

Цена 15 коп.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМ. О. В. КУУСИНЕНА

В. А. ГУРТОВ

**СБОРНИК ЗАДАЧ  
ПО ФИЗИКЕ  
ПОВЕРХНОСТИ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

ПЕТРОЗАВОДСК 1985

Министерство высшего и среднего специального образования  
РСФСР  
Петрозаводский государственный университет  
им. О. В. Куусинена

В. А. ГУРЛОВ

СБОРНИК ЗАДАЧ  
ПО ФИЗИКЕ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Учебное пособие

Петрозаводск 1985

537.33  
Г 957  
УДК 537.33

Рассмотрено и рекомендовано к печати на заседании редакционной комиссии по отрасли науки и техники "физика твердого тела" 24 марта 1984 года

Печатается по решению редакционно-издательского совета университета

Рецензенты: профессор Коноров П.П.,  
доцент Райкерус П.А.

Гуртов В.А.

Г 957 Сборник задач по физике поверхности полупроводников.  
Учебное пособие - Петрозаводск, 1985. - 92 с.

В учебном пособии рассмотрены задачи по физике поверхности полупроводников. Выделены отдельно задачи по статистике электронов и дырок в квазинейтральном объеме и на поверхности полупроводника. Даны задачи по расчету основных параметров области пространственного заряда для кремния, германия, антимонида индия и арсенида галлия по классической и квантовой статистике. Анализируется расчет вольт-фарадных характеристик с учетом поверхностных состояний. Приведены задачи на анализ уравнения электронейтральности.

Учебное пособие рассчитано на студентов университетов и технических вузов, специализирующихся в области физики полупроводников и диэлектриков, микроэлектроники и электронной техники. Оно может быть полезным аспирантам и научным сотрудникам.

537.33

© Петрозаводский государственный университет  
им.О.В.Куусинена, 1985

Содержание

	стр.
Предисловие . . . . .	4
1. Статистика электронов и дырок в полупроводниках . .	6,13
2. Барьеры Шоттки и р-и переходы . . . . .	7,21
3. Характеристика области пространственного заряда на поверхности полупроводника . . . . .	8,35
4. Поверхностные состояния . . . . .	10,53
5. МДН структуры . . . . .	11,59
6. Справочные графики и таблицы . . . . .	79
7. Литература . . . . .	82
8. Обозначения и сокращения . . . . .	83

### Предисловие

Учебное пособие представляет собой задачи с решениями, которые используются в курсе "Поверхностные и контактные явления в полупроводниках". Этот курс автор в течение нескольких лет читает студентам физико-математического факультета Петрозаводского государственного университета им. О. В. Куусинена, специализирующихся в области физики полупроводников и диэлектриков. Для закрепления теоретических положений курса решение задач представляется довольно полезным. Однако сборника задач, где бы вопросы физики поверхности полупроводников излагались последовательно, до настоящего времени нет. Частично материал можно найти в задачнике по физике полупроводников Бонч-Бруевича В. Л. и др. [1], в задачнике под ред. Г. Дж. Голдсмита по физике твердого тела [2]. При подборе задач для учебного пособия автор старался по возможности использовать реально встречающиеся в практике значения легирующих концентраций примеси в полупроводниковых подложках толщин и типов подзатворных диэлектриков. Полупроводниковые материалы ограничены кремнием, германием, широкозонным арсенидом галлия и узкозонным антимонидом индия, как наиболее часто используемыми в полупроводниковых приборах. При подстановке численных значений использовано ряд внесистемных единиц, традиционно применяемых в физике МДП структур. Так в качестве единицы площади использован квадратный сантиметр ( $\text{см}^{-2}$ ), в качестве единицы толщины диэлектриков - ангстрем ( $\text{Å}$ ). Поскольку значение разности энергии в электронвольтах (эВ) численно равно значению разности потенциалов в вольтах (В), то в тексте задач

не оговаривается перевод значений энергии в джоули и в соответствующих уравнениях заряд электрона  $q$  принимается равным единице.

Диапазон изменений температур выбран от 77 К до 300К, как наиболее часто встречающийся в экспериментальной практике. При этом предполагается, что в полупроводниках выполняется условие полной ионизации примеси. В предлагаемых решениях автор придерживался принципа поэтапности, общие решения, как правило, отсутствуют. Это сделано для того, чтобы, вычисляя промежуточные величины, студенты почувствовали их реальные значения и размерность. Предполагается, что физический анализ полученных результатов будет сделан студентами самостоятельно, либо под руководством преподавателя во время аудиторных занятий.

По первым двум разделам решение задач базируется на учебнике Шалимовой К. В. по физике полупроводников [3], по остальным разделам - на учебных пособиях автора [4, 5]. Читателей, более глубоко интересующихся вопросами физики поверхности полупроводников, отсылаем к библиографическому указателю [6], составленному по данной тематике. Из последних работ по физике поверхности полупроводников необходимо отметить монографии Зи С. М. [7], Овсика В. Н. [8], Николлиана Е. и Брюса Дж. [9]. При расчете численных значений в ряде случаев может быть полезен пакет программ, составленный для вычисления параметров области пространственного заряда в кремнии [10].

Реальность полученных численных значений параметров МДП структур можно проверить по графикам и таблицам, которые приведены в заключении задачника.

I. СТАТИСТИКА ЭЛЕКТРОНОВ И ДЫРОК  
В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

- I.1. Найти, чему равна собственная концентрация свободных носителей заряда в кремнии  $Si$ , германии  $Ge$ , арсениде галлия  $GaAs$  и антимониде индия  $InSb$  при комнатной температуре ( $T = 300$  К) и температуре жидкого азота ( $T_2 = 77$  К).
- I.2. Кремний  $Si$  и арсенид галлия  $GaAs$  легированы донорной примесью до концентрации  $N_D = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Считая примесь полностью ионизованной, найти концентрацию основных и неосновных носителей заряда при температуре  $T = 300$  К.
- I.3. Рассчитать объемное положение уровня Ферми  $\varphi_0$  относительно середины запрещенной зоны в собственных полупроводниках - кремнии  $Si$  и антимониде индия  $InSb$  при температурах  $T_1 = 300$  К и  $T_2 = 77$  К (с учетом различных значений эффективных масс электронов и дырок).
- I.4. Найти объемное положение уровня Ферми  $\varphi_0$  в германии марки ГДА-10 при температуре  $T = 300$  К.
- I.5. Рассчитать объемное положение уровня Ферми  $\varphi_0$  относительно середины запрещенной зоны в электронном и дырочном антимониде индия  $InSb$  при азотной температуре  $T = 77$  К и концентрации легирующей примеси  $N_{D,A} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .
- I.6. Рассчитать положение уровня Ферми  $\varphi_0$  в приближении полностью ионизованной примеси в кремнии марки КЭФ-4.5 при температурах  $T = 300$  К и  $T = 77$  К.
- I.7. Найти, чему равно удельное сопротивление  $\rho$  электронного и дырочного кремния  $Si$  с легирующей концентрацией  $N_{D,A} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$  при комнатной температуре.
- I.8. Рассчитать собственное удельное сопротивление монокристаллов кремния  $Si$ , германия  $Ge$ , арсенида галлия  $GaAs$  и антимонида индия  $InSb$  при комнатной температуре  $T = 300$  К.
- I.9. Найти концентрацию легирующей акцепторной примеси для кремния  $Si$  и германия  $Ge$ , при которой наступает вырождение концентрации свободных носителей заряда при комнатной температуре,  $T = 300$  К.
- I.10. Найти, как изменится объемное положение уровня Ферми

$\varphi_0$  в электронном арсениде галлия  $GaAs$  с  $\rho = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  при изменении температуры от  $T = 300$  К до  $T = 77$  К.

I.11. Кремний  $Si$ , германий  $Ge$ , арсенид галлия  $GaAs$  и антимонид индия  $InSb$  легированы донорной примесью до концентрации  $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Найти граничную температуру  $T_{гр}$ , при которой собственная концентрация носителей заряда  $n_i$  еще ниже концентрации основных носителей  $n_0$ .

2. БАРЬЕРЫ ШОТКИ И P - N ПЕРЕХОДЫ

- 2.1. Найти, чему равна высота потенциального барьера  $\varphi$  в барьере Шоттки электронной германий  $Ge$  - золото  $Au$ . Нарисовать зонную диаграмму контакта в равновесии.  
 $\rho_{Ge} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ .
- 2.2. Рассчитать, чему равна ширина обедненной области при внешнем напряжении  $V_G = +0,4$  В;  $V_G = -2,0$  В и в равновесных условиях. Нарисовать зонную диаграмму контакта.  
 $\rho_{Si} = 0,1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ .
- 2.3. Для барьера Шоттки электронный арсенид галлия  $GaAs$  - золото  $Au$  рассчитать, чему равно максимальное электрическое поле  $E$  в области пространственного заряда при внешнем напряжении  $V_G = +0,3$  В;  $V_G = 0$ ;  $V_G = -100$  В.  
 $N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .
- 2.4. Чему равны электрическое поле  $E$  и потенциал  $\varphi$  в барьере Шоттки  $nSi - Au$  при напряжении  $V_G = -5$  В на расстоянии  $Z = 1,2$  мкм от границы раздела кремний-золото.  
 $\rho_{Si} = 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ .
- 2.5. Найти, чему равны плотности токов  $j$  в барьере Шоттки  $nGaAs - Pt$  при внешнем напряжении  $V_G^{(1)} = +0,5$  В;  $V_G^{(2)} = -5,0$  В. Чем обусловлены эти токи.  $\rho = 50 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ .
- 2.6. Рассчитать высоту потенциального барьера в p-n переходе  $nGe - pGe$  с объемным сопротивлением  $\rho_{Ge} = 2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Как изменится высота потенциального барьера при изменении напряжения  $V_G$  от  $V_G^{(1)} = +0,15$  В до  $V_G^{(2)} = -0,5$  В. Нарисовать соответствующие зонные диаграммы.
- 2.7. Найти максимальное электрическое поле  $E$  и ширину областей пространственного заряда  $W_n$  и  $W_p$  в электронном и дырочном германии для p-n перехода в равновесных ус-

- ловиях.  $\rho_n = 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ,  $\rho_p = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ .
- 2.8. Как изменится величина и направление электрического поля  $E$  в p-n переходе  $n\text{Si}-p\text{Si}$  с  $\rho = 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  при изменении внешнего напряжения с прямого  $V_G^{(1)} = +0,4 \text{ В}$  на обратное до  $V_G^{(2)} = -2 \text{ В}$  на расстояниях  $Z = +0,2 \text{ мкм}$  от границы раздела электронного и дырочного кремния.
- 2.9. Рассчитать изменение потенциального барьера вглубь полупроводников в p-n переходе  $n^+\text{Si}-p\text{Si}$  при напряжении  $V_G = -1,0 \text{ В}$  с шагом  $\Delta Z = 0,1 \text{ мкм}$ . Нарисовать зонную диаграмму  $\rho_n = 0,001 \text{ Ом} \cdot \text{см}$   $\rho_p = 4,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ .
- 2.10. Какова величина тока  $J$  в кремниевом p-n переходе при  $V_G^{(1)} = +0,5 \text{ В}$  и  $V_G^{(2)} = -2,5 \text{ В}$ .  $N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ;  $N_D = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $S = 1 \text{ мм}^2$ .
- 2.11. Рассчитать и построить зонную диаграмму гетероперехода  $n\text{Ge}-p\text{GaAs}$  с  $N_{D,A} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

### 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЛАСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКА

- 3.1. Рассчитать дебаевскую длину экранирования  $L_D$  в электронном кремнии  $\text{Si}$  и германии  $\text{Ge}$  с удельным сопротивлением  $\rho = 15 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Показать, может ли и при каких условиях глубина проникновения электрического поля  $E$  быть больше, чем дебаевская длина  $T = 300 \text{ К}$ .
- 3.2. Рассчитать и сравнить дебаевские длины экранирования в собственных полупроводниках - кремнии  $\text{Si}$ , германии  $\text{Ge}$ , арсениде галлия  $\text{GaAs}$ , антимониде индия  $\text{InSb}$  при комнатной температуре.
- 3.3. Рассчитать объемную концентрацию электронов и дырок на поверхности  $n_s, p_s$  для  $n\text{Si}$  с  $\rho = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  при значениях поверхностного потенциала  $\psi_s = 0,3 \text{ В}$ ,  $-0,2 \text{ В}$ ,  $-0,5 \text{ В}$ ,  $-0,9 \text{ В}$ . Определить состояние поверхности. Нарисовать зонные диаграммы.
- 3.4. Найти величину заряда  $Q_{sc}$  и емкости  $C_{sc}$  ОПЗ кремния КДБ-Ю при значениях поверхностного потенциала  $\psi_s$  равного  $\psi_s = 0$ ;  $\psi_s = \varphi_0$ .  $\psi_s = 2\varphi_0$ .

- 3.5. Рассчитать для значения поверхностного потенциала  $\psi_s$  равного  $\psi_s = -0,6 \text{ В}$  для  $n\text{Ge}$  с  $\rho = 0,1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , величину заряда  $Q_{sc}$  в ОПЗ, электрического поля на поверхности  $E_s$  и избытка дырок  $\Gamma_p$  в инверсионном канале.
- 3.6. Найти в классическом случае среднее расстояние, на котором локализованы свободные электроны в инверсионном канале  $p\text{Si}$  при  $\psi_s = 3/2 \varphi_0$  при комнатной температуре  $T = 300 \text{ К}$  и температуре жидкого азота  $T = 77 \text{ К}$ .  $\rho = 0,1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ .
- 3.7. Рассчитать, чему равна емкость  $C_{sc}$  и заряд  $Q_{sc}$  в ОПЗ арсенида галлия  $\text{GaAs}$  с концентрацией доноров  $N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3}$  при следующих значениях поверхностного потенциала  $\psi_s$ :  $\psi_s = \frac{1}{2} \varphi_0$ ;  $0$ ;  $-\frac{1}{2} \varphi_0$ ;  $-\varphi_0$ ;  $-\frac{3}{2} \varphi_0$ ;  $-2\varphi_0$ ;  $-\frac{5}{2} \varphi_0$ . Данные представить в виде таблицы. Указать состояние поверхности.  $T = 300 \text{ К}$ .
- 3.8. Рассчитать, как изменится центр масс свободных электронов  $\lambda_c$  в  $p\text{Ge}$  с  $N_A = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , если  $T = 300 \text{ К}$ , а избыток электронов  $\Gamma_n$  меняется от  $\Gamma_n = 10^8 \text{ см}^{-2}$  до  $\Gamma_n = 10^{10} \text{ см}^{-2}$ .
- 3.9. Найти, чему равен электростатический потенциал  $\psi$  на следующих расстояниях от поверхности кремния при  $\Gamma_p = 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ,  $N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .  $Z_1 = 0$ ;  $Z_2 = 5 \text{ \AA}$ ,  $Z_3 = 10 \text{ \AA}$ ,  $Z_4 = 30 \text{ \AA}$ ,  $Z_5 = 100 \text{ \AA}$ ,  $Z_6 = 300 \text{ \AA}$ .
- 3.10. Оценить дебройлевскую длину волны электронов для кремния  $\text{Si}$ , германия  $\text{Ge}$ , арсенида галлия  $\text{GaAs}$  и антимонида индия  $\text{InSb}$  при комнатной  $T = 300 \text{ К}$  и азотной  $T_2 = 77 \text{ К}$  температурах.
- 3.11. Рассчитать энергию дна первых трех квантовых подзон в  $n\text{Si}$  при значении  $\psi_s = 2\varphi_0$  при  $N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Найти среднюю область локализации  $\lambda_c$  электрона от поверхности на каждом из этих уровней и полное число электронов  $N_i$  в подзонах.  $T = 77 \text{ К}$ .
- 3.12. В приближении квантового предела рассчитать энергию  $E_0$  дна квантовой подзоны ( $i = 0$ ) и среднюю область локализации  $\lambda_c$  при следующих значениях избытка электронов.  $\Gamma_{n1} = 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ;  $\Gamma_{n2} = 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ;  $\Gamma_{n3} = 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ,  $\Gamma_{n4} = 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ,  $N_A = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ;  $T = 77 \text{ К}$ . Сравнить с положением центра масс в классическом случае, рассчитанном для треугольной ямы.

## 4. ПОВЕРХНОСТНЫЕ СОСТОЯНИЯ

- 4.1. Рассчитать, чему равен заряд поверхностных состояний  $Q_{SS}$  при значениях поверхностного потенциала  $\psi_s = 0$ ,  $\psi_s = \varphi_0$ ;  $\psi_s = 2\varphi_0$  для дырочного кремния с  $N_A = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .  $T = 300 \text{ К}$ . Поверхностные состояния (ПС) распределены равномерно по зоне с плотностью  $N_{SS} = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ . Сравнить заряд  $Q_{SS}$  с соответствующим зарядом  $Q_{sc}$  ОПС.
- 4.2. В запрещенной зоне  $n\text{Si}$  с  $\rho = 7,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  имеются моноэнергетические ПС с концентрацией  $N_S = 8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , расположенные на расстоянии  $\mathcal{E}_T = 0,45 \text{ эВ}$  выше середины запрещенной зоны. Рассчитать постоянную времени  $\tau$  ПС, эквивалентную последовательную емкость  $C_S$  и сопротивление  $R_S$  для случая обогащающего изгиба зон, когда уровень Ферми на поверхности совпадает с энергетическим положением ПС. Сечение захвата  $S_T = 10^{-16} \text{ см}^2$ ,  $T = 300 \text{ К}$ .
- 4.3. При наличии континуума ПС с плотностью  $N_{SS}$ , равной  $N_{SS} = 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ , найти значение эквивалентной параллельной емкости  $C_p$  и проводимости  $G_p$  при частотах измерительного сигнала  $f_1 = 10^2 \text{ Гц}$ ;  $f_2 = 10^4 \text{ Гц}$ ;  $f_3 = 10^6 \text{ Гц}$ . Значение поверхностного потенциала  $\psi_s = -0,2 \text{ В}$ . Сечение захвата ПС  $S_T = 10^{-15} \text{ см}^2$ . Кремний марки КЦБ-Ю.
- 4.4. Для континуума ПС с  $S_T = 10^{-16} \text{ см}^2$  рассчитать постоянную времени  $\tau$  при следующих значениях поверхностного потенциала  $\psi_s$ , равных  $\psi_{s1} = +0,2 \text{ В}$ ;  $\psi_{s2} = 0$ ;  $\psi_{s3} = -\frac{3}{2}\varphi_0$ . Электронный германий с удельным сопротивлением  $\rho = 1,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ,  $T = 300 \text{ К}$ .
- 4.5. Рассчитать плотность поверхностных состояний  $N_{SS}$ , если максимум кривой зависимости нормированной проводимости  $G_p/\omega$  от частоты  $\omega$  равен  $G_p/\omega/\max = 2 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/см}^2$  и находится при частоте  $\omega = 2 \cdot 10^5 \text{ Гц}$ . Найти постоянную времени  $\tau$  ПС. Оценить тип ПС, если поверхностная концентрация  $n_{s0}$  равна  $n_{s0} = 10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

## 5. МДП СТРУКТУРЫ

- 5.1. Рассчитать значение емкости МДП структуры  $C_{FB}$  при условии "плоских зон" ( $\psi_s = 0$ ) для системы  $n\text{Ge-SiO}_2\text{-Al}$  при комнатной температуре.  $\rho_{Ge} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , площадь полевого электрода  $S = 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ ,  $d_{ox} = 1000 \text{ \AA}$ ,  $T = 300 \text{ К}$ . Как изменится эта величина, нормированная на емкость подзатворного диэлектрика, при увеличении толщины окисла  $d_{ox}$  до  $d_{ox} = 1 \text{ мкм}$ ?
- 5.2. Рассчитать напряжение плоских зон  $V_{FB}$  МДП структуры  $p\text{Si-SiO}_2\text{-Al}$  с диэлектриком двуокисью кремния толщиной  $d_{ox} = 800 \text{ \AA}$  для трех случаев:  
 а)  $N_{ox}^{(1)} = 0$ ;  $N_{SS}^{(1)} = 0$  б)  $N_{ox}^{(2)} = -2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ;  $N_{SS}^{(2)} = 0$ ;  
 в)  $N_{ox}^{(3)} = 0$ ;  $N_{SS}^{(3)} = 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ .  
 $\rho_{Si} = 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Построить зонные диаграммы для каждого случая при  $V_G = V_{FB}$ .
- 5.3. Как изменится напряжение плоских зон МДП структуры  $n\text{Si-Al}_2\text{O}_3\text{-Al}$  при изменении температуры  $T$  от  $T = 300 \text{ К}$  до  $T_2 = 77 \text{ К}$ .  $\rho_{Si} = 0,1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ;  $d_{ox} = 2000 \text{ \AA}$ ;  $N_{SS} = 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ ;  $N_{ox} = 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ .
- 5.4. Рассчитать, как изменится напряжение плоских зон МДП структуры  $n\text{GaAs-Si}_3\text{N}_4\text{-Au}$  с толщиной нитрида кремния  $d_N = 1800 \text{ \AA}$ ,  $N_{ox} = 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ,  $N_{SS} = 8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$  при  $N_D = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $T = 300 \text{ К}$ .  
 а) при уменьшении толщины нитрида кремния до  $d_N = 200 \text{ \AA}$ ;  
 б) при замене нитрида кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на пентаокись тантала  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ; толщиной  $d_{ox} = 1800 \text{ \AA}$ ;  
 в) при замене электронного арсенида галлия на дырочный с тем же легированием.
- 5.5. Рассчитать равновесную идеальную вольтфарадную характеристику МДП системы  $p\text{Si-SiO}_2\text{-Al}$  в классическом случае  $T = 300 \text{ К}$ ,  $d_{ox} = 40 \text{ \AA}$ ,  $N_A = 1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Данные привести в виде таблицы.
- 5.6. Рассчитать вольтфарадную характеристику (ВФХ) той же МДП системы, что в задаче 5.5, но с  $d_{ox} = 400 \text{ \AA}$  и при наличии встроенного положительного заряда  $N_{ox} = 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и континуума поверхностных состояний с плотностью  $N_{SS} = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ . Сечение захвата  $S_{n,p} = 10^{-16} \text{ см}^2$ .

- $f = 10$  кГц. Данные привести в виде таблицы.
- 5.7. Рассчитать вольтфарадную характеристику МДП системы  $pSi-SiO_2-Al$ ,  $d_{ox} = 1500 \text{ \AA}$ ,  $N_A = 1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $T = 300 \text{ К}$  при наличии отрицательного заряда  $N_{ox} = -4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и мо-  
ноуровня поверхностных состояний  $N_s = 6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  донорного  
типа, на расстоянии  $\mathcal{E}_t = 0,1$  эВ ниже середины запрещенной  
зоны кремния. Данные привести в виде таблицы.  
Построить ВФХ из задач 5.5; 5.6; 5.7 на одном графике.
- 5.8. Рассчитать величину напряжения на затворе  $V_G$  МДП струк-  
туры, необходимую для создания в инверсионном канале  
 $nGe$  ( $\rho = 5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ) избытка дырок  $\Gamma_p$  равного  $\Gamma_p = 3 \cdot 10^{12}$   
 $\text{см}^{-2}$ . Подзатворный диэлектрик  $SiO_2$  толщиной  $d_{ox} = 1300 \text{ \AA}$ ,  
материал затвора золото  $Au$ .  $N_{ox} = 0$ ;  $N_{SS} = 0$ ;  $T = 77 \text{ К}$ .
- 5.9. Оценить, чему равна плотность поверхностных состояний  
 $N_{SS}$ , если наклон высокочастотной  $f = 1$  МГц вольтфарадной  
характеристики  $\beta = \Delta C / \Delta V_G$  вблизи плоских зон равен  $\beta =$   
 $= 42 \text{ нФ/В}$ . МДП структура на основе кремния КМБ-7 с нитридом  
кремния  $Si_3N_4$  толщиной  $d_N = 800 \text{ \AA}$  и поликремниевым  
затвором  $S = 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$   $T = 300 \text{ К}$ .  $N_A = 1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .
- 5.10. Рассчитать, чему равна плотность поверхностных состо-  
яний и определить их тип, если при изменении температуры от  
комнатной  $T = 300 \text{ К}$  до азотной  $T = 77 \text{ К}$  напряжение плоских зон  
МДП структуры  $pGe-SiO_2-Al$  изменилось от  $V_{FB}^{(1)} = -3 \text{ В}$  до  
 $V_{FB}^{(2)} = -10 \text{ В}$ ,  $N_A = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $d_{ox} = 1400 \text{ \AA}$ .
- 5.11. Найти концентрацию легирующей примеси  $N_D$  полупро-  
водниковой подложки  $nSi$ , если минимальное значение высо-  
кочастотной емкости  $C_{min}$  равно  $C_{min} = 10 \text{ пФ}$  для тол-  
щины подзатворного диэлектрика  $d_{ox} = 400 \text{ \AA}$ . Площадь зат-  
вора  $S = 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ .
- 5.12. Найти встроенный заряд в МДП структуре  $pGaAs-Si_3N_4$   
 $-Pt$ , если напряжение плоских зон  $V_{FB}$  равно  $V_{FB} =$   
 $= +5 \text{ В}$ .  $d_N = 1500 \text{ \AA}$ . Как изменится  $N_{ox}$  если  $V_{FB}$  ста-  
нет равно  $V_{FB} = -5 \text{ В}$ .  $N_{SS} = 0$ ,  $N_A = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $T = 300 \text{ К}$ .

I. Статистика электронов и дырок  
в полупроводниках (решения)

I.1. Условие задачи

$Si, Ge, GaAs, InSb$

$T_1 = 300 \text{ К}$

$T_2 = 77 \text{ К}$

$n_i = ?$

Собственная концентрация носи-  
телей равна

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right).$$

Величины эффективных плотностей  
состояний рассчитываются по фор-  
муле

$$N_{c,v} = 2 \left( \frac{2\pi m_d^* kT}{h^2} \right)^{3/2},$$

где  $m_d$  - эффективная масса плотности состояний, значения  
которой приведены в таблице 4.  
Подставляя значения констант в выражение для  $N_{c,v}$ , полу-  
чаем

$$N_{c,v} = 2,5 \cdot 10^{19} \left( \frac{m_d^*}{m_0} \right)^{3/2} \left( \frac{T}{300} \right)^{3/2} [\text{см}^{-3}].$$

Si

Из таблицы I находим, что  $m_{d,n}^* = 1,08 m_0$ ,  $m_{d,p}^* =$   
 $= 0,59 m_0$ . Значения ширины запрещенной зоны  $E_g$   
при  $T_1 = 300 \text{ К}$  равно  $E_g = 1,12 \text{ эВ}$ , а при  $T_2 = 77 \text{ К}$   
равно  $E_g = 1,16 \text{ эВ}$ .

Приведем вспомогательные вычисления:

$$2kT_1 = 0,0259 \times 2 = 0,0518 \text{ эВ (300 К)}.$$

$$2kT_2 = 0,00664 \times 2 = 0,0133 \text{ эВ (77 К)}.$$

$$300 \text{ К} \quad N_c = 2,5 \cdot 10^{19} (1,08)^{3/2} = 2,8 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$$

$$N_v = 2,5 \cdot 10^{19} (0,59)^{3/2} = 1,13 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$$

$$n_i = \sqrt{2,8 \cdot 1,13 \cdot 10^{19}} \exp\left(-\frac{1,12}{0,0518}\right) = 7,5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$$

$$T = 77 \text{ К} \quad N_c = 2,5 \cdot 10^{19} (1,08)^{3/2} \left(\frac{77}{300}\right)^{3/2} = 3,6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$$

$$N_v = 2,5 \cdot 10^{19} (0,59)^{3/2} \left(\frac{77}{300}\right)^{3/2} = 1,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$$

$$n_i = \sqrt{3,6 \cdot 1,4 \cdot 10^{18}} \exp\left(-\frac{1,16}{0,0133}\right) = 2,9 \cdot 10^{-20} \text{ см}^{-3}$$

Ge Из таблицы I находим, что  $m_{d,n}^* = 0,57$ ,  $m_{d,p}^* =$   
 $= 0,37 m_0$ . Значение  $E_g$  при  $T_1 = 300 \text{ К}$  равно  $E_g = 0,803 \text{ эВ}$ ,  
а при  $T_2 = 77 \text{ К}$  равно  $0,88 \text{ эВ}$ .



T=300 K  $N_c = 2,5 \cdot 10^{19} \cdot (0,57)^{3/2} = 1,07 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$   
 $N_v = 2,5 \cdot 10^{19} \cdot (0,37)^{3/2} = 5,6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$   
 $n_i = \sqrt{10,7 \cdot 5,6 \cdot 10^{18}} \cdot \exp\left(\frac{0,803}{0,0518}\right) = 1,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$

T=77 K  $N_c = 2,5 \cdot 10^{19} \cdot (0,57)^{3/2} \left(\frac{77}{300}\right)^{3/2} = 1,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$   
 $N_v = 2,5 \cdot 10^{19} \cdot (0,37)^{3/2} \left(\frac{77}{300}\right)^{3/2} = 7,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$   
 $n_i = \sqrt{14 \cdot 7,3 \cdot 10^{17}} \cdot \exp\left(\frac{0,88}{0,0133}\right) = 1,8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$

GaAs Из таблицы I находим, что  $m_{d,n}^* = 0,668 m_0$ ,  $m_{d,p}^* = 0,5 m_0$ . Значения  $E_g$  при  $T_1=300$  К равно  $E_g = 1,43$  эВ, а при  $T_2=77$  К равно  $E_g = 1,51$  эВ.

T=300 K  $N_c = 2,5 \cdot 10^{19} \cdot (0,068)^{3/2} = 4,4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$   
 $N_v = 2,5 \cdot 10^{19} \cdot (0,5)^{3/2} = 8,8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$   
 $n_i = \sqrt{44 \cdot 8,8 \cdot 10^{18}} \cdot \exp\left(\frac{1,43}{0,0518}\right) = 1,8 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$

T=77 K  $N_c = 2,5 \cdot 10^{19} \cdot (0,068)^{3/2} \left(\frac{77}{300}\right)^{3/2} = 5,8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$   
 $N_v = 2,5 \cdot 10^{19} \cdot (0,5)^{3/2} \left(\frac{77}{300}\right)^{3/2} = 1,25 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$   
 $n_i = \sqrt{0,58 \cdot 1,25 \cdot 10^{17}} \cdot \exp\left(\frac{1,51}{0,0133}\right) = 4,1 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-3}$

In Sb Из таблицы I находим, что  $m_{d,n}^* = 0,013 m_0$ ,  $m_{d,p}^* = 0,6 m_0$ . Значение  $E_g$  при  $T_1=300$  К равно  $E_g = 0,18$  эВ, а при  $T_2=77$  К равно  $E_g = 0,23$  эВ.

T=300 K  $N_c = 2,5 \cdot 10^{19} \cdot (0,13)^{3/2} = 3,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$   
 $N_v = 2,5 \cdot 10^{19} \cdot (0,6)^{3/2} = 1,16 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$   
 $n_i = \sqrt{0,37 \cdot 116 \cdot 10^{17}} \cdot \exp\left(\frac{0,18}{0,0518}\right) = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$

T=77 K  $N_c = 2,5 \cdot 10^{19} \cdot (0,13)^{3/2} \left(\frac{77}{300}\right)^{3/2} = 4,8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$   
 $N_v = 2,5 \cdot 10^{19} \cdot (0,6)^{3/2} \left(\frac{77}{300}\right)^{3/2} = 1,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

$$n_i = \sqrt{0,48 \cdot 150 \cdot 10^{16}} \cdot \exp\left(\frac{0,23}{0,0133}\right) = 2,6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$$

I.2. Условие задачи

Si, GaAs  
 $N_D = 10^{17} \text{ см}^{-3}$   
 $T = 300 \text{ K}$   
 Дополнительные табличные данные  
 $n_i/Si = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$   
 $n_i/GaAs = 1,1 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$   
 $n_0, p_0 = ?$

В условиях полностью ионизованной примеси концентрация основных носителей равна концентрации примеси. При легировании полупроводников донорной примеси основными носителями являются электроны. Следовательно, их концентрации равны  $n_0 Si = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ;  $n_0 GaAs = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Для расчета концентрации основных носителей дырок  $p_0$  в условиях термодинамического равновесия воспользуемся соотношением  $n_0 p_0 = n_i^2$ .

Тогда  $p_0 = \frac{n_i^2}{n_0}$ ;

$$p_{0Si} = \frac{(1,6 \cdot 10^{10})^2}{10^{17}} = 2,6 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$$

$$p_{0GaAs} = \frac{(1,1 \cdot 10^7)^2}{10^{17}} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-3}$$

I.3. Условие задачи

Si, In Sb  
 Дополнительные табличные данные  
 $m_{d,n,si}^* = 1,08 m_0$   
 $m_{d,p,si}^* = 0,57 m_0$   
 $m_{d,n,InSb}^* = 0,068 m_0$   
 $m_{d,p,InSb}^* = 0,6$   
 $T_1=300 \text{ K}, T_2=77 \text{ K}$   
Si T=300 K

Уровень Ферми расположен ближе к той зоне, где меньше величина эффективной массы плотности состояний  $m_d^*$ . Величина  $\varphi_0$  (положительное направление отсчета вверх к зоне проводимости) выражается соотношением

$$\varphi_0 = \frac{3}{4} k T \ln \frac{m_{d,p}^*}{m_{d,n}^*};$$

$$\varphi_0 = \frac{3}{4} \cdot 0,0259 \cdot \ln\left(\frac{0,57}{1,08}\right) = -0,0124 \text{ эВ.}$$

T=77 K

$$\varphi_0 = \frac{3}{4} \cdot 0,0066 \cdot \ln\left(\frac{0,57}{1,08}\right) = -0,0032 \text{ эВ.}$$

InSb T=300 K

$$\varphi_0 = \frac{3}{4} \cdot 0,0259 \cdot \ln\left(\frac{0,6}{0,013}\right) = 0,074 \text{ эВ.}$$

T=77 K

$$\varphi_0 = \frac{3}{4} \cdot 0,0066 \cdot \ln\left(\frac{0,6}{0,013}\right) = 0,019 \text{ эВ.}$$

В Si уровень Ферми F находится ниже середины запрещенной зоны, но его относительный сдвиг (нормированный на половину ширины запрещенной зоны) мал и составляет 2% при T<sub>1</sub>=300 K и 0,5% при T<sub>2</sub>=77 K. В InSb уровень Ферми F сдвигнут вверх относительно середины запрещенной зоны. Относительный сдвиг велик, он равен 82% при T<sub>1</sub>=300 K и 17% - при T<sub>2</sub>=77 K.

I.4. Условие задачи

Ge  
ρ<sub>p</sub> = 10 Ом·см  
T = 300 K

Дополнительные табличные данные

n<sub>i</sub> = 2,5 · 10<sup>13</sup> см<sup>-3</sup>  
μ<sub>p</sub> = 1900 см<sup>2</sup>/В·с

φ<sub>0</sub> = ?

Величина объемного положения уровня Ферми φ<sub>0</sub> определяется соотношением

$$\varphi_0 = \kappa T \ln \frac{\rho_0}{n_i}$$

ГДА - германий дырочный, легированный алюминием. Для расчета концентрации основных носителей ρ<sub>0</sub> воспользуемся соотношением

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = q \mu_p \rho_0$$

Отсюда ρ<sub>0</sub> = (q μ<sub>p</sub> ρ)<sup>-1</sup>

$$\rho_0 = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1900 \cdot 10} = 3,3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$$

Проверим разность [ρ<sub>0</sub>] =  $\frac{B \cdot C}{K \cdot \text{см}^2 \cdot \text{Ом} \cdot \text{см}} = \frac{B \cdot C \cdot A}{K \cdot \text{см}^2 \cdot B \cdot \text{см}} =$

$$= \frac{B \cdot C \cdot A}{K \cdot \text{см}^3 \cdot B} = \frac{B \cdot C \cdot K \cdot \text{л}}{K \cdot \text{см}^3 \cdot B \cdot C} = \text{см}^{-3}$$

$$\varphi_0 = 0,0259 \ln \frac{3,3 \cdot 10^{14}}{2,5 \cdot 10^{13}} = 0,067 \text{ эВ.}$$

I.5. Условие задачи

InSb

T = 77 K

N<sub>D,A</sub> = 10<sup>15</sup> см<sup>-3</sup>

Дополнительные табличные данные

n<sub>i</sub> = 2,6 · 10<sup>9</sup> см<sup>-3</sup>

φ<sub>0</sub> = ?

Значение уровня Ферми φ<sub>0</sub> (относительно уровня Ферми в собственном полупроводнике) будет

$$\varphi_0 = \kappa T \ln \frac{N_{D,A}}{n_i};$$

$$\varphi_0 = 0,0066 \ln \frac{10^{15}}{2,6 \cdot 10^9} =$$

$$= 0,085 \text{ эВ.}$$

Чтобы найти положение уровня Ферми φ<sub>0</sub> относительно середины запрещенной зоны для InSb, воспользуемся результатами задачи I.3. Получаем:

$$\varphi_{0,n} = 0,085 + 0,019 = 0,104 \text{ эВ.}$$

$$\varphi_{0,p} = 0,085 - 0,019 = 0,066 \text{ эВ.}$$

Уровень Ферми в n-InSb с N<sub>D</sub> = 10<sup>15</sup> см<sup>-3</sup> лежит на расстоянии φ<sub>0,n</sub> = 0,104 эВ от середины запрещенной зоны. В p-InSb с N<sub>A</sub> = 10<sup>15</sup> см<sup>-3</sup> уровень Ферми лежит на расстоянии φ<sub>0,p</sub> = 0,066 эВ от середины запрещенной зоны. Поскольку в n-InSb уровень Ферми находится ниже дна зоны проводимости E<sub>c</sub> менее, чем на расстоянии 2κT, то n-InSb - вырожденный полупроводник.

I.6. Условие задачи

Si, КЭФ - 4,5

ρ<sub>n</sub> = 4,5 Ом·см

T<sub>1</sub> = 300 K

T<sub>2</sub> = 77 K

Дополнительные табличные данные

n<sub>i</sub><sup>(1)</sup> = 1,6 · 10<sup>10</sup> см<sup>-3</sup>

Рассчитаем концентрацию легирующей донорной примеси N<sub>D</sub>

$$\rho_n = \frac{1}{q \mu_n n_0} = \frac{1}{q \mu_n N_D}$$

$$N_D = \frac{1}{q \mu_n \rho_n};$$

$$N_D = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1500 \cdot 4,5} =$$

$$= 9,3 \cdot 10^{14} \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$$

Объемное положение уровня Ферми

$$n_i^{(2)} = 2,9 \cdot 10^{-20} \text{ см}^{-3}$$

$$\mu_n = 1500 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$$

$$\varphi_{01} = ? \quad \varphi_{02} = ?$$

### I.7. Условие задачи

$$Si$$

$$N_{A,D} \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$$

Дополнительные табличные данные

$$\mu_n = 1500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$$

$$\mu_p = 600 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$$

$$\rho_{n,p} = ?$$

$$\rho_n = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1500 \cdot 10^{16}} = 0,42 \text{ Ом} \cdot \text{см}.$$

$$\rho_p = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 600 \cdot 10^{16}} = 1,05 \text{ Ом} \cdot \text{см}.$$

### I.8. Условие задачи

$$Si, Ge$$

$$GaAs, InSb$$

$$T = 300 \text{ К}$$

$$\rho_i = ?$$

$$\rho_{Si} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,6 \cdot 10^{10} (1500 + 600)} = 1,9 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}.$$

$$\rho_{Ge} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2,5 \cdot 10^{13} (3500 + 1900)}$$

-18-

$\varphi_0$  найдем из соотношения

$$\varphi_0 = kT \ln \frac{N_D}{n_i}$$

$$\varphi_{01} = 0,0259 \ln \frac{9,3 \cdot 10^{14}}{1,6 \cdot 10^{10}} = 0,2849 \text{ В}.$$

$$\varphi_{02} = 0,0066 \ln \frac{0,3 \cdot 10^{14}}{2,9 \cdot 10^{-20}} = 0,529 \text{ В}.$$

Величину удельного сопротивления  $\rho$  найдем из соотношения, учитывая условие полной ионизации примеси.  $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q \mu_n n}$ .

p-тип:  $\rho_o = N_A$ ; n-тип  $\rho_o = N_D$ .

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q \mu_n n N_{A,D}}$$

Величина удельного сопротивления  $\rho$  для собственного полупроводника будет

$$\rho_i^{-1} = \sigma = q \mu_n n_i + q \mu_p p_i = q n_i (\mu_n + \mu_p).$$

Воспользуемся данными табл. I для значений  $\mu_n, \mu_p, n_i$ .

-19-

$$\rho_{GaAs} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,1 \cdot 10^7 (8500 + 400)} = 6,4 \cdot 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{см}.$$

$$\rho_{InSb} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{16} (78000 + 750)} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}.$$

### I.9. Условие задачи

$$Si, Ge$$

$$T = 300 \text{ К}$$

$$\rho^+ \text{ тип}$$

$$N_A = ?$$

За критерий вырождения возьмем такое состояние, когда уровень Ферми  $F$  находится на расстоянии  $kT$  выше вершины валентной зоны  $E_v$ .

Следовательно, концентрация дырок в этом случае

$$\rho = N_v \exp\left(\frac{E_v - F}{kT}\right) = N_v \exp\left(-\frac{kT}{kT}\right) = \frac{N_v}{e}$$

В условии полной ионизации примеси  $\rho = N_A$ . Поэтому  $N_A = N_v/e$ .

Воспользовавшись таблицей 4, получаем:

$$Si: N_A = \frac{1,02 \cdot 10^{19}}{2,72} = 3,8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}.$$

$$Ge: N_A = \frac{6,1 \cdot 10^8}{2,72} = 2,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}.$$

### I.10. Условие задачи

$$n GaAs$$

$$\rho_n = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$$

$$T_1 = 300 \text{ К}$$

$$T_2 = 77 \text{ К}$$

Дополнительные табличные данные

$$\mu_n = 8500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$$

$$n_i^{(1)} = 1,1 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$$

$$n_i^{(2)} = 4,1 \cdot 10^{-33} \text{ см}^{-3}$$

$$\varphi_{02} - \varphi_{01} = ? = 0,72 - 0,47 = 0,25 \text{ эВ}.$$

Рассчитаем сначала концентрацию легирующей примеси  $N_D$  в  $GaAs$

$$N_D = \frac{1}{q \rho_n \mu_n} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 8500} = 7,4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}.$$

$$\varphi_0 = kT \ln \frac{N_D}{n_i}$$

$$\varphi_{01} = 0,0259 \cdot \ln \frac{7,4 \cdot 10^{14}}{1,1 \cdot 10^7} = 0,479 \text{ В}.$$

$$\varphi_{02} = 0,0066 \cdot \ln \frac{7,4 \cdot 10^{14}}{4,1 \cdot 10^{33}} = 0,729 \text{ В}.$$

$$\varphi_{02} - \varphi_{01} =$$

I.II. Условие задачи

Si, Ge, GaAs, InSb

$$N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$$

$$n_i \leq n_0$$

$$T_{gp} = ?$$

$N_V(T)$ , используя для расчета их значения при  $T=300\text{K}$ . Очевидно, что если  $T_{gp} > 300\text{K}$ , то значения  $T_{gp}$  получим несколько завышенные, а при  $T_{gp} < 300\text{K}$  - несколько заниженные.

$$n_i = \sqrt{N_c N_V} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right);$$

$$\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) = \ln \frac{N_D}{\sqrt{N_c N_V}};$$

$$T_{gp} = \frac{E_g}{2k} \frac{1}{\ln \frac{1}{\sqrt{N_c N_V} N_D}}$$

Подставляем значения  $N_c, N_V, E_g$  из таблицы I, причем значение  $E_g$  переведем в Джоули.

$$\text{Si}; T_{gp} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,12}{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}} \cdot \frac{1}{\frac{2,8 \cdot 1,02 \cdot 10^{19}}{10^{15}}} = 667 \approx 400^\circ\text{C}.$$

$$\text{Ge}; T_{gp} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,8}{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}} \cdot \frac{1}{\frac{10,4 \cdot 6,1 \cdot 10^{18}}{10^{15}}} = 516 \text{ K} \approx 250^\circ\text{C}.$$

$$\text{GaAs}; T_{gp} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,43}{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}} \cdot \frac{1}{\frac{0,47 \cdot 7,0 \cdot 10^{18}}{10^{15}}} = 1104 \text{ K} \approx 830^\circ\text{C}.$$

$$\text{InSb}; T_{gp} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,18}{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}} \cdot \frac{1}{\frac{0,137 \cdot 1,20 \cdot 10^{17}}{10^{15}}} = 160 \text{ K} \approx -110^\circ\text{C}.$$

Следовательно, при концентрации донорной примеси  $N_D =$

Температурная зависимость  $n_i$  обусловлена зависимостью  $N_c, N_V$  от температуры и экспоненциальным множителем  $\exp(-\frac{E_g}{kT})$ .

Для оценки  $T_{gp}$  пренебрегаем зависимостью  $E_g(T), N_c(T),$

$= 10^{15} \text{ см}^{-3}$  по мере роста температуры  $T$  концентрация собственных носителей  $n_i$  будет больше, чем примесная концентрация основных носителей  $n_0$  при следующих температурах  $T_{gp}$ : InSb ( $-112^\circ\text{C}$ ), Ge ( $+250^\circ\text{C}$ ), Si ( $+400^\circ\text{C}$ ), GaAs ( $+830^\circ\text{C}$ ).

2. Барьеры Шоттки и p-n переходы (решения)

2.I. Условие задачи

n-Ge-Au

$$\rho_{Ge} = 1,0 \text{ Ом} \cdot \text{см}$$

$$\varphi_K = ?$$

Дополнительные табличные данные

$$\mu_n = 3900 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$$

$$\chi = 4,0 \text{ эВ}$$

$$E_g = 0,803 \text{ эВ}$$

$$n_i = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$$

$$\Phi_{Au} = 5 \text{ эВ}$$

Величина барьера на идеальном контакте металл-полупроводник равна разности термодинамических работ выхода для германия  $\Phi_{Ge}$  и золота  $\Phi_{Au}$ .

$$\varphi_K = \Phi_{Au} - \Phi_{Ge}.$$

Величина термодинамической работы золота  $\Phi_{Au}$  известна, необходимо рассчитать термодинамическую работу выхода из nGe. Она равна

$$\Phi_{Ge} = \chi + \frac{E_g}{2} - \varphi_0.$$

Значения электронного сродства  $\chi$  и ширины запрещенной зоны табличные, величину  $\varphi_0$  необходимо рассчитать

$$\varphi_0 = kT \ln \frac{N_D}{n_i}; \quad N_D = \frac{1}{\rho q \mu_n};$$

Подставляя числа, получаем:

$$N_D = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3900} = 1,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

$$\varphi_0 = 0,0259 \cdot \ln \frac{1,6 \cdot 10^{15}}{2,5 \cdot 10^{13}} = 0,11 \text{ эВ}.$$

$$\Phi_{Ge} = 4,0 + 0,4 + 0,11 = 4,29 \text{ эВ}.$$

$$\varphi_K = 5,0 - 4,29 = 0,71 \text{ эВ}.$$

2.2. Условие задачи

$n_{Si} - Pt$
$\rho_{Si} = 0,1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$
$V_{G1} = +0,4 \text{ В}$
$V_{G2} = 0$
$V_{G3} = -2,0 \text{ В}$
$W_{1,2,3} = ?$
Дополнительные табличные данные
$\chi_{Si} = 4,05 \text{ эВ}$
$E_g = 1,12 \text{ эВ}$
$n_i = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$
$\mu_n = 1500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
$\phi_{Pt} = 5,3 \text{ эВ}$
$\epsilon_s = 11,8$

Ширина обедненной области барьера Шоттки  $W$  равна

$$W = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_s \cdot \epsilon_0 \cdot (\varphi_K - V_G)}{q N_D}}$$

Рассчитаем высоту потенциального барьера  $n_{Si} - Pt$  в равновесных условиях  $V_G = 0$  аналогично решению предыдущей задачи.

$$N_D = \frac{I}{0,1 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1500} = 4,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$$

$$\varphi_0 = 0,0259 \cdot \ln \frac{4,2 \cdot 10^{16}}{1,6 \cdot 10^{10}} = 0,38 \text{ эВ}$$

$$\varphi_{Si} = 4,05 + 0,38 - 0,38 = 4,23 \text{ эВ}$$

$$\varphi_K = 5,3 - 4,23 = 1,07 \text{ эВ}$$

Подставляя числа в выражение для  $W$ , получаем:

$$W_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot 11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot (1,07 - 0,4)}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4,2 \cdot 10^{16}}} = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ см} = 0,14 \text{ мкм}$$

$$W_3 = \sqrt{\frac{2 \cdot 11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot (1,07 + 2,0)}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4,2 \cdot 10^{16}}} = 3,1 \cdot 10^{-5} \text{ см} = 0,31 \text{ мкм}$$

Проверим размерность  $[W]$ :

$$[W] = \left[ \frac{\text{Ф/см} \cdot \text{В}}{\text{Кл} \cdot \text{см}^{-3}} \right]^{1/2} = \left[ \frac{\text{Кл}}{\text{В}} \cdot \frac{\text{В}}{\text{см} \cdot \text{Кл} \cdot \text{см}^{-3}} \right]^{1/2} = \text{см}$$

2.3. Условие задачи

$n_{GaAs} - Au$
$N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3}$
$V_{G1} = +0,3 \text{ В}$
$V_{G2} = 0$
$V_{G3} = -100 \text{ В}$
$E_{max} = ?$
Дополнительные табличные данные
$\chi_{GaAs} = 4,07 \text{ эВ}$
$n_i = 1,1 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$
$\phi_{Au} = 5,0 \text{ эВ}$
$E_g = 1,43 \text{ эВ}$
$\epsilon_s = 10,9$

Электрическое поле в барьере Шоттки максимально на границе металл-полупроводник, линейно спадает вглубь полупроводника и обращается в нуль на границе обедненной области с квазинейтральным объемом.

$$E = \frac{q N_D}{\epsilon_s \epsilon_0} (W - x); E_{max} = \frac{q N_D W}{\epsilon_s \epsilon_0}$$

Для расчета  $E_{max}$  необходимо для каждого случая рассчитать ширину ОПЗ  $W$ . Воспользовавшись решением предыдущей задачи, получаем

$$\varphi_0 = 0,0259 \cdot \ln \frac{10^{16}}{1,1 \cdot 10^7} = 0,53 \text{ эВ}$$

$$\phi_{GaAs} = 4,07 + 0,53 = 4,6 \text{ эВ}$$

$$\varphi_K = 5,0 - 4,6 = 0,4 \text{ эВ}$$

$$W_1 = \frac{2 \cdot 10,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot (0,4 - 0,3)}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{16}} = 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ см} = 0,23 \text{ мкм}$$

$$W_2 = \frac{2 \cdot 10,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,4}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{16}} = 3,0 \cdot 10^{-5} \text{ см} = 0,3 \text{ мкм}$$

$$W_3 = \frac{2 \cdot 10,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot (0,4 + 100)}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{16}} = 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 3,5 \text{ мкм}$$

Значение максимального электрического поля будет:

$$E_{max}^{(1)} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{16} \cdot 2,3 \cdot 10^{-5}}{10,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}} = 3,8 \cdot 10^4 \text{ В/см}$$

$$E_{max}^{(2)} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{16} \cdot 3 \cdot 10^{-5}}{10,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}} = 5 \cdot 10^4 \text{ В/см.}$$

$$E_{max}^{(3)} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{16} \cdot 3,5 \cdot 10^{-4}}{10,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}} = 5,8 \cdot 10^5 \text{ В/см.}$$

Проверим размерность  $[E_{max}]$ :

$$[E_{max}] = \left[ \frac{\text{Кл} \cdot \text{см}^{-3} \cdot \text{см}}{\text{Ф/см}} \right] = \left[ \frac{\text{Кл} \cdot \text{см} \cdot \text{см} \cdot \text{В}}{\text{Кл} \cdot \text{см}^3} \right] = \frac{\text{В}}{\text{см}}$$

2.4. Условие задачи

$$nSi - Au$$

$$V_g = -5 \text{ В}$$

$$\rho_{Si} = 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$$

$$Z = 1,2 \text{ мкм}$$

$$E(z) = ? \quad \varphi(z) = ?$$

Дополнительные табличные данные

$$\chi_{Si} = 4,05 \text{ эВ}$$

$$E_g = 1,12 \text{ эВ}$$

$$n_i = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$$

$$\epsilon_s = 11,8$$

$$\mu_n = 1500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$$

$$\phi_{Au} = 5,0 \text{ эВ}$$

$$\varphi_0 = \kappa T \ln \frac{N_D}{n_i} = 0,0259 \cdot \ln \frac{4,2 \cdot 10^{14}}{1,6 \cdot 10^{10}} = 0,26 \text{ эВ.}$$

$$\phi_{Si} = \chi + \frac{E_g}{2} - \varphi_0 = 4,05 + 0,56 - 0,26 = 4,35 \text{ эВ.}$$

$$\varphi_K = \phi_{Au} - \phi_{Si} = 5,0 - 4,35 = 0,65 \text{ эВ.}$$

В барьере Шоттки электрическое поле  $E$  линейно убывает с координатой, а потенциала - квадратично

$$E = E_{max} \left( 1 - \frac{z}{W} \right);$$

$$\varphi = \varphi_{max} \left( 1 - \frac{z}{W} \right)^2.$$

Следовательно, необходимо сначала рассчитать значения  $E_{max}$ ,  $\varphi_K$ ,  $W$  для условий задачи. Согласно предыдущим задачам, находим:

$$N_D = \frac{1}{\rho \cdot q \cdot \mu_n} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10 \cdot 1500} = 4,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$$

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 (\varphi_K - V_g)}{q \cdot N_D}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot (0,65 + 5,0)}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4,2 \cdot 10^{14}}} = 4,2 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 4,2 \text{ мкм.}$$

$$E_{max} = \frac{q \cdot N_D \cdot W}{\epsilon_s \epsilon_0} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4,2 \cdot 10^{14} \cdot 4,2 \cdot 10^{-4}}{11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}} = 2,7 \cdot 10^4 \text{ В/см.}$$

Значение поля  $E$  и потенциала  $\varphi$  на расстоянии  $Z = 0,2 \text{ мкм}$  получаем

$$E(Z) = 2,7 \cdot 10^4 \cdot \left( 1 - \frac{1,2}{4,2} \right) = 1,9 \cdot 10^4 \text{ В/см.}$$

$$\varphi(Z) = 5,65 \cdot \left( 1 - \frac{1,2}{4,2} \right)^2 = 2,9 \text{ В.}$$

2.5. Условие задачи

$$nGaAs - Pt$$

$$\rho = 50 \text{ Ом} \cdot \text{см}$$

$$V_g^{(1)} = +0,5 \text{ В}$$

$$V_g^{(2)} = -5,0 \text{ В}$$

$$j = ?$$

Дополнительные табличные данные

$$\chi = 4,07 \text{ эВ}$$

$$n_i = 1,1 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$$

$$\phi_{Pt} = 5,3 \text{ эВ}$$

$$\epsilon_s = 10,9$$

$$\mu_n = 8500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$$

$$v = 10^7 \text{ см/с}$$

$$m_n^* = 0,068 m_0$$

Для выпрямления тока в барьере Шоттки существует две теории - диодная и диффузионная. Если длина свободного пробега велика, то справедлива диодная теория, если же  $l$  мала, то справедлива диффузионная теория. Критерием малости является выражение  $\frac{2q\varphi_K W}{kT}$ . Оценим эту величину:

$$N_D = \frac{1}{\rho \mu_n q} = \frac{1}{50 \cdot 8500 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$$

$$\varphi_0 = \kappa T \ln \frac{N_D}{n_i} = 0,0259 \cdot \ln \frac{1,5 \cdot 10^{13}}{1,1 \cdot 10^7} = 0,37 \text{ эВ.}$$

$$\phi_{GaAs} = 4,07 + 0,715 - 0,37 = 4,42 \text{ эВ.}$$

$$\varphi_K = 5,3 - 4,42 = 0,88 \text{ эВ.}$$

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 \varphi_k}{q N_D}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10 \cdot 9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,68}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,5 \cdot 10^{13}}} = 8,4 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 8,4 \text{ мкм}.$$

$$\frac{kT}{2q\varphi_k} W = \frac{0,0259 \cdot 8,4 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0,88} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ см} = 0,12 \text{ мкм}.$$

Оценим длину свободного пробега электронов  $l$  в арсениде галлия между актами рассеяния

$$l = v_T \cdot \tau; \quad \mu = \frac{q \cdot \tau}{m^*}; \quad l = \frac{v_T \cdot \mu_n \cdot m_n^*}{q}$$

$$l = \frac{10^5 \cdot 0,85 \cdot 0,068 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 3,3 \cdot 10^{-8} = 0,033 \text{ мкм}.$$

Следовательно,  $l \ll \frac{kT}{2q\varphi_k} W$  и для рассматриваемого в задаче случае справедлива диффузионная теория выпрямления. Согласно ей, величина плотности тока  $j$  будет равна

$$j = j_s (e^{\frac{2V_G}{kT}} - 1), \quad \text{где } j_s = q \mu_n E_{\text{max}} n_0 e^{\beta \varphi_k}.$$

Рассчитаем эти величины

$$j_s = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8500 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 1,5 \cdot 10^{13} \cdot \frac{0,88}{0,0259} = 1,8 \cdot 10^{-13} \frac{\text{А}}{\text{см}^2}.$$

При  $V_G^{(1)} = +0,5$  В получаем для прямого тока

$$j_p = 1,8 \cdot 10^{-13} \left[ \exp\left(\frac{0,5}{0,0259}\right) - 1 \right] = 4,3 \cdot 10^{-5} \text{ А/см}^2.$$

Прямой ток обусловлен электронами, инжектированными из GaAs в Pt.

При  $V_G^{(2)} = -5,0$  В получаем для обратного тока

$$j_n = 1,8 \cdot 10^{-13} \left[ \exp\left(-\frac{5,0}{0,0259}\right) - 1 \right] = 1,8 \cdot 10^{-13} \text{ А/см}^2.$$

Обратный ток обусловлен электронами, инжектируемыми из металла Pt в полупроводник GaAs, причем такими, энергия которых больше высоты потенциального барьера на границе металл-полупроводник со стороны металла.

2.6. Условие задачи

$$n_{Ge} - p_{Ge}$$

$$\rho = 20 \text{ м} \cdot \text{см}$$

$$V_G^{(1)} = +0,15 \text{ В}$$

$$V_G^{(2)} = -0,5 \text{ В}$$

$$\varphi^{(1)}, \varphi^{(2)}, \Delta\varphi = ?$$

Дополнительные табличные данные

$$n_i = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$$

$$\mu_n = 3600 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$$

$$\mu_p = 1900 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$$

Высота потенциального барьера p-n перехода определяется контактной разностью потенциалов  $\varphi_k$  и величиной приложенного внешнего напряжения  $V_G$

$$\varphi = \varphi_k - V_G$$

$$\varphi_k = \phi_p - \phi_n = \chi + \frac{E_g}{2} + \varphi_{p0} - \chi - \frac{E_g}{2} + \varphi_{n0} = \varphi_{p0} - \varphi_{n0}.$$

Рассчитаем необходимые параметры

$$N_D = n_{p0} = \frac{1}{q \mu_n \rho} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3600 \cdot 2} = 8,7 \cdot 10^{-14} \text{ см}^{-3}.$$

$$N_A = p_{p0} = \frac{1}{q \mu_p \rho} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1900 \cdot 2} = 1,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

$$\varphi_{n0} = kT \ln \frac{N_D}{n_i} = 0,0259 \cdot \ln \frac{8,7 \cdot 10^{-14}}{2,5 \cdot 10^{13}} = 0,09 \text{ эВ}.$$

$$\varphi_{p0} = kT \ln \frac{N_A}{n_i} = 0,0259 \cdot \ln \frac{1,6 \cdot 10^{15}}{2,5 \cdot 10^{13}} = 0,11 \text{ эВ}.$$

$$\varphi_k = \varphi_{n0} + \varphi_{p0} = 0,09 + 0,11 = 0,20 \text{ эВ}.$$

$$\varphi^{(1)} = 0,20 - 0,15 = 0,05 \text{ эВ}.$$

$$\varphi^{(2)} = 0,20 + 0,50 = 0,70 \text{ эВ}.$$

$$\Delta\varphi = \varphi^{(2)} - \varphi^{(1)} = 0,70 - 0,05 = 0,65 \text{ эВ}.$$

Следовательно, при изменении напряжения  $V_G$  от +0,15 В до -0,5 В высота потенциального барьера в p-n переходе возрастет на  $\Delta\varphi = 0,65$  эВ.

2.7. Условие задачи

$$nGe - pGe$$

$$\rho_n \quad \rho_p = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$$

$$V_G = 0$$

$E_{max} = ?$   
 $W_n, W_p = ?$   
 Дополнительные табличные данные

$$n_i = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$$

$$\mu_n = 3600 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$$

$$\mu_p = 1900 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$$

$$\epsilon_s = 16,0$$

$$N_D = \frac{1}{q \cdot \mu_n \cdot \rho_n} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3600 \cdot 10} = 1,7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$$

$$N_A = \frac{1}{q \cdot \mu_p \cdot \rho_p} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1900 \cdot 1} = 3,3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$$

$$\varphi_{on} = \kappa T \cdot \ln \frac{N_D}{n_i} = 0,0259 \cdot \ln \frac{1,7 \cdot 10^{14}}{2,5 \cdot 10^{13}} = 0,05 \text{ эВ}$$

$$\varphi_{op} = \kappa T \cdot \ln \frac{N_A}{n_i} = 0,0259 \cdot \ln \frac{3,3 \cdot 10^{15}}{2,5 \cdot 10^{13}} = 0,13 \text{ эВ}$$

$$\varphi_k = \varphi_{on} + \varphi_{op} = 0,18 \text{ эВ}$$

$$W_n = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_s \cdot \epsilon_0 \cdot 10^{-14} \cdot 1,7 \cdot 10^{15} \cdot 0,18}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,7 \cdot 10^{14} \cdot (1,7 \cdot 10^{14} + 3,3 \cdot 10^{15})}} = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 1,3 \text{ мкм}$$

Электрическое поле в p-n переходе достигает максимальной величины  $E_{max}$  на границе p и n областей

$$E_{max} = \frac{q N_D}{\epsilon_s \epsilon_0} W_p = \frac{q N_A}{\epsilon_s \epsilon_0} W_n$$

Ширина обедненной области в электронном  $W_n$  и дырочном  $W_p$  полупроводнике будут

$$W_n = \sqrt{\frac{2 \epsilon_s \epsilon_0 (\varphi_k - V_G)}{q N_D^2 \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}}$$

$$W_p = \sqrt{\frac{2 \epsilon_s \epsilon_0 (\varphi_k - V_G)}{q N_A^2 \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}}$$

Рассчитаем необходимые величины

$$W_p = \sqrt{\frac{2 \cdot 16 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1,7 \cdot 10^{15} \cdot 0,18}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3,3 \cdot 10^{15} \cdot (1,7 \cdot 10^{14} + 3,3 \cdot 10^{15})}} = 6,8 \cdot 10^{-6} \text{ см} = 0,068 \text{ мкм}$$

$$E_{max} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3,3 \cdot 10^{15} \cdot 6,8 \cdot 10^{-6}}{16 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}} = 2,5 \cdot 10^3 \text{ В/см}$$

2.8. Условие задачи

$$nSi - pSi$$

$$\rho = 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$$

$$V_G^{(1)} = +0,4 \text{ В}$$

$$V_G^{(2)} = -2,0 \text{ В}$$

$$Z = +0,2 \text{ мкм}$$

$$E_1(z), E_2(z) = ?$$

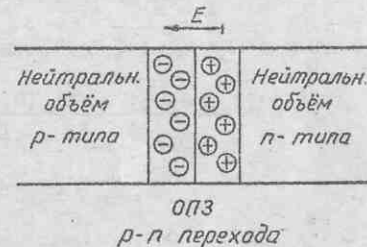
Дополнительные табличные данные

$$\epsilon_s = 11,8$$

$$\mu_n = 1500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$$

$$\mu_p = 600 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$$

$$n_i = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$$



Поле в ОПЗ p-n перехода направлено от ионизованных доноров к ионизованным акцепторам и при изменении внешнего напряжения направления не меняет. Меняется только его величина. Зависимость  $E(z)$  задается в виде

$$E(z) = E_{max} \left( 1 - \frac{z}{W_p} \right)$$

Рассчитаем необходимые параметры:

$$N_D = \frac{1}{q \mu_n \rho_n} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1500 \cdot 10} = 4,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$$

$$N_A = \frac{1}{q \mu_p \rho_p} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 600 \cdot 10} = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$$



$$\varphi_{on} = \kappa T \ln \frac{N_D}{n_i} = 0,0259 \cdot \ln \frac{4,2 \cdot 10^{14}}{1,6 \cdot 10^{10}} = 0,26 \text{ эВ.}$$

$$\varphi_{op} = \kappa T \ln \frac{N_A}{n_i} = 0,0259 \cdot \ln \frac{1 \cdot 10^{15}}{1,6 \cdot 10^{10}} = 0,29 \text{ эВ.}$$

$$\varphi_K = \varphi_{on} + \varphi_{op} = 0,26 + 0,29 = 0,55 \text{ эВ.}$$

$$W_p^{(1)} = \frac{2 \cdot 11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot (0,55 - 0,4) \cdot 4,2 \cdot 10^{14}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{15} (10^{15} + 4,2 \cdot 10^{14})} = 4,2 \cdot 10^{-5} \text{ см} = 0,42 \text{ мкм.}$$

$$W_p^{(2)} = \frac{2 \cdot 11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot (0,55 + 2,0) \cdot 4,2 \cdot 10^{14}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{15} (10^{15} + 4,2 \cdot 10^{14})} = 9,7 \cdot 10^{-5} \text{ см} = 0,97 \text{ мкм.}$$

$$E_{max}^{(1)} = \frac{q \cdot N_A \cdot W_p}{\epsilon_s \epsilon_0} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{15} \cdot 4,2 \cdot 10^{-5}}{11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}} = 6,4 \cdot 10^3 \text{ В/см.}$$

$$E_{max}^{(2)} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{15} \cdot 9,7 \cdot 10^{-5}}{11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}} = 1,75 \cdot 10^4 \text{ В/см.}$$

$$E^{(1)}(z) = E_{max}^{(1)} \left(1 - \frac{z}{W_p^{(1)}}\right) = 6,4 \cdot 10^3 \cdot \left(1 - \frac{0,2}{0,42}\right) = 3,4 \cdot 10^3 \text{ В/см.}$$

$$E^{(2)}(z) = 1,25 \cdot 10^4 \cdot \left(1 - \frac{0,2}{0,97}\right) = 1,4 \cdot 10^4 \text{ В/см.}$$

$$E^{(2)}(z) - E^{(1)}(z) = 1,4 \cdot 10^4 - 3,4 \cdot 10^3 = 1,1 \cdot 10^4 \text{ В/см.}$$

Следовательно, электрическое поле возрастает на величину  $1,1 \cdot 10^4 \text{ В/см.}$

2.9. Условие задачи

$$n^+ Si - p Si$$

$$V_G = -1,0 \text{ В}$$

$$\Delta Z = 0,1 \text{ мкм}$$

$$\rho_n = 0,001 \text{ Ом} \cdot \text{см}$$

$$\rho_p = 4,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$$

$$\varphi(z) = ?$$

Дополнительные табличные данные

$$\epsilon_s = 11,8$$

$$\mu_n = 1500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$$

$$\mu_p = 600 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$$

$$n_i = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$$

Выберем за начало отсчета для потенциала в  $n^+$  и  $p$  области дно зоны проводимости в квазинейтральном объеме. Тогда закон изменения потенциала в  $n^+$  и  $p$  областях будет

$$\varphi(z) = \frac{q N_D}{2 \epsilon_s \epsilon_0} (z + W_n)^2, (z < 0);$$

$$\varphi(z) = -\frac{q N_A}{2 \epsilon_s \epsilon_0} (-z + W_p)^2, (z > 0).$$

Рассчитаем необходимые параметры:

$$N_D = \frac{1}{q \mu_n \rho_n} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1500 \cdot 10^{-3}} = 4,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}.$$

$$N_A = \frac{1}{q \mu_p \rho_p} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 600 \cdot 4,5} = 2,3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

$$\varphi_{on} = \kappa T \ln \frac{N_D}{n_i} = 0,0259 \cdot \ln \frac{4,2 \cdot 10^{18}}{1,6 \cdot 10^{10}} = 0,50 \text{ эВ.}$$

$$\varphi_{op} = \kappa T \ln \frac{N_A}{n_i} = 0,0259 \cdot \ln \frac{2,3 \cdot 10^{15}}{1,6 \cdot 10^{10}} = 0,31 \text{ эВ.}$$

$$\varphi = \varphi_{on} + \varphi_{op} - V_G = 0,50 + 0,31 + 1,0 = 1,81 \text{ эВ.}$$

$$W_n = \sqrt{\frac{2 \epsilon_s \epsilon_0 (\varphi_K - V)}{q N_D^2 \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1,81 \cdot 2,3 \cdot 10^{15}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4,2 \cdot 10^{18} (4,2 \cdot 10^{18} + 2,3 \cdot 10^{15})}} = 5,5 \cdot 10^{-8} \text{ см} = 0,00055 \text{ мкм.}$$

$$W_p = \sqrt{\frac{2 \epsilon_s \epsilon_0 \cdot (V_k - V)}{q N_A \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1,81 \cdot 4,2 \cdot 10^{18}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2,3 \cdot 10^{15} (4,2 \cdot 10^{18} + 2,3 \cdot 10^{15})}} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 1 \text{ мкм}.$$

$$\psi_n(z) = \frac{q \cdot N_D \cdot W_n^2}{2 \epsilon_s \cdot \epsilon_0} \left( 1 + \frac{z}{W_n} \right)^2 = \psi_{on} \left( 1 + \frac{z}{W_n} \right)^2, \quad (z < 0).$$

$$\psi_p(z) = \frac{q \cdot N_A \cdot W_p^2}{2 \epsilon_s \cdot \epsilon_0} \left( 1 - \frac{z}{W_p} \right)^2 = \psi_{op} \left( 1 - \frac{z}{W_p} \right)^2, \quad (z > 0).$$

$\psi_{on}, \psi_{op}$  - падение потенциала в ОПЗ р-п перехода в электронной и дырочной частях.

$$\psi_{on} = \frac{q \cdot N_D \cdot W_n^2}{2 \epsilon_s \cdot \epsilon_0} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4,2 \cdot 10^{18} \cdot (5,5 \cdot 10^{-8})^2}{2 \cdot 11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}.$$

$$\psi_{op} = \frac{q \cdot N_A \cdot W_p^2}{2 \epsilon_s \cdot \epsilon_0} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2,3 \cdot 10^{15} \cdot (1 \cdot 10^{-4})^2}{2 \cdot 11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}} = 1,81 \text{ эВ}.$$

Z, мкм	0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6
$\psi(z)$	1,81	1,46	1,15	0,88	0,45	0,29

Z, мкм	0,4	0,7	0,8	0,9	1,0
$\psi(z)$	0,65	0,16	0,07	0,02	0

2.Ю. Условие задачи

$V_0^{(1)} = 0,5 \text{ В}$   
 $V_0^{(2)} = -0,5 \text{ В}$   
 $N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$   
 $N_D = 10^{14} \text{ см}^{-3}$   
 $S = 1 \text{ мм}^2$   
 $J = ?$

Величина тока в р-п переходе выражается соотношением

$$J = j \cdot S = j_0 \cdot S \left( e^{\frac{V_0}{kT}} - 1 \right), \text{ где}$$

$$j_0 = \frac{q \cdot D_n \cdot n_{p0}}{L_n} + \frac{q \cdot D_p \cdot p_{n0}}{L_p}.$$

Рассчитаем необходимые параметры

$$n_{p0} = \frac{n_i^2}{n_{n0}} = \frac{n_i^2}{N_D}$$

Дополнительные табличные данные

$n_i = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$   
 $\mu_n = 1500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$   
 $\mu_p = 600 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$   
 $\tau = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$

$$= \frac{(1,6 \cdot 10^{10})^2}{10^{14}} = 2,6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$$

$$\rho_{n0} = \frac{n_i^2}{p_{p0}} = \frac{n_i^2}{N_A}$$

$$= \frac{(1,6 \cdot 10^{10})^2}{10^{16}} = 2,6 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$$

$$D_n = \mu_n \frac{kT}{q} = 1500 \cdot 0,0259 = 39 \text{ см}^2/\text{с}.$$

$$D_p = \mu_p \frac{kT}{q} = 600 \cdot 0,0259 = 16 \text{ см}^2/\text{с}.$$

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau} = \sqrt{39 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}} = 3,1 \cdot 10^{-1} \text{ см} = 3,1 \text{ мм}.$$

$$L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau} = \sqrt{16 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}} = 6,3 \cdot 10^{-2} \text{ см} = 0,63 \text{ мм}.$$

$$j_0 = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 39 \cdot 2,6 \cdot 10^6}{3,1 \cdot 10^{-1}} + \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 16 \cdot 2,6 \cdot 10^4}{6,3 \cdot 10^{-2}} = 5,2 \cdot 10^{-11} + 1,1 \cdot 10^{-12} = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ А/см}^2.$$

При  $V_0 = \pm 0,5 \text{ В}$  величина тока

$$J_1 = 5,3 \cdot 10^{-11} \cdot 10^{-2} \cdot \left[ \exp \frac{0,5}{0,0259} - 1 \right] = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ А} = 0,13 \text{ мА}.$$

$$J_2 = 5,3 \cdot 10^{-11} \cdot 10^{-2} \cdot \left[ \exp \frac{0,5}{0,0259} - 1 \right] = 5,3 \cdot 10^{-13} \text{ А}.$$

Проверим размерность  $D, L, j_0$ :

$$[D] = \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \cdot \frac{\text{Дж} \cdot \text{К}}{\text{К} \cdot \text{Кл}} = \frac{\text{см}^2 \cdot \text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{К}}{\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{К}} = \frac{\text{см}^2}{\text{с}};$$

$$[L] = \left[ \frac{\text{см}^2}{\text{с}} \cdot \text{с} \right]^{1/2} = \text{см}; \quad [j_0] = \frac{\text{Кл} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{см}^{-3}}{\text{см} \cdot \text{с}} = \frac{\text{Кл}}{\text{с} \cdot \text{см}^2} = \frac{\text{А}}{\text{см}^2}.$$

2.И. Условие задачи

$n_{Ge} - p_{GaAs}$   
 $N_{D,A} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$

Для расчета зонной диаграммы необходимо знать термодинамические работы выхода  $\Phi_{Ge}, \Phi_{GaAs}$ , контактную разность потенциалов  $\varphi_k$ , ширины обедненных

$$\Phi_{Ge, GaAs} = ? \quad \varphi_k = ?$$

$$W_{n,p} = ?$$

Дополнительные табличные данные

$$n_{iGe} = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$$

$$E_{gGe} = 0,803 \text{ эВ}$$

$$\chi_{Ge} = 4,0 \text{ эВ}$$

$$\epsilon_{Ge} = 16$$

$$n_{iGaAs} = 1,1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$$

$$E_{gGaAs} = 1,43 \text{ эВ}$$

$$\chi_{GaAs} = 4,07 \text{ эВ}$$

$$\epsilon_{GaAs} = 10,9$$

областей  $W_{n,p}$ , падение потенциала в  $n$  и  $p$  областях. Рассчитаем необходимые параметры:

$$\varphi_{0Ge} = k \cdot T \cdot \ln \frac{N_{DGe}}{n_{iGe}} = 0,0259 \cdot \ln \frac{10^{16}}{2,5 \cdot 10^{13}} = 0,16 \text{ эВ}$$

$$\varphi_{0GaAs} = k \cdot T \cdot \ln \frac{N_{DGaAs}}{n_{iGaAs}} = 0,0259 \cdot \ln \frac{10^{16}}{1,1 \cdot 10^{17}} = 0,53 \text{ эВ}$$

$$\Phi_{Ge} = \chi_{Ge} + \frac{E_g}{2} - \varphi_0 = 4 + 0,4 - 0,16 = 4,24 \text{ эВ}$$

$$\Phi_{GaAs} = \chi_{GaAs} + \frac{E_g}{2} + \varphi_0 = 4,07 + 0,715 + 0,53 = 5,32 \text{ эВ}$$

Найдем ширины обедненных областей  $W_n$  и  $W_p$ , учитывая, что  $\epsilon_{Ge} \neq \epsilon_{GaAs}$ :

$$\varphi_k = 5,32 - 4,24 = 1,08 \text{ эВ};$$

$$W_{Ge} = \sqrt{\frac{2 \epsilon_{Ge} \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{GaAs} \cdot \varphi_k \cdot N_A}{q \cdot N_D \cdot (\epsilon_{Ge} N_D + \epsilon_{GaAs} N_A)}} = \frac{2 \cdot 16 \cdot 10,9 \cdot 8,88 \cdot 10^{-14} \cdot 1,08 \cdot 10^{16}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{16} \cdot 10^{16} (16 + 10,9)} = 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ см} = 0,28 \text{ мкм}$$

$$W_{GaAs} = \sqrt{\frac{2 \epsilon_{Ge} \cdot \epsilon_{GaAs} \cdot \epsilon_0 \cdot \varphi_k \cdot N_D}{q \cdot N_A \cdot (\epsilon_{Ge} N_D + \epsilon_{GaAs} N_A)}} = 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ см} = 0,28 \text{ мкм}$$

Найдем, какое падение напряжения в ОПЗ гетероперехода в Ge и GaAs:

$$\varphi_{Ge} = \frac{q \cdot N_D \cdot W_n^2}{2 \epsilon_{Ge} \cdot \epsilon_0} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{16} (2,8 \cdot 10^{-5})^2}{2 \cdot 16 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}} = 0,45 \text{ эВ}$$

$$\varphi_{GaAs} = \frac{q \cdot N_A \cdot W_p^2}{2 \epsilon_{GaAs} \cdot \epsilon_0} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{16} (2,8 \cdot 10^{-5})^2}{2 \cdot 10,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}} = 0,65 \text{ эВ}$$

Величина разрыва  $\Delta E_c$  равна

$$\Delta E_c = \chi_{GaAs} - \chi_{Ge} = 4,07 - 4,0 = 0,07 \text{ эВ}$$

Величина "пичка"  $\Delta E_v$  равна

$$\Delta E_v = \chi_{GaAs} + E_{gGaAs} - (\chi_{Ge} + E_{gGe}) = 4,07 + 1,53 - (4,0 + 0,8) = 0,8 \text{ эВ}$$

3. Характеристики области пространственного заряда на поверхности полупроводника (решения)

3.1. Условие задачи

$$n_{Si}, n_{Ge}$$

$$\rho_n = 15 \text{ Ом} \cdot \text{см}$$

$$L_D = ?$$

Дополнительные табличные данные

$$\epsilon_{Ge} = 16$$

$$\epsilon_{Si} = 11,8$$

$$\mu_{nSi} = 1500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$$

$$\mu_{nGe} = 3900 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$$

$$n_{iSi} = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$$

$$n_{iGe} = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$$

Дебаевская длина экранирования

$L_D$  равна

$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_s \cdot \epsilon_0 \cdot kT}{q \cdot N_D \cdot q}}$$

Рассчитаем необходимые параметры

$$N_{DSi} = \frac{1}{q \cdot \mu_n \cdot \rho_n} = \frac{1}{1} = 1$$

$$1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1500 \cdot 15$$

$$= 2,8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$$

$$N_{DGe} = \frac{1}{q \cdot \mu_n \cdot \rho_n} = \frac{1}{1} = 1$$

$$1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3900 \cdot 15$$

$$= 1,1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$$

$$L_{D..} = \sqrt{\frac{11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,0259}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2,8 \cdot 10^{14}}} = 2,5 \cdot 10^{-5} = 0,25 \text{ мкм.}$$

$$L_{DGe} = \sqrt{\frac{16 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,0259}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,1 \cdot 10^{14}}} = 4,6 \cdot 10^{-5} \text{ см} = 0,46 \text{ мкм.}$$

Дебаевская длина характеризует глубину проникновения электрического поля в полупроводник при малых возмущениях потенциала порядка  $\frac{kT}{q}$ . При больших величинах обедняющих напряжений  $\psi_s$  глубина проникновения электрического поля  $W$  больше, чем дебаевская длина  $L_D$ . Поскольку

$$W = \sqrt{\frac{2 \epsilon_s \cdot \epsilon_0 \cdot \psi_s}{q \cdot N_D}}; \text{ то } \frac{W}{L_D} = \sqrt{\frac{2 \psi_s}{kT/q}} \gg 1.$$

3.2. Условие задачи

Ge, Si, GaAs, In Sb

$T = 300 \text{ К}$

$n = p = n_i$

$L_D = ?$

Для собственных полупроводников дебаевская длина  $L_D$  равна

$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_s \cdot \epsilon_0 \cdot kT}{q \cdot n_i \cdot q}}$$

Подставляя  $\epsilon_s$  и  $n_i$  из таблицы 4, получаем

$$L_{D GaAs} = \frac{10,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,0259}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,1 \cdot 10^7} = 1,2 \cdot 10^{-1} \text{ см} = 1200 \text{ мкм.}$$

$$L_{D Si} = \frac{11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,0259}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,6 \cdot 10^{10}} = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ см} = 33 \text{ мкм.}$$

$$L_{D Ge} = \frac{16 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,0259}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2,5 \cdot 10^{13}} = 9,6 \cdot 10^{-5} \text{ см} = 0,96 \text{ мкм.}$$

$$L_{D In Sb} = \frac{17 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,0259}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{16}} = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ см} = 0,035 \text{ мкм.}$$

Следовательно, дебаевская длина возрастает с ростом ширины запрещенной зоны полупроводника.

3.3. Условие задачи

$n_{Si};$
$\rho_n = 10 \text{ м} \cdot \text{см}$
$\psi_s^{(1)} = 0,3 \text{ В}$
$\psi_s^{(2)} = -0,2 \text{ В}$
$\psi_s^{(3)} = -0,5 \text{ В}$
$\psi_s^{(4)} = -0,9 \text{ В}$
$n_s, p_s = ?$

$n_i = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$   
 $\mu_n = 1500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$

Значения поверхностной концентрации  $n_s$  и  $p_s$  в классическом случае выражаются

$n_s = n_0 e^{\beta \psi_s},$

$p_s = n_0 e^{-\beta(\psi_s + 2\psi_0)}.$

Рассчитаем необходимые параметры

$$n_0 = \frac{1}{q \cdot \mu_n \cdot \rho_n} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1500 \cdot 1} = 4,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

$$p_0 = \frac{n_i^2}{n_0} = 6,1 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}.$$

$$2\psi_0 = 2 \frac{kT}{q} \ln \frac{n_0}{n_i} = 2 \cdot 0,0259 \cdot \ln \frac{4,2 \cdot 10^{15}}{1,6 \cdot 10^{10}} = 0,65 \text{ В.}$$

$$n_s^{(1)} = 4,2 \cdot 10^{15} \cdot e^{-38,6 \cdot 0,3} = 4,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3},$$

$$p_s^{(1)} = 4,2 \cdot 10^{15} \cdot e^{-38,6(0,3 + 0,65)} = 5,0 \cdot 10^{-1} \text{ см}^{-3},$$

$$n_s^{(2)} = 4,2 \cdot 10^{15} \cdot e^{-38,6 \cdot 0,2} = 1,9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3},$$

$$p_s^{(2)} = 4,2 \cdot 10^{15} \cdot e^{-38,6(-0,2 + 0,65)} = 1,2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3},$$

$$n_s^{(3)} = 4,2 \cdot 10^{15} \cdot e^{-38,6 \cdot 0,5} = 1,7 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3},$$

$$p_s^{(3)} = 4,2 \cdot 10^{15} \cdot e^{-38,6(-0,5 + 0,65)} = 1,3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3},$$

$$n_s^{(4)} = 4,2 \cdot 10^{15} \cdot e^{-38,6 \cdot 0,9} = 3,4 \text{ см}^{-3},$$

$$p_s^{(4)} = 4,2 \cdot 10^{15} \cdot e^{-38,6(-0,9 + 0,65)} = 6,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}.$$

Сравнивая значения  $n_s$ ,  $p_s$  со значениями  $n_0$ ,  $p_0$ ,  $n_i$ , получаем, что состояние (1) - обогащение; (2) - обеднение, (3) - слабая инверсия, (4) - сильная инверсия.

3.4. Условие задачи

$KDB - 10$
$\psi_s^{(1)} = 0$
$\psi_s^{(2)} = \psi_0$
$\psi_s^{(3)} = 2\psi_0$
$Q_{sc}, C_{sc} = ?$
Дополнительные табличные данные
$\mu_n = 1500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$
$\epsilon_s = 11,8$
$n_i = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$

В состоянии (1) при  $\psi_s = 0$  заряд  $Q_{sc}$  в ОПЗ отсутствует, емкость  $C_{sc}$  равна емкости плоских зон  $C_{FB}$ .

$$Q_{sc} = 0;$$

$$C_{sc} = C_{FB} = \sqrt{\frac{\epsilon_s \cdot \epsilon_0 \cdot q \cdot N_D}{kT/q}}$$

Рассчитаем необходимые параметры:

$$N_D = \frac{1}{q \cdot \mu_n \cdot \rho} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 600 \cdot 10} = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$$

$$\psi_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_D}{n_i} = 0,0259 \cdot \ln \frac{1 \cdot 10^{15}}{1,6 \cdot 10^{10}} = 0,29 \text{ В.}$$

$$C_{FB} = \sqrt{\frac{11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{15}}{0,0259}} = 8 \cdot 10^{-8} \frac{\Phi}{\text{см}^2}$$

В состоянии (2) при  $\psi_s = \psi_0$  полупроводник на поверхности собственный, это граничное значение при переходе от обеднения к слабой инверсии

$$Q_{sc} = Q_b = \sqrt{2 \epsilon_s \cdot \epsilon_0 \cdot q \cdot N_D (\psi_0 - kT/q)} = \sqrt{2 \cdot 11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{15} \cdot 0,26} = 9,3 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Кл}}{\text{см}^2}$$

$$C_{sc} = C_b = \sqrt{\frac{\epsilon_s \cdot \epsilon_0 \cdot q \cdot N_D}{2(\psi_0 - kT/q)}} = \sqrt{\frac{11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{15}}{2(0,29 - 0,0259)}} = 5,7 \cdot 10^{-8} \frac{\Phi}{\text{см}^2}$$

Состояние (3) при  $\psi_s = 2\psi_0$  соответствует переходу от области слабой к области сильной инверсии.

$$Q_{sc} = 2 \epsilon_s \cdot \epsilon_0 \cdot q \cdot N_D \cdot 2\psi_0 =$$

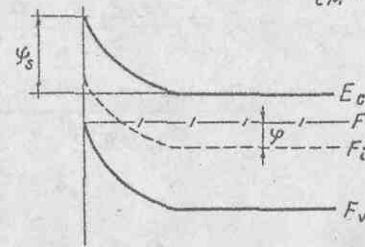
$$= \sqrt{2 \cdot 11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{15} \cdot 0,58} = 1,4 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Кл}}{\text{см}^2}$$

$$C_{sc} = \sqrt{\frac{\epsilon_s \cdot \epsilon_0 \cdot q \cdot N_D}{2\psi_0}} =$$

$$= \sqrt{\frac{11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{15}}{0,58}} = 1,7 \cdot 10^{-8} \frac{\Phi}{\text{см}^2}$$

3.5. Условие задачи

$n - Ge$
$\rho_n = 0,1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$
$\psi_s = -0,6 \text{ В}$
$Q_{sc}, E_s, \Gamma_p = ?$
Дополнительные табличные данные
$\mu_n = 3900 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$
$n_i = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$
$\epsilon_s = 16,0$



Для расчета параметров ОПЗ, таких как  $Q_{sc}$ ,  $E_s$  и  $\Gamma_p$ , необходимо первоначально определить состояние поверхности полупроводника. Для этого рассчитаем необходимые параметры.

$$N_D = \frac{1}{q \cdot \mu_n \cdot \rho_n} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3900 \cdot 0,1} = 1,6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$$

$$\psi_0 = kT \cdot \ln \frac{N_D}{n_i} = 0,0259 \cdot \ln \frac{1,6 \cdot 10^{16}}{2,5 \cdot 10^{13}} = 0,17 \text{ эВ.}$$

Величина  $2\psi_0 = 0,34 \text{ эВ}$ . Поскольку  $\psi_s < 0$  и величина  $|\psi_s| < 2\psi_0$ , то состояние поверхности - сильная инверсия.

$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_s \cdot \epsilon_0 \cdot kT}{q \cdot N_D}} = \sqrt{\frac{16 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,0259}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,6 \cdot 10^{16}}} = 3,7 \cdot 10^{-6} \text{ см} = 0,037 \text{ мкм}.$$

Для области сильной инверсии заряд  $Q_{sc}$  в ОПЗ обусловлен в основном зарядом свободных дырок.

$$Q_{sc} \approx q \cdot \Gamma_p = \frac{\sqrt{2} \cdot \epsilon_s \cdot \epsilon_0 \cdot kT}{q \cdot L_D} \cdot e^{-\frac{\beta(\psi_s - 2\psi_0)}{2}} = \frac{1,4 \cdot 16 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,0259}{3,7 \cdot 10^{-6}} e^{-\frac{38,6(-0,6 + 0,34)}{2}} = 1,4 \cdot 10^{-8} \cdot e^5 = 2,1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Кл}}{\text{см}^2}.$$

$$\Gamma_p = Q_{sc}/q = \frac{2,1 \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}.$$

Поскольку  $Q_{sc} = \epsilon_s \cdot \epsilon_0 \cdot E_s$ , то получаем

$$E_s = \frac{Q_{sc}}{\epsilon_s \cdot \epsilon_0} = \frac{2,1 \cdot 10^{-6}}{16 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ В/см}.$$

### 3.6. Условие задачи

$\rho_{Si}$
$\psi_s = \frac{3}{2} \psi_0 = 0,1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$
$T_1 = 300 \text{ К}$
$T_2 = 77 \text{ К}$
$\lambda_c^{(1)}, \lambda_c^{(2)} = ?$
Дополнительные табличные данные
$\mu_p = 600 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
$n_i = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$
$\epsilon_s = 11,8$

Поскольку поверхностный потенциал положителен ( $\psi > 0$ ) и лежит в диапазоне  $\psi_0 < \psi_s < 2\psi_0$ , то на поверхности реализовано условие слабой инверсии, что соответствует треугольной потенциальной яме. При этом

$$\lambda_c = \frac{\epsilon_s \cdot \epsilon_0 \cdot kT}{q \cdot Q_s}.$$

Рассчитаем необходимые параметры

$$N_A = \frac{1}{q \cdot \mu_p \rho} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 600 \cdot 0,1} = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}.$$

$$\psi_0 = kT \ln \frac{N_A}{n_i} = 0,0259 \ln \frac{1 \cdot 10^{17}}{1,6 \cdot 10^{10}} = 0,41 \text{ эВ}.$$

$$Q_s = \sqrt{2q \cdot \epsilon_s \cdot \epsilon_0 \cdot N_A \psi_s} = \sqrt{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1 \cdot 10^{17} \cdot 0,62} = 1,4 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Кл}}{\text{см}^2}.$$

$$\lambda_c^{(1)} = \frac{11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,0259}{1,4 \cdot 10^{-7}} = 1,9 \cdot 10^{-7} \text{ см} = 19 \text{ \AA}.$$

$$\lambda_c^{(2)} = \frac{11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,0066}{1,4 \cdot 10^{-7}} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ см} = 5 \text{ \AA}.$$

### 3.7. Условие задачи

$GaAs$
$N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3}$
$\psi_s^{(1)} = +\frac{1}{2} \psi_0$
$\psi_s^{(2)} = 0$
$\psi_s^{(3)} = -\frac{1}{2} \psi_0$
$\psi_s^{(4)} = -\psi_0$
$\psi_s^{(5)} = -\frac{3}{2} \psi_0$
$\psi_s^{(6)} = -2 \psi_0$
$\psi_s^{(7)} = -\frac{5}{2} \psi_0$

$$Q_{sc}, C_{sc} = ?$$

Дополнительные табличные данные

$$n_i = 1,1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$$

$$\epsilon_s = 10,9$$

Рассчитаем необходимые параметры  $\psi_0$  и  $L_D$  для  $GaAs$

$$\psi_0 = kT \ln \frac{N_D}{n_i} = 0,0259 \ln \frac{10^{16}}{1,1 \cdot 10^{17}} = -0,54 \text{ эВ}.$$

$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_s \cdot \epsilon_0 \cdot kT}{q \cdot N_D}} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ см} = 0,04 \text{ мкм}.$$

Для расчета  $C_{sc}$  и  $Q_{sc}$  воспользуемся для каждой области  $\psi_s$  приближенными выражениями.

1. Состояние обогащения

$$Q_{sc} = Q_n = -\frac{\sqrt{2} \cdot \epsilon_s \cdot \epsilon_0 \cdot kT}{q \cdot L_D} \cdot e^{\frac{\beta \psi_s}{2}} = -\frac{1,4 \cdot 10^{-7} \cdot 9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,0259}{4 \cdot 10^{-6}} \times$$

$$\Gamma_n^{(1)} = 10^8 \text{ см}^{-2}$$

$$\Gamma_n^{(2)} = 10^{10} \text{ см}^{-2}$$

$$\lambda_{c1}, \lambda_{c2} = ?$$

Дополнительные табличные данные

$$\varepsilon_s = 16$$

$$n_i = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$$

слабой инверсии

$$\Gamma_n = \left[ \frac{2q \cdot \varepsilon_s \cdot \varepsilon_0 \cdot N_A}{\psi_s - \frac{\kappa T}{q}} \right]^{1/2} \frac{\kappa T}{q^2} e^{\beta(\psi_s - 2\varphi_0)}$$

Для оценки предэкспоненты считаем параметры в пункте а)

$$\varphi_0 = \kappa T \cdot \ln \frac{N_A}{n_i} = 0,21 \text{ эВ.}$$

$$\Gamma_{n0} = \left[ \frac{2q \cdot \varepsilon_s \cdot \varepsilon_0 \cdot N_A}{2\varphi_0 - \frac{\kappa T}{q}} \right]^{1/2} \cdot \frac{\kappa T}{q^2} =$$

$$= \left[ \frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 16 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 10^{17}}{0,40} \right]^{1/2} \frac{0,0259}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 5,4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$$

Следовательно,  $\Gamma_n^{(1)}, \Gamma_n^{(2)} < \Gamma_{n0}$ , а поэтому  $\psi_s < 2\varphi_0$ , исследуемая область  $\Gamma_n$  относится к области слабой инверсии. Величина  $\psi_s$ , соответствующая различным  $\Gamma_n$ , будет

$$\psi_s = 2\varphi_0 - \frac{\kappa T}{q} \cdot \ln \frac{\Gamma_{n0}}{\Gamma_n}$$

$$\psi_s^{(1)} = 0,42 - 0,0259 \cdot \ln \frac{5,4 \cdot 10^{10}}{10^8} = 0,26 \text{ В.}$$

$$\psi_s^{(2)} = 0,42 - 0,0259 \cdot \ln \frac{5,4 \cdot 10^{10}}{10^{10}} = 0,38 \text{ В.}$$

Значение заряда  $Q_B$  в ОПЗ при этом

$$Q_B^{(1)} = [2 \cdot 16 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{17} \cdot 0,26]^{1/2} = 1,1 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Кл}}{\text{см}^2}$$

$$Q_B^{(2)} = [2 \cdot 10 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{17} \cdot 0,38]^{1/2} = 1,3 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Кл}}{\text{см}^2}$$

Величина центра для области слабой инверсии будет  $\lambda_c = \frac{\varepsilon_s \cdot \varepsilon_0 \cdot \kappa T}{q Q_B}$ .

нения уровней, куда входит расстояние между  $F_s$  и  $E_i$ , они должны суммироваться. Число электронов  $N_i$

$$N_i = \frac{\kappa T}{\pi \hbar^2} m^* \ln [1 + \exp(-\frac{F_s + E_i}{\kappa T})] \approx \frac{\kappa T}{\pi \hbar^2} m^* \exp(-\frac{F_s + E_i}{\kappa T})$$

$$\frac{\kappa T m^*}{\pi \hbar^2} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 77 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 0,5}{3,14 \cdot (1,05 \cdot 10^{-34})^2} = 1,4 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-2}$$

$$= 1,4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$$

$$N_0 = 1,4 \cdot 10^{12} \cdot \frac{0,13 + 0,10}{0,0066} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-2}$$

$$N_1 = 1,4 \cdot 10^{12} \cdot \frac{0,13 + 0,18}{0,0068} = 5,6 \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-2}$$

$$N_2 = 1,4 \cdot 10^{12} \cdot \frac{0,13 + 0,24}{0,0068} = 6,3 \cdot 10^{-13} \text{ см}^{-2}$$

Область локализации  $\lambda_{ci}$  будет

$$\lambda_{ci} = \frac{2E_i}{3q\varepsilon_s};$$

$$\lambda_{c0} = \frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-20}}{3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5,3 \cdot 10^6} = 1,3 \cdot 10^{-8} \text{ м} = 130 \text{ \AA.}$$

$$\lambda_{c1} = \frac{2 \cdot 2,9 \cdot 10^{-20}}{3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5,3 \cdot 10^6} = 2,3 \cdot 10^{-8} \text{ м} = 230 \text{ \AA.}$$

$$\lambda_{c2} = \frac{2 \cdot 3,9 \cdot 10^{-20}}{3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5,3 \cdot 10^6} = 3,1 \cdot 10^{-8} \text{ м} = 310 \text{ \AA.}$$

Проверим размерность  $E_i, N_i, \lambda_{ci}$ .

$$[E_i] = \left\{ \frac{[q] \cdot [h] \cdot [\varepsilon_s]}{[m]^{1/2}} \right\} = \left[ \frac{\text{Кл} \cdot \text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{В}}{\text{кг}^{1/2} \cdot \text{м}} \right]^{2/3} =$$

$$= \left[ \frac{\text{Дж} \cdot \text{Дж} \cdot \text{с}}{\text{кг}^{1/2} \cdot \text{м}} \right]^{2/3} = \left[ \frac{\text{Н}^2 \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}}{\text{кг}^{1/2} \cdot \text{м}} \right]^{2/3} = \left[ \frac{\text{кг}^2 \cdot \text{м}^4 \cdot \text{с}}{\text{кг}^{1/2} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^4} \right]^{2/3} =$$

$$= \left( \frac{\text{кг}^{3/2} \cdot \text{м}^3}{\text{с}^3} \right)^{2/3} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2} = \text{Дж};$$

$$[N_i] = \frac{[кг][м]}{[ħ]^2} = \frac{Дж \cdot кг}{Дж \cdot Дж \cdot с^2} = \frac{кг \cdot с^2}{кг \cdot м^2 \cdot с^2} = м^{-2};$$

$$[\lambda_{cl}] = \frac{[E_i]}{[g][\epsilon_s]} = \frac{Дж \cdot м}{кЛ \cdot В} = м.$$

3.12. Условие задачи

$\rho Si$   
 $N_A = 10^{15} \text{ см}^{-3}$   
 $T = 77 \text{ К}$   
 $\Gamma_{n1} = 10^{10} \text{ см}^{-2}$   
 $\Gamma_{n2} = 10^{11} \text{ см}^{-2}$   
 $\Gamma_{n3} = 10^{12} \text{ см}^{-2}$   
 $\Gamma_{n4} = 10^{13} \text{ см}^{-2}$

---

$\lambda_c, E_0 = ?$

Дополнительные табличные данные:

$\epsilon_s = 11,8$   
 $m^* = 0,5 m_0$

Для квантового предела значения энергии  $E_0$  и центроида  $\lambda_c$  будет

$$E_0 = \left(\frac{3}{2}\right)^{5/3} \left(\frac{g \cdot \hbar}{\epsilon_s \epsilon_0}\right)^{2/3} \frac{N_B + \frac{55}{96} \Gamma_n}{[m^* (N_B + \frac{11}{32} \Gamma_n)]^{1/3}};$$

$$\lambda_c = 3 \left[ \frac{\epsilon_s \epsilon_0}{12 m^* g^2 (N_B + \frac{11}{32} \Gamma_n)} \right]^{1/3}.$$

Рассчитаем необходимые параметры. При всех  $\Gamma_n$  величина  $\psi_s > 2 \varphi_0$ , следовательно, ОПЗ находится в сильной инверсии.

$$\varphi_0 = \frac{kT}{g} \ln \frac{N_A}{n_i} = 0,42 \text{ эВ};$$

$$N_B = \frac{Q_B}{g} = \frac{\sqrt{2g \cdot \epsilon_s \epsilon_0 \cdot N_A \cdot 2\varphi_0}}{g} = \sqrt{\frac{4 \epsilon_s \epsilon_0 \cdot N_A \cdot \varphi_0}{g}}$$

$$= \sqrt{\frac{4 \cdot 11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 10^{15} \cdot 0,42}{1,6 \cdot 10^{-19}}} = 3,3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} = 3,3 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}.$$

$$A = \left(\frac{3}{2}\right)^{5/3} \left(\frac{g^2 \cdot \hbar}{\epsilon_s \cdot \epsilon_0}\right)^{2/3} \left(\frac{1}{m}\right)^{1/3} = \left(\frac{3}{2}\right)^{5/3} \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 1,02 \cdot 10^{-34} \cdot 2^{2/3}}{11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \times$$

$$\times \frac{1}{0,5 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}^{1/3} = 2,2 \cdot 10^{-31} \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-4/3},$$

$$b = 3 \cdot \left[ \frac{\epsilon_s \epsilon_0 \hbar^2}{12 m^* g^2} \right]^{1/3} = 3 \cdot \frac{11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} (1,02 \cdot 10^{-34})^2 \cdot 1^{1/3}}{12 \cdot 0,5 \cdot 9,1 \cdot 10^{-32} (1,6 \cdot 10^{-19})^2} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{5/3}.$$

Найдем величины энергии

$$E_0^{(1)} = A \frac{N_B + \frac{55}{96} \Gamma_n}{(N_B + \frac{11}{32} \Gamma_n)^{1/3}} = 2,2 \cdot 10^{-31} \frac{3,3 \cdot 10^{15} + 0,57 \cdot 10^{14}}{(3,3 \cdot 10^{15} + 0,34 \cdot 10^{14})^{1/3}}$$

$$= 4,9 \cdot 10^{-21} \text{ Дж} = 0,031 \text{ эВ}.$$

$$E_0^{(2)} = 2,2 \cdot 10^{-31} \frac{3,3 \cdot 10^{15} + 0,57 \cdot 10^{15}}{(3,3 \cdot 10^{15} + 0,34 \cdot 10^{15})^{1/3}} = 5,7 \cdot 10^{-21} \text{ Дж} =$$

$$= 0,035 \text{ эВ}.$$

$$E_0^{(3)} = 2,2 \cdot 10^{-31} \frac{3,3 \cdot 10^{15} + 0,57 \cdot 10^{16}}{(3,3 \cdot 10^{15} + 0,34 \cdot 10^{16})^{1/3}} = 1,1 \cdot 10^{-20} \text{ Дж} =$$

$$= 0,066 \text{ эВ}.$$

$$E_0^{(4)} = 2,2 \cdot 10^{-31} \frac{3,3 \cdot 10^{15} + 0,57 \cdot 10^{17}}{(3,3 \cdot 10^{15} + 0,34 \cdot 10^{17})^{1/3}} = 4,0 \cdot 10^{-20} \text{ Дж} =$$

$$= 0,25 \text{ эВ}.$$

Найдем величины центроида

$$\lambda_c^{(1)} = \frac{b}{(N_B + \frac{11}{32} \Gamma_n)^{1/3}} = \frac{6 \cdot 10^{-4}}{(2,3 \cdot 10^{15} + 0,34 \cdot 10^{14})^{1/3}} =$$

$$= 4,1 \cdot 10^{-9} \text{ м} = 41 \text{ Å}.$$

$$\lambda_c^{(2)} = \frac{6 \cdot 10^{-4}}{(3,3 \cdot 10^{15} + 0,34 \cdot 10^{15})^{1/3}} = 3,9 \cdot 10^{-9} \text{ м} = 39 \text{ Å}.$$



$$\lambda_c^{(3)} = \frac{6 \cdot 10^{-4}}{(3,3 \cdot 10^{15} + 0,34 \cdot 10^{16})^{1/3}} = 3,2 \cdot 10^{-9} \text{ м} = 32 \text{ \AA}.$$

$$\lambda_c^{(4)} = \frac{6 \cdot 10^{-4}}{(3,3 \cdot 10^{15} + 0,34 \cdot 10^{17})^{1/3}} = 1,8 \cdot 10^{-9} \text{ м} = 18 \text{ \AA}.$$

Сравним квантовомеханическое значение  $\lambda_c$  с величиной  $\lambda_c$ , рассчитанной для треугольной ямы в классическом случае

$$\lambda_c = \frac{1}{\beta \cdot \epsilon_s} \approx \frac{\epsilon_s \cdot \epsilon_0 \cdot kT}{Q_{sc} \cdot q} = \frac{\epsilon_s \cdot \epsilon_0 \cdot kT}{q(\Gamma_p + N_a)q};$$

$$\lambda_c^{(1)} = \frac{11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,0066}{1,6 \cdot 10^{-19} (3,3 \cdot 10^{15} + 10^{14})} = 1,3 \cdot 10^{-9} \text{ м} = 13 \text{ \AA}.$$

$$\lambda_c^{(2)} = \frac{11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,0066}{1,6 \cdot 10^{-19} (3,3 \cdot 10^{15} + 10^{15})} = 1,2 \cdot 10^{-9} \text{ м} = 12 \text{ \AA}.$$

$$\lambda_c^{(3)} = \frac{11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,0066}{1,6 \cdot 10^{-19} (3,3 \cdot 10^{15} + 10^{16})} = 3,2 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 3,2 \text{ \AA}.$$

$$\lambda_c^{(4)} = \frac{11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,0066}{1,6 \cdot 10^{-19} (3,3 \cdot 10^{15} + 10^{17})} = 0,4 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 0,4 \text{ \AA}.$$

4. Поверхностные состояния (решения)

4.1. Условие задачи

$$\begin{aligned} pSi \\ N_A = 10^{18} \text{ см}^{-3} \\ T = 300 \text{ К} \\ N_{SS} = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1} \\ \psi_s^{(1)} = 0 \\ \psi_s^{(2)} = \psi_0 \\ \psi_s^{(3)} = 2 \psi_0 \end{aligned}$$

$$Q_{SS} = ? \quad Q_{sc} = ?$$

Дополнительные табличные данные

$$\begin{aligned} \epsilon_s = 11,8 \\ n_i = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3} \end{aligned}$$

Величина заряда в ПС  $Q_{SS}$

$$Q_{SS} = -q N_{SS} (\psi_s - \psi_0).$$

Заряд  $Q_{sc}$  в ОПЗ при условиях задачи обусловлен ионизованными акцепторами и равен

$$Q_{sc} = -\sqrt{2q \epsilon_s \epsilon_0 N_A \psi_s}.$$

Рассчитаем необходимые параметры

$$\psi_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} =$$

$$= 0,0259 \cdot \ln \frac{10^{18}}{1,6 \cdot 10^{10}} = 0,46 \text{ В}.$$

$$\begin{aligned} Q_{SS}^{(1)} = +q N_{SS} \psi_0 = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{12} \cdot 0,46 = 1,5 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Кл}}{\text{см}^2}. \\ Q_{SS}^{(2)} = 0. \end{aligned}$$

$$Q_{SS}^{(3)} = 0.$$

$$Q_{SS}^{(4)} = -q N_{SS} \psi_0 = -1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{12} \cdot 0,46 = -1,5 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Кл}}{\text{см}^2}.$$

$$Q_{sc}^{(1)} = 0.$$

$$\begin{aligned} Q_{sc}^{(2)} = -\sqrt{2q N_A \epsilon_s \epsilon_0 \psi_0} = -2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 11,8 \cdot 10^{18} \times \\ \times 0,46 = -3,9 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Кл}}{\text{см}^2}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{sc}^{(3)} = -\sqrt{2q \epsilon_s \epsilon_0 2\psi_0 N_A} = \sqrt{-2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 11,8 \cdot 10^{18} \times \\ \times \sqrt{0,92}} = -5,5 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Кл}}{\text{см}^2}. \end{aligned}$$

4.2. Условие задачи

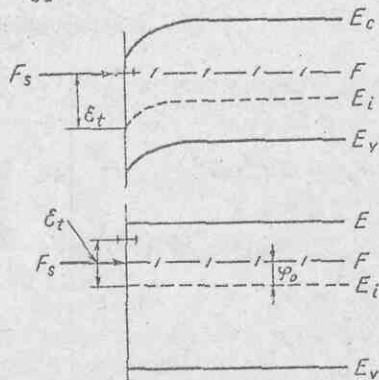
$$\begin{aligned} nSi \\ S_F = 10^{-16} \text{ см}^{-2} \end{aligned}$$

Для пояснения задачи построим зонную диаграмму

$\rho = 7,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$   
 $\mathcal{E}_t = 0,45 \text{ эВ}$   
 $N_t = 8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$   
 $T = 300 \text{ К}$

$C_s, \rho_s, \tau = ?$   
 Дополнительные табличные данные

$n_i = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$   
 $\mu_n = 1500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$   
 $m^* = 0,97 m_0$



Для моноэнергетических ПС  
 $C_s = \frac{q^2}{kT} \cdot N_s \cdot f_0 \cdot (1 - f_0);$

$R_s = \frac{kT}{q^2} \frac{1}{N_s(1-f_0)\alpha_n n_{so}}; \quad \tau = R_s \cdot C_s = \frac{f_0}{\alpha_n n_{so}}$

Рассчитаем необходимые параметры:

$f_0 = \frac{1}{1 + e^{\frac{\mathcal{E}_t - F_s}{kT}}} = \frac{1}{2}; \quad n_{so} = n_0 e^{\beta \psi_s}; \quad \psi_s = \frac{\mathcal{E}_t}{q} - \varphi_0;$

$\varphi_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_D}{n_i}; \quad N_D = \frac{1}{q \mu_n \rho_n}; \quad \alpha_n = S_t \cdot v_T; \quad v_T = \sqrt{\frac{2kT}{m^*}}$

$N_D = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1500 \cdot 7,5} = 5,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$

$\varphi_0 = 0,0259 \cdot \ln \frac{5,5 \cdot 10^{14}}{1,6 \cdot 10^{10}} = 0,27 \text{ В.}$

$\psi_s = 0,45 - 0,27 = 0,18 \text{ В.}$

$n_{so} = 5,5 \cdot 10^{14} e^{\frac{0,18}{0,0259}} = 5,7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$

$v_T = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{0,97 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}} = 1 \cdot 10^5 \text{ м/с} = 1 \cdot 10^7 \text{ см/с.}$

$\alpha_n = 1 \cdot 10^7 \cdot 10^{-16} = 1 \cdot 10^{-9} \frac{\text{см}^3}{\text{с}}$

Подставляем полученные значения в выражения для  $C_s, R_s, \tau$ . Получаем:

$C_s = \frac{1,6 \cdot 10^{-9} \cdot 8 \cdot 10^{11} \cdot 0,5 \cdot 0,5}{0,0259} = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф/см}^2$

$R_s = \frac{0,0259}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8 \cdot 10^{11} \cdot 0,5 \cdot 10^{-9} \cdot 5,7 \cdot 10^{17}} = 7,1 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$

$\tau = \frac{0,5}{10^{-9} \cdot 5,7 \cdot 10^{17}} = 8,8 \cdot 10^{-10} \text{ с.}$

4.3. Условие задачи

$\rho \text{ Si}$   
 $\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$   
 $\psi_s = 0,2 \text{ В}$   
 $N_{ss} = 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$   
 $f_1 = 10^2 \text{ Гц}$   
 $f_2 = 10^4 \text{ Гц}$   
 $f_3 = 10^6 \text{ Гц}$   
 $S_t = 10^{-15} \text{ см}^2$

Дополнительные табличные данные

$\mu_p = 600 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$   
 $n_i = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$

Для континуума ПС

$C_p = \frac{q N_{ss}}{w \tau_m} \arctg w \tau_m$

$G_p = \frac{q N_{ss}}{2 \tau_m} \ln(1 + w^2 \tau_m^2)$

Определим состояние ОПЗ при

$\psi_s = -0,2 \text{ В};$

$\varphi_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i};$

$N_A = \frac{1}{q \mu_p \rho_p};$

$N_A = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 600 \cdot 10} = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$

$\varphi_0 = 0,0259 \cdot \ln \frac{1 \cdot 10^{15}}{1,6 \cdot 10^{10}} = 0,29 \text{ В.}$

Изгиб зон обедняющий  $\psi_s < 0$ , но величина  $|\psi_s| < \varphi_0$ , следовательно, ОПЗ находится в обеднении. Основными носителями, участвующими в перезарядке ПС, остаются дырки.

Рассчитаем необходимые параметры

$$\tau_m = \frac{1}{\alpha_n n_{so}}; \quad \alpha_n = v_T \cdot S_t; \quad P_{so} = p_o e^{q\psi_s};$$

$$p_{so} = 1 \cdot 10^{15} \exp \frac{0,2}{0,0259} = 4,4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$$

$$v_T = 10^7 \text{ см/с}. \quad \alpha_n = 10^7 \cdot 10^{-15} = 10^{-8} \text{ см}^3/\text{с}.$$

$$\tau_m = \frac{1}{10^{-8} \cdot 4,4 \cdot 10^{11}} = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ с}.$$

Подставляем полученные значения в  $C_p, G_p$ .

$$C_p^{(1)} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{11}}{6,28 \cdot 10^2 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4}} \cdot \arctg 6,28 \cdot 10^2 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4} = \Phi \cdot \text{см}^{-2}$$

$$G_p^{(1)} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{11}}{2 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4}} \cdot \ln (1 + 6,28 \cdot 10^2 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4}) = 5,3 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-2}$$

$$C_p^{(2)} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{11}}{6,28 \cdot 10^4 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4}} \cdot \arctg 6,28 \cdot 10^4 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4} = \Phi \cdot \text{см}^{-2}$$

$$G_p^{(2)} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{11}}{2 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4}} \cdot \ln (1 + 6,28 \cdot 10^4 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4}) = 4,8 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-2}$$

$$C_p^{(3)} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{11}}{6,28 \cdot 10^6 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4}} \cdot \arctg 6,28 \cdot 10^6 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4} = \Phi \cdot \text{см}^{-2}$$

$$G_p^{(3)} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{11}}{2 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4}} \cdot \ln (1 + 6,28 \cdot 10^6 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4}) = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-2}$$

Проверим размерность  $C_p$  и  $G_p$

$$[C_p] = \frac{\text{Кл} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{В}^{-1}}{\text{с}^{-1} \cdot \text{с}} = \frac{\text{Кл}}{\text{см}^2 \cdot \text{В}} = \frac{\Phi}{\text{см}^2}$$

$$[G_p] = \frac{\text{Кл} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{В}^{-1}}{\text{с}} = \frac{\text{Кл}}{\text{см}^2 \cdot \text{В} \cdot \text{с}} = \frac{\text{А}}{\text{см}^2 \cdot \text{В}} = \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{см}^2}$$

4.4. Условие задачи

$nGe$

$$\rho = 1,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$$

$$\psi_{s1} = +0,2 \text{ В}$$

$$\psi_{s2} = 0$$

$$\psi_{s3} = -\frac{3}{2} \psi_o$$

$$S_t = 10^{-16} \text{ см}^2$$

$$N_c = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$$

$$\mu_n = 3900 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$$

Величина постоянной времени

$\tau$  равна

$$\tau = \frac{1}{\alpha_n \cdot n_{so}}$$

Рассчитаем необходимые параметры

$$\psi_o = \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{N_D}{n_i};$$

$$N_D = \frac{1}{q \cdot \mu_n \cdot \rho_n};$$

$$N_D = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3900 \cdot 1,5} =$$

$$= 1,1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3};$$

$$\psi_o = 0,0259 \cdot \ln \frac{1,1 \cdot 10^{15}}{2,5 \cdot 10^{13}} = 0,1 \text{ В};$$

$$\alpha_n = S_t \cdot v_T = 10^{-16} \cdot 10^7 = 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}.$$

Определим состояние поверхности и тип носителей, которые будут участвовать в перезарядке ПС.

$\psi_{s1} = +0,2 \text{ В}$  для  $nGe$  это обогащение, в перезарядке ПС участвуют электроны.

$$n_{so}^{(1)} = n_o e^{q\psi_s} = 1,1 \cdot 10^{15} \exp \frac{0,2}{0,0259} = 2,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$$

$\psi_s = 0$ , состояние плоских зон. Для  $nGe$  в перезарядке ПС опять участвуют электроны с концентрацией  $n_{so}^{(2)} = n_o = 1,1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .  $\psi_{s3} = -\frac{3}{2} \psi_o$  для  $nGe$  это состояние слабой инверсии, в перезарядке ПС участвуют дырки с концентрацией

$$p_{so} = n_o e^{q(\psi_s - 2\psi_o)} = n_o e^{-\frac{3q\psi_o}{2}} =$$

$$= 1,1 \cdot 10^{15} \cdot \exp^{-\frac{0,10}{2 \cdot 0,0259}} = 1,6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}.$$

Подставляя значение  $\alpha_n$  и  $n_{s0}$ , получаем для  $\tau$  значения

$$\tau_1 = \frac{1}{10^{-9} \cdot 2,5 \cdot 10^{18}} = 4 \cdot 10^{-10} \text{ с},$$

$$\tau_2 = \frac{1}{10^{-9} \cdot 1,1 \cdot 10^{15}} = 0,9 \cdot 10^{-6} \text{ с},$$

$$\tau_3 = \frac{1}{10^{-9} \cdot 1,6 \cdot 10^{14}} = 6,3 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

4.5. Условие задачи

$$\frac{G_p}{\omega}/\max = 2 \cdot 10^{-9}$$

$$\omega_{\max} = 2 \cdot 10^5 \text{ Гц}$$

$$n_{s0} = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$$

$$N_{ss} = ? \quad \tau = ?$$

Для максимума кривой нормированной проводимости  $G_p/\omega = f(\omega)$  имеем

$$\frac{G_p}{\omega}/\max = 0,27;$$

$$\omega_{\max} \cdot \tau = 1,98.$$

Следовательно:

$$N_{ss} = \frac{G_p/\omega/\max}{0,27 q} = \frac{2 \cdot 10^{-9}}{0,27 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 4,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ В}^{-1}.$$

$$\tau = \frac{1,98}{\omega_{\max}} = \frac{1,98}{2 \cdot 10^5} = 10^{-5} \text{ с}.$$

Для оценки типа ПС рассчитаем сечение захвата ПС из величины  $\tau$

$$\tau = \frac{1}{\alpha_n n_{s0}} = \frac{1}{v_T \cdot S_t \cdot n_{s0}}; \quad S_t = \frac{1}{\tau \cdot v_T \cdot n_{s0}} =$$

$$= \frac{1}{10^{-5} \cdot 10^7 \cdot 10^{12}} = 10^{-14} \text{ см}^2 = 100 \text{ \AA}^2 = (10 \text{ \AA})^2.$$

Поскольку сечение захвата для электронов соответствует кулоновскому центру, то ПС являются состояниями донорного типа

5. МДП структуры (решения)

5.1. Условие задачи

$$n_{Ge} - SiO_2 - Al$$

$$r_{Ge} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$$

$$S = 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$$

$$d_{ox}^{(1)} = 1000 \text{ \AA}$$

$$\varphi_s = 0$$

$$d_{ox}^{(2)} = 1 \text{ мкм}$$

$$T = 300 \text{ К}$$

$$C_{FB} = ?$$

Емкость  $C$  МДП структуры равна

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{S \cdot C_{ox}} + \frac{1}{S \cdot C_{sc}}.$$

При этом величины  $C_{ox}$  и  $C_{sc}$  будут

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox} \epsilon_0}{d_{ox}}; \quad C_{sc} = \frac{\epsilon_{sc} \epsilon_0}{S L_D};$$

$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_s \epsilon_0 kT}{q N_D q}};$$

$$N_D = \frac{1}{q \mu_n \rho_n}.$$

Рассчитаем необходимые параметры:

$$N_D = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3900 \cdot 1} =$$

$$= 1,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

$$L_D = \sqrt{\frac{16 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,0259}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,6 \cdot 10^{15}}} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ см}.$$

$$C_{ox}^{(1)} = \frac{3,82 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{1 \cdot 10^{-5}} = 3,4 \cdot 10^{-8} \text{ ф/см}^2.$$

$$C_{sc}^{(FB)} = \frac{16 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{1,2 \cdot 10^{-5}} = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ ф/см}^2.$$

$$C_{FB}^{(1)} = \left( \frac{1}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 3,4 \cdot 10^{-8}} + \frac{1}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 10^{-7}} \right)^{-1} =$$

$$= 1,3 \cdot 10^{-10} \text{ ф} = 130 \text{ пф}.$$

$$C_{ox}^{(2)} = \frac{3,82 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{10^{-4}} = 3,4 \cdot 10^{-9} \text{ ф/см}^2.$$

Дополнительные табличные данные

$$\mu_n = 3900 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$$

$$\epsilon_s = 16$$

$$C_{ox} = 3,82$$

$$= \left( \frac{I}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 3,4 \cdot 10^{-9}} + \frac{I}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 10^{-7}} \right) \cdot 10^{-1} = 1,65 \cdot 10^{-11} \Phi = 16,5 \text{ пФ};$$

$$\frac{C_{FB}^{(1)}}{S C_{ox}^{(1)}} = \frac{130 \cdot 10^{-12}}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 3,4 \cdot 10^{-8}} = 0,76;$$

$$\frac{C_{FB}^{(2)}}{S C_{ox}^{(2)}} = \frac{16,5 \cdot 10^{-12}}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 3,4 \cdot 10^{-9}} = 0,97.$$

### 5.2. Условие задачи

$$pSi - SiO_2 - Al$$

$$d_{ox} = 800 \text{ \AA}$$

$$N_{ox}^{(1)} = 0; N_{ss}^{(1)} = 0$$

$$N_{ox}^{(2)} = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}; N_{ss}^{(2)} = 0$$

$$N_{ox}^{(3)} = 0; N_{ss}^{(3)} = 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$$

$$\rho_{si} = 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$$

Дополнительные табличные данные

$$\chi_{si} = 4,05 \text{ эВ}$$

$$E_g = 1,12 \text{ эВ}$$

$$n_i = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$$

$$\mu_p = 600 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$$

$$\Phi_{Al} = 4,1 \text{ эВ}$$

$$\epsilon_{ox} = 3,82$$

$$V_{FB} = ? \quad \varphi_0 = 0,0259 \cdot \ln \frac{1 \cdot 10^{15}}{1,6 \cdot 10^{10}} = 0,29 \text{ В.}$$

$$\Phi_{si} = 4,05 + 0,56 + 0,29 = 4,9 \text{ эВ.}$$

$$\Delta \varphi_{ms} = \Phi_{Al} - \Phi_{si} = 4,1 - 4,9 = -0,8 \text{ В.}$$

Величина напряжения плоских зон  $V_{FB}$  равна

$$V_{FB} = \Delta \varphi_{ms} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} - q \frac{N_{ss}}{C_{ox}} \varphi_0.$$

Рассчитаем необходимые параметры

$$\Delta \varphi_{ms} = \Phi_{Al} - \Phi_{si};$$

$$\Phi_{si} = \chi_{si} + \frac{E_g}{2} + q \varphi_0;$$

$$\varphi_0 = \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{N_A}{n_i};$$

$$N_A = \frac{1}{q \cdot \mu_p \cdot \rho_p};$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox} \cdot \epsilon_0}{d_{ox}}.$$

$$N_A = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 600 \cdot 10} = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

-61-

$$C_{ox} = \frac{3,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{8 \cdot 10^{-6}} = 4,2 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2.$$

Подставляя значения  $Q_{ox}$  и  $Q_{ss}$ , получаем:

$$V_{FB}^{(1)} = -0,8 \text{ В.}$$

$$V_{FB}^{(2)} = -0,8 + \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{11}}{4,2 \cdot 10^{-8}} = -0,8 + 0,76 = -0,04 \text{ В.}$$

$$= -0,8 - \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cdot 10^{12} \cdot 0,29}{4,2 \cdot 10^{-8}} = -0,8 - 3,3 = -4,2 \text{ В.}$$

### 5.3. Условие задачи

$$nSi - Al_2O_3 - Al$$

$$T_1 = 300 \text{ К}$$

$$T_2 = 77 \text{ К}$$

$$\rho_{si} = 0,1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$$

$$d_{ox} = 2000 \text{ \AA}$$

$$N_{ss} = 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$$

$$N_{ox} = 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$$

$$\Delta V_{FB} = ?$$

Дополнительные табличные данные

$$\chi_{si} = 4,05 \text{ эВ}$$

$$E_g^{(1)} = 1,12 \text{ эВ}$$

$$E_g^{(2)} = 1,16 \text{ эВ}$$

$$n_i^{(1)} = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$$

$$n_i^{(2)} = 2,5 \cdot 10^{-20} \text{ см}^{-3}$$

$$\mu_n = 1500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$$

$$\Phi_{Al} = 4,1 \text{ эВ}$$

$$\epsilon_{ox} = 8,0$$

Величина напряжения плоских зон  $V_{FB}$  определяется выражением

$$V_{FB} = \Delta \varphi_{ms} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} + \frac{q N_{ss}}{C_{ox}} \varphi_0$$

В этом выражении от температуры будет зависеть  $\varphi_0$  и  $\Delta \varphi_{ms}$ . Рассчитаем необходимые параметры:

$$N_D = \frac{I}{q \mu_n \rho_n} = \frac{I}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1500 \cdot 0,1} = 4,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}.$$

$$\varphi_0^{(1)} = \frac{kT_1}{q} \ln \frac{N_D}{n_i^{(1)}} = 0,0259 \cdot \ln \frac{4,2 \cdot 10^{16}}{1,6 \cdot 10^{10}} = 0,38 \text{ В.}$$

$$\varphi_0^{(2)} = \frac{kT_2}{q} \ln \frac{N_D}{n_i^{(2)}} = 0,0066 \cdot \ln \frac{4,2 \cdot 10^{16}}{2,5 \cdot 10^{-20}} = 0,55 \text{ В.}$$

$$\Phi_{si}^{(1)} = \chi + \frac{E_g^{(1)}}{2} - q \varphi_0^{(1)} = 4,05 + \frac{1,12}{2} - 0,38 = 4,23 \text{ эВ.}$$

$$\Phi_{si}^{(2)} = \chi + \frac{E_g^{(2)}}{2} - q \varphi_0^{(2)} = 4,05 + \frac{1,16}{2} - 0,55 = 4,08 \text{ эВ.}$$

$$\Phi_{si}^{(2)} = \chi + \frac{E_g^{(2)}}{2} - q \varphi_0^{(2)} = 4,05 + \frac{1,16}{2} - 0,55 = 4,08 \text{ эВ.}$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox} \epsilon_0}{d_{ox}} = \frac{8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{2 \cdot 10^{-5}} = 3,5 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2.$$

Подставляя полученные значения в выражение для  $V_{FB}$ , имеем

$$V_{FB}^{(1)} = 4,1 - 4,23 - \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{11}}{3,5 \cdot 10^{-8}} + \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{12} \cdot 0,38}{3,5 \cdot 10^{-8}} =$$

$$= -0,13 - 2,29 + 1,74 = -0,68 \text{ В.}$$

$$V_{FB}^{(2)} = 4,1 - 4,09 - \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{11}}{3,5 \cdot 10^{-8}} + \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{12} \cdot 0,55}{3,5 \cdot 10^{-8}} =$$

$$= +0,02 - 2,29 + 2,51 = +0,24 \text{ эВ.}$$

$$\Delta V_{FB} = V_{FB}^{(1)} - V_{FB}^{(2)} = 0,24 + 0,68 = 0,92 \text{ В.}$$

#### 5.4. Условие задачи

$$nGaAs - Si_5N_4 - Al$$

$$d_N^{(1)} = 1800 \text{ \AA}$$

$$N_{ox} = 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$$

$$N_{SS} = 8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$$

$$N_D = 10^{17} \text{ см}^{-3}$$

$$d_N^{(2)} = 300 \text{ \AA}$$

$$d_{ox}^{(3)} = 1800 \text{ \AA}$$

$$\Delta V_{FB} = ?$$

Дополнительные табличные данные

$$\chi_{GaAs} = 4,07 \text{ эВ}$$

$$E_g = 1,43 \text{ эВ}$$

$$n_i = 1,1 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$$

$$E_N = 6,8$$

$$\epsilon = 27$$

$$\phi_{Au} = 5,0 \text{ эВ}$$

Величина напряжения плоских зон  $V_{FB}$  определяется выражением

$$V_{FB} = \Delta \varphi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} + \frac{q N_{SS}}{C_{ox}} \varphi_0.$$

Рассчитаем необходимые параметры

$$\varphi_0 = \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{N_D}{n_i} =$$

$$= 0,0259 \cdot \ln \frac{10^{17}}{1,1 \cdot 10^7} = 0,59 \text{ В.}$$

$$\phi_{nGaAs} = \chi + \frac{E_g}{2} - q \varphi_0 =$$

$$= 4,07 + \frac{1,43}{2} - 0,59 = 4,2 \text{ эВ.}$$

$$C_{ox}^{(1)} = \frac{\epsilon_N \epsilon_0}{d_N^{(1)}} =$$

$$= \frac{6,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{1,8 \cdot 10^{-5}} = 3,3 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2.$$

$$\Delta \varphi_{MS} = \phi_{Au} - \phi_{nGaAs} = 5,0 - 4,2 = 0,8 \text{ эВ.}$$

$$V_{FB}^{(1)} = 0,8 - \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4 \cdot 10^{12}}{3,3 \cdot 10^{-8}} + \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8 \cdot 10^{11} \cdot 0,59}{3,3 \cdot 10^{-8}} =$$

$$= 0,8 - 19,4 + 2,3 = -16,3 \text{ В.}$$

$$C_{ox}^{(2)} = \frac{\epsilon_N \epsilon_0}{d_N^{(2)}} = \frac{6,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{2 \cdot 10^{-6}} = 3 \cdot 10^{-7} \text{ Ф/см}^2.$$

$$V_{FB}^{(2)} = 0,8 - \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4 \cdot 10^{12}}{3 \cdot 10^{-7}} + \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8 \cdot 10^{11} \cdot 0,53}{3 \cdot 10^{-7}} =$$

$$= 0,8 - 2,13 + 0,25 = -1,1 \text{ В.}$$

$$C_{ox}^{(3)} = \frac{\epsilon_{ox} \epsilon_0}{d_{ox}^{(3)}} = \frac{27 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{1,8 \cdot 10^{-5}} = 1,3 \cdot 10^{-7} \text{ Ф/см}^2.$$

$$V_{FB}^{(3)} = 0,8 - \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4 \cdot 10^{12}}{1,3 \cdot 10^{-7}} + \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8 \cdot 10^{11} \cdot 0,59}{1,3 \cdot 10^{-7}} =$$

$$= 0,8 - 4,92 + 0,58 = -3,54 \text{ В.}$$

$$\phi_{pGaAs} = \chi + \frac{E_g}{2} + q \varphi_0 = 4,07 + \frac{1,43}{2} + 0,59 = 5,38 \text{ эВ.}$$

$$\Delta \varphi_{MS}^{(2)} = \phi_{Au} - \phi_{pGaAs} = 5,0 - 5,38 = -0,38 \text{ эВ.}$$

Следовательно, получаем для каждого случая

$$\text{а) } \Delta V_{FB} = V_{FB}^{(2)} - V_{FB}^{(1)} = -1,1 + 16,3 = 15,2 \text{ В.}$$

$$\text{б) } \Delta V_{FB} = V_{FB}^{(3)} - V_{FB}^{(1)} = -3,5 + 16,3 = 12,8 \text{ В.}$$

$$\text{в) } \Delta V_{FB} = \Delta \varphi_{MS}^{(2)} - \Delta \varphi_{MS}^{(1)} = -3,8 - 0,8 = -4,6 \text{ В.}$$

#### 5.5. Условие задачи

$$pSi - SiO_2 - Al$$

$$d_{ox} = 40 \text{ \AA}$$

$$N_A = 1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$$

$$T = 300 \text{ К}$$

$$C_{отн}(V_0) = ?$$

Дополнительные табличные данные

$$\chi_{Si} = 4,05 \text{ эВ}$$

$$E_g = 1,12 \text{ эВ}$$

$$\epsilon_s = 11,8$$

Порядок расчета идеальной ВХ следующий: задаются значения безразмерного поверхностного потенциала  $\beta \varphi_s$  от обогащения до сильной инверсии в диапазоне

$$2\beta \varphi_0 + 14 \geq \beta \varphi_s \geq -14.$$

Рассчитывается значение поверхностного потенциала  $\varphi_s$ .

$$N_A = \frac{2(2\varphi_0 - \frac{kT}{q})}{\epsilon_s \epsilon_0 q} \left( \frac{C_{ox}}{C_{min} - 1} \right)^2, \quad d_{ox} = \frac{\epsilon_{ox} \epsilon_0}{C_{ox}} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$$

Площадь  $S = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$

$$\epsilon_{ox} = 3,82$$

$$\epsilon_s = 11,8 \quad \epsilon_{ox} = 3,82$$

$$\varphi_0 = 0,3 \text{ В} \quad \Phi_{Al} = 4,1 \text{ эВ}$$

$\frac{kT}{q} = \frac{1}{40}$   $V_{ox}, C_{sc}, C, C_{отн}$   
Соотношения для расчета этих величин будут следующие

$$\beta = \frac{q}{kT} = 40$$

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox} \epsilon_0 S}{d_{ox}}, \quad L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_s \epsilon_0 kT}{q N_A}}, \quad \beta = \frac{q}{kT};$$

$$Q_{sc} = \frac{\sqrt{2} \cdot \epsilon_s \epsilon_0 kT \cdot F(\psi_s, \varphi_0)}{q \cdot L_D};$$

$$V_{ox} = \pm \frac{Q_{sc}}{C_{ox}}; \quad C_{sc} = \frac{\epsilon_s \epsilon_0 S}{\sqrt{2} L_D} \left[ 1 - e^{-\beta \psi_s} + e^{-\beta \varphi_0} (e^{\beta \psi_s} - 1) \right];$$

$$C = \frac{C_{ox} \cdot C_{sc}}{C_{ox} + C_{sc}}; \quad C_{отн} = \frac{C}{C_{ox}}; \quad V_G - \Delta \varphi_{ms} = V_{ox} + \psi_s.$$

(В последнем соотношении знак выбирается у  $V_{ox}$  одинаковым со знаком  $\psi_s$ ).

Рассчитаем необходимые параметры:

$$\varphi_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} = 0,0259 \cdot \ln \frac{1,5 \cdot 10^{15}}{1,6 \cdot 10^{10}} = 0,3 \text{ В.}$$

$$2\beta\varphi_0 = 2 \cdot 11,8 = 23. \quad \text{Диапазон изменения } \beta\psi_s \text{ будет } 37 \geq \beta\psi_s \geq -14.$$

$$C_{ox} = \frac{3,82 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{4 \cdot 10^{-7}} = 8,5 \cdot 10^{-7} \text{ Ф/см}^2.$$

$$L_D = \sqrt{\frac{11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,0259}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,5 \cdot 10^{15}}} = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ см.}$$

$$\beta = \frac{1}{0,0259} = 38,6 \text{ В}^{-1}.$$

$$\Phi_{psi} = \chi + \frac{E_g}{2} + q\varphi_0 = 4,05 + \frac{1,12}{2} - 0,3 = 4,91 \text{ эВ.}$$

$$\Delta \varphi_{ms} = \Phi_{Al} - \Phi_{psi} = 4,1 - 4,91 = -0,81 \text{ В.}$$

В таблице I приведены рассчитанные значения соответствующих параметров МДП структуры.

$$F(\psi_s, \varphi_0) = \left[ (e^{-\beta \psi_s} + e^{-\beta \varphi_0}) + e^{-\beta \psi_s} (e^{-\beta \varphi_0} - 1) \right]$$

Зная величину  $\psi_s$  и параметры МДП структуры, последовательно рассчитываются значения  $Q_{sc}$  и  $(V_G - \Delta \varphi_{ms})$ .

Таблица I

$N/n$	$\beta\psi_s$	$\psi_s, \text{ В}$	$Q_{sc}, \frac{\text{Кл}}{\text{см}^2}$	$V_{ox}, \text{ В}$	$C_{sc}, \frac{\text{Ф}}{\text{см}^2}$	$C, \frac{\text{Ф}}{\text{см}^2}$	$C_{отн}$	$V_G - \Delta \varphi_{ms}, \text{ В}$
0	I	0	0	0	0	0	0	0
I	-14	-0,36	$3,9 \cdot 10^{-6}$	-4,67	$7,6 \cdot 10^{-5}$	$8,4 \cdot 10^{-7}$	0,99	-5,04
2	-12	-0,31	$1,5 \cdot 10^{-6}$	-1,72	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$8,2 \cdot 10^{-7}$	0,97	-2,03
3	-10	-0,26	$5,3 \cdot 10^{-7}$	-0,63	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$7,8 \cdot 10^{-7}$	0,92	-0,89
4	-8	-0,21	$2,0 \cdot 10^{-7}$	-0,23	$3,8 \cdot 10^{-6}$	$6,9 \cdot 10^{-7}$	0,82	-0,44
5	-6	-0,16	$7,2 \cdot 10^{-8}$	-0,085	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$5,3 \cdot 10^{-7}$	0,62	-0,24
6	-4	-0,10	$2,5 \cdot 10^{-8}$	-0,030	$5,3 \cdot 10^{-7}$	$3,3 \cdot 10^{-7}$	0,38	-0,13
7	-2	-0,052	$7,5 \cdot 10^{-9}$	-0,009	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$	0,20	-0,061
8	-1	-0,026	$3,1 \cdot 10^{-9}$	-0,004	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	0,14	-0,029
9	0	0	0	0	$9,8 \cdot 10^{-8}$	$8,8 \cdot 10^{-8}$	0,10	0
10	+1	0,026	$-2,2 \cdot 10^{-9}$	0,003	$7,3 \cdot 10^{-8}$	$6,7 \cdot 10^{-8}$	0,079	0,028
11	+2	0,052	$-3,8 \cdot 10^{-9}$	0,004	$6,6 \cdot 10^{-8}$	$5,3 \cdot 10^{-8}$	0,062	0,056

Продолжение таблицы I

0	1	2	3	4	5	6	7	8
12	6	0,15	$-8,1 \cdot 10^{-9}$	0,010	$3,1 \cdot 10^{-8}$	$3,0 \cdot 10^{-8}$	0,035	0,16
13	10	0,26	$-1,1 \cdot 10^{-8}$	0,012	$2,3 \cdot 10^{-8}$	$2,2 \cdot 10^{-8}$	0,027	0,27
14	14	0,36	$-1,3 \cdot 10^{-8}$	0,015	$1,9 \cdot 10^{-8}$	$1,9 \cdot 10^{-8}$	0,022	0,38
15	18	0,47	$-1,5 \cdot 10^{-8}$	0,018	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	0,020	0,48
16	22	0,57	$-1,7 \cdot 10^{-8}$	0,019	$2,2 \cdot 10^{-8}$	$2,1 \cdot 10^{-8}$	0,025	0,59
17	23	0,50	$-1,7 \cdot 10^{-8}$	0,020	$3,3 \cdot 10^{-8}$	$3,2 \cdot 10^{-8}$	0,038	0,62
18	24	0,62	$-1,9 \cdot 10^{-8}$	0,022	$6,1 \cdot 10^{-8}$	$5,7 \cdot 10^{-8}$	0,067	0,64
19	25	0,65	$-2,1 \cdot 10^{-8}$	0,025	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	0,13	0,67
20	27	0,70	$-3,5 \cdot 10^{-8}$	0,041	$5,1 \cdot 10^{-7}$	$3,1 \cdot 10^{-7}$	0,38	0,74
21	29	0,75	$-8,5 \cdot 10^{-8}$	0,10	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$5,4 \cdot 10^{-7}$	0,65	0,85
22	31	0,80	$-2,2 \cdot 10^{-7}$	0,26	$4,3 \cdot 10^{-6}$	$7,1 \cdot 10^{-7}$	0,84	1,07
23	33	0,85	$-6,1 \cdot 10^{-7}$	0,72	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$7,9 \cdot 10^{-7}$	0,93	1,57
24	35	0,91	$-1,7 \cdot 10^{-6}$	1,95	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$8,2 \cdot 10^{-7}$	0,97	2,86
25	37	0,96	$-4,5 \cdot 10^{-6}$	5,34	$8,7 \cdot 10^{-5}$	$8,4 \cdot 10^{-7}$	0,99	6,3

5.6. Условие задачи

$\rho_{Si} - SiO_2 - Al$   
 $d_{ox} = 400 \text{ \AA}$   
 $N_A = 1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$   
 $T = 300 \text{ К}$   
 $N_{ox} = 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$   
 $N_{ss} = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$   
 $f = 10 \text{ кГц}$   
 $S_{n,p} = 10^{-16} \text{ см}^2$   
 $C_{отн} (V_G) = ?$

Порядок расчета останется аналогичным задаче 5.5., но несколько усложнится. Наличие ПС дает дополнительную емкость  $C_{ss}$  и заряд  $Q_{ss}$ , зависящие от  $\psi_s$ .

Соотношения для расчета этих величин будут следующие:

$\rho_{so} = \rho_o \cdot e^{-\beta \psi_s}$   
 $n_{so} = \rho_o \cdot e^{\beta(\psi_s - 2\psi_b)}$   
 $C_{ss} = \frac{q N_{ss}}{\omega \tau} \arctan \omega \tau m$   
 $Q_{ss} = -q N_{ss} (\psi_s - \psi_o)$

$\tau = \frac{1}{\alpha_n \rho_{so}}$  (обогащение и обеднение);

$\tau = \frac{1}{\alpha_n n_{so}}$  (слабая и сильная инверсия);

$C = \frac{C_{ox} (C_{ss} + C_{sc})}{C_{ox} + C_{ss} + C_{sc}}$ ;  $C_{отн} = \frac{C}{C_{ox}}$ ;

$C_{ox} = \frac{3,82 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{4 \cdot 10^{-6}} = 8,5 \cdot 10^{-8} \text{ ф/см}^2$ ;

$V_{ox} = \pm \frac{Q_{sc} - Q_{ss}}{C_{ox}}$ ;  $V_G - \Delta \psi_{ms} + \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} = V_G^* = \psi_s + V_{ox}$ ;

$\frac{Q_{ox}}{C_{ox}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{11}}{8,5 \cdot 10^{-8}} = 0,95 \text{ В}$ .

В таблице 2 приведены рассчитанные по этим соотношениям значения соответствующих параметров МШП структуры.



Таблица 2

$\beta \psi_s$	$R_{s0} \rho_{s0} \text{ CM}^{-3}$	$\tau, \text{ c}$	$C_{SS}, \frac{\phi}{\text{CM}^2}$	$C_{SS} + C_{SC}, \frac{\phi}{\text{CM}^2}$	$C, \frac{\phi}{\text{CM}^2}$	$C_{OTK}$	$Q_{SS}, \frac{K\lambda}{\text{CM}^2}$	$Q_{SS} + Q_{SC}, \frac{K\lambda}{\text{CM}^2}$	$V_{ox}, \text{ B}$	$V_g - \Delta \lambda_{st} + \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}, \text{ B}$
0	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-14	$1,8 \cdot 10^{21}$	$5,5 \cdot 10^{-6}$	$3,1 \cdot 10^{-7}$	$7,6 \cdot 10^{-5}$	$8,5 \cdot 10^{-8}$	1,00	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$4,1 \cdot 10^{-6}$	48,2	48,6
-12	$2,4 \cdot 10^{20}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$8,5 \cdot 10^{-8}$	1,00	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	-20,0	-20,3
-10	$3,3 \cdot 10^{19}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$8,4 \cdot 10^{-8}$	0,99	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$7,1 \cdot 10^{-7}$	-8,4	-8,7
-8	$4,5 \cdot 10^{18}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-9}$	$3,8 \cdot 10^{-6}$	$8,3 \cdot 10^{-8}$	0,98	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$	4,2	4,4
-6	$6,1 \cdot 10^{17}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-10}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$8,0 \cdot 10^{-8}$	0,94	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$	-2,6	-2,8
-4	$8,2 \cdot 10^{16}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$6,7 \cdot 10^{-11}$	$5,3 \cdot 10^{-7}$	$7,3 \cdot 10^{-8}$	0,86	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	-1,8	-1,9
-2	$1,1 \cdot 10^{16}$	0,9	$8,9 \cdot 10^{-12}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$6,1 \cdot 10^{-8}$	0,71	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	-1,41	-1,46
-1	$4,1 \cdot 10^{15}$	2,4	$3,3 \cdot 10^{-12}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$5,3 \cdot 10^{-8}$	0,62	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	-1,18	-1,2
0	$1,5 \cdot 10^{15}$	6,7	$1,2 \cdot 10^{-12}$	$9,8 \cdot 10^{-8}$	$4,6 \cdot 10^{-8}$	0,54	$9,5 \cdot 10^{-8}$	$9,5 \cdot 10^{-8}$	-1,12	-1,12
1	$5,5 \cdot 10^{14}$	18,2	$4,4 \cdot 10^{-13}$	$7,3 \cdot 10^{-8}$	$3,9 \cdot 10^{-8}$	0,46	$8,7 \cdot 10^{-8}$	$8,5 \cdot 10^{-8}$	-1,0	-0,97
2	$2,0 \cdot 10^{14}$	50	$1,6 \cdot 10^{-13}$	$5,6 \cdot 10^{-8}$	$3,4 \cdot 10^{-8}$	0,40	$7,9 \cdot 10^{-8}$	$7,5 \cdot 10^{-8}$	-0,88	-0,89

Продолжение таблицы 2

6	$3,7 \cdot 10^{12}$	$2,7 \cdot 10^3$	$3,0 \cdot 10^{-15}$	$3,1 \cdot 10^{-8}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$	0,27	$4,6 \cdot 10^{-1}$	$3,7 \cdot 10^{-8}$	-0,44	-0,29
10	$6,8 \cdot 10^{10}$	$1,5 \cdot 10^5$	$5,3 \cdot 10^{-18}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$	$1,8 \cdot 10^{-8}$	0,21	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$0,1 \cdot 10^{-8}$	0,00	0,26
14	$1,8 \cdot 10^{11}$	$5,6 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^{-16}$	$1,9 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$	0,18	$-2,1 \cdot 10^{-8}$	$-3,4 \cdot 10^{-8}$	0,40	0,76
18	$1,0 \cdot 10^{13}$	$1,0 \cdot 10^3$	$8,0 \cdot 10^{-15}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-8}$	0,17	$-5,3 \cdot 10^{-8}$	$-6,8 \cdot 10^{-8}$	0,80	1,27
22	$5,5 \cdot 10^{14}$	18,2	$4,4 \cdot 10^{-13}$	$2,2 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	0,21	$-8,7 \cdot 10^{-8}$	$-1,0 \cdot 10^{-7}$	1,18	1,75
23	$1,5 \cdot 10^{15}$	6,7	$1,2 \cdot 10^{-12}$	$3,3 \cdot 10^{-8}$	$2,4 \cdot 10^{-8}$	0,28	$-9,5 \cdot 10^{-8}$	$-1,1 \cdot 10^{-7}$	1,50	1,90
24	$4,1 \cdot 10^{15}$	2,4	$3,3 \cdot 10^{-12}$	$6,1 \cdot 10^{-8}$	$3,6 \cdot 10^{-8}$	0,42	$-1,0 \cdot 10^{-7}$	$-1,2 \cdot 10^{-7}$	1,41	2,03
25	$1,1 \cdot 10^{16}$	0,9	$8,9 \cdot 10^{-12}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$5,1 \cdot 10^{-8}$	0,60	$-1,1 \cdot 10^{-7}$	$-1,3 \cdot 10^{-7}$	1,53	2,18
27	$8,2 \cdot 10^{16}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$6,7 \cdot 10^{-11}$	$5,1 \cdot 10^{-7}$	$7,3 \cdot 10^{-8}$	0,86	$-1,3 \cdot 10^{-7}$	$-1,7 \cdot 10^{-7}$	2,0	2,70
29	$6,1 \cdot 10^{17}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-10}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$8,1 \cdot 10^{-8}$	0,95	$-1,5 \cdot 10^{-7}$	$-2,4 \cdot 10^{-7}$	2,83	3,58
31	$4,5 \cdot 10^{18}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-9}$	$4,3 \cdot 10^{-6}$	$8,3 \cdot 10^{-8}$	0,98	$-1,6 \cdot 10^{-7}$	$-4,8 \cdot 10^{-7}$	5,65	6,45
33	$3,3 \cdot 10^{19}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$8,4 \cdot 10^{-8}$	0,99	$-1,8 \cdot 10^{-7}$	$-7,9 \cdot 10^{-7}$	8,71	9,56
35	$2,4 \cdot 10^{20}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-8}$	1,00	$-1,9 \cdot 10^{-7}$	$-1,9 \cdot 10^{-6}$	22,4	23,3
37	$1,8 \cdot 10^{21}$	$5,5 \cdot 10^{-6}$	$3,1 \cdot 10^{-7}$	$8,7 \cdot 10^{-5}$	$8,5 \cdot 10^{-8}$	1,00	$-2,1 \cdot 10^{-7}$	$-4,7 \cdot 10^{-6}$	55,3	56,3

5.7. Условие задачи

$$\begin{aligned} pSi - SiO_2 - Al \\ d_{ox} = 1500 \text{ \AA} \\ N_A = 1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3} \\ T = 300 \text{ К} \\ N_{ox} = -4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \\ N_s = 6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \\ \alpha_n = 10^{-14} \text{ см}^2 \\ \epsilon_t = 0,1 \text{ эВ} \\ f = 10 \text{ кГц} \\ C_{отн} (V_0) = ? \end{aligned}$$

-70-

Порядок расчета ВЭХ при наличии моноэнергетических ПС аналогичен расчету ВЭХ в предыдущих задачах 5.5. и 5.6.

Отличаться будут лишь выражения для заряда  $Q_s$  и емкости  $C_s$  ПС.

Соотношения для расчета будут следующие:

$$Q_s = q \cdot N_s \cdot f,$$

$$C_s = \frac{q^2}{kT} N_s f (1-f) \cdot \frac{1}{1 + \omega^2 \tau^2};$$

$$\tau = \frac{f_n}{\alpha_n \cdot n_{s0}} \text{ (слабая и сильная инверсия),}$$

$$\tau = \frac{f_p}{\alpha_n \cdot p_{s0}} \text{ (обогащение и обеднение).}$$

$$f_0 = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\epsilon_t + q\psi_0 - q\psi_s}{kT}\right)},$$

$f_n, f_p$  - функция заполнения для электронов и дырок,

$$f_n = f_0; \quad f_p = 1 - f_0;$$

Величина емкости  $C_{отн}$  и напряжение на затворе  $V_0$  будут

$$C = \frac{C_{ox}(C_{ss} + C_{sc})}{C_{ox} + C_{ss} + C_{sc}}; \quad C_{отн} = \frac{C}{C_{ox}};$$

$$V_{ox} = \pm \frac{Q_{sc} + Q_{ss}}{C_{ox}}; \quad V_0 = \Delta\psi_{ms} + \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} = \psi_s + V_{ox}.$$

Численные значения  $C_{ox}, Q_{ox}$  и  $\Delta\psi_{ms}$  будут

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox} \epsilon_0}{d_{ox}} = \frac{3,82 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{1,5 \cdot 10^{-5}} = 2,3 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2;$$

$$\frac{Q_{ox}}{C_{ox}} = - \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4 \cdot 10^{11}}{2,3 \cdot 10^{-8}} = -2,78 \text{ В} \quad \Delta\psi_{ms} = -0,81 \text{ В},$$

В таблице 3 приведены рассчитанные по этим соотношениям значения соответствующих параметров МДП структуры.

Таблица 3

$\beta\psi_s$	$E_t - E_s, \text{ В}$	$f_p; f_n$	$\tau, \text{ с}$	$\frac{C_s}{\Phi, \text{ см}^2}$	$\frac{C_s + C_{sc}}{\Phi, \text{ см}^2}$	$C, \frac{\Phi}{\text{см}^2}$	$C_{отн}$	$Q_s, \frac{\text{Кл}}{\text{см}^2}$	$Q_s + Q_{sc}, \frac{\text{Кл}}{\text{см}^2}$	$V_{ox}, \text{ В}$	$V_0 - \Delta\psi_{ms} + \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}, \text{ В}$
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-14	0,56	1,00	$5,5 \cdot 10^{-8}$	0	$7,6 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$	1,0	$9,6 \cdot 10^{-8}$	$3,9 \cdot 10^{-6}$	-170	-170
-12	0,51	1,00	$4,2 \cdot 10^{-7}$	0	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$	1,0	$9,6 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	-65	-65,3
-10	0,46	1,00	$3,0 \cdot 10^{-6}$	0	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$	1,0	$9,6 \cdot 10^{-8}$	$6,3 \cdot 10^{-7}$	-27,4	-27,7
-8	0,41	1,00	$2,2 \cdot 10^{-5}$	0	$3,8 \cdot 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$	0,99	$9,6 \cdot 10^{-8}$	$3,0 \cdot 10^{-7}$	-13,0	-13,2
-6	0,36	1,00	$1,6 \cdot 10^{-4}$	0	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$	0,98	$9,6 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	-7,0	-7,2
-4	0,30	1,00	$1,2 \cdot 10^{-3}$	0	$5,3 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-8}$	0,96	$9,6 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	-5,2	-5,3
-2	0,252	1,00	$9 \cdot 10^{-3}$	0	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-8}$	0,90	$9,6 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	-4,5	-4,53
-1	0,226	1,00	$2,4 \cdot 10^{-2}$	0	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$	0,86	$9,6 \cdot 10^{-8}$	$0,99 \cdot 10^{-7}$	-4,31	-4,33
0	0,20	1,00	$6,7 \cdot 10^{-2}$	0	$9,6 \cdot 10^{-8}$	$1,9 \cdot 10^{-8}$	0,81	$9,6 \cdot 10^{-8}$	$9,6 \cdot 10^{-8}$	-4,17	-4,17
1	0,174	1,00	$1,8 \cdot 10^{-1}$	0	$7,3 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	0,76	$9,6 \cdot 10^{-8}$	$9,4 \cdot 10^{-8}$	-4,08	-4,05
2	0,148	1,00	0,5	0	$5,6 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-8}$	0,71	$9,6 \cdot 10^{-8}$	$9,2 \cdot 10^{-8}$	-4,01	-3,96

Продолжение таблицы 3

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	0,05	0,87	23,5	$2,8 \cdot 10^{-13}$	$3,1 \cdot 10^{-8}$	$3,1 \cdot 10^{-8}$	0,57	$8,4 \cdot 10^{-8}$	$7,6 \cdot 10^{-8}$	-3,80	-3,15
7	0,02	0,67	47,9	$2,7 \cdot 10^{-13}$	$2,9 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	0,56	$6,4 \cdot 10^{-8}$	$5,5 \cdot 10^{-8}$	-2,4	-2,22
8	0	0,43	86	$1,7 \cdot 10^{-13}$	$2,7 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$	0,54	$4,1 \cdot 10^{-8}$	$3,1 \cdot 10^{-8}$	-1,36	-1,15
9	-0,03	0,22	122	$8,3 \cdot 10^{-14}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$	0,52	$2,1 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$	-0,46	-0,23
10	-0,06	0,09	$1,3 \cdot 10^2$	$3,7 \cdot 10^{-14}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$	0,50	$8,6 \cdot 10^{-9}$	$-2,4 \cdot 10^{-9}$	0,10	-0,36
14	-0,16	1,00	$5,6 \cdot 10^4$	c	$1,9 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$	0,45	0	$-1,3 \cdot 10^{-8}$	0,56	0,92
18	-0,27	1,00	$1,0 \cdot 10^3$	0	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$9,8 \cdot 10^{-9}$	0,43	0	$-1,5 \cdot 10^{-8}$	0,65	1,12
22	-0,37	1,00	18,2	0	$2,2 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$	0,50	0	$-1,6 \cdot 10^{-8}$	0,70	1,27
23	-0,40	1,00	6,7	0	$3,3 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-8}$	0,59	0	$-1,7 \cdot 10^{-8}$	0,74	1,34
24	-0,42	1,00	2,4	0	$6,1 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	0,73	0	$-1,9 \cdot 10^{-8}$	0,83	1,45
25	-0,45	1,00	0,9	0	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$	0,85	0	$-2,1 \cdot 10^{-8}$	0,91	1,56
27	-0,50	1,00	$1,2 \cdot 10^{-1}$	0	$5,1 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-8}$	0,96	0	$-3,5 \cdot 10^{-8}$	1,52	2,22
29	-0,55	1,00	$1,6 \cdot 10^{-2}$	0	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$	0,98	0	$-8,5 \cdot 10^{-8}$	3,70	4,45
31	-0,60	1,00	$2,2 \cdot 10^{-3}$	0	$4,3 \cdot 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$	0,99	0	$-2,2 \cdot 10^{-7}$	9,57	10,37
33	-0,65	1,00	$3 \cdot 10^{-4}$	0	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$	1,00	0	$-6,1 \cdot 10^{-7}$	26,5	27,3
35	-0,71	1,00	$4,2 \cdot 10^{-5}$	0	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$	1,00	0	$-1,7 \cdot 10^{-6}$	73,9	74,8

5.8. Условие задачи

$nGe - SiO_2 - Al$

$\rho = 5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$

$\Gamma_p = 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$

$d_{ox} = 1300 \text{ \AA}$

$T = 77 \text{ К}$

$V_G = ?$

Дополнительные табличные данные

$\mu_n = 3900 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$

$n_i = 1,8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$

$\epsilon_s = 16$

$\chi = 4,0 \text{ эВ}$

$E_g = 0,88 \text{ эВ}$

$\Phi_{Au} = 5,0$

$\epsilon_{ox} = 3,82$

Величина напряжения  $V_G$  равна

$V_G = \Delta \varphi_{ms} + \varphi_s - \frac{Q_{sc}}{C_{ox}}$

При значении  $\Gamma_p$  в условиях задачи ОПЗ находится в области сильной инверсии. Рассчитаем необходимые параметры

$N_D = \frac{I}{q \cdot \mu_n \cdot \rho_n} = \frac{I}{I} = 3,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$

$1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3900 \cdot 5$

$\varphi_{ox} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{N_D}{n_i} =$

$= 0,0066 \cdot \ln \frac{3,2 \cdot 10^{14}}{1,8 \cdot 10^{11}} = 0,38 \text{ В.}$

$Q_B = \sqrt{2q \cdot \epsilon_s \cdot \epsilon_0 \cdot 2\varphi_0 N_D} =$

$= \sqrt{2 \cdot 16 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 3,2 \cdot 10^{14} \times \sqrt{0,76 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$

$N_B = \frac{Q_B}{q} = \frac{1 \cdot 10^{-8}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 6,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$

$\Gamma_p = \left( 2 \frac{kT}{q} \cdot \epsilon_s \cdot \epsilon_0 \cdot N_D \right)^{1/2} e^{\frac{\beta(-\varphi_s - 2\varphi_0)}{2}} = \Gamma_{p0} e^{\frac{\beta(-\varphi_s - 2\varphi_0)}{2}}$

$\Gamma_{p0} = \left( \frac{2 \cdot 0,0066 \cdot 16 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 3,2 \cdot 10^{14}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \right)^{1/2} = 6,1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$

$\varphi_s = -2\varphi_0 - \frac{2kT}{q} \cdot \ln \frac{\Gamma_p}{\Gamma_{p0}} = -0,76 - 0,0133 \cdot \ln \frac{3 \cdot 10^{12}}{6,1 \cdot 10^9} =$

$= -0,84 \text{ В.}$

$Q_{sc} = Q_B + q\Gamma_p = 1 \cdot 10^{-8} + 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cdot 10^{12} =$

$= 4,9 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/см}^2$

$\Phi_{nGe} = \chi + \frac{E_g}{2} - q\varphi_0 = 4,0 + 0,44 - 0,38 = 4,06 \text{ эВ.}$

$$\Delta \varphi_{ms} = \varphi_{Au} - \varphi_{nGe} = 5,0 - 4,06 = 0,94 \text{ В}$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox} \epsilon_0}{d_{ox}} = \frac{3,82 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{1,3 \cdot 10^{-5}} = 2,3 \cdot 10^{-8} \text{ ф/см}^2.$$

Следовательно, величина  $V_G$  будет

$$V_G = 0,94 - 0,84 - \frac{4,9 \cdot 10^{-7}}{2,3 \cdot 10^{-8}} = -21,2 \text{ В.}$$

5.9. Условие задачи

$$pSi - Si_3 N_4 - Si$$

$$d_N = 1200 \text{ \AA}$$

$$\beta = 20 \text{ пФ/В}$$

$$N_A = 1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$$

$$S = 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$$

$$N_{ss} = ?$$

Дополнительные табличные данные

$$\epsilon_N = 6,8$$

Для определения  $N_{ss}$  рассчитаем сначала теоретический наклон ВФХ вблизи плоских зон. Значения  $\varphi_s$  возьмем  $\pm \frac{kT}{q}$ . Выражения для  $C_{sc}$ ,  $Q_{sc}$  аналогичны, как и в задаче 5.5.

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_N \epsilon_0}{d_N} = \frac{6,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{1,2 \cdot 10^{-5}} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ ф/см}^2.$$

При  $\varphi_s = -0,0259 \text{ В}$  емкость  $C$  будет равна  $C_1 = 184 \text{ пФ}$ ,  $V_{G1} = -0,087 \text{ В}$ .

При  $\varphi_s = +0,0259 \text{ В}$  емкость  $C$  будет равна  $C_2 = 148 \text{ пФ}$ ,  $V_{G2} = +0,070 \text{ В}$ .

Следовательно, теоретический наклон

$$\beta_{теор.} = \frac{C_2 - C_1}{V_{G2} - V_{G1}} = \frac{184 - 148}{0,070 + 0,087} = 230 \text{ пФ/В};$$

Увеличение наклона происходит вследствие влияния ПС.

Уравнение электронейтральности дает

$$V_G = V_{FB} + \varphi_s - \frac{Q_{sc}}{C_{ox}} + \frac{q N_{ss}}{C_{ox}} \varphi_s;$$

$$V_{G2} - V_{G1} = (V_{G2} - V_{G1})_{теор.} + \frac{q N_{ss}}{C_{ox}} (\varphi_{s2} - \varphi_{s1}) =$$

$$= (V_{G2} - V_{G1})_{теор.} + \frac{q N_{ss}}{C_{ox}} \cdot 2 \frac{kT}{q}.$$

$$\beta = \frac{\Delta C}{\Delta V_G} \Rightarrow V_{G2} - V_{G1} = \frac{C_2 - C_1}{\beta} = \frac{36}{42} = 0,86 \text{ В.}$$

Получаем 
$$N_{ss} = \frac{(V_{G2} - V_{G1})_{экс.} - (V_{G2} - V_{G1})_{теор.}}{2 \frac{kT}{q}} \cdot \frac{C_{ox}}{q} =$$

$$= \frac{0,86 - 0,16}{2 \cdot 0,0259} \cdot \frac{5 \cdot 10^{-8}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 4,2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}.$$

5.10. Условие задачи

$$pGe - SiO_2 - Al$$

$$V_{FB}^{(1)} = -3 \text{ В}$$

$$V_{FB}^{(2)} = -10 \text{ В}$$

$$N_A = 10^{14} \text{ см}^{-3}$$

$$d_{ox} = 1400 \text{ \AA}$$

$$T_1 = 300 \text{ К}$$

$$T_2 = 77 \text{ К}$$

$$N_{ss} = ?$$

Дополнительные табличные данные

$$\epsilon_{ox} = 3,82$$

$$n_i(300 \text{ К}) = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$$

$$n_i(77 \text{ К}) = 1,8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$$

При изменении температуры напряжение плоских зон  $V_{FB}$  изменяется на величину  $\Delta V_{FB} = |V_{FB}(T_2) - V_{FB}(T_1)| = \frac{q N_{ss}}{C_{ox}} [\varphi_0(T_2) - \varphi_0(T_1)]$ . Рассчитаем необходимые параметры:

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox} \epsilon_0}{d_{ox}} = \frac{3,82 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{1,4 \cdot 10^{-5}} = 2,4 \cdot 10^{-8} \text{ ф/см}^2.$$

$$\varphi_0(300 \text{ К}) = \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{N_A}{n_i} =$$

$$= 0,0259 \cdot \ln \frac{10^{14}}{2,5 \cdot 10^{13}} = 0,04 \text{ В,}$$

$$\varphi_0(77 \text{ К}) = 0,0066 \cdot \ln \frac{10^{14}}{1,8 \cdot 10^{11}} =$$

$$= 0,38 \text{ В.}$$

Величина  $N_{ss}$  равна

$$N_{ss} = \frac{|\Delta V_{FB} \cdot C_{ox}|}{q \cdot \Delta \varphi_0} = \frac{7 \cdot 2,4 \cdot 10^{-8}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,34} = 3,1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}.$$

При изменении температуры уровень Ферми сместился вниз, к вершине валентной зоны. При этом ПС, лежащие в диапазоне энергий от  $\varphi_0(300 \text{ К})$  до  $\varphi_0(77 \text{ К})$  изменили свой заряд. Поскольку напряжение  $V_{FB}$  отрицательное по знаку и с уменьшением  $T$  возросло по абсолютной величине, заряд в ПС в диапазоне  $\varphi_0(300 \text{ К})$  до  $\varphi_0(77 \text{ К})$  стал положи-

тельными. Таким образом, ПС положительно (+) заряжены, когда на них нет электронов, и нейтральны, когда на них есть электроны. Следовательно, ПС донорного типа.

5.11. Условие задачи

$n\text{Si} - \text{SiO}_2 - \text{Me}$

$C_{min} = 10 \text{ пФ}$

$d_{ок} = 400 \text{ \AA}$

$S = 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$

$N_D = ?$

Дополнительные табличные данные

$\epsilon_{Si} = 11,8$

$\epsilon_{ок} = 3,82$

$n_i = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$

В минимуме высокочастотной емкости

$$\frac{1}{C_{min}} = \frac{1}{SC_{ок}} + \frac{1}{SC_{sc}}$$

Емкость ОПЗ  $C_{sc}$  будет определяться емкостью обедненного слоя  $C_B$ .

Рассчитаем необходимые параметры

$$C_{ок} = \frac{\epsilon_{ок} \cdot \epsilon_0}{d_{ок}}; C_{sc} = C_B = \frac{\epsilon_s \epsilon_0}{W}$$

$$W = \frac{2 \epsilon_s \epsilon_0 q \varphi_0}{q \cdot N_D}; \varphi_0 = \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{N_D}{n_i}$$

$$C_{ок} = \frac{3,82 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{4 \cdot 10^{-6}} = 8,5 \cdot 10^{-8} \text{ ф/см}^2$$

$$SC_{ок} = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 8,85 \cdot 10^{-8} = 4,2 \cdot 10^{-10} \text{ ф} = 420 \text{ пФ}$$

$$\frac{1}{SC_B} = \frac{1}{C_{min}} - \frac{1}{SC_{ок}} = 10^{11} - \frac{10^{10}}{4,2} = 9,8 \cdot 10^{10} \text{ ф}^{-1}$$

$$SC_B = 1,02 \cdot 10^{-11} \text{ ф} = 10,2 \text{ пФ}$$

Выразим емкость  $C_B$  через концентрацию  $N_D$ . Получаем трансцендентное уравнение относительно  $N_D$

$$C_B = \sqrt{\frac{q^2 N_D \epsilon_s \epsilon_0}{kT \ln N_D / n_i}}$$

Решаем его приближенно. Поскольку  $C_B$  мала, то  $N_D$  тоже мала. Возьмем  $N_D \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и рассчитаем  $\varphi_0$ , где ошибка в  $N_D$  слабо сказывается на величине  $\varphi_0$ .

$$\varphi_0^{(1)} = 0,0259 \cdot \ln \frac{10^{14}}{1,6 \cdot 10^{10}} = 0,23 \text{ В}$$

$$C_B = \sqrt{\frac{q N_D \epsilon_s \epsilon_0}{4 \varphi_0}}; N_D^{(1)} = \frac{4 \varphi_0 \cdot C_B^2}{q \epsilon_s \epsilon_0} = \frac{4 \cdot 0,23 \cdot (2,04 \cdot 10^{-9})^2}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 11,8} = 2,3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$$

Проверим, насколько велика ошибка в  $N_D$

$$\varphi_0^{(2)} = 0,0259 \cdot \ln \frac{2,3 \cdot 10^{13}}{1,6 \cdot 10^{10}} = 0,19 \text{ В}$$

$$N_D^{(2)} = \frac{4 \cdot 0,19 \cdot (2,04 \cdot 10^{-9})^2}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}} = 1,9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$$

Ошибка в  $N_D \approx 20\%$ .

5.12. Условие задачи

$p\text{GaAs} - \text{Si}_3\text{N}_4 - Pt$

$V_{FB}^{(1)} = +5 \text{ В}$

$d_N = 1500 \text{ \AA}$

$V_{FB}^{(2)} = -5 \text{ В}$

$N_A = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$

$T = 300 \text{ К}$

$N_{ок} = ?$

Дополнительные табличные данные

$\epsilon_N = 6,8$

$\varphi_{Pt} = 5,0 \text{ эВ}$

$\chi = 4,07 \text{ эВ}$

$E_g = 1,43 \text{ эВ}$

$n_i = 1,1 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$

Напряжение плоских зон  $V_{FB}$

при отсутствии ПС равно

$$V_{FB} = \Delta \varphi_{MS} - \frac{Q_{ок}}{C_{ок}}$$

Рассчитаем необходимые параметры

$$\Phi_{pGaAs} = \chi + \frac{E_g}{2} + q \varphi_0;$$

$$\varphi_0 = \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{N_A}{n_i};$$

$$\varphi_0 = 0,0259 \cdot \ln \frac{5 \cdot 10^{17}}{1,1 \cdot 10^7} = 0,64 \text{ В}$$

$$\Phi_{pGaAs} = 4,07 + 0,72 + 0,64 = 5,43 \text{ эВ}$$

$$\Delta \varphi_{MS} = 5,0 - 5,43 = -0,43 \text{ В}$$

$$C_x = \frac{\epsilon_N \epsilon_0}{d_N} = \frac{6,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{1,5 \cdot 10^{-5}} = 4 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2.$$

Получаем после подстановки:

$$Q_{ox} = (\Delta \varphi_{ms} - V_{FB}) C_{ox};$$

$$C_{ox}^{(1)} = (-0,43 - 5) \cdot 4 \cdot 10^{-8} = -2,2 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/см}^2.$$

$$N_{ox}^{(1)} = \frac{|Q_{ox}|}{q} = \frac{2,2 \cdot 10^{-7}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}.$$

$$Q_{ox}^{(2)} = (-0,43 + 5) \cdot 4 \cdot 10^{-8} = +1,8 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/см}^2.$$

$$N_{ox}^{(2)} = \frac{1,8 \cdot 10^{-7}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}.$$

При  $V_{FB} = +5 \text{ В}$  встроенный заряд отрицательный, с плотностью  $1,4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

При  $V_{FB} = -5 \text{ В}$ , встроенный заряд положительный, с плотностью  $1,1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

### Универсальные физические постоянные

Заряд электрона	$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса покоя электрона	$m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
	$m_0 = 9,1 \cdot 10^{-28} \text{ г}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{°К}^{-1}$
Постоянная Планка	$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
	$\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Диэлектрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$
	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14} \text{ Ф} \cdot \text{см}^{-1}$

### Полезные соотношения

$$\frac{kT}{q} \text{ (при } T = 300 \text{ К)} = 0,0259 \text{ В.}$$

$$\frac{kT}{q} \text{ (при } T = 77 \text{ К)} = 0,0066 \text{ В.}$$

Потенциал в вольтах (В) численно равен энергии в электрон-вольтах (эВ).  $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ .

$$e^x \approx 10^{0,43x} \approx 10^{\frac{x}{2,3}}.$$

$$e^1 = 2,7; \quad e^2 = 7,4; \quad e^3 = 20; \quad e^4 = 55; \quad e^5 = 148; \quad e^6 = 403; \quad e^7 = 1100; \\ e^8 = 3000; \quad e^9 = 8100; \quad e^{10} = 22000.$$

$$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м} = 10^8 \text{ см}$$

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

№ : Физический параметр	Обознач. ед. измерен.	Si		Ge		GaAs		InSb	
		300 К	77 К	300 К	77 К	300 К	77 К	300 К	77 К
1. Средствла к электрону $\chi$	эВ	4.05		4.0		4.07		4.59	
2. Ширина запрещенной зоны $E_g$	эВ	1.12 I, 1.16		0,803 0.88		1.43 I, 1.51		0.18 0,23	
3. Собственная концентрация $n_i$	см <sup>-3</sup>	1,6 · 10 <sup>10</sup> 2,9 · 10 <sup>20</sup>		2,5 · 10 <sup>13</sup> 1,8 · 10 <sup>-11</sup>		1,1 · 10 <sup>7</sup> 4,1 · 10 <sup>-33</sup>		1,5 · 10 <sup>16</sup> 2,6 · 10 <sup>9</sup>	
4. Диэлектрическая проницаемость $\epsilon$		11,8		16,0		10,9		17,0	
5. Показатель преломления $n$		3,44		4,0		3,4		3,75	
6. Эффективная масса электронов $m^*$	$m^*$	0,97 (l) 0,19 (t)		1,6 (l) 0,062 (t)		0,068		0,013	
	$m_0$	1,08 (d)		0,57 (d)		0,12 0,5		0,012 0,6	
7. Эффективная масса дырок $m^*$	$m^*$	0,16 (l) 0,50 (h)		0,04 (l) 0,3 (h)		0,12 0,5		0,012 0,6	
	$m_0$	0,59 (d)		0,37 (d)		0,12 0,5		0,012 0,6	
8. Подвижность электронов $\mu_n$	см <sup>2</sup> /В·с	1500		3900		8500		7800	
9. Подвижность дырок $\mu_p$	см <sup>2</sup> /В·с	600		1900		400		750 5000	
10. Время жизни носителей $\tau_{p,n}$	с	2,5 · 10 <sup>-3</sup>		10 <sup>-3</sup>		10 <sup>-8</sup>		10 <sup>-8</sup>	

Продолжение таблицы 4.

№	Физический параметр	Обознач. ед. измерен.	300 К		77 К		300 К		77 К	
			300 К	77 К	300 К	77 К	300 К	77 К		
11.	Эффективная плотность состояний в зоне проводимости $N_c$	см <sup>-3</sup>	2,8 · 10 <sup>19</sup>	3,6 · 10 <sup>18</sup>	1,04 · 10 <sup>19</sup>	1,4 · 10 <sup>18</sup>	4,7 · 10 <sup>17</sup>	5,8 · 10 <sup>16</sup>	3,7 · 10 <sup>16</sup>	4,8 · 10 <sup>15</sup>
12.	Эффективная плотность состояний в валентной зоне $N_v$	см <sup>-3</sup>	1,02 · 10 <sup>19</sup>	1,4 · 10 <sup>18</sup>	6,1 · 10 <sup>18</sup>	7,3 · 10 <sup>17</sup>	7,0 · 10 <sup>18</sup>	1,2 · 10 <sup>17</sup>	1,2 · 10 <sup>19</sup>	1,5 · 10 <sup>18</sup>

Физические параметры диэлектриков Таблица 5

№	Физические параметры	Обозначение ед. измерен.	$SiO_2$	$Si_3N_4$	$Al_2O_3$	$Ta_2O_5$
1.	Сродство к электрону	$\chi$ эВ	0,9	1,95	1,0	2,45
2.	Ширина запрещенной зоны	$E_g$ эВ	8,0	5,1	8,7	4,45
3.	Диэлектрическая проницаемость	$\epsilon$	3,8	6,8	9,0	27
4.	Показатель преломления	$n$	1,48	1,97	1,77	2,2
5.	Максимальная электрическая прочность	$E$ В/см	$1 \cdot 10^7$	$8 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$
6.	Плотность	$\rho$ г/см <sup>3</sup>	2,65	3,44	3,96	8,53
7.	Молярная масса	$M$ г/моль	60	140	102	442
8.	Постоянная роста	$\alpha$ А/В	5,0	-	15,5	16,6

Термодинамические работы выхода металлов

Таблица 6

Металл	<i>Mg</i>	<i>Al</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>	<i>Au</i>	<i>Ag</i>	<i>Pt</i>
$\varphi$ , эВ	3,35	4,1	4,55	4,7	5,0	5,1	5,1

## Литература

1. Бонч-Бруевич В.Л., Карпенко И.В., Звягин И.П., Миронов А.Г. Сборник задач по физике полупроводников. -М.:Наука, 1965, 110 с.
2. Задачи по физике твердого тела / Под ред. Г.Дж.Глэдсмита. - М.:Наука, 1976, 431 с.
3. Шалимова К.В. Физика полупроводников. -М.:Энергия, 1976, 416 с.
4. Гуртов В.А. Основы структур металл-диэлектрик-полупроводник. -Петрозаводск, 1983, 92 с.
5. Гуртов В.А. Электронные процессы в структурах металл-диэлектрик-полупроводник. -Петрозаводск, 1984, 112 с.
6. Гуртов В.А., Лебедева О.Ф. Физические принципы построения МДП структур на кремнии и электрофизические процессы в них. Библиографический указатель. -Новосибирск, ИФП СО АН СССР, 1980, 232 с.
7. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. -М.:Мир, 530 с.
8. Овсяк В.Н. Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда. -Новосибирск, :Наука, 1984, 253 с.
9. Nicollan E.H., Brews J.R. MOS (Metal-Oxide Semiconductor) Physic and Technology. - N.Y., 1982, 800 p.
10. Ванина Е.Н., Гуртов В.А., Дагман Э.В. Пакет программ для расчета характеристик области пространственного заряда в кремнии. -Препринт 4-82, ИФП СО АН СССР, 1982, 56 с.



## Обозначения и сокращения

- $C_{sc}$  - емкость ОПЗ полупроводника  
 $C_{ox}$  - емкость окисла  
 $C_{ss}$  - емкость поверхностных состояний  
 $d_{ox}$  - толщина окисла  
 $E_s$  - величина поперечного электрического поля на поверхности  
 $E_g$  - ширина запрещенной зоны кремния  
 $\hbar$  - постоянная Планка  
 $\varphi_0$  - уровень Ферми (энергия Ферми) в объеме полупроводника  
 $k$  - постоянная Больцмана  
 $m$  - масса электрона  
 $m^*$  - эффективная масса носителей заряда  
 $N_{ss}$  - плотность поверхностных состояний  
 $N_{d,n}$  - концентрация доноров, акцепторов  
 $n_i$  - собственная концентрация носителей заряда в объеме полупроводника  
 $n(z)$  - концентрация электронов или дырок в ОПЗ на расстоянии  $z$  от поверхности  
 $p(z)$  - концентрация дырок или электронов в ОПЗ на расстоянии  $z$  от поверхности  
 $Q_{sc}$  - полный заряд в ОПЗ  
 $Q_{ss}$  - заряд поверхностных состояний  
 $Q_{inv}$  - заряд в инверсионном слое  
 $Q_{ox}$  - встроенный заряд в окисле  
 $q$  - заряд электрона  
 $T$  - температура  
 $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость материала  
 $\mu_{n,p}$  - подвижность носителей заряда  
 $F$  - величина квазиуровня Ферми  
 $\varphi_0$  - расстояние до уровня Ферми, отсчитанное от середины запрещенной зоны  
 $\psi(x)$  - электростатический потенциал на расстоянии  $x$  от поверхности  
 $\psi_s$  - значение электростатического потенциала  $\psi_s$  на поверхности полупроводника

- $V_{ss}$  - напряжение смещения канал-подложка  
 $V_{ox}$  - падение напряжения на окисле МДП структуры  
 $C_s$  - эквивалентная последовательная емкость ПС  
 $R_s$  - эквивалентное последовательное сопротивление ПС  
 $C_p$  - эквивалентная параллельная емкость ПС  
 $G_p$  - эквивалентная параллельная проводимость ПС  
 $\tau$  - время перезарядки ПС  
 $N_c$  - эффективная плотность состояний в зоне проводимости  
 $N_v$  - эффективная плотность состояний в валентной зоне  
 $n_s, p_s$  - концентрация электронов или дырок на поверхности  
 $\rho$  - плотность окисла  
 $M$  - молярная масса  
 $A$  - атомная масса элемента  
 $N_{ox}$  - плотность встроенного заряда в диэлектрике  
 $C_{FE}$  - емкость плоских зон  
 $V_{FB}$  - напряжение плоских зон  
 $V_G$  - напряжение на затворе МДП структуры  
 $S_t$  - сечение захвата на ПС  
 $\Gamma_{n,p}$  - избыток электронов или дырок в инверсионном канале  
 $\lambda_c$  - центроид локализации свободных носителей  
 $ОПЗ$  - область пространственного заряда  
 $ПС$  - поверхностные состояния  
 $МДП$  - металл-диэлектрик-полупроводник  
 $ВФХ$  - вольт-фарадная характеристика  
 $КЭФ$  - кремний электронный, легированный фосфором  
 $КДБ$  - кремний дырочный, легированный бором  
 $ГДА$  - германий дырочный, легированный алюминием  
 $ГЭС$  - германий электронный, легированный сурьмой  
 $ИСЭ$  - антимонид индия электронный

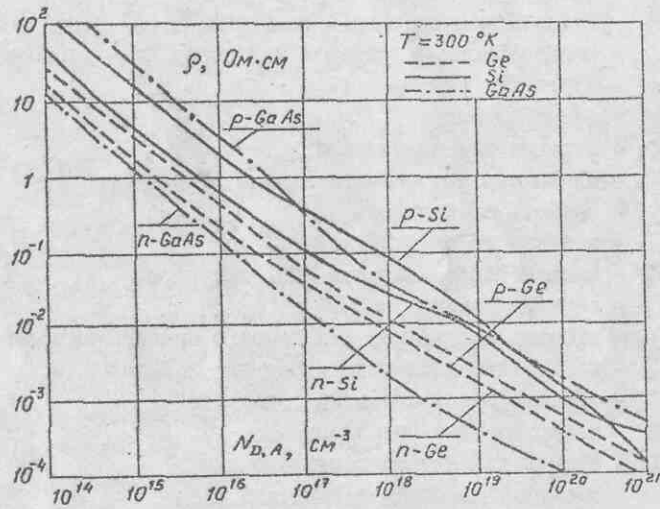


Рис.1. Зависимость удельного сопротивления  $\rho$  от концентрации легирующей примеси  $N_{D,A}$  для различных полупроводников при температуре  $T=300$  К.

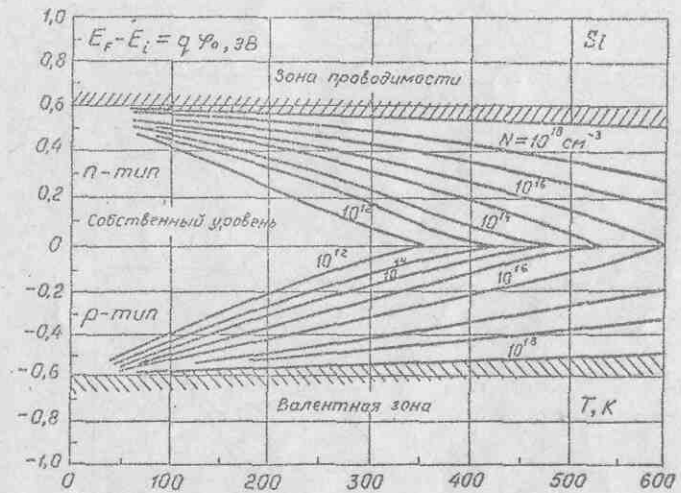


Рис.2. Зависимость объемного положения уровня Ферми  $\varphi_0$  от температуры  $T$  для кремния Si различного уровня легирования.

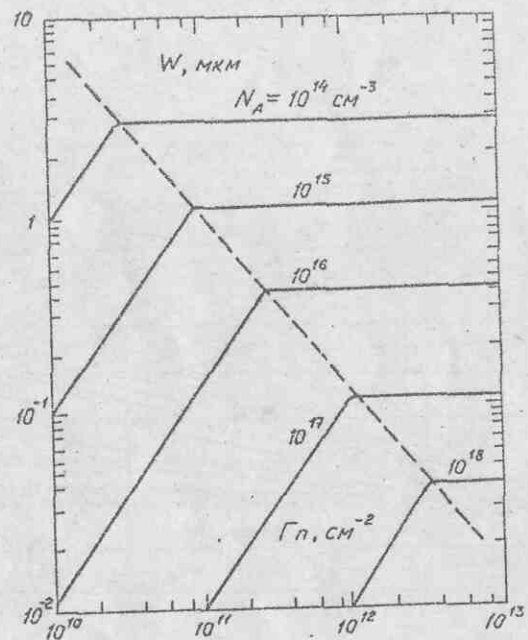


Рис.3. Зависимость ширины ОПЗ  $W$  для  $p$ -Si от избытка электронов  $\Gamma_n$  при различной концентрации акцепторной примеси

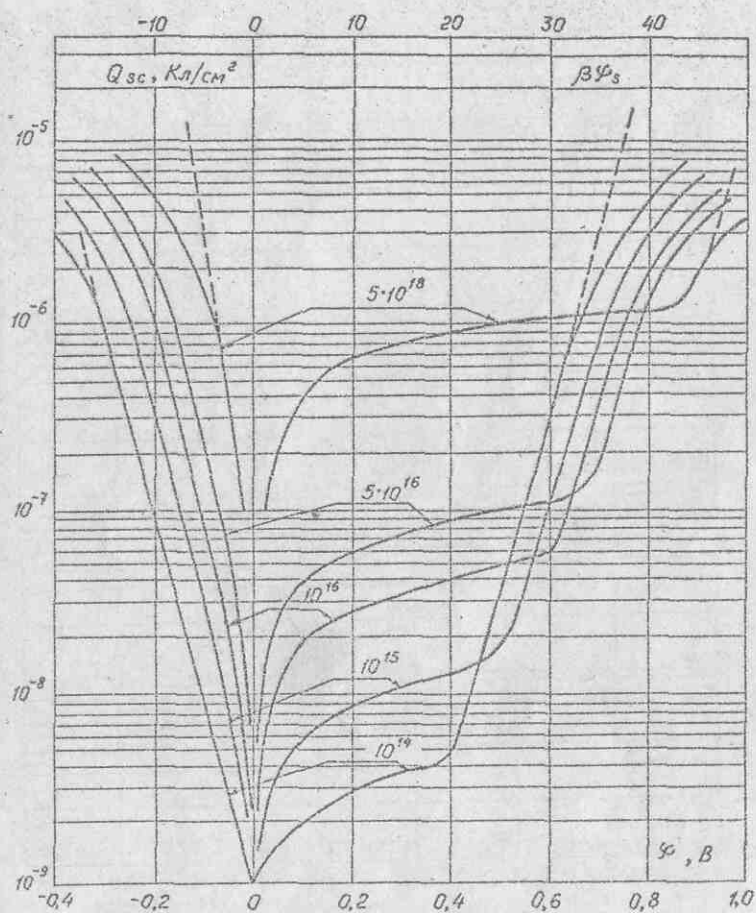


Рис.4. Зависимость заряда в области пространственного заряда  $Q_{sc}$  от поверхностного потенциала  $\varphi_s$ , для кремния  $p$ - типа проводимости при температуре  $T=295$  К с учетом вырождения при различных значениях концентрации акцепторов  $N_A$ ,  $\text{см}^{-3}$ .

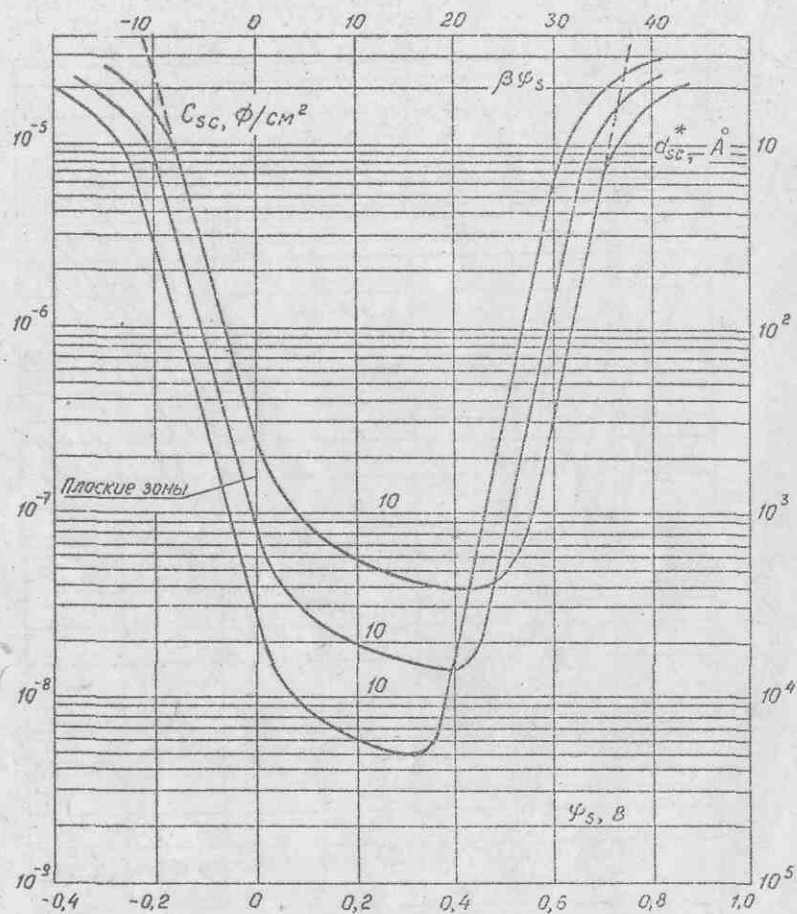


Рис. 5. Зависимость емкости области пространственного заряда  $C_{sc}$  и эффективной толщины ОПЗ  $d_{sc}^* = \frac{\epsilon_s \epsilon_0}{C_{sc}}$  от поверхностного потенциала  $\psi_s$ , рассчитанная в классическом (пунктирная линия) и вырожденном (сплошная линия) случае для  $p$ -кремния с различной концентрацией акцепторов  $N_A, \text{см}^{-3}$  при температуре  $T=295 \text{ K}$ .

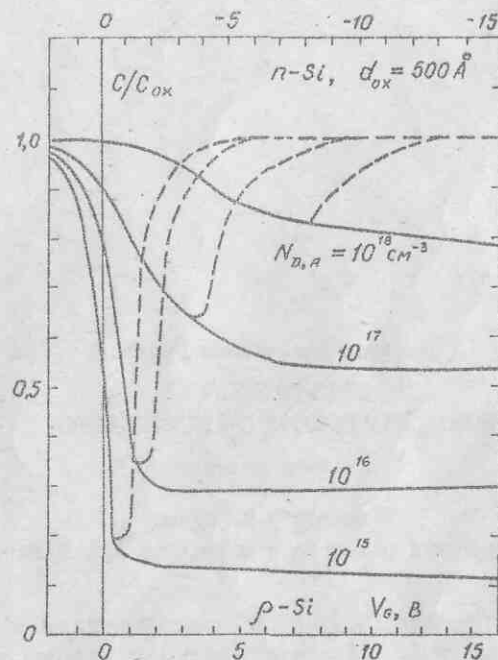


Рис. 6. Высоочастотные (сплошные линии) и низкочастотные (пунктирные линии) ВЧ МДП структур с различной концентрацией легирующей примеси  $N_{D,A}$ .

Валерий Алексеевич Гуртов  
СБОРНИК ЗАДАЧ  
ПО ФИЗИКЕ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ  
Учебное пособие

Редактор Н.В.Михина  
Технический редактор и корректор А.А.Фемпи

Подписано в печать 29.11.85. Формат бумаги 60 x 84 1/16.  
Типографская № 3. Офсетная печать. 5 усл.печ.л.  
5 уч.-изд.л. Изд. № 22. Тираж 500 экз. Заказ № 433.  
Цена 15 коп.  
Темплан 1985, поз. 2048

РИО Петрозаводского государственного университета  
им. О.В.Куусинена  
Петрозаводск, пр.Ленина, 33  
Ютапринт ПГУ