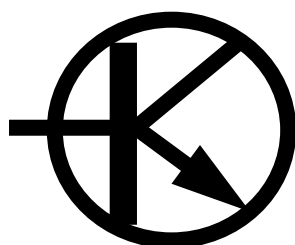


**МИНИСТЕРСТВО  
ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ**

**КУРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра теоретической и экспериментальной  
физики, компьютерных методов физики



***Физика полупроводников  
и полупроводниковых приборов***

**часть I**

Методические указания по выполнению  
лабораторных работ для студентов  
специальности 010701

Курган 2011

*Кафедра теоретической и экспериментальной физики,  
компьютерных методов физики  
Дисциплина: «Физика» (специальность 0107001)*

*Составитель: кандидат физико-математических наук, доцент  
Тыщенко А.П.*

*Утверждены на заседании кафедры            « 03» марта            2010 г*

*Рекомендованы редакционно - издательским советом университета*

*«17» января 2 011 г*

## Содержание

|   |    |
|---|----|
| Блок питания и регулировки температуры.....                             | 4  |
| Лабораторная работа ФП1.<br>Исследование полупроводниковых диодов ..... | 7  |
| Лабораторная работа ФП2.<br>Опорные диоды.....                          | 14 |
| Лабораторная работа ФП3.<br>Туннельные диоды.....                       | 18 |
| Лабораторная работа ФП4.<br>Фотодиоды.....                              | 24 |
| Лабораторная работа ФП 5.<br>Варисторы .....                            | 33 |

### **Блок источника питания и регулировки температуры термостата**

Для проведения исследования характеристик полупроводниковых приборов при различных температурах в большинстве лабораторных работ используется универсальный блок, содержащий источник стабилизированного напряжения, электронную схему, устанавливающую необходимую температуру исследуемого прибора и поддерживающую ее с точностью не менее 0,5 градуса в ходе эксперимента.

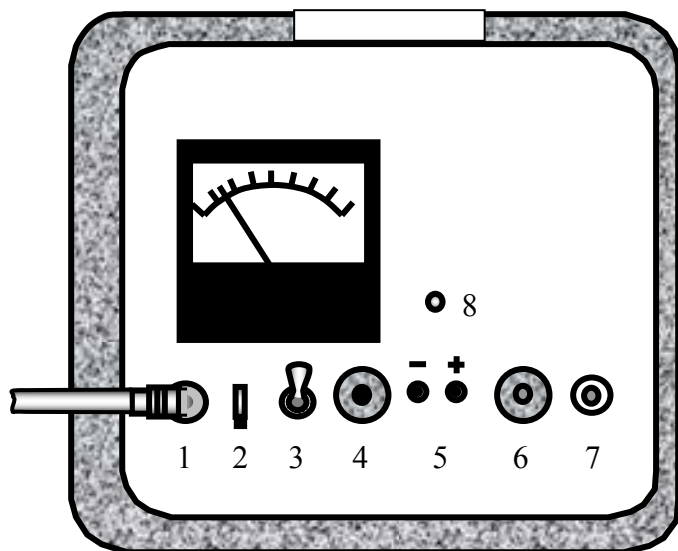


Рис.1. Расположение ручек управления на лицевой панели блока источника питания и регулировки температуры:

1 – разъем для подключения нагревателя, 2 – переключатель шкалы термометра, 3 – выключатель сетевого напряжения, 4 – ручка регулятора температуры, 5 – клеммы источника питания, 6 – ручка регулировки напряжения, 7 – кнопка отключения защиты от короткого замыкания, 8 – индикатор короткого замыкания

стабилизированного напряжения 5, ручка регулировки напряжения 6, индикатор короткого замыкания 8. Загорание светодиода 8 свидетельствует о перегрузке источника стабилизированного напряжения в результате протекания большого тока в цепи нагрузки. При этом стабилизатор напряжения автоматически отключается. Для восстановления работоспособности источника питания следует устранить причину короткого замыкания (уменьшить сопротивление электрической цепи, подключенной к клеммам 5), после чего нажать кнопку 7. К разъему 1 подсоединяется кабель, соединяющий универсальный блок с подогревателем, на котором устанавливается

Блок смонтирован в корпусе от монитора ПЭВМ «Электроника» (рис. 1.). С помощью тумблера 3 включается сетевое напряжение. В левой верхней части блока находится термометр – миллиамперметр 9, проградуированный в градусах Цельсия. С помощью переключателя 2 изменяется цена деления шкалы термометра. Установка и регулировка температуры термостата осуществляется ручкой 4. Поскольку подогреватель термостата обладает некоторой инерционностью, то при увеличении температуры термостата ручку регулировки 4 следует вращать очень плавно. В правой нижней части лицевой панели находятся клеммы источника

исследуемый полупроводниковый прибор. Нагреватели полупроводниковых приборов имеют различные конструкции.

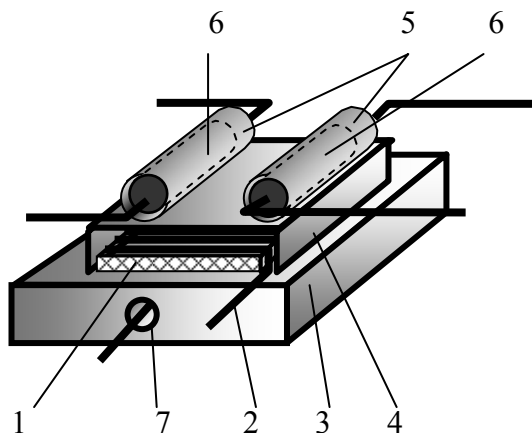


Рис.2. Схематическое изображение нагревателя для исследования диодов: 1 - слюда, 2 – провод из нихрома, 3 – основание нагревателя, 4 - П-образная крышка, 5 – медные трубки, 6 – диоды, 7 – датчик температуры

Схематическое изображение нагревателя для диодов и некоторых других приборов показано на рис. 2. Он представляет собой пластинку из слюды 1 размером 15×15 мм, на которой намотана спираль 2 из нихрома сопротивлением около 30 Ом. Нагреватель закрывается сверху и снизу слюдой и устанавливается на медной пластине 3, к которой сверху припаяна медная П-образная крышка 4. К крышке припаяны медные трубки 5, в которых устанавливаются исследуемые полупроводниковые приборы 6. В пластине 4 параллельно большой грани просверлено сквозное отверстие 7 диаметром 3 мм. В нем установлен диод типа КД 109, который служит в качестве датчика температуры.

отверстие 7 диаметром 3 мм. В нем установлен диод типа КД 109, который служит в качестве датчика температуры.

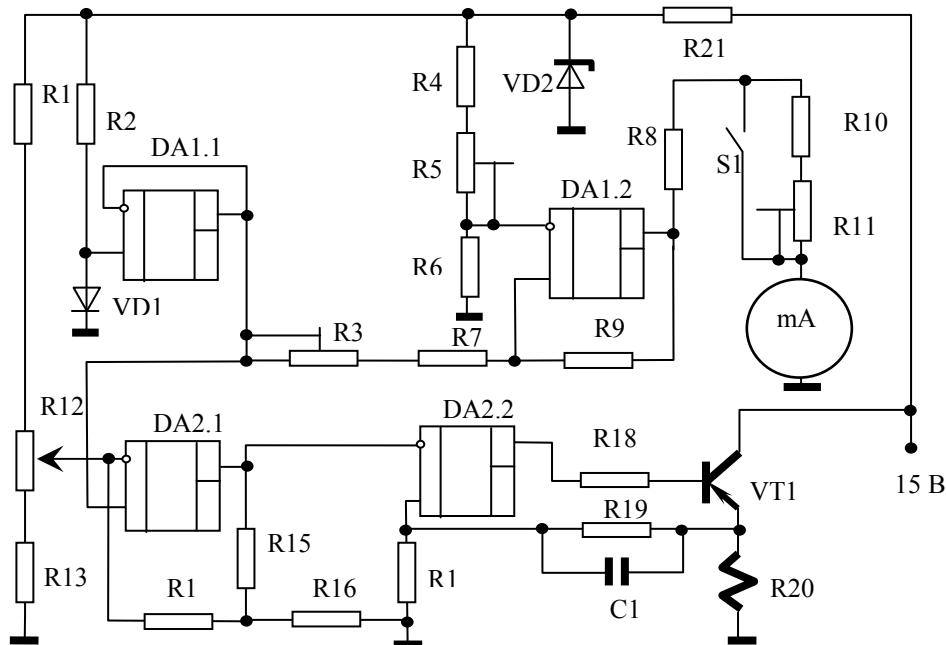


Рис.3. Принципиальная схема устройства стабилизации, регулировки, и измерения температуры.

Принципиальная схема устройства стабилизации, регулировки и измерения температуры представлена на рис. 3. Отличительная особенность

схемы – использование одного и того же датчика VD1 как в цепи управления, так и в цепи измерения температуры. На операционном усилителе DA1 собрана измерительная часть устройства, показывающий прибор – миллиамперметр с градуировкой  $0 \div 150 \text{ } ^\circ\text{C}$ . На операционном усилителе DA2 выполнена схема задания и регулировки температуры, усилитель мощности на транзисторе VT1 управляет током подогревателя. Требуемая температура устанавливается переменным резистором R12.

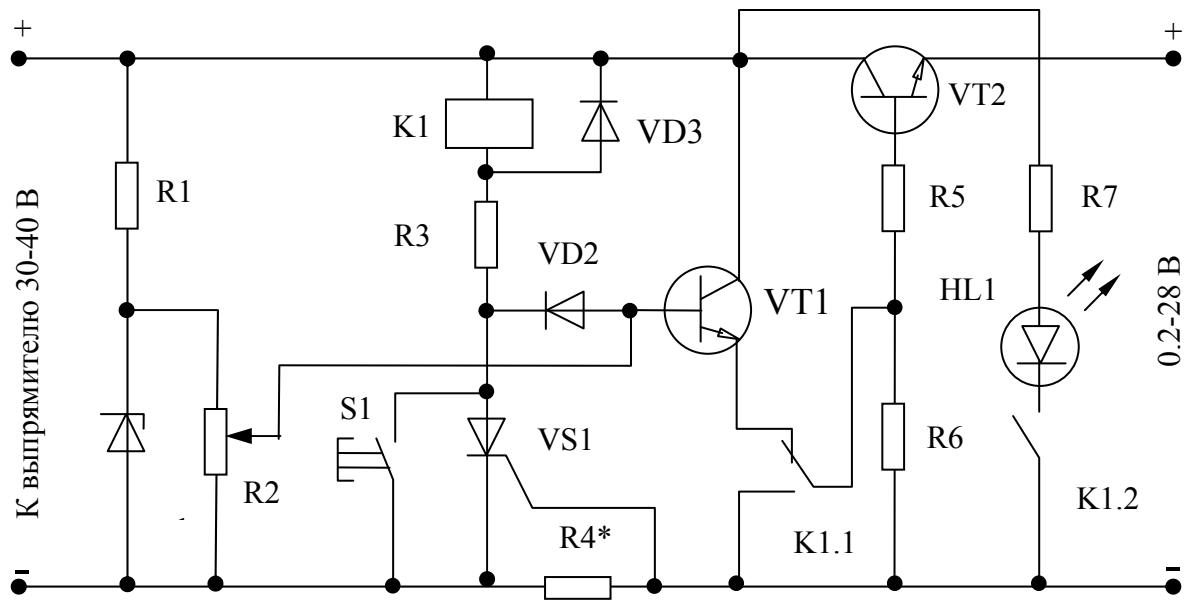


Рис. 4. Схема стабилизатора напряжения с двойной защитой от перегрузки: R1-1,3 к, R2- 6.8-15 к, R3-620, R4-0,5 (подстраивается по току срабатывания защиты), R5-10, R6-5,6 к, R7-4,3 к, VD1-Д816Б, VD2-Д220А, VD3-КД105Б, VS1-КУ201К, VT1-КТ608А, VT2-КТ803А, HL1-АЛ307Б, К1- реле РЭС9

Для исследования фотодиодов, фоторезисторов и фототранзисторов используются нагреватели цилиндрической конструкции. Помимо устройства стабилизации и регулировки температуры универсальный блок содержит источники стабилизированного напряжения. Низковольтные стабилизаторы собраны по схеме, приведенной на рис. 4. Они имеют двойную защиту от перегрузки и короткого замыкания на выходе. На передней панели некоторых универсальных блоков установлены измерительные приборы (мультиметры, измерители емкости и т.д.).

## 1. Лабораторная работа ФП 1

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

**Цель работы:** Ознакомление с физическими явлениями, происходящими на  $p-n$ -переходе, конструкцией и технологией изготовления диодов, их параметрами. В работе исследуются вольтамперные характеристики диодов при различных температурах.

#### 1.1. Физические явления, происходящие на $p-n$ -переходе

Основу полупроводникового диода составляет  $p-n$ -переход. Электронно-дырочным переходом ( $p-n$ -переходом) называют область на границе двух полупроводников, один из которых имеет электронную, а другой – дырочную электропроводность.

Схематически образование  $p-n$ -перехода можно представить как соприкосновение двух полупроводников с различным типом электропроводности (рис. 1.1.1). До соприкосновения в обоих полупроводниках электроны, дырки и неподвижные ионы были распределены равномерно (рис. 1.1.1,а).

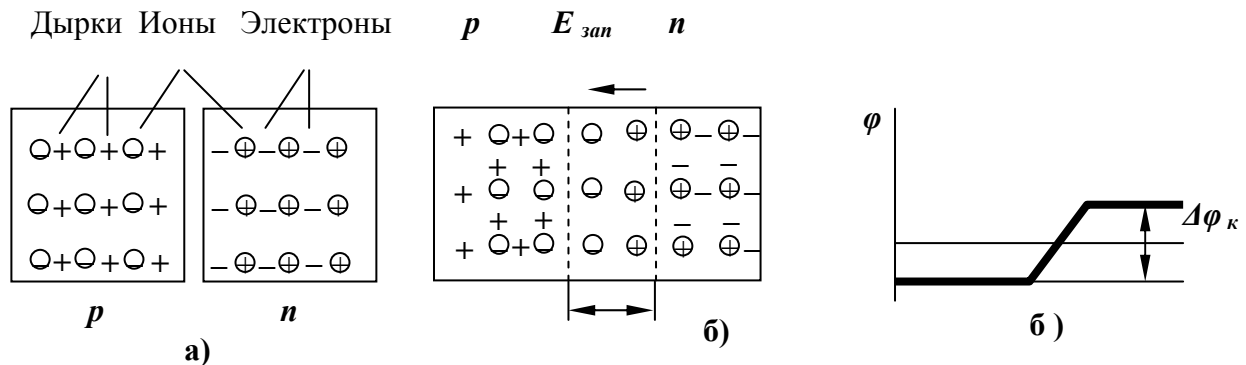


Рис. 1.1.1. Образование  $p-n$ -перехода

При соприкосновении полупроводников в пограничном слое происходит рекомбинация электронов и дырок. Свободные электроны из зоны проводника  $n$ -типа занимают свободные уровни в валентной зоне полупроводника  $p$ -типа. В результате вблизи границы двух полупроводников образуется слой, обедненный подвижными носителями заряда и вследствие этого обладающий высоким электрическим сопротивлением, - так называемый запирающий слой (рис. 1.1.1, б). Толщина запирающего слоя обычно не превышает нескольких микрометров.

Расширению запирающего слоя препятствуют неподвижные ионы донорных и акцепторных примесей, которые образуют на границе полупроводников двойной электрический слой. Этот слой определяет контактную разность потенциалов (потенциальный барьер) на границе

полупроводников (рис. 1.1.1, в). Возникшая разность потенциалов создает в запирающем слое электрическое поле, препятствующее как переходу электронов из полупроводника  $n$ -типа в полупроводник  $p$ -типа, так и переходу дырок в обратном направлении. Таким образом, контактная разность потенциалов препятствует движению **основных носителей заряда** и не препятствует движению **неосновных носителей заряда**. Однако при движении через  $p$ - $n$ -переход неосновных носителей (так называемый дрейфовый ток  $I_{др.}$ ) происходит снижение контактной разности потенциалов  $\varphi_k$ , что позволяет некоторой части основных носителей, обладающих достаточной энергией, преодолевать потенциальный барьер, обусловленный контактной разностью потенциалов  $\varphi$ . Появляется диффузионный ток  $I_{диф.}$ , который направлен навстречу дрейфовому току  $I_{др.}$ , т.е. возникает динамическое равновесие, при котором  $I_{др.} = I_{диф.}$ .

Если к  $p$ - $n$ -переходу приложить внешнее напряжение, которое создает в запирающем слое электрическое поле, сонаправленное с полем неподвижных ионов (рис. 1.1.2, а), то это приведет лишь к расширению запирающего слоя, так как отведет от контактной зоны и положительные и отрицательные носители заряда. При этом сопротивление  $p$ - $n$ -перехода велико, ток через него мал – он обусловлен движением неосновных носителей заряда. В этом случае ток называется **обратным**, а  $p$ - $n$ -переход - **закрытым**.

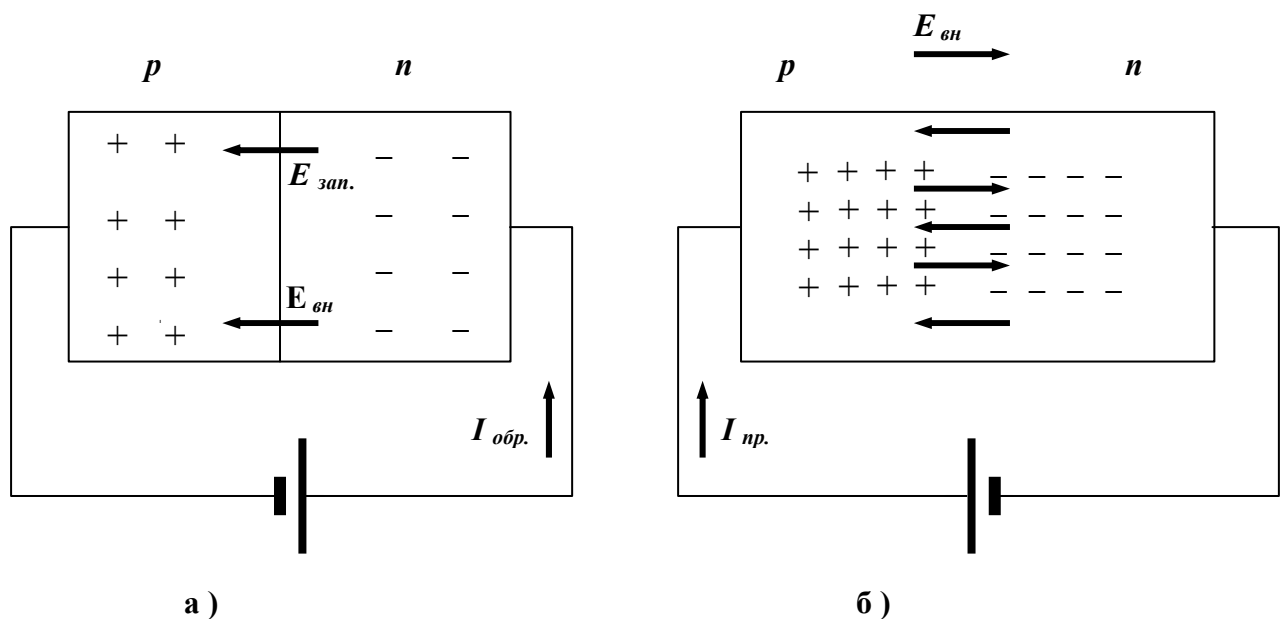


Рис. 1.1.2. Электронно-дырочный переход во внешнем электрическом поле:  
 а – к  $p$ - $n$ - переходу приложено обратное напряжение,  
 б - к  $p$ - $n$ - переходу приложено прямое напряжение

При противоположной полярности источника напряжения электрическое поле направлено навстречу полю двойного электрического слоя, толщина запирающего слоя уменьшается, и при напряжении 0,3-0,5 В запирающий слой



исчезает. Сопротивление  $p$ - $n$ -перехода резко снижается, возникает сравнительно большой ток. Ток при этом называется *прямым*, а переход – *открытым*. Сопротивление открытого  $p$ - $n$ -перехода определяется только сопротивлением полупроводника.

На рис. 1.1.3 показана вольтамперная характеристика открытого и закрытого  $p$ - $n$ -перехода. На участке 1 ( $E_{внешн.} < E_{зан.}$ ) прямой ток мал. На участке 2 ( $E_{вн.} > E_{зан.}$ ) запирающий слой отсутствует, ток определяется только сопротивлением полупроводника. На участке 3 запирающий слой препятствует движению основных носителей, небольшой ток определяется движением неосновных носителей заряда. Излом вольтамперной характеристики в начале координат обусловлен различными масштабами тока и напряжения при прямом и обратном направлениях напряжения, приложенного к  $p$ - $n$ -переходу.

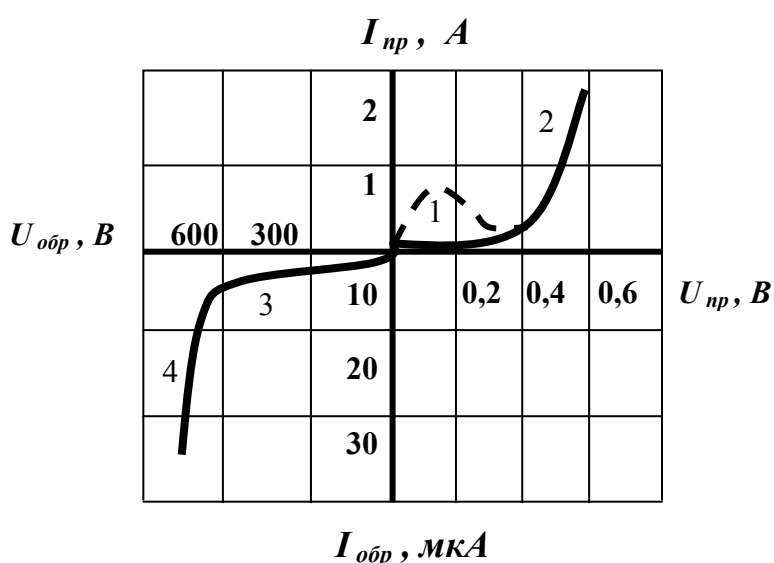


Рис. 1.1.3. Вольтамперная характеристика  $p$ - $n$ -перехода

И, наконец, на участке 4 происходит пробой  $p$ - $n$ -перехода и обратный ток возрастает. Это связано с тем, что при движении через  $p$ - $n$ -переход под действием электрического поля неосновные носители приобретают энергию, достаточную для ударной ионизации атомов полупроводника. В переходе начинается лавиннообразное размножение носителей заряда, что приводит к резкому увеличению обратного тока через  $p$ - $n$ -переход при почти

неизменном обратном напряжении. Этот вид электрического пробоя называют *лавинным*. Обычно он развивается в относительно широких  $p$ - $n$ -переходах, которые образуются в слаболегированных полупроводниках. В сильнолегированных полупроводниках ширина запирающего слоя меньше, что препятствует возникновению лавинного пробоя, так как движущиеся носители не приобретают энергии, достаточной для ударной ионизации. В то же время может возникать электрический пробой  $p$ - $n$ -перехода, когда при достижении критической напряженности электрического поля  $p$ - $n$ -переходе за счет энергии поля появляются пары носителей электрон-дырка (эффект Зенера), и существенно возрастает обратный ток перехода. Для электрического пробоя характерна обратимость, заключающаяся в том, что первоначальные свойства  $p$ - $n$ -перехода полностью восстанавливаются при снижении на нем напряжения.

Благодаря этому электрический пробой используют в качестве рабочего режима в полупроводниковых диодах.

Если температура  $p-n$ -перехода возрастает в результате его перегрева обратным током, то усиливается процесс генерации пар носителей заряда. Это, в свою очередь, приводит к дальнейшему увеличению обратного тока и нагреву  $p-n$ -перехода, что может вызвать разрушение перехода. Такой пробой называют тепловым пробоем.

## 1.2. Технология изготовления, конструкция, параметры полупроводниковых диодов

Полупроводниковым диодом называют полупроводниковый прибор с одним  $p-n$ -переходом и двумя выводами, в котором используются свойства перехода.

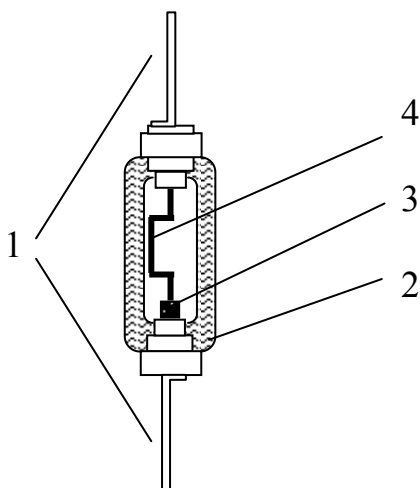


Рис. 1.2.1. Конструкция точечного диода: 1 – выводы, 2 – стеклянный корпус, 3 – кристалл полупроводника, 4 – гибкий контакт

В качестве материалов для полупроводниковых диодов используют германий, кремний, селен, арсенид галлия, фосфид галлия и др. Легирующими добавками служат элементы III-V групп таблицы Менделеева.

Все полупроводниковые диоды делят на два класса: точечные и плоскостные. В точечном диоде используется пластинка из германия или кремния с электропроводностью  $n$ -типа толщиной 0,1- 0,6 мм и площадью 0,5-1,5 мм<sup>2</sup>; с пластиной соприкасается заостренная стальная проволочка (рис. 1.2.1). На заключительной стадии изготовления в диоде создают большой ток, стальную проволочку вплавляют в

полупроводник, образуя область с электропроводностью  $p$ -типа. Этот процесс называется формовкой диода.

Вольтамперные характеристики точечного диода аналогичны характеристикам, приведенным на рис. 1.1.3, но из-за малой площади контакта прямой ток таких диодов сравнительно невелик. По той же причине у них мала и межэлектродная емкость, что позволяет применять эти диоды в области очень высоких частот (СВЧ-диоды). Точечные диоды используют в основном для выпрямления переменного напряжения.

В плоскостных диодах  $p-n$ -переход образуется двумя полупроводниками с различными типами электропроводности, причем площадь перехода у

полупроводников различных типов лежит в пределах от сотых долей квадратного миллиметра (микроплоскостные диоды) до нескольких квадратных сантиметров (силовые диоды) В зависимости от назначения плоскостного диода в нем используются те или иные участки характеристики  $p-n$ -перехода.

### 1.3. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Записать паспортные данные для всех исследуемых диодов, зарисовать схему расположения их выводов.
2. Собрать схему для снятия прямых характеристик диодов (рис. 2.3.1, а).

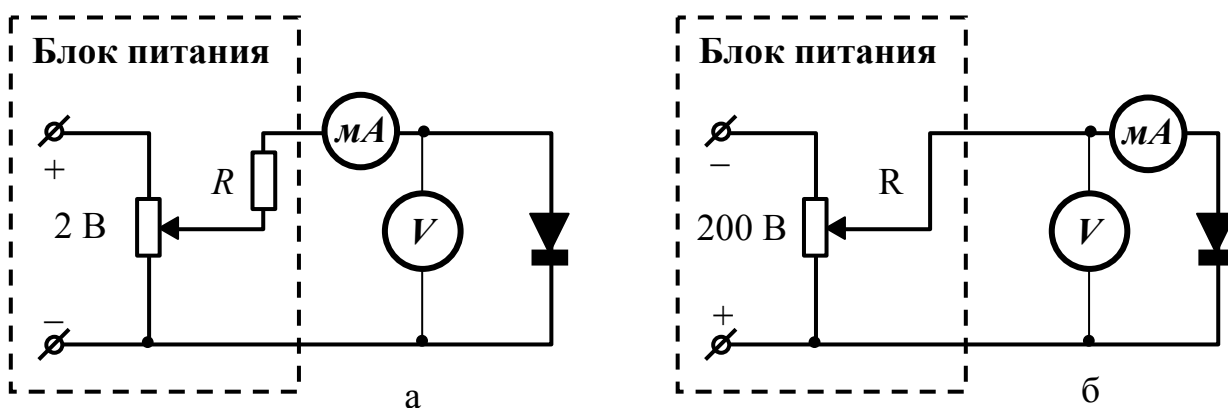


Рис.1. 3.1. Схемы для снятия прямых (а) и обратных (б) вольтамперных характеристик диода.

3. Снять прямые характеристики  $I = f(U)$  при комнатной температуре и при других температурах, указанных преподавателем. При измерениях следует помнить, что нельзя превышать ток выше номинального (указанного в паспортных данных прибора), а напряжение – выше максимально допустимого.
4. Собрать схему для снятия обратных характеристик диодов (рис. 1.3.1, б).
5. Снять характеристики  $I_{обр.} = f(U)$  при комнатной температуре и других температурах, указанных преподавателем.
6. Вычислить прямые сопротивления всех исследованных диодов по постоянному току  $R_{пр}$  при номинальном токе (напряжении), а также обратные сопротивления  $R_{обр}$  всех диодов при номинальном обратном напряжении.
7. Построить вольтамперные характеристики диодов. Прямая и обратная ветви строятся на одном графике, при этом масштабы по вертикальной и горизонтальной осям выбираются разными.
8. Построить графики зависимости прямого и обратного сопротивления диодов по постоянному току от температуры.

9. Вычислить величины теплового тока  $I_0$  по измеренным значениям  $r_{\partial\theta}$  по формуле  $I_0 = \varphi_T / r_{\partial\theta}$ .
10. Построить графики зависимостей  $\ln (I/I_0) = f (U/\varphi_T)$  по прямым характеристикам, снятым при комнатной температуре.

#### **1.4. Вопросы для подготовки**

1. Что такое собственная, электронная и дырочная проводимости полупроводников?
2. Как на диаграммах полупроводников с собственной, электронной и дырочной проводимостями располагается уровень Ферми?
3. Как зависит положение уровня Ферми от концентрации примесей в примесных полупроводниках?
4. Как зависит концентрация основных носителей от температуры в полупроводниках?
5. Нарисуйте энергетическую диаграмму  $p$ - $n$ -перехода.
6. Что такое контактная разность потенциалов двух полупроводников и чем определяется ее величина?
7. Нарисуйте энергетические диаграммы  $p$ - $n$ -перехода при включении его в прямом и обратном направлениях.
8. На какие составляющие может быть разложен ток через  $p$ - $n$ -переход при обратном включении?
9. Как зависит величина прямого и обратного напряжений  $p$ - $n$ -перехода от температуры и почему?
10. Нарисуйте распределение плотности объемного заряда и напряженности электрического поля в  $p$ - $n$ -переходе.
11. Что такое ширина  $p$ - $n$ -перехода и как она зависит от величины и полярности приложенного напряжения?
12. Что такое емкость  $p$ - $n$ -перехода и как она зависит от величины приложенного напряжения?
13. Нарисуйте устройство точечных и плоскостных диодов.
14. Чем различаются характеристики германиевых и кремниевых полупроводниковых диодов и почему?
15. Объясните с помощью характеристики диода, построенной в полулогарифмическом масштабе  $\ln (I/I_0) = f (U/\varphi_T)$  причины отличий характеристики реального от теоретической характеристики, описываемой уравнением  $I = I_0 [\exp(U / \varphi_0 - 1)]$ .
16. Как влияет температура окружающей среды на характеристики полупроводникового диода?
17. Назовите основные характеристики точечных и плоскостных диодов.

18. Почему у некоторых экземпляров диода наблюдается изменение величины обратного тока во времени при неизменных внешних условиях и постоянном обратном напряжении?
19. Назовите преимущества и недостатки полупроводниковых диодов по сравнению с вакуумными.
20. Каковы основные области применения полупроводниковых диодов?

### *Список литературы*

1. Федотов Я.А. Основы физики полупроводниковых приборов.-М.: Советское радио, 1963.- Гл. IV, § 2; гл. XIII.
2. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: Учебное пособие.- 8-е изд., испр.-СПб.: Изд-во «Лань», 2006.- 480 с.
3. Герасимов В.Г. Основы промышленной электроники.- М.: Высшая школа, 1988.
4. Жеребцов И.П. Основы электроники.-Л.: Энергоатомиздат, Ленинград-ское отделение, 1990.
5. Тугов Н.М. Полупроводниковые приборы.- М.: Энергоатомиздат, 1990.
6. Справочник по полупроводниковым диодам, транзисторам и интегральным схемам / Под ред. Горюнова Н.Н.-М.: Энергия, 1972.

## 2. Лабораторная работа ФП 2

### ОПОРНЫЕ ДИОДЫ

**Цель работы:** Исследовать характеристики опорного диода, изучить влияние температуры окружающей среды на его свойства.

#### 2.1. Краткая теория

Принцип работы полупроводниковых приборов связан с тем, что в полупроводниках существует электропроводность двух типов. Так же, как и металлы, полупроводники обладают электронной электропроводностью, которая обусловлена перемещением электронов проводимости. Полупроводники обладают также дырочной электропроводностью, которая обусловлена перемещением дырок.

Электронно-дырочным переходом (*p-n*-переходом) называют область на границе двух полупроводников, один из которых имеет электронную, а другой – дырочную электропроводность.

Работа большинства полупроводниковых приборов основана на использовании свойств одного или нескольких *p-n*-переходов.

**Опорный диод** (полупроводниковый стабилитрон) – полупроводниково-ый диод, напряжение на котором в области электрического пробоя слабо зависит от тока; стабилитроны используются обычно в схемах стабилизации напряжения. Типичная вольтамперная характеристика стабилитрона приведена на рисунке 2.1.1.

Как видно, в области пробоя напряжение на стабилитроне  $U_{cm}$  лишь незначительно изменяется при больших изменениях тока стабилизации. Ток, соответствующий напряжению устойчивого пробоя, является минимальным током  $I_{min}$ , максимально допустимый обратный ток – максимальный ток стабилизации  $I_{max}$ .

Следовательно, основными параметрами стабилитрона являются: напряжение на участке стабилизации  $U_{cm}$ , динамическое сопротивление на участке стабилизации  $R_{\delta} = dU_{cm} / dI_{cm}$ ; минимальный ток стабилизации  $I_{cm.min}$ ; максимальный ток стабилизации  $I_{cm.max}$ ; температурный коэффициент на участке стабилизации  $TKH = \frac{dU_{cm}}{dT} \cdot 100 \sqrt{a^2 + b^2}$ .

Напряжение стабилизации современных стабилитронов лежит в пределах 1 – 1000 В и зависит от толщины запирающего слоя *p-n*-перехода. Участок стабилизации расположен на характеристике стабилитрона от  $I_{cm.min}$  до  $I_{cm.max}$ ;  $I_{cm.min} \approx 1 \div 10$  мА,  $I_{cm.max} \approx 50 \div 2000$  мА. Значение минимального тока  $I_{cm.min}$  ограничено нелинейным участком характеристики стабилитрона, значение максимального тока  $I_{cm.max}$  – допустимой температурой полупроводника.

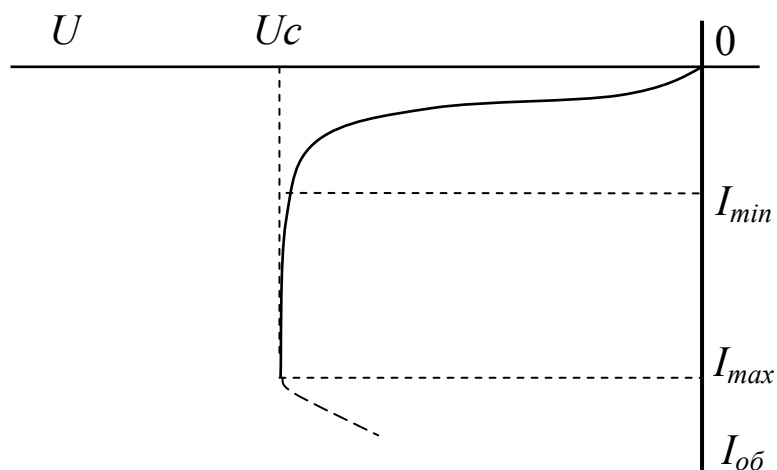


Рис. 2.1.1. Вольтамперная характеристика опорного диода.

На участке стабилизации  $R_D \approx const$ , для большинства стабилитронов  $R_D \approx 0.5 \div 200$  Ом. Важным параметром стабилитрона является температурный коэффициент напряжения  $TKN$ , который показывает, на сколько процентов изменяется напряжение стабилизации при изменении температуры полупроводника на  $1^\circ\text{C}$ . Для большинства стабилитронов  $TKN = (-0.05 \div +0.2) \%/^\circ\text{C}$ . При этом отрицательным  $TKN$  обладают стабилитроны с низким напряжением стабилизации ( $U_{cm} \leq 6.0$  В). Путем последовательного соединения в процессе изготовления  $p$ - $n$ -переходов с различными по знаку  $TKN$  удается получить стабилитроны с очень низким  $TKN$ . Так, у прецизионного стабилитрона КС196В  $TKN = \pm 0.0005 \%/^\circ\text{C}$  в диапазоне температур от  $-60$  до  $+60^\circ\text{C}$ . Такие стабилитроны применяют в стабилизаторах напряжения, предназначенных для измерения постоянных напряжений и токов. Стабилизацию постоянного напряжения можно также получить с помощью диода, включенного в прямом направлении. Кремниевые диоды, предназначенные для этой цели, называют стабисторами.

В настоящее время выпускаются исключительно кремниевые стабилитроны многих типов. Их также называют опорными диодами, так как получаемое от них стабильное напряжение в используется в качестве эталонного.

## 2.2. Схемы для исследования характеристик стабилитронов

На рис.2.2.1 показаны схемы для снятия прямых и обратных характеристик стабилитрона. Балластное сопротивление  $R_b$  равно 200 Ом. Эта же схемы служат также для измерения коэффициента стабилизации.

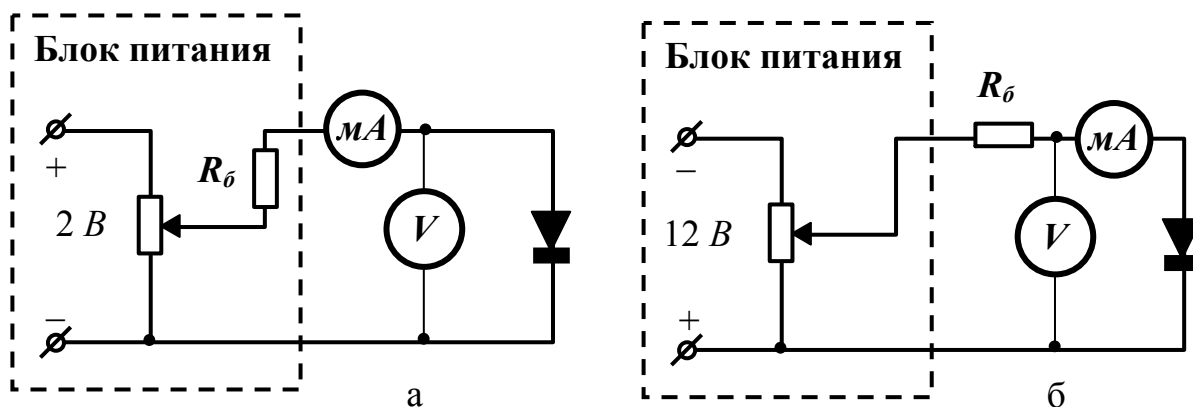


Рис. 2.2.1. Схемы для снятия прямых (а) и обратных (б) вольтамперных характеристик стабилитронов

### 2.3. Задание

1. Записать паспортные данные исследуемого стабилитрона и зарисовать схему расположения выводов.
2. Собрать схему на рис. 2.2.1, а и снять прямые характеристики  $I = f(U)$  стабилитрона при температурах, указанных преподавателем.
3. Собрать схему на рис. 2.2.1, б и снять обратную характеристику  $I = f(U)$  при температурах, указанных преподавателем.

### 2.4. Методические указания

1. При снятии прямых характеристик стабилитронов не следует превышать максимально допустимого прямого тока.
2. Вычисление дифференциального сопротивления диода  $R_D$  в области стабилизации следует производить по тангенсу угла наклона касательной к вольтамперной характеристике диода в соответствующей точке.
3. Используя прямые характеристики диода, снятые при разных температурах, определить  $TKH$  для заданных значений прямого тока по формуле:

$$TKH = \frac{U(T_2) - U(T_1)}{U(T_1)(T_2 - T_1)} \cdot 100 \text{ (\%/град)}.$$

4. На снятой характеристике  $U_{cm} = f(U_{cm})$  отметить границы области стабилизации.
5. Подсчитать коэффициент стабилизации  $k_{cm}$  по формуле

$$k_{cm} = \frac{\Delta U_{вх}}{\Delta U_{см}} \cdot \frac{U_{см}}{U_{вх}}.$$



## 2.5. Вопросы для подготовки

1. Назовите основные виды пробоев  $p$ - $n$ -переходов. Какие виды пробоев используются в стабилитронах?
2. Как влияет проводимость исходных материалов на величину напряжения пробоя  $p$ - $n$ -перехода стабилитронов?
3. Расскажите, какие физические процессы определяют форму характеристики на ее разных участках?
4. Назовите основные параметры опорного диода.
5. Почему в качестве материала для стабилитронов выбран кремний, а не германий?
6. Что такое  $TКН$  и как он определяется?
7. Как зависит  $TКН$  от вида пробоя  $p$ - $n$ -перехода?
8. Для каких напряжений пробоя  $p$ - $n$ -перехода  $TКН$  близок к нулю?
9. Каким способом можно уменьшить  $TКН$  стабилитронов?
10. Чем ограничена величина наибольшего тока стабилизации стабилитрона?
11. Что такое коэффициент стабилизации?
12. Каковы преимущества и недостатки стабилитронов по сравнению со стабилитронами тлеющего разряда?
13. Назовите типы опорных диодов, выпускаемых промышленностью, и приведите численные значения их основных параметров.
14. Расскажите о применениях опорных диодов.

## Список литературы

1. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем.- М.: Госэнергоиздат, 1963.- § 3-3.
2. Федотов Я.А. Основы физики полупроводниковых приборов.-М.: Советское радио, 1963.-Гл. IV, § 2; гл. XIII.
3. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: Учебное пособие.- 8-е изд., испр.-СПб.: Изд-во «Лань», 2006.- 480 с.
4. Герасимов В.Г. Основы промышленной электроники. - М.: Высшая школа, 1988.
5. Жеребцов И.П. Основы электроники.-Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1990.
6. Тугов Н.М. Полупроводниковые приборы.-М.: Энергоатомиздат, 1990.

### 3. Лабораторная работа ФП 3

#### ТУННЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

**Цель работы:** Ознакомиться с физическими принципами работы туннельных диодов, их конструкцией, основными характеристиками и параметрами, областями их применения.

##### 3.1. Краткая теория

В квантовой механике известен так называемый туннельный эффект, заключающийся в том, что микрочастица с массой  $m$  и кинетической энергией  $E$  может проникнуть за потенциальный барьер высотой  $U$  и шириной  $x - x_0$ , хотя высота барьера  $U > E$ . Вероятность проникновения барьера (прозрачность)  $D$  определяется формулой

$$D = C \exp\left(-\frac{2m}{h} \int_{x_0}^x \sqrt{U - E} dx\right),$$

где  $C$  – константа порядка единицы,  $h$  – постоянная Планка.  $D$  велика на длине менее  $1 \text{ \AA}$  и резко падает при уменьшении ширины барьера.

Туннельный диод – это полупроводниковый диод на основе вырожденного полупроводника, в котором туннельный эффект приводит к появлению на вольтамперной характеристике при прямом напряжении участка отрицательной дифференциальной проводимости.

В отличие от всех остальных полупроводниковых диодов для изготовления туннельных диодов используют материал с очень большой концентрацией примесей ( $10^{18}$ -  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ ). Следствием большой концентрации примесей в прилегающих к электронно-дырочному переходу областях является, во-первых, малая толщина перехода (около  $10^{-2}$  мкм), т.е. на два порядка меньше, чем в других полупроводниковых диодах. Сквозь такие тонкие потенциальные барьеры возможно туннелирование носителей заряда.

Другим следствием большой концентрации примесей является расщепление примесных энергетических зон, которые примыкают к зоне проводимости в  $n$ -области и к валентной зоне в  $p$ -области. Уровни Ферми при этом оказываются расположенными в разрешенных областях (рис. 3.1.1, а). В диоде без внешнего напряжения существует туннелирование электронов из  $n$ -области в  $p$ -область и обратно. Встречные потоки равны, поэтому суммарный ток через диод равен нулю. При обратном подключении внешнего напряжения к туннельному диоду также существуют условия для туннелирования электронов (рис. 3.1.1, б). Возникающий при этом обратный ток будет расти с увеличением обратного напряжения по абсолютному значению. Таким образом, туннельный диод обладает относительно высокой проводимостью при обратном напряжении. Можно считать, что у туннельного диода при ничтожно малых обратных напряжениях происходит туннельный пробой.

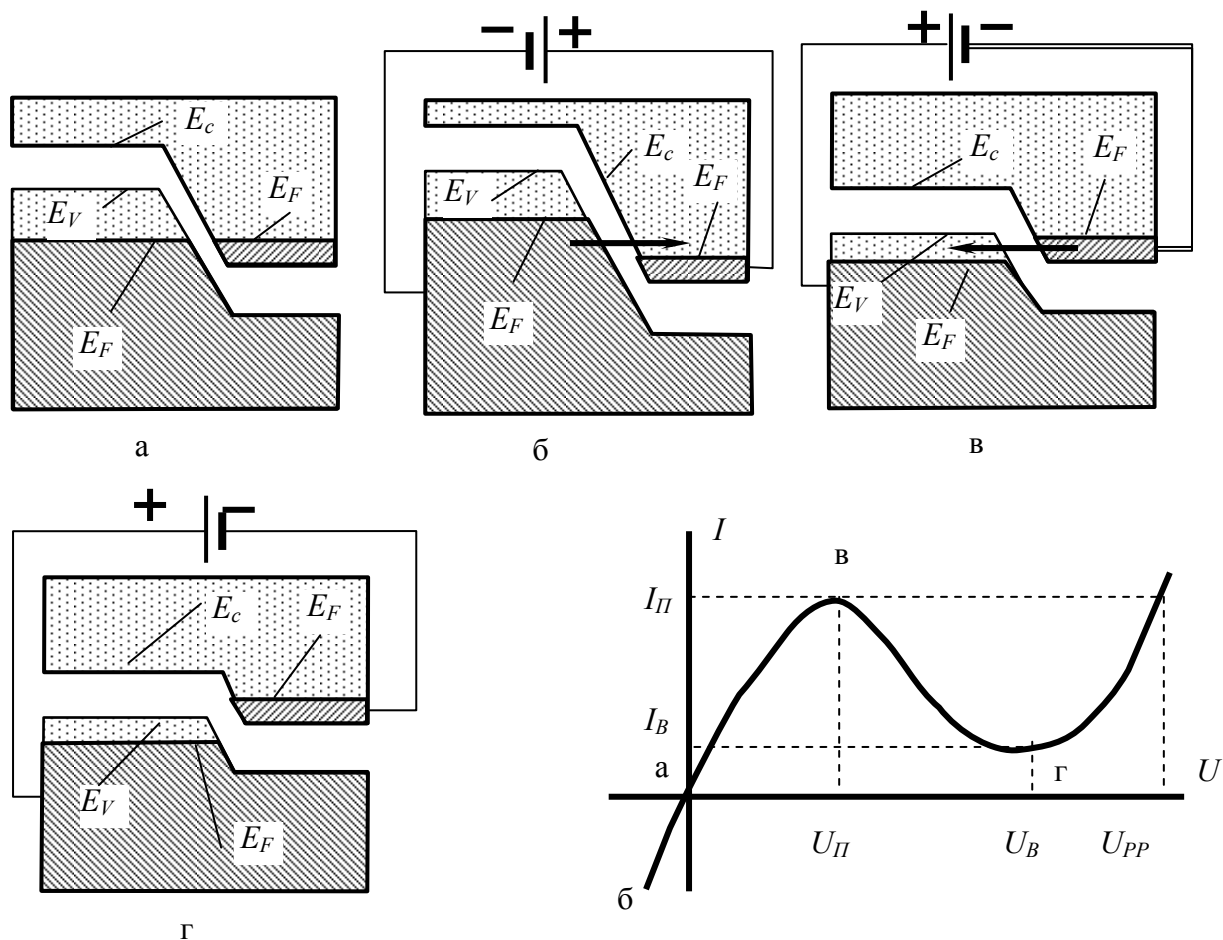


Рис. 3.1.1. Энергетические диаграммы и вольтамперная характеристика туннельного диода: а – отсутствие напряжения, б – обратное напряжение, в – напряжение пика, г – напряжение впадины

При небольшом прямом напряжении на туннельном диоде происходит уменьшение высоты потенциального барьера электронно-дырочного перехода или смещение энергетической диаграммы  $n$ -области относительно энергетической диаграммы  $p$ -области. Свободные энергетические уровни  $p$ -области (занятые дырками), расположенные непосредственно над уровнем Ферми, оказываются на одной высоте по энергетической диаграмме или при одних и тех же значениях с энергетическими уровнями  $n$ -области, занятыми электронами. Поэтому будет происходить преимущественное туннелирование электронов из  $n$ -области в  $p$ -область.

При прямом напряжении на диоде, когда свободные энергетические уровни валентной и примесной зон  $p$ -области окажутся на одной высоте с занятыми электронами энергетическими уровнями зоны проводимости и примесной зоны  $n$ -области, туннельный ток через диод будет максимальным (рис. 3.1.2, в).

При дальнейшем увеличении прямого напряжения на диоде туннельный ток через диод будет уменьшаться, так как из-за смещения энергетических

диаграмм будет уменьшаться количество электронов, способных туннелировать из  $n$ -области в  $p$ -область.

Туннельный ток через диод окажется равным нулю при некотором еще большем прямом напряжении, когда из-за относительного смещения энергетических диаграмм  $n$ - и  $p$ -областей для свободных электронов  $n$ -области не будет свободных энергетических уровней в  $p$ -области (рис. 3.1.1, г). Однако при этом через диод будет проходить прямой ток, обусловленный переходом носителей через понизившийся потенциальный барьер электронно-дырочного перехода, т.е. ток, связанный с инжекцией. С дальнейшим увеличением прямого напряжения в связи с уменьшением высоты потенциального барьера прямой ток через туннельный диод будет возрастать, как в обычных выпрямительных диодах.

Итак, туннельный диод обладает отрицательным дифференциальным сопротивлением в некотором диапазоне напряжений. Это является самым интересным свойством туннельного диода, так как всякий прибор с отрицательным дифференциальным сопротивлением может быть использован для генерации и усиления электромагнитных колебаний, а также в переключающих схемах.

#### **Туннельные диоды характеризуются следующими параметрами**

1. *Пиковый ток  $I_n$*  - прямой ток в точке максимума вольтамперной характеристики, при котором значение  $dI/dU$  равно нулю. Этот ток различен для туннельных диодов различного назначения. Величина его может быть от десятых долей миллиампера до сотен миллиампер.
2. *Ток впадины  $I_e$*  - прямой ток в точке минимума вольтамперной характеристики, при котором  $dI/dU$  равно нулю.
3. *Отношение токов туннельного диода  $I_n/I_e$*  - отношение пикового тока к току впадины. Для туннельных диодов из арсенида галлия это отношение больше или равно 10, для германиевых туннельных диодов оно равно 3-6.
4. *Напряжение пика  $U_n$*  - прямое напряжение, соответствующее току впадины. У туннельных диодов из арсенида галлия  $U_n = 100-150$  мВ, для германиевых  $U_n = 40-60$  мВ.
5. *Напряжение впадины  $U_e$*  - прямое напряжение, соответствующее току впадины. У диодов из арсенида галлия оно равно 400-500 мВ, у германиевых – 250-300 мВ.
6. *Напряжение раствора  $U_{pp}$*  - прямое напряжение, большее напряжения впадины, при котором ток равен пиковому.
7. *Удельная емкость туннельного диода  $C_d/I_n$*  - отношение емкости туннельного диода к пиковому току.

8. *Предельная резистивная частота  $f_R$*  - расчетная частота, на которой активная составляющая полного сопротивления последовательной цепи, состоящей из *p-n*-перехода и сопротивления потерь, обращается в нуль.
9. *Резонансная частота туннельного диода  $f_0$*  - расчетная частота, на которой общее реактивное сопротивление *p-n* - перехода и индуктивности корпуса туннельного диода обращается в нуль.

Изменение температуры туннельных диодов вызывает изменение его параметров. При повышении температуры уменьшается ширина запрещенной зоны исходных полупроводниковых материалов для туннельных диодов. Это вызывает в свою очередь уменьшение толщины потенциального барьера, сквозь который туннелируют электроны, вследствие чего растет вероятность туннелирования. Туннельная составляющая прямого тока и, в частности, пиковый ток увеличивается.

При увеличении температуры изменяется распределение электронов по энергетическим уровням – количество электронов над уровнем Ферми в зоне проводимости *n*-области уменьшается, так как часть свободных электронов переходит на более высокие энергетические уровни, а уровень Ферми смещается вниз. Поэтому уменьшается число электронов, которые могут туннелировать из *n*-области в *p*-область.

Суммарное влияние этих факторов делает температурные изменения туннельного тока небольшими, а пиковый ток туннельного диода может как возрастать, так и уменьшаться.

Инжекционная составляющая тока туннельного диода растет с повышением температуры как в обычных выпрямительных диодах, что приводит к увеличению тока впадины.

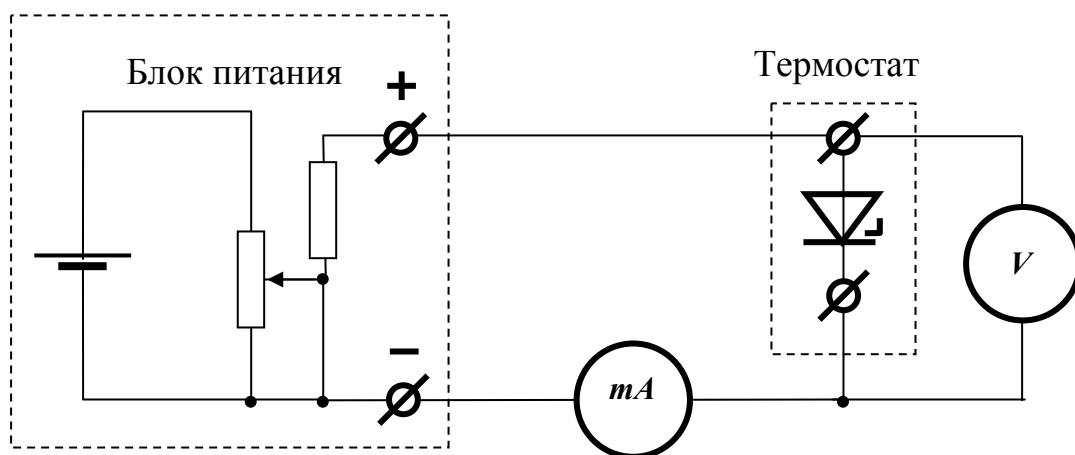


Рис. 3.2.1. Схема для исследования статических вольтамперных характеристик туннельных диодов

### 3.2. Порядок выполнения работы

1. Записать паспортные данные исследуемого туннельного диода и зарисовать схему его выводов.
2. Собрать схему для снятия статических характеристик диода (рис 3.2.1). Снять вольтамперную характеристику диода  $I = f(U)$  при комнатной температуре.
3. Снять вольтамперные характеристики диода при других температурах, указанных преподавателем.
4. Собрать и настроить генератор на туннельном диоде по схеме, приведенной на рис. 3.2.2. Изменяя ток через диод, получить устойчивую картину колебательного процесса на экране осциллографа.
5. Записать значение тока, при котором начинается генерация, и тока, при котором происходит срыв генерации. Зарисовать форму генерируемых импульсов, исследовать, как она изменяется при изменении тока через диод.
6. Определить амплитуду, длительность импульсов, период и частоту колебаний. Изменяя емкость колебательного контура, исследовать, как меняются параметры колебаний.

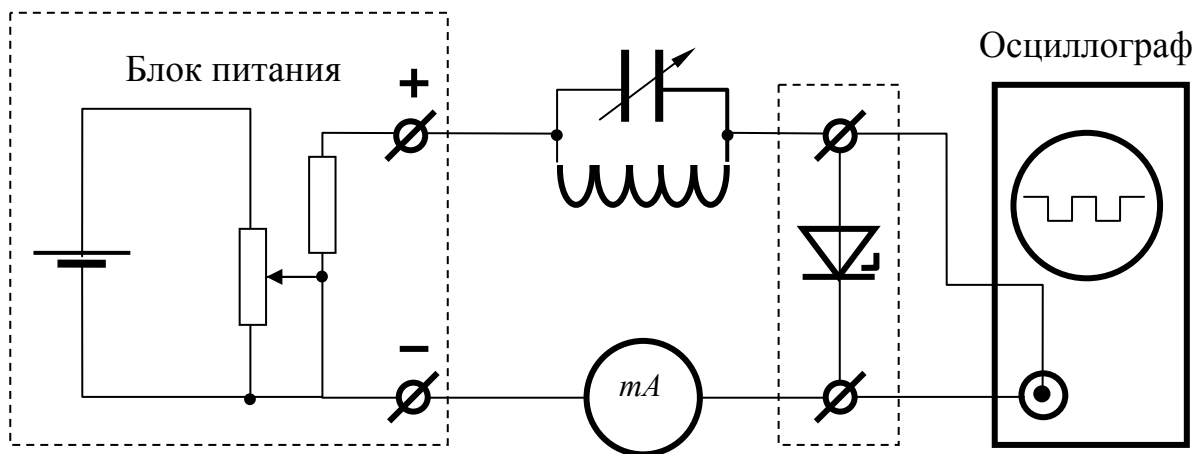


Рис. 3.2.2. Схема генератора на туннельном диоде

7. По вольтамперной характеристике диода определить его параметры: пиковый ток  $I_n$ , ток впадины  $I_v$ , отношение токов  $I_n / I_v$ ,  $\Delta I = I_n - I_v$ , напряжение пика  $U_n$ , напряжение впадины  $U_v$ , напряжение раствора  $U_{pp}$ , интегральное отрицательное сопротивление  $R_{\partial} = (U_n - U_v) / \Delta I$ , минимальное дифференциальное сопротивление  $r_{диф} = (U_{pp} - U_v) / \Delta I$ .

### 3.3. Вопросы для подготовки

1. Расскажите о принципе действия туннельного диода.
2. Как зависит положение уровня Ферми от концентрации примесей в примесных полупроводниках.
3. Что такое туннельный эффект?
4. Нарисуйте энергетическую диаграмму  $p-n$ -перехода туннельного диода.
5. Какова толщина  $p-n$ -перехода в туннельном диоде?
6. Нарисуйте вольтамперную характеристику туннельного диода.
7. Чем отличаются характеристики обычного и туннельного диода?
8. Какой из видов пробоя происходит при обратном напряжении на туннельном диоде?
9. Назовите параметры туннельного диода.
10. Как изменяется отношение  $I_n / I_g$  с увеличением температуры?
11. Чем определяется верхний частотный предел туннельного диода?
12. Из каких материалов изготавливают туннельные диоды?
13. Расскажите о применении туннельных диодов.

### Список литературы

1. Шпольский Э.В. Атомная физика.- М.: Наука, 1974, Т.1.-С. 493 – 506
2. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем.- М.: Госэнергоиздат, 1963.- § 3-4.
3. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: Учебное пособие.- 8-е изд., испр.-СПб.: Изд-во «Лань», 2006.- 480 с.
4. Федотов Я.А. Основы физики полупроводниковых приборов.- М.: Советское радио, 1963.- Гл. V, § 3.
5. Воронцов Ю.И. и др. Измерение параметров туннельных диодов // Полупроводниковые приборы и их применение / Под ред. Я.И. Федотова.- М.: Советское радио, 1961.- Вып. 7.
6. Герасимов В.Г. Основы промышленной электроники.- М.: Высшая школа, 1988.
7. Жеребцов И.П. Основы электроники.- Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1990.
8. Тугов Н.М. и др. Полупроводниковые приборы.- М.: Энергоатомиздат, 1990.
9. Туннельные диоды и их применение в схемах переключения и устройствах СВЧ-диапазона / Под ред. Визеля А.А.- М.: Советское радио, 1965.
10. Сидоров А.С. Импульсные схемы на туннельных диодах // Полупроводниковые приборы и их применение / Под ред. Федотова Я.А.-М.: Советское радио, 1964.- Вып. 12.

## 4. Лабораторная работа ФП 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОДИОДОВ

**Цель работы:** Ознакомиться с физическими основами действия фотодиодов, изучить их характеристики и параметры в фотодиодном и вентильном режимах.

#### 4.1. Краткая теория

Фотодиод – полупроводниковый фотоэлектрический селективный приёмник оптического излучения, обладающий односторонней фотопроводимостью. Фотодиоды могут работать в одном из двух режимов: 1) без внешнего источника электрической энергии (режим фотогенератора); 2) с внешним источником электрической энергии (режим фотопреобразователя).

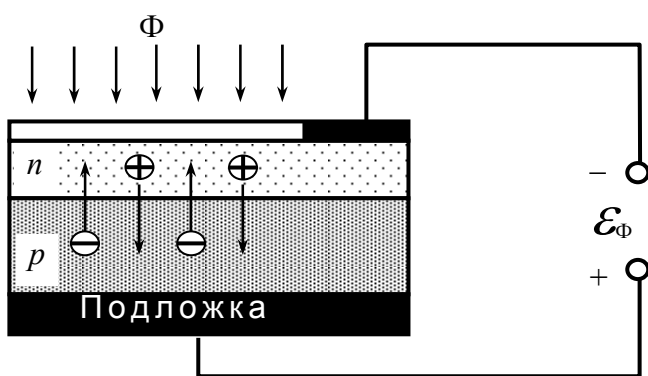


Рис. 4.1.1. Устройство фотодиода

В первом режиме используется фотогальванический эффект – разновидность внутреннего фотоэффекта, связанная с образованием разности потенциалов (фотоЭДС) при освещении неоднородного полупроводника. Фотодиоды состоят из двух примесных полупроводников с различными типами электропроводности, на границе между которыми создается  $p$ - $n$ -переход (рис 4.1.1), фотодиоды изготавливают

из германия, кремния, арсенида, галлия, индия, сульфида, кадмия и других полупроводниковых материалов. Световой поток при освещении прибора направлен перпендикулярно плоскости  $p$ - $n$  – перехода (рис. 4.1.1). В отсутствие освещения и внешнего источника электроэнергии в области  $p$ - $n$ -перехода возникает потенциальный барьер, обусловленный неподвижными носителями заряда – положительными ионами в  $n$ -области и отрицательными ионами в  $p$ -области.

При падении светового потока на фотодиод фотоны, проходя толщину полупроводника, сообщают части валентных электронов энергию, достаточную для перехода их в зону проводимости. В результате в обеих областях увеличивается число пар свободных носителей заряда (основных и неосновных), то есть дырок и электронов. Под действием контактной разности потенциалов (потенциального барьера)  $p$ - $n$ -перехода неосновные носители заряда  $n$ -области – дырки переходят в  $p$ -область, а неосновные носители заряда  $p$ -области – электроны – в  $n$ -область. Это приводит созданию на зажимах фотодиода при разомкнутой внешней цепи разности потенциалов, называемой



фотоЭДС. Предельно возможное значение фотоЭДС равно контактной разности потенциалов, которая составляет десятые доли вольт. Так, например, у селеновых и кремниевых фотодиодов фотоЭДС достигает 0,5–0,6 В, у фотодиодов из арсенида галлия –0,87 В.

Если замкнуть зажимы освещённого фотодиода через резистор, то в электрической цепи появляется ток, обусловленный движением неосновных носителей заряда, значение которого зависит от фотоЭДС и сопротивления резистора. Максимальный ток при одной и той же освещённости фотодиода будет при сопротивлении резистора, равным нулю, то есть при коротком замыкании фотодиода. При сопротивлении резистора, не равном нулю, ток во внешней цепи фотодиода существенно уменьшается.

Если к неосвещённому фотодиоду подключить источник, значение и полярность напряжения которого можно изменять, то снятые при этом вольтамперные характеристики будут иметь такой же вид, как у обычного полупроводникового диода (рис. 4.1.2).

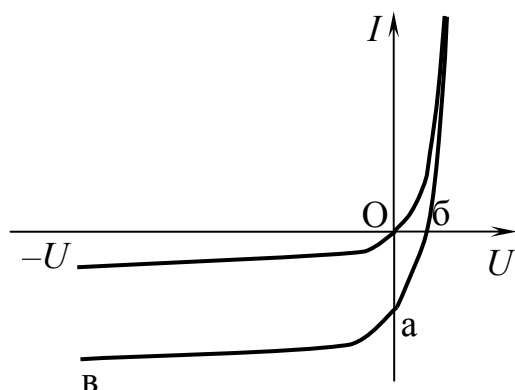


Рис. 4.1.2. Вольтамперные характеристики фотодиода

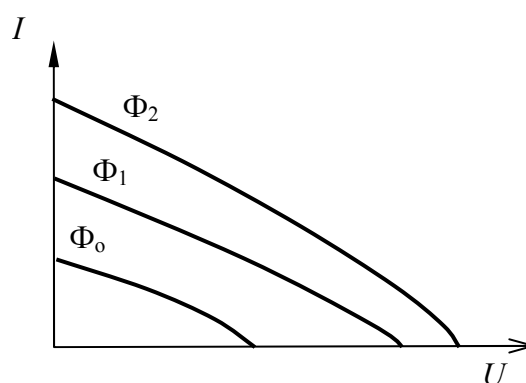


Рис. 4.1.3. Вольтамперные характеристики фотодиода фотогенераторном режиме

При освещении фотодиода существенно изменяется лишь обратная ветвь вольтамперной характеристики, прямые же ветви практически совпадают при сравнительно наибольших напряжениях. Отрезок Об на рис. 4.1.2 соответствует напряжению холостого хода освещённого фотодиода, то есть фотоЭДС, а отрезок Оа – току короткого замыкания фотодиода. Участок аб характеризует работу фотодиода в режиме фотогенератора. Вольтамперные характеристики фотодиода в этом режиме при различных значениях светового потока построены на рис. 4.1.3.

Режим фотопреобразователя соответствует подаче напряжения на фотодиод в запирающем направлении (участок аб на рис. 4.1.2). Вольтамперные характеристики фотодиода в этом режиме при различных значениях светового потока показаны на рис. 4.1.4.

Ток мало зависит от сопротивления нагрузки и приложенного напряжения. Токовую чувствительность фотодиода, работающего в режиме фотогенератора, измеряют при коротком замыкании по формуле  $S_I = I_{\Phi} / \Phi$ .

В режиме фотопреобразователя ток практически равен току короткого замыкания, поэтому чувствительность фотодиода по току в обоих режимах принято считать одинаковой. Чувствительность фотодиодов (мА/лм): селеновых –  $0,3 \div 0,75$ , кремниевых – 3, сернисто-серебрянных –  $10 \div 15$ , германиевых – до 20.

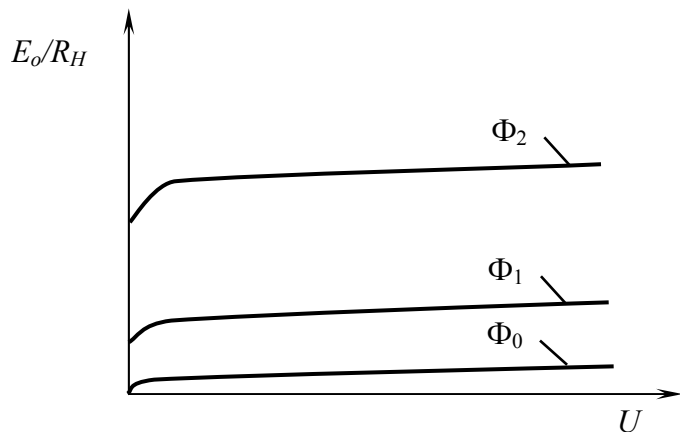


Рис. 4.1.4. Вольт-амперные характеристики фотодиода в режиме фотопреобразователя

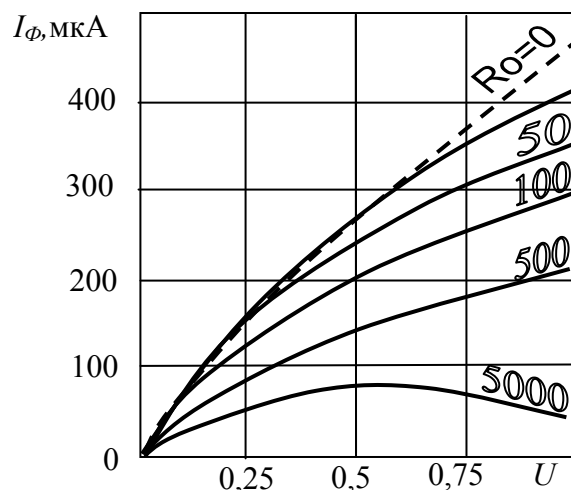


Рис. 4.1.5.

Темновой ток фотодиодов, так же как и фоторезисторов, ограничивает минимальное значение измеряемого светового потока. У германиевых фотодиодов он равен  $10 \div 30$  мкА, у кремниевых –  $1 \div 3$  мкА. Энергетические характеристики фототока фотодиода в режиме фотопреобразователя линейны, а в режиме фотогенератора зависят от сопротивления резистора, включенного во внешнюю цепь. На рис. 4.1.5 приведены энергетические характеристики фототока селенового фотодиода в режиме фотогенератора при различных значениях сопротивления нагрузочного резистора.

Спектральные характеристики фотодиодов зависят от материалов, используемых для их изготовления. Селеновые фотодиоды имеют спектральную характеристику, близкую по форме к спектральной зависимости чувствительности человеческого глаза, поэтому их широко применяют в фото- и кинотехнике. Германиевые и кремниевые фотодиоды чувствительны как в видимой, так и в инфракрасной части излучения.

Существенным недостатком фотодиодов является зависимость значений их параметров от температуры. В частности, темновой ток возрастает почти вдвое при повышении температуры на  $10^\circ\text{C}$ , что ограничивает в ряде случаев применение фотодиодов. При этом следует иметь в виду, что кремниевые фотодиоды более стабильны. По сравнению с фоторезисторами фотодиоды являются более быстродействующими, но имеют меньшую чувствительность.

В работе исследуются вольтамперные и световые характеристики фотодиода в фотодиодном режиме. Рассчитываются параметры прибора в фотодиодном режиме: интегральная чувствительность, начальное

статистическое  $R_o$  и динамическое  $R_D$  сопротивления фотодиода, а также чувствительность по напряжению.

Анализируется зависимость темнового тока от температуры и строится график зависимости  $R_o$  от температуры. Изучаются электрические и световые характеристики фотодиода в вентильном режиме. Вычисляются параметры фотодиода в вентильном режиме: интегральная чувствительность, ток короткого замыкания и напряжение холостого хода при отдельном световом потоке  $\Phi$ .

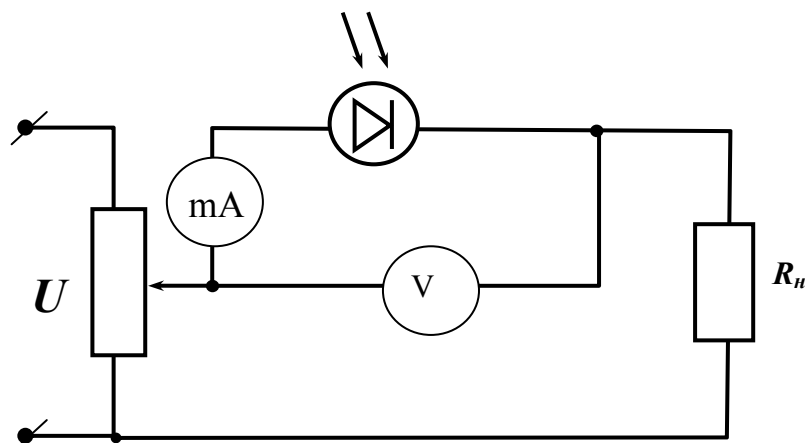


Рис. 4.1.6. Схема для снятия характеристик фотодиода в фотодиодном режиме

На рис 4.1.6 приведена схема для снятия вольтамперных, световых и температурных характеристик фотодиода в фотодиодном режиме. Способ изменения и контроля светового потока, его спектрального состава, а также модуляции светового потока изложен в методических указаниях.

Схема на рис. 4.1.7 предназначена для снятия вольтамперных и световых характеристик фотодиода в вентильном режиме ( $R_H$  – магазин сопротивлений, используемый в качестве нагрузки). Ток в режиме короткого замыкания и напряжения в режиме холостого хода могут быть измерены с помощью компенсационных схем на рис. 4.1.8 и 4.1.9, в которых используется микроамперметр с малым внутренним сопротивлением ( $\mu A_1$ ).

## 4.2. Задания

1. Записать паспортные данные и зарисовать схему выводов исследуемого фотодиода.
2. Собрать схему испытания фотодиода в фотодиодном режиме (рис. 4.1.6).
3. Снять семейство вольтамперных характеристик фотодиода  $I_\Phi = f(U_\Phi)$  при различных световых потоках  $\Phi$ , в том числе при  $\Phi=0$ .
4. Снять семейство световых характеристик фотодиода  $I = f(\Phi)$  при нескольких значениях напряжения  $U_\Phi$ .

- Поместив фотодиод в термостат, снять зависимость темнового тока,  $I_T=f(\Theta)$  от температуры  $\Theta$  при заданном напряжении  $U_\phi$ .
- Собрать схему испытания фотодиода в вентильном режиме (рис. 4.1.7).

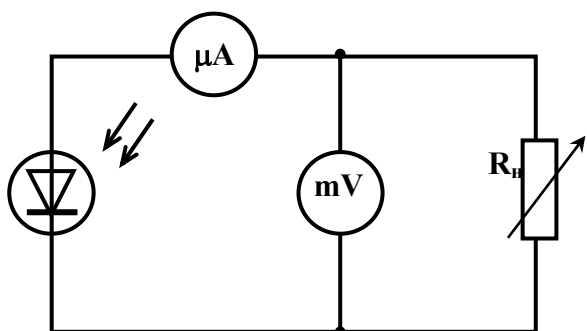


Рис. 4.1.7. Схема работы фотодиода в вентильном режиме

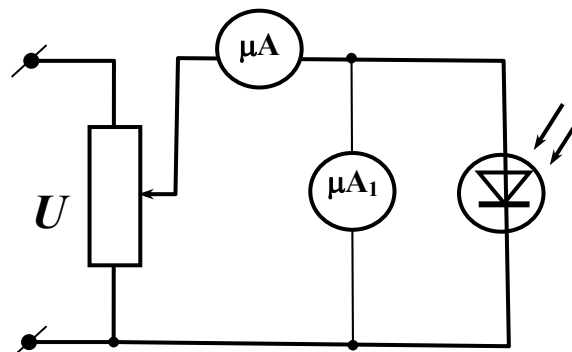


Рис. 4.1.8. Схема для измерения тока в режиме короткого замыкания

- Снять семейство характеристик зависимости фототока  $I_\Phi=f(R_H)$  от величины нагрузочного сопротивления  $R_H$  при работе фотодиода в вентильном режиме при нескольких световых потоках  $\Phi$ ,
- Снять семейство световых характеристик фотодиода в вентильном режиме  $I=f(\Phi)$  при различных сопротивлениях нагрузки  $R_H$ .

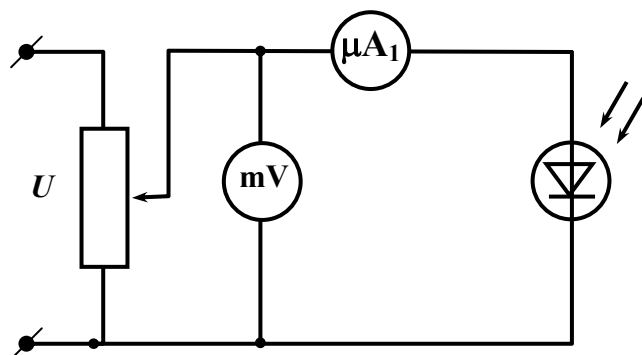


Рис. 4.1.9. Схема для измерения напряжения в режиме холостого хода

- Собрать схему для измерения тока короткого замыкания фотодиода  $I_{кз}$  в вентильном режиме (рис. 4.1.8, см. методические указания). Снять световую характеристику в вентильном режиме  $I_{кз}=f(\Phi)$ , построить ее на том же графике, что и кривые в п. 9 этого раздела.

- Собрать схему для измерения ЭДС холостого хода фотодиода  $U_{xx}$  в вентильном режиме (рис. 4.1.9, см. методические указания).
- Измерить ЭДС холостого хода фотодиода  $U_{xx}$  при нескольких световых потоках  $\Phi$  в вентильном режиме.

### 4.3. Методические указания по выполнению лабораторной работы

1. Категорически **ЗАПРЕЩАЕТСЯ** включать фотодиод в прямом направлении.
2. Во время измерений световой поток изменять с помощью осветительной лампы, либо расстоянием до фотодиода, либо её мощностью.
3. Световой поток измерять люксметром.
4. При работе со схемой, изображённой на рис. 4.1.8, при каждом измерении тока  $I_\Phi$  следует регулировать входное напряжение так, чтобы микроамперметр  $\mu A_1$  показывал нуль. Напряжение, включенное навстречу падению напряжения на приборе  $\mu A_1$ , компенсирует последнее, и ток внешнего источника равен фототоку в режиме короткого замыкания.
5. При работе со схемой (рис 4.1.9), при каждом измерении напряжения  $U_\Phi$  на фотодиоде входное напряжение регулируют так, чтобы микроамперметр показывал нуль. Ток внешнего источника компенсирует ток в цепи фотодиода, и падение напряжения, регулируемое милливольтметром, оказывается равным величине ЭДС. в режиме холостого хода.

### 4.4. Обработка результатов измерений

1. Подсчитать по вольтамперным характеристикам фотодиода  $I_\Phi=f(U)$  начальное статическое  $R_o=1/I_T$  и динамическое  $R_d=dU_\Phi/dI_\Phi$  сопротивления при  $U_\Phi=1$  В и  $\Phi=0$ .
2. Для заданного сопротивления нагрузки  $R_H$  в цепи фотодиода подсчитать чувствительность фотодиода по напряжению  $k_n = \frac{\partial(I_\Phi R_H)}{\partial\Phi}$ .
3. По световым характеристикам  $I_K=f(\Phi)$  определить интегральную чувствительность фотодиода  $K_\Sigma = \frac{\partial I_\Phi}{\partial\Phi}$  при  $U_\Phi=1$  В.
4. По снятой характеристике  $I_T=f(\Theta)$  построить график зависимости начального статического сопротивления  $R_o$  от температуры  $R_o=f(\Theta)$ .
5. По снятой характеристике  $I_\Phi=f(R_H)$  при работе фотодиода в вентильном режиме построить график зависимости  $I_\Phi=f(U)$ , где  $U=I_\Phi \cdot R_H$  для нескольких световых потоков  $\Phi$ .
6. Рассчитать по световой характеристике  $I_{кз}=f(\Phi)$  интегральную чувствительность фотодиода  $K_\Sigma = \frac{\partial I_{кз}}{\partial\Phi}$ .

#### 4.5 .Отчёт

Отчёт должен содержать:

1. Паспортные данные и эскиз конструкции исследованного фотодиода.
2. Схемы испытания фотодиода.
3. Семейство вольтамперных характеристик фотодиода  $I_{\Phi}=f(U_{\Phi})$  при работе фотодиода в фотодиодном режиме при различных световых потоках  $\Phi$ .
4. Снять семейство световых характеристик фотодиода  $I=f(\Phi)$  при нескольких значениях напряжения  $U_{\Phi}$ .
5. Поместив фотодиод в термостат, снять зависимость темнового тока  $I_T$  от температуры  $\Theta$ , при заданном напряжении  $U_{\Phi}$ ,  $I_T=f(\Theta)$ .
6. Собрать схему испытания диода в вентильном режиме (рис. 4.1. 7).
7. Снять семейство характеристик зависимости фототока  $I_{\Phi}$  от величины нагрузочного сопротивления  $R_H$  при работе фотодиода в вентильном режиме при нескольких световых потоках  $\Phi$ ,  $I_{\Phi}=f(R_H)$ .
8. Снять семейство световых характеристик фотодиода в вентильном режиме  $I=f(\Phi)$ , при различных сопротивлениях нагрузки  $R_H$ .
9. Собрать схему для измерения тока короткого замыкания фотодиода  $I_{кз}$  в вентильном режиме (рис. 4.1.8, см. методические указания).
10. Снять световую характеристику в вентильном режиме  $I_{кз}=f(\Phi)$ , которую построить на том же графике, что и кривые п. 9 этого раздела.
11. Собрать схему для измерения ЭДС. холостого хода фотодиода  $U_{xx}$  в вентильном режиме (рис. 4.1.9, см. методические указания).
12. Измерить ЭДС. холостого хода фотодиода  $U_{xx}$  при нескольких световых потоках  $\Phi$  в вентильном режиме.

#### 4.6. Вопросы для подготовки

1. Назовите возможные режимы работы фотодиодов и их особенности.
2. Начертите принципиальные схемы устройства фотодиодов.
3. Расскажите об образовании фотоЭДС при освещении  $p-n$ -перехода.
4. Чем ограничена максимальная фотоЭДС фотодиода, работающего в вентильном режиме?
5. Нарисуйте вольтамперные характеристики фотодиода в фотодиодном режиме.
6. Нарисуйте световые характеристики фотодиода в фотодиодном режиме.
7. Нарисуйте характеристики фотодиода в вентильном режиме для нескольких световых потоков. Укажите на характеристиках режимы холостого хода и короткого замыкания.

8. Чем объяснить зависимость интегральной чувствительности фотодиода, работающего в фотодиодном режиме, от напряжения питания?
9. Чем объяснить сильную зависимость темнового тока от температуры окружающей среды у фотодиодов?
10. Чем объяснить различия в спектральных характеристиках германиевых и кремниевых фотодиодов?
11. Какими физическими явлениями можно объяснить уменьшение фототока с ростом частоты модуляции светового потока?
12. Какими методами можно улучшить частотные свойства фотодиода?
13. Что такое порог чувствительности фотодиода, и какими физическими процессами он определяется?
14. Что такое световой эквивалент шума?
15. Какой режим работы фотодиода предпочтительнее при регулировании предварительно малых световых потоков, фотодиодный или вентильный, и почему?
16. Расскажите о технологии изготовления фотодиодов
17. Расскажите о применениях фотодиодов.

### **Список литературы**

1. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов.- М.: Радио и связь, 1990.-264 с.: ил.
2. Гурлев Д.С. Справочник по электронным приборам.- 6-е изд., перераб. и доп.-Киев: Техніка, 1979.-464 с.: ил.
3. Дулин В.Н. Электронные приборы: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Радиотехника».- 3-е изд., перераб. и доп.- М.: Энергия, 1977.– 424 с.: ил.
4. Морозова И.Г. Физика электронных приборов: Учебник для ВУЗов.-М.: Атомиздат, 1980.- 392 с.
5. Волощенко Ю.И., Мартюшев Ю.Ю., Никитина И.Н. и др. Основы радиоэлектроники: Учебное пособие / Под ред. Г.Д. Петрухина. – М.: Изд-во МАИ, 1993.–416 с.: ил.
6. Рывкин С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках.- М.: Физматгиз, 1963.
7. Федотов Я.А. Основы физики полупроводниковых приборов.- М.: Советское радио, 1963.- § 4-12.

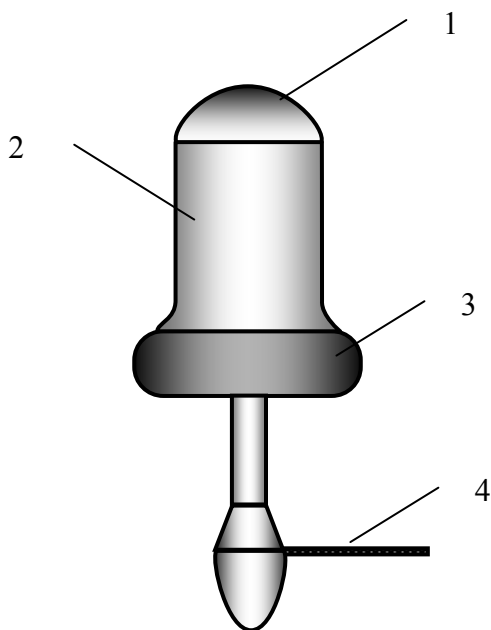
## 4.7. Приложение

В данной лабораторной работе используется германиевый фотодиод ФД-1, который имеет герметичный металлический корпус с ленточным выводом и прозрачным окном.

### *Технические характеристики фотодиода:*

|                               |                                       |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| вес                           | – 0,9 гр;                             |
| интервал рабочих температур   | – $5\div 40^{\circ}\text{C}$ ;        |
| выдерживаемая температура     | – от $-40$ до $+40^{\circ}\text{C}$ ; |
| допустимая влажность воздуха  | – $95\pm 3\%$ ;                       |
| рабочее положение             | – любое;                              |
| срок службы                   | – не менее 500 час;                   |
| темновой ток                  | – 15 мкА;                             |
| рабочее напряжение            | – 10 В;                               |
| интегральная чувствительность | – 10 мкА/лм.                          |

Внешний вид фотодиода представлен на рисунке.



1 – стеклянное окошечко для  
освещения фотодиода;  
2 – герметичный корпус;  
3,4 – контакты.

Контакт 3 есть сам корпус.



## 5. Лабораторная работа ФП 5

### ВАРИСТОРЫ

**Цель работы:** Ознакомиться с принципом действия, характеристиками и параметрами нелинейных полупроводниковых сопротивлений (симметричных варисторов), изучить зависимость их работы от температуры. Снять ВАХ варистора. Определить температурный коэффициент сопротивления варистора.

#### 5.1. Краткая теория

Варистор – это полупроводниковый резистор, сопротивление которого зависит от приложенного напряжения. Варисторы изготовляют методом керамической технологии, т. е. путем высокотемпературного обжига заготовок из порошкообразного карбида кремния со связкой, в качестве которой обычно используют глину. Чаще всего варисторы имеют форму стержней или дисков с электродами, на противоположных концах или поверхностях к которым припаяны выводы для присоединения к схеме.

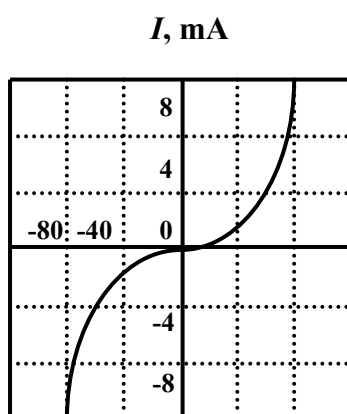


Рис. 5.1.1. ВАХ варистора

Нелинейность ВАХ варисторов (рис. 5.1.1) обусловлена явлениями на точечных контактах между кристаллами карбида кремния. При малых напряжениях на варисторе может происходить туннелирование электронов сквозь тонкие потенциальные барьеры, существующие на поверхности кристаллов карбида кремния.

При больших напряжениях на варисторе и соответственно при больших токах, проходящих через него, плотность тока в точечных контактах оказывается очень большой. Все напряжение, приложенное к варистору, падает на точечных контактах. Разогрев точечных контактов приводит

к уменьшению их сопротивления и нелинейности ВАХ.

Сопротивление точечных контактов определяется сопротивлением растекания, т.е. сопротивлением малых активных областей полупроводника под точечными контактами. Из-за малости активных областей их разогрев практически не приводит к повышению температуры всего варистора. Кроме того, малые объемы активных областей обеспечивают малую инерционность тепловых процессов – разогрев и охлаждение этих областей. Теоретические расчеты показывают, что тепловая постоянная времени активных областей может составлять  $10^{-6} - 10^{-8}$  с.

Считая разогрев активных областей под точечными контактами одним из основных процессов, приводящих к нелинейности ВАХ, можно получить ряд важнейших зависимостей и характеристик варисторов.

Температурная зависимость удельной проводимости полупроводников  $\gamma$  соответствует уравнение

$$\gamma = \gamma_{\infty} \cdot \exp(-B/T). \quad (5.1.1)$$

Сопротивление растекания двух контактирующих кристаллов

$$R \approx 2/\pi d\gamma = (2/\pi d\gamma) \exp(B/T), \quad (5.1.2)$$

где  $d$  – диаметр точечного контакта,  $B$  – коэффициент температурной чувствительности поверхностных слоев кристаллов карбида кремния. Тогда статическое сопротивление варистора, состоящего из  $a$  параллельно включенных цепочек, имеющих  $b$  последовательно включенных контактирующих кристаллов,

$$R = \frac{b}{a} R_{\text{кон.}} = \frac{2b}{a\pi\gamma_{\infty}} \exp \frac{B}{T}. \quad (5.1.3)$$

Уравнение теплового баланса для активных областей варистора имеет вид:

$$U^2/R = I^2 R = H(T - T_0), \quad (5.1.4)$$

где  $H$  – коэффициент рассеяния активных областей,  $T$  – температура активных областей,  $T_0$  – температура среды, окружающей активные области.

Из (5.1.3) и (5.1.4) можно получить уравнения ВАХ варисторов в параметрической форме:

$$U = \sqrt{\frac{2Hb(T - T_0)}{ad\pi\gamma_{\infty}} \exp \frac{B}{T}}, \quad (5.1.5)$$

$$I = \sqrt{\frac{ad\pi\gamma_{\infty}H(T - T_0)}{2b}} \exp\left(-\frac{B}{T}\right). \quad (5.1.6)$$

Используя уравнения (5.1.5) и (5.1.6), можно выяснить некоторые требования, предъявляемые к исходному материалу для изготовления варисторов с заданными свойствами, и установить связь между различными параметрами варисторов.

## 5.2. Характеристики варисторов

*Коэффициент нелинейности варистора* – это отношение статического  $R_C$  и дифференциального  $R_D$  сопротивлений при заданном постоянном напряжении на варисторе.

$$\beta = \frac{R_C}{R_D} = \frac{U}{I} \cdot \frac{dI}{dU} = \frac{U}{I} \cdot S. \quad (5.2.1.)$$

Из (5.1.5) и (5.1.6) дифференциальное сопротивление варистора:

$$R_{д} = \frac{dU}{dI} \frac{dU}{dT} \bigg/ \frac{dI}{dT} = \frac{2b}{ad\pi\gamma_{\infty}} \frac{T^2 - BT + BT_0}{T^2 + BT - BT_0} \cdot \exp\left(\frac{B}{T}\right) \quad (5.2.2)$$

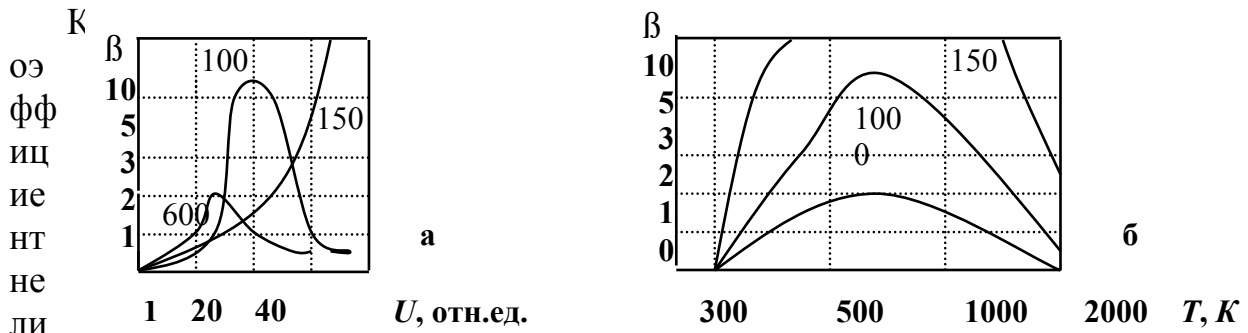


Рис.5.2.1. Расчетные зависимости коэффициента нелинейности  $\beta$ :  
а - от напряжения, б - от температуры активной области варистора:

$$\beta = \frac{R}{R_{д}} = \frac{T^2 + BT - BT_0}{T^2 - BT + BT_0} \quad (5.2.3.)$$

На рис. 5.2.1 показаны расчетные зависимости коэффициента нелинейности от напряжения и температуры активных областей варисторов из материалов с различными коэффициентами температурной чувствительности  $B$  поверхностных слоев кристаллов.

Максимальное значение коэффициента нелинейности

$$\beta_{\text{макс.}} = (4T + B)/(4T - B) \quad (5.2.4)$$

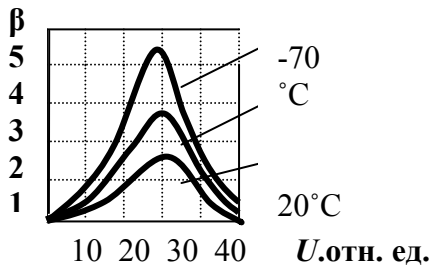


Рис. 5.2.2. Расчетная зависимость коэффициента температурной нелинейности варистора от напряжения при различных температурах ( $B=600$  К)

откуда следует, что при  $\beta < 4B$  имеет место нелинейная ВАХ с положительным коэффициентом нелинейности, а при  $\beta > 4B$  у варистора наблюдается отрицательное дифференциальное сопротивление и отрицательный коэффициент нелинейности.

Температура активных областей варистора может превышать температуру окружающей среды на несколько сотен градусов.

Коэффициент нелинейности варисторов меньше 6, что ограничивает возможные применения варисторов.

Увеличение температуры окружающей среды должно привести к уменьшению коэффициента нелинейности  $\beta$  и незначительному сдвигу максимума кривой  $\beta = f(U)$  по напряжению (рис. 5.2.2).

**Вольтамперная характеристика варистора.** Если варистор работает в узком диапазоне изменений напряжений и токов, то коэффициент нелинейности в этом диапазоне можно считать постоянным:

$$\beta = \frac{U}{I} \cdot \frac{dI}{dU} = \text{const}.$$

Тогда  $\int \frac{dI}{I} = \beta \int \frac{dU}{U}$ ;  $\ln I = \beta \ln U + \ln B$ , и ВАХ варистора будет соответствовать уравнению:  $I = BU^\beta$ , где  $B$  – коэффициент, значение которого зависит от типа варистора и от температуры.

**Частотные свойства варисторов** могут определяться либо инерционностью процессов, приводящих к нелинейности ВАХ, либо собственной емкостью варистора. Инерционность разогрева и охлаждения активных областей под точечными контактами мала. Поэтому частотные свойства варисторов определяются временем перезаряда их собственной емкости.

### 5.3. Схемы для исследования варисторов

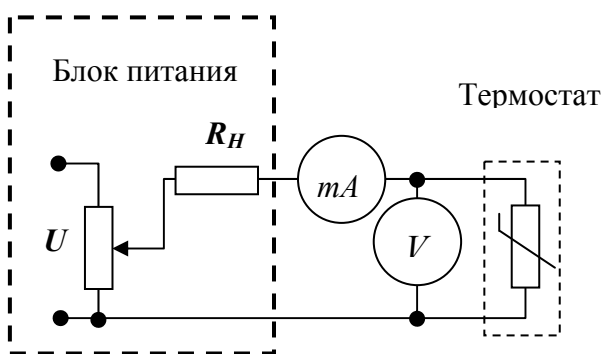


Рис. 5.3.1. Схема для снятия характеристик варисторов

Схема на рис. 5.3.1 позволяет снять вольтамперные  $I = f(U)$  и ампер-температурные характеристики варисторов  $I = f(\theta)$ . Величина напряжения источника питания  $U$  и сопротивление нагрузки  $R_H$  выбираются в зависимости от типа исследуемого варистора.

При исследовании температурных зависимостей варистор помещается в термостат.

### 5.4. Задания

1. Записать паспортные данные исследуемых в работе варисторов.
2. Собрать схему для снятия характеристик варисторов (рис 5.3.1).
3. Снять вольтамперную характеристику варистора  $I = f(U)$  при комнатной температуре. Необходимо следить за однозначностью и воспроизводимостью показаний миллиамперметра (см. рис. 5.3.1). Разные значения  $I$  при одинаковом  $U$  могут получаться при перегреве варисторов (термисторный эффект), которого не следует допускать.
4. Поместив варистор в термостат, снять зависимость тока варистора от температуры,  $I = f(\theta)$ , поддерживая напряжение  $U$  на варисторе постоянным.

### 5.5 Обработка результатов измерений

1. Подсчитать статическое сопротивление варистора  $R_C$  по формуле  $R_C = U/I$  при заданном значении приложенного напряжения.
2. Подсчитать дифференциальное сопротивление варистора по формуле  $R_D = dU/dI$  при заданном значении напряжения, а также крутизну вольтамперной характеристики  $S = dI/dU$ .
3. Подсчитать коэффициент нелинейности варистора  $\beta$  по формуле:
$$\beta = R / R_{\delta} = S (U/I).$$
4. Построить график зависимости коэффициента нелинейности  $\beta$  от приложенного к варистору напряжения  $\beta = f(U)$ .
5. Определить постоянную  $B$  в уравнении, описывающем вольтамперную характеристику варистора  $I = BU^{\beta}$ , для заданного значения приложенного напряжения.
6. Построить график зависимости постоянной  $B$  от приложенного к варистору напряжения  $B = f(U)$ .
7. Построить характеристики зависимостей сопротивлений варистора  $R_C$  и  $R_D$  от температуры:  $R_C = f(\theta)$  и  $R_D = f(\theta)$ .
8. Подсчитать температурный коэффициент сопротивления варистора  $k$  по формуле:  $k = \frac{1}{R} \frac{dR}{d\theta}$ .

### 5.6. Отчет

Отчет должен содержать:

1. Паспортные данные исследуемых варисторов.
2. Схемы испытаний варисторов.
3. Вольтамперные характеристики варисторов, снятые при комнатной, а также при повышенных температурах.
4. Расчет статического  $R_C$  и динамического  $R_D$  сопротивлений варистора, а также крутизны характеристики  $S$ .
5. Расчет коэффициента нелинейности варистора  $\beta$ .
6. Расчет постоянной  $B$  уравнения варистора  $I = BU^{\beta}$ .
7. Графики зависимостей  $\beta$  и  $B$  от приложенного к варистору напряжения,  $\beta = f(U)$  и  $B = f(U)$ .
8. График зависимости тока варистора от температуры,  $I = f(\theta)$ , при постоянном напряжении  $U$ .
9. Характеристики зависимостей сопротивлений варистора  $R_C$  и  $R_D$  от температуры,  $R_C = f(\theta)$  и  $R_D = f(\theta)$ .
10. Расчет температурного коэффициента сопротивления варистора  $k$ .

### 5.7. Вопросы для подготовки

1. Расскажите о принципе действия варисторов, их отличии от термисторов.
2. Что такое несимметричные варисторы?
3. Какие материалы используют для изготовления симметричных варисторов?

4. Начертите основные характеристики варисторов.
5. Чем вызвана нелинейность вольтамперной характеристики варистора?
6. Какой формулой можно описать ВАХ симметричного варистора?
7. Назовите основные параметры варисторов.
8. Как зависит сопротивление  $R_C$  варистора от температуры?
9. Что такое коэффициент нелинейности сопротивления варистора  $\beta$ ?
10. Каковы значения  $\beta$  у промышленных образцов варисторов?
11. Начертите график зависимости коэффициента нелинейности  $\beta$  от приложенного к варистору напряжения.
12. Начертите семейство вольтамперных характеристик варистора для разных температур. Как изменяется крутизна характеристики варистора  $S$  при повышении температуры?
13. Начертите график зависимости тока варистора от температуры при постоянном напряжении на варисторе.
14. Что такое температурный коэффициент сопротивления варистора  $k$  и как он определяется?
15. При каких  $\beta$  и  $k$  варисторы обладают лучшими свойствами?
16. Каковы конструктивное оформление, маркировка симметричных варисторов?
17. Можно ли использовать симметричные варисторы в маломощных стабилизаторах напряжения?
18. Расскажите о возможных применениях варисторов в области автоматики, счетно-решающей техники, связи, приборостроения и электроники.

### *Список литературы*

1. Гапонов В.И. Электроника. Т. II.-М.: Физматгиз, 1960.
2. Герасимов В.Г. Основы промышленной электроники.- М.: 1988.
3. Жеребцов И.П. Основы электроники.-Л.:Энергоатомиздат.Ленингр.отд., 1990.
4. Лавриненко В.Ю. Справочник по полупроводниковым приборам.-Киев, Техніка, 1964.- Гл.3.
5. Некрасов М.М. Микроминиатюризация и микроэлектроника на нелинейных сопротивлениях.- М.: Советское радио, 1965.
6. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: Учебное пособие.- 8-е изд., испр.-СПб.: Изд-во «Лань», 2006.- 480 с.
7. Тугов Н.М. Полупроводниковые приборы.- М.: Энергоатомиздат, 1990.
8. Удалов Н.П. Полупроводниковые датчики.- М.: Энергия, 1965.
9. Шайв Дж.Н. Физические свойства и конструкции полупроводниковых приборов.- М.: Госэнергоиздат, 1963.

Тыщенко Александр Петрович

**Физика полупроводников  
и полупроводниковых приборов  
часть I**

*Методические указания по выполнению  
лабораторных работ для студентов  
специальности 010701*

Редактор Е.А.Устюгова

---

|                    |                     |                  |
|--------------------|---------------------|------------------|
| Подписано в печать | Формат 60 × 84 1/16 | Бумага тип. № 1  |
| Плоская печать     | Усл. печ. лист. 2,5 | Уч.- изд. л. 2,5 |
| Заказ              | Тираж 75            | Цена свободная   |

---

РИЦ Курганского государственного университета.  
640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25.  
Курганский государственный университет.