

В.Я. Молчанов, Ю.И. Китаев,
А.И. Колесников, В.Н. Нарвер, А.З. Розенштейн,
Н.П. Солодовников, К.Г. Шаповаленко

**ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА
СОВРЕМЕННОЙ
АКУСТООПТИКИ**



**В.Я. Молчанов, Ю.И. Китаев,
А.И. Колесников, В.Н. Нарвер, А.З. Розенштейн,
Н.П. Солодовников, К.Г. Шаповаленко**

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА СОВРЕМЕННОЙ АКУСТООПТИКИ

Научная монография



Москва 2015

УДК 535
Т33

Монография издана при организационной и финансовой поддержке
авторов А.З. Розенштейна и К.Г. Шаповаленко

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук, проф. *В.И. Балакиев* (МГУ им. М.В. Ломоносова);
д-р физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. РАН *Ю.Н. Пархоменко* (НИТУ «МИСиС»)

Авторы: В.Я. Молчанов, Ю.И. Китаев, А.И. Колесников, В.Н. Нарвер,
А.З. Розенштейн, Н.П. Солодовников, К.Г. Шаповаленко

Теория и практика современной акустооптики [Текст] : науч. моногр. /
Т33 В.Я. Молчанов [и др.]. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2015. – 459 с.
ISBN 978-5-87623-483-4

В монографии рассмотрен широкий спектр теоретических проблем, возникающих при изучении взаимодействия света с полем акустической волны, пути их решения и представлены результаты технической реализации полученных результатов в спектроскопии, оптической обработке информации, лазерной технике, оптоволоконной связи, кристаллофизике, микробиологии.

Теоретически обоснована возможность создания акустооптических (АО) адаптивных мягких диафрагм для мощных лазерных машин. Впервые представлен дисперсионный вид АО взаимодействия, который характеризуется комплексными спектральными аппаратными функциями. Рассмотрено формирование произвольных спектральных функций пропускания монохроматоров, не имеющих аналогов в классической спектрометрии. Представлены результаты исследований управления фемтосекундными и субпикосекундными лазерными импульсами в ОРСПА и СРА лазерных системах посредством АО дисперсионных линий задержки. Изложена теория многочастотной дифракции. Рассмотрены гиперспектральные и спектрополяриметрические методы и АО аппаратура анализа изображений объектов. Разобраны примеры наблюдательных артефактов. Проанализированы нанотехнологические аспекты изготовления АО приборов, которые не имеют физических и химических механизмов деградации свойств во времени, и физические принципы разработки и конструирования электронных систем управления для АО приборов, в том числе дисперсионных. Детально рассмотрены принципы работы сканирующих АО систем. Представлена новая лазерная система с энергетическим воздействием на исследуемый объект в области локализации единичного пикселя. Уделено внимание созданию и применению АО сканирующих систем в волоконных линиях связи. Рассмотрены структура, свойства, способы выращивания и дефекты одного из самых востребованных в фотонике АО материалов – монокристаллов парателлурита. Показана динамика развития технологии выращивания и повышения структурной и оптической однородности этих кристаллов.

Настоящая монография предназначена для исследователей и научных работников в области фотоники, лазерной физики и спектроскопии, может быть рекомендована студентам старших курсов и аспирантам соответствующих специальностей.

УДК 535

ISBN 978-5-87623-483-4

© Коллектив авторов, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

К читателю	8
Предисловие.....	9
Глава 1. Преобразование пространственного спектра когерентного излучения при дифракции на акустических волнах	16
1.1. Дифракция света на акустических волнах	16
1.1.1. Историческое введение. Основные понятия и определения. Дифракция Рамана–Ната и дифракция Брэгга	16
1.1.2. Дифференциальный метод решения задачи при дифракции Брэгга	22
1.1.3. Квантомеханическое представление об акустооптическом взаимодействии	27
1.2. Теория взаимодействия расходящихся световых и звуковых пучков в сильном акустическом поле	34
1.2.1. Дифракция ограниченной световой волны на ультразвуке	34
1.2.2. Формирование углового спектра пространственных гармоник дифрагированной волны	36
1.2.3. Модификация профиля лазерного пучка в зоне акустооптического взаимодействия. Акустооптическое устройство как мягкая лазерная диафрагма	38
1.2.4. Распределение поля дифрагированного света в дальней зоне при сильном взаимодействии	43
1.2.5. Различие между дифракцией света на акустических волнах и дифракцией на отверстиях	45
Библиографический список	49
Глава 2. Спектральные акустооптические приборы в астрофизике и в космосе	53
2.1. Спектральные акустооптические фильтры. Основные определения	53
2.2. Особенности приборов на монокристаллах парателлурита для ультрафиолетового диапазона длин волн	58
2.3. Концепция акустооптического спектрометра изображений	62
2.3.1. Спектрометр изображений. Основные определения.....	62
2.3.2. Искажения спектральных изображений при акустооптической фильтрации.....	66
2.4. Спектральные акустооптические системы для неполяризованного излучения.....	74
2.5. Астрономический спектрометр изображений.....	80
2.5.1. Акустооптический спектрометр изображений	82
2.5.2. Астрономические наблюдения с акустооптическим спектрометром.....	85
2.6. Спектральные акустооптические приборы в космических исследованиях.....	96
Библиографический список	103

Глава 3. Адаптивные дисперсионные линии задержки для фемтосекундных лазерных систем.....	113
3.1. Адаптивное управление спектральными амплитудами и фазами электромагнитного излучения с помощью пространственного фотон-фононного взаимодействия в кристалле	113
3.2. Акустооптические приборы: дисперсионные линии задержки и перестраиваемые фильтры с квазиколлинеарной геометрией взаимодействия в монокристалле парателлурита	120
3.3. Варианты оптимизации квазиколлинеарного взаимодействия в различных приборах в зависимости от системных требований.....	124
3.4. Уменьшение углового chirpa дифрагированного фемтосекундного пучка	130
3.5. Спектральные характеристики квазиколлинеарных акустооптических устройств на монокристалле парателлурита в монохроматическом режиме	133
3.6. Квазиколлинеарные акустооптические устройства УФ диапазона длин волн на основе монокристалла KDP	136
3.7. Особенности управления спектральной амплитудой и спектральной фазой фемтосекундных импульсов.....	143
3.7.1. Особенности спектрального синтеза аппаратной функции дисперсионной линии задержки при управлении спектральными амплитудами. Согласованная трансформация оптического спектра.....	143
3.7.2. Аспекты управления спектральной фазой фемтосекундного импульса. Двухкаскадная дисперсионная линия задержки.....	149
3.8. Дисперсионные методы формирования произвольных спектральных функций пропускания квази-ЛЧМ сигналом для задач согласованной оптической спектральной фильтрации.....	155
3.9. Дисперсионная обработка широкополосных фемтосекундных спектров.....	162
3.9.1. Дисперсионная линия задержки в ОРСРА фемтосекундной лазерной системе.....	162
3.9.2. Трансформация широкополосного спектра фемтосекундных лазерных импульсов дисперсионной линии задержки	165
3.10. Дисперсионные линии задержки для обработки узкополосных спектров. Спектральная коррекция субпикосекундных лазерных импульсов в регенеративном усилителе на основе неодимового фосфатного стекла	167
Библиографический список	174
Глава 4. Системы возбуждения ультразвуковых волн в акустооптических приборах.....	181
4.1. Пьезопреобразователи акустооптических устройств	181
4.2. Нанотехнология изготовления пьезопреобразователей методом вакуумной интердиффузии атомов в химически активных ультратонких слоях. Входной импеданс пьезопреобразователя со связующим слоем	185

4.3. Задача электрического согласования	197
4.4. Толстые, тонкие и ультратонкие связующие слои	200
4.5. Алгоритмы и методы синтеза согласующих цепей акустооптических устройств по диаграммам Смита	204
4.6. Увеличение спектрального диапазона перестройки акустооптических фильтров при применении пьезопреобразователей из ниобата лития с регулярной доменной структурой	210
Библиографический список	215
Глава 5. Многочастотная акустооптическая дифракция	219
5.1. Многочастотная изотропная дифракция Брэгга	219
5.1.1. Уравнения связанных волн при многочастотной акустооптической дифракции	219
5.1.2. Применение метода медленно меняющихся амплитуд к уравнениям связанных волн	222
5.1.3. Диаграммы Фейнмана	223
5.1.4. Интегралы по пути	224
5.1.5. Вычисление интегралов по пути	227
5.1.6. Спектральный состав излучения при многочастотной акустооптической дифракции	228
5.1.7. Правила отбора путей	230
5.1.8. Эффективность многочастотной дифракции	231
5.1.9. Кроссмодуляция оптических мод при многочастотной дифракции	233
5.1.10. Интермодуляционные составляющие спектра оптических мод	235
5.2. Анизотропная многочастотная дифракция	237
5.2.1. Векторные диаграммы при анизотропной акустооптической дифракции	237
5.2.2. Многочастотная акустооптическая дифракция при сканирующих акустических пучках	241
Глава 6. Разработка и конструирование электронных систем управления для применения в области акустооптики	256
6.1. Общие принципы построения электронных систем управления для применения в области акустооптики	256
6.2. Основы конструирования генераторов	261
6.2.1. Неуправляемые генераторы	261
6.2.2. Управляемые генераторы с электронной перестройкой частоты	268
6.2.3. Переходные процессы в ТВГ	272
6.2.4. Шумы ТВГ	273
6.2.5. Схемотехнические особенности и устойчивость колебаний ТВГ	274
6.2.6. ТВГ с быстрой перестройкой частоты	277
6.2.7. Структурная схема задающего генератора для акустооптических устройств на основе ТВГ с быстрой перестройкой	280

6.3. Выбор усилителей ВЧ мощности для акустооптических систем	309
6.3.1. Современные технологии конструирования широкополосных усилителей	309
6.3.2. Основные параметры усилителя ВЧ мощности.....	312
6.3.3. Балансный широкополосный усилитель с регулируемой выходной мощностью	317
6.3.4. Акустооптические фильтры	318
Библиографический список	326
Глава 7. Акустооптические сканирующие системы для ультрафиолетового и инфракрасного когерентного излучения	329
7.1. Акустооптические сканирующие системы для ультрафиолетового излучения	330
7.1.1. Диапазоны УФ спектра	330
7.1.2. Лазеры УФ диапазона.....	331
7.1.3. Акустооптические дефлекторы и сканеры для УФ излучения	333
7.1.4. Лазерные сканирующие системы для УФ излучения с лучевым воздействием на объект	339
7.1.5. Перспективные лазерные сканирующие системы для УФ излучения	343
7.2. Акустооптические лазерные информационные системы	347
7.2.1. Акустооптическая лазерная информационная система векторного отображения информации	348
7.2.2. Акустооптическая лазерная информационная система с оптоволоконным экраном	352
7.2.3. Лазерная информационная система с УФ лазером.....	354
7.3. Применение акустооптических сканирующих систем ИК диапазона в волоконных линиях связи.....	357
7.3.1. Структура современных волоконно-оптических сетей.....	358
7.3.2. Полностью оптические маршрутизаторы.....	362
7.3.3. Возможная реализация структуры матрицы оптического коммутатора на элементах MEMS.....	369
7.3.4. Матрица оптического коммутатора на многоканальном акустооптическом элементе на базе кристалла арсенида галлия.....	371
7.3.5. Матрица оптического коммутатора на акустооптическом элементе на основе кристалла парателлурита.....	381
7.3.6. Технологии создания и тестирования оптоволоконных матриц.....	386
7.4. Акустооптические оптоволоконные коммутаторы на базе элементов интегральной оптики	392
7.4.1. Характеристика акустооптических оптоволоконных коммутаторов.....	392
7.4.2. Оптимизация параметров функциональных элементов интегрального акустооптического коммутатора	393
7.4.3. Материалы для интегральной акустооптики.....	394
7.4.4. Планарные оптические волноводы и линзы.....	396

7.4.5. Расчет параметров геодезической линзы с учетом aberrаций.....	397
7.4.6. Устройства возбуждения поверхностных акустических волн.....	399
Библиографический список	403
Глава 8. Акустооптические материалы	407
8.1. Основные требования к акустооптическим материалам.....	407
8.2. Дефекты в акустооптических кристаллах.....	416
8.3. Монокристаллы парателлурифта.....	419
8.3.1. Структура и свойства парателлурифта	419
8.3.2. Способы выращивания кристаллов парателлурифта	435
8.3.3. Структурные и оптические дефекты в кристаллах парателлурифта	441
Библиографический список	455