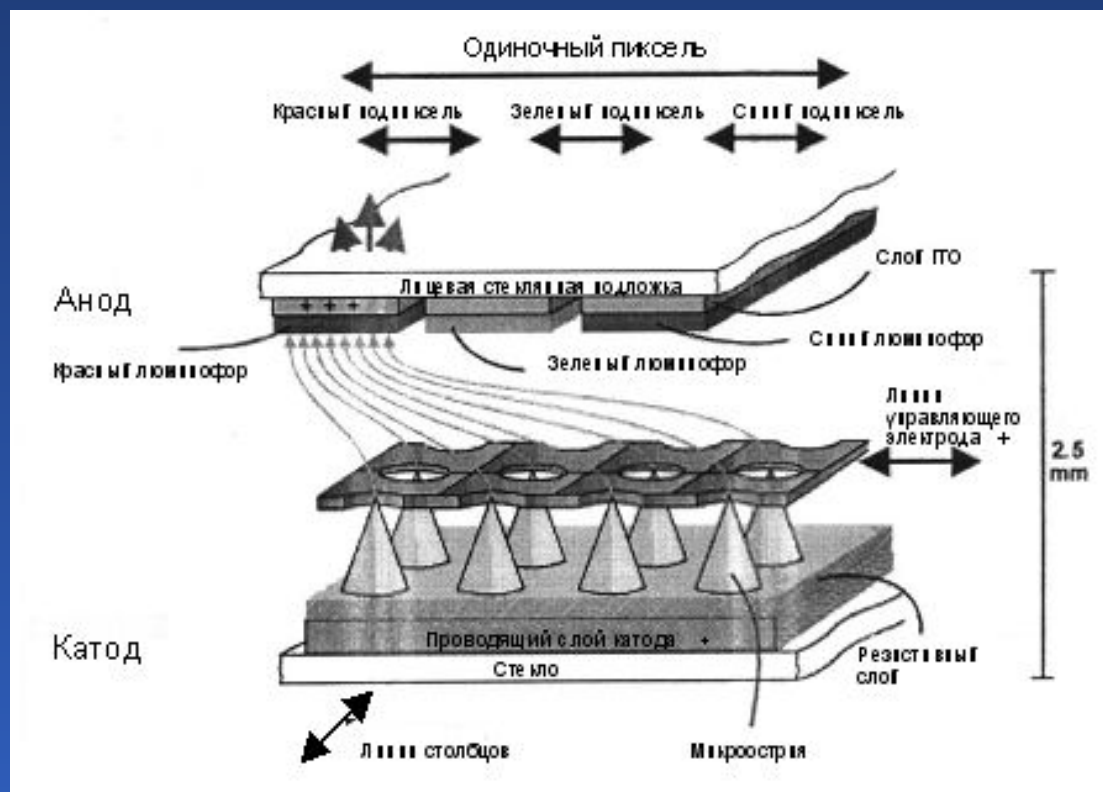
- 8.1. Электровакуумные приборы – общие сведения, классификация
- 8.2. Физические основы работы электровакуумных приборов
- 8.3. Приборы на основе термоэлектронной эмиссии
- 8.4. Приборы на основе автоэлектронной эмиссии

Электровакуумные приборы: общие сведения, классификация

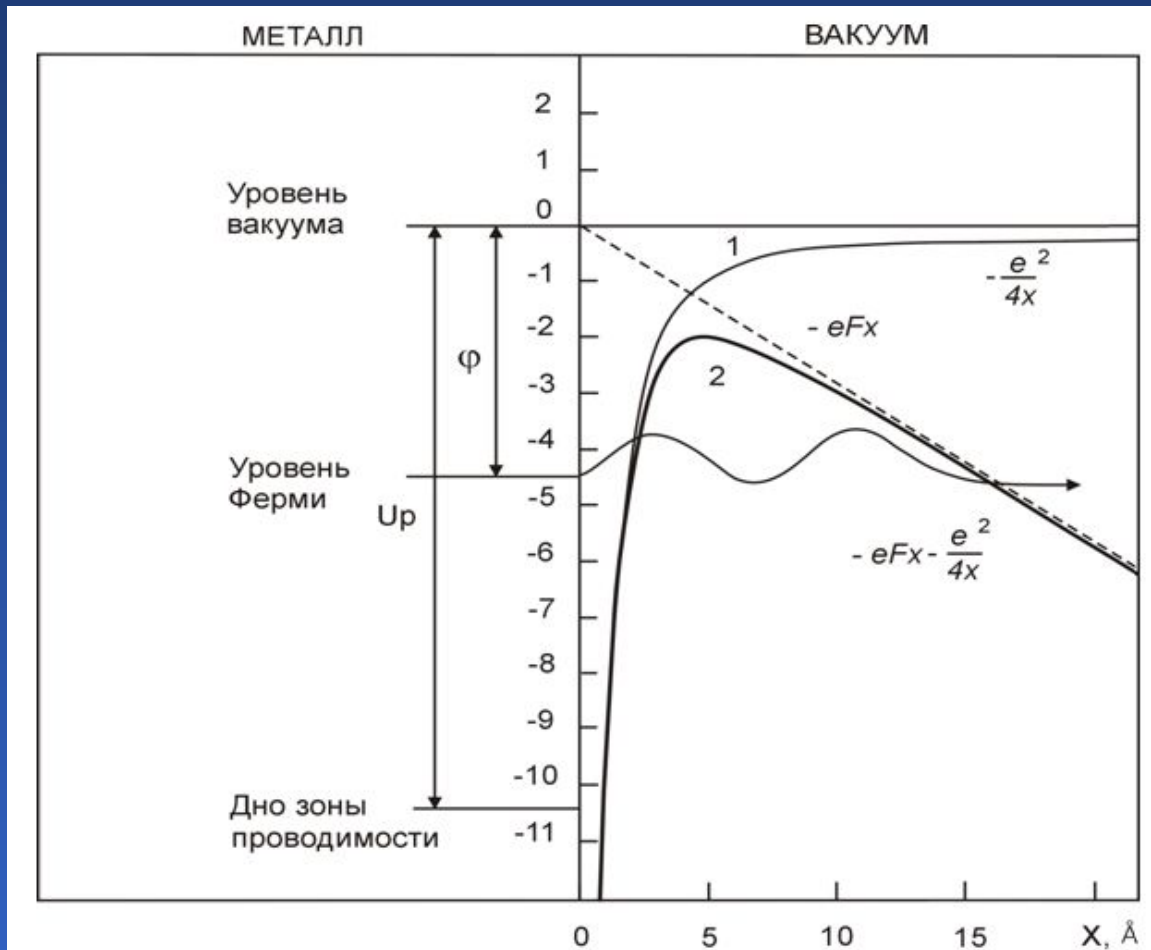
Электровакуумными приборами (ЭВП) называют приборы, в которых рабочее пространство, изолированное газонепроницаемой оболочкой, имеет высокую степень разрежения или заполнено специальной средой (пары или газы) и действие которых основано на использовании электрических явлений в вакууме или газе.



Электровакuumные приборы: общие сведения, классификация

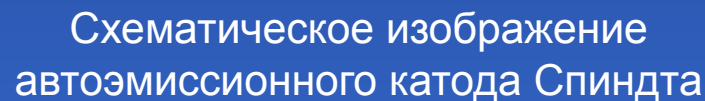


Физические основы работы электровакуумных приборов

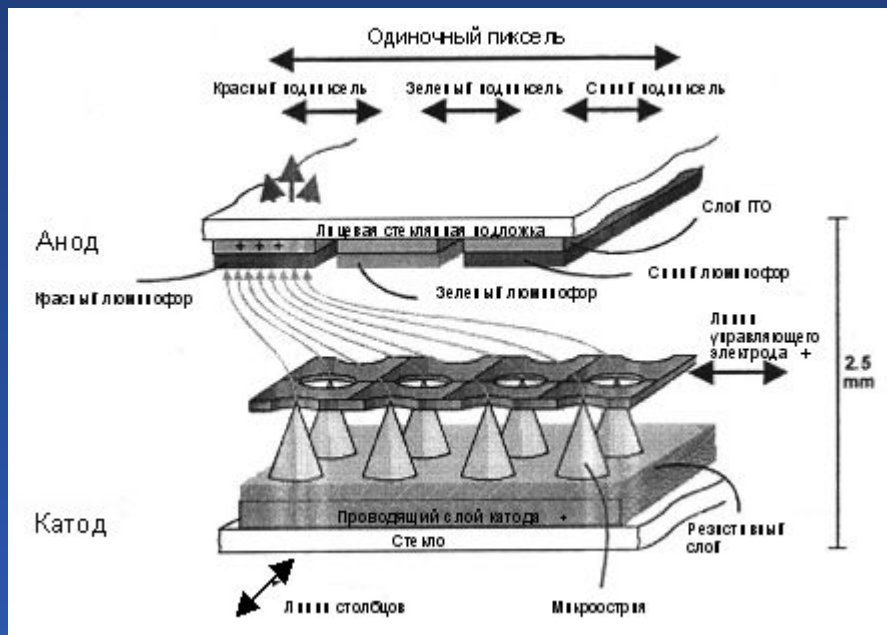


Потенциальный барьер на границе металл–вакуум:
1 – потенциал сил зеркального изображения,
2 – потенциальный барьер в сильном электрическом поле.
Уровень Ферми – энергия, соответствующая максимальной энергии электрона в металле при температуре абсолютного нуля

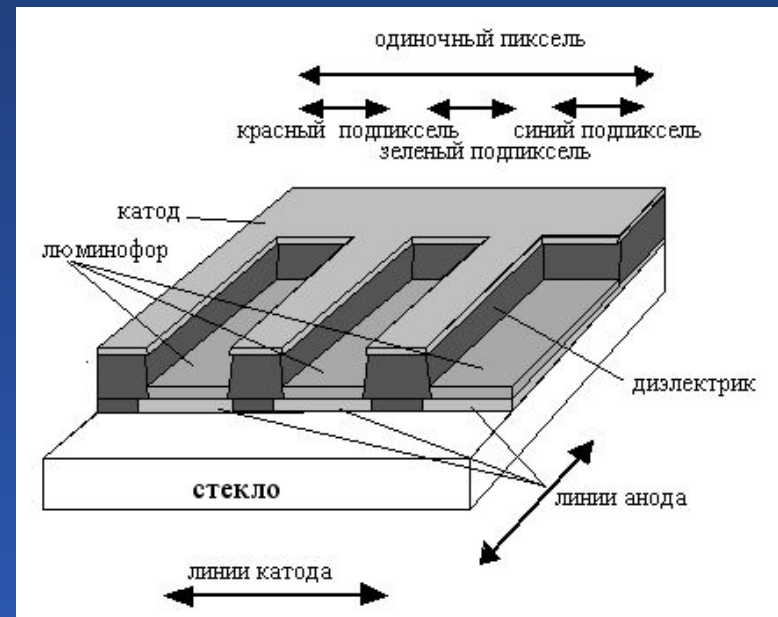




Приборы на основе автоэлектронной эмиссии



Конструкция
полевого эмиссионного дисплея
с катодами острейного типа



Конструкция
полевого эмиссионного дисплея
с катодами планарного типа



Тема 9

Перспективы развития электроники. Нанoeлектроника – исторический этап развития электроники

Лекция 26



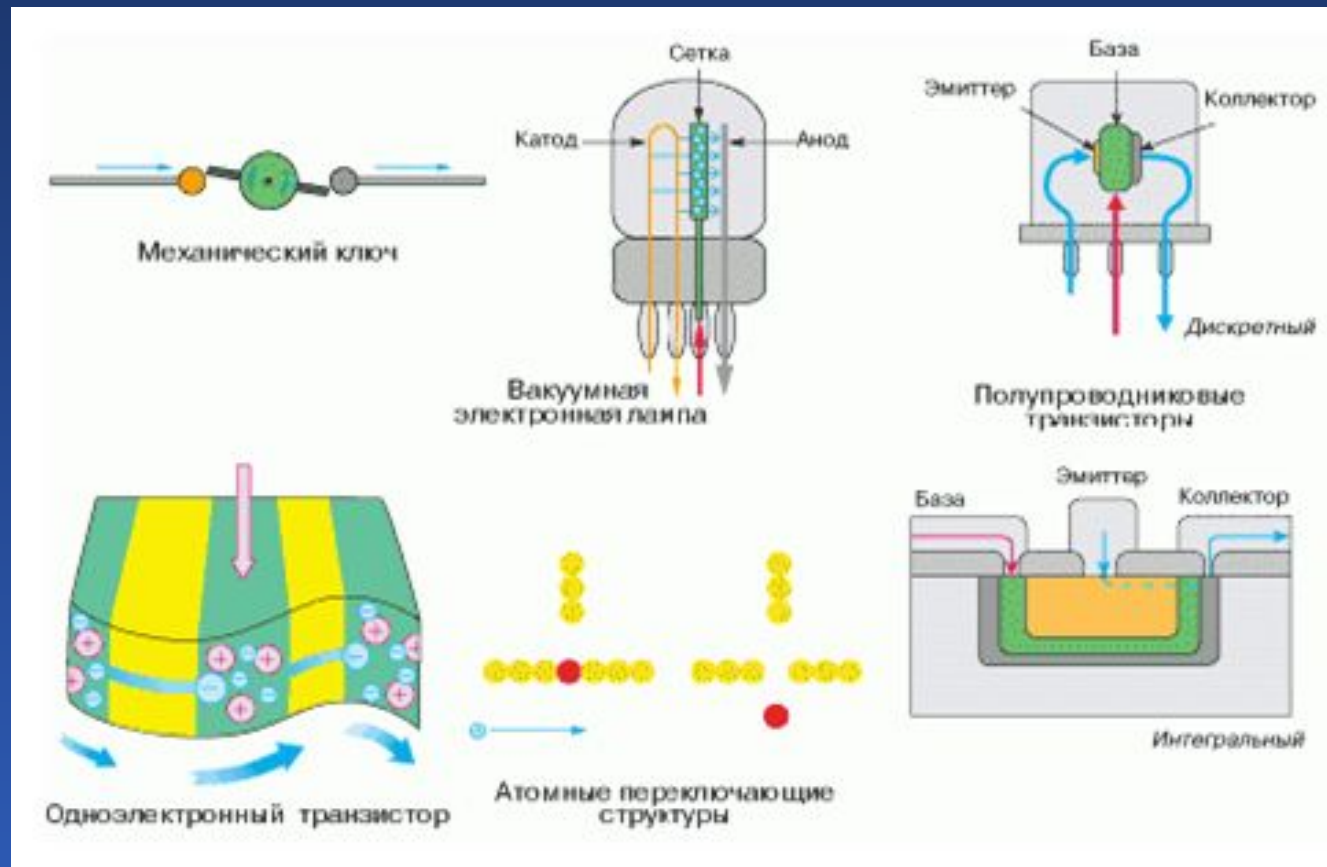
Выбор темы

Тема 9

Перспективы развития электроники. Нанoeлектроника – исторический этап развития электроники

- 9.1. Перспективы развития электроники
- 9.2. Квантовые основы нанoeлектроники
- 9.3. Технологические особенности формирования наноструктур и элементы нанoeлектроники

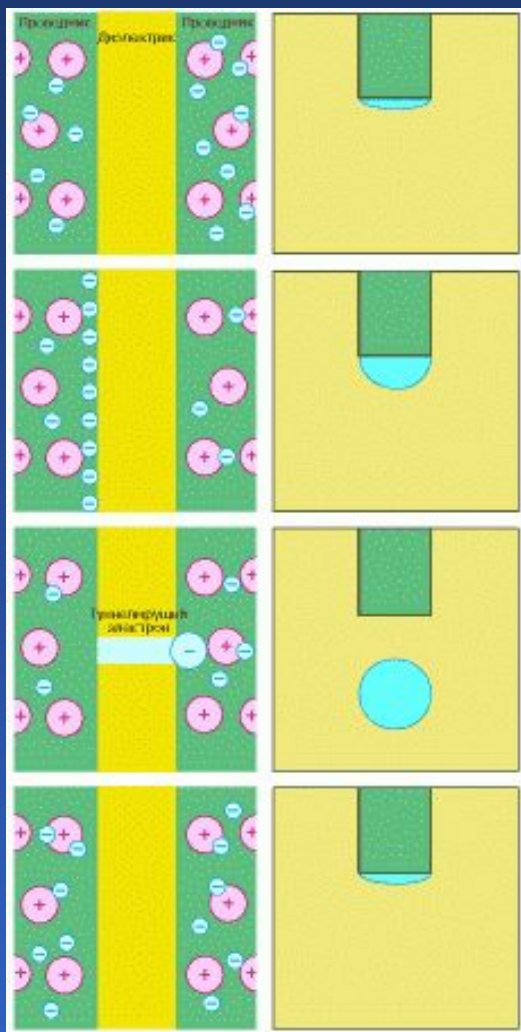
Перспективы развития электроники



Эволюция элементной базы электроники



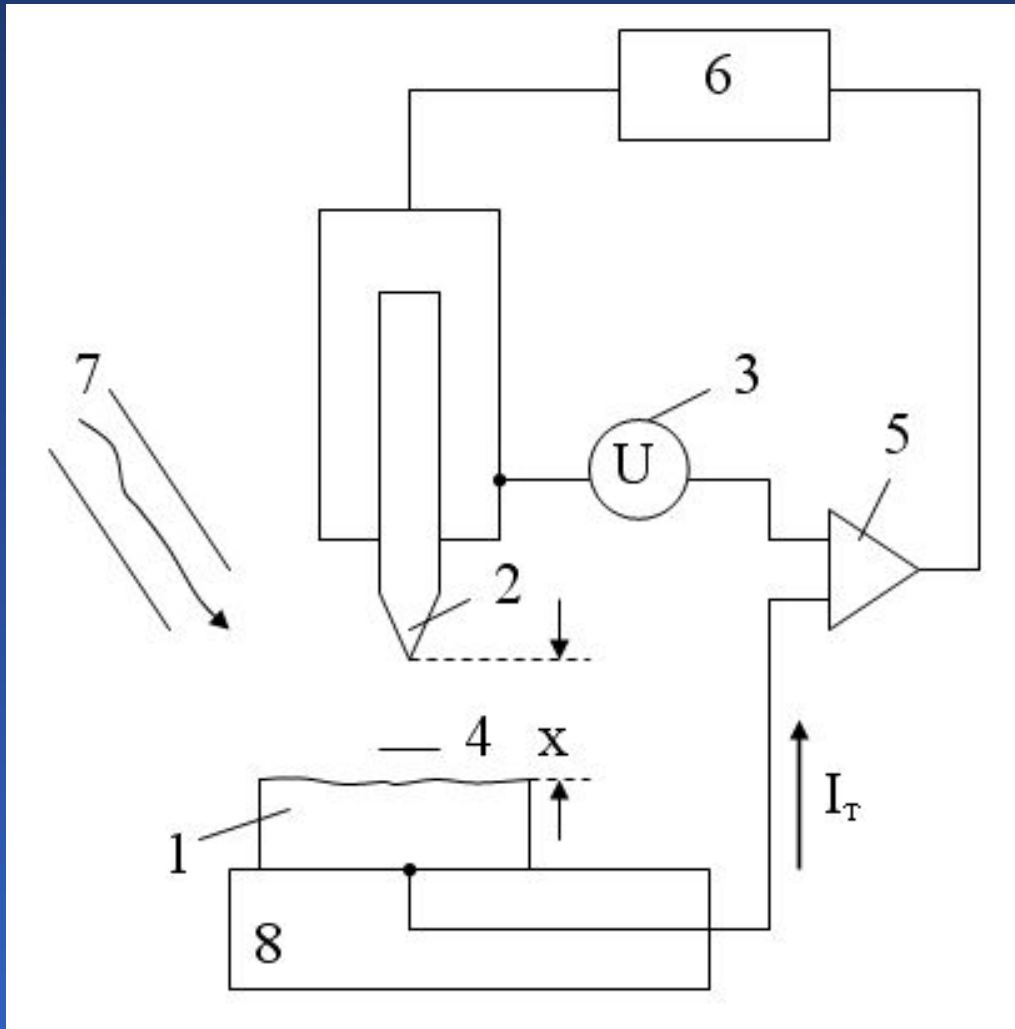
Квантовые основы наноэлектроники



Одноэлектронное туннелирование
в условиях кулоновской блокады



Технологические особенности формирования наноструктур



Нанотехнологическая установка:
а – схема нанотехнологической установки на основе туннельного микроскопа; 1 – подложка, 2 – зонд, 3 – источник питания, 4 – зазор между зондом и подложкой, 5 – усилитель туннельного тока, 6 – динамический регулятор зазора на основе пьезоманипуляторов, 7 – приспособление для напуска газообразных и жидких реактивов, 8 – система прецизионного позиционирования подложки



Применение СТМ для формирования наноразмерных структур

