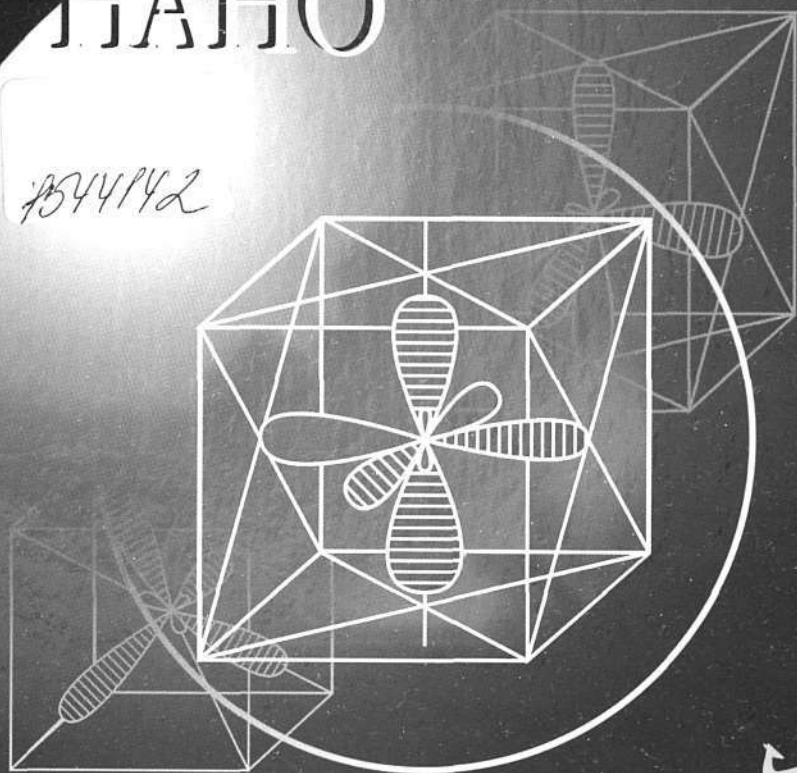


738  
4574442  
С. Ю. ДАВЫДОВ, А. А. ЛЕБЕДЕВ  
О. В. ПОСРЕДНИК

# ЭЛЕМЕНТАРНОЕ ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ НАНОСИСТЕМ

4574442





621.382.807  
Δ 132

С. Ю. ДАВЫДОВ, А. А. ЛЕБЕДЕВ,  
О. В. ПОСРЕДНИК

# ЭЛЕМЕНТАРНОЕ ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ НАНОСИСТЕМ

*Издание второе, переработанное и дополненное*

**РЕКОМЕНДОВАНО**  
УМО вузов РФ по образованию  
в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники  
и автоматизации в качестве учебного пособия для студентов вузов,  
обучающихся по направлениям подготовки  
«Электроника и наноэлектроника»  
и «Нанотехнологии и микросистемная техника»



•САНКТ-ПЕТЕРБУРГ•  
•МОСКВА•КРАСНОДАР•  
2023

Давыдов С. Ю., Лебедев А. А., Посредник О. В.

Д 13 Элементарное введение в теорию наносистем: Учебное пособие. — 2-е изд., перераб. и доп. — СПб.: Издательство «Лань», 2023. — 192 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

ISBN 978-5-8114-1565-6

В книге в рамках единого подхода рассматривается широкий круг задач: от электронных состояний в потенциальных ямах до квантового эффекта Холла. Особое внимание уделяется электронной структуре низкоразмерных систем и их транспортным особенностям в наноразмерной области. Подробно описываются свойства поверхности и ее адсорбционная способность. Подчеркнем, что здесь излагаются физические идеи и теоретические подходы к изучаемым проблемам, наборы же экспериментальных фактов, равно как и описание самих экспериментов, остаются за рамками настоящей книги.

Каждая глава сопровождается задачами, предложены темы соответствующих семинаров. Для углубленного изучения материала по каждой главе приводится список дополнительной литературы. Отметим, что для успешного усвоения предлагаемого материала вполне достаточно знаний математики и квантовой физики, получаемых студентами на первых трех курсах университетов.

Настоящее учебное пособие предназначено для бакалавров и магистров физических и материаловедческих направлений, но может быть полезно аспирантам и молодым научным сотрудникам, интересующимся данной проблематикой.

ББК 32.85я73

#### Рецензенты:

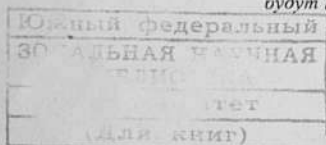
*В. А. МОШНИКОВ* — доктор физико-математических наук, профессор кафедры микро- и наноэлектроники СПбГЭТУ (ЛЭТИ);  
*И. В. ГРЕХОВ* — зав. отделением твердотельной электроники ФТИ им. А. Ф. Иоффе, академик РАН.

#### Обложка

*Е. А. ВЛАСОВА*

*Охраняется законом РФ об авторском праве.  
Воспроизведение всей книги или любой ее части  
запрещается без письменного разрешения издателя.*

*Любые попытки нарушения закона  
будут преследоваться в судебном порядке.*



- © Издательство «Лань», 2023
- © С. Ю. Давыдов, А. А. Лебедев, О. В. Посредник, 2023
- © Издательство «Лань», художественное оформление, 2023

1544142

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
<b>Часть I</b>	
<b>Глава 1</b>	
<b>Квантовые ямы .....</b>	<b>6</b>
1.1. Одномерные изолированные квантовые ямы .....	6
1.1.1. Прямоугольная потенциальная яма .....	6
1.1.2. Треугольная потенциальная яма .....	11
1.1.3. Параболическая потенциальная яма .....	13
1.1.4. Плотность состояний в одномерных квантовых ямах .....	14
1.2. Двумерные и трехмерные изолированные квантовые ямы .....	14
1.2.1. Потенциальный ящик с бесконечными стенками .....	14
1.2.2. Потенциальный цилиндр .....	15
1.2.3. Потенциальный параллелепипед .....	16
1.2.4. Потенциальная сфера .....	17
1.2.5. Кулоновская яма .....	19
1.3. Сдвоенные квантовые ямы .....	19
1.4. Дираковская потенциальная гребенка .....	23
1.5. Вакансия в дираковской потенциальной гребенке .....	26
1.6. Полубесконечная дираковская потенциальная гребенка .....	27
1.7. Тонкая квантово-размерная пленка .....	30
1.8. Плотности состояний бесструктурных систем пониженной размерности .....	33
Задачи к главе 1 .....	36
<b>Глава 2</b>	
<b>Решеточные модели низкоразмерных систем .....</b>	<b>37</b>
2.1. Метод функций Грина .....	37
2.2. Однозонная модель линейной цепочки .....	41
2.3. Двухзонная модель линейной цепочки .....	44
2.4. Одноатомная плоская решетка .....	47
Задачи к главе 2 .....	50
<b>Глава 3</b>	
<b>Фоновый спектр систем пониженной размерности .....</b>	<b>52</b>
3.1. Простейшие модели колебаний атомов в твердых телах .....	52
3.2. Колебания одно- и двухатомных цепочек .....	54
3.2.1. Одноатомная цепочка .....	54
3.2.2. Двухатомная цепочка .....	57
3.3. Изотопический дефект в одноатомной линейной цепочке .....	59
3.4. Вакансия в одноатомной линейной цепочке .....	61
3.5. Интерфейсные фононы в полярных кристаллах .....	64
Задачи к главе 3 .....	68
<b>Часть II</b>	
<b>Глава 4</b>	
<b>Туннелирование через квантово-размерные структуры .....</b>	<b>72</b>
4.1. Коэффициент прохождения .....	72
4.2. Двухбарьерные структуры .....	75
4.3. Кулоновская блокада туннелирования .....	78
4.3.1. Общие соотношения .....	78
4.3.2. Потенциальная энергия гранулы .....	81
4.3.3. Вольт-амперная характеристика .....	84
Задачи к главе 4 .....	86

**Глава 5**

<b>Транспорт в мезоскопических системах</b> .....	88
5.1. Контактанс баллистического проводника. Формула Ландауэра ...	89
5.2. Длина локализации в одно- и многомодовом режимах .....	95
5.3. Слабая локализация .....	100
5.4. Универсальные флуктуации контактанса .....	104
5.4.1. Флуктуации при $T = 0$ .....	104
5.4.2. Флуктуации при конечных температурах .....	107
Задачи к главе 5 .....	109

**Глава 6**

<b>Квантовый эффект Холла</b> .....	111
6.1. Двумерный электронный газ в слабом магнитном поле .....	111
6.2. Двумерный электронный газ в квантующем магнитном поле ...	113
6.3. Условия холловского эксперимента .....	116
6.4. Осцилляции продольного сопротивления и холловские плато ...	119
6.5. Дробный квантовый эффект Холла .....	122
Задачи к главе 6 .....	124

**Часть III****Глава 7**

<b>Физика поверхности</b> .....	126
7.1. Что есть поверхность? .....	126
7.2. Релаксация и реконструкция поверхности .....	128
7.2.1. Общие положения .....	128
7.2.2. Трансляционная симметрия реконструированных поверхностей .....	131
7.2.3. Структура поверхности и химическая связь .....	133
7.3. Электронная структура поверхности: простые модели .....	137
7.3.1. Вакансия в одномерной цепочке .....	138
7.3.2. Качественная картина .....	139
7.3.3. Электронная структура грани (001) кремния .....	140
Задачи к главе 7 .....	141

**Глава 8**

<b>Адсорбционные свойства поверхности</b> .....	142
8.1. Задача Костера-Слэтера .....	143
8.2. Модель Андерсона-Ньюнса .....	152
8.3. Модель Халдейна-Андерсона для адсорбции на полупроводниках .....	158
Задачи к главе 8 .....	161

**Глава 9**

<b>Взаимодействие адатомов</b> .....	163
9.1. Диполь-дипольное отталкивание адатомов .....	164
9.2. Косвенный обмен .....	168
9.3. Прямой обмен .....	170
9.4. Изменение поверхностной проводимости полупроводниковой подложки, вызванное адсорбцией .....	175
9.5. Корреляция электронов и поверхностные сверхрешетки адатомов .....	179
9.5.1. Общие соображения .....	179
9.5.2. Зарядовое упорядочение при отталкивании адатомов ...	182
9.6. Электрон-фононное взаимодействие и перестройка в адсорбированном слое .....	185
Задачи к главе 9 .....	187

<b>Темы семинаров</b> .....	188
-----------------------------	-----

<b>Список рекомендуемой литературы</b> .....	188
--	-----

*Сергей Юрьевич ДАВИДОВ  
Александр Александрович ЛЕБЕДЕВ  
Олеся Валерьевна ПОСРЕДНИК*

## **ЭЛЕМЕНТАРНОЕ ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ НАНОСИСТЕМ**

*Учебное пособие*

*Издание второе, переработанное и дополненное*

Зав. редакцией  
инженерно-технической литературы *Т. В. Гаврильева*  
Ответственный редактор *А. Д. Пузовик*  
Корректор *Т. А. Брылева*  
Подготовка иллюстраций *А. П. Маркова*  
Верстка *Е. Е. Егорова*  
Выпускающие *Т. С. Симонова, О. В. Шилкова*

ЛР № 065466 от 21.10.97  
Гигиенический сертификат 78.01.07.953.П.007216.04.10  
от 21.04.2010 г., выдан ЦГСЭН в СПб

Издательство «ЛАНЬ»  
lan@lanbook.ru; www.lanbook.com  
192029, Санкт-Петербург, Общественный пер., 5.  
Тел./факс: (812) 412-29-35, 412-05-97, 412-92-72.  
Бесплатный звонок по России: 8-800-700-40-71

### **ГДЕ КУПИТЬ**

#### **ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИЙ:**

*Для того, чтобы заказать необходимые Вам книги, достаточно обратиться  
в любую из торговых компаний Издательского Дома «ЛАНЬ»:*

**по России и зарубежью**  
«ЛАНЬ-ТРЕЙД». 192029, Санкт-Петербург, ул. Крупской, 13  
тел.: (812) 412-85-78, 412-14-45, 412-85-82; тел./факс: (812) 412-54-93  
e-mail: trade@lanbook.ru; ICQ: 446-869-967  
www.lanpbl.spb.ru/price.htm

**в Москве и в Московской области**  
«ЛАНЬ-ПРЕСС». 109263, Москва, 7-я ул. Текстильщиков, д. 6/19  
тел.: (499) 178-65-85; e-mail: lanpress@lanbook.ru

**в Краснодаре и в Краснодарском крае**  
«ЛАНЬ-ЮГ». 350072, Краснодар, ул. Жлобы, д. 1/1  
тел.: (861) 274-10-35; e-mail: lankrd98@mail.ru

#### **ДЛЯ РОЗНИЧНЫХ ПОКУПАТЕЛЕЙ:**

*интернет-магазины:*  
Издательство «Лань»: <http://www.lanbook.com>  
«Сова»: <http://www.symplex.ru>; «Ozon.ru»: <http://www.ozon.ru>  
«Библион»: <http://www.biblion.ru>

Подписано в печать 19.12.13.  
Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 84×108<sup>1/32</sup>.  
Печать офсетная. Усл. п. л. 10,08. Тираж 1000 экз.

Заказ № 179.

Отпечатано в полном соответствии  
с качеством предоставленного оригинал-макета  
в ОАО «Издательско-полиграфическое предприятие «Правда Севера».  
163002, г. Архангельск, пр. Новгородский, д. 32







**Издательство «Лань»**  
победитель конкурса по качеству  
«Сделано в Санкт-Петербурге»

ISBN 978-5-8114-1565-6



9 785811 415656