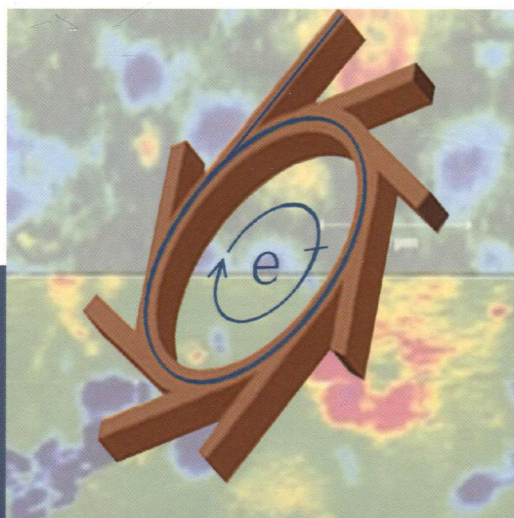


# СОВРЕМЕННАЯ ИНФРАКРАСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ: ОСНОВЫ, МЕТОДЫ, ПРИБОРНАЯ БАЗА

А. И. Ефимова  
В. Б. Зайцев  
Д. В. Казанцев  
Н. Ю. Болдырев



**А. И. ЕФИМОВА, В. Б. ЗАЙЦЕВ,  
Д. В. КАЗАНЦЕВ, Н. Ю. БОЛДЫРЕВ**

# **СОВРЕМЕННАЯ ИНФРАКРАСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ: ОСНОВЫ, МЕТОДЫ, ПРИБОРНАЯ БАЗА**

*Рекомендовано  
Федеральным учебно-методическим объединением  
в системе высшего образования  
по укрупненной группе специальностей  
и направлений подготовки «Физика и астрономия»  
в качестве учебного пособия для обучающихся  
по основным образовательным программам  
высшего образования по направлению подготовки  
«Физика» уровней бакалавриата и магистратуры,  
специалитета по специальности  
«Фундаментальная и прикладная физика»*



**ЛАНЬ**

• САНКТ-ПЕТЕРБУРГ • МОСКВА • КРАСНОДАР •  
2023

УДК 535  
ББК 22.344я73

**С 56** Современная инфракрасная спектроскопия: основы, методы, приборная база : учебное пособие для вузов / А. И. Ефимова, В. Б. Зайцев, Д. В. Казанцев, Н. Ю. Болдырев. — Санкт-Петербург : Лань, 2023. — 356 с. : ил. — Текст : непосредственный.

**ISBN 978-5-507-45721-2**

Учебное пособие предназначено для студентов и аспирантов физических и химических специальностей классических университетов, а также широкого круга специалистов, использующих современное оптическое спектральное оборудование в исследовании твердотельных низкоразмерных структур.

УДК 535  
ББК 22.344я73

**Рецензенты:**

*М. Н. ПОПОВА* — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института спектроскопии РАН;

*Д. Р. ХОХЛОВ* — доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой общей физики и физики конденсированного состояния вещества физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, член-корреспондент РАН;

*А. П. ШКУРИНОВ* — доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, член-корреспондент РАН.

**Обложка**  
*П. И. ПОЛЯКОВА*

© Издательство «Лань», 2023  
© Коллектив авторов, 2023  
© Издательство «Лань»,  
художественное оформление, 2023

# ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	3
ПРЕДИСЛОВИЕ.....	11
1. ОСНОВЫ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРИИ .....	14
1.1. Принципиальная оптическая схема фурье-спектрометра.....	14
1.2. Интерферограмма и восстановление оптического спектра из интерферограммы.....	15
1.3. Референтный лазерный канал и особенности восстановления спектров из дискретных интерферограмм .....	20
1.4. Фазовая коррекция и фазовые спектры .....	33
1.5. Суммирование интерферограмм и канал белого света .....	36
2. АППАРАТНАЯ ФУНКЦИЯ, ФУНКЦИЯ АПОДИЗАЦИИ И РАЗРЕШЕНИЕ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРА .....	40
2.1. Аппаратная функция и теоретический предел разрешения фурье- спектрометра, обусловленные конечностью оптической разности хода .....	40
2.2. Функция аподизации.....	44
2.3. Реальный фурье-спектрометр: аппаратная функция, разрешение .....	50
3. ПРЕИМУЩЕСТВА ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРОВ .....	62
3.1. Выигрыш в разрешающей способности по сравнению с дифракционными спектрометрами.....	62
3.2. Преимущество фурье-спектрометров перед щелевыми спектрометрами; выигрыш Жакино .....	67
3.3. Преимущество фурье-спектрометров перед сканирующими спектрометрами; выигрыш Фелжетга .....	71
4. ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ .....	79
4.1. Оптические материалы .....	79
4.2. Источники излучения .....	81
4.3. Светоделители .....	83
4.4. Поляризаторы .....	85
4.5. Приемники излучения.....	89
5. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПРОГРАММЫ: ПАРАМЕТРЫ ПОЛУЧЕНИЯ СПЕКТРОВ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ОБРАБОТКИ .....	101
6. ИСТОЧНИКИ СЛУЧАЙНЫХ И СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ОШИБОК ПРИ РАБОТЕ НА ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРАХ.....	113
7. СЕРИЙНЫЕ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРЫ: ОСОБЕННОСТИ И СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ .....	125
7.1. Интерферометры с плоскими зеркалами и динамическое отслеживание разьюстировки .....	126
7.2. Интерферометры с поворотными системами.....	133
7.3. Интерферометры с движущимися поступательно уголковыми ретрорефлекторами .....	136
7.4. Интерферометры типа «двойной маятник».....	141
7.5. Интерферометры типа «кошачий глаз» .....	153

8. МЕТОДЫ ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ: ПРИБОРНАЯ БАЗА И ОСОБЕННОСТИ РЕГИСТРАЦИИ СПЕКТРОВ .....	162
8.1. Спектроскопия пропускания.....	162
8.2. Спектроскопия зеркального отражения.....	177
8.3. Спектроскопия диффузного и полного отражения и пропускания .....	183
8.4. Спектроскопия нарушенного полного внутреннего отражения .....	192
8.4.1. Физические основы метода.....	192
8.4.2. Кристаллы и приставки нарушенного полного внутреннего отражения .....	194
8.4.3. Спектры НПВО и спектры пропускания .....	207
8.4.4. Преимущества спектроскопии НПВО и проблемы ее корректной, в том числе количественной, реализации.....	211
8.4.5. Особенности нарушенного полного внутреннего отражения в поглощающих и анизотропных средах .....	219
8.5. Оптическое волокно в ИК-спектрометрии .....	224
8.6. Сравнительная характеристика методов исследования ультратонких пленок, монослоев и систем пониженной размерности.....	229
9. ИНФРАКРАСНАЯ ФУРЬЕ-МИКРОСКОПИЯ.....	255
9.1. ИК-фурье-микроскопы и гиперспектральная визуализация .....	255
9.2. ИК-фурье-микроскопия высокого разрешения на синхротронных источниках излучения.....	276
10. БЛИЖНЕПОЛЬНАЯ ИНФРАКРАСНАЯ МИКРОСКОПИЯ- СПЕКТРОСКОПИЯ .....	291
10.1. Пространственное разрешение оптических и ближнеполюсных микроскопов.....	292
10.1.1. Дифракционный предел .....	292
10.1.2. Игла атомно-силового микроскопа — оптический шуп .....	292
10.1.3. Преодоление дифракционного предела в безапертурном ближнеполюсном оптическом микроскопе (БСБОМ) .....	295
10.2. Безапертурный ближнеполюсный оптический микроскоп глазами радиофизика .....	296
10.3. Фазоры — язык для описания колебаний и волн .....	297
10.4. Гомодинное (интерференционное) детектирование слабых рассеянных полей.....	299
10.5. Зависимость амплитуды рассеяния света иглой от расстояния игла-поверхность .....	304
10.5.1. Калибровка датчика высоты иглы над образцом.....	306
10.5.2. Запись вариаций фототока на выходе интерферометра Майкельсона .....	309
10.6. Калибровка детектирующей системы БСБОМ известными образцами.....	312
10.6.1. Лоренцев отклик плазмы свободных электронов в полупроводнике.....	313
10.6.2. Бегущая фонон-поляритонная волна .....	316

10.7. Сходство приборной конфигурации фурье-спектрометра и БСБОМ .....	322
10.8. Смешанное пространственно-временное рассмотрение интерферограммы.....	327
10.9. Детектирование с использованием термического расширения вследствие поглощения излучения.....	331
10.10. Усиленное иглой комбинационное рассеяние света .....	334
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>338</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>339</b>