

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИНК

_____ В.Н. Бориков
« ___ » _____ 2016 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

Методические указания к выполнению лабораторной работы
по дисциплине «Электроника 1.1», «Электроника 1.2», «Электроника 1.3»
для студентов направлений 12.03.01 «Приборостроение» и
12.03.04 «Биотехнические системы и технологии» и др.

Авторы-составители **В.В. Гребенников, Ю.В. Мутовин**

Издательство
Томского политехнического университета
2016

УДК 681.2(076.5)

ББК 34.9я7

Г79

Гребенников В.В.

Г79 Исследование полупроводниковых диодов : методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу «Электроника 1.1», «Электроника 1.2», «Электроника 1.3» для студентов II курса, обучающихся по направлениям 12.03.01 «Приборостроение», 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии» и др. / авторы-сост. В.В. Гребенников, Ю.В. Мутовин ; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 24 с.

УДК 681.2(076.5)

ББК 34.9я7

Методические указания рассмотрены и рекомендованы
к изданию методическим семинаром кафедры
промышленной и медицинской электроники ИНК
«__»_____ 2016 г.

Зав. кафедрой ПМЭ, кандидат физико-
математических наук _____

Ф.А. Губарев

Председатель учебно-методической
комиссии _____

Ф.А. Губарев

Рецензент

доцент кафедры ПМЭ ТПУ

Д.Н. Огородников

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2016

© Гребенников В.В., Мутовин Ю.В.,

Составление, 2016

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ СТЕНДА

Для проведения лабораторных работ по электронике используется моноблок “Основы электроники”, представленный на рис. 1.



Рис. 1

Моноблок включает в себя:

- 1) модуль питания, обеспечивающий ввод однофазного напряжения ~ 220 В, получение низковольтного переменного напряжения ~ 12 В и постоянных напряжений питания $+12$ В и -12 В.
- 2) измерительные приборы позволяющие:
 - выполнить стрелочными приборами измерение постоянного тока;
 - выполнить с помощью цифровых приборов измерения напряжение в цепях постоянного и переменного тока;
 - обеспечивать с помощью функционального генератора подачу измерительных сигналов синусоидальной и прямоугольной формы к исследуемому устройству;
- 3) регуляторы напряжения $RP1$ и $RP2$, позволяющие изменять подаваемые на них от источника питания напряжения без ограничения либо с ограничением тока (резисторами $R1$ и $R2$) в зависимости от исследуемой схемы;
- 4) систему импульсно-фазового управления (СИФУ) для управления тиристорами и симистором;
- 5) для работы с логическими элементами в моноблоке предусмотрены блоки логических уровней (“0” и “1”), импульсов

(единичного и нулевого) и генератор положительных импульсов разных частот;

б) собственно блок-схемы:

- диоды и тиристоры;
- транзисторы;
- операционный усилитель;
- логические элементы.

ЦЕЛЬ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ

Важнейшей частью курса “Электроника” является лабораторный практикум. Для того, чтобы овладеть указанной дисциплиной необходимо научиться самостоятельно решать разнообразные задачи в области электроники. Решение этих задач может быть получено, как известно, аналитическим или экспериментальным методом. Экспериментальные методы решения изучаются на лабораторных занятиях.

Лабораторные занятия дают возможность:

- закрепить на практике теоретические сведения о работе различных электронных устройств;
- подробно ознакомиться с устройством и характеристиками наиболее важных электронных приборов, составляющих предмет лабораторной практики;
- овладеть практическими способами управления и настройки электронных устройств на заданный режим;
- получить практические навыки в проведении измерений электрических величин, пользовании различными измерительными приборами, чтении электрических схем, построение графиков и характеристик;
- изучить технику проведения экспериментального исследования физических моделей или промышленных образцов электронных устройств;
- выработать умение рассуждать о рабочих свойствах и степени пригодности исследованных электронных устройств для решения тех или иных задач.

ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНОМУ ЗАНЯТИЮ

Экспериментальные задачи, предлагаемые на лабораторных занятиях, могут быть успешно решены в отведенное в соответствии с

расписанием занятий время только при условии тщательной предварительной подготовки к каждой из них.

Студент, в первую очередь, должен твердо уяснить цель задания и четко представлять назначение устройства, его условное обозначение на электрических схемах, принцип действия и основные характеристики.

Затем, по материалам руководства необходимо ознакомиться с основными параметрами объекта исследования, источников питания и других используемых в стенде преобразователей и пускорегулирующих аппаратов. Эти сведения нужны для определения диапазона возможного изменения величин и необходимого режима работы объекта исследования. Требуемые расчетные соотношения и формулы следует найти и записать самостоятельно на основе изучения учебных пособий.

Особое внимание следует уделить измерительным приборам. В соответствии с каждым этапом рабочего задания необходимо проанализировать схему соединений, состоящую из элементов объекта исследования и электроизмерительных приборов. При этом рекомендуется заготовить таблицы для записи показаний приборов.

Одним из важных этапов подготовки к выполнению лабораторной работе является изучение технологии проведения эксперимента, используемые методические рекомендации к выполнению рабочего задания.

Завершает этап подготовки к выполнению лабораторной работы составление ответов на контрольные вопросы, приведенные в методических указаниях.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Получив разрешение преподавателя на проведение лабораторного исследования, следует немедленно приступить к сборке электрических цепей на рабочем месте. Рекомендуется придерживаться следующего порядка, значительно облегчающего работу по сборке и избавляющего от многих ошибок при соединениях. Общим правилом является соединение сначала участков цепи с последовательно соединением элементов и приборов, а затем параллельных ветвей как объекта исследования, так и приборов.

Этот прием позволяет сознательно подойти к оценке назначения каждого элемента цепи и тем самым правильно осуществить её сборку.

Одновременно со сборкой цепи надо произвести маркировку измерительных приборов в соответствии с их условными обозначениями на рабочей схеме соединений. Маркировку приборов

можно выполнить с помощью бумажных бирок, которые изготавливают учащийся, выполняющий лабораторное исследование.

Во избежание возможного возникновения больших токов в собранной цепи элементы регулирования потенциометров необходимо устанавливать в положение, соответствующие минимуму напряжения на выходе (положение “0”).

Собранную цепь следует обязательно показать для проверки преподавателю. Только с его разрешения можно включить источник питания и произвести предварительное опробование работы цепи, чтобы убедиться в возможности проведения опыта при заданных пределах изменения величин. Нельзя приступать к измерениям, не будучи совершенно уверенным, что цепь собрана правильно.

Если при испытании цепи постоянного тока стрелка измерительного прибора уходит за пределы шкалы в обратном направлении, надо отключить цепь и переключить подходящие к прибору провода.

При снятии характеристик не допустимо превышать номинальные значения токов и напряжений испытываемого электронного устройства, если нет особых указаний в руководстве по лабораторному эксперименту. В случае, если стрелка какого-либо прибора выходит за пределы шкалы, надо немедленно отключить цепь от источника питания, доложить преподавателю и изменить условия эксперимента (уменьшить напряжение питания, увеличить диапазон изменения сопротивления и т.д.)

После предварительного опробования цепи, проверки или оценки диапазона изменения переменного параметра необходимо наметить последовательность отдельных манипуляций и отсчетов, а затем приступить к наблюдениям.

Отсчеты рекомендуется проводить по возможности одновременно по всем приборам. Следует избегать перерыва начатой серии наблюдений и во всех случаях, когда возникает сомнение правильности полученных наблюдений, их необходимо повторить несколько раз.

Результаты всех первичных наблюдений и отсчетов записывают в таблицу протокола испытаний. Запись отсчетов должна вестись в точном соответствии с показаниями измерительных приборов. Протоколы наблюдений являются единственным документальным следом, остающимся от измерений, поэтому от точной и своевременной фиксации в таблицах результатов отсчета в значительной степени зависит успех экспериментальной работы.

При переходе от одного этапа исследования к другому необходимо каждый раз обращаться к преподавателю за проверкой правильности

полученных результатов, которых представляют в виде таблиц или графиков.

К следующему этапу работы разрешается приступать только после проверки и визирования протокола преподавателем.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Каждый студент самостоятельно должен обрабатывать данные опытов и подготовить отчет по каждой проделанной работе.

Отчет оформляется в соответствии с требованиями стандартов ТПУ.

В начале отчета указывается цель выполнения лабораторной работы. Далее приводится краткое содержание программы работы без каких-либо подробностей.

Отчет должен содержать, паспортные данные объекта исследования, схемы соединения элементов объекта исследования с включенными измерительными приборами, таблицы с записью результатов эксперимента, обработанные осциллограммы, графики зависимостей и векторные диаграммы.

После проведения эксперимента должны быть сделаны основные выводы, полученные в результате исследования.

Каждая схема должна быть сопровождается соответствующей таблицей записей результатов измерений и графиком, иллюстрирующим изучаемые зависимости. В таблице обязательно следует указывать, в каких единицах измерены исследуемые величины. Все таблицы необходимо снабдить заголовками, характеризующими проводимый опыт.

На основании результатов измерений проводится их окончательная обработка. Измеренные и вычисленные величины заносятся в соответствующие колонки одной и той же таблицы.

Вычерчивание схем, таблиц и осциллограмм рекомендуется производить карандашом обязательно с помощью линейки.

Особое внимание надо уделить графикам зависимостей между величинами, т.к. они являются наглядным результатом работы, графическим ответом на вопросы, поставленные в лабораторной работе.

При построении графиков по осям приводят стандартные буквенные обозначения величин и единиц их измерения, указывают деления с одинаковыми интервалами, соответствующие откладываемым величинам в принятых единицах измерения или в десятичных кратных либо дольных единицах.

Числовые отметки у масштабных делений принято выбирать так, чтобы они составляли $10^{\pm n}$, $2 \cdot 10^{\pm n}$ или $5 \cdot 10^{\pm n}$ от тех единиц, в которых выражены величины, откладываемые по осям. Например, 10 мА; 10 Ом; 2 В.

При построении графиков вдоль оси абсцисс в выбранном масштабе откладывают независимую переменную. Условное буквенное обозначение этой величины рекомендуется ставить под осью, а наименование единиц измерения либо их десятичных кратных или дольных единиц — после обозначения величины. Вдоль оси ординат масштабные цифры ставят слева от оси, наименование или условное обозначение откладываемых величин — также слева от оси и под этим обозначением указывают единицу измерения. Если в одних координатных осях строят несколько графиков функций одной независимой переменной, то следует провести дополнительные шкалы параллельно основным, каждую со своим масштабом. Если величины по осям абсцисс и ординат отложены в определенном масштабе с числовыми отметками, то не следует ставить стрелок, указывающих направление роста численных значений величин. Наименование единиц измерения дается без скобок. При вычерчивании графиков надо учитывать, что всякое измерение имеет случайные погрешности (истинное значение измеряемой величины остается неизвестным, а вместо него принимают некоторое её значение, признаваемое за наиболее приближающееся к истинному). Поэтому не следует проводить кривые через все экспериментальные точки. На графике необходимо проводить плавные непрерывные кривые, которые проходят среди экспериментальных точек. Отступление некоторых точек от плавной кривой называют «разбросом точек». Величина разброса при наблюдении закономерных явлений определяет тщательность проведения эксперимента.

При наличии нескольких кривых на одном графике точки, соответствующие опытным данным и относящиеся к различным кривым, должны быть помечены условными значками (крестиками, кружками и т.п.).

Каждый график обязательно должен быть снабжен таким лаконичным текстом, чтобы любой достаточно подготовленный читатель мог легко понять, какую зависимость характеризует построенный график.

Выводы приводятся либо по каждому пункту программы работы, либо в конце отчета. Выводы должны быть конкретными и не содержать перечисление действий.

Отчет в целом должен быть составлен таким образом, чтобы для понимания содержания и результатов проведенной работы не требовалось дополнительных устных пояснений. Составление подобных отчетов — первый шаг к оформлению технических отчетов по экспериментальным исследованиям, которые предстоит проводить будущему инженеру.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИОДОВ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение характеристик и параметров диодов – выпрямительного, Шоттки, стабилитрона и светодиода.

2. ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Предварительное домашнее задание:

а) изучить темы курса “*p-n*-переход”, “Полупроводниковые диоды” и содержание данной работы, быть готовым ответить на все контрольные вопросы;

б) пользуясь принципиальными схемами, приведенных в данном руководстве, начертить схемы соединений для проведения экспериментов, перечисленных в лабораторной работе.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Диодами называют двухэлектродные элементы электрической цепи, обладающие односторонней проводимостью тока. Принцип действия полупроводникового диода основан на специфике процессов, протекающих в электронно-дырочном (*p-n*-) переходе.

Полупроводниковые диоды широко применяются для выпрямления переменного тока (выпрямительные диоды), для детектирования высокочастотных колебаний (высокочастотные диоды), для стабилизации напряжения (стабилитроны), для модуляции высокой частоты (варикапы), для преобразования формы импульсов (импульсные диоды), для генерации колебаний (туннельные диоды) и др.

Теоретический анализ показывает, что вольтамперная характеристика идеализированного диода описывается выражением:

$$I_a = I_S \cdot (e^{U_a/\varphi_T} - 1),$$

где I_a и U_a – ток и напряжение диода, соответственно; I_S – тепловой ток диода; φ_T – тепловой потенциал, (при температуре $T = 300\text{К}$, $\varphi_T \approx 26\text{ мВ}$).

Ток $I_S = 0$ при $T = 0\text{К}$, его величина сильно зависит от температуры. Поэтому его называют **тепловым током**. При обратном напряжении обратный ток идеализированного диода равен I_S и не зависит от напряжения. Поэтому величину I_S еще называют **обратным током насыщения**.

Важной особенностью вольт-амперной характеристики идеализированного диода является очень крутая (экспоненциальная) прямая ветвь. Поэтому в качестве аргумента удобнее задавать ток и пользоваться выражением:

$$U_a = \varphi_T \cdot \ln\left(\frac{I_a}{I_S} + 1\right). \quad (2.1)$$

Тепловой ток кремниевых диодов значительно меньше, чем у германиевых, так как концентрация неосновных носителей у кремния существенно меньше, чем у германия при той же температуре. Это связано с тем, что ширина запрещенной зоны кремния больше по сравнению с германием. По той же причине падение напряжения на переходе при прямом его включении выше у кремниевых диодов.

Вольт-амперная характеристика диода отличается от характеристики идеализированного диода. Отличия обратной ветви характеристики связаны с процессами термогенерации носителей заряда в области перехода, поверхностными утечками, а также с явлениями пробоя перехода. Обратные ветви характеристик германиевого и кремниевого диодов приведены на рис. 2.1.

При увеличении обратного напряжения выше некоторой величины наблюдается резкое увеличение тока, носящее название пробой перехода.

В зависимости от причин, вызывающих появление дополнительных носителей заряда, различают туннельный, лавинный и тепловой пробой.

В основе туннельного пробоя лежит туннельный эффект, т.е. переход носителей в смежный слой, не преодолевая потенциального барьера. Туннельный пробой развивается в узких р–n-переходах, где при сравнительно небольшом обратном напряжении имеется высокая напряженность поля.

Лавинный пробой возникает в результате ударной ионизации, приводящей к лавинообразному размножению носителей. Лавинный пробой характерен для слабо легированных полупроводников. Туннельный и лавинный пробой являются обратимыми процессами. Это означает, что они не приводят к повреждению диода и при снижении напряжения его свойства сохраняются.

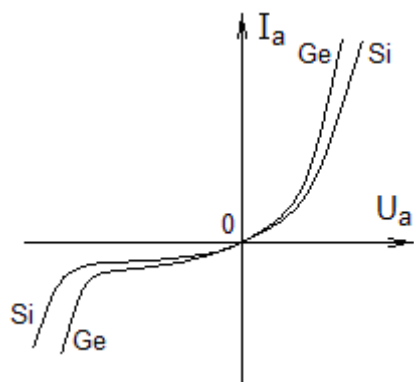


Рис. 2.1

Тепловой пробой возникает за счет интенсивной термогенерации носителей в р–n-переходе при недопустимом повышении температуры. Процесс развивается лавинообразно и ввиду неоднородности р–n-перехода обычно носит локальный характер. Лавинообразное развитие теплового процесса обуславливается тем, что увеличение числа носителей заряда за счет повышения температуры вызывает увеличение обратного тока и, следовательно, еще больший разогрев участка р-n-перехода. При тепловом пробое диод выходит из строя.

Кроме активного сопротивления полупроводниковый диод имеет емкость р–n-перехода, состоящую из двух слагаемых: **барьерной емкости и диффузионной**. Барьерная (или зарядная) емкость характеризуется сосредоточением по обе стороны границы раздела р- и n-слоев объемных зарядов, создаваемых ионами примесей. Барьерная емкость возрастает с уменьшением толщины р–n-перехода, т.е. при снижении обратного напряжения. Барьерная емкость гораздо выше при прямом включении диода, чем при обратном его включении. Величина барьерной емкости зависит также от площади р–n-перехода и может составлять десятки и сотни пикофарад. Зависимость барьерной емкости от обратного напряжения используется в варикапах, применяемых в качестве конденсаторов переменной емкости, управляемых напряжением.

При прямом напряжении на диоде к барьерной емкости добавляется еще диффузионная емкость. В отличие от барьерной емкости, определяемой шириной области объемного заряда $p-n$ -перехода, диффузионная обусловлена изменением суммарных зарядов неравновесных электронов и дырок соответственно слева и справа от $p-n$ -перехода в результате изменения напряжения на нем. Эти заряды создаются за счет диффузии (инъекции) носителей через $p-n$ -переход. Поэтому она существует только при прямом напряжении, когда носители заряда в большом количестве инжектируют через пониженный потенциальный барьер и, не успев рекомбинировать, накапливаются в n и p областях. Величина диффузионной емкости зависит от протекающего через $p-n$ -переход прямого тока и может составлять сотни и тысячи пикофарад, т.е. она существенно больше барьерной емкости.

Таким образом, при прямых напряжениях емкость $p-n$ -перехода определяется в основном диффузионной емкостью, а при обратных напряжениях, когда диффузионная емкость равна нулю, барьерной.

Наличие емкости $p-n$ -перехода оказывает существенное влияние на выпрямительные свойства диодов при их работе на повышенных частотах. В полупроводниковых диодах, работающих в выпрямительном режиме, при перемене полярности напряжения могут наблюдаться значительные импульсы обратного тока. Эти импульсы возникают по двум причинам. Во-первых, под влиянием обратного напряжения возникает импульс тока, заряжающего барьерную емкость $p-n$ -перехода. Во-вторых, при обратном напряжении происходит рассасывание неосновных носителей, накопившихся в n и p областях. Эти носители во время прохождения прямого тока инжектируются через переход и, не успев рекомбинировать, накапливаются в n и p областях. При обратном напряжении начинается процесс рассасывания, т.е. электроны начинают двигаться из p области в n область, а дырки из n области в p область. В результате возникает импульс обратного тока. Когда закончится процесс рассасывания носителей и завершится заряд барьерной емкости, через $p-n$ -переход будет протекать лишь ничтожно малый обратный ток.

На низкой частоте для каждого момента времени изменения синусоидального напряжения переходные процессы, связанные с рекомбинацией, успевают установиться. Ток диода протекает практически только в первом полупериоде.

На повышенной частоте выпрямляющие свойства $p-n$ -перехода ухудшаются. При таких частотах дырки, инжектированные в n базу за положительный полупериод, не успевают полностью рекомбинировать в

базе. Во время отрицательного полупериода часть накопленных в n базе дырок рекомбинируют, а часть уходит в р-область, создавая всплеск обратного тока. Далее обратный ток спадает, стремясь к своему стационарному значению. На очень высоких частотах заряд дырок, введенных в n базу за положительный полупериод, полностью выводится во внешнюю цепь за отрицательный полупериод, и диод теряет выпрямительные свойства.

Довольно часто на практике для получения стабильного опорного напряжения используются *стабилитроны*. В полупроводниковых стабилитронах используется свойство незначительного изменения обратного напряжения на р–n-переходе при лавинном или туннельном пробое. Это связано с тем, что небольшое увеличение напряжения на р–n-переходе в режиме электрического пробоя вызывает более интенсивную генерацию носителей заряда и значительное увеличение обратного тока. Участок 1–2 на рис. 2.2 является рабочим участком вольтамперной характеристики стабилитрона.

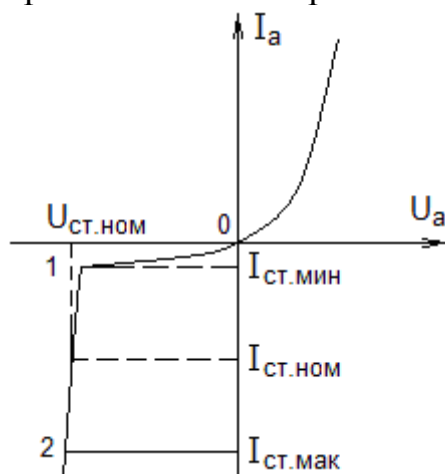


Рис. 2.2

Главным параметром прибора является напряжение стабилизации, равное напряжению пробоя. Точка 1 на характеристике соответствует минимальному току стабилитрона, при котором наступает пробой. Точке 2 соответствует максимальный ток стабилитрона, достижение которого еще не грозит тепловым пробоем р–n-перехода.

Параметром, характеризующим наклон рабочего участка характеристики, является динамическое сопротивление стабилитрона:

$$R_{д} = \frac{dU_{ст}}{dI_{ст}}$$

Величина R_d для низковольтных стабилитронов лежит в пределах 1–30 Ом, а для высоковольтных – 18–300 Ом. Влияние температуры оценивается температурным коэффициентом напряжения стабилизации (ТКН), который представляет собой относительное изменение напряжения U_{CT} при повышении температуры на один градус:

$$TKH = \frac{dU_{CT}}{(U_{CT} \cdot dT)}$$

Величина U_{CT} и значение ТКН зависят от удельного сопротивления основного полупроводника. Стабилитроны на малые напряжения (до 6–7 В) изготавливаются из кремния с малым удельным сопротивлением, т.е. с большой концентрацией примесей. В таких стабилитронах р-п-переход имеет малую толщину, в нем действует поле с высокой напряженностью и пробой происходит главным образом за счет туннельного эффекта. При этом ТКН получается отрицательным. Если использовать кремний с меньшей концентрацией примесей, то р-п-переход будет более широким. В этом случае пробой возникает при более высоких напряжениях и является лавинным. Для таких стабилитронов характерен положительный ТКН.

Диоды Шоттки

В основе диодов Шоттки (рис. 2.3) лежит контакт между металлом и полупроводником. Причем этот контакт выпрямляющий. Приповерхностный слой полупроводника в таком контакте обеднен основными носителями и его сопротивление в равновесном состоянии намного больше сопротивления остальной части полупроводника.

Основное преимущество диодов Шоттки по сравнению с диодами с р-п-переходом является то, что у них отсутствует инжекция носителей при прямом включении, а значит и явления накопления и рассасывания носителей. Т.е. у диодов Шоттки отсутствует диффузионная емкость. Соответственно инерционность диодов Шоттки очень мала и обусловлено только барьерной емкостью контакта. Но барьерная емкость может быть уменьшена за счет уменьшения размеров структуры.

Рабочие частоты у диодов Шоттки малой мощности могут достигать значений 3÷15 Гигагерц, а времена переключения до 0,1 наносекунды. Обратные токи у этих диодов также весьма малы. Обратное допустимое напряжение лежит в пределах от 10 до 500 В. Прямое падение напряжения у диодов Шоттки ниже, чем у обычных диодов. Например, при прямом токе 50 ампер падение напряжения на силовом диоде Шоттки составляет всего ~ 0,5 В.

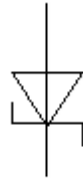


Рис. 2.3

При прямом и обратном смещении, ток в барьере Шоттки обусловлен основными носителями - электронами. Инжекция неосновных носителей в базу в таких диодах отсутствует. Ток образуется только электронами, движущимися из кремния в металл. По этой причине у 2 диодов Шоттки отсутствует накопление зарядов в базе (отсутствуют рекомбинационные и диффузионные процессы) и время переключения значительно меньше, чем время переключения диода с р-п переходом.

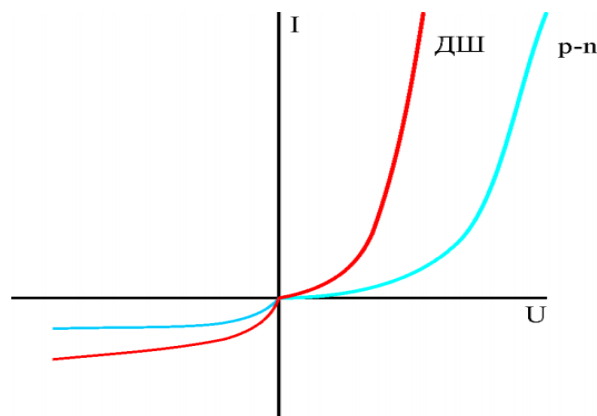


Рис. 2.4

Светодиоды

Светодиодами называются полупроводниковые источники света, представляющие собой излучающие р-п-переходы, свечение которых вызвано рекомбинацией носителей заряда в базе при прямом смещении диода.

Излучающие полупроводниковые диоды делятся на два вида: светоизлучающие диоды, работающие в диапазоне видимого излучения (СИД) и диоды, работающие в инфракрасном диапазоне оптического излучения (ИК-диоды).

Излучающий диод – основной и наиболее универсальный излучатель некогерентной оптоэлектроники. Это обусловлено следующими его достоинствами:

- высокое значение КПД преобразования электрической энергии в оптическую;
- высокая для некогерентного излучателя направленность излучения;
- малые значения прямого падения напряжения;
- высокое быстродействие; малые габариты,
- технологическая совместимость с микроэлектронными устройствами,
- высокая надежность и долговечность.

Структура светодиода в упрощенном виде и схема подключения его к источнику питания показаны на рис. 2.5.

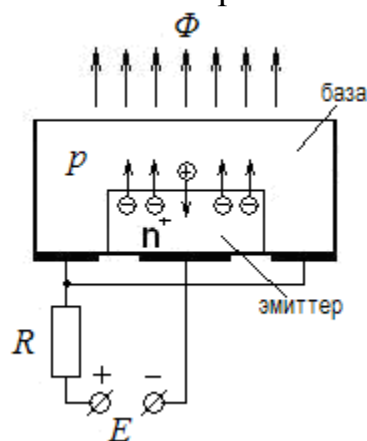


Рис. 2.5

При приложении прямого напряжения к светодиоду потенциальный барьер р–n-перехода понижается, и появляются диффузионные токи, как дырок, так и электронов, т.е. увеличивается инжекция носителей: дырок в n-область, электронов в p-область.

Обычно излучающей является область только по одну сторону р–n-перехода (p-область на рис. 2.5). Очевидно, желательно, чтобы количество инжектированных носителей было максимально именно в излучающей p-области. С этой целью в n-область вводят больше донорной примеси, чем акцепторной в p-область. Таким образом, в структуре инжекция практически односторонняя – из n-эмиттера в p-базу, и излучает базовая область.

Следует отметить, что наряду с рекомбинацией, которая обеспечивает генерацию оптического излучения, существует также рекомбинация, не дающая излучение.

К такому типу относится рекомбинация на глубоких центрах люминесценции, т.е. электрон может переходить в валентную зону не непосредственно, а через те или иные центры рекомбинации, образующие энергетические уровни в запрещенной зоне. Энергия рекомбинации в этом случае выделяется частично в виде длинноволновых фотонов, частично переходит в тепловые колебания кристаллической решетки. Такими центрами рекомбинации могут быть примеси и структурные дефекты кристаллической решетки.

Характеристики и параметры излучающих диодов

1. Излучающая характеристика

Эффективность излучающего диода характеризуют зависимостями параметров оптического излучения от прямого тока через диод (излучающие характеристики) и от длины волны излучения (спектральные характеристики). Для ИК-диодов излучательная характеристика представляет собой зависимость потока излучения Φ_e от прямого тока I_{np} .

Для СИД диодов излучательная характеристика представляет собой зависимость силы света J_V от прямого тока через диод (рис. 2.6, а).

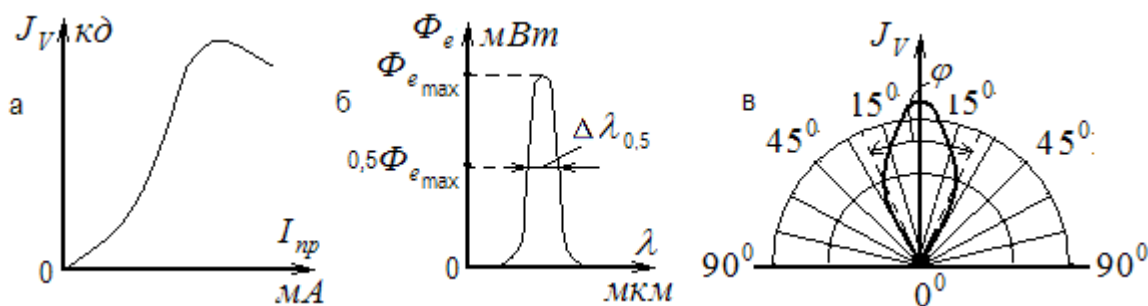


Рис. 2.6

При малых токах велика доля рекомбинаций без излучения квантов света и коэффициент инжекции мал. С ростом прямого тока поток излучения сначала быстро увеличивается – до тех пор, пока в токе диода не становится преобладающей диффузионная составляющая тока. Дальнейшее увеличение тока приводит к постепенному насыщению центров люминесценции и снижению излучательной способности

диода. Кроме того, с ростом тока увеличивается вероятность ударной рекомбинации, что также уменьшает поток излучения.

Таким образом, излучательная характеристика имеет максимум при некотором токе. Максимальная сила излучения зависит от площади и геометрии излучающего р-перехода.

2. Спектральная характеристика

Спектральная характеристика представляет собой зависимость параметров излучения от длины волны излучения. В справочниках приводится зависимость потока излучения Φ_e , т.е. мощности излучения (рис. 2.6, б) или яркости от длины волны. Длина световой волны, определяющая цвет свечения, зависит от разности энергий двух энергетических уровней, между которыми происходит переход электронов при люминесценции. В связи с разной шириной запрещенной зоны у различных материалов, длина волны излучения различна в разных типах излучающих диодов.

Так как переход электронов при рекомбинации носителей зарядов происходит обычно между двумя группами энергетических уровней, то спектр излучения оказывается размытым.

Спектральный диапазон излучающего диода характеризуют шириной спектра $\Delta\lambda_{0,5}$ измеряемой на высоте 0,5 максимума излучения (рис. 2.6, б).

3. Диаграмма направленности излучения

Эта диаграмма отражает зависимость силы света J_v от направления излучения, т.е. от угла излучения φ (рис. 2.6, в). В пределах угла излучения сила света составляет не менее половины ее максимального значения.

Вольтамперная характеристика излучающего диода подобна обычному диоду. Различия прямых ветвей ВАХ связаны с разницей в ширине запрещенной зоны применяемых материалов. Чем меньше длина волны излучения, тем больше прямое падение напряжения на излучающем диоде. Обратные ветви ВАХ имеют малое допустимое обратное напряжение, так как при высокой концентрации примеси ширина р–n-перехода в излучающих диодах незначительна.

При работе светодиода в схеме с высокими обратными напряжениями последовательно с излучающим диодом необходимо включать обычный диод, имеющий достаточное значение допустимого обратного напряжения. В результате обеспечивается защита светодиода в случаи недопустимых для него бросков обратного напряжения.

На рис. 2.7, а для сравнения показана ВАХ светодиода и пунктиром характеристика обычного диода.

Прямое напряжение на светодиоде обычно находится в пределах $2 \div 4 \text{ В}$. Значение прямого напряжения дается в справочниках для определенного значения прямого тока.

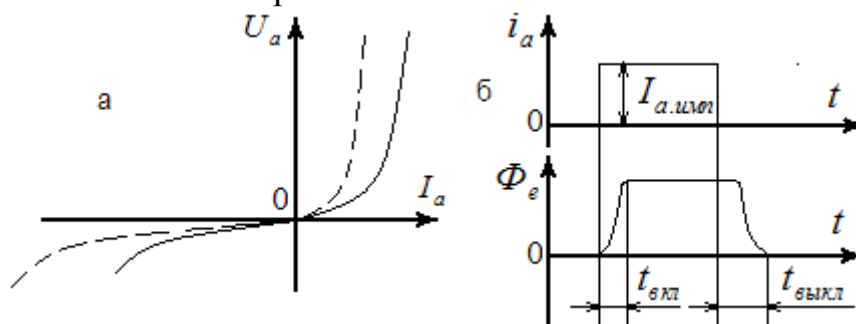


Рис. 2.7

Быстродействие излучающего диода определяется инерционностью возникновения излучения при подаче прямоугольного импульса прямого тока (рис. 2.7, б). Время переключения $t_{пер}$ складывается из времени включения $t_{вкл}$ и выключения $t_{выкл}$ излучения. Инерционность излучающего диода определяется процессом перезаряда барьерной емкости и процессами накопления и рассасывания неосновных носителей в активной области диода.

Для светоизлучающих диодов (СИД) быстродействие является второстепенной характеристикой, так как инерционность человеческого глаза около 50 мс, что существенно больше времени переключения СИД. Для излучателей в оптопарах время переключения ИК-диодов стремятся сделать минимально возможным, так как это время входит составной частью в общее время переключения оптоэлектронного прибора.

Влияние температуры на параметры излучающего диода заключается в изменении длины волны излучения и мощности излучения. С ростом температуры длина волны излучения увеличивается, так как с ростом температуры уменьшается ширина запрещенной зоны полупроводника. Сила света светодиода с ростом температуры уменьшается, так как уменьшается мощность излучения вследствие увеличения длины волны.

3. ПРОГРАММА И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

3.1. Экспериментальное исследование выпрямительного диода

а) собрать схему для исследования выпрямительного диода на постоянном токе в соответствии с принципиальной схемой рис. 3.1. Для измерения анодного тока включить миллиамперметр постоянного тока с пределом 100 мА. Для измерения анодного напряжения использовать встроенный мультиметр. Последовательно с диодом включить токоограничивающий резистор $R_{\text{н}}$, предварительно установив его ручку в крайнее левое положение.

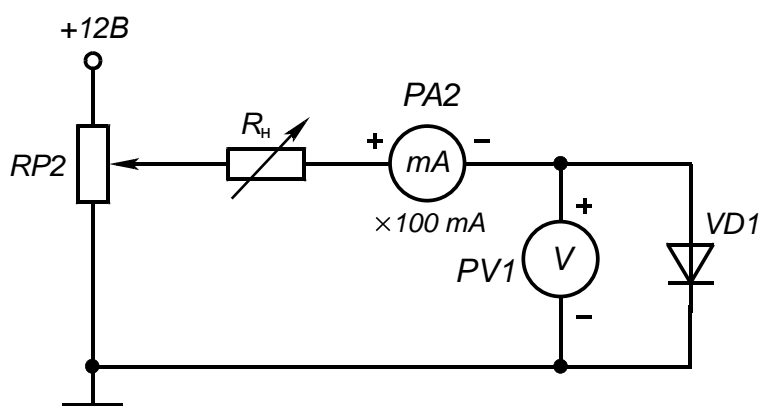


Рис. 3.1

Снять вольтамперную характеристику выпрямительного диода на постоянном токе для прямой ветви (рис. 3.1); для снятия характеристик регулировать напряжение на выходе потенциометра $RP2$; результаты измерений занести в таблицу, по которой построить прямую ветвь ВАХ (10-15 точек);

б) собрать схему для снятия обратной ветви ВАХ $VD1$, подключив к $RP2$ источник питания -12В и заменив миллиамперметр, поменяв также его полярность подключения (рис. 3.2); снять обратную ветвь ВАХ диода;

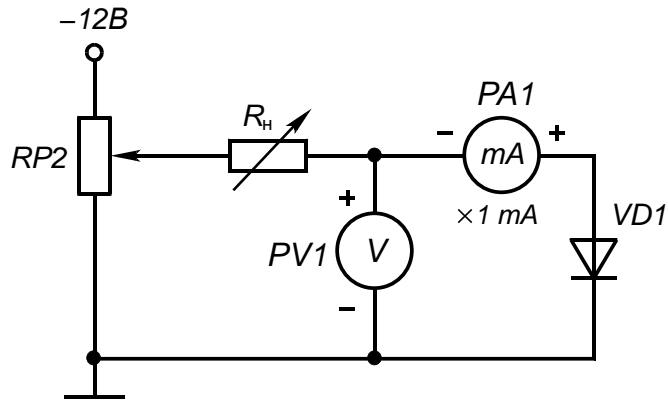


Рис. 3.2

в) определить параметры диода: максимальное напряжение между анодом и катодом в открытом состоянии $U_{a \max}$ при максимальном анодном токе $I_{a \max}$, пороговое напряжение e_0 , дифференциальное сопротивление r_d и статическое сопротивление $R_{ст}$. Сравнить дифференциальное и статическое сопротивление диода;

г) собрать схему для получения ВАХ диода на экране осциллографа. Исследование выпрямительного диода выполняется на переменном токе в соответствии с принципиальной схемой, изображенной на рис. 3.3. Вход Y (CH2) осциллографа подключить к шунту RS2, а корпус осциллографа (землю) соединить с общим проводом (землей) схемы. Вход X (CH1) осциллографа подключить к аноду диода. При этом переключатель развертки осциллографа должен быть установлен в положение X-Y. Светящуюся точку на экране осциллографа поместить в начало координат. Подать питание. Зарисовать ВАХ диода, определить масштабы по току и напряжению;

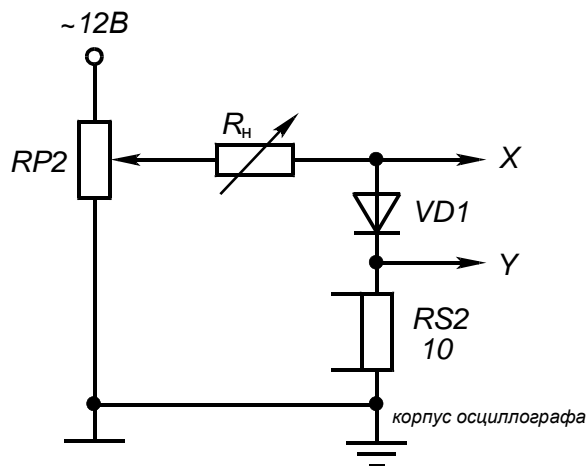


Рис. 3.3

д) определить по осциллограмме параметры диода: максимальное напряжение между анодом и катодом в открытом состоянии $U_{a \max}$ при максимальном анодном токе $I_{a \max}$, пороговое напряжение e_0 и дифференциальное сопротивление r_d , сравнить с результатами, полученными на постоянном токе;

е) собрать схему для исследования частотных свойств выпрямительного диода (рис. 3.4). На вход подать прямоугольные импульсы амплитудой 1В. Зарисовать осциллограммы на входе и выходе схемы на частотах 50Гц, 500Гц и 3кГц. Измерить время восстановления диода.

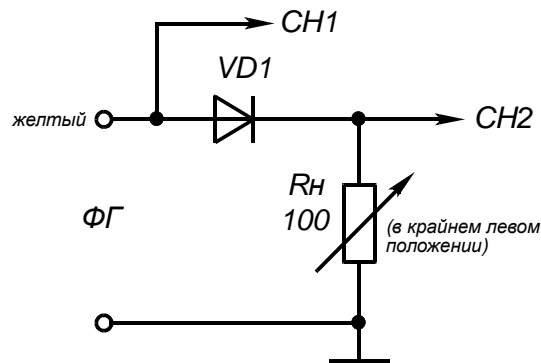


Рис. 3.4

3.2 Экспериментальное исследование диода Шоттки

Выполнить пункты 2а,в для диода Шоттки, используя схему на рис. 3.1. ВАХ построить на том же рисунке, что и в п.3.1. Сравнить ВАХ и параметры диода Шоттки с параметрами и ВАХ обычного выпрямительного диода.

3.3 Экспериментальное исследование стабилитрона

Выполнить пункты 2а,б,г для стабилитрона, включив в схему резистор R_6 . ВАХ построить на том же рисунке, что и в п.3.1. Сравнить ВАХ стабилитрона и ВАХ обычного выпрямительного диода. По ВАХ, снятым на постоянном и переменном токе, определить напряжение стабилизации $U_{ст}$ и дифференциальное сопротивление $r_{д ст}$ (на участке стабилизации), сравнить результаты.

3.4 Экспериментальное исследование светодиода

Собрать схему для исследования прямой ветви ВАХ светодиода на постоянном токе подобно рис. 3.1, заменив $VD1$ на $VD3$, и подключив в качестве токоограничивающего резистора $R_6 = 1$ кОм; снять ВАХ и построить ее на том же рисунке что и в п.3.1. Определить ток, при котором становится заметным свечение.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по работе должен содержать:

- а) наименование и цель работы;
- б) краткая программа работы;
- в) схемы соединений для выполненных экспериментов;
- г) результаты экспериментальных исследований и проведенных по ним расчетов, помещенные в соответствующие таблицы;
- д) экспериментально снятые и построенные характеристики;
- е) обработанные осциллограммы;
- ж) выводы по работе.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 5.1. Что такое p–n-переход и как он создается?
- 5.2. Чем определяются вентильные свойства p–n-перехода?
- 5.3. Каковы различия у вольт-амперных характеристик реального и идеализированного диода?
- 5.4. Перечислите виды пробоя p–n-перехода? Какова физическая сущность каждого вида пробоя? Какие виды пробоя относят к обратимым? Почему?
- 5.5. Чем обусловлен обратный ток диода? Как зависит от температуры и типа полупроводника?
- 5.6. Как влияет температура на различные участки ВАХ диода?
- 5.7. Чем определяются частотные свойства диода?
- 5.8. Перечислите типы полупроводниковых диодов. В чем выражаются их основные отличия?
- 5.9. Что показывает стрелка в условном графическом обозначении диода?
- 5.10. Приведите основные параметры полупроводниковых диодов.

5.11. Как снять по точкам ВАХ диода? Почему на схемах рис. 3.1 и рис. 3.2 по-разному включены измерительные приборы?

5.12. Как снять ВАХ диода с помощью осциллографа?

5.13. Какие погрешности можно ожидать при осциллографировании по схеме рис. 3.3?

5.14. Поясните вид ВАХ стабилитрона. Где находится рабочий участок на ВАХ стабилитрона? Как зависит напряжение стабилизации от температуры?

5.15. В чем отличие ВАХ выпрямительного диода, диода Шоттки и светодиода?

5.16. От чего зависит яркость свечения светодиода? Какой элемент обязателен в схеме индикатора на светодиоде?

5.17. Каким образом на экране осциллографа получают изображение функциональной зависимости двух напряжений?

5.18. Каким образом на экране осциллографа получается изображение периодической функции времени?

5.19. Предложите схему для проверки работоспособности диода, если у вас имеются в наличии: элемент питания (батарея или аккумулятор, лампа накаливания).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жеребцов И.П. Основы электроники. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 352 с.: ил.
2. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: Учеб. для вузов. – М.: Высш. Шк., 1987. – 479 с.
3. Епифанов Г.И., Мома Ю.А. Твердотельная электроника: Учеб. для вузов. – М.: Высш. Шк., 1986. – 304 с.
4. Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А. Полупроводниковые приборы. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
5. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микропроцессорная техника: Учеб. для вузов. – 5-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2008.– 798 с.: ил.
6. Полупроводниковые приборы: Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы: - справочник./А.В. Баюков, А.Б. Гитцевич, А.А. Зайцев и др.; под. общ. ред. Н.Н. Горюнова. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 744 с.
7. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: Учебник для вузов. – М.: Альянс, 2008.– 496 с.: ил.