

**Кафедра ИУ-4
«Проектирование и технология производства ЭС»**

Журнал практических работ

**по курсу: «Физические основы
микроэлектроники»**

Для студентов приборостроительных специальностей

20___ / ___ учебный год

Студент _____
(фамилия, и. о.)

Группа _____

Преподаватель _____ Допуск к экзамену (зачету) _____ Подпись _____
(фамилия, и. о.) (число)

**Москва
2023**

Программа
к учебному плану направления подготовки 551100 (654300)
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ,
специальностям
220500 Проектирование и технология электронно-вычислительных средств и
200800 Проектирование и технология радиоэлектронных средств.

№	Виды учебных работ	Объем работ в часах		
		Всего	6 сем.	
	На дисциплину	144	144	
1	Аудиторная работа	85	85	
1.1	- лекции	51	51	
1.2	- семинары	17	17	
1.3	- лабораторные занятия	17	17	
1.4	Самостоятельная работа:	59	59	
	Домашние задания:	-	-	
	Курсовая работа	-	-	
	Самостоятельное изучение раздела			
1.5	Виды отчетности по дисциплине			
	Контрольная работа			
	Рубежный контроль		РК3 (15)	
	Зачеты	-	-	
	Экзамены		экзамен	

Отчет по практической работе № 6			
«Расчет основных параметров сплавного р-п перехода с использованием MATLAB»			
дата	Оценка		подпись

Цель работы:

Задачи работы:

Задание повышенной сложности (бонус за сложность – max 2 балла):

-реализация в среде MATLAB методики расчета основных параметров р-п перехода с интерактивным заданием исходных параметров.

Краткий конспект теоретической части (ответы на контрольные вопросы)

1. _____

2. _____

3. _____

4. _____

5. _____

6. _____

7. _____

8. _____

9. _____

10. _____

11. _____

12. _____

Ознакомление с необходимыми справочными данными:

Заряд электрона $q = 1,6021766208(98) \cdot 10^{-19}$ Кл
 Постоянная Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
 Постоянная Планка $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
 $\epsilon_0 = 8,8541878128(13) \cdot 10^{-12}$ м⁻³·кг⁻¹·с⁴·А², или Ф·м⁻¹.

Таблица №1 Некоторые параметры полупроводников

Параметр	Обозначение	Si	Ge	GaAs	InSb
Ширина запрещенной зоны при 300К, эВ	E _g	1,12	0,66	1,43	0,18
Ширина запрещенной зоны при 0К, эВ	E _g	1,21	0,8	1,56	0,23
Эффективная масса m*/m ₀ электронов	m* _n	1,08	0,56	0,068	0,013
Эффективная масса m*/m ₀ дырок	m* _p	0,56	0,35	0,45	0,6
Концентрация собственных носителей зарядов при 300 К ⁰ , см ⁻³	n _i	1,4*10 ¹⁰	2,3*10 ¹³	1,1*10 ⁷	2*10 ¹⁶
Диэлектрическая проницаемость	ε	11,7	16	14,6	5,7
Подвижность электронов см ² /(В·с)	μ _n	1400	3800	4000	60 000
Подвижность дырок см ² /(В·с)	μ _p	450	1800	400	4000

Этапы расчетов и представления результатов Имеется сплавной p-n переход. Используя исходные данные, представленные в табл.№1 приложения рассчитать:

1. Контактную разность потенциалов
2. Ширину p-n перехода
3. Максимальную напряженность электрического поля p-n перехода
4. Барьерную емкость p-n перехода при различных обратных напряжениях
5. Обратный ток насыщения p-n перехода при T=300 К⁰

Разработка m.-файла расчета в среде MATLAB

1. Согласно руководству пользователя запустите программную среду MATLAB, в окне редактора (EDITOR) вбейте первую строку следующего содержания:
 % Исходные данные Это будет заголовок программного модуля в среде MATLAB.

2. Сохраните .m-файл под вашим именем.

3. Последовательно введите значения справочных данных, соблюдая следующие рекомендуемые обозначения:

```
%Расчет основных параметров сплавного p-n перехода
% Исходные данные
q=1.6*1e-19; %Кл - это заряд электрона
k=1.38*1e-23;% Дж/К - постоянная Больцмана
```

$N_a = 1.0 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ концентрация акцепторной примеси
 $N_d = 1.00 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ концентрация донорной примеси
 $n_i = 1.40 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$ собственная концентрация носителей
 $T = 3.00 \cdot 10^2 \text{ К}$ температура в градусах Кельвина
 $S = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ площадь p-n перехода согласно варианту, М2
 $\epsilon_r = 11.7$ диэлектрическая проницаемость Si
 $\epsilon_0 = 8.8541878128 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^4 \cdot \text{А}^2$ – диэлектрическая постоянная

% расчет контактной разности потенциалов U_k , В
 $U_k = k \cdot T / q \cdot \log(N_a \cdot N_d / n_i \cdot n_i)$

Ряд параметров необходимо взять из приложения №1 настоящего журнала в соответствии с номером студента в списке группы.

1. Расчет контактной разности потенциала сплавного p-n перехода

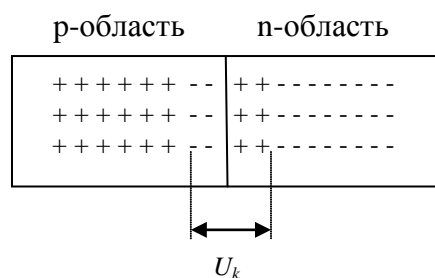


Рис.1. Схема контактной разности потенциала U_k в p-n переходе

$$U_k = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}$$

$U_k =$, В

2. Расчет ширины p-n перехода при температуре 300К в отсутствии внешнего напряжения

Ширина области объемного заряда

.

$$d = d_p + d_n = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 U_k}{q} \frac{(N_a + N_d)}{N_a N_d}}$$

$d =$

Определим ширину области, легированной донорами

$$d_p = d \frac{N_d}{N_a + N_d}$$

$$d_p =$$

Определим ширину области, легированной акцепторами

$$d_n = d \frac{N_a}{N_a + N_d}$$

$$d_n =$$

3. Расчет максимальной напряженности электрического поля р-n перехода

Выражения для напряженности внутреннего поля перехода соответственно со стороны р- и n- областей.

Напряженность поля со стороны р-области

$$E_p = - \frac{qN_a}{\varepsilon\varepsilon_0} (d - d_n)$$

Напряженность поля со стороны n-области

$$E_n = - \frac{qN_d}{\varepsilon\varepsilon_0} (d - d_p)$$

На металлургической границе р-n перехода, когда $d=0$

Максимальная напряженность электрического поля со стороны р области

$$E_p = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0} N_a d_n$$

Максимальная напряженность электрического поля со стороны n области

$$E_n = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0} N_d d_p$$

3.1. Построить графики изменения напряженности электрического поля E для области dp и pn и совместить эти графики в одном окне, в одних координатных осях. На графике авторучкой указать, где область p и где область n .

Примечание: для отображения нужного окна с графиком можно нажать левой кнопкой мышки на пиктограмму маталаба внизу и в открывшемся окне выбрать нужный график или открыть нужное окно с графиком через основное меню.

4. Расчет барьерной емкости p - n перехода

4.1. Расчет барьерной емкости p - n перехода при отсутствии обратного напряжения ($U=0$)

$$C_{\text{бар}_0} = S \sqrt{\frac{q\varepsilon\varepsilon_0}{2(U_k - U)} \frac{N_a N_d}{(N_a + N_d)}}$$

$C_{\text{бар}_0} =$

4.2. Расчет барьерной емкости p - n перехода при величине обратного напряжения согласно варианту задания $U_{\text{обр}} =$ _____, В (написать значение)

$$C_{\text{бар}} = S \sqrt{\frac{q\varepsilon\varepsilon_0}{2(U_k - U)} \frac{N_a N_d}{(N_a + N_d)}}$$

$C_{\text{бар}} =$

4.3. Определение величины изменения барьерной емкости p - n перехода за счет отрицательного смещения

$$\Delta C_{\text{бар}} = C_{\text{бар}} - C_{\text{бар}_0}$$

$$\Delta C_{\text{бар}} =$$

5. Построить график изменения барьерной емкости p - n перехода в зависимости от величины приложенного к нему обратного напряжения в диапазоне от 0 до 30 В. На осях графика рис.2 поставить деления и указать на них числа. Допускается наклеить или вставить отдельный лист графика, построенного на компьютере.

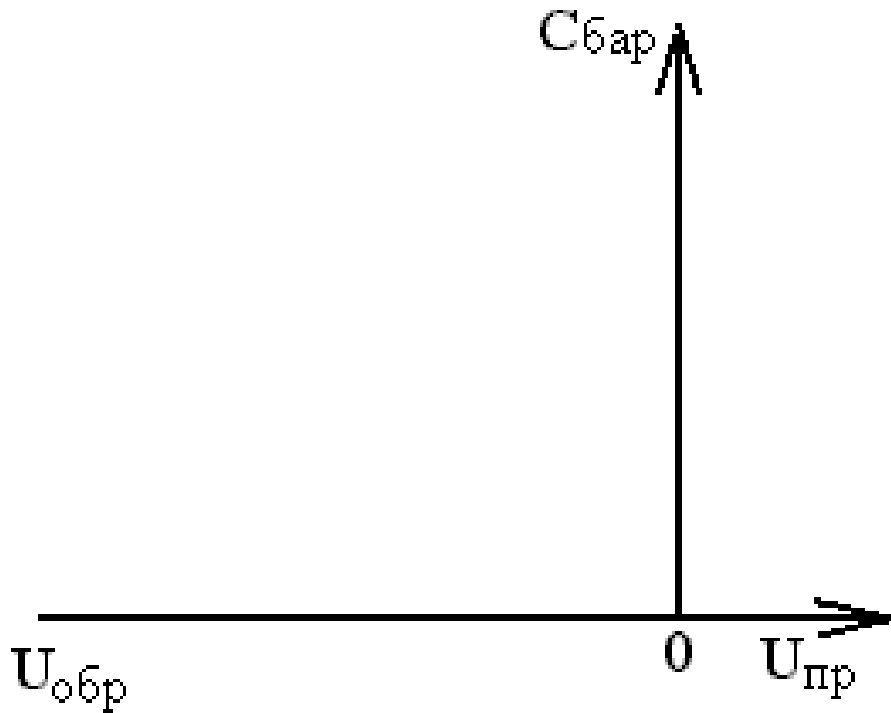


Рис.2 график изменения барьерной емкости р-п перехода

6. Рассчитать плотность обратного тока насыщения р-п перехода для соответствующего варианта при температуре $T = 300 \text{ K}$ и $L_p=L_n=1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

$$I_0 = qS \left(\frac{D_p N_d}{L_p} + \frac{D_n N_a}{L_n} \right)$$

Из соотношения Эйнштейна известно, что $D_p = (kT/q) \cdot \mu_p$ и $D_n = (kT/q) \cdot \mu_n$.

Где μ_p — подвижность дырок; μ_n — подвижность электронов

D_p — коэффициент диффузии дырок в п-области

D_n — коэффициент диффузии электронов в р-области

L_n - диффузионная длина электрона в р-области

L_p — диффузионная длина дырки в п-области

$D_p =$

$D_n =$

$I_0 =$

7. На основании расчетов, сделанных в п.2. настоящей практической работы, проставить ручкой размеры областей d , d_p и d_n . на рис.3.

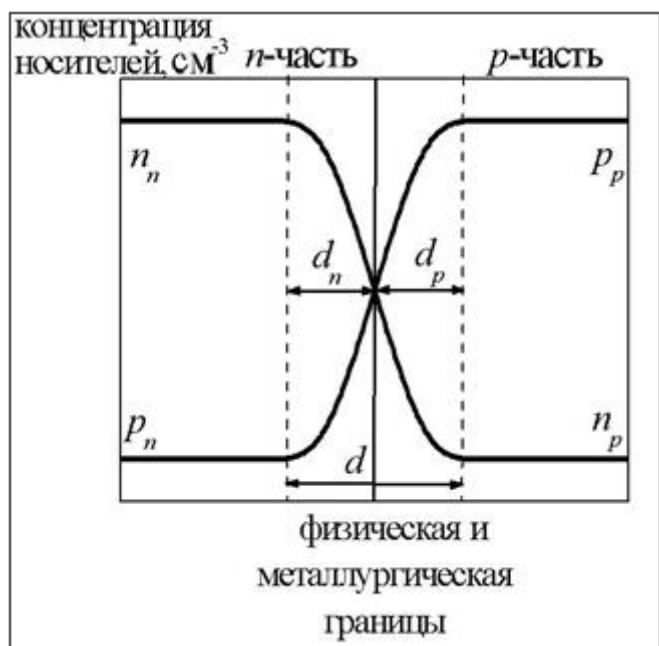


Рис.3. Структура р-п перехода

8. Сформулируйте выводы по работе

[illegible]

Контрольные вопросы

1. Что называют р-п переходом или запирающим слоем?
2. До каких пор будут продолжаться взаимные переходы электронов и дырок при контакте полупроводника n и p типа?
3. Что такое контактная разность потенциалов в р-п переходе?
4. Каков порядок величины контактной разности потенциалов р-п перехода?
5. Что такое ширина р-п перехода?
6. Как меняется ширина р-п перехода при приложении к нему прямого напряжения?
7. Как меняется ширина р-п перехода при приложении к нему обратного напряжения?
8. От чего зависит напряженность электрического поля р-п перехода при отсутствии внешнего напряжения?
9. Чем обусловлена барьерная емкость р-п перехода?
10. От каких параметров р-п перехода зависит величина барьерной емкости?
11. Как можно управлять величиной барьерной емкости р-п перехода?
12. Где используется варикап?

13. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В.В., Столяров А.А. Физические основы нанотехнологий. - М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана. 2011.
2. Гуртов В.А. Твердотельная электроника.-М.: Техносфера. 2005.
3. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы нанотехнологий.- Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000.
4. Шик А.Я., Бакуева Л.Г., Мусихин С.Ф., Рыков С.А. Физика низкоразмерных систем, СПб, Наука, 2001.
5. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники, СПб, 2003.
6. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: учебное пособие для вузов. – 2-е изд. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001.
7. Старосельский В.И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники: учебное пособие. – М.: Юрайт, 2011.
8. Зиненко, В.И. Основы физики твердого тела [Текст]: учеб. пособие для вузов / В.И. Зиненко, Б.И. Сорокин, Р.И. Турчин. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2001. 336с.
9. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника: Учебное пособие для вузов / Под ред. Н.Д. Федорова. М.: Радио и связь, 2002.
10. Зегря Г.Г., Перель В.И. Основы физики полупроводников. М.: Физматлит, 2009. Н.А. Афанасьева, Л.П. Булат. Физические основы электроники. Учебное пособие. СПб.: СПб ГУНиПТ, 2010. -181с.
11. Андреев В.В., Балмашнов А.А., Корольков В.И., Лоза О.Т., Милантьев В.П. Физическая электроника и ее современные приложения. Учеб. пособие. М.: РУДН, 2008. – 383 с.

Приложение 1

Номер варианта соответствует номеру студента в списке группы

Таблица №1 Исходные данные.

№ варианта	Полупроводник	N_a – концентрация акцепторных атомов, м^{-3}	N_d – концентрация донорных атомов, м^{-3}	Площадь p-n перехода, S , мм^2	Обратное смещение, $U_{обр}$, В
1	Si	10^{22}	10^{20}	1	-25
2	Ge	$2,8 \cdot 10^{16}$	$4,4 \cdot 10^{17}$	2	-15
3	GaAs	$2 \cdot 10^{20}$	$3 \cdot 10^{22}$	1,5	-15
4	InSb	$3,8 \cdot 10^{19}$	$1,5 \cdot 10^{20}$	0,75	-10
5	Si	$2 \cdot 10^{22}$	$2 \cdot 10^{20}$	3	-20
6	Ge	$2 \cdot 10^{16}$	$4 \cdot 10^{17}$	4	-12
7	GaAs	$2,5 \cdot 10^{20}$	$3,5 \cdot 10^{22}$	0,5	-14
8	InSb	$3,4 \cdot 10^{19}$	$1,9 \cdot 10^{20}$	0,3	-13
9	Si	$2 \cdot 10^{21}$	$2 \cdot 10^{19}$	0,2	-22
10	Ge	$2 \cdot 10^{17}$	$4 \cdot 10^{18}$	0,1	-10
11	GaAs	$2,5 \cdot 10^{21}$	$3,5 \cdot 10^{21}$	0,4	-14
12	InSb	$3,4 \cdot 10^{20}$	$1,9 \cdot 10^{21}$	0,6	-12
13	Si	$4 \cdot 10^{22}$	$3 \cdot 10^{20}$	0,5	-18
14	Ge	$3,8 \cdot 10^{16}$	$3,4 \cdot 10^{17}$	1	-11
15	GaAs	$3,3 \cdot 10^{20}$	$4,3 \cdot 10^{22}$	1	-13
16	InSb	$5,8 \cdot 10^{19}$	$4,5 \cdot 10^{20}$	0,4	-12
17	Si	$6 \cdot 10^{22}$	$7 \cdot 10^{20}$	0,3	-23
18	Ge	$1,8 \cdot 10^{16}$	$2,4 \cdot 10^{17}$	0,2	-14
19	GaAs	$2,9 \cdot 10^{20}$	$3,9 \cdot 10^{22}$	0,3	-12
20	InSb	$3,9 \cdot 10^{19}$	$1,9 \cdot 10^{20}$	0,7	-11
21	Si	$7 \cdot 10^{22}$	$3 \cdot 10^{20}$	1,2	-24
22	Ge	$7,8 \cdot 10^{16}$	$6,4 \cdot 10^{17}$	1,3	-14
23	GaAs	$3 \cdot 10^{20}$	$7,8 \cdot 10^{22}$	1,1	-10
24	InSb	$5,8 \cdot 10^{19}$	$7,5 \cdot 10^{20}$	1,4	-12
25	Si	$3,3 \cdot 10^{22}$	$5,8 \cdot 10^{20}$	1,7	-18
26	Ge	$2,1 \cdot 10^{16}$	$4,2 \cdot 10^{17}$	1,8	-11
27	GaAs	$2,6 \cdot 10^{20}$	$3,7 \cdot 10^{22}$	1,9	-9
28	InSb	$3,7 \cdot 10^{19}$	$1,8 \cdot 10^{20}$	2,1	-8
29	Si	$1,3 \cdot 10^{22}$	$2,8 \cdot 10^{20}$	0,75	-30
30	Ge	$1,1 \cdot 10^{16}$	$2,2 \cdot 10^{17}$	0,65	-15

```
%Расчет основных параметров сплавного p-n перехода
% Исходные данные
q=1.6*1e-19; %Кл - это заряд электрона
k=1.38*1e-23;% Дж/К - постоянная Больцмана
Na= 1.0*1e+23 % м-3 концентрация акцепторной примеси
Nd= 1.00*1e+21 % м-3 концентрация донорной примеси
ni= 1.40*1e+16 % м-3 собственная концентрация носителей
T= 3.00*1e+02 % К температура в градусах Кельвина
S= 1*1e-6 % площадь p-n перехода согласно варианту, M2
ep= 11.7 % диэлектрическая проницаемость Si
ep0= 8.8541878128*1e-12 % м?3·кг?1·с4·А2 - диэлектрическая постоянная
mpSi=450 %Подвижность дырок полупроводника см?/(В·с)
mnSi=1400 % Подвижность электронов полупроводника см?/(В·с)
Uobr=-30
Lp=1*1e-3 % м - диффузионная длина дырок
Ln=1*1e-3 %м - диффузионная длина электронов

% расчет контактной разности потенциалов Uk, В
Uk=k.*T./q.*log(Na.*Nd./ni./ni)

% Расчет ширины p-n перехода d при температуре 300K в отсутствии внешнего
% напряжения, М
d=sqrt(2.*ep.*ep0.*Uk.*(Na+Nd)./(q.*Na.*Nd))
%Определим ширину области, легированной донорами , М
dp=d.*Nd./(Na+Nd)
dp_max=dp
%Определим ширину области, легированной акцепторами, М
dn=d.*Na./(Na+Nd)
dn_max=dn
%проверка, что dd=d
dd=dp+dn
%Расчет максимальной напряженности электрического поля p-n перехода со
%стороны p области
Ep=-q.*Na.*dn./ep./ep0
% построение графика изменения напряженности от координаты для области p
% dn=0:1e-07:9.4568e-07
dn=0:1e-07:dn_max
Ep=-q.*Na.*dn./ep./ep0
%subplot(1,2,1);
hold on
plot(dn,Ep)
%Расчет максимальной напряженности электрического поля p-n перехода со
%стороны n области
En=-q.*Nd.*dp./ep./ep0
%проверка
A=Na.*dp
B=Nd.*dn
% построение графика изменения напряженности от координаты для области n
dp=0:-1e-09:-dp_max
En=-q.*Nd.*dp./ep./ep0
plot(dp,En)
title('Изменение напряженности поля E на p-n переходе');
xlabel(' справа от 0 n-область; Толщина p-n перехода,M');
ylabel('Напряженность E, В/М');
grid on
hold off;
% Расчет барьерной емкости p-n перехода, Ф, при отсутствии обратного напряжения (Uobr=0)
Uobr=0
Cbar0=S.*sqrt((q.*ep.*ep0.*Na.*Nd)./(2.*(Uk-Uobr).*(Na+Nd)))
% Расчет барьерной емкости p-n перехода, Ф, при обратном напряжении Uобр
```

```

% согласно варианту

Cbar_Uobr=S.*sqrt((q.*ep.*ep0.*Na.*Nd)./(2.*(Uk-Uobr).*(Na+Nd)))
%Определение величины изменения барьерной емкости p-n перехода за счет
%отрицательного смещения, Ф
delta_Cbar=Cbar0-Cbar_Uobr
% строим график
%subplot(1,2,2);
Uobr=0:-1:-30
Cbar_Uobr=S.*sqrt((q.*ep.*ep0.*Na.*Nd)./(2.*(Uk-Uobr).*(Na+Nd)))
figure
plot(Uobr,Cbar_Uobr)
title('Барьерная емкость Cбар p-n перехода');
xlabel('Обратное напряжение Uобр, В');
ylabel('Емкость Cбар, Ф');
grid on
%Рассчитать величину плотности обратного тока насыщения p-n перехода для
%соответствующего варианта при температуре T = 300 K0 и Lp=Ln=1·10-3 м
Dp=k.*T.*mpSi./q./10000 % делим на 10000, чтобы для подвижности перевести см в м
Dn=k.*T.*mnSi./q./10000 % делим на 10000, чтобы для подвижности перевести см в м
I0=q.*S.*(Dp./Lp.*Nd+Dn./Ln.*Na) % плотность обратного тока насыщения А/М2

```