

Н.А. Сергеев, Д.С. Рябушкин

Физика наносистем



Москва • 2015 • Логос

УДК 539.5
ББК 22.37
С32

Рецензенты

Н.А. Корыневский, доктор физико-математических наук, профессор
Национального университета «Львовская политехника»

Н.К. Андреев, доктор технических наук, профессор Казанского
государственного энергетического университета

Сергеев Н.А.

С32 Физика наносистем: монография / Н.А. Сергеев, Д.С. Рябушкин. —
М.: Логос, 2015. — 192 с.

ISBN 978-5-98704-833-7

Изложены основы физики наносистем. Обсуждаются свойства сверхрешеток, транспортные явления в низкоразмерных системах, оптические свойства наноструктур, квантовые явления в магнитном поле. Анализируются перспективы создания различных устройств наноэлектроники и молекулярной электроники.

Для студентов высших учебных заведений, аспирантов, научных работников и инженеров, работающих в области физики наносистем и нанотехнологий.

УДК 539.2
ББК22.37

ISBN 978-5-98704-833-7

© Сергеев Н.А.,
Рябушкин Д.С., 2015
© Логос, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
Глава 1. Размерное квантование	9
1.1. Квантовые мембраны, нити и капли.....	9
1.2. Условия наблюдения эффектов квантового ограничения.....	13
1.3. Двумерные структуры с электронным газом.....	14
1.4. Квантовые провода и точки.....	19
Задания.....	21
Глава 2. Энергетический спектр частицы в потенциальной яме	22
2.1. Движение частицы в прямоугольной потенциальной яме.....	22
2.2. Движение частицы над потенциальной ямой.....	26
2.3. Треугольная потенциальная яма.....	28
2.4. Структура с двумя квантовыми ямами.....	31
Задания.....	33
Глава 3. Прохождение частиц через потенциальные барьеры	35
3.1. Рассеяние частиц на потенциале в виде ступеньки.....	35
3.2. Потенциальный барьер конечной ширины. Туннельный эффект.....	38
3.3. Интерференционные эффекты при прохождении частицы над барьером.....	40
Задания.....	42
Глава 4. Квантовые структуры с несколькими потенциальными барьерами	44
4.1. Прохождение частиц через два потенциальных барьера.....	44
4.2. Вертикальный транспорт. Резонансный туннельный диод.....	48
4.3. Вольт-амперная характеристика резонансного туннельного диода.....	51
Задания.....	53
Глава 5. Сверхрешетки	55
5.1. Создание гетероструктур и сверхрешеток методом молекулярно-пучковой эпитаксии.....	55
5.2. Виды сверхрешеток.....	57
5.3. Энергетический спектр сверхрешетки. Минизоны.....	58
5.4. Вольт-амперная характеристика сверхрешетки. Осцилляции Зенера – Блоха.....	60
5.5. Сверхатома.....	64
Задания.....	65

Глава 6. Плотность электронных состояний в низкоразмерных системах	67
6.1. Функция плотности состояний трехмерных систем	67
6.2. Функция плотности состояний двумерных систем	69
6.3. Функции плотности состояний одно- и нульмерных систем	71
6.4. Функция плотности энергетических состояний сверхрешетки.....	74
6.5. Концентрация электронов в низкоразмерных системах.....	75
Задания.....	78
Глава 7. Фононы в сверхрешетках	81
7.1. Колебания одномерной цепочки. Акустические и оптические колебания	81
7.2. Колебания одномерной сверхрешетки.....	86
7.3. Свертывание акустических ветвей и локализация фононов.....	89
Задания.....	91
Глава 8. Транспортные явления в низкоразмерных системах	92
8.1. Общие сведения	92
8.2. Время релаксации и подвижность.....	95
8.3. Баллистический транспорт. Квантованная проводимость. Формула Ландауэра.....	96
8.4. Эффекты квантовой интерференции. Локализация квантовых состояний	100
Задания.....	102
Глава 9. Интерференционные квантовые явления	103
9.1. Эффект Ааронова – Бома	103
9.2. Кулоновская блокада.....	107
Задания.....	111
Глава 10. Оптические свойства низкоразмерных структур	113
10.1. Общие сведения	113
10.2. Вероятность спектроскопического перехода	114
10.3. Оптические переходы между подзонами	116
10.4. Оптические переходы между зонами.....	119
10.5. Экситоны в наноструктурах.....	122
10.6. Эффект Франца – Келдыша.....	125
Задания.....	126
Глава 11. Квантовые осцилляции в магнитном поле	127
11.1. Уровни Ландау	127
11.2. Плотность электронных состояний в магнитном поле.....	129
11.3. Степень вырождения уровня Ландау	132
11.4. Осцилляции Шубникова – де Гааза	133
11.5. Эффект де Гааза – ван Альфена	136
Задания.....	137

Глава 12. Квантовый эффект Холла	139
12.1. Общие сведения	139
12.2. Целочисленный квантовый эффект Холла	140
12.3. Дробный квантовый эффект Холла	144
Задания	149
Глава 13. Мезоскопические устройства и низкоразмерные структуры в нанoeлектронике	151
13.1. Лазеры на основе квантовых ям и квантовых точек	151
13.2. Оптические модуляторы	154
13.3. Приемники света на основе сверхрешетки <i>nipi</i>	155
13.4. Одноэлектронная помпа	156
13.5. Клеточные автоматы на основе квантовых точек	158
13.6. Квантовые компьютеры	160
13.7. Зависимости физических свойств мезоматериалов от размеров образца	162
Глава 14. Спинтроника	164
14.1. Гигантское магнетосопротивление	164
14.2. Спиновые вентили. Считывающая головка	170
14.3. Эффект Кондо и квантовые точки	172
Глава 15. Молекулярная электроника	176
15.1. Общие сведения	176
15.2. Возможные механизмы передачи информации в молекулярных системах	177
15.3. Электронная структура атомов углерода, азота, кислорода и кремния	178
15.4. Проводящие полимеры, аккумуляторы	182
15.5. Примеры устройств молекулярной электроники	184
Литература	189

ПРЕДИСЛОВИЕ

Как свидетельствует практика, число научных сотрудников, работающих в области физики твердого тела (ФТТ), значительно превышает количество исследователей, представляющих другие разделы физики. То же самое можно сказать и о числе публикаций по физике твердого тела: их заметно больше, нежели работ, не относящихся к этой области. Связано это с тем, что многие материалы, используемые в технике и повседневной жизни, являются типичными объектами изучения для ФТТ. Кроме того, спектр проблем, исследуемых в физике твердого тела, столь широк, что это не могло не привести к разработке новых моделей, экспериментальных и теоретических методов изучения природы, которые сразу же нашли применение в других областях естествознания. Конечно, физика твердого тела является только разделом физики, и она тоже заимствует новые экспериментальные и теоретические инструменты из других областей этой науки. Достаточно вспомнить диаграммы Фейнмана, первоначально разработанные для решения задач квантовой электродинамики, а ныне широко используемые в теории твердого тела. Или другой пример: в экспериментальных исследованиях структуры твердого тела широко применяются синхротронное излучение и пучки нейтронов, которые являются продуктами работы ускорителей и ядерных реакторов.

В последние десятилетия в физике твердого тела значительно увеличилось количество работ, связанных с исследованием физических свойств материалов, которые хотя бы в одном измерении имеют размеры от долей до сотен нанометров. В физике твердого тела появилась новая область — наука о наноматериалах и связанных с ней методах создания таких материалов — нанотехнологии. Оказалось, что в наносистемах физические свойства и различные динамические процессы существенно отличаются от того, что наблюдается в массивных образцах. Например, температура плавления частиц нанозолота почти в 3 раза меньше температуры плавления массивных частиц.

Главная отличительная черта наноматериалов состоит в том, что в них хорошо знакомые нам объекты (скажем, электроны) начинают демонстрировать свои волновые свойства, и в результате можно наблюдать явления квантовой интерференции и дифракции волн материи. Размерный эффект, играющий важную роль в наноматериалах, приводит к яркому проявлению квантовых свойств многих физических характеристик. Таковыми являются сопротивление (эффект Холла), проводимость наноматериалов и др. Кроме того, поскольку в наносистемах значительная часть атомов находится

именно на поверхности, физические свойства наноматериалов сильно зависят от качества поверхности образца.

Бурное развитие науки о наноматериалах быстро привело к созданию технических устройств, работающих на принципиально новых основах. Особенно отчетливо это видно на примере наноэлектроники, имеющей дело с одноэлектронными транзисторами, сверхрешетками, резонансным туннельным и баллистическим транспортом зарядов и т.д. Имеются разработки нанодвигателей, наномашин и нанороботов, реализация которых наверняка расширит возможности человека в создании новых устройств, в частности, позволяющих целенаправленно управлять движением лекарств в теле человека.

Здесь имеет смысл упомянуть об одном забавном обстоятельстве, требующем реагирования. Усилиями средств массовой информации слово «нано» приобрело поистине магическое значение. Например, косметические фирмы рекламируют «нанокремы», которые могут превратить пожилую женщину в юную красавицу. Некоторые авторы пишут о «наноброне», которая делает всякий танк абсолютно непробиваемым. Еще доводилось слышать о нанокостюмах с волшебными свойствами, наномолоке и т.д. Все это — дутые сенсации, рассчитанные на публику, ничего не знающую по существу вопроса. А от незнания есть только одно средство — доступное и подробное объяснение предмета.

В настоящее время практически на всех физических специальностях вузов преподаются курсы, связанные с изложением основ нанотехнологий и физики наноматериалов. И хотя имеется довольно большое количество книг, посвященных этой теме, все же представляется, что этих книг еще недостаточно. Дело в том, что физика наносистем — наука очень молодая, а потому общее мнение специалистов по поводу того, какие книги достойны к повсеместному использованию в учебном процессе, пока не сформировано. Очевидно, только время назовет лучшую книгу, а негласное соревнование авторов, пишущих на одну и ту же тему, всегда было, есть и будет.

Надеемся, что предлагаемая работа заинтересует не только студентов и аспирантов, но и физиков, инженеров, а также исследователей, решивших связать свою жизнь в науке с изучением наносистем. Для понимания текста читателю потребуются знания математики, квантовой механики и физики твердого тела в пределах стандартного вузовского курса.

Авторы с благодарностью воспримут любые отклики читателей на книгу. Нам можно написать по адресу sergeev_riabushkin@mail.ru.

*Н.А.Сергеев
Д.С.Рябушкин*