

Нелинейная
лазерная
спектроскопия
сверхвысокого
разрешения

В. С. Летохов, В. П. Чеботаев

В. С. Летохов, В. П. Чеботаев

Нелинейная
лазерная
спектроскопия
сверхвысокого
разрешения



МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1990

ББК 22.344
Л52
УДК 535.33

Рецензент

доктор физико-математических наук *С. А. Азманов*

ЛЕТОХОВ В. С., ЧЕБОТАЕВ В. П. Нелинейная лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения.— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990.— 512 с.— ISBN 5-02-014040-6

Дано систематическое изложение основных принципов нелинейной лазерной спектроскопии сверхвысокого разрешения без доплеровского уширения: спектроскопии насыщения поглощения, двухфотонной спектроскопии и спектроскопии лазерно-охлажденных атомов. Изложены как основы теории, так и сведения об экспериментальных методах. Рассмотрены разнообразные применения методов в квантовой метрологии, атомной и молекулярной физике и квантовой электронике.

Для научных работников, инженеров, а также аспирантов и студентов старших курсов, специализирующихся в спектроскопии, оптике, атомной и молекулярной физике, квантовой электронике.

Табл. 15. Ил. 231. Библиогр.: 884 назв.

Научное издание

ЛЕТОХОВ Владимир Степанович, ЧЕБОТАЕВ Вениамин Павлович

НЕЛИНЕЙНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Заведующий редакцией *Л. И. Гладнева*
Редактор *Е. К. Козлова*
Младший редактор *В. А. Кузнецова*
Художественный редактор *Т. Н. Кольченко*
Технический редактор *Л. В. Лихачева*
Корректоры *Е. Ю. Рычагова, Н. Д. Дорохова*

ИБ № 32593

Сдано в набор 23.08.89. Подписано к печати 12.12.90. Формат 60×90/16. Бумага тип. № 1. Гарнитура обыкновенная. Печать высокая. Усл. печ. л.32. Усл. кр.-отт.32. Уч.-изд. л. 35,71. Тираж 1900 экз. Заказ № 4067. Цена 6 р. 90 к.

Издательско-производственное и книготорговое объединение «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

2-я типография издательства «Наука»
121099 Москва Г-99, Шубинский пер., 6

Л $\frac{1604060000-140}{053(02)-90}$ 73-91

© «Наука»
Физматлит, 1990

ISBN 5-02-014040-6

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
<i>Глава 1. Введение в субдоплеровскую спектроскопию</i>	<i>5</i>
§ 1.1. Уширение оптических спектральных линий в газе	5
1.1.1. Доплеровское уширение (5). 1.1.2. Механизмы однородного уширения (9).	
§ 1.2. Методы оптической спектроскопии без доплеровского уширения	11
1.2.1. Спектроскопия квантовых переходов: пучковые методы монохроматизации скоростей (12). 1.2.2. Спектроскопия квантовых уровней: двойной оптический резонанс, пересечение уровней и квантовые биения (16). 1.2.3. Спектроскопия релаксационной ширины: когерентные нестационарные методы (22).	
§ 1.3. Лазерная спектроскопия насыщения	24
1.3.1. Выжигание «дырки» при насыщении доплеровского контура (24). 1.3.2. Провал Лэмба. Обращенный провал Лэмба (28). 1.3.3. Варианты спектроскопии насыщения (33).	
§ 1.4. Двухфотонная лазерная спектроскопия	38
§ 1.5. Лазерная спектроскопия в пространственно разнесенных световых полях	40
§ 1.6. Лазерное охлаждение и локализация частиц	42
1.6.1. Лазерное охлаждение ионов и атомов (43). 1.6.2. Локализация частиц (45).	
§ 1.7. Узкие нелинейные резонансы в оптической области	47
<i>Глава 2. Элементы теории резонансного взаимодействия светового поля с доплеровски уширенным переходом</i>	<i>50</i>
§ 2.1. Уравнение Шредингера. Вероятности переходов в резонансном поле	51
2.1.1. Уравнения для амплитуд вероятностей (51). 2.1.2. Когерентные осцилляции в двухуровневой системе. Частота Раби (53). 2.1.3. Релаксация уровней (57).	
§ 2.2. Уравнения для матрицы плотности в резонансном поле	57
2.2.1. Общее уравнение для матрицы плотности (58). 2.2.2. Приближение вращающейся волны. Стационарный режим (60).	
§ 2.3. Различные релаксационные процессы. Движение частиц	63
2.3.1. Некогерентная связь (релаксация и возбуждение) с нерезонансными с полем уровнями (64). 2.3.2. Столкновительная дефазировка (64). 2.3.3. Двухуровневая система с учетом релаксации (67). 2.3.4. Движение частиц (69).	
§ 2.4. Поляризация и восприимчивость среды. Скоростные уравнения	71
2.4.1. Скоростные уравнения для заселенностей (72). 2.4.2. Коэффициент поглощения бегущей волны (73).	

§ 2.5.	Насыщение поглощения стоячей волной	75
	2.5.1. Слабое насыщение. Провал Лэмба (75). 2.5.2. Сильное насыщение. Эффекты заселенностей уровней (77). 2.5.3. Когерентные эффекты и эффекты неоднородности поля стоячей волны (82).	
§ 2.6.	Насыщение поглощения для случая сильной и слабой встречных волн	91
	2.6.1. Эффекты заселенностей уровней (91). 2.6.2. Произвольные частоты волн. Когерентные эффекты (92). 2.6.3. Точное решение (95).	
§ 2.7.	Насыщение поглощения для однонаправленных волн . . .	97
§ 2.8.	Эффект Штарка в световом поле на доплеровски уширенном переходе	100
Глава 3. Резонансы насыщения на доплеровски уширенном переходе		102
§ 3.1.	Резонансные явления в одномодовом лазере с насыщающимся газовым поглотителем	103
	3.1.1. Уравнения одномодового лазера (104). 3.1.2. Мощность генерации (105). 3.1.3. Частота генерации (115).	
§ 3.2.	Резонансы насыщения поглощения независимыми волнами 3.2.1. Метод встречной пробной волны (122). 3.2.2. Встречные волны разной частоты (127). 3.2.3. Волны с различной поляризацией (128).	120
§ 3.3.	Резонансы насыщения дисперсии. Интерферометрический и поляризационный методы	130
	3.3.1. Резонансы насыщения дисперсии показателя преломления (130). 3.3.2. Интерферометрическая нелинейная спектроскопия (132). 3.3.3. Поляризационная нелинейная спектроскопия (134).	
§ 3.4.	Резонансы насыщения плотности возбужденных частиц . . .	136
	3.4.1. Двухуровневый доплеровски уширенный переход (136). 3.4.2. Колебательно-вращательные переходы (138).	
§ 3.5.	Различные методы наблюдения резонансов насыщения . . .	141
	3.5.1. Резонансы интенсивности флуоресценции (142). 3.5.2. Метод маркирования уровней (143). 3.5.3. Оптогальваническое детектирование резонансов (144). 3.5.4. Оптоакустическое детектирование резонансов (145).	
Глава 4. Двухфотонные резонансы без доплеровского уширения		148
§ 4.1.	Двухфотонное поглощение	149
	4.1.1. Вероятности перехода (150). 4.1.2. Правила отбора (151). 4.1.3. Резонансное повышение сечения (153).	
§ 4.2.	Форма двухфотонного резонанса в газе во встречных световых лучах	155
	4.2.1. Линейный доплер-эффект (155). 4.2.2. Квадратичный доплер-эффект (158). 4.2.3. Полевой сдвиг и уширение двухфотонного резонанса (160).	
§ 4.3.	Резонансы двухфотонной дисперсии	165
	4.3.1. Вращение плоскости поляризации (165). 4.3.2. Оптическая бистабильность на узком двухфотонном резонансе (166). 4.3.3. Поляризационная двухфотонная спектроскопия (168).	
§ 4.4.	Наблюдение двухфотонных резонансов без доплеровского уширения	170
	4.4.1. Атомные переходы (170). 4.4.2. Колебательно-вращательные переходы (172). 4.4.3. Электронно-колебательно-вращательные переходы (174).	
§ 4.5.	Бездоплеровское комбинационное рассеяние в газе	174

Глава 5. Резонансы на связанных доплеровски уширенных переходах	177
§ 5.1. Двухквантовые и ступенчатые переходы	181
§ 5.2. Основные уравнения	186
5.2.1. Уравнения для амплитуды вероятности (187). 5.2.2. Уравнение для матрицы плотности трехуровневых атомов (189). 5.2.3. Вероятность перехода в трехуровневой схеме (192).	
§ 5.3. Форма линии поглощения на связанных переходах в газе	195
5.3.1. Форма линии излучения в условиях резонанса в слабых полях (196). 5.3.2. Форма линии излучения в сильных полях (199).	
§ 5.4. Методы исследований резонансных явлений в трехуровневых системах	201
5.4.1. Резонансы в спонтанном излучении (202). 5.4.2. Резонансы на вынужденных переходах (206). 5.4.3. Резонансы при пересечении мод (208).	
§ 5.5. Исследования резонансного ВКР	210
5.5.1. Выбор переходов (210). 5.5.2. Описание эксперимента по наблюдению резонансного ВКР (211). 5.5.3. Форма линии резонансного ВКР (214). 5.5.4. Поляризационные характеристики резонансного ВКР (215).	
§ 5.6. Нелинейные резонансы ВКР в поле стоячей волны	216
§ 5.7. Провал Лэмба на связанных, близко расположенных переходах. Перекрестные резонансы	220
Глава 6. Метод разнесенных оптических полей	224
§ 6.1. Метод разнесенных полей в микроволновом диапазоне	224
§ 6.2. Двухфотонные резонансы	227
6.2.1. Двухфотонный резонанс в пространственно разнесенных оптических полях (227). 6.2.2. Двухфотонное поглощение последовательности сверхкоротких импульсов (229).	
§ 6.3. Резонансы в двухуровневой системе	231
6.3.1. Резонансы поглощения в трех полях (231). 6.3.2. Перенос макроскопической поляризации (233). 6.3.3. Теория метода разнесенных полей (236). 6.3.4. Экспериментальные исследования метода разнесенных полей (238).	
Глава 7. Узкие резонансы охлажденных и плененных частиц	245
§ 7.1. Эффекты резонансного давления лазерного излучения для атомных частиц	245
7.1.1. Радиационное охлаждение атомных частиц (246). 7.1.2. Локализация атомов в световом поле (248).	
§ 7.2. Влияние отдачи фотона на движение атома	248
7.2.1. Эффект отдачи при поглощении (испускании) фотона (249). 7.2.2. Сила светового давления (251). 7.2.3. Импульсная диффузия (253).	
§ 7.3. Радиационная сила для двухуровневого атома в резонансном световом поле	254
7.3.1. Общее выражение для силы светового давления (254). 7.3.2. Плоская бегущая волна (255). 7.3.3. Плоская стоячая волна. Многорезонансная структура (256). 7.3.4. Бегущий гауссовский луч. Градиентная сила (259).	
§ 7.4. Замедление и охлаждение атомов резонансным световым полем	260
7.4.1. Замедление и монохроматизация атомного пучка бегущей волной (260). 7.4.2. Поперечное охлаждение и коллимация атомного пучка (270). 7.4.3. Радиационное охлаждение атомов во встречных световых волнах (273).	
§ 7.5. Локализация нейтральных атомов в оптических ловушках	276

§ 7.6.	Локализационные атомные ионы в лазерном поле	280
	7.6.1. Методы локализации ионов (280). 7.6.2. Радиационное охлаждение локализованных ионов (282). 7.6.3. Эксперименты по лазерному охлаждению ионов (286).	
§ 7.7.	Получение узких резонансов путем охлаждения частиц	288
	7.7.1. Возможные пути получения узких резонансов (288). 7.7.2. Ультразвукие резонансы на запрещенных переходах локализованных ионов (291). 7.7.3. Ультразвукие резонансы на запрещенных переходах атомов (292).	
<i>Глава 8.</i>	<i>Нелинейные резонансы в спектроскопии</i>	<i>294</i>
§ 8.1.	Ширина нелинейных резонансов	296
	8.1.1. Влияние столкновений (296). 8.1.2. Пролетные эффекты (301). 8.1.3. Интенсивность резонансов (309). 8.1.4. Другие эффекты (312).	
§ 8.2.	Экспериментальные исследования резонансов в пролетной области	314
§ 8.3.	Лазерные спектрометры для спектроскопии сверхвысокого разрешения	321
<i>Глава 9.</i>	<i>Узкие резонансы в атомной спектроскопии</i>	<i>329</i>
§ 9.1.	Измерение естественной ширины и времени жизни уровней 9.1.1. Измерение естественной ширины линий (329). 9.1.2. Измерение времени жизни уровней (334). 9.1.3. Трехуровневые системы (336).	329
§ 9.2.	Ударное уширение нелинейных резонансов	337
	9.2.1. Основные экспериментальные результаты (337). 9.2.2. Механизмы столкновений (341). 9.2.3. Исследование релаксационных процессов на отдельных уровнях методами ТЛС (345).	
§ 9.3.	Исследование структуры уровней	355
	9.3.1. Изотопическая и сверхтонкая структуры (355). 9.3.2. Исследование эффектов Зеемана и Штарка (362).	
§ 9.4.	Спектроскопия запрещенных переходов	367
§ 9.5.	Нелинейная лазерная спектроскопия ридберговских атомов	369
<i>Глава 10.</i>	<i>Нелинейная молекулярная лазерная спектроскопия</i>	<i>372</i>
§ 10.1.	Исследование структуры уровней	373
	10.1.1. Электронно-колебательно-вращательные переходы молекул (373). 10.1.2. Сверхтонкая структура (374). 10.1.3. Штарк- и зееман-эффекты на колебательно-вращательных переходах (377). 10.1.4. Измерение вращательных постоянных и изотопических сдвигов по биениям (384).	
§ 10.2.	Ударное уширение резонансов на колебательно-вращательных переходах	385
	10.2.1. Ударное уширение контура линий поглощения молекул (385). 10.2.2. Уширение нелинейных резонансов (386). 10.2.3. Однородность насыщения на колебательно-вращательных переходах при низком давлении (388). 10.2.4. Нелинейная зависимость ширины резонансов от давления (390). 10.2.5. Наблюдение упругого рассеяния при столкновениях (394). 10.2.6. Применение резонансов при исследовании неупругих столкновений (397).	
§ 10.3.	Прикладная молекулярная спектроскопия	399
<i>Глава 11.</i>	<i>Узкие резонансы в квантовой электронике</i>	<i>401</i>
§ 11.1.	Селекция мод нелинейным поглощением	401
§ 11.2.	Узкие резонансы усиления в трехуровневой схеме	405
§ 11.3.	Стабилизация частоты лазеров по узким резонансам	408
	11.3.1. Метод внутренней нелинейно-поглощающей ячейки (410). 11.3.2. Лазер с узкой линией излучения (414). 11.3.3. Дол-	

временная стабильность и воспроизводимость частоты лазера (416). 11.3.4. Стабилизация частоты по сверхузким резонансам (424). 11.3.5. Метод внешней нелинейно-поглощающей ячейки (427). 11.3.6. Стабилизация частоты по конкурентным резонансам (430). 11.3.7. Стабилизация частоты в двухмодовом режиме (431).	
§ 11.4. Оптические часы	432
§ 11.5. Измерение абсолютной частоты лазеров	433
<i>Глава 12. Узкие оптические резонансы в экспериментальной физике</i>	436
§ 12.1. Измерение скорости света	437
§ 12.2. Прецизионная спектроскопия переходов атома водорода	440
12.2.1. Насыщение поглощения серии Бальмера. Постоянная Ридберга (441). 12.2.2. Двухфотонная спектроскопия перехода $1S \rightarrow 2S$. Сдвиг Лэмба (443).	
§ 12.3. Прецизионная спектроскопия лептонных атомов	449
12.3.1. Позитроний (449). 12.3.2. Мюоний (452).	
§ 12.4. Наблюдение эффектов теории относительности	453
12.4.1. Релятивистский эффект Доплера (453). 12.4.2. Изотропия пространства и скорости света (456). 12.4.3. Связь массы и энергии (456).	
§ 12.5. Наблюдение эффектов гравитации и космологии	458
12.5.1. Детектирование гравитационных волн (458). 12.5.2. Проверка постоянства мировых констант (460).	
§ 12.6. Другие квантовые эффекты	462
12.6.1. Эффекты отдачи (463). 12.6.2. Расщепление уровней энергии левых и правых молекул (465).	
§ 12.7. О возможностях лазерной γ -спектроскопии без доплеровского уширения	467
12.7.1. Связь между оптическими и ядерными переходами (467). 12.7.2. Электронно-ядерные переходы в атомах (470). 12.7.3. Молекулярно-ядерные переходы (471). 12.7.4. Двойной γ - и оптический резонанс (474). 12.7.5. Лазерно-индуцированные узкие резонансы 2γ -аннигиляционного излучения (478).	
Список литературы	481