



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Радиоэлектроника»

Сборник задач
к проведению лабораторных занятий
по дисциплине

«Физические основы микроэлектроники»

Автор
Сукиязов А. Г.

Ростов-на-Дону, 2018

Аннотация

Сборник содержит описания, методические указания и задания к лабораторным работам по дисциплине «Физические основы микроэлектроники» и предназначен для студентов по направлениям: радиотехника (110301), а также инфокоммуникационные технологии и системы связи (11.03.02) очной и заочной форм обучения.

В составе лабораторных работ присутствуют работы, выполняемые как в режиме имитационных исследований, так и в режиме натурального эксперимента. Методичка к лабораторной работе 1 в сборник не включена, т.к. рассчитана на изменчивое содержание уровня вводного лабораторного занятия.

Автор

Профессор кафедры Радиозлектроника

Сукиязов А.Г.



Оглавление

Лабораторная работа 2. Исследование температурной зависимости электропроводности металлов и полупроводников	4
Часть 1	4
Часть 2	19
Лабораторная работа 3. Определение ширины запрещенной зоны полупроводников	25
<i>Часть 1.</i>	25
<i>Часть 2.</i>	35
Лабораторная работа 4. Исследование контакта металл-полупроводник на примере диода Шоттки	41
Лабораторная работа 5. Исследование ВАХ полупроводниковых диодов	53
Лабораторная работа 6. Исследование взаимодействующих р-п переходов. Биполярный транзистор	62
Лабораторная работа 7. Исследование полевого транзистора с общим истоком в статическом режиме	75
Лабораторная работа 8. Исследование полевого транзистора с изолированным затвором в статическом режиме	87
Рекомендуемая литература	99

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: исследовать температурную зависимость сопротивления полупроводникового материала на примере термистора и установить вид аналитической функции этой зависимости

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:

1. Лабораторная установка «Электронные приборы»;
2. Термоэлектрическая камера с блоком питания;
3. Компьютер с программным обеспечением.

Лабораторная работа состоит из двух частей:

Часть 1 – имитационное исследование температурной зависимости сопротивления термистора. Выполняется в соответствии с индивидуальным заданием.

Часть 2 – натуральный эксперимент. Выполняется на лабораторной установке с реальными термистором и медным сопротивлением.

Отчет по лабораторной работе должен состоять из двух частей. По каждой части он должен соответствовать методическим указаниям.

Часть 1

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ.

Электропроводность твердых тел связана с существованием в них подвижных зарядов. Электрический ток – это направленное движение электрических зарядов, которые в данном случае называются носителями тока.

Все твердые тела в разной степени проводят ток. Изоляторы (диэлектрики) при комнатной температуре обладают чрезвычайно низкой проводимостью. При нагревании их проводимость растет. При достаточно высокой температуре (если изолятор при ней не разлагается) электропроводность может стать достаточно высокой. Т.е. проводимость диэлектриков при нагревании растет (сопротивление – падает). Металлы даже при комнатной температуре обладают высокой проводимостью. Однако, в противоположность изоляторам, при нагревании проводимость металла падает (а сопротивление растет)¹. Объяснение такому поведению материалов дает квантовая механика.

Группа веществ, сопротивление которых лежит в интервале между металлами и диэлектриками называется полупроводниками. Полупроводники могут иметь сопротивление близкое к сопротивлению металла, но его температурная зависимость всегда такая же, как у диэлектриков.

Полупроводниковые термосопротивления. Полупроводниковые объемные термосопротивления изготавливают из смеси окислов различных металлов (например, CuO, CoO, MnO). В процессе изготовления термосопротивления подвергают обжигу при высокой температуре. При обжиге окислы спекаются в прочную массу, образуя химическое соединение.

Величина сопротивления R_T полупроводника характеризуется зависимостью

$$R_T = A \cdot e^{\frac{B}{T}}, \quad (2.1)$$

¹ См. 1 часть лабораторной работы 1.

где A - постоянная, зависящая от физических свойств полупроводника, размеров и формы термосопротивления;

B - постоянная, зависящая от физических свойств полупроводника;

T - температура в градусах абсолютной шкалы (К);

e - основание натуральных логарифмов.

Не вдаваясь в детали квантово механической модели, можно сказать, что при нагревании металлов не происходит заметного изменения концентрации носителей тока. Ухудшаются условия их движения и сопротивление растет. У диэлектриков и полупроводников при нагревании резко возрастает концентрация носителей тока. Увеличение проводимости за счет роста концентрации носителей с лихвой компенсирует ухудшение условий их движения. Поэтому сопротивление диэлектриков и полупроводников падает.

По какому закону уменьшается сопротивление полупроводника при нагревании (или увеличивается проводимость) можно выявить с помощью экспериментального исследования.

Так как в данной лабораторной работе основной целью является выявление закона изменения проводимости полупроводника при нагревании, в качестве объекта выбрано полупроводниковое сопротивление (термистор) типа ММТ-4 и ММТ-1.

Конструктивно термосопротивления изготавливают в виде стержней, шайб, дисков и бусинок. На рисунке 1 показано устройство полупроводниковых термосопротивлений типов ММТ и КМТ. Термосопротивления типов ММТ-1 и КМТ-1 (рисунок 1.а) представляют собой полупроводниковый стержень 1, покрытый эмалевой краской, с контактными колпачками 2 и выводами 3. Эти типы термосопротивлений могут быть использованы лишь в сухих помещениях. Термосопротивления типов ММТ-4 и КМТ-4 (рисунок 1.б) смонтированы в металлических корпусах 2 и герметизированы, благодаря чему они могут быть применены в условиях любой влажности и любой среды, не являющейся агрессивной относительно корпуса термосопротивления. Герметизация осуществлена стеклом 3 и оловом 4. Стержень 1 в термосопротивлении ММТ-4 обернут металлической фольгой 5. Эти термосопротивления выпускаются на номинальные значения сопротивления от 1000 до 200 000 ом (при +20°C) и пригодны для работы в диапазоне температур от -

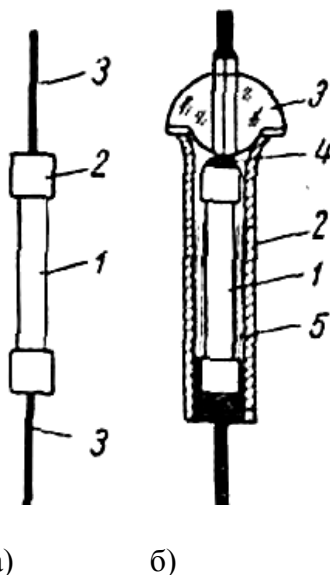


Рисунок 2.1 – Устройство полупроводниковых термосопротивлений
 а) ММТ-1, КМТ-1 и б) ММТ-4, КМТ-4

100 до + 120°C.

Основные параметры терморезисторов определяемые в данной работе

1. Номинальное сопротивление $R_{ном}$ определяется при 200С, у различных терморезисторов лежит в пределах от десятков Ом до сотен килоОм.

2. Диапазон рабочих температур t_{min} - t_{max} . Имеются терморезисторы с величинами t_{min} в пределах от -1960С до 00С и t_{max} в пределах от 500С до 3000С.

3. Коэффициент температурной чувствительности B - аппроксимирующий коэффициент, используется для математического описания зависимости R и ТКС от температуры. Вычисляется по формуле

$$B = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_1}{R_2} \text{ [K]},$$

где R_1 и R_2 - сопротивления терморезистора при температурах соответственно T_1 и T_2 (в градусах по шкале Кельвина).

У основной массы терморезисторов величина B лежит в диапазоне 2000 - 7200 [K], но есть терморезисторы с величиной B в пределах 700 - 15800 [K].

4. Температурный коэффициент сопротивления ТКС - изменение сопротивления терморезистора в % при изменении его температуры на 1°C.

$$TKR = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} \cdot 100 \text{ [% / град]}.$$

В справочниках приводятся величины ТКР обычно для 20°C. У различных термисторов величины ТКР лежат в диапазоне -(0,8-8,4) % / град., у позисторов +(10-20)% / град.

TKC также определяется соотношением

$$TKR = -\frac{B}{T^2},$$

где T - температура по шкале Кельвина.

Имитационный эксперимент производится по индивидуальному заданию. Студенту выдается таблица готовых экспериментальных данных, которые находятся в файлах в конце методички. Обработывая эти данные студент должен определить основные характеристики полупроводникового термосопротивления, для которого получены данные.

Результаты исследований привести в отчете.

ЗАДАНИЕ

При исследовании температурной зависимости сопротивления полупроводниковых сопротивлений получены данные, представленные в таблице.

На основании этих данных необходимо

1. Определить константы A и B в температурной зависи-

мости $R = Ae^{\frac{B}{T}}$.

Решение этой задачи провести с помощью методики, описанной ниже.

2. Построить графики:

$$R = f(t^\circ),$$

$$\ln R = f(1/T),$$

$$t^\circ = F(R)$$

ХОД РАБОТЫ

1. Каждый студент работает с индивидуальной таблицей данных. Для этого:

- надо **переписать** себе в лабораторный журнал таблицу исходных данных, при этом, студент с четным номером зачетной книжки (студ. билета) выбирает только четные строчки таблицы, а студент с Нечетным номером зачетной книжки (студ. билета) выбирает только Нечетные строчки таблицы;

- при записи в индивидуальную таблицу значения сопротивления произвести округление до первого десятичного знака.

В результате получается таблица данных примерно из 15 - 20 строк.

В качестве шапки индивидуальной таблицы можно предложить форму:

Таблица 2.1

№	t °C	T K	R Ом	1/T	ln R
1					
2					
3					
20					

Форма содержит колонки, которые будут заполнены после расчетов

Удобнее всего для расчетов использовать EXCEL. С помощью EXCEL можно построить графики. Важным моментом является выяснение того, какую форму имеет график в координатах $\ln R = f(1/T)$. **В идеальном случае**

график должен иметь вид прямой линии. Это подтверждает, что аналитическая зависимость соответствует формуле (2.1).

2. Для нахождения коэффициента температурной зависимости B использовать вспомогательную таблицу. Вспомогательная таблица заполняется следующим образом: на зависимости $R_T=f(T)$ произвольно выбираются два значения температуры T_1 и T_2 . По графику находят соответствующие им значения сопротивления. Найденные значения температуры и сопротивления заносятся в таблицу 2. Аналогичным образом заполняются три строчки таблицы 2. По этим данным производят расчет по формуле (2.2). Так же поступают для следующих строчек таблицы. Строчки таблицы независимы.

Таблица 2.2

№	R	T	R	T	B	Δ
	₁ (Ом)	₁ К	₂ (Ом)	₂ К	К	
1.						
2.						
3.						
Средние значения						

2. Для решения задач лабораторной работы студент сам (при консультации с преподавателем) выбирает программные средства для расчетов и построения графиков.

Вариант 1

Таблица данных

№	t C	T K	R Ом
1	20	293	605,6913
2	22	295	587,4923
3	24	297	579,6155
4	26	299	558,598
5	28	301	544,1815
6	30	303	532,4269
7	32	305	512,2832
8	34	307	499,1379
9	36	309	496,4292
10	38	311	484,8536
11	40	313	470,3312
12	42	315	453,6832
13	44	317	445,1853
14	46	319	435,5092
15	48	321	423,7164
16	50	323	411,4128
17	52	325	409,246
18	54	327	397,2146
19	56	329	392,0113
20	58	331	377,958
21	60	333	375,818
22	62	335	367,8521
23	64	337	352,4073
24	66	339	348,7087
25	68	341	342,7159
26	70	343	333,0012
27	72	345	327,5889
28	74	347	325,1238
29	76	349	314,2577
30	78	351	311,204
31	80	353	302,8435
32	82	355	296,8042
33	84	357	288,8315

Физические основы микроэлектроники

34	86	359	283,8481
35	88	361	281,4954
36	90	363	278,0653
37	92	365	273,5167
38	94	367	268,3004
39	96	369	263,2506
40	98	371	255,1074
41	100	373	250,6958

Вариант 2

Таблица данных

№	t C	T K	R Ом
1	20	293	465,3951
2	22	295	462,782
3	24	297	444,3133
4	26	299	444,2032
5	28	301	432,179
6	30	303	427,0956
7	32	305	415,5249
8	34	307	411,9347
9	36	309	408,5853
10	38	311	394,0434
11	40	313	393,3597
12	42	315	384,7457
13	44	317	380,9741
14	46	319	369,9321
15	48	321	368,4431
16	50	323	361,7871
17	52	325	357,0035
18	54	327	352,8293
19	56	329	343,9839
20	58	331	343,0044
21	60	333	336,9713
22	62	335	327,5079
23	64	337	325,3503
24	66	339	321,3256

Физические основы микроэлектроники

25	68	341	313,3886
26	70	343	312,2917
27	72	345	309,8732
28	74	347	301,5622
29	76	349	298,9987
30	78	351	296,5335
31	80	353	291,9319
32	82	355	286,4536
33	84	357	282,5989
34	86	359	282,3675
35	88	361	277,2708
36	90	363	275,4414
37	92	365	275,2009
38	94	367	271,5477
39	96	369	267,8411
40	98	371	262,0456
41	100	373	256,359

Вариант 3

Таблица данных

№	t C	T K	R Ом
1	20	293	27696,46
2	22	295	26678,08
3	24	297	25775,52
4	26	299	24220,7
5	28	301	23526,67
6	30	303	22254,64
7	32	305	21313,55
8	34	307	20699,2
9	36	309	19806,32
10	38	311	18901,58
11	40	313	18058,6
12	42	315	17306,4
13	44	317	16726,58
14	46	319	16223,43

Физические основы микроэлектроники

15	48	321	15557,59
16	50	323	14737,18
17	52	325	14458,91
18	54	327	13742,54
19	56	329	13364,09
20	58	331	12849,07
21	60	333	12337,45
22	62	335	11847,82
23	64	337	11370,83
24	66	339	10999,47
25	68	341	10815,95
26	70	343	10464,09
27	72	345	9935,839
28	74	347	9677,15
29	76	349	9369,431
30	78	351	9043,283
31	80	353	8852,322
32	82	355	8594,983
33	84	357	8267,567
34	86	359	8052,068
35	88	361	7773,142
36	90	363	7431,862
37	92	365	7349,341
38	94	367	7066,972
39	96	369	6897,273
40	98	371	6630,905
41	100	373	6401,947

Вариант 4

Таблица данных

№	t C	T K	R Ом
1	20	293	355,4721
2	22	295	350,4545
3	24	297	345,4531
4	26	299	340,1027
5	28	301	332,3737
6	30	303	330,4413
7	32	305	324,9695
8	34	307	323,4742
9	36	309	320,2938
10	38	311	317,2637
11	40	313	312,3241
12	42	315	303,0969
13	44	317	300,7065
14	46	319	297,0586
15	48	321	298,9584
16	50	323	294,4248
17	52	325	285,1765
18	54	327	287,9041
19	56	329	282,7947
20	58	331	281,3988
21	60	333	277,0339
22	62	335	271,1133
23	64	337	268,7348
24	66	339	264,5619
25	68	341	267,3065
26	70	343	259,3495
27	72	345	257,6781
28	74	347	259,0298
29	76	349	256,3314
30	78	351	249,2794
31	80	353	248,2165
32	82	355	247,9414
33	84	357	242,9787

Физические основы микроэлектроники

34	86	359	245,2224
35	88	361	239,5172
36	90	363	237,195
37	92	365	234,8154
38	94	367	235,9532
39	96	369	231,9502
40	98	371	226,8714
41	100	373	227,9058

Вариант 5

Таблица данных

№	t C	T K	R Ом
1	20	293	1115.758
2	22	295	1099.266
3	24	297	1084.428
4	26	299	1078.999
5	28	301	1041.196
6	30	303	1034.991
7	32	305	1011.601
8	34	307	999.9915
9	36	309	990.3313
10	38	311	972.7353
11	40	313	975.0035
12	42	315	946.3169
13	44	317	942.2849
14	46	319	929.842
15	48	321	925.7345
16	50	323	914.2731
17	52	325	889.8783
18	54	327	891.5858
19	56	329	866.7086
20	58	331	861.5334
21	60	333	849.5276
22	62	335	837.6003
23	64	337	833.5591
24	66	339	832.7522

Физические основы микроэлектроники

25	68	341	825.0262
26	70	343	818.2589
27	72	345	804.9112
28	74	347	791.5491
29	76	349	789.543
30	78	351	765.2736
31	80	353	773.9362
32	82	355	766.667
33	84	357	750.4019
34	86	359	751.7239
35	88	361	728.4316
36	90	363	719.8964
37	92	365	727.2195
38	94	367	721.0912
39	96	369	715.8645
40	98	371	706.98
41	100	373	694.1021

Часть 2

Исследование температурной зависимости электропроводности металлов и полупроводников с помощью натурального эксперимента

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: познакомиться с основными методами проведения экспериментальных исследований в курсе «Физические основы микроэлектроники» (ФОМЭ) и обработкой их результатов.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:

1. Термоэлектрическая камера,
2. Блок питания камеры PS-305 D,
3. Держатель объектов исследований,
2. Измеритель сопротивления прибор РВ7-3,
3. Компьютер с программным обеспечением.

ВВЕДЕНИЕ

Конструкция термокамеры

Важнейшим внешним отличием электрических свойств металлов от свойств полупроводников является то, что при нагревании сопротивление металлов увеличивается, а у полупроводников сильно уменьшается. Сказанное выше означает ответ на вопрос: «**Как** зависит сопротивление материалов от температуры?». Для того, чтобы ответить на вопрос: «**Почему** зависимость имеет такой вид?» требуется проведение специальных исследований. Для их проведения используется специально разработанная термокамера, в которой можно изменять температуру и изучать ее влияние на определенные параметры полупроводников или полупроводниковых приборов.

Функциональная схема лабораторной установки для натуральных исследований электропроводности металлов и полупроводников представлена на рисунке 2.2.

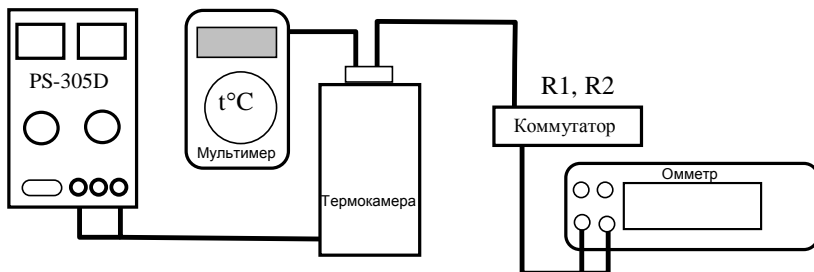


Рисунок 2.2 – Функциональная схема лабораторной установки

Устройство термокамеры представлено на рисунке 2.3

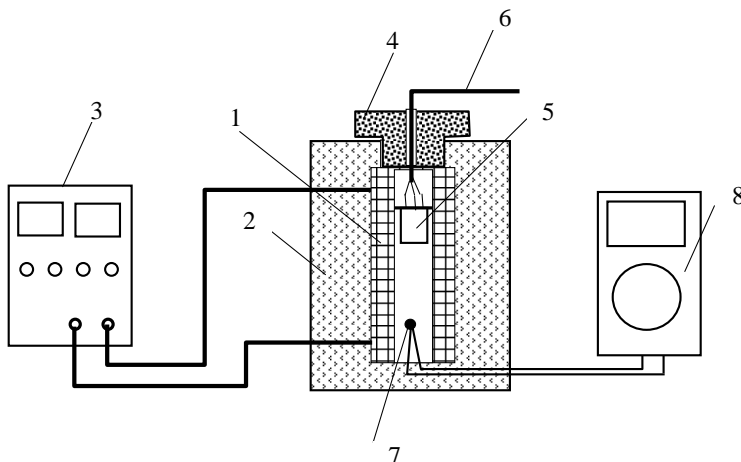


Рисунок 1.3 Устройство термокамеры.

- 1 – Нагревательный элемент, 2 – Корпус с термоизоляцией,
- 3 – Источник питания нагревателя, 4 – Пробка, 5 – Объект исследования,
- 6 – Кабель для подключения к лабораторной установке, 7 – Термопара.
- 8 – Прибор показания температуры.

Для повышения производительности исследований в термокамере помещаются одновременно два объекта: полупроводниковое сопротивление (термистор) и медное сопротивление. Измерительный прибор с помощью коммутатора (см. рисунок 2.2) подключается по очереди к R1 или R2.

Электрическая схема лабораторной установки представлена на рисунке 2.4.

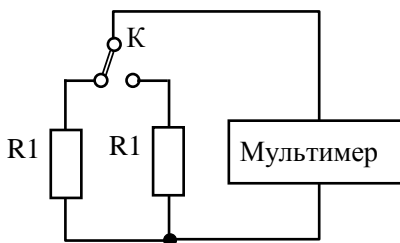


Рисунок 2.4 - Электрическая схема лабораторной установки

Ход работы.

1. Собрать лабораторную установку в соответствии с рисунком 1 и рисунком 3.

2. Поместить объекты исследований в термокамеру. Питание термокамеры не включать!.

3. Выждать несколько минут для установления теплового равновесия.

4. Измерить значения R_1 и R_2 и записать результаты в первую строчку таблицы эксперимента

Таблица 2.3

№	$t^{\circ}\text{C}$	R_1 (Ом)	R_2 (Ом)
1			
2			
3			
.....			
≈ 10	100		

5. Включить питание термокамеры и установить на блоке питания напряжение 20 В. Температура начнет сначала медленно увеличиваться, затем скорость нагрева возрастет, а потом вновь замедлится. В процессе непрерывного увеличения температуры производить отсчеты сопротивления примерно через 10 – 15 °С.

6. Когда скорость нагрева замедлится – прибавить напряжение на термокамере.

7. Данные снимать до температуры 90 - 100°С.

8 После завершения эксперимента выключить все приборы сообщить об этом преподавателю.

Обработка данных.

1. Построить графики зависимости сопротивления образцов от температуры. Для этого использовать все усвоенные методики и программные средства по своему усмотрению.

2. Известно, что для металла зависимость сопротивления от температуры имеет вид: $R = R_0(1 + \alpha \cdot t^0)$. Здесь R_0 - значение сопротивления при 0°С, α - температурный коэффициент сопротивления (ТКС), для меди $\alpha = 0,0043$ 1/°С. Для нахождения ТКС, необходимо произвольно взять значение сопротивления R_1 и R_2 соответствующее двум произвольным температурам t_1 и t_2 . Тогда $R_1 = R_0(1 + \alpha \cdot t_1^0)$ и $R_2 = R_0(1 + \alpha \cdot t_2^0)$. Решаем их совместно и находим:

$$\alpha = \frac{R_1 - R_2}{R_2 \cdot t_1 - R_1 \cdot t_2}.$$

По последней формуле для трех вариантов набора температур найти значения α , среднее значение и погрешность.

Для этого данные записать в промежуточную таблицу:

№	R	t	R	t	α	Δ
	$_1$ (Ом)	$_1$ °C	$_2$ (Ом)	$_2$ °C	(1/°C)	α , (1/°C)
4.						
5.						
6.						
Средние значения						

Таблица 2.4

3. Данные, касающиеся сопротивления полупроводника обработать в соответствии с частью 1 (формула 2.2). Промежуточная таблица должно иметь вид:

Таблица 2.5

	R	T_1	R	T_2	B	Δ
	$_1$ (Ом)	К	$_2$ (Ом)	К	К	В, К
1.						
2.						
3.						
Средние значения						

По окончанию работы сделать полные обобщенные выводы. Схему и чертежи лабораторной установки должны быть в отчете.

Вопросы для зачета

1. Что такое электрический ток?
2. С чем связана электропроводность твердых тел?
3. В чем различие между проводниками и изоляторами?
4. Как зависит от температуры электропроводность металлов?
5. Как зависит от температуры электропроводность изоляторов?
6. Какие вещества называются полупроводниками?

7. Как температура должна влиять на электропроводность полупроводников?

8. Что такое полупроводниковые термосопротивления? Где они могут применяться?

9. По какому закону изменяется сопротивление металла при нагревании?

10. Что такое температурный коэффициент сопротивления?

12. По какому закону изменяется величина полупроводникового термосопротивления при нагревании?

13. Что такое коэффициент температурной чувствительности полупроводникового термосопротивления?

14. Как находится температурный коэффициент термосопротивления (TKR)?

15. Как можно обрабатывать результаты эксперимента с помощью компьютерных программ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: исследовать температурную зависимость сопротивления германия и кремния, установить вид аналитической функции этой зависимости и рассчитать ширину запрещенной зоны.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:

1. Лабораторная установка «Электронные приборы»;
2. Термоэлектрическая камера с блоком питания;
3. Компьютер с программным обеспечением.

Часть 1.

Имитационный эксперимент

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ.

Электропроводность твердых тел связана с существованием в них подвижных зарядов. Электрический ток – это направленное движение электрических зарядов, которые в данном случае называются носителями тока.

Все твердые тела в разной степени проводят ток. Изоляторы (диэлектрики) при комнатной температуре обладают чрезвычайно низкой проводимостью. При нагревании их проводимость растет. При достаточно высокой температуре (если изолятор при ней не разлагается) электропроводность может стать достаточно высокой. Т.е. проводимость диэлектриков при нагревании растет (сопротивление – падает). Металлы даже при комнатной температуре обладают

высокой проводимостью. Однако, в противоположность изоляторам, при нагревании проводимость металла падает (а сопротивление растет)². Объяснение такому поведению материалов дает квантовая механика.

Группа веществ, сопротивление которых лежит в интервале между металлами и диэлектриками называется **полупроводниками**. Полупроводники могут иметь сопротивление близкое к сопротивлению металла, но его температурная зависимость всегда такая же, как у диэлектриков.

ЗОННАЯ ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ. ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ТОКА

В изолированном атоме электроны находятся в стационарных состояниях, каждому из которых соответствует строго определенное значение энергии. Таким образом, энергетический спектр электронных состояний в атоме дискретный. В кристаллическом твердом теле из-за возмущения, вносимого другими атомами, уровни энергии расщепляются и образуются области или зоны разрешенных значений энергии, разделенные интервалами (зонами) запрещенных значений энергии. Для описания электрических свойств полупроводников используются две зоны, в которых возможно нахождение энергии электронов: валентная зона и свободная зона (называемая также зоной проводимости). При нуле Кельвин валентная зона полностью заполнена, а зона проводимости – свободна. Согласно законам квантовой механики, в данной ситуации электропроводность невозможна. Для того, чтобы полупроводниковый кристалл обладал электропроводностью должны появиться носители заряда, т.е. разрешенные зоны должны быть заполнены частично: в валентной зоне должны образоваться вакансии (называемые дырками), а в зоне проводимости появиться электроны. Если в кристалле отсутствуют искажения кри-

² См. 1 часть лабораторной работы 1.

сталлической решетки и примеси, то носители заряда могут появиться только благодаря переходу некоторой части электронов из валентной зоны в зону проводимости. Для этого им необходимо сообщить энергию больше, чем ширина запрещенной зоны. Иллюстрацией этому процессу может служить рисунок 3.1а), на котором представлена зонная диаграмма чистого полупроводника, называемого также «собственным».

На рисунке приняты обозначения: n – концентрация электронов переведенных в зону проводимости, p – концентрация возникших вакансий в валентной зоне, называемых «дырками». Дырки ведут себя как положительные носители заряда. W_g – ширина запрещенной зоны. W_F – уровень Ферми, играющий важную роль в теории.

Электропроводность собственного полупроводника называется также собственной. Важнейшие признаки собственной проводимости: $n=p$ концентрация электронов равна концентрации дырок, а уровень Ферми лежит по середине запрещенной зоны.

Любое искажение кристаллической решетки сопровождается изменением спектра разрешенных значений энергии электрона в области нахождения (локализации) дефекта. Если новые энергетические уровни попадают в запрещенную зону, то характер электропроводности может существенно измениться. Электропроводность кристаллов с дефектами называется примесной. Энергетические диаграммы примесных полупроводников показаны на рисунке 3.1б) и 3.1в).

Так как концентрация искажений решетки в полупроводника очень незначительна, то новые уровни между собой не взаимодействуют и находятся в непосредственной близости к локализации дефекта решетки. Поэтому называются «локальными». Если примесный уровень при нуле Кельвин свободен и способен удерживать электрон, то он называется «акцепторным». Нагрев кристалла с акцепторными уровнями приведет к переходу электронов из валент-

ной зоны на этот уровень. Энергия, которую необходимо для этого сообщить электрону, называется энергией активации акцепторного уровня W_A . Она значительно меньше ширины запрещенной зоны. Акцепторный уровень с захваченным электроном превращается в отрицательный ион и в электропроводности не участвует. Но образовавшиеся вакансии в валентной зоне (дырки) могут в этой зоне перемещаться и образовывать электрический ток. Переход электронов из валентной зоны в зону проводимости, при температуре соответствующей энергии активации акцепторного уровня, имеет значительно меньшую интенсивность. Таким образом, в акцепторном полупроводнике имеются одновременно и электроны и дырки, но дырок много больше. Поэтому такой полупроводник называется «дырочным» или «р-типа». Носители заряда, концентрация которых больше (в данном случае дырки - p), называются основными, а которых меньше (в данном случае электроны - n) – неосновными.

Если примесные уровни при нуле Кельвин заполнены и расположены близко к зоне проводимости, то они называются донорными. Энергетический зазор между донорным уровнем и дном зоны проводимости называется «энергией активации донорного уровня» W_d . При нагревании электроны переходят в зону проводимости, оставляя на своем месте положительные ионы. В зоне проводимости появляются электроны. Чтобы возникли дырки, как и прежде необходим переход электронов из валентной зоны в зону проводимости (рисунок 3.1в). В результате получается электронный полупроводник, или полупроводник n-типа. Основными носителями в нем будут электроны, а неосновными – дырки.

Найдем, вид температурной зависимости концентрации носителей тока для собственной проводимости полупроводника, лежащей в основе лабораторной работы.

При отличии температуры от нуля Кельвин, в полупроводнике проходят два процесса (рисунок 3.1а) «генерация» носителей тока интенсивностью G и обратный процесс

«рекомбинация» интенсивностью R . Так как концентрация электронов в зоне проводимости зависит от температуры, а их количество много меньше числа мест в зоне проводимости, то подсчет количества электронов перешедших из валентной зоны можно осуществить с помощью классической статистики Больцмана. Так как рассматриваем собственную проводимость, то количество электронов будет равно числу дырок.

Интенсивность рекомбинации от температуры не зависит и определяется только концентрацией электронов и дырок. В состоянии равновесия (при постоянной температуре T) эти интенсивности сравниваются. Исходя из этого, можно найти равновесную концентрацию электронов n и получить выражение для температурной зависимости тока.

На основании статистики Больцмана для интенсивности генерации G можем записать

$$G = A \exp\left(-\frac{W_g}{kT}\right)$$

где A - некоторая константа;

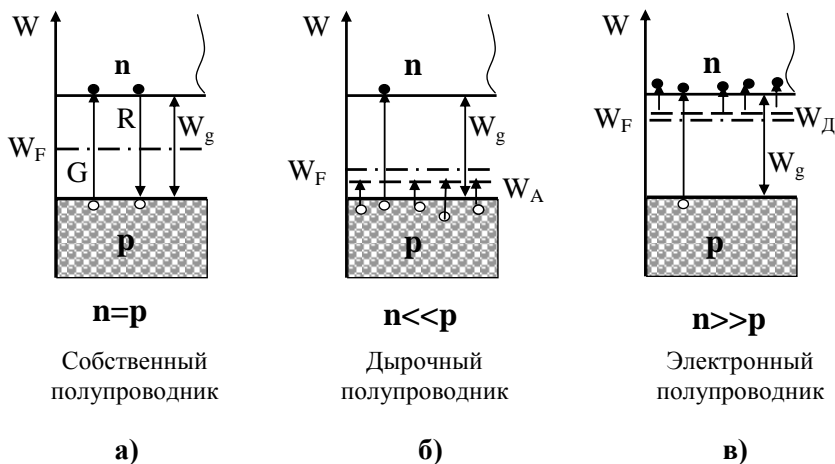


Рисунок 3.1 – Зонные диаграммы полупроводников

$k = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/К}$ - постоянная Больцмана;

T - температура в градусах Кельвина.

Для интенсивности рекомбинации R , с учетом того,

$n = p$ можем записать:

$$R = Bn \cdot p = Bn^2$$

В состоянии равновесия $G=R$:

$$Bn^2 = A \exp\left(-\frac{W_g}{kT}\right)$$

откуда

$$n = \sqrt{\frac{A}{B}} \exp\left(-\frac{W_g}{2kT}\right) = \text{const} \cdot \exp\left(-\frac{W_g}{2kT}\right)$$

Основываясь на том, что при постоянной величине напряжения сила тока пропорциональна концентрации носителей тока, можем записать:

$$I = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_g}{2kT}\right),$$

где I_0 - константа.

Если (3.5) прологарифмировать, то получим выражение, из которого не трудно выразить искомую величину запрещенной зоны W_g

$$\ln I = \ln I_0 - \frac{W_g}{2kT}$$

Следует обратить внимание, что с точки зрения физического смысла, наличие «2» в знаменателе (3.5) означает, что каждый переход электрона из валентной зоны в зону проводимости приводит к одновременному возникновению

двух носителей тока: электрона и дырки. Этот вывод играет важную роль в основе предлагаемой методики использования полупроводникового диода с р-п переходом для нахождения ширины запрещенной зоны чистого полупроводника.

Следовательно, если собственная проводимость полупроводника описывается выражением (3.3), то график зависимости тока от температуры в координатах должен иметь вид линии:

$$\ln I = f\left(\frac{1}{T}\right)$$

В лабораторной работе выводы делаются в обратном

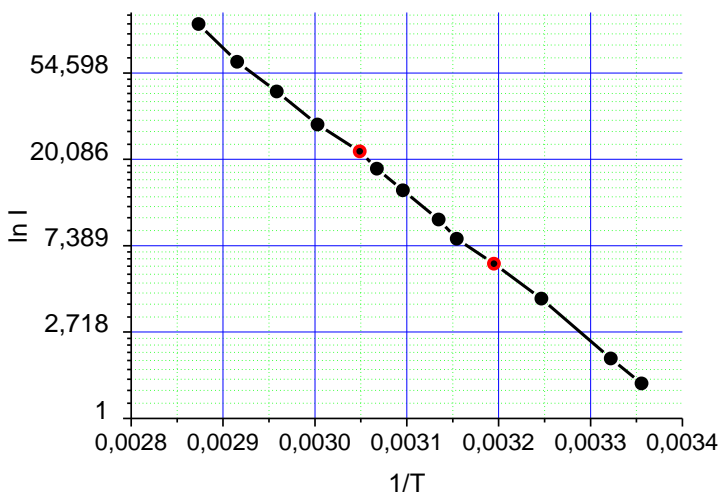


Рисунок 3.2

порядке: « Если точки на указанном графике ложатся вдоль прямой, то значит математическая зависимость соответствует (3.1)». Если есть отклонения, то можно оценить степень несоответствия формуле (3.1).

ХОД РАБОТЫ

Данная лабораторная работа проводится в двух режимах: имитационном и натуральном. В имитационном режиме экспериментальные данные выдаются в форме готовых таблиц, а дальше студент проводит их обработку.

В режиме натурального эксперимента данные получаются путем непосредственного измерения обратного тока германиевых диодов. Обработка данных и составление отчета для обеих режимов одинакова.

Методика имитационного эксперимента.

1. Получить вариант экспериментальных данных и на их основе сформировать таблицы в отчет для германия и кремния. Для каждого полупроводника рекомендуется следующая форма рабочей

Таблица 3.2

Кремний					
№	t °C	T K	I мА	$1/T$	$\ln I$
1					
2					
3					
10					

№	I_1 (мА)	T_1 К	I_2 (мА)	T_2 К	W_g эВ	ΔW_g эВ
1.						
2.						

2. Построить графики зависимости обратных токов

Таблица 3.1

Германий					
№	t °С	T К	I мА	$1/T$	$\ln I$
1					
2					
3					
10					

диодов от температуры в координатах $\ln I = f\left(\frac{1}{T}\right)$. Здесь

$T=t^\circ+273$ температура в Кельвинах. На основании полученных графиков сделать вывод о соответствии данных собственной проводимости полупроводников (см. рисунок 3.2).

3. Для нахождения ширины запрещенной зоны воспользоваться методикой лабораторной работы 2

Рассмотрим вывод рабочей формулы.

Воспользуемся формулой (6) для двух значений температуры T_1 и T_2 и соответствующие им значения токов I_1 и I_2 и получим формулу (3.9). Для этого применим формулу

Таблица 3.3

3.						
Средние значения						

(3.6) для каждой выбранной строчки:

$$\begin{cases} \ln I_1 = \ln I_0 - \frac{Wg}{2kT_1} \\ \ln I_2 = \ln I_0 - \frac{Wg}{2kT_2} \end{cases}$$

Вычтем из второго уравнения первое

$$\ln \frac{I_1}{I_2} = \frac{Wg}{2k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

Откуда находим выражение для расчета ширины запрещенной зоны собственного полупроводника:

$$Wg = \frac{2k \cdot \ln \frac{I_1}{I_2}}{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)}$$

В таблице экспериментальных данных выберем произвольно два значения температуры (лучше на прямом участке графика)

Для каждой строчки таблицы производим расчет значения ширины запрещенной зоны и погрешности. Найденное значение ширины запрещенной зоны дать в электрон-вольтах. $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$. k - постоянная Больцмана. $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/К}$.

Таблицу 3.1, таблицу 3.2 и таблицу 3.3 соответствующий график (рисунок 3.2) выполнить для каждого полупроводника и привести их в отчете.

Часть 2.

Натурный эксперимент

МЕТОДИКА НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА.

Исследуемые диоды помещаются в термокамеру где они подвергаются нагреву от комнатной температуры до 100 °С.

Электрическая схема измерений представлена на рисунке 2. Она собирается на лабораторной установке «Электронные приборы». Для повышения точности измерений учитывается, что внутреннее сопротивление вольтметра значительно выше сопротивления диодов. В то же время, сопротивление миллиамперметра может быть соизмеримо с сопротивлением диодов. Поэтому вольтметр подключен не к выходу источника, а непосредственно к диодам.

Электронно-дырочный или *n-p* переход представляет собой область контакта *n*- и *p*-полупроводников (рисунок 3.3). Следует отметить, что может быть образован за счет вплавления акцептора в *n*-полупроводник или донора в *p*-полупроводник (сплавные *n-p* переходы), а также методом диффузии в вакуумных печах парообразного донора или акцептора в *p*- или *n*-кристалл (диффузионные *n-p* переходы).

Физические основы микроэлектроники

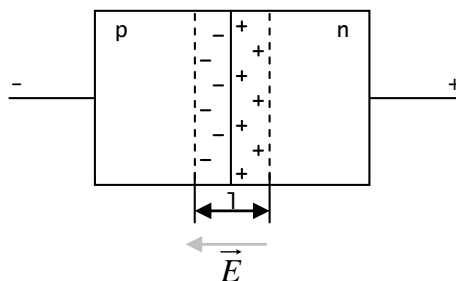


Рисунок 3.3 – p-n переход

Не вдаваясь глубоко в физические процессы образования и работы p-n перехода, отметим, что в месте контакта p и n областей образуется запирающий слой повышенного сопротивления. Толщина этого слоя зависит от величины и направления приложенного напряжения. Если к p-полупроводнику приложить полярность (+), то толщина запирающего слоя будет уменьшаться, а электрический ток переносится основными носителями в каждой области. Поэтому для этой полярности p-n переход имеет низкое сопротивление. Это направления тока называется прямым.

Если приложить “-” к p-области и “+” к n-области. Произойдёт следующее: высота потенциального барьера увеличится на величину приложенного напряжения qU (рисунок 1). Толщина обеднённого слоя увеличится, вследствие оттягивания основных носителей тока от границ p-n-перехода. Такую полярность приложенного напряжения, при которой высота потенциального барьера увеличивается, называется обратной полярностью, а протекающий ток - обратным.

Обратный ток при такой полярности обусловлен неосновными носителями в каждой области, для которых поле в переходе является ускоряющим. Обратный ток будет много меньше прямого тока ($I_{обр} \ll I_{прям}$) и практически не зависит от приложенного напряжения, т.к. уже при небольших напряжениях все имеющиеся неосновные носители вовлекаются в образование тока и дальнейшее увели-

чение напряжения не приводит к росту тока. Под воздействием термогенерации внутри каждого полупроводника p-n перехода образуются пара носителей тока.

В отличие от однородного полупроводника носители заряда этой пары в p-n переходе имеют разный статус, в зависимости от того, в какой его части они возникли. Если генерация пары произошла в p – области, то дырка будет основным носителем и будет неотделима от большого числа имеющихся дырок. В то же время электрон будет неосновным носителем, которых мало и будет влиять на величину обратного тока. Для генерации пары в n – области все будет наоборот. Из сказанного должно быть ясно, что обратный ток p-n перехода соответствует собственной проводимости однородного полупроводника. Для учета этого в температурной зависимости тока ((5) описания лабораторной работы) необходимо в убрать из показателя экспоненты двойку. **В результате этого основные теоретические уравнения будут отличаться от однородного полупроводника отсутствием множителя «2» у температуры!**

Рабочая формула примет иметь вид:

$$Wg = \frac{k \cdot \ln \frac{I_1}{I_2}}{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)}$$

ХОД РАБОТЫ

1.Собрать систему термокамеры (рисунок 3.4) и схему по рисунку 3.5.

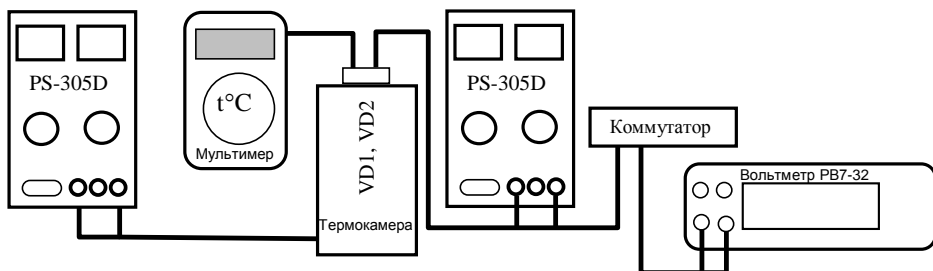


Рисунок 3.4 – Функциональная схема лабораторной установки

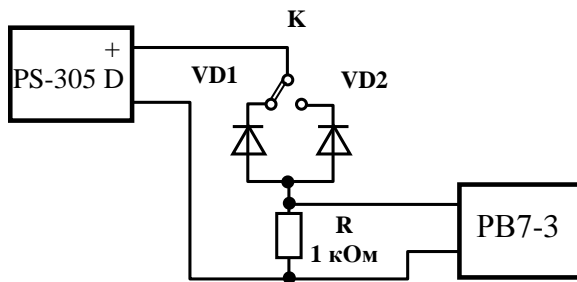


Рисунок 3.5 – Электрическая схема измерения силы тока

2. При комнатной температуре установить обратное напряжение, питающее измерительную схему, в интервале 15 В, и больше не изменять его.

3. Установить на источнике питания термокамеры указанное преподавателем напряжение.

4. По мере прогрева до 100 °С снимать показания и записать в таблицу:

Физические основы микроэлектроники

№	Т-ра t°C	Т-ра T°K	VD1		VD2	
			U, мВ	I мкА	U, мВ	I мкА
1	20					
2	22					
...
N	90					

6. Обработку результатов: построение графиков и определение ширины запрещенной зоны провести для каждого диода по методике, описанной для имитационного эксперимента. Для каждого диода анализировать зависимость $I=F(T)$.

7. Силу тока через диод находить по закону Ома:

$$I = \frac{U}{R}.$$

Если напряжение на резисторе измерять в мВ, а величину резистора принять равной 1 кОм, то величина расчетного тока (2) будет соответствовать мкА.

После завершения экспериментальной части приступить к обработке данных. Для этого:

– Построить графики зависимости обратных токов образцов германиевых диодов от температуры. Для этого использовать все усвоенные методики и программные средства по своему усмотрению.

– Данные, касающиеся сопротивления полупроводника обработать в соответствии с частью 1. Промежуточная таблица отдельно для диода VD1 и диода VD2 должна иметь вид:

Диод VD1 (VD2)

№	I ₁ (мкА)	T ₁ К	I ₂ (мкА)	T ₂ К	W _г (эВ)	ΔW _г (эВ)
1.						
2.						
3.						
Средние значения						

По окончании работы сделать полные обобщенные выводы. Схему и чертежи лабораторной установки должны быть в отчете.

7. Полный отчет по лабораторной работе 3 должен содержать материалы имитационной и натурной частей.

Справочное значение для ширины запрещенной зоны германия составляет $0,66 \div 0,72$ эВ.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТА МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИК НА ПРИМЕРЕ ДИОДА ШОТКИ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Изучить физические процессы, возникающие в контакте металл-полупроводник

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:
Компьютер с соответствующим программным обеспечением:

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ.

Работой выхода электрона называется минимальная работа, необходимая для удаления электрона из твердого тела. Согласно квантово механическим представлением работа рассчитывается при переходе электрона с уровня Ферми F в вакуум. В металле уровень ферми совпадает с верхним заполненным энергетическим уровнем (запрещенной зоны в металле нет). Для полупроводников – уровень Ферми лежит в запрещенной зоне. Чем выше уровень Ферми, тем меньше работа выхода.

При контакте любых разнородных тел (металл-металл, металл-полупроводник, полупроводник-полупроводник и т.п.) происходит переход электронов из материала с меньшей работой выхода в материал с большей работой выхода. Так как электроны – это заряженные микрочастицы, то этот переход сопровождается возникновением электрического поля, препятствующего переходу. В результате установившегося равновесия, на границе контакта возникает электрическое поле, называемое контактным. Между материалами

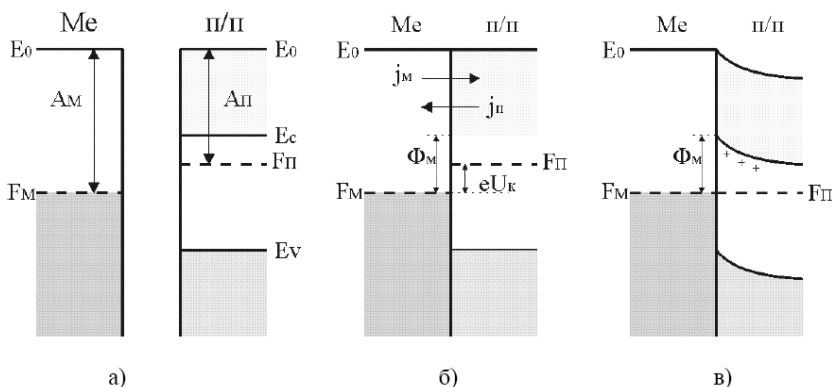


Рис. 4.1

возникает разность потенциалов, называемая контактной. Физический механизм явлений на контакте тел весьма сложен и многообразен. На их основе изготавливаются различные элементы микроэлектроники. В данной лабораторной работе проводится исследование контакта металл-полупроводник. Объектом исследования служит полупроводниковый диод, работающий на основе изучаемого контакта. Такого типа диоды выпускаются промышленно и широко используются в схемотехнике. Эти диоды называются диодами Шоттки.

Рассмотрим контакт электронного полупроводника (n -типа) и металла в предположении, что работа выхода электрона из полупроводника A_{Π} меньше работы выхода электрона из металла A_M , то есть $A_{\Pi} < A_M$.

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

Если обеспечить идеальный контакт металла и полупроводника (т.е. такой контакт, при котором отсутствует вакуумный или диэлектрический слой между Me и п/п), то

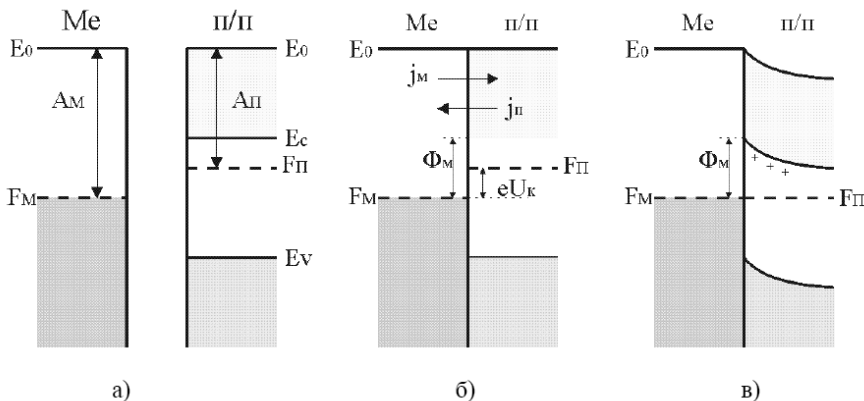


Рис. 4.1

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

$$U_k = \frac{A_M - A_f}{q_e}$$

Заряд на поверхности металла будет находиться в пределах длины, которая примерно равна 0.05 нм. Т.к. концентрация доноров в полупроводнике на несколько порядков меньше концентрации электронов в металле, то нескомпенсированные доноры займут значительный по толщине слой полупроводника L , сравнимый с шириной обедненной обла-

сти p-n перехода, и энергетические зоны в полупроводнике изогнуться 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 Φ_M . Результирующий поток электронов направлен от полупроводника к металлу и увеличивается с ростом напряжения. 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_n 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 заборный слой или нет. Первый случай реализуется тогда, когда длина свободного пробега l электрона меньше толщины заборного 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 рисунке 4.3 показаны ВАХ, полученные согласно диодной (кривая 1) и диффузионной (кривая 2) теории.

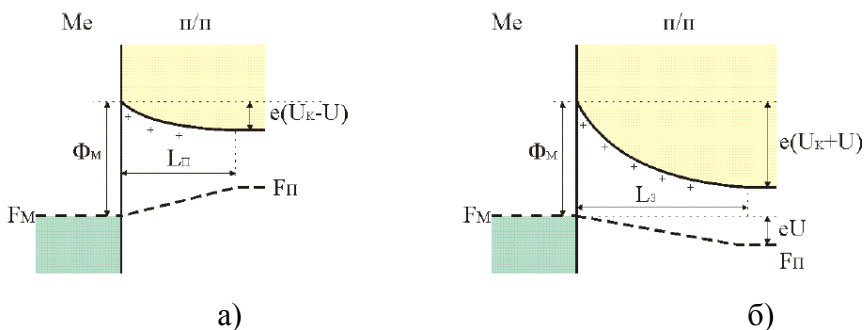


Рис.4.2

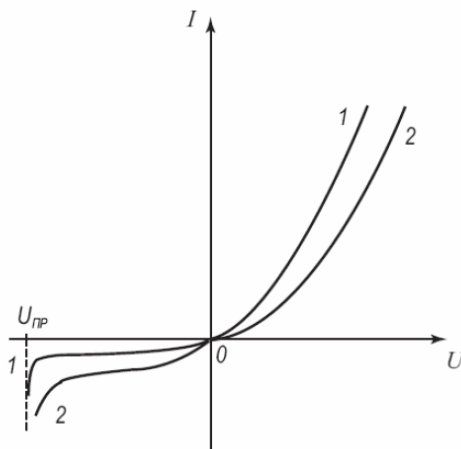


Рис. 4.3

В обоих случаях в прямом смещении ток через диод определяется экспоненциальным членом:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{q_e U}{kT}\right) - 1 \right].$$
 При обратном смещении экспоненциальный член становится мал по сравнению с единицей, и при больших значениях напряжения в толстом слое ток растет пропорционально \sqrt{U} , а в тонком стремиться к насыщению.

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

Методика эксперимента

Для осуществления имитационного экспериментального исследования контакта металл-полупроводник используется программа WorkBench. С помощью имитационного эксперимента можно провести исследование контакта в более широком спектре задач. В данной работе предполагается выполнение следующих исследований:

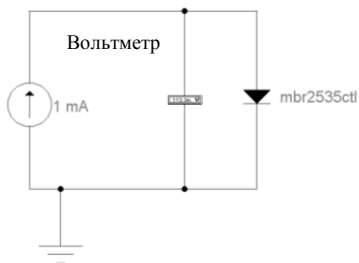
1. Снятие ВАХ (прямое и обратное направления) диода Шоттки для двух значений температуры (например $T_1=20^\circ\text{C}$ и $T_2=50^\circ\text{C}$);
2. Снятие температурной зависимости падения напряжения на переходе Шоттки от температуры при постоянной величине тока (прямое и обратное направления).
3. Снятие температурной зависимости тока через переход Шоттки от температуры при посто-

янном напряжении на переходе (прямое и обратное направления).

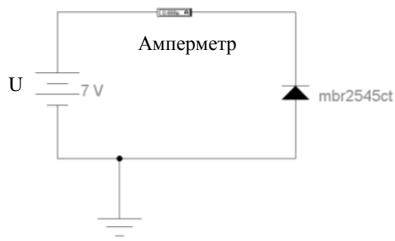
Инструкции по выполнению имитационного эксперимента.

1. На рабочем поле WorkBentch собрать схему для снятия прямой ветви ВАХ в соответствии со схемой рисунок 4 а. При снятии прямой ветви устанавливается ток через диод Шоттки и определяется (по вольтметру) падение напряжения переходе. При снятии обратной ветви действия осуществляются в обратной последовательности: устанавливается напряжение и измеряется ток через диод. Для этого используется схема рисунок 4 б.

Резистор R служит для ограничения тока. Благодаря



а) Схема для снятия прямой ветви ВАХ



б) Схема для снятия обратной ветви ВАХ

Рисунок 4.4

ему образуется делитель напряжения резистор-диод и напряжение на диоде отличается от напряжения батареи E . Поэтому в таблицу эксперимента необходимо в графу напряжения записывать показания вольтметра

2. Для выбора конкретного типа диода Шоттки и установки температуры диода воспользоваться базой элементов программы (рисунок 5). На том же рисунке показан путь

установки температуры диода. Можно выбрать любой диод Шоттки по желанию студента, например *mbr2535_ctl* в группе *motorol2*.

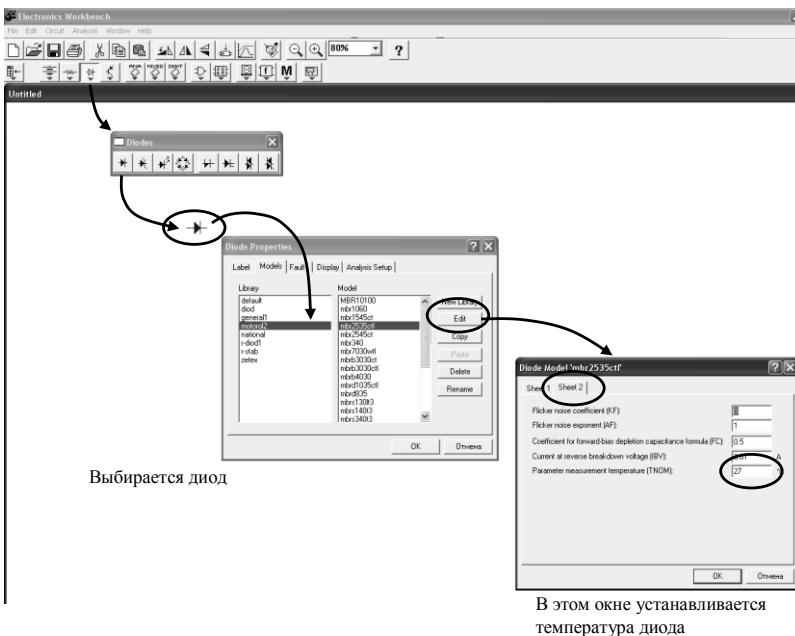


Рис. 4.5

3. Снятие ВАХ для каждой ветви сначала производить сначала для одной температуры, а затем для другой. Как устанавливать температуру показано на рисунке 4.5.

Результаты снятия ВАХ диода для двух температур занести в таблицу 4.1:

Таблица 4.1

Прямая ветвь. Диод типа					
№ п/п	Температура $T_1=$ °C		Температура $T_2=$ °C		Примечания
	I, mA	U, V	I, mA	U, V	
	На графике –ось Y	На графике –ось X	На графике –ось Y	На графике –ось X	

Физические основы микроэлектроники

1.	1		1		
2.	2		2		
3.	5		5		
4.	10		10		
5.	20		20		
6.	50		50		
7.	100		100		
8.	150		150		
9.	200		200		
10.	500		500		
11.	600		600		
12.	800		800		
13.	900		900		
14.	1000		1000		

Таблица 4.2

Обратная ветвь. Диод типа					
№ п/п	Температура $T_1=$ °C		Температура $T_2=$ °C		Примечания
	U, В	I, mA	U, В	I, mA	
	На графике –ось X	На графике –ось Y	На графике –ось X	На графике –ось Y	
1.	0,5		0,5		
2.	1,0		1,0		
3.	2,0		2,0		
4.	5,0		5,0		
5.	10,0		10,0		
6.	15,0		15,0		
7.	20,0		20,0		

4. Для снятия температурной зависимости падения напряжения на переходе Шоттки при постоянной величине тока установить значение прямого тока примерно 50 мА. Изменять температуру от 20 °C до 100 °C. Данные занести в таблицу 3.

Для выполнения этого задания использовать схему рисунок 4.4 а.

Таблица 4.3

Прямая ветвь диода типа _____ Ток диода _____ мА			
№ п/п	Температура °С	Падение напряжения, мВ	Примечания
	0		
	10		
	15		
	20		
.....			
	40		
	50		

5. Для изучения влияния температуры на диод Шоттки, смещенный в обратном направлении использовать схему рисунок 4.4 б. Установить необходимое напряжение на переходе. Изменять температуру диода и записать результаты в таблицу 4.4.

Таблица 4.4

Обратная ветвь диода типа _____ Напряжение на диоде _____ В			
№ п/п	Температура °С	Ток диода, мкА	Примечания
	0		
	10		

Физические основы микроэлектроники

	15		
	20		

.....

	40		
	50		

Для каждой таблицы должны быть построены графики и объяснен их ход.

В отчете указать, как влияет температура на ВАХ диода Шоттки.

Рекомендуемое задание

1. Собрать установку по соответствующей схеме прямого, а затем обратного включения диода, указанной на рабочем месте.
2. Получить данные для построения прямой ветви ВАХ, задаваясь разными значениями прямого тока и измеряя соответствующие значения прямого напряжения на диоде.
3. Исследовать при заданном значении прямого тока зависимость прямого напряжения на диоде от температуры: $U = f(T)_{I=const}$
4. Получить данные для построения обратной ветви ВАХ, задаваясь разными значениями обратного напряжения на $ГН$ и измеряя соответствующие значения обратного тока диода.
5. Исследовать при заданном значении обратного напряжения зависимость обратного тока диода от температуры. $I' = f(T)_{U'=const}$
6. Построить на графике выбирая соответствующие масштабы тока и напряжения на осях координат, ВАХ для прямой и обратной ветвей.
7. Построить графики найденных зависимостей.

8. Используя данные снятия ВАХ (таблицы 4.1 и 4.2) проверить соответствие теоретической формуле

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{q_e U}{kT}\right) - 1 \right].$$

Если экспериментальные точки хорошо ложатся на исследуемую функцию, то можем сделать, что теоретическая формула соответствует реальности.

Вопросы:

1. Что такое работа выхода? Отчего она зависит?
2. Что такое электрон-вольт?
3. Что такое контактная разность потенциалов? Почему она возникает?
4. Почему область объемного заряда в полупроводнике (диод Шоттки) много больше, чем к металлу?
5. Какой вид имеет уравнение ВАХ для диода Шоттки?
6. Участвуют ли в работе диода Шоттки основные и неосновные носители в полупроводнике?
7. В чем достоинства диодов Шоттки?
8. В чем недостатки диодов Шоттки?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ВАХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Изучить физические процессы, возникающие в контакте металл-полупроводник и р-п-переходе.

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:

Компьютер с соответствующим программным обеспечением:

Краткое теоретическое введение

р-п-переход

Полупроводниковым диодом называют полупроводниковый прибор с одним электрическим р-п переходом и двумя выводами. Физический механизм действия и функциональные возможности зависят от внутреннего строения диода. В данной работе исследуются вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов, основанных на контактных явлениях в полупроводниках.

По функциональному назначению диоды делятся на выпрямительные, импульсные, стабилитроны (опорные), варикапы, туннельные, фотодиоды, светодиоды и др.

Большинство полупроводниковых диодов выполняют на основе несимметричных р-п переходов. Низкоомную область диодов называют эмиттером, а высокоомную – базой.

В реальных диодах прямая и обратная ветви ВАХ отличаются от идеальной характеристика р-п перехода. При обратном включении диода тепловой ток I_0 составляет лишь часть обратного тока диода. При прямом включении существенное влияние на ход ВАХ оказывает падение напряжения на сопротивление базы диода, которое начинает проявляться уже при 2...10 мА.

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 ($l \gg d$).

В обоих случаях в прямом смещении ток через диод определяется экспоненциальным членом:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{q_e U}{kT}\right) - 1 \right].$$

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

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

Диод Шоттки. Работа диодов Шоттки основана на переносе основных носителей заряда. Перенос зарядов в барьере Шоттки осуществляется в основном за счёт термоэлектронной эмиссии в отличие от р-п-перехода, где перенос осуществляется за счёт инжекции и диффузии неосновных носителей заряда.

Напряжение, приложенное к диоду Шоттки, непосредственно управляет потоком заряда, преодолевающим потенциальный барьер. Действительно, при прямом смещении электроны из полупроводника переходят в металл. В момент перехода их энергия превосходит энергию основной массы электронов металла на величину энергии преодолённого барьера.

Однако спустя короткое время, порядка 10^{-12} с, за счёт соударений они теряют избыток энергии. Это исключает их возвращение в полупроводник и предопределяет практически безинерционное (без задержки) участие в дальнейших процессах, обусловленных изменением внеш-

него напряжения. Поэтому диоды Шоттки являются наиболее высокочастотными.

Обратный ток реального барьера Шоттки больше чем идеального, определяемого формулой. При отрицательном напряжении процессы переноса имеют обратное направление. Идеальной моделью учитывается только ток, создаваемый переносом электронов из металла в полупроводник.

n-p-переход. Электронно-дырочный или n-p-переход представляет собой область контакта n- и p- полупроводников. Следует отметить, что этот контакт не механический, а полученный внутри кристалла и может быть образован за счет сплавления акцептора в n-полупроводник или донора в p-полупроводник (сплавные n-p переходы), а также методом диффузии в вакуумных печах парообразного донора или акцептора в p- или n-кристалл (диффузионные n-p переходы).

Переход в целом нейтрален: положительный заряд в левой части равен отрицательному заряду в правой части. Однако плотности зарядов резко различны (из-за различия в концентрациях примесей).

Поэтому различны и протяженности обедненных слоев: в слое с меньшей концентрацией примеси (в нашем случае в p-слое) область объемного заряда значительно шире. Несимметричный переход сосредоточен в высокоомном слое.

Не вдаваясь глубоко в физические процессы образования и работы p-n перехода, отметим, что в месте контакта p и n областей образуется запирающий слой повышенного сопротивления. Толщина этого слоя зависит от величины и направления приложенного напряжения. Если к p-полупроводнику приложить полярность (+), то толщина запирающего слоя будет уменьшаться, а электрический ток переносится основными носителями в каждой области. Поэтому для этой полярности n-p-переход имеет низкое сопротивление. Это направления тока называется прямым.

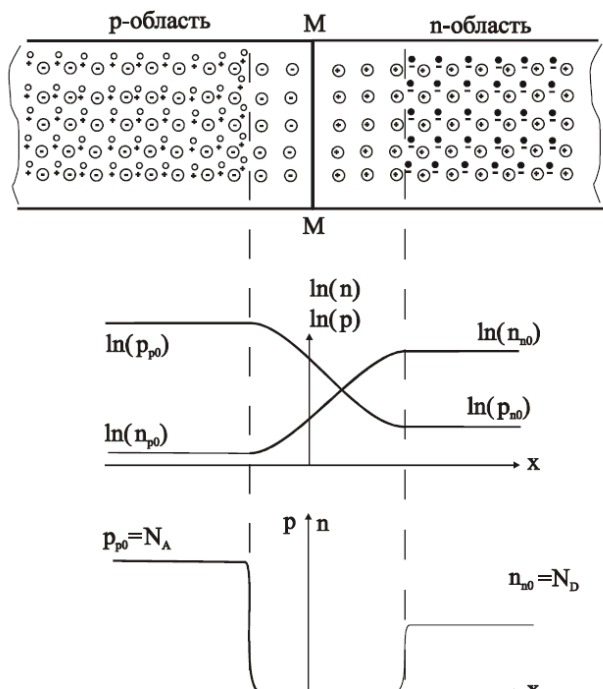


Рисунок 5.1

Если приложить “-” к р-области и “+” к п-области. Произойдёт следующее: высота потенциального барьера увеличится на величину приложенного напряжения qU . Толщина обеднённого слоя увеличится, вследствие оттягивания основных носителей тока от границ р-п-перехода. Такую полярность приложенного напряжения, при которой высота потенциального барьера увеличивается, называется обратной полярностью, а протекающий ток - обратным.

Обратный ток при такой полярности обусловлен неосновными носителями в каждой области, для которых поле в переходе является ускоряющим (рисунок 3). Обратный ток

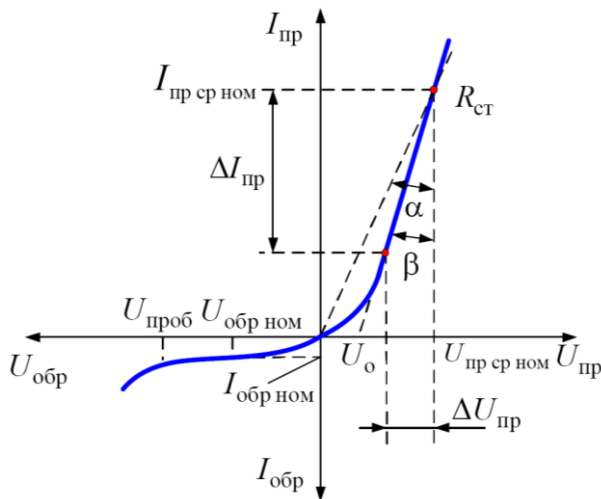


Рисунок 5.2

будет много меньше прямого тока ($I_{обр} \ll I_{прям}$). Обратный ток практически не зависит от приложенного напряжения, т.к. уже при небольших напряжениях все имеющиеся неосновные носители вовлекаются в образование тока и дальнейшее увеличение напряжения не приводит к росту тока. Под воздействием термогенерации внутри каждого полупроводника р-п-перехода образуются пара носителей заряда.

Вольт-амперная характеристика р-п-перехода в общем виде, с указанием основных параметров представлена на рисунке 4. Из рисунка становятся ясным физический смысл основных параметров полупроводникового диода.

Статическое сопротивление $R_{ст}$ находится с помощью

закона Ома $R_{ст} = \frac{U_{ид}}{I_{ид}}$ для каждой строчки таблицы.

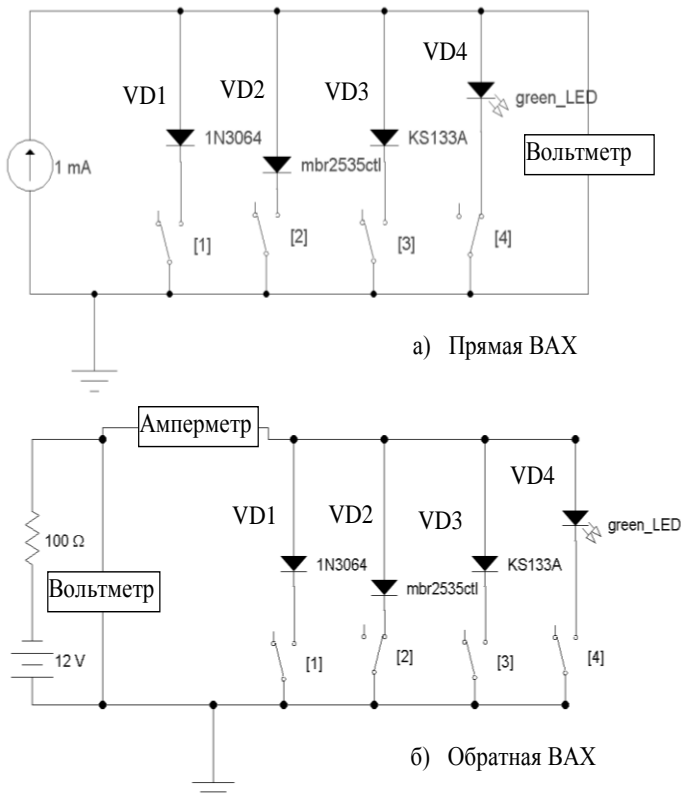


Рисунок 5.3

Методика эксперимента

Для осуществления имитационного экспериментального исследования контакта металл-полупроводник используется программа WorkBench. С помощью имитационного эксперимента можно провести исследование контакта в более широком спектре задач. В данной работе предполагается выполнение следующих исследований:

1. Снятие ВАХ (прямое и обратное направления) диодов. В качестве диодов предполагается

Физические основы микроэлектроники

исследование кремниевого диода 1N3064, диода Шоттки mbr2535ctl, светодиода green_LED и стабилитрона KS133A.

2. Расчет статического сопротивления диодов для прямого направления.

3. Нахождение падения напряжения на диоде, включенном в прямом направлении U_0 . (Находится по графику).

Инструкции по выполнению лабораторной работы.

1. На рабочем поле WorkBentch собрать схему для снятия ВАХ в соответствии со схемой 5. Для удобства схема содержит все указанные диоды и нужные режимы устанавливаются переключателями.

2. Выбор конкретного типа диода осуществлен с использованием базой элементов программы.

3. Результаты снятия ВАХ каждого диода занести в таблицу. Структура таблицы приведена ниже. **Всего должно быть четыре таблицы.**

4. Для стабилитрона запись снятия обратной ветви записывается в таблицу 3

Таблицы 1, 2, 4

Физические основы микроэлектроники

№ п/п	Диод типа					Примечания
	Прямая ветвь		№ п/п	Обратная ветвь		
	U, В	I, мА		U, В	I, мкА	
1.		0	1.	0		
2.		0,5	2.	2		
3.		1	3.	3		
4.		3	4.	5		
5.		5	5.	10		
6.		10	6.	15		
7.		15	7.	20		
8.		20	8.	30		
9.		25	9.	40		
10.		30	10.	♦	♦	
11.		40	11.	♦	♦	
12.		50	12.	♦	♦	

Таблица 3

№ п/п	Таблица 3 Обратная ветвь стабилитрона		
	Напряжение батареи U _б , В	Показание вольтметра U, В	I, мкА
1	0		
2	2		
3	2.8		
4	2.9		
5	3.0		
6	3.1		
7	3.2		
8	3.3		
9	3.4		
10	3.5		
11	4,0		
12	5.0		

5. Обратные ветви диодов VD1, VD2 и VD3 снимать до напряжения 10 В. Обратить внимание на обратный ток диода Шоттки (VD2): он должен быть больше.

6. Обратный ток стабилитрона VD4 снимать до значения тока 15 мА. Он начнет резко расти, начиная с напряже-

ния 3,2 В. Поэтому до напряжения 3 В снять три точки примерно через 1 В. Затем через 0,1 В еще пять точек.

7. Для каждой таблицы должны быть построены графики и объяснен их ход.

8. На основании полученных результатов снятия ВАХ найти уравнение для прямой ветви диода Шоттки. Аппроксимировать с помощью Curvexpert экспоненциальной функцией (см. теорию).

9. На основании полученных результатов снятия ВАХ построить графики зависимости статического сопротивления прямой ветви от приложенного напряжения для ветодиода и определить необходимые характеристики.

Контрольные вопросы

1. Какие типы примесной проводимости Вы знаете?
2. Какие носители называются основными (неосновными)?
3. Какие возможны варианты контакта металл-полупроводник в зависимости от соотношения работ выхода и типа проводимости?
4. В чем отличие диффузионной и диодной теорий выпрямляющего действия контакта?
5. Запишите уравнение ВАХ полупроводникового диода.
6. На чем основывается работа диодов Шоттки?
7. Почему диоды Шоттки обладают большим быстродействием, чем обычные р-п переходы?
8. Что такое р-п переход? Каковы пути его получения?
9. Что такое прямой ток р-п перехода? Какие носители его обеспечивают?
10. Что такое обратный ток р-п перехода? Какие носители его обеспечивают?
11. Как соотносятся между собой обратные токи р-п перехода и диода Шоттки?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ P-N ПЕРЕХОДОВ. БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Изучить физические процессы, возникающие в контакте взаимодействующих p-n-переходов. Снять характеристики биполярного транзистора для схемы с общим эмиттером

ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:

Компьютер с соответствующим программным обеспечением:

КРАТКОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Транзисторы представляют собой полупроводниковые приборы, состоящие из трех областей с чередующимися типами электропроводимости.

По принципу действия транзисторы делятся на биполярные и полевые. Транзистор называют биполярным из-за того, что физические процессы в нем связаны с движением носителей зарядов обоих знаков (свободных дырок и электронов).

Биполярный транзистор, способный усиливать и генерировать электрические сигналы приобретает указанные свойства благодаря тому, что p-n-переходы, из которых он состоит, взаимодействуют между собой в кристалле полупроводника.

В биполярном транзисторе (БТ) ток через кристалл обусловлен движением носителей заряда обоих знаков (и электронов, и дырок). В полевых транзисторах протекание тока через кристалл обусловлено движением носителей заряда одного знака (электронов или дырок).

Возможны две трехслойные структуры с различным чередованием участков с электронной и дырочной проводи-

мостью, отсюда различают транзисторы двух типов: р-п-р и п-р-п. Структура и условные обозначения этих типов транзисторов приведены на рисунок 6.1 а, б.

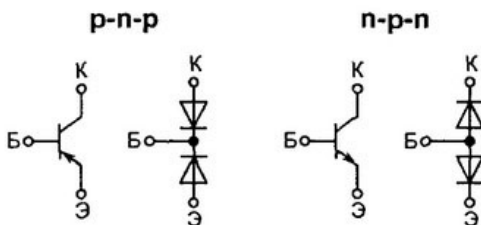


Рисунок. 6.1

Принцип работы БТ обеих структур одинаков, они отличаются только полярностью подключения источников питания. Рассмотрим работу БТ на примере структуры п-р-п.

В пластину полупроводника р-типа с низкой концентрацией дырок наплавливаются с двух сторон таблетки донорной примеси. Атомы донорной примеси проникают в кристалл, создавая п-области. Между п-областями и полупроводником р-типа образуются р-п-переходы. При этом в одной п-области создают большую концентрация примесей (на рис. 2 – в левой п-области), чем в другой. Наименьшая концентрация примеси остается в средней области р-типа. Наружная область с наибольшей концентрацией примеси называется эмиттером, вторая наружная область – коллектором, а внутренняя область – базой. Электронно-дырочный переход между эмиттером и базой называют эмиттерным переходом, а между коллектором и базой – коллекторным переходом. В соответствии с концентрацией основных носителей заряда база является высокоомной областью, коллектор – низкоомной, а эмиттер – самой низкоомной. Толщина базы очень мала и составляет единицы мкм; площадь коллекторного перехода в несколько раз превышает площадь эмиттерного перехода.

Электроны, перешедшие в базу, имеют вблизи р-п-перехода повышенную концентрацию, что вызывает диффузию их в базу. Толщина базы очень мала, поэтому электроны в процессе диффузии оказываются вблизи коллекторного перехода. Большая их часть не успевает рекомбинировать с дырками базы и втягивается ускоряющим электрическим полем коллекторного перехода в область коллектора. Происходит экстракция электронов под действием обратного напряжения из базы в коллектор. Движение электронов в процессе экстракции из базы в коллектор создает ток коллектора I_k . Незначительная часть инжектируемых из эмиттера в базу электронов рекомбинируют в области базы с дырками, количество которых пополняется из внешней цепи от источника $E_э$. За счет этого в цепи базы протекает ток базы $I_б$. Он очень мал из-за небольшой толщины базы и малой концентрации основных носителей заряда – дырок. При этих условиях число рекомбинаций, определяющих величину тока базы, невелико.

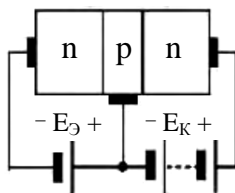


Рисунок 6.2 Схема подключения БТ к источникам питания

Ток коллектора управляется током эмиттера: если увеличится ток эмиттера, то практически пропорционально возрастет ток коллектора. Ток эмиттера может изменяться в больших пределах при малых изменениях прямого напряжения на эмиттерном переходе. Токи трех электродов транзистора связаны соотношением: $I_э = I_k + I_б$.

На рисунке 3 представлены в схематическом виде основные процессы, протекающие в транзисторе.

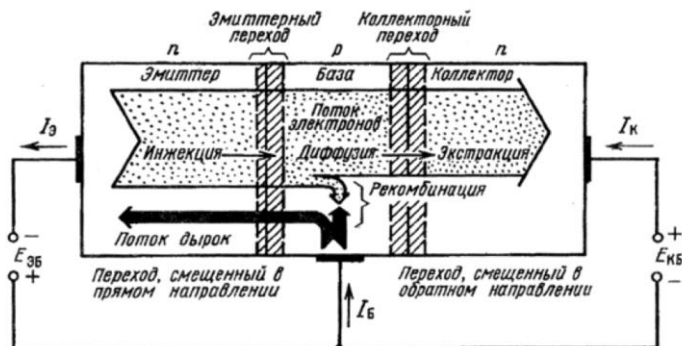


Рисунок 6.3 – Процессы, протекающие в транзисторе

Основные характеристики биполярного транзистора

Основными характеристиками биполярного транзистора являются входные и выходные характеристики. Фактически эти характеристики представляют собой ВАХ соответствующих переходов, снятые при наличии работающего другого перехода. Что считать входом и выходом транзистора как усилительного элемента зависит от схемы его включения. Наибольшее применение нашла схема включения с общим эмиттером, т. к. она дает наибольший коэффициент усиления по мощности и имеет вполне приемлемые значения входного и выходного сопротивления. Поэтому именно для этой схемы включения проведем исследования входных и выходных характеристик. Входной цепью для схемы ОЭ является цепь эмиттер–база, а выходной – цепь эмиттер–коллектор. Поэтому входной характеристикой для этой схемы является зависимость тока базы I_B от напряжения между базой и эмиттером $U_{БЭ}$ при постоянной величине напряжения между эмиттером и коллектором:

$$I_B = f(U_{БЭ}) \quad U_{КЭ} = \text{const}.$$

Выходной характеристикой является зависимость тока коллектора I_K от напряжения между эмиттером и коллектором при неизменной величине тока базы I_B :

$$I_K = f(U_{КЭ}) \Big|_{I_B = \text{const}}$$

Входная характеристика схемы с общим эмиттером –
Входной характеристикой для этой схемы является зависи-

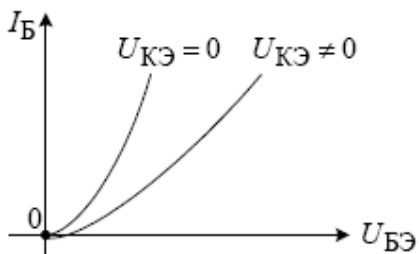


Рисунок 6.4 – Входная характери-
стика

мость тока базы I_B от
напряжения между ба-
зой и эмиттером $U_{БЭ}$
при постоянной вели-
чине напряжения меж-
ду эмиттером и кол-
лектором

$$I_B = f(U_{БЭ}) \Big|_{U_{КЭ} = \text{const}}$$

на рисунке 4. Т.к. входной (эмиттерный переход) включен в
прямом направлении, то входная характеристика похожа на
ВАХ прямого направления p-n перехода.

Вид входной характе-
ристики представлен

Выходная характеристика схемы с общим эмит-

тером - зависимость тока коллектора I_K от напряжения
между эмиттером и коллектором при неизменной величине

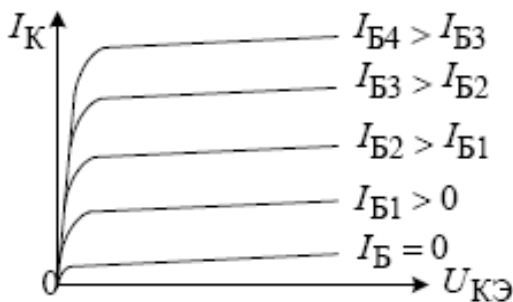


Рисунок 6.5 – Выходная характеристика

тока базы I_B : $I_K = f(U_{КЭ})|_{I_B = const}$. Семейство выходных характеристик транзистора, соответствующих различным значениям тока базы показана на рисунке 5. Не трудно видеть, что выходная характеристика похожа на ВАХ диода в обратном направлении. То насыщения зависит от прямого тока входного p-n перехода.

На рисунке 6 представлен сводный график характеристик биполярного транзистора. С помощью этого рисунка можно ориентироваться в получаемых экспериментальных данных.

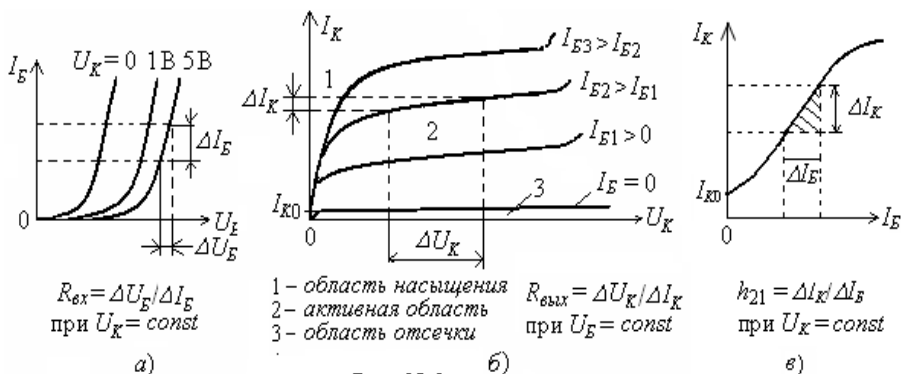


Рисунок 6.6

Методика эксперимента

Для осуществления имитационного экспериментально-го исследования входных и выходных характеристик биполярного транзистора используется программа WorkBentch.

Схема для снятия статических характеристик приведена на рисунке 7.

В схеме используются два регулируемых источника напряжения $E1$ и $E2$. С помощью источника $E1$ регулируется напряжение смещения на базе транзистора. Источник напряжения $E2$ питает цепь коллектора. Контроль тока базы осуществляется амперметром $PA1$. Вольтметром $PV1$ измеряется напряжение база-эмиттер.

Контроль тока коллектора осуществляется амперметром $PA2$. С помощью вольтметра $PV2$ измеряется напряжение коллектор-эмиттер.

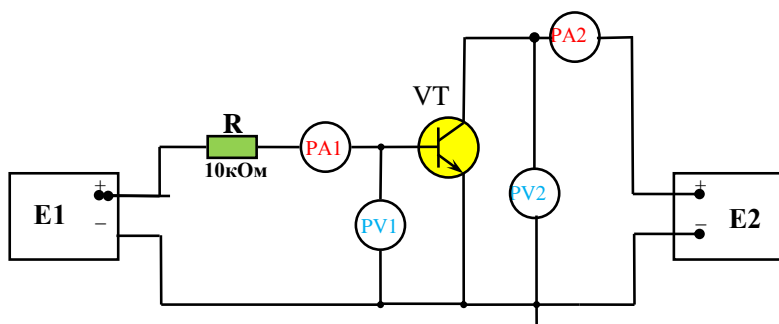


Рисунок 6.7 - Принципиальная схема снятия статических характеристик транзистора в схеме с общим эмиттером.

При снятии входных статических характеристик с помощью источника напряжения $E2$ устанавливается напряжение коллектор-эмиттер, значение которого в процессе измерения остается неизменным. С помощью источника напряжения $E1$ устанавливается напряжение база-эмиттер, значение которого изменяется в процессе измерения.

При снятии выходных статических характеристик с помощью источника напряжения $E1$ устанавливается ток базы, значение которого в процессе измерения остается неизменным. С помощью источника напряжения $E2$ устанавливается напряжение коллектор-эмиттер, значение которого изменяется в процессе измерения.

Порядок измерений

В соответствии с принципиальной схемой, указанной на рисунке 1 собрать схему измерений на рабочем поле WORKBENCH. Выбрать самостоятельно имитационные компоненты. В качестве транзистора n-p-n типа рекомендуется взять транзистор 2N3394, а в качестве транзистора p-n-p – транзистор 2N3703. Источники E1 и E2 можно взять однотипными.

Снятие входных статических характеристик транзистора.

Для снятия входных характеристик необходимо собрать схему по рисунку 8. Собранную схему покажите преподавателю. После проверки преподавателем собранной схемы запустите программу.

Входное напряжение задается батареей, а величина тока ограничивается сопротивлением 10 кОм. Входные характеристики отражаются двумя кривыми: при нулевом напряжении на коллекторе и при других напряжениях. В процессе лабораторной работы необходимо убедиться, что при 10 В и при 15 В на коллекторе входные характеристики совпадают.

напряжение коллектор-эмиттер равное 0В. Изменяя значение напряжение база-эмиттер согласно таблице 6.1. При каждом значении напряжения база-эмиттер записать показания амперметра PA1 в соответствующий столбец таблицы

Повторить данную операцию при двух значениях напряжения коллектор-эмиттер равных 10В и 15В, полученные экспериментальные данные занести в таблицы 6.2 и 6.3.

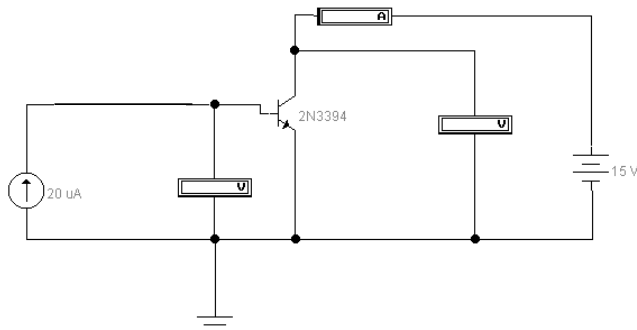


Рисунок 6.8 – Схема снятия входных статических характеристик биполярного транзистора

 $U_{кэ}=0В$
 $U_{кэ}=10В$
Таблица 6.1
Таблица 6.2

I_b(мкА)	2	10	30	60	90	110	120	150
$U_{бэ}$ (мВ)								

 $U_{кэ}=15В$
Таблица 6.3

I_b(мкА)	2	10	30	60	90	110	120	150
$U_{бэ}$ мВ)								

Внимание! При построении графиков в отчете по оси Х откладывать $U_{бэ}$.

Снятие выходных статических характеристик транзистора.

При снятии выходных характеристик параметром, поддерживаемом постоянным, является ток базы. Поэтому батарею с ограничивающим сопротивлением необходимо заменить источником тока, который при любых значениях напряжения на коллекторе, поддерживает заданное значение тока базы.

Для снятия выходных характеристик можно использовать ту же схему (рисунок 8). После проверки преподавателем собранной схемы запустите программу.

Выходной характеристикой биполярного транзистора является зависимость тока коллектора от напряжения коллектор-эмиттер при постоянном токе базы.

Контроль тока коллектора осуществляется амперметром PA2. С помощью вольтметра PV2 измеряется напряжение коллектор-эмиттер.

Порядок измерений.

При этом упражнении ток коллектора не должен превышать 15-20мА при изменении напряжения на коллекторе. Управление величиной тока базы осуществляется с помощью источника E1. Провести измерения при трех значениях тока базы I_b , полученные экспериментальные данные занести в таблицы 6.4, 6.5 и 6.6.

$I_b=20\mu\text{кА}$

Таблица 6.4

U_к (В)	0	0,05	0,1	0,15	0,2	1	5	10
I_к(мА)								

$I_b=50\mu\text{кА}$

Таблица 6.5

U к (В)	0	0,05	0,1	0,15	0,2	1	5	10
I к(мА)								

 $I_b = 100 \mu\text{кА}$
Таблица 6.6

U к (В)	0	0,05	0,1	0,15	0,2	1	5	10
I к(мА)								

3.3 Исследование транзистора другой структуры.

Заменить транзистор n-p-n типа на транзистор p-n-p. Повторить проведенные ранее исследования с транзистором другого типа. Замена типа транзистора должна сопровождаться переменной полярности источников и приборов.

Отчет должен содержать:

Краткую теорию.

Схемы измерений;

Таблицы и графики снятых зависимостей (после проведения исследований) должны быть подписаны преподавателем;

Контрольные вопросы

1. Что такое собственная проводимость полупроводников?
2. Какие типы примесной проводимости Вы знаете?
3. Какие носители называются основными (неосновными)?

4. Какие возможны варианты контакта металл-полупроводник в зависимости от соотношения работ выхода и типа проводимости?
5. Что такое биполярный транзистор?
6. В чем отличие биполярного транзистора от полевого?
7. Как работает транзистор, включенный в режиме «с общим эмиттером»?
8. Что такое входная характеристика транзистора?
9. Какой вид имеет входная характеристика для биполярного транзистора?
10. Что такое выходная характеристика транзистора?
11. Какой вид имеет выходная характеристика для биполярного транзистора?
12. Как зависит выходная характеристика от напряжения между коллектором и эмиттером?
13. Как зависит выходная характеристика от тока базы?
14. В чем различие между транзисторами n-p-n и p-n-p типа?

Рисунок 2

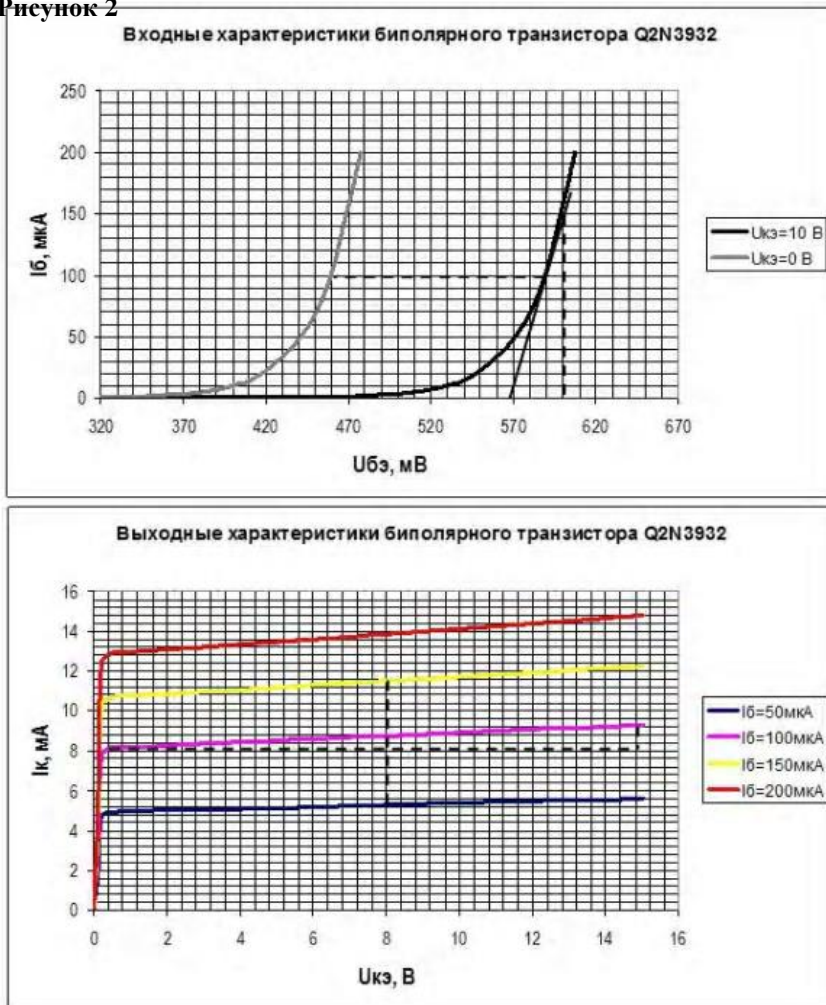


Рисунок 6.9 – Ориентировочный вид графиков

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С ОБЩИМ ИСТОКОМ В СТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: в режиме имитационного макетирования в среде WorkBench провести исследование:

- выходных характеристик полевого транзистора,
- работу полевого транзистора в нагрузочном режиме.

МАТЕРИАЛЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: программа WorkBench, элементы схемы и приборы из базы программы.

КРАТКОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В полевых транзисторах, управление потоком основных носителей заряда осуществляется в области полупроводника, называемой каналом, путем изменения его поперечного сечения с помощью электрического поля. Полевой транзистор имеет следующие три электрода: исток, из которого они вытекают в канал, сток, в который основные носители втекают из канала, и затвор, предназначенный для регулирования тока путем изменения поперечного сечения канала.

Преимуществом полевых транзисторов является также и то, что ассортимент полупроводниковых материалов для их изготовления значительно шире (так как они работают только с основными носителями заряда), благодаря чему возможно создание, например, температуростойких приборов. Большое значение также имеют низкий уровень шумов и высокое входное сопротивление этих транзисторов.

Существует несколько разновидностей полевых транзисторов, различающихся физической структурой и способом управления проводимостью канала, которые в ря-

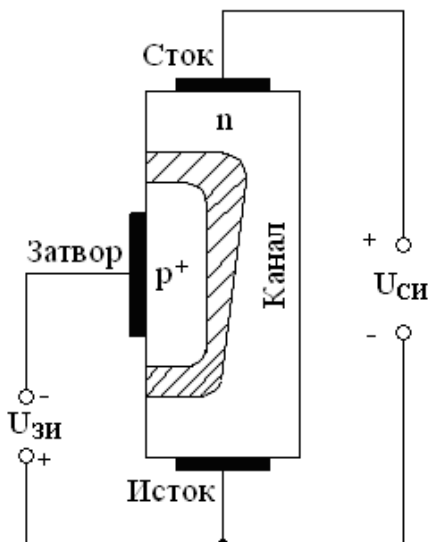


Рисунок 7. 1 – ПТ с управляющим р-п переходом

де устройств работают более эффективно, чем биполярные.

На рисунке 7.1 приведена упрощенная структура полевого транзистора с управляющим р-п переходом и каналом n-типа. В принципе канал может иметь электропроводимость, как р-типа, так и n-типа; поскольку $\mu_n > \mu_p$ выгоднее применять n-канал. Затвор выполняют в виде полупроводниковой области р⁺-типа. Во входную цепь между затвором и каналом включен источник обратного смещения $U_{зи}$. Выходная цепь состоит из источника постоянного напряжения $U_{си}$ плюсом подсоединенного к стоку. Исток является общей точкой схемы. Контакты истока и стока невыпрямляющие.

Полевой транзистор работает следующим образом. При отсутствии напряжения на входе основные носители

заряда - электроны под действием ускоряющего электрического поля в канале ($E = 10^5 \div 10^4$ В/см) дрейфуют в направлении от истока к стоку, в то время как р-п переход для них заперт. Ток I_C , создаваемый этими электронами, определяется как напряжением стока $U_{СИ}$, так и сопротивлением канала. Последнее зависит от поперечного сечения канала, которое ограничивается р-п переходом (заштрихованная область). Поскольку потенциал электрического поля линейно возрастает от истока к стоку вдоль канала, толщина р-п перехода минимальна вблизи истока и максимальна вблизи стока, и канал сужается вдоль р-п перехода от истока к стоку. Таким образом, наибольшим сопротивлением канал обладает в наиболее узкой своей части, т.е. у стока.

Если обратное напряжение $U_{ЗИ}$ подаваемое к затвору увеличить, то толщина р-п перехода по всей его длине увеличится, а площадь сечения канала и, следовательно, ток в цепи стока уменьшаются.

Указанный эффект будет тем сильнее, чем больше удельное сопротивление материала полупроводника, поэтому полевые транзисторы выполняют из высокоомного материала (с малой концентрацией примесей в канале). При обратном напряжении на затворе равном $U_{ЗИ0}$ сечение канала в определенной его части станет равным нулю и ток через канал прекратится. Такой режим называется режимом отсечки.

Статические характеристики полевого транзистора с управляющим р-п переходом

В качестве статических характеристик ПТ представляются функциональные зависимости между токами и напряжениями, прикладываемыми к их электродам: *входная характеристика* $I_3 = f(U_{ЗИ})$ при $U_{СИ} = \text{const}$; *характеристика обратной связи* $I_3 = f(U_{СИ})$ при $U_{ЗИ} = \text{const}$; *характеристика прямой передачи* $I_C = f(U_{ЗИ})$ при $U_{СИ} = \text{const}$; *выходная характеристика* $I_C = f(U_{СИ})$ при $U_{ЗИ} = \text{const}$.

На практике широко используются лишь две последние характеристики, причем первую из них часто называют передаточной характеристикой.

Входная характеристика и характеристика обратной связи применяется редко, так как в абсолютном большинстве случаев входные токи ПТ пренебрежимо малы (от 10^{-8} до 10^{-12} А) по сравнению с токами, протекающими через элементы, подключенные ко входу.

На рисунке 7.2, а изображена характеристика прямой передачи $I_C = f(U_{ЗИ})$.

При напряжениях на стоке $U_{СИ} > U_{ЗИ0}$ характеристика прямой передачи хорошо описывается формулой

$$I_C = I_{C0} \cdot \left(1 - \frac{U_{ЗИ}}{U_{ЗИ0}}\right)^2,$$

где I_{C0} – ток стока при $U_{ЗИ}=0$.

На рисунке 7.2, б изображено семейство статических выходных характеристик $I_C = f(U_{СИ})$ при различных значениях напряжения затвора $U_{ЗИ}$. Каждая характеристика имеет три участка - омический (для $U_{СИ} < U_{ЗИ0} - U_{ЗИ}$), насыщения (для $U_{СИ} > U_{ЗИ0} - U_{ЗИ}$) и пробоя. При $U_{ЗИ} = 0$ с увеличе-

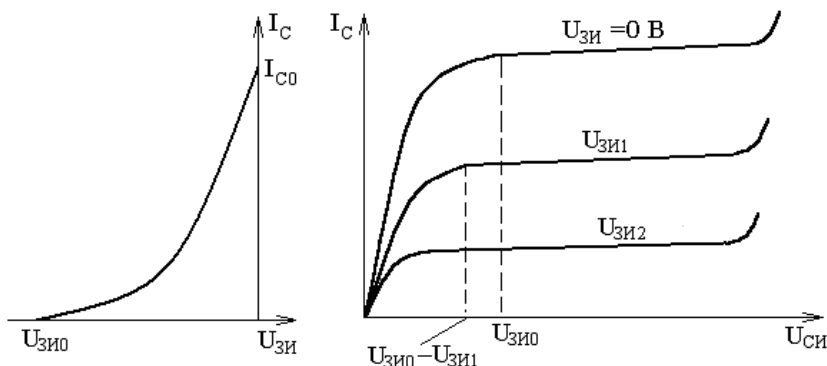


Рисунок 7.2 – Характеристики прямой передачи (а) и выходные (б) ПТ с управляющим р-п переходом

нием напряжения U_C ток I_C вначале нарастает почти линейно, однако далее характеристика перестает подчиняться ли-

нейному закону; ток I_C начинает расти медленнее, ибо его увеличение приводит к повышению падения напряжения в канале и потенциала вдоль канала. Вследствие этого увеличиваются толщина запирающего слоя и сопротивление канала в области, прилегающей к стоку, это приводит к замедлению возрастания самого тока I_C . При напряжении насыщения $U_{СИ} = U_{ЗИ0}$ сечение канала вблизи стока приближается к нулю и рост I_C прекращается.

В омической области $U_{СИ} < |U_{ЗИ0} - U_{ЗИ}|$ ток стока определяется формулой

$$I_C = K_{ПТ} [(U_{ЗИ0} - U_{ЗИ}) U_{СИ} - 0,5 \cdot U_{СИ}^2],$$

где $K_{ПТ}$ – постоянный коэффициент, зависящий от конструкции транзистора и свойства материала, из которого он изготовлен.

Значение $K_{ПТ}$ можно выразить через параметры ПТ. Например, в случае ПТ с $p-n$ -переходом

$$K_{ПТ} = \frac{2 \cdot I_{C0}}{U_{ЗИ0TC}^2}$$

Следующая характеристика, снятая при некотором обратном напряжении затвора $U_{ЗИ1}$, когда запирающий слой имеет большую толщину при тех же значениях $U_{СИ}$, будет более пологой на начальном участке и насыщение наступит при меньших значениях $U_{СИ1} = U_{ЗИ0} - U_{ЗИ1}$.

При больших напряжениях на стоке наблюдается резкое увеличение I_C , и, если мощность рассеивания на стоке превышает допустимую, то происходит необратимый пробой участка затвор-сток. При увеличении запирающего напряжения до $U_{ЗИ2}$ увеличивается разность потенциалов между затвором и стоком. В этом случае пробой наблюдается при меньшем напряжении $U_{СИ}$ на величину напряжения $U_{ЗИ2}$, т.е. $U_{СИ2} = U_{СИ1} - U_{ЗИ2}$.

Если к $p-n$ -переходу затвор-канал прикладывать прямое напряжение, то обедненный слой уменьшается и эффективная толщина проводящего канала увеличивается.

Выходной ток в данном случае возрастает. Однако при определенных значениях отпирающего напряжения (превышающих 0,6 В для кремниевых приборов) возникают существенные прямые токи перехода затвор-канал, ток стока и входное сопротивление прибора в этом случае резко падают. Из-за этого в большинстве случаев применения ПТ работа с прямыми токами затвора нежелательна. Поэтому обычно транзисторы с *p-n*-переходом используют при запирающих входных напряжениях.

Температурная зависимость тока истока связана с изменением подвижности основных носителей, заряда в материале канала. Для кремниевых транзисторов крутизна S уменьшается с увеличением температуры. Кроме того, с повышением температуры увеличивается собственная проводимость полупроводника, возрастает входной ток I_3 через переход и, следовательно, уменьшается $R_{вх}$. У полевых кремниевых транзисторов с *p-n* переходом при комнатной температуре ток затвора порядка 1 нА. При увеличении температуры ток удваивается на каждые 10°C.

Особенность полевых транзисторов заключается в наличии у них термостабильной точки (ТСТ), т. е. точки, в которой ток стока практически постоянен при различных температурах (рисунок 7.3). Это объясняется следующим образом. При повышении температуры из-за уменьшения подвижности носители удельная проводимость канала уменьшается, а, следовательно, уменьшается и ток стока. Одновременно сокращается ширина *p-n* перехода, расширяется проводящая часть канала и увеличивается ток. Первое сказывается при больших токах стока, второе при малых. Эти два противоположных процесса при определенном выборе рабочей точки могут взаимно компенсироваться. При правильном ее положении основной причиной дрейфа тока стока может быть высокоомный резистор в цепи затвора, в зависимости от температуры будет изменяться падение напряжения на нём и потенциал на затворе, которое изменит рабочий ток стока.

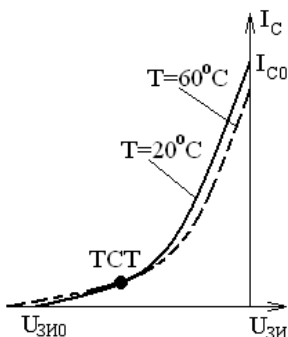


Рисунок 7.3 – Зависимость характеристик прямой передачи от температуры

Полевые транзисторы с р-п переходом целесообразно применять во входных устройствах усилителей при работе от высокоомного источника сигнала, в чувствительной по току измерительной аппаратуре, импульсных схемах, регуляторах уровня сигнала и т. п.

Методика эксперимента

Ход лабораторной работы

На рабочем поле WorkBentch собирается исследуемая схема. Тип полевого транзистора выбирается из списка в библиотеке программы. В отчет должна быть помещена схема с экрана WorkBentch, а не из методички!!!

Требуется выбрать два идентичных по конструкции транзистора и записать их марки, с указанием фирмы изготовителя:

транзистор 1 _____,

транзистор 2 _____

Основные параметры отечественного транзистора КП303Е (для сравнения):

Таблица 7.1

Наименование	Обозначение	Значения
Начальный ток стока, мА	$I_{\text{Снач.}}$	5 – 20
Крутизна характеристики, мА/В	S	≥ 4
Напряжение отсечки, В	$U_{\text{Зиотс.}}$	≤ 8
Максимально допустимое напряжение сток-исток, В	$U_{\text{СИmax}}$	25
Постоянная рассеиваемая мощность транзистора, мВт	P_{max}	200

1. Выходные характеристики полевого транзистора

Соберите на рабочем поле WorkBentch схему для снятия выходных характеристик полевого транзистора (Рисунок 7.4).

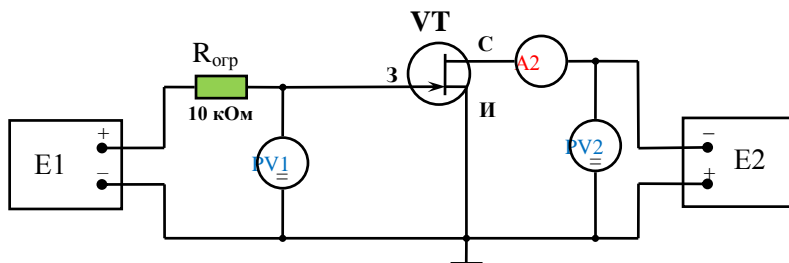


Рисунок 7.4 - Схема для снятия характеристик полевого транзистора с управляющим р-п-переходом и n-каналом.

После проверки схемы снимите семейство стоковых характеристик Для каждого транзистора $I_c=f(U_{си})$ для трёх значений напряжения на затворе. Результаты измерений занесите в таблицу № 1 и № 2. Должно быть два семейства.

Транзистор 1. Тип _____ Таблица 7.1

Uзи, В	Uси, В	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	10	20	40
0	I _c , мА													
1	I _c , мА													
1,5	I _c , мА													

Транзистор 2. Тип _____ Таблица 7.2

Uзи, В	Uси, В	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	10	12	14
0	I _c , мА													
1	I _c , мА													
1,5	I _c , мА													

Нанесите рабочую точку (Р.Т.) с координатами: $U_{си} = 6 \text{ В}$, $U_{зи} = 0,5 \text{ В}$ и определите величины напряжения насыщения: $U_{си\text{нас}} = \text{_____ В}$.

Внимание! Для замены транзистора не надо перенабавать схему. Для этого надо мышкой активизировать транзистор. После двойного щелчка WorkBentch перейдет в библиотеку транзисторов. В библиотеке надо выбрать дуной полевой транзистор и вернутья на рабочее поле.

2. Исследование полевого транзистора в нагрузочном режиме

Соберите на рабочем поле WorkBentch схему для исследования полевого транзистора в нагрузочном режиме (Рисунок 7.5).

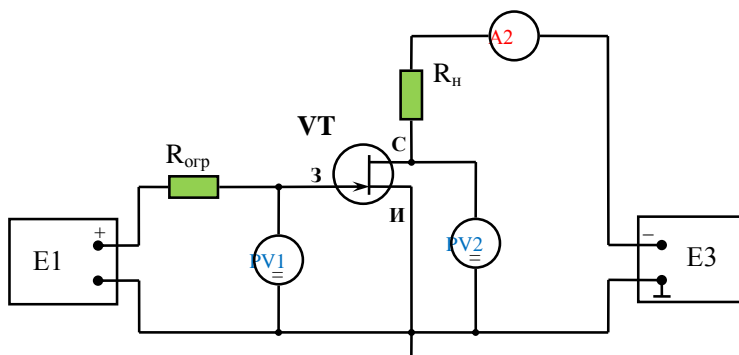


Рисунок 3.5 - Схема для исследования транзистора в нагрузочном режиме

В зависимости от номера рабочего места установить следующие значения величин, указанных в таблице 7.3.

Таблица 7.3

Вариант	1	2	3	4	5	6	7			10
$E3$ В	-10	-15	-10	-15	-10					
$R_{огр}$ КОМ	10	10	20	30	40					
$R_н$ КОМ	3	3,3	5	6	7					

2.1 Для каждого транзистора снять зависимость падения напряжения $U_{си}$ и тока I_c от величины $U_{зи}$. Полученные данные занести в таблицы 7.4 и 7.5

Транзистор 1. Тип _____ Таблица 7.4

$U_{зи}$, В	0	0,3	0,6	1	2	4	6	7	8	9
$U_{си}$, В										
I_c , МА										

Транзистор 2. Тип _____ Таблица 7.5

$U_{зи}, В$	0	0,3	0,6	1	2	4	6	7	8	9
$U_{си}, В$										
$I_c, мА$										

2.2 Для каждого транзистора снимите семейство стоко-затворных характеристик транзистора $I_c=f(U_{зи})$ для значения напряжения стока 15 В. Результаты измерений занесите в таблицу 7. 6 и 7.7

Транзистор 1. Тип _____

Таблица 7.6

$U_{си}, В$	$U_{зи}, В$	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5	2,75	3,0
15	$I_c, мА$													

Транзистор 2. Тип _____

Таблица 7.7

$U_{си}, В$	$U_{зи}, В$	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5	2,75	3,0
15	$I_c, мА$													

По данным таблиц постройте график зависимости $I_c=f(U_{зи})$ для каждого транзистора при $U_{си}=\text{const}$, нанесите рабочую точку с координатами: $U_{си} = 6 В$, $U_{зи} = 0,5 В$ и определите величину напряжения отсечки $U_{зиотс.} = \underline{\hspace{2cm}}$ В.

2.3 Для одного из транзисторов проверьте возможность замены стока истоком, т.е. переверните вертикально транзистор в схеме рисунок 1. Снимите зависимость $I_{и}=f(U_{ис})$ при $U_{зс} = 0$.

Результаты измерений занесите в таблицу №7. 8.

Таблица № 7.8.

$U_{зс}, В$	$U_{ис}, В$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0
0	$I_{и}, мА$													

	А												
--	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

2.7. По данным таблицы № 8 постройте зависимость $I_{и}=f(U_{иc})$ при $U_{зс}=0$ на графике стоковых характеристик.

2.8. Рассчитайте параметры исследуемого полевого транзистора (S, R_i, μ) в Р.Т. с координатами $U_{си} = 6$ В, $U_{зи} = 0,5$ В.

Результаты расчета привести в отчете.

3. ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ.

Крутизна характеристик: $U_{си}=\text{const}$	$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}}$
Выходное (внутреннее) сопротивление $U_{зи}=\text{const}$	$R_i = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c}$
Коэффициент усиления	$\mu = SR_i$

Контрольные вопросы

1. Как называются электроды полевого транзистора?
2. В чем отличие полевого транзистора от биполярного?
3. Поясните принцип работы полевого транзистора с управляющим р-n-переходом.
4. Почему полевой транзистор называется униполярным?
5. Почему у полевого транзистора большое входное сопротивление?
6. Почему у полевого транзистора управляющий р-n-переход должен быть смещен в обратном направлении?
7. Нарисуйте и объясните вид переходной характеристики полевого транзистора.
8. Что такое напряжения отсечки?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ В СТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Цель работы: в режиме имитационного макетирования в среде WorkBench провести исследование:

- выходных характеристик полевого транзистора с изолированным затвором,
- передаточных характеристик полевого транзистора с изолированным затвором

Материалы и принадлежности: программа WorkBench, элементы схемы и приборы из базы программы.

Краткое теоретическое введение

В полевых транзисторах, управление потоком основных носителей заряда осуществляется в области полупроводника, называемой каналом, путем изменения его поперечного сечения с помощью электрического поля. Полевой транзистор имеет следующие три электрода: исток, из которого они вытекают в канал, сток, в который основные носители втекают из канала, и затвор, предназначенный для регулирования тока путем изменения поперечного сечения канала.

Преимуществом полевых транзисторов является также и то, что ассортимент полупроводниковых материалов для их изготовления значительно шире (так как они работают только с основными носителями заряда), благодаря чему возможно создание, например, температуростойких приборов. Большое значение также имеют низкий уровень шумов и высокое входное сопротивление этих транзисторов.

Существует несколько разновидностей полевых транзисторов, различающихся физической структурой и

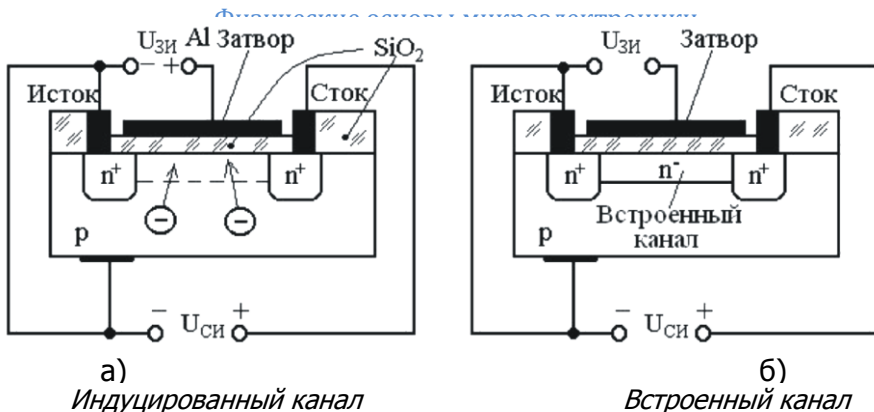


Рисунок 8.1 – ПТ с изолированным затвором

способом управления проводимостью канала, которые в ряде устройств работают более эффективно, чем биполярные.

Принцип действия ПТ с индуцированным каналом поясним, обратившись к схеме на рисунке 8.1 б), где показан n-канальный ПТ с короткозамкнутой подложкой и истоком, включенный по схеме с ОИ. В отсутствие напряжения на затворе, т.е. при $U_{зи} = 0$, и при $U_{си} > 0$ проводящего канала нет и ток стока ничтожно мал, так как представляет собой ток электронов обратно смещенного стокового p-n-перехода.

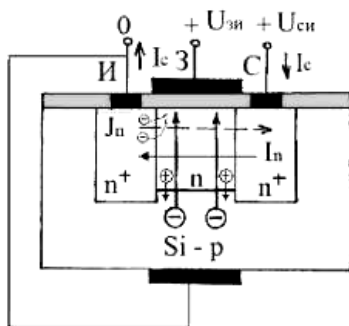


Рисунок 8.2 – Устройство полевого транзистора с изолированным затвором

При подаче напряжения $U_{зи}$ плюсом на затвор, как это показано на рисунке 2, дырки подложки оттесняются электрическим полем, созданным этим напряжением, от границы раздела диэлектрик-полупроводник вглубь подложки. Одновременно с этим процессом, понижается потенциальный барьер истокового n^+ - p -перехода, что приводит к росту числа электронов, поставляемых n^+ -истоком к границе раздела. Туда же поступают, хотя и в меньшем количестве, электроны из подложки. С ростом $U_{зи}$ концентрация электронов на границе раздела растет, главным образом, за счет понижения потенциального барьера истокового n^+ - p -перехода и увеличения потока электронов к границе из n^+ -истока. При некотором напряжении $U_{зи}$, называемом пороговым и составляющем единицы вольт, концентрация электронов под затвором увеличится настолько, что превысит концентрацию дырок в этой области, где и произойдет так называемая инверсия типа электропроводности подложки, т.е. образование тонкого проводящего канала n -типа (индуцированный канал). Таким образом, при $U_{зи} = U_{зи\ пор}$, где $U_{зи\ пор}$ — пороговое напряжение, исходный n^+ - p - n^+ транзистор преобразуется в n^+ - n - n^+ -структуру с изотипными n^+ - n - переходами, подобную структуре ПТ со встроенным каналом n -типа.

При дальнейшем увеличении $U_{зи}$, т.е. при $U_{зи} > U_{зи\ пор}$, понижается потенциальный барьер уже изотипного истокового n^+ - n -перехода, что приводит к существенному увеличению числа электронов, поставляемых n^+ -истоком в канал (режим обогащения канала), уменьшению сопротивления канала за счет увеличения его толщины и площади и к росту тока стока.

Качественное описание физических процессов в ПТ с индуцированным каналом адекватно отражает его передаточная характеристика, показанная на рисунке 3, которая хорошо аппроксимируется выражением при $U_{зи} > U_{зи\ пор}$. На рисунке 3 I_{c0} и $U_{зи\ пор}$ - параметры аппроксимации. Так как ПТ с индуцированным каналом может работать только в режиме обога-

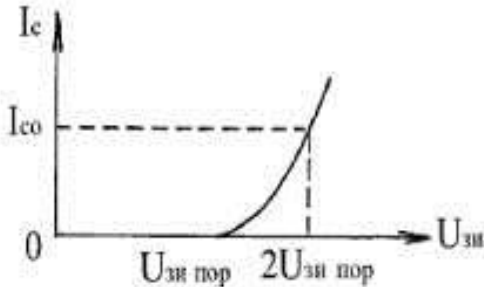


Рисунок 8.3 – Передаточная характеристика полевого транзистора с индуцированным каналом n-типа

щения, то его выходные характеристики имеют вид, показанный на рисунке 8.4, где $U_{зи\ пор}$

$$I_C = I_{C_0} \left(\frac{U_{зи}}{U_{зи\ пор}} - 1 \right)^2 \quad (1)$$

Основные параметры этого ПТ идентичны параметрам ПТ с управляющим p+-n-переходом (см. лабораторную работу 7). Все вышеизложенное о физических процессах в n-канальных ПТ, их характеристик и параметров справедливо и по отношению к p-канальным приборам. В частности, статические харак-

теристики р-канальных ПТ будут иметь тот же вид, что и n-канальных, но в своих областях напряжений $U_{зи}$ и $U_{си}$. электронных схемах являются n-канальные ПТ, обладающие лучшим сочетанием выходных характе-

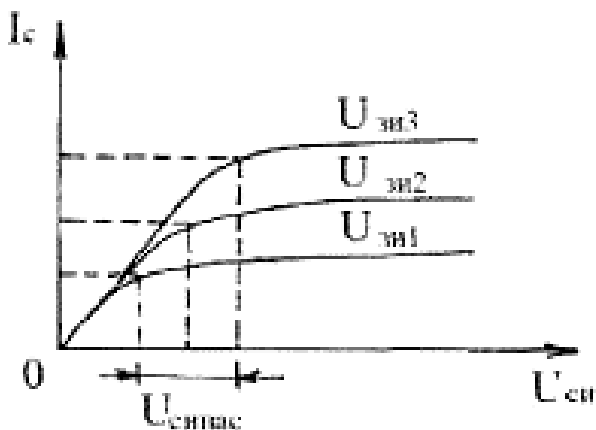


Рисунок 8.4 – Выходные характеристики полевого транзистора с индуцированным каналом

ристик по сравнению с р-канальными приборами из-за большей, чем у дырок, подвижности электронов

Методика эксперимента

Ход лабораторной работы

На рабочем поле WorkBentch собирается исследуемая схема. Тип полевого транзистора выбирается из списка в библиотеке программы. В отчет должна быть помещена схема с экрана WorkBentch, а не из методички!!!

Требуется выбрать два идентичных по конструкции полевых транзистора с изолированным затвором записать их марки, с указанием фирмы изготовителя:

транзистор 1 _____,

транзистор 2 _____

1. Выходные характеристики полевого транзистора

Соберите на рабочем поле WorkBentch схему для снятия выходных характеристик полевого транзистора (Рисунок 4).

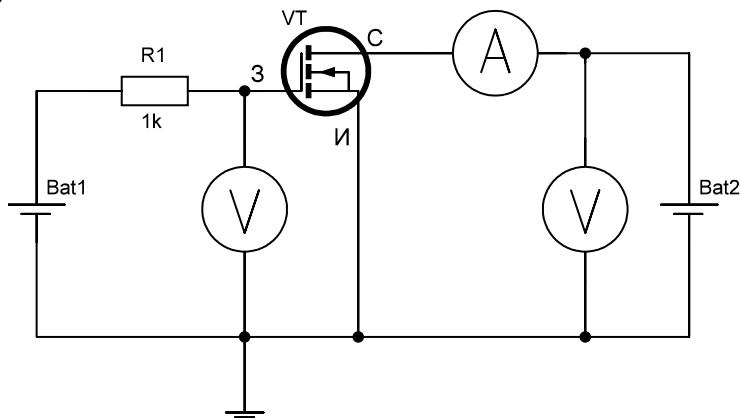


Рисунок 8.5 - Схема для снятия характеристик полевого транзистора

После проверки схемы снимите семейство стоковых характеристик Для каждого транзистора $I_c = f(U_{ci})$ для четырех значений напряжения на затворе. Результаты измере-

ний занесите в таблицу № 1 и № 2. Должно быть два семейства.

Транзистор 1. Тип
Таблица 1

$U_{зи}, В$	$U_{си}, В$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	10,0	12,0	14,0
0	$I_C, кА$													
1	$I_C, кА$													
1,5	$I_C, мА$													
2	$I_C, мА$													

Транзистор 2. Тип
Таблица 2

$U_{зи}, В$	$U_{си}, В$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	10,0	12,0	14,0
0	$I_C, кА$													
1	$I_C, кА$													
1,5	$I_C, мА$													
2	$I_C, мА$													

Нанесите рабочую точку (Р.Т.) с координатами: $U_{си} = 6 В$, $U_{зи} = 0,5 В$ и определите величины напряжения насыщения: $U_{синас} = \underline{\hspace{2cm}} В$.

Внимание! Для замены транзистора не надо перенабирать схему. Для этого надо мышкой активизировать транзистор. После двойного щелчка WorkBentch перейдет в библиотеку транзисторов. В библиотеке надо выбрать дуной полевой транзистор и вернуться на рабочее поле.

2. Исследование полевого транзистора в нагрузочном режиме

Соберите на рабочем поле WorkBentch схему для исследования полевого транзистора в нагрузочном режиме (Рисунок 8.5).

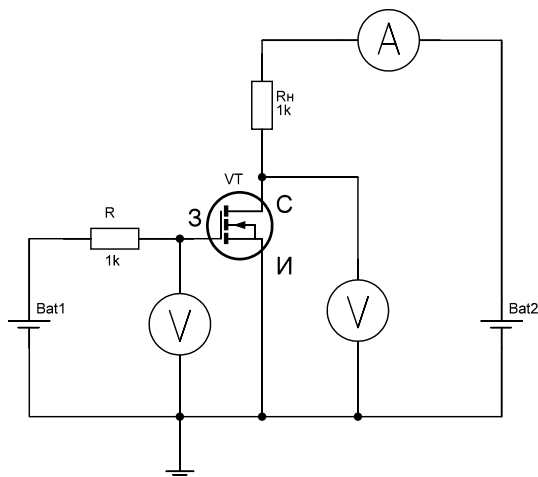


Рисунок 8.6 - Схема для исследования транзистора в нагрузочном режиме

В зависимости от номера рабочего места установить следующие значения величин, указанных в таблице 3.

ВАРИАНТЫ

Таблица 3

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0 ¹
E3 В	10	5	10	15	10					
R кОм	10	10	20	30	40					
R _н кОм	3	3 ³ ,3	5	6	7					

2.1 Для каждого транзистора снять зависимость падения напряжения $U_{СИ}$ и тока I_c от величины $U_{зи}$. Полученные данные занести в таблицы 4 и 5

Физические основы микроэлектроники

Транзистор 1. Тип _____ Таблица 4

$U_{зи}, В$	0	0,3	0,6	1	2	4	6	7	8	
$U_{си}, В$										
$I_c, МА$										

Транзистор 2. Тип _____ Таблица 5

$U_{зи}, В$	0	0,3	0,6	1	2	4	6	7	
$U_{си}, В$									
$I_c, МА$									

2.2 Для каждого транзистора снимите семейство стоко-затворных характеристик транзистора $I_c=f(U_{зи})$ для значения напряжения стока 15 В. Результаты измерений занесите в таблицу № 6 и 7

Транзистор 1. Тип _____ Таблица 6

$U_{си}, В$	$U_{зи}, В$	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5	2,75	3,0
15	$I_c, МА$													

Транзистор 2. Тип _____ Таблица 7

$U_{си}, В$	$U_{зи}, В$	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5	2,75	3,0
15	$I_c, МА$													

По данным таблиц постройте график зависимости $I_c=f(U_{зи})$ для каждого транзистора при $U_{си}=\text{const}$, нанесите рабочую точку с координатами

татами: $U_{СИ} = 6 \text{ В}$, $U_{ЗИ} = 0,5 \text{ В}$ и определите величину напряжения отсечки $U_{ЗИотс.} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В}$.

3. Наблюдение передаточной характеристики полевого транзистора на экране осциллографа (динамическая кривая).

Соберите на рабочем поле WorkBenth схему рисунок 7. На функциональном генераторе выберите режим пилообразного напряжения

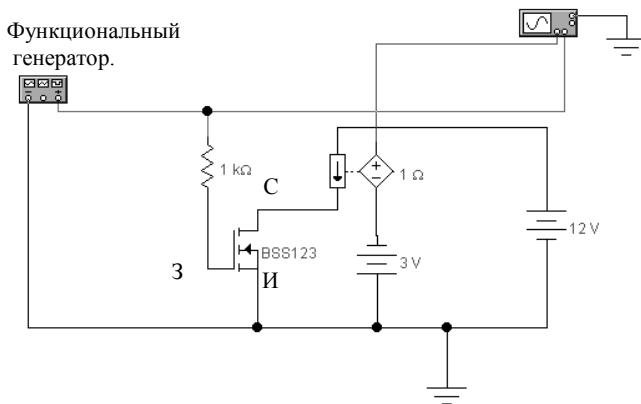


Рисунок 8.7 – Схема наблюдения передаточной характеристики в динамическом режиме

частотой 100 герц и амплитудой 6 В.

Осциллограф перевести в режим графопостроителя . Для этого установить режим **A/B**.

Принцип наблюдения. Напряжение генератора обеспечивает горизонтальную развертку. На вертикальные пластины подается сигнал тока стока транзистора. В результате наблюдается передаточная характеристика, вид которой представлен на рисунке 8.

Зарисовать в отчет передаточную характеристику.

Заменить марку транзистора из базы транзисторов WorkBenth и наблюдать как изменяется передаточная характеристика. Для этого схему перенабирать не надо. Менять только марку транзистора.

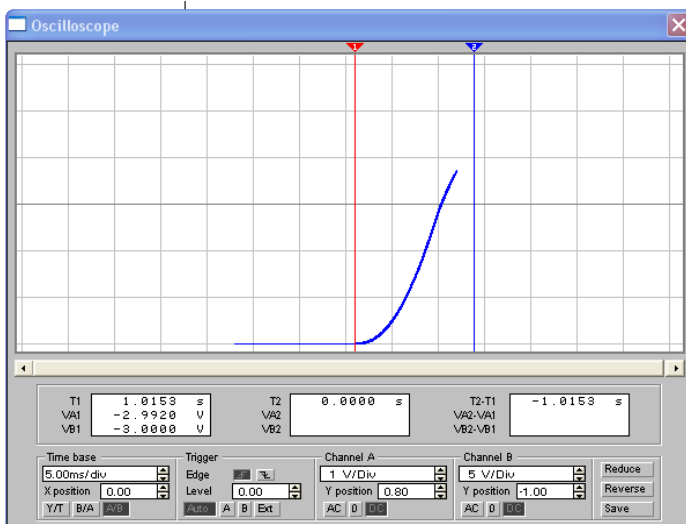


Рисунок 8 – Вид экрана с динамической передаточной характеристикой

Контрольные вопросы

1. Дать определение полевого транзистора.
2. На чем основано управление током в полевом транзисторе?
3. Объясните устройство и принцип действия полевого транзистора с управляющим р-n-переходом.
4. Как зависит сопротивление канала от электропроводности полупроводника, площади и длины канала?
5. Какую роль в полевых транзисторах выполняет затвор?
6. Как влияет сечение канала на ток полевого транзистора?
7. Какой полярности напряжение должно подаваться на затвор для эффективного управления током транзистора?
8. Как зависит сечение канала от величины напряжения, приложенного к стоку?
9. Нарисуйте выходные (стоковые) характеристики полевого транзистора с управляющим р-n-переходом и объ-

ясните их ход.

10. Нарисуйте стокзатворные характеристики полевого транзистора с управляющим р-n-переходом и объясните их ход.

11. Что называется напряжением отсечки?

12. Какой электрический режим полевого транзистора называется режимом насыщения?

13. Какое напряжение стока носит название напряжения насыщения?

14. Какие основные отличия полевых транзисторов с управляющим р-n-переходом от биполярных транзисторов Вы знаете?

15. В чем преимущества полевых транзисторов по сравнению с биполярными?

16. Назовите основные статические параметры полевых транзисторов?

17. Поясните методы определения статических параметров полевых транзисторов.

18. Нарисуйте эквивалентную схему полевого транзистора, поясните ее состав.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники: Учеб. пособие для вузов / — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2004. — 488 с: ил. I

2. Марголин В.И., Жабрев В.А., Тупик В.А. Физические основы микроэлектроники. - М.: Издательский центр “Академия”, 2008. - 400 с.

3. Епифанов Г. И. Физические основы микроэлектроники. М.: «Советское радио», 1971, стр. 376,