

И.С. Янусик

Брестский государственный технический университет, кафедра физики, г. Брест

В новом для нашего технического университета курсе «Физические основы электронной техники» для студентов специальности «Промышленная электроника» особое место уделяется зонной теории, которая является научным базисом микроэлектроники, основой для описания электрических свойств кристаллических твёрдых тел. Рассматриваются некоторые аспекты подачи данного материала студентам.

Зонная теория рассматривается как квантовая теория спектра энергий электронов кристалла. Спектр состоит из чередующихся зон (полос) разрешённых и запрещённых энергий для электронов. Разрешённые энергетические зоны (полосы) электронов в кристалле образованы совокупностью атомных энергетических уровней; «расщепившихся» в результате агрегации свободных атомов в кристаллическую структуру. При объединении N идентичных атомов в кристалл каждый атомный уровень энергии расщепляется на N уровней, которые образуют квазинепрерывную разрешённую зону (или её часть). Уровни энергии электронов внешних оболочек атома расщепляются (и сдвигаются в область отрицательных энергий) намного больше, чем уровни внутренних оболочек. Расщепившиеся уровни энергии электронов внешних оболочек образуют разрешённую валентную и зону проводимости. Ширина запрещённой зоны E_g кристалла – энергетическая щель между валентной и зоной проводимости.

Рассматривается два способа описания состояния макросистемы, как коллектива, состоящего из большого числа микрочастиц – термодинамический и статистический. Вводится понятие химического потенциала (μ). Если U – внутренняя энергия системы, а N – количество частиц системы, то изменение внутренней энергии системы, находящейся только в диффузионном взаимодействии с окружающей средой, равно произведению «химического» потенциала на изменение числа частиц в системе:

$$dU = \mu dN.$$

В состоянии равновесия химический потенциал, отсчитанный от произвольного, но одинакового уровня, имеет одно и то же значение во всех частях системы. Электрoхимический потенциал для электронов зоны проводимости обычно называют «уровнем Ферми». Далее студенты знакомятся с квантовыми статистиками для вырожденных коллективов Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна. Объясняется, что в термодинамическом равновесии заполнение электронами разрешённых состояний (энергетических уровней) происходит в соответствии с распределением Ферми-Дирака f_{FD} . Среднее число делокализованных электронов в состоянии с одноэлектронной энергией E равно:

$$f_{FD} = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{(E - E_F)}{kT}\right]} \leq 1, \quad (1)$$

где kT – тепловая энергия; E_F – химический потенциал (уровень Ферми).

Начало отсчета E и E_F совмещено.

Математическое ожидание того, что состояние с энергией E не занято электроном, равно $1 - f_{FD}$. При температуре $T \rightarrow 0$ уровень Ферми E_F обозначает границу между занятыми и свободными электронными состояниями. Согласно формуле (1). Объясняется студентам, что свойства полупроводникового кристалла зависят от числа электронов в зоне проводимости и (или) от числа незаполненных электронами уровней (дырок – подвижных вакансий электронов) в валентной зоне. Если разрешённая энергетическая зона заполнена электронами частично, то под действием внешнего (приложенного к кристаллическому образцу) электрического поля они перераспределяются по уровням в зоне. При этом нарушается симметрия электронов по скоростям – возникает электрический ток.

Далее вводится понятие работы выхода электрона и понятие электронное сродство. Работа выхода W_m электрона проводимости из металла в вакуум равна разности между уровнем вакуума $E_0=0$ и уровнем Ферми $(E_F)_m$. Ширина запрещенной зоны – разность энергий электрона на дне E_c зоны проводимости и на потолке E_v валентной зоны: $E_g = E_c - E_v > 0$. Энергетическое расстояние от дна c -зоны до уровня вакуума называют электронным сродством χ . Сродство к электрону одиночного атома есть разность его энергий в отрицательно заряженном и нейтральном состояниях.

Рассматриваются три типа кристаллических материалов: проводник (металл), изолятор (диэлектрик) и полупроводник электричества, их электрические свойства, в частности электропроводность собственная и примесная, с точки зрения зонной теории.

Таким образом, зонная теория рассматривается в объеме, достаточном для успешного и полного усвоения знаний, которые студенты данной специальности будут получать в дальнейшем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киреев П.С. Физика полупроводников. – М.: Высшая школа, 1975. – 584 с.
2. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. – М: Наука, 1977. – 672с.
3. Зеегер К. Физика полупроводников. – М.: Мир, 1977. – 616с.
4. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. – М: Высшая школа, 1987. – 480с.
6. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В двух книгах. – М: Мир, 1984. – 456с.