

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие .....</b>	8
<b>Предисловие авторов .....</b>	10
<b>Введение .....</b>	13
<b>Глава 1. Голографические дифракционные решетки .....</b>	18
1.1. Оптические волны и простейшие дифракционные решетки .....	19
1.1.1. Оптические волны .....	19
1.1.2. Интерференционная картина .....	22
1.1.3. Запись и восстановление волнового фронта .....	24
1.1.4. Пространственные частоты .....	30
1.1.5. Дифракционная эффективность .....	31
1.1.6. Селективность тонкой амплитудной голограммы .....	32
1.2. Тонкие фазовые голографические решетки, дифракция Рамана — Ната .....	32
1.3. Некоторые примеры тонких фазовых голографических решеток .....	36
1.4. Толстые голографические решетки, дифракция Брэгга .....	39
1.4.1. Теория связных волн Когельника .....	42
1.4.2. Фазовые пропускающие голограммы .....	46
1.4.3. Фазовые отражательные голограммы .....	51
1.5. Некоторые примеры отражательных голограмм .....	54
1.6. Пропускающая и отражательная геометрии для записи и считывания голограмм .....	57
1.7. Работа отражательной решетки Брэгга как оптического фильтра .....	59
1.8. Краткие итоги первой главы .....	61
<b>Глава 2 Отражательные дифракционные решетки с фазовым кодированием .....</b>	62
2.1. Передаточная функция простой отражательной решетки Брэгга ...	62
2.2. Передаточная функция отражательной решетки Брэгга с одним фазовым сдвигом .....	66
2.3. Передаточная функция отражательной решетки Брэгга, содержащей набор фазовых сдвигов .....	74
2.4. Передаточная функция отражательной решетки, случай малых амплитуд решетки .....	79
2.5. Передаточная функция и информационные параметры отражательных решеток Брэгга .....	83
2.6. Краткие итоги второй главы .....	85
<b>Глава 3.Фоторефрактивные кристаллические материалы и механизмы записи голографических решеток .....</b>	86
3.1. Фоторефрактивная запись решеток .....	86
3.1.1. Диффузионный механизм голографической записи .....	89

3.1.2. Дрейфовый механизм голограммической записи .....	92
3.1.3. Общий случай записи фазовой голограммической решетки в фоторефрактивном кристалле .....	93
3.1.4. Эффект насыщения ловушечных уровней .....	95
3.2. Голограммическая запись решеток в ниобате лития .....	97
3.2.1. Фотогальванический эффект в ниобате лития .....	99
3.2.2. Электрооптический эффект в ниобате лития .....	103
3.2.3. Зависимость амплитуды голограммической решетки от ориентации кристалла $\text{LiNbO}_3$ .....	106
3.3. Голограммическая запись в титанате бария .....	110
3.3.1. Голограммические свойства титаната бария .....	110
3.3.2. Зависимость амплитуды решетки от ориентации кристалла $\text{BaTiO}_3$ .....	112
3.4. Голограммическая запись в силленитах .....	113
3.4.1. Электрооптический эффект в силленитах .....	115
3.4.2. Продольный и поперечный электрооптический эффект в силленитах .....	116
3.4.3. Динамические голограммы в силленитах .....	120
3.4.4. Запись отражательных решеток в силленитах с использованием обратного флексоэлектрического эффекта .....	122
3.5. Краткие итоги третьей главы: возникновение явления двухволнового взаимодействия в динамических голограммических средах .....	128
<b>Глава 4. Адаптивные голограммические интерферометры</b> .....	131
4.1. Рабочая точка интерферометра .....	136
4.1.1. Стабилизация интерферометра при помощи динамической голограммы .....	139
4.2. Голограммический интерферометр на двух- и трехволновом взаимодействии в силленитах .....	140
4.2.1. Геометрия изотропной (без поворота плоскости поляризации) дифракции .....	143
4.2.2. Геометрия анизотропной (с поворотом плоскости поляризации) дифракции .....	146
4.3. Практическая реализация интерферометра на двух- и трехволновом взаимодействии в силленитах .....	148
4.3.1. Абсолютная калибровка интерферометра .....	148
4.3.2. Особенности работы адаптивного голограммического интерферометра, режимы двух- и трехволнового взаимодействия .....	149
4.3.3. Измерение малых механических колебаний адаптивным интерферометром .....	156
4.4. Адаптивный интерферометр для направленного детектирования лазерного ультразвука .....	159

4.4.1. Интерферометр для ненаправленного детектирования ультразвуковых волн .....	159
4.4.2. Интерферометр для направленного детектирования ультразвуковых волн .....	161
4.5. Адаптивный интерферометр с использованием BaTiO <sub>3</sub> .....	166
4.5.1. Линеаризация выхода интерферометра .....	167
4.5.2. Численный анализ работы интерферометра .....	169
4.5.3. Измерение давления света адаптивным интерферометром на BaTiO <sub>3</sub> .....	174
4.6. Исследование сил Казимира методами динамической голографии .....	178
4.6.1. Что это такое — сила Казимира? .....	178
4.6.2. Экспериментальное исследование сил Казимира между макрообъектами .....	180
4.6.3. Сравнение теоретических и экспериментальных результатов .....	185
4.7. Краткие итоги четвертой главы .....	189
<b>Глава 5. Исследование материальных параметров фотопреломляющих кристаллов и высокоомных полупроводников ....</b>	<b>190</b>
5.1. Волны пространственного заряда в силленитах и их дисперсионное соотношение .....	190
5.2. Способы оптического возбуждения волн пространственного заряда .....	192
5.2.1. Способ движущихся решеток .....	192
5.2.2. Способ переменного электрического поля .....	194
5.2.3. Способ осциллирующей решетки .....	195
5.3. Уравнение поля пространственного заряда .....	196
5.4. Дифракция света на тонкой голограмме в случае осцилляции во времени амплитуды голографической решетки .....	198
5.4.1. Экспериментальные исследования ВПЗ в силленитах .....	200
5.4.2. Основные итоги исследования волн пространственного заряда .....	206
5.5. Измерение концентрации ловушечных уровней в силленитах с помощью адаптивного голографического интерферометра .....	207
5.5.1. Экспериментальные методы и результаты .....	208
5.6. ВПЗ в высокоомных полупроводниках .....	214
5.6.1. «Обычные» и «необычные» волны перезарядки ловушек .....	214
5.6.2. Экспериментальные исследования ВПЗ в высокоомных полупроводниках .....	220
5.6.3. InP:Fe в «ортогональной» геометрии .....	221
5.6.4. GaAs:Cr в «ортогональной» геометрии .....	224
5.6.5. Эффект усиления ВПЗ при отрицательной дифференциальной проводимости в присутствии внешнего магнитного поля .....	230
5.6.6. GaAs:Cr и InP:Fe в «параллельной» геометрии .....	232

5.6.7. Ориентационные зависимости ВПЗ для GaAs:Cr .....	238
5.7. Краткие итоги пятой главы .....	245
<b>Глава 6. Дифракционные фильтры и устройства на их основе .....</b>	<b>246</b>
6.1. Спектральные диапазоны работы волоконно-оптических линий связи .....	247
6.2. Спектральная селективность дифракционных фильтров .....	250
6.3. Оптический демультиплексор на тонкой фазовой решетке .....	251
6.4. Электрически управляемые брэгговские фильтры в интегральном исполнении на LiNbO <sub>3</sub> .....	254
6.4.1. Принцип работы интегрально-оптического волновода .....	256
6.4.2. Основы волновой теории интегрально-оптического волновода .....	262
6.4.3. Использование волнового уравнения для анализа волновода ....	265
6.4.4. Конкретный вид поля в волноводе .....	269
6.4.5. Двумерные (канальные) волноводы .....	271
6.5. Основы технологии изготовления оптических волноводов .....	271
6.6. Практическая реализация интегрально-оптического фильтра .....	273
6.7. Оптический кодер с синтезируемой передаточной характеристикой в интегральном исполнении на LiNbO <sub>3</sub> .....	278
6.8. Волоконно-оптические фильтры Брэгга .....	283
6.8.1. Оптическое волокно со ступенчатым показателем преломления .....	285
6.8.2. Поперечные электрические волны .....	291
6.8.3. Классификация мод .....	293
6.8.4. Отражательные решетки Брэгга в оптическом волокне .....	295
6.9. Краткие итоги шестой главы .....	299
<b>Глава 7. Интерференционные фильтры Фабри — Перо и устройства на их основе .....</b>	<b>300</b>
7.1. Передаточная функция простого фильтра Фабри — Перо .....	300
7.2. Передаточная функция многозеркального фильтра Фабри — Перо .....	305
7.2.1. Матричный формализм многоволнового фильтра Фабри — Перо .....	305
7.2.2. Фильтр Фабри — Перо, состоящий из двух зеркал .....	307
7.2.3. Фильтр Фабри — Перо, состоящий из трех зеркал, частные случаи .....	308
7.2.4. Фильтр Фабри — Перо, состоящий из трех зеркал, общий случай .....	312
7.2.5. Фильтр Фабри — Перо, состоящий из четырех зеркал .....	314
7.2.6. Фильтр Фабри — Перо, состоящий из четырех зеркал, сглаженная передаточная функция .....	317
7.3. Примеры устройств, использующих перестраиваемые фильтры Фабри — Перо .....	320
7.3.1. Управляемый демультиплексор .....	320

7.3.2. Методика тестирования оптического демультиплексора и экспериментальные результаты .....	323
7.3.3. Оптический спектроанализатор .....	327
7.4. Краткие итоги седьмой главы .....	328
<b>Глава 8. Оптические модуляторы на основе интерференции .....</b>	<b>329</b>
8.1. Общие принципы модуляции оптических сигналов .....	330
8.1.1. Основные схемы оптических модуляторов .....	333
8.1.2. Материалы для модуляторов .....	339
8.2. Основные характеристики модуляторов .....	341
8.2.1. Электрическая полоса пропускания .....	344
8.3. Прямая токовая модуляция лазерного диода .....	353
8.4. Модуляция света за счет модуляции поглощения (электроабсорбция) .....	361
8.5. Технологии роста и интеграция .....	371
8.6. Конструкция и методы изготовления модулятора Maxa — Цендера на основе LiNbO <sub>3</sub> .....	373
8.6.1. Создание модуляторов на подложках LiNbO <sub>3</sub> .....	374
8.6.2. Оптическая схема модулятора Maxa — Цендера в интегральном исполнении .....	381
8.7. Электрооптические модуляторы на основе фосфида индия .....	394
8.7.1. Конструкция модулятора на InP .....	396
8.8. Модуляторы на основе кремния Si .....	403
8.9. Модуляторы на основе GaAs .....	409
8.10. Модуляторы на основе полимеров .....	415
8.10.1. Конфигурация модулятора .....	417
<b>Заключение .....</b>	<b>421</b>
<b>Список литературы .....</b>	<b>423</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В предлагаемой читателю книге рассматривается область научных исследований, связанных с использованием оптических технологий для генерации, передачи и обработки оптических сигналов. Термин «фотоника», закрепившийся за данным направлением, вынесен в название книги и подчеркивает ключевое значение свойств фотонов в расширении функциональных возможностей и повышении характеристик современных информационно-телекоммуникационных систем. Волоконно-оптические линии связи с их огромной пропускной способностью являются основой всей современной телекоммуникационной инфраструктуры. Использование оптических методов для высокоточных измерений позволяет достичь беспрецедентной чувствительности сложнейших систем, примером которых может служить проект LIGO, впервые позволивший экспериментально наблюдать гравитационные волны. Оптические компоненты используются для демонстрации квантовых вычислений и рассматриваются как перспективная элементная база квантовых компьютеров. Неуклонно растет число научных публикаций по этому направлению, формируются новые высокорейтинговые научные издания, такие как *Nature Photonics*, *APL Photonics* и др. Все это делает публикацию книги весьма своеобразной и соответствующей современным тенденциям в развитии науки и техники.

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе всегда был одним из мировых лидеров в области применения оптических методов в информационных технологиях, начиная от разработки компонентной базы полупроводниковой оптоэлектроники и заканчивая построением сложных комплексов для передачи и обработки оптических сигналов. Заметное место в этих работах занимают исследования, проводимые в лаборатории квантовой электроники в тесном сотрудничестве с кафедрой квантовой электроники Политехнического института (ныне Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого). Это, прежде всего, пионерские исследования в области фоторефрактивных материалов и их применения в оптических системах обработка информации и голограмической интерферометрии. Результаты этих исследований являются базисом данной книги, в которой изложены как теоретические основы применения явлений интерференции и дифракции для построения компонентной базы фотоники, так и практические аспекты использования фоторефрактивных материалов при разработке ключевых элементов оптических информационных систем, таких как управляемые дифракционные решётки, адаптивные интерферометры и интегрально-оптические модуляторы. Помимо оригинальных результатов, полученных авторами, в книге дан широкий обзор последних достижений в рассматриваемой области. Библиография насчитывает более 600 источников. Отдельно рассмотрены возможности применения интерференционных и дифракционных компонентов для актуальных современных направлений оптических информационных технологий, таких как нанооптомеханика и сверхширокополосные интегрально-оптические модуляторы.

Книга рассчитана на широкий круг читателей и может быть полезна как студентам и аспирантам физических и технических специальностей, так и специалистам, занимающимся разработкой оптических информационных систем.

Академик РАН, профессор И. В. Грехов

## **ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРОВ**

В последние годы информационно-телекоммуникационные технологии претерпевают революционные изменения, которые связаны с бурным развитием сетевых технологий и разнообразных интернет-приложений. Значительную роль в этой научно-технической революции играет оптика. Преимущества, которые обеспечивают оптические информационные технологии, вытекают из фундаментальных свойств носителей информации — фотонов. Фотон — это элементарная частица без массы, способная существовать, только двигаясь со скоростью света. Электрический заряд фотона равен нулю. Это обеспечивает беспрецедентно высокое быстродействие (до десятков фемтосекунд), огромную полосу пропускания (до десятков терагерц) и низкую восприимчивость к внешним помехам. Подчеркивая огромный вклад именно свойств фотонов в развитие новых оптических технологий, в обиход вошел новый термин — фотоника и его специализированные разделы: информационная фотоника, радиофотоника, квантовая фотоника.

Информационная фотоника, которой посвящена данная книга, — это область технологий, где свет выполняет функции, традиционно относящиеся к информационным технологиям и обычно реализуемые с использованием электронных устройств, такие как телекоммуникация, обработка сигналов и вычисления. Как уже неоднократно случалось в истории развития новых научно-технических направлений, задача достижения высоких параметров и широкого практического применения сводится к созданию адекватной элементной базы.

В представленной книге мы попытались осветить вопросы создания элементной базы информационной фотоники, использующей фундаментальные оптические явления — интерференцию и дифракцию. В книге представлены как фундаментальные аспекты фотоники и оптических технологий, так и описание конкретных технических решений современных прикладных задач, использующих управляемые дифракционные решетки и интерферометры. Представленный материал базируется на наших оригинальных разработках и научных результатах, полученных в ходе 30-летнего опыта работ в области использования нелинейных фоторефрактивных материалов для управления светом. Книга содержит большую библиографию, базирующуюся по мере возможности на оригинальных источниках. Помимо собственных результатов, для полноты картины и объективного описания состояния в рассматриваемой области мы также представили известные из литературы результаты, полученные с использованием наиболее перспективных альтернативных технологических платформ, таких как полупроводниковая оптоэлектроника и оптические полимеры. Мы постарались включить в книгу большое количество графического материала, облегчающего понимание и иллюстрирующего последние достижения в рассматриваемой области.

Книга рассчитана на широкий круг читателей. Это студенты и аспиранты физических и технических специальностей, специалисты из смежных областей, пытающиеся использовать информационную фотонику для решения своих за-

дач, а также разработчики аппаратуры для оптических информационно-теле-коммуникационных систем.

Мы попытались сделать изложение книги максимально логически связанным, начиная повествование с исторического экскурса во введении и давая в каждой главе, описывающей то или иное практическое применение, базовые понятия, позволяющие понять основополагающие физические принципы. Поэтому книга может читаться как последовательно, так и выборочно по главам, в зависимости от интересов читателя.

Первая глава посвящена дифракционным решеткам. Здесь изложены основные положения теории дифракции. Данна классификация дифракционных решеток, описаны их основные свойства, такие как угловая и спектральная селективность. Материал проиллюстрирован возможными применениями решеток в качестве оптических фильтров. Во второй главе рассмотрен вопрос синтеза передаточной характеристики оптических фильтров на основе дифракционных решеток. Подробно описан оригинальный метод фазового кодирования отражательных решеток Брэгга. В третьей главе очень подробно приводятся физические и голографические свойства, а также особенности практического применения для записи дифракционных решеток фоторефрактивных кристаллов, позволяющих управлять условиями дифракции. В четвёртой главе изложены основные принципы динамической интерферометрии с использованием дифракционных решеток в фоторефрактивных кристаллах, даны основные схемы интерферометров, приведены примеры их практического использования для измерения малых периодических колебаний и физических явлений, связанных с ними. В пятой главе приведены примеры использования техники адаптивной голографической интерферометрии для исследования материальных параметров самих фоторефрактивных кристаллов и высокоомных полупроводников. Приводятся данные по исследованию волн пространственного заряда и их уникального дисперсионного соотношения. Шестая глава посвящена узкополосным управляемым оптическим фильтрам. Приводятся полезные обсуждения связи параметров оптических фильтров и требований стандартов оптической связи, использующих спектральное уплотнение (DWDM). Седьмая глава посвящена оптическим фильтрам Фабри — Пере. Приводится теория многорезонаторных фильтров, даны примеры синтеза передаточных характеристик различной формы. Даются примеры использования фильтров Фабри — Пере для создания оптического демультиплексора и спектроанализатора. Восьмая глава посвящена ключевым элементам компонентной базы информационной фотоники — оптическим модуляторам, использующим явления интерференции для высокочастотной модуляции оптических сигналов.

Безусловно, получение оригинальных научных результатов, изложенных в данной книге, было бы невозможно без участия наших коллег, в тесном сотрудничестве с которыми проводились теоретические и экспериментальные исследования, а также разработка устройств для конкретных практических применений. Благодарности им представлены в отдельном разделе.

Написание этой книги позволило нам систематизировать уже полученные результаты, сопоставить их с мировым уровнем и вдохновило на новые идеи. Мы искренне надеемся, что это произойдет и с читателями этой книги.

Заведующий кафедрой квантовой электроники  
СПбПУ Петра Великого,  
доктор физико-математических наук, профессор В. М. Петров;  
заведующий лабораторией квантовой электроники  
ФТИ им. А. Ф. Иоффе,  
доктор физико-математических наук А. В. Шамрай

## ВВЕДЕНИЕ

Интерференция и дифракция света — это, пожалуй, два самых простых оптических явления, которые можно наблюдать даже в повседневной жизни без использования каких-либо специальных устройств. Действительно, чтобы наблюдать дифракцию, достаточно подойти к окну в тёмное время суток и посмотреть на фонарь уличного освещения сквозь не очень плотную занавеску, например тюлевую. Современные лампы, используемые для уличного освещения, имеют достаточно узкий спектр излучения, а ткань занавески — периодическую структуру, образованную нитями. В результате можно увидеть картину, характерную для дифракции на двух, взаимно ортогонально ориентированных решётках.

Внимательный наблюдатель заметит интерференцию, возникающую в результате прохождения солнечных лучей сквозь небольшие дефекты — отверстия, иногда имеющиеся в плотной ткани портьёры. Если с внешней стороны окна светит солнце, то при удачном соотношении размеров отверстий и расстояний между ними можно увидеть интерференционную картину на потолке или стене комнаты.

Радужные пятна, возникающие на масляных пятнах или бензина, разлитых на поверхности воды, — тоже результат интерференции света на тонкой плёнке.

Оптические явления человек мог наблюдать всегда. Днём — если светит солнце, ночью — если на небе светят звезды. Вероятно, именно поэтому зарождение современной физики связано с описанием и попыткой понять природу света и явлений, связанных с ним.

Вероятно, первые упоминания о явлении дифракции как о явлении отклонения луча света от своего прямолинейного направления распространения появились в работах Леонардо да Винчи (1452–1519). Прошло более ста лет, и Франческо Гриимальди (1618–1663) дал детальное описание дифракции. Эта книга была опубликована только через два года после его смерти, в 1665 году [1]. В те времена была широко распространена корпускулярная теория света, которая хорошо описывала прямолинейное распространение света. Однако она не могла объяснить явление дифракции. Христиан Гюйгенс (1629–1695) первым предложил использовать волновые принципы для описания взаимодействия света с препятствием. Главная идея состояла в использовании метода вторичных волн [2]. Эта книга была написана в 1678 году, а опубликована только в 1690 году. В своей книге Гюйгенс не упоминает результатов Гриимальди. Можно предположить, что он просто не был знаком с ними, так как в противном случае он использовал бы их для подтверждения своей теории.

Проявление явления интерференции как возникновение разноцветной, «радужной» окраски тонких плёнок было независимо обнаружено Робертом Бойлем (1627–1691) [3] и Робертом Гуком (1635–1703) [4].

В 1801 году Томас Юнг (1773–1829) впервые использовал понятие интерференции для качественного объяснения появления цветов в тонких плёнках [5].

В 1818 году Августин Френель (1788–1827) объяснил процесс дифракции на препятствии как появление вторичных волн и их последующую интерференцию [6]. Впоследствии такой подход к решению задачи о дифракции получил название принципа Гюйгенса — Френеля. В 1883 году Густав Кирхгоф (1832–1887) предложил точное математическое описание дифракции [7]. Интересно отметить, что впервые дифракционная решётка была предложена американским астрономом Давидом Риттенхаузом (1732–1796) еще в 1785 году [8], почти за сто лет до появления работы Кирхгофа. К сожалению, это открытие в те времена не было востребовано и про него забыли. Вторично дифракционную решётку предложил Джозеф Фраунгофер (1787–1826) уже в 1819 году [9]. Первые дифракционные решётки изготавливались следующим образом: брались два параллельно расположенных винта, на которые наматывалась тонкая проволока. Параллельно натянутые витки проволоки образовывали периодическую структуру, которая и была дифракционной решёткой. Настоящим прорывом своего времени стало изобретение Генри Роуланда (1848–1901), который в 1882 году изобрёл машину для «промышленного» изготовления дифракционных решёток [10]. Такая машина была способна изготавливать отражательные решётки в виде периодических расположенных канавок, прорезанных резцом на металлической поверхности. Эти решётки имели размер примерно  $10 \times 12 \text{ см}^2$  и содержали до 5,5 тысяч штрихов на миллиметр, что по тем временам было выдающимся достижением.

В 1908 году Габриэль Липпман (1845–1921) становится лауреатом Нобелевской премии за разработку и создание метода репродуцирования (*англ. reproduction*) цветов в фотографии — так называемая цветная фотография Липпмана. Предложенный метод был основан на явлении интерференции. Во многих литературных источниках именно Липпман считается основоположником голограммии.

Параллельно с созданием «искусственных» дифракционных решёток шло активное исследование дифракции на «естественнных» дифракционных решётках, существующих в природе. Макс фон Лаэ (1879–1960) с коллегами в 1912 году предсказал дифракцию рентгеновского излучения на периодической структуре, образованной атомами [11]. В 1914 году он стал лауреатом Нобелевской премии.

В 1915 году отец Уильям Генри Брэгг (1862–1942) и сын Уильям Лоренс Брэгг (1890–1971) становятся лауреатами Нобелевской премии за нахождение точного соотношения между периодом решётки, длиной волны падающего излучения и углом падения, которое обеспечивает эффективную дифракцию [12]. Впоследствии предложенный метод был успешно применён для анализа структуры кристаллических веществ. В наши дни случай дифракции, когда падающее (считывающее) излучение пересекает большое количество периодов решётки, называется дифракцией Брэгга, а условие, при котором наблюдается

максимальная интенсивность продифрагированного излучения, — условием Брэгга.

В 1935 году индийские учёные Ч. Вентака Раман и Н. С. Нагенда Нат при исследовании дифракции света на ультразвуковых волнах обнаруживают, что если выполняются условия тонкой фазовой дифракционной решётки, то амплитуды высших порядков дифракции хорошо описываются функциями Бесселя [13, 14]. Эта теория в наши дни широко используется для описания процессов дифракции на тонкой фазовой решётке, а случай дифракции называется дифракцией Рамана — Ната.

Важнейшим этапом стало появление метода восстановления волнового фронта, предложенного Денисом Габором (1900–1979) в 1948 году [15]. В то время ещё отсутствовали мощные источники когерентного излучения, поэтому работа не получила практического развития. Дальнейшее бурное развитие голограммии связано с появлением лазеров. В 1962 и 1963 годах Эммет Лейт и Юрис Упатниекс из Мичиганского университета [16] и Юрий Денисюк из Государственного оптического института им. С. И. Вавилова [17] публикуют работы, в которых демонстрируют возможность записи интерференционной картины между предметным и опорным пучками и последующим восстановлением предметной волны за счёт освещения интерферограммы (голограммы) опорной волной.

Период 60–80-х годов прошлого века ознаменован развитием математического аппарата, позволяющего точно описывать процессы дифракции на объёмных (толстых) голографических решётках, а также открытием новых эффектов, позволяющим записывать решётки в различных материалах, а не только в «классических» фотографических пластинах. Идёт активное исследование различных стёкол, керамики, полимерных и органических светочувствительных материалов, фотопререкрективных кристаллов.

Последующие годы были связаны с бурным развитием голограммии для задач оптической обработки сигналов радиолокационных, гидроакустических и сейсмических антенн с синтезированной апертурой, оптической обработкой изображений и распознавания образов, систем оптической памяти и «оптических суперкомпьютеров». Было сделано предположение о том, что использование «двумерности», или «параллельности», систем оптической обработки информации позволит существенным образом повысить вычислительную производительность. В таких системах голографическим элементам памяти и ввода информации в тракт когерентной обработки отводилась одна из ключевых ролей.

В те же годы промышленными и научными центрами, как у нас в стране, так и за рубежом, был выполнен большой объём фундаментальных, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. В результате были созданы различные образцы оптических Фурье-процессоров и корреляторов, оптической голографической памяти, которые по своим параметрам существенно превосходили имеющиеся в то время электронные аналоги. Однако выдающийся прогресс в развитии цифровой вычислительной техники в

90-х годах XX века практически не оставил шансов оптическим аналоговым процессорам. На сегодняшний день имеется лишь несколько примеров успешного практического использования аналоговых оптических процессоров в системах обработки сигналов.

Своё второе дыхание оптическая голограмма получила в начале XXI века в связи с телекоммуникационным бумом и широким внедрением волоконно-оптических систем связи. Для таких систем связи оказались востребованными оптические элементы, позволяющие быстро управлять потоками данных в оптическом диапазоне без перехода в электрические сигналы. Большая часть таких элементов работает на принципах интерференции или дифракции. Различные дифракционные, или голографические, решётки, в том числе и созданные в оптическом волокне, различные дифракционные и интерференционные фильтры стали своего рода базовыми элементами при создании оптических компонентов, так необходимых для построения развитой системы оптической связи.

Особую роль в развитии элементной базы оптических систем связи сыграли отражательные решётки Брэгга. Обладая чрезвычайно высокой спектральной селективностью, они стали незаменимыми при создании элементной базы полностью оптических телекоммуникационных сетей. Например, для создания перестраиваемых оптических де- и мультиплексоров, перестраиваемых кросс-коннекторов, для сетей, использующих принципы частотного (спектрального) мультиплексирования (*англ. WDM* — *Wavelength Division Multiplexing*), и для высокоточной стабилизации частоты лазеров.

Современные оптические информационные технологии широко используют два относительно «простых» физических явления — интерференцию и дифракцию. *Интерференция* используется для создания или, как ещё говорят, для записи голографических, или дифракционных, решёток в различных материалах. Обычно когда дифракционную решётку называют голографической, то тем самым хотят подчеркнуть, что она была изготовлена по голографической технологии, т. е. с использованием интерференционной картины двух, а иногда и более когерентных волн. Помимо этого, интерференция используется в работе эталонов Фабри — Перо, которые широко применяются в современных системах оптических телекоммуникаций в качестве фильтров.

*Дифракция* используется для считывания или, что то же самое, для восстановления волнового фронта, записанного в виде голограммы или дифракционной решётки. Дифракционная эффективность некоторых голограмм, или дифракционных решёток, достигает 100%. Это значит, что такие элементы могут быть использованы для эффективного управления световыми потоками.

По мере развития оптических технологий и все более широкого их распространения и использования произошло неизбежное слияние оптики с другими разделами науки и техники.

В последнее время в широкий обиход вошел более специализированный термин «фотоника», который образуется по аналогии с термином электроника и является отражением все более тесной связи оптики и электроники. Электрони-

Конец ознакомительного фрагмента.  
Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)