**Лабораторная работа №1**

**«Свойства p-n перехода в равновесном состоянии»**

Для полупроводникового электронно-дырочного перехода определить параметры в равновесном состоянии (φ0, *l*0). Построить энергетическую диаграмму, распределение заряда, напряженности электрического поля, потенциала. Данные по *p-n* переходу приведены в приложении табл. П 1.2. *(первый столбец - номера вариантов. Варианты брать по списку вашей группы).* Материал – кремний.

**Лабораторная работа №2**

**«Исследование p-n перехода в неравновесном состоянии»**

Задание: Построить вольт-амперную характеристику (ВАХ) *р-n* перехода при *Т*=300 К по данным табл. П 1.3. *(первый столбец - номера вариантов. Варианты брать по списку вашей группы)* для кремния. Определить обратный ток, прямое падение напряжения, коэффициент выпрямления при температурах 300 К, 305 К, 310 К. Построить зависимости *I*0, *U*пр, *K*В от температуры.

**Приложение 1**

**Таблица П 1.1**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Материал** | Германий | Кремний | Арсенид галлия |
| **Номер** | 1 | 2 | 3 |

**Таблица П 1.2**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№** | ***N*a,**  **см-3** | ***N*д,**  **см-3** | **σn, (Ом·см)-1** | **σp, (Ом·см)-1** | **ρ*n*,**  **Ом·см** | **ρp,**  **Ом·см** |
| 01 | 1016 | 0,5 1014 |  |  |  |  |
| 02 | 0,5 1016 | 0,5 1014 |  |  |  |  |
| 03 | 2 1016 | 0,5·1014 |  |  |  |  |
| 04 |  |  | 0,55 | 0,48 |  |  |
| 05 |  |  | 0,55 | 0,4 |  |  |
| 06 |  |  | 0,55 | 0,43 |  |  |
| 07 |  |  |  |  | 1,45 | 3 |
| 08 |  |  |  |  | 1,4 | 3,5 |
| 09 |  |  |  |  | 1,48 | 3 |
| 10 | 2·1015 | 4,7·1014 |  |  |  |  |
| 11 | 3,2·1015 | 7·1014 |  |  |  |  |
| 12 | 2·1015 | 2,7·1014 |  |  |  |  |
| 13 |  |  | 0,5 | 0,32 |  |  |
| 14 |  |  | 0,55 | 0,35 |  |  |
| 15 |  |  | 0,5 | 0,3 |  |  |
| 16 |  |  |  |  | 1,25 | 3,2 |
| 17 |  |  |  |  | 1,2 | 3,26 |
| 18 |  |  |  |  | 1,27 | 3,28 |
| 19 | 7·1015 | 3·1015 |  |  |  |  |
| 20 | 4,7·1015 | 3·1015 |  |  |  |  |
| 21 | 7·1015 | 4,3·1015 |  |  |  |  |
| 22 |  |  | 0,456 | 0,45 |  |  |
| 23 |  |  | 0,45 | 0,56 |  |  |
| 24 |  |  | 0,45 | 0,45 |  |  |
| 25 |  |  |  |  | 1,4 | 1,8 |
| 26 |  |  |  |  | 1,4 | 1,8 |
| 27 |  |  |  |  | 1,4 | 1,8 |
| 28 | 2,8·1015 | 5·1015 |  |  |  |  |
| 29 | 8·1015 | 4,5·1015 |  |  |  |  |
| 30 | 8·1015 | 5·1015 |  |  |  |  |
| 31 |  |  | 0,45 | 0,48 |  |  |
| 32 |  |  | 0,4 | 0,4 |  |  |
| 33 |  |  | 0,43 | 0,55 |  |  |
| 34 |  |  |  |  | 1,34 | 2,1 |
| 35 |  |  |  |  | 1,3 | 2 |

**Таблица П 1.3**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№** | ***S*,**  **м2** | τ*n*,  мкс | τ*р*,  мкс | ***N*a,**  **см-3** | ***N*д,**  **см-3** | **ρ*n*,**  **Ом·см** | **ρp,**  **Ом·см** | **Uпр , В** |
| 01 | 2∙10-5 | 5 | 10 | 5·1015 | 3·1014 |  |  |  |
| 02 | 10-6 | 10 | 5 | 1016 | 0,5·1014 |  |  | 0,1 |
| 03 | 3∙10-5 | 32 | 15 | 4∙1016 | 3∙1015 |  |  |  |
| 04 | 10-6 | 5 | 15 |  |  | 1,2 | 1,8 |  |
| 05 | 2·10-6 | 15 | 5 |  |  | 1,4 | 3 | 0,12 |
| 06 | 3∙10-6 | 20 | 25 |  |  | 1,8 | 1,2 |  |
| 07 | 2∙10-6 | 25 | 35 | 2,5∙1016 | 5∙1016 |  |  |  |
| 08 | 5·10-5 | 20 | 20 | 2·1015 | 7·1014 |  |  | 0,15 |
| 09 | 3∙10-5 | 30 | 10 |  |  |  |  |  |
| 10 | 3∙10-6 | 27 | 14 |  |  | 1,4 | 2,8 |  |
| 11 | 0,5·10-5 | 15 | 15 |  |  | 1,2 | 3,2 | 0,17 |
| 12 | 5∙10-6 | 18 | 20 |  |  | 1,5 | 2,5 |  |
| 13 | 2∙10-5 | 20 | 10 | 5∙1015 | 8∙1015 |  |  |  |
| 14 | 0,2·10-6 | 25 | 20 | 7·1015 | 3·1015 |  |  | 0,2 |
| 15 | 3,5∙10-6 | 15 | 5 | 3∙1015 | 5∙1015 |  |  |  |
| 16 | 4,5∙10-6 | 18 | 15 |  |  | 1,5 | 1,3 |  |
| 17 | 3·10-6 | 10 | 10 |  |  | 1,4 | 1,8 | 0,18 |
| 18 | 2,5∙10-5 | 12 | 10 |  |  | 2,5 | 2,5 |  |
| 19 | 3·10-6 | 25 | 18 | 5·1015 | 3,2·1015 |  |  |  |
| 20 | 4,5·10-6 | 15 | 25 | 8·1015 | 5·1015 |  |  | 0,22 |
| 21 | 2·10-5 | 30 | 25 | 3,2·1015 | 2,5·1015 |  |  |  |
| 22 | 2,3·10-6 | 22 | 45 |  |  | 2,4 | 2,65 |  |
| 23 | 1,5·10-6 | 20 | 15 |  |  | 1,3 | 2 | 0,21 |
| 24 | 4,5·10-5 | 50 | 45 |  |  | 4,8 | 9 |  |
| 25 | 5·10-5 | 12 | 42 | 1,3·1016 | 1,3·1015 |  |  |  |
| 26 | 5,5·10-6 | 20 | 25 | 3·1015 | 5·1015 |  |  | 0,14 |
| 27 | 4,2·10 | 39 | 18 | 3,3·1015 | 5,5·1017 |  |  |  |
| 28 | 2,4·10-6 | 20 | 18 |  |  | 1,6 | 1,75 |  |
| 29 | 2,5·10-6 | 25 | 25 |  |  | 1,5 | 1,8 | 0,16 |
| 30 | 3,8·10-5 | 16 | 14 |  |  | 1,8 | 3,4 |  |
| 31 | 3·10-5 | 12 | 18 | 4,5·1016 | 4,8·1017 |  |  |  |
| 32 | 3,3·10-6 | 10 | 15 | 4·1015 | 3·1015 |  |  | 0,25 |
| 33 | 4,3·10-5 | 13 | 27 | 5·1015 | 2·1016 |  |  |  |
| 34 | 3,8·10-6 | 25 | 15 |  |  | 1,8 | 1,5 | 0,19 |
| 35 | 3,4·10-6 | 15 | 10 |  |  | 1,4 | 1,3 |

**Таблица П 1.4**

**Основные параметры Si, GaAs и Ge**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Параметр (при *Т*=300 К)** | **Кремний** | **Арсенид галлия** | **Германий** |
| Собственное удельное сопротивление ρ, Ом∙см | 2,3∙105 | 108 | 47 |
| Ширина запрещенной зоны Δ*Е*з, эВ | 1,12 | 1,42 | 0,66 |
| Эффективная масса электронов по отношению к массе свободного электрона *mn*/*m*0 | 0,33 | 0,07 | 0,22 |
| То же для дырок *mp*/*m*0 | 0,55 | 0,5 | 0,39 |
| Эффективная плотность состояний, см-3: |  |  |  |
| в зоне проводимости *N*п | 2,8∙1019 | 4,7∙1017 | 1019 |
| в валентной зоне *N*в | 1019 | 7∙1017 | 6∙1018 |
| Собственная концентрация *ni*, см-3 | 1,45∙1010 | 1,8∙106 | 2,4∙1013 |
| Подвижность, см2/(В∙с): |  |  |  |
| электронов μ*n* | 1500 | 8500 | 3900 |
| дырок μ*p* | 450 | 400 | 1900 |
| Коэффициент диффузии, см/с: |  |  |  |
| электронов *Dn* | 36 | 290 | 100 |
| дырок *Dp* | 13 | 12 | 45 |
| Дрейфовая скорость насыщения vнас, см/с: |  |  |  |
| электронов | 107 | 6∙106 | 6∙106 |
| дырок | 8∙106 | – | 6∙106 |
| Электрическое поле пробоя εпр, В/см | 3∙105 | 4∙105 | 105 |
| Диэлектрическая проницаемость ε0 εп, пФ/см | 1,05 | 1,15 | 1,42 |

## 2.2. Примеры выполнения лабораторной работы.

**Пример 1 (лабораторная №1)**

Для германиевого *p-n* перехода с одинаковой концентрацией примеси в *p*- и *n*-областях равной 1015 см-3, определить параметры равновесного состояния, построить распределение заряда, напряженности электрического поля и потенциала, если пi. = 1013 см-3; *Т*=300 К.

|  |  |
| --- | --- |
| Дано: | Решение:  1) .  . |
| *N*a=*N*д=1015 см-3 |
| *ni*= 1013 см-3 |
| ε=16 |
| *l*0, φ0 |

Параметры показаны на рис. 10,*б*.

2) Распределение плотности объемного заряда (рис. 10,*а*)

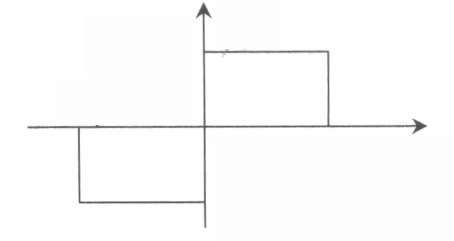
|  |  |
| --- | --- |
|  | см |

3) Распределение напряженности электрического поля (рис. 10,*в*)



Распределение *Е*(*х*) линейное с максимумом при *х*=0.

.



λ, Кл/см3

1,6∙10-4

-1,6∙10-4

-*lp*

*ln*

*х*, см

*n*

*p-n*

φ*c*

φ*F*

φ*v*

*l*0= 90,2∙10-6 см

φ0= 0,23 В

φ*v*

φ*F*

φ*c*

*р*

*Е*, В/м

*x*

-45,1∙10-6см

52,39

45,1∙10-6см

*а*)

*б*)

*в*)

**Рис. 10**

4) Распределение потенциала (рис. 11)



.

Значения потенциала при разных *х* приведены в таблице.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *x*, см | *ln* = 45,1 | ½ *ln* = 22,25 | 0 | -½ *lp* =-22,25 | *lp* =- 45,1 |
| φ, В | 0 | 0,031 | 0,1241 | 0,195 | 0,23 |

0,3

0,2

0,1

*х*·10-6 см

0

10

20

30

40

-40

-30

-20

-10

φ, В

φ0

**Рис. 11**

Если в задании (табл. П 1.2) указаны значения проводимости (σn, σp) или удельных сопротивлений (ρn, ρp), то необходимо сначала определить концентрацию примесей как в примере 2, 3, а далее решать по примеру 1.

**Пример 2 (лабораторная №1)**

Для германиевого *p-n* перехода с проводимостью *p*-области σ*p*=0,304 См/см, а *n*-области σ*n*=0,624 См/см определить параметры *p-n* перехода в равновесном состоянии при *Т*=300 К, *ni*=1013 см-3.

|  |  |
| --- | --- |
| Дано: | Решение:  1) По справочным данным Приложения 1 определяем параметры германия: |
| σ*n*=0,624 см/см |
| σ*p*=0,304 см/см  *ni*=1013 см-3 |
| φ0, *l*0 |  |
|  | ε=16 |

2) Определяем концентрацию примесей в *p-* и *n-*областях.

3) .

.

Остальное решение как в примере 1.

**Пример 3 (лабораторная №1)**

Для германиевого *p-n* перехода с удельным сопротивлением *p*-области ρ*p*=3,3 Ом∙см, а *n*-области ρ*n*=1,6 Ом∙см. Определить параметры равновесного состояния *p-n* перехода при *Т*=300 К, *ni*=1013 см-3.

|  |  |
| --- | --- |
| Дано: | Решение:  1) По справочным данным Приложения 1 определяем параметры германия: |
| ρ*n*=1,6 Ом∙см |
| ρ*p*=3,3 Ом∙см  *ni*=1013 см-3 |
| φ0, *l*0 |

2) Определяем концентрацию примесей в *p*- и *n*-областях.

Остальное решение как в примере 1.

**Пример 4 (лабораторная №2)**

Построить вольт-амперную характеристику германиевого *p-n* перехода при *Т*=300 К, если известно, что концентрация примесей в *p-n* переходе равна *N*a=1015 см-3, *N*д=1015 см-3, время жизни τn=τp=10 мкс, площадь *p-n* перехода *S*=10-6 м2. Определить обратный ток, прямое падение напряжения, коэффициент выпрямления при температурах 300 К, 305 К, 310 К. Построить зависимости *I*0, *U*пр, *K*В от температуры.

|  |  |
| --- | --- |
| Дано: | Решение:  1) По справочным данным Приложения 1 определяем параметры германия. |
| *N*a=*N*д=1015 см-3 |
| τ*n*=τ*p*=10 мкс |
| *S*=10-6 м2=10-2 cм2 |  |
| *I*0, *U*пр, *K*В |



*ni*=2,45∙1013 см-3

2) Определяем ток насыщения для германиевого *p-n* перехода по формуле

.

Для нахождения *I*0 определяем коэффициенты диффузии *Dn*, *Dp*; диффузионную длину *Ln*, *Lp*; неосновные носители заряда *pn*0, *np*0.

;

;

;

;

;

;

.

3) По формуле  определим ток при разных напряжениях. Данные занесем в таблицу и построим по ним график (рис. 12).

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *U*, В | 0,025 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | -1 | -2 | -3 |
| *I*, мкА | 0,073 | 0,200 | 1,474 | 10,8925 | 80,697 | 27 | 27 | 27 |

20

40

60

80

100

-1

-2

-3

-4

-5

0,1

0,2

20 мкА

*I*пр, мкА

*I*обр, мкА

*U*пр, В

*U*обр, В

*I*0

**Рис. 12**

4) Определяем значения *I*0 при температурах *Т*= 300 К, 305 К, 310 К по формуле

.

Для германия α=0,09.

Полученные значения *I*0 при заданных температурах приведены в таблице.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *I*0, мкА | 27 | 43 | 67,8 |
| *Т*, К | 300 | 305 | 310 |

5) Определяем прямое падение напряжения при 300 К, 305 К, 310 К.

.

Задаем значение прямого тока *I*пр= 80 мА=const.

Полученные данные приведены в таблице.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *U*пр, В | 0,2 | 0,198 | 0,188 |
| *Т*, К | 300 | 305 | 310 |

6) Определяем коэффициент выпрямления при 300 К, 305 К, 310 К.

.

Полученные данные приведены в таблице.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *K*В | 2963 | 1860 | 1180 |
| *Т*, К | 300 | 305 | 310 |

Графические зависимости *I*0(*Т*), *U*пр(*Т*), *K*В(*Т*) представлены на рис. 13 (*а*, *б* и *в* соответственно).

# Краткие теоретические сведения

## Электронно-дырочный переход

Электронно-дырочный переход образуется при контакте полупроводников с разным типом проводимости. Он представляет собой переходную область, состоящую из ионов доноров и ионов акцепторов (рис. 1).

*p*

*n*

*p-n*

*Е*внутр

**Рис. 1**

Энергетическая диаграмма *p-n* перехода в равновесном состоянии имеет вид представленный на рис. 2.

*l*0

*n-*

*p-*

*p-n*

φ0

φ*c*

φ*F*

φ*v*

φ*v*

φ*F*

φ*c*

**Рис. 2**

Основные параметры p-n перехода высота потенциального барьера (φ0) и ширина обедненного слоя (*l*0). Высота потенциального барьера зависит от концентрации примесей и температуры (1).

. (1)

Ширина *p-n* перехода в равновесном состоянии определяется выражением (2)

. (2)

Распределение плотности объемных зарядов в обедненном слое имеет вид, представленный на рис. 3,*а* и соответствует условию электрической нейтральности

,

где *lp* , *ln* – ширина слоя ионов акцепторов и ионов доноров.

Распределение напряженности электрического поля в *p-n* переходе имеет вид, изображенный на рис. 3,*б*.

Аналитическая зависимость электрического поля в *p-n* переходе (3):

 (3)

Распределение потенциала в *p-n* переходе изображено на рис. 3,*в* и выражается зависимостью (4)

 (4)

*б*)

*а*)

*в*)

*l*0

*ln*

*lp*

*-eN*a

λ(*х*), Кл/м3

*x*, м

*eN*д

*E*max

*l*0

*lp*

*ln*

|*Е*|, В/м

*x*, м

φ, В

φ0

*l*0

*ln*

*lp*

*x*, м

**Рис. 3. Распределение заряда (*а*), поля (*б*), потенциала (*в*) в *p – n* переходе для *N*a>>*N*д**

ВАХ *p-n* перехода при 2-х температурах представлена на рис. 4. Её аналитическая зависимость

, (5)

где *I*0 – обратный ток идеального *p-n*-перехода.

*I*пр*,* мА

*I*0

2

4

6

8

10

-10

-20

-30

10 мкА

1

**Рис. 4 – Вольтамперная характеристика идеального *p-n-*перехода при двух температурах *Т*1 и *Т*2**

*T2>T1*

*T1*

*Т*2

*I*А

*U*А

*U*,

А

В

Для заданной рабочей точки сопротивление постоянному току *R*А равно отношению прямого падения напряжения *U*А к прямому току *I*А:

. (6)

Дифференциальное сопротивление (сопротивление на переменном сигнале) в заданной точке А, определяемое производной от тока по напряжению:

. (7)

Обратный ток идеального *p-n* перехода и его температурная зависимость определяется формулой

, (8)

где  – обратный (тепловой) ток идеального *p-n* перехода при заданной температуре *T*0 или ток насыщения;

α – коэффициент зависящий от ширины запрещенной зоны: α= 0,13φз,



.

Для определения температурной зависимости обратного тока можно использовать эмпирическую формулу удвоения, по которой зависимость  выражается в виде

, (9)

где *Т*2 – температура удвоения: равна 8оС для германия и 5оС для кремния.

Зависимость  представлена на рис. 5.

Из рис. 6 видно, что прямое падение напряжения на *p-n* переходе незначительно уменьшается с ростом температуры (рис. 6). Аналитическая зависимость прямого падения напряжения

. (10)

Выпрямительные свойства p-n перехода с ростом температуры ухудшаются. Они оцениваются коэффициентом выпрямления *K*В:

. (11)

С ростом температуры *K*В уменьшается (рис. 7).

*I*0

*T*

**Рис. 5**

*U*пр

*T*

**Рис. 6**

**Рис. 7**

*K*В

*T*

При изменении напряжения на *p-n-*переходе изменяется ширина *p-n-*перехода и заряд ионов доноров и ионов акцепторов в обедненном слое. Поэтому *p-n-*переход обладает емкостью, которая называется барьерной *С*б.

, (12)

где *lp-n* – ширина *p-n*-перехода;

*S* – площадь перехода.

График зависимости барьерной емкости от обратного напряжения называется вольтфарадной характеристикой (ВФХ) и представлен на рис. 8.

Зависимость  от обратного напряжения имеет вид прямой (рис. 9), продолжение которой до оси напряжения позволяет определить высоту потенциального барьера φ0.

*C*б

*U*обр

**Рис. 8**

1/*С*б2

**Рис. 9**

φ0

*U*обр