

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**
(Н И У « Б е л Г У »)

Институт инженерных технологий и естественных наук

Кафедра информационно-телекоммуникационных систем и технологий

Курс лекций по электронике

Учебное пособие для направления подготовки:

**11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи и
10.05.04 Информационно-аналитические системы безопасности**

Авторы – составители: Пеньков Е.П., старший преподаватель кафедры ИТСиТ;
Романькова Т.С., ассистент кафедры ИТСиТ;
Трубицына Д.И., ассистент кафедры ИТСиТ.

Рецензенты: Рубанов В.Г., заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук,
профессор, директор института информационных технологий и систем
управления БГТУ и. В.Г. Шухова
Белов С. П., доктор технических наук, профессор кафедры информационно-
телекоммуникационных систем и технологий
Буханцов А. Д., кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-
телекоммуникационных систем и технологий



Белгород 2016 г.

Лекция № 1. Пассивные элементы электронных устройств
*(резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, трансформаторы
электронной аппаратуры)*

1. Резисторы (сопротивления) — это наиболее распространённые компоненты электронной аппаратуры, с помощью которых осуществляется регулирование и распределение электрической энергии между цепями и элементами схем.

Условное обозначение на схемах: \boxed{R} .

В зависимости от назначения резисторы подразделяются на две группы: 1) *общего назначения* (диапазоны номиналов 10 Ом – 10 Мом, номинальные мощности рассеивания 0,062 – 100Вт); 2) *специального назначения*, которые подразделяются на: а) высокоомные резисторы (от 10^6 до 10^{12} Ом), рабочее напряжение единицы – десятки КВольт); б) высоковольтные (сопротивления до 10^{11} Ом, рабочее напряжение единицы – десятки КВольт); в) высокочастотные (имеют малые значения собственной ёмкости и индуктивности); г) прецизионные (повышенная точность – допуск 0,001... 1%, номинальные мощности рассеивания до 2-х Вт).

Переменные резисторы подразделяются на подстроечные и регулируемые.

Подстроечные резисторы рассчитаны на проведение подстройки электрических режимов, а *регулируемые* – для проведения многократных регулировок.

В зависимости от характера изменения сопротивлений при перемещении подвижной части переменные резисторы делятся на резисторы с *линейной А* и *нелинейной* функциональными характеристиками: *логарифмической Б*; *обратнологарифмической В*, характеристиками типа *И*, *Е* (рис.1).

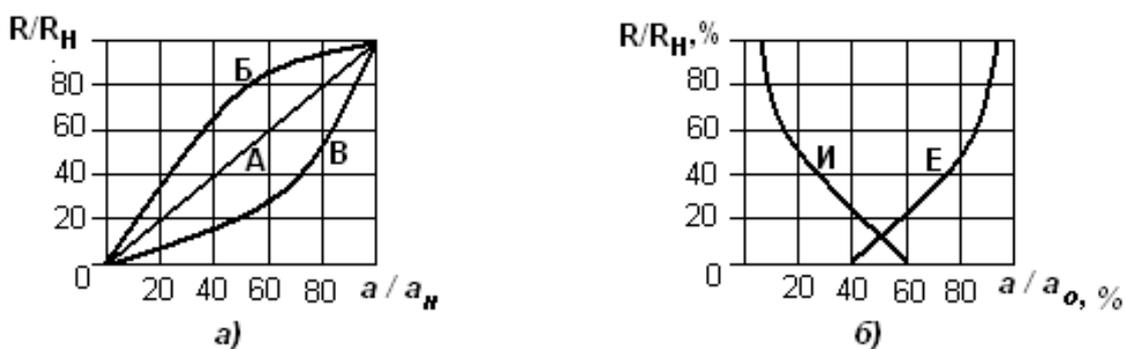


Рисунок 1 Функциональные характеристики переменных резисторов:
а) -- линейная (А); логарифмическая (Б); антилогарифмическая (В);
б) – характеристики типа И, Е; a и a_H – полный текущий углы поворотов подвижной части; R_H и R – номинальное и текущее значение сопротивления

В зависимости от материала, используемого для создания проводящего элемента, резисторы подразделяют на проволочные, непроволочные, метал-

лофольговые. У проволочных и металлофольговых резисторов в качестве материала проводящего элемента используют манганин и нихром.

Непроволочные резисторы можно подразделить на следующие группы: а) углеродистые и бороуглеродистые; б) металлодиэлектрические, металлоплёночные, или металлооксидные; в) композитные; г) полупроводниковые.

Система условных обозначений предусматривает как полные, так и сокращённые условные обозначения. Полное обозначение обычно используется в технической документации.

Сокращённое условное обозначение состоит трёх элементов: *первый* – буква или сочетание букв, обозначающих подкласс резистора: Р – постоянные резисторы; РП – резисторы переменные; НР – наборы резисторов; *второй* – цифра 1 для непроволочных или 2 для проволочных резисторов; *третий* – цифра, обозначающая регистрационный номер каждого типа. Например, резисторы постоянные непроволочные с номером 26 имеют обозначение Р1 – 26.

Маркировка резисторов содержит полное или кодированное обозначение номинальных сопротивлений и их допускаемых отклонений.

Полное обозначение состоит из значения номинального сопротивления и обозначения единицы измерения [Ом; КОм (килоом) = 10^3 Ом; Мом (мегаом) = 10^6 Ом; ГОм (гигаом) = 10^9 Ом; Том (тераом) = 10^{12} Ом] Например: 25 Ом; 100 КОм; 4,7 Мом; 2,5 ГОм; 1 Том.

Кодированное обозначение состоит из трёх или четырёх знаков, включающих две или три цифры и букву. Буква обозначает множитель, на который умножается цифровое обозначение: $R \rightarrow \times 1$, $K \rightarrow \times 10^3$, $M \rightarrow \times 10^6$, $G \rightarrow \times 10^9$, $T \rightarrow \times 10^{12}$. Иногда вместо R применяют E .

Например: 0,1 Ом \rightarrow R1(E1); 100 Ом \rightarrow 100R (100E) или K10; 100 КОм \rightarrow 100K или M10; 36,5МОм \rightarrow 36M5; 100МОм \rightarrow 100M или G10(G10); 100ГОм \rightarrow 100G (100Г) или T10; 2 ТОм \rightarrow 2ТО.

Основные параметры резисторов

1. Номинальные сопротивления.
2. Допускаемые отклонения сопротивлений от номинальных величин.
3. Номинальные мощности рассеивания (максимальные мощности, рассеиваемые резистором без изменения его номинального значения).
4. Предельное рабочее напряжение (напряжение, которое может быть приложено к резистору без нарушения его работоспособности).
5. Температурный коэффициент сопротивления (характеризует изменение сопротивления резистора при изменении температуры на 1°C).

$$T K = \frac{\Delta R}{R_H \Delta t} \cdot 100\%$$

где R_H – сопротивление резистора при нормальной температуре; Δt – предельная разность между нормальной и действующей температурой; ΔR – изменение номинала сопротивления при изменении температуры.

6. Уровень собственных шумов D (мкВ/В).

7. Максимальная температура окружающей среды для номинальной мощности рассеивания.

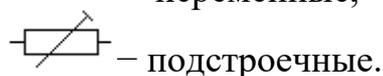
8. Коэффициент напряжения $K_U = \frac{U_{д.е.й.1^c} \cdot 10^{\%}}{U_{н.о.м.и.н}}$

9. Влагоустойчивость и термостойкость.

Промышленность выпускает резисторы общего назначения (МЛТ, ОМЛТ, С2-6, С2-11, С2-23, С2-33 и др.), прецизионные (С2-1, С2-13, С2-14, С2-31 и т. д.) высокомегаомные (КВМ, КЛМ, С3-13, С3-14 и т. п.), высоковольтные (КЭВ, С3-9, С3-12, С3-14 и др.), высокочастотные (С2-10, С2-34, С3-8 и др.).

Номенклатура подстроечных и регулировочных резисторов также достаточно велика (СП5-1, СП5-6, РП-25, РП-80, СП5-21, СП5-30, СП5-54, СПО, СПЗ-10 и др.).

Условное обозначение в схемах:



В практике кроме линейных используются термозависимые (терморезисторы) и нелинейные (варисторы) резисторы.

Терморезисторы выполняются или из металла, сопротивление которого линейно изменяется при изменении температуры (медь, платина), или на основе полупроводников (п/п). Для этой группы резисторов основной характеристикой является температурная. В полупроводниковых терморезисторах она достаточно точно описывается уравнением

$$R(T) = R_1(T_0) \cdot e^{\frac{B}{T} - \frac{B}{T_0}},$$

где $R_1(T_0)$ – номинальное значение сопротивления при температуре T_0 (обычно $T_0 = 293^{\circ}K$); T – температура окружающей среды; B – коэффициент, характеризующий свойства материала терморезистора; e – основание натурального логарифма.

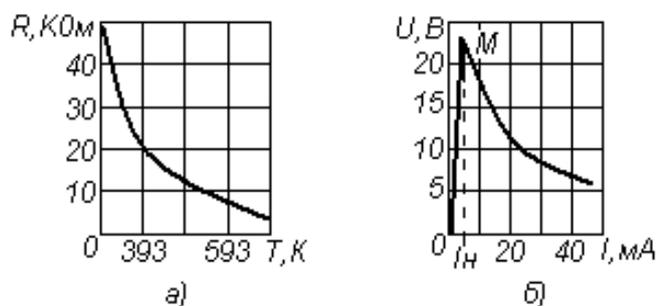


Рисунок 2 – Характеристики терморезисторов
а) температурная; б) вольт – амперная (ВАХ)

При прохождении электрического тока в терморезисторе выделяется тепло и он нагревается. Это приводит к изменению сопротивления (рис.2,а).

Вследствие нелинейной температурной характеристики ВАХ будет также нелинейной. Форма ВАХ существенно зависит от температуры окружающей среды T_0 и условий теплообмена. При малых токах ВАХ практически линейна (см. рис.2,б), а при больших – существенно нелинейна.

В некоторых случаях сопротивление терморезистора меняют за счёт его нагрева от специального подогревателя, электрически изолированного от терморезистора. Такие терморезисторы называются *подогревными* или *терморезисторами с косвенным подогревом*.

Основное применение таких терморезисторов – параметрическая термостабилизация электронных цепей, компенсация температурных погрешностей, измерение температуры, регулирование в электрических цепях.

Терморезисторы, имеющие положительный температурный коэффициент сопротивления (ТКС) называются *позисторами*. Их обычно изготавливают из полупроводниковых твёрдых растворов на основе титана бария.

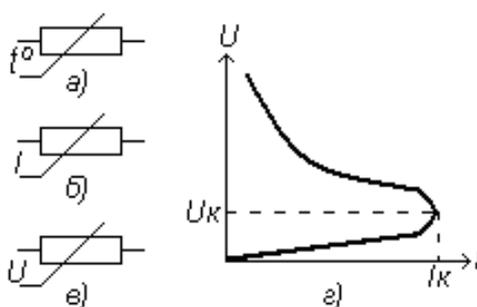


Рисунок 3 – Обозначения резисторов и ВАХ позистора (г):
 а) терморезистор; б) позистор; в) варистор

ВАХ позистора имеет вид, показанный на рис 3,г. Максимальное значение тока на ней I_K , которое соответствует напряжению U_K , называют *пороговым* или *током опрокидывания*. При достижении током значения I_K позистор разогревается, его сопротивление увеличивается, а ток уменьшается. При этом падение напряжения будет больше, чем U_K .

Изменение сопротивления позистора связано с его температурой, которая не может изменяться мгновенно, поэтому динамические свойства позистора характеризуются временем опрокидывания. Под ним понимают промежуток времени, в течение которого начальный ток уменьшится в два раза. Время опрокидывания, оцениваемое секундами, зависит от начального тока и уменьшается при его увеличении.

Позисторы используются для токовой защиты электрических цепей различного назначения, например, для защиты блока питания.

Промышленность выпускает терморезисторы типов СТ1-21, СТ3-21, СТ1-27, СТ3-27, СТ3-31 и др., причём терморезисторы с косвенным подогревом типа СТ1-31 предназначены для использования в качестве бесконтактных управляемых сопротивлений в цепях переменного и постоянного токов.

Нелинейные резисторы, сопротивление которых зависит от напряжённости электрического поля, называют *варисторами*. Основой для их изгото-

товления обычно служит карбид кремния. ВАХ варистора приведены на рис.4.

Характеристика 2 имеет участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Варисторы с такими ВАХ называют *негисторами*.

В технических условиях на варисторы обычно приводятся номинальное напряжение $U_{НОМ}$ (напряжение, при повышении которого на 20% не наблюдается заметного разогрева), ток $I_{НОМ}$, протекающий при $U_{НОМ}$, коэффициент нелинейности β , равный отношению статического сопротивления $R = U_{НОМ} / I_{НОМ}$ к дифференциальному $r_{ДИФ} = \frac{\partial U_{НОМ}}{\partial I_{НОМ}} \beta = R / r_{ДИФ}$.

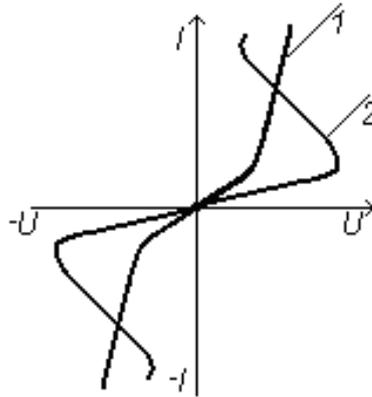


Рисунок 4 – ВАХ варисторов

1—варистор без участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением;
2 -- негистор

Основные параметры позисторов

1. Номинальное сопротивление при температуре 25⁰С (Омы – десятки Ом).
2. Допуск на номинальное сопротивление, % (обычно $\pm 30\%$).
3. Температура переключения (порядка 120⁰).
4. Ток опрокидывания $I_{ОПР}$, равный при температуре 25⁰С пороговому току $I_{ПОР}$.
5. Предельное значение тока опрокидывания, при котором начинается ограничение тока при любой температуре из рабочего диапазона температур окружающей среды, заданного для конкретного позистора.
6. Время опрокидывания (время уменьшения начального тока в два раза).
7. Максимальное рабочее напряжение.
8. Остаточный ток $I_{ОСТ}$ при максимальном напряжении.
9. Кратность изменения сопротивления ($\geq 10^3$).
10. Предельное значение номинального тока $I_{НОМ}$, при котором гарантируется устойчивая работа (без переключения) во всём диапазоне температур окружающей среды.
11. Температурный коэффициент сопротивления (14 – 17% / ⁰С).
12. Максимальная потребляемая мощность.
13. Температурный коэффициент рассеивания мощности (мВт / ⁰С).
14. Нароботка на отказ (в часах).

2. Конденсаторы (ёмкости) – это устройства способные накапливать и длительное время удерживать электрический заряд. Конструктивно они представляют собой два проводника в виде пластин, разделённые диэлектриком. Если к проводникам подсоединить источник постоянного тока, то на пластинах накапливаются противоположные электрические заряды $\pm q$. Величина заряда определяется формулой $q = C \cdot u$, где C – коэффициент пропорциональности, называемый ёмкостью; u – величина приложенного напряжения. Ёмкость в системе единиц СИ измеряется в фарадах ($1\text{Ф} = 1\text{А}\cdot\text{секунда}/\text{Вольт} = 1\text{ секунда}/\text{Ом}$)

С энергетической точки зрения конденсатор характеризуется преобразованием электрической энергии в энергию электрического поля при нарастании напряжения U_c и обратным преобразованием – энергии электрического поля в энергию электрического тока. Энергия заряженного конденсатора определяется по формуле $W_{\text{э}} = \frac{C \cdot U^2}{2}$.

Сопротивление конденсатора переменному току определяется по формуле

$$X_C = \frac{1}{\omega C}, \text{ где } \omega - \text{ круговая частота переменного тока.}$$

Конденсаторы, как и резисторы, являются широко распространёнными элементами электронных схем. Различают конденсаторы постоянной ёмкости, переменной ёмкости и подстроечные конденсаторы.

По типу диэлектрика конденсаторы постоянной ёмкости разделяют на пять групп: 1) с газообразным диэлектриком (воздушные, газонаполненные, вакуумные); 2) с жидким диэлектриком; 3) с твёрдым неорганическим диэлектриком (керамические, стеклокерамические, стеклоэмалевые, стеклоплёночные, из неорганических плёнок, слюдяные); 4) с твёрдым органическим диэлектриком (бумажные, металобумажные, фторопластовые, полиэтиленфталатные); 5) с оксидным диэлектриком (электролитические, оксидно-полупроводниковые, оксидно-металлические), выполняемые с использованием алюминия, титана, ниобия, сплавов тантала и ниобия.

У конденсаторов различают номинальное $C_{\text{НОМ}}$ и фактическое $C_{\text{Ф}}$ значение ёмкости. Номинальная ёмкость указывается на его маркировке в сопроводительной документации; фактическая – это значение ёмкости, измеренное при данной температуре и определённой частоте.

Допускаемое отклонение ёмкости задаётся в процентах:

$$\Delta C_{\text{Н}} = \frac{C_{\text{Ф}} - C_{\text{Н}}}{C_{\text{Н}}} \cdot 100\%$$

Изменения значения ёмкости в зависимости от температуры характеризуется температурным коэффициентом ёмкости (ТКЕ), который обычно обозначается

$$\alpha_C = T \cdot K = \frac{1}{C} \cdot \frac{dC}{dT}$$

Этот коэффициент показывает изменение ёмкости при изменении на 1°K температуры окружающей среды. В зависимости от материала диэлектрика ТКЕ может быть положительным, нулевым или отрицательным.

Его значение, определённое на конкретной частоте, указывается в маркировке конденсатора с помощью букв и цифр или цветного кода. По допускаемому отклонению ТКЕ от нормированного значения конденсаторы подразделяются на два класса: А и Б. У класса А отклонение в $2 \cdot \dots \cdot 2,5$ раза меньше, чем у класса Б. При необходимости получить определённое значение ТКЕ применяют последовательное, параллельное и смешанное соединение конденсаторов с разными номиналами и разными величинами ТКЕ.

Подбирая номиналы и величины ТКЕ, а также комбинируя последовательное и параллельное соединения, можно получить нулевой ТКЕ, что применяется при создании измерительных конденсаторов. Упрощённые эквивалентные схемы конденсаторов содержат ёмкость $C(f)$, сопротивление $R(f)$ и индуктивность $L_{ЭК}$. Используется последовательное и последовательно-параллельное включение этих элементов (рис.5, а, б). Индуктивность $L_{ЭК}$ образована элементами конструкции конденсатора. Сопротивление $R(f)$ характеризует потери энергии и отражает тот факт, что напряжение и ток реального конденсатора сдвинуты по фазе на угол $\varphi < 90^{\circ}$ в диапазоне частот, где индуктивностью $L_{ЭК}$ можно пренебречь.

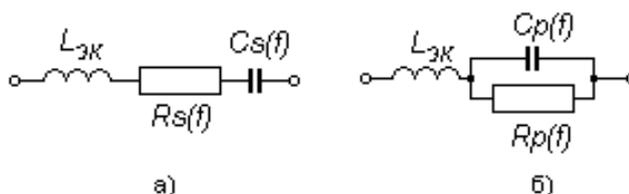


Рисунок 5 – Эквивалентные схемы конденсатора

а) с последовательным включением элементов;

б) с последовательно-параллельным включением элементов.

При использовании эквивалентной схемы (рис.5,а) сопротивление конденсатора переменному току $Z(\omega) = \sqrt{R_s^2 + \left(\omega L_{ЭК} - \frac{1}{\omega C_s} \right)^2}$, где ω – круговая (угловая) частота. Из этого уравнения видно, что на частотах выше резонансной частоты $f_0 = \omega_0 / 2\pi$ конденсатор имеет индуктивный характер сопротивления. По этому в электронных цепях конденсаторы стараются использовать на частотах, где индуктивность $L_{ЭК}$ практически не влияет на свойства конденсатора. Так, у воздушных конденсаторов максимальные рабочие частоты 2,5 – 3,6 МГц; у слюдяных – от 150 до 200 МГц; у бумажных – от 50 до 80 МГц; у керамических дисковых – от 200 до 2000 МГц; у керамических трубчатых от 5 до 200 МГц.

Следует обратить внимание на то, что значения конденсатора и сопротивления потерь, измеренные по последовательной и параллельной схемам

включения этих элементов, различаются между собой. Отличия между значениями тем больше, чем больше тангенс угла потерь $tg \delta$.

Тангенс угла потерь характеризует электромагнитные потери в конденсаторе и определяется как отношение его активной мощности P к реактивной Q мощности: $tg \delta = P / Q$.

В отличие от ёмкости тангенс угла потерь не зависит от его схемы, по которой проводились измерения: $tg \delta = \omega C_s R_s = \frac{1}{\omega C_p R_p}$.

Значения $tg \delta$ зависят от материала диэлектрика и могут меняться с изменением частоты и с течением времени, а также зависят от температуры и напряжённости электрического поля.

Различают полные и сокращённые условные обозначения конденсатора. Полное обозначение применяют в технической документации, а сокращённое – в принципиальных схемах. Сокращённое обозначение состоит из трёх элементов. *Первый* – буквы, характеризующие подкласс конденсаторов (К – постоянной ёмкости; КТ – подстроечные; КП – переменной ёмкости; КС – конденсаторные сборки); *второй* – цифры, характеризующие тип диэлектрика и назначение конденсатора, т. е. его группу; *третий* – порядковый номер разработки, например К10 – 25.

Для обозначения номинальной ёмкости, допустимого отклонения от номинала, группы по температурной стабильности применяют кодированное обозначение. Номинальная ёмкость характеризуется цифрой и буквой, указывающей на единицу измерения и представляющей собой множитель.

Так, буквы p, n, μ, m, F обозначают $10^{-12}, 10^{-9}, 10^{-6}, 10^{-3}, 1$ соответственно для значений ёмкости, выраженной в фарадах.

В обозначении ТКЕ буквы означают его знак (М – минус, П – плюс, МП – близкое к нулю), а цифры указывают значение ТКЕ, например: П100 (ТКЕ = $+ 100 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{К}$), М750 (ТКЕ = $- 750 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{К}$). Буква Н указывает на то, что ТКЕ не нормируется, а цифры после неё – на возможное изменение ёмкости в диапазоне допустимых температур, например Н20 (изменение ёмкости относительно измеренной при 20°C не более $\pm 20\%$).

Для обозначения ТКЕ часто используют цветовой код. Цвет покрытия корпуса указывает на знак ТКЕ, а цвет кодировочного знака – на его значение, например: синий и серый цвета корпуса – положительный ТКЕ; голубой – близкий к нулю; красный и зелёный – отрицательный ТКЕ; серый с красным знаком – П60; красный с зелёным знаком – М330; зелёный без знака М1500 и т. д.

Предусмотрены кодированные обозначения ТКЕ латинскими буквами, например: П100 – А; П60 – G; П33 – N; МПО – С; М33 – H; М47 – M; М75 – L; М150 – P; М220 – R; М330 – S; М470 – T; М750 – U; М1500 – V; М2200 – K; Н10 – B; Н20 – Z; Н30 – D; Н50 – X; Н70 – E; Н90 – F.

Аналогично резисторам номинальные ёмкости конденсаторов соответствуют рядам предпочтительных значений, на которые имеются ГОСТы.

Основные параметры постоянных конденсаторов

1. Номинальное значение ёмкости конденсатора.
2. Допустимое отклонение действительной ёмкости от номинального значения (в %).
3. Тангенс угла потерь или добротность Q ($Q = 1 / \operatorname{tg} \delta$). Тангенс угла потерь характеризует электромагнитные потери в конденсаторе и определяется как отношение его активной мощности P к реактивной мощности Q : $\operatorname{tg} \delta = P/Q$.
4. Ток утечки (в основном для электролитических конденсаторов).
5. Сопротивление изоляции или постоянная времени саморазряда. Сопротивление изоляции определяется формулой $R_{\text{из}} = U_0 / I_{\text{утечки}}$, где U_0 – постоянное напряжение, приложенное к конденсатору, вызвавшее ток утечки.
6. Температурный коэффициент ёмкости.
7. Номинальное напряжение.

Переменные и подстроечные конденсаторы выполняются с механически или электрически изменяемой ёмкостью.

В конденсаторах с механически изменяемой ёмкостью одна группа пластин или пластина перемещается относительно других пластин или пластины, составляющих обкладку конденсатора. При этом может меняться или взаимное перекрытие пластин или расстояние между ними. Чаще всего применяют вращательное движение и одну обкладку пластин выполняют в виде ротора, а другую – статора.

Промышленность выпускает переменные и подстроечные конденсаторы с воздушным, твёрдыми неорганическими (керамическими, слюдяными) и органическими (полистироловыми, полиэтиленовыми и т. д.) диэлектриками.

Переменные и подстроечные конденсаторы различаются в основном конструктивным исполнением. *Переменные* конденсаторы имеют ручку, с помощью которой вращается подвижная часть. Их конструкция рассчитана на долговременную работу в режиме вращения ротора. У *подстроечных* конденсаторов подвижная часть, как правило, имеет шлиц для её вращения отвёрткой и конструкция подвижной части упрощена. Она не рассчитана на долговременную работу в режиме вращения.

Максимальные значения ёмкости, которые можно получить у переменных конденсаторов, как правило, не превышают значений $600 \div 5000$ пФ, при этом воздушные зазоры между подвижными и неподвижными пластинами порядка $0,1 \div 0,25$ мм. Закон изменения ёмкости зависит от геометрической формы пластин.

Для переменных и подстроечных конденсаторов важны *максимальная* C_{MAX} и *минимальная* C_{MIN} ёмкости, коэффициент перекрытия по ёмкости $K_C = C_{\text{MAX}} / C_{\text{MIN}}$, $\operatorname{tg} \delta$ и закон изменения ёмкости.

Кроме линейных конденсаторов в электронике применяют нелинейные конденсаторы, у которых ёмкость зависит от напряжённости электрического поля. Нелинейные конденсаторы, выполненные на основе сегнетоэлектриков

(керамических диэлектриков со спонтанной поляризацией) получили название *варикондов*.

Для керамических материалов, называемых *сегнетоэлектриками* (титаната бария, стронция, калия и др.) характерны высокие значения относительной диэлектрической проницаемости и её сильная зависимость от напряжённости электрического поля и температуры. Ёмкость конденсаторов с такими диэлектриками зависит от напряжения, приложенного к ним. Условные обозначения различных конденсаторов показаны на рис.6.

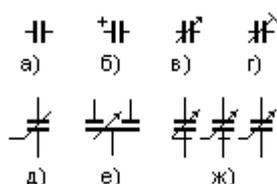


Рисунок 6 – Условные обозначения конденсаторов

а) постоянной ёмкости; б) электролитический, полярный; в) переменной ёмкости; г) подстроечный; д) вариконд; е) дифференциальный; ж) многосекционный

3. Катушки индуктивности не являются комплектующими изделиями, как, например, резисторы и конденсаторы. Они изготавливаются на сборочных заводах по изготовлению электронной аппаратуры и имеют те параметры, которые необходимы для конкретных изделий. Из-за трудностей микроминиатюризации, повторяемости характеристик, значительных габаритов и массы области применения катушек индуктивности ограничено. Однако при создании качественных фильтров источников питания электронной аппаратуры без катушек индуктивности обойтись сложно.

Катушки индуктивности, как правило, имеют цилиндрическую или спиральную форму витков и выполняются однослойными или многослойными.

Сопротивление катушки индуктивности переменному току определяется по формуле $X_L = \omega L$, где ω – частота переменного тока; L – величина индуктивности катушки.

Характер намотки зависит от назначения катушки индуктивности. Для уменьшения межвитковых ёмкостей витки укладывают на каркас с определенным шагом или применяют специальные способы намотки, когда витки укладываются не параллельно, а под некоторым углом друг к другу (универсальная намотка).

Для увеличения значений индуктивности и повышения их добротности широко применяют магнитопроводы с постоянными или регулируемыми параметрами. Наиболее распространённые формы магнитопроводов – бронева и тороидальная (рис.7, а,б).

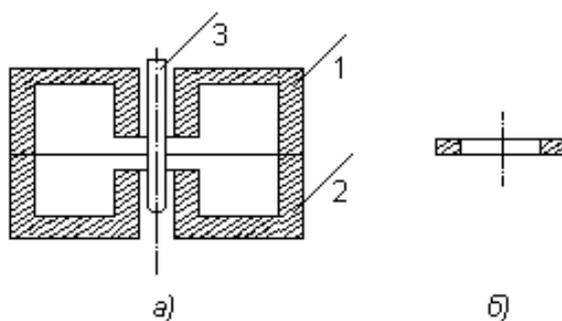


Рисунок 7 – Магнитопроводы катушек индуктивности
 а) броневой; б) тороидальный; 1, 2 – чашки броневого магнитопровода;
 3 – настроечный сердечник

Регулирование параметров магнитопровода осуществляют с помощью подвижного сердечника 3, который изготавливают из ферромагнитного материала усиливающего магнитное поле магнитопровода. При его перемещении изменяются параметры магнитопровода и индуктивность катушки. Иногда вместо ферромагнитного используют диамагнитный сердечник (медь, латунь), который ослабляет магнитное поле магнитопровода.

В катушках индуктивности, работающих на низких частотах (до 1 КГц), в качестве магнитопроводов используют пермаллой. При этом магнитопровод, как правило тороидальный, собранный из тонких колец ($h = 0,002 \dots 0,1 \text{ мм}$) или навитый из ленты тех же толщин. На более высоких частотах (до нескольких МГц) широко применяют ферриты, причём их марка зависит от диапазона рабочих частот. На частотах свыше нескольких МГц используют катушки индуктивности без магнитопровода, но с использованием подстроечного сердечника. На ОВЧ (очень высокие частоты) катушки индуктивности выполняют без магнитопровода и подстроечного сердечника.

Для проведения электрических расчётов используют одну из эквивалентных схем, приведены на рис.8, а, б. В них учтены резистивное сопротивление провода $r_{пр}$, индуктивность L , потери в магнитопроводе $R_{пот}$ и ёмкость C . С помощью эквивалентной ёмкости C учитывают наличие межвитковых ёмкостей, ёмкости выводов катушки индуктивности, ёмкости отдельных витков относительно окружающей его арматуры. Следует отметить, что L и L' , R и R' не равны друг другу. Поэтому эти параметры должны быть привязаны к определённой эквивалентной схеме.

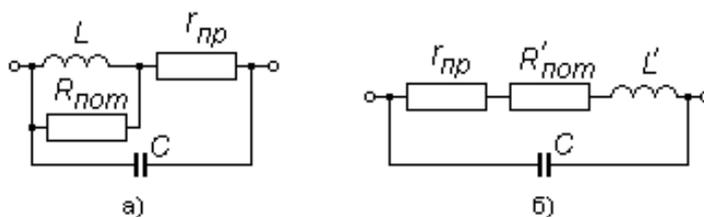


Рисунок 8 – Упрощённые эквивалентные схемы катушек индуктивности
 а) сопротивление потерь включено параллельно индуктивности;
 б) сопротивление потерь включено последовательно с индуктивностью.

Важнейшим параметром катушки индуктивности является добротность Q , которая равна отношению реактивного сопротивления X к резистивной составляющей R полного сопротивления катушки Z , т. е. $Q = X/R$. Значение добротности зависит от частоты. Если ферромагнитный магнитопровод отсутствует ($R_{\text{пот}} \rightarrow \infty$; $R'_{\text{пот}} \rightarrow 0$), а ёмкость C достаточно мала, то добротность зависит от соотношения между индуктивностью L и резистивным сопротивлением провода $r_{\text{пр}}$ и увеличивается с повышением частоты. Однако на частотах порядка нескольких МГц резистивное сопротивление резко возрастает из-за проявления поверхностного эффекта и добротность заметно уменьшается.

Одной из разновидностей катушек индуктивности являются *дроссели*. Их основное назначение – обеспечить большое сопротивление для переменных токов и малое – для постоянного и низкочастотных токов.

Различают дроссели *низких* и *высоких* частот. Дроссели низкой частоты (НЧ) используются в выпрямительных устройствах для создания фильтров, сглаживающих пульсации выпрямленного тока. Их применяют при больших токах источников питания (единицы – сотни ампер) и когда требуется получить малые пульсации выпрямленного тока. Дроссель НЧ наматывается аналогично силовым трансформаторам с использованием тех же магнитопроводов. Его основное отличие от трансформатора заключается в том, что в магнитной цепи магнитопровода делается воздушный зазор $h = 0,05 \dots 0,1 \text{ мм}$. Наличие зазора предохраняет магнитную цепь от насыщения постоянным током. При расчёте дросселя необходимо учитывать сопротивление нагрузки источника питания. Дроссели НЧ выпускаются серийно. Их обозначения Д1 – Д274.

Дроссели высоких частот (ВЧ) используют в высокочастотных электронных схемах, где пропускают токи только относительно низких частот. Они представляют собой катушки индуктивности, намотанные в навал или с определённым шагом на диэлектрический каркас. При этом стремятся, чтобы их ёмкость была минимально возможной, а индуктивность соответствовала расчётным номиналам.

Основные параметры катушек индуктивности

1. Номинальная индуктивность катушки.
2. Допускаемое отклонение индуктивности катушки (разность между предельным и номинальным значениями индуктивности).
3. Номинальная добротность Q катушки индуктивности, которая определяется как отношение реактивной мощности X к резистивной мощности R , т. е. $Q = X/R$.
4. Эффективная индуктивность (значение индуктивности, определённое с учётом влияния собственной ёмкости, собственной индуктивности и изменения начальной проницаемости сердечника).

5. Начальная индуктивность (значение индуктивности, определённое на низкой частоте, где отсутствует влияние собственной ёмкости).

6. Температурный коэффициент индуктивности катушки (ТКИ) – отношение относительного изменения индуктивности $\Delta L/L$ к интервалу температур ΔT , вызвавшему это изменение: $T K I = \frac{\Delta L}{L \Delta T}$.

7. Температурная нестабильность индуктивности катушки (относительное изменение индуктивности, вызванное изменением температуры).

8. Температурный коэффициент добротности (ТКД) – отношение относительного изменения добротности $\Delta Q/Q$ к интервалу температур ΔT , вызвавшему это изменение: $T K D = \frac{\Delta Q}{Q \Delta T}$.

9. Собственная ёмкость катушки индуктивности (электрическая ёмкость), составляющая с её индуктивностью резонансный контур, измеренная на частоте собственного резонанса.

10. Рабочий диапазон температур (максимальная и минимальная температуры).

Для дросселей, используемых в цепях питания, важны ток подмагничивания I_0 , индуктивность L , сопротивление обмотки дросселя постоянному току R .

4. Трансформаторы электронной аппаратуры.

Трансформаторами называются статические устройства, обеспечивающие преобразование параметров переменных напряжений и токов. Трансформаторы позволяют: изменять уровни и фазу напряжений (токов); согласовывать сопротивления источников сигнала и нагрузки; разделять цепи по постоянному току; изменять форму переменного напряжения (тока). Принцип работы электромагнитного трансформатора основан на преобразовании энергии электрического поля в энергию магнитного поля и обратном преобразовании последней. Тем самым осуществляется передача электроэнергии из одной цепи в другую. Такой трансформатор состоит из ферромагнитного магнитопровода и размещённых на нём обмоток. Обмотка, подключаемая к первичной питающей сети, называется *первичной*, а обмотки, к которым подключаются цепи нагрузки, – *вторичными*.

Различают трансформаторы питания электронной аппаратуры и сигнальные трансформаторы.

Трансформаторы питания электронной аппаратуры – это маломощные трансформаторы, предназначенные для преобразования напряжения электрической сети в напряжения, необходимые для питания электронных устройств.

Сигнальные трансформаторы – это трансформаторы малой мощности, предназначенные для точной передачи, преобразования, а иногда и запоминания электрических сигналов. Их подразделяют на *входные* (обеспечивающие согласование входных сопротивлений электронных узлов и источников сигнала), *выходные* (обеспечивающие согласование выходных сопротив-

лений электронных устройств с сопротивлениями нагрузки), *проходные* (обеспечивающие согласование нагрузок между отдельными узлами электронной аппаратуры) и *импульсные* (обеспечивающие преобразование и формирование импульсных сигналов). Магнитопроводы трансформаторов электронной аппаратуры имеют различные конфигурации. Широко используются *стержневые, броневые и тороидальные* конструкции (рис.9).

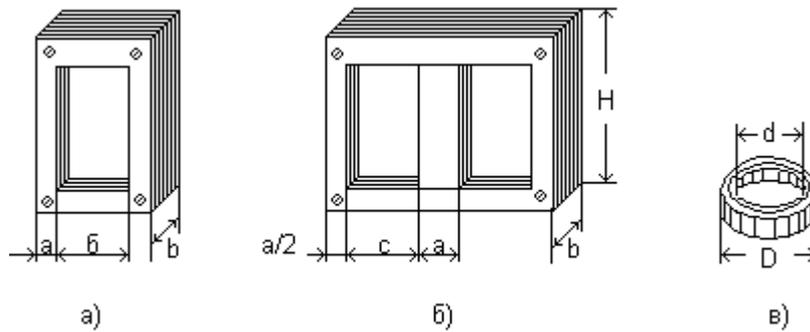


Рисунок 9 – Магнитопроводы трансформаторов
 а) стержневой; б) броневой; в) тороидальный (кольцевой)

Силовые трансформаторы

Трансформаторы со *стержневым* магнитопроводом (сердечником) (рис.9,а) имеют неразветвлённую магнитную цепь, обладают относительно большим значением потока рассеивания и лучшими условиями охлаждения обмоток, т. к. обмотки размещаются на разных стержнях. Такие конструкции менее чувствительны к внешним магнитным полям в связи с тем, что ЭДС помехи, наводимые в обеих катушках противоположны по знаку и частично или полностью компенсируют друг друга. Благодаря такому свойству стержневые магнитопроводы широко используются в мощных силовых электроцепях.

Недостатки их – большие потки рассеяния, большие габариты и масса по сравнению с броневыми сердечниками.

Броневые трансформаторы (рис.9,б) имеют разветвлённую магнитную цепь. Обмотки располагаются на среднем стержне. Такие трансформаторы относятся к числу наиболее простых и дешёвых в производстве. Недостатками их являются относительно высокая чувствительность к наводкам, большая величина потока рассеивания и плохое охлаждение обмоток.

Трансформаторы на *тороидальных сердечниках* (рис.9,в) наиболее сложные и дорогие. Основными преимуществами их являются малая чувствительность к внешним магнитным полям и малое значение потока рассеивания. Обмотки в трансформаторе тороидальной конструкции наматывают равномерного по всему тору, что позволяет уменьшить магнитные потоки рассеивания.

Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопроводы изготавливаются из тонких пластин трансформаторной стали, покрытых с одной стороны

слоем изолирующего лака и оксида. Сборка сердечника из пластин, толщина которых меньше 0,1...0,2 мм, неудобна и плохо поддаётся автоматизации. В случае тонкого магнитопровода удобнее и дешевле оказываются «витые сердечники», навиваемые из стальной ленты необходимой толщины.

Броневые и стержневые магнитопроводы изготавливают из холоднокатаной стали и собирают встык из двух отдельных половин.

Ленточные магнитопроводы по сравнению с пластинчатыми допускают применение на 20...30% большей магнитной индукции, имеют лучшее заполнение объёма магнитопровода обмотки, меньшие электромагнитные потери и повышенный КПД.

Магнитопроводы для трансформаторов изготавливают нескольких типов: броневые ленточные – ШЛ – с наименьшей массой, ШЛМ – со сниженным расходом меди, ШЛЮ – с увеличенной шириной окна, ШЛП – с наименьшим объёмом, ШЛР – наименьшей стоимостью; стержневые ленточные – ПЛВ – с наименьшей массой, ПЛМ – с уменьшенным расходом меди, ПЛР – наименьшей стоимости; тороидальные ленточные с наименьшей массой – ОЛ.

Выбор материала (электротехнические стали, пермаллои, ферриты) зависит от назначения и свойств трансформатора. Для низкочастотных силовых трансформаторов используют холоднокатанные текстурированные ленточные стали, например, 3411, 3421 и др. Они имеют пониженные удельные потери, высокую индукцию насыщения, высокую магнитную проницаемость в средних и сильных полях.

Для сигнальных трансформаторов широко применяются пермаллои 50НП, 79НМ, 80НХС и др. Ферриты используются обычно в трансформаторах, работающих на повышенных частотах (выше нескольких десятков КГц). Их применение ограничено из-за низкой индукции насыщения и сильной температурной зависимости параметров. В основном используются марганец-цинковые ферриты марок 6000 НМ, 4000 НМ, 2000 НМ, 1500 НМЗ, 1000 НМЗ, 700 НМ (первые цифры указывают номинальные значения магнитной проницаемости μ магнитного материала).

Свойства трансформатора определяются магнитными свойствами материала магнитопровода, который должен иметь минимальное сопротивление для основного магнитного потока. Материал магнитопровода характеризуется следующими основными параметрами: *индукцией насыщения B_s , остаточной индукцией B_r , магнитной проницаемостью $\mu = B / H$ и площадью петли гистерезиса.*

Инженерный расчёт трансформатора состоит из четырёх этапов: 1) выбор типа трансформатора и его конструкции; 2) выбор и расчёт магнитопровода с определением его основных размеров; 3) электрический и конструктивный расчёты; 4) проверочный расчёт.

Сигнальные трансформаторы

Сигнальные трансформаторы, обеспечивающие точную передачу аналоговых информационных сигналов, проектируют так, чтобы вносимые ими частотные и нелинейные искажения не превышали допустимых значений при коэффициентах трансформации, требуемых для согласования сопротивлений источников сигнала и нагрузки.

Частотные искажения наблюдаются как в области низких, так и в области высоких частот. В области низких частот они обусловлены малым значением сопротивления взаимоиндуктивности первичной и вторичной обмоток трансформатора, в результате чего часть электрического тока, созданного входным сигналом, ответвляется в неё. В области высоких частот частотные искажения обусловлены наличием у обмоток индуктивностей рассеяния, электромагнитными потерями в магнитопроводе, а также наличием у обмоток и между обмотками паразитных ёмкостей.

Нелинейные искажения обусловлены тем, что взаимоиндуктивность и сопротивление потерь зависят от значения магнитной индукции в магнитопроводе трансформатора. В результате этого соотношение между сопротивлениями элементов схемы меняются в зависимости от уровня входного сигнала, и соответственно изменяется коэффициент трансформации трансформатора. Это приводит к искажениям формы выходного сигнала относительно входного, которые называются *нелинейными искажениями*.

Сигнальные трансформаторы, обеспечивающие точную передачу аналоговых информационных сигналов, проектируют так, чтобы вносимые ими частотные и нелинейные искажения не превышали заданных при коэффициентах трансформации, требуемых для согласования сопротивлений источников сигналов и нагрузки. Частотные искажения сигнала наблюдаются как в области низких, так и в области высоких частот. Причиной нелинейных искажений является нелинейность перемагничивания магнитопровода (петля гистерезиса).

Импульсными трансформаторами (ИТ) называются специальные типы сигнальных трансформаторов, которые предназначены для трансформации или формирования импульсов напряжения (тока) различной формы. Основным требованием, предъявляемым к ИТ является требование малых или определённых искажений формы трансформируемого импульса.

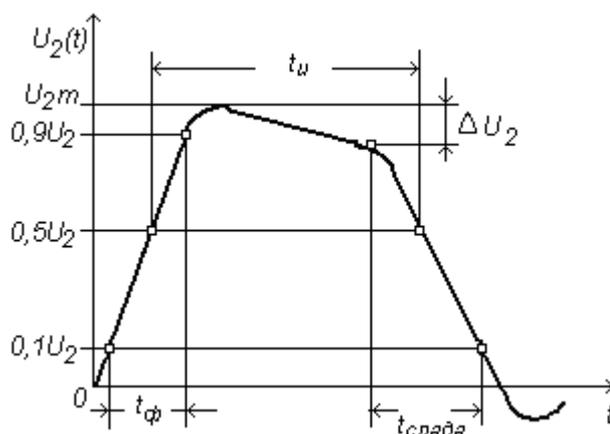


Рисунок 10 – Прямоугольный импульс, переданный через импульсный трансформатор

На рис.10 показаны типичные искажения формы прямоугольного импульса, который передан через импульсный трансформатор. Увеличение длительности фронта и спада импульса обусловлено действием индуктивности рассеяния и собственной ёмкости трансформатора. Перекос вершины импульса ΔU_2 объясняется конечным значением индуктивности намагничивания. Относительный спад $\lambda = \Delta U_2 / U_{2m}$ вершины импульса объясняется конечным значением индуктивности намагничивания L_1 . Время нарастания t_n и спада $t_{спада}$ определяются между уровнями 0,1 и 0,9 от $U_{2m}=I$. Длительность импульсов обычно определяют на уровне 0,5 от U_{2m} .

Задачей проектирования ИТ является выбор и определение материала, типоразмера магнитопровода, числа витков, конструктивных габаритов обмоток, исходя из условий получения допустимых искажений импульсов и высоких значений технико-экономических показателей.

Основные конструктивные особенности ИТ обусловлены стремлением уменьшить искажения импульса.

Обычно в ИТ малой мощности используют тороидальные магнитопроводы с очень малым магнитным полем рассеяния. В вычислительной технике широко применяют импульсные трансформаторы на магнитопроводах с прямоугольной петлёй гистерезиса.

Основные параметры трансформаторов питания

1. Номинальное напряжение первичной обмотки U_1 .
2. Номинальный ток первичной обмотки I_1 .
3. Напряжение вторичной обмотки U_2 .
4. Ток вторичной обмотки I_2 .
5. Напряжение холостого хода U_0 (напряжение на разомкнутой вторичной обмотке).
6. Номинальная мощность (сумма мощностей вторичных обмоток).
7. Коэффициент трансформации.
8. Частота питания.

Для сигнальных низкочастотных выходных трансформаторов также важны: 1) полоса пропускания $\Delta f = f_{верх} - f_{нижн}$; 2) сопротивление нагрузки (обычно задаётся на средней частоте диапазона рабочих частот); 3) номинальная выходная мощность; 4) КПД. У сигнальных трансформаторов параметры задаются в зависимости от их назначения. Условное обозначение трансформаторов на рис.11.

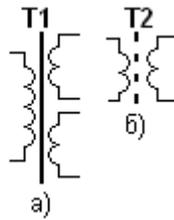


Рисунок 11 – Условные обозначения трансформатора с магнитопроводом из стали (а) и из ферродиелектрика (б)

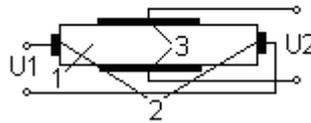


Рисунок 12 – Конструкция пьезотрансформатора
1 – пластина из сегнетодиэлектрика; 2, 3 – электроды

На высоких частотах широко применяются трансформаторы без сердечников, или только с подстроечными ферритовыми сердечниками. В отдельных случаях применяют безобмоточные трансформаторы, в которых используют пьезоэффект. Такие трансформаторы выгодно применять при получении большого коэффициента трансформации ($n=10 \dots 100$) и малой мощности передаваемого сигнала.

Пьезоэффектом называют свойства некоторых материалов изменять свои геометрические размеры под воздействием электростатического поля или образовывать на гранях связанные разноимённые заряды при их растяжении или сжатии. Пьезоэффект наблюдается в таких материалах, как кварц, сегнетова соль, турмалин, титанат бария, пьезокерамика и др.

Пьезотрансформаторы состоят из пьезоэлемента с нанесёнными на них электродами и корпуса с контактами. Простейший пьезотрансформатор содержит пьезокерамическую пластину прямоугольной формы, на которую методом вжигания нанесены электроды из серебра (рис.12). К одной паре электродов подключается входное напряжение, создающее электрическое поле в диэлектрике. В результате в пьезоэлементе возникают механические колебания и определённые участки его деформируются. На деформируемых участках появляется ЭДС, которая может быть снята с помощью правильно расположенных электродов. Выбором параметров пьезоэлемента, геометрии и расположения электродов можно получить коэффициент трансформации в несколько сотен и более. Такие трансформаторы не обладают широкополосностью и хорошо работают только на определённых резонансных частотах.

Существует граничная напряжённость электрического поля, превышение которой приводит к перегреву пьезоэлемента, что снижает надёжность пьезотрансформатора. Поэтому допустимую напряжённость следует выбирать в зависимости от материала пьезоэлемента и допустимого перегрева пьезотрансформатора.

Условное обозначение унифицированных трансформаторов

Полное условное обозначение унифицированных трансформаторов состоит из букв русского алфавита, указывающих на его тип, и последующих цифр, характеризующих основные параметры. Применяют следующие буквенные обозначения: ТА – трансформатор питания анодных цепей; ТН – трансформатор питания накальных цепей; ТАН – трансформатор анодно-накальных цепей; ТПП – трансформатор питания устройств на п/п приборах; ТС – трансформатор питания бытовой аппаратуры; ТТ – трансформатор питания тороидальный; ТВТ – трансформатор входной для транзисторных устройств; ТОТ – трансформатор выходной для транзисторных устройств; ТМ – трансформатор согласующий маломощный; ТИ – трансформатор импульсный; ТИМ – трансформатор импульсный маломощный.

Контрольные вопросы и задания

1. Назначение резистора в электрической цепи.
2. Резистор – как преобразователь энергии.
3. Назначение и устройство подстроечных и переменных резисторов.
4. Преимущества и недостатки проволочных сопротивлений.
5. Разновидности групп непроволочных сопротивлений (резисторов).
6. Причина появления собственных шумов в резисторе.
7. Особенности температурной вольт-амперной характеристик терморезистора.
8. Области применения терморезисторов.
9. Разновидности варисторов и их особенности.
10. Назначение конденсатора в электрической схеме.
11. Разновидности конденсаторов и области их применения.
12. Что такое тангенс угла потерь?
13. Разновидности эквивалентных схем конденсаторов.
14. Области применения переменных и подстроечных конденсаторов.
15. Охарактеризовать свойства варикондов.
16. Построить график зависимости $X_C = f(\omega)$.
17. Разновидности диэлектриков в конденсаторах.
18. Причина появления тока утечки в конденсаторах.
19. Назначение катушек индуктивности в электрических цепях.
20. Определение добротности катушки индуктивности.
21. Роль магнитопровода в катушках индуктивности.
22. Что такое температурный коэффициент индуктивности (ТКИ)?
23. Определение температурного коэффициента добротности индуктивности.
24. Отличие дросселя от катушки индуктивности.
25. Способ подстройки величины индуктивности в катушке.
26. Устройство и принцип работы трансформатора.
27. Классификация трансформаторов.

28. Разновидности магнитопроводов трансформаторов, их краткая характеристика.
29. Особенности конструкции пьезотрансформаторов и принцип их работы.
30. Причины искажения формы прямоугольного импульса, прошедшего через трансформатор.

Лекция №2. Электрофизические свойства полупроводников (п /п). Основные свойства и характеристики п /п. Электрические переходы. Особенности реальных p-n-переходов.

Электрофизические свойства полупроводников

Все вещества состоят из атомов, в состав которых входят положительно заряженные ядра и вращающиеся вокруг них отрицательно заряженные электроны. В ядро входят электрически нейтральные нейтроны и положительно заряженные протоны. Количество протонов в ядре определяет его заряд. Отрицательный заряд электрона по величине равен положительному заряду протона. В нормальном состоянии число электронов, образующих электронную оболочку атома, равно числу протонов в ядре, и атом электрически нейтрален. Электроны вращаются вокруг ядра по орбитам, сгруппированным в слои. Каждому слою соответствует строго определённая энергия электрона W (так называемый разрешённый энергетический уровень). Количество электронов в слоях строго определено: в первом, ближайшем к ядру слое может находиться не более двух электронов, во втором – не более восьми и т. д. Электроны целиком заполненных слоёв устойчивы к внешним воздействиям. «Не уместившиеся» во внутренних слоях электроны образуют незаполненный внешний слой, который легко отдаёт и принимает электроны. Эти электроны определяют валентность элемента при химических реакциях. Чем дальше от ядра расположена орбита электрона, тем большей энергией он обладает. Под воздействием энергии теплоты, света, радиации или каких-либо других внешних факторов электрон из валентной зоны может перейти на новую, более удалённую от ядра орбиту. Такой электрон называется возбуждённым, а при дальнейшем увеличении энергии, называемой работой выхода, электрон покидает поверхность вещества.

В кристалле происходит взаимодействие между соседними атомами, заключающееся в том, что на электроны атома воздействуют ядра соседних атомов. В результате разрешённые энергетические уровни электронов смещаются и расщепляются на несколько – по числу соседних атомов в кристаллической решётке. Эти уровни создают энергетические зоны. Совокупность энергетических уровней, соответствующих внешнему слою электронов, образует *валентную зону*. Разрешённые уровни энергии, которые остаются незанятыми, *составляют зону проводимости*, так как её уровни могут занимать возбуждённые электроны, обеспечивающие электропроводность вещества. Между валентной зоной и зоной проводимости может располагаться запрещённая зона.

Зонная структура лежит в основе деления веществ на проводники, полупроводники и диэлектрики. На рис.13 показано расположение энергетических зон для этих групп веществ.

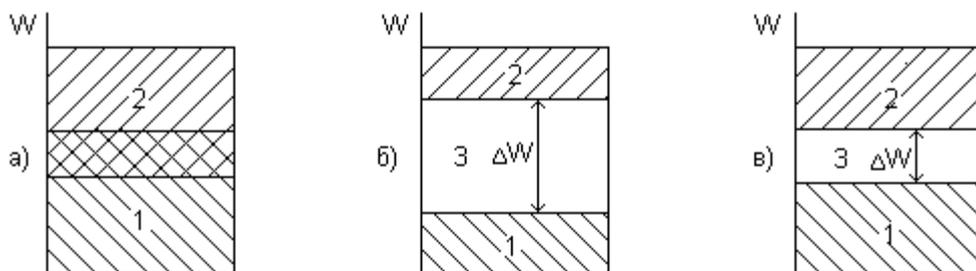


Рисунок 13 – Энергетические зоны проводника (а), диэлектрика (б) и полупроводника. 1 – валентная зона; 2 – зона проводимости; 3 – запрещенная зона

У проводников (металлов) валентная зона 1 и зона проводимости 2 перекрывают друг друга (рис.13,а) и валентные электроны легко переходят в зону проводимости. У диэлектриков (рис.13,б) ширина запрещённой зоны велика (более 6 электрон-Вольт(эВ)), и для перехода валентных электронов в зону проводимости им необходимо сообщить значительную энергию. У полупроводников (рис.13,в) запрещённая зона сравнительно мала и колеблется от 0,1 до 3,0 эВ.

В кристаллической решётке четырёхвалентного полупроводника (например, кремния, германия) каждый атом связан с четырьмя соседними атомами с помощью двух валентных электронов – по одному от каждого атома. Такая связь называется *ковалентной*. При её образовании электрон принадлежит уже не одному, а обоим связанным между собой атомам, т. е. является для них общим. В результате вокруг каждого ядра образуется восьмиэлектронная оболочка, устойчивая к внешним воздействиям. Так как все валентные электроны оказываются прочно связанными между собой, свободных электронов, способных обеспечить электронную проводимость, нет. Такую структуру имеют химически чистые полупроводники при температуре – 273⁰С (абсолютный нуль), рис.14,а.

Под воздействием внешних факторов (например, при повышении температуры) отдельные электроны атомов кристаллической решётки приобретают энергию, достаточную для освобождения от ковалентных связей, и становятся свободными.

При освобождении электрона от ковалентной связи в кристаллической решётке возникает свободное место, обладающее положительным зарядом. Такое место называется *дыркой*, а процесс образования пары «свободный электрон – дырка» — генерацией.

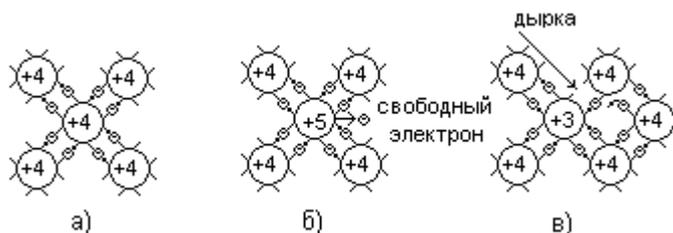


Рисунок 14 – Кристаллическая структура чистого проводника (а); полупроводника с донорной (б) и акцепторной (в) примесью

В дырку может «перескочить» валентный электрон из ковалентной связи соседнего атома. В результате ковалентная связь в одном атоме восстановится (этот процесс называется *рекомбинацией*), а в соседнем – разрушится, образуя новую дырку. Такое перемещение дырки по кристаллу равносильно перемещению положительного заряда.

При отсутствии внешнего электрического поля дырки в кристалле перемещаются хаотически. Если же к кристаллу приложить разность потенциалов, то под воздействием созданного электрического поля движение дырок и электронов становится упорядоченным, и в кристалле возникает электрический ток. Таким образом, проводимость полупроводника обусловлена перемещением как отрицательно заряженных электронов, так и положительно заряженных дырок. Соответственно различают два типа проводимости – *электронную*, или *проводимость n – типа*, и *дырочную*, или *проводимость p – типа*.

Для создания полупроводниковых элементов широко применяют *примесные полупроводники*. С четырёхвалентным германием и кремнием используют пятивалентные (мышьяк, сурьму, фосфор) и трёхвалентные примеси (бор, алюминий, индий, галлий).

В случае пятивалентной примеси (рис.14,б) четыре валентных электрона примесного атома совместно с четырьмя электронами соседних атомов основного вещества образуют ковалентные связи, а пятый валентный электрон оказывается «лишним». В результате даже при комнатной температуре «лишние» электроны легко освобождаются от своих атомов, переходя в зону проводимости. В таких полупроводниках электропроводность обеспечивается главным образом избытком свободных электронов. Их называют полупроводниками *n – типа*, а примеси – *донорными*.

За счёт тепловой энергии в полупроводнике *n -типа* могут образоваться и отдельные дырки при генерации пар «свободный электрон – дырка». Поэтому в полупроводниках *n -типа* называют основными, а дырки – неосновными носителями зарядов.

При введении трёхвалентной примеси (рис.14,в) в одной из ковалентных связей примесного и атома основного полупроводника отсутствует электрон, т. е. образуется дырка. Разрешённые энергетические уровни валентных зон примеси и основного полупроводника находятся рядом. Электрон валентной зоны атома основного полупроводника легко захватывается трёхвалентным атомом примеси, в результате чего дырка образуется уже в атоме основного полупроводника и, таким образом перемещается по кристаллической решётке. Дырки в таких полупроводниках становятся основными носителями зарядов, создавая эффект перемещения положительных зарядов. Трёхвалентные примеси называют *акцепторными*, а полупроводники с такой примесью – полупроводниками *p -типа*. Неосновными носителями в этом случае выступает небольшое количество свободных электронов, образовавшихся в результате тепловой генерации пар «свободный электрон – дырка».

Реальный p - n -переход и его свойства

Тонкий слой полупроводника между двумя областями, одна из которых представляет п/п p -типа, а другая n -типа называют p - n -переходом, (рис.15,а). Концентрации основных носителей заряда в p - и n -областях могут быть равными или существенно отличаться. В первом случае p - n -переход называют симметричным, а во втором – несимметричным. Чаще используют несимметричные переходы.

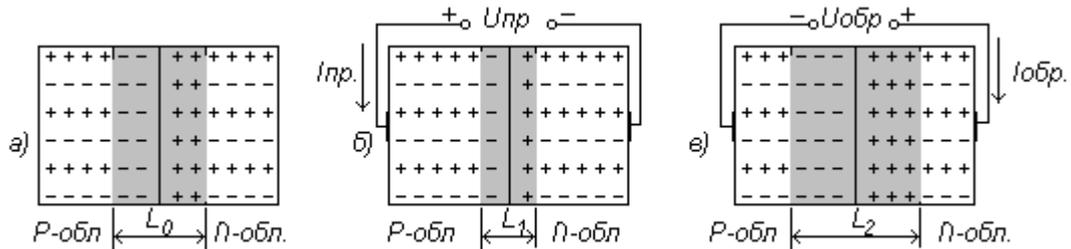


Рисунок 15 – Структура p - n перехода

а) в равновесном состоянии; б) при прямом внешнем напряжении; в) при обратном внешнем напряжении

Пусть концентрация акцепторной примеси в p -области больше, чем концентрация донорной примеси в n -области.

За счёт диффузии дырки из p -области и электроны из n -области стремятся равномерно распределиться по всему объёму. Если бы электроны и дырки были нейтральными, то диффузия в конечном итоге привела бы к полному выравниванию их концентраций по всему объёму кристалла. Однако этого не происходит. Дырки, подошедшие к границе со стороны p -области, отталкиваются назад положительным зарядом, а электроны, подошедшие из n -области, – отрицательным зарядом. Таким образом, образуется p - n -переход, представляющий собой слой полупроводника с пониженным содержанием носителей – так называемый обеднённый слой, который имеет относительно высокое электрическое сопротивление.

Свойства p - n -структуры изменяются, если к ней приложить внешнее напряжение. Если внешнее напряжение противоположно по знаку контактной разности потенциалов (рис.15,б), то дырки p -области, отталкиваясь от приложенного положительного потенциала внешнего источника, приближаются к границе между областями, компенсируют заряд части отрицательных ионов и сужают ширину p - n -перехода L со стороны p -области. Аналогично этому электроны n -области, отталкиваясь от отрицательного потенциала внешнего источника, компенсируют заряд части положительных ионов и сужают ширину p - n -перехода со стороны n -области. Потенциальный барьер сужается, через него начинают проникать дырки из p -области и электроны из n -области и через p - n -переход начинает течь ток.

С увеличением внешнего напряжения ток возрастает неограниченно, т. к. создаётся основными носителями, концентрация которых постоянно восполняется источником внешнего напряжения.

Полярность внешнего напряжения, приводящая к снижению потенциального барьера, называется прямой, или открывающей, а созданный ею ток – прямым. При подаче такого напряжения *p-n-переход* открыт.

Если к *p-n-* структуре приложить напряжение обратной полярности (рис.15, в), то эффект будет противоположным. Под действием электрического поля источника дырки *p-области* смещаются к отрицательному потенциалу внешнего напряжения, а электроны *n-области* – к положительному потенциалу. Таким образом, основные носители зарядов отодвигаются внешним полем от границы, увеличивая ширину *p-n-перехода*, который оказывается почти свободным от носителей зарядов. Электрическое сопротивление *p-n-перехода* при этом возрастает. Такая полярность внешнего напряжения называется обратной, запирающей. При подаче такого напряжения *p-n-переход* закрыт.

Тем не менее, при обратном напряжении наблюдается протекание малого тока I_{OBR} . Этот ток, в отличие от прямого, определяется носителями не примесной, а собственной проводимости, образующейся в результате генерации пар «свободный электрон – дырка» под воздействием температуры. Значение обратного тока практически не зависит от внешнего напряжения. Это объясняется тем, что в единицу времени количество генерируемых пар «свободных электрон – дырка» при неизменной температуре остаётся постоянным, и даже при U_{OBR} , в доли вольта все носители участвуют в создании обратного тока.

При подаче обратного напряжения *p-n-переход* уподобляется конденсатору, пластинами которого являются *p-* и *n- области*, разделённые диэлектриком. Роль диэлектрика выполняет приграничная область, почти свободная от носителей зарядов. Эту ёмкость *p-n-перехода* называют *барьерной*. Она тем больше, чем меньше ширина *p-n-перехода* и чем больше его площадь.

Особенности реальных p-n-переходов

В идеальном *p-n-переходе* обратный ток уже при сравнительно небольшом обратном напряжении не зависит от величины обратного напряжения. Однако при исследовании реальных *p-n-переходов* наблюдается достаточно сильное увеличение обратного тока при увеличении приложенного напряжения, причём в кремниевых п/п обратный ток на 2 ÷ 3 порядка выше теплового. Такое отличие экспериментальных данных от теоретических объясняется термогенерацией носителей заряда непосредственно в области *p-n-перехода* и существованием канальных токов и токов утечки.

Канальные токи обусловлены наличием поверхностных энергетических состояний, искривляющих энергетические зоны вблизи поверхности и приводящих к появлению инверсных слоёв. Эти слои называют *каналами*, а токи,

протекающие через переход между инверсным слоем и соседней областью – канальными токами.

Ёмкости $p-n$ -перехода. Наряду с электропроводностью $p-n$ -переходы имеют и определённую ёмкость. Ёмкостные свойства обусловлены наличием по обе стороны от границы электрических зарядов, которые созданы ионами примесей, а также подвижными носителями заряда, находящимися вблизи границы $p-n$ -перехода.

Ёмкость $p-n$ -перехода подразделяют на две составляющие: барьерную, отражающую перераспределение зарядов в $p-n$ -переходе и диффузионную, отражающую перераспределение зарядов вблизи $p-n$ -перехода. При прямом смещении перехода в основном проявляется диффузионная ёмкость, при обратном (режим экстракции) заряды вблизи $p-n$ -перехода (в базе) меняются мало и основную роль играет барьерная ёмкость.

Так как внешнее напряжение влияет на ширину $p-n$ -перехода, значение пространственного заряда и концентрацию инжектированных носителей зарядов, ёмкость $p-n$ -перехода зависит от приложенного напряжения и его полярности.

Барьерная ёмкость $C_{\text{БАР}}$ обусловлена наличием в $p-n$ -переходе донорной и акцепторной проводимостей, которые образуют как бы две заряженные обкладки конденсатора. При изменении запирающего напряжения, например увеличении, ширина $p-n$ -перехода увеличивается и часть подвижных носителей заряда (электронов в области n и дырок в области p) отсасывается электрическим полем от слоёв, прилегающих к переходу. Перемещение этих носителей зарядов вызывает ток $i = \frac{dQ_{\text{ПЕР}}}{dt} = C_{\text{БАР}} \cdot \frac{dU}{dt}$, где $dQ_{\text{ПЕР}}/dt$ – изменение заряда обеднённого слоя $p-n$ -перехода. Этот ток становится равным нулю по окончании переходного процесса изменения границ $p-n$ -перехода.

Величину $C_{\text{БАР}}$ для резкого перехода можно определить из приближённой формулы $C_{\text{БАР}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{l_0} \sqrt{\frac{U_K}{U_K + |U|}}$, где S , l_0 – площадь и толщина $p-n$ -перехода при $U=0$; U_K – контактная разность потенциалов.

С увеличением приложенного обратного напряжения U барьерная ёмкость уменьшается из-за увеличения толщины перехода l .

Зависимость $C_{\text{БАР}} = f(U)$ называют *вольт-фарадной* характеристикой.

При подключении к $p-n$ -переходу прямого напряжения барьерная ёмкость увеличивается вследствие уменьшения l . Однако в этом случае приращение зарядов за счёт инъекции играет большую роль и ёмкость $p-n$ -перехода определяется в основном диффузионной составляющей ёмкости.

Диффузионная ёмкость отражает физический процесс изменения концентрации подвижных носителей заряда, накопленных в областях, вследствие изменения концентрации инжектированных носителей.

Пробой $p-n$ -перехода. Под пробоем $p-n$ -перехода понимают значительное уменьшение обратного сопротивления, сопровождающееся возрастанием

обратного тока при увеличении приложенного напряжения. Различают три вида пробоя: *туннельный*, *лавинный* и *тепловой*.

В основе *туннельного* пробоя лежит туннельный эффект, т. е. «просачивание» электронов сквозь потенциальный барьер, высота которого больше, чем энергия носителей заряда. Туннельный пробой наступает тогда, когда напряжённость электрического поля возрастает настолько, что становится возможным туннельный переход электронов из валентной зоны п/п с электропроводностью одного типа в зону проводимости п/п с электропроводностью другого типа (рис.10,а).



Рисунок 16 – Энергетическая зонная диаграмма, поясняющая туннельный переход электрона (а); ВАХ p-n перехода (б)

1 – лавинный пробой; 2 – туннельный пробой; 3 – тепловой пробой

Туннельный пробой чаще всего возникает у полупроводниковых приборов, имеющих узкий переход и малое значение удельного сопротивления, причём напряжённость поля должна быть достаточно высокой (более 10^5 В/см). При такой напряжённости энергетические зоны искривляются настолько, что энергия электронов валентной зоны полупроводника *p-типа* становится такой же как и энергия свободных электронов зоны проводимости полупроводника *n-типа*. В результате перехода электронов «по горизонтали» из области *p* в область *n* возникает *туннельный ток*. Начало туннельного пробоя оценивается по десятикратному превышению туннельного тока над обратным. При увеличении температуры напряжение, при котором возникает туннельный пробой, уменьшается. ВАХ туннельного пробоя представлена на рис.16,б.

Лавинный пробой вызывается ударной ионизацией, которая происходит тогда, когда напряжённость электрического поля, вызванная обратным напряжением, достаточно велика. Неосновные носители заряда, движущиеся через *p-n-переход*, ускоряются настолько что при соударении с атомами в зоне *p-n-перехода* ионизируют их. В результате появляется пара электрон – дырка. Вновь появившиеся носители заряда ускоряются электрическим полем и в свою очередь могут вызвать ионизацию следующего атома и т. д. Если процесс ударной ионизации идёт лавинообразно, то по тому же закону увеличивается количество носителей зарядов и обратный ток. При лавинной ионизации ток в цепи ограничен только внешним сопротивлением.

Лавинный пробой возникает в высокоомных полупроводниках, имеющих достаточно большую ширину *p-n-перехода*. Напряжение лавинного про-

боя зависит от температуры полупроводника и растёт с её увеличением из-за сокращения длины свободного пробега носителей зарядов. При лавинном пробое падение напряжения на *p-n-переходе* остаётся постоянным (1 на рис.16,б)

Тепловой пробой возникает в результате разогрева *p-n-перехода*, когда количество теплоты, выделяемой током в *p-n-переходе*, больше количества теплоты, отводимой от него. При разогреве *p-n-перехода* происходит интенсивная генерация электронно-дырочных пар и увеличение обратного тока через *p-n-переход*. Это, в свою очередь, приводит к дальнейшему увеличению температуры и обратного тока. В итоге ток через *p-n-переход* лавинообразно увеличивается и наступает тепловой пробой (3 на рис.16,б).

Следует заметить, что один вид пробоя может наступать как следствие другого вида пробоя.

Контрольные вопросы и задания

1. Дать характеристику энергетических зон проводника, диэлектрика, полупроводника.
2. Как изменить ширину запретной зоны в полупроводнике?
3. Что такое электронная и дырочная проводимость?
4. Каким образом получают полупроводники *p*- и *n*-типов?
5. Какая структура *p-n*-перехода: а) в равновесном состоянии; б) при прямом внешнем напряжении; в) при обратном внешнем напряжении?
6. За счёт чего в *p-n*-переходе образуется потенциальный барьер?
7. Что происходит в *p-n*-переходе при приложении к нему прямого и обратного напряжений?
8. Какие носители зарядов образуют прямой ток, а какие – обратный?
9. Основные отличия реального *p-n*-перехода от идеального.
10. Что такое термогенерация, канальные токи и токи утечки?
11. Причина появления барьерной ёмкости.
12. Причина туннельного пробоя *p-n*-перехода.
13. Чем вызывается лавинный пробой *p-n*-перехода?
14. Объяснить причину проявления теплового пробоя *p-n*-перехода.

Лекция №3. Полупроводниковые диоды, их основные свойства и характеристики, разновидности по областям применения.

Полупроводниковым (п/п) диодом называют прибор с одним *p-n*-переходом и двумя выводами.

В зависимости от технологии изготовления различают точечные диоды, сплавные и микросплавные, с диффузионной базой, эпитаксильные и др.

По функциональному назначению диоды делят на выпрямительные, универсальные, импульсные, смесительные, детекторные, модуляторные, переключающие, умножительные, стабилитроны (опорные), туннельные, параметрические, фотодиоды, светодиоды, магнитодиоды, диоды Ганна, Шоттки и т. д.

Большинство п/п диодов выполняют на основе несимметричных *p-n*-переходов. Низкоомную область диодов называют *эмиттером*, а высокоомную – *базой*. Для создания переходов с вентильными свойствами используют *p-n*-, *p-i-n-i*-переходы, а также переходы *металл – полупроводник*. Идеализированная вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода изображена на (рис.17).

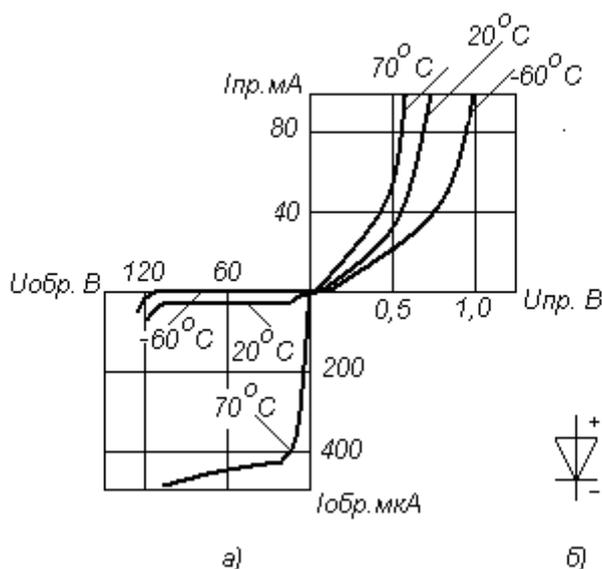


Рисунок 17 – Вольт – амперные характеристики германиевого диода (а); условное обозначение диодов (б)

Вывод от *p*-области (+) называется *анодом*, а от *n*-области (-) – *катодом*. Вольт-амперная характеристика п/п диода, т. е. зависимость протекающего через диод тока от приложенного к нему напряжения определяется вольт-амперной характеристикой *p-n*-перехода, т. е. $I_D = f(U_D)$. При подаче к диоду прямого напряжения диод открыт и пропускает ток, при этом падение напряжения на диоде составляет десятые доли вольта. При подаче обратного напряжения диод заперт, и если оно не достигает значения $U_{ОБР.МАХ}$ ($\approx 120В$), то через диод протекает обратный ток $I_{ОБР.}$ сравнительно малой величины.

При подаче обратного напряжения, превышающего $U_{OBR.MAX}$, наступает пробой *p-n-перехода*, при котором обратный ток резко возрастает.

Выпрямительные диоды

Эти диоды предназначены для преобразования (выпрямления) переменного тока в постоянный. Выпрямительные диоды характеризуются малым сопротивлением в прямом направлении и позволяют пропускать большие токи (до десятков и сотен ампер) при допустимых обратных напряжениях до 1000В. Для этого площадь *p-n-перехода* выполняется относительно большой и, следовательно, ёмкость *p-n-перехода* достаточно велика (десятки пикофард). Поэтому переходные процессы в этих диодах протекают относительно долго. (Под длительностью переходного процесса понимают время перехода из открытого состояния диода в запертое и наоборот при перемене полярности приложенного напряжения).

Основными параметрами выпрямительных диодов являются:

- 1) допустимое обратное напряжение $U_{OBR.}$, которое диод выдержит в течение длительного времени без нарушения работоспособности;
- 2) средний прямой ток $I_{ПР.СР.}$ – наибольший допустимый постоянный ток, протекающий длительно в прямом направлении;
- 3) максимально допустимый импульсный ток $I_{ПР.}$ при указанной в паспорте наибольшей длительности импульса;
- 4) средний обратный ток $I_{OБ.СР.}$ – среднее значение обратного тока за период протекания;
- 5) среднее прямое напряжение $U_{ПР. СР.}$ – падение напряжения на открытом диоде;
- 6) средняя рассеиваемая мощность $P_{СР. Д.}$ – средняя мощность, выделяющаяся за период в диоде при выпрямлении переменного тока;
- 7) дифференциальное сопротивление $r_{ДИФ.} = \Delta U_{ПР. СР.} / \Delta I_{ПР. СР.}$.

Импульсные диоды

Импульсные диоды имеют малую длительность переходных процессов и предназначены для работы в импульсных и цифровых устройствах. От выпрямительных диодов они отличаются малыми ёмкостями *p-n-переходов* (доли пФ) и рядом параметров, определяющих переходные характеристики диода. Уменьшение ёмкостей достигается за счёт уменьшения площади *p-n-перехода*, поэтому допустимые мощности рассеяния у них невелики (30 ÷ 40мВт).

Основные параметры импульсных диодов

1. Общая ёмкость диода C_D (от долей до нескольких пикофард).
2. Максимальное импульсное прямое напряжение $U_{ПР.иМАХ.}$.

3. Максимально допустимый импульсный прямой ток $I_{ПР.иМАХ}$.

4. Время установления прямого напряжения диода $t_{УСТ}$ – интервал времени от момента подачи импульса прямого тока на диод до достижения заданного значения прямого напряжения на нём – зависит от скорости движения внутрь базы инжектированных через переход неосновных носителей заряда, в результате которого наблюдается уменьшение её сопротивления (доли наносекунд – доли микросекунд).

5. Время восстановления обратного сопротивления диода $t_{ВОС}$ – интервал времени, прошедший с момента прохождения тока через нуль (после изменения полярности приложенного напряжения) до момента, когда обратный ток достигнет заданного значения (порядка $0,1I$, где I – ток при прямом напряжении); $t_{ВОС}$ – доли наносекунд – доли микросекунд.

В быстродействующих импульсных и цифровых цепях широко используют диоды Шоттки. У этих диодов не затрачивается время на накопление и рассасывания зарядов в базе, их быстродействие только от скорости процесса перезарядки барьерной ёмкости.

Стабилитроны

Стабилитроны – это диоды, использующие участок ВАХ *p-n-перехода*, соответствующий обратному электрическому пробоя (рис.18,а)

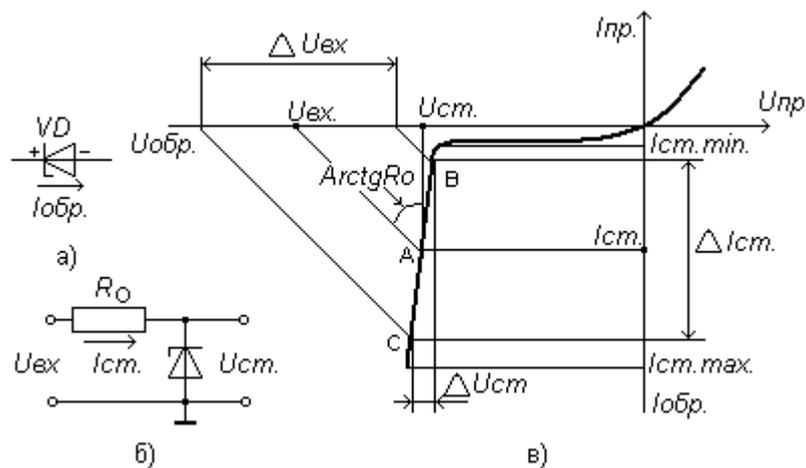


Рисунок 18 – Стабилитрон

а) условное обозначение; б) схема включения; в) вольт – амперная характеристика

Стабилитрону свойственна стабильность падения напряжения на нём при изменениях в несколько раз тока, протекающего через него. Благодаря этому свойству, стабилитроны широко применяются в качестве опорного напряжения, которое остаётся неизменным при изменениях параметров схемы. Применяются они и как стабилизаторы напряжения при небольших мощностях нагрузки.

Работа стабилитрона основана на использовании явления электрического пробоя *p-n-перехода* при включении диода в обратном направлении.

Механизм пробоя может быть туннельным, лавинным или смешанным. У низковольтных стабилитронов (с низким сопротивлением базы) более вероятен *туннельный* пробой. У стабилитронов с высокоомной базой (сравнительно высокоомных) пробой носит *лавинный* характер. Материалы, используемые для создания *p-n-перехода* стабилитронов, имеют высокую концентрацию примесей. При этом напряжённость электрического поля в *p-n-переходе* значительно выше, чем у обычных диодов. При относительно небольших обратных напряжениях в *p-n-переходе* возникает сильное электрическое поле, вызывающее его электрический пробой. В этом режиме нагрев диода не носит лавинообразного характера. Поэтому электрический пробой не переходит в тепловой.

Во избежание теплового пробоя последовательно со стабилитроном включают резистор R_0 (рис.18,б), ограничивающий ток $I_{СТ.}$, который является обратным током для *p-n-* структуры стабилитрона. При изменениях входного напряжения $\Delta U_{ВХ}$ (рис.11,в) меняются ток $\Delta I_{СТ.}$ и падение напряжения от этого тока на R_0 . Значения тока $I_{СТ.}$ и его изменения определяются точками А, В и С пересечения ВАХ *p-n-перехода* и прямых, проведенных под углом $\text{arctg}R_0$ из точек $U_{ВХ}$, и его изменений, отложенных на оси $U_{ОБР.}$ Точка А определяет значение $U_{СТ.}$ при среднем значении $U_{ВХ.}$, а точки В и С – изменения $\Delta U_{СТ}$ при изменениях $\Delta U_{ВХ.}$

Дифференциальное сопротивление стабилитрона на участке ВС равно

$$r_{ДИФ} = \Delta U_{СТ.} / \Delta I_{СТ.}$$

Если напряжение $U_{ВХ.}$ может изменяться в обе стороны от своего среднего значения, то точку А выбирают на середине линейного участка ВАХ стабилитрона. При $R_0 \gg r_{ДИФ.}$ Получим, что $\Delta U_{СТ.} \ll \Delta U_{ВХ.}$ и стабилизация тем лучше, чем больше отношение $R_0 / r_{ДИФ.}$

Основными параметрами стабилитронов являются:

1. Напряжение стабилизации $U_{СТ.}$.
2. Минимальный ток стабилизации $I_{СТ.МІN}$, при котором наступает устойчивый электрический пробой *p-n-перехода*.
3. Максимальный ток стабилизации $I_{СТ.МІN}$, при котором мощность, рассеиваемая на стабилитроне, не превышает допустимого значения.
4. Дифференциальное сопротивление $r_{ДИФ.}$
5. Максимальная мощность рассеивания $P_{МАХ}$, при которой ещё не наступает тепловой пробой *p-n-перехода*.
6. Температурный коэффициент стабилизации $\alpha_{СТ.}$ – отношение относительного изменения напряжения стабилизации к абсолютному изменению температуры окружающей среды (выражается в % / град):

$$\alpha_{СТ} = \Delta U_{СТ.} / (U_{СТ.} / \Delta T).$$

Выпускаются кремниевые стабилитроны на напряжение стабилизации от 5 до 400В и на мощность от 250мВт до 50Вт.

Варианты

Варикап – это п/п диод, предназначенный для использования в качестве управляемой электрическим напряжением ёмкости. В варикапе ширина электронно-дырочного перехода и его ёмкость зависят от величины приложенного к нему напряжения.

Варикап работает при обратном напряжении, приложенном к *p-n-переходу*. Его ёмкость меняется в широких пределах, а её значение определяют по формуле $C_B(U) = C(0) \left(\frac{U_K}{U_K + U} \right)^{1/n}$, где $C_B(0)$ – ёмкость при нулевом напряжении на диоде; U_K – значение контактного потенциала; U – приложенное обратное напряжение; $n = 2$ для резких переходов и $n = 3$ для плавных переходов.

К основным параметрам варикапов относятся:

1. Общая ёмкость C_B – ёмкость, измеренная между выводами варикапа при заданном обратном напряжении (десятки – сотни пикофард).

2. Коэффициент перекрытия по ёмкости – отношение ёмкостей варикапа при двух заданных значениях обратных напряжений: $K_C = C_{B.max} / C_{B.min}$ (единицы – десятки единиц).

3. Сопротивление потерь r_{Π} – суммарное резистивное сопротивление, включая сопротивление кристалла, контактных соединений и выводов варикапа.

4. Добротность Q_B – отношение реактивного сопротивления варикапа на заданной частоте переменного сигнала (X_C) к сопротивлению потерь при заданном значении ёмкости или обратного напряжения: $Q_B = X_C / r_{\Pi}$ (десятки – сотни единиц).

5. Температурный коэффициент ёмкости (ТКЕ) $\alpha_C = \Delta C / (C \Delta T)$ ($2 \cdot 10^{-4}$.. $6 \cdot 10^{-4}$ 1/К).

Так как ёмкость контура C_B варикапа уменьшается при увеличении частоты, то его добротность Q_B на высоких частотах уменьшается.

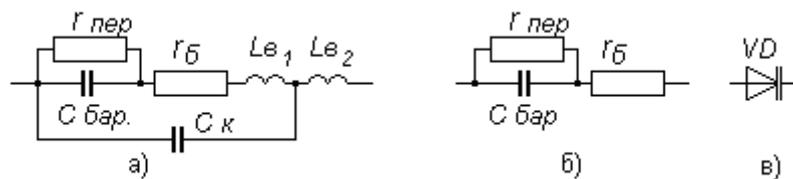


Рисунок 19 – Эквивалентные схемы варикапа

а) на низких и б) на высоких частотах; в) условное обозначение

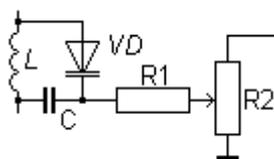


Рисунок 20 – Схема контура, перестраиваемого варикапом

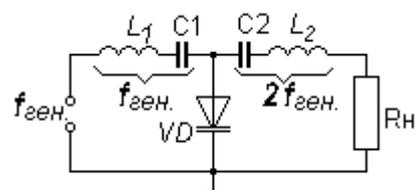


Рисунок 21 – Удвоитель частоты на варикапе

На эквивалентной схеме варикапа (рис.19) $C_{\text{БАР}}$ и $r_{\text{ПЕР}}$ – ёмкость и сопротивление p - n -перехода, $r_{\text{б}}$ – сопротивление п/п, $L_{\text{В1}}$ и $L_{\text{В2}}$ – индуктивности внутренних и внешних выводов, $C_{\text{К}}$ – ёмкость корпуса.

Схема перестраиваемого варикапом контура резонансного усилителя показана на рис.20. Постоянное напряжение подаётся на варикап с потенциометра $R2$ через резистор $R1$. Конденсатор C служит для отделения постоянной составляющей, от переменного напряжения протекающего через индуктивность L .

Схема удвоителя частоты показана на рис.21. Последовательные резонансные контуры $L1C1$ и $L2C2$ соответственно настроены на частоту входного сигнала $f1$ и частоту $f2 = 2f1$ (при настройке контуров учитывается и ёмкость варикапа $C_{\text{В}}$). Сигнал с частотой поступает в нагрузку $R_{\text{Н}}$.

Кроме варикапов для изменения частоты в электронных схемах широко используют *варакторы*. Их отличие от варикапов состоит в том, что у варакторов пределы изменения ёмкости при изменении приложенного напряжения значительно больше, чем у варикапов.

Диоды Шоттки

В основе выпрямляющего диода может использоваться не только переход между полупроводниками p - и n -типа, но и между полупроводником и металлом. Такие диоды называются *диодами Шоттки*.

Рассмотрим структуру *металл – полупроводник n -типа*.

Если работа выхода электронов у металла выше, чем у полупроводника, то преобладающим будет перемещение электронов из полупроводника в металл (свободным электронам металла труднее приобрести энергию, равную работе выхода, чем электронам полупроводника). В результате металл заряжается отрицательно, а оставшиеся в полупроводнике ионы донорной примеси создают в его приграничном слое положительный потенциал (рис.22,а)

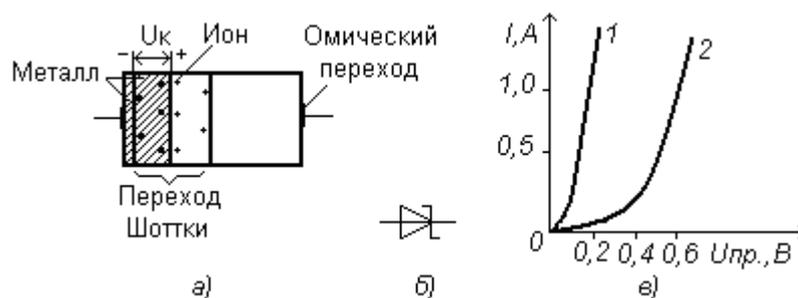


Рисунок 22 – Металлополупроводниковый диод Шоттки

а) структура диода; б) условное обозначение; в) вольт-амперная характеристика; 1—переход Шоттки; 2— p - n переход

Такое распределение зарядов создаёт контактную разность потенциалов $U_{\text{К}}$ (потенциальный барьер), препятствующий дальнейшему перемещению электронов. При этом тонкий приграничный слой полупроводника

обедняется носителями зарядов. Таким образом, в месте контакта металла и полупроводника возникает переход, аналогичный *p-n-переходу*. Если к такому переходу приложить обратное напряжение, совпадающее с U_K , то ширина обеднённой области увеличится, а сопротивление перехода возрастёт. Если приложить прямое напряжение, то оно будет противодействовать U_K , при этом переход сужается, потенциальный барьер уменьшается и через переход начинает течь ток. Вольт-амперные характеристики такого перехода и *p-n-перехода* оказываются аналогичными.

Основной отличительной особенностью характеристик диода Шоттки является значительно меньшее прямое падение напряжения по сравнению с диодами на основе *p-n-перехода* (рис.22,в). Это объясняется тем, что в диоде Шоттки одно из веществ перехода – металл, и, следовательно, его электрическое сопротивление (и соответствующее падение напряжения на нём) значительно меньше, чем у полупроводника. Другая особенность диода Шоттки – отсутствие проникновения неосновных носителей заряда из металла в полупроводник (в рассматриваемом случае – дырок, которые для *n-области* являются неосновными). Это значительно повышает быстродействие диодов Шоттки по сравнению с обычными диодами, т.к. отпадает необходимость в рассасывании таких носителей при смене полярности внешнего напряжения.

Диоды Шоттки, у которых выпрямляющий переход представляет собой тонкую плёнку молибдена или алюминия, нанесённую на плёнку кремния методом вакуумного напыления, обладают ёмкостью, не превышающую 0,01пФ. Это обеспечивает чрезвычайно малое время их переключения (доли наносекунды) и предельно высокую частоту работы (десятки гигагерц). Мощные диоды позволяют пропускать токи в десятки ампер при обратных напряжениях до 500В. Благодаря меньшему прямому напряжению (0,3В вместо 0,7В у диодов *p-n-типа*) они обеспечивают более высокий КПД.

Вольтамперная характеристика диодов Шоттки напоминает характеристику диодов на основе *p-n-переходов*. Отличие состоит в том, что прямая ветвь в пределах изменения приложенного напряжения в $10^8 \div 10^{10}$ раз представляет почти идеальную экспоненциальную кривую, а обратные токи малы (доли – десятки наноампер). Конструктивно диоды Шоттки выполняют в виде пластины низкоомного кремния, на которую нанесена высокоомная плёнка с электропроводностью того же типа. На поверхность плёнки вакуумным напылением наносится слой металла. Эквивалентная схема диода Шоттки показана на рис. 23.

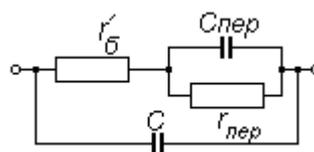


Рисунок 23 – Эквивалентная схема диода Шоттки

$r_{пер}$ – сопротивление *p-n* перехода; $C_{пер}$ – ёмкость *p-n* перехода;
 $r_б$ – омическое сопротивление тела базы и эмиттера; C – межэлектродная ёмкость вывода

Диоды других типов

Кроме рассмотренных диодов некоторое распространение получили стабисторы, туннельные, и СВЧ-диоды, среди которых различают детекторные, параметрические, переключательные и ограничительные, умножительные и настроенные.

Стабисторы, как и стабилитроны, предназначены для стабилизации напряжения. Однако, в отличие от последних в них используется специальная форма прямой ветви вольт-амперной характеристики. Поэтому стабисторы работают при прямом напряжении и позволяют стабилизировать малые напряжения (0,35...1,9В). По основным параметрам они близки к стабилитронам, но включаются в цепь стабилизации в прямом направлении.

Туннельные диоды – это п/п приборы, на вольт-амперной характеристике которых имеется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением (участок 1–2 на рис. 25,а). Наличие его является следствием проявления туннельного эффекта.

Туннельный эффект практически безынерционен, т. к. развивается за $10^{-14} - 10^{-13}$ сек. Действительный частотный предел работы туннельных диодов ограничен только собственными паразитными ёмкостями *p-n-переходов* и корпуса, а также индуктивностью выводов.

В зависимости от функционального назначения туннельные диоды условно подразделяются на усилительные (ЗИ101, ЗИ104 и др.), генераторные (ЗИ201–ЗИ203), переключательные (ЗИ306 – ЗИ309).

Основными параметрами туннельных диодов являются:

1. Пиковый ток I_{Π} и ток впадины I_B – соответственно прямые токи в точках максимума и минимума ВАХ, а также соответствующие этим токам напряжения пика U_{Π} и впадины U_B .
2. Отношение токов I_{Π} и I_B .
3. Напряжение раствора U_{PP} , при котором ток при увеличении прямого напряжения становится равным пиковому току I_{Π} .
4. Барьерная ёмкость $C_{БАР}$ (0,5 ÷ 50 пФ).
5. Отрицательное дифференциальное сопротивление r , (десятки Ом);
6. Ёмкость корпуса C_K (0,2 ÷ 0,8 пФ).
7. Индуктивность выводов L (0,1 ÷ 0,2 нГн).

Для туннельных диодов из германия $I_{\Pi} / I_B = 4 \div 6$; $U_{\Pi} = 40 \div 100$ мВ; $U_B = 300 \div 400$ мВ, а из арсенида галлия $I_{\Pi} / I_B =$ до 100 и выше; $U_{\Pi} = 100 \div 150$ мВ; $U_B = 400 \div 500$ мВ.

Эквивалентная схема туннельного диода, работающего в режиме с отрицательным дифференциальным сопротивлением при малом сигнале показана на рис. 24.

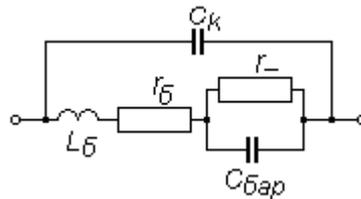


Рисунок 24 – Эквивалентная схема туннельного диода

Частота f_0 , на которой полное реактивное сопротивление туннельного диода обращается в нуль, называется *резонансной*.

При снижении степени легирования сильнолегированного п /п туннельный эффект проявляется слабо и туннельный ток прямой ветви прямой ветви ВАХ становится незначительным. Диоды, обладающие большим туннельным обратным и малым туннельным прямым токами, называются *обращёнными* и используются для переключения в наносекундном и пикосекундном диапазонах, а также для детектирования СВЧ-сигналов.

Область применения туннельных диодов в настоящее время ограничена из-за большой эффективности, даваемой другими полупроводниковыми компонентами. Обращённые диоды представляют собой разновидность туннельных диодов и характеризуются тем, что вместо участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением у них на вольт-амперной характеристике имеется практически горизонтальный участок (рис.25,в). В этих диодах прямую ветвь характеристики можно считать обратной. Обращённый диод имеет значительно меньшее прямое напряжения, чем у обычных диодов, и может быть применён для выпрямления малых напряжений. Значения обратного напряжения также малы.

Диоды, предназначенные для генерирования шумов, составляют отдельную группу п/п приборов – так называемых *генераторов шума*, например типа 2Г401. По виду вольт-амперных характеристик и схемы включения они практически не отличаются от стабилитронов. Режим их работы выбирается так, чтобы обратный ток (ток пробоя) был меньше $I_{СТ.МІN}$. При малых токах параметры напряжения пробоя нестабильны, в результате чего возникают его колебания, происходящие случайным образом (генерируется напряжение шумов). Спектр их достаточно широкий (до 3,5МГц).

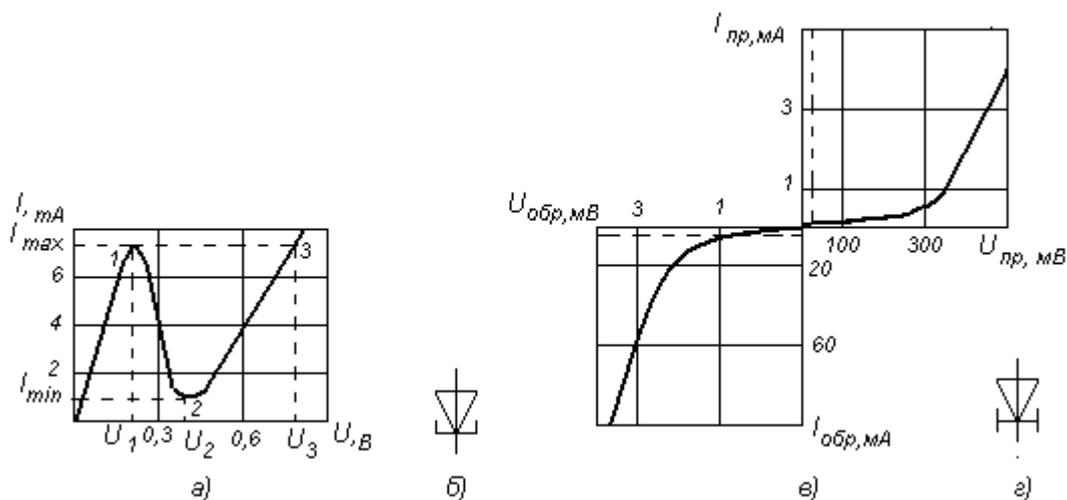


Рисунок 25 – ВАХ туннельного диода (а) и его условное обозначение (б); ВАХ обращенного диода (в) и его условное обозначение (з)

Контрольные вопросы и задания

1. Какие параметры характеризуют выпрямительные свойства и быстродействие универсальных и импульсных диодов?
2. Как по ВАХ-ке диода определить величину тока, протекающего через диод?
3. В чём особенность ВАХ стабилитрона?
4. Что такое варикап и область его применения?
5. Основное отличие варактора от варикапа.
6. Особенность структуры диода Шоттки, область его применения.
7. Функциональные разновидности туннельных диодов.
8. Разновидности резонанса в эквивалентной схеме туннельного диода.
9. Особенность ВАХ туннельных и обращённых диодов.
10. Режим работы диодов, используемых в генераторах шумов.

Лекция №4. Диоды СВЧ, их области применения, магнитодиоды.
Условное обозначение диодов

Сверхвысокочастотные диоды подразделяют на смесительные (2А101–2А109 и др.), детекторные (2А201–2А203 и др.), параметрические (1А401–1А408), переключательные и ограничительные (2А503–2А524), умножительные и настроечные (Э2А601–Э2А613), генераторные (3А703, 3А705). Это специальные типы диодов, предназначенные для работы в сантиметровом диапазоне волн, которые характеризуются параметрами, важными для работы в этом диапазоне частот.

Диоды СВЧ-диапазона изготавливают из кремния, германия и арсенида галлия. Эти диоды имеют микросплавной, диффузионный, планарный и планарно-эпитаксильный *p-n-переход*, либо переход металл-полупроводник, а также точечный контакт, изготавливаемый микросваркой вольфрамовой иглы с кристаллом п/п. Не являясь в строгом смысле *p-n-переходом*, точечный контакт обладает выпрямительными и другими свойствами *p-n-перехода*.

Смесительные диоды предназначены для работы в преобразователях частоты (смесителях), представляющих собой схему, подавая на входы которой два переменных сигнала разных частот получают на выходе схемы сигнал суммы или разности входных частот. Сумма или разность частот практически получается при любой нелинейной комбинации двух сигналов. В преобразователях частоты СВЧ используется нелинейность ВАХ смесительного диода. Основными параметрами смесительных диодов являются:

1. Выпрямленный ток $I_{ВП}$ (доли и единицы мА), представляющий собой постоянную составляющую, протекающую в выходной цепи диода в рабочем режиме.

2. Потери преобразования $L_{ПРБ}$ (5 – 10дБ), равные отношению мощности СВЧ-сигнала на входе к мощности сигнала выходной частоты на нагрузке.

3. Нормированный коэффициент шума F (6 – 11дБ), равный отношению мощностей сигнала $P_{СИГ}$ и шума $P_{Ш}$ на входе к их отношению на выходе в заданном режиме; используют также шумовое отношение $n_{Ш}$, равное 2 – 6 и представляющее собой отношение мощности собственных шумов диода к мощности тепловых шумов эквивалентного сопротивления.

Смесительные диоды характеризуют также входным и выходным сопротивлениями $r_{ВХ}$ и $r_{ВЫХ}$, составляющими сотни Ом.

Детекторные диоды предназначены для детектирования СВЧ-сигналов и отличаются почти полным отсутствием инжекции и накопления носителей зарядов и, как следствие, крайне малой инерционностью. Основными параметрами детекторных диодов являются:

1. Дифференциальное сопротивление $r_{ДИФ}$ (от сотен Ом до 10 – 15 КОм) при заданном прямом токе $I_{ПР}$ (до 100мА).

2. Чувствительность по току β_I , равная отношению выпрямленного тока к поданной на детектор СВЧ-мощности и достигающая нескольких Ампер/Ватт.

3. Коэффициент качества (добротность), равный $(15 - 120)^{-0.5}$ Вт и определяемый при заданной падающей мощности $P_{ПД}$ (единицы и десятки мкВт) и прямом токе $I_{ПР}$ (до десятков мкА) по формуле:

$$M = \beta_I \cdot r_{\text{диф}} / (n_{\text{Ш}} \cdot r_{\text{Ш}} + R_{\text{Ш}})^{0.5}, \text{ где } R_{\text{Ш}} = 1 \text{ КОм.}$$

Параметрические диоды предназначены для работы в параметрических усилителях. Усиление входного переменного сигнала получают, изменяя зарядную ёмкость *p-n-перехода* подачей на диод переменного напряжения, частота которого больше частоты усиливаемого сигнала. Усилительный эффект получают в результате передачи энергии от внешнего генератора в резонансную систему, настроенную на входную частоту. Преимущества параметрических диодов – очень низкий уровень собственных шумов. Основными параметрами параметрических диодов являются:

1. Ёмкость (десятые и сотые доли пФ);
2. Постоянная времени τ (0,7 – 2,2 пС), равная произведению зарядной ёмкости *p-n-перехода* на последовательное сопротивление потерь (сопротивление тела π / π) и характеризующая предельную частоту работы диода ($f_{ПР} \approx 0,2 / \tau$), а также его шумовые свойства.

Переключательные диоды предназначены для работы в переключательных устройствах СВЧ, в которых используется изменение сопротивления *p-n-перехода* переменному току при подаче прямого и обратного постоянного напряжения. При обратном напряжении полное сопротивление переменному току диода, включённого параллельно передающей СВЧ-линии, близко к сопротивлению малых ёмкостей *p-n-перехода* $C_{\text{БАР}}$ и корпуса $C_{\text{К}}$ (рис.26,а), поэтому сигнал не подавляется. При прямом напряжении полное сопротивление диода мало (рис.26,б) и сигнал подавляется. Так как прямое дифференциальное сопротивление *p-n-перехода* $r_{\text{диф}}$ зависит от прямого тока $I_{ПР}$, изменяя прямое напряжение на переключательном диоде, можно использовать его в качестве управляемого аттенюатора или модулятора СВЧ.

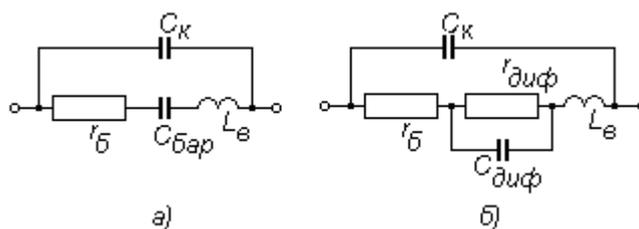


Рисунок 26 – Эквивалентная схема переключательного диода
 а) при обратном напряжении; б) при прямом напряжении

Основными параметрами переключательных диодов являются:

1. Общая ёмкость $C_{\text{д}}$ (доли и единицы пФ).
2. Прямое сопротивление потерь r (1,5 – 5 Ом) при заданном прямом токе $I_{ПР}$ (10 – 50 мА).

3. Время восстановления обратного сопротивления $\tau_{\text{ВОС}}$ (десятки нС).

Индуктивность выводов L_B и ёмкость корпуса C_K этих диодов соответственно равны долям мГн и пФ.

Умножительные диоды применяются для умножения частоты в СВЧ-диапазоне, используя, как и в умножителях на варикапах зависимость ёмкости *p-n-перехода* от величины напряжения сигнала, поданного на диод. Отличием этих диодов от варикапов являются меньшие номинальные ёмкости (доли и единицы пФ). Умножительные диоды могут работать с частичным открыванием *p-n-перехода* и, если они обладают свойствами диодов с накоплением заряда, эффективность умножения повышается в результате появления составляющих сигнала более высоких частот.

Основными параметрами умножительных диодов являются:

1. Непрерывная рассеиваемая СВЧ-мощность $P_{\text{СВЧ max}}$ (от единиц мкВт до 10Вт).

2. Предельная частота $f_{\text{ПРЕД}}$ (до 400МГц).

Иногда указывают мощность какой-либо (третьей или восьмой) гармоники в заданном режиме. Для умножительных диодов с эффектом накопления заряда указывают также время выключения $t_{\text{ВЫКЛ}}$ (не более 0,1 – 1нС) и эффективное время жизни неосновных носителей τ (не менее 10 – 50 нС).

Генераторные СВЧ-диоды, используемые в генераторах сантиметрового диапазона, подразделяют на диоды Ганна и лавинно-пролётные (ЛПД).

Диоды Ганна основаны на том, что в некоторых п /п (арсенид галлия, фосфид индия) в зависимости от напряжённости электрического поля свободные электроны могут быть лёгкими с подвижностью μ_1 или тяжёлыми с подвижностью μ_2 . При небольшой напряжённости E электроны лёгкие и их средняя дрейфовая скорость $v = \mu_1 E$. При напряжённости, превышающей некоторое пороговое значение $E_{\text{ПОР}}$, электроны становятся тяжёлыми и их дрейфовая скорость $v_2 = \mu_2 E$ (для арсенида галлия $E_{\text{ПОР}} \approx 3000 \text{ В / см}$, $\mu_1 / \mu_2 \approx 40$).

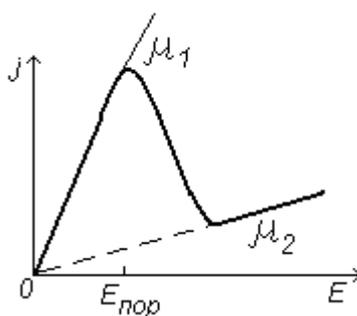


Рисунок 27 – Зависимость плотности тока от напряженности электрического поля для арсенида галлия n-типа

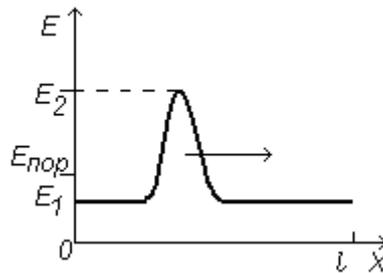


Рисунок 28 – Распределение напряжённости электрического поля в кристалле *n/n* с отрицательной дифференциальной проводимостью под действием внешнего напряжения

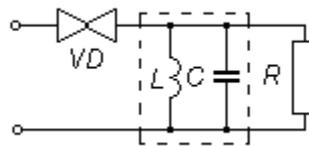


Рисунок 29 – Генератор на диоде Ганна

Зависимость плотности тока i от напряжённости E для арсенида галлия показана на рис.27. При $E < E_{\text{пор}}$ плотность тока возрастает линейно, а при $E > E_{\text{пор}}$ также линейно, но не так быстро. На участке, где напряжённость E близка к $E_{\text{пор}}$, с ростом напряжённости всё бо́льшая часть лёгких электронов становится тяжёлыми и плотность тока уменьшается, т. е. появляется участок дифференциальной отрицательной проводимости. Свойством дифференциальной отрицательной проводимости в диодах Ганна обладает весь объём полупроводника в отличие, например от туннельных диодов, в которых отрицательной проводимостью обладает лишь *p-n-переход*.

В полупроводнике с отрицательной дифференциальной проводимостью при подаче напряжения, создающего среднюю напряжённость, бо́льшую, чем $E_{\text{пор}}$, образуется *домен* – тонкий подвижный слой, имеющий высокую напряжённость E_2 , тяжёлые электроны и большое сопротивление (рис.28). Вне домена $E_1 < E_{\text{пор}}$ и электроны лёгкие. Под действием электрического поля домен движется к аноду со скоростью v_2 и, приблизившись к нему, разрушается. В этот момент ток в цепи в результате исчезновения домена, обладающего большим сопротивлением, увеличивается. В следующий момент возле катода зарождается новый домен, ток уменьшается и новый домен начинает своё движение к аноду и т. д.

В результате в цепи протекает пульсирующий ток, период которого равен времени движения домена от катода к аноду. Частота пульсаций определяется толщиной кристалла *n/n* и лежит в СВЧ-диапазоне. Таким образом, *n/n*, обладающий отрицательной дифференциальной проводимостью, является СВЧ-генератором. Стабильность частоты такого генератора улучшается, если диод Ганна работает в настраиваемом объёмном или полосковом СВЧ-резонаторе (рис.29).

Основными параметрами диодов Ганна являются:

1. Минимальная выходная непрерывная СВЧ-мощность $P_{ВЫХ\ min}$ (10 – 50 мВт) при заданной частоте (5 – 12 ГГц).

2. Постоянный рабочий ток (сотни мА) при заданном номинальном напряжении.

3. Сопротивление r_0 (3 – 20 Ом) при заданном постоянном токе.

Лавинно-пролётные диоды основаны на том, что в режиме пробоя *p-n-перехода* ток пробоя несколько отстаёт по времени от напряжения пробоя. При включении лавинно-пролётного диода в резонатор можно создать условия, при которых пробой будет происходить периодически, а отставание по фазе периодического тока пробоя от напряжения будет около 180° , что соответствует отрицательному дифференциальному сопротивлению, т. е. режиму генерации. Основными параметрами лавинно-пролётных диодов являются:

1. Рабочий диапазон частот (от 6 – 6,7 до 10 – 11,5 ГГц).

2. Выходная мощность (единицы и десятки мВт) при заданном рабочем токе (десятки мА).

3. Обратное напряжение (десятки Вольт) при рабочем токе.

4. Ёмкость диода C_d (десятые доли пФ).

Магнитодиоды представляют собой п/п приборы, вольт-амперная характеристика которых существенно зависит от значения индукции магнитного поля и расположения его вектора относительно плоскости *p-n-перехода*. При практическом применении магнитодиод обычно включают в прямом направлении и используют зависимость его сопротивления от магнитной индукции.

Так, например, у магнитодиодов КД301В при магнитной индукции $B = 0$ и величине тока $I = 3$ мА падение напряжения на диоде составляет $U = 10$ В, а при $B = 0,4$ Тл и $I = 3$ мА — $U \approx 32$ В. Эта группа диодов используется в качестве датчиков магнитного поля.

Отдельную группу диодов образуют диоды, работающие в инфракрасном, оптическом и ультрафиолетовом диапазонах волн. К ним относятся светодиоды и фотодиоды. Их свойства и параметры рассматриваются ниже.

Условное обозначение п/п диодов

Обозначение п/п диодов состоит из шести элементов. Первый элемент – буква, указывающая, на основе какого п/п материала выполнен диод. Германий или его соединения обозначают буквой Г, кремний и его соединения – К, соединения галлия – А. В приборах специального назначения буквы заменяются цифрами: германий – 2, кремний – 2, соединения галлия – 3. Второй элемент – буква, обозначающая подклассы диода: выпрямительные, импульсные, универсальные – Д, варикапы – В,

туннельные и обращённые диоды – И, стабилитроны – С, СВЧ-диоды – А. Третий элемент – цифра, определяющая назначение диода (от 101 до 399 – выпрямительные; от 401 до 499 – универсальные; от 501 до 599 – импульсные). У стабилитрона эта цифра определяет мощность рассеивания. Четвёр-

тый и пятый элементы – цифры, определяющие порядковый номер разработки (у стабилитронов эти цифры показывают номинальное напряжение стабилизации). Шестой элемент – буква, показывающая деление технологического типа на параметрические группы (приборы одного типа по значениям параметров подразделяются на группы). У стабилитронов буквы от А до Я определяют последовательность разработки. Примеры обозначений: КД215А, ГД412А, 2Д504А, КВ101А, КС168А и т. д.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие разновидности СВЧ-диодов вы знаете?
2. Назначение и область применения смесительных диодов.
3. Основные характеристики детекторного диода.
4. Охарактеризовать параметрические диоды.
5. Принцип работы переключательных диодов.
6. Расчёт резонансных частот в эквивалентных схемах переключательных диодов.
6. Сравнительная характеристика умножительных диодов и варикапов.
7. Области применения диодов Ганна и их основные параметры.
8. Охарактеризовать лавинно-пролётные диоды.
9. Принцип работы магнитодиодов.
10. Условное обозначение диодов.

Лекция № 5. Биполярные транзисторы, их устройство, принцип работы, характеристики, области применения.

Общая характеристика биполярных транзисторов

Биполярными транзисторами называют полупроводниковые приборы с двумя или несколькими взаимодействующими электрическими *p-n-переходами* и тремя или более выводами, усилительные свойства которых обусловлены явлениями инжекции и экстракции неосновных носителей зарядов.

При воздействии малого сигнала (основной режим работы) транзистор рассматривают как линейный активный четырёхполюсник (рис.30), у которого один из зажимов всегда является общим для входа и выхода.



Рисунок 30 – Схема четырёхполюсника, эквивалентного транзистору

В соответствии с теорией четырёхполюсников входные и выходные напряжения и токи (U_1, I_1, U_2, I_2) однозначно связаны между собой системой уравнений, содержащей четыре параметра четырёхполюсника.

Система *h-параметров* получила широкое распространение, т.к. при измерении этих параметров требуется воспроизведение холостого хода на входе ($I_1 = 0$) или короткого замыкания на выходе ($U_2 = 0$), что легко выполнить. В этой системе параметров уравнения четырёхполюсника записываются в виде $U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2$; $I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2$.

Все *h-параметры* имеют определённый физический смысл: $h_{11} = U_1 / I_1$ – входное сопротивление транзистора при короткозамкнутом выходе ($U_2 = 0$); $h_{12} = U_1 / U_2$ – коэффициент обратной связи по напряжению при разомкнутом по переменному току входе ($I_1 = 0$); $h_{21} = I_2 / I_1$ – коэффициент передачи тока при короткозамкнутом выходе ($U_2 = 0$); $h_{22} = I_2 / U_2$ – выходная проводимость при разомкнутом по переменному току входе ($I_1 = 0$).

Для наиболее часто используемых параметров (коэффициент передачи тока при включении с ОБ и ОЭ) введены особые обозначения $h_{21Б} = \alpha$; $h_{21Э} = \beta$. Зависимость между α и β определяется выражением $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$.

Система *y-параметров* используется преимущественно на высоких частотах. По способу определения *y-параметры* являются параметрами короткого замыкания по переменному току на входе или выходе, что вытекает из уравнений $I_1 = y_{11}U_1 + y_{12}U_2$; $I_2 = y_{21}U_1 + y_{22}U_2$.

Все *y-параметры* имеют определённый физический смысл: $y_{11} = I_1 / U_1$ – входная проводимость при короткозамкнутом выходе ($U_2 = 0$); $y_{12} = I_1 / U_2$ – обратная взаимная проводимость при короткозамкнутом входе ($U_1 = 0$); $y_{21} = I_2 / U_1$ – прямая взаимная проводимость (крутизна) при короткозамкну-

том выходе ($U_2 = 0$); $y_{22} = I_2 / U_2$ – выходная проводимость при короткозамкнутом

входе ($U_1 = 0$).

Принцип действия, режимы работы и схемы включения транзисторов.

Усилительный трёхэлектродный п/п прибор с двумя *p-n-переходами* на основе трёхслойной структуры (*n-p-n* или *p-n-p*), в котором один – эмиттерный модулирует сопротивление другого – коллекторного – называют *биполярным транзистором*. Рассмотрим работу *n-p-n-транзистора* (рис.31).

Его центральную часть (рис.31,а) называют *базой*, одну из *n-областей* обычно сильно легированную (на рисунке – левая) – *эмиттером*, другую *n-область* (на рисунке – правая) – *коллектором*. Эмиттерный *p-n-переход* открыт, а коллекторный закрыт источниками напряжений $E_Э$ и $E_К$, подаваемых через резисторы $R_Э$ и $R_К$. Входной сигнал подаётся на эмиттер, выходной снимается с коллектора.

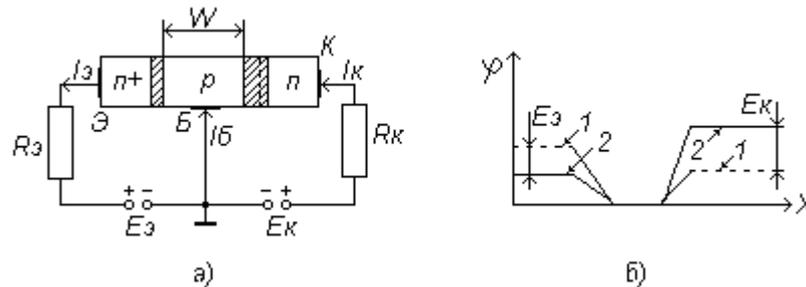


Рисунок 31 – Включение n-p-n транзистора (а); распределение потенциала (б)

Высота потенциального барьера на эмиттерном переходе уменьшена на $E_Э$ (рис.31,б). Через эмиттерный переход проходит прямой ток эмиттера $I_Э$, в базу инжектируются электроны, концентрация которых у эмиттерного перехода высокая. Высота потенциального барьера коллекторного перехода увеличена на $E_К$. Электроны, оказавшиеся в базе у границы коллекторного перехода, затягиваются электрическим полем области пространственного заряда (ОПЗ) и переносятся в коллекторную область *n-типа*, вызывая прохождение тока коллектора $I_К$ в его цепи.

Инжектированные в базу электроны, являясь в ней избыточными неосновными носителями зарядов, диффундируют в направлении от эмиттера к коллектору. В процессе переноса избыточных электронов диффузией через базу часть их рекомбинирует с дырками, не попадая в область коллектора. Дырки, необходимые для рекомбинации электронов, поступают из внешней цепи за счёт тока базы $I_Б$.

Для уменьшения потерь на рекомбинацию толщина базы должна быть малой (до десятых долей микрометра), чтобы электроны, диффундируя через базу, «не успевали» прорекомбинировать, т. е. время пролёта электронов через базу должно быть меньше их времени жизни τ .

В транзисторе с достаточно тонкой базой почти все инжектированные эмиттером электроны попадают в цепь коллектора, а значение I_K близко к $I_{\mathcal{E}}$. Отношение этих токов $h_{21B} = I_K / I_{\mathcal{E}}$ называют *статистическим коэффициентом передачи тока в схеме с общей базой*. Обычно $h_{21B} = 0,95 \div 0,995$, а I_B во много раз меньше I_K .

Для токов транзистора выполняется первый закон Кирхгофа (алгебраическая сумма токов в узле цепи равна нулю) т. е. $I_{\mathcal{E}} = I_K + I_B$.

Не смотря на то, что выходной ток I_K несколько меньше входного $I_{\mathcal{E}}$, транзистор, включённый по схеме рис.18,а, усиливает напряжение и мощность. Предположим, что напряжение на эмиттере изменяется на $\Delta U_{\mathcal{E}}$, что вызвало изменение токов эмиттера $\Delta I_{\mathcal{E}}$ и коллекторе ΔI_K , а также напряжения на коллекторе ΔU_K . Коэффициент усиления по напряжению на малом сигнале $K_U = \Delta U_K / \Delta U_{\mathcal{E}}$.

Транзистор *p-n-p-типа* действует аналогично транзистору *n-p-n-типа* с той лишь разницей, что в его базу инжектируются не электроны, а дырки; полярности напряжений и направления токов обратны по отношению к *n-p-n-транзистору*.

По режимам работы *p-n-переходов* различают четыре режима работы транзистора: *активный, насыщения, отсечки и инверсный*.

В активном режиме эмиттерный переход открыт, коллекторный закрыт. Этот режим работы является обычным усилительным, при котором искажения сигнала минимальны.

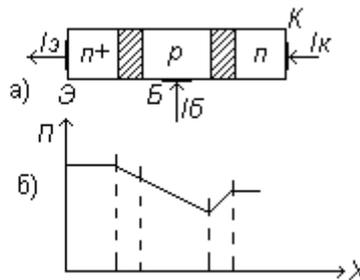


Рисунок 32 – Падение напряжений на p-n-переходах (а) и распределение концентрации электронов (б) в n-p-n-транзисторах в режиме насыщения

В режиме насыщения оба перехода открыты. Падения напряжений на открытых эмиттерном и коллекторном переходах направлены встречно, однако ток в цепи эмиттер – коллектор проходит в одном направлении, например от коллектора к эмиттеру в транзисторе *n-p-типа* (рис.32,а). Транзистор работает в режиме насыщения при относительно больших токах базы. Инжекции электронов в базу при этом становится столь сильной, что цепь коллектора оказывается не способной извлекать избыточные электроны из базы так же эффективно, как в активном режиме. Концентрация электронов в базе у коллекторного перехода становится сравнимой с концентрацией у эмиттерного перехода (рис.32,б), что соответствует прямой полярности напряжения на коллекторном переходе. Вывести транзистор из режима насыщения при заданном токе базы можно, увеличив ток коллектора изменением режима ра-

боты его внешней цепи, например, уменьшив внешнее сопротивление в его цепи при неизменном напряжении питания.

В режиме отсечки оба перехода закрыты. Он характеризуется очень малыми токами через запертые переходы транзистора.

В инверсном режиме эмиттерный переход закрыт, а коллекторный открыт, т. е. транзистор включён «наоборот»: коллектор работает в качестве эмиттера, эмиттер – в качестве коллектора. Из-за особенностей конструкции реальных транзисторов усилительные свойства их в инверсном, как правило, неудовлетворительны.

В зависимости от того, какой из трёх электродов является общим (т. е., от какого электрода «отсчитывается» входное и выходное напряжения), существуют три схемы включения транзистора: с общей базой (ОБ), общим эмиттером (ОЭ) и общим коллектором (ОК) (рис.33,а – в). Схемы включения различаются параметрами, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Схема включения		
	ОБ	ОЭ	ОК
Усиление тока	Меньше 1	Высокое	Высокое
Усиление напряжения	Более 100	Несколько сотен	Около 1
Усиление мощности	Среднее	Высокое	Низкое
Вх. сопротивление	Низкое	Низкое	Высокое
Вых. сопротивление	Высокое	Среднее	Низкое

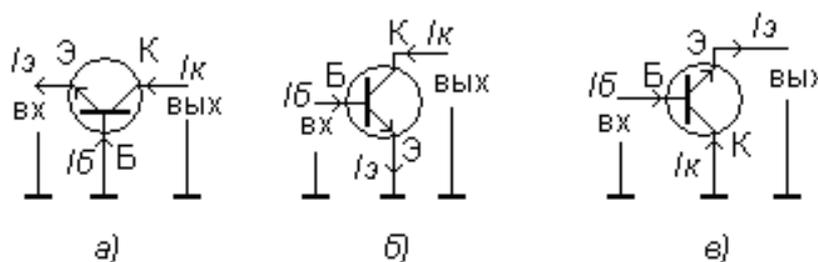


Рисунок 33 – Схемы включения транзисторов а) с ОБ; б) с ОЭ; в) с ОК

В схемах ОЭ и ОК, для которых входным током является $I_{\text{Б}}$, коэффициент передачи (усиления) тока составляет несколько десятков и более. Учитывая соотношение токов транзистора, для статических коэффициентов передачи тока в схемах ОЭ и ОК можно получить: $h_{21\text{Э}} = h_{21\text{Б}} / (1 - h_{21\text{Б}})$, $h_{21\text{К}} = 1 / (1 - h_{21\text{Э}})$.

Коэффициент усиления по напряжению в схеме с ОЭ соизмерим с таким же коэффициентом у схемы с ОБ. По коэффициенту усиления по мощности схема с ОЭ за счёт значительно большего коэффициента по току ($h_{21\text{Э}}$

=β) многократно превосходит схему с ОБ. Благодаря отмеченным свойствам, схема с ОЭ нашла очень широкое применение.

Практические схемы включения транзисторов отличаются от приведенных на рис.33 добавлением радиокомпонентов (резисторов, конденсаторов, индуктивностей и др.) для задания рабочего режима, нагрузки, разделения переменной и постоянной составляющих токов в цепи.

Инерционные свойства транзисторов проявляются при быстрых изменениях входного сигнала, например $I_{\text{Э}}$. Они обусловлены конечным временем «пролёта» носителей зарядов. В итоге выходной сигнал (ток $I_{\text{К}}$) будет иметь искажённую форму. Если у транзистора, работающего в активной области, скачком изменить ток эмиттера на $\Delta I_{\text{Э}}$ (рис.34,а), то ток коллектора $I_{\text{К}}$ вначале практически не меняется, а затем начинает нарастать до установившегося значения по сложному закону, увеличиваясь на $\Delta I_{\text{К}}$ (рис.34,б).

В инженерной практике чаще всего считают, что изменения выходного сигнала происходят по экспоненте с задержкой на время $t_{\text{зд}}^{\alpha}$. Экспоненциальная функция имеет постоянную времени τ_{α} , приблизительно равную времени, в течение которого выходной сигнал достигает 0,63 установившегося значения. Изменение выходного сигнала не соответствует изменениям входного. Это свидетельствует о том, что коэффициент α является сложной функцией времени. Так как данная зависимость достаточно сложная, при практических расчётах её заменяют более простыми функциями.

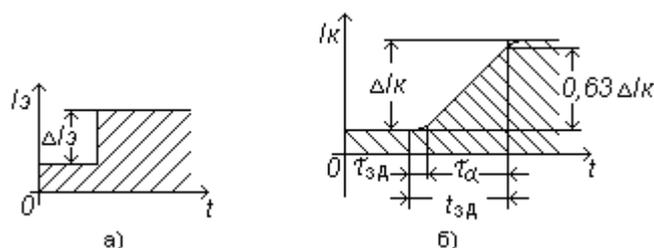


Рисунок 34 – Диаграмма изменения тока эмиттера (а) и тока коллектора(б)

Входные и выходные характеристики схемы с ОЭ

Работу любой схемы на транзисторах обычно описывают с помощью входных и выходных характеристик транзистора в той или иной схеме включения. Для схемы с ОЭ входная характеристика – это зависимость входного тока от напряжения на входе схемы, т. е. $I_{\text{Б}} = f(U_{\text{БЭ}})$ при фиксированных значениях напряжения коллектор – эмиттер ($U_{\text{КЭ}} = \text{const}$).

Выходные характеристики – это зависимости выходного тока, т. е. тока коллектора, от падения напряжения между коллектором и эмиттером транзистора $I_{\text{К}} = f(U_{\text{БЭ}})$ при токе базы $I_{\text{Б}} = \text{const}$.

Входная характеристика по существу повторяет вид характеристики диода при подаче прямого напряжения (рис.21,б). С ростом напряжения $U_{\text{К}}$ незначительно смещаться вправо.

Вид выходных характеристик (рис.35,а) резко различен в области малых значений (участок ОА) и относительно больших значений $U_{КЭ}$. Для нормальной работы транзистора необходимо, чтобы на переход база – эмиттер подавалось прямое напряжение, а на переход база – коллектор – обратное.

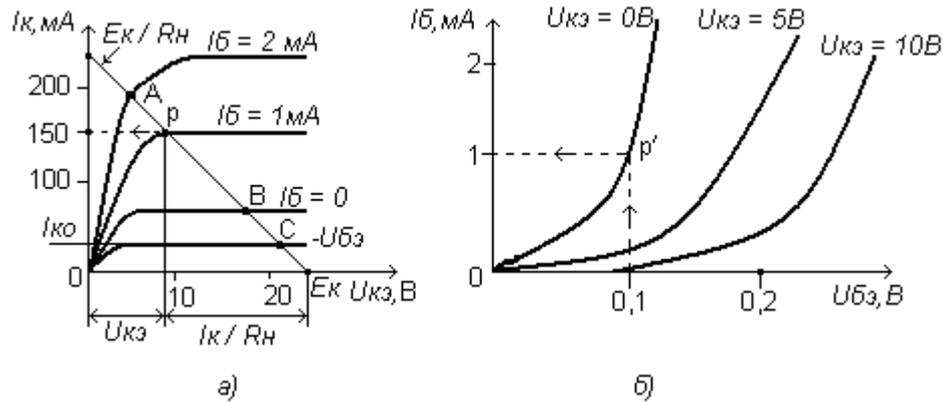


Рисунок 35 – Выходные (а) и входные (б) характеристики транзистора в схеме с ОЭ

Поэтому, пока $|U_{КЭ}| < U_{БЭ}$, напряжение на коллекторном переходе оказывается прямым, что резко уменьшает ток I_K . При $|U_{КЭ}| > U_{БЭ}$ напряжение на коллекторном переходе $U_{БК} = U_{КЭ} - U_{БЭ}$ становится обратным и, следовательно, мало влияет на величину коллекторного тока, который в основном определяется током эмиттера. При таком напряжении все носители, инжектированные эмиттером в базу и прошедшие через область базы, устремляются к внешнему источнику. При напряжении $U_{БЭ} < 0$ эмиттер носителей не инжектирует и ток базы $I_B = 0$, однако в коллекторной цепи протекает ток $I_{К0}$ (самая нижняя выходная характеристика). Этот ток соответствует обратному току I_0 обычного *p-n-перехода*.

При работе транзистора изменяется его режим. Действительно, чем больше ток, протекающий через транзистор, тем больше падение напряжения на нагрузке, а следовательно, тем меньшее напряжение будет падать на самом транзисторе. Характеристики, представленные на рис.35, а, б, описывают лишь *статический режим* работы схемы. Для оценки динамического режима и влияния нагрузки на работу схемы используют графо-аналитический метод расчёта на основе входных и выходных характеристик схемы с ОЭ.

Проведём прямую через точку E_K , отложенную на оси абсцисс, и точку E_K / R_K (т. е. $R_{НАГР.}$ коллектора), отложенную на оси ординат выходных характеристик транзистора. Полученная прямая называется *нагрузочной*. Точка E_K / R_H этой прямой соответствует максимальному току коллектора $I_{K,МАХ}$ при полностью открытом транзисторе. Точка E_K соответствует другому крайнему случаю – цепь разомкнута, ток через нагрузку равен нулю, а напряжение $U_{КЭ} = E_K$. Точка p пересечения нагрузочной прямой с *статической* выходной характеристикой, соответствующей входному току $I_B = I_{К0}$, (т. е. току покоя транзистора) определит рабочий режим схемы, т. е. ток в нагрузке I_K , падение напряжения на ней $U_H = I_K R_H$ и падение напряжения

$U_{КЭ}$ на самом транзисторе. На рис.35,а точка p соответствует подаче на транзистор тока базы $I_B = 1\text{мА}$. Нетрудно видеть, что подача тока базы $I_B = 2\text{мА}$ приводит к смещению рабочей точки в точку A и перераспределению напряжений между нагрузкой и транзистором.

Пример расчёта. Рассчитать схему с ОЭ и $R_K = 110\text{ Ом}$ при входном напряжении $U_{БЭ} = +0,1\text{В}$, напряжении питания $E_K = +25\text{В}$, используя характеристики транзистора.

Решение.

1. Найдём отношение $E_K / R_H = 25 / 110 = 28\text{мА}$ и, отложив найденную точку на оси I_K и значение $E_K = +25\text{В}$ на оси $U_{КЭ}$, проведём нагрузочную прямую.

2. По входной характеристике для напряжения $U_{БЭ} = 0,1\text{В}$ определим входной ток $I_B = 1\text{мА}$.

3. Точка пересечения p прямой с кривой характеристикой, соответствующей $I_B = 1\text{мА}$, определит ток $I_K = 150\text{ мА}$.

4. Напряжение на нагрузке равно $U_H = I_K \cdot R_H = 0,15 \cdot 110\text{В} = 16,5\text{В}$.

5. Напряжение между коллектором и эмиттером транзистора

$$U_{КЭ} = E_K - I_K \cdot R_H = 25 - 16,5 = 8,5\text{ В}.$$

В заключение отметим, что режим, соответствующий точке A , называют *режимом насыщения* (при заданных значениях R_K , и E_K ток I_K в точке A достигает наибольшего возможного значения). Режим, соответствующий точке B (входной сигнал равен нулю), а также точке C (входной сигнал отрицателен и запирает транзистор), называют *режимом отсечки*. Все промежуточные состояния транзистора с нагрузкой между точками A и B относятся к *активному режиму* его работы.

Основные параметры биполярных транзисторов и их ориентировочные значения

1. Коэффициенты передачи эмиттерного и базового тока

$$h_{2\varepsilon} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} n \quad \text{и} \quad h_{2Б} = \frac{\Delta I_B}{\Delta I_K} n \quad \text{и} \quad h_{2\varepsilon} \cdot h_{2Б} = 1$$

2. Дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода (единицы – десятки Ом).

$$r_{\varepsilon} = \frac{\Delta U_{\varepsilon}}{\Delta I} \approx \frac{U_{\varepsilon}}{I_{\varepsilon}}$$

3. Обратный ток коллекторного перехода при заданном обратном напряжении (несколько наноампер – десятки миллиампер)

$$I_{КБ} = I_{\alpha} n \quad \text{и} \quad U_{КБ} \ll 0.$$

4. Объёмное сопротивление базы r_B (десятки – сотни Ом); коэффициент внутренней обратной связи по напряжению $h_{12Б}$ ($10^{-3} \dots 10^{-4}$).

5. Выходная проводимость h_{22} или дифференциальное сопротивление коллекторного перехода (доли – сотни мкСм)

$$r_{к.д} = \frac{1}{h_{2\varepsilon}} = \frac{\Delta U_K}{\Delta I_K} n \quad \text{и} \quad r_{к.д} \approx \frac{1}{h_{2\varepsilon}} \approx \frac{\Delta U_K}{\Delta I_K} n \quad \text{и} \quad h_{2\varepsilon} = \frac{1}{r_{к.д}}$$

6. Максимально допустимый ток коллектора $I_{K.max}$ (сотни миллиампер – десятки ампер).

7. Напряжение насыщения коллектор – эмиттер $U_{KЭ.нас}$ (десятые доли – один вольт).

8. Наибольшая мощность рассеяния коллектором $P_{K.max}$ (милливатт – десятки ватт).

9. Ёмкость коллекторного перехода C_K (единицы – десятки пикофарад).

10. Тепловое сопротивление между коллектором и корпусом транзистора $R_T = \Delta T / P_{K.max}$, где ΔT – перепад температур между коллекторным переходом и корпусом.

11. Предельная частота коэффициента передачи тока f_{h21} , на которой коэффициент передачи h_{21} уменьшается до 0,7 своего статического значения.

12. Максимальная частота генерации $f_{Г.max}$ – это наибольшая частота, на которой может работать автогенератор. На этой частоте коэффициент усиления транзистора ≈ 0 .

Условные обозначения биполярных транзисторов

Обозначения транзисторов состоят из шести или семи элементов. Первый элемент – буква, указывающая исходный материал: Г – германий, К – кремний, А – арсенид галлия. Для транзисторов специального назначения первый элемент – цифра: 1 – германий, 2 – кремний, 3 – арсенид галлия. Второй элемент – буква Т. Третий элемент – число, присваиваемое в зависимости от назначения транзистора (см. таблицу 2). Четвёртый, пятый и шестой элементы – цифра, означающая порядковый номер разработки. Шестой (седьмой) элемент – буква, указывающая разновидность типа из данной группы приборов, например: ГТ108А, 2Т144А, 2Т392А-2, КТ602А, КТ801Б, КТ958А и т. д.

Таблица 2

Обозначение транзистора	Мощность, рассеиваемая транзистором	Граничная частота коэффициента тока, МГц				
		до 3	до 30	более 30	30...300	Свыше 300
Шестизначное	Малая	1	2	3	–	–
	Средняя	4	5	6	–	–
	Большая	7	8	9	–	–
Семизначное	До 1 Вт	–	1	–	2	4
	Свыше 1 Вт	–	7	–	8	9

Контрольные вопросы и задания

1. Структура биполярного транзистора.
2. Принцип действия биполярных транзисторов.

3. Какие носители формируют ток в транзисторе р-п-р-типа и какие в транзисторе п-р-п-типа?
4. Режимы работы биполярных транзисторов.
5. Разновидности схем включения транзисторов, их краткая характеристика.
6. Что усиливает схема с ОБ: ток или напряжение? Объясните почему.
7. В каком случае в схеме с ОЭ наступает режим насыщения, и в каком – отсечки?
8. Почему схему с ОК называют эмиттерным повторителем?
9. Какие параметры характеризуют работу транзисторов на низких и высоких частотах?
10. Как, используя входную ВАХ и параметры транзистора, определить коэффициент усиления по току?
11. Как, используя выходную ВАХ транзистора, выбрать линейный режим усиления сигнала?
12. Основные параметры биполярных транзисторов.
13. Условные обозначения биполярных транзисторов.

Лекция № 6. Биполярные транзисторы с инжекционным питанием, особенности структуры, области применения. Тиристоры, принцип работы, характеристики, разновидности, области применения.

Биполярные транзисторы с инжекционным питанием – класс п/п приборов, появившихся в результате развития интегральной технологии (рис.36). На их основе выполняются экономичные логические элементы, запоминающие устройства (ЗУ), аналого-цифровые преобразователи и т. д. Компоненты, выполненные на основе биполярных транзисторов с инжекционным питанием, имеют высокую степень интеграции, потребляют малую мощность, нормально функционируют при изменениях в широких пределах напряжения питания и потребляемой мощности, хорошо согласуются с существующими устройствами, построенными на биполярных транзисторах.

Отличительной особенностью биполярных транзисторов с инжекционным питанием является наличие дополнительной области с электропроводностью того же типа, что и у базы транзистора и, следовательно, дополнительного *p-n-перехода*. Дополнительная область носит название *инжектора* (И). Таким образом, транзистор с инжекционным питанием представляет собой четырёхслойную структуру $p_1 - n_1 - p_2 - n_2$ (рис.36,а), в которой можно выделить два транзистора $n_2 - p_2 - n_1$ и $p_1 - n_1 - p_2$ – типов, соединённых между собой как показано на рис.36,б. Дополнительный *p - n - переход* называют *инжекторным*.

Предположим, что эмиттер и база транзистора разомкнуты, а к инжекторному *p-n-переходу* подключено напряжение E , смещающее его в прямом направлении (рис.36,в). Пусть также к коллектору приложен запирающий потенциал $U_{кэ}$. Тогда из области инжектора в область эмиттера инжектируются дырки, а из эмиттера в инжектор – электроны.

Для упрощения считаем, что вследствие различных удельных проводимостей областей инжекция имеет односторонний характер, и учитываем только дырки, инжектируемые в эмиттер. В эмиттерной области у инжекторного *p-n-перехода* возникает избыточная концентрация дырок, которые в соответствии в соответствии с принципом электронейтральности компенсируются электронами, поступающими в цепь эмиттера от внешнего источника. Вследствие диффузии носители заряда движутся от инжекторного *p-n-перехода* в глубь эмиттера.

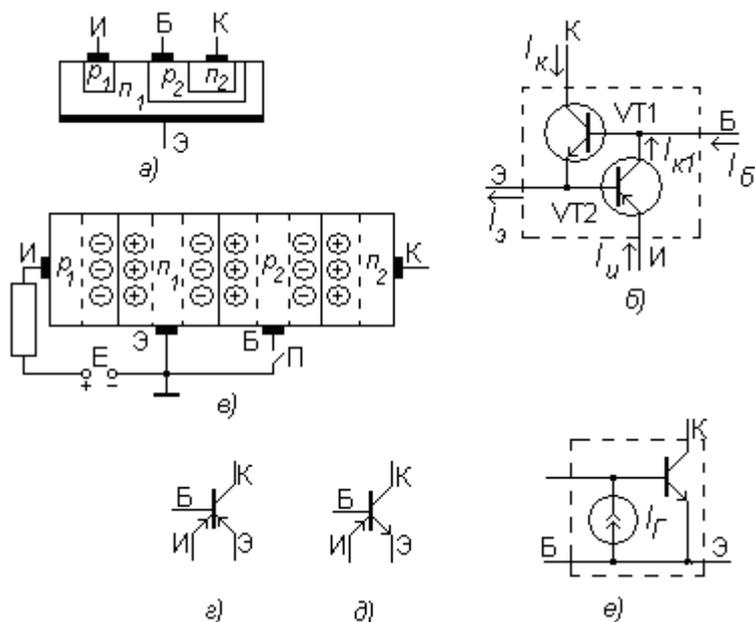


Рисунок 36 – Планарный биполярный транзистор с инжекционным питанием
 а) структура; б) двухтранзисторная модель; в) подключение напряжений; г) условное обозначение транзистора с инжектором n-типа; д) условное обозначение транзистора p-типа; е) эквивалентная схема

Достигнув эмиттерного *p-n-перехода*, дырки захватываются его полем и переходят в область базы, частично компенсируя заряд отрицательно заряженных ионов концепторной проводимости. Часть электронов, пришедших к переходу вместе с дырками, компенсирует заряды положительно заряженных ионов донорной примеси. Это приводит к снижению потенциального барьера эмиттерного *p-n-перехода* и уменьшению его ширины, т. е. последний смещается в прямом направлении.

В результате смещения эмиттерного *p-n-перехода* оставшаяся часть электронов, пришедших с дырками, перемещается в область базы, что эквивалентно их инжекции из области эмиттера. Дырки в базе, не рекомбинировавшие с ионами, обеспечивают её электронейтральность. Эти носители заряда диффундируют в глубь базы к коллекторному *p-n-переходу* и, достигнув последнего, аналогичным образом смещают его в прямом направлении. Таким образом, и эмиттерный, и коллекторный переходы транзистора *n-p-n*-типа смещены в прямом направлении, что, как известно из теории транзисторов, характеризует режим насыщения транзистора *VT1*. В режиме насыщения сопротивление транзистора и падение напряжения на нём малы и его можно рассматривать как замкнутый ключ.

Всё сказанное справедливо для случая, когда максимальный ток источника внешнего напряжения, создающего на коллекторе потенциал $U_{КЭ}$, меньше или равен току насыщения $I_{К.нас.}$.

Условные обозначения инжекционных транзисторов $n_1 - p_1 - n_2 - p_2$ и $p_1 - n_1 - p_2 - n_2$ типов приведены на *рис.22, г, д*.

В применяемых на практике устройствах у одного транзистора обычно имеется несколько коллекторных областей (многоколлекторный транзистор). В ряде конструкций и инжектор является общим для группы транзисторов.

Схемы на транзисторах с инжекторным питанием нормально функционируют при изменениях питающих токов в широких пределах. С увеличением тока их быстродействие возрастает, он при этом увеличивается потребляемая мощность.

Тиристоры

Тиристоры – это $p-n-p$ приборы с тремя или более $p-n$ -переходами, которые имеют два устойчивых состояния и применяются как мощные электронные ключи.

В зависимости от конструктивных особенностей и свойств тиристоры делятся на диодные (динистры) и триодные (тристоры).

Диодные тиристоры (динистры) имеют два вывода от крайних, чередующихся p - и n -областей (рис.37,а)

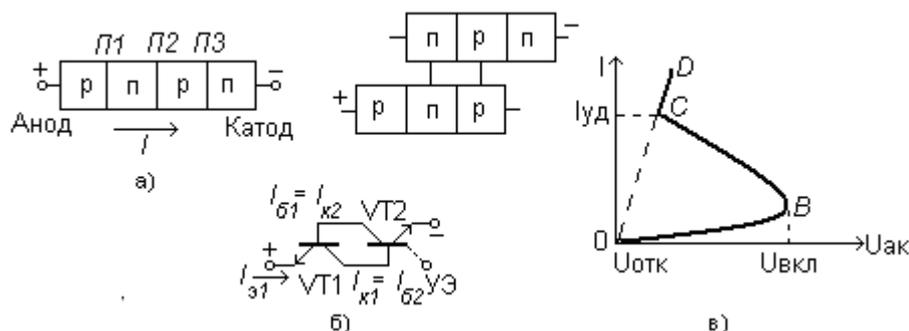


Рисунок 37 – Диодный тиристор и его структура (а), эквивалентная схема (б) и ВАХ (в)

Вывод, соединённый с крайней p -областью, называется *анодом*, а с n -областью – *катодом*. Внешнее напряжение U является прямым по отношению к переходам П1 и П3 и обратным для перехода П2, поэтому переходы П1 и П3 открыты (подобно открытым диодам), а переход П2 заперт. В результате напряжение U почти целиком приложено к П2 и через тиристор протекает небольшой ток, являющийся обратным током I_0 $p-n$ -перехода.

С увеличением напряжения ток через динистор несколько возрастает (участок 0В характеристики на рис.37), а при достижении напряжением, приложенным между анодом и катодом, значения $U_{вкл}$, лавинообразно увеличивается, ограничиваясь только сопротивлением нагрузки. Поясним этот процесс.

Динисторы подразделяют на: запираемые в обратном направлении; проводящие в обратном направлении; симметричные.

Тиристоры (рис.38) отличаются от динисторов тем, что он имеет внешний вывод, который называют управляющим электродом. При подаче управляющего тока на этот электрод ток через переход p_2-n_2 увеличивается. Увеличение тока через запертый коллекторный $p-n$ -переход аналогично увеличению приложенного напряжения. Поэтому изменяя ток, можно менять напряжение, при котором происходит переключение тиристора, и тем самым управлять моментом его включения.

Тиристор можно представить как два биполярных транзистора $VT1$ и $VT2$ (рис.37,б). Небольшое приращение тока $\Delta I_{Э1} = \Delta I$ вызывает (как в обычном транзисторе) приращение тока коллектора ΔI_{K1} , который поступая на базу $VT2$, вызывает приращение его коллекторного тока $\Delta I_{K2} = \Delta I_{Б2} \beta_2 = \Delta I_{K1} \beta_2$, где β_2 – коэффициент передачи тока $VT2$. Но ток коллектора $VT2$, как показано по схеме, является базовым для $VT1$ ($\Delta I_{K2} = \Delta I_{Б1}$), поэтому ток I_{K1} , в свою очередь, увеличивается: $\Delta I_{K1} = \Delta I_{Б1} \beta_1 = \Delta I_{K1} \beta_2 \beta_1$ и т. д.

Этот процесс соответствует участку BC ВАХ с отрицательным сопротивлением и переводит тиристор в открытое состояние, когда он ведёт себя как диод в прямом направлении.

Чтобы запереть (погасить) тиристор, необходимо уменьшить ток I , протекающий через него, до значения, меньше удерживающего $I_{уд}$. Если напряжение U , питающее схему, переменное, то тиристор запирается в отрицательный полупериод, когда ток I достигает нуля, если же оно постоянное, то для запираания тиристора применяют схему *гашения*.

Перевод тиристора из запертого состояния в открытое можно вызвать не только повышением анодного напряжения, но и кратковременным увеличением тока базы в одном из транзисторов его эквивалентной схемы. Для этого от одной из баз делают вывод *управляющий электрод* (УЭ) рис. 38,а,б.

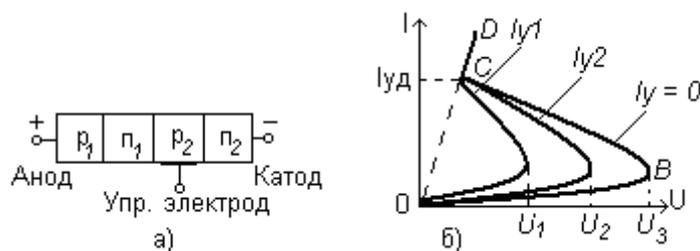


Рисунок 38 – Триодный (управляемый) тиристор
а) структура; б) ВАХ-ки

Подавая импульс тока $I_{УПР}$ на управляющий электрод (рис.38,а), можно вызвать лавинообразное увеличение тока при $U < U_{вкл.}$. Такие тиристоры называют триодными (управляемыми) тиристорами.

Тиристоры подразделяют на: запираемые в обратном направлении с управлением по аноду и катоду; проводящие в обратном направлении с управлением по аноду и катоду; симметричные (двунаправленные). Кроме того в их состав входит группа выключаемых тиристоров.

Тиристоры нашли своё применение в силовой электронике и электротехнике – там, где требуется формирование мощных питающих напряжений

постоянного или переменного тока, питающих напряжений с регулируемой частотой специальной формы. В частности, на основе тиристоров разрабатываются устройства регулирования частотой вращения электродвигателей, в том числе в приводах станков.

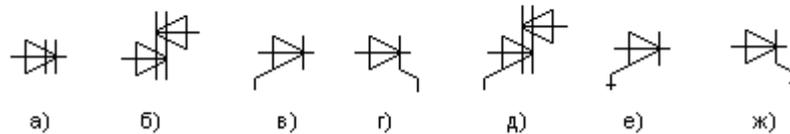


Рисунок 39 – Условные обозначения тиристоров:

а) диодный; б) диодный симметричный; в) триодный незапираемый с управлением по аноду; г) триодный незапираемый с управлением по катоду; д) триодный симметричный; е) триодный запираемый с управлением по аноду; ж) триодный запираемый с управлением по катоду

Основные параметры тиристоров и их ориентировочные значения

1. Напряжение переключения (постоянное и импульсное) (десятки – сотни вольт).
2. Падение напряжения на открытом тиристоре ΔU (1...3 В).
3. Обратное напряжение U_{OBR} . – напряжение, при котором тиристор работает длительное время без нарушения его работы (единицы – тысячи вольт).
4. Максимальное значение прямого напряжения U_{AK} , при котором не происходит включение динистора (единицы – сотни вольт).
5. Наибольшее напряжение на управляющем электроде $U_{УПР.}$, не вызывающее отпирание тиристора (доли вольта).
6. Запирающее напряжение на управляющем электроде $U_{У.зан.}$ – напряжение, обеспечивающее требуемое значение запирающего тока управляющего электрода (единицы – десятки вольт).
7. Максимальное значение тока открытого тиристора (сотни мА – сотни ампер).
8. Ток удержания $I_{УД}$ (десятки – сотни мА)
9. Обратный ток тиристора I_{OBR} . (доли мА).
10. Отпирательный ток тиристора – наименьший ток управляющего электрода, необходимый для включения тиристора (десятки мА).
11. Максимальная скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии (от десятков до сотен В/мкс).
12. Время включения $t_{ВКЛ.}$ – время с момента подачи отпирательного импульса, до момента, когда напряжение на тиристоре уменьшится до 0,1 своего начального значения (единицы – десятки мкс).
13. Время выключения $t_{ВЫКЛ.}$ – минимальное время, в течение которого к тиристору должно прикладываться запирающее напряжение (десятки – сотни мкс).
14. Рассеиваемая мощность P (единицы – десятки Ватт).

Обозначения тиристоров состоят из шести элементов. Первый элемент – буква К, указывающая исходный материал п /п; второй – буква Н для динисторов и У для тиристоров; третий – цифра, определяющая назначение прибора; четвёртый и пятый – порядковый номер разработки; шестой – буква, определяющая технологию изготовления, например КУ201А, КН103И и т. д.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое инжекторный транзистор и его условное обозначение?
2. Структура планарного транзистора с инжекторным питанием.
3. Достоинства и недостатки транзисторов с инжекторным питанием.
4. Объяснить особенность устройства многоэмиттерного транзистора.
5. Структура р-п-переходов у тиристора.
6. Особенности ВАХ тиристорov.
7. Отличие динистора от тиристора.
8. Разновидности динисторов.
9. Способы управления тиристором.
10. Области применения динисторов и тиристорov.
11. Что такое запирающее напряжение и отпирающий ток?
12. Основные параметры тиристорov.
13. условное обозначение тиристорov.
14. Рекомендации по использованию **h**-параметров и **u**-параметров при расчёте электронных устройств.

Лекция № 7. Полевые транзисторы, их устройство, принцип работы, характеристики, области применения.

Особенности структур полевых транзисторов

Полевой транзистор – это полупроводниковый прибор, имеющий три электрода: исток, сток и затвор. Между истоком и стоком в кристалле полупроводника, из которого выполнен полевой транзистор, расположен канал, через который течёт ток транзистора. Канал выполняется из полупроводника одного типа – n или p . Управление током, текущим через канал, осуществляется путём изменения проводимости канала, которая зависит от напряжения между затвором и истоком. В отличие от биполярных транзисторов, в которых ток транзистора от эмиттера к коллектору течёт последовательно через два p - n -перехода, в полевых транзисторах ток течёт через канал, который образуется в полупроводнике одного типа проводимости, и через p - n -переход не течёт. Так как направление тока в полевом транзисторе – от истока – через канал – к стоку, а управление током осуществляется напряжением между затвором и истоком, то исток соответствует эмиттеру биполярного транзистора; сток – коллектору, а затвор – базе.

Изменение проводимости канала может осуществляться двумя способами. В зависимости от этого полевые транзисторы делятся на два основных вида: транзисторы с *управляющим p - n -переходом* и транзисторы с *изолированным затвором*.

Полевые транзисторы с управляющим p - n -переходом

В полевых транзисторах с управляющим p - n -переходом управление током транзистора достигается путём изменения сечения канала за счёт изменения области, занимаемой этим переходом. Управляющий p - n -переход образуется между каналом и затвором, которые выполняются из полупроводников противоположных типов проводимости. Так, если канал образован полупроводником n -типа (рис. 40,а), то затвор – полупроводником p -типа. Напряжение между затвором и истоком всегда подаётся обратной полярности, т. е. запирающей p - n -переход. При подаче напряжения обратной полярности область, занимаемая p - n -переходом, расширяется. При этом расширяется и область, обеднённая носителями заряда, а значит, сужается область канала, через которую может течь ток. Причём, чем больше значение запирающего напряжения, тем шире область, занимаемая p - n -переходом, и тем меньше сечение и проводимость канала. Условные обозначения транзисторов с разными каналами показаны на рис. 40 б, в.

В отличие от биполярного, работа полевого транзистора может также описываться непосредственной зависимостью выходного параметра – тока стока от входного – управляющего напряжения между затвором и истоком.

Эти характеристики называются *передаточными (переходными)*, или *стокзатворными*.

Так как управляющий *p-n*-переход всегда заперт, у полевого транзистора практически отсутствует входной ток. Благодаря этому они имеют очень высокое входное сопротивление и практически не потребляют мощности от источника управляющего сигнала. Это свойство относится не только к транзисторам с управляющим *p-n*-переходом, но и ко всем полевым транзисторам, что выгодно отличает их от биполярных с точки зрения более высокого КПД.

Полевые транзисторы с изолированным затвором

Если в полевых транзисторах с управляющим *p-n*-переходом затвор имеет электрический контакт с каналом, то в полевых транзисторах с изолированным затвором такой контакт отсутствует. В этих транзисторах (рис. 5, а) затвор представляет собой тонкую плёнку металла, изолированного от полупроводника. В зависимости от вида изоляции различают МДП и МОП-транзисторы. Аббревиатура «МДП» расшифровывается как «металл – диэлектрик – полупроводник», а «МОП» – как «металл – оксид – полупроводник». В последнем случае под «оксидом» понимается оксид кремния, который является высококачественным диэлектриком.

Исток и сток формируют в виде сильно легированных областей полупроводника. За счёт этого области стока и истока имеют высокую концентрацию носителей, что отмечено на рисунке знаком «+». Как МДП-, так и МОП- транзисторы могут быть выполнены с каналом *p*- и *n*-типов. Канал в этой группе транзисторов может быть *встроенным* (т. е. созданным при изготовлении) и *индуцированным* (т. е. наводящимся под влиянием напряжения, приложенного к затвору).

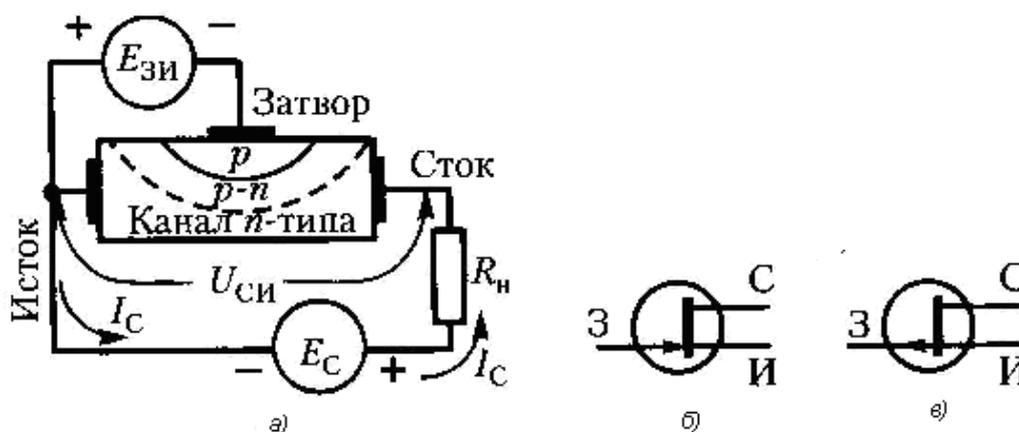


Рисунок 40 – Полевые транзисторы:

а) с управляющим *p-n*-переходом; б) и в) – условное обозначение транзисторов с *n*-каналом и *p*-каналом

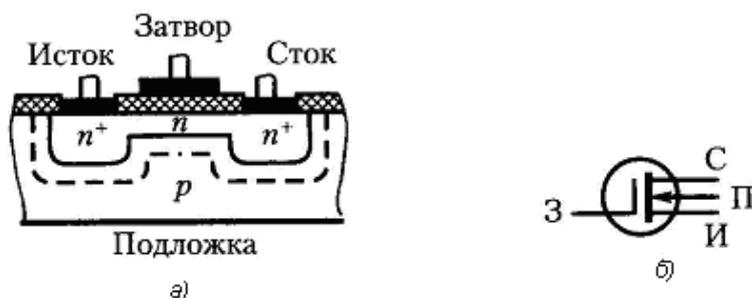


Рисунок 41 – Полевой транзистор:

а) с изолированным затвором и встроенным каналом и его условное обозначение б)

Полевые транзисторы с встроенным каналом

Разновидностью транзистора с изолированным затвором является транзистор с встроенным каналом. На рис. 41, а изображён МДП-транзистор с встроенным каналом n -типа (тонким слоем полупроводника n -типа), соединяющим исток и сток (n^+ – области). Эти области образованы в подложке – полупроводнике p -типа. Строго говоря, в МДП- и МОП-транзисторах не три, а четыре электрода, включая подложку. Однако часто подложку электрически соединяют с истоком (или стоком), образуя три вывода.

В зависимости от полярности напряжения $U_{зи}$, приложенного к затвору относительно истока, в канале может изменяться концентрация основных носителей (в рассматриваемом случае – электронов). При отрицательном напряжении на затворе $U_{зи}$ электроны выталкиваются из области канала в области n^+ , канал обедняется носителями и ток I_C снижается. Положительное напряжение на затворе втягивает электроны из областей n^+ в канал и ток I_C через канал возрастает. Таким образом, в отличие от полевого транзистора с p - n -переходом в этом полевом транзисторе управляющее напряжение может быть как отрицательным, так и положительным.

Полевой транзистор с индуцированным каналом

Этот вид транзистора отличается от предыдущего тем, что при отсутствии напряжения на затворе канал отсутствует, так как n -области истока и стока образуют с p -подложкой два p - n -перехода, включённые навстречу друг другу, и, значит, при любой полярности напряжения $U_{си}$ один из переходов заперт (рис. 42, а).

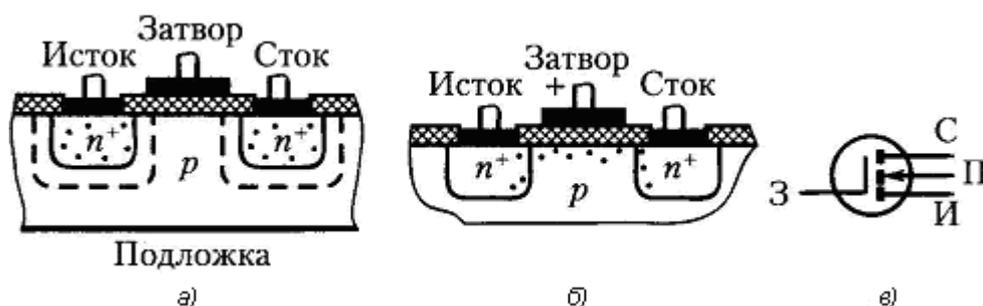


Рисунок 42 – Полевой транзистор:

а) с индуктивным каналом в исходном состоянии; б) при приложенном напряжении на затворе; в) условное обозначение

Если же на затвор подать напряжение больше порогового $U_{зи} > U_{зипор.}$, то созданное им электрическое поле вытягивает электроны из n^+ -областей (и в какой то мере из подложки), образуя тонкий слой n -типа в приповерхностной области p -подложки (рис. 42,б). Этот слой соединяет исток и сток, являясь каналом n -типа. От подложки канал изолирован возникшим обеднённым слоем.

Таким образом, полевые транзисторы с индуцированным n -каналом (n -МОП-транзисторы), в отличие от рассмотренных ранее полевых транзисторов, управляются только положительным сигналом $U_{зи}$. Значение порогового напряжения у них $0,1 \div 0,2$ В.

Значительно больше пороговое напряжение у p -МОП-транзистора, принцип работы которого аналогичен n -МОП-транзистору. Но в связи с тем, что носителями в нём служат дырки, а не электроны, полярность всех напряжений у этого транзистора противоположна n -МОП-транзистору.

Значение порогового напряжения этого типа транзисторов составляет $2 \div 4$ В.

Особенностью таких транзисторов является то, что форма переходной характеристики такая же как входная характеристика у биполярных транзисторов.

Как и биполярные, полевые транзисторы можно включать по схеме с общим затвором (ОЗ), общим истоком (ОИ) и общим стоком (ОС). Наиболее распространена схема включения с ОИ, которая, подобно схеме с ОЭ биполярных транзисторов, обеспечивает одновременно усиление по току, напряжению и мощности.

Преимущества полевых транзисторов

К преимуществам полевых транзисторов следует отнести:

- 1) высокое входное сопротивление в схеме с ОИ;
- 2) малый уровень собственных шумов, т. к. перенос тока осуществляют только основные для канала носители и, следовательно, нет рекомбинационного шума;
- 3) высокая устойчивость против температурных и радиоактивных воздействий;
- 4) высокая плотность расположения элементов при изготовлении интегральных микросхем.

В транзисторах со встроенным каналом ток в цепи стока протекает и при нулевом напряжении на затворе. Для его прекращения необходимо к затвору приложить положительное (при структуре с каналом p -типа) или отрицательное (при структуре с каналом n -типа), равное или большее $U_{зиотс.}$ (рис.43,б).

Отметим также интересную особенность полевых транзисторов: в принципе исток и сток в транзисторах равноправны, т. е. в зависимости от полярности приложенного напряжения исток и сток могут меняться местами. На этом свойстве основано использование полевых транзисторов в качестве электронных ключей вместо обычных контактных переключателей.

Полевые транзисторы широко используются в усилителях, генераторах, преобразователях сигналов и другой радиоэлектронной аппаратуре, а МОП-транзисторы являются основой для разработки всех современных средств вычислительной техники и аппаратуры цифровой обработки информационных сигналов.

Сравнивая условные обозначения полевых транзисторов, заметим, что стрелка в них *всегда направлена от p-области к n-области*, что позволяет легко установить, например, тип канала транзистора.

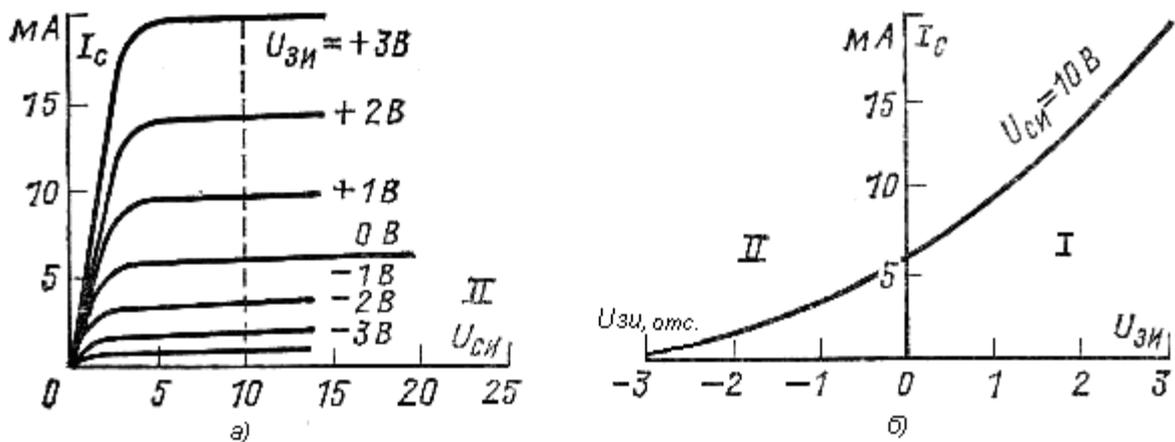


Рисунок 43 – Характеристики полевого транзистора с изолированным затвором со встроенным каналом

а) выходная; б) переходная. В области I транзистор работает с индуцированным каналом, а в области II – в режиме со встроенным каналом

Основные параметры полевых транзисторов и их ориентировочные значения

1. Крутизна характеристики $S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \approx \mu_n \cdot C_{зп} \cdot U_{зи}$ $S = 0,1 - 500$ mA/V.
2. Начальный ток стока $I_{с.нач}$ – ток стока при нулевом напряжении $U_{зи}$, у транзисторов с управляющим *p-n-переходом* составляет 0,2 – 600 мА; с технологически встроенным каналом – 0,1–100 мА; с индуцированным каналом – 0,01 – 0,5 мкА.
3. Напряжение отсечки $U_{зи.отс.}$ (0,2 – 10 В).
4. Пороговое напряжение $U_{зи.пор.}$ (1 – 6 В).
5. Сопротивление сток – исток в открытом состоянии $R_{си.отк.}$ (2 – 300 Ом).
6. Постоянный ток стока $I_{с.мах}$ (от 10 мА до 0,7 А).

7. Остаточный ток стока $I_{C.ост.}$ – остаточный ток при напряжении $U_{ЗИ.ост}$ (0, 001 – 10 мА).

8. Максимальная частота усиления f_P – частота, на которой коэффициент усиления по мощности равен единице (десятки – сотни МГц).

Обозначения полевых транзисторов аналогичны обозначениям биполярных транзисторов, только вместо буквы Т ставится буква П, например КП103А, КП 105Б.

Контрольные вопросы и задания

1. Принципиальное отличие структуры р-п-переходов биполярных и полевых транзисторов.
2. Почему полевой транзистор по способу управления сравнивается с электронной лампой?
3. Способ изменения типа проводимости у полевых транзисторов.
4. Схемы включения полевых транзисторов.
5. Структура и принцип работы транзистора с управляющим р-п-переходом.
6. Структура и принцип работы транзистора с индуцированным затвором (каналом).
7. Разница в структуре МДП- и МОП-транзисторов.
8. Особенности структуры транзисторов со встроенным и индуцированным каналом.
9. Почему в схеме с ОИ у полевых транзисторов высокое входное сопротивление?
10. Почему у транзисторов с индуцированным каналом управляющее напряжение однополярное, а с встроенным каналом – как положительное, так и отрицательное?
11. Преимущества полевых транзисторов перед биполярными.
12. Основные параметры полевых транзисторов.
13. Какие из полевых транзисторов чаще всего применяются в интегральных микросхемах?

Транзисторы интегральных микросхем (ИМС)

Транзисторы ИМС получают последовательной диффузией донорных и акцепторных примесей в островки, созданные тем или иным способом (рис. 44, а). Характерным для них является расположение выводов в одной плоскости.

Для осуществления логических операций созданы *многоэмиттерные транзисторы* (рис.44, б, в), применение которых основано на их свойстве оставаться открытыми, если хотя бы к одному из эмиттеров приложено относительно базы прямое напряжение. Запирание транзисторов происходит тогда, когда на все эмиттеры поданы обратные напряжения.

Наряду с биполярными в ИМС широко применяют полевые МДП-транзисторы и особенно МОП-транзисторы с индуцированным каналом. В основе их изготовления также как и биполярных, лежит планарная технология. Так, при изготовлении островков по планарно-диффузионной технологии получается практически готовая заготовка для МОП-транзистора. Каждый из двух соседних островков может быть стоком или истоком этого транзистора. Поэтому для их изготовления требуется меньшее по сравнению с эпитаксиально-планарной технологией количество операций.

Полевые и биполярные транзисторы, применяемые в ИМС, изготавливают по технологии монокристаллических ИС. Иногда используют отдельные дискретные миниатюрные бескорпусные транзисторы, поскольку тонкоплёночная технология пока не всегда позволяет получать биполярные транзисторы удовлетворительного качества.

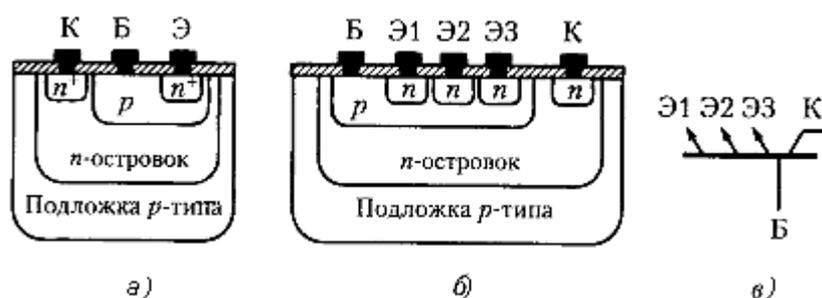


Рисунок 44 – Транзисторы интегральных микросхем

а) биполярный; б) многоэмиттерный; в) условное обозначение многоэмиттерного транзистора

Биполярные транзисторы монокристаллических ИС по сравнению с дискретными транзисторами имеют более высокое сопротивление коллектора из-за необходимости выводить контакт наверх и добавления сопротивления (кристалла) между коллекторным контактом и переходом. Для уменьшения этого сопротивления под коллекторным переходом иногда создают сильно легированный скрытый слой с большой удельной проводимостью.

Технология изготовления монокристаллических ИС сводится к следующему. В пластинку кремния (подложку), имеющую проводимость *p-типа*, проводят локальную диффузию мышьяка для формирования скрытого слоя n^+ . Затем на неё наращивают эпитаксиальный слой *n*. Полученную поверхность окисляют. В результате получается диэлектрический слой диоксида SiO_2 , который называют *маскирующим*. Маскирующие свойства его основываются на том, что скорость диффузии примесей, используемых для получения областей транзистора, в нём значительно меньше, чем в кремнии. Поэтому в процессе диффузии последняя происходит только на участках, свободных от SiO_2 .

Используя фотошаблон базового слоя и процесс фотолитографии, в маскирующем слое травлением вскрывают окно под базу транзистора. Далее проводится двухэтапная диффузия атомов бора. В результате в эпитаксиальном слое проявляется зона с электропроводностью *p-типа*.

Лекция № 8. Основы микроэлектроники. Технология изготовления микросхем, их классификация.

Микроэлектроника – это направление электроники, позволяющее с помощью комплекса технологических, конструктивных и схемотехнических средств создавать малогабаритные, высоконадёжные и экономичные электронные устройства.

Микроэлектроника основана на применении *интегральных микросхем* (ИМС), в которых элементы не раздельно связаны между собой, а

представляют собой единое целое. ИМС изготавливают на основе кристалла полупроводника, в качестве которого чаще всего используют кремний. В кристалле кремния создаются *p-n-переходы*, образующие как активные так и пассивные элементы электрической схемы. Элементы микросхемы связываются между собой электрически с помощью тонких металлических перемычек. Такой кристалл называют *чип* (англ. chip – кристалл). Характеристикой сложности ИМС является уровень интеграции, оцениваемый числом транзисторов, которые могут быть реализованы на кристалле. В зависимости от уровня интеграции ИМС делят на несколько категорий:

1. Малые ИМС – до 10 – ти элементов (МИС).
2. Средние ИМС – от 10 –ти до 100 элементов (СИС).
3. Большие ИМС – от 100 до 10^5 элементов (БИС).
4. Сверхбольшие ИМС – более 10^5 элементов (СБИС).

В качестве элементов в микросхемах чаще всего выступают транзисторы, что особенно касается цифровых микросхем. Современные СБИС содержат несколько миллионов транзисторов, причём степень интеграции повышается при разработке новых моделей микросхем. Необходимо отметить, что чёткой границы между БИС и СБИС не существует, и их часто объединяют в один класс БИС/СБИС. В настоящее время находят применение все категории ИМС.

Кроме степени интеграции ИМС классифицируют в зависимости от их функционального назначения на два больших класса: цифровые и аналоговые. Цифровые ИМС оперируют с входными напряжениями, дискретно меняющими своё значение, которое соответствует либо «1» либо «0». Аналоговые ИМС используются для преобразования непрерывно изменяющихся во времени сигналов.

Цифровые ИМС в зависимости от степени интеграции могут выполнять простейшие логические преобразования (МИС), образовывать целые узлы цифровых устройств, таких как малоразрядные регистры, счётчики, дешифраторы, сумматоры и т. д. (СИС). Цифровые БИС / СБИС способны выполнять функции уже не отдельного узла, а целой системы. К ним относятся все микропроцессорные ИМС, микросхемы памяти, ИМС программируемой логики, ИМС, реализующие стратегию «Система в кристалле».

Аналоговые ИМС выполняют разнообразные функции усиления сигналов переменного и постоянного токов, генерирование колебаний различной

формы, обеспечение других микросхем стабилизированным напряжением питания, цифроаналоговое и аналого-цифровое преобразование сигналов, фильтрацию сигналов, их модуляцию и демодуляцию и т. д.

Обозначение ИМС состоит из четырёх элементов. Первый элемент – цифра, обозначающая группу по конструктивно – технологическому наполнению (1, 5, 6, 7 – полупроводниковые; 2, 4, 8 – гибридные; 3 – прочие). Второй элемент – две или три цифры, обозначающие порядковый номер разработки. Третий элемент – две буквы, соответствующие подгруппе и виду по функциональному назначению.

Существует более двух десятков подгрупп и около полутора сотен видов ИС, перечни которых приведены в справочниках. Примерами подгрупп являются *генераторы, логические элементы, усилители*. Примерами ИС этих подгрупп являются генераторы гармонических сигналов (две буквы третьего элемента – ГС); прямоугольных импульсов (ГГ); линейно изменяющихся сигналов (ГЛ); сигналов специальной формы (ГФ); логические элементы И, НЕ, И–НЕ (соответственно, ЛИ, ЛН, ЛА); усилители высокой, промежуточной, низкой частоты (УВ, УР, УН). Четвёртый элемент – одна или несколько цифр, обозначающих условный номер ИС по функциональному признаку в данной серии ИС (буквой К перед первым элементом обозначают ИС широкого применения). Например, запись К155ЛА8 означает: 1 – полупроводниковая ИС, 55 – порядковый номер серии, ЛА – логический элемент И–НЕ, 8 – порядковый номер данной схемы в серии по функциональному признаку. Микросхема 155ТМ2 расшифровывается как полупроводниковая микросхема серии 55, являющаяся триггером Д-типа, порядковый номер которого равен 2.

В конце условного обозначения микросхемы может быть буквенный индекс (от А до Я), характеризующий отличие микросхемы данного типа по численному значению одного или нескольких параметров, например К140УД8А (операционный усилитель) отличается от К140УД8Б.

Технология изготовления полупроводниковых ИМС

Изготовление п/п ИМС осуществляют, используя два основных технологических процесса: *диффузию примесей*, создающих в полупроводнике область с типом проводимости, противоположным исходному, и *эпитаксиальное наращивание* слоя кремния на кремниевую подложку, имеющую противоположный тип проводимости.

Все элементы схемы формируются в так называемых *островках*, образованных в кристалле и изолированных друг от друга. Металлические подложки, необходимые для соединения элементов электрическую схему, напыляют на поверхность пластины кристалла. Для этого электроды всех элементов выводятся на поверхность пластины и размещаются в одной плоскости в одном *плане*. Поэтому технология изготовления схем с помощью диффузии

называется *планарно-диффузионной*, а с помощью эпитаксильного наращивания – *эпитаксильно – планарной*.

Исходным материалом для изготовления ИМС по планарно – диффузионной технологии является слабо легированная пластина кремния *p-типа*, на которую методом фотолитографии наносят слой SiO_2 (рис. 45)

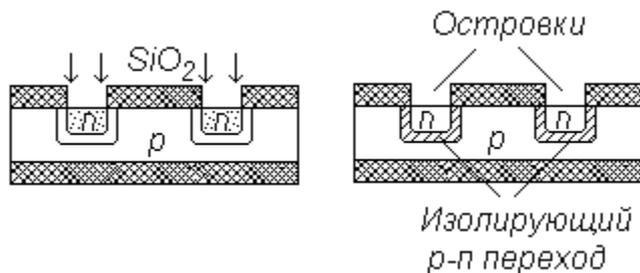


Рисунок 45 – Изготовление островков по планарно-диффузионной технологии

Через окна в защитном слое производится диффузия примеси *n-типа*, в результате чего образуются островки, границы которых упираются снизу в защитный слой, что резко снижает возможность протекания токов утечки по поверхности. Между островками и подложкой образуется *p-n-переход*. К которому подключают напряжение таким образом, чтобы этот переход был заперт (т. е. минусом на *p-подложке*). В результате островки становятся изолированными друг от друга.

Исходным материалом при эпитаксильно-планарной технологии служит пластина кремния *n-типа* со слоем SiO_2 (рис.46,а), в которой вытравливают продольные и поперечные канавки (рис.46,б). Полученную фигурную поверхность (в виде шахматной доски) снова окисляют, создавая изоляционный слой диоксида кремния (рис.46,в). На этот слой эпитаксильно наращивают слой кремния собственной проводимости (рис.46,г), а верхний слой кремния *n-типа* сошлифовывают. Полученные таким образом островки (рис.46, д) надёжно изолированы друг от друга фигурным слоем диэлектрика и ёмкость между ними существенно меньше, чем в предыдущем случае. Но такая технология изготовления ИМС сложнее и стоимость изготовления микросхем выше.

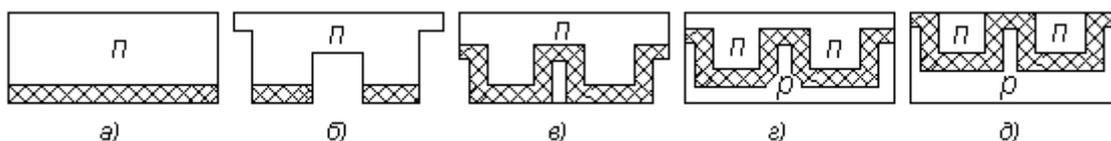


Рисунок 46 – Изготовление островков по эпитаксильно-планарной технологии

В полученных тем или иным способом островках формируют как активные, так и пассивные элементы методом диффузионной технологии или эпитаксильным наращиванием.

Технологию, по которой изготавливают тонкоплёночные полевые транзисторы, условно называют «кремний на сапфире» (КНС). При этом в каче-

стве подложки используют синтетический сапфир, на котором с помощью эпитаксильного наращивания выращивают плёнку кремния толщиной 1 мкм и более, на которой выполняют транзистор. Ввиду хороших диэлектрических свойств сапфира ёмкость между областями стока, истока и подложкой практически отсутствуют, что приводит к существенному увеличению быстродействия компонентов. Полевые транзисторы, выполненные с применением технологии КНС, работают на частотах выше 250 МГц. Такая сапфировая подложка не меняет своих параметров при радиационном облучении средней мощности, компоненты, изготовленные по этой технологии, имеют высокую радиационную стойкость.

Биполярные транзисторы монокристаллических ИС по сравнению с дискретными транзисторами имеют более высокое сопротивление коллектора из-за необходимости выводить контакт наверх и добавления сопротивления (кристалла) между коллекторным контактом и переходом. Для уменьшения этого сопротивления под коллекторным переходом иногда создают сильно легированный скрытый слой с большой удельной проводимостью. Технология изготовления монокристаллических ИС сводится к следующему. В пластинку кремния (подложку), имеющую электропроводность *p*-типа, проводят локальную диффузию мышьяка для формирования скрытого слоя n^+ . Затем на неё наращивают эпитаксильный слой n^+ . Затем на неё наращивают эпитаксильный слой *n*. Полученную поверхность окисляют. В результате получается диэлектрический слой диоксида SiO_2 , который называют *маскирующим*. Маскирующие свойства его основаны на том, что скорость диффузии примесей, используемых для получения областей транзистора, в нём значительно меньше, чем в кремнии. Поэтому в процессе диффузии последняя происходит только на участках, свободных от SiO_2 .

Используя фотошаблон базового слоя и процесс фотолитографии, в маскирующем травлением вскрывают окно под эмиттер транзистора и под контакт к коллектору. В эти окна проводят двухэтапную диффузию примесей фтора. В результате образуется область эмиттера и низкоомная область для подключения коллекторного контакта. После диффузии вся поверхность пластины покрыта диоксидом. В этом диоксиде тем же методом вскрываются окна под выводы контактов эмиттера, коллектора и базы. Затем в вакууме напыляют слой алюминия и, используя фотолитографию, получают рисунок соединений с другими элементами ИС.

Перечисленные процессы являются групповыми и проводятся одновременно для пластины, на которой располагаются десятки – сотни микросхем, имеющих значительное количество транзисторов.

Полевые транзисторы с управляющим *p-n-переходом* и МОП-транзисторы изготавливают по технологии монокристаллических ИС или по КНС-технологии. Особенности технологии изготовления полевого транзистора определяются в основном видом и концентрацией вводимых примесей.

Различают *p*-МОП-, *n*-МОП-, и *k*-МОП-технологии. Компоненты, выполненные по *p*-МОП-технологии (с каналом типа *p*), имеют малое быстро-

действие, большое пороговое напряжение, дешёвы, просты в изготовлении, имеют большой выход годных изделий.

Технология *n-MOP* более сложна, позволяет изготавливать транзисторы с меньшим пороговым, каналом типа *n*, большими быстродействием и плотностью элементов.

В технологии комплементарных приборов *k-MOP* используется комбинация процессов, используемых в *n-MOP*- и *p-MOP*-технологиях. Поэтому производство более дорогостоящее, а плотность элементов на кристалле малая. Однако, при небольших напряжениях быстродействие приборов, выполненных по этой технологии выше, чем у приборов, выполненных по *n-MOP*-технологии. Кроме того такие ИС потребляют очень малую мощность и могут работать при значительных изменениях напряжения питания.

МОП-транзисторы ИС выполняются или с технологически встроенным, или с индуцированным каналом. При изготовлении МОП-транзисторов количество ответственных операций, влияющих на процесс выхода годных микросхем, значительно меньше, чем при изготовлении биполярных транзисторов. Роль диэлектрика между затвором и каналом выполняет диоксид кремния SiO_2 , что хорошо согласуется с основными технологическими процессами. В отличие от своего дискретного аналога полевые транзисторы с управляющим *p-n-переходом* значительно реже применяют в ИС, чем МОП-транзисторы.

Диоды, используемые в ИС, выполняют либо по технологии монолитных интегральных схем, либо применяют дискретные навесные. Для упрощения технологического процесса в монолитных ИС в качестве диодов используют биполярные транзисторы в диодном включении в зависимости от требований, предъявляемых к диоду, выводы которого на стадии формирования контактов соединяют между собой (рис.47).

Так на рис.47, а, б в качестве диода используется *p-n-переход* база – эмиттер. Диод открыт при указанной на рисунке полярности приложенного напряжения и закрывается при противоположной полярности. Диоды, выполненные в соответствии с рис. 47, а, б, обеспечивают высокое быстродействие, но малый ток. Диоды, выполненные в соответствии с рис.47, в используют два параллельных *p-n-перехода* и, соответственно, большой ток, но меньшее быстродействие. Диоды, выполненные в соответствии с рис.47, г, д, имеют наибольшее допустимое напряжение, подобно тому, как в биполярных транзисторах наибольшее напряжение может быть приложено к переходу база – эмиттер.

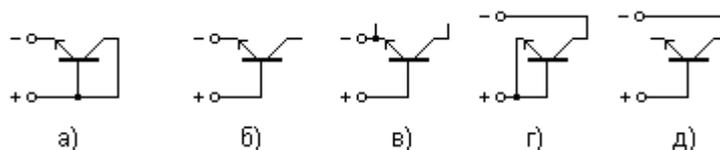


Рисунок 47 – Варианты выполнения диодов на основе транзистора

Контрольные вопросы

1. Определение понятия «микроэлектроника» и на чём она основана.
2. Классификация ИМС по уровню интеграции и областям применения.
3. Условное обозначение ИМС.
4. Разновидности технологии изготовления ИМС.
5. Разновидности технологии изготовления МОП-транзисторов в ИМС.
6. Способы изготовления п/п диодов в ИМС,

Лекция № 9. Компоненты оптоэлектроники и технические средства отображения информации

Общие сведения о компонентах оптоэлектроники

Источник света, световой поток или яркость которого являются одной из функций электрического сигнала, поступающего на его вход, называют *управляемым источником света*.

Общими требованиями к управляемым источникам света оптоэлектронных цепей являются: *стабильность и линейность характеристики преобразования, миниатюрность, малая потребляемая мощность, большой срок службы, высокая надёжность, высокая эффективность, быстроедействие, возможность изготовления в виде интегральных микросхем, возможность смещения спектральных характеристик в любую заданную часть области спектра, механическая прочность и технологичность*.

Оптоэлектроникой называют научно-техническое направление, в котором для передачи, обработки и хранения информации используются электрические и оптические методы.

В оптоэлектронике оптический луч выполняет те же функции управления, преобразования и связи, что и электрический сигнал в электрических цепях.

Устройства оптоэлектроники имеют ряд преимуществ перед чисто электронными приборами.

В них обеспечивается практически полная развязка между входной и выходной цепями. Отсутствует обратное влияние приёмника сигнала на его источник. Легко согласуются между собой электрические цепи с разными входными и выходными импедансами (полными сопротивлениями). Оптоэлектронные устройства имеют широкую полосу пропускания и преобразования сигналов, большое быстроедействие и высокую информационную ёмкость оптических каналов связи (до $10^{13} \dots 10^{15}$ Гц). В связи с тем, что в оптической цепи носителями заряда являются электрически нейтральные фотоны, которые в световом потоке не взаимодействуют между собой, не смешиваются и не рассеиваются, на подобные цепи практически не влияют всевозможные электромагнитные поля. В электронных и электрических цепях, где носителями заряда являются электроны, имеющие определённый электрический заряд, всегда наблюдается «взаимодействие» носителей заряда с электрическими и магнитными полями, вследствие чего информационные сигналы искажаются.

К недостаткам оптоэлектронных компонентов относятся: плохая временная и температурная стабильность характеристик; сравнительно большая потребляемая электрическая мощность; сложности изготовления универсальных устройств для обработки информации; меньшие функциональные возможности по сравнению с интегральными микросхемами; жёсткие требования к технологии изготовления. Вследствие этого компоненты оптоэлек-

троники и электроники существуют не отрицая друг друга и каждый из них используется в той области, где применение его более целесообразно.

Оптоэлектронными приборами называют устройства, излучающие и преобразующие излучение в инфракрасной, видимой или ультрафиолетовой областях спектра или использующие для своей работы электромагнитные излучения, частоты которых находятся в этих областях.

Для осуществления элементарного преобразования в оптоэлектронике необходимо иметь управляемый источник света (фотоизлучатель), яркость свечения которого однозначно определяется электрическим сигналом, а также фотоприёмник, сопротивление или ЭДС которого зависят от степени его освещённости.

Полупроводниковые светодиоды и фотодиоды

Светоизлучающие диоды

Светодиоды предназначены для преобразования электрической энергии в энергию электромагнитного излучения инфракрасного (ИК) или видимого диапазона. Светодиод представляет собой излучающий *p-n-переход*, свечение в котором возникает вследствие рекомбинации носителей заряда (электронов и дырок. Действие светодиода основано на явлении инжекционной электролюминесценции, т. е. генерации оптического излучения в *p-n-переходе*, находящемся под прямым внешним напряжением электрического тока. Под воздействием внешней энергии электроны в атомах переходят в возбуждённое состояние с более высоким уровнем энергии, чем энергия, необходимая для выхода электрона из атома. Такой уровень энергии называется *метастабильным уровнем возбуждения* (зона проводимости 2 на рис.13). При возвращении таких электронов с метастабильного уровня 2 на исходный низкий энергетический уровень 1 происходит испускание фотонов с длиной волны $\lambda = 1, 23 (W_2 - W_1)$, где W_1 – низкий уровень энергии 1, а W_2 – высокий уровень энергии 2.

Показатель преломления активного слоя выше 2 показателя преломления ограничивающих пассивных слоев 1, благодаря чему рекомбинационное излучение может распространяться в пределах активного слоя, испытывая многократное отражение, что значительно повышает КПД источника излучения.

Гетеродинные (неоднородные) для изготовления светодиода структуры могут создаваться на основе разных полупроводниковых материалов. Обычно в качестве подложки используются GaAs (галлий, мышьяк) и In P (индий, фосфор). Соответствующий композиционный состав активного материала выбирается в зависимости от длины волны излучения и создаётся посредством напыления на подложку.

Длину волны излучения λ_0 определяют как значение, соответствующее максимуму спектрального распределения мощности, а ширину спектра излуче-

ния $\Delta\lambda_{0,5}$ – как интервал длин волн, в котором спектральная плотность мощности составляет половину максимальной. Яркость свечения пропорциональна прямому току светодиода.

Светодиоды изготавливают как в виде отдельных индикаторов, так и в виде сегментных или точечных матриц. На основе точечных матриц можно синтезировать любое изображение.

Основные параметры и характеристики светодиодов

1. Сила света I_V – световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в заданном направлении; выражается в канделах (обычно $0,1 \div 10$ мКд).

2. Цвет свечения или длина волны излучения.

3. Постоянное прямое напряжение – падение напряжения при заданном токе ($2 \div 4$ В).

4. Угол излучения α – плоский угол, в пределах которого сила света составляет не менее половины её максимального значения.

5. Характеристики зависимостей: силы света от величины тока; спектральной плотности излучения $I_V(\lambda) / I_V(\lambda)_{\max}$ от длины волны; постоянного прямого тока от постоянного прямого напряжения и др.

Для получения повышенной мощности излучения применяют *суперлюминесцентные* диоды, занимающие промежуточное положение между инъекционными светодиодами и полупроводниковыми лазерами. Они обычно представляют собой конструкции, работающие на том участке ВАХ, на котором наблюдается оптическое усиление (стимулированное излучение). Этот участок характеризуется тем, что внешний квантовый выход на нём существенно больше, чем у обычного светодиода. Суперлюминесцентные диоды имеют уменьшенную спектральную ширину полосы излучения и требуют для работы больших плотностей тока (при мощности излучения 60 мВт плотность тока 3 КА/см²). Их применяют при работе с волоконно-оптическими линиями связи.

В ряде случаев в качестве управляемых источников света применяют инжекторные лазеры. Они отличаются от светодиодов тем, что излучение сконцентрировано в узкой спектральной области и является когерентным. Лазеры имеют высокий КПД и большое быстродействие.

Полупроводниковые лазеры широко применяются при создании световодных линий связи большой протяжённости и в измерительных устройствах различного назначения.

Система обозначений светодиодов аналогична обозначениям обычных диодов, только вместо буквы *Д* используют *Л*, например АЛ302В.

Оптоэлектронные преобразователи

Фотоприёмники предназначены для преобразования светового излучения в электрические сигналы. Так как функциональные возможности Элек-

тролюминесцентных источников света ограничены, то многообразие возможных характеристик оптронов реализуется за счёт фотоприёмников.

В качестве фотоприёмников могут быть использованы фоторезисторы, фотодиоды, фототиристоры и т. д.

При подборе фотоизлучателей и фотоприёмников необходимо согласовывать их спектральные характеристики. В противном случае вследствие несовершенства существующих источников света сложно получить удовлетворительные результаты.

Фоторезисторы. В фоторезисторах используется явление изменения сопротивления вещества под действием инфракрасного, видимого или ультрафиолетового излучения. Основным элементом их является п/п пластина, сопротивление которой при освещении изменяется. В полупроводнике при облучении светом концентрация подвижных носителей заряда увеличивается и проводимость его резко возрастает.

В качестве исходного материала фоторезистора чаще всего используется сернистый таллий, сернистый теллур, сернистый висмут, сернистый свинец, теллуристый свинец, сернистый кадмий и т. д.

Характеристики фоторезисторов

1. ВАХ – зависимость тока I через фоторезистор от напряжения U , приложенного к его выводам, при различных значениях светового потока Φ (рис. 48,а)

2. Энергетическая (люкс-амперная) характеристика – зависимость фототока фоторезистора от светового потока при $U = const$ (рис.48, б).

3. Чувствительность – отношение входной величины к выходной. Для фоторезисторов чаще всего используют токовую чувствительность S , под которой понимают отношение фототока (или его приращения) к длине световой волны (рис.48,в).

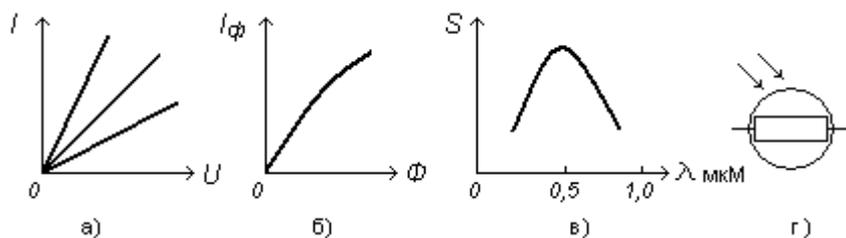


Рисунок 48 – Характеристики фоторезисторов:

а) вольт-амперная, б) энергетическая, в) спектральная, г) условное обозначение -

4. Абсолютная $S_{ABC}(\lambda)$ и относительная $S(\lambda)$ спектральные характеристики – это значения чувствительности в полосе частот. Абсолютная спектральная характеристика представляет собой зависимость монохроматической чувствительности, выраженной в абсолютных единицах, от длины волны регистрируемого потока излучения.

Относительная спектральная характеристика – зависимость монохроматической чувствительности от длины волны, отнесённая к значению максимальной чувствительности: $S(\lambda) = S_{ABC}(\lambda) / S_{ABC\max}(\lambda)$.

5. Граничная частота $f_{ГР}$ – частота синусоидального сигнала, модулирующего световой поток, при котором чувствительность фоторезистора уменьшится в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с чувствительностью при немодулированном потоке ($10^3 \div 10^5$ Гц).

6. Температурный коэффициент фототока – коэффициент, показывающий изменение параметров фоторезистора с изменением температуры:

$$\alpha_r = \left. \frac{\partial I_\phi}{\partial T} \cdot \frac{1}{I_\phi} \right|_{\phi_{const}}$$

У промышленных фоторезисторов $\alpha_T \approx -10^{-3} \div -10^{-4}$ град⁻¹

Фотодиоды. Простейший фотодиод представляет собой п/п диод, в котором обеспечивается возможность воздействия оптического излучения на *p-n-переход*.

При воздействии излучения в направлении, перпендикулярном поверхности *p-n-перехода*, в результате поглощения фотонов, с энергией, большей, чем ширина запрещённой зоны, в *n-области* возникают электронно-дырочные пары. Эти электроны и дырки называют *фотоносителями*. При диффузии фотоносителей в глубь *n-области* основная доля дырок и электронов не успевает рекомбинировать и доходит до границы *p-n-перехода*. Здесь фотоносители разделяются электрическим полем *p-n-перехода*, причём дырки переходят в *p-область*, а электроны не могут преодолеть поле перехода и скапливаются у границы *p-n-перехода* в *n-области*.

Таким образом, ток через *p-n-переход* обусловлен дрейфом неосновных носителей – дырок. Дрейфовый ток фотоносителей называется *фототоком* I_ϕ . Фотоносители – дырки – заряжают *p-область* положительно относительно *n-области*, а фотоносители – электроны – заряжают *n-область* отрицательно по отношению к *p-области*. Возникающая разность потенциалов называется *фотоЭДС* – E_ϕ . Генерируемый ток в фотодиоде – обратный, он направлен от катода к аноду. Причём его величина пропорциональна степени освещённости фотодиода.

Фотодиоды используют для получения электроэнергии (солнечные батареи).

Характеристики фотодиодов

Свойства фотодиода можно охарактеризовать следующими характеристиками:

Вольт-амперная характеристика фотодиода представляет собой зависимость светового тока при неизменном световом потоке и темнового тока I_m от напряжения.

Световая характеристика фотодиода обусловлена зависимостью фототока от освещённости. При увеличении освещённости фототок возрастает.

Спектральная характеристика фотодиода – это зависимость фототока от длины волны падающего света на фотодиод. Она определяется для больших длин волн шириной запрещённой зоны, а при малых длинах волн большим показателем поглощения и увеличением влияния поверхностной рекомбинации носителей заряда с уменьшением длины волны квантов света. То есть, коротковолновая граница чувствительности зависит от толщины базы и от скорости поверхностной рекомбинации. Положение максимума в спектральной характеристике фотодиода сильно зависит от степени роста коэффициента поглощения.

Постоянная времени – это время, в течение которого фототок фотодиода изменяется после освещения или после затемнения фотодиода в e раз (63%) по отношению к установившемуся значению.

Темновое сопротивление – сопротивление фотодиода в отсутствие освещения.

Интегральная чувствительность определяется формулой:

$$K = I_{\phi} / \Phi$$

где I_{ϕ} – фототок, Φ – освещённость.

Инерционность

Существует три физических фактора, влияющих на инерционность:

1. Время диффузии или дрейфа неравновесных носителей через базу t ;
2. Время пролёта через *p-n-переход* – t_{p-n} ;
3. Время перезарядки барьерной ёмкости *p-n-перехода*, характеризующееся постоянной времени $\tau = RC_{\text{БАР}}$.

Толщина *p-n* перехода, зависящая от обратного напряжения и концентрации примесей в базе, обычно меньше 5 мкм, а значит, $t_{p-n} \approx 0,1$ нс. $RC_{\text{БАР}}$ определяется барьерной ёмкостью *p-n-перехода*, зависящей от напряжения и сопротивления базы фотодиода при малом сопротивлении нагрузки во внешней цепи. Величина $\tau = RC_{\text{БАР}}$ обычно составляет нескольких наносекунд.

Расчёт КПД фотодиода и мощности

КПД вычисляется по формуле:

$$\eta = \frac{I \cdot U}{P_{\text{осв}}} \cdot 100\% ,$$

где $P_{\text{осв}}$ – мощность освещённости; I – сила тока;

U – напряжение на фотодиоде.

Расчёт мощности фотодиода иллюстрирует рис. 49 и таблица 4.

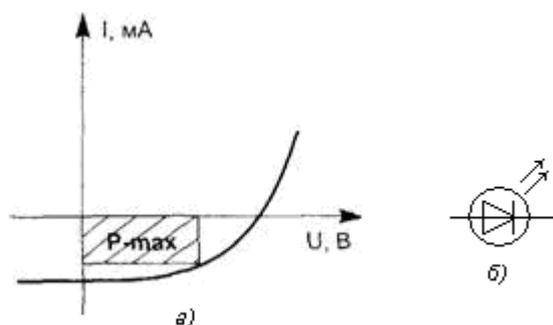


Рисунок 49 – ВАХ светодиода (а), его условное обозначение (б)

Максимальная мощность фотодиода соответствует максимальной площади данного прямоугольника (P-max).

Зависимость мощности от КПД

Таблица № 3

Мощность освещенности, мВт	Сила тока, мА	Напряжение, В	КПД, %
1	0,0464	0,24	1,1
3	0,1449	0,41	2,0
5	0,248	0,26	1,3
7	0,242	0,45	1,6

Применение фотодиодов в оптоэлектронике

Фотодиод является составным элементом во многих сложных оптоэлектронных устройствах.

Фотодиод может обладать большим быстродействием, но его коэффициент усиления фототока не превышает единицы. Благодаря наличию оптической связи оптоэлектронные интегральные микросхемы обладают рядом существенных достоинств, а именно: *почти идеальная гальваническая развязка управляющих цепей от силовых при сохранении между ними сильной функциональной связи.*

Фототранзисторы. В качестве фотоприёмников применяются транзисторные структуры. Простейший фотоприёмник (рис.50,а) имеет два *p-n-перехода*: эмиттерный и коллекторный. Фототранзистор можно рассматривать как комбинацию фотодиода и транзистора. Его характеристики аналогичны характеристикам фотодиода, но соответствующие токи оказываются усиленными, поэтому масштаб по оси токов увеличен в соответствующее число раз (рис.50,б).

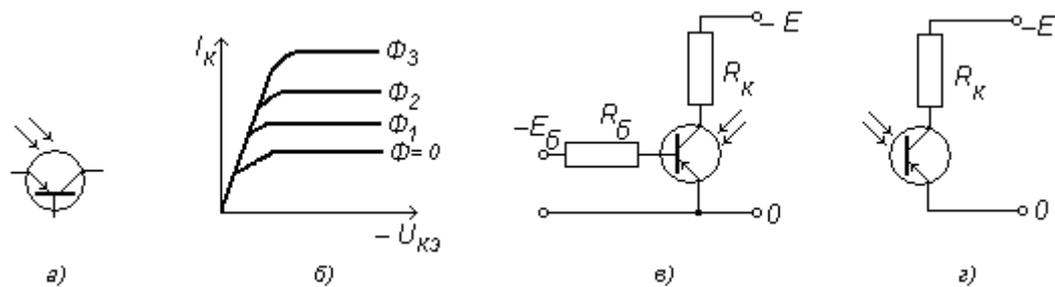


Рисунок 50 – Обозначение фототранзистора (а); вольт-амперные (выходные) характеристики (б); схемы включения с подключенной базой (в) и со свободной базой (г)

Напряжения питания на транзистор подают так же, как и на обычный биполярный транзистор (рис.50,в). Часто применяют включение, когда напряжение прикладывается только между коллектором и эмиттером, а вывод базы остаётся оторванным (рис.50,г). Такое включение называется включением *с плавающей базой* и характерно только для фототранзисторов. При включении с плавающей базой фототранзистор всегда находится в активном режиме, однако при $\Phi = 0$ протекающий через него ток невелик.

Конструктивно фототранзистор выполнен так, что световой поток облучает область базы. В результате собственного поглощения энергии в ней генерируются электронно-дырочные пары. Неосновные носители заряда в базе (дырки) диффундируют к коллекторному переходу и перебрасываются электрическим полем перехода в коллектор, увеличивая ток последнего. Этот процесс аналогичен процессу в фотодиоде. Если база разомкнута, то основные носители заряда (электроны), образовавшиеся в результате облучения, не могут покинуть базу и накапливаются в ней. Объёмный заряд этих электронов снижает потенциальный барьер электронного перехода, в результате чего увеличивается диффузионное движение дырок через эмиттерный переход. Инжектированные дырки, попав в базу, движутся, как и в обычном транзисторе, к коллекторному переходу и, переходя в область коллектора, увеличивают его ток. Таким образом, носители заряда, генерируемые в результате облучения светом, непосредственно участвуют в создании фототока.

Основные характеристики и параметры фототранзисторов

1. ВАХ фототранзистора напоминают выходные характеристики биполярного транзистора в схеме с ОЭ (рис. 35,б), только параметром служит не ток базы, а световой поток Φ или *фототок* (при $I_B = const$).

2. Энергетические и спектральные характеристики (подобны характеристикам фотодиодов).

3. Токовая чувствительность – отношение изменения электрического тока на выходе фототранзистора к изменению «входного» светового потока при холостом ходе на входе и коротком замыкании на выходе.

4. Коэффициент усиления по фототоку $K_{УФ} = (1 + h_{21Э})$. В промышленных фототранзисторах он достигает $(1 \div 6)10^2$ и определяется как отношение

фототока коллектора фототранзистора со свободной базой к фототоку коллекторного *p-n-перехода*, измеренному в диодном режиме (при отключённом эмиттере) при том же значении светового потока.

Кроме фототранзисторов *p-n-переходами* в качестве высокочувствительных фотоприёмников используют полевые фототранзисторы. Они имеют высокую фоточувствительность (до нескольких ампер на люмен), широкую полосу пропускания ($10^6 \div 10^8$ Гц), значительную мощность рассеяния. По своим характеристикам они ближе к фоторезисторам, чем к биполярным транзисторам. Полевой фототранзистор выполняется с управляющим *p-n-переходом* и, так же как обычный полевой транзистор, имеет три электрода: исток, сток и затвор. Объём полупроводника между стоком и истоком образует проводящий канал. Затвор отделён от канала *p-n-переходом*, область объёмного заряда которого модулируется потенциалом затвор – исток. Переход затвор – канал можно рассматривать как фотодиод, фототок которого вызывает падение напряжения на резисторе R_3 , включённом в цепь затвора (рис.51,а). При $E_3 = const$ это приводит к модуляции потенциала затвора за счёт световой энергии и соответствующим изменениям сопротивления канала.

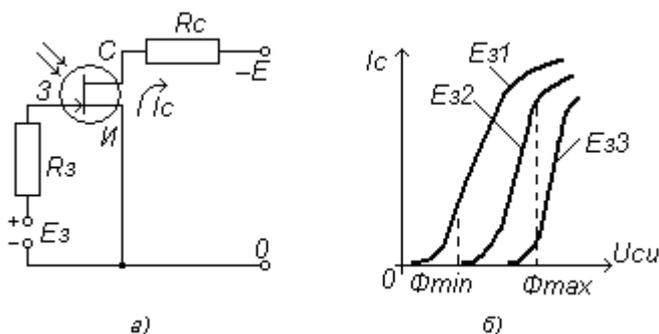


Рисунок 51 – Фототранзистор на базе полевого транзистора (а); его энергетические характеристики (б)

Энергетические характеристики полевого фототранзистора показаны на рис.51,б. При малом световом потоке $\Phi < \Phi_{min}$ и $E_3 = E_{з1} = const$ транзистор практически заперт и ток стока практически равен нулю. При $\Phi > \Phi_{min}$ в цепи стока протекает ток, значение которого зависит от светового потока. До $\Phi = \Phi_{max}$ энергетическая характеристика близка к линейной. При большом световом потоке $\Phi \gg \Phi_{max}$ влияние напряжения затвора на величину тока в канале становится незначительным и он близок к максимальному значению.

Инерционность полевого фототранзистора определяется инерционностью фотодиода в области затвора и временем пролёта носителей заряда через канал и оценивается значениями $10^{-6} \div 10^{-9}$ секунды. Граничная частота полевых фототранзисторов находится в пределах $10^7 \div 10^8$ Гц.

Фототиристоры. Фототиристоры используются для коммутации световым сигналом электрических цепей большой мощности. Они представляют

собой фотоэлектрические аналоги управляемого тиристора. Схема подключения напряжения к фототиристор и его ВАХ-ки показаны на рис.52.

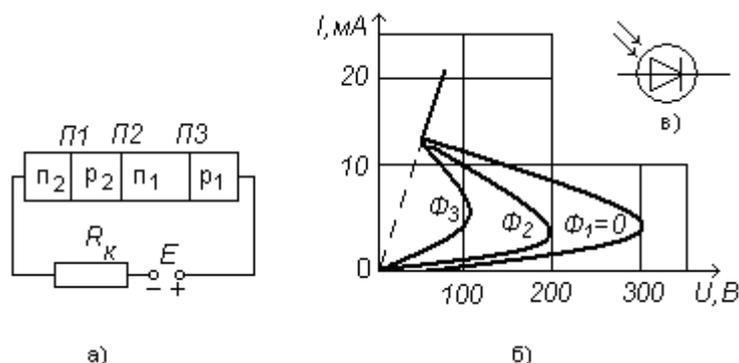


Рисунок 52 – Схема подключения к фототиристор напряжения (а); его ВАХ (б) и условное обозначение (в)

Фототиристор имеет четырёхслойную *p-n-p-n-структуру*, у которой переходы Π_1 и Π_3 смещены в прямом направлении, а коллекторный переход Π_2 – в обратном. Свет обычно попадает на обе базы тиристора – слои p_2 и n_1 . При этом с ростом освещённости возрастают эмиттерные токи, что приводит к возрастанию тока через тиристор. ВАХ типового фототиристора имеет вид, показанный на рис.52,б . Сопротивление фототиристора изменяется от 10^8 Ом (в запертом состоянии) до 0,1 Ом в открытом состоянии. Время переключения тиристора лежит в пределах $10^{-5} \div 10^{-6}$ секунды.

Таким образом, фототиристоры позволяют с помощью светового луча управлять значительными мощностями в электроцепях.

Многоэлементные фотоприёмники.

Эти приборы (сканистор, фотодиодная матрица с управлением на МОП-транзисторе, фоточувствительные приборы с зарядовой связью и другие) относятся к числу наиболее быстро развивающихся и прогрессирующих изделий электронной техники. Опто-электрический «глаз» на основе фотодиода способен реагировать не только на яркостно-временные, но и на пространственные характеристики объекта, то есть воспринимать его полный зрительный образ. Число фоточувствительных ячеек в приборе является достаточно большим, поэтому кроме всех проблем дискретного фотоприёмника (чувствительность, быстродействие, спектральная область) приходится решать и проблему считывания информации. Все многоэлементные фотоприёмники представляют собой сканирующие системы, то есть устройства, позволяющие производить анализ исследуемого пространства путём последовательного его просмотра (поэлементного разложения).

Как происходит восприятие образов?

Распределение яркости объекта наблюдения превращается в оптическое изображение и фокусируется на фоточувствительную поверхность. Здесь световая энергия переходит в электрическую, причём отклик каждого элемента (ток, заряд, напряжение) пропорционален его освещённости. Яр-

костная картина преобразуется в электрический рельеф. Схема сканирования производит периодический последовательный опрос каждого элемента и считывание содержащейся в нём информации. Тогда на выходе устройства мы получаем последовательность видеоимпульсов, в которой закодирован воспринимаемый образ.

При создании многоэлементных фотоприёмников стремятся обеспечить наилучшее выполнение ими функций преобразования и сканирования.

Оптроны

Оптроном называется такой оптоэлектронный прибор, в котором имеются источник и приёмник излучения с тем или иным видом оптической связи между ними, конструктивно объединённые и помещённые в один корпус. Между *управляющей* цепью (ток в которой мал, порядка нескольких мА), куда включён излучатель, и *исполнительной*, в которой работает фотоприёмник, отсутствует электрическая (гальваническая) связь, а управляющая информация передаётся посредством светового излучения (рис. 53).

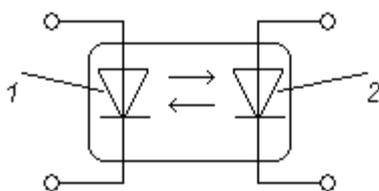


Рисунок 53 – Оптрон 1) светодиод; 2) фотодиод

Это свойство оптоэлектронной пары (а в некоторых видах оптронов присутствует по несколько не связанных друг с другом даже оптически оптопар) оказалось незаменимым в тех электронных узлах, где нужно максимально устранить влияние выходных электрических цепей на входные. У всех дискретных элементов (транзисторов, тиристоров, микросхем, являющихся коммутационными сборками, или микросхем с выходом, позволяющим коммутировать нагрузку большой мощности) управляющие и исполнительные цепи электрически связаны друг с другом. Это часто недопустимо, если коммутируется высоковольтная нагрузка. К тому же, возникающая обратная связь неминуемо приводит к появлению дополнительных помех. Использование оптронов в электронно-вычислительной аппаратуре является одним из основных методов повышения помехоустойчивости аппаратуры.

Основной носитель помех в радиоэлектронной аппаратуре – корпус. Корпус используется как один из полюсов электропитания, поэтому подключение к нему разных силовых устройств приводит к наведению кратковременных импульсных помех при коммутации цепей с значительными величинами токов в них. В то же время для передачи информации чисто электрическим путём между источником и приёмником информации должна быть электрическая связь по корпусу. Если к этому же корпусу подключены сило-

вые цепи, то помехи, вызванные коммутациями в этих цепях, приводят к сбоям в работе других устройств, подключённых к корпусу.

Передача информации с помощью оптронов позволяет развязать электрические цепи питания источника и приёмника информации, т. к. носителем информации является электрически нейтральное оптическое излучение.

Кроме защиты от воздействия помех, гальваническая развязка на основе оптронов позволяет решить ещё одну задачу – совместную работу устройств, находящихся под разными потенциалами. Передача сигнала в оптроне возможна, даже если цепи светодиода и фотодиода находятся под разными (в некоторых оптронах до 500В) напряжениями.

Конструктивно фотоприёмник обычно крепится на дне корпуса, а излучатель – в верхней части. Зазор между излучателем и фотоприёмником заполнен иммерсионным материалом – чаще всего эту роль выполняет полимерный оптический клей. Этот материал исполняет роль линзы, фокусирующей излучение на чувствительный слой фотоприёмника. Иммерсионный материал снаружи покрыт специальной плёнкой, отражающей световые лучи внутрь, чтобы препятствовать рассеянию излучения за пределы рабочей зоны фотоприёмника.

Роль излучателей в оптронах, как правило, выполняют светодиоды на основе арсенид-галлия. Светочувствительные элементы в оптопарах могут представлять собой фотодиоды (оптопары серии АОД...), фототранзисторы, фототринисторы (оптопары серии АОУ...) и высокоинтегрированные схемы фотореле. В диодной оптопаре, например, в качестве фотоприёмного элемента используется фотодиод на основе кремния, а излучателем служит инфракрасный излучающий диод. Максимум спектральной характеристики излучения диода приходится на длину волны около 1 мкм. Диодные оптопары применяются в фотодиодном и фотогенераторном режимах.

Транзисторные оптроны (серия АОТ...) имеют некоторые преимущества относительно диодных. Коллекторным током биполярного транзистора управляют как оптически (воздействуя на светодиод), так и электрически по базовой цепи (в данном случае работа фототранзистора при отсутствии излучения управляющего светодиода оптрона практически не отличается от работы обыкновенного кремниевого транзистора). У полевого транзистора управление осуществляется через цепь затвора.

Кроме того, фототранзистор может работать в ключевом и усилительном режимах, а фотодиод – только в ключевом. Оптроны с составными транзисторами (например, АОТ1ЮБ), имеют наибольший коэффициент усиления (как и обычный узел на составном транзисторе), могут коммутировать напряжение и ток достаточно больших величин и по данным параметрам уступают только тиристорным оптронам и оптоэлектронным реле типа КР293КП2 – КР293КП4, которые приспособлены для коммутации высоковольтных и сильноточных цепей. Сегодня в розничной продаже появились новые оптоэлектронные реле серий К449 и К294. Серия К449 позволяет коммутировать напряжение до 400 В при токе до 150 мА. Такие микросхемы в

четырёхвыводном компактном корпусе DIP-4 приходят на смену маломощным электромагнитным реле и имеют по сравнению с реле массу преимуществ (бесшумность работы, надёжность, долговечность, отсутствие механических контактов, широкий диапазон напряжения срабатывания). Кроме того, их доступная цена объясняется тем, что нет необходимости использовать драгметаллы (в реле ими покрываются коммутирующие контакты).

В резисторных оптронах (например, ОЭП-1) излучателями являются электрические минилампы накаливания, помещённые также в один корпус.

Графическим обозначениям оптронов по стандарту присвоен условный код – латинская буква U, после которой следует порядковый номер прибора в схеме.

Применение фотоприёмников

Любое оптоэлектронное устройство содержит фотоприёмный блок. И в большинстве современных оптоэлектронных устройств фотодиод составляет основу фотоприёмника.

Фотоприёмники обладают наилучшим сочетанием фотоэлектрических параметров, основных с точки зрения использования в оптоэлектронике: *высокие значения чувствительности и быстродействия, малые значения паразитных параметров (например, тока утечки)*. Простота их устройства позволяет достигнуть физического и конструктивного оптимума и обеспечить наиболее полное использование падающего света.

В сопоставлении с другими, более сложными фотоприёмниками, они обладают наибольшей стабильностью температурных характеристик и лучшими эксплуатационными свойствами.

Основной недостаток, на который обычно указывают, – отсутствие усиления. Но он достаточно условен. Почти в каждом оптоэлектронном устройстве фотоприёмник работает на ту или иную согласующую электронную схему. И введение усилительного каскада в нее значительно проще и целесообразнее, чем придание фотоприёмнику несвойственных ему функций усиления.

Высокая информационная ёмкость оптического канала, связанная с тем, что частота световых колебаний (около 10^{15} Гц) в $10^3 \dots 10^4$ раз выше, чем в освоенном радиотехническом диапазоне. Малое значение длины волны световых колебаний обеспечивает высокую достижимую плотность записи информации в оптических запоминающих устройствах (до 10^8 бит/см²).

Острая направленность (кучность) светового излучения, обусловленная тем, что угловая расходимость луча пропорциональна длине волны и может быть меньше одной минуты. Это позволяет концентрированно и с малыми потерями передавать электрическую энергию в любую область пространства.

Возможность двойной (временной и пространственной) модуляции светового луча. Так как источник и приёмник в оптоэлектронике не связаны друг с другом электрически, а связь между ними осуществляется только по-

средством светового луча (электрически нейтральных фотонов), то они не влияют друг на друга. И поэтому в оптоэлектронном приборе поток информации передаётся лишь в одном направлении – от источника к приёмнику. Каналы, по которым распространяется оптическое излучение, не воздействуют друг на друга и практически не чувствительны к электромагнитным помехам, что определяет их высокую помехозащищённость.

Важная особенность фотодиодов – высокое быстродействие. Они могут работать на частотах до нескольких ГГц, их обычно изготавливают из германия или кремния.

Фотодиод является потенциально широкополосным приёмником. Этим обуславливается его повсеместное применение и популярность.

Контрольные вопросы

1. Определение понятия «оптоэлектроника и её преимущества перед электроникой.
2. Устройство и принцип работы светодиода.
3. Материалы, используемые при изготовлении светодиода.
4. Преимущества п/п светодиодов.
5. Разновидности конструкций светодиодов.
6. Устройство и принцип работы фотодиода
7. Принцип действия фотоносителей.
8. Основные характеристики фотодиодов.
9. Области применения фотодиодов.
10. Устройство и назначение оптрона.
11. Причины высокой помехозащищённости оптронов.
12. Преимущества триодных оптронов.
13. Режимы работы фототранзисторов.
14. Достоинства и области применения фотоприёмников.

Современная маркировка элементов электронной аппаратуры

Миниатюризация современной радиоэлектронной аппаратуры привела к значительному уменьшению размеров элементов электронных схем и к применению поверхностного монтажа. Элементы для поверхностного монтажа в современных электронных устройствах занимают не менее 80% от числа всех производимых промышленностью электронных устройств и приборов.

Сегодня любой современный печатный монтаж, выполненный серийно, не мыслим без электронных компонентов, имеющих малые размеры и поверхностный монтаж на плате. Они получили название *планарных* элементов в SMD (SMT) корпусах.

Возможны ситуации, когда фирмы – производители в один и тот же корпус под одной и той же маркировкой помещают разные по назначению и электрическим параметрам приборы. Практически каждый производитель (особенно зарубежный) работает по своим стандартам. Это вызвано отсутствием единых международных стандартов на маркировку SMD элементов. А пока встречаются элементы, корпус которых имеет стандартные размеры, но нестандартное название.

Корпуса с одним и тем же названием могут иметь разную высоту. Объясняется это необходимостью. К примеру, для конденсаторов в зависимости от ёмкости и рабочего напряжения, для резисторов – от величины рассеиваемой мощности.

Обозначения корпусов транзисторов для поверхностного монтажа не ограничиваются аббревиатурой SOT (SOD, SC -70, TO – 253 и др.) – их основное отличие в типоразмерах и расположении выводов на корпусе.

Малые размеры SMD элементов и соответственно малые зазоры между контактными площадками для них на плате ограничивают допустимое рабочее напряжение устройств.

Часто название корпусов состоит из четырёх цифр, которые отображают его длину и ширину. Маркировка наносится на корпус с помощью лазера (или трафаретной печатью символов белой краской), что позволяет размещать до 8-ми знаков на ограниченной площади. Производители размещают на корпусе SMD элементов и дополнительную технологическую информацию – дату выпуска и (или) код партии выпуска.

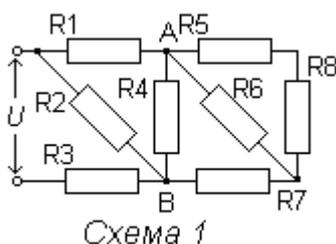
Код пишется более крупным шрифтом и располагается в верхнем левом углу корпуса, всё остальное – технологическая информация.

Маркировочный код элементов может быть цифровым, буквенным или буквенно-цифровым. Количество символов кода от 1 до 4, при этом полное наименование элемента содержит от 5-ти до 14-ти знако-символов.

Дополнительными элементами маркировки элементов схем являются цветовые полосы или точки. Единый стандарт на цвет полос или точек не разработан.

Задачи для самостоятельной работы

Все индивидуальные задания выбираются из приведенной таблицы в соответствии с последней цифрой номера зачётной книжки.



Задача № 1

В приведенной схеме 1 определить:

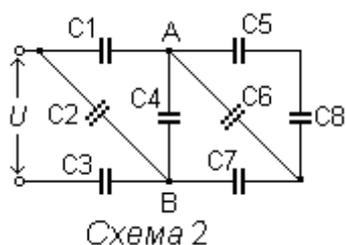
- а) полный ток, потребляемый цепью;
 б) величину падения напряжения между точками АВ;

в) полную мощность, потребляемую цепью, при протекании постоянного и переменного тока.

Данные для расчета брать из таблицы вариантов.

Таблица вариантов № 1

№ вар.	R1=R2=R3, (Ом)	R4=R5, (Ом)	R6=R7=R8, (Ом)	U, в
0	10	12	20	100
1	20	10	12	90
2	12	20	10	80
3	11	13	18	70
4	18	11	13	60
5	13	18	11	50
6	14	15	16	40
7	16	14	15	30
8	15	16	14	20
9	13	17	19	10



Задача №2

В приведенной схеме 2 определить:

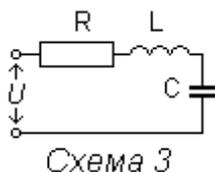
- а) полный, потребляемый цепью;
 б) величину падения напряжения между точками АВ;

в) полную мощность, потребляемую цепью, при протекании переменного тока 50Гц и 1кГц. Данные для расчета брать из таблицы вариантов

Таблица вариантов № 2

№ вар.	C1=C2=C3, (мФ)	C4=C5, (мФ)	C6=C7=C8, (мФ)	U, в
0	10	12	20	100
1	20	10	12	90
2	12	20	10	80
3	11	13	18	70
4	18	11	13	60
5	13	18	11	50

6	14	15	16	40
7	16	14	15	30
8	15	16	14	20
9	13	17	19	10



Задача №3

В приведенной схеме 3 определить мгновенные значения токов при частоте 50 и 150 Гц, $R=X_L=3$ Ом. Определить на какой частоте сопротивление цепи минимальное и определить величину тока на этой частоте.

Таблица вариантов № 3

№ вар.	R, (Ом)	L, (мкГн)	C, (мФ)	U, в
0	10	12	20	100
1	20	10	12	90
2	12	20	10	80
3	11	13	18	70
4	18	11	13	60
5	13	18	11	50
6	14	15	16	40
7	16	14	15	30
8	15	16	14	20
9	13	17	19	10

Задание № 1. Определение режима работы транзистора в линейном режиме с использованием его входной характеристики

Порядок выполнения задания:

- 1) скопировать входную характеристику транзистора, указанного в таблице с учётом индивидуального номера варианта задания;
- 2) выбрать наиболее линейный участок характеристики и определить среднюю точку (РТ) этого участка;
- 3) определить величину напряжения смещения $U_{бэ}$, обеспечивающую положение рабочей точки (РТ) на характеристике;
- 4) определить величину входного напряжения $U_{вх}$, обеспечивающую линейное усиление сигнала.

Таблица вариантов № 4

№ вар.	0	1	2	3	4
Тип транз.	1Т403 А	1Т403 Д	ГТ405 В	КТ314А-2	КТ348
Стр.	158	158	160	174	196
№ вар.	5	6	7	8	9
Тип	КТ358	КТ375	КТ379	КТ3102-	КТ601

транз.		А	А	А	А
Стр.	198	207	210	218	224

Примечание. Данные в таблице № 4 страницы соответствуют месту размещения соответствующих транзисторов в справочнике, указанном в списке литературы под №6.

Задание № 2. Определение режима работы транзистора в линейном режиме с использованием его выходной характеристики

Порядок выполнения задания:

- 1) скопировать входную и выходную характеристики транзистора, указанного в таблице с учётом индивидуального номера варианта задания;
- 2) используя данные таблицы, найти величину I_K ;
- 3) на выходной характеристике транзистора, указанного в таблице, построить нагрузочную линию;
- 4) определить точку пересечения нагрузочной прямой с линией I_{B0} , характеризующую положение рабочей точки (РТ) в исходном состоянии (входной сигнал отсутствует);
- 5) используя пределы изменения ΔI_{B0} , определить по выходной характеристике $\Delta U_{KЭ}$, а по входной характеристике с ОЭ $\Delta U_{BЭ}$ при $U_{KЭ} = 0$.

Таблица вариантов задания № 5

№ вар.	0	1	2	3	4
Тип транз.	ГТ308Б	ГТ308 В	ГТ309 Б	ГТ309 В	ГТ311 И
Стр.	279	281	301	302	329
E_K (В)	14	14	5	5	9
R_K (Ом)	280	280	1000	2000	75
I_{B0} (мкА)	200	400	30	30	400
ΔI_{B0} (мкА)	200	400	40	40	400
№ вар.	5	6	7	8	9
Тип транз.	КТ312 А	ГТ313 А	ГТ320 А	ГТ322 В	ГТ403 А
Стр.	348	362	376	407	435
E_K (В)	50	10	10	12	1
R_K (Ом)	4166,6	200	100	1000	12,5
I_{B0} (мкА)	200	150	600	150	1мА
ΔI_{B0} (мкА)	200	200	800	100	1мА

Примечание. Данные в таблице № 5 страницы соответствуют месту размещения соответствующих транзисторов в справочнике, указанном в списке литературы под №7.

Литература

1. Электроника и микропроцессорная техника: учебник / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев – М.: КРОКУС, 2013 – (Бакалавриат).
2. Электроника: учебник для бакалавров / О. В. Миловзоров, И. Г. Панков – М.: Издательство Юрайт, 2013.

3. Схемотехника для бакалавров: учебное пособие / Составители Е. П. Пеньков, В. Е. Пеньков – Белгород: ИПЦ «Политера», 2012.
4. Схемотехника телекоммуникационных устройств: учебник / авт.- сост. Пеньков Е. П., В. Е. Пеньков. – Белгород: ИД «Белгород» НИУ «БелГУ».2014.
5. Маркировка радиоэлементов: Справочник/ А. П. Кашкаров – М.: ИП РадиоСофт, 2010.
6. Полупроводниковые приборы: Транзисторы. Справочник / В. Л. Аронов, А. В. Баюков, А. А. Зайцев и др. Под общей ред. Н. Н. Горюнова – М. : Энергоатомиздат, 1985.
7. Транзисторы. Справочник. Под общей редакцией И. Ф. Николаевского. Изд – во «Связь». М., 1969.