

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию
Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

Физика твердого тела

Учебное пособие

Под редакцией
д-ра физ.-мат. наук, проф. А.С. Рудого,
д-ра физ.-мат. наук, проф. А.В. Проказникова

Рекомендовано
Научно-методическим советом университета
для студентов, обучающихся по специальности
Микроэлектроника и полупроводниковые приборы

Ярославль 2009

УДК 539.2
ББК В37я73
Ф 50

*Рекомендовано
Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного издания. План 2009 года*

Научные редакторы:
д-р физ.-мат. наук, проф. А. С. Рудый,
д-р физ.-мат. наук, проф. А. В. Проказников

Авторский коллектив:
Раздел 1, 2 – канд. физ.-мат. наук, доц. Н. А. Рудь
Раздел 3, 4 – д-р физ.-мат. наук, проф. И. А. Кузнецова
Раздел 5 – д-р физ.-мат. наук, проф. А. С. Рудый,
канд. физ.-мат. наук, доц. О. С. Трушин

Рецензенты:
В. И. Бачурин, д-р физ.-мат. наук, проф.;
Физико-технологический институт РАИ (Ярославский филиал)

Ф 50 **Физика твердого тела** : учеб. пособие / под. ред. А. С. Рудого,
А. В. Проказникова ; Яросл. гос. ун-т. – Ярославль : ЯрГУ, 2009. – 260 с.
ISBN 978-5-8397-0704-7

Физика твердого тела представляет собой стремительно развивающуюся область, имеющую широкий спектр практических приложений. В последние годы эта область привлекает к себе пристальное внимание благодаря ярким результатам, отмеченным Нобелевскими премиями. В настоящей работе коллективом ученых ЯрГУ им. П. Г. Демидова представлены разделы современной физики конденсированного состояния, включающие как традиционное изложение, так и описание явлений в низкоразмерных структурах.

Работа предназначена для студентов, обучающихся по специальности 010803 Микроэлектроника и полупроводниковые приборы (дисциплина "Физика твердого тела", блок ОПД), очной формы обучения, а также для аспирантов, специализирующихся в областях микро- и нанoeлектроники и физики твердого тела.

УДК 539.2
ББК В37я73

ISBN 978-5-8397-0704-7

© Ярославский государственный
университет им. П.Г. Демидова, 2009

ПРЕДИСЛОВИЕ

Физика твердого тела представляет собой один из важнейших разделов современной физики, который исследует строение, свойства твердых тел и происходящие в них физические явления. Вследствие успехов этого направления физики стало возможным стремительное развитие квантовой электроники, полупроводниковой техники, а также весомые достижения в области создания материалов с уникальными физическими свойствами, определяющие в значительной степени важнейшие направления научно-технического прогресса нашей планеты. Неудивительно поэтому, что примерно половина всех физиков мира – исследователей и инженеров – занимаются теми или иными вопросами физики твердого тела. Большой вклад в развитие физики твердого тела, наряду с зарубежными учёными, внесли наши соотечественники: Я.И.Френкель, Л.В. Ландау, В.Л. Гинзбург, А.В. Шубников, Н.В. Белов, Н.Н. Боголюбов и многие другие. При достаточно низких температурах практически все вещества находятся в твердом состоянии. Под твердым телом понимают такое состояние вещества, которое обладает некоторой жесткостью по отношению к сдвигу.

Твердые тела можно классифицировать в соответствии с различными критериями. Среди более важных из них – разделение твердых тел на *кристаллические* и *некристаллические (аморфные, неупорядоченные)*. До конца 50-х годов двадцатого столетия в физике твердого тела уделялось значительно больше внимания кристаллам, чем аморфным телам, изучение которых представляет собой более сложную задачу.

В окружающем нас мире имеется огромное количество веществ в кристаллическом состоянии, которым присущи многие весьма разнообразные свойства, определяемые как различным внутренним строением, так и природой атомов, входящих в их состав. *Особенностью строения кристаллических веществ является наличие так называемого «дальнего» порядка – корреляции во взаимном расположении атомов (молекул) на расстояниях много больших, чем средние межатомные расстояния.* Такая корреляция обусловлена динамическим равновесием многих сил или процессов, возникающих при взаимодействии атомов и имеющих специфическое строение электронных оболочек. В состоянии такого равновесия атомы (молекулы) располагаются упорядоченно, образуя симметричный, периодически повторяющийся в пространстве узор, характерный для данного кристалла. Указанное равновесие может нарушаться за счет дефектов структуры – точечных дефектов, дислокаций, пустот, частиц другой фазы, включений. Многие свойства реальных кристаллов: ионная и примесная электропроводность, фотопроводимость, люминесценция, прочность и пластичность, окраска, диффузия и многие другие – являются структурно-чувствительными, т. е. зависят от дефектов структуры. Это открывает чрезвычайно широкие возможности управления свойствами твердых тел, используемых в различных областях современной твердотельной электроники.

Существование металлов, полупроводников и диэлектриков, как известно, объясняется зонной теорией твердых тел, которая полностью основана на существовании в твердом теле дальнего порядка (кристаллической решетки). Аморфные тела проявляют главным образом *ближний порядок* в связях между ближайшими соседями, а не дальний порядок, присущий кристаллической решетке. Макроскопическая особенность веществ в аморфном состоянии – естественная изотропия их свойств. Открытие того, что аморфные вещества могут обладать теми же электрическими свойствами,

что и кристаллические, привело к переоценке роли периодичности. В 1960 г. А.Ф. Иоффе и А.Р. Регель высказали предположение, что электрические свойства аморфных полупроводников определяются не дальним, а ближним порядком. На основе этой идеи была развита теория неупорядоченных материалов (Н. Мотт, Э. Дэвис, Б. Т. Коломиец, А.И. Губанов, В.Л. Бонч-Бруевич и др.), которая позволила понять многие свойства некристаллических веществ.

Кристаллические твердые вещества встречаются в виде отдельных одиночных кристаллов – монокристаллов – и в виде поликристаллов, представляющих собой скопления беспорядочно ориентированных мелких кристалликов – кристаллитов (зерен).

Микроскопические и рентгеноструктурные исследования реальных монокристаллов показывают, что они редко имеют идеальное строение. Обычно им присуще мозаичная структура. Весь монокристалл в этом случае разбит на так называемые блоки мозаики размером около 10^{-6} м, которые слегка разориентированы друг относительно друга (угол максимальной разориентации нормалей к плоскостям блоков составляет для различных монокристаллов от $10''$ до $15''$). В поликристаллах кристаллиты (зерна) часто по строению очень близки к монокристаллам, например кристаллиты рекристаллизованных металлов. Кристаллиты также разбиваются на блоки мозаики размером порядка 10^{-6} м. Каждый блок мозаики имеет почти идеальную структуру, но блоки расположены не в один ряд, а повернуты друг относительно друга на углы от нескольких минут до нескольких градусов.

Вследствие того что в структуре кристалла в разных направлениях различны расстояния и силы связи между частицами, большинство свойств кристалла анизотропны, т. е. различны в разных направлениях, но одинаковы в направлениях, симметричных друг другу. Например, слюда легко расщепляется на параллельные листочки, но только вдоль плоскостей с одной определенной ориентацией, а вдоль других плоскостей расщепить ее не удастся.

Анизотропной является и скорость роста кристалла. Если бы скорость роста была изотропной, кристалл вырос бы в форме шара. Именно вследствие того, что скорость роста кристалла различна в разных направлениях и что эти различия симметричны в пространстве, кристалл вырастает в форме симметричных правильных многогранников. Внешняя форма кристалла отражает анизотропию и симметрию его скоростей роста.

В свою очередь, анизотропия скоростей роста определяется структурой кристалла. Поэтому природная многогранная форма наглядно характеризует закономерность структуры кристалла и позволяет судить о симметрии его свойств.

Первые представления о структуре кристалла были сформулированы еще в XVIII и XIX вв., задолго до открытия дифракции рентгеновских лучей, только на основании изучения симметрии природных многогранников.

Итак, симметрия, периодичность и закономерность структуры – основные характеристики кристаллического состояния вещества.

Целью настоящего учебного пособия является систематическое изложение основ физики твердого тела, включающих общие представления о строении кристаллов и аморфных веществ, методах исследования структуры, а также различных физических свойствах – тепловых, магнитных, сверхпроводящих и др.

ГЛАВА I. ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

РАЗДЕЛ 1. ОСНОВЫ КРИСТАЛЛОГРАФИИ

1.1. ГЕОМЕТРИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Понятие *кристалл* используется для обозначения весьма разнообразных объектов реального мира (алмаза, изумруда, рубина, топаза, турмалина, гранатов, опала, природных минералов, материалов микроэлектронной техники), абстракций теоретической физики (ионного, молекулярного, металлического кристаллов) и даже встречается в поэтических образах.

Слово «кристалл» происходит от древнегреческого слова *κρυσταλλος*, которым называли лед. В Древнем Риме этим же словом называли также блестящие куски кварца (SiO_2 см. рис. 1.1), которые находили в Альпах. Римляне полагали, что эти сверкающие камни кварца представляют собой воду, которая застыла навечно под действием сильнейшего мороза, царящего на вершинах снежных гор. Когда первые естествоиспытатели обнаружили, что раствор соли, испаряясь, оставляет множество сверкающих кубиков, они их приняли за еще одну форму затвердевшей воды и назвали ее уже известным словом «кристалл» [1, 2].

В природе кристаллы встречаются в виде красивых, правильных многогранников с плоскими гранями и прямыми ребрами (см. рис. 1.1, 1.2). Симметрия и правильность внешней формы природных кристаллических многогранников издавна привлекала внимание людей. Однако правильность и симметрия внешней формы характерны, но не обязательны для кристалла и зависят от условий их роста. В заводских и лабораторных условиях чаще выращивают кристаллы не многогранные, но их свойства от этого не изменяются. Из природных и искусственно выращенных кристаллов вырезают пластинки, призмы, стержни, линзы, в которых уже нет следов внешней многогранной формы кристалла, однако сохраняется удивительная симметрия структуры и свойств кристаллического вещества.

Множество экспериментов, проводимых с использованием природных и искусственно выращенных кристаллических образцов, позволяют сформулировать некоторые общие свойства кристаллов. Прежде всего, кристаллы обладают *атомарным строением*. Структурными единицами этих тел являются атомы, ионы, молекулы. При этом атомы кристалла находятся друг с другом в химической связи. Кристалл представляет собой одну из форм *конденсированного состояния вещества*.

Следующим важнейшим свойством кристаллов является *однородность*, которая проявляется в том, что их части, линейные размеры которых много больше кратчайшего межатомного расстояния (порядка 10^{-10} м), обладают одинаковыми физическими свойствами вне зависимости от того, из какой области тела вырезана эта часть.

Далее, кристаллы отличаются *анизотропией* – неодинаковостью физических свойств в разных направлениях. Именно анизотропия определяет такие специфические свойства кристаллов, как пьезоэффект, двойное лучепреломление света, явления пиро- и сегнетоэлектричества (об этих свойствах кристаллов будет изложено в разделе 1.2) и многие другие. Опыт показывает, что если поместить обломок или пластинку из