



Лекция 3

Тема Лекции: Зонная структура полупроводников

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

Цель лекции:

Ознакомление с физическими принципами функционирования электропроводящих зондов, применяемых в зондовой микроскопии и наноэлектронике, а также рассмотреть понятие зонной структуры полупроводников как фундаментальной основы для понимания проводящих свойств зондов и исследуемых материалов.

Основные вопросы:

1. Влияние зонной структуры на работу электропроводящих зондов.
2. Современные направления развития
3. Колебательная спектроскопия (ИК- и КР-спектры).
4. Современные тенденции и автоматизация анализа.
5. Комплементарность методов .

Зонная структура полупроводников

Если твердое тело состоит из N атомов, то энергетические уровни оказываются N кратно вырожденными. Электрическое поле ядер, или остовов атомов, выступает как возмущение, снимающее это вырождение. **Дискретные моноэнергетические уровни атомов**, составляющие твердое тело, расщепляются в энергетические зоны. Решение квантовых уравнений в приближении сильной или слабой связи дает качественно одну и ту же картину для структуры энергетических зон твердых тел.

Если величина энергетической щели между этими зонами (обычно называемой запрещенной зоной) больше 3 эВ, то твердое тело является диэлектриком. И, наконец, если ширина запрещенной зоны E_g лежит в диапазоне $(0,1 \div 3,0)$ эВ, то твердое тело принадлежит к классу полупроводников

Для диэлектриков ширина запрещенной зоны $E_g > 3$ эВ, величина удельной проводимости $\sigma < 10^{-8}$ Ом*см, удельное сопротивление Ом*см. Для металлов величина удельной проводимости $\sigma > 10^6$ Ом*см.:

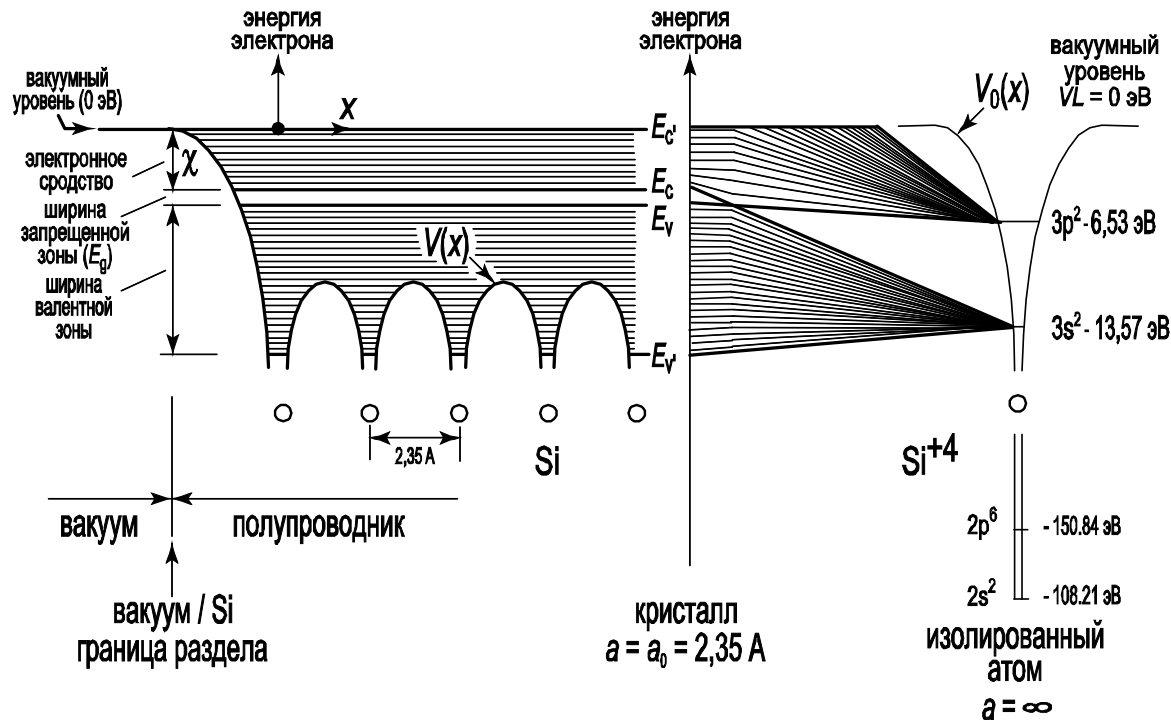
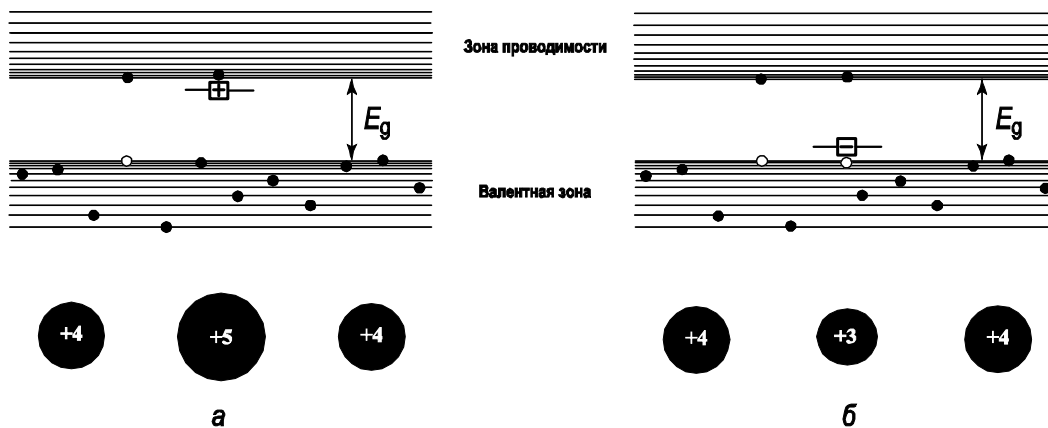


Рис. 1.- Структура энергетических уровней в изолированном атоме кремния

Терминология и основные понятия:

Собственные полупроводники – это полупроводники, в которых нет примесей (доноров и акцепторов). **Собственная концентрация (n_i)** – концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике (электронов в зоне проводимости n и дырок в валентной зоне p , причем **$n = p = n_i$**). При $T = 0$ в собственном полупроводнике свободные носители отсутствуют (**$n = p = 0$**).

Легирование – введение примеси в полупроводник, в этом случае полупроводник называется примесным



Статистика в полупроводниках **электронов** **и дырок** в полупроводниках

Равновесные процессы – процессы, происходящие в телах, которые не подвергаются внешним воздействиям. *В состоянии термодинамического равновесия для данного образца кристалла при заданной температуре существует определенное* распределение электронов и дырок по энергиям, а также значения их концентраций. Вычисление концентраций основных и неосновных носителей заряда составляет главную задачу статистики **электронов и дырок** в кристаллах.

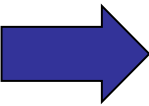
Распределение **квантовых** **состояний** в зонах

Стационарные состояния электрона в идеальном кристалле характеризуются квазиимпульсом $\mathbf{p}$.
Запишем принцип неоднородностей *Гейзенберга* для квазиимпульсов **$d\mathbf{p}_x$, $d\mathbf{p}_y$ и $d\mathbf{p}_z$** :

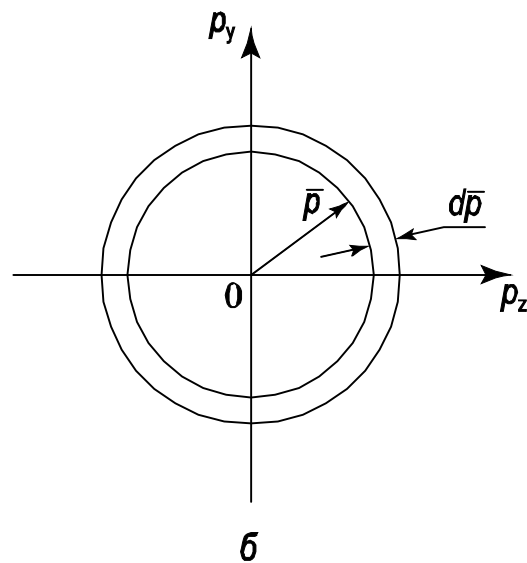
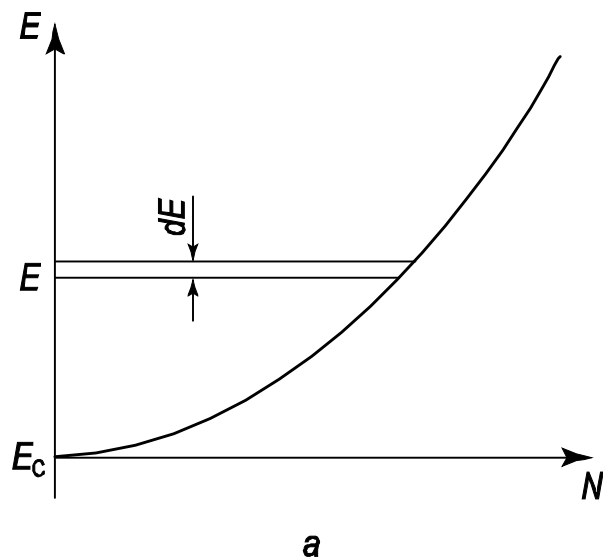
$$dx \cdot dp_x \leq h$$

$$dz \cdot dp_z \leq h$$

$$dy \cdot dp_y \leq h$$



Зона проводимости — одномерная относительно энергии. Зона Бриллюэна — трехмерная (p_x, p_y, p_z). **Заполнение зоны Бриллюэна начинается с самых малых значений квазиимпульса p .** Поэтому в качестве dp надо выбрать элемент объема, заключенный между двумя очень близкими изоэнергетическими поверхностями. Внутри этого тонкого шарового слоя радиусом p и толщиной **dp** число квантовых состояний будет равно:



Концентрация носителей заряда и положение уровня Ферми

$$f(E, T) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - F}{kT}\right)}$$

F – электрохимический потенциал, или
уровень Ферми.

Вопросы для контроля изучаемого материала:

1. Что представляет собой электропроводящий зонд и какие требования к нему предъявляются?
2. Какие существуют основные методы получения и модификации зондов?
3. Как зонная структура полупроводников влияет на их электрические свойства?
4. В чём различие между собственным и примесным полупроводником?
5. Что такое барьер Шоттки и как он проявляется в контакте зонд—поверхность?
6. Какие современные материалы применяются для создания зондов с нанометровым разрешением?
7. Как с помощью зондовой микроскопии можно изучать локальную электронную структуру полупроводников?

Список литературных источников:

8. Соколов В. И. Физика и технология полупроводников. — М.: МИФИ, 2018.
9. Боровик-Романов А. С., Горин Б. Н. Физика магнитных и электронных явлений в твёрдых телах. — М.: Наука, 1980.
10. Kittel, C. Introduction to Solid State Physics. — Wiley, 2018.
11. Sze, S. M., Ng, K. K. Physics of Semiconductor Devices. — Wiley, 2007.
12. Wiesendanger, R. Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy: Methods and Applications. — Cambridge University Press, 1994.
13. Bhushan, B. Springer Handbook of Nanotechnology. — Springer, 2017.
14. Coey, J. M. D. Magnetism and Magnetic Materials. — Cambridge University Press, 2010.