

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

В. А. Гольдаде

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Практическое пособие

для студентов факультета физики и информационных технологий
специальности 1-31 04 03 «Физическая электроника»

Гомель
ГГУ им. Ф. Скорины
2019

УДК 621.382.2/.3(076)
ББК 32.853.1я73
Г63

Рецензенты:
доктор технических наук А. С. Неверов,
кандидат технических наук Н. Н. Федосенко

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
учреждения образования «Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины»

Гольдаде, В. А.

Г63 Исследование характеристик полупроводниковых
приборов : практическое пособие / В. А. Гольдаде ;
Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ им.
Ф. Скорины, 2019. – 34 с.
ISBN 978-985-577-501-1

В практическом пособии изложены основные данные о *p-n*-переходах в полупроводниках, а также приведен комплекс лабораторных работ, посвященных изучению характеристик полупроводниковых приборов.

Издание разработано в соответствии с учебной программой «Физика полупроводников и полупроводниковых приборов» и с требованиями образовательного стандарта высшего образования.

Адресовано студентам специальности 1-31 04 03 «Физическая электроника».

УДК 621.382.2/.3(076)
ББК 32.853.1я73

ISBN 978-985-577-501-1

© Гольдаде В. А., 2019

© Учреждение образования «Гомельский
государственный университет
имени Франциска Скорины», 2019

Оглавление

Предисловие.....	4
Контактные явления в полупроводниках	5
Лабораторная работа 1. Исследование характеристик выпрямительного диода	9
Лабораторная работа 2. Исследование характеристик стабилитрона.....	13
Лабораторная работа 3. Исследование характеристик полевого транзистора	18
Лабораторная работа 4. Исследование характеристик биполярного транзистора	25
Лабораторная работа 5. Исследование характеристик тиристора	31

Предисловие

Учебная дисциплина «Физика полупроводников и полупроводниковых приборов» посвящена изучению процессов, протекающих в полупроводниках в различных условиях, а также принципов работы классических полупроводниковых приборов.

Целью изучения дисциплины является формирование систематизированных теоретических знаний и практических навыков, необходимых для специалистов в области полупроводниковой микро- и нано-электроники. Основная задача дисциплины – научить студентов анализировать физические явления и процессы, протекающие в полупроводниковых приборах и лежащие в основе работы приборов электроники и радиоэлектронных устройств.

Практическое пособие состоит из двух частей. Первая часть посвящена описанию физических процессов, протекающих в электронно-дырочных переходах. Эти явления лежат в основе работы большинства полупроводниковых приборов. Вторая часть содержит методические рекомендации по выполнению лабораторных работ, которые посвящены исследованию характеристик полупроводниковых диодов, стабилитронов, транзисторов и тиристоров.

В каждой работе приведены краткие теоретические сведения, порядок проведения лабораторной работы, контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы. Основное внимание уделено привитию у студентов навыков практической работы с лабораторным оборудованием, умениям самостоятельно исследовать характеристики полупроводниковых приборов и анализировать полученные экспериментальные результаты.

Контактные явления в полупроводниках

Контактные явления в полупроводниках – это неравновесные электронные процессы, возникающие при прохождении электрического тока: 1) через контакт полупроводника с металлом или другим полупроводником (гетеропереход); 2) через границу двух областей одного и того же полупроводника, отличающихся типом носителей заряда (*p-n*-переход) или разной их концентрацией. Контакты полупроводника с металлом или другим полупроводником обладают выпрямляющим свойством, т. е. значительно эффективнее пропускают электрический ток в одном направлении, чем в обратном. Это свойство обусловило их широкое применение в технике.

Электронно-дырочный или *p-n-переход* – переходная область между двумя соприкасающимися одинаковыми полупроводниками, один из которых имеет электронную, а другой – дырочную проводимость. Концентрация дырок в *p*-области гораздо выше, чем в *n*-области, поэтому дырки из *p*-области диффундируют в *n*-область, а электроны из *n*-области – в *p*-область. В результате в *p*-области остаются отрицательно заряженные акцепторные атомы, а в *n*-области – положительно заряженные донорные атомы. Так как и те и другие неподвижны, в области *p-n*-перехода образуется двойной слой пространственного заряда: отрицательные заряды в *p*-области и положительные – в *n*-области (рисунок 1, а). Возникающее поле E_k двойного электрического слоя препятствует дальнейшей диффузии основных носителей тока. Поле E_k обуславливает контактную разность потенциалов:

$$V_k = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{np}{n_0^2} \right),$$

где e – заряд электрона;

T – температура полупроводника;

n и p – концентрации электронов и дырок в *n*- и *p*-областях;

n_0 – концентрация электронов в собственном полупроводнике.

При определенной толщине двойного электрического слоя наступает равновесное состояние контакта, характеризуемое выравниванием уровня Ферми E_F для обоих полупроводников (рисунок 1, в). В области *p-n*-перехода энергетические зоны искривляются, в результате чего возникают потенциальные барьеры eV_k как для электронов, так и для дырок. Толщина d слоя *p-n*-перехода в полупроводниках составляет 10^{-6} – 10^{-7} м, а контактная разность потенциалов V_k – десятые доли

вольт. При обычных температурах носители тока не способны преодолеть потенциальный барьер eV_k , поэтому контактный слой является *запирающим*, т. е. характеризуется повышенным сопротивлением.

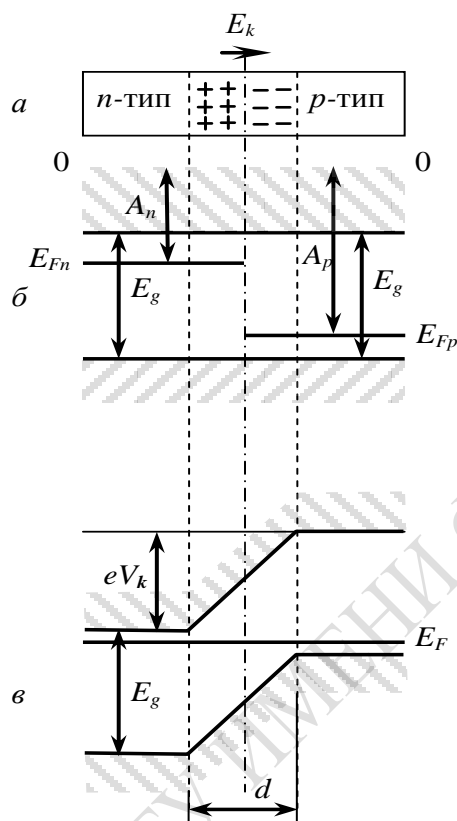


Рисунок 1 – Схема электронно-дырочного перехода:

a – образование двойного электрического слоя в контакте полупроводников с *n*- и *p*-типами проводимости; *б* и *в* – энергетические зоны в изолированных друг от друга полупроводниках и после образования *p-n*-перехода; A_n и A_p – работы выхода электронного и дырочного полупроводников; E_g – ширина запрещенной зоны; E_{Fn} и E_{Fp} – уровни Ферми; eV_k – высота потенциального барьера; d – толщина слоя *p-n*-перехода

Внешнее электрическое поле изменяет высоту потенциального барьера eV_k и нарушает равновесие потоков носителей тока через барьер. Внешнее поле, направление которого совпадает с полем E_k контактного слоя (рисунок 2, *a*), вызывает движение электронов в *n*-полупроводнике и дырок в *p*-полупроводнике от границы *p-n*-перехода в противоположные стороны. В результате запирающий слой расширяется и его сопротивление возрастает. Такое направление внешнего поля называют *запирающим (обратным)*. В запирающем направлении электрический ток через *p-n*-переход практически не проходит.

Внешнее электрическое поле, приложенное к p - n -переходу, противоположно полю контактного слоя (рисунок 2, б) и вызывает движение электронов и дырок к границе p - n -перехода навстречу друг другу.

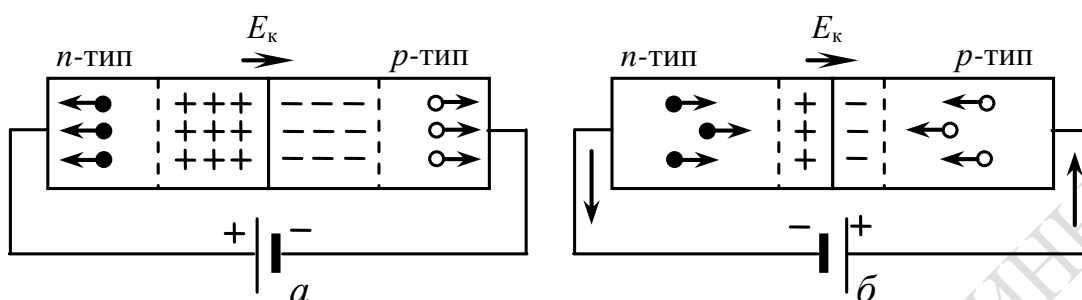


Рисунок 2 – Электронно-дырочный переход во внешнем электрическом поле:
 a – запирающее направление; $б$ – пропускное направление

В области перехода носители рекомбинируют, толщина и сопротивление контактного слоя его уменьшаются. При таком направлении внешнего поля электрический ток проходит сквозь p - n -переход от p - к n -полупроводнику. В результате p - n -переход приобретает *одностороннюю проводимость*, а направление приложенного поля называют *пропускным* или *прямым*.

Зависимость тока, протекающего через p - n -переход, от приложенного напряжения (вольтамперная характеристика) обладает резко выраженной нелинейностью (рисунок 3). При изменении знака U значение тока через p - n -переход изменяется в 10^5 – 10^6 раз. Благодаря этому электронно-дырочный переход является вентильным элементом, используемым в полупроводниковых диодах для выпрямления переменного тока.

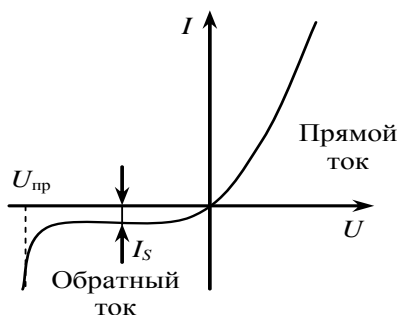


Рисунок 3 – Вольтамперная характеристика p - n -перехода:
 I_s – ток насыщения; $U_{пр}$ – напряжение пробоя

Гетеропереход – контакт двух разных по химическому составу полупроводников. На границе гетероперехода происходит изменение

свойств полупроводникового материала: структуры энергетических зон, ширины запрещенной зоны, эффективных масс носителей заряда, их подвижности и т. д. Гетеропереход называют *изотипным*, если он образован полупроводниками с одинаковым типом проводимости, и *анизотипным*, если механизмы проводимости контактирующих полупроводников разные.

Наибольшее практическое значение имеют гетеропереходы, образованные монокристаллами. Для получения идеальных монокристаллических гетеропереходов (без дефектов кристаллической решетки и поверхностных состояний на границе раздела полупроводников) необходимо, чтобы у полупроводников совпадали коэффициенты термического расширения, типы и периоды кристаллических решеток. Для получения гетеропереходов, близких к идеальным, периоды решеток полупроводников должны совпадать с точностью до $\sim 0,1\%$. В зависимости от способа получения гетероперехода толщина d переходной области между двумя однородными полупроводниками может колебаться в широких пределах. В наиболее «резких» гетеропереходах $d \approx 20 \text{ \AA}$, т. е. равна толщине 4÷5 атомных слоев. Комбинации различных гетеропереходов образуют *гетероструктуры*.

Механизм протекания тока в гетеропереходах обусловлен различием в высотах потенциальных барьеров для электронов и дырок. При так называемом прямом смещении (см. *p-n*-переход) на анизотипном гетеропереходе не одинаковы как потоки носителей между полупроводниками с разной шириной запрещенной зоны, так и токи инжектированных электронов и дырок. Поэтому в гетеропереходах обычно происходит односторонняя инжекция носителей из широкозонного полупроводника (*эмиттера*) в узкозонный.

В электронной технике широко применяют гетеропереходы между полупроводниковыми монокристаллами типа $A^{III}B^V$, например, на основе арсенида галлия. Гетероструктуры получают также на основе многокомпонентных твердых растворов, период решетки которых не изменяется при изменении состава раствора в широких пределах. Изготавливают гетероструктуры методами эпитаксиального наращивания полупроводниковых кристаллов. Гетеропереходы используются в полупроводниковых приборах: транзисторах, тиристорах, гетеролазерах, светодиодах, фотодетекторах и др.

Лабораторная работа 1

Исследование характеристик выпрямительного диода

Цель работы:

- ознакомление с принципами работы полупроводникового диода;
- исследование вольтамперной характеристики (ВАХ) диода и определение основных параметров p - n -перехода;
- изучения влияния температуры на ВАХ диодов.

Приборы и материалы:

- лабораторный стенд К4826;
- комбинированные измерительные приборы Ц3101 и Ц4342;
- тестеры DT5801 и DT920A;
- диод (тип диода на выбор преподавателя);
- муфельная печь;
- термометр для контроля температуры печи.

1. Сведения из теории

Полупроводниковый диод представляет собой электронный прибор на основе p - n -перехода. Схема включения диода и его вольтамперная характеристика (ВАХ) представлены на рисунок 1.1.

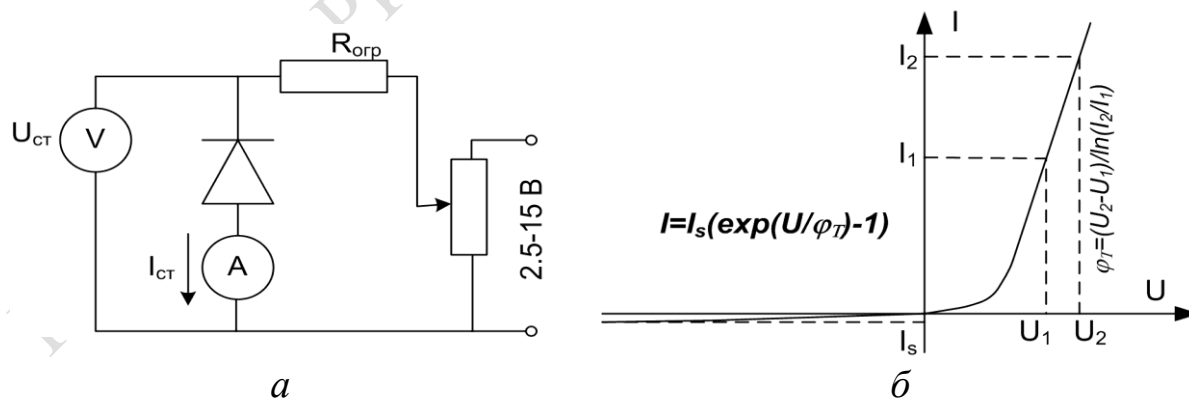


Рисунок 1.1 – Схема включения диода (а)
и его вольтамперная характеристика (б)

В идеализированном случае ВАХ описывается формулой Шокли [2]:

$$I = I_s (e^{U/\varphi_T} - 1), \quad (1.1)$$

где $\varphi_T = kT/q$ – тепловой потенциал;

T – абсолютная температура;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана;

$q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – электрический заряд электрона.

Для гомогенного p - n -перехода ток насыщения (I_s) равен:

$$I_s = q n_i^2 \left[\frac{1}{N_a} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + \frac{1}{N_d} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \right] I_0 e^{-\frac{\Delta E_z}{kT}}, \quad (1.2)$$

где $n_i = N_v \cdot N_c$ – плотность состояний нелегированного полупроводника;

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_{cn} kT}{h^2} \right)^{3/2} \text{ – плотность состояний в зоне проводимости;}$$

$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_{cp} kT}{h^2} \right)^{3/2} \text{ – плотность состояний в валентной зоне;}$$

$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка;

m_{cn} – эффективная масса электронов;

m_{cp} – эффективная масса дырок;

N_a – концентрации акцепторных примесей в p -области;

N_d – концентрации донорных примесей в n -области;

D_n – коэффициент диффузии электронов в p -области;

τ_n – время жизни электронов в p -области;

D_p – коэффициент диффузии дырок в n -области;

τ_p – время жизни дырок в n -области;

ΔE_z – ширина запрещённой зоны.

В случае гетероперехода выражение для тока насыщения записывается в виде:

$$I_s = q \left[\frac{N_n}{N_a} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} e^{-\frac{\Delta E_{zp}}{kT}} + \frac{N_v}{N_d} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} e^{-\frac{\Delta E_{zn}}{kT}} \right] \quad (1.3)$$

где N_v – плотность состояний в валентной зоне;

N_c – плотность состояний в зоне проводимости;

ΔE_{zp} – ширина запрещенной зоны для полупроводника p -типа;

ΔE_{zn} – ширина запрещенной зоны для полупроводника n -типа.

Как правило, при работе выпрямительного диода используется значительная разница между его электрическими сопротивлениями в прямой и обратной полярности включения. В результате этого

положительный сигнал проходит через диод с минимальными потерями, в то время как сигнал отрицательной полярности в значительной степени ослабляется.

Основные параметры p - n -перехода:

1) ток насыщения I_s (рисунок 1.1, б). В идеализированном случае ток насыщения I_s описывается уравнением (1.2).

2) температурный потенциал ϕ_T , который в идеализированном случае описывается следующей формулой

$$\phi_T = \frac{kT}{q}. \quad (1.4)$$

При описании процессов в реальных диодах вводят коэффициент неидеальности n , который показывает, на сколько реальное значение температурного потенциала (см. рисунок 1.1, б) отличается от теоретического (1.4) [3].

2. Экспериментальная часть

1) Собрать измерительную схему (см. рисунок 1.1, а).

2) Снять вольтамперную характеристику диода при комнатной температуре, определить значения I_s и ϕ_T (см. рисунок 1.1, б).

3) Включить муфельную печь и нагреть диод до 40 °С (регулятор нагрева в положении 3,6 А), температура печи контролируется термометром каждые 2–3 минуты с одновременным контролем изменения тока насыщения (при напряжении –20 В).

4) Снять вольтамперную характеристику диода при 40 °С, определить I_s и ϕ_T .

5) Нагреть диод до 60 °С (регулятор нагрева в положении 4,0 А), температура печи контролируется термометром каждые 2–3 минуты с одновременным контролем изменения тока насыщения (при напряжении –20 В).

6) Снять вольтамперную характеристику диода при 60 °С, определить I_s и ϕ_T .

7) Нагреть диод до 90 °С (регулятор нагрева в положении 4,4 А), температура печи контролируется термометром каждые 2–3 минуты с одновременным контролем изменения тока насыщения (при напряжении –20 В).

8) Снять вольтамперную характеристику диода при 90 °С, определить I_s и ϕ_T .

9) Построить графики зависимости I_s (как в процессе нагрева, так и по ВАХ) и ϕ_T от температуры.

10) По формуле (1.2) рассчитать теоретические значения φ_T при рассматриваемых температурах, построить соответствующий график и сравнить его с экспериментальными значениями, определить коэффициент неидеальности диода.

11) Сделать выводы.

3. Контрольные вопросы

1) Опишите устройство и принцип работы выпрямительного диода.

2) Нарисуйте условное графическое обозначение диода и схему его включения для измерения ВАХ.

3) Нарисуйте ВАХ диода и расскажите о физических процессах, определяющих её форму.

4) Перечислите основные параметры ВАХ диода и опишите методику их измерения.

5) Нарисуйте диаграммы энергетических уровней p - n -перехода в прямом и обратном смещении, поясните изменения в положении уровней Ферми.

6) Что такое коэффициент неидеальности p - n -перехода и как его определить?

7) Для чего применяют выпрямительные диоды?

Литература

1. Викулин, И. М. Физика полупроводниковых приборов / И. М. Викулин, В. И. Стафеев. – М. : Советское радио, 1980. – С. 7–56.

2. Зи, С. М. Физика полупроводниковых приборов / С. М. Зи. – М. : Энергия, 1984. – Т. 1. – С. 69–142.

3. Червяков, Г. Г. Электронные приборы / Г. Г. Червяков, С. Г. Прохоров, О. В. Шиндор. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2012. – С. 8–38.

Лабораторная работа 2

Исследование характеристик стабилитрона

Цель работы:

- ознакомление с принципами работы стабилитрона;
- исследование вольтамперной характеристики (ВАХ) стабилитрона и определение его основных параметров;
- изучение влияния температуры на ВАХ стабилитронов.

Приборы и материалы:

- лабораторный стенд К4826;
- комбинированные измерительные приборы 43101 и Ц4342;
- мультиметры DT5801 и DT920A;
- стабилитрон КС175Ж;
- муфельная печь и термометр для контроля температуры печи.

1. Сведения из теории

Стабилитронами, или опорными диодами, называют кремниевые диоды, работающие в режиме электрического пробоя и предназначенные для стабилизации электрического напряжения [1]. Схема включения стабилитрона и его типичная вольтамперная характеристика (ВАХ) представлены на рисунке 2.1.

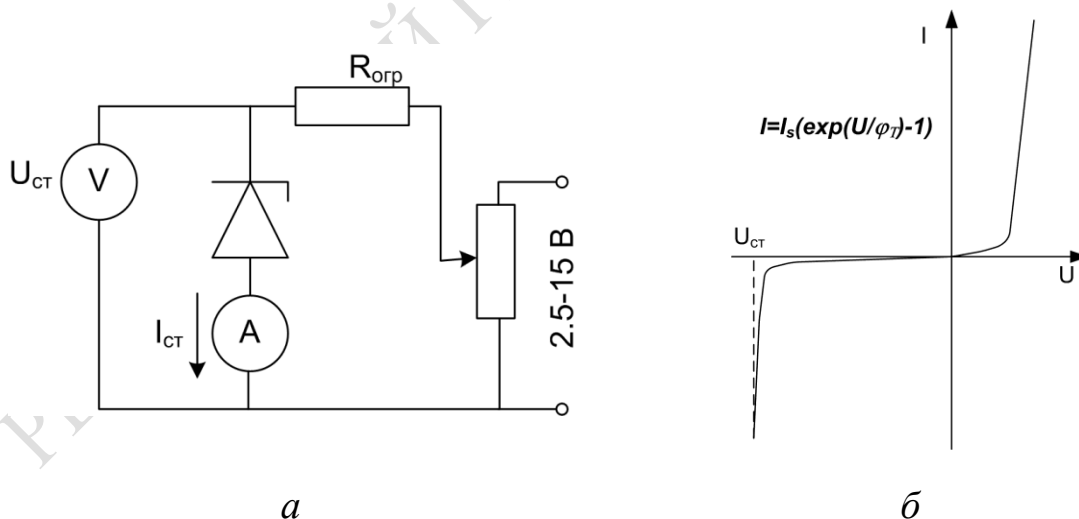


Рисунок 2.1 – Схема включения стабилитрона (*a*) и его вольтамперная характеристика (*б*)

Основные параметры стабилитрона:

- 1) напряжение стабилизации $U_{ст}$, которое практически совпадает с напряжением пробоя стабилитрона (рисунок 2.1, *б*);

2) динамическое (дифференциальное) сопротивление в режиме пробоя:

$$r_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI}; \quad (2.1)$$

3) температурный коэффициент напряжения стабилизации:

$$\text{ТКН} = \frac{1}{U_{\text{ст}}} \left(\frac{dU_{\text{ст}}}{dT} \right) 100 \%. \quad (2.2)$$

В работе стабилитрона используется эффект нарастания электрического тока при сохранении практического постоянного напряжения, возникающий при электрическом пробое p - n -перехода. Данный эффект наблюдается при подаче на диод значительного напряжения отрицательной полярности. При этом различают три вида электрического пробоя: лавинный, туннельный и тепловой.

В основе **туннельного пробоя** лежит туннельный эффект, то есть просачивание электронов с энергией E сквозь потенциальный барьер величиной $E_0 > E$, если толщина последнего W достаточно мала (рисунок 2.2, а) [2]. Он более вероятен для низковольтных стабилитронов на базе сильно легированных полупроводников. Вероятность такого перехода $T_{\text{тун}}$ равна [3]:

$$T_{\text{тун}} = \frac{E_0^2 \sin^2 h^2 W \sqrt{2m^*(E_0 - E)}}{4E(E_0 - E)}, \quad (2.3)$$

где m^* – эффективная масса носителей заряда (электронов).

При этом величина тока $I_{\text{тун}}$, возникающего при туннельном пробое, составляет [3]:

$$I_{\text{тун}} = \frac{q^3 \xi U \sqrt{2m^*}}{4\pi^2 h^2 D E_g^2} \exp \left(-\frac{4D E_g^2 \sqrt{2m^*}}{3q \zeta h} \right) \quad (2.4)$$

где ξ – электрическое поле в p - n -переходе;
 ΔE_g – ширина запрещённой зоны;
 U – величина приложенного напряжения;
 q – элементарный электрический заряд.

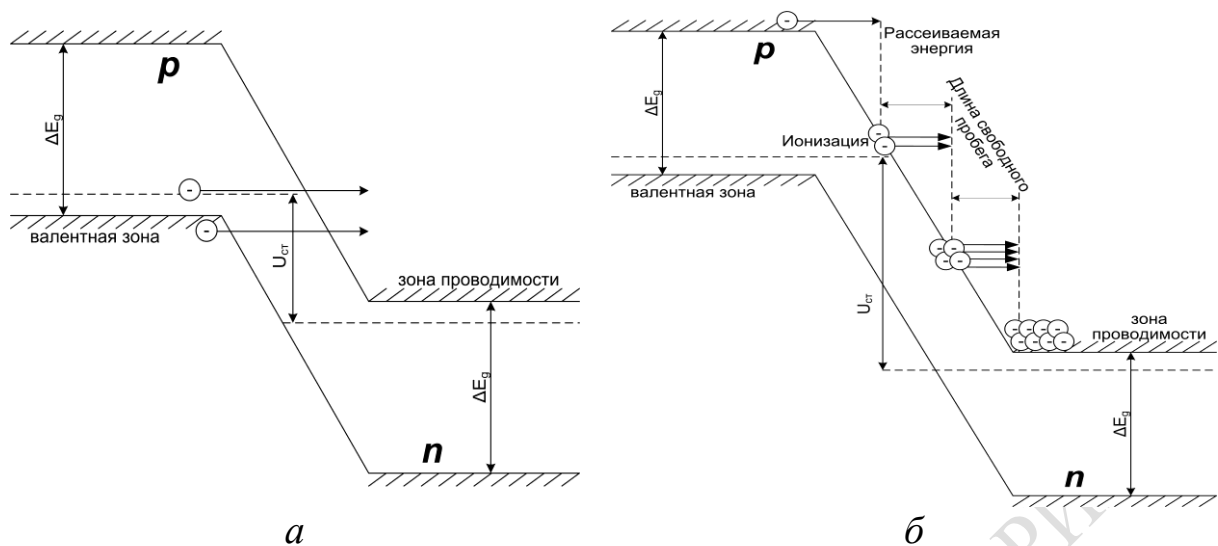


Рисунок 2.2 – Энергетическая диаграмма p - n -перехода при его обратном включении и схема перемещения электронов из p -области в n -область при туннельном переходе (а) и лавинном умножении (б)

В основе **лавиного пробоя** лежит ударная ионизация, обусловленная ускорением неосновных носителей заряда (ток насыщения) в сильном электрическом поле p - n -перехода с их последующим соударением с нейтральными атомами полупроводника, в результате чего за счёт рассеяния кинетической энергии носителей образуются новые электронно-дырочные пары. Такой процесс характерен для стабилитронов с высокоомной базой (слабо легированных), если ширина области объёмного заряда p - n -перехода (d) превышает длину свободного пробега (l).

Для описания лавинного пробоя на практике используют коэффициент умножения тока M , определяемый по эмпирической формуле [4]:

$$M = \frac{I}{I_s} = \frac{U^c}{U_{\text{проб}}^c} \quad (2.5)$$

где I – ток лавинного пробоя;

I_s – ток насыщения p - n -перехода;

U – напряжение;

$c = 2 \div 6$ – постоянный коэффициент, определяемый типом полупроводникового материала;

$U_{\text{проб}}$ – напряжение лавинного пробоя, определяемое соотношением [1]:

$$U_{\text{проб}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta_{\text{кр}}^2}{2qN} \approx 60 \frac{\sqrt{\varepsilon_3}}{1,1 \sqrt{\zeta_3}} \left(\frac{E_3}{10^{20}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (2.6)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость полупроводника;

ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума;

N – концентрация примеси;

a – градиент концентрации примеси в см^{-4} ;

$\xi_{\text{кр}}$ – критическое значение электрического поля в полупроводнике.

Экспериментально установлено, что для кристаллического кремния при величине напряжения $U < 4\Delta E_g/q$ преобладающим является туннельный пробой, при $U > 6\Delta E_g/q$ – лавинный пробой, при $U = 4 \div 6 \Delta E_g/q$ проявляются оба эффекта [3].

Явление **теплового пробоя** связано с тем, что при прохождении обратного тока I_s в p - n -переходе выделяется определенное количество тепла. Если оно превышает количество тепла, отводимое от перехода, то температура p - n -перехода начинает повышаться, что приводит к увеличению концентрации носителей заряда и росту обратного тока:

$$I_s = I_0 \cdot \exp(-\Delta E_g/kT), \quad (2.7)$$

где T – абсолютная температура;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана;

I_0 – некоторая постоянная, не зависящая от температуры. Тепловой пробой происходит при выполнении условия [4]:

$$I_s U \frac{\Delta E_g}{kT^2} > \frac{1}{R_T}, \quad (2.8)$$

где $R_T = \frac{(T - T_K)}{P_0}$ – тепловое сопротивление диода;

T_K – температура корпуса и P_0 – отводимая мощность.

2. Экспериментальная часть

1) Собрать измерительную схему (рисунок 2.1, а).

2) Снять вольтамперную характеристику стабилитрона при комнатной температуре (прямую и обратную ветвь), определить $r_{\text{диф}}$ по формуле (2.1) и $U_{\text{ст}}$.

3) Включить муфельную печь и нагреть стабилитрон до 40°C (регулятор нагрева в положении 3,6 А), температура печи контролируется термометром каждые 2–3 минуты с одновременным контролем изменения напряжения стабилизации при токе пробоя в 60 мА.

4) Снять вольтамперную характеристику стабилитрона при 40°C , определить $r_{\text{диф}}$ и $U_{\text{ст}}$.

5) Нагреть стабилитрон до 60 °С (регулятор нагрева в положении 4,0А), температура печи контролируется термометром каждые 2–3 минуты с одновременным контролем изменения напряжения стабилизации при токе пробоя в 60 мА.

6) Снять вольтамперную характеристику стабилитрона при 60 °С, определить $r_{\text{диф}}$ и $U_{\text{ст}}$.

7) Нагреть стабилитрон до 90 °С (регулятор нагрева в положении 4,4А), температура печи контролируется термометром каждые 2–3 минуты с одновременным контролем изменения напряжения стабилизации при токе пробоя в 60 мА.

8) Снять вольтамперную характеристику стабилитрона при 90 °С, определить $r_{\text{диф}}$ и $U_{\text{ст}}$.

9) Построить графики зависимости $U_{\text{ст}}$ (как в процессе нагрева, так и по ВАХ) и $r_{\text{диф}}$ от температуры, найти значения ТКН (по формуле 2.2).

10) Сравнить полученные зависимости и сделать выводы.

3. Контрольные вопросы

1) Опишите принципы работы стабилитрона. Какие типы пробоя *p-n*-перехода могут использоваться в данном приборе?

2) Нарисуйте условное графическое обозначение стабилитрона и схему его включения для стабилизации напряжения.

3) Нарисуйте ВАХ стабилитрона и расскажите о физических процессах, определяющих её форму.

4) Перечислите основные параметры кремниевого стабилитрона и опишите методику их измерения.

5) Для чего стабилитроны применяют в электронной аппаратуре?

Литература

1. Лысенко, А. П. Исследование основных параметров кремниевых стабилитронов : методические указания к лабораторной работе № 30 по дисциплине «Микроэлектроника» / А. П. Лысенко. – Москва : МГИЭМ, 2005. – <http://fe.miem.edu.ru>.

2. Викулин, И. М. Физика полупроводниковых приборов / И. М. Викулин, В. И. Стафеев. – М. : Советское радио, 1980. – С. 36–56.

3. Зи, С. М. Физика полупроводниковых приборов / С. М. Зи. – М. : Энергия, 1984. – Т. 1. – С. 103–117.

4. Червяков, Г. Г. Электронные приборы / Г. Г. Червяков, С. Г. Прохоров, О. В. Шиндор. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2012. – С. 45–51.

Лабораторная работа 3

Исследование характеристик полевого транзистора

Цель работы:

- ознакомление с принципами работы полевого транзистора (ПТ) и схемами его включения;
- исследование характеристик полевого транзистора.

Приборы и материалы:

- лабораторный стенд К4826;
- комбинированные измерительные приборы 43101 и Ц4342;
- мультиметры DT5801 и DT920A;
- полевой транзистор (КП103, КП303, IRF740 или IRF9530 – на выбор преподавателя).

1. Сведения из теории

Полевыми (униполярными) транзисторами (ПТ) называются транзисторы, работа которых основана на управлении размерами токопроводящей области (канала) посредством изменения напряжённости поперечно приложенного электрического поля. Протекание в полевом транзисторе рабочего тока обусловлено носителями заряда только одного знака (электронами или дырками), поэтому такие приборы часто включают в более широкий класс униполярных электронных приборов (в отличие от биполярных). Различают два вида полевых транзисторов: с *управляющим p - n -переходом* и с *изолированным затвором*. Все они имеют три электрода (рисунок 3.1): *исток* (источник носителей тока), *затвор* (управляющий электрод) и *сток* (электрод, куда стекают носители). Область, толщина и поперечное сечение которой управляется внешним напряжением на управляющем p - n -переходе и по которой проходит управляемый ток основных носителей, называют *каналом*.

Электропроводность канала может быть как n -, так и p -типа. Поэтому по электропроводности канала различают полевые транзисторы с n -каналом и p -каналом (рисунок 3.1, б). Все полярности напряжений смещения, подаваемых на электроды транзисторов с n - и с p -каналом, противоположны.

Управление током стока, то есть током от внешнего относительно мощного источника питания в цепи нагрузки, происходит

при изменении обратного напряжения на p - n -переходе затвора. В связи с малостью обратных токов мощность, необходимая для управления током стока и потребляемая от источника сигнала в цепи затвора, оказывается ничтожно малой. Поэтому полевой транзистор может обеспечить усиление электромагнитных колебаний как по мощности, так и по току и напряжению.

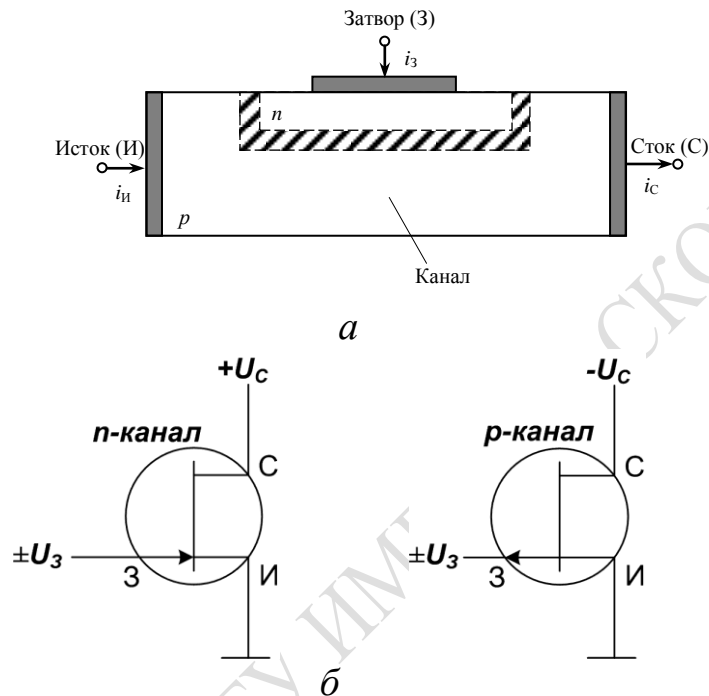


Рисунок 3.1 – Упрощённая схема полевого транзистора (а) и схематическое изображение полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом для n - и p -каналов (б)

Таким образом, полевой транзистор по принципу действия аналогичен вакуумному триоду. Исток в полевом транзисторе подобен катоду вакуумного триода, затвор – сетке, сток – аноду. Но при этом полевой транзистор существенно отличается от вакуумного триода. Во-первых, для работы полевого транзистора не требуется подогрева катода. Во-вторых, любую из функций истока и стока может выполнять каждый из этих электродов. В-третьих, полевые транзисторы могут быть сделаны как с n -каналом, так и с p -каналом, что позволяет удачно сочетать эти два типа полевых транзисторов в схемах.

Полевой транзистор можно включать по одной из трех основных схем: с общим истоком (ОИ), общим стоком (ОС) и общим затвором (ОЗ). На практике чаще всего применяется схема с ОИ. Каскад с общим истоком даёт очень большое усиление тока и мощности. Схема с ОЗ не даёт усиления тока, и поэтому усиление мощности в ней во

много раз меньше, чем в схеме ОИ. Каскад ОЗ обладает низким входным сопротивлением, в связи с чем он имеет ограниченное практическое применение в усилительной технике.

Транзистор с управляющим p - n -переходом – это полевой транзистор, затвор которого изолирован (т. е. отделён в электрическом отношении) от канала p - n -переходом, смещённым в обратном направлении.

Удельное сопротивление слоя n (затвора) намного меньше удельного сопротивления слоя p (канала), поэтому область p - n -перехода, обедненная подвижными носителями заряда и имеющая очень большое удельное сопротивление, расположена главным образом в слое p .

Если типы проводимости слоев полупроводника в рассмотренном транзисторе изменить на противоположные, то получим полевой транзистор с управляющим p - n -переходом и каналом n -типа. Если положительное напряжение подать между затвором и истоком транзистора с каналом p -типа ($U_{зи} > 0$), то оно сместит p - n -переход в обратном направлении.

При увеличении обратного напряжения на переходе он расширяется в основном за счет канала (в силу указанного выше различия в удельных сопротивлениях). Увеличение ширины перехода уменьшает толщину канала и, следовательно, увеличивает его сопротивление. Это приводит к уменьшению тока между истоком и стоком. Именно это явление позволяет управлять током с помощью напряжения и соответствующего ему электрического поля. Если напряжение $U_{зи}$ достаточно велико, то канал полностью перекрывается областью p - n -перехода (напряжение отсечки).

В рабочем режиме p - n -переход должен находиться под обратным или нулевым напряжением. Поэтому в рабочем режиме ток затвора примерно равен нулю ($I_3 \approx 0$), а ток стока практически равен току истока.

Полевой транзистор с изолированным затвором – это транзистор, затвор которого отделен в электрическом отношении от канала слоем диэлектрика. Физической основой работы таких транзисторов является эффект поля, который состоит в изменении концентрации свободных носителей заряда в приповерхностной области полупроводника под действием внешнего электрического поля. В соответствии с их структурой такие транзисторы называют **МДП-транзисторами** (металл-диэлектрик-полупроводник) или **МОП-транзисторами** (металл-оксид-полупроводник). Существуют две разновидности МДП-транзисторов: с индуцированным и со встроенным каналами. На рисунке 3.2 показан принцип устройства транзистора со встроенным каналом.

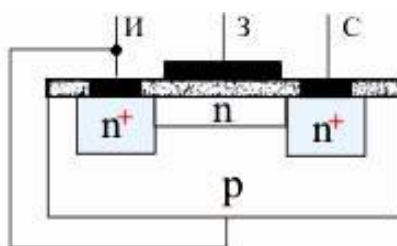


Рисунок 3.2 – Устройство МДП-транзистора со встроенным каналом n -типа

Основанием (подложкой) служит кремниевая пластинка с электропроводностью p -типа. В ней созданы две области с электропроводностью n^+ -типа с повышенной проводимостью. Эти области являются истоком и стоком и от них сделаны выводы. Между стоком и истоком имеется приповерхностный канал с электропроводностью n -типа. Заштрихованная область – диэлектрический слой из диоксида кремния (его толщина обычно составляет 0,1–0,2 мкм). Сверху диэлектрического слоя расположен затвор в виде тонкой металлической пленки. Кристалл такого транзистора обычно соединен с истоком, и его потенциал принимается за нулевой. Иногда от кристалла бывает сделан отдельный вывод.

Если к затвору приложено нулевое напряжение, то при подаче между стоком и истоком напряжения через канал потечет ток, представляющий собой поток электронов. Через кристалл ток не пойдет, так как один из p - n -переходов находится под обратным напряжением. При подаче на затвор напряжения отрицательной полярности относительно истока (следовательно, и кристалла) в канале образуется поперечное электрическое поле, которое выталкивает электроны из канала в области истока, стока и кристалла. Канал обедняется электронами, его сопротивление увеличивается, ток уменьшается. Чем больше напряжение на затворе, тем меньше ток. Такой режим называется **режимом обеднения**. Если подать положительное напряжение на затвор, то под действием поля из областей стока, истока и кристалла в канал будут приходить электроны. Сопротивление канала падает, ток увеличивается. Такой режим называется **режимом обогащения**. Если кристалл n -типа, то канал должен быть p -типа – и полярность напряжения меняется на противоположную.

Основными характеристиками полевого транзистора являются **стокзатворная ВАХ** (зависимость тока в канале I_C от напряжения на затворе $U_{зи}$) и **выходная ВАХ** (зависимость тока в канале I_C от напряжения между стоком и истоком $U_{си}$). Схемы включения различных типов полевых транзисторов и соответствующие характеристики представлены на рисунке 3.3.

	ПТ с <i>n</i> -каналом			ПТ с <i>p</i> -каналом		
	Полярность напряжений	Сток-затворная ВАХ	Выходная ВАХ	Полярность напряжений	Сток-затворная ВАХ	Выходная ВАХ
С управляющим <i>p-n</i> переходом						
МОП/МДП (тип канала) Индуцированный						
МОП/МДП Встроенный						

Рисунок 3.3 – Схемы включения и характеристики полевых транзисторов

В ПТ используется движение только основных носителей заряда от истока к стоку через токопроводящий канал, проводимость которого регулируется за счёт изменения электрического поля на управляющем затворе. При этом основная регуляция осуществляется за счёт изменения ширины канала путём смещения области, обеднённой носителями заряда (режим обеднения), или за счёт увеличения концентрации носителей заряда, притягиваемых затвором (режим обогащения).

Основные параметры полевых транзисторов находятся из соответствующих ВАХ (рисунок 3.4), измеряемых согласно типовой схеме для исследования полевого транзистора (рисунок 3.5). К ним относятся:

– крутизна стокзатворной характеристики S (рисунок 3.4, б):

$$S = \frac{dI_c}{dU_{зи}}, \text{ мА/В}; \quad (3.1)$$

– внутреннее дифференциальное сопротивление r_i (рисунок 3.4, а):

$$r_i = \frac{dU_{зи}}{dI_c}, \text{ Ом} \quad (3.2)$$

– коэффициент усиления по напряжению (рисунок 3.4, в):

$$K_U = \frac{DU_{СИ}}{DU_{ЗИ}} = \frac{DU_{ВЫХ}}{DU_{ВХ}}, \quad (3.3)$$

– предельный коэффициент усиления по напряжению K :

$$K = S \cdot r_i. \quad (3.4)$$

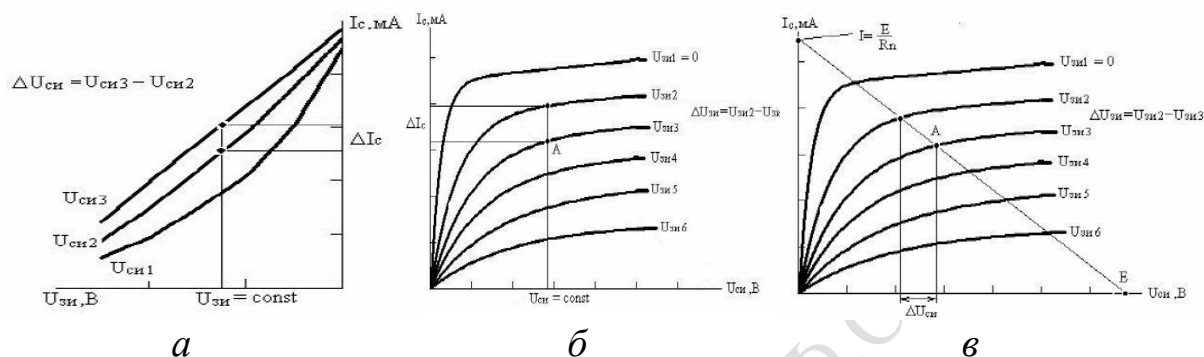


Рисунок 3.4 – Определение внутреннего дифференциального сопротивления (а), измерение крутизны стокзатворной характеристики (б) и коэффициента усиления по напряжению (в) для полевого транзистора

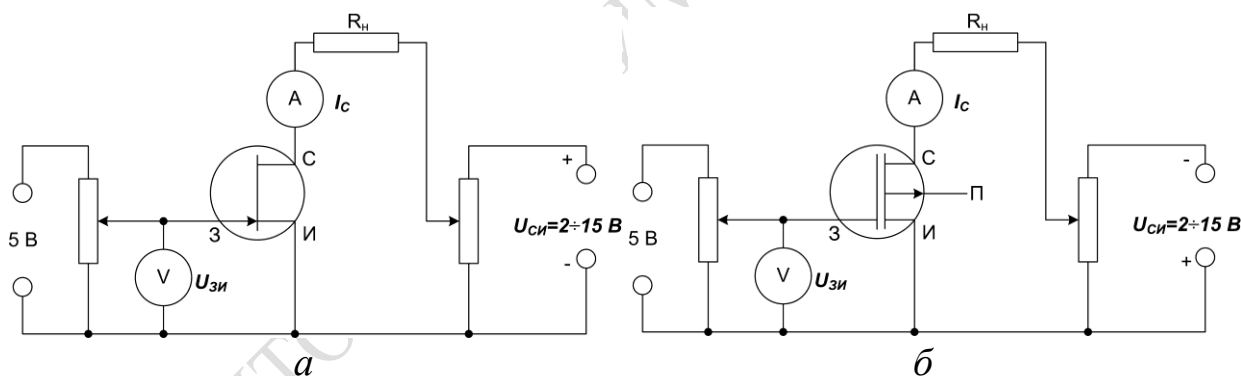


Рисунок 3.5 – Измерительная схема для исследования полевого транзистора: ПТ с управляющим $p-n$ -переходом и каналом n -типа (а), МДП-транзистор с каналом p -типа (б).

2. Экспериментальная часть

1) Собрать измерительную схему, ориентируясь на тип исследуемого полевого транзистора (рисунок 3.5).

2) Снять стокзатворные ВАХ полевого транзистора (ток канала в зависимости от напряжения на затворе) при различных уровнях напряжения между стоком и истоком (для ПТ с каналом n -типа: $U_{СИ} = -5, 5, 10, 15$ В; для ПТ с каналом p -типа: $U_{СИ} = 5, -5, -10, -15$ В соответственно).

3) Снять выходные ВАХ полевого транзистора (ток канала в зависимости от напряжения сток-исток) при различных уровнях напряжения на затворе для ПТ с каналом n -типа: $U_{зи} = -5, -3, -1, 0, 1, 2$ В; для ПТ с каналом p -типа: $U_{зи} = -2, -1, 0, 1, 3, 5$ В соответственно.

4) Построить соответствующие графики (ВАХ).

5) Определить крутизну стокзатворной характеристики по формуле (3.1) для различных значений $U_{си}$.

6) Определить внутреннее дифференциальное сопротивление по формуле (3.2) для различных значений $U_{зи}$.

7) Определить коэффициент усиления по напряжению по формуле (3.3) и сравнить его с предельным значением (формула (3.4)).

8) Построить графики зависимостей $S(U_{си})$ и $r_i(U_{зи})$.

9) Сделать выводы.

3. Контрольные вопросы

1) Опишите принципы работы полевого транзистора. Что такое исток, сток, канал и затвор?

2) Какие типы полевых транзисторов вы знаете?

3) Нарисуйте условное графическое обозначение полевого транзистора и схему его включения для усиления сигнала.

4) Нарисуйте главную ВАХ ПТ и расскажите о физических процессах, определяющих её форму.

5) Перечислите основные параметры полевого транзистора и опишите методику их измерения.

6) Что такое МОП- и МДП-структуры?

7) Чем отличаются МДП-структуры со встроенным и индуцированным каналом?

8) Для чего применяют полевые транзисторы?

Литература

1. Викулин, И. М. Физика полупроводниковых приборов / И. М. Викулин, В. И. Стафеев. – М. : Советское радио, 1980. – С. 137–161.

2. Зи, С. М. Физика полупроводниковых приборов / С. М. Зи. – М. : Энергия, 1984. – Т1. – С. 325–450. – Т. 2. – С. 5–90.

3. Червяков, Г. Г. Электронные приборы / Г. Г. Червяков, С. Г. Прохоров, О. В. Шиндор. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2012. – С. 124–135.

Лабораторная работа 4

Исследование характеристик биполярного транзистора

Цель работы:

- ознакомление с принципами работы биполярного транзистора и схемами его включения;
- исследование характеристик биполярного транзистора.

Приборы и материалы:

- лабораторный стенд К4826;
- комбинированные измерительные приборы 43101 и Ц4342;
- тестеры DT5801 и DT920A;
- биполярный транзистор (КТ315Б или КТ361Б – на выбор преподавателя);
- источник постоянного тока Б5-46.

1. Сведения из теории

Биполярными транзисторами называют полупроводниковые приборы с двумя взаимодействующими электрическими $p-n$ -переходами, которые способны усилить сигнал по мощности за счёт внешнего источника питания. В биполярном транзисторе в переносе тока одновременно принимают участие два типа носителей зарядов – электроны и дырки. Переход, работающий в прямом направлении, называется эмиттерным, а соответствующий крайний слой – эмиттером. Переход, работающий в обратном направлении, называется коллекторным, а соответствующий крайний слой – коллектором (рисунок 4.1).

При отключенном эмиттере ($p-n$ -переход включён в обратной полярности) ток коллектора $I_{к60}$ будет равен току насыщения I_S коллекторного $p-n$ -перехода, определяемого по формуле Шокли. Если же эмиттерный переход включается в прямом направлении, то инжектированные им основные носители заряда (дырки для $p-n-p$, электроны для $n-p-n$ структур) проходят через базу и увеличивают ток коллекторного перехода. При этом для уменьшения рекомбинационных потерь в базе, её ширина W должна быть меньше диффузионной длины соответствующих носителей заряда (L_p или L_n). Соответствующие схемы включения и энергетические диаграммы $n-p-n$ и $p-n-p$ транзисторов представлены на рисунках 4.2(а) и 4.2(б). Очевидно, что изменение тока коллектора при таком включении не может превышать изменения тока в эмиттере, т. е. коэффициент усиления по току будет

меньше 1, однако при $U_{кб} > I_{к}R_{н}$ можно получить усиление по мощности, так как нагрузочное сопротивление $R_{н}$ намного превышает сопротивление эмиттера при его прямом смещении.

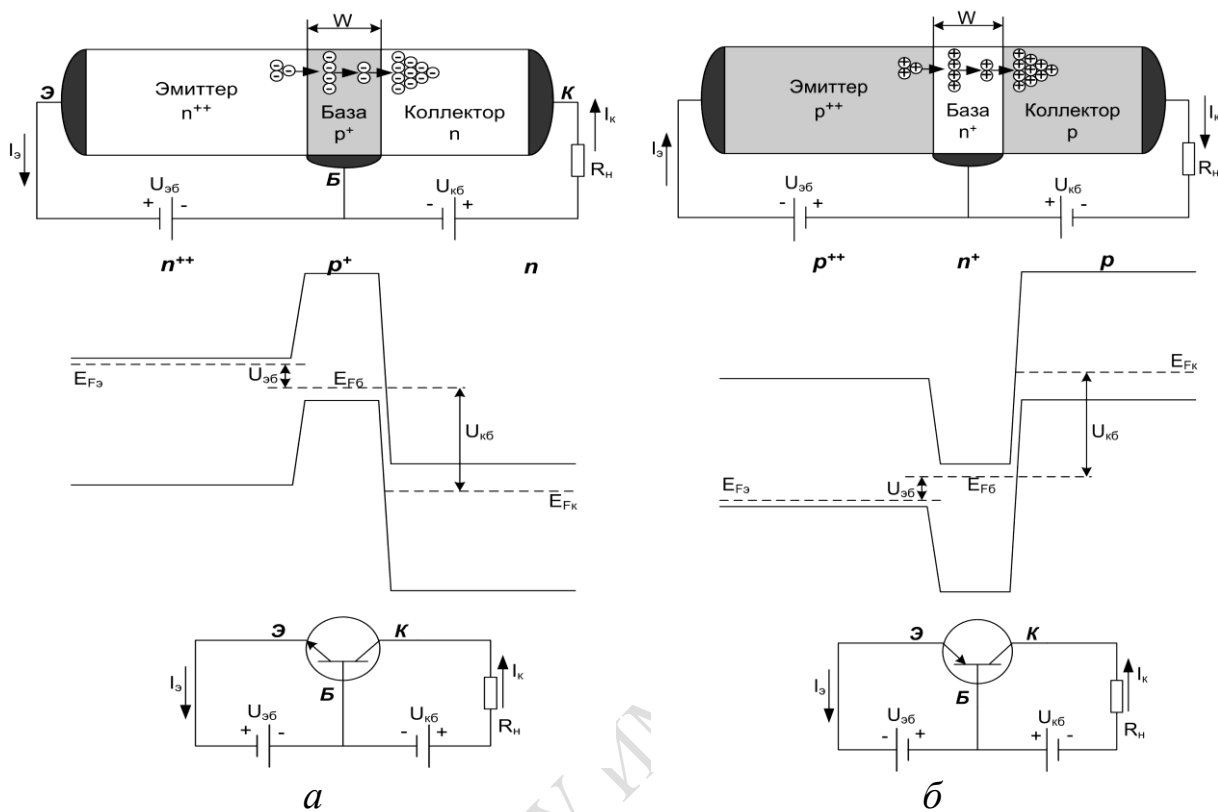


Рисунок 4.1 – Структура, энергетическая диаграмма при рабочих смещениях и эквивалентная электрическая схема $n-p-n$ (а) и $p-n-p$ (б) транзисторов при включении с общей базой

Усилительные свойства $n-p-n$ транзистора в схеме с общей базой (рисунок 4.1, а) характеризуются **коэффициентом передачи тока** $h_{21Б} = (I_{к}/I_{э})_{U_{кб}=const}$, который равен:

$$h_{21Б} = \frac{I_{к}}{I_{пэ} + I_{нэ}} = \frac{I_{нэ}}{I_{пэ} + I_{нэ}} \frac{I_{нк}}{I_{нэ}} \frac{I_{к}}{I_{нк}} = \gamma \beta \gamma_{к}, \quad (4.1)$$

где $\gamma = I_{нэ} / (I_{нэ} + I_{пэ}) = (1 + I_{пэ}/I_{нэ})^{-1}$ – эффективность эмиттера;

$\beta = I_{нк}/I_{нэ}$ – коэффициент переноса;

$\beta = I_{к}/I_{нк}$ – эффективность коллектора;

$I_{нэ}$ и $I_{пэ}$ – токи электронов и дырок через эмиттерный переход;

$I_{нк}$ и $I_{рк}$ – токи электронов и дырок через коллекторный переход.

Для получения высокой **эффективности эмиттера** необходимо выполнение условия $I_{нэ} \gg I_{пэ}$. Тогда, с учётом соотношений $I_{пэ} \sim D_{п}p_{н}/L_{п}$ и $I_{нэ} \sim D_{н}n_{п}/L_{н}$, получаем:

$$\gamma \approx 1 - I_{p3}/I_{n3} = 1 - D_p p_n L_n / D_n n_p L_p = 1 - \mu_{nn} \mu_{pn} \sigma_p W / \mu_{pp} \mu_{np} \sigma_n L_p, \quad (4.2)$$

где D_p и D_n – коэффициенты диффузии дырок и электронов;

L_p и L_n – диффузионная длина для дырок и электронов;

p_n и n_p – концентрация дырок и электронов в n - и p -областях соответственно;

μ_{pp} и μ_{pn} – подвижность дырок, а μ_{np} и μ_{nn} – подвижность электронов в p - и n -областях эмиттерного перехода;

σ_p и σ_n – проводимость p - и n -областей.

Так как $p_n n_n = n_p p_p$, то в качестве эмиттерного применяется несимметричный n^{++}/p^+ переход, в котором $n_n \gg p_p$, причём $L_n, L_p \gg W$.

Коэффициент переноса β на частоте ω может быть выражен согласно формуле

$$\beta = \operatorname{sch} \frac{W}{L_n} \sqrt{1 + j\omega\tau_n} \quad (4.3)$$

для низких частот $\omega\tau_n \ll 1$ и малой ширины базы $L_n, L_p \gg W$, с учётом рекомбинации:

$$\beta = \operatorname{sch} \frac{W}{L_n} \gg 1 - 0,5 \frac{W}{L_n} \frac{S_s}{S_3 D_p} = 1 - (W/L_n)^2 (0,5 + sA\tau_n/S_3), \quad (4.4)$$

где s – скорость поверхностной рекомбинации;

$S_s = AW$ – площадь поверхности рекомбинации;

S_3 – площадь эмиттера.

По аналогии с эмиттером, выражение для эффективности коллектора записывается в виде:

$$\gamma_k = 1 + I_{pk} / I_{nk} = 1 + \mu_p p / \mu_n n. \quad (4.5)$$

Существует три основные схемы включения транзистора (рисунок 4.2): с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ) или общим коллектором (ОК). При этом выделяют три соответствующих коэффициента передачи по току:

1) схема с ОБ (рисунок 4.2, а): $h_{21Б}$ задаётся соотношением (4.1);

2) схема с ОЭ (рисунок 4.2, б):

$$h_{21Э} = I_k / I_6 = I_k / (I_3 - I_k) = h_{21Б} / (1 - h_{21Б}); \quad (4.6)$$

3) схема с ОК (рисунок 4.2, в):

$$h_{21К} = I_3 / I_6 = I_3 / (I_3 - I_k) = 1 / (1 - h_{21Б}). \quad (4.7)$$

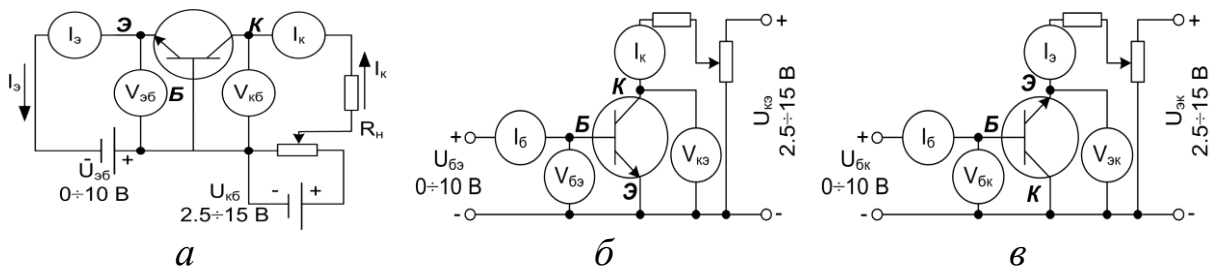


Рисунок 4.2 – Схемы включения биполярного транзистора: с общей базой – ОБ (а), с общим эмиттером – ОЭ (б), с общим коллектором – ОК (в)

Как правило, при расчёте схем на транзисторах удобно представить его в виде линейного четырёхполюсника, характеризуемого входными U_1 и I_1 и выходными U_2 и I_2 напряжениями и токами. Соответствующие входные и выходные вольтамперные характеристики для каждой из рассматриваемых схем включения транзистора представлены на рисунке 4.3.

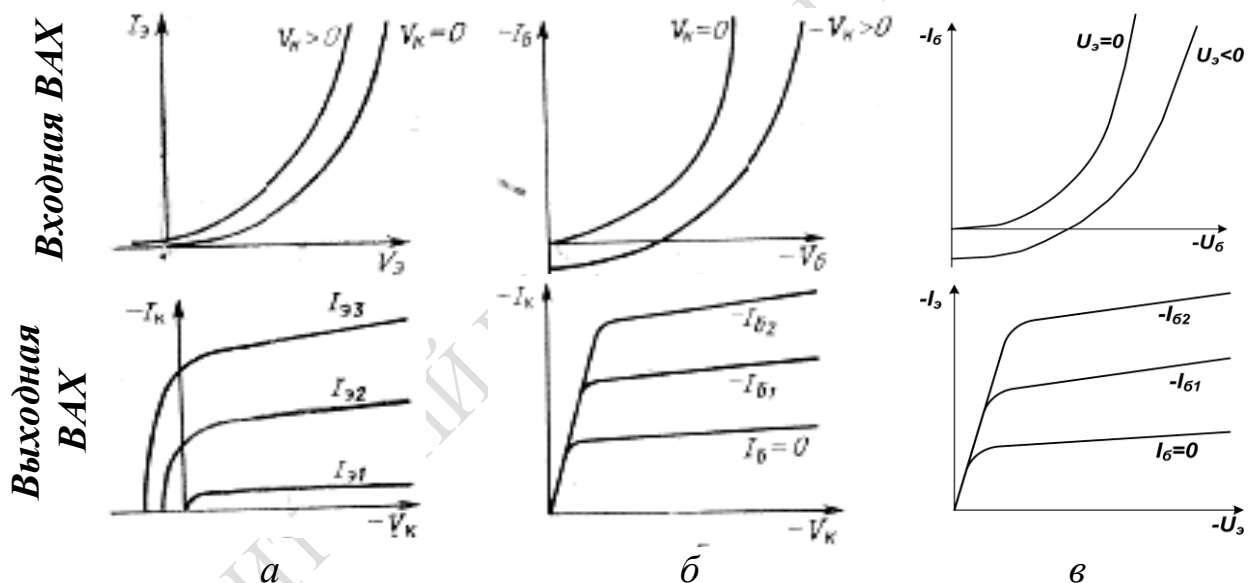


Рисунок 4.3 – Входные и выходные вольтамперные характеристики (ВАХ) транзистора по схеме: с общей базой – ОБ (а), с общим эмиттером – ОЭ (б), с общим коллектором – ОК (в)

Для описания транзистора используют три основные системы параметров:

1) **Z-параметры** (сопротивление):

$$\begin{aligned} U_1 &= Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2, \\ U_2 &= Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2, \end{aligned} \tag{4.8}$$

где $Z_{11} = (U_1 / I_1)_{I_2=0}$ – входное сопротивление транзистора при холостом ходе на выходе;

$Z_{12} = (U_1 / I_2)_{I_1=0}$ – сопротивление обратной связи при холостом ходе на входе;

$Z_{21} = (U_2 / I_1)_{I_2=0}$ – сопротивление прямой передачи при холостом ходе на выходе;

$Z_{22} = (U_2 / I_2)_{I_1=0}$ – выходное сопротивление транзистора при холостом ходе на входе.

2) **Y-параметры** (проводимость):

$$I_1 = Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2,$$

$$I_2 = Y_{21}I_1 + Y_{22}I_2, \quad (4.9)$$

где $Y_{11} = (I_1 / U_1)_{U_2=0}$ – входная проводимость транзистора при короткозамкнутом выходе;

$Y_{12} = (I_1 / U_2)_{U_1=0}$ – проводимость обратной связи при коротком замыкании на входе;

$Y_{21} = (I_2 / U_1)_{U_2=0}$ – проводимость прямой передачи при коротком замыкании на выходе;

$Y_{22} = (I_2 / U_2)_{U_1=0}$ – выходная проводимость транзистора при короткозамкнутом входе.

3) **H-параметры** (гибридные):

$$U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2,$$

$$I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2, \quad (4.10)$$

где $h_{11} = (U_1 / I_1)_{U_2=0}$ – входное сопротивление транзистора при короткозамкнутом выходе;

$h_{12} = (U_1 / U_2)_{I_1=0}$ – коэффициент обратной связи по напряжению при холостом ходе на входе транзистора;

$h_{21} = (I_2 / I_1)_{U_2=0}$ – коэффициент передачи тока при короткозамкнутом выходе;

$h_{22} = (I_2 / U_2)_{I_1=0}$ – выходная проводимость транзистора при холостом ходе на входе.

2. Экспериментальная часть

1) Собрать измерительную схему с общей базой (рисунок 2, а), для эмиттерного перехода использовать источник постоянного тока Б5-46, для коллекторного – блок питания на 15 В от стенда К-4826 ограничительным резистором 100 Ом.

2) Снять входную вольтамперную характеристику транзистора (прямую и обратную ветви) при закороченном коллекторном

переходе, определить напряжение пробоя эмиттерного перехода.

3) Снять выходную вольтамперную характеристику транзистора (прямую и обратную ветви) при закороченном эмиттерном переходе.

4) Убедиться в работоспособности транзистора (оба $p-n$ -перехода должны обладать ВАХ, характерными для диода), в случае необходимости, заменить прибор.

5) Снять выходную вольтамперную характеристику транзистора (рисунок 4.3, а), варьируя напряжение в цепи коллектора при токах в цепи эмиттера в 30, 60, 90 и 120 мА (задаются блоком питания Б5-46), определить параметры Z_{22} по формуле (4.8) и h_{21} по формуле (4.10).

6) Снять входную вольтамперную характеристику транзистора (рисунок 4.3, а), варьируя напряжение в цепи эмиттера при напряжении в цепи коллектора в 5, 10 и 15 В, определить параметры Z_{11} по формуле (4.8).

7) Сделать выводы.

3. Контрольные вопросы

1) Назовите два типа биполярных транзисторов и перечислите их составные части.

2) Чем эмиттер отличается от коллектора?

3) Опишите принципы работы $n-p-n$ биполярного транзистора и охарактеризуйте основные рабочие режимы.

4) Перечислите основные схемы включения биполярных транзисторов и охарактеризуйте их входные / выходные вольтамперные характеристики.

5) Какие параметры используются для описания работы биполярного транзистора?

6) Запишите систему гибридных уравнений для биполярного транзистора. Что такое h_{21} и как он определяется в схеме включения с общей базой?

7) Для каких целей используются биполярные транзисторы?

Литература

1. Викулин, И. М. Физика полупроводниковых приборов / И. М. Викулин, В. И. Стафеев. – М. : Советское радио, 1980. – С. 93–135.

2. Зи, С. М. Физика полупроводниковых приборов / С. М. Зи. – М. : Энергия, 1984. – Т. 1. – С. 142–202.

3. Червяков, Г. Г. Электронные приборы / Г. Г. Червяков, С. Г. Прохоров, О. В. Шиндор. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2012. – С. 70–124.

Лабораторная работа 5

Исследование характеристик тиристора

Цель работы:

- ознакомление с принципами работы тиристора и схемами его включения;
- измерение вольтамперных характеристик тиристора и определение его основных параметров.

Приборы и материалы:

- лабораторный стенд;
- комбинированные измерительные приборы 43101 и Ц4342;
- тестеры DT5801 и DT920A;
- тиристор (КУ101Б, S6050J или BT103 – на выбор преподавателя).

1. Сведения из теории

Тиристорами называют большое семейство полупроводниковых приборов, которые обладают бистабильными характеристиками и способны переключаться из одного состояния в другое. В одном состоянии тиристор имеет высокое сопротивление и малый ток (закрытое или выключенное), в другом – низкое сопротивление и большой ток (открытое или включенное). Принцип действия тиристора тесно связан с принципом действия биполярного транзистора, в котором и электроны, и дырки участвуют в механизме проводимости. В зависимости от количества выводов различают динисторы (два – анод/катод) и тринисторы (три – анод/катод и управляющий электрод) [1]. Основные схемы тиристорной структуры показаны на рисунке 5.1.

Тиристор представляет собой четырёхслойный полупроводник структуры $p-n-p-n$, содержащий три последовательно соединённых $p-n$ -перехода J_1, J_2, J_3 . Контакт к внешнему p -слою называется анодом, к внешнему n -слою – катодом. В общем случае $p-n-p-n$ -прибор может иметь до двух управляющих электродов (баз), присоединённых к внутренним слоям. Подачей сигнала на управляющий электрод производится управление тиристором (изменение его состояния). Прибор без управляющих электродов называется *диодным тиристором* или *динистором*. Такие приборы управляются напряжением, приложенным между основными электродами. Прибор с одним управляющим электродом называют *триодным тиристором*, или *тринистором* (рисунок 5.2). В зависимости от того, к какому слою полупроводника подключён управляющий электрод, тринисторы бывают управляемыми по аноду и по катоду. Наиболее распространены последние.

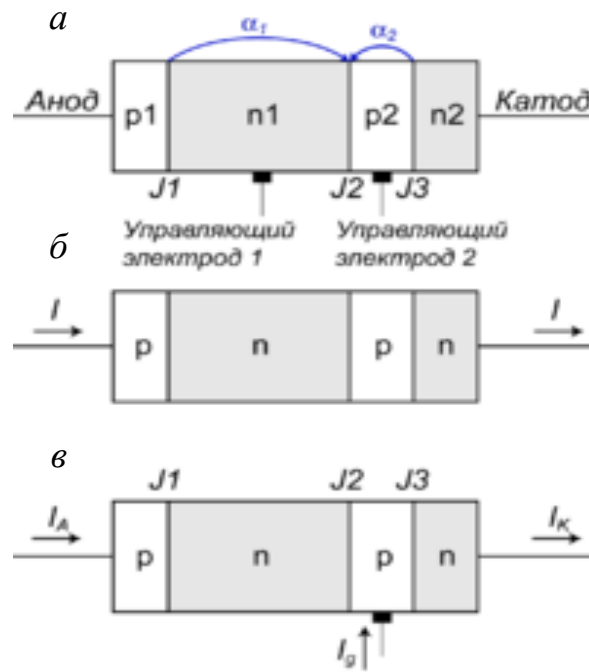


Рисунок 5.1 – Схемы тиристора:

а – основная четырёхслойная $p-n-p-n$ -структура, б – диодный тиристор, в – триодный тиристор (тринистор)



Рисунок 5.2 – Обозначение тристора на схемах

Тиристоры, имеющие управляющий электрод, делятся на запираемые и незапираемые. Незапираемые тиристоры, как следует из названия, не могут быть переведены в закрытое состояние с помощью сигнала, подаваемого на управляющий электрод. Такие тиристоры закрываются, когда протекающий через них ток становится меньше тока удержания. На практике это обычно происходит в конце полуволны сетевого напряжения.

Тиристор имеет нелинейную **вольт-амперную характеристику** (ВАХ) с участком отрицательного дифференциального сопротивления (рисунок 5.3,б). По сравнению, например, с транзисторными ключами, управление тиристором имеет некоторые особенности. Переход тиристора из одного состояния в другое в электрической цепи происходит скачком (лавинообразно) и осуществляется внешним воздействием на прибор: либо напряжением (током), либо светом

(для фототиристора). После перехода тиристора в открытое состояние он остаётся в этом состоянии даже после прекращения управляющего сигнала, если протекающий через тиристор ток превышает некоторую величину, называемую током удержания.

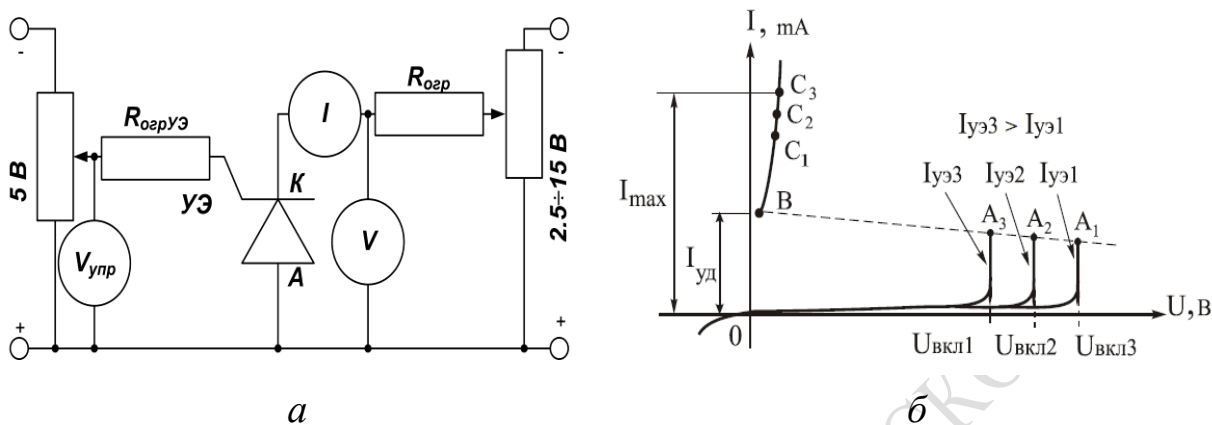


Рисунок 5.3 – Схема включения тринистора (а) и его вольтамперные характеристики (б)

Основными параметрами тринистора (рисунок 5.1, б) являются [2]:

- 1) напряжение и ток включения $U_{\text{вкл}}$, $I_{\text{вкл}}$;
- 2) напряжение и ток выключения $U_{\text{ост}}$, $I_{\text{ост}}$;
- 3) ток управления $I_{\text{упр}}$;

2. Экспериментальная часть

- 1) Собрать измерительную схему (рисунок 5.3, а).
- 2) Снять вольтамперную характеристику тиристора (прямую и обратную ветви) при различных уровнях напряжения на управляющем электроде (0, 1, 2, 3, 4, 5 В).
- 3) Определить напряжение и ток переключения и выключения.
- 4) Определить I_s (на обратной ветви ВАХ) и φ_T (на прямой ветви ВАХ).
- 5) Сделать выводы.

3. Контрольные вопросы

- 1) Что такое тиристор? Перечислите основные типы тиристоров.
- 2) Нарисуйте условное графическое изображение тринистора и схему его включения для управления электрической цепью.
- 3) Нарисуйте ВАХ тринистора и расскажите о физических процессах, определяющих её форму.

4) Перечислите основные параметры тиристора и опишите методику их измерения.

5) Для чего применяются тиристоры в электронной аппаратуре?

Литература

1. Викулин, И. М. Физика полупроводниковых приборов / И. М. Викулин, В. И. Стафеев. – М. : Советское радио, 1980. – С. 193–208.

2. Зи, С. М. Физика полупроводниковых приборов / С. М. Зи. – М. : Энергия, 1984. – Т. 2. – С. 202–257.

3. Червяков, Г. Г. Электронные приборы / Г. Г. Червяков, С. Г. Прохоров, О. В. Шиндор. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2012. – С. 116–124.

Производственно-практическое издание

Гольдаде Виктор Антонович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ**

Практическое пособие

Редактор *В. И. Шкредова*
Корректор *В. В. Калугина*

Подписано в печать 08.02.2019. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Ризография. Усл. печ. л. 2,1.
Уч.-изд. л. 2,3. Тираж 25 экз. Заказ 62.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1452 от 17.04.2017.
Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013.
Ул. Советская, 104, 246019, Гомель.

