

несколько процентов. Таким образом, общий вывод, который можно сделать из приведенных выше рассмотрений, сводится к тому, что благодаря эффекту экранирования влияния взаимодействия между электронами на свойства твердого тела оказывается сравнительно не существенным. Это особенно относится к электронам с энергией, близкой к энергии Ферми. У этих электронов всегда имеется возможность оттолкнуться от себя облако электронов и двигаться вместе с этой «негативной» или «дырочной» шубой.

Расчет показывает, что такое образование обладает значительным временем жизни. Это обстоятельство позволяет считать образование (электрон + облако) стабильной квазичастицей. Большое время жизни связано с принципом Паули, который мешает электронам, входящим в облако «шубу», изменять свое состояние. Появление подвижных квазичастиц тесно связано с тепловым возбуждением системы, когда в ней происходят переходы электронов в незаполненные состояния. Поэтому систему электронов при $T \neq 0$ можно рассматривать как электронную жидкость, в которой движутся элементарные тепловые возбуждения. Эти возбуждения (или квазичастицы) движутся независимо друг от друга, обладают зарядом ($-e$), массой m^* и спином $1/2$ и подчиняются статистике Ферми. Для краткости мы будем называть эти квазичастицы электронами.

Подчеркнем, что неучтенные факторы, например, дискретное распределение положительного заряда, не изменяет полученного качественного вывода.

Взаимодействие электрона (квазичастицы) с фононами, как мы увидим ниже, приводит к образованию вокруг него облака, «шубы» фононов, которое движется вместе с ним, изменяя его массу, так что $m^* \rightarrow m^{**}$. Взаимодействие между электронами непосредственно проявляется в ряде эффектов, например, в изменении скорости звука в металле по сравнению с диэлектриком. И тем не менее, характер этого взаимодействия показывает, почему модель идеального газа свободных электронов правильно передает основные свойства системы электронов в металлах. Экранирование существенно уменьшает взаимодействие между электронами. Главный эффект взаимодействия сводится к изменению эффективной массы.

§ 51. Модель металла, полупроводника и диэлектрика

Мы можем перейти теперь к обсуждению свойств системы электронов в твердом теле.

На основании результатов предыдущего параграфа при качественном описании поведения системы электронов ее можно заменить системой квазичастиц — фермионов. В дальнейшем мы

будем именовать их электронами, что, однако, не должно привести к недоразумению. Прямые измерения (см. ниже) позволяют определить число нелокализованных электронов в 1 см^3 . У так называемых «хороших» металлов, таких как металлы щелочных и щелочноземельных элементов, серебра, меди, золота и ряда других, число нелокализованных электронов в 1 см^3 примерно равно числу атомов, т. е. число таких электронов, приходящихся на один атом, равно единице.

У ряда металлов число «свободных» электронов, приходящихся на один атом, оказывается значительно меньшим единицы. Кроме того, проявляется существенная анизотропия, так что свойства системы электронов в разных кристаллографических направлениях оказываются различными. В виде примера можно привести висмут, обладающий резкой анизотропией в электрических и магнитных свойствах.

У неметаллов число «свободных» электронов на один атом оказывается столь малым, что система электрона образует невырожденный идеальный газ. Наконец, у ряда хороших диэлектриков, например, в NaCl или твердом кислороде, свободных электронов практически нет. Хотя плотность свободных электронов имеет решающее значение для поведения системы электронов в твердом теле, было бы неверным считать, что все различие между металлами, полупроводниками и изоляторами сводится к изменению этой характеристики и имеет количественный характер. В действительности оно имеет глубокий смысл. Это видно, например, из качественного различия в механизме электропроводности или в магнитных свойствах металлов, полупроводников и диэлектриков. Глубокое различие в их физических свойствах связано с разным характером энергетического спектра электронов.

Мы видели, что электронный спектр в кристалле имеет характер чередующихся зон дозволенных и недозволенных энергий. Напомним, что в каждой зоне дозволенных энергий имеется ограниченное число состояний. Именно, в ней имеется $2N$ состояний, где N — число элементарных ячеек в единице объема и множитель 2 связан с двумя электронами, заполняющими каждое состояние. Если все состояния зоны дозволенных энергий попарно заполнены электронами, то они не могут изменять состояние и переходить из одного состояния в другое под действием приложенного внешнего поля. Такое тело ведет себя как изолятор. Если же в дозволенной зоне только часть состояний заполнена электронами, то переходы между состояниями возможны и тело ведет себя как металл.

Рассмотрим схематически образование металла из разделенных невзаимодействующих атомов. Пусть в последних имеется один валентный электрон на верхнем уровне энергии. Это

состояние будет двукратно вырожденным, поскольку энергия электрона не зависит от ориентации его спина. В системе, состоящей из N независимых не взаимодействующих атомов, соответствующий уровень энергии будет $2N$ -кратно вырожденным. При сближении атомов и установлении взаимодействия между ними уровень распадается на $2N$ смежных уровней, образующих сплошную полосу. Половина этих уровней энергии будет

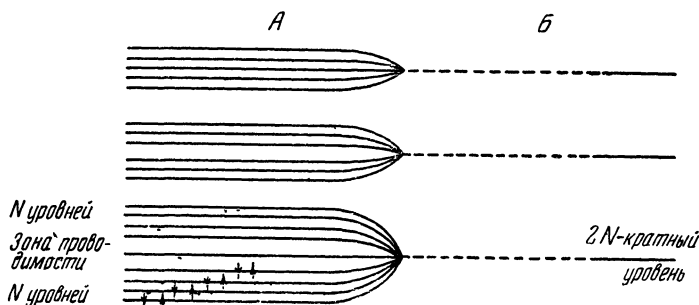


Рис. 45.

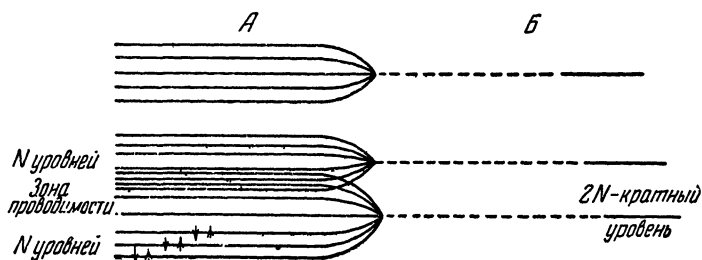


Рис. 46.

заполнена парами электронов, половина — свободна. Таким образом, нижняя полоса энергетических уровней, называемая зоной проводимости, возникает из нижних энергетических состояний валентного электрона. Возбужденные состояния валентного электрона, расщепляясь на большое число уровней, образуют другие зоны, не заполненные электронами (рис. 45). В некоторых случаях, изображенных на рис. 46, расширение полос так велико, что они перекрываются друг с другом. Между полосами дозволённых энергий лежат полосы недозволенных энергий. Образовавшийся кристалл будет обладать металлическими свойствами, поскольку незаполненные состояния непосредственно прилегают к заполненным состояниям. Такой случай имеет место у щелочных металлов, меди, серебра и некоторых других металлов.

Предположим теперь, что в атоме имеются два внешних электрона, находящихся в одном энергетическом состоянии с противоположно ориентированными спинами. Состояние электронов в атоме будет невырожденным. Соответствующее состояние системы из N невзаимодействующих атомов будет N -кратно вырожденным. При образовании кристалла оно распадается на N близких уровней, попарно заполненных электронами

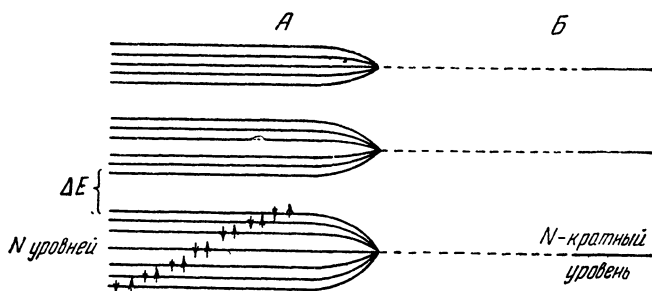


Рис. 47.

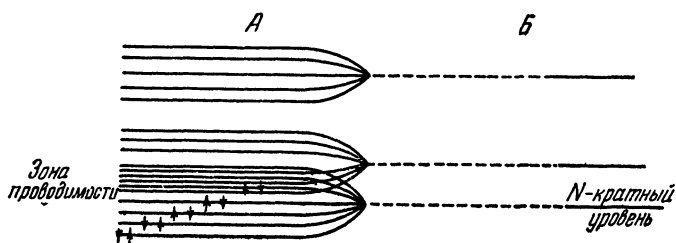


Рис. 48.

(рис. 47). Кристалл с таким расположением уровней является изолятором. В нем заполненные уровни энергии отделены от заполненных уровней областью недозволенных энергий с интервалом ΔE . Для того чтобы тепловое возбуждение могло перевести электрон из заполненного в незаполненное состояние, тепловая энергия должна быть порядка ΔE . То же относится и к возбуждению электронов электрическим полем. Значения соответствующей температуры или напряженности поля оказываются очень большими. При обычных температурах и полях электроны остаются на заполненных уровнях и не могут переносить тока. Таким образом, диэлектрик отличается от металла не общим числом электронов, а характером расположения полюс дозволенных энергий.

Однако из сказанного не следует делать вывод о том, что любые атомы с двумя внешними электронами образуют при своем объединении кристалл изолятора.

Помимо разобранных случаев, возможно также расположение полос, изображенное на рис. 48. Благодаря перекрыванию полос, возникающих из нормального и возбужденного состояний атома, незаполненная полоса непосредственно прилегает к заполненной. Вещество такого типа — металл. Подобными металлами являются щелочноземельные металлы, свинец и ряд других. Современная теория не позволяет заранее сказать, какой из этих двух случаев реализуется при объединении атомов с данными свойствами. Само собой разумеется, что разделение кристаллов на металлы и диэлектрики охватывает лишь два предельных случая. Вся гамма промежуточных свойств между металлами и диэлектриками заполняется полупроводниками. У последних ширина запрещенной зоны сравнительно мала и становится сравнимой с энергией теплового возбуждения при сравнительно невысоких температурах.

§ 52. Магнитные свойства металлов. Парамагнетизм электронного газа

Оказалось, что целый ряд важных результатов может быть получен из простейшей модели металла, в которой металл рассматривается как некоторый потенциальный ящик с бесконечно высокими стенками, заполненный газом свободных электронов.

В частности, эта грубая схема оказывается достаточной для описания тепловых свойств металлов.

Оказалось, что магнитные свойства металлов определяются в первую очередь поведением нелокализованных электронов. При этом взаимодействие электронов с решеткой оказывает сравнительно незначительное влияние на магнитные свойства металлов.

Рассмотрим поведение вырожденного электронного газа, помещенного в магнитное поле. Оказывается, что в такой системе проявляются два основных эффекта. Один из них связан с наличием у электронов спина, а второй — с квантованием орбитального движения электрона в магнитном поле. Мы начнем с первого эффекта.

При наложении внешнего магнитного поля возникает преимущественная ориентация спиновых магнитных моментов в поле. В результате этого в системе возникает намагничивание.

Для вычисления магнитной восприимчивости напишем прежде всего выражение для свободной энергии свободных электронов в магнитном поле.