

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Факультет Инновационных технологий

Кафедра управления инновациями

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ И К САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ

по дисциплине «Физика полупроводниковых приборов»

Составлены кафедрой управления инновациями для студентов, обучающихся  
по направлению подготовки «Инноватика»

Форма обучения очная

Составитель  
доцент кафедры управления инновациями

П.Н. Дробот  
«25» октября 2018 г.

Томск 2018

## Оглавление

Введение .....	3
Материально-техническое обеспечение для практических занятий и самостоятельной работы.....	4
Прием выполненных практических заданий .....	6
Тема занятий 1 – «Полупроводниковые приборы на основе однородных полупроводников». ....	8
Практическое занятие с указаниями по самостоятельной работе «Изучение некоторых свойств полупроводниковых терморезисторов. Изучение спектральных и частотных характеристик фотопроводимости полупроводниковых фотосопротивлений» .....	8
Тема занятий 2 «Потенциальные барьеры в полупроводниковых приборах». Практическое занятие с указаниями по самостоятельной работе 1. Изучение вольт – амперной характеристики р-п - перехода и ее зависимости от температуры. ....	11
Тема занятий 3 «Полупроводниковые диоды».....	14
Практическое занятие с указаниями по самостоятельной работе «Изучение свойств полупроводниковых варикапов с р-п переходом. Характеристики и параметры полупроводникового стабилитрона. Исследование характеристик полупроводниковых СВЧ диодов. Исследование свойств полупроводниковой солнечной» .....	14
Тема занятий 4 «Транзисторы» .....	17
Практическое занятие с указаниями по самостоятельной работе «Измерение и расчет $h$ – параметров биполярного транзистора. Изучение частотной зависимости коэффициента усиления по току биполярного транзистора».....	17
Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины .....	22

## **Введение**

Дисциплина «Физика полупроводниковых приборов» предлагается к изучению студентам бакалавриата «Инноватика» для формирования профессиональных знаний в области физики полупроводниковых приборов как основы возможных инновационных проектов в качестве разработки НИОКР. Изучение дисциплины имеет целью получение знаний в области основ физики полупроводников, физических принципов, лежащих в основе работы полупроводниковых приборов и об области их применения; получение представлений об адекватных способах решения экспериментальных задач по измерению, расчету и проектированию различных полупроводниковых приборов и способных применять эти знания для управления инновациями в электронной технике. Дисциплина формирует способность спланировать необходимый эксперимент, получить адекватную модель и исследовать ее.

Полученные знания и навыки могут быть использованы в управлении инновациями в электронной технике.

Практические задания, предусмотренные настоящими указаниями, выполняются студентами во время аудиторных занятий индивидуально под контролем со стороны преподавателя. Все консультации осуществляются преподавателем.

Перед началом занятий студенты должны изучить инструкцию по охране труда. Преподаватель должен убедиться в знании инструкции, задавая студенту вопросы по ее содержанию, после чего сделать соответствующую запись в журнале охраны труда.

Во время проведения практических занятий в аудитории студентам запрещается передавать друг другу файлы и другие материалы, являющиеся результатом выполнения заданий.

Студент имеет право просить консультации у преподавателя, если он в текущий момент не распределяет задания, не принимает выполненные работы и не консультирует другого студента.

Преподаватель, давая консультацию студенту, указывает раздел технической

документации или методической литературы, в которой имеется ответ на вопрос студента. Если необходимые сведения в документации и литературе отсутствуют, то преподаватель должен дать устные пояснения или продемонстрировать практические действия, приводящие к требуемому результату, с последующим повторением студентом.

Консультации, выдача практических заданий и прием результатов выполнения осуществляется только во время аудиторных занятий. Задания выполняются последовательно. Правильное выполнение некоторых заданий возможно только, если студент корректно выполнил предыдущие задания. Поэтому приступать к следующему заданию студент может, только сдав преподавателю результат выполнения предыдущего.

### **Материально-техническое обеспечение для практических занятий и самостоятельной работы**

#### **Для практических занятий**

Лаборатория управления проектами

учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа, учебная аудитория для проведения занятий практического типа, учебная аудитория для проведения занятий лабораторного типа, учебная аудитория для проведения занятий семинарского типа, помещение для курсового проектирования (выполнения курсовых работ), помещение для проведения групповых и индивидуальных консультаций, помещение для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации, помещение для самостоятельной работы

634034, Томская область, г. Томск, Вершинина улица, д. 74, 414 ауд.

Описание имеющегося оборудования:

- Компьютер WS2 (6 шт.);
- Компьютер WS3 (2 шт);
- Компьютер Celeron (3 шт.);
- Компьютер Intel Core 2 DUO;
- Проектор Nec;
- Экран проекторный Projecta;

- Стенд передвижной с доской магнитной;
- Акустическая система + (2 колонки) KEF-Q35;
- Кондиционер настенного типа Panasonic CS/CU-A12C;
- Комплект специализированной учебной мебели;
- Рабочее место преподавателя.

Программное обеспечение:

- Microsoft Windows 7 Pro
- OpenOffice

Лаборатория ГПО

учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа, учебная аудитория для проведения занятий практического типа, учебная аудитория для проведения занятий лабораторного типа, учебная аудитория для проведения занятий семинарского типа, помещение для курсового проектирования (выполнения курсовых работ), помещение для проведения групповых и индивидуальных консультаций, помещение для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации, помещение для самостоятельной работы

634034, Томская область, г. Томск, Вершинина улица, д. 74, 126 ауд.

Описание имеющегося оборудования:

- Компьютер Celeron;
- Компьютер WS3 (5 шт.);
- Компьютер WS2 (2 шт.);
- Доска маркерная;
- Проектор LG RD-JT50;
- Экран проекторный;
- Экран на штативе Draper Diplomat;
- Осциллограф GDS-820S; Размещение и освещенность рабочих мест в учебной

аудитории (лаборатории) должно удовлетворять действующим требованиям санитарных

правил и норм (СанПиН).

Размещение и освещенность рабочих мест в учебной аудитории (лаборатории) должно удовлетворять действующим требованиям санитарных правил и норм (СанПиН).

#### **Для самостоятельной работы**

Для самостоятельной работы используются учебные аудитории (компьютерные классы), расположенные по адресам:

- 634050, Томская область, г. Томск, Ленина проспект, д. 40, 233 ауд.;
- 634045, Томская область, г. Томск, ул. Красноармейская, д. 146, 201 ауд.;
- 634034, Томская область, г. Томск, Вершинина улица, д. 47, 126 ауд.;
- 634034, Томская область, г. Томск, Вершинина улица, д. 74, 207 ауд.

Состав оборудования: - учебная мебель; - компьютеры класса не ниже ПЭВМ INTEL Celeron D336 2.8ГГц. - 5 шт.; - компьютеры подключены к сети «Интернет» и обеспечивают доступ в электронную информационно-образовательную среду университета.

Перечень программного обеспечения:

- Microsoft Windows;
- OpenOffice;
- Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows;
- 7-Zip;
- Google Chrome.

#### **Прием выполненных практических заданий**

Результаты выполнения практических заданий демонстрируются преподавателю. Во время приема выполненной работы преподаватель вправе:

- Требовать у студента демонстрации выполненного задания в виде файлов, таблиц, мнемосхем, рисунков, графиков или диаграмм, в том числе, по возможности и необходимости, в бумажном письменном или распечатанном виде.

- Самостоятельно производить манипуляции с программным обеспечением, не изменяя его конфигурацию.

- Требовать у студента пояснений, относящихся к способам реализации задания.

Задание считается выполненным и принимается преподавателем только в том случае, если получены все результаты, предусмотренные заданием. Если какие то результаты, предусмотренные заданием, не получены или неверны, то задание подлежит доработке.

Студент должен работать внимательно и аккуратно. Подлежат обязательному исправлению замеченные преподавателем недочеты:

- грамматические ошибки;
- небрежное оформление рисунков, графиков, структур, схем;
- неточности в описаниях, структурах, схемах.

Результаты выполнения заданий сохраняются студентом в электронном виде (файлы), а также, если возможно и удобно, в бумажном формате, до получения зачета/экзамена по данной дисциплине.

До начала экзаменационной сессии студент должен сдать результаты выполнения всех практических заданий, предусмотренным настоящими указаниями. В противном случае студенты к сдаче экзамена (зачета) не допускаются.

## **Тема занятий 1 – «Полупроводниковые приборы на основе однородных полупроводников».**

### **Практическое занятие с указаниями по самостоятельной работе «Изучение некоторых свойств полупроводниковых терморезисторов. Изучение спектральных и частотных характеристик фотопроводимости полупроводниковых фотосопротивлений»**

Цель: Научить студентов выявлять потенциальные полупроводниковые приборы на базе термосопротивлений и на базе фотосопротивлений, разрабатывать описание инновационного продукта возможного проекта на основе этих полупроводниковых разработок.

Задание:

1. Используя основную литературу, конспект лекций и ресурсы интернет соберите информацию по теме занятия – термосопротивлениях и фотосопротивлениях. Подготовьте мини-лекцию с использованием слайдов презентации и доложите полученные результаты.

### **Принцип действия термосопротивлений**

**Термосопротивления** (термисторы) - полупроводниковые приборы, принцип действия которых основан на зависимости электрической проводимости полупроводников от температуры.

Сопротивление терморезисторов при комнатной температуре лежит в пределах от нескольких Ом до десятков МОм.

Вольтамперная характеристика (ВАХ) терморезистора (рис. 4) представлена тремя основными участками: OA, AB и BC. На начальном участке OA характеристика линейна, т.к. при малых токах мощность, выделяющаяся в термисторе за счет джоулева тепла, мала и заметно не влияет на его температуру. На участке AB линейность характеристики нарушается. С ростом тока температура термистора за счет джоулева тепла повышается, а его сопротивление, вследствие увеличения концентрации носителей зарядов (электронов и дырок) уменьшается. На конечном участке BC характеристика становится почти параллельной оси абсцисс, что делает возможным применение некоторых типов терморезисторов для стабилизации напряжения.

### **Методические указания по самостоятельной работе:**

Студентам необходимо проработать лекционный материал и ресурсы интернет по теме занятия. Подготовится к презентации сделанного исследования свойств термосопротивлений и фотосопротивлений.

Используйте следующий материал:

Терморезисторы - это по сути термометры сопротивления, выполненные на основе смешанных оксидов переходных металлов. Два основные типа термисторов – NTC (с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления) и PTC (с положительным коэффициентом). Наиболее распространенный тип – NTC. PTC

термисторы используются только в очень узких диапазонах температур, в несколько градусов, в основном в системах сигнализации и контроля. **Конструкция и материалы.** Большим преимуществом термисторов является разнообразие форм и миниатюрность. Основные конструктивные типы: бусиновые (0,1-1 мм), дисковые (2,5-18 мм), цилиндрические (3-40 мм), пленочное покрытие (толщина 0,2-1 мм). Выпускаются бусиновые термисторы диаметром до 0,07 мм с выводами толщиной 0,01 мм. Такие миниатюрные датчики позволяют измерять температуру внутри кровеносных сосудов или растительных клеток. Большинство термисторов – керамические полупроводники, изготовленные из гранулированных оксидов и нитридов металлов путем формирования сложной многофазной структуры с последующим спеканием (синтерация) на воздухе при 1100-1300 °С. Сложные двойные и тройные структуры оксидов переходных металлов, такие как  $(AB)_3O_4$ ,  $(ABC)_3O_4$  лежат в основе термисторов. Распространенной формулой является  $(Ni_{0.2}Mn_{0.8})_3O_4$ . Наиболее стабильными термисторами при температурах ниже 250 °С являются термисторы на основе смешанных оксидов марганца и никеля или магния, никеля и кобальта, имеющие отрицательный ТКС. Удельная проводимость термистора  $\rho$  (25 °С) зависит от химического состава и степени окисления. Дополнительное управление проводимостью осуществляется добавлением очень малых концентраций таких металлов как Li и Na. При изготовлении бусиновых термисторов бусинки наносятся на две параллельные платиновые проволоки при температуре 1100 °С, проволоки разрезаются на куски для получения необходимой конфигурации выводов. На бусинки наносится стеклянное покрытие, спекаемое при 300 °С, либо бусинки герметизируются внутри миниатюрных стеклянных трубок. Для получения металлических контактов в дисковых термисторах, на диск наносится металлическое покрытие Pt-Pd-Ag и выводные проводники соединяются с покрытием пайкой или прессованием. Номинальное сопротивление термисторов значительно выше, чем у металлических термометров сопротивления, оно обычно составляет 1, 2, 5, 10, 15 и 30 кОм. Поэтому может применяться двухпроводная схема включения.

**Зависимость сопротивления термистора от температуры** Сопротивление идеальных полупроводников (количество дырок и носителей заряда одинаково) в зависимости от температуры может быть представлено следующей формулой  $R(T) = A \exp(b/T)$  где A, b – постоянные, зависящие от свойств материала и геометрических размеров. Однако, сложная композиция и неидеальное распределение зарядов в термисторном полупроводнике не позволяет напрямую использовать теоретическую зависимость и требует эмпирического подхода. Для NTC термисторов используется аппроксимационная зависимость Стейнхарта и Харта  $1/T = a + b(\ln R) + c(\ln R)^3$  где T –

температура в К; R – сопротивление в Ом; a,b,c – константы термистора, определенные при градуировке в трех температурных точках, отстоящих друг от друга не менее, чем на 10 °С. Типичный 10 кОм-ый термистор имеет коэффициенты в диапазоне 0-100 °С близкие к следующим значениям:  $a = 1,03 \cdot 10^{-3}$   $b = 2,93 \cdot 10^{-4}$   $c = 1,57 \cdot 10^{-7}$ . Дисковые термисторы могут быть взаимозаменяемыми, т.е. все датчики определенного типа будут иметь одну и ту же характеристику в пределах установленного производителем допуска. Лучший возможный допуск, как правило,  $\pm 0,05$  °С в диапазоне от 0 до 70 °С. Бусинковые термисторы не взаимозаменяемы и требуют индивидуальной градуировки. Градуировка термисторов может осуществляться в жидкостных термостатах. Необходимо герметизировать термисторы, погрузив их в стеклянные пробирки. Обычно для градуировки и вычисления констант проводится сличение термистора с образцовым платиновым термометром. В диапазоне от 0 до 100 °С сличение проводится в точках с интервалом 20 °С. Погрешность интерполяции обычно не превышает 1 –5 мК при использовании модифицированного уравнения Стейнхарта и Харта:  $1/T = a + b(\ln R) + c(\ln R)^2 + d(\ln R)^3$  Могут также использоваться реперные точки: тройная точка воды (0,01 °С), точка плавления галлия (29,7646 °С), точки фазовых переходов эвтектик и органических материалов. Для градуировки нескольких термисторов они могут быть соединены последовательно, так чтобы через них проходил одинаковый ток. При градуировке и использовании термисторов важно учитывать эффект нагрева измерительным током. Для 10 кОм – ого термистора рекомендуется выбирать токи от 10 мкА (погрешность 0,1 мК), до 100 мкА (погрешность 10 мК). **Стабильность** Причины нестабильности термисторов следующие: - напряжения, возникающие в материале при термоциклировании и образование микротрещин; - структурные изменения в полупроводнике; - внешнее загрязнение (водой и др. веществами) и в результате химические реакции в порах и на поверхности полупроводника; - нарушение адгезии металлической пленки; - миграция примесей из металлических контактов в материал термистора. Для получения стабильного состояния термисторы подвергают старению (до 500-700 дней). Как правило, во время старения наблюдается рост сопротивления. При длительном использовании термисторов, они уходят за пределы допуска, в большинстве случаев, термисторный термометр показывает температуру несколько ниже, чем значение, определенное по номинальной характеристике. Исследования показывают, что бусинковые термисторы могут проявлять очень высокую стабильность (дрейф до 3 мК за 100 дней при 60 °С). Дисковые термисторы менее стабильны (дрейф до 50 мК за 100 дней при 60 °С). Термисторы представляют особый интерес для измерения низких температур благодаря своей относительной нечувствительности к магнитным полям. Некоторые типы термисторов могут применяться до температуры минус 100 °С. Диапазон наилучшей

стабильности термисторов – от 0 до 100 °С. Основными преимуществами термисторов являются вибропрочность, малый размер, малая инерционность и невысокая цена.

**Тема занятий 2 «Потенциальные барьеры в полупроводниковых приборах». Практическое занятие с указаниями по самостоятельной работе. Изучение вольт – амперной характеристики р-п - перехода и ее зависимости от температуры.**

Цель: Овладеть знаниями о потенциальных барьерах и их базовой роли в работе многих полупроводниковых приборов.

Изучите самостоятельно нижеследующий материал.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) р-п-перехода представляет собой зависимость тока от величины и полярности приложенного напряжения и описывается выражением:

$$I = I_0 \left( e^{\frac{U_p}{\varphi_T}} - 1 \right),$$

где  $I_0$  – тепловой обратный ток р-п-перехода;  $U_d$  – напряжение на р-п-переходе;  $j_T = k T / q$  – тепловой потенциал, равный контактной разности потенциалов ( $j_k$ ) на границе р-п-перехода при отсутствии внешнего напряжения (при  $T = 300$  К,  $j_T = 0,025$  В);  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура;  $q$  – заряд электрона.

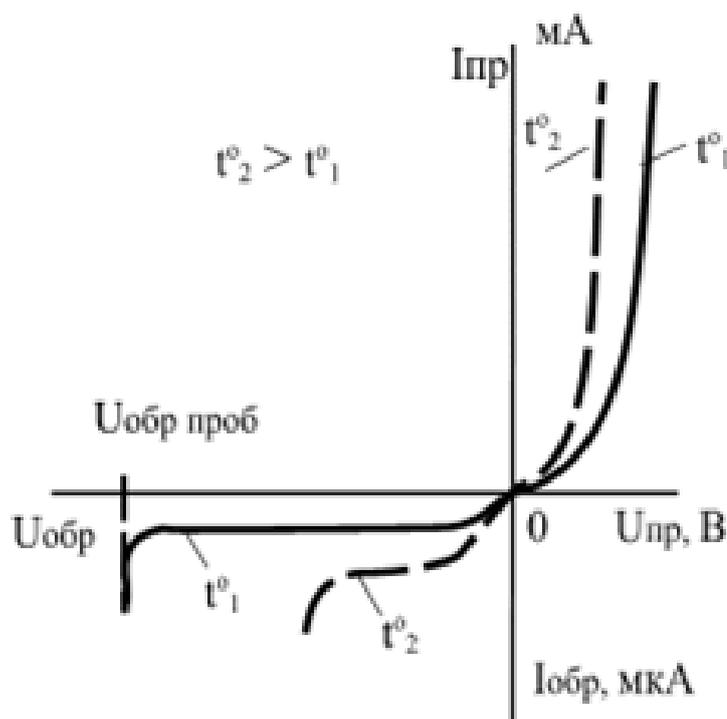


Рисунок 1 – Вольт-амперная характеристика р-п-перехода и влияние температуры на прямой и обратный токи

При отрицательных напряжениях порядка  $0,1 \dots 0,2$  В экспоненциальной составляющей, по сравнению с единицей, можно пренебречь ( $e^4 \gg 0,02$ ), при положительных напряжениях, превышающих  $0,1$  В, можно пренебречь единицей ( $e^4 \gg 54,6$ ). Тогда вольт-амперная характеристика р-п-перехода, будет иметь вид, приведенный на рис 2.4.

По мере возрастания положительного напряжения на р-п-переходе прямой ток диода резко возрастает. Поэтому незначительное изменение прямого напряжения приводит к значительному изменению тока, что затрудняет задание требуемого значения прямого тока с помощью напряжения. Вот почему для р-п-перехода характерен режим заданного прямого тока.

Вольт-амперная характеристика (см. рис. 2.4) имеет две ветви: прямую, расположенную в первом квадранте графика, и обратную, расположенную в третьем квадранте. Обратный ток создается дрейфом через р-п-переход неосновных носителей заряда. Поскольку концентрация неосновных носителей заряда на несколько порядков ниже, чем основных, обратный ток несоизмеримо меньше прямого.

При небольшом увеличении обратного напряжения от нуля обратный ток сначала возрастает до значения, равного значению теплового тока ( $I_0$ ), а с дальнейшим увеличением  $U_{обр}$  ток остается постоянным. Это объясняется тем, что при очень малых значениях обратного напряжения еще есть незначительная диффузия основных носителей заряда, встречное движение которых уменьшает результирующий ток в обратном направлении. Когда эта диффузия прекращается, значение обратного тока определяется только движением через переход неосновных носителей, количество которых в полупроводнике не зависит от напряжения. Повышение обратного напряжения до определенного значения, называемого напряжением пробоя ( $U_{обр.проб}$ ) приводит к пробоему электронно-дырочного перехода, т.е. к резкому уменьшению обратного сопротивления и, соответственно, росту обратного тока.

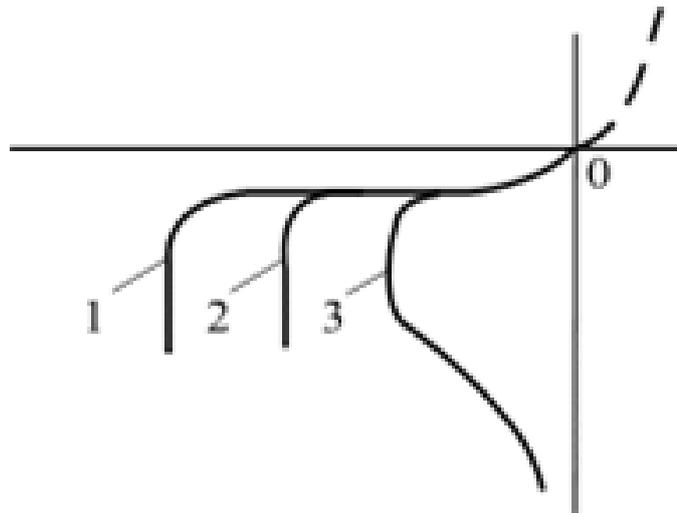


Рисунок 2 –Виды пробоя p-n-перехода: 1 – лавинный; 2 – туннельный; 3 – тепловой

Свойство p-n-перехода проводить электрический ток в одном направлении значительно больший, чем в другом, называют односторонней проводимостью. Электронно-дырочный переход, электрическое сопротивление которого при одном направлении тока на несколько порядков больше, чем при другом, называют выпрямляющим переходом.

Влияние температуры на прямую и обратную ветви вольт-амперной характеристики p-n-перехода показано штриховой линией (см. рис. 2.4). Прямая ветвь при более высокой температуре располагается левее, а обратная – ниже. Таким образом, повышение температуры при неизменном внешнем напряжении приводит к росту как прямого, так и обратного токов, а напряжение пробоя, как правило, снижается. Причиной такого влияния повышения температуры является уменьшение прямого и обратного сопротивлений из-за термогенерации пар носителей заряда, а также из-за снижения потенциального барьера ( $j_0$ ) и увеличение энергии подвижных носителей зарядов.

Рассмотрим причины, вызывающие пробой p-n-перехода и процессы, которые при этом происходят.

Пробоем p-n-перехода (рис. 2.5) называют, как было сказано, резкое уменьшение обратного сопротивления, вызывающее значительное увеличение тока при достижении обратным напряжением критического для данного прибора значения ( $U_{обр.проб}$ ). Пробой p-n-перехода происходит при повышении обратного напряжения вследствие резкого возрастания процессов генерации пар «свободный электрон – дырка». В зависимости от причин, вызывающих дополнительную интенсивную генерацию пар носителей заряда, пробой может быть электрическим и тепловым. Электрический пробой, в свою очередь, делится на лавинный и туннельный.

**Методические указания по самостоятельной работе:**

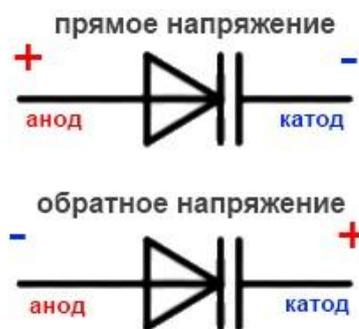
Студентам необходимо проработать лекционный материал, подобрать дополнительные источники информации в интернет. На основе найденной вторичной информации подготовить презентацию и доклад по теме своих исследований. Подготовить презентации расчетов д.

### Тема занятий 3 «Полупроводниковые диоды»

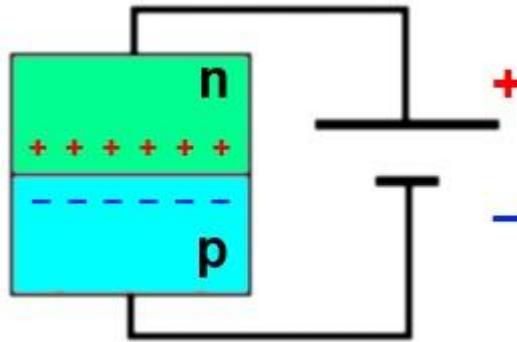
**Практическое занятие с указаниями по самостоятельной работе «Изучение свойств полупроводниковых варикапов с р-п переходом. Характеристики и параметры полупроводникового стабилитрона. Исследование характеристик полупроводниковых СВЧ диодов. Исследование свойств полупроводниковой солнечной»**

**Варикап** – это полупроводниковый диод, основным параметром которого является, не односторонняя электрическая проводимость, а изменяемая под действием управляющего напряжения емкость. То есть в варикапе используется зависимость приложенного к нему обратного напряжения и емкости р-п-перехода.

Принцип работы варикапа. Варикап представляет собой обычный электронный компонент, созданный из двух полупроводников различного типа проводимости (р- и n-). Область перехода между этими полупроводниками называется р-п-переходом.



При отсутствии внешнего управляющего напряжения в области р-п-перехода образуется потенциальный барьер. При прямом управляющем напряжении (+ к аноду, – к катоду) этот барьер практически полностью нейтрализуется и варикап, по сути, работает как обычный диод. Если же к варикапу приложено обратное напряжение (+ к катоду, - к аноду), то ширина потенциального барьера увеличивается и он начинает вести себя как простейший конденсатор. При этом, чем больше обратное напряжение тем меньше емкость конденсатора (барьер расширяется и расстояние между воображаемыми обкладками увеличивается).



## Применение

Варикапы часто используются в частотоподающих электрических цепях, так как позволяют достаточно просто изменять рабочую частоту системы посредством изменения ее емкости, которая в свою очередь меняется при изменении управляющего напряжения. Их можно встретить в схемах радиоприемников, беспроводных модулей передачи данных и прочих устройствах, где применяются частотозависимые цепи.

## Стабилитроны

Стабилитрон это полупроводниковый диод, предназначенный для стабилизации напряжения. В отличие от обычных диодов, стабилитрон имеет достаточно низкое напряжение пробоя (при обратном включении) и что самое главное - может поддерживать это напряжение на постоянном уровне при значительном изменении силы обратного тока. Благодаря этому эффекту стабилитроны широко применяются в источниках питания.



### *Обозначение стабилитрона на принципиальных схемах*

В стабилитронах, для создания р-п перехода, используются материалы с высокой концентрацией примесей. При относительно небольших обратных напряжениях в р-п переходе возникает сильное электрическое поле, вызывающее его электрический пробой. При этом электрический пробой является обратимым (если конечно не наступит тепловой пробой вследствие слишком большой силы тока).

В основе работы стабилитрона лежат два механизма: лавинный пробой р-n перехода и туннельный пробой р-n перехода. Туннельный пробой р-n перехода в англоязычной литературе называется Эффектом Зенера, поэтому стабилитрон имеет еще одно название - диод Зенера.

Несмотря на схожие результаты действия этих механизмов - различны, хотя и присутствуют в любом стабилитроне совместно, но преобладает только один из них. У стабилитронов до напряжения 5,6 вольт преобладает туннельный пробой с отрицательным температурным коэффициентом, выше 5,6 вольт доминирующим становится лавинный пробой с положительным температурным коэффициентом. При напряжении, равном 5,6 вольт, оба эффекта уравниваются, поэтому выбор такого напряжения является оптимальным решением для устройств с широким температурным диапазоном применения.



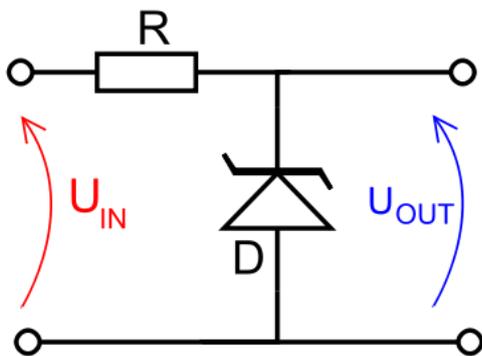
*Обозначение  
двуханодного стабилитрона  
на принципиальных схемах*

Существует большое количество разновидностей стабилитронов:

Стабилитроны отличаются по мощности, существуют мощные стабилитроны и маломощные стабилитроны. Прецизионные стабилитроны - обладают повышенной стабильностью напряжения стабилизации, для них вводятся дополнительные нормы на временную нестабильность напряжения и температурный коэффициент напряжения (например: 2С191, КС211, КС520);

Двусторонние - обеспечивают стабилизацию и ограничение двухполярных напряжений, для них дополнительно нормируется абсолютное значение несимметричности напряжения стабилизации (например: 2С170А, 2С182А);

Быстродействующие - имеют сниженное значение барьерной ёмкости (десятки пФ) и малую длительность переходного процесса (единицы нс), что позволяет стабилизировать и ограничивать кратковременные импульсы напряжения (например: 2С175Е, КС182Е, 2С211Е).



*Типовая схема  
включения стабилитрона*

Характеристики стабилитронов:

Напряжение стабилизации - значение напряжения на стабилитроне при прохождении заданного тока стабилизации. Пробивное напряжение диода, а значит, напряжение стабилизации стабилитрона зависит от толщины р-п-перехода или от удельного сопротивления базы диода. Поэтому разные стабилитроны имеют различные напряжения стабилизации (от 3 до 400 В).

Температурный коэффициент напряжения стабилизации - величина, определяемая отношением относительного изменения температуры окружающей среды при постоянном токе стабилизации. Значения этого параметра у различных стабилитронов различны. Коэффициент может иметь как положительные так и отрицательные значения для высоковольтных и низковольтных стабилитронов соответственно. Изменение знака соответствует напряжению стабилизации порядка 6В.

Дифференциальное сопротивление - величина, определяемая отношением приращения напряжения стабилизации к вызвавшему его малому приращению тока в заданном диапазоне частот.

Максимально допустимая рассеиваемая мощность - максимальная постоянная или средняя мощность, рассеиваемая на стабилитроне, при которой обеспечивается заданная надёжность.

#### **Тема занятий 4 «Транзисторы»**

**Практическое занятие с указаниями по самостоятельной работе «Измерение и расчет  $h$  – параметров биполярного транзистора. Изучение частотной зависимости коэффициента усиления по току биполярного транзистора»**

Цель: Научить студентов пониманию  $h$  – параметров биполярного транзистора. м роли частотной зависимости коэффициента усиления по току биполярного транзистора.

Подготовить презентацию по теме и на занятии обсудить полученные результаты.

При определении переменных составляющих токов и напряжений (т. е. при анализе на переменном токе) и при условии, что транзистор работает в активном режиме, его часто представляют в виде линейного четырехполюсника (рис. 1.81). В четырехполюснике условно изображен транзистор, включенный по схеме с общим эмиттером.

Для разных схем включения транзистора токи и напряжения этого-четырёхполюсника обозначают различные токи и напряжения транзистора. Например, для схемы с общим эмиттером эти токи и напряжения следующие:

$i_1$  — переменная составляющая тока базы;  $u_1$  — переменная составляющая напряжения между базой и эмиттером;

$i_2$  — переменная составляющая тока коллектора;  $u_2$  — переменная составляющая напряжения между коллектором и эмиттером.

Транзистор удобно описывать, используя так называемые  $h$ -параметры. При этом

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

т. е.  $u_1 = h_{11} \cdot i_1 + h_{12} \cdot u_2$   
 $i_2 = h_{21} \cdot i_1 + h_{22} \cdot u_2$

Коэффициенты  $h_{ij}$  определяют опытным путем. Например,  $h_{11}$  определяют, устанавливая  $u_2 = 0$  (режим короткого замыкания на выходе). При этом  $h_{11} = u_1 / i_1 | u_2 = 0$   
 $h_{22} = i_2 / u_2 | i_1 = 0$

### **Методические указания по самостоятельной работе**

Студентам необходимо проработать лекционный материал. Используя доступ в Интернет найти вторичные данные по теме занятий. Подготовится для представления информации группе.

### **Методические указания по самостоятельной работе**

Студентам необходимо проработать лекционный материал. Рассчитать бюджет маркетинга для собственного проекта. Изучить представленный выше учебный материал. Подготовится для представления информации группе.

### **Темы опросов на занятиях**

Полупроводниковые термосопротивления. Параметры и характеристики термосопротивлений. Конструкция. Применение термосопротивлений. Релейный эффект. Применение релейного эффекта.

Фотосопротивления. Принцип действия фотосопротивлений. Параметры и характеристики. Конструкция и технология изготовления. Применение фотосопротивлений.

Нелинейные полупроводниковые сопротивления (варисторы). Технология изготовления и конструкция варисторов. Принцип действия. Параметры и характеристики варисторов. Применение варисторов.

Полупроводниковые термоэлементы. Принцип действия термоэлектрических генераторов.

Термо-э.д.с. Эффект Пельтье. Параметры термоэлементов. Холодильники и нагреватели.

Контакт металл – полупроводник. Образование потенциального барьера на границе металл полупроводник. Контактная разность потенциалов. Запорный (выпрямляющий) и антизапорный контакты. Диодная и диффузионная теории выпрямления тока на контакте металл – полупроводник.

p-n переход. Потенциальный барьер в p-n переходе. Распределение концентрации свободных носителей заряда в p-n переходе. Расчет ширины области пространственного заряда p-n перехода. Емкость p-n перехода. Выпрямление тока p-n переходом. ВАХ p-n перехода. Особенности работы p-n перехода при больших обратных смещениях (пробой p-n перехода). Виды пробоя: лавинный, туннельный, тепловой, поверхностный.

Структура металл – диэлектрик - полупроводник. Идеальная структура металл – диэлектрик полупроводник. Режимы аккумуляции, обеднения, инверсии. Поверхностные состояния, поверхностный и пространственный заряды.

Диоды СВЧ. Выпрямляющие, импульсные, преобразовательные диоды СВЧ. Конструкция диодов СВЧ. Параметры и характеристики диодов СВЧ.

Полупроводниковые стабилитроны. Принцип действия и применение полупроводниковых стабилитронов. Параметры стабилитрона.

Полупроводниковые варикапы. Принцип работы варикапа в качестве усилителя. Эквивалентная схема полупроводникового варикапа. Параметры варикапа.

Фотодиоды и фотоэлементы. Физические принципы работы фотодиода. Конструкция фотодиодов. Параметры фотодиодов. Фотоэлементы. Эквивалентная схема фотоэлемента. Параметры фотоэлемента.

Биполярные транзисторы. Классификация транзисторов. Технология изготовления биполярных транзисторов. Принцип действия транзистора в качестве усилителя. Расчет постоянных токов в транзисторе. Статические параметры биполярного транзистора.

Полупроводниковый триод как элемент схемы. Частотные свойства биполярного транзистора. Представление транзистора в виде эквивалентного четырехполюсника в системе Z, Y, H параметров. Эквивалентные схемы транзистора: физические и формальные.

Полевые транзисторы с p-n переходом в качестве затвора. Конструкции полевых транзисторов. Принцип действия и выходные характеристики полевого транзистора с p-n переходом в качестве затвора. Расчет ВАХ полевого транзистора с p-n переходом. Параметры полевого транзистора.

Полевые транзисторы с изолированным затвором. Конструкция и выходные характеристики

полевых транзисторов с изолированным затвором. Расчет ВАХ МДП транзистора с изолированным затвором. Параметры МДП–транзистора. Преимущества и недостатки полевых транзисторов.

### Вопросы на самоподготовку

1. Почему с повышением температуры тепловой ток увеличивается, используя только физические основы полупроводников?
2. В чем причина возникновения тока термогенерации в переходе?
3. Почему ширина перехода с увеличением концентрации носителей уменьшается?
4. Как изменяется ширина перехода в зависимости от полярности приложенного внешнего напряжения?
5. Нарисуйте эквивалентную схему транзистора при малом сигнале для переменных составляющих при включении с ОБ
6. Нарисуйте эквивалентную схему транзистора при малом сигнале для переменных составляющих при включении с ОЭ.
7. Нарисуйте статические выходные и передаточные характеристики транзистора с управляющим р-п-переходом.
8. Начертите передаточные характеристики транзистора с индуцированным каналом для каналов р и п типа.
9. Начертите эквивалентную схему полевого транзистора для переменных составляющих в режиме малого сигнала.

### Зачёт

1. Какие типы полупроводников Вы знаете?
2. Для каких целей в полупроводник вводятся примеси?
3. От каких параметров зависят концентрации р и п в собственном полупроводнике?
4. Что характеризует подвижность носителей заряда и почему подвижность с повышением температуры падает?
5. Что означает понятие время жизни носителей и почему с увеличением концентрации доноров или акцепторов время жизни падает?
6. Что означает понятие диффузионная длина?
7. От каких параметров зависят диффузионные и дрейфовые токи в полупроводнике?
8. Объясните, почему дырки п-слоя и электроны р-слоя могут свободно переходить соответственно в р-слой и п-слой?
9. Объясните, почему при равновесии ток через переход равен нулю?
10. Почему переход в основном сосредоточен в полупроводнике с более низкой концентрацией примесей?

11. Почему ширина перехода с увеличением концентрации носителей уменьшается?
12. Как изменяется ширина перехода в зависимости от полярности приложенного внешнего напряжения?
13. Какие типы переходов Вы знаете?
14. Приведите формулу, описывающую статическую вольт-амперную характеристику диода.
15. Объясните физическую природу обратного теплового тока.
16. Запишите выражение, определяющее температурную зависимость теплового тока.
17. Объясните, почему с повышением температуры тепловой ток увеличивается, используя только физические основы полупроводников?
18. В чем причина возникновения тока термогенерации в переходе?
19. Зависит ли статическая вольтамперная характеристика диода от температуры при прямом смещении?
20. Нарисуйте эквивалентную схему диода при прямом смещении.
21. Объясните причину появления барьерной емкости перехода и ее зависимость от величины приложенного напряжения.
22. Физическая природа появления диффузионной емкости и ее зависимость от величины тока, протекающего через переход.
23. Какие виды пробоя перехода Вы знаете?
24. Полупроводниковые стабилитроны и их основное применение.
25. Почему для производства стабилитронов в основном используется кремний?
26. Режимы работы биполярных транзисторов.
27. Схемы включения биполярных транзисторов.
28. Физические основы работы биполярных транзисторов.
29. Основные токовые соотношения в биполярном транзисторе.
30. Начертите статические характеристики реального транзистора для схемы с общей базой.
31. Нарисуйте эквивалентную схему транзистора при малом сигнале для переменных составляющих при включении с ОБ.
32. Зависимость параметров транзистора от температуры.
33. Основные параметры транзистора при включении с ОЭ.
34. Статические характеристики транзистора с ОЭ.
35. Нарисуйте эквивалентную схему транзистора при малом сигнале для переменных составляющих при включении с ОЭ.
36. В чем принципиальные отличия в работе полевых транзисторов от биполярных?
37. Объясните физические принципы работы полевого транзистора с управляющим р-n-переходом.
38. Почему канал у стока сужается?
39. Какие типы каналов у полевых транзисторов Вы знаете?
40. Нарисуйте статические выходные и передаточные характеристики транзистора с управляющим р-n-переходом.

41. Почему нормальная работа полевого транзистора с р-n-переходом обеспечивается только при обратном смещении на переходе?
42. В чем особенность полевых транзисторов с изолированным затвором?
43. Объясните физические принципы работы полевого транзистора со встроенным каналом. Начертите статические вольтамперные характеристики полевого транзистора со встроенным каналом.
44. Объясните физические принципы работы полевого транзистора с индуцированным каналом.
45. В чем принципиальное отличие передаточных характеристик полевого транзистора с индуцированным каналом от аналогичных характеристик для транзистора с встроенным каналом?
46. Начертите передаточные характеристики транзистора с индуцированным каналом для каналов р и n типа.
47. Приведите основные параметры полевых транзисторов.
48. Начертите эквивалентную схему полевого транзистора для переменных составляющих в режиме малого сигнала.

### **Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

#### **Основная литература**

1. Твердотельная электроника: Учебное пособие / Троян П. Е. - 2006. 330 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/538>, дата обращения: 11.11.2018.
2. Нанoeлектроника: Учебное пособие / Дробот П. Н. - 2016. 286 с. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/6436>, дата обращения: 11.11.2018.
3. Твердотельные приборы и устройства: Учебное пособие / Шангин А. С. - 2012. 156 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/2438>, дата обращения: 11.06.2018.

#### **Дополнительная литература**

1. История и философия нововведений в области электроники и электронной техники: Учебное пособие / Дробот П. Н. - 2015. 208 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/5402>, дата обращения: 11.06.2018.
2. Электроника: Учебное пособие / Коновалов В. Ф. - 2012. 266 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/7314>, дата обращения: 11.11.2018.