

добиться успеха и в получении информации о квазичастичном взаимодействии из экспериментов по распространению высокочастотных электромагнитных волн в металлах [40].

Теория ферми-жидкости в состоянии дать однозначный ответ на вопрос: какие свойства связаны с взаимодействием между электронами, а какие нет? С ее помощью можно установить, как соотносятся друг с другом одноэлектронные характеристики, определяющие различные свойства системы. В то же время значительно более объемистая теоретико-полевая техника, применяемая в теории многих тел, едва ли способна дать нам большую информацию.

§ 7. АМОРФНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ [41]

Вернемся к рассмотрению аморфных полупроводников, о которых уже кратко упоминалось в п. 2 § 10 гл. II. Мы опишем модель их электронной структуры и увидим, как с помощью этой модели можно понять кинетические и оптические свойства этих веществ.

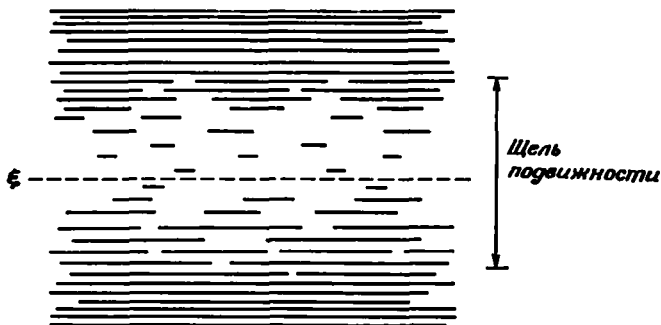
Представим себе сначала кристаллический полупроводник, в котором каждый атом окружен четырьмя соседями, расположенными в вершинах тетраэдра. Начнем затем вносить некоторое разупорядочение, оставляя, однако, в основном тетраэдрическую координацию.

С беспорядком неизбежно появятся атомы без тетраэдрического окружения, и можно представить себе, что у них останутся пустые или «болтающиеся» связи, которые приводят к возникновению ловушек в запрещенной зоне. Весьма вероятно, что такие ошибки в расположении могут вызывать появление локализованных состояний в запрещенной зоне, отщепляющихся от валентной зоны. Энергии этих состояний будут зависеть от деталей локальной структуры, и поэтому эти состояния будут распределены по всей запрещенной зоне, хотя в основном они будут сосредоточены по соседству с краями валентной зоны и зоны проводимости. Ясно, что состояния, которые ближе всех лежат к центру запрещенной зоны, должны быть наиболее локализованными; те же состояния, которые лежат вблизи краев зоны, должны быть более протяженными. Можно ожидать, что при увеличении беспорядка в конечном счете возникнет система, подобная той, которая схематически показана на фиг. 109.

Резонно полагать, что имеется достаточно электронов для того, чтобы заполнить все состояния с энергиями, лежащими вплоть до середины бывшей запрещенной зоны. Здесь плотность уровней — а эти уровни хорошо локализованы — может быть довольно низкой, но отличной от нуля. Таким образом, даже если в такой материал добавлены примеси, уровень Ферми лишь слегка сместится, оставаясь в той области энергий, где все состояния локализованные.

Это связано с тем фактом, что аморфные полупроводники оказываются собственными, даже если они легированы.

Каким образом осуществляется проводимость такой системы, можно понять из следующих соображений. Вклад в проводимость дают только те электроны, которые находятся в нелокализованных состояниях, расположенных над энергией Ферми, равно как и дырки, расположенные под энергией Ферми. Заселенность этих уровней определяется функцией Ферми так же, как это было бы



Ф и г. 109. Схематическая диаграмма энергетических уровней аморфного полупроводника.

Энергетическая щель в кристаллическом полупроводнике заменяется энергетической областью, в которой уровни имеют малую плотность и соответствующие им состояния локализованы; большой локализации отвечают более короткие линии. При низких температурах состояния ниже энергии Ферми ξ заняты, а состояния выше энергии Ферми пусты. Вклад в проводимость могут давать лишь те электроны или дырки, которые термически возбуждаются на уровни, соответствующие распространяющимся электронам, т. е. на те уровни, которые лежат над щелью подвижности.

в отсутствие большого числа локализованных ловушек, и проводимость поэтому близка к проводимости собственного кристаллического полупроводника с энергетической щелью, равной щели подвижности, т. е. щели, отделяющей распространяющиеся состояния от локализованных (показана на фиг. 109). При обычных температурах эта проводимость очень мала.

Хотя мы видели, что поднять проводимость с помощью легирования невозможно, этого можно достичь путем инжектирования большого числа электронов (или дырок), приложив, например, большое напряжение к металлическим контактам на аморфном полупроводнике. Если напряжение затем уменьшить, электроны упадут с проводящих состояний в вышележащие ловушки, и впоследствии их легко будет возбудить снова в проводящие состояния. Эта неравновесная ситуация может привести к такому же сильному заселению состояний вблизи верхнего края щели подвижности, как если бы уровень Ферми поднялся в эту область. Данные соображения есть, по сути дела, интерпретация *эффекта Овшинского*, представляющего собой увеличение проводимости аморфных полупроводников после приложения к ним импульса напряжения.

Можно рассмотреть еще одно свойство аморфных полупроводников — их оптическое поглощение. Ввиду того что уровни распределены по всем энергиям, нельзя ожидать ни прозрачности при низких частотах, ни края поглощения, характерного для кристаллических полупроводников. Однако экспериментально найдено, что оптические свойства аморфных полупроводников очень близки к свойствам кристаллических полупроводников. Это обстоятельство также можно понять в рамках построенной нами модели. Заметим, что, хотя сразу же под энергией Ферми и есть занятые, а чуть выше ее — свободные состояния, и те и другие сильно локализованы и обычно в кристалле их волновые функции не перекрываются. Таким образом, сила осциллятора для поглощения между такими уровнями будет равна нулю просто из-за отсутствия перекрытия начальной и конечной волновых функций. Поэтому очень маловероятно найти незанятые состояния, перекрывающиеся с данным локализованным состоянием чуть ниже уровня Ферми, за исключением незанятых состояний с достаточно высокой энергией и, следовательно, делокализованных, т. е. лежащих вблизи верхнего края щели подвижности. Подобным же образом весьма маловероятно возбуждение электронов на локализованные незанятые состояния с заполненных состояний, не лежащих вблизи нижнего края щели подвижности. Таким образом, в обоих случаях можно говорить об очень маленьком поглощении, за исключением области частот, больших или равных половине щели подвижности. Тот факт, что наблюдаемый край поглощения очень резкий, наводит на мысль, что очень резкий и переход по энергиям от локализованных состояний к делокализованным состояниям как у верхнего, так и у нижнего края щели подвижности.

Эта картина электронной структуры аморфных полупроводников кажется весьма правдоподобной. Она очень сильно отличается от электронной структуры кристаллических полупроводников. Удивительно, что, несмотря на столь большое их отличие, свойства этих систем очень схожи. Большое внимание, уделяемое в настоящее время проблеме аморфных полупроводников, связано с возможностью использовать эффект Овшинского для построения переключающих устройств.

ЗАДАЧИ

1. а. Рассмотрите полупроводник с шириной запрещенной зоны, равной Δ , и параболическими электронной и дырочной зонами с эффективными массами m_e и m_h соответственно. Разложив должным образом функцию распределения Ферми, получите энергию Ферми как функцию температуры. Обратите внимание на направление сдвига энергии Ферми с изменением T , если $m_h > m_e$.

б. Пусть в полупроводник добавлены донорные атомы малой концентрации. Получите энергию Ферми в пределе сначала низких, а затем высоких температур ($m_e = m_h$). (Возбужденные донорные состояния можно не рассматривать.) Вероятно, что вам удастся предсказать результат без вычислений.