

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗОННОЙ ТЕОРИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Духновский С.К.

ВНУ им. В. Даля, ЛОМАНУМ

(г. Северодонецк)

В работе была рассмотрена история развития зонной теории твердых тел, начиная от исследований проводимости полупроводников, изобретения кристаллического детектора, исследований свойств кристаллов цинкита до появления точечного транзистора. Рассмотрена вероятностная оценка того, что электрон занимает определенный энергетический уровень при данной температуре.

Целью работы является изучение истории возникновения Зонной теории твёрдого тела и её современного состояния.

Зонная теория проводимости – это квантовомеханическая теория движения электронов в твёрдом теле. Рождение твердотельной электроники относят к 1833 году. Именно тогда Майкл Фарадей, экспериментируя с сульфидом серебра, обнаружил, что проводимость данного вещества растет с повышением температуры, в противоположность проводимости металлов, которая в данном случае уменьшается. Следующей вехой в развитии твердотельной электроники стал 1874 год. Немецкий физик Фердинанд Браун, публикует статью в журнале *Analen der Physik und Chemie*, в которой на примере «естественных и искусственных серных металлов» описывает важнейшее свойство полупроводников – проводить электрический ток только в одном направлении. Выпрямляющее свойство контакта полупроводника с металлом противоречило закону Ома. Браун пытается объяснить наблюдаемое явление и проводит дальнейшие исследования, но безрезультатно. Явление есть, объяснения нет. По этой причине современники Брауна не заинтересовались его открытием, и только

пять десятилетий спустя выпрямляющие свойства полупроводников были использованы в детекторных приемниках [1].

Год 1906. Американский инженер Гринлиф Виттер Пикард получает патент на кристаллический детектор. Тонкий металлический проводник, с помощью которого осуществлялся контакт с поверхностью кристалла, внешне очень напоминал кошачий ус. Кристаллический детектор Пикарда так и стали называть – «кошачий ус» (cat's whisker).

Российский ученый Лосев О.В., приступая к экспериментам, ошибочно предполагал, что «в связи с тем, что некоторые контакты между металлом и кристаллом не подчиняются закону Ома, то вполне вероятно, что в колебательном контуре, подключенном к такому контакту, могут возникнуть незатухающие колебания» [2]. В то время уже было известно, что для самовозбуждения одной лишь нелинейности вольтамперной характеристики недостаточно, должен обязательно присутствовать падающий участок. Испытав больше количество кристаллических детекторов, Лосев О.В. выяснил, что лучше всего генерируют колебания кристаллы цинкита, подвергнутые специальной обработке. Для получения качественных материалов он разрабатывает технологию приготовления цинкита методом сплавления в электрической дуге естественных кристаллов.

1925 году корпорация American Telephone and Telegraph (AT&T) открывает научный и опытно-конструкторский центр Bell Telephone Laboratories. В 1936 году директор Bell Telephone Laboratories Мервин Келли решает сформировать группу ученых, которая провела бы серию исследований, направленных на замену ламповых усилителей полупроводниковыми [3]. Группу возглавил Джозеф Бекер, привлечший к работе физика-теоретика Уильяма Шокли и блестящего экспериментатора Уолтера Браттейна. В 1938 году, в рабочей тетради 26-летнего Шокли появляется первый набросок полупроводникового триода. От высоких напряжений и токов кристаллы взрывались, но не желали изменять свое сопротивление. Усиление сигнала возникает по другой причине. Во всех предыдущих оценках рассматривались только электроны, как основные носители тока в германиевом кристалле, а «дырки», которых было в миллионы раз меньше, естественно игнорировались. Бардин понял, что дело именно в «дырках». Введение «дырок» через один электрод (этот процесс называли инъекцией) вызывает неизмеримо больший ток в другом электроде. И все это на фоне неизменности состояния огромного количества электронов. Вот так, непредсказуемым образом, 19 декабря 1947 года на свет появился точечный транзистор [4].

Согласно квантовой теории электрон может иметь дискретные вполне определенные уровни энергии и поэтому может находиться только на определенных орбитах вращения вокруг ядра. Между этими орбитами

есть запрещенные зоны, на которых электрон не может находиться. Совокупность уровней образует энергетический спектр электронов в атоме.

В невозбужденном атоме электрон находится на ближайшей к ядру орбите. При поглощении атомом энергии электрон может перейти на более высокую орбиту или даже покинуть пределы атома, и атом превращается в ион.

Если атомы находятся на достаточно большом расстоянии, то они не влияют друг на друга и на энергетические уровни их электронов. Но если образуется система из близко лежащих атомов, то они влияют на энергетические уровни электронов. Рассмотрим систему из шести атомов. На расстоянии r_1 , для энергетического уровня E_1 и на r_2 для E_2 воздействие атомов незначительно и поэтому энергетические уровни не разделяются. При $r < r_1$ для E_1 и при $r < r_2$ для E_2 начинают сказываться влияния соседних атомов, и энергетические уровни превращаются в зоны из шести уровней. Однако на расстоянии r_0 они еще не сливаются, и между ними имеется запрещенная зона ΔE_3 . Сами энергетические зоны расширяются до ΔE_1 и ΔE_2 . После уменьшения r до r_3 зоны ΔE_1 и ΔE_2 расширяются так, что перерываются и запретная зона ΔE_3 исчезает [5].

При нормальной температуре окружающей среды и отсутствии внешних полей электроны внутри веществ могут находиться в двух зонах: валентной и в зоне проводимости. Между этими зонами находится запрещенная зона.

В зависимости от наличия и ширины зоны 3 материалы делятся на:

- проводники, у которых нет запрещенной зоны 3, и зоны валентная и проводимости перекрываются;
- диэлектрики, у которых запрещенная зона очень широкая;
- полупроводники, у которых запрещенная зона узкая.

Процесс занятия электроном определенного уровня является вероятностным и описывается распределением Ферми. Вероятность того, что электрон занимает определенный энергетический уровень при данной температуре, равна

$$P_n(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1}, \quad (1)$$

где E - данный энергетический уровень;

E_F - энергетический уровень Ферми;

k – постоянная Больцмана = $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град;

T – абсолютная температура.

Энергия уровня Ферми равна

$$E_F = E_v + \frac{\Delta E_3}{2} = E_c - \frac{\Delta E_3}{2} .$$

Вероятность того, что на уровне E находится дырка равна

$$P_p(E) = \frac{1}{e^{\frac{E_F - E}{kT}} + 1} .$$