

БИБЛИОГРАФИЯ

530.145(049.3)

УЧЕБНЫЙ КУРС ПО ТЕОРИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Вонсовский С. В., Кацнельсон М. И. Квантовая физика твердого тела. — М.: Наука, 1983. — 336 с.

В последние два десятилетия опубликовано немало специальных книг по физике твердого тела. И все же появление хорошего достаточно подробного учебного курса по теории твердого тела следует приветствовать. Именно таким курсом, на наш взгляд, является недавно вышедшая книга С. В. Вонсовского и М. И. Кацнельсона «Квантовая физика твердого тела». Она удовлетворяет главным требованиям, которые можно предъявить к учебному пособию. Из всего многообразия идей и фактов авторы отобрали основные, наиболее важные и изложили их в стройной логической последовательности.

Поскольку пока не существует строгой теории твердого тела «из первых принципов», т. е. теории, в которой все свойства твердого тела выводились бы из свойств составляющих их атомов, авторы отказались от дедуктивного метода изложения, а применили метод, основанный на анализе экспериментально установленных закономерностей с помощью соответствующих физических моделей.

Монография С. В. Вонсовского и М. И. Кацнельсона заметно отличается по характеру изложения от большинства монографий и учебников, посвященных физике твердого тела (Ч. Киттеля, Дж. Займана, У. Харрисона и др.). Материал группируется не по свойствам (магнетизм, оптика, явление переноса и т. д.), а по «концепциям»: свободные электроны — широкий круг свойств, трудности и необходимость перехода к более строгой теории; затем зонная модель, снова трудности и переход к многоэлектронной теории и т. д. Такое изложение в известном смысле повторяет историю развития предмета и, несомненно, очень полезно для начинающих изучение теории твердого тела.

Наряду с детальным рассмотрением ряда классических проблем (уравнение Шрёдингера с периодическим потенциалом для одномерного случая, приближение Хартри — Фока и др.) в книге изложены и более современные вопросы: элементы теории псевдопотенциала, плазменные и ферми-жидкостные эффекты, рассеяние нейтронов кристаллической решеткой и другие.

Через всю книгу проводится концепция элементарных возбуждений (квазичастиц) и рассмотрен широкий круг их: фононы, электроны проводимости, плазмоны, магноны, экситоны, поляроны. Рассмотрение постоянно ведется в рамках наиболее простых моделей, в которых эффект или свойство вообще существуют (за небольшими исключениями, например в задаче о куперовских парах). Этого, по-видимому, вполне достаточно, чтобы сформировать у читателя необходимую основу для дальнейшего более глубокого изучения теории твердого тела с учетом реального энергетического спектра и реальных механизмов взаимодействия квазичастиц. Именно поэтому авторы сконцентрировали внимание на общих свойствах твердых тел. Так, например, кинетические явления рассматриваются только для квадратичного закона дисперсии, но зато очень подробно. Полностью, до числа, решаются некоторые простые одномерные задачи в разделе о зонной теории, детально рассматривается простейшая модель пустой решетки (предельный случай бесконечно малого кристаллического потенциала).

Авторы всюду, где это возможно, стараются не создавать впечатления полной завершенности теории твердого тела, хотя речь идет о достаточно устоявшихся вопросах. В книгу, например, включено рассмотрение, пусть конспективное, важнейшей проблемы перехода Мотта, неоднократно подчеркивается возможная неадекватность зонной теории применительно к соединениям переходных и редкоземельных металлов.

Хотелось бы отметить и ряд других, более частных особенностей монографии. Подробнее, чем в других аналогичных книгах, рассмотрен вопрос о рассеянии микрочастиц — нейтронов, электронов, фотонов — на кристаллической решетке. В этом разделе в связи с задачей о факторе Дебая — Валлера, проводится весьма полный анализ свойств вторично квантованных операторов для статистики Бозе и правил обращения с ними. В разделе о свойствах нормальных металлов (гл. 3) разобрано чуть ли не все, что имеет смысл рас-

считать в модели свободных электронов (даже, например, поверхностный плазмон, который ранее в таких монографиях не рассматривался). Необычно много внимания уделено в этом разделе историческому материалу от опытов Рике до теории «блуждающих электронов» Френкеля. Это безусловно способствует лучшему пониманию роли квантовой механики в теории твердого тела и позволяет увидеть все то новое, что она внесла в эту теорию.

В разделе о зонной теории проводится очень подробный разбор одномерного случая, который описан только в таких старых книгах по физике твердого тела, как книги Ф. Зейтца и А. Вильсона. В этой же главе излагается теория влияния постоянного электрического поля на блоховские состояния, дается вывод эффективного гамильтониана для электрона в магнитном поле по Пайерлсу, который в монографиях до сих пор не приводился.

В разделе о многочастичных эффектах довольно подробно описывается вопрос о плазмоне, причем оригинально в методическом отношении рассмотрено затухание Ландау. В параграф о теории ферми-жидкости включен не очень традиционный материал о кинетическом уравнении для квазичастиц. Задача Купера о переходе электронной системы в результате электрон-фононного взаимодействия в сверхпроводящее состояние решается с учетом кулоновского отталкивания. Очень ясно изложена модель Гейзенберга для d -электронов переходных металлов.

Книга С. В. Вонсовского и М. И. Кацнельсона адресована читателю, желающему ознакомиться с основами теории твердого тела и конденсированного состояния вещества вообще. Для чтения книги достаточно знания лишь основ квантовой и статистической механики. Математический аппарат излагается, как правило, в связи с конкретными задачами, в которых он используется. Так, функции Грина вводятся (и описываются, как ими пользоваться) на примере задачи о локализации электрона на примеси; метод вторичного квантования излагается в связи с проблемой рассеяния нейтронов на фононах. Выкладки описаны очень подробно, и можно думать, что книга будет доступна не только физикам-экспериментаторам, на кого она главным образом рассчитана, но и специалистам смежных наук, а также аспирантам и студентам, желающим войти в курс проблем теории твердого тела и ознакомиться с соответствующим математическим аппаратом.

Естественно, что в книге такого охвата некоторые вопросы, в особенности такие, в которых требуется учет многочастичных эффектов, излагаются сжато, поскольку очень трудно найти упрощенный вариант математического аппарата. В таких случаях авторы ограничиваются изложением простых моделей и качественными рассуждениями.

В целом книга оставляет очень хорошее впечатление — ее отличает физичность и ясность. Изложение устоявшегося в общем разделе теоретической физики получилось свежим и нестандартным.

А. А. Абрикосов, И. М. Цидильковский

532(049.3)

МЕТОДЫ КОРРЕЛЯЦИИ ФОТОНОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В МЕХАНИКЕ ЖИДКОСТЕЙ

Photon Correlation Techniques in Fluid Mechanics/ Ed. E. O. Schultz-DuBois. — Berlin; Heidelberg; New York; Tokyo: Springer-Verlag, 1983. — 399 p. — (Springer Series in Optical Sciences. V. 38).

В 38-м томе серии «Оптика», выпускаемой издательством Шпрингера, собраны доклады, представленные на Пятой Международной конференции по методам корреляции фотонов и их применениям в механике жидкостей, которая проходила с 23 по 26 мая 1982 г. в Киле — Дэмпе (ФРГ).

Методы корреляции фотонов широко применяются в настоящее время при исследовании процессов рассеяния света, приводящих к сдвигам частоты рассеянного излучения или уширению его линии в диапазоне от нескольких Гц до десятков и сотен МГц. В рамках этого метода рассеянный свет регистрируется в режиме счета фотонов. Выходной сигнал фотоприемника в виде последовательности одноэлектронных импульсов обрабатывается в реальном масштабе времени с помощью цифрового коррелятора. Полученная автокорреляционная функция фотоотсчетов содержит искомую спектральную информацию, которая может быть представлена в явном виде с помощью подходящих алгоритмов.

Многие аспекты теории и приложений метода корреляции фотонов обсуждались ранее на летних школах 1973 и 1976 гг. на Капри (Италия), а также на четырех предыдущих международных конференциях, проходивших в 1977 г. в Англии, в 1978 г. в Швеции, в 1979 г. в Англии и в 1980 г. в США.

В данном томе содержится 43 доклада, тематика которых охватывает все важнейшие аспекты метода корреляции фотонов и многие типичные его применения.

Открывается сборник вводной статьей его редактора Е. О. Шульца-Дюбуа «Интерферометрия интенсивности и корреляция фотонов». В ней изложены теоретические основы метода (теорема Винера — Хинчина, соотношение Зигерта, формула Мандела и др.),

принципы работы корреляторов и структураторов. В качестве примеров применения метода описаны определение диаметров звезд с помощью интерферометров Ханбьюри-Брауна и Твисса, определение скорости потоков с помощью лазерных доплеровских анемометров, определение коэффициентов диффузии броуновских частиц. В заключение приводятся оценки оптимальных условий применимости метода (временное разрешение — от нескольких нс до нескольких мс, интенсивность регистрируемого света — от 10^8 фотон/с до 10^4 фотон/с). Перечислены возможности применения цифровых корреляторов для обработки не одноэлектронных импульсов, а сигналов другой природы, например последовательных значений накопленного за определенные промежутки времени заряда.

Все остальное содержание тома разделено на три части. В первой части «Фотон-корреляционная анемометрия: возможности метода и избранные примеры технических приложений» содержится 20 статей. В обзоре Дж. Аббиса изложены теоретические аспекты метода корреляции фотонов в приложении к широко распространённым доплеровским анемометрам, построенным по дифференциальной схеме. Получены и подробно проанализированы математические выражения для рассеянного поля и автокорреляционной функции сигнала в случаях ламинарного и турбулентного потока, в частности при одночастичном режиме измерений и наличии фоновой засветки. В статье Р. Брауна на основе данных эксперимента и моделирования сигналов доплеровских и времяпролетных анемометров обсуждаются предельные возможности этих приборов с точки зрения точности и адекватности информации, получаемой из экспериментальных коррелограмм. Ряд статей посвящен применению метода к исследованию турбулентных потоков. Практически важными представляются работы, в которых описан опыт применения лазерных анемометров в сложных условиях морского плавания.

Следует специально выделить работы, посвященные методам дистанционного лазерного зондирования атмосферы для измерения скорости ветра. В статье Л. Даниельсона и Э. Р. Пайка проведено сравнение систем, работающих в видимом и ИК диапазонах, с точки зрения их дистанционности, пространственного разрешения, числа измеряемых компонент вектора скорости, сложности юстировки, стоимости и др. Приведены схемы некоторых конкретных работающих систем главным образом видимого диапазона (в ИК диапазоне метод корреляции фотонов не используется), позволяющих проводить надежные измерения скорости ветра при рассеянии от естественного аэрозоля на расстояниях порядка сотни метров. В статье Ф. Дёрста и Дж. Рихтера описана передвижная лазерная система для дистанционного измерения скорости ветра, построенная на базе непрерывного лазера видимого диапазона. Приведены примеры сигналов, зарегистрированных с расстояния 106 м. Сравнение результатов, полученных на этой системе и с помощью акустического анемометра, показывает их хорошее совпадение.

Несколько работ посвящено анализу сигналов и применению двухлучевых времяпролетных анемометров. Показано, что с их помощью можно проводить измерения скорости и параметров турбулентности с высокой точностью.

В статьях С. Хансона, а также Ц. Кевелоха и У. Штауде описаны методы и системы для прямого измерения градиентов скорости потоков.

Во второй части книги обсуждаются альтернативные схемы обработки одноэлектронных сигналов, в частности с помощью структураторов, а также возможности обработки сигналов, отличных от одноэлектронных импульсов. Так, в статье К. Шатцеля предлагается обобщенный подход, позволяющий охватить с единых позиций различные корреляционные методы обработки оптических сигналов: корреляцию фотонов, корреляцию скорости поступления импульсов (не обязательно одноэлектронных), корреляцию фазы. Сформулированы критерии, которым должны удовлетворять дискретные выборки сигнала, чтобы временная функция совпадала с корреляционной функцией дискретных отсчетов. Замена корреляционных функций структурными функциями позволяет уменьшить влияние низкочастотных шумов и трендов.

Отдельные статьи посвящены цифровым методам обработки корреляции фазы, например при изучении пропанового пламени как глубокого фазового экрана или обработки корреляции шпирен-картины в трансзвуковом потоке воздуха.

В третьей части книги обсуждаются проблемы применения фотон-корреляционной спектроскопии к исследованию броуновского движения, в частности к анализу полидисперсности и изучению динамики взаимодействующих частиц. Критический обзор существующих методов анализа полидисперсности по экспериментальным коррелограммам и их практического применения для получения распределений частиц по размерам дан в статье Н. Островской и Д. Сорнет. Далее в нескольких работах обсуждаются частные алгоритмы решения этой некорректной задачи: регуляризация, итеративные процедуры и пр.

В статье П. Пьюзи дан обзор современного состояния исследований взаимодействующих броуновских частиц. В других работах более подробно рассматриваются такие процессы, как полимеризация фибрина при коагуляции крови, движение смешанных мицелл, агрегация латексных сфер и пр.

В статье Г. Хиллера и Ж. Симонсона описан эксперимент по измерению коэффициента тепловой диффузии в чистой жидкости вдали от критической точки. В этом случае регистрируется рэлеевское рассеяние на флуктуациях энтропии. Показано, что измерение кросс-корреляционной функции фотоотсчетов двух фотоумножителей позволяет точно

определить коэффициент теплопроводности, не вводя макроскопического градиента температуры.

В работе Дж. Донта рассмотрено влияние многократного рассеяния Рэлея — Ганса — Дебая в коллоидных системах на вид получаемых корреляционных функций. Предложена итеративная схема, позволяющая привести экспериментальные данные к случаю однократного рассеяния при условии, что корректируются только эффекты двукратного рассеяния.

В заключительной статье П. Каска и др. обсуждаются проблемы и некоторые результаты использования флюоресцентной корреляционной спектроскопии. В связи с тем, что флюоресцентная эмиссия некогерентна, приходится работать с очень малыми измерительными объемами, чтобы регистрировать флуктуации числа флюоресцирующих молекул. Другое необходимое условие состоит в фотохимической стабильности красителя. Сложности выполнения этих требований являются причинами того, что флюоресцентная корреляционная спектроскопия не получила еще большого распространения.

Следует отметить, что тот факт, что в рецензируемом сборнике представлена лишь одна работа, посвященная биологическим применениям фотон-корреляционной спектроскопии, не отражает истинного интереса к этому направлению. С каждым годом растет число исследований, проводимых с целью изучения диффузионной и структурной подвижности, а также взаимодействия важнейших биологических макромолекул, вирусов, клеток и их комплексов, подвижных микроорганизмов (бактерий, ресничных и жгутиковых простейших, сперматозоидов), биологических мембран, подвижности цитоплазмы и отдельных органоидов внутри живой клетки и пр. Многие из этих вопросов обсуждались на конференции, специально посвященной применению методов лазерного светорассеяния для исследования биологической подвижности, проходившей в Маратеа (Италия) в 1982 г.

В остальном сборник дает истинное представление о потенциальных возможностях и последних достижениях в обсуждаемой области, а также о географии проводимых исследований.

Рецензируемый сборник очень хорошо оформлен, прекрасно иллюстрирован. Знакомство с ним, наверняка, будет полезным как для начинающих интересоваться данным направлением, так и для исследователей, активно работающих в сфере лазерного светорассеяния и его приложений.

А. В. Приезжев

621.315.592(049.3)

ТОЧЕЧНЫЕ ДЕФЕКТЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Bourgoin J., Lannoo M. Point Defects in Semiconductors. II: Experimental Aspects/Ed. M. Cardona.— Berlin; Heidelberg; New York; Tokyo: Springer-Verlag, 1983.— 295 p.— (Springer Series in Solid State Sciences. V. 35).

Книга французских физиков Ж. Бургуана и М. Ланноо является второй частью двухтомника, посвященного свойствам точечных дефектов в полупроводниках. Первая часть, имеющая подзаголовок «теоретические аспекты», вышла в той же серии издательства «Шпрингер-ферлаг» в 1981 г. (том 22, 265 стр.).

Двухтомник Ж. Бургуана и М. Ланноо — первый систематический учебный курс по точечным дефектам в полупроводниках. Еще несколько лет назад появление такого учебника было бы, пожалуй, преждевременным, поскольку отсутствовало понимание природы и структуры так называемых «глубоких центров» в полупроводниках. Однако успехи последних лет в расчетах таких центров сделали не только возможным, но и необходимым изложение современных представлений о точечных дефектах на уровне учебника.

В книгах Ж. Бургуана и М. Ланноо изложение материала, предельно ясное и четкое, нацелено прежде всего на выявление физических принципов. Это дало авторам возможность описать практически все основные представления физики точечных дефектов в полупроводниках в рамках разумного объема двухтомника. По своему уровню книги вполне доступны студентам старших курсов, а по объему — специалистам, желающим получить представление о современном уровне знаний о точечных дефектах в полупроводниках. Последние, как правило, вынуждены выуживать достаточно простые идеи теории дефектов из лухлых монографий, где они погребены под массой ненужных подробностей.

Итак, второй том учебника Ж. Бургуана и М. Ланноо посвящен наблюдаемым характеристикам точечных дефектов. Изложенные в первом томе квантовомеханические представления о структуре дефектов используются здесь для расчета их свойств.

Прежде всего, подробно рассмотрено взаимодействие дефекта с окружающей кристаллической решеткой и эффект Яна — Теллера. Влияние искажения решетки на энергетический спектр реального глубокого центра проиллюстрировано на примере вакансии в кремнии. Вообще, в книге рассматриваются почти исключительно дефекты в алмазоподобных полупроводниках. Для учебника такое ограничение вполне оправдано, тем более что этот класс материалов исследован наиболее полно. Главным образом обсуждают-

ся дефекты с глубокими уровнями (лишь одна глава первого тома посвящена методу эффективной массы).

Каждая из последующих глав второй книги является, по существу, изложением теоретических основ различных экспериментальных методов исследования точечных дефектов:

- (3) Электронный парамагнитный резонанс
- (4) Оптические свойства
- (5) Явления переноса в электрическом поле
- (6) Выброс, захват и рекомбинация носителей
- (7) Некоторые другие методы (фотовозбуждение, оптическое детектирование парамагнитного резонанса и др.)
- (8) Радиационные дефекты
- (9) Отжиг дефектов

Модельные расчеты характеристик спинового резонанса, сечений оптического поглощения, формы линии и т. д. удачно дополняются теорией и экспериментальными данными для некоторых конкретных систем (в частности, вакансии в кремнии).

По тематике каждой из перечисленных выше глав уже написаны монографии. Вместе с тем, книга, объединяющая достоинства этих монографий с простотой и последовательностью изложения, необходимой любому учебнику, появилась впервые.

О. А. Панкратов

532 5(049.3)

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ В ГИДРО- И ГАЗОДИНАМИКЕ

Peyret R., Taylor T. D. Computational Methods for Fluid Flow. — New York; Berlin; Heidelberg; Tokyo: Springer-Verlag, 1982. — 359 p. — (Springer Series in Computational Physics).

Монография представляет собой обстоятельный обзор численных методов, которые используются для решения различных задач гидродинамики и газодинамики. Книга состоит из трех частей: численные подходы, несжимаемые течения, течения сжимаемого газа.

Первая глава — введение, в котором дается обоснование необходимости использования численных методов для решения практических задач и приводятся уравнения Навье — Стокса в различных формах (общая интегральная форма, дифференциальные уравнения в дивергентном и недивергентном виде, в ортогональных криволинейных координатах, для несжимаемой жидкости в переменных v , p и ψ , ω , в безразмерном виде).

Вторая глава — описание основных понятий теории конечно-разностных схем. Прежде всего, приводятся формулы для разностных производных. Затем записывается разностная аппроксимация стационарного уравнения переноса с вязкостью и рассмотрены способы реализации полученной системы линейных алгебраических уравнений: прогонка с условиями устойчивости, итерационные методы Якоби, Гаусса — Зейделя, верхней релаксации; даны также схемы четвертого порядка. После рассмотрения стационарной задачи изучается одномерное нестационарное уравнение переноса с вязкостью с постоянными коэффициентами. На примере этого уравнения вводятся понятия аппроксимации и порядка аппроксимации, устойчивости; приведены условия устойчивости Неймана и Куранта — Фридрихса — Леви; на примере схемы Дюфорты — Франкела акцентировано внимание на возможность условной аппроксимации. Затем авторы рассматривают квазилинейное уравнение переноса с постоянным коэффициентом вязкости. Описаны слабые решения, схемы Лакса — Вендрофа, Мак-Кормака, неявные методы Кранка — Николсона, Бима — Уорминга, подчеркнуты трудности, которые могут иметь место при постановке граничных условий в многошаговых методах. Далее авторы приводят явные и неявные схемы для двумерного линейного уравнения переноса с вязкостью, подчеркивается уменьшение ограничений на временный шаг τ , а также говорится о необходимости внимательного рассмотрения проблемы граничных условий в методах расщепления.

Отметим, что все вопросы, рассмотренные в этой главе, очень подробно освещены в советской литературе.

Третья глава — описание метода конечных элементов и спектральных методов как альтернативы к методам конечных разностей. Эти вопросы в применении к задачам газодинамики в значительно меньшей степени описаны в советской литературе, поэтому материал третьей главы представляет определенную ценность. Даны основные понятия, формулы алгоритмов и примеры.

В четвертой главе устанавливаются соответствия между различными подходами: конечно-разностным, спектральным, интегральным.

Пятая глава — описание некоторых специальных методов решения задач гидродинамики и газодинамики: метод функций Грина, дискретных вихрей, вихрей в ячейках, метод характеристик. Даны основные формулы и соображения о реализации.

Гл. 6—9 содержат описание численных методов решения задач несжимаемой жидкости.

В шестой главе для стационарных уравнений Навье — Стокса, записанных в переменных v, p , подробно рассматривается метод искусственной сжимаемости, предложенный Н. Н. Яненко и Б. Г. Кузнецовым в 1965 г. Приведены разностные формулы, изучен вопрос о сходимости к стационарному решению, подробно исследованы постановка граничных условий и решение уравнения Пуассона для давления. Для нестационарных уравнений Навье — Стокса даны формулы метода маркеров в ячейках и ряда итерационных методов. Представлены решения двух задач в формулировке v, p : стационарное течение за уступом (расчет проводится методом расщепления) и нестационарная струя в стратифицированной жидкости (итерационная процедура). В формулировке ψ, ω представлены методы и результаты численного расчета двух классических задач: стационарное течение в квадратной полости и нестационарное обтекание круглого цилиндра.

Седьмая глава — краткое описание метода конечных элементов в применении к задачам вязкой несжимаемой жидкости, приведены сложные расчетные сетки.

Восьмая глава содержит описание спектральных методов. В случае невязких течений исходные уравнения в переменных ψ, ω разлагаются по полиномам Чебышева, полученные обыкновенные уравнения решаются далее методами Рунге — Кутты или Адамса — Башфорта. На модельной задаче о движении пары вихрей в ограниченной области показано, что спектральный метод дает ускорение счета в 10—30 раз по сравнению с методом конечных элементов и методом конечных разностей. Аналогичный подход можно реализовать также и для случая вязких течений, но пока нет ясности с постановкой граничных условий.

В девятой главе кратко излагаются подходы к численному моделированию турбулентных потоков. Прежде всего, это интегрирование нестационарных уравнений типа Навье — Стокса, полученных с помощью тех или иных процедур замыкания (*large eddy simulation*, (k, ε) -модель и т.п.). Следующий подход — прямое моделирование полных уравнений Навье — Стокса с помощью конечно-разностных и спектральных методов.

Гл. 10, 11 содержат описание численных методов и результатов расчетов для течений сжимаемого газа, идеального и вязкого. Даны явные и неявные алгоритмы, практические рекомендации по выбору метода и постановки граничных условий. Эта часть книги обладает излишней краткостью.

В целом рецензируемая монография является весьма полезной для специалистов и начинающих исследователей как справочник по методам численного решения задач гидро- и газодинамики, поскольку в ней выписаны с достаточной степенью детальностью основные алгоритмы, указаны относительные качества алгоритмов, подчеркнуты имеющиеся в настоящее время трудности. В книге отсутствуют строгие обоснования, но дана обширная библиография, которая может послужить для более углубленного изучения отдельных вопросов. Конечно, ограниченный объем монографии не позволил авторам привести результаты методических расчетов, чтобы можно было сравнить различные алгоритмы.

В целом монография дает ясное представление о существующих численных методах, которые с успехом могут применяться для решения сложных задач механики сплошных сред.

Ю. А. Березин