

Лекция 5

Тема Лекции:
Образование и зонная диаграмма p-n перехода

к.ф.-м.н., PhD, ассоциированный профессор
Тулегенова Аида Тулегенкызы

Цель лекции:

Изучить физические процессы, происходящие при образовании p–n перехода, рассмотреть механизм выравнивания уровней Ферми и построение зонных диаграмм в равновесном и неравновесном состояниях, а также объяснить роль p–n перехода в работе полупроводниковых приборов.

Основные вопросы:

1. Зонная диаграмма p–n перехода в равновесии.
2. Энергетическая диаграмма до и после контакта.
3. Образование p–n перехода.
4. Понятие и значение p–n перехода.

Введение

- Электронно дырочным, или p-n переходом, называют контакт двух полупроводников одного вида с различными типами проводимости (электронным и дырочным).

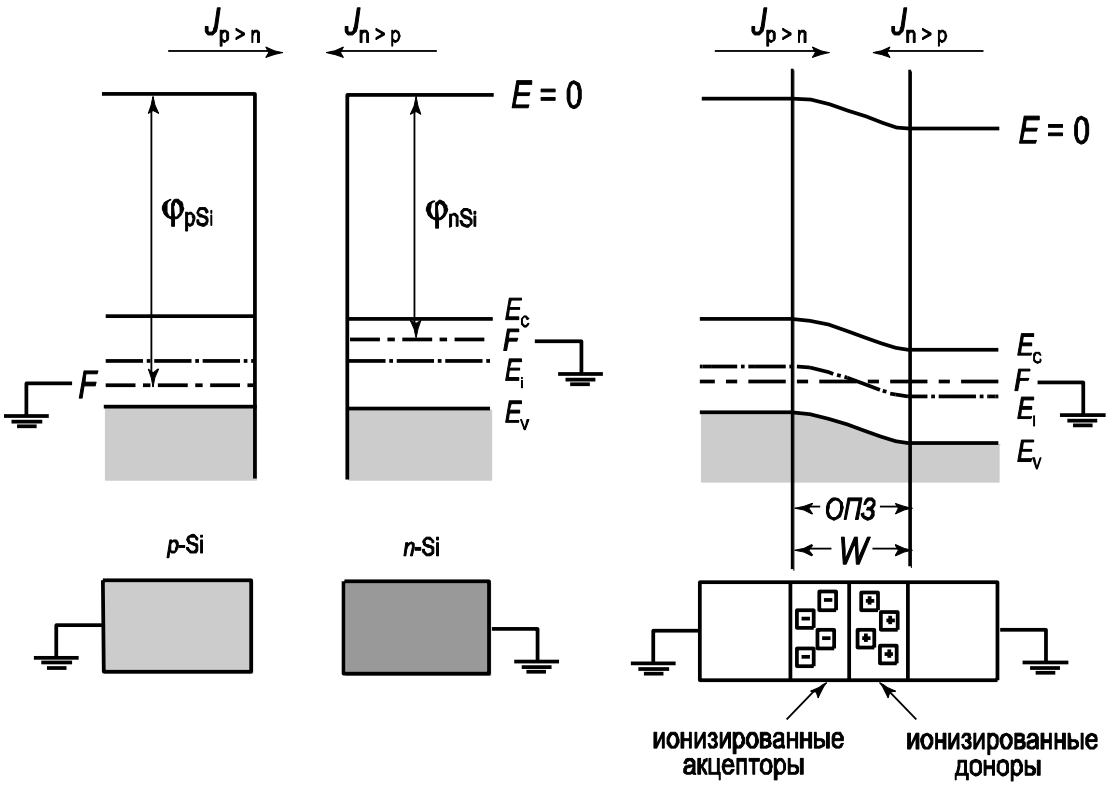
- Классическим примером p n перехода являются: nSi – pSi, nGe – pGe.

- Величина работы выхода Ф определяется расстоянием от уровня Ферми до уровня вакуума. Термодинамическая работа выхода в полупроводнике p типа Фp всегда больше, чем термодинамическая работа выхода Фn в полупроводнике n типа.

- При контакте полупроводников n и p типов вследствие различного значения токов термоэлектронной эмиссии (из-за разных значений работы выхода) поток электронов из полупроводника n типа в полупроводник p типа будет больше.
- Электроны из полупроводника n типа будут при переходе в полупроводник p-типа рекомбинировать с дырками. Вследствие несбалансированности токов в полупроводнике n типа возникнет избыточный положительный заряд, а в полупроводнике p типа – отрицательный.

- Положительный заряд обусловлен ионизованными донорами, отрицательный заряд – ионизованными акцепторами.

Зонные диаграммы, иллюстрирующие этапы формирования электронно дырочного перехода



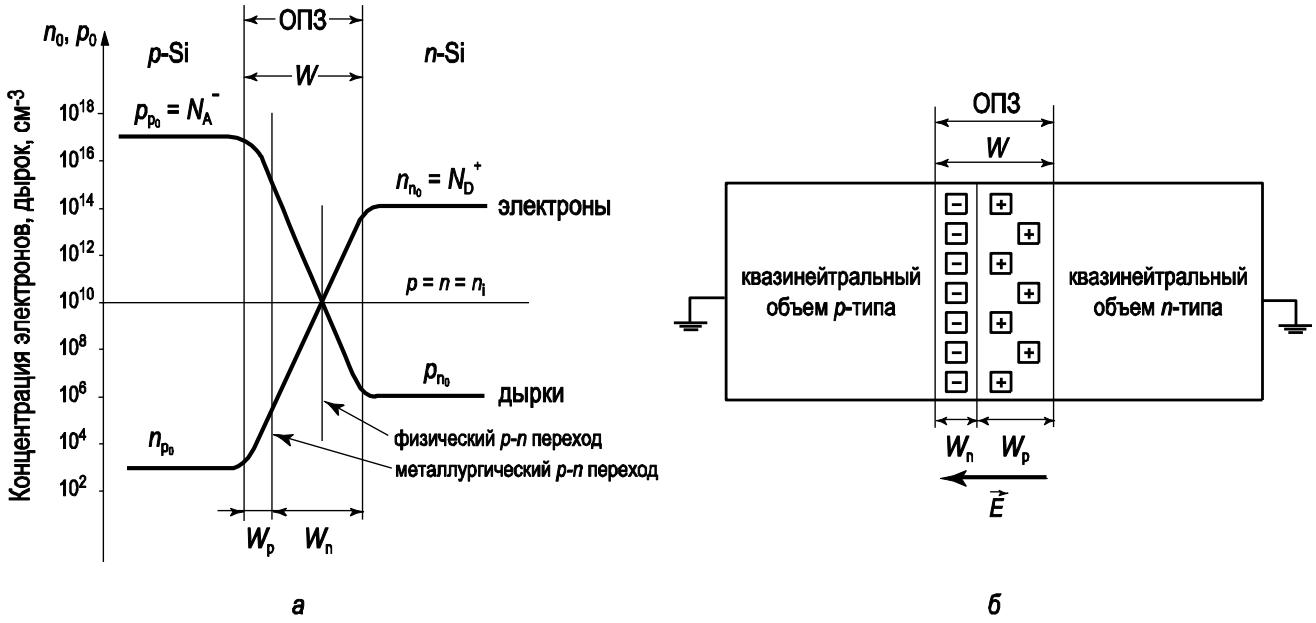
Схема, иллюстрирующая образование *p-n* перехода

Распределение свободных носителей в p n переходе

Рассмотрим несимметричный *p-n* переход, будем считать, что концентрация акцепторов больше, чем концентрация **доноров** $N_A > N_D$; в этом случае для объемного положения уровня **Ферми получаем** $\varphi_n < \varphi_p$. В условиях равновесия **($V_G = 0$) высота потенциального барьера *p-n* перехода** будет:

$$\Delta\hat{O} = \varphi_n + \varphi_p = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

Распределение концентрации носителей в несимметричном *p-n* переходе в логарифмическом масштабе и схема *p-n* перехода:



***p-n* переход** в равновесных условиях:

а) распределение равновесных носителей; *б*) диаграмма, иллюстрирующая распределение доноров и акцепторов

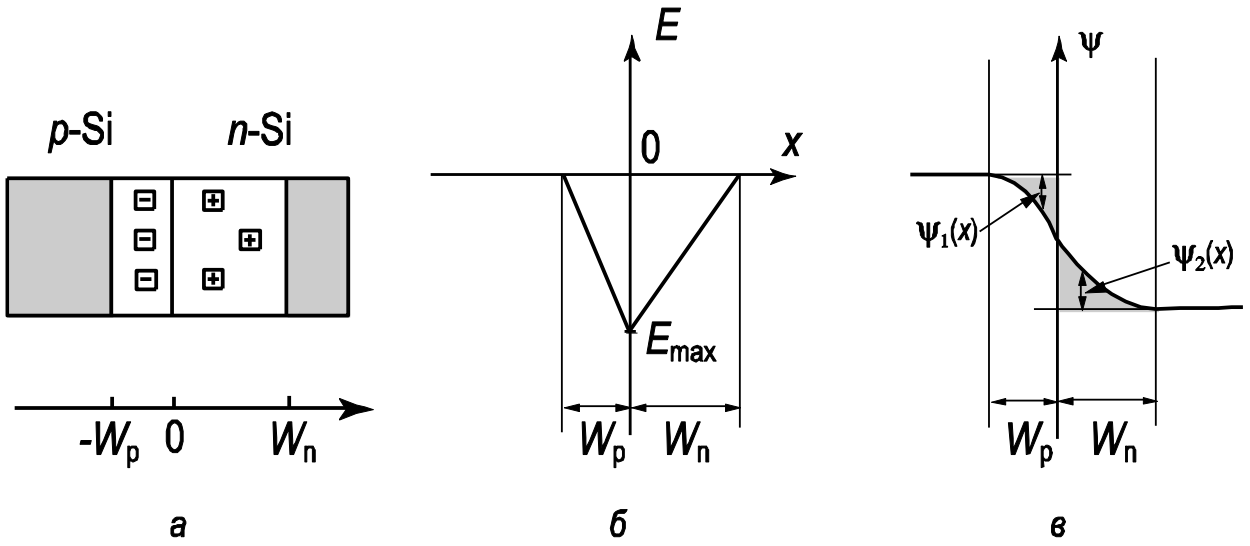
Будем решать уравнение **Пуассона отдельно для областей I и II.** После интегрирования уравнения Пуассона получаем **для области I:**

$$E(x) = -\frac{qN_{\mathrm{D}}^{+}}{\varepsilon_{\mathrm{s}}\varepsilon_{0}}(W_{\mathrm{n}} - x)$$

для области II:

$$E(x) = -\frac{qN_{\mathrm{A}}^{+}}{\varepsilon_{\mathrm{s}}\varepsilon_{0}}(W_{\mathrm{p}} + x)$$

Диаграмма, иллюстрирующая распределение электрического поля и потенциала в p-n переходе



***а*) структура *p-n* перехода;**

***б*) распределение электрического поля в ОПЗ;**

***в*) распределение потенциала в ОПЗ**

Выводы лекции:

При контакте полупроводников p- и n-типа электроны диффундируют из n-области в p-область, а дырки — в обратном направлении. Вблизи границы остаются нескомпенсированные ионы примесей, и образуется обеднённый слой с внутренним электрическим полем. Это поле препятствует дальнейшей диффузии, и в равновесии уровни Ферми обеих областей выравниваются. На зонной диаграмме это проявляется как изгиб зон и потенциальный барьер высотой $q\varphi_0$, где φ_0 — контактная разность потенциалов. До контакта уровень Ферми в n-области лежит выше, чем в p-области. После контакта он становится единым по всему кристаллу.При прямом смещении барьер понижается и ток резко возрастает. При обратном смещении барьер повышается и течёт лишь малый ток неосновных носителей. Так p–n переход приобретает выпрямляющие свойства. На этом основана работа диодов, транзисторов, светодиодов, фотодиодов и солнечных элементов, поэтому p–n переход — базовый элемент полупроводниковой электроники.

Вопросы для контроля изучаемого материала:

1. Как образуется p–n переход и что представляет собой область пространственного заряда?
2. Что такое встроенный потенциал и как он определяется?
3. Объясните процесс выравнивания уровней Ферми при контакте p- и n-областей.
4. Как изменяется зонная диаграмма при прямом и обратном смещении?
5. Чем различаются дрейфовый и диффузионный токи в области перехода?
6. Почему p–n переход обладает выпрямляющими свойствами?
7. Какие типы p–n переходов существуют и где они применяются?

Список литературных источников:

1.Соколова Т. Н. Физика конденсированного состояния. — М.: Лань, 2020.
2.Китаев В. П. Физика твёрдого тела. — М.: Физматлит, 2021.
3.Капустин А. П. Кристаллография, минералогия и физика твёрдого тела. — М.: МИСиС, 2020.
4.Kittel, C. Introduction to Solid State Physics. — Wiley, 2022.
5.Ashcroft, N. W., Mermin, N. D. Solid State Physics. — Cengage, 2019.