

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский  
государственный университет им. Н. И. Лобачевского»

А. Ю. Аладышкин, А. А. Фраерман

# Лекции по физике поверхности

*Введение в физику поверхностных и интерфейсных явлений*

Учебное пособие

Рекомендовано Учёным советом радиофизического факультета для  
студентов ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки  
03.04.02 – «Физика» и 03.04.03 – «Радиофизика»

Нижний Новгород

2024

УДК 538.9

ББК 22.37

А-45

Рецензенты:

доктор физ.-мат. наук, доц. В. А. Бурдов (ННГУ),  
доктор физ.-мат. наук, доц. В. С. Столяров (МФТИ)

А-45 Аладышкин А. Ю.; Фраерман А. А. Лекции по физике поверхности. Введение в физику поверхностных и интерфейсных явлений: Учебное пособие. – Нижний Новгород: Издательство Нижегородского госуниверситета, 2024. – 286 с. – ISBN 000-0-0000-000-000.

В книге затронут широкий круг вопросов физики ограниченных твёрдых тел. Рассмотрено взаимодействие электромагнитного излучения рентгеновского диапазона, «тепловых» нейтронов и электронов с поверхностью твёрдого тела и многослойными структурами. Излагаются основы теории электронных состояний в полуограниченных твёрдых телах и применение метода туннельной спектроскопии для экспериментального изучения этих состояний. Возникновение поверхностной (прикраевой) сверхпроводимости на границах раздела рассматривается как аналог поверхностных электронных состояний. Рассмотрена структура равновесной поверхности кристалла и её изменение в процессах релаксации к равновесию и роста. Деформации, возникающие на границе двух кристаллов с различными постоянными решётки, рассмотрены в рамках модели Френкеля – Конторовой. Даны представления о природе неоднородных состояний, возникающих в ограниченных ферромагнетиках и сверхпроводниках первого рода. В качестве метода изучения доменной структуры ферромагнетиков излагаются физические основы метода магнитно-силовой зондовой микроскопии. Описание распада твёрдых растворов дано в рамках теории фазовых переходов Ландау.

Для студентов старших курсов физических факультетов ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки «Физика» и «Радиофизика».

Ответственный за выпуск:

заместитель председателя методической комиссии радиофизического факультета ННГУ, доктор физ.-мат. наук Е. З. Грибова

ISBN 000-0-0000-000-000

УДК 538.9

ББК 22.37

© Аладышкин А. Ю., Фраерман А. А.

© Национальный исследовательский  
Нижегородский государственный  
университет им. Н. И. Лобачевского

# Содержание

Введение	7
<b>Глава 1. Отражение рентгеновского излучения, тепловых нейтронов и электронов</b>	<b>11</b>
<b>Лекция 1. Отражение рентгеновского излучения в приближении сплошной среды</b>	<b>11</b>
1.1 <i>Модель свободных электронов для расчёта диэлектрической проницаемости</i>	13
1.2 <i>Приближение однократного рассеяния</i>	14
1.3 <i>Поляризационные эффекты</i>	18
1.4 <i>Приближение сплошной среды</i>	19
1.5 <i>Полное внешнее отражение</i>	23
1.6 <i>Отражение рентгеновского излучения от шероховатой поверхности</i>	24
<b>Лекция 2. Отражение рентгеновского излучения от многослойных структур.</b>	<b>37</b>
2.1 <i>Многослойные рентгеновские зеркала: приближение однократного рассеяния</i>	37
2.2 <i>Приближение медленно меняющихся амплитуд</i>	41
2.3 <i>Эффект Бормана и метод стоячих рентгеновских волн</i>	45
2.4 <i>Отражение рентгеновского излучения от многослойных структур с шероховатыми границами раздела</i>	47
<b>Лекция 3. Рассеяние электронов на кристаллах</b>	<b>53</b>
3.1 <i>Рассеяние электронных волн на неоднородном электрическом потенциале</i>	54
3.2 <i>Приближение однократного рассеяния: условие Лауэ и построение Эвальда</i>	56
3.3 <i>Просвечивающая электронная микроскопия и дифрактометрия</i>	58
3.4 <i>Рассеяние электронов на двумерном потенциале</i>	59
3.5 <i>Дифракция медленных электронов</i>	63
3.6 <i>Дифракция быстрых электронов</i>	65

<b>Лекция 4. Отражение тепловых нейтронов от ферромагнетиков . . . . .</b>	<b>68</b>
4.1 <i>Симметрия по отношению к обращению времени: взаимные и невзаимные эффекты в нейтронной оптике .</i>	69
4.2 <i>Полное внешнее отражение и поляризаторы нейтронов .</i>	72
4.3 <i>Отражение нейтронов от систем с неколлинеарным магнитным полем: расщепление нейтронного пучка . . .</i>	75
<b>Лекция 5. Спин-зависящее рассеяние электронов и туннельное магнитосопротивление . . . . .</b>	<b>82</b>
5.1 <i>Электронные волны в однородном ферромагнетике . . .</i>	83
5.2 <i>Туннелирование электронов в системе с неколлинеарным распределением намагниченности . . . . .</i>	85
5.3 <i>Проводимость туннельного перехода: спиновый вентиль</i>	89
5.4 <i>Магниторезистивный элемент и магнитная память с произвольным доступом . . . . .</i>	93
<b>Глава 2. Электронные свойства поверхности</b>	<b>97</b>
<b>Лекция 6. Поверхностные электронные состояния . . . . .</b>	<b>97</b>
6.1 <i>Зонный спектр и поверхностные электронные состояния в приближении сильной связи . . . . .</i>	99
6.2 <i>Зонный спектр и поверхностные электронные состояния в приближении слабой связи . . . . .</i>	105
6.3 <i>Поверхностные электронные состояния в потенциале изображения . . . . .</i>	109
6.4 <i>Обобщение на трёхмерный случай . . . . .</i>	111
<b>Лекция 7. Исследование свойств поверхности методом туннельной микроскопии и спектроскопии . . . . .</b>	<b>117</b>
7.1 <i>Вывод общего выражения для дифференциальной проводимости туннельного перехода . . . . .</i>	119
7.2 <i>Вклад s-орбиталей электронов иглы в туннельную проводимость. . . . .</i>	124
7.3 <i>Интерференция поверхностных электронных волн вблизи дефектов . . . . .</i>	129
7.4 <i>Восстановление энергетического спектра поверхностных состояний . . . . .</i>	133
<b>Лекция 8. Поверхностная и прикраевая сверхпроводимость. . . . .</b>	<b>139</b>
8.1 <i>Функционал свободной энергии и уравнения Гинзбурга – Ландау . . . . .</i>	139
8.2 <i>Зарождение сверхпроводимости в массивных сверхпроводниках и второе критическое поле . . . . .</i>	142

8.3	<i>Поверхностная (прикраевая) сверхпроводимость и третье критическое поле . . . . .</i>	147
8.4	<i>Доменная сверхпроводимость в гибридных наноструктурах сверхпроводник – ферромагнетик» . . .</i>	152
8.5	<i>Локализованная сверхпроводимость на плоскостях двойникования . . . . .</i>	156
<b>Глава 3. Равновесные свойства поверхности и рост кристаллов</b>		<b>160</b>
<b>Лекция 9. Равновесная форма кристаллов и структура поверхности . . . . .</b>		<b>160</b>
9.1	<i>Равновесная форма кристаллов: теорема Вульфа . . . . .</i>	160
9.2	<i>Смачивание и краевой угол Юнга. . . . .</i>	165
9.3	<i>Режимы роста тонких плёнок. . . . .</i>	166
9.4	<i>Фазовый переход поверхности в шероховатое состояние при конечной температуре . . . . .</i>	168
9.5	<i>Механизмы релаксации поверхности к равновесной форме</i>	171
<b>Лекция 10. Дислокации несоответствия . . . . .</b>		<b>177</b>
10.1	<i>Модель Френкеля – Конторовой . . . . .</i>	178
10.2	<i>Соизмеримые и несоизмеримые решения . . . . .</i>	182
10.3	<i>Критические параметры псевдоморфного роста . . . . .</i>	187
<b>Лекция 11. Механизмы и модели роста кристаллов . . . . .</b>		<b>190</b>
11.1	<i>Стохастическая модель роста кристаллов . . . . .</i>	190
11.2	<i>Модель Беккера – Дёринга – Зельдовича – Френкеля: начальный этап образования зародышей . . . . .</i>	192
11.3	<i>Модель Колмогорова массовой кристаллизации: время формирования и толщина сплошной плёнки. . . . .</i>	194
11.4	<i>Модель Лифшица-Слёзова: стадия коалесценции . . . . .</i>	198
11.5	<i>Динамика эшелона ступеней моноатомной высоты . . . . .</i>	205
<b>Глава 4. Формирование доменов и структура межфазных границ</b>		<b>212</b>
<b>Лекция 12. Распад твёрдых растворов. . . . .</b>		<b>212</b>
12.1	<i>Термодинамика распадающихся твёрдых растворов . . . . .</i>	212
12.2	<i>Феноменологическая модель межфазной границы . . . . .</i>	216
12.3	<i>Диффузия в распадающемся растворе: модель Кана – Хилларда . . . . .</i>	220

<b>Лекция 13. Неоднородные магнитные состояния и доменная структура в ферромагнитных плёнках . . .</b>	<b>224</b>
13.1 <i>Термодинамические соотношения для ферромагнетиков .</i>	225
13.2 <i>Перемагничивание ферромагнитных плёнок внешним магнитным полем . . . . .</i>	229
13.3 <i>Блоховская доменная стенка. . . . .</i>	232
13.4 <i>Равновесная доменная структура . . . . .</i>	236
13.5 <i>Магнитно-силовая микроскопия: визуализация магнитных доменов . . . . .</i>	240
13.6 <i>Магнитное состояние ферромагнитных наночастиц . .</i>	243
<b>Лекция 14. Эффект Мейсснера и фазовое расслоение в сверхпроводниках . . . . .</b>	<b>252</b>
14.1 <i>Сверхпроводник с нулевым размагничивающим фактором в магнитном поле. . . . .</i>	252
14.2 <i>Эффект Мейсснера . . . . .</i>	254
14.3 <i>Критическое термодинамическое поле . . . . .</i>	256
14.4 <i>Энергия границы раздела «сверхпроводник – нормальный металл» . . . . .</i>	256
14.5 <i>Сверхпроводники первого и второго рода . . . . .</i>	259
14.6 <i>Промежуточное состояние и доменная структура в сверхпроводниках первого рода . . . . .</i>	262
14.7 <i>Равновесная форма доменов в магнитном поле . . . . .</i>	263
14.8 <i>Равновесный период доменной структуры в сверхпроводящих плёнках . . . . .</i>	265
14.9 <i>Эффект близости и наведённая сверхпроводимость . . .</i>	268
<b>Лекция 15. Твердотельные наноструктуры и размерность пространства . . . . .</b>	<b>273</b>
15.1 <i>Локализация частицы в «мелкой» потенциальной яме .</i>	273
15.2 <i>Задача о случайных блужданиях частицы: теорема Поля . . . . .</i>	276
15.3 <i>Размерность пространства и фазовые переходы в магнитных системах . . . . .</i>	279
15.4 <i>Фазовый переход Пайерлса и отсутствие металлической проводимости в одномерных системах . . . . .</i>	282

## Введение

Физика поверхности изучает явления, обусловленные ограниченностью реальных твёрдых тел, что является естественным обобщением классических концепций кристаллографии, квантовой механики и физики твёрдого тела на случай пространственно-ограниченных кристаллов. Дополнительным стимулом к развитию физики поверхности послужила практическая потребность в создании искусственных микро- и наноструктурированных материалов с заданными свойствами, а также методов их исследования. Накопленные знания легли в основу ряда учебников и монографий, среди которых укажем книги, вышедшие в последние годы [1–8]. Существование этих монографий и классических учебных пособий позволяет нам обойти вниманием хорошо разработанные в методическом плане вопросы и сосредоточиться на избранных аспектах физики поверхностных явлений, которые недостаточно, на наш взгляд, описаны в учебной литературе. В предлагаемом учебном пособии рассматриваются различные по физической сути проблемы, включающие рассеяние коротковолнового излучения, поверхностные электронные состояния, рост кристаллов и формирование границ раздела (интерфейсов), что делает изложение мультидисциплинарным с точки зрения общей и теоретической физики. Выбор этих задач обусловлен научными интересами авторов, с одной стороны, и наличием хорошо апробированных «классических» моделей описываемых явлений – с другой. Знание этих моделей и умение применять их на практике представляются совершенно необходимыми для успешной работы в области физики поверхности. По нашему мнению, такой подход может быть полезен как для студентов и аспирантов, начинающих свои исследования в области физики поверхности, так и для специалистов, работающих в смежных областях. Далее дадим более развернутое описание вопросов, затронутых в этих лекциях.

Первая глава, состоящая из пяти лекций, посвящена описанию особенностей взаимодействия электромагнитного излучения рентгеновского диапазона, низкоэнергетичных («тепловых») нейтронов и электронов с твёрдым телом. Ключевой особенностью, объединяющей все перечисленные задачи, является «слабость» взаимодействия этих излучений с веществом. В случае рентгеновского излучения «слабость» взаимодействия обусловлена высокой частотой электромагнитных волн рентгеновского диапазона по сравнению с плазменной частотой, что приводит к тому, что диэлектрическая проницаемость всех веществ в этом диапазоне близка к единице. Для электронных и нейтронных волн кинетическая энергия частиц существенно превышает их потенциальную энергию, связанную в первом случае с взаимодействием электронов с электрическим зарядом электронов и ионов в твёрдом теле, а во втором случае – с сильным взаимодействием нейтро-

нов с ядрами. Всё это позволяет описывать взаимодействие этих излучений с веществом в приближении однократного рассеяния, что в свою очередь дает возможность решения некоторых классических задач без дополнительных приближений. К таким задачам относится, например, рассеяние излучения на шероховатой поверхности. Особое место занимает описание отражения рентгеновского излучения от многослойных рентгеновских зеркал, ставших основным элементом современной рентгеновской оптики. При описании отражения рентгеновского излучения и нейтронов основное внимание уделяется приближению «малоуглового» рассеяния, в котором переход к описанию кристалла в приближении сплошной среды оправдан. Для полноты картины рассеяние электронов рассматривается в широком диапазоне углов и энергий, включая дифракцию на кристаллических структурах различной симметрии. Эти явления и процессы важны для понимания физики, лежащей в основе экспериментальных методов анализа поверхности методами рентгеноструктурного анализа, дифракции медленных и быстрых электронов. Отдельная лекция посвящена описанию отражения нейтронов от намагниченных поверхностей, в которой особое внимание уделено спин-зависящему взаимодействию нейтрона с ферромагнетиком. Существующая аналогия в описании движения нейтронов и электронов проводимости в ферромагнетиках позволила включить в этот раздел задачу о туннельном магнитном контакте и эффекте спинового вентиля. Обсуждается принцип работы магниторезистивных запоминающих элементов в устройствах энергонезависимой памяти.

Вторую главу составляют три лекции, посвящённые особенностям электронного спектра в полуограниченных твёрдых телах и описанию метода туннельной спектроскопии для экспериментального изучения этих особенностей. Основное внимание уделено описанию «неблоховских» поверхностных состояний, как в приближении «сильной связи» (состояния Тамма), так и в приближении «слабой связи» (состояния Шокли). Существование этих состояний обусловлено резонансным (брэгговским) отражением электрона от кристаллической структуры, что в известном смысле объединяет эту задачу с задачей отражения рентгеновского излучения от многослойных структур. Рассмотрена модель формирования поверхностных электронных состояний в потенциале изображения. Важной составляющей этой главы является лекция, посвящённая изучению электронных состояний на поверхности твёрдых тел методом туннельной спектроскопии. Известное формальное сходство уравнения Шрёдингера для бесспиновой частицы в магнитном поле и линеаризованного уравнения Гинзбурга – Ландау для сверхпроводящего параметра порядка позволяет рассматривать возникновение поверхностной (прикраевой) сверхпроводимости на границах раздела «сверхпроводник – изолятор» или «сверхпроводник – вакуум» как аналог поверхностных электронных состояний. Обобщения задачи о поверхност-



ных сверхпроводящих состояниях приводят нас к эффектам локализованной сверхпроводимости на плоскостях двойникования или вблизи магнитных доменных стенок в ферромагнитных сверхпроводниках и гибридных структурах «сверхпроводник – ферромагнетик».

Третья часть лекций посвящена описанию равновесных свойств поверхности и моделям роста кристаллов. В первой лекции этой части рассмотрена задача о равновесной огранке кристаллов, известная как теорема Вульфа. Далее показано, что с повышением температуры в процессе фазового перехода атомарно гладкая поверхность кристалла может перейти в шероховатое состояние. Даны представления о релаксации поверхности к равновесной форме, обусловленной процессами адсорбции/десорбции и поверхностной диффузии. Отдельная лекция посвящена вопросу о внутренних деформациях, возникающих на границе раздела двух монокристаллических плёнок с несоответствием параметров решёток. Эта задача рассмотрена в рамках модели Френкеля – Конторовой, которая даёт представление о фазовом переходе в соизмеримую фазу и дислокациях несоответствия, возникающих при псевдоморфном росте плёнок. Эта модель позволяет оценить критическое рассогласование и критическую толщину псевдоморфного роста. В заключительной лекции этой главы рассмотрены задачи о росте системы островков новой фазы. В рамках модели Колмогорова дана оценка минимальной толщины сплошной плёнки. Классическим примером задачи самоорганизации является модель Лифшица – Слёзова, в рамках которой описан процесс укрупнения зародышей, который характерен для кинетики фазовых переходов первого рода.

Четвертая часть посвящена описанию межфазных границ различной природы. Во-первых, это межфазные границы, возникающие естественным образом при распаде твёрдых двухкомпонентных растворов. Описание спиnodального распада в рамках теории Ландау позволяет рассмотреть проблему «созревания» зародышей под иным углом зрения. Отдельная лекция посвящена магнитным доменам и доменным стенкам между областями с различным направлением намагниченности. Отмечается, что сам факт разбиения ферромагнетика на домены обусловлен наличием поверхности. В качестве метода изучения доменной структуры ферромагнетиков излагаются физические основы метода магнитно-силовой микроскопии. Ещё одна лекция посвящена особенностям межфазных границ между сверхпроводящей и нормальной фазами в сверхпроводниках первого и второго рода. Рассмотренные межфазные границы есть солитонные решения соответствующих нелинейных уравнений. Единство методов их теоретического анализа делают эти различные задачи схожими. В заключение мы обсуждаем некоторые проявления взаимосвязи размерности пространства и происходящих в нем физических явлений. Вопрос этот не является чисто абстрактным, поскольку при подходящем выборе условий в наноструктурах могут

реализовываться ситуации с различной размерностью. В последней лекции приведены известные рассуждения, которые не дают точного решения проблемы, но указывают на её нетривиальность: локализация квантовомеханической частицы в «мелкой» яме, теорема о случайных блужданиях Поля, модель Изинга и модель фазового перехода Пайерлса.

Данное учебное пособие основано на материалах лекций, прочитанных для студентов старших курсов физических специальностей Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, аспирантов Института физики микроструктур РАН, а также для студентов Московского физико-технического института. Мы благодарны сотрудникам Института физики микроструктур РАН и межфакультетской кафедры «Физика наноструктур и наноэлектроника» за обсуждение и прояснение многих вопросов, затронутых в этой книге. Авторы выражают благодарность Д. В. Грузневу, С. В. Миронову, М. А. Фаддееву и Я. В. Фоминову за внимательное изучение рукописи и конструктивные замечания.

1. Оура К., Лифшиц В. Г., Саранин А. А., Зотов А. В., Катаяма М. *Введение в физику поверхности*. – Москва: Наука, 2006. – 490 с.
2. Дубровский В. Г. *Теория формирования эпитаксиальных наноструктур*. – М.: Физматлит, 2009. – 346 с.
3. Мамонова М. В., Прудников В. В., Прудникова И. А. *Физика поверхности. Теоретические модели и экспериментальные методы*. – М.: Физматлит, 2011. – 400 с.
4. Шикин А. М. *Формирование, электронная структура и свойства низкоразмерных структур на основе металлов*. – СПб.: ВВМ, 2011. – 432 с.
5. Ibach H. *Physics of surfaces and interfaces*. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. – 646 p.
6. Gross A. *Theoretical surface science: A microscopic perspective*. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – 342 p.
7. Lüth H. *Solid surfaces, interfaces and thin films*. – 5<sup>th</sup> ed. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – 577 p.
8. Voigtländer B. *Scanning probe microscopy: Atomic force microscopy and scanning tunneling microscopy*. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. – 375 p.