

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет»

Кафедра радиоэлектронных устройств и систем

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам № 3-6

по дисциплине «Физические основы микро- и нанозлектроники» по направлениям 211000.62

«Конструирование и технология электронных средств»(профиль «Проектирование и технология радиоэлектронных средств»), 210400.62

«Радиотехника»(профиль «Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов») и специальности 210601.65 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения



Воронеж 2014

Составитель канд. физ.-мат. наук А.С. Бадаев

УДК 539.2.21.(07)

Методические указания к лабораторным работам № 3-6 по дисциплине «Физические основы микро- и наноэлектроники» по направлениям 211000.62 «Конструирование и технология электронных средств»(профиль «Проектирование и технология радиоэлектронных средств»), 210400.62 «Радиотехника»(профиль «Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов») и специальности 210601.65 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения / ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет»; сост. А.С. Бадаев. Воронеж, 2014. 49 с.

В методических указаниях изучаются характеристики полупроводниковых диодов, физические процессы в контакте металл-полупроводник, вольт-амперные характеристики и основные параметры стабилитронов и тиристоров.

Методические указания предназначены для студентов 2 курса очной формы обучения.

Ил. 22. Библиогр.: 4 назв.

Рецензент д-р физ.-мат. наук, проф. В.И. Митрохин

Ответственный за выпуск зав. кафедрой д-р физ.-мат. наук, проф. Ю.С. Балашов

Печатается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2014

2. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

2.1. Задание № 1

Ознакомиться с классификацией, методами изготовления и устройством полупроводниковых диодов.

Методические указания по выполнению задания

Изучить материал /1, с. 80 – 83/.

Полупроводниковый диод – это прибор с одним *p-n*-переходом и двумя выводами. Различные типы диодов различаются по следующим признакам:

а) по применяемым полупроводниковым материалам (германиевые, кремниевые, на основе арсенида галлия и др.);

б) по структуре перехода (точечные и плоскостные);

в) по технологии изготовления (сплавные, диффузионные, эпитаксиальные и др.);

г) по функциональному назначению (выпрямительные, детекторные, импульсные и т.д.);

д) по частотному диапазону (низкочастотные, высокочастотные и сверхвысокочастотные);

е) по мощности рассеяния (маломощные, средней мощности и мощные);

ж) по конструктивному оформлению (стеклянные, металлические, металлокерамические, пластмассовые).

В *точечных диодах p-n*-переход образуется точечно-контактным способом. Например, к пластине германия с электропроводностью *n*-типа, напаянной с помощью олова на кристаллодержатель, подводят и прижимают заостренную иглу из бериллиевой бронзы.

Диаметр острия порядка 20 – 50 мкм. В месте соприкосновения иглы с полупроводником образуется выпрямляющий переход. Для улучшения его свойств через контакт иглы с германием пропускают мощные короткие импульсы тока, при этом конец иглы сплавляется с полупроводником, обеспечивая стабильность и механическую прочность контакта. На конец иглы перед прижатием наносят индий или алюминий, которые являются акцепторными примесями. При повышенных температурах примесь диффундирует внутрь германия, образуя под контактной иглой полусферическую область p -типа, таким образом формируется p - n -переход. Точечные диоды имеют очень маленькую емкость, так как площадь p - n -перехода небольшая, поэтому их используют главным образом при изготовлении диодов высокой и сверхвысокой частоты.

В *плоскостных диодах*, у которых линейные размеры перехода значительно больше толщины, p - n -переходы получают методами сплавления, диффузии, эпитаксии.

Сплавные диоды получают вплавлением примеси в монокристалл полупроводника. Например, небольшая таблетка алюминия помещается на поверхность кристалла кремния n -типа, и все нагревается до температуры несколько ниже температуры плавления алюминия, но достаточной для образования расплава Al – Si (порядка 580 °С). При остывании на границе расплава кристаллизуется тонкий слой кремния, сильно легированный алюминием, т.е. слой с проводимостью p -типа на кристалле n -типа.

Сплавные p - n -переходы получают несимметричными, т.е. $p \gg n$, поэтому у такого диода дырочная составляющая тока диффузии значительно больше электронной составляющей:

$$I_{\text{диф}} = I_p + I_n \approx I_p$$

Область перехода с большой концентрацией основных носителей заряда называют *эмиттером*, а область с

меньшей концентрацией основных носителей, в которую инжектируются неосновные носители для этой области - *базой*. Сплавные резкие переходы имеют значительно бóльшую площадь, чем точечные, соответственно их емкость много больше. Большая площадь *p-n*-перехода сплавных диодов позволяет им работать при больших прямых токах, но на низких частотах.

При изготовлении плоскостного *диффузионного* перехода применяют диффузию примесного вещества (донорного или акцепторного) в исходную полупроводниковую пластину *p*- или *n*-типа при температурах более 1000 °С. При этом концентрация примеси постепенно уменьшается с глубиной, поэтому *p-n*-переход получается плавным.

Планарные переходы получили свое название потому, что *p-n*-переходы диодных структур (и транзисторных) и контакты ко всем областям расположены на одной плоскости полупроводникового кристалла.

Методом *эпитаксии* можно получить плоскостной диод, наращивая кристаллический слой с донорной примесью на монокристаллическую пластину кремния *p*-типа из газовой фазы. Эпитаксиальные диоды обычно имеют малое падение напряжения в открытом состоянии и высокое пробивное напряжение.

На рис. 1 представлены структуры планарно-эпитаксиального (а) и сплавного (б) диодов. База и эмиттер образуют омические переходы (контакт) с электродами. К электродам подсоединены металлические выводы, посредством которых диод включается в цепь.

2.2. Задание № 2

Изучить ВАХ, зависимость ВАХ от температуры и материала полупроводника, основные параметры диодов.

Методические указания по выполнению работы

Ознакомиться с материалом /1, с. 83-85; 2, с. 93-105/.

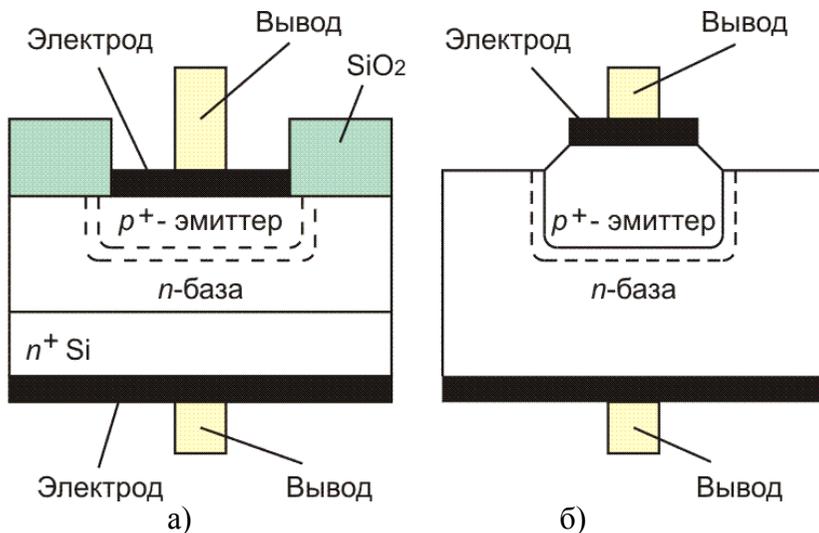


Рис. 1

Основной характеристикой полупроводниковых диодов является вольт-амперная характеристика (ВАХ). ВАХ представляет собой зависимость тока во внешней цепи $p-n$ перехода от значения и полярности прикладываемого к нему напряжения.

Для идеального $p-n$ перехода ВАХ описывается следующей зависимостью (пунктирная кривая на рис.2):

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right), \quad (1)$$

где I_0 – обратный (или тепловой) ток;

q – заряд электрона;

k – $1.38 \cdot 10^{-28}$ Дж/К;

T – температура.

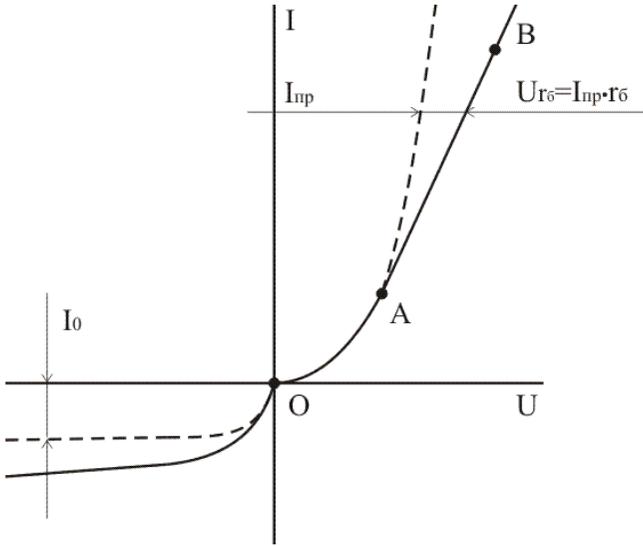


Рис. 2

В прямом смещении ВАХ ($U > 0$) реального диода (сплошная кривая на рис.2) близка к экспоненциальной только в начале зависимости - участок ОА, а далее рост тока при увеличении прямого напряжения замедляется и характеристика становится более полой - участок АВ. Этот участок характеристики называют омическим, поскольку здесь оказывает влияние объемное сопротивление базы r_b p - n перехода. Ток, протекая через r_b , создает падение напряжения:

$$U_{r_b} = I_{np} r_b . \quad (2)$$

При этом внешнее напряжение не полностью падает на p - n переходе, а распределяется между ним и слоем базы. С учетом этого уравнения реальная ВАХ принимает вид:

$$I = I_0 \left(\exp \left(\frac{U_{np} - r_{\bar{\sigma}} I_{np}}{\phi_T} \right) - 1 \right). \quad (3)$$

Таким образом, влияние объемного сопротивления базы на прямую ветвь ВАХ реального p - n перехода проявляется в виде смещения прямой ветви в сторону больших значений прямых напряжений. Поэтому, чем больше $r_{\bar{\sigma}}$, тем положе идет прямая ветвь ВАХ реального перехода. Как правило, p - n переходы с большими значениями $r_{\bar{\sigma}}$ выполняются для увеличения допустимого рабочего обратного напряжения на p - n переходе.

В области обратных напряжений можно пренебречь падением напряжения в объеме полупроводника, т.к. $r_{\bar{\sigma}}$ всегда много меньше сопротивления объемного заряда обратносмещенного перехода (за исключением области пробоя). Отличия реальной обратной ветви ВАХ ($U < 0$) p - n перехода от идеальной состоят в следующем: обратный ток реальной ВАХ растет при увеличении обратного напряжения p - n перехода и имеет значение, не равное I_0 . Данная зависимость приведена на рис.2 (сплошная кривая). Это объясняется тем, что в реальном p - n переходе обратный ток содержит несколько составляющих:

$$I_{обр} = I_0 + I_{mz} + I_y, \quad (4)$$

где I_{mz} – ток термогенерации в области p - n перехода;
 I_y – ток утечки.

Ток термогенерации I_{mz} вызван тепловой генерацией носителей внутри p - n перехода. Он увеличивается с ростом обратного напряжения, так как происходит расширение p - n перехода.

Ток утечки I_y возникает в местах выхода p - n перехода на поверхность. При современной технологии изготовления p - n перехода I_y имеет незначительную величину.

При увеличении температуры уменьшается контактная разность потенциалов, энергия основных носителей заряда возрастает, соответственно растет диффузионная составляющая тока и прямой ток увеличивается (рис. 3, $T_2 > T_1$). Иначе говоря, при большей температуре p - n -перехода тот же прямой ток достигается при меньшем смещении.

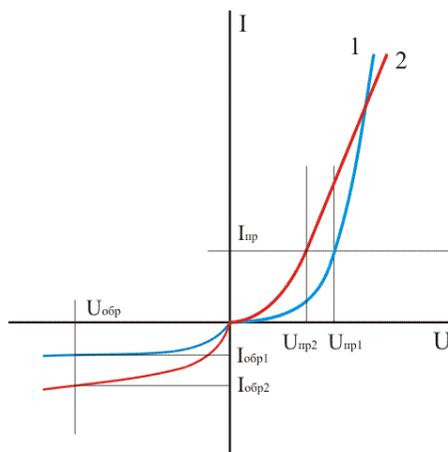


Рис. 3

Для оценки влияния температуры вводится **температурный коэффициент напряжения прямой ветви**, под которым понимается величина, показывающая, на сколько изменится прямое напряжение для получения одной и той же величины прямого тока при изменении температуры на 1 градус.

При больших прямых токах нельзя пренебречь сопротивлением базы, которое увеличением температуры растет из-за снижения подвижности свободных носителей заряда.

Таким образом, результирующая ВАХ диода при прямом смещении сложным образом зависит от T . При малых токах характеристика смещается с ростом T влево, а при больших токах (где влияние базы сильнее) – вправо.

С ростом температуры увеличивается скорость тепловой генерации электронно-дырочных пар во всех областях p - n перехода. Это приводит к резкому возрастанию с температурой концентрации неосновных носителей в n - и p -областях перехода и, следовательно, к увеличению тока насыщения (рис.3 при $U < 0$) и ухудшению выпрямляющих свойств диода.

Следует отметить, что при некоторой температуре концентрации основных носителей становится приблизительно равной концентрации неосновных носителей, и переход исчезает совсем.

Полупроводниковые диоды обычно характеризуются следующими основными параметрами (рис. 3):

1. Постоянный обратный ток $I_{обр}$ (мкА; мА) при некоторой величине постоянного обратного напряжения $U_{обр}$;
2. Постоянное прямое напряжение $U_{пр}$ при постоянном прямом токе $I_{пр}$ (мА; А).

При нормальной температуре у германиевых выпрямительных диодов пробивные напряжения лежат в пределах 100 – 400 В. У кремниевых диодов это напряжение может достигать 1000 – 1500 В. Падение прямого напряжения на кремниевом диоде при протекании через него номинального прямого тока составляет 0,8 – 1,5 В, а у германиевых диодов – 0,3 – 0,5 В.

Полупроводниковые диоды отличаются друг от друга материалом полупроводника. Наиболее часто в них используют германий или кремний. Вольт-амперные характеристики кремниевого и германиевого диодов представлены на рис. 4. Главная причина отличия ВАХ p - n переходов – это различное значение ширины запрещенной зоны полупроводниковых материалов. Чтобы появился прямой ток, необходимо уменьшить величину потенциального ба-

рьера. Для этого на p - n переход нужно подать прямое напряжение, близкое к значению контактной разности потенциалов φ_k . В p - n переходе на основе германия $\varphi_k = (0,3 \div 0,4)$ В, в p - n переходе на основе кремния $\varphi_k = (0,6 \div 0,8)$ В. Поэтому прямая ветвь ВАХ кремниевого p - n перехода относительно германиевого смещается вправо на $(0,3 \div 0,5)$ В.

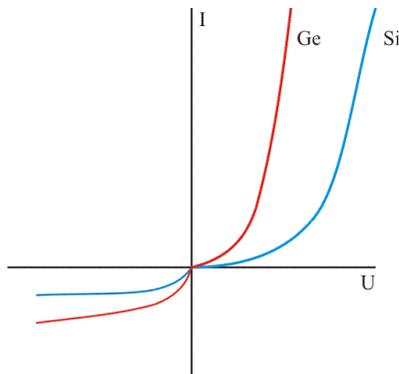


Рис. 4

Следует отметить, что **обратный ток кремниевых p - n переходов много меньше обратного тока германиевых p - n переходов.** Это связано с различием ширины запрещенной зоны: $\Delta W_{3_{Ge}} 0,72$ эВ; $\Delta W_{3_{Si}} 1,12$ эВ. Ток насыщения определяется в основном неосновными носителями заряда, имеющими место в примесном полупроводнике. Так, например, в полупроводнике n -типа это дырки $-p_n$, концентрация которых определяется в соответствии с законом действующих масс: $p_n = n_i^2 / n_n$. Известно, что $n_{i_{Ge}} \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$, а $n_{i_{Si}} \approx 10^{10} \text{ см}^{-3}$. При равной концентрации примеси получаем, что концентрация неосновных носителей заряда в кремниевом полупроводнике на шесть порядков меньше, чем в германиевом примесном полупроводни-

ке, поэтому ток I_0 в кремниевом p - n переходе пренебрежимо мал.

Обратный ток германиевого p - n перехода включает следующие составляющие: $I_{обр_{Ge}} \approx I_0 + I_y$, а обратный ток кремниевое p - n перехода - $I_{обр_{Si}} \approx I_{mz} + I_y$. Для германиевых p - n переходов обратный ток в основном определяется током насыщения и имеет величину десятки микроампер. Ток термогенерации у них мал и им обычно пренебрегают. Незначительный наклон обратной ветви ВАХ германиевых p - n переходов обусловлен током утечки.

Обратный ток кремниевое p - n перехода примерно на три - четыре порядка меньше обратного тока германиевого перехода и определяется током термогенерации, т.е дрейфовым током неосновных носителей, возникающих в результате тепловой генерации в самом p - n переходе. I_{mz} увеличивается с ростом обратного напряжения, так как происходит расширение p - n перехода. Ток термогенерации невелик из-за малого объема p - n перехода, ток утечки при современной технологии изготовления p - n перехода имеет незначительную величину. Отсюда в целом обратный ток кремниевое p - n перехода имеет небольшое значение, по сравнению с обратным током германиевых p - n переходов

При повышении температуры абсолютная величина изменения обратного тока в кремниевом диоде значительно меньше, чем в германиевом.

3. ВОПРОСЫ К ДОМАШНЕМУ ЗАДАНИЮ

1. Какой прибор называют полупроводниковым диодом?

2. Приведите классификацию диодов.

3. Каким методом изготавливают точечные диоды?

Приведите схему.

4. Какими методами получают плоскостные диоды?

Приведите схему получения сплавного диода.

5. Какова схема изготовления планарных $p-n$ -переходов?

6. Какие переходы называют плавными и резкими, симметричными и несимметричными?

7. Какая область $p-n$ -перехода называется эмиттером, а какая – базой?

8. Какие диоды называются выпрямительными? Где они применяются?

9. Нарисуйте вольт-амперную характеристику выпрямительного диода и покажите на ней основные параметры диода.

10. Чем отличается ВАХ кремниевого выпрямительного диода от германиевого?

11. Как влияет температура на ВАХ и основные параметры выпрямительных диодов?

4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

4.1. Задание № 1

Используя комплекс МУК-ФОЭ1, собрать установку по соответствующей схеме прямого, а затем обратного включения диода, указанной на рабочем месте.

Требуемое оборудование, входящее в состав модульного учебного комплекса МУК-ФОЭ1:

- | | |
|---|-------|
| 1. Блок амперметра-вольтметра АВ1 | 1 шт. |
| 2. Блок генератора напряжения ГНЗ | 1 шт. |
| 3. Стенд с объектами исследования СЗ-ТТ02 | 1 шт. |
| 4. Соединительные провода с наконечниками Ш4-Ш1.6 | 6 шт. |

ВАХ при прямом включении диода имеет большую крутизну: при малом изменении прямого напряжения ток диода изменяется резко. Для экспериментального исследования ВАХ в этом случае проще и точнее устанавливать

величину тока, а напряжение, полученное на диоде, измерять. Для этого в качестве источника необходимо применять «генератор тока» (рис. 5а), входящий в состав генератора напряжений ГНЗ.

ВАХ при обратном включении диода: даже при больших изменениях напряжения ток изменяется незначительно. В этом случае предпочтительнее использовать «генератор напряжений» для установки напряжения на диоде, а ток диода измерять (рис. 5б).

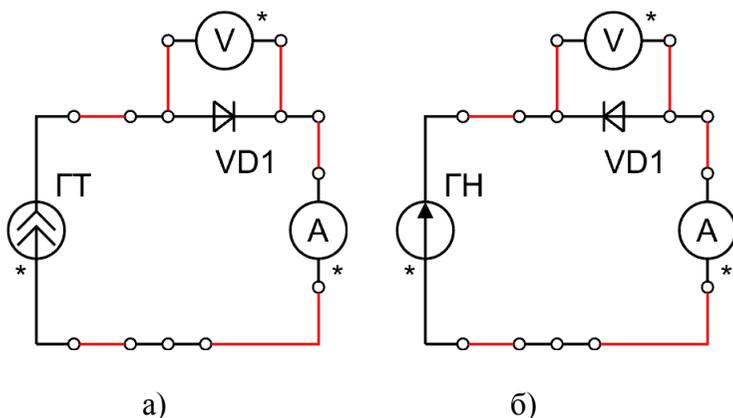


Рис. 5

4.2. Задание № 2

Получить данные для построения прямой ветви ВАХ германиевого диода, задаваясь разными значениями прямого тока на ГТ и измеряя соответствующие значения прямого напряжения на диоде. Измерения проводить при различных значениях температуры. Рекомендуемые значения 300К, 360К, 390К.

Подключить к измерительному комплексу германиевый диод VD1, установленный в стенде СЗ-ТТ02-2, температуру устанавливать ручкой регулятора температуры (работа № 1, рис. 6). Для быстрого охлаждения воспользуйтесь вентилятором, установленным в стенде.

4.3. Задание № 3

Получить данные для построения обратной ветви ВАХ германиевого диода, задаваясь разными значениями обратного напряжения на ГН и измеряя соответствующие значения обратного тока диода. Измерения проводить при различных значениях температуры. Рекомендуемые значения 300К, 360К, 390К.

Построить графики ВАХ для прямой и обратной ветвей. Определить $I_{обр}$, U_{np} (рис. 3), рассчитать ТКН прямой ветви по формуле (5) (рис. 3).

$$TKH = \frac{U_{np1} - U_{np2}}{T_2 - T_1} \quad (5)$$

4.4. Задание № 4

Подключить к измерительному комплексу кремниевый диод VD2, установленный в стенде СЗ-ТТ02-2. Выполнить п. 4.2, 4.3 для кремниевого диода.

5. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет оформляется в виде пояснительной записки на листах формата А4 (210 × 297 мм). Необходимо дома подготовить заготовку отчета по всей работе. Заготовка отчета должна содержать номер, цель и содержание работы, все пункты домашних заданий и результаты их выполнения, все пункты лабораторных заданий и свободные места для их выполнения. Дополнительно в отчете необходимо сделать выводы по результатам проделанной работы. Рисунки и графики выполнять на отдельных листах формата А4, на которых, если позволяет место, может быть размещено по несколько рисунков. Рисунки вкладывать в отчет после

первой ссылки по тексту. Титульный лист выполняется по ГОСТ 7.4-78 в виде обложки, в которую вкладывается отчет.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ

1. Привести схему лабораторной установки. Объяснить методику проведения измерений и расчетов.

2. Укажите на ВАХ диодов прямую и обратную ветвь. Почему ток в прямом включении больше обратного?

3. Как определяется $I_{обр}$ и $U_{пр}$?

4. Что такое ТКН прямой ветви, как он определяется?

5. Почему с увеличением температуры увеличивается прямой и обратный ток?

6. Как изменяется напряжение пробоя при повышении температуры у кремниевых и германиевых диодов?

7. Приведите значения пробивных напряжений и падения прямых напряжений кремниевых и германиевых выпрямительных диодов.

8. В чём причина отличия ВАХ кремниевых и германиевых диодов?

9. Почему $I_{обр}$ кремниевых диодов значительно меньше $I_{обр}$ германиевых?

10. Укажите области применения полупроводниковых диодов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бадаев А.С. Физические основы полупроводников и микроэлектронной техники [Текст] : учеб. пособие / А.С. Бадаев. – Воронеж: ГОУ ВПО ВГТУ, 2009 – 148 с.

2. Чернышов А.В. Радиоматериалы. Ч.2: Проводниковые, полупроводниковые и магнитные материалы [Текст] :

учеб. пособие / А.В. Чернышов, А.С. Бадаев. – Воронеж: ГОУ ВПО ВГТУ, 2008. – 235 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ: КОНТАКТ МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИК

1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

1.1. Цель работы

Изучение физических процессов, протекающих в контакте металл-полупроводник.

1.2. Содержание работы

Основным содержанием работы является: теоретическое изучение явлений в контакте металл-полупроводник; экспериментальное исследование и анализ вольт-амперной характеристики (ВАХ), изучение влияния температуры на величину прямого напряжения и обратного тока перехода металл-полупроводник.

Обучение осуществляется в процессе выполнения домашних и лабораторных заданий. Контроль усвоения полученных студентами знаний и навыков производится при собеседовании путем оценки ответов на контрольные вопросы, а также при выполнении лабораторной работы.

Время выполнения домашних заданий 3 ч. Общее время на выполнение лабораторных заданий, включая собеседование и отчет по лабораторной работе 4 ч.

1.3. Указания по технике безопасности

В процессе работы необходимо соблюдать общие правила техники безопасности при работе с электроустановками напряжением до 1000 В.

2. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

2.1. Задание №1

Изучить физические явления, возникающие в контакте металл-полупроводник.

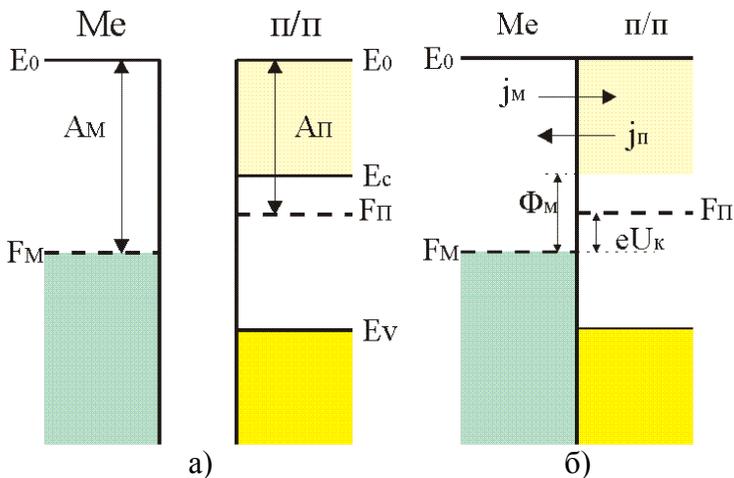
Методические указания по выполнению задания

Для выполнения задания следует изучить материал /1, с. 100-103; 2, с. 152-156/.

Рассмотрим явления в контакте металл – полупроводник при отсутствии поверхностных состояний. Возьмем контакт электронного полупроводника (n -типа) и металла в предположении, что работа выхода электрона из полупроводника $A_{п}$ меньше работы выхода электрона из металла $A_{м}$, то есть $A_{п} < A_{м}$.

На рисунке 1а показана зонная энергетическая диаграмма металла (Me) и полупроводника (п/п) не находящиеся в контакте друг с другом. Термодинамическая работа выхода – это расстояние от уровня вакуума E_0 до уровня Ферми в металле $A_{м}$ или в полупроводнике $A_{п}$.

Если обеспечить идеальный контакт металла и полупроводника (т.е. такой контакт, при котором отсутствует



в)
Рис. 1

вакуумный или диэлектрический слой между Me и п/п), то электроны будут переходить преимущественно из полупроводника в металл (так как уровень Ферми в полупроводнике в момент соединения с металлом лежит выше, чем в металле, $F_{\Pi} > F_M$) (рис.1б). При этом металл заряжается отрицательно, а в полупроводнике возникнет положительный заряд, создаваемый нескомпенсированными донорами,

которые получены при уходе электронов проводимости в металл. Этот поток электронов будет иметь место до тех пор, пока уровни Ферми $F_{\text{П}}$ и $F_{\text{М}}$ не выровняются, после чего установится динамическое равновесие (токи $j_{\text{П}}$ и $j_{\text{М}}$ будут равны друг другу). Между металлом и полупроводником возникает контактная разность потенциалов.

$$U_{\kappa} = \frac{A_{\text{М}} - A_{\text{П}}}{e} \quad (1)$$

Заряд на поверхности металла будет находиться в пределах длины экранирования Томсана-Ферма, которая примерно равна 0.05 нм. Т.к. концентрация доноров на несколько порядков меньше концентрации электронов в металле, то нескомпенсированные доноры займут значительный по толщине слой полупроводника L , сравнимый с шириной обедненной области р-п перехода, и энергетические зоны в полупроводнике изогнутся вверх (рис. 1в)

Наличие потенциального барьера на границе металл – полупроводник приводит к тому, что возможно явление выпрямления переменного тока, а ВАХ для постоянного тока будет несимметричной.

За положительное напряжение U примем такое напряжение, когда металл имеет положительный потенциал относительно полупроводника. Так как в области объемного заряда L (в приконтактной области полупроводника) свободных электронов практически нет, то удельное сопротивление этой области очень велико и все внешнее напряжение будет падать здесь. При $U > 0$ все уровни в полупроводнике сдвинутся вверх на величину eU , рис. 2а. Переход электронов из полупроводника в металл облегчится, высота барьера со стороны полупроводника уменьшится, а со стороны металла высота барьера останется той же самой $\Phi_{\text{М}}$. Результирующий поток электронов направлен от полупроводника к металлу и увеличивается с ростом напря-

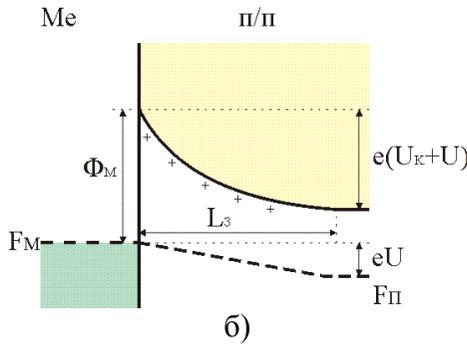
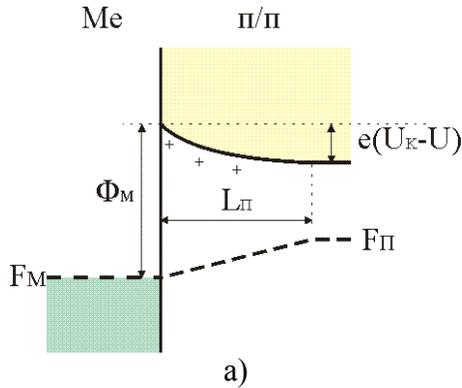


Рис. 2

жения. При этом ширина обедненной области L_{II} уменьшится.

При $U < 0$ все уровни в полупроводнике сдвинутся вниз на величину eU , рис.2б, и высота потенциального барьера со стороны полупроводника увеличится, а со стороны металла вновь не изменится. Вследствие этого поток электронов j_{II} со стороны полупроводника уменьшится, и при увеличении U этот поток станет очень мал. Поэтому через барьер будет проходить только постоянный поток электронов из металла и результирующий поток будет идти из металла в полупроводник. При этом ширина обедненной области L_3 увеличится.

Процесс протекания тока через выпрямляющий контакт существенно зависит от того, испытывают ли электроны соударения при прохождении через запирающий слой или нет. Первый случай реализуется тогда, когда длина свободного пробега l электрона меньше толщины запирающего слоя d , а второй при обратном соотношении. В соответствии с этим существует две теории выпрямления: диффузионная ($l \ll d$) и диодная ($l \gg d$). На рис. 3 показаны ВАХ, полученные согласно диодной (кривая 1) и диффузионной (кривая 2) теории.

В обоих случаях в прямом смещении ток через диод определяется экспоненциальным членом: $I \sim \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right)$.

При обратном смещении экспоненциальный член становится мал по сравнению с единицей, и при больших значениях напряжения в толстом слое ток растет пропорционально $U^{\frac{1}{2}}$, а в тонком стремиться к насыщению.

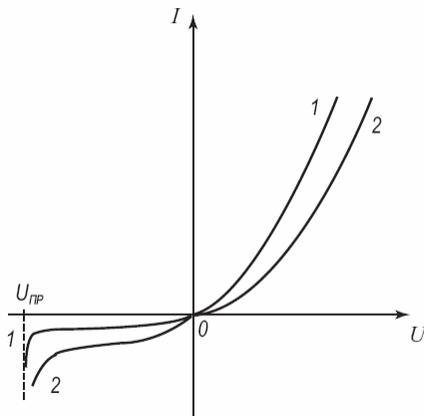


Рис. 3

Для большинства реальных контактов идеальная ситуация, рассмотренная ранее, никогда не достигается. Это связано с тем, что поверхность полупроводника всегда мо-

жет содержать тонкий диэлектрический слой окисла, молекулы воды, ионы различных веществ, а также другие органические и неорганические загрязнители. По этой причине ВАХ реальных полупроводниковых приборов на основе контакта металл-полупроводник (диодов Шоттки) может не совпадать с теоретической.

3. ВОПРОСЫ К ДОМАШНЕМУ ЗАДАНИЮ

1. Что такое работа выхода электронов?
2. Что называют контактной разностью потенциалов? Как она образуется и чему равна?
3. Чему равна ширина области пространственного заряда?
4. Какое включение будет прямым и какое обратным для контакта полупроводник n-типа и металла?
5. Расскажите о контакте металл-полупроводник, создающем переход Шоттки.
6. Обладает ли переход Шоттки выпрямительными свойствами?
7. По какой причине ВАХ реальных диодов Шоттки может не совпадать с теоретической?

4. ЛАБОРАТНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

4.1. Задание № 1

Используя комплекс МУК-ФОЭ1, собрать установку по соответствующей схеме прямого, а затем обратного включения контакта металл-полупроводник.

Методические указания по выполнению задания

Исследовать свойства выпрямляющего контакта металл-полупроводник можно с помощью диода Шоттки, ко-

торый состоит из перехода металл-полупроводник, системы металлических выводов и корпуса и установлен в стенде с обозначением VD3.

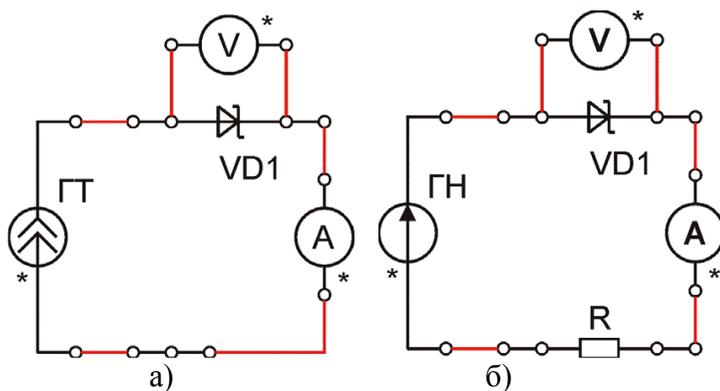


Рис. 4

При прямом смещении ВАХ имеет большую крутизну: при малом изменении прямого напряжения ток диода изменяется резко. Для экспериментального исследования ВАХ в этом случае проще и точнее устанавливать величину тока, а напряжение, полученное на диоде, измерять. Для этого в качестве источника необходимо применять либо «генератор тока» (рис. 4а), либо гасящее сопротивление R (рис. 4б).

ВАХ при обратном включении диода: даже при больших изменениях напряжения ток изменяется незначительно. В этом случае предпочтительнее использовать «генератор напряжений» для установки напряжения на диоде, а ток диода измерять (рис. 5).

4.2. Задание № 2

Получить данные для построения прямой ветви ВАХ, задавая разными значениями прямого тока и измеряя соответствующие значения прямого напряжения на диоде.

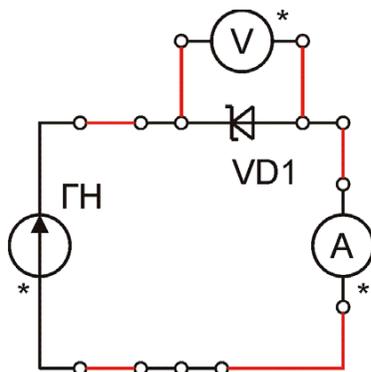


Рис. 5

Исследовать при заданном значении прямого тока зависимость прямого напряжения на диоде от температуры: $U = f(T)_{I=const}$. Построить графики.

4.3. Задание № 3

Получить данные для построения обратной ветви ВАХ, задаваясь разными значениями напряжения на ГН и измеряя соответствующие значения обратного тока на диоде.

Исследовать при заданном значении обратного напряжения зависимость обратного тока на диоде от температуры: $I' = f(T)_{U'=const}$. Построить графики.

5. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет оформляется в виде пояснительной записки на листах формата А4 (210 × 297 мм). Необходимо дома подготовить заготовку отчета по всей работе. Заготовка отчета должна содержать номер, цель и содержание работы, все пункты домашних заданий и результаты их выполнения, все пункты лабораторных заданий и свободные места для их выполнения. Дополнительно в отчете необходимо сде-

лать выводы по результатам проделанной работы. Рисунки и графики выполнять на отдельных листах формата А4, на которых, если позволяет место, может быть размещено по несколько рисунков. Рисунки вкладывать в отчет после первой ссылки по тексту. Титульный лист выполняется по ГОСТ 7.4-78 в виде обложки, в которую вкладывается отчет.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ

1. Привести схему лабораторной установки. Объяснить методику проведения измерений.
2. В каком случае контакт металл-полупроводник будет омическим?
3. Приведите ВАХ диода Шоттки. В чём заключается особенность ВАХ по сравнению с ВАХ полупроводниковых диодов?
4. Как влияет температура на U_{np} и $I_{обр}$? Объясните эту зависимость.
5. В чём преимущества диодов Шоттки по сравнению с диодами с р-п переходом?
6. Из каких материалов изготавливают диоды Шоттки?
7. Укажите области применения диодов Шоттки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балашов Ю. С. Физические основы функционирования интегральных устройств микроэлектроники [Текст] : учеб. пособие / Ю. С. Балашов, М. И. Горлов. - 2-е изд., перераб. и доп. – Воронеж: ГОУ ВПО ВГТУ, 2008. – 187 с.
2. Пасынков В. В. Полупроводниковые приборы [Текст] : учебник / В. В. Пасынков, П. К. Чиркин. - 5-е изд., перераб. и доп. – СПб.: “Лань”, 2003. – 479 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТАБИЛИТРОНОВ

1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

1.1. Цель работы

Исследовать температурные зависимости ВАХ лавинного и туннельного стабилитронов, определить их основные параметры.

1.2. Содержание работы

Основным содержанием работы является: изучение физических принципов работы стабилитронов и их электрических параметров; экспериментальное исследование и анализ ВАХ лавинного и туннельного стабилитронов, определение их основных параметров: напряжения стабилизации U_{cm} , дифференциального сопротивления r_{cm} , температурного коэффициента $U_{cm} \text{ TKN}_{cm}$; исследование влияния температуры на ВАХ и U_{cm} .

Обучение осуществляется в процессе выполнения домашних и лабораторных заданий. Контроль усвоения полученных студентами знаний и навыков производится при собеседовании путем оценки ответов на контрольные вопросы, а также при выполнении лабораторной работы.

Время выполнения домашних заданий 3 ч. Общее время на выполнение лабораторных заданий, включая собеседование и отчет по лабораторной работе 4 ч.

1.3. Указания по технике безопасности

В процессе работы необходимо соблюдать общие правила техники безопасности при работе с электроустановками напряжением до 1000 В.

2. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

2.1. Задание №1

Изучить физические принципы работы стабилитронов, их ВАХ и виды пробоя.

Методические указания по выполнению задания

Для выполнения задания необходимо ознакомиться с материалом /1, с. 116-120/.

Полупроводниковым стабилитроном, или опорным диодом, называют плоскостный полупроводниковый диод, вольт-амперная характеристика которого отражает слабую зависимость напряжения от тока в области электрического пробоя (рис. 1).

Рабочий участок вольт-амперной характеристики стабилитрона обуславливается электрическим пробоем *p-n*-перехода при включении диода в обратном направлении. Подобной вольт-амперной характеристикой обладают сплавные диоды с базой, изготовленной из низкоомного полупроводникового материала. При этом напряженность электрического поля в *p-n*-переходе стабилитрона значительно выше, чем у обычных диодов. При относительно небольших обратных напряжениях в *p-n*-переходе возникает сильное электрическое поле, вызывающее его электрический пробой. Напряжение, при котором происходит лавинный пробой, зависит от удельного сопротивления по-

лупроводникового материала. С ростом удельного сопротивления напряжение лавинного пробоя увеличивается.

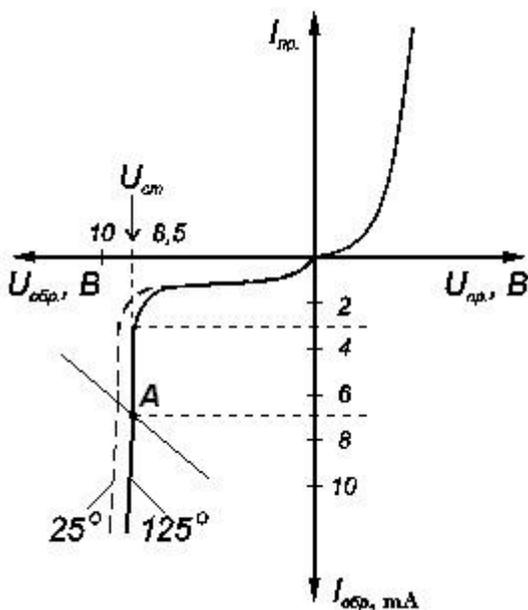


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика стабилитрона КС104А

Существует предел повышения запирающего напряжения на $p-n$ переходе. Этот предел определяется пробоем $p-n$ перехода. Начиная с некоторого значения напряжения обратный ток увеличивается медленно, а затем все быстрее и быстрее. Если не принимать специальных мер, то переход окажется пробитым. В области больших запирающих напряжений вольтамперные характеристики будут иметь вид одной из кривых, показанных на рис.2.

Различают четыре вида пробоя:

- туннельный пробой;
- лавинный пробой, или пробой за счет ударной ионизации;

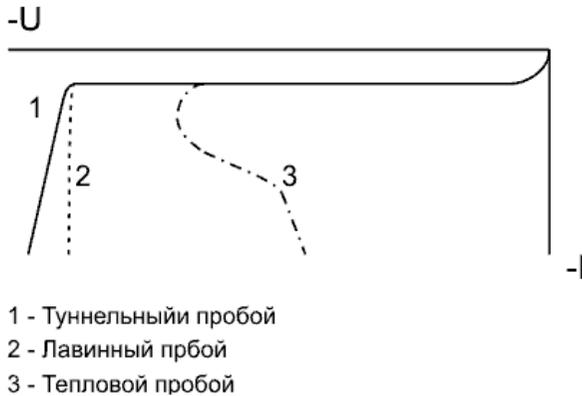


Рис. 2

- тепловой пробой за счет кумулятивного разогрева перехода;

- поверхностный пробой.

Туннельный (зенеровский) пробой является результатом непосредственного воздействия сильного электрического поля на кристаллическую решетку полупроводника. При сильном обратном смещении p - n -перехода можно создать условия для прямых электронных переходов между валентной зоной и зоной проводимости (туннелирования). Запрещенная зона при этом трактуется как область отрицательной кинетической энергии, в которой волновые функции быстро затухают. Вероятность перехода электрона через такой потенциальный барьер (с сохранением энергии) отлична от нуля, если с другой стороны барьера имеются состояния с равной или меньшей энергией. Эта вероятность имеет существенное значение только, при большой напряженности поля и малой ширине барьера. При этом образуются парные заряды электрон — дырка, увеличивающие ток через переход. Поэтому туннельный будет характерен для узких (тонких) переходов.

Лавинный пробой возникает в том случае если не основные носители, попадающие в поле области объемного заряда, приобретают энергию, достаточную для разрыва

валентной связи. При столкновении с решеткой кристалла они выбивают из связи валентный электрон. В результате этого также возникает парный заряд, увеличивающий ток через переход. Для того чтобы носители заряда успели приобрести за время движения в переходе достаточную энергию, время их дрейфа должно быть относительно велико. Поэтому ударная ионизация наблюдается только в достаточно широких переходах, т. е. в переходах на относительно высокоомном материале.

Как в первом, так и во втором случае сопротивление перехода начинает падать, ток резко возрастает. Так как эти два случая являются предельными, то часто мы будем иметь дело с переходами, в которых будут действовать оба указанных механизма.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что как у сплавных, так и у диффузионных германиевых и кремниевых переходов туннельный пробой наблюдается в основном при удельных сопротивлениях менее 0,1 ом/см. Напряжения туннельного пробоя составляют при этом менее 2В для германиевых и менее 5В для кремниевых переходов. Пробивные напряжения свыше 7В для кремниевых и свыше 5В для германиевых переходов соответствуют лавинному пробоя. Промежуточные значения соответствуют одновременному существованию обоих видов пробоя. ВАХ для туннельного и лавинного пробоев оказываются довольно сходными, и практически не всегда можно с уверенностью сказать, какая из причин вызвала пробой.

Температурная зависимость напряжения туннельного пробоя будет определяться температурной зависимостью ширины $p-n$ перехода. С ростом температуры уменьшается контактная разность потенциалов, уменьшается ширина $p-n$ перехода, вероятность туннелирования возрастает, и напряжение пробоя падает.

Температурная зависимость напряжения лавинного пробоя зависит от температурной зависимости длины сво-

бодного пробега носителей тока. При рассеянии носителей на решетке подвижность носителей уменьшается. Поэтому для того, чтобы носитель при меньшей длине свободного пробега приобрел энергию, достаточную для ионизации валентных связей, поля в переходе должны иметь большую величину. Это приводит к тому, что напряжение пробоя будет увеличиваться с ростом температуры.

Таким образом, напряжения туннельного и лавинного пробоев имеют противоположные знаки изменения напряжения пробоя с изменением температуры $\left(\frac{dU_n}{dT}\right)$. Изменение знака происходит при концентрациях порядка $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. В этой области ($U_n = 5 \div 6 \text{ В}$) изменения напряжения пробоя с температурой будут минимальными.

Тепловой пробой может иметь место в тех случаях, когда не обеспечивается необходимый отвод тепла от перехода, работающего в режиме выпрямления больших токов.

Явление поверхностного пробоя заключается в следующем. Поверхностный заряд, имеющийся практически всегда на поверхности полупроводника в месте выхода *p-n* перехода на поверхность, может сильно исказить картину поля в переходе. Это в свою очередь повлияет на ширину перехода на поверхности и как следствие может увеличить вероятность пробоя.

Так как кремниевые диоды имеют меньшее значение обратного тока, обладают большей устойчивостью к тепловому пробую, чем германиевые диоды, в качестве стабилитронов применяют только кремниевые диоды.

2.2. Задание № 2

Изучить основные электрические параметры стабилитронов и схемы их включения.

Методические указания по выполнению задания

Для выполнения задания следует изучить материал /1, с. 116 - 120/.

Основными электрическими параметрами стабилитрона являются (в скобках даны их типовые значения):

1. Напряжение стабилизации U_{cm} – падение напряжения на стабилитроне при протекании заданного тока стабилизации (несколько вольт – сотни вольт);

2. Ток стабилизации I_{cm} – номинальное значение тока, протекающего через стабилитрон, определяющее напряжение стабилизации (несколько мА – несколько А);

3. Дифференциальное или динамическое сопротивление r_{cm} , которое определяется при заданном значении тока стабилизации на участке пробоя как

$$r_{cm} = \frac{dU_{cm}}{dI_{cm}} \quad (1)$$

Дифференциальное сопротивление определяет наклон обратной ветви вольт-амперной характеристики стабилитрона. Величина r_{cm} колеблется в пределах от 1 до 1000 Ом.

4. Температурный коэффициент напряжения стабилизации TKH_{cm} – относительное изменение напряжения стабилизации $\Delta U_{cm} / U_{cm}$ к изменению температуры окружающей среды на ΔT , т.е. при изменении температуры окружающей среды на один градус при постоянном значении тока стабилизации (\pm сотые – тысячные доли процента на градус)

$$TKH_{cm} = \frac{\Delta U_{cm}}{U_{cm} \Delta T} \text{ [%/град]} \quad (2)$$

ТКН для сплавных переходов равен 0,37 %/град, а для диффузионных – 0,3 %/град.

Кроме того, в технических условиях на стабилитроны указываются следующие предельно-допустимые режимы эксплуатации.

1. Максимально-допустимый ток стабилизации в диапазоне температур $I_{ст. макс}$ (десятки мА ÷ единицы А), определяемый максимально-допустимой мощностью.

2. Минимальный ток стабилизации в диапазоне температур $I_{ст. мин}$ (от 1 ÷ 3 мА);

3. Максимально-допустимая мощность в диапазоне окружающей температуры $P_{макс}$ (от нескольких милливольт до нескольких ватт);

На рис. 3 представлена простейшая схема стабилизации напряжения постоянного тока на стабилитроне. По этой схеме осуществляется стабилизация напряжения как при изменении входного напряжения, так и при изменении величины сопротивления нагрузки.

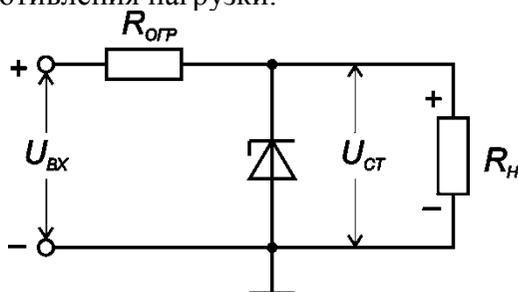


Рис. 3. Схема включения полупроводникового стабилитрона в схему стабилизации напряжения на нагрузке

При возрастании входного напряжения увеличивается ток стабилитрона, а, следовательно, и обратный ток I_o и падение напряжения на ограничительном сопротивлении $R_{огр}$. Приращение напряжений $\Delta U_{вх}$ и $\Delta I_o R_{огр}$ взаимно компенсируются, поэтому напряжение стабилизации остается прежним.

Величина ограничительного сопротивления может быть определена по формуле

$$R_{огр} = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{ст}}}{I_{\text{ст}} - I_{\text{н}}}$$

где $I_{\text{н}}$ – ток, протекающий через сопротивление нагрузки.

Прямая ветвь вольт-амперной характеристики кремниевых диодов, в том числе стабилитронов, имеет крутой подъем, поэтому для стабилизации малых напряжений (порядка $0,8 \div 1,5$ В) можно использовать кремниевые диоды, включенные в прямом направлении (стабисторы).

Отечественная промышленность выпускает кремниевые стабилитроны на напряжение стабилизации от 5 до 300 В при токе стабилизации от 0,1 мА до 2 А и при рассеиваемой мощности от 0,15 до 50 Вт.

3. ВОПРОСЫ К ДОМАШНЕМУ ЗАДАНИЮ

1. Какие полупроводниковые диоды называют стабилитронами и стабисторами?

2. Нарисуйте ВАХ стабилитрона и назовите его основные электрические параметры.

3. Из какого материала изготавливают стабилитроны, какую они имеют структуру p - n -перехода, в какой полярности включаются?

4. Какие виды пробоя p - n переходов вы знаете? Чем они обусловлены?

5. Приведите схему включения стабилитрона.

4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

4.1 Задание № 1

Используя комплекс МУК-ФОЭ1, собрать установку по схеме (рис. 4). В качестве объектов исследования выбирать туннельный стабилитрон (диод Зенера) VD4 и лавин-

ный стабилитрон из стенда СЗ-ТТ02-2 VD5, включая их в обратном смещении. Для обеспечения защиты стабилитрона от неограниченного возрастания тока при превышении напряжения генератора выше напряжения пробоя необходимо использовать ограничивающее сопротивление R .

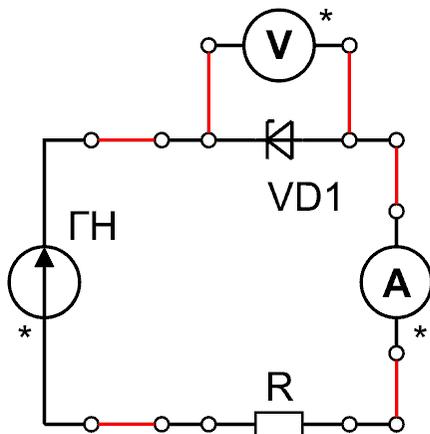


Рис. 4

4.2. Задание № 2

Получить данные для построения обратной ветви ВАХ туннельного стабилитрона, задаваясь разными значениями обратного напряжения на ГН и измеряя соответствующие значения обратного тока стабилитрона. Измерения проводить при различных значениях температуры. Рекомендуемые значения 300К, 330К, 360К, 390К. Построить графики.

4.3. Задание № 3

Из построенных ВАХ определить U_{cm} при $I_{cm} = 20$ мА. Построить зависимость $U_{cm} = f(T)$ при постоянном

$I_{cm} = 20$ мА, по формуле (2) определить TKN_{cm} туннельного стабилитрона. Используя ВАХ, полученную при $T = 300\text{К}$ по формуле (1) рассчитать r_{cm} .

4.4. Задание № 4

Выполнить п. 4.1 – 4.3 для лавинного стабилитрона. Провести сравнительный анализ полученных результатов.

5. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет оформляется в виде пояснительной записки на листах формата А4 (210 × 297 мм). Необходимо дома подготовить заготовку отчета по всей работе. Заготовка отчета должна содержать номер, цель и содержание работы, все пункты домашних заданий и результаты их выполнения, все пункты лабораторных заданий и свободные места для их выполнения. Дополнительно в отчете необходимо сделать выводы по результатам проделанной работы. Рисунки и графики выполнять на отдельных листах формата А4, на которых, если позволяет место, может быть размещено по несколько рисунков. Рисунки вкладывать в отчет после первой ссылки по тексту. Титульный лист выполняется по ГОСТ 7.4-78 в виде обложки, в которую вкладывается отчет.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ

1. Привести схему лабораторной установки. Объяснить методику проведения измерений и расчетов. Для чего в схему включён резистор R?
2. Чем туннельный стабилитрон отличается от лавинного?

3. Объясните температурные зависимости ВАХ и $U_{ст}$ от температуры.

4. Как определяется U_{cm} , r_{cm} и TKH_{cm} исследованных стабилитронов?

5. Проведите сравнительный анализ исследованных характеристик туннельного и лавинного стабилитронов.

6. Приведите основные параметры отечественных стабилитронов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балашов Ю. С. Физические основы функционирования интегральных устройств микроэлектроники [Текст] : учеб. пособие / Ю. С. Балашов, М. И. Горлов. - 2-е изд., перераб. и доп. – Воронеж: ГОУ ВПО ВГТУ, 2008. – 187 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТИРИСТОРОВ

1.1. Цель работы

Изучение вольт-амперной характеристики тиристорov.

1.2. Содержание работы

Основным содержанием работы является: изучение структуры, принципа работы, схем включения тиристорov; экспериментальное исследование ВАХ; измерение управляющего тока, тока и напряжения включения тиристора; определение напряжения и тока выключения.

Обучение осуществляется в процессе выполнения домашних и лабораторных заданий. Контроль усвоения полученных студентами знаний и навыков производится

при собеседовании путем оценки ответов на контрольные вопросы, а также при выполнении лабораторной работы.

Время выполнения домашних заданий 3 ч. Общее время на выполнение лабораторных заданий, включая собеседование и отчет по лабораторной работе 4 ч.

1.3. Указания по технике безопасности

В процессе работы необходимо соблюдать общие правила техники безопасности при работе с электроустановками напряжением до 1000 В.

2. ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

2.1. Задание №1

Изучить структуры и принцип работы тиристоры.

Методические указания по выполнению работы

Для выполнения задания ознакомиться с материалом /1, с. 127-131/.

Тиристор – полупроводниковый прибор с двумя устойчивыми состояниями, имеющий три (или более) выпрямляющих перехода, который может переключаться из закрытого состояния в открытое и наоборот. Различают диодные (неуправляемые) и триодные (управляемые) тиристоры. Диодный тиристор называют *динистором*, а триодный – *тиристором*. Для коммутации цепей переменного тока разработаны специальные симметричные тиристоры – *симисторы*.

Динистор – это двухэлектродный прибор диодного типа, имеющий три *p-n*-перехода. Крайняя область P называется анодом, а другая крайняя область N – катодом. Структура динистора приведена на рис. 1,а.

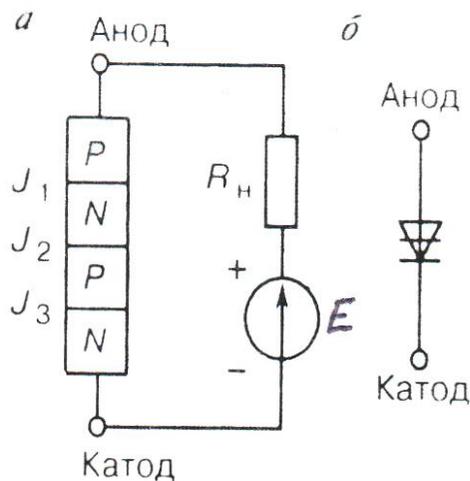


Рис. 1. Структура диодистора (а) и его схематическое изображение (б)

Три $p-n$ -перехода диодистора обозначены как J_1 , J_2 и J_3 . Схематическое изображение диодистора приведено на рис. 1,б. Схему замещения диодистора можно представить в виде двух триодных структур, соединенных между собой. Деление диодистора на составляющие транзисторы и схема замещения представлены на рис. 2.

При таком соединении коллекторный ток первого транзистора является током базы второго, а коллекторный ток второго транзистора – током базы первого. Благодаря этому внутри прибора есть положительная обратная связь.

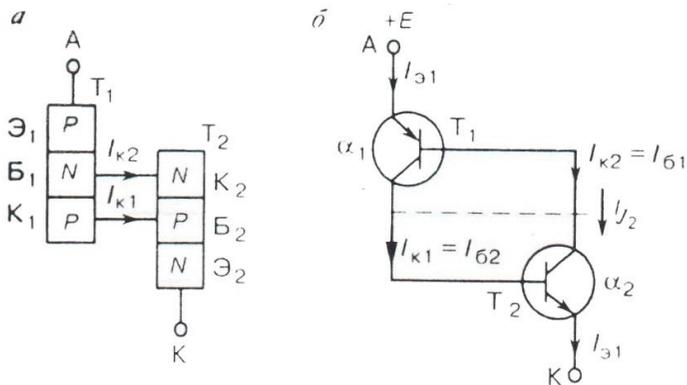


Рис. 2. Две структуры динодистора и схема его замещения

Если на анод подано положительное напряжение по отношению к катоду, то переходы J_1 и J_3 будут смещены в прямом направлении, а переход J_2 – в обратном, поэтому все напряжение источника E будет приложено к переходу J_2 . Примем, что коэффициенты передачи по току эмиттера транзисторов T_1 и T_2 имеют значения α_1 и α_2 соответственно. Пользуясь схемой замещения, приведенной на рис. 2,б, найдем ток через переход J_2 , равный сумме токов коллекторов обоих транзисторов и тока утечки $I_{к0}$ этого перехода:

$$I_{J_2} = \alpha_1 I_{э1} + \alpha_2 I_{э2} + I_{к0} . \quad (1)$$

Ток во внешней цепи равен $I_{э1} = I_{э2} = I_{J_2} = I$, поэтому после подстановки I в (11.1) получим:

$$I(1 - \alpha_1 - \alpha_2) = I_{к0} \quad (2)$$

откуда получим значение внешнего тока:

$$I = \frac{I_{к0}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (3)$$

Пока выполняется условие $(\alpha_1 + \alpha_2) < 1$, ток в динисторе будет равен $I_{к0}$. Если же сделать $(\alpha_1 + \alpha_2) \geq 1$, то динистор включается и начинает проводить ток. Таким образом, получено условие включения динистора.

Для увеличения коэффициентов передачи тока α_1 или α_2 имеются два способа. По первому способу можно увеличивать напряжение на динисторе. С ростом напряжения $U = U_{вкл}$ один из транзисторов будет переходить в режим насыщения.

Коллекторный ток этого транзистора, протекая в цепи базы второго транзистора, откроет его, а последний, в свою очередь, увеличит ток базы первого. В результате коллекторные токи транзисторов будут лавинообразно нарастать, пока оба транзистора не перейдут в режим насыщения.

После включения транзисторов динистор замкнется и ток I будет ограничиваться только сопротивлением внешней цепи. Падение напряжения на открытом приборе меньше 2 В, что примерно равно падению напряжения на обычном диоде. Вольт-амперная характеристика динистора приведена на рис. 3,а, а схема импульсного включения на рис. 3,б.

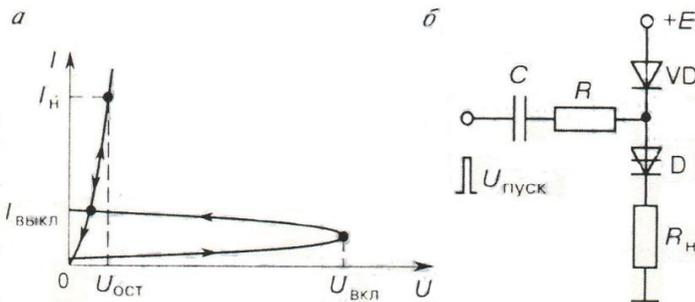


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики динистора (а) и схема его включения (б)

Выключить динистор можно, понизив ток в нем до значения $I_{\text{выкл}}$ или поменять полярность напряжения на аноде. Различные способы выключения динистора приведены на рис. 4.

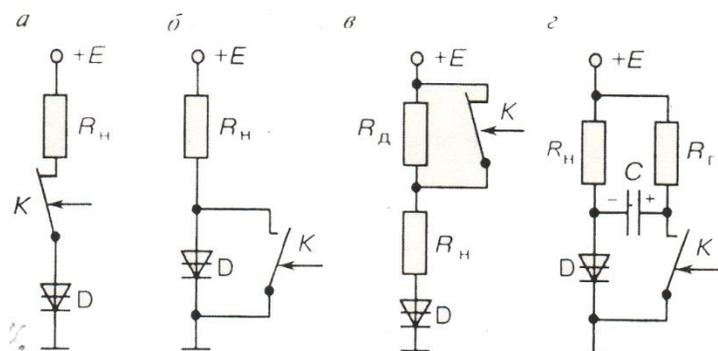


Рис. 4. Схемы включения динистора: с размыканием цепи (а); шунтированием прибора (б); со снижением тока анода (в); с подачей обратного напряжения (г)

В схеме (а) прерывается ток в цепи динистора. В схеме (б) напряжение на динисторе делается равным нулю. В схеме (в) ток динистора понижается до $I_{\text{выкл}}$ включением добавочного резистора $R_{\text{д}}$. В схеме (г) при замыкании ключа К на анод динистора подается напряжение противоположной полярности при помощи конденсатора С.

Второй способ включения четырехслойной структуры реализован в тиристоре. Для этого в нем имеется вывод от одной из баз эквивалентных транзисторов T_1 или T_2 . Если подать в одну из этих баз ток управления, коэффициент передачи соответствующего транзистора увеличится и произойдет включение тиристора.

В зависимости от расположения управляющего электрода (УЭ) тиристоры делятся на тиристоры с катодным управлением и тиристоры с анодным управлением. Распо-

ложение этих управляющих электродов и схематические обозначения тиристоров приведены на рис. 5.

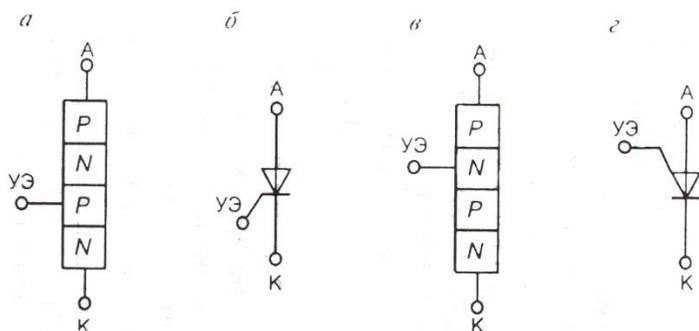


Рис. 5. Структура тиристора с катодным управлением (а) и его схематическое обозначение (б); структура тиристора с анодным управлением (в) и его схематическое обозначение (г)

2.2. Задание № 2

Изучить ВАХ, схемы включения и основные параметры тиристорov.

Методические указания по выполнению задания

Изучить материал /1, с. 132-133; 2/.

Схема включения тиристора с катодным управлением представлена на рис. 6.

В отсутствии управляющего напряжения статическая вольт-амперная характеристика тиристора аналогична диодистору (рис. 7). Пусть к аноду тиристора подано небольшое положительное напряжение. $p-n$ -переходы Π_1 и Π_3 включены в прямом направлении, а переход Π_2 включен в обратном, поэтому почти всё приложенное напряжение будет падать на нём.

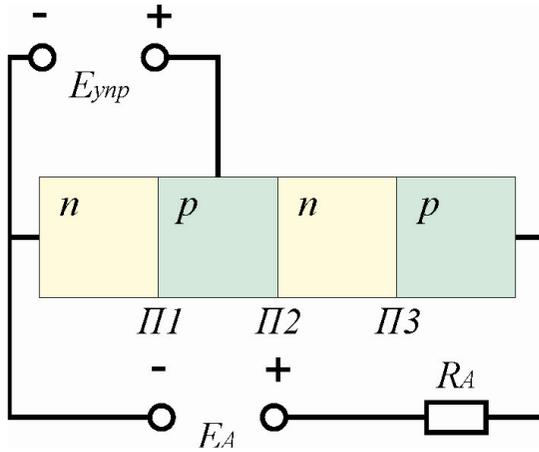


Рис. 6

Участок 01 вольт-амперной характеристики (рис. 7) аналогичен обратной ветви характеристики диода и характеризуется режимом прямого запирания.

Переход из закрытого состояния в открытое происходит при превышении напряжения на тиристоре $U_{вкл}$ (точка 1). В итоге этого лавинообразного процесса через тиристор будет протекать ток, ограниченный сопротивлением нагрузки R_A (точка 2).

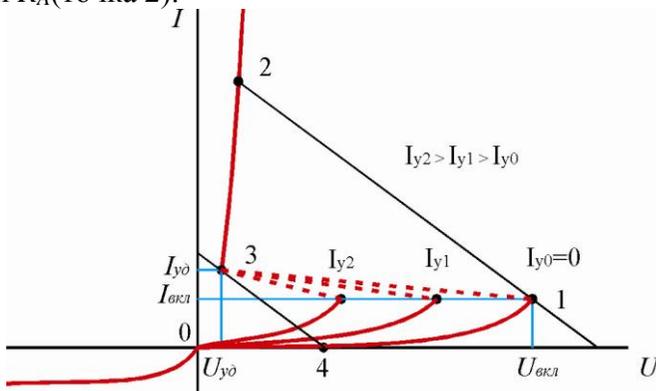


Рис. 7

Для выключения тиристора необходимо уменьшить анодный ток до величины $I_{уд}$ (точка 3). После выключения тиристор переходит в состояние 4.

Если управляющий электрод подключить к источнику, то напряжение включения тиристора $U_{вкл}$ уменьшится.

При увеличении тока управления снижается напряжение включения. Таким образом, тиристор эквивалентен динистору с управляемым напряжением включения.

После включения управляющий электрод теряет управляющие свойства, следовательно, с его помощью выключить тиристор нельзя. Основные схемы выключения тиристора такие же, как и для динистора.

Как динисторы, так и тиристоры подвержены самопроизвольному включению при быстром изменении напряжения на аноде. Это явление получило название «эффекта dU/dt ». Оно связано с зарядом емкости перехода C_{j2} при быстром изменении напряжения на аноде тиристора (или динистора): $I_{c2} = C_{j2} dU/dt$. Даже при небольшом напряжении на аноде тиристор может включиться при большой скорости его изменения.

Условное обозначение динисторов и тиристоров содержит информацию о материале полупроводника (буква К), обозначении типа прибора: (динистор – буква Н, тиристор – буква У), классе по мощности (1 – ток анода $I_a < 0,3$ А; 2 – $I_a > 0,3$ А) и порядковом номере разработки – например, динистор КН102 – кремниевый, малой мощности; тиристор КУ202 – кремниевый, большой мощности.

Основные параметры динисторов и тиристоров:

1. Допустимое обратное напряжение $U_{обр}$.
2. Напряжение в открытом состоянии $U_{пр}$ при заданном прямом токе.
3. Допустимый прямой ток $I_{пр}$.
4. Время включения $t_{вкл}$ и время выключения $t_{выкл}$.

3. ВОПРОСЫ К ДОМАШНЕМУ ЗАДАНИЮ

1. Какие полупроводниковые приборы называются тиристорами?
2. Что такое динистор? Приведите схему его структуры и объясните принцип действия.
3. Приведите вольт-амперные характеристики динистора и объясните их.
4. Какой прибор называют тринистором (тиристором)? Приведите схему структуры, вольт-амперную характеристику, расскажите о принципе его работы.
5. Назовите основные параметры тиристоров.
6. Как обозначаются тиристоры? Нарисуйте условные графические обозначения тиристоров.

4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

4.1. Задание № 1

Соберите электрическую схему рис. 8. На этой схеме более светлым цветом выделены проводники с наконечниками Ш4-Ш1.6, а темным – с наконечниками Ш1.6 – Ш1.6.

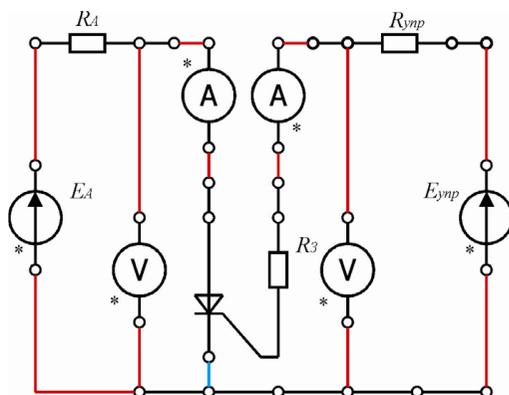


Рис. 8

Экспериментальные исследования производятся с помощью модульного учебного комплекса МУК-ФОЭ1. Для получения вольт-амперной характеристики тиристора используется электрическая схема, представленная на рис 8.

Все элементы схемы расположены на стенде с объектами исследования СЗ-ФОЭ01. В качестве исследуемого тиристора используется КУ202А.

Для питания схемы используется источник регулируемого анодного напряжения, который расположен в генераторе испытательных сигналов БЛ2.

Все измерения производится с помощью амперметра-вольтметра АВ1. При включении амперметра в анодную цепь рекомендуется соблюдать полярность, указанную на схеме рис. 8. Такое включение позволяет при измерении малых токов существенно уменьшить сетевую наводку на электрическую цепь. При этом необходимо знак тока в результате измерений изменить на противоположный.

Для защиты управляющего вывода от повреждения током при неправильном включении предусмотрен защитный резистор R_3 . По этой причине управляющее напряжение на тиристоре можно рассчитать как:

$$U_{ynp} = U_V - I_{ynp} R_3, \quad (4)$$

где U_V – показания вольтметра;

I_{ynp} – показания амперметра.

4.2. Задание № 2

Для анодных напряжений (5В, 10В, 15В, 20В) изменяя управляющий ток, найти точку переключения тиристора из закрытого в открытое состояние. Измерьте значения управляющего тока I_y , тока включения $I_{вкл}$ и напряжения

включения $U_{\text{вкл}}$. Проведите опыт несколько раз и найдите средние значения.

4.3. Задание № 3

Определите напряжение $U_{y\partial}$ и ток $I_{y\partial}$ выключения тиристора.

После включения тиристора уменьшите управляющий ток до 0. Уменьшая анодное напряжение, зафиксируйте момент выключения тиристора. Измерьте значения тока $I_{y\partial}$ и напряжения $U_{y\partial}$. Проведите опыт несколько раз и найдите средние значения.

4.4. Задание № 4

Снимите ВАХ тиристора во включенном и выключенном состоянии при одном из полученных управляющий значениях тока управления. Постройте ВАХ тиристора.

5. УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет оформляется в виде пояснительной записки на листах формата А4 (210 × 297 мм). Необходимо дома подготовить заготовку отчета по всей работе. Заготовка отчета должна содержать номер, цель и содержание работы, все пункты домашних заданий и результаты их выполнения, все пункты лабораторных заданий и свободные места для их выполнения. Дополнительно в отчете необходимо сделать выводы по результатам проделанной работы. Рисунки и графики выполнять на отдельных листах формата А4, на которых, если позволяет место, может быть размещено по несколько рисунков. Рисунки вкладывать в отчет после первой ссылки по тексту. Титульный лист выполняется по ГОСТ 7.4-78 в виде обложки, в которую вкладывается отчет.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАДАНИЯМ

1. Приведите схему лабораторной установки. Объясните методику проведения измерений и расчётов.
2. По какой причине рекомендуется соблюдать полярность включения амперметра в анодную цепь, указанную на рис. 8? Для чего нужен резистор R_3 ?
3. Что такое I_y , $I_{вкл}$, $U_{вкл}$, как они определяются?
4. Как определяются $U_{уд}$ и $I_{уд}$?
5. Назовите области применения тиристорov.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бадаев А.С. Физические основы полупроводников и микроэлектронной техники [Текст] : учеб. пособие / А.С. Бадаев. – Воронеж: ГОУ ВПО ВГТУ, 2009. – 148 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 3. Исследование параметров полупроводниковых диодов	1
Лабораторная работа № 4. Исследование контактных явлений в полупроводниках: контакт металл-полупроводник	16
Лабораторная работа № 5. Исследование параметров стабилитронов	26
Лабораторная работа № 6. Исследование характеристик тиристорov	37