

Институт сейсмологии Национальной академии наук Кыргызской
Республики

УДК 535.41: 778.38

На правах
рукописи

Исмаилов Джапар Авазович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЗАПИСИ
ГОЛОГРАММ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

По специальностям 01.04.05 -«Оптика» и 05.13.16 – «Применение
вычислительной техники, математического моделирования и математических
методов в научных исследованиях (по отраслям науки)».

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант: доктор технических наук,
академик НАН КР Жумалиев Кубанычбек Мырзабекович

Бишкек-2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
ГЛАВА 1. ВРЕМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ И МЕТОДЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	13
1.1. Временные процессы при вводе информации.....	13
1.1.1. Набор страницы данных для ввода в голограмму.....	13
1.1.2. Степень параллельности при вводе и выводе информации.....	17
1.1.3. Время, затрачиваемое на адресацию голограмм.....	22
1.2. Временные процессы при записи голограмм.....	27
1.3. Временные процессы при выборке информации.....	31
1.4. Время, затрачиваемое на стирание записанных голограмм и перезапись.....	33
1.5. Голографические методы исследования временных процессов.....	34
1.5.1. Классические методы голографической интерферометрии ...	35
1.5.2. Метод реального масштаба времени	36
1.5.3. Метод двойной экспозиции	40
1.5.4. Методика расшифровки голографических интерферограмм.....	44
1.5.5. Метод усреднения во времени	46
1.5.6. Стробо-голографический метод	49
1.5.7. Методы сдвиговой голографической интерферометрии.....	50
1.6. Запись серии двух-экспозиционных голографических интерферограмм на плоских регистрирующих средах	55
1.7. Состояние и проблемы разработки методик голографической интерферометрии на основе объемных регистрирующих сред и рельефно- фазовых носителей	60
ГЛАВА 2. ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ И АКУСТООПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА С ВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ	68

2.1. Структура и принцип действия голографических запоминающих устройств.....	68
2.2 Голографическая память на основе синтезированных голограмм...72	
2.3. Реализация параллельного считывания нескольких страниц в голографических системах хранения информации	80
2.4. Повышение плотности записи информации на основе синтезированных рентгеновских голограмм	86
2.5. Акустооптический анализатор спектра с высокой информационной производительностью	93
2.5.1. АОСА с пространственной и временной интеграцией	95
2.5.2. Экспериментальная реализация панорамного радионаблюдения с использованием АОСА с пространственной интеграцией	99
2.5.3. Улучшение системы анализа спектра РЧ с использованием АОСА со смешанной пространственно-временной интеграцией	103
2.5.4. Система анализа спектра СВЧ, объединяющая АОС и АОСА с пространственной интеграцией.....	105
ГЛАВА 3. ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ И АКУСТООПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ВРЕМЕННЫХ И ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ..	
109	
3.1. Интерферограмма изображений, относящихся к двум различным во времени состояниям объекта.....	109
3.2. Голографический интерферометр для исследования процессов, изменяющихся во времени.....	110
3.3. Метод голографической интерферометрии для регистрации процесса изменения диффузно отражающих объектов.....	114
3.4. Интерференционный и корреляционный методы исследования объектов.....	121
3.5. Чувствительность спектрального прибора на основе акустооптического перестраиваемого фильтра.....	126
3.5.1. Информационная структура спектральных устройств на основе АОПФ	128

3.5.2. Передача информации в АОПФ обработки изображений.....	131
3.5.3. Экспериментальное исследование спектрального прибора на основе АОПФ.....	133
3.6. Исследование характеристик поверхности объекта с использованием акустооптического перестраиваемого фильтра.....	136
3.6.1. Исследование пространственного отражательного рельефа с использованием АОПФ.....	138
3.6.2. Исследование цветового фона бумаги с использованием АОПФ.	140
3.6.3. Экспериментальные образцы АОПФ	142
3.6.4. Экспериментальное исследование образцов АОПФ с использованием подхода, учитывающего изучаемую шкалу серого спектра	143
ГЛАВА 4. ПОВЫШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ЗАПИСИ РЕГИСТРИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ.....	147
4.1. Регистрация временных процессов и временные ограничения в голографических устройствах.....	147
4.1.1. Связь между временными процессами и информационной емкостью голографических устройств.....	148
4.2. Кинетика записи голограмм в средах с различными механизмами записи.....	152
4.2.1. Влияние процесса стирания на кинетику записи голограмм.....	154
4.2.2. Кинетика записи голограммы в средствах с после экспозиционным проявлением.....	155
4.2.3. Кинетика записи голограмм в средах с послеэкспозиционным проявлением и с предэкспозиционной подготовкой.....	158
4.2.4. Кинетика регистрации в средах с записью во время экспозиции и частично после ее окончания.....	159
4.3. Фототермическая запись в системах хранения данных.....	162
4.3.1. Фототермическая запись в полупроводниках	163

4.3.2. Жидкие кристаллы как среды для фототермической записи.....	164
4.3.3. Побитная фототермическая запись.....	167
4.3.4. Магнитооптическая фототермическая запись.....	169
4.4. Зависимость времени ввода информации от процедуры записи...	172
4.5. Метод записи информации на фототермопласте	176
ГЛАВА 5. РЕГИСТРАЦИЯ ВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ	
АКУСТООПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ.....	185
5.1. Информационная метрология акустооптических перестраиваемых фильтров.....	185
5.1.1. Принципы информационной метрологии акустооптических приборов	186
5.1.2. Применение информационной метрологии к акустооптическим настраиваемым фильтрам.....	189
5.1.3. Экспериментальная реализация информационной метрологии АОПФ	191
5.2. Взаимосвязь динамического диапазона и информационной емкости акустооптических устройств.....	194
5.2.1. Влияние шкал серого на разрешающую способность акустооптических приборов.....	196
5.2.2. Зависимость информационной емкости АОСА от количества уровней серости.....	199
5.3. Акустооптический перестраиваемый фильтр с переменной спектральной селективностью.....	202
5.3.1. Информационное содержание полосы пропускания и длины волн АОПФ.....	204
5.3.2. Конструкция управляемого полоса пропускания АОПФ.....	206
5.3.3. Управление полосой пропускания изменением амплитуды сигнала	209

5.3.4. Управление полосой пропускания путем состава нескольких частот сигнала.....	210
5.4. Мультиплексирование голограмм по длине волны с применением акустооптического перестраиваемого фильтра.....	214
5.4.1. Акустооптический перестраиваемый фильтр как спектральный прибор с электронным управлением.....	214
5.4.2. Мультиплексирование по длине волны и его применение совместно с угловым мультиплексированием.....	217
5.5. Применение акустооптического перестраиваемого фильтра в качестве мультиплексора длины волны.....	219
5.6. О разрешающей способности АОПФ, обеспечивающего мультиплексирование по длине волны.....	221
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	224
ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	226

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации. При работе с большими массивами информации необходимо учитывать, чтобы плотность записываемых данных была высокой, что позволяет сделать устройства хранения и передачи информации более компактными. Кроме того, важную роль играет скорость передачи данных. Выборка и обработка двумерных (а в некоторых случаях и трехмерных) информационных массивов в реальном времени представляют собой одну из наиболее значимых научно-технических проблем. Постоянное увеличение объемов данных, которые необходимо своевременно принимать, анализировать и интерпретировать, стимулирует развитие новых высокопроизводительных информационных технологий и систем, применяемых для решения разнообразных научных, прикладных и хозяйственных задач.

Среди систем, которые эффективно используются в скоростном режиме (что позволяет получать результаты практически в реальном времени), особое место занимают голографические и акустооптические устройства. Благодаря параллельной записи скорость передачи голографической информации достигает очень высоких значений (порядка 10^9 бит/с и более). Однако время ввода, хранения и выборки голографической информации существенно варьируется в зависимости от используемых записывающих сред и других компонентов. В связи с этим крайне важен системный анализ временных характеристик. Необходимо определить, как различные требования к допустимым временным параметрам могут быть хотя бы частично удовлетворены за счет выбора оптимальных компонентов.

Акустооптические устройства также играют значительную роль в передаче информации в реальном времени, как в сочетании с голографическими системами, так и самостоятельно. С их помощью может быть решен широкий круг задач, связанных с быстрой передачей данных. Таким образом, тема настоящей диссертации является весьма актуальной.

Цели и задачи исследования. Целью работы является заложение основ создания высокопроизводительных систем и устройств на базе голографических

и акустооптических принципов, способных передавать и обрабатывать временную информацию, в том числе в реальном времени, что позволит использовать их в автоматических системах.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Классифицировать временные информационные процессы в голографических и акустооптических устройствах.

2. Исследовать возможности анализа временных изменений с помощью голографической интерферометрии и предложить новые методы, позволяющие более эффективно изучать временные изменения.

3. Проанализировать процессы, происходящие в голографической интерферометрии реального времени.

4. Оценить возможность одновременной регистрации корреляционной функции изменяющегося во времени объекта с использованием голографической интерферометрии в реальном времени.

5. Исследовать кинетику процессов голографической записи на различных записывающих средах и их влияние на регистрацию изменяющихся во времени процессов.

6. Определить факторы, ограничивающие регистрацию временных изменений процессов и объектов.

7. Изучить временные ограничения, вносимые акустооптическими дефлекторами в голографические системы памяти.

8. Проанализировать особенности прохождения информации в устройствах анализа широкополосных радиочастотных сигналов с использованием акустооптических анализаторов спектра.

9. Исследовать возможность применения акустооптического перестраиваемого фильтра для мультиплексирования голограмм по длине волны.

Методы исследований. Результаты, представленные в диссертации, получены на основе теоретических и экспериментальных исследований с

использованием методов когерентной оптики, голографии, фурье-оптики, акустооптики и теории информации.

Научная новизна полученных результатов.

1. Классифицированы и проанализированы временные информационные процессы, происходящие в голографических устройствах.

2. Предложены и апробированы два новых, более эффективных метода двухэкспозиционной голографической интерферометрии для исследования временных процессов.

3. Установлены предельные возможности голографической интерферометрии реального времени с использованием двухпучкового восстановления голограмм.

4. Проанализированы источники ограничений скорости ввода и вывода голографической информации и даны рекомендации по их частичной компенсации.

5. Проведено исследование кинетики процессов записи в голографических системах и на различных записывающих средах, а также оценено их влияние на временные характеристики и возможность передачи информации в реальном времени.

6. Показано, что акустооптические дефлекторы, несмотря на их высокую эффективность, ограничивают скорость ввода и выборки информации в голографических системах.

7. Продемонстрирована возможность применения акустооптического перестраиваемого фильтра для мультиплексирования голограмм по длине волны.

Практическая значимость полученных результатов.

1. В работе классифицированы временные операции, выполняемые при вводе, хранении, обработке и выборке информации в голографических и акустооптических устройствах, что позволяет оптимизировать эти операции при проектировании систем для решения различных задач.

2. Предложены новые методы двухэкспозиционной интерферометрии

с использованием двух опорных пучков, которые повышают эффективность исследования временных процессов.

3. Решена задача сокращения времени получения интерферограмм и коррелограмм за счет их одновременного формирования для идентичных наборов объектов.

4. Изучена кинетика записи голографической информации на различных средах, что позволяет выбирать наиболее подходящие материалы для конкретных задач.

5. Достигнуто сокращение времени выполнения операций за счет их параллельного выполнения.

6. Установлена роль акустооптических элементов в оптимизации временных параметров голографических систем хранения данных и обработки сигналов, что повышает производительность этих устройств.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Методика записи информации в виде синтезированных Фурье-голограмм с требуемой мультипликацией и реализацией параллельного считывания нескольких страниц.

2. Голографические интерферометры с двумя опорными пучками, позволяющие эффективно исследовать временные процессы в голографических системах на основе серии интерферограмм.

3. Методика двухпучковой записи и двухпучкового восстановления голограмм, обеспечивающая высокую точность реализации голографической интерферометрии реального времени, при которой временные изменения наблюдаются одновременно с их протеканием.

4. Методика записи информации на фототермопластические носители, значительно сокращающая время регистрации.

5. Мультиплексирование голограмм по длине волны с использованием акустооптического перестраиваемого фильтра, что увеличивает количество записываемых голограмм.

6. Наибольшая информационная производительность достигается в

устройствах с комбинацией АОСА, использующих пространственное и временное интегрирование и работающих параллельно. Такая производительность может быть обеспечена в режиме радиоэфирного наблюдения и анализа.

7. АОПФ на основе монокристаллов TeO_2 , обеспечивающий подтверждение подлинности документов путем проверки специальных отражающих рельефных рисунков и спектрального состава фона.

Личный вклад автора.Автором поставлены задачи исследования, разработаны методы голографической интерферометрии с использованием двух опорных пучков, проведена запись голографической информации на фототермопластических средах и выполнен анализ полученных результатов.

Апробация результатов диссертации. Результаты работы представлены на международных конференциях и семинарах, включая:

- 2-ю Всесоюзную конференцию «Оптическая обработка информации» (1990, Фрунзе, Кыргызстан);
- Международную конференцию «Голография и оптическая обработка информации» (1996, Нанкин, Китай);
- Международный семинар «Голография и оптическая обработка информации» (1997, 2001, Бишкек, Кыргызстан);
- Международную конференцию «Развитие информационно-коммуникационных технологий в информационном обществе» (2004, Бишкек, Кыргызстан);
- Международный семинар «Оптика и фотоника» (2012, Бишкек, Кыргызстан);
- Международную конференцию «Оптика и фотоника» (2013, Самарканд, Узбекистан; 2014, Токио, Япония);
- Международную конференцию «Фотоника и информационная оптика» (2015, Москва, Россия);
- Международную конференцию «Тенденции развития современной физики полупроводников: проблемы, достижения и перспективы» (2020,

Ташкент, Узбекистан);

- Международную научную конференцию «Проблемы интеграции науки, образования и производства» (2022, 2023, Ош, Кыргызстан).

Полнота отражения результатов диссертации в публикациях. Основные результаты исследований опубликованы в 63 работах, включая 20 зарубежных публикаций и 6 работ под единоличным авторством.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, содержащего 228 наименований. Общий объем работы составляет 247 страниц, включая 64 рисунка.

ГЛАВА 1. ВРЕМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ И МЕТОДЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

Каждой операции должно соответствовать свое обеспечение, определенное устройство или группа устройств (комплекс), реализующие данную операцию - блоки, из которых состоит голографическое устройство. В различных случаях часть блоков может отсутствовать (но не каждая), и связаны они могут быть друг с другом по-разному. Разными также могут быть физические принципы, на основе которых в различных случаях может реализоваться каждый из необходимых механизмов. Связи между блоками зависят от характера и формы записывающих звеньев (в виде линеек, в матричном виде, в виде лент, дисков мягких или жестких или цилиндров и т.п.).

Соответственно этому может быть реализовано значительное число вариантов голографических устройств [1] [1-8].

1.1. Временные процессы при вводе информации

1.1.1. Набор страницы данных для ввода в голограмму.

Каждой голограмме соответствует страница данных или изображение и в системе голографической памяти должно иметься устройство, формирующее эту страницу. Для нормальной работы памяти данные должны быть введены не любым образом, а так, чтобы на записывающей среде с помощью оптической схемы, элементом которой является часть устройства ввода данных, могла быть сформирована голографическая интерферограмма. Для этого данные должны переноситься когерентным светом. Чтобы это произошло, необходимо иметь модулятор постороннего источника когерентного света (например, лазера). Модулировать луч лазера оптическими параметрами, соответствующими вводимым данным, можно с помощью модулятора - транспаранта, либо с помощью модулятора - отражателя. Эти модуляторы должны данные, переносимые сигналами разной природы (электрической, оптической),

превращать в распределение или набор оптических параметров (коэффициента пропускания, показателя преломления, угла наклона плоскости поляризации) самого модулятора.

В зависимости от целей, преследуемых при создании голографической памяти, модулятор может иметь дело с вводом данных различного характера. В частности, в случае архивных аналоговых устройств памяти, необходимо записывать одно или серию изображений, представляющих собой непрерывное распределение оптических параметров. При необходимости записывать серии изображений путем формирования набора расположенных рядом или наложенных голограмм, требуется последовательный ввод в оптическую систему различных изображений. Эта операция может быть осуществлена либо заменой одного транспаранта на другой, либо использованием пространственно-временного модулятора света (ПВМС), в котором после использования для записи одного изображения и его стирания, вводится другое.

В случае дискретной цифровой записи данных вместо изображений используется набор (страница) дискретных данных, как правило, представленных в бинарной форме. Эти данные могут набираться одновременно всей страницей, либо последовательно. Ввод данных в ПВМС может производиться с помощью сигналов различной природы. Наиболее употребительными являются модуляторы с электрическим вводом данных и с оптическим вводом данных. Модуляторы этих двух групп существенно различаются между собой, в некоторых случаях они работают на основе различных эффектов. В практике систем используются обе группы пространственных модуляторов, однако, в настоящее время чаще приходится иметь дело с устройствами с электрическим вводом данных, в особенности тогда, когда системы сопряжены с компьютером или когда изображение в аналоговой форме вводится телевизионным способом, используя видеосигналы. В таких случаях ПВМС является необходимым звеном системы, и не может быть заменен обычным транспарантом, в том числе сменяемым.

Расположение данных в ПВМС может осуществляться либо путем

оптической адресации их (если ПВМС оптически управляемые), либо путем электрической адресации. При оптической адресации возможен параллельный ввод всех данных страницы, но возможен и последовательный. При электрической адресации, как правило, осуществляется ввод информации либо последовательно по строкам и столбцам, либо выборочно по электрически управляемым адресам. Имеется много вариантов реализации адресации. К ним относится в случае оптической адресации - отклонение светового пучка дефлектором, система “бегущего” луча, когда отклонение производится электронным лучом, который высвечивает люминофор в соответствующей адресу точке; в случае электронной адресации - отклонение электронного пучка, использование матрицы электродов, электрическое возбуждение бегущих акустических волн.

Требования к пространственным модуляторам света, как инструментам ввода данных, зависят от условий, в которых необходимо реализовать запись. Для разных систем они различны и в отношении объема вводимой информации, и в отношении скорости записи, и в отношении интервалов между последовательными вводами новых изображений или страниц данных.

Условия записи могут быть различными не только в случае изображений и набора данных, но также в случае оперативного использования данных и изображений и при постоянном хранении их, либо при медленном изменении состава данных и изображений. В случае ввода изображений в задачу устройства ввода входит как преобразование его в изображение в когерентном свете, так и быстрая замена одного изображения другим. Если данные набираются по совокупности оптических сигналов или состоят из фрагментов изображений (например, слов, знаков и т.п.), то в задачу устройства ввода входит собрать эти фрагменты в страницу и передать ее в когерентном свете.

Та же самая задача стоит и перед устройствами электронного ввода данных, чаще всего, представляемых в цифровой форме. В этом случае их также необходимо набрать и преобразовать в страницу когерентных световых сигналов и осуществлять быструю замену одной страницы на другую. Независимо от типа

устройства ввода оно характеризуется в разной степени следующими показателями:

1. Скоростью формирования кадров; в случае ввода изображения со скоростью, в которой оно может быть введено в модулятор и преобразовано в записываемое когерентное изображение; в случае страниц данных - скоростью набора данных в страницу. В любом случае, чем выше эта скорость, тем лучше устройство. Но при последовательном наборе - чем больше этот набор, тем меньше скорость его заполнения.

2. Скоростью замены кадров; эта скорость зависит от скорости формирования кадров, но не только от нее. Скорость замены кадров уменьшается при необходимости отдельного времени, затрачиваемого на стирание, а в некоторых модуляторах и на операции, предшествующие вводу новых данных. Очевидно, что чем выше скорость смены кадров, тем выше при прочих равных условиях производительность устройств ввода. В общем случае к ней не всегда предъявляются такие высокие требования, как к быстрой выборке данных на конечном этапе работы устройства. Но в отдельных случаях, например, в оперативных ГЗУ, требования к скорости замены остаются предельно высокими. Реализация такой скорости при высокой плотности вводимой информации (например, 10^4 бит на кадр и выше) представляется задачей крайне трудной.

3. Емкостью информации, вводимой в кадр, в страницу. И здесь желательно, чтобы она была как можно больше. Однако, вследствие невозможности иметь и очень большую скорость смены кадров и большую емкость, а также учитывая влияние последней на размер записываемых голограмм, на первых порах, предлагалась емкость $128 \times 128 \approx 1,6 \cdot 10^4$ бит бинарной информации, но в последнее время чаще ориентируются на создание устройства ввода с емкостью $1024 \times 1024 \approx 10^6$ бит.

4. Плотностью расположения информации в модуляторе. Чем выше возможная плотность вводимой информации, тем удобнее устройство ввода, и тем лучше характеристики системы в целом. К сожалению, как правило, ПВМС с электронным вводом значительно отстают по разрешающей способности от

лучших сред для записи информации. В случае ПВМС удовлетворительными считаются размеры элемента в десятки мкм. Желательно иметь более высокое разрешение, чем это.

5. Контрастом и отношением сигнал/шум формируемого кадра, страницы данных. Учитывая, что голографическая память - сложное многозвенное устройство, необходимо, чтобы был достаточный запас на входе, позволяющий при прохождении ряда звеньев на выходе получать достаточно надежные данные. Помимо требований к ПВМС, связанных с перечисленными показателями, от этих устройств требуется высокая пространственная однородность, хорошая повторяемость при одинаковых воздействиях в разные интервалы времени, высокий срок службы, высокое качество стирания информации. И требования могут по-разному удовлетворяться при различных назначениях памяти.

Для памяти важно вводить либо набор страниц данных, из которых выбирать нужную страницу, а из нее требуемое данное, либо набор изображений и в дальнейшем выбирать нужное изображение, из которого, при необходимости, выбирать фрагменты. Реально такие наборы можно делать только последовательно. Поэтому пространственные модуляторы света в системах голографической памяти предназначены не для разового параллельного ввода определенного массива информации (набора данных или изображения), а для последовательного ввода таких массивов [9,10].

1.1.2. Степень параллельности при вводе и выводе информации

Выражение

$$I = N \log_2(m+1). \quad (1.1)$$

связывает информационную емкость с общим числом пикселей, записанных в устройстве хранения информации. Их общее число

$$N = N_p N_S N_M. \quad (1.2)$$

В каждом пикселе может фиксироваться один из m уровней, так что

$I=N\log_2(m+1)$. Если площадь среды, в которую вводится полный объем информации, равна s , а площадь поверхности, на которой записываются отдельные голограммы, равна s_H , то $s = s_H N_S$. N_S можно охарактеризовать как фактор раздельности, отмечающий число независимых друг от друга участков среды, хранящих информацию. N_M - характеризует количество мультиплексных голограмм, записываемых и восстанавливаемых через площадку s_H . Произведение $N_M N_S$ составляет число страниц или изображений, вводимых в устройство хранения информации, и так как набор из $N_M N_S$ голограмм записывается и восстанавливается последовательно, то этот множитель $N_H = N_M N_S$ может охарактеризован как фактор последовательности. N_p – количество пикселей в странице.

Следует отметить, что разделение информации на параллельную и последовательную относится только к процессам ввода и вывода информации. Хранение всей информации производится одновременно и, в этом случае, можно говорить только о потенциально параллельной или последовательной информации.

Отношение

$$\gamma = N_p / N_H \quad (1.3)$$

характеризует коэффициент параллельности или долю параллельно вводимой или выводимой информации в общем возможном числе выборок различных голограмм.

Следует отметить, что при одинаковом вхождении в число выбираемых голограмм, множители N_S и N_M имеют разное влияние на ограничения максимальной информационной емкости и, следовательно, на полную ее величину.

При выборке данных из набора необходима вторая ступень, при которой выборка данных происходит так же как выборка голограмм, причем на одну восстановленную голограмму может быть достаточно одной выборки по заданному адресу.

Двухступенчатая запись массива информации (сперва набор страницы, потом ее запись) и такое же двухступенчатое (сперва страница, потом заданная информация) считывание, является особенностью голографической памяти, открывающей дополнительную возможность варьирования параметрами системы. Так как весь массив данных состоит в этом случае из количества страниц, и количества информации в странице, то общая информационная емкость, ограниченная плотностью упаковки информации и размерами пластины, может быть по-разному распределена в зависимости от назначения ГЗУ.

Оценим, например, максимальную общую информационную емкость плоской среды, на которую записываются субголограммы, по одной на каждый участок поверхности (случай поверхностной записи с $N_M = 1$). Ее размеры ограничиваются эффективной апертурой линз, используемых при записи субголограмм и восстановлении с них изображений, проектируемых на фотоматрицу. Диаметр эффективной апертуры без существенного увеличения искажений для рассматриваемого случая может достигать 15 см и, соответственно, рабочая площадь используемой пластины, вписывающаяся в такую апертуру, составит приблизительно 10×10 см². Имея в виду плотность информации, записываемой на пластине в виде плоских субголограмм порядка $4 \cdot 10^5$ бит/мм (например, 1000×1000 точек в субголограмме, занимающей поверхность $\sim 2,5$ мм) информационная вместимость окажется равной $4 \cdot 10^9$ бит. Если использовать объемную запись с мультиплексированием, набирая 1000 голограмм на каждом участке, то плотность возрастет до $4 \cdot 10^9$ бит/мм² или 400бит/мкм², а общая информационная вместимость (без учета неполного использования среды) - $4 \cdot 10^{12}$ бит. От распределения числа страниц и емкости страниц зависит соотношение между факторами параллельности и последовательности и, соответственно, конструкция системы памяти. В промежуточном и, в определенной мере, удобном варианте число точек в странице и фактор параллельности равны числу страниц или на один два порядка отличается от числа страниц (голограмм). Однако, могут оказаться

целесообразными и другие варианты [11]. В одном случае могут понадобиться гораздо более содержательные страницы при больших размерах и меньшем числе субголограмм. Степень параллельности при этом окажется более высокой. К сожалению, запись в одну голограмму набора данных с числом пикселей, большим, чем 10^6 является проблематичным. В другом случае, наоборот, при малом содержании страницы для сохранения общей емкости памяти потребуется большое число субголограмм. Здесь степень параллельности существенно уменьшается. Технические решения в последних двух случаях могут существенно отличаться друг от друга, вследствие изменения требований к различным элементам системы.

В первом варианте нагрузка на адресацию примерно одинакова для обеих ступеней оптической и электронной. Однако реализация быстрой оптической адресации технически более сложна, чем электронной. Необходимость иметь 10^4 - 10^6 оптически реализуемых адресов представляется задачей непростой, хотя она и возможна с использованием нескольких акустооптических дефлекторов, или комбинации отклоняющих и других адресующих устройств, но, как правило, с удлинением времени выборки. С этой точки зрения уменьшение количества страниц, субголограмм и количества оптических адресов облегчает техническую реализацию оптической адресации. Связанное с этим увеличение числа электронных адресов больших затруднений при этом не представит. Однако при этом существенно возрастает нагрузка на устройства параллельного ввода и вывода информации, поскольку количество элементов в странице и число фотоприемников матрицы должно существенно увеличиваться.

Появление более высоких требований по информационной емкости и пропускной способности может привести к необходимости улучшения используемых пространственных модуляторов света и фотодетекторных матриц, как правило, с более замедленным действием. Оптический ввод и вывод информации имеет меньше ограничений по объему одновременно вводимой и выводимой информации, но очень часто требуется больше времени для фиксации ее в таких устройствах. Замедление записи информации,

обусловленное замедленным вводом информации в составитель страниц, существенно сказывается на работе оперативной памяти, и менее существенно на других видах памяти, хотя и для них увеличение времени записи нежелательно. Что касается времени выборки информации, то с его увеличением можно мириться только в более редких случаях, в основном тогда, когда не нужна высокая производительность извлечения информации и когда вместе с увеличением времени выборки достигается более высокая информационная емкость устройства.

Таким образом, можно отметить, что увеличение емкости страниц при сохранении общей информационной емкости ГЗУ приводит к существенному перераспределению характеристик и возможностей устройства во многом в сторону ограничения их. Однако необходимость иметь при решении ряда задач более содержательные страницы, заставляет принимать и те ограничения, за счет которых достигается большая информационная емкость.

В третьем варианте существенно увеличивается число субголограмм и соответственно число адресов в первой ступени и одновременно уменьшается емкость каждой субголограммы. В этом случае степень параллельности низка и система приближается по своим характеристикам к одноступенной записывающей системе, в которой ввод и вывод информации производится целиком последовательно.

Увеличение числа субголограмм не только приводит к увеличению времени, затрачиваемого на адресацию, но и начиная с некоторого числа их, практически трудно реализуемо при неподвижном носителе вследствие ограничений, присущих акустооптическим дефлекторам. Альтернативой является существенное увеличение времени выборки и уменьшение объема считываемой в единицу времени информации, что приводит к потере части преимуществ голографической технологии памяти.

1.1.3. Время, затрачиваемое на адресацию голограмм

Оценивая время записи страницы данных (соответствующей одной голограмме), необходимо определить время, затрачиваемое на адресацию, связанную с изменением направления записывающих пучков на заданную площадку голограммы.

Имеются две возможности перехода записывающих пучков от одной голограммы к другой: отклонением пучков или смещением среды таким образом, чтобы под записывающие пучки попадала новая требуемая площадка. На практике используются обе эти возможности [12].

В первом случае необходимо использовать устройства, обеспечивающие при изменении адреса точное попадание лазерного пучка на заданный участок среды при записи, считывании и стирании информации. Если используется мультиплексирование, то пучок должен попадать под нужным углом и обладать заданными при записи свойствами. Изменение направления и переход от одного участка к другому должен осуществляться быстро и безошибочно. Такие операции осуществляются устройствами отклонения светового луча - дефлекторами [13].

Существуют три основных типа дефлекторов: механические, акустооптические [14,15] и электрооптические. Основными характеристиками их являются: максимальное отклонение, разрешающая способность и быстродействие (величина, обратная времени перевода луча на нужное направление). Дополнительными характеристиками являются эффективность, определяющая потери света при использовании дефлектора, потребляемая мощность, стабильность отклонения и др. Последние также влияют на возможный выбор используемого дефлектора. Так, например, увеличение числа разрешимых направлений обычно приводит к увеличению неточности позиционирования.

По совокупности характеристик наиболее удобным для использования в голографической памяти является акустооптический дефлектор.

Использование акустооптических дефлекторов существенно расширяет

возможности голографических систем хранения информации. Как устройство, включающее акустооптические ячейки (АОЯ), такие дефлекторы имеют свою специфику. В основе работы АОЯ лежит явление взаимодействия световых волн с акустическими, в результате которого прохождение в среде акустических волн сказывается на характеристиках световой волны, проходящей через эту же среду.

Возможность использования акустооптической ячейки в качестве дефлектора вытекает из зависимости угла отклонения (в результате дифракции) проходящего светового пучка от частоты акустических волн, изменение которой может быть реализовано в результате изменения электрической частоты подаваемой на пьезоэлектрический преобразователь.

Для того, чтобы падающий свет дифрагировал на объемной решетке с максимальной эффективностью, он должен быть направлен под углом, определяемым из условия Брегга

$$2\Lambda \sin \theta_0 = \lambda. \quad (1.4)$$

Так как

$$\lambda \ll \Lambda, \quad (1.5)$$

то

$$\theta_0 \approx \lambda / 2\Lambda. \quad (1.6)$$

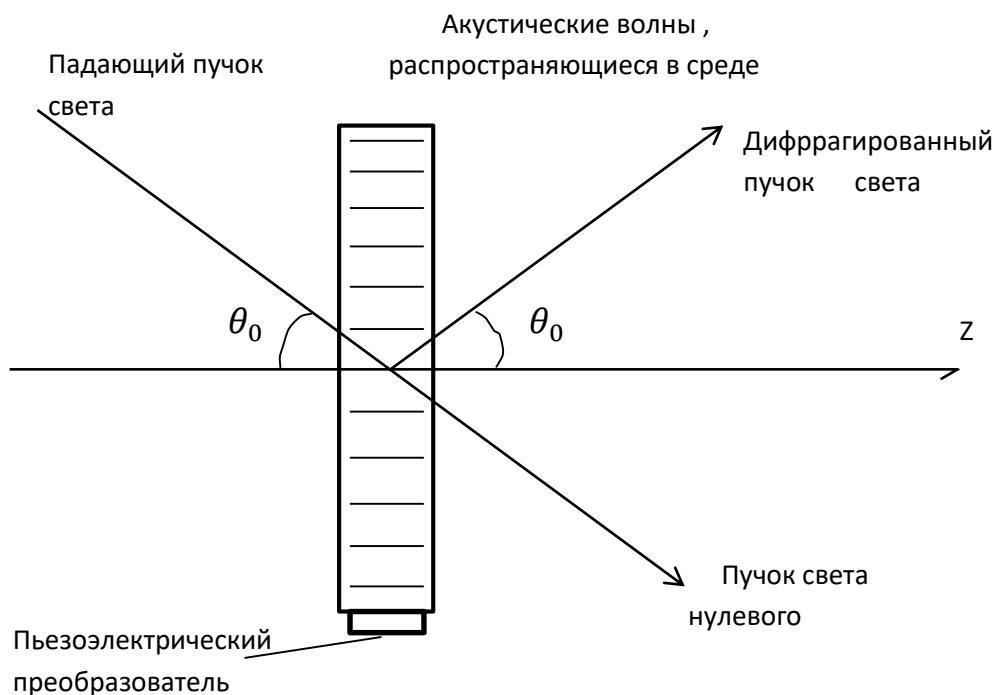


Рисунок 1.1. Формирование пучков нулевого и первого порядка в акустооптической ячейке Брэгга.

Как видно из рисунка 1.1, световой пучок после прохождения решетки, созданной акустическими волнами, расщепляется надвое: один пучок проходит, не меняя направления, т.е. под углом θ_0 , другой как бы зеркально отражается от акустических волновых фронтов и выходит под углом $-\theta_0$ ($2\theta_0$ от не отклоненного светового пучка). Так как $\Lambda = v/v_\alpha$, где v_α - частота акустических волн, v - скорость, то для угла отклонения можно написать [15]

$$\theta \approx \lambda / \Lambda = v_\alpha \lambda / v. \quad (1.7)$$

Если изменять акустическую частоту в пределах от v_α до $v_\alpha + \Delta v_\alpha$, то изменение угла отклонения определится величиной

$$\Delta\theta = \Delta v_\alpha \lambda / v. \quad (1.8)$$

Меняя плавно или дискретно частоту посылаемых в ячейку акустических

волн, можно плавно или дискретно изменять угол отклонения пучка света. Некоторая трудность связана с тем, что изменению угла отклонения должно соответствовать и изменение угла, под которым световой пучок падает на ячейку, однако имеется несколько способов компенсации изменения угла падения светового пучка на акустическую решетку без изменения положения падающего пучка.

Важная задача, которая должна быть решена при использовании АОД - обеспечить достаточно высокое быстродействие. Быстродействие может быть определено временем переброски пучка из одного возможного направления в другое. Для этого должно произойти переключение одной частоты пьезоэлектрического преобразователя на другую и акустические волны измененной частоты пройти такое расстояние, чтобы весь пучок проходил через акустическую решетку с новой частотой. Поскольку наиболее медленной операцией при этом будет прохождение акустических волн новой частоты на смену волнам старой, то время полного перевода пучка в новое направление должно быть больше времени этого прохождения. Имея в виду, что длина пути прохождения акустической волны новой частоты больше ширины пучка D но соизмеримо с этой величиной, то

$$\tau \approx c D/v, \quad (1.9)$$

где c - коэффициент больше единицы.

Так как, согласно (2.9), величина D связана с числом разрешимых направлений, то выявляется закономерность: при заданном $\Delta\theta$ и, соответственно, $\Delta\nu_\alpha$, время выборки тем больше, (а быстродействие тем меньше), чем больше число разрешимых направлений, т.е. чем больше емкость памяти. Увеличение быстродействия без уменьшения емкости памяти возможно только за счет увеличения ширины полосы акустических частот.

Из (2.8) нетрудно оценить (полагая $D = 1\text{ мм}$, $c=2$, $v = 2 \cdot 10^5 \text{ см/с}$), что $\tau = 10^{-6}$ с. Из соотношения (1.7), условия, что $\Delta\alpha \sim \lambda/D$ и соотношения

(1.8) можно получить

$$N_x = \Delta\theta/\Delta\alpha \approx \Delta v_\alpha D / v = \Delta v_\alpha \tau / c. \quad (1.10)$$

При $\Delta v_\alpha = 50$ МГц и $\tau = 10^{-6}$ с, $N_x \approx 25$ и, следовательно, $N = N_x N_y \approx 625$. Для того же, чтобы записать 100 x 100 голограмм, необходимо два акустооптических дефлектора (отклоняющих пучок в направлениях x и y с полосой частот порядка 200 МГц и больше).

Для эффективной работы акустооптического дефлектора в объемной голографической памяти важно установить согласование характеристик АОД с характеристиками матрицы объемных голограмм.

Голографический узел хранения данных - матрица голограмм (МГ) - обладает определенными структурой и характеристиками. Эти характеристики также, как и характеристики АОД должны быть согласованы с требованиями, предъявляемыми к ГЗУ в целом и согласованы между собой. Очевидно, что согласовываться должны прежде всего те характеристики, которые, являясь функциональными для обоих звеньев, оказываются важными для всей системы. Учитывая взаимозависимость характеристик звеньев друг от друга, можно оптимизировать ГЗУ подбирая и управляя определенными параметрами АОД и МГ, влияя таким образом на критичные характеристики этих звеньев [16].

Основные характеристики системы в целом, на которые влияют характеристики как АОД, так и МГ это информационная емкость, время ввода и, главным образом, выборки системы, энергия затрачиваемая на ввод и вывод информации. Система работает с N_r массивов информации, каждый ёмкостью $I_r = n \log_2(m+1)$, где n - число разрешимых ячеек, а m - число возможных отличных от нуля уровней в этих ячейках, для бинарных систем $m = 1$. В МГ эти массивы создают N_r субголограмм и таким образом в МГ хранится $I = N I_r = N n$ бит информации. Время ввода данных составляется из времени набора страницы данных, времени адресации и времени необходимого, чтобы записывающие пучки могли создать интерференционную картину

интенсивностью, достаточной для записи голограммы на данном участке матрицы голограмм. Это время зависит от энергетических характеристик системы, которые также относятся к основным характеристикам и среди которых важное значение приобретает дифракционная эффективность как МГ, так и АОД.

1.2. Временные процессы при записи голограмм

Особенности голографической записи связаны с основными характеристиками МГ. Важными параметрами являются размер матрицы и число субголограмм, уместяющихся на поверхности среды, а также увеличение этого числа благодаря возможности в трехмерной среде реализации большого числа мультиплексий. Предельные возможности здесь связаны с динамическим диапазоном.

К характеристикам АОД, влияющим на характеристики всей системы относятся количество положений, на которые могут переключать пучки света дефлекторы, время, требуемое на адресацию (переключение пучка с одного положения на другое), дифракционная эффективность. Как правило, в системе приходится использовать несколько дефлекторов для того, чтобы пучок попадал на заданную поверхность МГ по координатам x и y , а также (в случае углового мультиплексирования) по одному из заданных углов к поверхности МГ. Число дефлекторов может быть увеличено вместе с усложнением системы в целом при необходимости увеличения числа субголограмм и, соответственно, числа необходимых адресов, что позволяет получать большие величины объема хранимой и произвольно выбираемой информации. Число позиций N' , определяемое отдельным дефлектором, определяется отношением максимального раствора $\Delta\alpha_{max} = \lambda/v\Delta f$ к угловой ширине светового пучка λ/d [10,96], т.е.

$$N' = (\lambda/v\Delta f) / (\lambda\beta d) = \beta\tau\Delta f, \quad (1.11)$$

где λ - длина волны света, Δf - ширина полосы частот, вводимых в дефлектор, v - скорость звуковой волны, d - диаметр светового пучка, β определяет насколько угловое расстояние должно быть расширено, чтобы не было наложения сигналов от соседних позиций [17], $\tau = d/v$ - время прохождения акустического сигнала заданной частоты через ширину освещающего луча. Иногда ее определяют как время выборки [18], что не соответствует действительности, ибо как раз в течение этого времени в апертуре луча находятся одновременно две частоты, определяющие различный угол отклонения луча, в результате чего в этом интервале времени в МГ восстанавливаются и в МФП накладываются друг на друга массивы данных от субголограмм предыдущего и последующего адреса. Для того, чтобы искажения были незначительны, необходимо, чтобы время T_a ввода в акустооптическую ячейку частоты нового адреса удовлетворило условию $T_a \gg \tau$ или чтобы в интервале T_6 времени $\tau < T_6 < 2\tau$ считывающий пучок был закрыт. Превышение времени T_a над временем τ может быть еще больше при использовании для адресных субголограмм нескольких АОД. Таким образом очевидно, что для повышения производительности ГЗУ за счет сокращения времени выборки необходимо использовать ячейки с минимальным временем τ . Но так как емкость МОГ определяется $I = N_\Gamma I_\Gamma$, где N_Γ - число субголограмм, I_Γ - число бит, записанное в одной субголограмме, а N_Γ ограничивается помимо других причин числом возможных адресов, обеспечиваемых АОД, то для трех АОД (по оси x , по оси y и по одной угловой координате попадания луча на поверхность субголограммы) $N_\Gamma = N'_x N'_y N'_\alpha$. Очевидно, что, уменьшая время адресации T_a , надо ограничиваться только выполнением поставленных требований к этому времени, чтобы не уменьшать существенно число возможных субголограмм.

Как следует из выражения (1.11) число возможных адресов зависит не только от τ , но и от Δf определенных интервалах частот (Δf от 10 МГц до 1 ГГц) и изменений τ (от 1 мкс до 10 мкс) N' мало зависит от изменений входящих в (2.11) величин и их произведение колеблется вокруг значения 1000 [10].

Вследствие этого используя более высокие частоты можно те же значения N' получать при меньших величинах τ . Однако, использование более высоких частот ведет к ухудшению еще одного ключевого параметра АОД - количества света, дифрагирующего в первый порядок.

Увеличение скорости ввода информации предпочтительно всегда, но оно имеет особое значение при перезаписи информации, когда от того, как быстро она введется, зависит быстрота ее использования.

Полная запись, как правило, состоит из многих операций. Прежде всего, нужно ввести набор данных или изображение в ПМС (на что уйдет время $t_{\text{ПМС}}$) и продержат их такое время, которое потребуется на экспозицию одной голограммы (t_{ex}). Затем может потребоваться время на замену в ПМС одного набора данных на другой, после чего следует время экспозиции другой голограммы. Одновременно с заменой содержания ПМС необходимо переадресовать записывающие пучки либо на другой участок среды, либо, чтобы на том же участке записывалась другая мультиплексированная голограмма. Время на переадресацию может быть больше или меньше времени замены содержания. Очевидно, что из этих двух времен, приходится выбирать большее время. Цикл ввода наборов данных в ПМС может происходить одновременно с переадресацией на новое место записи голограммы. Сама скорость ввода информации I'_h при записи определенной голограммы может быть довольно велика. Она равна

$$I'_h = N_p/t_h, \quad (1.12)$$

где t_h — время экспозиции одной голограммы. Это время определяется чувствительностью среды и желаемой дифракционной эффективностью на одну голограмму.

Длительность ввода информации в среду хранения голограмм определяется несколькими составляющими. Среди них:

- время стирания данных предыдущей страницы в ПМС для ввода новой,
- время ввода информации в ПМС,
- время экспозиции страницы данных, в течение которого формируется интерференционная картина от этой страницы, освещенной одновременно опорным пучком, время формирования голограммы из этой картины,
- время адресации (перехода на новую ячейку),
- время, затрачиваемое на последовательную запись $N_S N_M$ голограмм.

Время формирования голограммы из экспонированной интерференционной картины для разных сред может состоять из разного количества составляющих: времени предобработки среды, времени проявления и времени фиксации. В лучшем и нередко реализуемом случае некоторые из этих составляющих исключаются и время формирования практически совпадает с временем экспозиции, особенно, если последнее достаточно велико.

Из сказанного следует, что время ввода информации в среду хранения значительно больше, чем время выборки, прежде всего по той причине, объем хранимой информации существенно больше объема произвольно выбираемой информации. Если же сравнивать скорости ввода в процессе одной записи и вывода информации от одной голограммы, различие во времени будет существенно меньше. Хотя, как правило, скорости выборки заметно больше, чем скорости ввода информации, могут иметь место случаи, когда средняя скорость ввода информации в одну голограмму больше, чем скорость произвольной выборки. Это может иметь место, например, в случае, когда информация записывается последовательно ячейка за ячейкой, тогда как выборка производится произвольно, с большим временем, затрачиваемым на адресацию. Обычно скорость ввода информации заметно меньше скорости выборки по двум причинам: необходимости во многих случаях добавления заметного времени на проявление и вследствие меньшей информационной чувствительности сред хранения по сравнению с матрицами фотоприемников. Практически реализуемая скорость выборки информации составляет 10^9 бит в сек. Для скоростей ввода информации в отдельные голограммы, записанные на

небольшой линейной части динамического диапазона среды в работе [19] в фотополимере толщиной 100 мкм экспериментально была получена скорость $0,7 \cdot 10^6$ бит/сек, то есть более чем в тысячу раз меньшая, чем при выборке.

Для получения больших скоростей записи, важно подобрать среды имеющие более близкую к матрице фотоприемников информационную чувствительность и не требующих дополнительного времени на проявление.

1.3. Временные процессы при выборке информации.

Важным параметром, определяющим производительность ГЗУ с произвольной выборкой данных, является время выборки. Часть этого времени - время адресации целиком определяется АОД. Другая часть этого времени - время формирования сигнала зависит от чувствительности датчика, энергии восстанавливающего пучка и потерь этой энергии в системе, в том числе в АОД за счет недостаточно высокой дифракционной эффективности последнего .

Как следует из выражения (1.11) число возможных адресов зависит не только от τ , но и от Δf определенных интервалах частот (Δf от 10 МГц до 1 ГГц) и изменений τ (от 1 мкс до 10 мкс) N' мало зависит от изменений входящих в (1-11) величин и их произведение колеблется вокруг значения 1000 [15]. Вследствие этого используя более высокие частоты можно те же значения N' получать при меньших величинах τ . Однако использование более высоких частот ведет к ухудшению еще одного ключевого параметра АОД - количества света, дифрагирующего в первый порядок.

Сравнительно короткое полное время произвольной выборки достигается благодаря использованию двухступенчатой адресации (на первой ступени выбирается заданная голограмма из набора голограмм, на второй ступени выбирается данное из массива данных, восстановленного с выбранной голограммы) и благодаря использованию устройства высокоскоростной адресации при записи и выборке голограммы. Наиболее подходящим устройством для этой цели является, как указывалось, набор из двух или трех

акустооптических дефлекторов [20]. На второй ступени производится электронная адресация, на которую затрачивается меньшее время, чем на оптическую адресацию голограмм. Важно поэтому оценить минимальное время, затрачиваемое акустооптическими дефлекторами на необходимое отклонение пучка.

В случае хранения страницы данных в объемной голограмме и применения при записи углового мультиплексирования могут быть использованы три дефлектора: с отклонением по оси X , с отклонением по оси Y и с угловым отклонением. При записи два первых дефлектора устанавливают как объектный так и опорный пучки на входном участке записываемой голограммы, а третий создает необходимый угловой раствор, определяя таким образом полный адрес записываемой голограммы.

Так же как и в случае записи время, затрачиваемое на адресацию акустооптическими дефлекторами при выборке данных, содержащихся в голограмме, определяется величиной $\tau = d/v$ - временем прохождения акустического сигнала заданной частоты через ширину освещающего луча, где v - скорость звуковой волны, d - диаметр светового пучка. Как раз в течение этого времени в апертуре луча находятся одновременно две частоты, определяющие различный угол отклонения луча. В результате этого в интервале времени τ с голограмм, записанных в среде восстанавливаются и в матрице фотоприемников накладываются друг на друга массивы данных от субголограмм предыдущего и последующего адреса. Для того, чтобы искажения были незначительны, необходимо, чтобы время T_a нахождения в акустооптической ячейки частоты нового адреса удовлетворило условию $T_a \gg \tau$ или чтобы в интервале T_b времени $\tau < T_b < 2\tau$ считывающий пучок был закрыт [9]. Но Δf при постоянном уменьшение τ ведет к уменьшению числа считываемых субголограмм. Поэтому, уменьшая время адресации t_{ad} надо ограничиваться только выполнением поставленных требований к этому времени, чтобы не уменьшать существенно число возможных субголограмм.

При рассмотрении временных информационных процессов надо иметь в

виду способ выдачи данных: если данные выдаются в том порядке следования, как они были записаны (по неизменной программе), скорость их выдачи будет достаточно большой. Время выборки в этом случае определяется наряду со временем извлечения информации, временем перехода извлекающего луча от одной ячейки памяти к соседней с ней ячейке (времени коммутации одного элемента). Информационная пропускная способность выхода памяти в этом случае определяется полосой частот коммутации.

Такой способ выдачи данных вследствие его ограниченности используется не часто. Более употребительными являются выборка информации по заданным адресам из ячеек, расположенных в самых разных точках носителя информации. Но в этом случае возможны два варианта выборки: с последовательным прохождением всех ячеек до нужной и произвольная выборка с прямым переходом от ячейки предыдущего адреса к ячейке с последующим адресом. В последнем случае, если, как это имеет место в оптическом побитовом и голографическом ЗУ, информация записана в двух измерениях (на рабочей площадке среды) при произвольной выборке, даже при сохранении скорости движения коммутирующего пучка, время выборки будет значительно меньше, чем при последовательном прохождении всех элементов.

1.4. Время, затрачиваемое на стирание записанных голограмм и перезапись

Во многих случаях на одну и ту же матрицу голограмм необходимо вводить новый набор массивов данных, предварительно проведя операцию стирания предыдущего набора. Операция стирания записанной информации может быть осуществлена не во всех записывающих средах, а только в реверсивных. К реверсивным относят такие среды, в которых изменения оптических параметров при записи, могут быть скомпенсированы под действием какого либо агента, отличающегося от записывающего. К реверсивным, относятся фототермопластические среды, фотохромные материалы, сегнетоэлектрические кристаллы, халькогенидные стеклообразные полупроводники, многие из полимерных сред для записи голограмм,

фотополимерные композиты и другие. Операция стирания может быть проведена для всего набора записанных на матрице голограмм. К такому стиранию могут быть отнесены термостатические стирания при достаточных температурах, при которых благодаря тепловым процессам среды приходят к исходному состоянию, имевшему место до действия записывающего агента. В более редких случаях могут быть стерты отдельные голограммы из набора голограмм, без затрагивания других голограмм, записанных на той же матрице. Как правило, такое стирание производится лазерными пучками, и стирание производит либо достаточно мощный свет, обычно длиной волны, отличной от записывающей, либо тепло, приносимое лазерным пучком. Конечно, на стирание требуется определенное время, разное для разных сред и разных стирающих агентов.

Однако помимо времени, затрачиваемого на стирание, потребуются интервалы времени, определяющие запись новых голограмм, связанные не только с записывающей средой, но и с работой ПВМС, дефлектора и других компонент голографического устройства. При исследовании сложных и продолжительных временных процессов, придется учитывать и такие временные затраты.

1.5. Голографические методы исследования временных процессов

Одним из важным практическим приложением голографии [22-24] являются методы голографической интерферометрии [25-33], которые нашли широкое применение в различных областях науки и техники благодаря своим уникальным возможностям. Эти методы позволяют проводить высокоточные измерения деформаций, вибраций, изменений температуры и других физических параметров объектов. Вот несколько ключевых аспектов, подчеркивающих целесообразность использования голографической интерферометрии, как например, высокая точность и чувствительность. Голографическая интерферометрия способна обнаруживать перемещения и деформации поверхности с точностью до нескольких нанометров. Это делает ее идеальным

инструментом для исследования материалов, компонентов и конструкций, где требуется высокая точность. Так как голографическая интерферометрия является бесконтактным методом, она может использоваться для измерения очень чувствительных или легко повреждаемых объектов без риска их повреждения.

Методы голографической интерферометрии позволяют проводить измерения в реальном времени, что особенно важно при анализе динамических процессов, таких как вибрации, деформации под нагрузкой и термическое расширение. Голографическая интерферометрия применяется в самых разных областях, включая машиностроение, аэрокосмическую отрасль, биомедицину, микроэлектронику и материаловедение, что подчеркивает ее универсальность и ценность. Метод позволяет анализировать сложные или неровные поверхности, обеспечивая детальное изображение деформаций или вибраций по всей поверхности объекта.

Во многих случаях голографическая интерферометрия превосходит традиционные методы измерения из-за своей способности проводить полевые измерения без необходимости специальной подготовки поверхности объекта.

Несмотря на высокую стоимость некоторого оборудования для голографической интерферометрии, метод может быть экономически эффективным за счет снижения времени исследований и повышения качества получаемых данных.

Следует отметить, что голографическая интерферометрия представляет собой мощный инструмент для исследования и анализа различных физических и инженерных задач. Ее высокая точность, бесконтактные измерения и универсальность делают этот метод ценным инструментом в руках исследователей и инженеров.

1.5.1. Классические методы голографической интерферометрии

Голографическая интерферометрия — это метод, который позволяет

измерять микроскопические изменения в объекте путем записи и сравнения голограмм объекта до и после воздействия определенного внешнего фактора. Этот метод используется во многих областях, таких как испытания материалов, неразрушающий контроль, измерение деформаций и тепловых полей. Существует несколько разновидностей голографической интерферометрии, каждая из которых имеет свои особенности и области применения.

1.5.2. Метод реального масштаба времени

Метод основан на интерференции волны, восстановленной голограммой и волны отраженной от предмета во время наблюдения. Интерферометрическое исследование в реальном масштабе времени может быть осуществлено на обычной голографической установке с внеосевым опорным пучком, по схеме, которая изображена на рисунке 1.2.

Поскольку интерференционные полосы наблюдают в процессе деформации или перемещения, то этот метод называют методом голографической интерферометрии в реальном масштабе времени. Вид интерференционной картины определяется изменениями, которым подвергается объект, а также схемой голографической установки. Проведем количественный анализ распределения полос. Пусть голограмма записана предметной волной рассеянной объектом $\bar{U}_n(x, y) = U_1(x, y) \exp[i\varphi(x, y)]$ и плоской волной $\bar{U}_0(x, y) = \bar{U}_R$ Интенсивность регистрируемого поля в плоскости голограммы:

$$J(x, y) = (\bar{U}_n + \bar{U}_R)^2 = (\bar{U}_n + \bar{U}_R)(U_n^* + U_R^*) = U_n^2 + U_R^2 + \bar{U}_n \cdot \bar{U}_R^* + \bar{U}_n^* \cdot \bar{U}_R \quad (1.13)$$

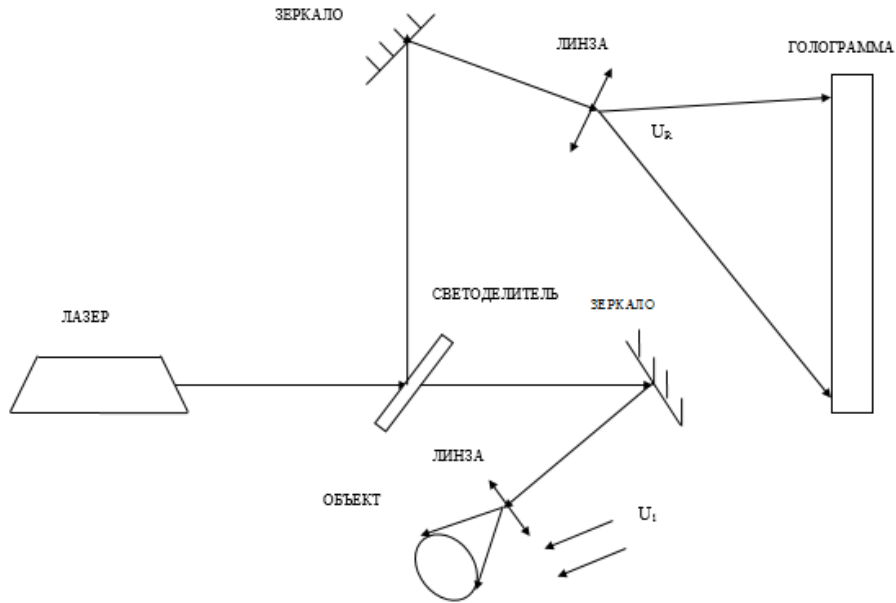


Рисунок 1.2. Внеосевая схема регистрации голографической интерферометрии. U_R - опорный пучок; U_1 - предметный пучок.

Фотопластинка экспонируется распределением освещенности, соответствующим формуле (1.13), затем проявляется так, что ее амплитудное пропускание $T(x, y)$ пропорционально $J(x, y)$

$$T(x, y) = T_0 + \alpha(\bar{U}_n \cdot \bar{U}_R^* + \bar{U}_n^* \cdot \bar{U}_R), \quad (1.14)$$

где T_0 пропорционален первым двум слагаемым в (1.13); α - коэффициент пропорциональности, зависящий от применяемого фотографического процесса. Мы здесь ограничились чисто амплитудной записью этого распределения, когда фотослой реагирует на освещенность только своим пропусканием.

После проявления, как уже отмечалось, голограмма помещается на прежнее место и освещается волной, которая представляет собой сумму волн, рассеянных объектом и опорного пучка первоначальной формы. Если изменение, происшедшее с объектом, невелико, то амплитуда рассеянного им излучения остается практически той же, фаза же меняется. Поэтому новую объектную волну можно записать в виде $\bar{U}_n' = \bar{U}_1(x, y) \exp[i\theta(x, y)]$. Результирующая волна $\psi(x, y)$ имеет вид:

$$\begin{aligned} \psi(x, y) = T(x, y)(\bar{U}_n' + \bar{U}_R) = T_0\bar{U}_R' + \alpha\bar{U}_n U_n' U_R^* + \\ + \alpha\bar{U}_n^* \bar{U}_R \bar{U}_n' + T_0 U_R' + \alpha\bar{U}_n U_R^2 + \alpha U_R^2 U_n^* \end{aligned} \quad (1.15)$$

Слагаемые в выражении (1.15) представляют собой волны, распространяющиеся в различных направлениях. Первое и пятое слагаемые соответствуют направлению распространения первоначальной волны. Собирая эти два члена выражения, получим:

$$\psi_0(x, y) = T_0\bar{U}_n' + \alpha U_R^2 \bar{U}_n = T_0 U_1(x, y) \exp[i\theta(x, y)] + \alpha_0 U_R^2 U_1(x, y) \exp[i\varphi(x, y)] \quad (1.16)$$

Если за время между регистрацией голограммы и последующим наблюдением с объектом не произошло никаких изменений, то две интерферирующие волны будут отличаться одна от другой только постоянными множителями T_0 и $\alpha d/R^2$. При негативной записи голограмм ($\alpha < 0$) волны будут в противофазе ($-I = e^{i\pi}$), и будут везде ослаблять одна другую, а при равенстве их амплитуд - будут полностью гасить.

Если же с объектом произошли какие-либо изменения, то мы будем наблюдать интерференционную картину, структура которой определяется этими изменениями.

Контраст интерференционной картины будет определяться соотношением интенсивностей интерферирующих волн. Для того чтобы уравнивать эти интенсивности, на стадии наблюдения можно вводить в опорный или предметный пучок ослабляющие высококачественные фильтры, например, электрохимический фильтр [34].

Метод реального масштаба времени обладает тем существенным достоинством, что с помощью одной голограммы, полученной в исходном состоянии объекта, можно с интерферометрической точностью исследовать динамику происходящего с ним процесса, изучая последовательно множество его состояний. Если при восстановлении волнового фронта изменить наклон восстанавливающего пучка, то можно получить систему несущих полос конечной ширины, ориентация и частота которых по желанию наблюдателя будут задаваться направлением и величиной наклона пучка [35]. Эти полосы

облегчают и уточняют расшифровку интерференционной картины и позволяют идентифицировать знак фазовых изменений, вносимых объектом.

Голографическая интерферометрия в реальном масштабе времени усложняется рядом факторов. Чтобы интерференционная картина наблюдалась вообще и чтобы по ней можно было судить о смещении предмета, о положении предмета и о его освещении при наблюдении через обработанную голограмму, установленную в исходное положение, должны быть точно такими же, как при получении голограммы. Это означает, что предмет, оптические детали голографической установки либо должны оставаться в фиксированном положении в течении времени между экспонированием и наблюдением, либо могут быть возвращены в исходное положение с большой точностью. Совместить интерференционную структуру, образованную предметным и опорными пучками во время наблюдения со структурой, которая зарегистрирована на голограмме, необходимо с точностью до долей расстояния между полосами. Эта задача упрощается, когда угол между предметным и опорным пучками мал. Дополнительная трудность связана с усадкой эмульсии, сопровождающей мокрый процесс обработки фотографической пластины. Это вызывает неизбежные искажения восстановленных волновых фронтов и соответствующее искажение наблюдаемой интерференционной картины. Кроме того, до тех пор, пока фотопластинка не высохнет полностью, усадка продолжается, что затрудняет усадку голограммы с помощью исходного опорного пучка.

Эти недостатки преодолеваются теми или иными способами. Например, в работе [36] использовано устройство, обеспечивающее поворот пластинки вокруг двух ортогональных осей так, чтобы тонкую настройку можно было бы осуществлять, поворачивая микрометрические винты, а два края пластинки располагаются против двух закругленных штифтов из нержавеющей стали и прижимаются к ним за счет силы тяжести, либо с помощью пружины. В работах [37, 38], во избежание трудностей установки голограммы на прежнее место, производили проявление, не вынимая фотопластинки из голографической

установки. Для этого был использован простой держатель, в котором пластинка подвешивается вертикально так, чтобы сосуд с фотореактивами, в который погружается пластинка, можно было подводить под нее снизу.

Пути преодоления таких нежелательных эффектов, как однородные и неоднородные деформации фотопластинок, набухание и усадка, изложены в работах [39-43].

Несмотря на указанные трудности, экспериментаторы успешно применяют этот метод для решения прикладных задач, в частности, для исследования деталей и конструкций, подвергнутых деформации и смещению, например, для определения деформации сетки мишени суперорбитонов [30]. В работе [44] приведены результаты исследований деформации лопаток турбин. С целью изучения термической деформации интегральных микросхем, вызванной джоулевым тепловыделением, при протекании тока в р-п переходах был использован также метод реального масштаба времени [45]. Этот метод успешно используется для проведения вибрационных измерений при небольших амплитудах колебаний.

1.5.3. Метод двойной экспозиции

Метод двойной экспозиции наиболее распространен и заключается в следующем. В методе двойной экспозиции на фотопластинку записываются два последовательных состояния объекта. Сначала получают голограмму исследуемого предмета в первоначальном состоянии, т. е. не нагруженного, не нагретого и не деформированного. Затем предмет подвергают внешним воздействиям и на ту же фотопластинку записывают голограмму его измененного состояния. Так как запись вторично производится на ту же голограмму, необходимо обеспечить стабильность установки в промежутке между экспозициями. При восстановлении голограммы суперпозиция волновых фронтов этих состояний дает интерференционную картину, которая покрывает изображение объекта и позволяет определить величину его смещения.

При восстановлении изображения с двукратно экспонированной голограммы наблюдается результат интерференции полей, существующих в

разные моменты времени - во-первых, волнового поля, несущего информацию о первоначальном состоянии объекта, и, во-вторых, волнового поля, несущего информацию о его измененном состоянии. В результате на изображение объекта накладывается сеть интерференционных полос, по которым определяют изменения, происшедшие с объектом. Метод двух экспозиций применяют для изучения поверхностной деформации тел, контроля сварных швов, обнаружения трещин, пузырей, непроваров и так далее.

В методе с двойной экспозицией используется внеосевая схема, подобная той, которая изображена на рисунке 1.2. Предположим, что в некоторый момент времени t_1 , во внеосевой голографической схеме регистрируется предметная волна $\bar{U}_1(x, y)$, рассеянная от объекта (рисунок 1.1). а - схема получения; 1 - лазер; 2 - расщипитель пучка; 3 и 6 - линзовые системы; 4 и 5 - зеркала; 7 - объект; 8 - фотопластинка. б - схема восстановления; 1 - лазер; 2 - линзовая система; 3 - зеркало; 4 - голограмма.

В методе двух экспозиций используется голографическая схема, подобная изображенной на рисунке 1.3. Для примера предположим, что объектом в этой схеме служит турбинная лопатка и что определяется ее отклик на воздействие механической силы. На одну фотопластинку регистрируются две голограммы объекта, находящегося в двух разных состояниях: ненагруженном и нагруженном. При освещении проявленной фотопластинки

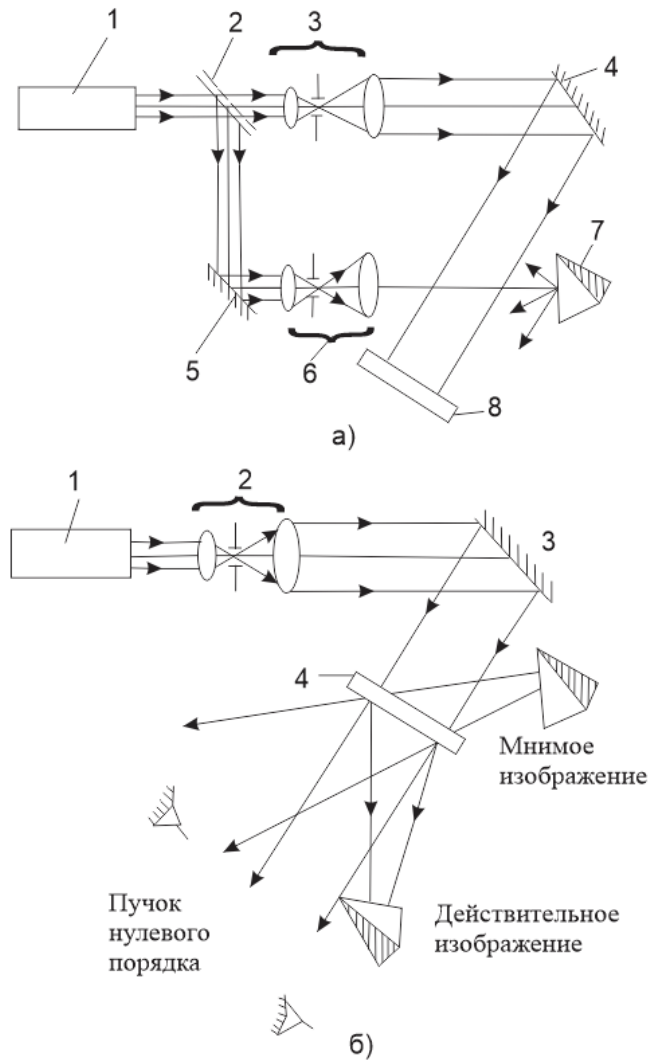


Рисунок 1.3. Метод двойной экспозиции

восстанавливающей волной, идентичной опорной волне, использовавшейся на стадии регистрации, наблюдатель, смотрящий через голограмму, увидит трехмерное мнимое изображение турбинной лопатки с наложенной на него

картиной интерференционных полос (рисунок 1.3). Наблюдатель заметит также, что полосы локализованы в пространстве, причем не обязательно на поверхности турбинной лопатки, и слегка смещаются и изменяют свою форму при изменении направления наблюдения. Анализ наблюдаемой интерференционной картины позволяет выявить созданные нагрузкой деформации и установить опасные места.

Через некоторый интервал времени t_2 на той же самой фотопластинке регистрируется волна $\bar{U}_2(x, y)$, рассеянная объектом в нагруженном состоянии. Обе волны экспонируются одновременно с опорной волной \bar{U}_R . После проявления такой фотопластинки получается дважды экспонированная голограмма. При освещении такой голограммы волной \bar{U}_R восстанавливается волна, комплексная амплитуда которой пропорциональна сумме $\bar{U}_1(x, y) + \bar{U}_2(x, y)$, а интенсивность определяется выражением:

$$J(x, y) = |\bar{U}_1(x, y) + \bar{U}_2(x, y)|^2 \quad (1.17)$$

В связи с тем, что деформация (перемещение), рассматриваемые голографической интерферометрией, обычно малы в сравнении с пространственной протяженностью объекта, предметные волны могут быть выражены следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{U}_1(x, y) &= \bar{U}_0(x, y) = a(x, y) \exp[-i\varphi(x)] \\ \bar{U}_2(x, y) &= \bar{U}'_0(x, y) = a(x, y) \exp\{-i[\varphi(x, y) + \Delta\varphi(x, y)]\} \end{aligned} \quad (1.18)$$

Следовательно, распределение интенсивности в восстановленном изображении можно записать:

$$\begin{aligned} J(x, y) &= |a(x, y) \exp[-i\varphi(x, y)] + a(x, y) \exp\{-i[\varphi(x, y) + \Delta\varphi(x, y)]\}|^2 = \\ &= 2a^2(x, y) \{1 + \cos[\Delta\varphi(x, y)]\} \end{aligned} \quad (1.19)$$

Распределение интенсивности восстановленного изображения является функцией интенсивности точки (a^2) объекта, промодулированной по закону косинуса, вследствие изменения фазы в результате смещения объекта. Темные полосы - это линии, вдоль которых значения фазы $\Delta\varphi$ являются нечетными, кратными числу π , светлые полосы - линии постоянных значений фазы $\Delta\varphi$, являющиеся четными кратными числу π . В различных случаях изменение фазы $\Delta\varphi$ может быть связано с различными физическими величинами, например смещением, вращением, деформацией, изгибающим моментом, колебаниями, температурой, давлением, концентрацией массы, электронной плотностью или напряжением.

При использовании метода двойной экспозиции отпадает необходимость точного возвращения химически обработанной фотопластинки в то положение, которое она занимала при экспозиции. Если экспонирование объекта в двух состояниях сделано излучением одной и той же продолжительностью и интенсивностью, то получаются высококонтрастные интерференционные картины. Однако это условие не выполняется для определенного класса фотоматериалов, как например, фототермопластических носителей, из-за специфичности записи голографической информации на них. Пути преодоления этого недостатка описаны во второй главе настоящей работы.

Методики интерпретаций голографических интерферограмм одинаковы для обоих методов голографической интерферометрии и одна из них описана в следующем параграфе.

1.5.4. Методика расшифровки голографических интерферограмм

При интерпретации голографических интерферограмм получила распространение так называемая геометрическая модель, устанавливающая связь между геометрическими параметрами оптической схемы, вектором перемещения в рассматриваемой точке поверхности тела и наблюдаемой картиной интерференционных полос в виде [46-48].

$$(\bar{e}_s - \bar{e}_1)\bar{x} = \left(N_1 - \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (1.20)$$

где N_1 - абсолютный порядок темной интерференционной полосы в рассматриваемой точке; \bar{e}_1 - единичный вектор направления освещения; \bar{x} - вектор перемещения; λ - длина волны используемого источника света; \bar{e}_s - единичный вектор направления наблюдения. Уравнение (1.8) можно переписать следующим образом:

$$\bar{k}_1\bar{x} = \left(N_1 - \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (1.21)$$

где $\bar{k}_1 = \bar{e}_s - \bar{e}_1$ - вектор чувствительности, направленный по биссектрисе угла, образованного направлениями освещения и наблюдения.

В голографической интерферометрии диффузно-отражающих объектов картина интерференционных полос представляет собой геометрической место точек равной проекции вектора перемещений на направление вектора чувствительности. В общем, направление обоих этих векторов изменяется по исследуемой поверхности тела.

Для определения неизвестного вектора перемещения произвольной точки поверхности деформируемого тела, необходимо иметь как минимум три уравнения вида (1.21). Эти уравнения можно вывести при анализе интерференционных картин, полученных в трех направлениях наблюдения:

$$\begin{cases} \bar{k}_1 \bar{x} = \left(N_1 - \frac{1}{2} \right) \lambda \\ \bar{k}_2 \bar{x} = \left(N_2 - \frac{1}{2} \right) \lambda \\ \bar{k}_3 \bar{x} = \left(N_3 - \frac{1}{2} \right) \lambda \end{cases} \quad (1.22)$$

Систему уравнений (1.22) можно представить в матричном виде:

$$\bar{K} \bar{X} = N \quad (1.23)$$

где \bar{K} - матрица чувствительности размерности 3×3 , характеризующая оптическую схему голографического интерферометра; \bar{X} - искомый вектор перемещения с компонентами x_1, x_2, x_3 ; N - нормированный на длину волны света вектор абсолютных порядков полос.

Таким образом, для определения вектора перемещения произвольной точки поверхности деформируемого тела, в общем случае необходимо решить систему линейных алгебраических уравнений.

При оценке погрешности расчета проекций вектора смещения необходимо учесть, что наибольший вклад в эту величину вносит погрешность определения полос, прошедших через рассчитываемую точку при изменении наблюдения. Считается, что глаз может зарегистрировать прохождение через исследуемую точку 0,1 полосы, а при большом экспериментальном навыке и при малой

пространственной частоте полос – 0,01 полосы. Для повышения точности отсчета долей полос необходимо использовать методы, основанные на фотоэлектрической регистрации интенсивности полос интерференционной картины.

1.5.5. Метод усреднения во времени

Метод усреднения во времени широко используется при исследовании вибраций, так как он наиболее прост в техническом отношении. Идея метода заключается в следующем. Если объект вибрирует во время экспозиции, длительность которой значительно превышает период колебаний, то на голограмме будут зарегистрированы волны, рассеянные этим объектом во всех состояниях, которые он последовательно проходит. Восстановленные голограммой волны образуют интерференционную картину, которая дает представление о характере движения различных точек объекта. Вклад в общую экспозицию различных положений объекта будет определяться скоростью, с которой объект проходит через эти положения. Чем больше скорость, тем меньший интервал времени объект находится в этом положении, тем меньший вклад это состояние дает в общую экспозицию. Поскольку в крайних (амплитудных) положениях объект совсем останавливается и скорость его вблизи этих положений мала, то вклад этих двух состояний объекта в общую экспозицию будет максимален, и можно приближенно рассматривать полученную голограмму как соответствующую двум амплитудным положениям объекта, то есть голограмму, полученную методами двух экспозиций. На восстановленном изображении объекта образуются интерференционные полосы равных амплитуд вибраций. Неподвижные участки объекта (узловые линии) будут иметь максимальную яркость, так как в течение всей экспозиции эти точки объекта находились в одном и том же положении. Точки, для которых разность хода волн рассеянных объектов в его амплитудных положениях составляет нечетное число полуволн, дадут минимум интенсивности и будут соответствовать середине темных полос. Точки, для которых разность хода составляет четное число полуволн, будут образовывать максимум светлых

полос. Интенсивность этих максимумов по мере увеличения амплитуды колебаний будет убывать.

Математический анализ, подтверждающий эти качественные рассуждения, приведен в [35]. Там же отмечено, что среднее значение яркости точки в восстановленном изображении, когда объект движется с произвольной скоростью, представляется формулой

$$J \sim \left| \frac{a}{T} \int_0^T \exp \left\{ -i \left[\varphi_0 + \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^t (\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2) v dt \right] \right\} dt \right|^2 \quad (1.24)$$

где a - амплитуда световой волны пришедшей в плоскость регистрации голограммы; T - время экспозиции; v - скорость движения объекта; φ_1, φ_2 - углы освещения и наблюдения соответственно; $\varphi_0 = \frac{(2\pi x \sin \theta)}{\lambda}$.

Если объект движется с постоянной скоростью, то интегрирование (1.24) приведет нас к формуле:

$$J \sim \frac{a^2 \sin^2 \left[\frac{\pi}{\lambda} (\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2) v T \right]}{\left[\frac{\pi}{\lambda} (\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2) v T \right]^2} \quad (1.25)$$

если $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$, то

$$J \sim a^2 \operatorname{sinc}^2 \left(\frac{2vT}{\lambda} \right) \quad (1.26)$$

Из (1.14) видно, что интенсивность восстановленного с голограммы изображения равномерно движущегося объекта оказывается ослабленной в $\operatorname{sinc}^2 \left(\frac{2vT}{\lambda} \right)$ раз по сравнению со случаем неподвижного объекта.

При ступенчатом движении объекта интеграл (1.24), разбивается на две части и в результате интегрирования, получаем следующую формулу:

$$J \sim a^2 \cos^2 \left[\frac{\pi}{\lambda} r (\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2) \right] \quad (1.27)$$

Данный случай соответствует методу двух экспозиций.

Рассмотрим случай, когда объект вибрирует с частотой ω и амплитудой A . Тогда выражение (1.12) принимает вид:

$$J \sim \left| \frac{a}{T} \int_0^T \exp \left\{ -i \left[\frac{2\pi A}{\lambda} (\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2) \sin \omega t \right] \right\} dt \right|^2 \quad (1.28)$$

Поскольку

$$\exp \left\{ -i \frac{2\pi A}{\lambda} (\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2) \sin \omega t \right\} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n \left[\frac{2\pi A}{\lambda} (\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2) \right] e^{in\omega t} \quad (1.29)$$

где J_n - функция Бесселя первого рода n -го порядка, получаем следующую формулу:

$$J \sim \left| \frac{a}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ J_n \left[\frac{2\pi A}{\lambda} (\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2) \right] \int_0^T e^{in\omega t} dt \right\} \right|^2 \quad (1.30)$$

Если время экспозиции составляет целое число периодов колебаний объекта, т.е. $T = \frac{2k\pi}{\omega}$ все слагаемые кроме того, который соответствует $n=0$, обращаются в нуль и

$$J \sim a^2 J_0^2 \left[\frac{2\pi A}{\lambda} (\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2) \right] \quad (1.31)$$

Для $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$ формула (1.19) записывается в виде:

$$J \sim a^2 J_0^2 \left(\frac{4\pi A}{\lambda} \right) \quad (1.32)$$

Как видно из формулы (1.32), интенсивность восстановленного изображения пропорционально функции Бесселя нулевого порядка. Темные полосы в наблюдаемой интерференционной картине поверхности, вибрирующей по синусоидальному закону, соответствуют нулям функции J_0^2 , а светлые полосы соответствуют максимумам этой функции.

Метод усреднения во времени позволяет с интерферометрической точностью измерять амплитуды вибраций диффузно отражающих поверхностей. Этот метод успешно применялся для изучения вибраций различных предметов. В работах [49-51] изучены колебательные характеристики реальных промышленных деталей сложной формы – турбинных лопаток и дисков; в работе [52] вибрации кристаллов кварца; в работах [53,54] исследовались вибрационные характеристики деталей корпуса скрипки.

Однако метод усреднения во времени имеет ряд ограничений. Одно из этих ограничений связано с падением контраста интерференционных полос, следствием которого является невозможность исследования объектов, амплитуды вибраций которых превышают 5λ .

1.5.6. Стробо-голографический метод

Стробо-голографический метод используется в исследовании вибраций с относительно большими амплитудами. При использовании гелий-неонового светового источника ($k=0,63$ мкм), например, удастся исследовать вибрации с амплитудами до 6 мкм.

При стробо-голографическом методе экспонирование производится лишь в течение небольшой доли каждого полупериода колебаний вблизи амплитудного смещения объекта синхронно с его колебаниями.

Дальнейшим развитием явился стробо-голографический метод, сделавший возможным исследование распределения амплитуд колебаний по поверхности диффузора при амплитуде до 15 мкм. Суть метода заключалась в использовании последовательности коротких лазерных импульсов для записи голограммы, синхронизированных с амплитудным положением вибрирующего объекта. При этом голограмма освещается импульсами в моменты максимальных смещений. Для изучения фаз колебаний импульсы синхронизируются с двумя любыми моментами в течение периода колебаний.

Экспонирование голограммы осуществляют при помощи стробо-голографического метода, используя короткие световые импульсы, синхронизированные с определенной фазой исследуемой вибрации, что позволяет применять метод для исследования любых, в том числе и негармонических, периодических процессов.

Было предложено использовать стробо-голографический метод для выделения отдельных мод при много-модовом характере колебаний, что типично для колебаний диффузоров. Для этого последовательность импульсов

должна быть синхронизирована с частотой выделяемой моды. Общим недостатком всех методов голографической интерферометрии является медленный и трудоемкий процесс фото-обработки голограмм и восстановленных изображений. Интерференционная картина образуется опорной и отраженной объектом волнами, регистрируется телевизионной камерой, затем обрабатывается с помощью цифровых фильтров, как и в видеотехнике. Восстановленное изображение воспроизводится на экране дисплея.

Схемы установок для получения голограмм вибрирующих объектов стробо-голографическим методом отличаются от схем голографирования вибраций по методу многократных экспозиций тем, что предусматривают синхронизацию освещения вибрирующего объекта с его колебаниями.

1.5.7. Методы сдвиговой голографической интерферометрии

Общая особенность диффузно рассеянного освещения объекта состоит в том, что в каждой точке голограммы регистрируется фаза волны, соответствующая определенному углу просвечивания объекта. Очевидно, что максимально допустимые углы просвечивания объекта ограничиваются размером голограммы и минимальным расстоянием от объекта до голограммы.

При настройке на бесконечно широкую полосу интерференционные полосы локализованы в плоскости объекта. Однако при настройке на полосы конечной ширины в интерферометрах, описанных в работах [56-59], например, путем разворота нерассеянного пучка, полосы настройки конечной ширины локализованы на голограмме, а полосы в области объекта “ уходят ” за голограмму к плоскости объекта. При фокусировке на голограмму полосы на объекте выглядят “ размытыми “ с низким контрастом. При фокусировке в плоскость объекта “ размытыми “ оказываются полосы настройки [55].

Кроме того, в объектах, в которых распределение показателя преломления трёхмерная функция, траектории лучей в объекте при его диффузном освещении

не обязательно являются плоскими кривыми, и касательные к ним могут не пересекаться с первоначальными, прямыми лучами. Это приводит к снижению контрастности интерференционной картины [39].

Методы сдвиговой голографической интерферометрии лишены указанных недостатков, а при определенных условиях и подборке схем могут быть использованы для определения трехмерного распределения фазы прозрачного объекта.

Простейшая схема голографической сдвиговой интерферометрии, основанной на исследовании интерференционными методами волнового фронта, восстановленного с голограммы сфокусированного изображения, полученной методом однократного экспонирования, предложена в работах [61,62]. В фокальной плоскости объектива О устанавливается устройство N для разделения пучка на два и наложения этих пучков в плоскости наблюдения Э, оптически сопряженной с плоскостью голограммы Г (рисунок 1.4).

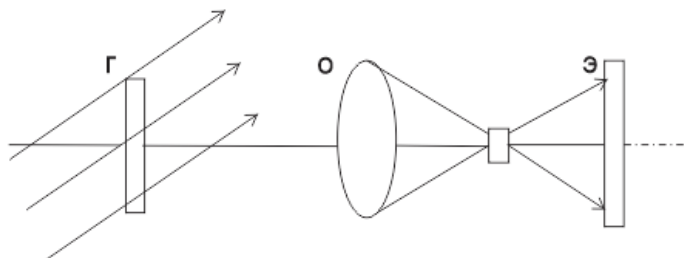


Рисунок 1.4. Простейшая схема голографической сдвиговой интерферометрии

В качестве таких устройств могут быть использованы дифракционная решетка, зеркальная оптическая система, поляризационные призмы и т.д. [60, 61]. При выполнении условия когерентности полученных таким образом вторичных источников света на экране наблюдается интерференционная картина. Качество картины определяется, прежде всего, контрастом интерференционных полос. В предлагаемой схеме контраст интерференционных полос на интерферограмме сдвига неодинаков в результате неравномерного

пропускания голограммы. Для устранения этих недостатков необходимо выполнение множества дополнительных условий, в том числе выбор соответствующих источников света и фотоматериалов, а также светоделительного устройства.

Применение компенсированных интерферометров сдвига для регистрации голограмм было предложено в работах [63, 64]. Компенсированные интерферометры отличаются от других видов интерферометров тем, что вблизи переднего фокуса коллимирующего объектива устанавливается осветительная дифракционная решетка (с той же частотой штрихов, что и у приемной решетки, установленной у заднего фокуса коллимирующей системы). Интерференционные полосы локализованы, причем положение плоскости локализации определяется взаимным расположением плоскости приемной решетки и изображения плоскости осветительной решетки. Положение плоскости локализации при настройке на частые полосы рассмотрено в работе [65]. Полосы расположены между линзами интерферометра при симметричном смещении решеток относительно фокальных областей объективов коллимирующей системы. Голографические методы позволяют использовать объективы среднего качества и получать произвольную настройку интерференционных полос.

В работе [66] приведены схемы голографического интерферометра сдвига, в котором в качестве делительного устройства используются две решетки. Схема с двумя дифракционными решетками проста и позволяет осуществить запись голограмм с различной величиной сдвига волновых фронтов и произвольной ориентацией голографических полос при одновременном получении обычной теневой картины. В рассматриваемой схеме световой пучок, прошедший через исследуемую неоднородность и преобразованный с помощью линзы в сходящийся, направляется на дифракционные решетки, установленные последовательно друг за другом по ходу пучка. При этом рассматриваются только два пучка: первый, который дифрагировал в первый порядок на первой решетке и прошел через вторую решетку как через нейтральный фильтр, и

второй, который прошел через первую решетку и дифрагировал на второй. Одинаковая интенсивность этих пучков обеспечивает получение полос максимального контраста.

В работе [46] рассматривается схема голографического сдвигового интерферометра на основе голографических линз. В предлагаемой схеме две голографические линзы с одинаковыми фокусными расстояниями f образуют голографический сэндвич с обращенными друг к другу эмульсионными поверхностями фотопластинок и со смещенными на ΔX оптическими центрами. При освещении такого сэндвича волной сопряженной опорной, возникают два пучка с фокусами в двух различных точках P_1 и P_2 . При этом смещение в плоскости, удаленной от фокальной на z равно, $(1+\varepsilon)\Delta x$ где $\varepsilon=z/f$. Другой сэндвич, идентичный первому, помещается в рассматриваемой плоскости и освещается точечными источниками P_1 и P_2 . В результате получаются две пары лучей, смещенных на $2\Delta x$. В схеме используются только два крайних луча. Т.к. амплитуды смещенных лучей одинаковые, то получается высококонтрастная интерференционная картина. Показано, что распределение картины интерференционных полос пропорционально производной функции аберрации тестируемого объекта. Предлагаемая схема при всех своих преимуществах обладает существенным недостатком: невозможность регулирования чувствительности и отсюда заданность на определенные типы искажений пропускающих объектов (плавно меняющееся распределение фазы).

Использование голографической оптики позволяет существенно упростить оптическую схему и конструкцию интерферометра для исследования пространственных неоднородностей [68]. В рассматриваемой схеме голографические линзы регистрируются на одну или несколько составных фотопластинок с одним общим для всех линз расходящимся пучком и набором зональных плоских волн, распространяющихся под определенными углами к оси и составляющих с плоскостью голограммы углы

$$\alpha_n = \arctg l_n / d_n ,$$

где d_n - расстояние от оси интерферометра до центра n – ой голограммной линзы; l_n - расстояние от исследуемого объекта до плоскости голограммных линз. Полученные таким образом голограммные линзы используются в пространственном интерферометре для формирования плоских волн, просвечивающих исследуемый объект под определенными дискретными углами α_n .

В работе [69] для разделения пучков использовалась синусоидальная фазовая решетка с частотой 200 штрихов/мм. Для формирования объектных пучков использовались нулевой, плюс (минус) первые и плюс (минус) вторые порядки дифракции. Размер поля визуализации составлял $0-150^0$. Предложенная схема показала хорошие возможности использования дифракционной решетки для исследования пространственных неоднородностей.

Все рассмотренные выше работы предлагали к рассмотрению голографические интерферометры сдвига для контроля качества оптических фокусирующих элементов, которые использовали для освещения исследуемого объекта когерентное излучение с плоским или сферическим фронтом волны. В работе [70] дана схема сдвигового голографического интерферометра, в котором контролируемый объект освещается диффузно рассеянным когерентным излучением. Когерентное излучение со сходящимся фронтом сферической волны, рассеянное матовым стеклом, проходит через исследуемую линзу и регистрируется во время первой экспозиции на фотопластинке в качестве предметной волны одновременно с плоской опорной волной. Перед второй экспозицией, если проводится двухэкспозиционная запись, исследуемая линза смещается в главной плоскости, а матовое стекло в своей плоскости. Предложенный интерферометр позволяет получать интерферограмму сдвига в плоскости контролируемой линзы в широком диапазоне её фокусных расстояний и независимо от знака. Недостатком данного интерферометра является то, что наличие спекла, вызванного использованием диффузного освещения приводит к определенным сложностям в локализации интерферограммы в плоскости, а это

вызывает необходимость перенастройки интерферометра а, также, мириться с тем, что в этом случае происходят потери в контрасте интерферограмм.

Трехщелевые высокочувствительные интерферометры были впервые предложены в работах [71,72]. Однако из-за ограниченности их применения эти приборы не были востребованы. Например, трехщелевой интерферометр, впервые предложенный Цернике [71], мог измерить только оптические разности путей для трех близкорасположенных точек на исследуемом объекте.

В работе [73] рассмотрена схема, основанная на трехщелевом интерферометре, в котором световой пучок от центральной щели отделен от световых пучков двух боковых щелей, которые, непосредственно, и используются для формирования голограммы. Это позволяет устранить позиционные ограничения, накладываемые на точки исследуемого объекта, давая возможность сканировать большие площади протяженного объекта.

Отделение светового пучка от центральной щели от лучей, сформированных боковыми щелями без использования голограммы, описано в работе [74]. Недостатком этой схемы является ее сложность, низкая интенсивность выходного светового потока и большое поперечное сечение площади взаимодействия светового пучка с исследуемым объектом. В работе [73] сумели преодолеть эти недостатки за счет отделения двух боковых щелей от центральной посредством использования голограммы двойной экспозиции. Волновые фронты от боковых щелей голографически восстанавливаются наклонной опорной волной и складываются со светом от центральной щели для того, чтобы сформировать интерференционную картину, изменяющуюся в реальном масштабе времени. Измерения оптических длин пути могут проводиться путем сравнения смежных максимумов.

1.6. Запись серии двух-экспозиционных голографических интерферограмм на плоских регистрирующих средах

На практике большой интерес представляет использование методов голографической интерферометрии для изучения непрерывного процесса изменения исследуемых объектов с большими перемещениями и деформациями. Однако вследствие высокой частоты интерференционных полос и потери корреляции фронтов интерферирующих волн пределы измерения методов голографической интерферометрии ограничены. Поэтому с целью изучения таких процессов разрабатываются специальные методы голографической интерферометрии.

Один из методов для решения указанных задач описан в работе [75], где осуществляется последовательная запись серии двух-экспозиционных голографических интерферограмм изменяющегося объекта на различные участки фотоматериала. Проанализируем измерительные характеристики данного метода. Допустим, что голографические интерферограммы на фоторегистрирующей среде записаны в виде узких полос, равных по площади (рис.1.5).

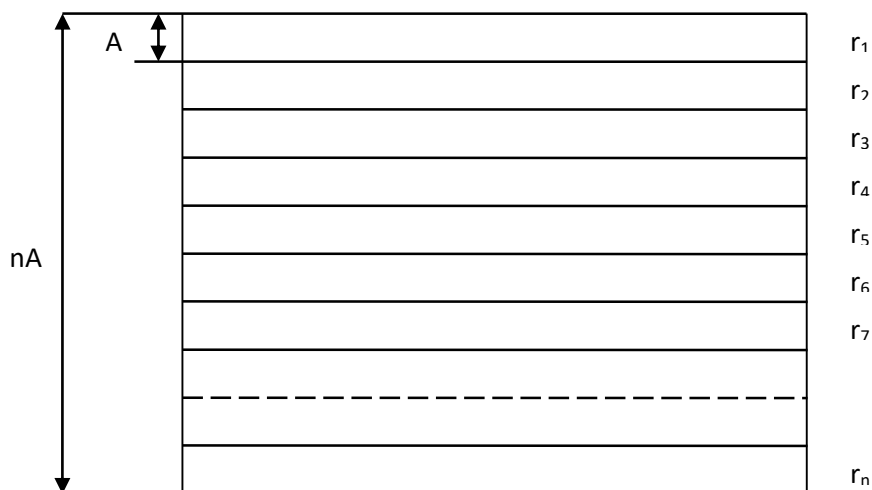


Рисунок 1.5. Серия голографических интерферограмм записанная на плоском носителе; n – количество голографических интерферограмм; A – ширина полоски.

На рис. 1.5 видно, что с ростом количества записываемых состояний изменяющегося объекта и соответственно голографических интерферограмм уменьшаются размеры записываемых голограмм. С уменьшением размеров голограмм растут размеры элементов пятнистой структуры и ухудшается разрешающая способность, и эти факторы приводят к уменьшению отношения сигнал/шум, следствием которого является большая погрешность в измерении. Для количественного анализа приведем следующие формулы:

отношение сигнал/шум в изображении, восстановленном с голограммы [55].

$$\frac{J_c}{J_u} = \frac{Ad}{\lambda l}, \quad (1.33)$$

где A, d - линейные размеры голограммы и считывающего отверстия; l - расстояние от объекта до голограммы; λ - длина волны лазерного излучения.

Зависимость $\frac{J_c}{J_u}$ от A носит прямоугольный характер. Допустим размеры фото-пластины равны 20×20 см² и на ней записаны 10

двух-экспозиционных интерферограмм, тогда $A=2$ см. Если $d=100$ мкм; $\lambda=0,63$ мкм и $l=20$ см, то $\frac{J_c}{J_u}=15$.

Абсолютная погрешность определения порядков интерференционных полос [35]

$$\Delta N = \frac{1}{\pi} \arccos \left(1 - \frac{J_c}{J_u} \right) \quad (1.34)$$

Если $\frac{J_c}{J_u}=15$, то в приведении к одной полосе относительная погрешность измерения $\Delta N/N$ обусловленная шумами, вносимыми голограммой равняется 11%.

На рисунке 1.6 приведены графики зависимости $\frac{J_c}{J_u}(A)$ при $d=100$ мкм, $\lambda=0,63$ мкм, различных l и $\Delta N/N(A)$. С уменьшением l $\frac{J_c}{J_u}$ возрастает и это вызывает значительный рост погрешности измерения при расшифровке голографических интерферограмм [76].

Уменьшение линейного размера голограммы нежелательно также с точки зрения расшифровки голографических интерферограмм. Известно, что при расшифровке голографических интерферограмм используются в основном два метода, предложенных В.Б. Александровым и А.М. Бонч-Бруевичем, когда неизвестна нулевая полоса [76]; и А.Е. Энносом, когда известна нулевая полоса [77]. С целью определения влияния размера голограммы на точность измерения при расшифровке интерферограмм рассмотрим один из двух методов, например, более универсальный первый метод. В этом методе для определения трехмерного вектора перемещения наблюдатель проводит счет полос, непрерывно перемещая глаз в пределах апертуры голограммы и визируя данную точку с различных четырех ракурсов.

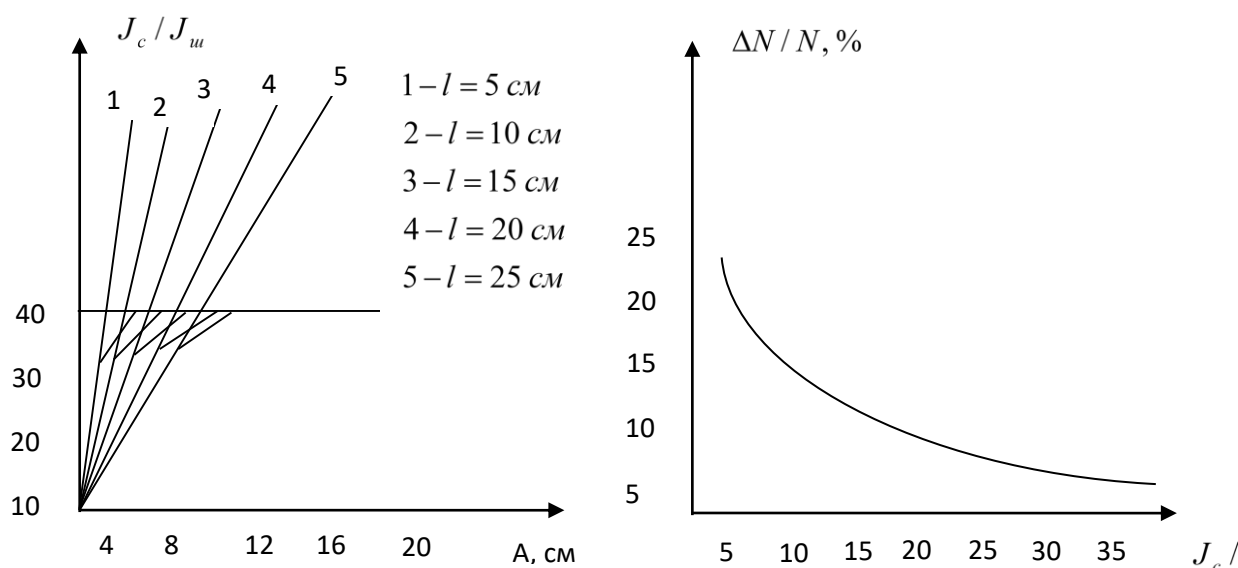


Рисунок 1.6. Зависимости $J_c/J_u(A)$ и $\Delta N/N(A)$

Поэтому размеры голограммы должны быть достаточными для визуализации прохождения через данную точку хотя бы одной полосы. Рассмотрим случай определения вектора перемещения, когда направление перемещения \bar{L} априори известно, рис.1.7. Обозначим через Q_1 и Q_2 две крайние точки голограммы H , \bar{K}_1 , волновой вектор в направлении наблюдения Q_1p , а \bar{K}_2 в направлении Q_2p и \bar{K}_1 и \bar{K}_2 симметричны относительно оси x , φ - угол между ними и l - расстояние между точкой наблюдения p и голограммой H

Пусть при смещении направления наблюдения из точки Q_1 , в точку Q_2 визуализируются прохождения через точку p N - интерференционных полос. Тогда вектор перемещения L определяется формулой

$$L = \frac{\lambda \cdot N}{2 \sin \varphi \cdot \cos \psi} \quad (1.35)$$

где ψ - угол между вектором перемещения L и биссектрисой угла 2φ . Из рисунка 1.5.3 можно получить следующую формулу

$$\sin \varphi = \frac{A \cos \varphi}{2l} \quad (1.36)$$

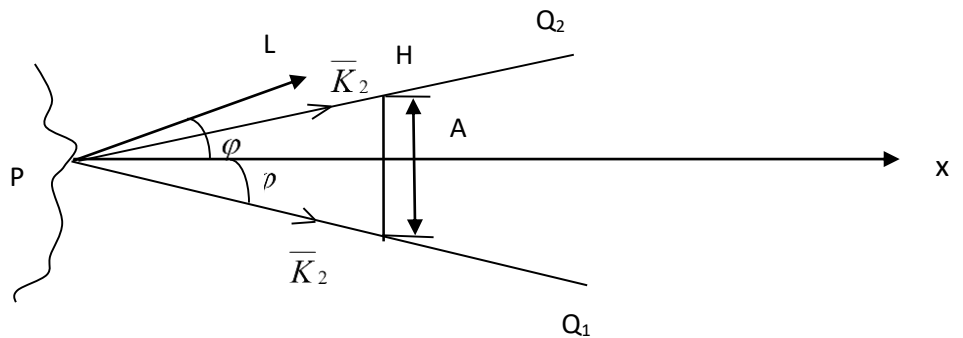


Рисунок 1.7. Определение вектора перемещения

Подставляя в (1.23) вместо $\sin \varphi$ из (1.24), получаем

$$A = \frac{N \cdot l \lambda}{L \cos \varphi \cdot \cos \psi}$$

Пусть $L = \lambda = 0,63 \text{ мкм}$; $l = 5 \text{ см}$, $\cos \psi = 1$ (\bar{L} совпадает с осью x) и $N=1$, т.е. через точку P проходит единственная интерференционная полоса. Тогда из

формулы (1.7.2) $\varphi = 30^\circ$, а $A = 23,1 \text{ см}$. На рис. 1.8 приведен график зависимости $A(l)$ при $\cos\psi = 1$, $N = 1$ и различных углах φ .

Как видно из графика, зависимость $A(l)$ прямолинейная. Из проведенного анализа вытекает, что использование методики получения голографических интерферограмм на плоских носителях оправдывает себя, когда направление вектора перемещения априори известно и чувствительность схемы голографического интерферометра соответствующим образом подобрана, а также объект имеет приблизительно равные размеры с голограммой. Когда объект имеет большие размеры и направление вектора перемещения неизвестно, то желательно использовать объемные регистрирующие среды, при этом используя весь объем и всю площадь регистрирующей среды.

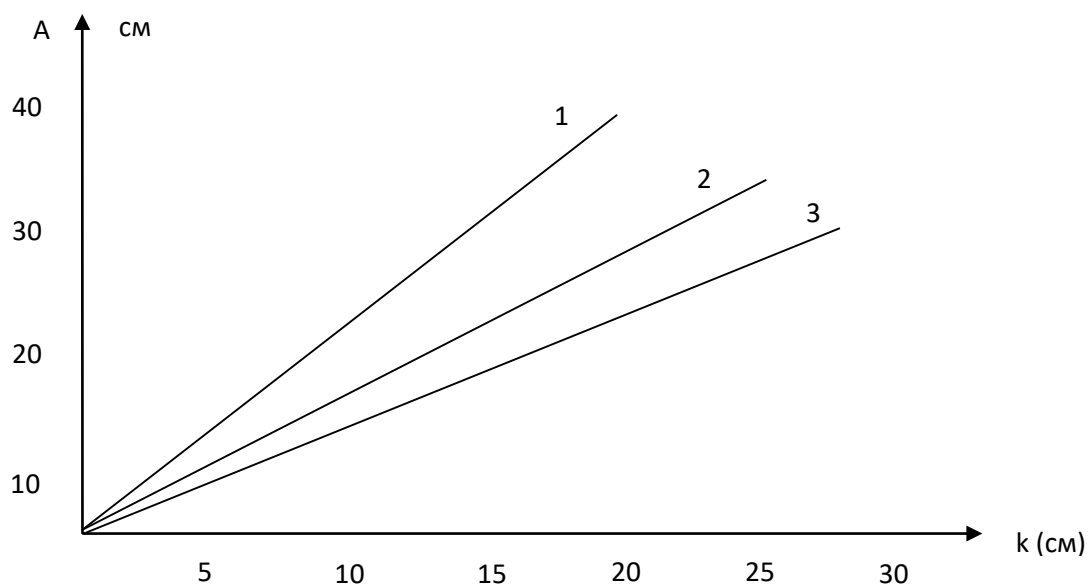


Рисунок 1.8. Зависимость $A(l)$: 1) $\varphi = 60^\circ$; 2) $\varphi = 45^\circ$; 3) $\varphi = 30^\circ$.

1.7. Состояние и проблемы разработки методик голографической интерферометрии на основе объемных регистрирующих сред и рельефно-фазовых носителей

В настоящее время голография в трехмерных регистрирующих средах нашла применение в различных областях науки и техники, в частности в изобразительной голографии [78-80], в создании голограммных отражательных

фокусирующих элементов [23, 81, 82], в записи и последующем считывании информации с чрезвычайно большой емкостью [83-87], в динамической голографии [88-92] и др. Объемные регистрирующие среды также успешно используются в голографической интерферометрии. В работе [93] Нейман и Пенн с целью исключения побочных перемещений объекта использовали метод записи голограммы во встречных пучках (рис.1.9), предложенный Ю.Н.Денисюком [23]. Как видно из рисунка 1.9, объемная регистрирующая среда жестко связана с поверхностью исследуемого объекта с помощью зажимов, в которых пластинка закреплена так, что ее эмульсия находится от поверхности объекта на расстоянии порядка 1 см или меньше. При каждой экспозиции в процессе получения двухэкспозиционной голографической интерферограммы пластинка и объект освещаются одной и той же сферической волной с большим радиусом кривизны. В этом случае отраженный в обратном направлении свет образует предметную волну, а лазерный свет, проходящий через голограмму в прямом направлении, служит опорной волной. Разность фаз между двумя волнами практически не зависит от расстояния между точечным источником и голограммой, поэтому интерферограмма совершенно нечувствительна к перемещению объекта как целого. Изображения, восстанавливаемые голограммами во встречных пучках можно наблюдать в белом свете.

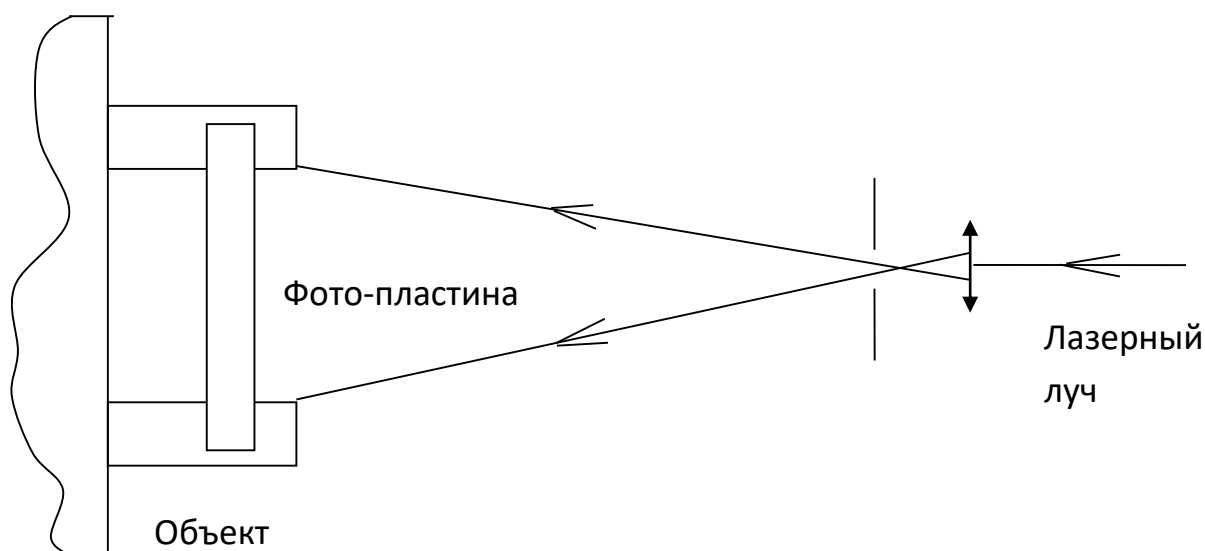


Рисунок 1.9. Схема голографической интерферометрии во встречных пучках

В этой работе [93] также были отмечены существенные трудности, возникающие при использовании этого способа для исследования деформации объекта в реальном масштабе времени. Эти трудности связаны прежде всего с наличием усадки фотоэмульсии в процессе получения отражательной голограммы, и авторам этой работы не удалось их преодолеть. Для преодоления этих трудностей в работе [94] рассмотрены особенности получения голографических интерферограмм в реальном времени. Подобран такой режим экспонирования и обработки фотопластинки, чтобы, во-первых, усадка фотоэмульсии была минимальной, и дифракционная эффективность голограммы при восстановлении той же волной, которая использовалась на этапе записи была достаточно высокой (20-30%); во-вторых, голограмма начального состояния объекта должна обладать достаточно высоким пропусканием (40-50%). На рис.1.10 представлена схема установки для исследования деформации консольной балки 1 в реальном времени. Запись голограммы, наблюдение интерференционных полос проводилось непрерывным излучением гелий-неонового лазера ЛГ-38 [94]. Микро-объектив 3, точечная диафрагма 4, объектив 5 и зеркало 6 формировали параллельный освещающий пучок. В качестве регистрирующей среды использовалась фотопластинка ПЭ-2. Консольная балка и жестко закрепленная относительно нее голограмма устанавливались на юстировочном столике 8, что позволяло осуществлять поступательные и угловые смещения системы – объект – голограмма. Отражательные голограммы практически без усадки фотоэмульсии с коэффициентом пропускания примерно 50% при достаточно высокой дифракционной эффективности голограммы были получены при использовании концентрированного рабочего проявителя ФМГ-1 (без обработки в фиксаже).

В этой работе определены допустимые величины поступательных и угловых смещений системы объект-голограмма при наблюдении в реальном

времени. Также отмечено, что данный метод применим только в случае поступательного движения объекта или его поворота вокруг оси освещающего пучка.

В работе [95] с целью повышения производительности и достоверности определения микро-перемещений поверхности диффузно-отражающего объекта предложено следующее устройство в котором в качестве регистрирующей среды используется объемная среда (рисунок 1.11). Световой пучок от оптического квантового генератора 1 расщепляют свето-делителями 2 и 3 на один предметный и два опорных пучка. Первый опорный пучок отклоняют зеркалом 4, с расширением – линзой 5, на регистрирующую среду 6 (фото-пластинку). Второй опорный пучок отклоняют зеркалом 7, с расширением – линзой 8, на регистрирующую среду 6. Предметный пучок отклоняют зеркалом 9, с расширением – линзой 10, на диффузно-отражающий объект 11. Отклонение

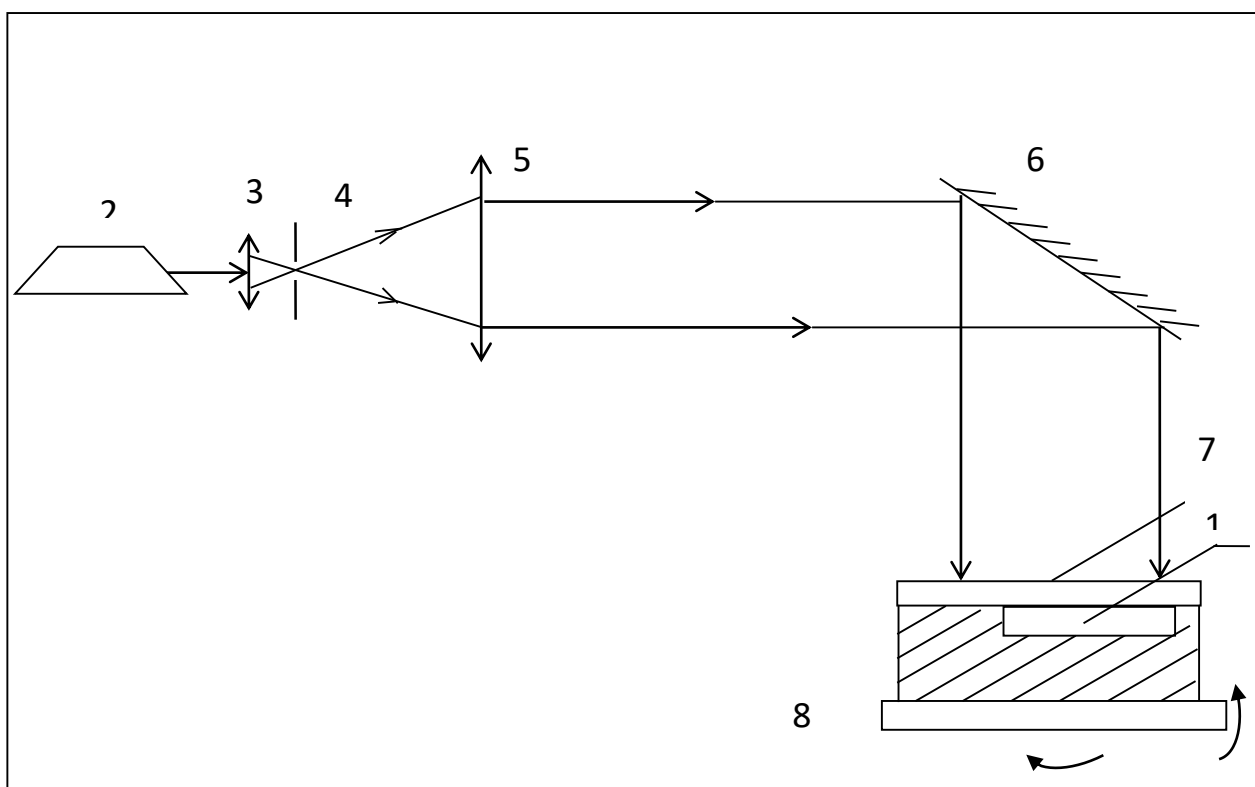


Рисунок 1.10. Схема установки для исследования деформации консольной балки

предметного пучка относительно первого опорного пучка в горизонтальной плоскости осуществляют введением в него между зеркалом 9 и

линзой 10 оптического клина 12, а отклонение предметного пучка относительно второго опорного пучка в вертикальной плоскости осуществляют поворотом оптического клина 12 на 90^0 в плоскости, перпендикулярной оси предметного пучка. Запись первой и второй голограмм ненагруженного объекта осуществляют с использованием первого и второго опорных пучков, падающих на регистрирующую среду под углами 45^0 и 25^0 соответственно. Величина этих углов принимается такой, чтобы обеспечить рассогласование между двумя регистрирующими интерферограммами. Это достигается при угле между двумя опорными пучками не менее 10^0 . Нагружают объект 11 с помощью нагружающего узла 13. Затем изменяют угол между предметным и первым опорным пучками в горизонтальной плоскости, вводя оптический клин 12 в предметный пучок и записывают третью голограмму. Затем изменяют угол между предметным и вторым опорным пучками в вертикальной плоскости. Для этого оптический клин 12 поворачивают на 90^0 в плоскости, перпендикулярной оси предметного пучка и осуществляют запись четвертой голограммы. В результате наложения третьей голограммы на первую и четвертой на вторую, получают две интерференционные картины, при освещении которых соответствующими опорными пучками, восстанавливаются два изображения объекта с наложенными на них несущими полосами, ориентированными соответственно в горизонтальной и вертикальной поверхности диффузно-отражающего объекта.

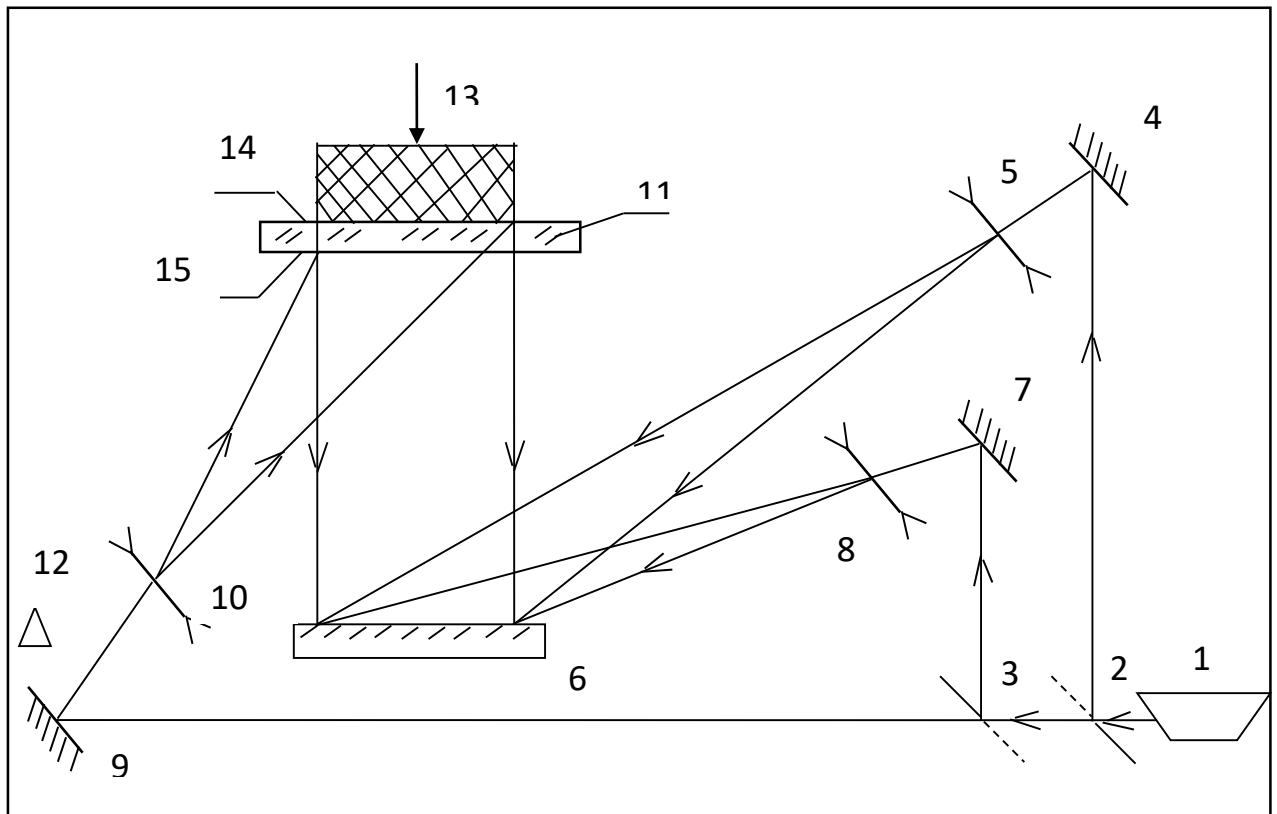


Рисунок 1.11. Схема устройства определения микро-перемещений плоскостях.

Величина и знак перемещения точек поверхности объекта в каждой плоскости определяются по смещению и искривлению несущих полос.

Как видно из рассмотренных работ использование трехмерных регистрирующих сред в голографической интерферометрии ограничивается лишь получением однократной или двукратной двух-экспозиционной интерферограммы в связи с отсутствием способа получения наложенных двух-экспозиционных интерферограмм. Характерным недостатком вышеизложенных способов получения голографической интерферометрии является ограниченность диапазона измеряемых величин, т.к. большие перемещения, диффузно отражающих деформаций и фазовые изменения прозрачных объектов между двумя экспозициями в случае двух-экспозиционной интерферометрии, между двумя наблюдениями в методе реального времени приводят к потере

корреляции фронтов восстанавливаемых волн. Это приводит к полному исчезновению наблюдаемых интерференционных полос [96].

Верхний предел измерения определяется максимальной пространственной частотой зернистого изображения, которое составляют структуры 20-50 лин/мм. При цене полосы $\lambda/2$ верхний предел равняется 10-25 мкм, если $\lambda=0,63$ мкм, максимальный градиент составляет 6-15 мкм/мм.

Напротив, наложенные двух-экспозиционные интерферограммы позволяют исследовать непрерывный процесс изменения объекта с большими интервалами времени по сравнению с двух-экспозиционной интерферометрией или методы реального времени, а также открывают новые возможности в измерении с помощью импульсной голографической интерферометрии.

Поэтому разработка методов записи и восстановления наложенных двух-экспозиционных интерферограмм в объемных регистрирующих средах является перспективным.

Нами предложен способ получения наложенных двух-экспозиционных интерферограмм в объемных регистрирующих средах, заключающийся в следующем [97]. Пучок когерентного света разделяют на два опорных и предметный пучки, голограмму исходного состояния объектов записывают с одним опорным пучком, затем регистрируют с помощью двух опорных пучков $2n$ наложенных голограмм объекта, последовательно в n его состояниях, причем угол падения каждого опорного пучка на регистрирующую среду изменяют после каждой двух регистраций с использованием этого опорного пучка, а при восстановлении голограмм изменяют угол восстанавливающего пучка в диапазоне изменения углов опорных пучков при записи.

Использование предложенного способа позволяет провести измерения в объекте по серии двух-экспозиционных голографических интерферограмм, а не на одной как в известных способах. В результате данный способ позволяет расширить области применения за счет измерения деформации, перемещений диффузно-отражающих объектов, фазовых изменений в прозрачных объектах в

n раз больше интервал времени чем в известных способах. Способ применим также к голографическому исследованию быстропротекающих процессов.

Таким образом, разработка, исследование и практическое применение устройства, реализующего способ получения наложенных двух-экспозиционных интерферограмм в объемных регистрирующих средах, а также методики получения интерферограмм в реальном масштабе времени с использованием фототермопластических носителей, составили основную цель настоящей диссертационной работы, результаты которой изложены в последующих главах.

Выводы к главе 1:

1. Голографическая система состоит из набора компонент, каждой из которых требуется определенное время для прохождения через нее сигнала, несущего информацию. Времена ввода, хранения и выборки голографической информации существенно различаются при использовании различных записывающих сред и других компонент. Очень существенным вследствие этого является системный анализ временных характеристик.

2. При вводе голографической информации необходимо учесть быстродействия работы ПВМС, которые определяются скоростью формирования страницы, скоростью замены страницы, емкостью информации, вводимой в страницу, плотностью расположения информации в модуляторе, контрастом и отношением сигнал/шум формируемого кадра, страницы данных, время, затрачиваемое на адресацию голограмм, а также временные процессы при записи голограмм.

3. Важным параметром, определяющим производительность ГЗУ с произвольной выборкой данных, является время выборки. Часть этого времени - время адресации целиком определяется АОД. Другая часть этого времени - время формирования сигнала зависит от чувствительности датчика, энергии восстанавливающего пучка и потерь этой энергии в системе, в том числе в АОД за счет недостаточно высокой дифракционной эффективности последнего .

4. Рассмотренные выше голографические методы исследования

позволяют исследовать отражающие и пропускающие объекты, сложность которых может быть любой, и эти объекты могут быть даже диффузные которым не предъявляются строгие требования к качеству оптики, столь суровые для обычных интерферометров и дают возможность сравнения волн света, рассеянных или пропущенных в разные моменты времени исследуемым объектом.

5. Вследствие потери корреляции фронтов и высокой частоты интерференционных полос существующие методы голографической интерферометрии не позволяют исследовать непрерывный процесс изменения в объектах с большими оптическими возмущениями.

6. Использование плоских носителей для записи серии двух-экспозиционных интерферограмм изменяющихся объектов оправдывается, когда направление вектора перемещения априори известно и чувствительность схемы голографического интерферометра соответствующим образом подобрана, а также объект имеет равные размеры с голограммой.

7. При использовании объемных и фототермопластических носителей в качестве регистрирующих сред в голографической интерферометрии значительно расширяется предел, повышается точность измерения и появляется возможность исследования непрерывного процесса изменения объектов с большими изменениями измеряемых величин.

ГЛАВА 2. ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ И АКУСТООПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА С ВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ

2.1. Структура и принцип действия голографических запоминающих устройств

Рассмотрим в качестве примера голографическое запоминающее устройство [98]. В наиболее общем виде схема ГЗУ представлена на рисунке 2.1. Для разных модификаций она может варьироваться, что будет показано при рассмотрении конкретных устройств. Набор блоков можно разделить на 3 части, из которых за редким исключением одновременно работают две: либо I и II - при вводе информации в блок хранения, либо I и III - при выборке информации.

Общими для первой и второй части являются: источник света - лазер, первый блок адресации (как правило, акустооптический дефлектор), расщепитель света на два пучка - объектный и опорный, а также блок хранения информации (блок набора голограмм). Общим для второй и третьей части является блок набора голограмм. В первую часть, кроме перечисленных блоков входят: источник вводимой информации, формирователь набора информации-

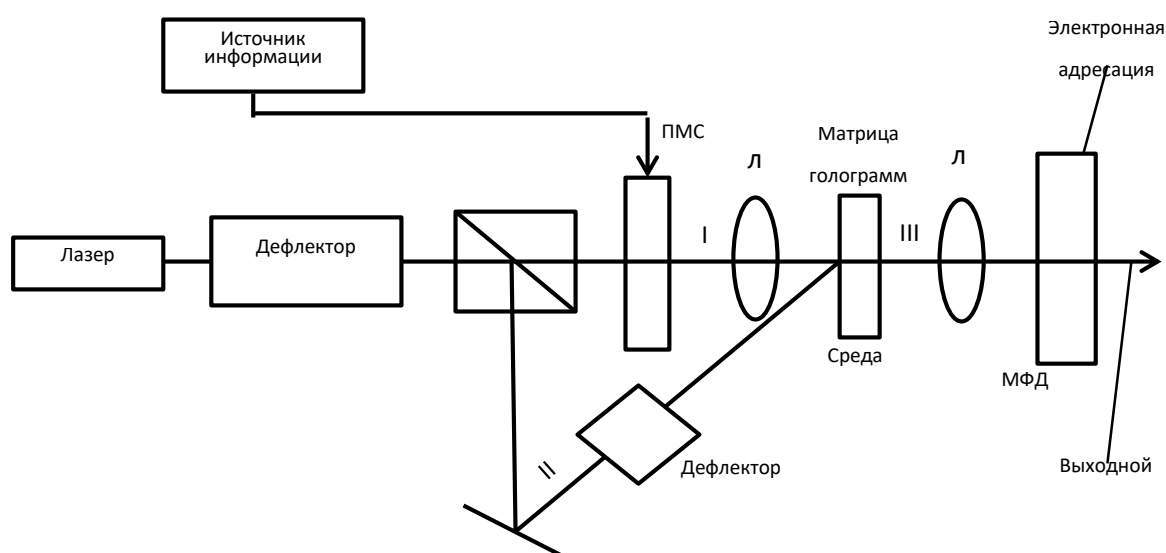


Рисунок 2.1. Блок-схема голографической памяти

(набора данных или изображения), которым является пространственный модулятор света (ПМС) и первая группа линз и необходимой оптики,

обеспечивающей нужное совмещение объектного и опорного пучков при формировании голограммы. Во вторую часть, кроме оптики, направляющей опорный пучок, входит второй блок адресации, обычно используемый при мультиплексировании в объемном блоке хранения голограмм. В третьей части, помимо второй группы линз, содержится матрица фотоприемников, на которую проецируется изображение, восстановленное с выбранной голограммы и третий блок адресации, используемый, если изображение не является конечным продуктом выборки и из набора пикселей требуется выбрать заданное данное. Набор блоков, содержащихся в ГЗУ, показан на рисунке 2.2.

Кроме общей связи между блоками, между отдельными блоками существует специфическая связь. Так число пикселей, формируемых в ПМС и вводимых в виде определенной голограммы в блок хранения должно в точности соответствовать числу пикселей, воспринимаемых матрицей фотодетекторов. Число голограмм, хранимых в блоке, жестко не связано с числом пикселей в ПМС и матрице фотодетекторов. Определенная зависимость между ними

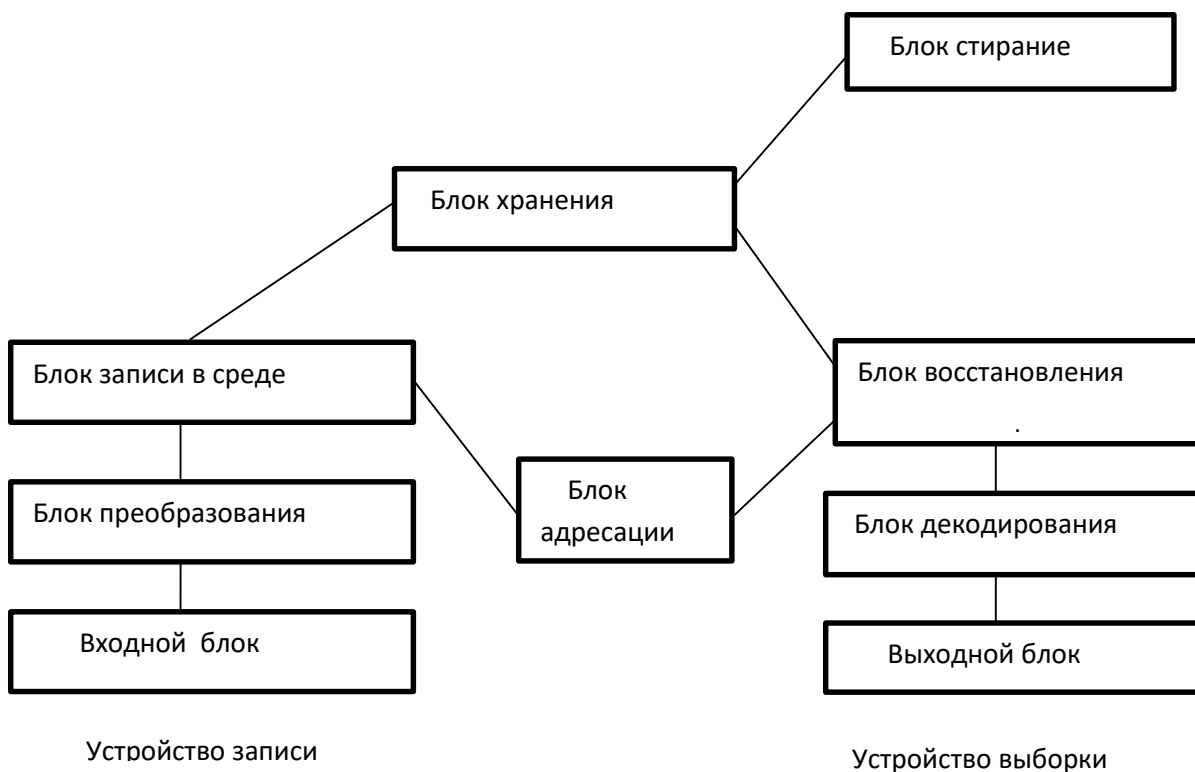


Рисунок 2.2. Набор блоков в ГЗУ.

существует, и она будет рассмотрена позднее.

Здесь же следует отметить, что с ней связано соотношение между количествами информации вводимых и выбираемых параллельно и последовательно. Число пикселей определяет объем информации, хранящейся в голограмме в блоке хранения, вводимых и выбираемых параллельно. Число голограмм в блоке хранения определяет величину объема информации вводимых и выбираемых последовательно.

Предельным случаем полностью последовательно вводимой и выбираемой информации является система побитовой оптической памяти. Предельным случаем полностью параллельного ввода и вывода информации является система, в которой блок хранения содержит только одну голограмму (рисунок 2.3). Распространенным случаем систем голографической памяти, является промежуточный случай, когда часть хранимой в блоке хранения голограмм передается параллельно, а часть последовательно. Ниже будет показано, что оптимальное соотношение между этими потоками зависит от характера информационных процессов, происходящих в системе голографической памяти.

Ввод информации в ГЗУ зависит от вида вводимой информации и характеристик ПМС, через который информация вводится. Особенностью ПМС должно быть в данном случае то, что проходящая через ПМС информация должна быть представлена когерентным светом.

Кодирование информации производится в ГЗУ вследствие преобразования волнового фронта от набора информации в интерференционную картину, содержащую ту же информацию или достаточную ее часть, что и в самом волновом фронте. Далее производится запись информации на носитель. Блок хранения действует вместе с распределителем информации, блоком адресации, отправляющим поступающий набор информации в пространственную страницу с заданным адресом или приданным ей признаком, ключом, по которому она в дальнейшем может быть извлечена из массива другой информации.

Характер записи в среду не отличается от других систем (например,

оптических побитовых), хотя требования к ходу протекания процесса и к материалу среды существенно различны и, соответственно, может отличаться структура и механизм записи информации.

Механизм извлечения информации в ГЗУ специфичен, он отличается от механизма извлечения информации даже и в оптических побитовых устройствах. Это механизм восстановления волнового фронта. Восстанавливается, как правило, волновой фронт массива информации. При этом осуществляется и декодирование. Массив информации, распределенный по всей или части поверхности среды, преобразуется в пространственно разделенную информацию, что позволяет в дальнейшем выделить нужную информацию из массива. Вывод информации из ГЗУ существенно не отличается от вывода информации из других запоминающих устройств.

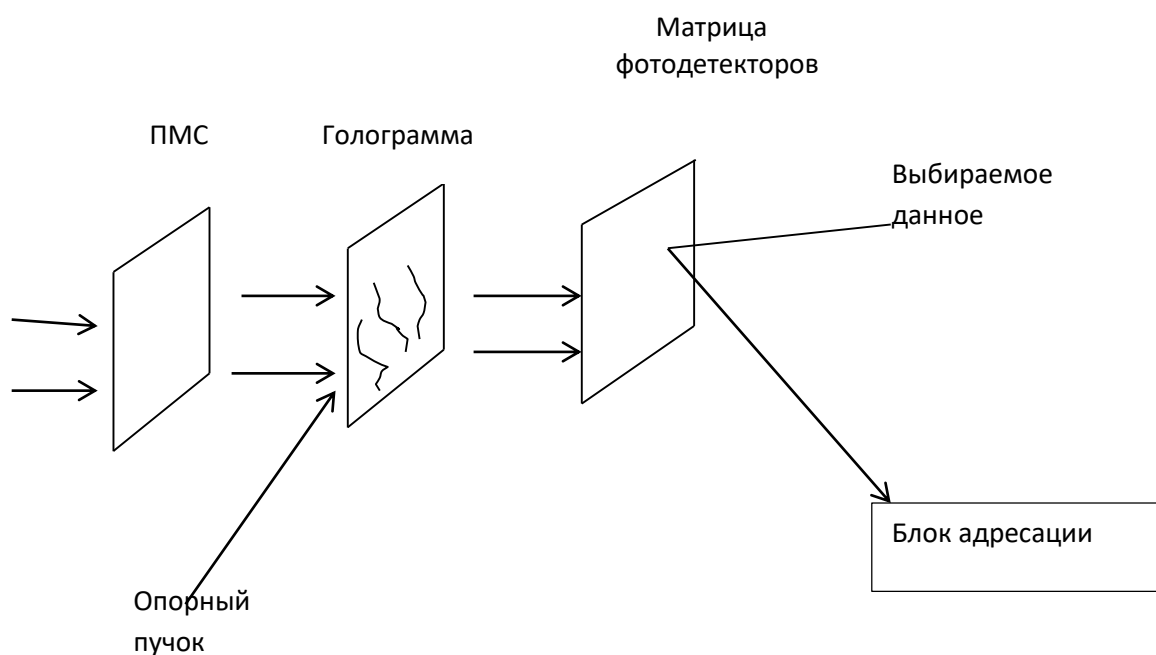


Рисунок 2.3. Голографическая память с хранением и выборкой данных одной страницы

В целях повышения быстродействия рассмотренных ГЗУ нами предложены методика записи информации в виде синтезированных голограмм, которая описывается в следующем разделе [99,100,103].

2.2 Голографическая память на основе синтезированных голограмм

В ближайшей перспективе появятся задачи, требующие огромных вычислительных мощностей [99]. Это в свою очередь потребует новых методов хранения гигантского объема информации, скорость записи и считывания которой должна быть очень высокой. И тут несомненным приоритетом, в сравнении с большим количеством известных методов хранения информации, обладает голографический метод. Именно этот метод позволяет получить очень высокую плотность записи, при том, что скорость доступа и считывания информации в этом случае остается максимальной. Достигается это тем, что и запись, и считывание происходят здесь огромными блоками – голограммами, каждая из которых несет большой объем информации. Параллельная запись и считывание со скоростью выше 1 Мбит/с, ассоциативность делают ее особенно привлекательной. Современное развитие оптоэлектронных приборов и компьютерных технологий способствуют дальнейшему развитию разработок голографической памяти [100-103].

Практически все известные способы записи информации голографическим методом основаны на фиксации интерференционной картины – голограммы, формирующейся как результат суперпозиции опорного и предметного пучков. Основная проблема, с которой сталкиваются экспериментаторы при разработке таких систем – это необходимость точного совмещения опорного и предметного пучков при записи голограмм. Другая проблема – это использование дорогостоящих дефлекторов, необходимых для отклонения опорного пучка на необходимый угол, что сильно усложняет процесс записи информации. Решить рассмотренные проблемы, по крайней мере, на этапе записи голограммы, можно воспользовавшись следующим способом записи цифровой информации (рисунок 2.4) [103]. Луч лазера 1 расширяется микрообъективом 2 и коллимируется линзой 3. Далее расширенный луч лазера падает на жидкокристаллический модулятор света 4. На жидкокристаллическом модуляторе света отображается распределение интенсивности световой волны,

рассчитанной по методике синтеза цифровой голограммы страницы цифровой информации с использованием опорной волны [99].

Голограмма несет большой объем информации об объекте [104]. Для получения количественных данных о параметрах объекта и решения сложных

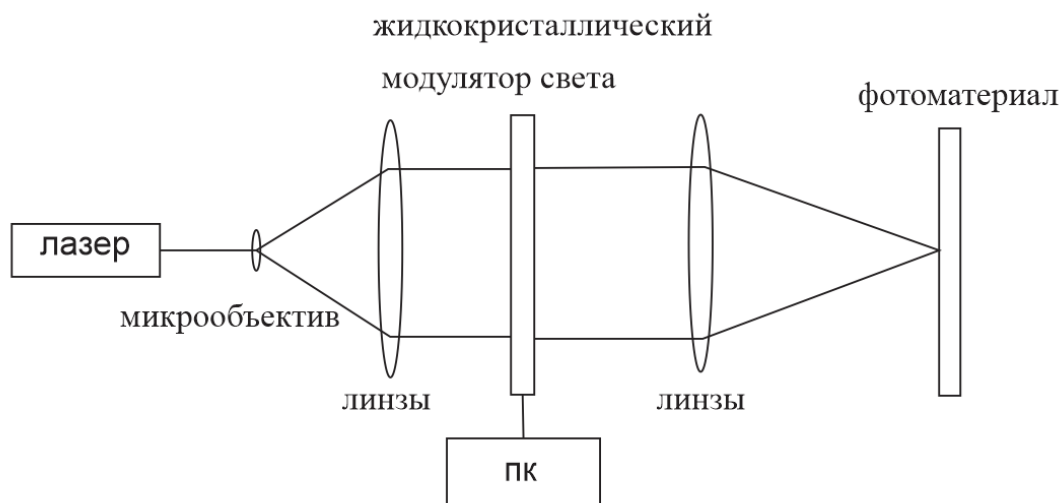


Рисунок 2.4. Схема записи цифровой информации в виде синтезированных голограмм.

задач визуализации внутренней структуры и различных видов объекта необходима автоматизация голографического эксперимента. Одним из наиболее удобных путей автоматизации является ввод голограммы в компьютер с последующим восстановлением (реконструкцией) в цифровом виде. Цифровое восстановление (реконструкция) изображений основано на моделировании процесса распространения света от голограммы к объекту. В простых случаях возможно использование приближения Кирхгофа и следующих из него методов дифракции Френеля и Фраунгофера [105,106]. Для цифровой реконструкции более сложных объектов должны быть применены методы теории рассеяния.

Ввод голограмм в компьютер требует разрешения ряда трудностей [104]. Аналоговый объект (физическое поле) переводится при вводе в компьютер в цифровую форму. При этом имеют место дискретизация и квантование,

вносящие методические погрешности в результаты измерений. Для ввода оптических голограмм, в принципе, могут быть использованы методы сканирования и устройства [106], применяемые при передаче и цифровой обработке изображений. Физическая оптическая голограмма может формально рассматриваться как некоторое изображение. Но имеются существенные количественные отличия голограммы от обычных изображений в смысле требований к разрешению систем ввода в компьютер. Так, для перевода обычных изображений в цифровую форму достаточно выбрать отсчеты с плотностью, не превышающей 10^1 - 10^2 мм⁻¹ (по каждой оси). Известно также [107], что разрешение на внеосевой голограмме имеет порядок 10^3 - 10^4 линий на миллиметр, что на один - два порядка превышает возможности известных систем. Возможны усовершенствования систем ввода, несколько повышающие их разрешающую способность. Однако такая мера не является радикальной и сопряжена со значительным повышением стоимости соответствующих систем. Другой путь состоит в применении специальных методов снижения полосы пространственных частот на голограммах [107]. Цифровая реконструкция для широкого класса голограмм может быть основана на использовании приближения Френеля-Кирхгофа задачи о дифракции. Строгое решение интеграла Френеля-Кирхгофа в частотной области [85] дает следующий результат. Если плоская волна единичной амплитуды распространяется в направлении оси z и падает на помещенный в плоскости $z=0$ транспарант с амплитудным пропусканием $t(u, v)$, то спектр $A(\varepsilon, \eta)$ комплексной амплитуды волны в плоскости $z=d$ имеет вид:

$$A(\varepsilon, \eta) = t(\varepsilon, \eta)\Phi(\varepsilon, \eta, d), \quad (2.1)$$

$$\text{Где } t(\varepsilon, \eta) = f\{t(\varepsilon, \eta)\} \quad (2.2)$$

$$\Phi(\varepsilon, \eta, d) = \exp\left[-i \frac{2\pi d}{\lambda} (1 - \lambda^2 \varepsilon^2 - \lambda^2 \eta^2)^{1/2}\right] \quad (2.3)$$

Символами f и f^{-1} здесь и далее обозначаем, соответственно, прямое и обратное преобразования Фурье [104]. Символами f_d и f_d^{-1} , соответственно, прямое и обратное дискретные преобразования Фурье (ДПФ) [106]. С использованием опорной волны комплексная функция $\Phi(\varepsilon, \eta, d)$ может быть зарегистрирована в виде интенсивности интерференционной картины. Предположим, что в память компьютера записан двумерный массив данных $A(k, l)$, полученный путем дискретизации функции $A(\varepsilon, \eta)$ по аргументам с шагом Δ , и вместо соотношения (2.3) используется

$$A(k, l) = t(k, l)\Phi(k, l, d), \quad (2.4)$$

где $t(k, l)$, $\Phi(k, l, d)$ - отсчеты функций $t(\varepsilon, \eta)$ и $\Phi(\varepsilon, \eta, d)$, соответственно с шагом Δ по осям ε и η . Задача решения уравнения (2.1) относительно $t(u, v)$ в области пространственных частот (ε, η) эквивалентна решению интегрального уравнения Фредгольма 1 рода в области пространственных переменных (u, v) и является некорректной в смысле устойчивости решения [107]. Малым отклонениям наблюдаемой функции $A(\varepsilon, \eta)$, вообще говоря, могут соответствовать большие отклонения решения $t(u, v)$. Для решения этой задачи следует использовать метод регуляризации академика А.Н.Тихонова [108]. Регуляризованное решение уравнения (1.1) в спектральной области имеет вид:

$$T(\varepsilon, \eta) = \frac{1}{1 + \frac{\alpha M(\varepsilon, \eta)}{|\Phi(\varepsilon, \eta, d)|^2}} \frac{A(\varepsilon, \eta)}{\Phi(\varepsilon, \eta, d)} \quad (2.5)$$

где α - параметр регуляризации; $M(\varepsilon, \eta)$ - четная неотрицательная функция, определяющая регуляризующий функционал. Для самого широкого класса функций можно показать, что при использовании регуляризаторов тихоновского типа, существует такая зависимость погрешности регуляризованного решения от погрешности наблюдения, при которой последовательность приближенных регуляризованных решений сходится к

точному решению. Используя регуляризованное решение (2.5) в дискретной форме:

$$\hat{T}(k,l) = \frac{1}{1 + \frac{\alpha M(k,l)}{|\Phi(k,l,d)|^2}} \frac{A(k,l)}{\Phi(k,l,d)} \quad (2.6)$$

и применяя к функции $\hat{T}(k,l)$ ДПФ, получим искомое решение [104]:

$$\hat{t}(m,n) = F_D^{-1}\{\hat{T}(k,l)\} \quad (2.7)$$

Реконструкция в частной области - не единственный путь решения задачи. Если справедливо параболическое приближение [105], функция $\Phi(\varepsilon, \eta, d)$ с точностью до постоянного множителя совпадает с функцией Френеля, а функции $t(u, v)$ и $a(x, y) = f^{-1}\{A(\varepsilon, \eta)\}$ связаны прямым и обратным преобразованиями Френеля. В этих условиях спектр объекта может быть вычислен через наблюдаемую функцию $A(\varepsilon, \eta)$ (в дискретной форме $A(k, l)$) из соотношения:

$$\hat{T}(k,l) = A(k,l)\Phi^*(k,l,d) \quad (2.8)$$

где * - символ комплексно-сопряженной величины. Соответствующее решение имеет вид:

$$\hat{t}(m,n) = F_D^{-1}\{A(k,l)\Phi^*(k,l,d)\} \quad (2.9)$$

и получается с использованием ДПФ. До сих пор мы рассматривали восстановление плоских объектов. Восстановление трехмерного объекта $t(u, v, z)$ не вызывает трудностей, если этот объект может быть представлен совокупностью плоских сечений, параллельных плоскости голограммы [99]:

$$t(u, v, z) = \sum_{i=1}^N t_i(u, v) \delta(z - z_i) \quad (2.10)$$

Для реализации цифровой реконструкции объекта по сечениям можно использовать любой из методов, описанных в этом разделе, варьируя параметр d , соответствующий расстоянию от голограммы до восстановленного сечения [99].

Синтезированные голограммы рассчитываются с помощью интеграла

$$\Gamma(\xi, \eta) = \int_{(x,y)} b(x, y) \exp\{i\pi\lambda^{-1}d^{-1}[(x-\xi)^2 + (\eta-y)^2]\} dx dy \quad (2.11)$$

где $b(x, y)$ - описывает распределение амплитуд и фаз записываемого объекта, d - расстояние между плоскостями объекта и голограммы, λ - длина волны.

Голограммы, синтезированные в соответствии с этим соотношением [99], называются синтезированными голограммами Френеля [109,110,111].

Рассмотрим дискретное представление голограммы Френеля.

Поскольку объект, описываемый функцией $b(x, y)$, имеет ограниченные размеры, скажем $(-X_{\text{макс}}, X_{\text{макс}}; -Y_{\text{макс}}, Y_{\text{макс}})$, то функция $\Gamma(\xi, \eta) \exp\{-i\pi\lambda^{-1}d^{-1}[(x-\xi)^2 + (\eta-y)^2]\}$ может быть восстановлена интерполяцией своих отсчетов:

$$\begin{aligned} \Gamma(\xi, \eta) \exp[-i\pi\lambda^{-1}d^{-1}(\xi^2 + \eta^2)] &= \sum_r \sum_s \Gamma(\Delta\xi, \Delta\eta) \exp\{-i\pi\lambda^{-1}d^{-1}[(r\Delta\xi)^2 + (s\Delta\eta)^2]\} \times \\ &\times \text{sinc}\left[\frac{\pi}{\Delta\xi}(\xi - r\Delta\xi)\right] \text{sinc}\left[\frac{\pi}{\Delta\eta}(\eta - r\Delta\eta)\right] \end{aligned} \quad (2.12)$$

где $\Delta\xi = \lambda d / 2X_{\text{макс}}$, $\Delta\eta = \lambda d / 2Y_{\text{макс}}$.

В задаче синтеза голограмм естественно считать, что объект характеризуется достаточно гладкой функцией $|b(x, y)|$, описывающей его коэффициент отражения по интенсивности. Пусть $|b(x, y)|$, может быть восстановлена по ее отсчетам путем интерполяции их некоторой функцией $\varphi(x, y)$:

$$|b(x, y)| = \sum_k \sum_l |b(k\Delta x, l\Delta y)| \varphi(x - k\Delta x, y - l\Delta y) \quad (2.13)$$

где Δx и Δy – интервалы дискретизации по координатам x и y в прямоугольной системе координат. Тогда

$$\begin{aligned} & \Gamma(r\Delta\xi, s\Delta\eta) \exp\{-i\pi\lambda^{-1}d^{-1}[(r\Delta\xi)^2 + (s\Delta\eta)^2]\} = \\ & = \sum_k \sum_l |b(k\Delta x, l\Delta y)| \iint_{(x,y)} \varphi(x - k\Delta x, y - l\Delta y) \exp\{i\frac{\pi}{\lambda d}[\beta(x, y) + \\ & + (x^2 + y^2)]\} \exp\{-i\frac{2\pi}{\lambda d}[xr\Delta\xi + ys\Delta\eta]\} dx dy \end{aligned} \quad (2.14)$$

где $\beta(x, y)$ – функция, пропорциональная фазе коэффициента отражения объекта, пересчитанной на касательную к нему плоскость.

Нетрудно понять, что $\beta(x, y)$ описывает профиль объекта по отношению к этой плоскости.

Максимальные значения r и s , для которых нужно вычислять сумму, определяются равенствами [99]

$$N_x = \lambda d / \Delta\xi \Delta x, N_y = \lambda d / \Delta\eta \Delta y. \quad (2.15)$$

Эти же величины определяют число членов суммы в (2.14), так как

$$2X_{\text{макс}} / \Delta x = \lambda d / \Delta\xi \Delta x; \quad 2Y_{\text{макс}} / \Delta y = \lambda d / \Delta\eta \Delta y. \quad (2.16)$$

Таким образом, имеем

$$\begin{aligned} & \Gamma(r, s) = \exp\{i\frac{\pi}{\lambda d}[r^2(\Delta\xi)^2 + s^2(\Delta\eta)^2]\} \times \sum_{\kappa=0}^{N_x-1} \sum_{l=0}^{N_y-1} b(\kappa, l) \times \\ & \times \exp\{i\frac{\pi}{\lambda d}[\kappa^2(\Delta x)^2 + l^2(\Delta y)^2]\} \times \exp[-i2\pi(\frac{\kappa r}{N_x} + \frac{ls}{N_y})]. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Чтобы устранить в (2.17) размерные величины, обозначим

$$\eta_\xi^2 = (2X_{\text{макс}})^2 / \lambda d / (\Delta\xi)^2, \quad (2.18)$$

$$\eta_\eta^2 = (2Y_{\text{макс}})^2 / \lambda d = \lambda d (\Delta\eta)^2.$$

Из (2.17) и (2.18) получаем

$$\frac{(\Delta x)^2}{\lambda d} = \frac{1}{N_x^2} \frac{(2X_{\text{макс}})^2}{\lambda d} = \frac{\eta_\xi^2}{N_x^2}, \quad (2.19)$$

$$\frac{(\Delta y)^2}{\lambda d} = \frac{1}{N_y^2} \frac{(2Y_{\text{макс}})^2}{\lambda d} = \frac{\eta_\eta^2}{N_y^2}.$$

Окончательно имеем

$$\Gamma(r, s) = \exp\left[i\pi\left(\frac{r^2}{\eta_\xi^2} + \frac{s^2}{\eta_\eta^2}\right)\right] \sum_{\kappa=0}^{N_x-1} \sum_{l=0}^{N_y-1} b_1(\kappa, l) \times \exp\left[i\pi\left(\frac{\kappa^2 \eta_\xi^2}{N_x^2} + \frac{l^2 \eta_\eta^2}{N_y^2}\right)\right] \exp\left[-i2\pi\left(\frac{\kappa r}{N_x} + \frac{l s}{N_y}\right)\right]. \quad (2.20)$$

Это соотношение является дискретным представлением преобразования Френеля, сведенным к ДПФ [110]. Для его вычисления, кроме матрицы $b(\kappa, l)$, определяющей комплексную амплитуду поля на объекте, необходимо еще задаться и величинами η_ξ и η_η , характеризующими относительные размеры объекта, наблюдаемого из воображаемой точки регистрации голограммы. При их выборе следует руководствоваться условиями малости ошибки при дискретизации фазовых множителей.

Таким образом, задача синтеза голограмм Френеля сводится к расчету матрицы $\{\Gamma(r, s)\}$ по матрице отсчетов объекта $\{b(\kappa, l)\}$ и аналоговой интерполяции полученных отсчетов [99].

Расчет синтезированной голограммы осуществляется с помощью компьютера 7 (рисунок 2.4). Линза 5 уменьшает изображение распределения интенсивности до требуемых размеров на плоскости фотоматериала 6. Т. е., изменяя положение фотоматериала 6, можно записать множество голограмм без использования реального опорного пучка. Для записи таких голограмм не потребуются когерентные источники света, и значительно упрощается процесс записи голограмм [99].

Для записи большого количества голограмм на один носитель используется метод углового мультиплексирования, в основе которого использование для записи каждой из голограмм одного и того же опорного пучка, обычно плоской волны, угол падения которого изменяют. Информация о каждой голограмме, записанной под определенным углом, формируется при интерференции объектного пучка с плоской опорной волной, падающей под данным углом. Важнейшее преимущество использования синтезированных

голограмм, заключается в том, что данная часть голографического процесса, т. е. формирование углового смещения каждой из голограмм, осуществляется машинными методами на этапе синтеза голограммы.

2.3. Реализация параллельного считывания нескольких страниц в голографических системах хранения информации

В рассмотренных ранее голографических системах хранения информации осуществлена последовательная, постраничная схема считывания записанной информации. Данный подход общепринят при мультиплексной схеме записи голограмм, на которых хранится записанная информация [111]. Метод углового мультиплексирования позволяет при изменении угла падения исходной опорной волны восстанавливать отдельную страницу записанной информации. Такой подход позволяет считывать информацию огромными блоками – страницами, что является значительным преимуществом голографических систем хранения информации по сравнению с другими методами. Однако данный метод не позволяет считывать параллельно несколько страниц, что позволило бы значительно ускорить скорость съёма записанных данных, и максимально использовать возможности голографических методов хранения информации.

В работе [111] рассматривается возможность использования синтезированных на компьютере двумерных Фурье-голограмм отдельных страниц информации для хранения голографической информации. Каждая из таких подголограмм считывается с помощью пространственно-временного модулятора света, а затем сформированное аналоговое изображение указанной голограммы оптическими методами уменьшается до требуемых масштабов и записывается на высокочувствительный голографический носитель. В процессе мультиплексирования указанная последовательность действий повторяется для следующей подголограммы со страницей информации, также синтезированной с помощью компьютера. Полученная подголограмма проецируется на тот же

носитель с целью записи новой страницы. При такой последовательной записи страниц на один носитель положение опорного пучка не меняется. Однако плоскость носителя при каждой последующей записи разворачивается на некоторый угол вокруг оси, соосной направлению опорного луча. Направление опорного луча не изменяется и, для удобства, берется нормально плоскости голографического носителя. При восстановлении такой мультиплексной голограммы исходным опорным пучком восстанавливаются изображения одновременно со всех записанных подголограмм, так как для записи всех подголограмм использовался один и тот же опорный луч. Количество подголограмм, записываемых на один носитель, ограничивается необходимостью пространственного разделения восстанавливаемых изображений, чтобы исключить наложение одних страниц информации на другие. В предлагаемой схеме число одновременно восстановленных подголограмм равно максимально возможному количеству подголограмм, записываемых на данный носитель, так как опорный луч фиксируется. Указанный факт сильно ограничивает плотность записи информации на один и тот же носитель.

Рассмотренная схема записи может быть модернизирована так, что плотность записи значительно увеличивается. Кроме того резко увеличивается скорость считывания записанной информации.

Рассмотрим более подробно алгоритм синтеза голограмм [111], который может быть использован в устройствах записи мультиплексных голограмм для голографических систем хранения информации. На первом этапе синтеза голограмм обычно в памяти компьютера формируется информация о записываемом объекте, который впоследствии будет восстановлен из сгенерированной на компьютере голограммы. В нашем конкретном случае это страница, или несколько страниц информации. На следующем этапе обычно рассчитывается последовательность угловых проекций объекта, если объект трехмерный. Затем, после ряда математических преобразований над указанной

последовательностью, получает конечный продукт в виде двумерной комплексной матрицы. На конечном этапе комплексная матрица кодируется на реальный носитель, и полученная позитивная матрица используется как голографический транспарант.

Рассмотрим более строго указанную последовательность действий. Объект, обозначенный как $t(x_1, y_1, z_1)$, задается в декартовой системе координат. Здесь z_1 продольная ось, т. е. виртуальная оптическая ось. Для каждой пары углов φ_m, θ_n , описывающих горизонтальное и вертикальное направления соответственно рассчитывается m, n -я проекция объекта. Для каждой пары углов φ_m, θ_n проекционное изображение $H_{mn}(x_2, y_2)$ записывается в память компьютера в виде двумерной матрицы, в которой (x_2, y_2) координатная система каждой проекции [111]. Используя хорошо известные выражения для перехода от одной системы координат к другой связь между координатами (x_2, y_2) и (x_1, y_1, z_1) можно задать соотношениями

$$\begin{aligned} x_2 &= x_1 \cos \varphi_m - z_1 \sin \varphi_m, \\ y_2 &= y_1 \cos \theta_n - z_1 \sin \theta_n \cos \varphi_m - x_1 \sin \varphi_m \sin \theta_n. \end{aligned} \quad (2.21)$$

На следующем этапе действия алгоритма синтеза голограммы каждое проекционное изображение, видимое под углом φ_m, θ_n , умножается на экспоненциальную функцию $\exp[-i2\pi b(x_2 \sin \varphi_m + y_2 \sin \theta_n)]$. Затем полученное произведение суммируется следующим образом:

$$s(m, n) = \iint p_{mn}(x_2, y_2) \exp[-i2\pi b(x_2 \sin \varphi_m + y_2 \sin \theta_n)] dx_2 dy_2, \quad (2.22)$$

где b реальная константа, а $s(m, n)$, в общем случае, комплексная величина.

Далее рассчитывается следующее проекционное изображение, видимое с соседней точки, имеющей чуть большее значение угла, и получается новое значение суммы, скажем $s(m+1, n)$. Из величин, полученных из уравнения (2.22),

формируется комплексная матрица. Каждое значение этой матрицы соответствует различным точкам наблюдения, а значения элементов матрицы расположены также как и последовательность наблюдаемых проекционных изображений. Тем не менее, связи между точками голограммы и различными направлениями обзора существуют только на стадии синтеза. На стадии восстановления изображения результирующая голограмма является глобальной в том смысле, что каждая точка голограммы несет информацию обо всем объемном изображении [111].

Комплексные значения полученной матрицы должны быть закодированы в реальные и неотрицательные значения коэффициентов пропускания голограммы. Освещение такой матрицы коэффициентов пропускания когерентным светом приводит к голографическому восстановлению изображения [111].

Рассмотренный алгоритм синтеза голограмм на компьютере представляет собой имитацию специфической голографической когерентной системы. Поэтому сформированное изображение имеет особенности свойственные изображению, полученному при восстановлении голограммы, записанной когерентным светом.

Рассмотрим отдельный бесконечно малый элемент размером $(\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta z_1)$ трехмерного объекта. Этот элемент, имеющий координаты (x_1, y_1, z_1) и значение $t(x_1, y_1, z_1)$ присутствует как отдельный элемент в каждой проекционной плоскости (x_2, y_2) , но положение его меняется при переходе от одной плоскости к другой. В соответствии с уравнением (1.22) распределение в плоскости голограммы для всех значений φ_m, θ_n и единичного источника задается следующим образом

$$\begin{aligned}
s'(m, n) &= \iint t(x_1, y_1, z_1)(\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta z_1) \delta(\bar{x}_2 - x_2, \bar{y}_2 - y_2) \exp[-i2\pi b(\bar{x}_2 \sin \varphi_m + \bar{y}_2 \sin \theta_n)] d\bar{x}_2 d\bar{y}_2 = \\
&= t(x_1, y_1, z_1) \exp[-i2\pi b(x_2 \sin \varphi_m + y_2 \sin \theta_n)] (\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta z_1),
\end{aligned} \tag{2.23}$$

где δ дельта-функция Дирака. Используя соотношение (2.21) получаем для (2.23)

$$\begin{aligned}
s'(m, n) &= t(x_1, y_1, z_1) \exp\{-i2\pi b[\sin \varphi_m (x_1 \cos \varphi_m - z_1 \sin \varphi_m) + \\
&+ \sin \theta_n (y_1 \cos \theta_n - z_1 \sin \theta_n \cos \varphi_m - x_1 \sin \varphi_m \sin \theta_n)]\} \Delta x_1, \Delta y_1, \Delta z_1.
\end{aligned} \tag{2.24}$$

Так как входная область обзора трехмерна, то полное распределение $s(m, n)$, определяемое всеми точками области наблюдения, получается в результате трехмерного интегрирования по всем точкам области

$$\begin{aligned}
s(m, n) &= \iiint s'(m, n) dx_1 dy_1 dz_1 = \\
\text{наблюдения [111]} &= \iiint t(x_1, y_1, z_1) \exp\{-i2\pi b[\sin \varphi_m (x_1 \cos \varphi_m - z_1 \sin \varphi_m) + \\
&+ \sin \theta_n (y_1 \cos \theta_n - z_1 \sin \theta_n \cos \varphi_m - x_1 \sin \varphi_m \sin \theta_n)]\} dx_1 dy_1 dz_1.
\end{aligned} \tag{2.25}$$

Максимальные углы наблюдения $\varphi_{\max}, \theta_{\max}$ берутся таким образом, чтобы они были достаточно малы и, в этом случае, используя приближение малых углов, получаем

$\cos \varphi_m \approx 1, \cos \theta_n \approx 1$. В этом случае уравнение (2.25) преобразуется к виду

$$\begin{aligned}
s(m, n) &= \\
&= \iiint t(x_1, y_1, z_1) \exp\{-i2\pi b[x_1 \sin \varphi_m + y_1 \sin \theta_n - z_1(\sin^2 \varphi_m + \sin^2 \theta_n) - \\
&- x_1 \sin \varphi_m \sin^2 \theta_n]\} dx_1 dy_1 dz_1.
\end{aligned} \tag{2.26}$$

При выполнении условия малости углов член $x_1 \sin \varphi_m \sin^2 \theta_n$ в экспоненте в уравнении (2.26) много меньше, чем один радиан во всем диапазоне переменных. По этой причине этим слагаемым можно пренебречь. Когда матрица $s(m, n)$ записывается на оптический носитель, а увеличение угла при

переходе от одной проекции к другой предполагается пренебрежимо малым, можно перейти от переменных (m, n) в матрице $s(m, n)$ к непрерывным переменным (u, v) :

$$s(u, v) = \iiint t(x_1, y_1, z_1) \exp\left\{-i4\pi b \frac{\sin \varphi_{\max}}{\Delta u} [ux_1 + vy_1 - z_1 \frac{2 \sin \varphi_{\max}}{\Delta u} (u^2 + v^2)]\right\} dx_1 dy_1 dz_1. \quad (2.27)$$

При переходе от уравнения (2.26) к уравнению (2.27) мы предполагаем, что угловые интервалы между любыми двумя последовательными проекциями равны. Другими словами мы используем соотношения $\sin \varphi_m = m \sin \varphi_{\max} / M, \sin \theta_n = n \sin \theta_{\max} / N$, где M и N общее число проекций в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно. Также в уравнении (2.27) предполагается, что голограмма проецируется на пространственный модулятор света таким образом, что выполняется равенство $\sin \varphi_{\max} / \Delta u = \sin \theta_{\max} / \Delta v$, где Δu и Δv ширина и высота среды пропускания соответственно. Из сказанного видно, что $s(u, v)$ в уравнении (2.27) ведет себя также как комплексная амплитуда в выходной плоскости эквивалентной когерентной системы [111]. При когерентном освещении такая установка представляет собой эквивалентную оптическую систему для цифровой обработки, которая формирует голограмму, описанную в уравнении (2.27). Трехмерный объект $t(x_1, y_1, z_1)$ освещается плоской волной, длина которой равна λ , после чего волновой фронт, отраженный от объекта, проходит сквозь сферическую линзу, имеющую фокусное расстояние f . Комплексная амплитуда, полученная в задней фокальной плоскости, задается соотношением

$$g(u, v) = C \iiint t(x_1, y_1, z_1) \exp\left\{-i \frac{2\pi}{\lambda f} [ux_1 + vy_1 - z_1 \frac{u^2 + v^2}{2f}]\right\} dx_1 dy_1 dz_1, \quad (2.28)$$

где C постоянная, а $g(u, v)$ представляет собой фронт комплексной волны, который после интерференции с опорной волной формирует голограмму Фурье. Выражения (2.27) и (2.28), по сути, эквивалентны. Отличия только в постоянных величинах, которые присутствуют в показателе экспоненты. Следовательно, $s(u, v)$ представляет собой двумерную функцию, которая содержит информацию о трехмерном объекте, подобно тому, как двумерная оптическая голограмма содержит трехмерную информацию о записанном объекте.

Предложенный алгоритм синтеза голограмм является обобщенным, так как разработан для трехмерных объектов. Для случая двумерных объектов, каковыми являются страницы информации в голографических системах хранения данных, алгоритм сводится к частному случаю, при котором одна из переменных, обычно продольная, совпадающая с оптической осью, фиксируется, а число проекций изображения берется равным единице [111].

2.4. Повышение плотности записи информации на основе синтезированных рентгеновских голограмм

Плотность записи голографической информации на атомарном уровне не возможна даже при использовании в качестве источников ультрафиолетовые лазеры, так как длина волны такого лазера на порядки превышает межатомные расстояния, что исключает возможность дифрагирования световых лучей на атомной решетке. Запись голограмм, несущих информацию о структуре атомной решетки, а тем более о структуре отдельных атомов, возможна только при использовании лазеров в рентгеновском диапазоне.

Рентгеновская голография является очень перспективным методом изучения образцов с атомарным разрешением в таких областях как биология,

микроэлектроника и материаловедение [112]. Она обеспечивает хорошую проникающую способность и высокий фазовый контраст, удобна для работы с импульсными источниками и дает возможность формирования трехмерных изображений при сочетании методов голографии и томографии. Мягкое рентгеновское излучение очень удобно для использования в целях микроскопии тонких органических образцов и жидких биологических объектов, таких как субклеточные органеллы. Значительные достижения в развитии оптики, детекторов и источников рентгеновского излучения сделали возможным габоровскую и фурье голографии, обеспечивающие поперечное разрешение порядка 50-60 нм при использовании фотонов с энергиями 300-600 эВ. Недавно была продемонстрирована голографическая томография с продольным разрешением 100 нм.

Рентгеновская голография для более высоких энергий (1-4 кэВ) может быть реализована при использовании мощных синхротронных источников. В этом случае методы рентгеновской голографии могли бы быть использованы для исследования более плотных объектов, чем в случае мягкого рентгеновского излучения, например, дефекты в микрочипах, микротрещины в структуре кристаллов и т. д [112].

Перспективы развития рентгеновской голографии связаны с расширением диапазона энергий рентгеновских фотонов, используемых в голографии, и достижением трехмерного разрешения меньше одного микрона [112].

Знания об атомной и молекулярной структуре материалов лежат в основе, как физики, так и химии, и биологии. Помимо чисто научного интереса, результаты таких исследований находят широкое применение и на практике, например, для контроля структуры материалов на атомном уровне в высокотехнологичных областях промышленности. Такая потребность приводит к необходимости разработки методов исследования, которые позволят увидеть микроскопическую структуру материалов. Большинство этих методов основывается на упругом рассеянии волн исследуемыми образцами. Тем не

менее, пространственная структура рассеивающих объектов определяется не только распределением интенсивности, но и соотношением фаз волн, распространяющихся в различных направлениях. Преобразование данных по интенсивности в реальную трехмерную атомную структуру невозможно без знания фазовой информации. Во многих случаях дополнительные знания об образце (состав, знание об изученных и сходных по структуре образцах и т. д.) могли бы заместить утерянную фазовую информацию и позволить решить задачу по изучению структуры этого образца. Тем не менее, существуют проблемы, которые невозможно обойти при использовании обычных методов. Поэтому методы, дающие информацию о фазе напрямую или косвенными методами, представляют огромную ценность. Голография, использующая локальные опорные точки - флуоресцентная рентгеновская голография, один из этих методов [112].

Голография атомного разрешения основывается на принципах флуоресцентной рентгеновской голографии. Данный тип рентгеновской голографии был впервые предложен в 1986 г. [113].

На рисунке 2.5 показана схема реализации флуоресцентной рентгеновской голографии. В этом методе опорные волны формируются в результате флуоресценции отдельных атомов (на рисунке 2.5) под воздействием внешнего рентгеновского излучения. Объектными волнами, возникающие при упругом рассеянии флуоресцентных рентгеновских волн на соседних атомах (на рисунке 2.5), интерферируют друг с другом. Результат их интерференции можно рассматривать как голограмму атомного разрешения. Анализируя и преобразовывая численными методами полученную интерференционную картину, получают трехмерную атомную структуру исследуемого образца [112].

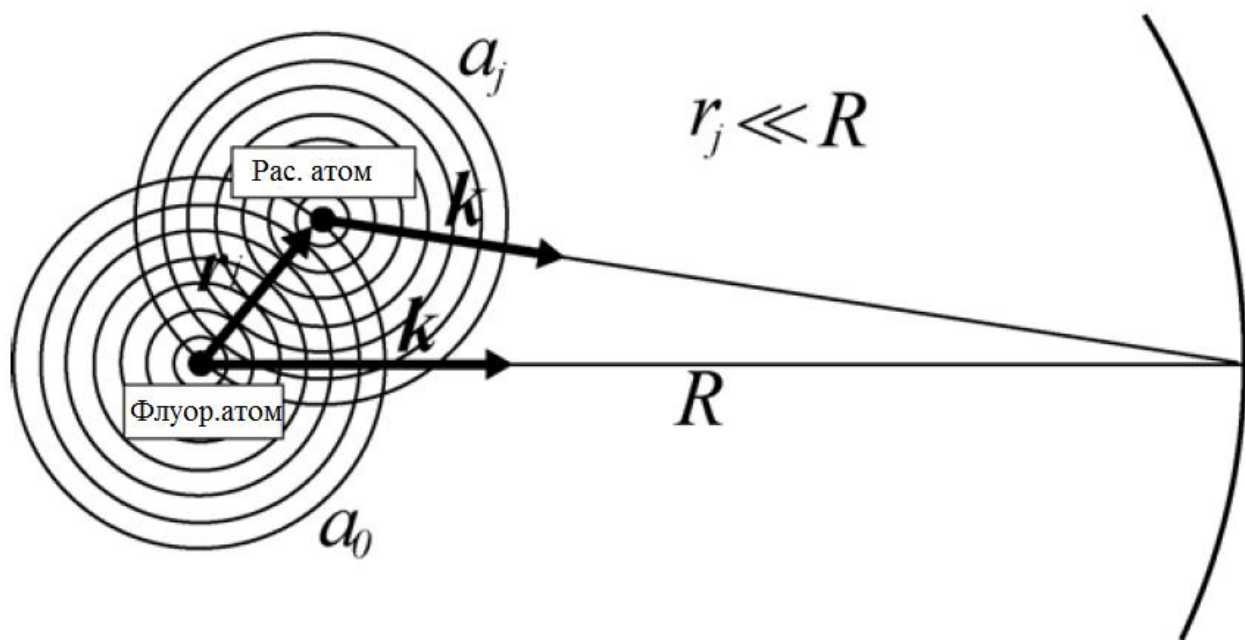
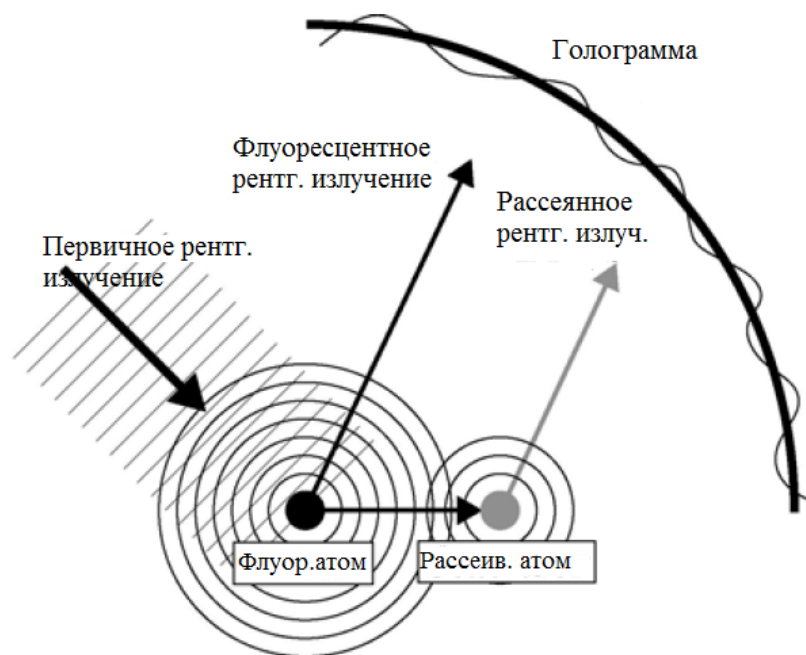
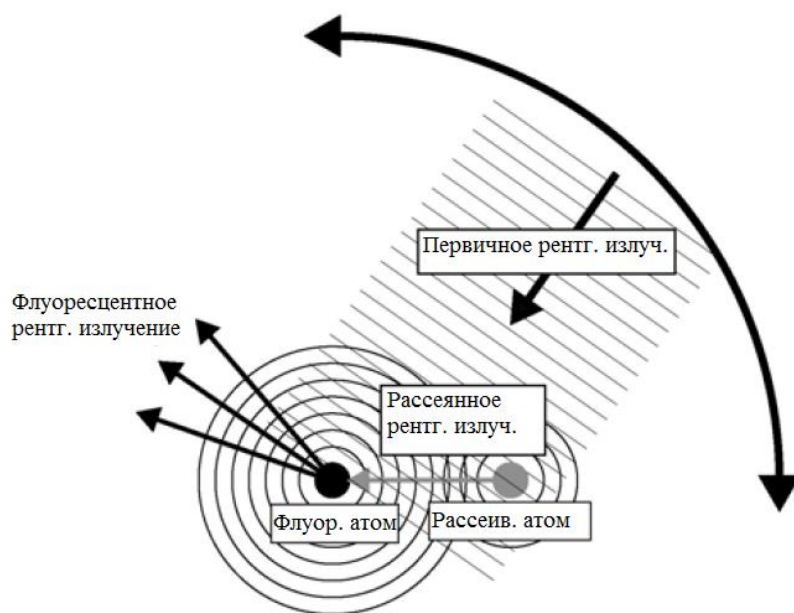


Рисунок 2.5. Обобщенная схема принципа флуоресцентной рентгеновской голографии

Флуоресцентные голограммы получают двумя основными способами. Их называют голографией с внутренним источником (ГВИ) [114] и голографией с внутренним детектором (ГВД) [115] соответственно. На рисунке 2.6 представлены схемы для этих типов голографий. В методе ГВИ (рисунок 2.6а) опорные волны приходят извне, не рассеиваясь на атомах вещества. Объектные волны формируются за счет рассеяния флуоресцентного излучения на соседних атомах. Все эти волны интерферируют, формируя флуоресцентную рентгеновскую голограмму атомного разрешения. Метод ГВД (рисунок 2.6 б) основывается на принципе оптической обратимости, в соответствии с которым детектор и источник излучения (флуоресцирующий атом) меняются местами. Монохроматический пучок рентгеновских лучей падает на исследуемый образец. Часть этого пучка проходит, не рассеиваясь, до атома-детектора – эту волну можно рассматривать как опорную. Оставшаяся часть пучка рассеивается на атомах ближнего окружения атома-детектора, формируя объектную волну. Эти волны интерферируют, образуя в пространстве распределение электромагнитного поля, которое вызывает флуоресценцию атома-детектора,



a



б

Рисунок 2.6. Типы флуоресцентной рентгеновской голографии

излучение которого пропорционально квадрату амплитуды этого поля. Изменение угла падения первичного пучка по отношению к плоскости поверхности исследуемого образца, изменяет амплитуду интерференционного поля вблизи флуоресцентного атома, что отражается на флуоресцентном

излучении. Детектируя фотоны как функцию направления падения первичного пучка, формируют голограмму окружения флуоресцентного атома. Записанная на фотопластинку картина распределения интенсивности флуоресцентного излучения представляет собой голограмму [112].

Ключевое отличие методов ГВИ и ГВД заключается в энергиях излучений, которые используются для записи голограммы. В методе ГВИ энергия первичного излучения ограничена энергией возбуждения флуоресцирующего атома. В методе ГВД энергия первичного излучения может быть любой, лишь бы она превышала значение энергии поглощения атомами исследуемого образца. На первый взгляд, метод ГВД проще, так как позволяет использовать рентгеновское излучение любой энергии, при условии превышения энергии возбуждения. Однако, именно этот метод требует монохроматизации первичного рентгеновского излучения, так как оно используется в качестве опорной волны, тогда как в методе ГВИ первичное излучение используется только для возбуждения флуоресцирующего атома, что можно сделать без монохроматизации первичного излучения. Т. е. метод ГВИ технически реализуется более просто [112].

Интенсивность флуоресцентного рентгеновского излучения I и выражение для интерференционного члена ε в уравнении интерференции определяются, соответственно, соотношениями

$$I(\mathbf{k}) = I_{\phi} |1 + R(\mathbf{k})|^2 = I_{\phi} [1 + |R(\mathbf{k})|^2 + 2\text{Re}\{R(\mathbf{k})\}]$$

(2.29) и

$$\varepsilon = 2\text{Re}\{R(\mathbf{k})\}, \tag{2.30}$$

где \mathbf{k} – волновой вектор флуоресцентного рентгеновского излучения в методе ГВИ, или первичного излучения в методе ГВД, I_{ϕ} – интенсивность фона, $R(\mathbf{k})$ – первичная волна в методе ГВИ, или флуоресцентная волна в методе ГВД, Re – реальная часть комплексного выражения. Первый член внутри квадратных

скобок выражения (2.29) представляет собой компоненту опорной волны, второй член компоненту объектной волны и третий член – это интерференционный член, ответственный за осцилляции в плоскости голограммы [112].

Для отдельного флуоресцентного атома внутри твердого тела $R(\mathbf{k})$ выражается соотношением:

$$R(\mathbf{k}) = \sum_j \frac{p_{ref}[\theta(\mathbf{k}, \mathbf{a}_j)]}{a_j} \exp[i(\mathbf{k}\mathbf{a}_j - k a_j)], \quad (2.31)$$

где p – коэффициент поляризации, r_e – классический радиус электрона, $f[\theta(\mathbf{k}, \mathbf{a}_j)]$ – коэффициент рассеяния атома, $\theta(\mathbf{k}, \mathbf{a}_j)$ – угол рассеяния первичного излучения на j –ом атоме, a_j – расстояние между флуоресцентным атомом и j –м атомом окружения. Отсюда оценка осцилляции интерференционного члена для одного рассеивающего атома дает значение [112].

$$\varepsilon(\mathbf{k}) = 2 \frac{p_{ref}[\theta(\mathbf{k}, \mathbf{a}_1)]}{a_1} \cos(\mathbf{k}\mathbf{a}_1 - k a_1) \approx 2 \frac{(2,8 \times 10^{-5} \text{ \AA}) \cdot 100}{3 \text{ \AA}} \approx 10^{-3}. \quad (2.32)$$

Из (2.32) видно, что осцилляции интерференционного члена составляют порядка 10^{-3} от фона. Поэтому при сборе информации для рентгеновской голограммы необходима высочайшая точность измерений, а также статистика, превышающая миллионы измерений для каждой из исследуемых областей атомной структуры образца, для того чтобы увеличить отношение сигнал/шум.

Так как осцилляции интерференционного члена для совокупности рассеивающих атомов ε можно рассматривать как сумму осцилляций интерференционных членов для каждого рассеивающего атома в отдельности ε_j [112], то

$$\varepsilon = \sum_j \varepsilon_j = \sum_j 2 \frac{p_{ref}[\theta(\mathbf{k}, \mathbf{a}_j)]}{a_j} \cos(\mathbf{k}\mathbf{a}_j - k a_j). \quad (2.33)$$

Голограммы, полученные как с помощью ГВИ, так и ГВД методов, позволяют восстановить трехмерную структуру вблизи какого-либо флуоресцентного атома. Алгоритм, который позволяет восстановить атомные изображения, основывается на интегральной теореме Гельмгольца-Кирхгофа [115]. Согласно этой теореме, если \mathbf{R} – радиус-вектор произвольной точки на замкнутой поверхности S , а значение волны на S равно $U(\mathbf{R})$, то значение волны в произвольной точке пространства $U(\mathbf{r})$, определяемой радиус-вектором \mathbf{r} ($|\mathbf{r}| \leq |\mathbf{R}|$), равно

$$U(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi} \iint \left[\frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{-ik|\mathbf{R}-\mathbf{r}|}}{ik|\mathbf{R}-\mathbf{r}|} \right) - \frac{e^{-ik|\mathbf{R}-\mathbf{r}|}}{ik|\mathbf{R}-\mathbf{r}|} \frac{\partial U}{\partial n} \right] ds. \quad (2.34)$$

В флуоресцентной рентгеновской голографии S представляет собой сферическую поверхность радиуса k . Исходя из этого, выражение (1.26) можно упростить до вида

$$U(\mathbf{r}) = \iint \varepsilon(\mathbf{k}) e^{-i\mathbf{k}\mathbf{r}} d\tau_k, \quad (2.35)$$

где τ_k - безразмерный элемент. Так как задача сферически симметрична по отношению к центральному флуоресцентному атому, то решать задачу восстановления атомной структуры вблизи флуоресцентного атома удобнее в сферической системе координат [116]. В этом случае волновой вектор может быть представлен в виде

$$\mathbf{k} = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) (\sin\theta \cos\varphi, \sin\theta \sin\varphi, \cos\theta) = k(\sin\theta \cos\varphi, \sin\theta \sin\varphi, \cos\theta). \quad (2.36)$$

Радиус-вектор \mathbf{r} выразим через координаты $\mathbf{r} = (x, y, z)$. Интенсивности восстановленных атомных изображений определяются соотношением

$$U(\mathbf{r}) = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \varepsilon(\theta, \varphi) e^{-ik(\sin\theta \cos\varphi, \sin\theta \sin\varphi, \cos\theta)} \sin\theta d\theta d\varphi \quad (2.37)$$

Процесс формирования рентгеновских голограмм достаточно ясен. Однако нельзя считать, что трехмерная атомная структура восстанавливается абсолютно точно на основе измеренных данных. Использование интегрального преобразования Гельмгольца-Кирхгофа позволяет получить трехмерную атомную структуру без дополнительных условий. Однако данный способ оценки атомной структуры не учитывает многие искажения, такие, как влияние рассеяния флуоресцентного излучения атомами, удаленными от центрального атома, слабое рассеяние атомами малой массы и др. Поэтому положения атомов и их яркость, которая пропорциональна количеству электронов, может определяться с достаточной долей ошибки. И, тем не менее, этот метод может быть основой итерационного подхода для более точного определения атомной структуры исследуемого образца [112, 116].

2.5. Акустооптический анализатор спектра с высокой информационной производительностью

Акустооптические анализаторы спектра (АОСА) выполняют обработку спектра сигнала со скоростью, определяемой такими пиковыми характеристиками, как полоса пропускания частот и временная апертура ячейки Брэгга. АОСА с интеграцией по пространству и времени имеют примерно одинаковую информационную производительность, но первый позволяет обрабатывать более широкую область спектра, тогда как второй обеспечивает более высокую разрешающую способность по частоте. Механическое сочетание обоих не приводит к росту производительности, если не принимать во внимание характер обрабатываемого сигнала. В работе [117] нами предложены использовать комбинацию АОСА с интеграцией по пространству и времени для обработки сигнала с некоторыми заранее известными характеристиками. Устройство, состоящее из обоих видов АОСА и обрабатывающее такой вид сигнала, имеет информационную производительность примерно на порядок большую, чем устройство на основе одного АОСА. Также в данной работе [117]

представлены и обсуждены принципы построения устройства, особенности используемых ячеек Брэгга и данные по обработке радиоэфирных сигналов.

Анализ спектра является очень важным и продуктивным методом исследования сигналов. Возможность работы в режиме реального времени позволяет использовать этот метод для многих приложений. Анализ спектра в реальном времени требует очень быстрой обработки сигнала, которая может быть успешно выполнена в оптическом канале, где обычная линза может выполнять преобразование Фурье и обеспечивать анализ достаточно большого количества информации одновременно. Для ввода электрического сигнала в оптический канал необходимо иметь блок ввода сигнала. Акустооптическая ячейка Брэгга выглядит оптимальным компонентом для обеспечения ввода электрического сигнала в оптическую схему [118].

Акустооптические анализаторы спектра (АОСА) можно разделить на два класса: АОСА с пространственной и временной интеграцией. Каждый из этих классов имеет свои преимущества и недостатки, и выбор конкретного устройства во многом зависит от решаемой задачи. Одной из важнейших задач, которую можно решить с помощью АОСА, является панорамное наблюдение за радиоэфиром в реальном времени [119].

Устройства для панорамного наблюдения за воздухом должны обеспечивать решение следующих задач:

1. Наблюдение за радиоэфиром в реальном времени с визуальным представлением всех радиоисточников, имеющих место во время наблюдения.
2. Выбор областей особого интереса и анализ спектра в реальном времени в этих областях.
3. Измерения значений частот отдельных пиков спектра, а также их относительной интенсивности.

4. В зависимости от конкретных намерений могут потребоваться дополнительные опции.

Очевидно, что решение таких задач возможно только при использовании приборов с очень высокой информационной производительностью. Различные виды АОСА могут удовлетворить требованиям, предъявляемым к таким приборам. Ниже рассматриваются проблемы, связанные с данной областью применения АОСА.

2.5.1. АОСА с пространственной и временной интеграцией

Самая простая АОСА основана на структуре с пространственной интеграцией. Это устройство схематически показано на рисунке 2.7, состоит из одной ячейки Брэгга (кристалл, в котором распространяется акустическая волна, соединенный с другим кристаллом, служащим пьезоэлектрическим преобразователем). монохроматического источника света (обычно лазера). входной оптики, обеспечивающей заполнение апертуры ячейки Брэгга. линзы Фурье. и линейного фотоприемника, такого как линейная ПЗС-матрица.

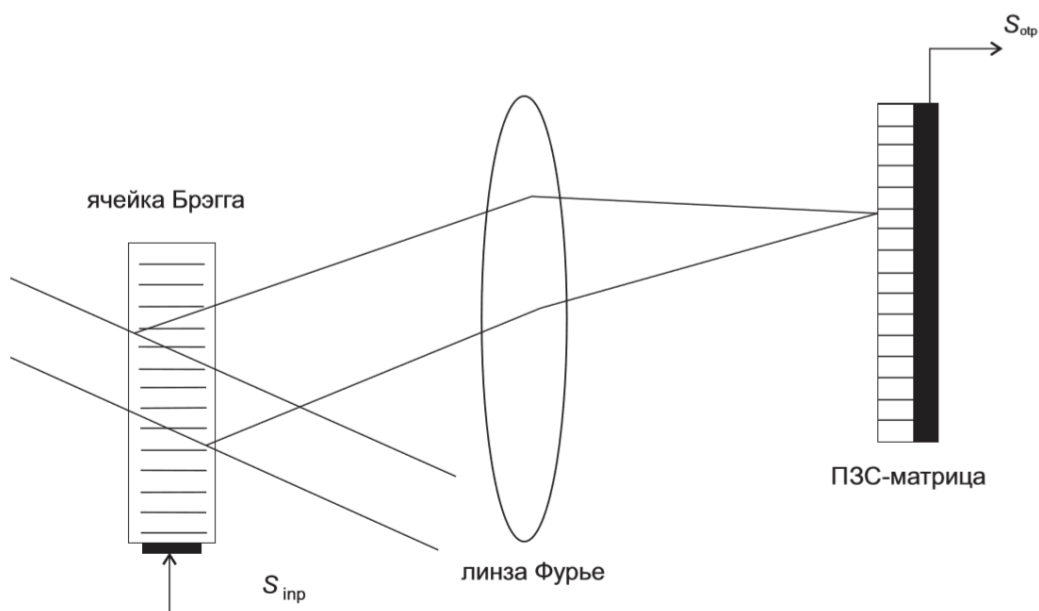


Рисунок 2.7. Схематическое изображение АОСА с пространственной интеграцией

В этой конфигурации дифрагированный световой луч отклоняется на угол, пропорциональный частоте сигнала. Линза Фурье преобразует угол в координату в плоскости светочувствительного детектора. Считывание сигнала с матрицы ПЗС пропорционально спектру мощности входного сигнала. Однако эта пропорциональность ограничена нелинейностью преобразования. Поскольку устройство работает в режиме Брэгга, то имеют место только два порядка дифракции: нулевой и первый. Их интенсивности можно выразить как

$$I_d = I_i \sin^2(BP_0)^{1/2} \quad (2.38)$$

$$I_u = I_i \cos^2(BP_0)^{1/2} \quad (2.39)$$

где I_i — интенсивность падающего света, P_0 — акустическая мощность, а B — константа, которую можно определить как

$$B = (\pi^2 L / 2 \lambda^2 H) M_2, \quad (2.40)$$

где L — размер апертуры светового пучка, H — ширина пьезоэлектрического преобразователя. λ — длина волны света, а M_2 — акустооптическая добротность, которая сильно зависит от скорости звука (чем больше скорость, тем меньше M_2).

Из выражения (2.38) следует, что преобразование сигнала нелинейно, но при малых значениях сигнала это преобразование можно принять близким к линейному.

Одной из важнейших характеристик АОСА является разрешающая способность по частоте. Если разрешающая способность определяется исходя из критерия Рэлея, то можно считать, что ее можно вычислить как величину, обратную временной апертуре ячейки Брэгга. Поскольку временная апертура (время пересечения акустической волной светового пучка) может быть близка к 10 нс, то разрешение по частоте составляет около 100 кГц. Для анализа спектра радиоэфира этого обычно недостаточно.

Другой класс АОСА — устройства с временной интеграцией. Эти устройства основаны на конфигурации акустооптического коррелятора. Акустооптическая техника на основе ячеек Брэгга позволяет реализовать акустооптические корреляторы (АОК), которые обеспечивают формирование корреляционной функции для двух сигналов [121]. Наиболее распространенная структура АОК, содержащая две акустооптические ячейки Брэгга, была предложена Монтгомери [122]. Ее структура проиллюстрирована на рисунке 1. В этом виде АОК входной сигнал $S_i(t)$ и опорный сигнал $S_o(t)$ можно представить в виде

$$S_i(t) = a_i(t)\cos[\omega t + \varphi_i(t)], \quad (2.41)$$

$$S_o(t) = a_o(t)\cos[\omega t + \varphi_o(t)], \quad (2.42)$$

Предполагается, что (сигналы отличны от нуля в течение периода $0 < t < T$). Анализ акустооптической дифракции в двух последовательных встречно-ориентированных ячейках Брэгга показывает, что электрический заряд Q , накопленный фотодетектором за время T , можно выразить как

$$Q(x) \sim \int_0^T a_i \left[t - \frac{x+L}{v} \right] a_o \left[t - \frac{L-x}{v} \right] \cos \left\{ \left(\frac{2\omega x}{v} \right) - \varphi_i \left[t - \frac{x+L}{v} \right] + \varphi_o \left[t - \frac{L-x}{v} \right] \right\} dt. \quad (2.43)$$

Применение простой подстановки переменной t показывает, что накопленный заряд пропорционален взаимной корреляционной функции между $S_o(t)$ и $S_i(t)$.

Эта конфигурация также может быть использована для анализа спектра радиочастотных сигналов. Для того чтобы получить анализатор спектра, использующий схему, показанную на рисунке 2.8, достаточно обеспечить, чтобы сигнал $S_o(t)$ был линейно-частотно-модулированным с прямоугольной огибающей, тогда как исследуемая функция $S_i(t)$ является огибающей другого линейно-частотно-модулированного сигнала [123,124]. В этом случае

накопленный заряд Q имеет компонент, пропорциональный спектру сигнала $S_i(t)$.

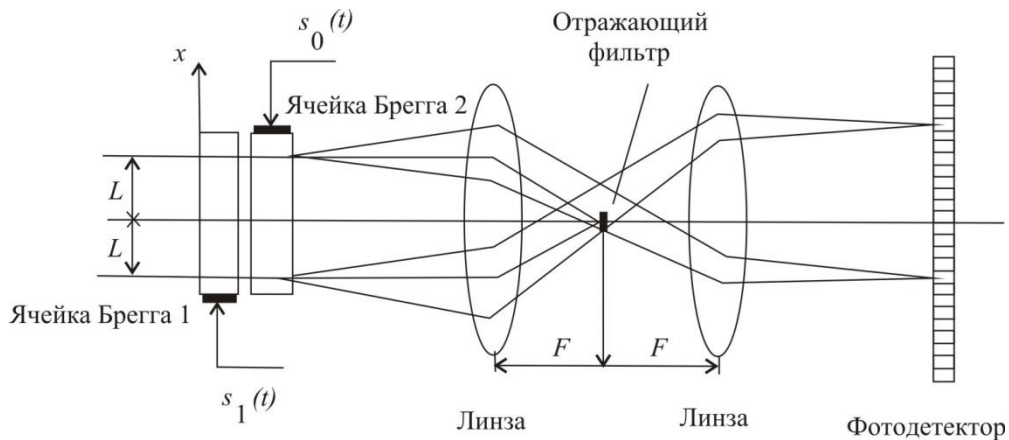


Рисунок 2.8. Схематическое изображение акустооптического коррелятора с встречно-ориентированными ячейками Брэгга как основы анализатора спектра с интеграцией по времени

Недостатком такого АОСА является то, что полоса пропускания одновременно анализируемых частот может быть выражена как

$$\Delta f = \Delta f_B T_{dev} / t, \quad (2.44)$$

где Δf — полоса пропускания частот одной ячейки Брэгга, T_{dev} период линейной функции частотной модуляции, а T — время интегрирования. На практике полоса пропускания для АОСА с временным интегрированием в сотни раз меньше, чем у одной ячейки Брэгга. Но разрешающая способность по частоте такого устройства в сотни раз лучше, чем у одной ячейки Брэгга. Информационная производительность АОСА может быть описана пропускной способностью устройства. Эта величина представляет собой количество информации, которое обрабатывается и передается устройством в единицу времени и может быть описана выражением [123].

$$J' = (N/\tau) \log_2(m+1), \quad (2.45)$$

где τ — временная апертура АОСА, а m — число ненулевых уровней серой шкалы, которые можно распознать в выходном сигнале. Значение N для АОСА

можно рассматривать как число разрешенных частотных интервалов в спектре сигнала.

2.5.2. Экспериментальная реализация панорамного радионаблюдения с использованием АОСА с пространственной интеграцией

На базе АОСА с пространственной интеграцией разработана, изготовлена и исследована система, позволяющая проводить радионаблюдение за радиоэфиром с очень высокой скоростью, практически недоступной для чисто электрических аналогов.

В состав устройства входит ноутбук, который непосредственно демонстрирует картину радиоэфира как во всем диапазоне наблюдения, так и в выбранных областях диапазона.

Предлагаемый способ радионаблюдения за воздухом включает композицию электрических и акустооптических методов обработки сигналов. Общее схематическое изображение системы показано на рисунке 2.9.

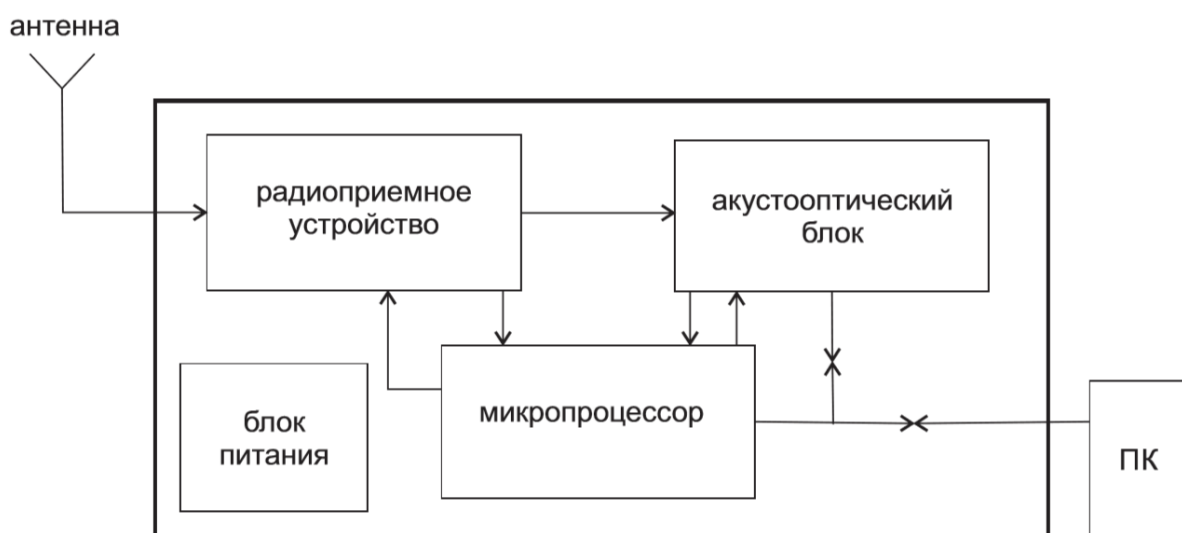


Рисунок 2.9. Схематическая конфигурация системы радионаблюдения за эфиром с использованием акустооптической обработки спектра сигнала

Акустооптический блок включен в общую систему наравне с обычным электронным блоком, обеспечивающим прием и обработку входного сигнала. Для повышения разрешающей способности системы частотные диапазоны 10 МГц обрабатываются акустооптическим блоком последовательно. Обработка каждого поддиапазона 10 МГц занимает не более 50 мс. Таким образом, общая обработка панорамного диапазона 50. .900 МГц может быть выполнена за несколько секунд, что значительно быстрее скорости работы любого электронного панорамного радиоприемника.

Радиоприемное устройство включает в себя преобразователь частоты, 3 полосовых фильтра, редуктор, усилитель мощности ВЧ. Частотный синтезатор, смеситель, управляемый полосовой фильтр, коммутатор и редуктор звукового канала, усилитель низкой частоты.

Сигнал с антенны поступает на преобразователь частоты (см. рис. 2.10), обеспечивающий прием радиосигналов в поддиапазоне 10 МГц в общем диапазоне 50.. .900 МГц. Затем сигнал смещается на частоты 30.. .40 МГц. Управление преобразователем частоты осуществляется последовательным 16-разрядным кодом в режиме 12S и позволяет устанавливать частоты с минимальным разносом 62,5 кГц.

Пройдя через преобразователь частоты, сигнал поступает на селективный фильтр. Его полоса пропускания находится в диапазоне 30.. .40 МГц и позволяет отфильтровать боковые лепестки и зеркальные составляющие сигнала после преобразователя.

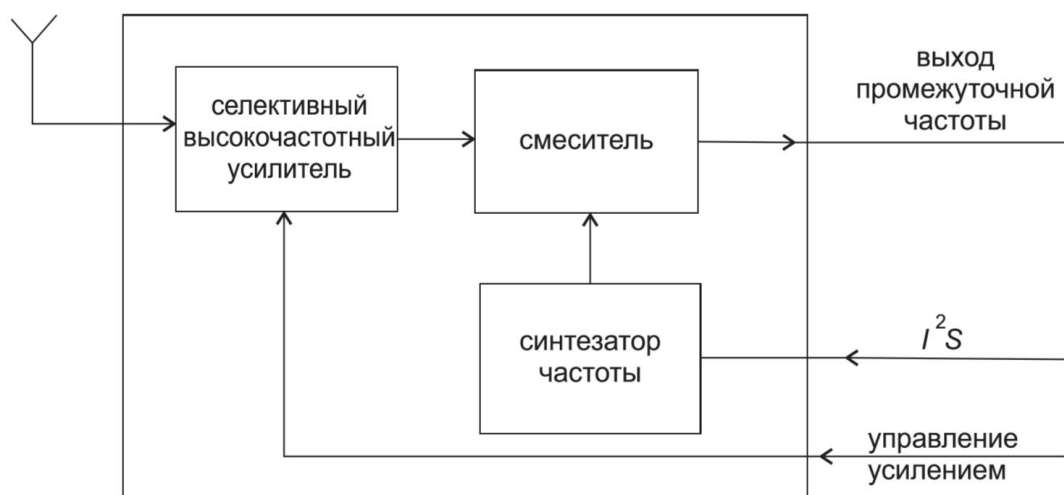


Рисунок 2.10. Принципиальная схема преобразователя частоты

Пройдя фильтр, сигнал идет по 2 направлениям. По 1 направлению сигнал проходит оптический каналный редуктор, который обеспечивает регулировку уровня сигнала в диапазоне не менее 45 дБ. Далее сигнал проходит коммутатор и поступает на усилитель мощности, обеспечивающий усиление 50 дБ. Далее сигнал поступает на выход радиоприемного устройства и далее на вход ячейки Брэгга, которая является основой АОСА.

Проходя по второму направлению, сигнал поступает на полосовой фильтр с диапазоном 30. ..40 МГц. Фильтр подавляет сигнал задней помехи смесителя. Далее сигнал поступает на смеситель. Одновременно сигнал с синтезатора частот, также прошедший через полосовой фильтр, поступает на смеситель.

Сигнал со смесителя поступает на управляемый полосовой фильтр с 2 диапазонами пропускания. Далее сигнал поступает на детектор сигналов. Здесь он детектируется и поступает на коммутатор аудиосигнала. Далее сигнал поступает на усилитель низкой частоты, а затем на громкоговоритель.

АОСА, которая используется в системе, может быть описана общей схемой, показанной на рисунке 1. Фактически эта схема изменена, так как размеры всего устройства не позволяли задействовать оптическую схему без модификаций.

Мы использовали несколько зеркал, чтобы минимизировать размеры АОСА. Ячейка Брэгга была разработана на основе монокристалла диоксида теллура с пьезоэлектрическим преобразователем, выполненным на кристалле ниобата лития. Пьезоэлектрический преобразователь предназначен для возбуждения сдвиговой акустической волны, распространяющейся вдоль оси (1 10). АОСА обеспечивает одновременную обработку полосы частот 10 МГц.

Система позволяет поворачивать полосы 10 МГц как последовательно, так и произвольно. Программное обеспечение, обеспечивающее работу системы, формирует изображения сигналов, существующих в полосе одновременно. Он также позволяет проводить относительные измерения интенсивности демонстрируемых радиоисточников, а также значения частот, которые соответствуют максимуму каждого пика. Программное обеспечение предоставляет базу данных, содержащую известные заранее радиоисточники. Анализ этих источников не является необходимым. Следовательно, система может показывать новые источники, которые появляются и исчезают во время работы системы.

Общий диапазон времени наблюдения 50. ..900 МГц составляет около 5 с, если тактовая частота ноутбука не менее 166 МГц.

Разрешенный частотный интервал системы составляет около 150 кГц, что обеспечивается АОСА, и 25 кГц, обеспечиваемых параллельным электрическим каналом.

Мы провели радионаблюдение за эфиром с использованием представленной системы на основе АОСА и обнаружили, что на основе этой экспериментальной системы может быть разработано промышленное устройство.

2.5.3. Улучшение системы анализа спектра РЧ с использованием АОСА со смешанной пространственно-временной интеграцией

Ни АОСА с временной, ни пространственной интеграцией не являются идеальными для задачи панорамного анализа спектра РЧ. Существующая панорамная система анализа спектра, включающая АОСА с пространственной интеграцией [124], обеспечивает параллельную акустооптическую обработку поддиапазонов 10 МГц и последовательную выборку соседних поддиапазонов с использованием электрических средств. Помимо низкой разрешающей способности по частоте, которая обеспечивается использованием одной ячейки Брэгга для анализа спектра, недостатком этой версии является необходимость объединения параллельного оптического и последовательного электрического способов обработки. Это вызывает ограничения скорости работы; однако эта скорость остается намного больше, чем для чисто электрической системы обработки.

Влияние этих недостатков можно уменьшить, если для акустооптического анализа спектра будет использоваться другая конфигурация корреляции. Эта конфигурация известна как АОСА со смешанной пространственной и временной интеграцией [125]. Структурное представление этой АОСА представлено на рисунке 2.11. В устройстве задействованы четыре равные акустооптические ячейки Брэгга. Первая пара ячеек Брэгга расположена сразу за цилиндрической линзой, которая обеспечивает фокусировку коллимированного светового пучка в своих апертурах.

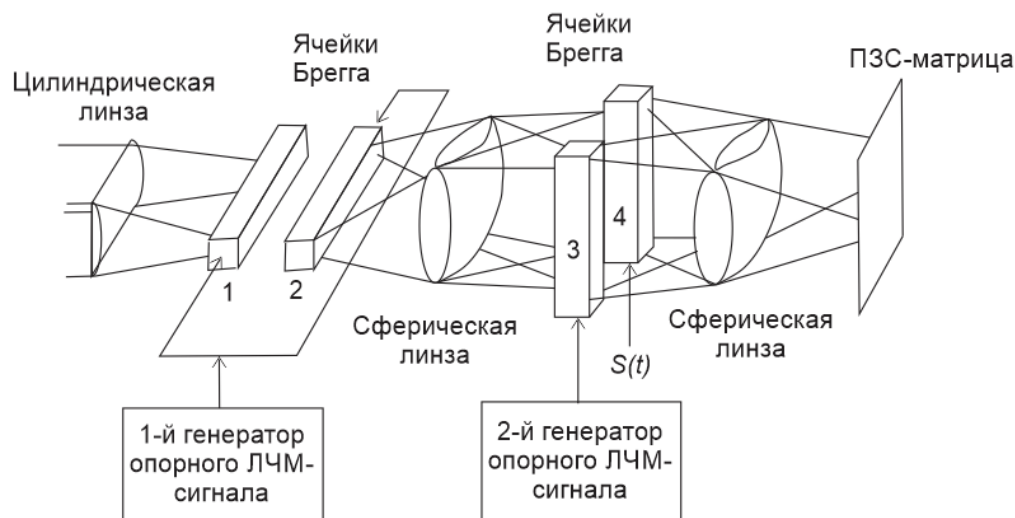


Рисунок 2.11. Оптическая схема АОСА, обеспечивающая анализ спектра сигнала со смешанной временной и пространственной интеграцией.

В устройстве задействованы четыре одинаковые акустооптические ячейки Брэгга. Первая пара ячеек Брэгга расположена сразу за цилиндрической линзой, которая обеспечивает фокусировку коллимированного светового пучка в своих отверстиях. Обе эти ячейки питаются одним и тем же опорным сигналом, но в противоположно-параллельных направлениях. Этот опорный сигнал имеет линейную частотную модуляцию и может быть представлен как

$$s_1 = s_2 = \cos(\omega_1 t + gt^2/2). \quad (2.46)$$

Первая сферическая линза обеспечивает фокусировку 1-го порядка дифракции в апертуре третьей ячейки Брэгга после первой ячейки и, соответственно, первый порядок дифракции после второй ячейки фокусируется в апертуре четвертой ячейки.

Третья ячейка Брэгга также питается опорным ЛЧМ-сигналом с периодом, сопряженным с временной апертурой ячейки. Четвертая ячейка Брэгга передает сигнал для обработки. Благодаря работе этой системы вторая сферическая линза фокусирует в плоскости ПЗС матрицы двумерную картину, соответствующую спектру обработанного сигнала. Вертикальный отсчет соответствует грубому отсчету частоты, тогда как горизонтальный отсчет соответствует точному отсчету частоты.

Расчеты показывают, что вертикальный отсчет обеспечивает работу в режиме обычной АОСА с пространственным интегрированием. В системе радиоэфирного наблюдения режим вертикального отсчета обеспечивает все функции АОСА, используемые в представленной версии системы. Наравне с этим режим горизонтального отсчета обеспечивает все функции, которые выполняются в представленной системе в электронном канале. Необходимо также учитывать, что точное считывание частоты по горизонтальной оси обеспечивает разрешение по частоте, намного лучшее, чем то, которое обеспечивает электронный канал в системе, рассмотренного в предыдущем разделе. Разрешение по частоте грубого считывания частоты определяется временной апертурой ячейки Брэгга, тогда как точное считывание частоты - временем интегрирования ПЗС-матрицы. Оно может быть порядка десятков миллисекунд. Следовательно, в системе можно получить разрешение в десятки Гц.

Однако эта система не лишена недостатков. Ее скорость работы значительно падает по сравнению с АОСА с пространственной интеграцией. Ее другим недостатком является очень сложная оптическая схема, которую необходимо очень строго настраивать. Наши попытки объединить высокую разрешающую способность по частоте, присущую конфигурации коррелятора, показанной на рисунке 2.7, и высокую скорость работы АОСА с пространственной интеграцией и упростить процедуры работы всей системы позволили предложить систему, в которой АОС и АОСА с пространственной интеграцией работают параллельно.

2.5.4. Система анализа спектра СВЧ, объединяющая АОС и АОСА с пространственной интеграцией

Предлагаемая система включает в себя классические варианты АОС с двумя встречно-ориентированными ячейками Брэгга и АОСА на основе одной ячейки Брэгга. Они работают в системе независимо и параллельно обрабатывают

один и тот же сигнал. Общая схематическая схема системы по блокам представлена на рисунке 2.12.

Радиосигнал из эфира принимается антенной, а затем поступает в радиоприемный блок. Этот блок выполняет предварительное усиление и гетеродинирование сигнала. Для дальнейшей обработки сигнал с приемного блока поступает на оба акустооптических устройства параллельно. Спектры, полученные обоими анализаторами, направляются в процессор, где либо один из этих спектров, либо оба передаются на ПК через специальный интерфейс.

Оба акустооптических устройства работают с ячейками Брэгга, изготовленными из монокристаллов диоксида теллура. Пьезоэлектрические преобразователи, изготовленные из монокристаллов ниобата лития, обеспечивают распространение медленной сдвиговой акустической волны в объеме кристалла TeO вдоль оси [110]. Такая конфигурация позволяет получить высокую эффективность дифракции и разрешить около 400 точек на выходе каждой ячейки Брэгга.

Специальное программное обеспечение, разработанное для этой системы, обеспечивает параллельную работу обоих акустооптических устройств. Спектр сигнала просматривается по данным, поступившим от АОСА с пространственным интегрированием в реальном времени. Если при очередном просмотре обнаруживается, что появился какой-либо новый радиоисточник, то АОСА с временным интегрированием начинает анализировать узкую область спектра вокруг частоты, соответствующей этому источнику. В это же время АОСА с интеграцией по пространству выполняет очередной панорамный просмотр. Работа АОСА с интеграцией по времени может быть настроена не только по признаку вновь появившегося радиоисточника, но и по какому-либо другому признаку.

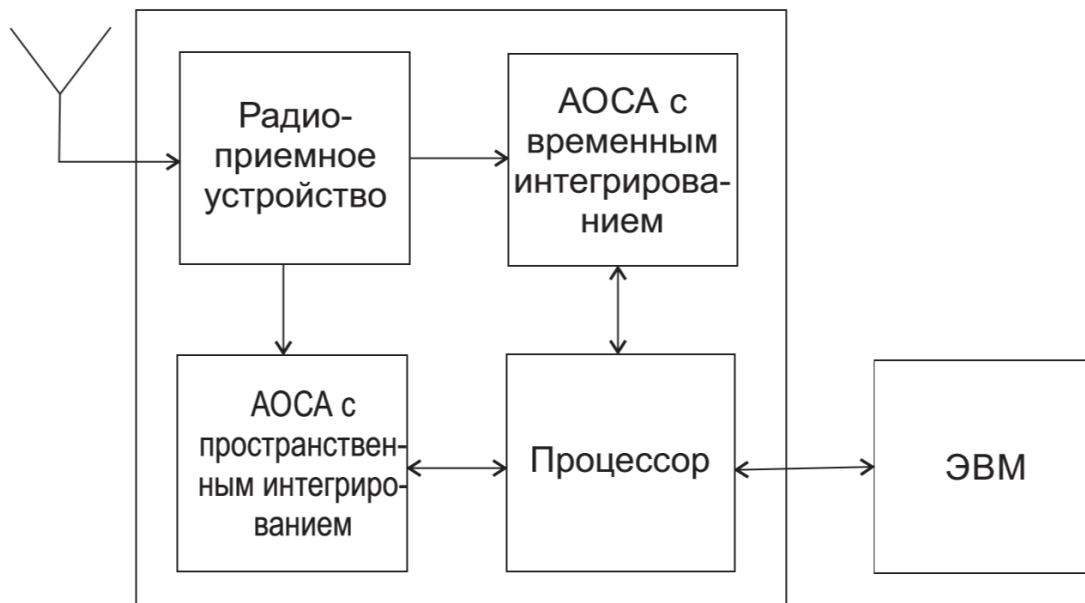


Рисунок 2.12. Схематическое изображение системы анализа спектра радиочастотного сигнала с отдельными АОСА с временной и пространственной интеграцией, работающими параллельно

Если наблюдение и обработка спектра в этой системе выполняются так же, как и в системе, в которой использовался только один АОСА с пространственным интегрированием. с последовательной обработкой поддиапазонов. то та же рабочая полоса, как описано в статье, может быть объединена с разрешающей способностью по частоте 10. ..100 Гц.

Выводы к главе 2

1. Основные источники увеличения времени задержек прохождения информации связаны с работой ПВМС, дефлекторов, используемых при адресации, процессом записи в матрицу голограмм и процессом преобразования восстановленного набора данных или изображения в электрический сигнал на матрице фотодетекторов.

2. Методика записи информации в виде синтезированных Фурье голограмм с требуемыми мультипликацией значительно ускоряет и упрощает процесс ввода информации в голографической системы, а также реализует параллельного записи и считывания нескольких страниц.

3. С целью повышения плотности голографической информации рассмотрены различные методы рентгеновской голографии. Приведены оценки отношения сигнал / шум в голографической информации. Для получения достоверной информации необходимо проделать много измерений.

4. Рассмотренные варианты сравнения АОСА показывают, что наибольшая информационная производительность присуща устройству с комбинацией АОСА с пространственным и временным интегрированием, работающих параллельно. Такая высокая производительность может быть обеспечена, если устройство работает в режиме радиоэфирного наблюдения и анализа. Высокая скорость панорамного наблюдения эфира позволяет находить интересующие пики в наблюдаемом спектре, но эти пики не заполняют спектр полностью, а занимают не более нескольких процентов спектра.

ГЛАВА 3. ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ И АКУСТООПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ВРЕМЕННЫХ И ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ

3.1. Интерферограмма изображений, относящихся к двум различным во времени состояниям объекта

Если голограмму восстанавливают точной копией опорной волны, то результатом восстановления является точная копия объектной волны. Эта восстановленная волна может интерферировать с волной, исходящей от того же или аналогичного объекта, причем форма и пространственная частота интерференционных полос отражают отличия двух объектов. Существует довольно много методов получения таких интерферограмм, однако с точки зрения применения все эти методы сводятся к двум группам:

1. Сравнение двух близких, но различных объектов с целью идентификации и оценки степени различия.
2. Сравнение двух состояний одного и того же объекта в различные моменты времени.

Наиболее распространенным методом получения интерферограмм, изображений, относящихся к двум различным во времени состоянием объекта, является двухэкспозиционная интерферометрия. Если наблюдать за изменением состояния объекта непрерывно, то полученная информация, как правило, оказывается избыточной, не говоря о том, что непрерывное наблюдение требует часто слишком высокой информационной производительности (информационной пропускающей способности) устройства. Часто оказывается достаточным зарегистрировать относительное смещение поверхности, которое осуществляется между двумя моментами времени, чтобы судить о процессе, происходящем с объектом. В этом случае применяется метод, заключающийся в том, что голограмма объекта до своей обработки дважды экспонируется: в исходном состоянии и по истечении некоторого промежутка времени, в течение которого происходит процесс, например, деформации

поверхности. Каждый раз при экспонировании применяется одна и та же опорная волна. При восстановлении дважды экспонированной голограммы автоматически восстанавливается интерферограмма начального и конечного состояний объекта.

Очевидно, что для получения наиболее высокого контраста интерференционных полос необходимо, чтобы интенсивности изображений, восстанавливаемых с голограмм, соответствующих отдельным экспозициям, были бы близки друг к другу. Для этого достаточно, чтобы запись происходила при одинаковых интенсивностях света для каждой экспозиции, при условии работы на линейном участке динамического диапазона регистрирующей среды. В ряде случаев это создает специальные требования к динамическому диапазону среды, которые не применяются в случае сред для записи одиночных голограмм.

Метод дважды экспонированной голограммы оказался весьма удобным для регистрации быстропротекающих процессов [126]. В частности, авторы [126] получили изображение летящей пули путем экспонирования голограммы двумя последовательными вспышками импульсного лазера. При пролете пули через пространство освещаемой камеры с газом в области ударной волны, создаваемой пулей, плотность газа изменяется, и соответственно меняется длина оптического пути света. Когда голограмма после всего цикла обработки освещается волной, аналогичной опорной волне, восстанавливаются обе объектные волны. При этом они интерферируют и образуют полосы, характеризующие изменение плотности газа за время между двумя экспозициями.

3.2. Голографический интерферометр для исследования процессов, изменяющихся во времени

С помощью методов голографической интерферометрии возможно также осуществлять контроль непрерывно протекающих процессов, например, связанных с изменениями диффузно отражающих объектов. Рассматриваемый ниже, предложенный в настоящей работе [97] , метод позволяет реализовать такой контроль при наличии больших смещений и деформаций, а также

наблюдать за фазовыми изменениями прозрачных объектов.

Для реализации данного метода была предложена схема голографического интерферометра, показанная на рисунке 3.1.

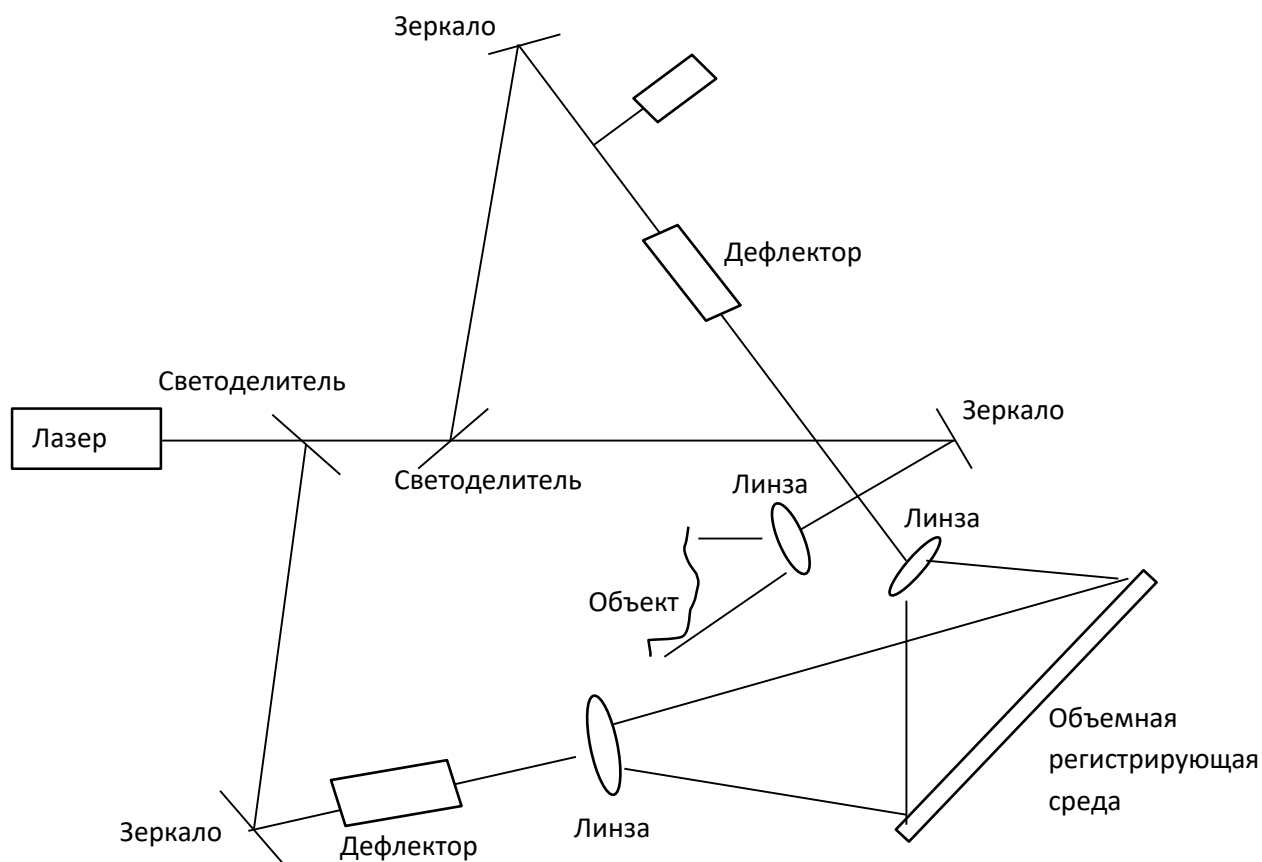


Рисунок 3.1. Оптическая схема голографического интерферометра для исследования процессов, изменяющихся во времени

На схеме, проиллюстрированной рисунком 3.1, свет от лазера проходит через два светоделителя, при этом расщепляясь на один предметный и два опорных пучка. Первый опорный пучок проходит через светоделитель и направляется вниз, отражаясь от зеркала и с помощью дефлектора попадая на регистрирующую среду через расширяющую линзу. Второй опорный пучок направляется вверх через светоделитель. В этом участке дополнительно установлен затвор, который прерывает пучок. После прохождения через расширяющую линзу второй опорный пучок также попадает на регистрирующую среду.

Последовательность записи голограмм на этой схеме следующая. С помощью первого опорного пучка осуществляется регистрация голограммы исходного состояния объекта. Затем объект нагружается, например, термическим способом. По прошествии времени t одновременно записываются две голограммы нагруженного объекта с помощью обоих опорных пучков. Это происходит, когда открывают затвор на пути второго опорного пучка.

Далее через интервал времени $2t$ одновременно записывают две голограммы второго состояния нагруженного объекта, используя оба опорных пучка, причем первый опорный пучок при этом отклоняется на угол α , обеспечивающий рассогласование между регистрируемыми голограммами. Через интервал времени $3t$ происходит одновременная запись третьего состояния нагруженного объекта, причем первый опорный пучок остается отклоненным на угол α , а второй опорный пучок также отклоняется на тот же угол. Через время $4t$ фиксируются две голограммы четвертого состояния нагруженного объекта. При этом второй опорный пучок остается отклоненным на угол α , в то время как первый опорный пучок отклоняется на угол 2α . В свою очередь, через интервал времени $5t$ происходит одновременная запись двух голограмм нагруженного объекта в пятом состоянии, когда первый опорный пучок остается отклоненным на угол 2α , а второй опорный пучок также отклоняют на угол 2α .

Описанная процедура может продолжаться дальше, и на регистрирующей среде будут записываться голограммы нагруженного объекта в последующих состояниях. Таким образом, для того, чтобы записать голограмму n -го состояния нагруженного объекта, необходимо:

- - если n - четное число, то первый опорный пучок должен быть отклонен на угол $n \alpha / 2$, а второй опорный пучок отклоняется на угол $(n - 2) \alpha / 2$;
- - если n нечетное число, то оба опорных пучка отклоняются на угол $(n - 1) \alpha / 2$.

В результате ряда последовательных записей голограмм с регистрирующей среды может быть восстановлена серия двухэкспозиционных интерферограмм. Это происходит следующим образом.

Освещение всех записанных голограмм первым опорным пучком в исходном направлении восстанавливает изображения ненагруженного объекта и нагруженного объекта в первом состоянии. При этом, соответственно, восстанавливается двухэкспозиционная интерферограмма двух этих состояний.

Освещение регистрирующей среды с записанными на ней голограммами вторым опорным пучком в первоначальном направлении восстанавливает изображения нагруженного объекта в первом и втором состояниях. При этом образуется соответствующая двухэкспозиционная интерферограмма.

Освещение всех наложенных на регистрирующей среде голограмм первым опорным пучком, отклоненным на угол α , приводит к восстановлению изображений нагруженного объекта во втором и третьем состояниях, что влечет за собой формирование двухэкспозиционной интерферограммы этих состояний.

Таким образом, освещая регистрирующую среду с записанными на ней голограммами поочередно первым и вторым опорными пучками, каждый раз отклоняя их на угол, кратный α , можно получить интерферограммы всех n пар последовательных состояний нагруженного объекта. Обобщая данные, полученные из всех поочередных двухэкспозиционных интерферограмм, можно получить достаточно полное представление о протекании процесса, связанного с воздействием нагрузки на объект.

Угол между предметным и двумя опорными пучками, кратность угла отклонения опорных пучков α , а также максимальное количество голограмм, которые можно зарегистрировать в среде, зависят от толщины регистрирующей среды и её динамического диапазона. Интервал времени t , определяющий промежуток между фиксируемыми состояниями нагруженного объекта, зависит от скорости протекания процесса реакции объекта на нагрузку и от величины деформаций и фазовых изменений объекта. Для реализации описанной схемы могут использоваться как лазеры непрерывного излучения, так и импульсные лазеры. В последнем случае скорость протекания процесса в объекте должна быть такова, что частота следования импульсов лазера могла бы быть синхронизирована с требуемым промежутком времени между регистрируемыми

состояниями.

Таким образом, использование описанного выше способа реализации процедуры голографической интерферометрии позволяет получать данные о протекающих процессах по серии двухэкспозиционных интерферограмм в отличие от известных способов (см., например, [127]), где данные получают лишь из одной интерферограммы. В результате существенно возрастает объем получаемой информации. Это достоинство позволяет особенно эффективно использовать данный способ при голографических исследованиях быстропротекающих процессов.

3.3. Метод голографической интерферометрии для регистрации процесса изменения диффузно отражающих объектов

Исследование быстропротекающих процессов с помощью метода голографической интерферометрии часто связано с необходимостью получать информацию о сравнительно больших перемещениях, либо фазовых изменениях, происходящих за малые промежутки времени, сравнимые с длительностью импульса лазерного излучения. Такое требование может быть удовлетворено с помощью метода получения наложенных голографических интерферограмм, изложенного ниже [128-132].

Предлагаемый метод иллюстрируется оптической схемой, изображенной на рисунке 3.2. Устройство содержит импульсный лазер 1 и светоделители 2 и 3, разделяющие световой пучок на предметный и два опорных; предметный пучок направляется прямо, а опорные - по обе стороны от направления предметного пучка в плоскости рисунка. На пути первого опорного пучка установлена оптическая линия задержки, состоящая из зеркала 4 и полупрозрачного зеркала 5. Они расположены параллельно друг другу на расстоянии d и образуют угол γ с направлением первого опорного пучка. Далее по ходу первого опорного пучка расположены зеркало 6, ориентированное по отношению к нему под углом β , а также полупрозрачное зеркало 7, параллельное зеркалу 6 и находящееся на

расстоянии $d \sin \theta \sin \beta$ от него.

Далее по ходу первого опорного пучка установлены экран 8 с отверстиями, линейка гололинз 9 и регистрирующая среда 10. На пути второго опорного пучка также расположена оптическая линия задержки, образованная из зеркала 16 и полупрозрачного зеркала 17, расположенные параллельно друг другу на расстоянии d под углом θ относительно хода опорного пучка, зеркало 18, расположенное под углом θ относительно опорного пучка, полупрозрачное зеркало 19, параллельное зеркалу 18 и отстоящее от него на расстоянии

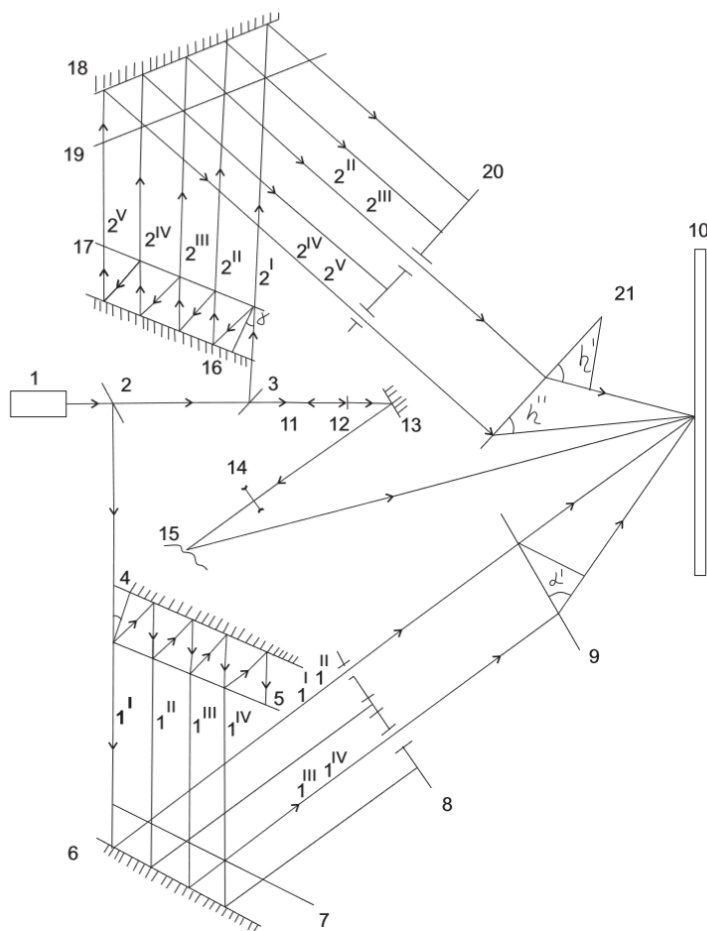


Рисунок 3.2. Оптическая схема устройства для получения наложенных голографических интерферограмм

$d/\sin \theta \sin \theta$, экран с отверстиями 20, а также линейка гололинз 21. При этом оптическая длина пути от светоделителя 3 до зеркала 12 равна оптической длине

пути от светоделителя 3 до полупрозрачного зеркала 12, расположенного по ходу предметного пучка.

По ходу предметного пучка расположены оптическая линия задержки, образованная полупрозрачными зеркалами 11 и 12, которые расположены параллельно друг другу на расстоянии $d \sin \gamma$. При этом длина оптического пути от светоделителя 2 до зеркала 5 равна длине оптического пути от светоделителя 2 до зеркала 12. Далее по ходу предметного пучка располагаются зеркало 13, линза 14 и объект 15.

Работа устройства осуществляется следующим образом. Первый опорный пучок 1^1 , прошедший через полупрозрачное зеркало 5, направляется на регистрирующую среду 10 с помощью зеркала 6, по дороге расширяясь под действием гололинзы 9. В то же время предметный пучок, прошедший через полупрозрачные линзы 11 и 12, зеркалом 13 направляется на объект 15, расширяясь с помощью линзы 14. Отраженные от объекта волны попадают на регистрирующую среду 10.

Второй опорный пучок 2^1 , прошедший через полупрозрачное зеркало 17 и отраженный от зеркала 18, перекрывается экраном 20. При этом оптические длины пути опорных пучков 1^1 и 2^1 до регистрирующей среды равны.

Далее осуществляется изменение объекта, например, термическим способом. Через интервал времени $t = (d/c) \cos \gamma$, где c - скорость света, одновременно записывают две голограммы нагруженного объекта в первом состоянии с помощью первого 1^{11} и второго 2^{11} опорных пучков. Пучок 1^{11} представляет собой часть пучка 1^1 , отраженную полупрозрачным зеркалом 5 и задержанную оптической линией задержки на время, равное $(d/c) \cos \gamma$. Он распространяется в направлении, параллельном направлению распространения пучка 1^1 . Пучок же 2^{11} представляет собой часть пучка 2^1 , выделенную оптической линией задержки в плече второго опорного пучка и задержанную ей на время, равное $2d/\cos \gamma$. При этом предметный пучок с помощью оптической линии задержки, образованной полупрозрачными зеркалами 11 и 12, задерживается на такое же время.

Можно сформулировать требования к длине когерентности лазерного пучка, которые бы обеспечили запись голограмм объекта в первом нагруженном состоянии. Для записи с первым опорным пучком это требование можно записать как

$$L_{\text{coh.las.}} \geq |2d \sin \gamma (\tan \gamma + 2/\sin \beta - \tan \beta)|, \quad (3.1)$$

а для записи голограммы первого нагруженного состояния со вторым опорным пучком

$$L_{\text{coh.las.}} \geq |2d \sin \gamma (\tan \gamma + 2/\sin \beta - \tan \beta \cos \eta_1)|, \quad (3.2)$$

где $L_{\text{coh.las.}}$ - длина когерентности лазерного пучка, а η_1 - угол отклонения опорного пучка первой гололинзой.

Выражения (3.1) и (3.2) описывают разность оптического хода лучей между предметным и опорными пучками I^{11} и 2^{11} , соответственно. Если исходить из того, что предметный пучок проходит такой же оптический путь, как и опорные пучки 1^1 и 2^1 , то вышеприведенные выражения могут быть получены путем сравнения оптической длины пучков I^{11} , 2^{11} с оптической длиной пучков 1^1 , 2^1 , соответственно. Из рисунка 2.3 можно определить разность длины оптического пути опорных пучков света 1^1 и 1^{11} , которая оказывается равной

$$\Delta = EW + OD + AO = 2d \sin \gamma \tan \gamma + AO - DP + AO = 2d \sin \gamma \tan \gamma + 2AO + AP \sin \beta = 2d \sin \gamma (\tan \gamma - \tan \beta + 2/\sin 2\beta). \quad (3.3)$$

Аналогичным образом можно получить соотношение для разности оптического хода опорных пучков из другого плеча. Последний член в выражении (3.2) описывает разность оптического хода, приобретенную опорным пучком 2^{11} после прохождения гололинзы.

Через интервал времени $t = 2dc \cos \gamma$ записывают две голограммы нагруженного объекта во втором состоянии с помощью двух опорных пучков 1^{111} и 2^{111} . Часть пучка 1^{11} отражается от полупрозрачного зеркала 5 и, задерживаясь

оптической линией задержки, превращается в пучок 1^{111} . Аналогичным образом образуется и пучок 2^{111} . Эти опорные пучки попадают на регистрирующую среду, отражаясь от зеркал 6 и 18, соответственно. Гололинзы 9 и 21 расширяют опорные пучки и отклоняют их на углы α_1 и η_1 соответственно

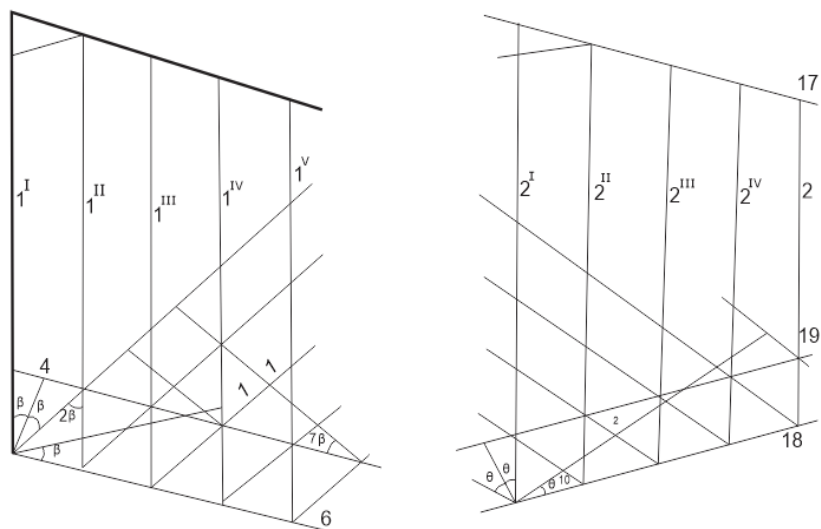


Рис. 3.3. К вычислению разности оптического пути опорных пучков в первом (а) и втором (б) плечах распространения опорных пучков

Далее, снова через интервал времени $t = 2dc \cos \gamma$ записывают две голограммы нагруженного объекта в третьем состоянии. Это осуществляется с помощью опорных пучков 1^{IV} и 2^{IV} , которые образуются так же, как и предыдущие пучки 1^{111} и 2^{111} , проходя через соответствующие оптические линии задержки. Гололинзы 9 и 21 расширяют опорные пучки и отклоняют их на углы α_2 и η_2 .

Для регистрации голограмм нагруженного объекта в третьем состоянии требования к длине когерентности лазерного излучения могут быть представлены как

$$L_{\text{coh.las.}} \geq |2d \sin \gamma (3 \tan \gamma + 4 / \sin 2\beta - \tan \beta - 2 \cos \alpha_2)|, \quad (3.6)$$

$$L_{\text{coh.las.}} \geq |2d \sin \gamma (3 \tan \gamma + 4 / \sin 2\theta - \tan \theta - 2 \cos \eta_2)|. \quad (3.7)$$

Оптическая линия задержки в предметном пучке обеспечивает освещение предмета через интервал времени $t = 2(d/c)\cos \gamma$.

Из приведенных выше формул можно вывести требования, предъявляемые к длине когерентности лазерного излучения для случая регистрации голограмм нагруженного объекта в n -ом состоянии. Длина когерентности для нечетных n определяется соотношениями

$$L_{coh.las.} \geq |(n - 1)2d \sin(\gamma/2)(\tan \gamma - 2 \cos \alpha_{n-1})|, \quad (3.8)$$

$$L_{coh.las.} \geq |(n - 1)2d \sin \gamma (\tan \gamma - 2 \cos \eta_{(n-1)/2})|. \quad (3.9)$$

Для четных n можно записать

$$L_{coh.las.} \geq \left| 2d \sin \gamma \left\{ [(n - 1)/2] \tan \gamma - (n - 2) \cos \frac{\alpha_{n-2}}{2} (2/\sin 2\beta) - \tan \beta \right\} \right| \quad (3.10)$$

$$L_{coh.las.} \geq \left| 2d \sin \gamma [(n - 1) \tan \gamma \cos \eta_{n/2} + (2/\sin 2\theta) - \tan \theta] \right| \quad (3.11)$$

Освещая записанные голограммы в соответствующем направлении, можно получить необходимую голографическую интерферограмму.

Интервал времени между экспозициями зависит от разности хода опорного и предметного пучков. Из формул (3.8) - (3.11) можно определить

$$(\Delta t)_{max} = (\Delta S)_{max}/c, \quad (3.12)$$

где $(\Delta S)_{max}$ - максимальное абсолютное значение разности хода. Эта величина различна для различных n , и может быть определена для двух плеч опорных пучков следующим образом. Если n четное, то

$$\Delta S_{1n}=2d \sin \gamma \left[(n - 1) \tan \gamma - (n - 2) \cos \frac{\alpha_{n-2}}{2} (2 / \sin 2\theta) - \tan \beta \right] \quad (3.13)$$

$$\Delta S_{2n}=2d \sin \gamma \left[(n - 1) \tan \gamma - n \cos \frac{\eta_n}{2} (1 / \sin 2\theta) - \tan \theta \right] \quad (3.14)$$

Если же n — нечетное число, то

$$\Delta S_{1n}=(n-1)2d \sin \gamma (\tan \gamma - \cos \alpha_{n-1}) \quad (3.15)$$

$$\Delta S_{2n}=(n-1)2d \sin \gamma (\tan \gamma - \cos \eta_{(n-1)/2}). \quad (3.16)$$

Интервал времени между экспозициями можно определить из соотношения

$$t = 2d/c \cos \gamma - (\Delta t)_{max}. \quad (3.17)$$

Чтобы наложенные голограммы записались отдельно во времени, соотношение временных параметров схемы записи и длительности

записывающего лазерного импульса должно удовлетворять условию

$$2d/c \cos \gamma - (\Delta t)_{max} > \tau > (\Delta t)_{max} \quad (3.18)$$

где τ - длительность импульса излучения лазера. Расстояния между соседними диафрагмами на экране и гололинзами на линейке гололинз равны и не превышают диаметра лазерного пучка $a_{coh.las.}$, т.е.

$$4d \sin \gamma > a_{coh.las} \quad (3.19)$$

отсюда может быть получено условие, накладываемое на угол γ

$$\gamma \geq \arcsin(a_{coh.las.}/4d). \quad (3.20)$$

Таким образом, быстродействие рассматриваемого устройства зависит от длительности лазерного импульса и определяется формулами (3.17), (3.18).

3.4. Интерференционный и корреляционный методы исследования объектов

Записывая различные состояния объекта в фазовых объемных регистрирующих средах с помощью двух опорных пучков, появляется возможность одновременно наблюдать изменения в объектах интерференционными и корреляционными методами.

Положим, что значения амплитуд объектной и опорной волн в среде записи объемных голограмм равны

$$\begin{aligned} u_0(\mathbf{p}) &= \sum a_i \exp(j\mathbf{k}_{0i} \cdot \mathbf{p}), \\ u_1(\mathbf{p}) &= A \exp(j\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{p}), \end{aligned} \quad (3.21)$$

где \mathbf{p} - радиус-вектор, \mathbf{k}_{0i} и \mathbf{k}_i , волновые векторы волн каждого пиксела объекта и опорной волны. Их длина $2\pi/\lambda$, где $\lambda = \lambda_0/n$ - длина волны в среде (λ_0 - длина волны в воздухе, n - среднее значение показателя преломления в среде).

Распределение интенсивностей интерференционной картины, возникшей в среде определится

$$I(\mathbf{p}) = |\sum u_{0i} + u_r|^2 = (\sum u_{0i} + u_r)(\sum u_{0i}^* + u_r^*) = \sum a_i^2 + \sum \sum a_{ij} \exp[j(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_j) \cdot \mathbf{p}] + A^2 + A \sum a_i \exp[j(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_{0i}) \cdot \mathbf{p}] + A \sum a_i \exp[-j(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_{0i}) \cdot \mathbf{p}]. \quad (3.22)$$

Эффективные векторы \mathbf{K}_i полос, возникающих от наибольшего действия света в среде определится разностью векторов \mathbf{k}_r и \mathbf{k}_{0i} ;

$$\mathbf{K}_i = \mathbf{k}_r - \mathbf{k}_{0i} \quad (3.23)$$

имеют направление вектора нормали к полосам, а его длина связана с периодом полос d соотношением

$$\mathbf{K}_i = 2\pi/d_i \quad (3.24)$$

Для величины d , имеем

$$d_i = \lambda/2 \sin \theta_i/2, \quad (3.25)$$

где θ_i - угол между векторами опорной волны и объектных волн от различных пикселей.

Разность векторов $\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_j$ по сравнению с векторами \mathbf{K}_i будут малы и поэтому они не будут, за редким исключением, влиять на дифракцию от объемных голограмм. При этом можно первые два члена в правой части выражения (3.25) с достаточной степенью точности заменить на $(\sum a_i)^2$.

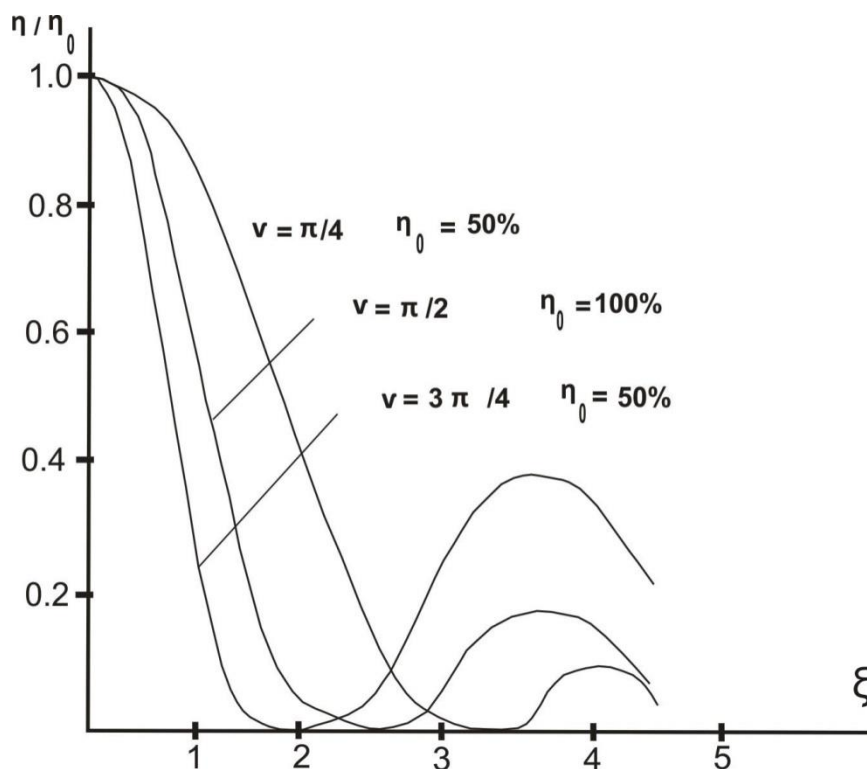


Рисунок 3.4. Зависимость η/η_0 от ξ для различных значений параметров

Оценим величину дифракционной эффективности η , характеризующей дифрагированную волну, исходящую из фазовой голограммы на пропускание [133]. На рисунке 3.4 представлена зависимость относительной эффективности η/η_0 где η_0 - эффективность, получаемая при падении освещающего пучка под углом Брэгга, от величины пропорциональной угловому отклонению ξ от угла Брэгга ($\xi = \delta L \sin \theta_0 2\pi/\lambda$). Здесь имеется в виду, что углы между векторами от пиксела объектной волны и от опорной волны и плоскостями решеток равны). На рисунке приведены кривые для трех значений $\nu = \pi L/\lambda \cos \theta_0$: $\nu = \pi/2$, $\nu = \pi/4$, $\nu = 3\pi/4$. Для первого значения $\eta_0 = 100\%$, для второго и третьего - $\eta_0 = 50\%$. По указанным кривым можно определить уменьшение дифракционной эффективности вплоть до нулевой как в зависимости от отклонения угла падения от угла Брэгга, так и в зависимости от изменения длины волны.

При восстановлении волнового фронта с объемной голограммы, записанной пучками (1) опорная волна, посланная под тем же углом, с вектором k_r , что и при записи будет в соответствии с приведенными условиями полностью

или частично отражаться на плоскостях решетки, созданных взаимодействием опорной волны с волнами каждого пиксела. При $\eta_0 = 100\%$ все пучки уйдут в направлении в котором шли от пикселов записываемого объекта, и в направлении определяемом вектором k_r , свет будет отсутствовать. При $\eta_0 < 100\%$ часть света помимо дифрагированного и рассеянного выйдет из голограммы продолжением опорного пучка и таким образом за голограммой будет восстановлено начальное (при записи) изображение объекта и изображение опорного пучка.

Регулируя в небольших пределах наклон восстанавливающего опорного пучка со смещением относительно угла Брэгга можно устанавливать определенные соотношения между интенсивностями дифрагированной и прямо проходящей частями пучка, в том числе и такое, при котором эти интенсивности будут равны.

При освещении голограммы объектным пучком с тем же набором волновых векторов k_{oi} , ($i = 1, 2, \dots, N$) весь (при $\eta_0 = 100\%$) или часть света (при $\eta_0 < 100\%$) дифрагирует таким образом, что восстанавливает волну с вектором k_r (опорный пучок). Другая часть света идет без изменения направления и попадает туда же, куда шла дифрагированная волна при освещении голограммы опорным пучком.. В случае, когда $\eta_0 < 100\%$ при восстановлении двумя пучками в обоих направлениях происходит наложение дифрагированных и проходящих волн. Наличие рассеяния и различных искажений приводит к различию картин в этих двух случаях.

Если фазовый объектный восстанавливающий пучок не изменяя своего направления частично изменяет распределение фаз, рассмотренная выше картина претерпит изменения за счет прошедшей и дифрагированной измененной объектной волны. Прошедшая часть в направлении I сложится с дифрагированной неизменной опорной волной и даст интерференционную картину, образованную начальным и конечным состояниями объекта. Более сложным образом образуется картина в направлении II, характеризующем корреляцию между начальным и конечным состоянием объекта.

При освещении объемной голограммы одновременно неизменным опорным и измененным объектным фазовым пучками в направлении I интерференционная картина создается двумя волнами, которые дадут распределение интенсивности

$$I(x,y) = C^2 + D^2 + 2CD \cos[\Delta\varphi(x,y)], \quad (3.26)$$

где C и D - амплитуды каждой из идущих в этом направлении волн.

Изменения $\Delta\varphi$ разные для разных пикселей при изменении объекта могут изменяться и во времени. Для пикселя (x_1, y_1) изменение $\Delta\varphi$ во времени от $\Delta\varphi_1$ до $\Delta\varphi_2$ приведет к изменению интенсивности

$$I_2 - I_1 = 2CD(\cos \Delta\varphi_2 - \cos \Delta\varphi_1) = 4CD \sin(\Delta\varphi_2/2 + \Delta\varphi_1/2) \sin(\Delta\varphi_2/2 - \Delta\varphi_1/2) \quad (3.27)$$

При малом различии в разности фаз $\Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1 = \delta\varphi \sin(\Delta\varphi_2/2 - \Delta\varphi_1/2) \approx \delta\varphi/2$, а $\sin(\Delta\varphi_2/2 + \Delta\varphi_1/2) \approx \sin \Delta\varphi$. В этом случае

$$I_2 - I_1 = (I_2 - I_1)_{\max} \delta\varphi \sin \Delta\varphi / 2. \quad (3.28)$$

Можно определить различимую разность фаз $\delta\varphi_{thr}$. Она равна

$$\delta\varphi_{thr} = k/2\psi \sin \Delta\varphi, \quad (3.29)$$

где ψ - отношение сигнал/шум и $(I_2 - I_1)_{\max} / (I_2 - I_1)_{thr} = \psi / k$.

Поскольку дифракционная эффективность фазовой объемной голограммы велика, то величина $(I_2 - I_1)_{\max}$ и различимость изменения фаз при работе с такой голограммой оказывается существенно выше.

При рассмотрении картины, формируемой в направлении II можно отметить, что в фурье плоскости прошедшая через голограмму (и не дифрагированная) опорная плоская волна собирается в точку (с точностью до

дифракционного размытия). В эту же точку собираются дифрагированные волны от пикселей, разность фаз между начальным и конечным состоянием в которых либо равна нулю либо кратна 2π . От остальных пикселей волны либо рассеются, либо при малом смещении фаз создадут ослабленный фон в окрестностях точки. Таким образом, оценивая интенсивность в пике и распределения света в фоне, можно сделать заключение о степени расхождения между начальным и конечным распределении фаз в объекте.

Таким образом, можно заметить, что, используя в приборе, являющемся одновременно голографическим интерферометром реального времени и коррелометром [133], среды для записи объемных голограмм, можно получить более высокую точность в выходных данных, чем при использовании сред для записи плоских голограмм.

3.5. Чувствительность спектрального прибора на основе акустооптического перестраиваемого фильтра

Возможности передачи максимального количества информации для спектральных приборов на основе акустооптического перестраиваемого фильтра (АОПФ) определяются не только селективностью АОПФ и, соответственно, общим количеством выделенных спектральных интервалов, но и пороговой чувствительностью прибора. В этом разделе проведена необходимая оценка чувствительности светочувствительных компонентов, необходимых для обеспечения работы прибора с заданной селективностью [134]. Описаны также экспериментальные исследования специально разработанного спектрального прибора, содержащего АОПФ в качестве компонента монохроматора. Специально разработанный для этой цели АОПФ обеспечивает выбор спектральных интервалов с полосой пропускания несколько нм в зависимости от его места в общем спектральном диапазоне. Обсуждены также информационные характеристики таких спектральных приборов.

Акустооптические перестраиваемые фильтры (АОПФ) являются весьма удобными компонентами, обеспечивающими выбор узкой спектральной полосы света с заданной длиной волны из пучка белого света. Их основными преимуществами являются отсутствие механически движущихся частей, высокая скорость работы и возможность управления с помощью программного обеспечения. Более того, ширина полосы пропускания их выходного светового луча также может управляться соответствующим программным обеспечением.

Таким образом, АОПФ являются очень привлекательными компонентами для использования в различных спектральных приборах.

Спектральная селективность прибора по длине волны света обычно является основным параметром, по которому сравниваются эти приборы. Действительно, этот фактор в основном определяет объем информации, обрабатываемой и передаваемой устройством. Однако, если мы попытаемся решить задачу оптимизации информации спектрального прибора, то возникнут два вопроса:

1. По какому критерию должна быть найдена селективность спектрального прибора?

2. Является ли селективность единственной спектральной характеристикой прибора, определяющей объем информации, обрабатываемой устройством?

Проблемы, связанные с 1-м вопросом, ранее рассматривались применительно к устройствам на основе АОПФ [135,136]. Мы нашли информационный критерий спектральной селективности АОПФ, согласно которому две длины волн разрешаются, если их можно различить с вероятностью, заданной заранее, как того требует задача. Мы также разработали способ измерения селективности АОПФ по этому критерию [136].

Что касается второго вопроса, то на него можно ответить правильно, если рассмотреть передачу и потери информации в спектральных устройствах, в которых АОПФ являются основным компонентом.

3.5.1. Информационная структура спектральных устройств на основе АОПФ

Изучение передачи информации в спектральных устройствах на основе АОПФ целесообразно проводить с использованием метода, разработанного для телевизионных передающих устройств [137] и примененного в дальнейшем для многих оптических и оптоэлектронных систем.

Общая схема простого спектрального прибора, содержащего АОПФ, представлена на рисунке 3.5. Она включает в себя такие компоненты, как входная оптическая схема, АОПФ, выходная оптическая схема и светочувствительное устройство. Эти компоненты обозначают основной способ передачи информации через прибор. Наравне с этим в работе прибора участвует служебная информация, которая поступает в прибор от электрического блока управления.

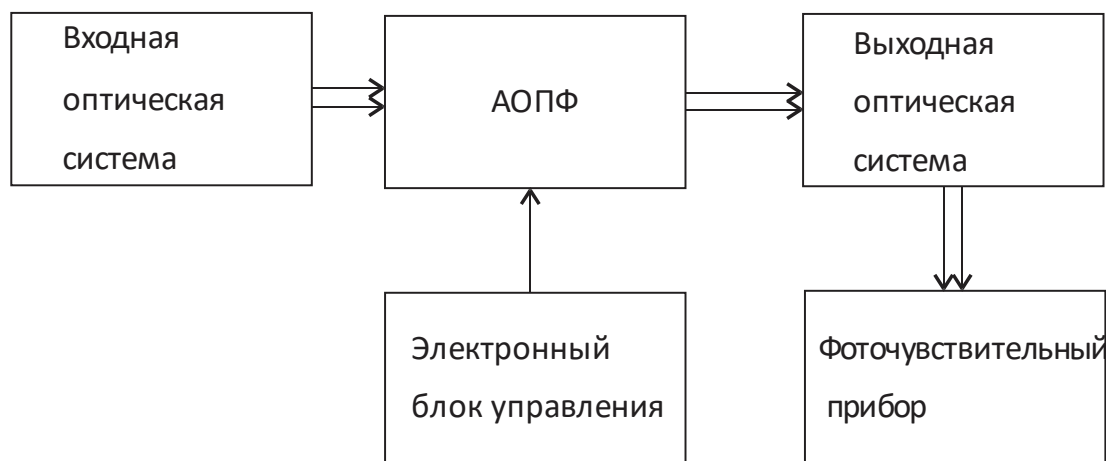


Рисунок 3.5. Упрощенная общая схема спектрального прибора на основе АОПФ.

Указанный подход к изучению передачи информации связан с представлением всего устройства как последовательности связей, каждая из

которых соответствует определенному физическому преобразованию сигнала. Поскольку он был разработан для различных оптических систем, например, для голографических запоминающих устройств [138], то такие параметры, как входное и выходное значение сигнала S_{i-1} и S_i , входное и выходное отношение сигнал/шум Ψ_{i-1} и Ψ_i , коэффициент усиления α_i и изменение отношения сигнал/шум ξ_i могут быть назначены для каждой связи, как показано на рисунке 3.6.

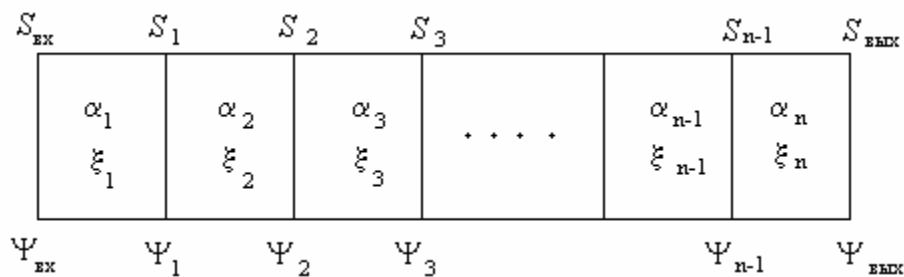


Рисунок 3.6. Последовательность связей оптической системы типа спектрального прибора на основе АОПФ.

Мы исходим из того, что входная информация распределена по спектру падающего света и изменяется во времени. Первое звено связано с обработкой информации линзой. Интенсивность света светящегося объекта представляет собой входной сигнал линзового звена, тогда как интенсивность света на изображении – выходной сигнал. Это звено имеет отличительную особенность, согласно которой мощность света существенно падает при переходе от объекта к изображению. Это связано в основном с ограничениями светового пучка зрачками объективов и, что менее важно, с поглощением и отражением света в линзах. Передача сигнала и шума линзовым звеном рассматривалась ранее [137], и было показано, что если входной сигнал звена не содержит других шумов, кроме тех, которые определяются нормальным распределением квантов света, то

$$\xi_l = (\gamma^{1/2}/2)(D/d), \quad (3.29)$$

где γ — коэффициент пропускания объектива, d — расстояние между объектом и плоскостью входной линзы, а D — диаметр входного зрачка. Легко

подсчитать, что если мы потеряем 2 порядка мощности света, то отношение сигнал/шум в этом звене упадет на один порядок.

Следующее звено обеспечивает преобразование сигнала путем акустооптического взаимодействия. Поскольку шумы добавляются геометрически, то можно предположить, что шум на выходе этого звена можно представить как

$$N_2 = \{[\delta\lambda/\Delta\lambda]\Phi(\lambda)\eta + N_{ao}^2 + (\gamma/4)(D/d)^2\}^{1/2}, \quad (3.30)$$

где $\delta\lambda$ — селективность устройства, $\Delta\lambda$ — спектральный диапазон, содержащийся во входном световом пучке, $\Phi(\lambda)$ — спектральное распределение интенсивности света, η — дифракционная эффективность ячейки Брэгга, а N_{ao} — шум, переносимый акустической волной, умноженный на фактор акустооптического взаимодействия [139], который определяется фотоупругими константами активного кристалла ячейки Брэгга. Обратите внимание, что

$\delta\lambda$ зависит от λ . Самый важный вклад в N_{ao} вносят шум Джонсона и дробовой шум, поступающий от входной электрической цепи, в которой был сформирован управляющий сигнал. Поскольку коэффициент передачи сигнала этого звена также известен, несложно вычислить коэффициент ξ_2 .

Третье звено снова обеспечивает преобразование линзы. Следовательно, оно описывается как для 1-го звена. В свою очередь, последнее звено (преобразование света в электрический сигнал с использованием ПЗС или фотодиодной матрицы) следует рассматривать как следствие звеньев, обеспечивающих фотоактивное поглощение, накопление заряда и считывание. Поглощающее звено действует как диафрагма с фактором, равным квантовой эффективности. Оно создает шум, присущий диафрагменному звену [137]. Особенностью, присущей АОПФ, и не важной для других акустооптических устройств, является спектральная чувствительность, которая пропорциональна

$$R_\lambda = S_{эфф} e\eta / h\nu, \quad (3.31)$$

где $S_{эфф}$ — активная площадь ячейки ПЗС-матрицы, а η — квантовая эффективность.

Шум в звене поглощения определяется статистикой фотогенерации носителей заряда. На этапе накопления структуру ПЗС-матрицы можно рассматривать как набор RC-цепей, а шум формируется процессом зарядки эквивалентного конденсатора через эквивалентный резистор. Среднеквадратичное отклонение напряжения (которое описывает величину шума) составляет [140]

$$V(t)^2 = (k T/C) [1 - \exp(-2t/RC)], \quad (3.32)$$

т. е. этот шум близок к чистому шуму Джонсона. Двумя другими источниками шума на этом этапе являются токи утечки и статистика объемных и поверхностных ловушек. Анализ звена считывания показывает, что шум здесь пренебрежимо мал по сравнению с шумом предыдущих звеньев.

3.5.2. Передача информации в АОПФ обработки изображений

АОПФ может использоваться как для изучения пространственно однородного спектрального состава пучка, так и для анализа такового для оптических лучей, несущих изображения. Второй случай включает в себя многие проблемы многоспектральной и гиперспектральной обработки изображений [141,142]. Очевидно, что требования к чувствительности в этом случае жестче, чем при анализе не визуализирующего пучка. Визуализирующий АОПФ должен передавать гораздо больше информации, а отношение сигнал/шум должно рассчитываться для каждого уровня серой шкалы каждого пикселя изображения.

Информация, передаваемая АОПФ, одновременно состоит из двух частей. Большую (обычно) часть можно оценить как

$$I_{im\lambda} = N \log_2(m + 1) \quad (3.33)$$

где N - число независимых элементов в передаваемом изображении, а m - число уровней серой шкалы выше нуля в каждом элементе. Другая часть

информации содержит значение λ или набор длин волн, для которых изображение выбрано АОПФ. Более простой случай включает передачу определенного диапазона длин волн. Это означает, что общая полоса пропускания $\Delta\lambda$ делится на N_λ частей; $N_\lambda = \Delta\lambda/\delta\lambda$, где $\delta\lambda$ описывает спектральную селективность устройства. Если устройство выполняет многоспектральную или гиперспектральную обработку изображений, то значения 1 или 0 назначаются для каждого интервала $\delta\lambda$. Следовательно, мы добавляем

$$I_{sp} = N_\lambda, \quad (3.34)$$

к общему объему переданной информации. Однако может иметь место и более сложный случай. Как правило, некоторые спектральные компоненты могут передаваться АОПФ с разными весами. Это означает, что светочувствительная матрица должна распознавать некоторые уровни серой шкалы в дополнение к тем, которые содержатся в исходном изображении. Следовательно, количество спектральной информации в этом случае описывается выражением

$$I_{sp} = N \lambda \log_2(m_\lambda + 1), \quad (3.35)$$

где m_λ может зависеть от λ из-за спектральной зависимости градационной чувствительности светочувствительной матрицы.

Далее рассмотрим два крайних случая. Первый связан с изображениями, в которых пространственное распределение всех спектральных компонент одинаково, хотя и с разными весами. В этом случае общее количество информации, передаваемой устройством, равно

$$I_1 = I_{im\lambda} I_{sp} = N \log_2(m + 1) + N_\lambda \log_2(m_\lambda + 1). \quad (3.36)$$

Во втором случае все спектральные компоненты распределены в пространстве по интенсивности совершенно независимо друг от друга.

Следовательно, общий объем информации выглядит как произведение пространственной и спектральной информации

$$I_2 = I_{im\lambda} I_{sp} = N N_\lambda \log_2(m + 1) \log_2(m_\lambda + 1). \quad (3.37)$$

На практике реальные изображения содержат частично коррелированные спектральные компоненты. Следовательно, общий объем передаваемой информации находится между двумя крайними значениями I_1 и I_2 .

3.5.3. Экспериментальное исследование спектрального прибора на основе АОПФ

Для проведения экспериментальных исследований чувствительности прибора использовались те же экспериментальные схемы и оборудование, что и для системы, предназначенной для модулей считывания цветowych данных на основе АОПФ [143]. На рисунке 3.7 показана экспериментальная установка.

Блок освещения был основан на кварцевой лампе, а спектр источника света был откалиброван. Блок позволяет использовать мощность света, распространяющегося внутри угла расхождения 150...180. Остальной свет отклоняется диафрагмой внутри блока освещения. Оптические компоненты, входящие в состав блока подсветки, обеспечивали подсветку бумаги с цветным изображением. Свет рассеивается на бумаге с индикатрисой по закону Ламберта. Очевидно, что направления рассеивания лежат далеко за пределами телесного угла, что является оптимальным для эффективной работы АОПФ. Чтобы избежать этого недостатка, мы использовали корректирующую линзу, которая на рисунке 3.7 не показана.

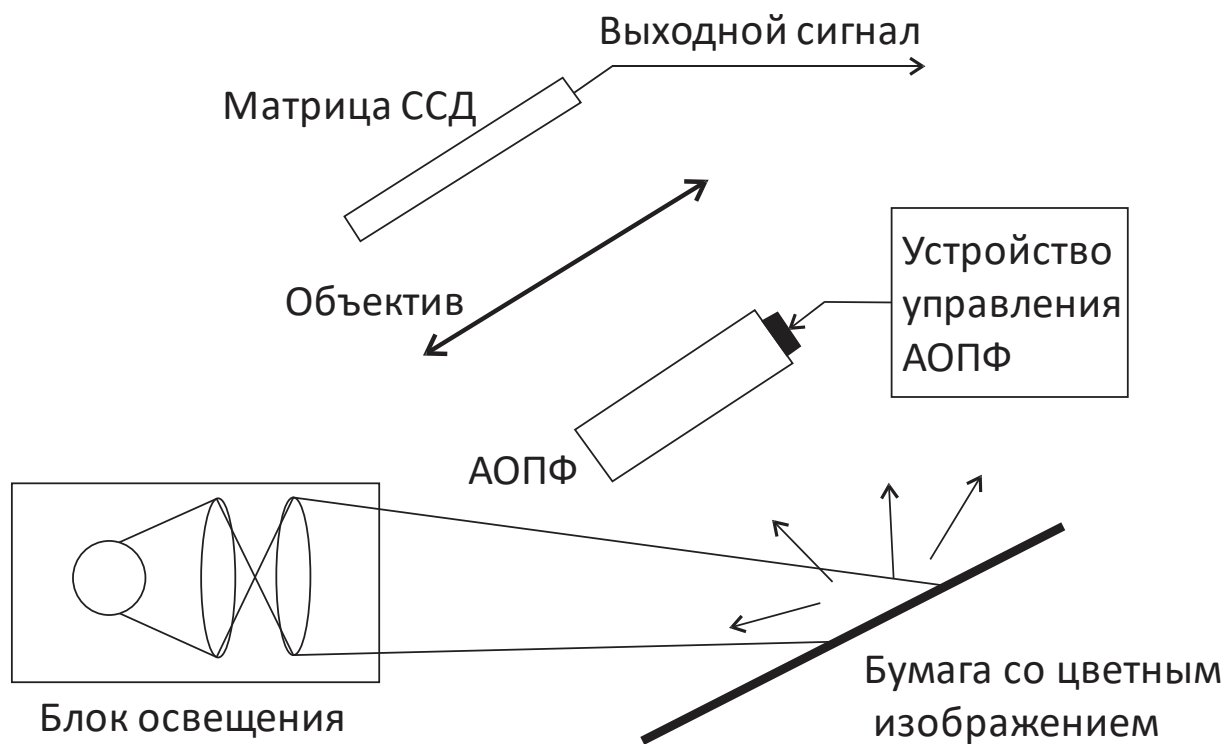


Рисунок 3.7 Оптическая схема экспериментального макета модуля считывания цветного изображения, применяемого для исследования спектральных приборов на основе АОПФ.

АОПФ выполняет фильтрацию изображения по длине волны. В соответствии с сигналом, поступающим с блока управления, АОПФ выделяет часть изображения, которую несет свет соответствующей длины волны (или группы длин волн, если группа частот поступает с блока управления на АОПФ). Отфильтрованное изображение фокусируется в плоскости ПЗС-матрицы за счет объектива. Далее записанное изображение обрабатывается специальным программным обеспечением.

Мы провели экспериментальное исследование спектрального прибора на основе образцов АОПФ, разработанных в нашей лаборатории. Образцы АОПФ были спроектированы по схеме с неколлинеарным акустооптическим взаимодействием с широкой угловой апертурой [144]. Данные образцы были спроектированы с ячейками Брэгга на основе монокристаллов TeO_2 .

Кристаллографическая конфигурация была принята для условия неколлинеарного взаимодействия, она показана на рисунке 3.8. Такая геометрия обеспечивала нормальное падение света на переднюю грань кристалла.

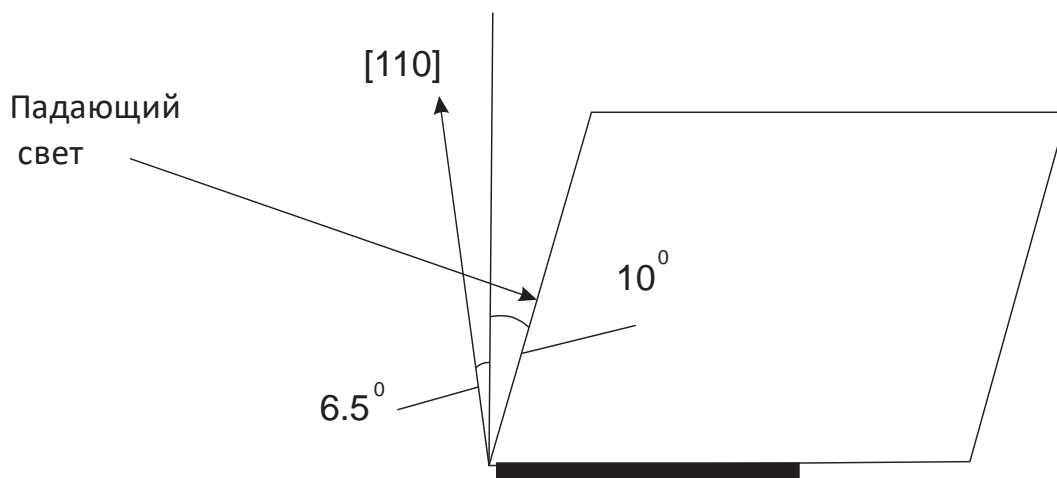


Рисунок 3.8. Кристаллографическая конфигурация ячейки Брэгга АОПФ.

В кристалле возбуждалась сдвиговая акустическая волна. Она контактировала с активной средой ячейки Брэгга с помощью холодной сварки в вакууме. Реализована анизотропная дифракция; длина акустооптического взаимодействия составила около 6,5 мм.

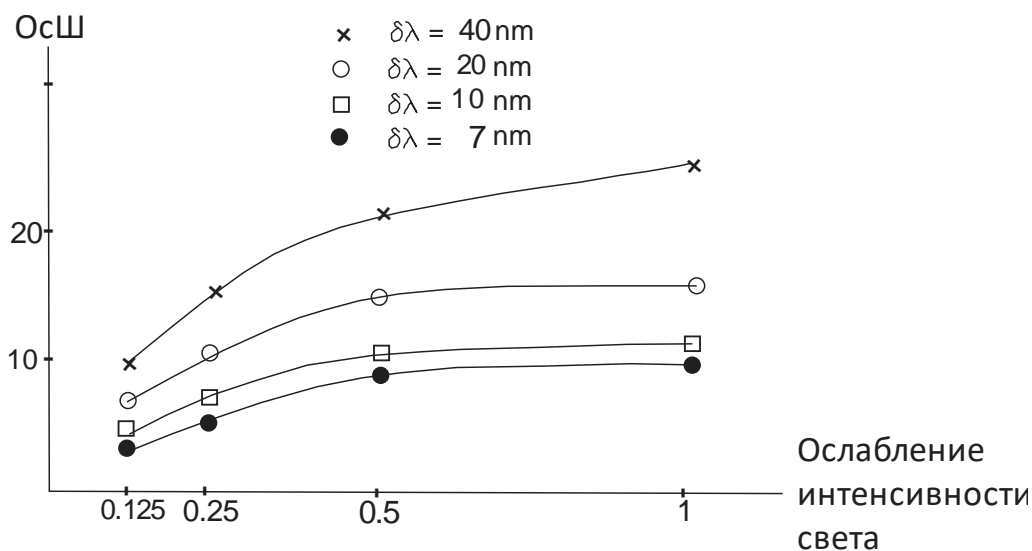


Рисунок 3.9. Зависимость отношения сигнал/шум от входной световой мощности для различных значений селективности АОПФ.

Настройка интенсивности света производилась с использованием набора нейтральных светофильтров. Измерения проводились по методикам, разработанным для любых акустооптических приборов [145] и особенно для АОПФ [136]. Сигнал измерялся в месте достаточно равномерного освещения без модуляции света. Спектральный диапазон измеряемого шума включал полосу пропускания, соответствующую стандарту вещательного телевидения. Также в экспериментах использовался описанный ранее метод настройки спектральной селективности АОПФ [146]. Результаты показаны на рисунке 3.9 для селекции изображения при $\lambda=0,52$ мкм.

Чувствительность спектрального прибора можно найти, исходя из требуемого отношения сигнал/шум. В свою очередь, отношение сигнал/шум определяет вероятность потери единицы информации. Следовательно, если в условия задачи входит допустимая вероятность сбоя, то можно найти требуемую чувствительность спектрального прибора.

3.6. Исследование характеристик поверхности объекта с использованием акустооптического перестраиваемого фильтра

Акустооптические перестраиваемые фильтры (АОПФ) представляют собой очень мощный инструмент для изучения особенностей различных поверхностей, особенно, если эти особенности зависят от спектральной дисперсии формы и положения индикатрисы отражения света. Типичным примером задачи, связанной с определением особенностей поверхности, является задача распознавания рельефа поверхности, которая используется для подлинности различных объектов. Рельеф поверхности может представлять собой сумму ряда дифракционных решеток, ориентированных в разных направлениях и имеющих разные расстояния. Если исследуемая поверхность освещается светом переменной длины волны, отраженный свет соответственно меняет свою интенсивность и направление. Переменная длина волны света может быть обеспечена АОПФ, тогда как пространственное и временное распределение отраженного света может быть зарегистрировано двумерной

ПЗС-матрицей. АОПФ, который используется для исследования поверхности, был изготовлен с использованием акустооптической ячейки Брэгга на основе монокристалла диоксида теллура. Конфигурация взаимодействия в ячейке соответствует неколлинеарному АОПФ. Световой поток на выходе АОПФ может быть охарактеризован контролируемой центральной длиной волны, контролируемой спектральной селективностью и контролируемой формой спектральной характеристики АОПФ. В данном разделе приведены данные, измеренные с помощью ПЗС-матрицы, сравниваются с данными образца с помощью специального программного обеспечения [147].

Различные бумаги, такие как денежные купюры, удостоверения личности и другие, нуждаются в защите от несанкционированного копирования. Маркировка рельефного рисунка отражающей поверхности является одним из наиболее распространенных способов подтверждения подлинности документа. Эти элементы защиты часто используются во въездных визах, удостоверениях личности, акцизных марках и т. д. Помимо определенных изображений, которые можно обнаружить, если рассматривать рельеф отражающей поверхности под определенными углами, рисунок может содержать некоторые специфические элементы, которые невозможно обнаружить при простом наблюдении. Следовательно, для подтверждения подлинности рельефного рисунка поверхности иногда могут потребоваться специальные средства.

Другим способом защиты документов является либо их изготовление со специальным фоном, который должен содержать некоторую кодированную цветовую информацию, либо использование специальных знаков в документах, цветовой состав которых должен содержать определенные заранее известные компоненты. Этот способ может быть еще более эффективным, поскольку известно, что человеческий глаз одинаково воспринимает как чистые цвета (оранжевый, желтый), переносимые монохроматической световой волной, так и составные цвета, составленные из трех основных цветов R, G, B. Следовательно, для проверки подлинности документа необходимо использовать специальные

средства, позволяющие анализировать спектр отражения фона документа или специального знака.

3.6.1. Исследование пространственного отражательного рельефа с использованием АОПФ

Рисунок рельефа отражающей поверхности, используемый для маркировки, обычно представляет собой композицию из множества дифракционных решеток с различными интервалами и различными направлениями ориентации [148]. Если световой луч падает на этот набор решеток под определенным углом, пространственное распределение интенсивности отраженного света сильно зависит от длины волны падающего света. Нетрудно показать, что если падающая монохроматическая световая волна попадает на однофазную синусоидальную отражательную решетку под углом α , как это показано на рисунке 3.10, поэтому комплексная амплитуда света в m -м порядке дифракции равна

$$A_m = a J_m(2\pi d/\lambda) \exp(i\omega t) \exp(i2\pi x \sin \alpha / \lambda + i2\pi x / \Lambda) = a J_m(2\pi d/\lambda) \exp(i\omega t) \exp[2\pi i x (\sin \alpha / \lambda - 1/\Lambda)], \quad (3.38)$$

где x – координата вдоль поверхности решетки, λ – длина волны падающего света, ω – его угловая частота, Λ – шаг дифракционной решетки, d – глубина рельефа решетки (считается $\Lambda \gg d$), J_m – функция Бесселя m -го порядка.

Оба способа должны быть реализованы с использованием специальных средств. Среди средств, которые могут быть использованы для обоих способов защиты документов, наиболее привлекательными выглядят акустооптические перестраиваемые фильтры (АОПФ) благодаря своей высокой надежности и скорости работы, а также отсутствию подвижных частей. Ниже мы рассмотрим использование АОПФ для решения перечисленных выше задач.

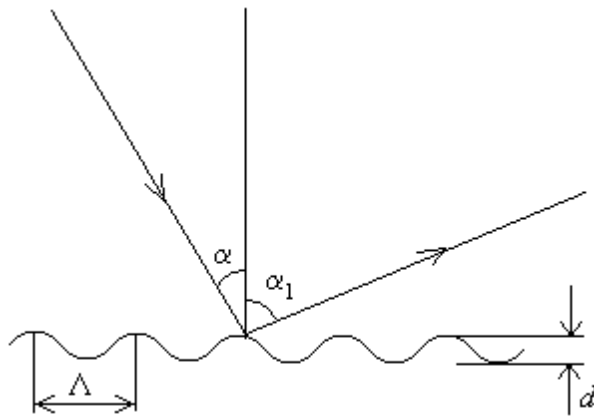


Рисунок 3.10. Геометрия дифракции света на элементарной решетке рельефа отражающей поверхности

Следовательно, интенсивность света в 1-м порядке дифракции пропорциональна квадрату функции Бесселя 1-го порядка, если аргумент равен $2\pi d/\lambda$. Угол, под которым луч 1-го порядка дифракции излучается из решетки, равен

$$\alpha_1 = \arcsin(1/\Lambda - \sin\alpha/\lambda). \quad (3.39)$$

Легко показать, что точность измерения пространственной частоты решетки можно выразить как

$$\Delta\Omega = \Delta\lambda(\Omega/\lambda), \quad (3.40)$$

где Ω - пространственная частота дифракционной решетки, $\Delta\lambda$ - спектральная полоса пропускания монохроматического света. Если падающий свет формируется с помощью АОТФ, то $\Delta\lambda$ представляет селективность прибора. В случае (обычно имеющем место), если $\lambda = 500$ нм, $\Delta\lambda = 10$ нм, а $\Omega = 100$ линий/мм, легко найти, что точность составит 2 линии/мм.

Использование АОПФ для измерений параметров рельефа отражающей поверхности очень выгодно, так как позволяет измерять расстояния между различными решетками, содержащимися в рисунке, используя один и тот же источник света с проходящим через АОПФ, который расположен в одном и том

же месте. Все необходимые настройки можно выполнить путем изменения длины волны света.

Что касается измерений интенсивности выходного света, то сложность заключается в том, что направление дифрагированного света сильно меняется от решетки к решетке в довольно широком диапазоне телесных углов. Проблему можно решить, применив 2-D датчик в качестве фоточувствительного устройства вместе с фокусирующей оптикой, которая обеспечивает ограничение расходимости света. Все результаты измерений необходимо корректировать с помощью весовой функции, учитывающей спектральную чувствительность датчика.

3.6.2. Исследование цветового фона бумаги с использованием АОПФ

Для подтверждения подлинности документа иногда необходимо проверить цветовой состав фона документа. Это исследование можно успешно выполнить и с помощью АОПФ. Кроме того, можно проверить спектральный состав отдельных изображений и знаков на бумаге документа. Наиболее подходящей оптической схемой для его реализации является конфигурация, близкая к той, которая использовалась ранее для считывания цветных графических данных со сложных полихромных изображений [149]. Эта конфигурация проиллюстрирована на рисунке 3.11.

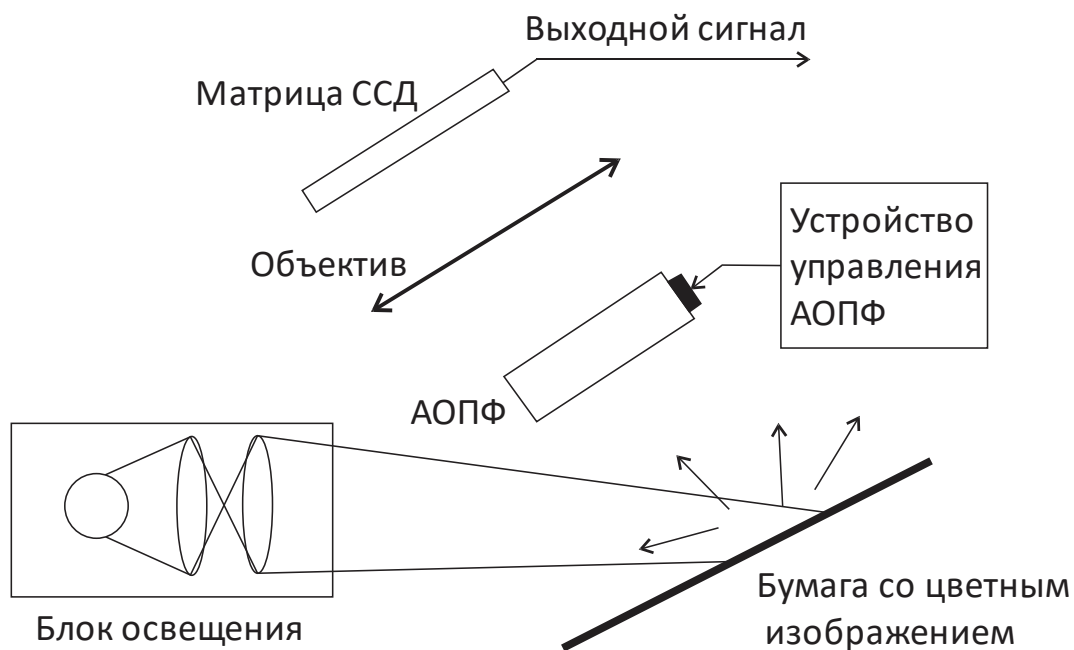


Рисунок 3.11 Оптическая конфигурация фона бумаги и спектрального состава знаков с использованием АОПФ.

Источник света с широким калиброванным спектром освещает исследуемую бумагу. Отраженный свет пропускает АОПФ. Как правило, можно использовать некоторую дополнительную оптику и диафрагму для настройки расходимости отраженного света. АОПФ выбирает определенную длину волны из отраженного света. Затем выбранный свет поступает на матрицу 2-D сенсора через объектив. Если изучается только фон бумаги, нет необходимости использовать и объектив, и матрицу 2-D, поскольку не нужно воспроизводить изображения, и достаточно использовать только один фотоприемник.

Однако, если необходимо изучать знаки, расположенные на бумаге, то изображение знака должно быть сформировано в плоскости ПЗС-матрицы. Затем изображение определенного цвета преобразуется в видеосигнал, который поступает на электрический блок, где сравнивается относительная интенсивность света на изображении знака определенного цвета с интенсивностью света образца знака. Измерения проводятся многократно в разных положениях светового спектра, а результатом сравнения является подтверждение подлинности знака или нет.

3.6.3. Экспериментальные образцы АОПФ

Экспериментальные образцы АОПФ были созданы на основе ячеек Брэгга, изготовленных из монокристаллов диоксида теллура. Эти образцы были разработаны в соответствии с концепцией, обеспечивающей неколлинеарное акустооптическое взаимодействие с широкой угловой апертурой [150]. Кристаллографическая конфигурация обеспечивала возбуждение сдвиговой медленной акустической волны в кристалле со значительным углом между нормалью к плоскости пьезоэлектрического преобразователя и направлением распространения акустической волны. Конфигурация кристалла показана на рисунке 3.12.

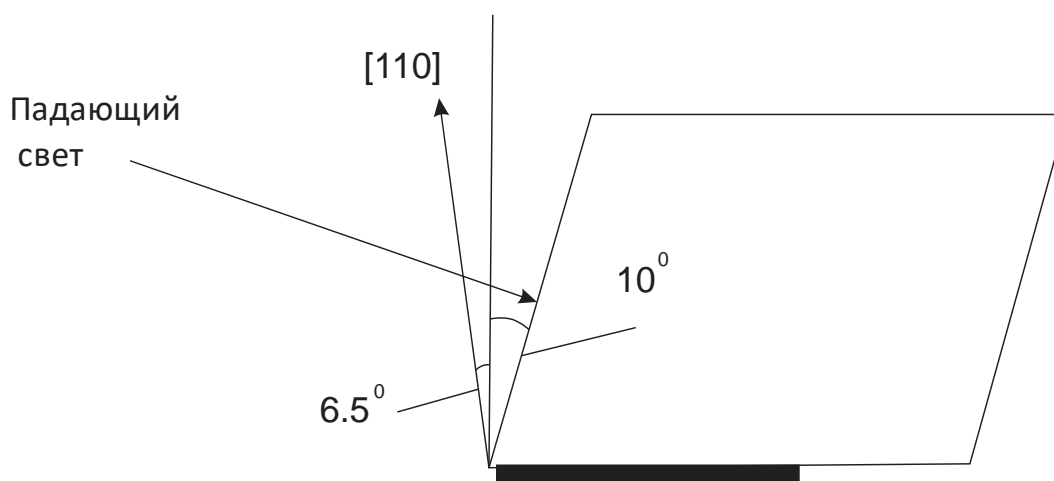


Рис. 3.12 Кристаллографическая конфигурация ячейки Брэгга, подготовленной для АОПФ с неколлинеарным взаимодействием и широкой угловой апертурой

Сдвиговая акустическая волна возбуждалась в кристалле с помощью пьезоэлектрического преобразователя, подготовленного с использованием монокристаллической пластины LiNbO_3 . Она контактировала с активной средой ячейки Брэгга с помощью холодной сварки в вакууме.

Как было показано в разделе 2, основной характеристикой АОПФ, определяющей ее возможности подтверждения подлинности документа, является ее спектральная селективность. Однако ранние определения

селективности не учитывали необходимость различения уровней серой шкалы в исследуемом спектре и исходили из предположения, что соседние спектральные линии примерно равнозначны [151]. На практике может иметь место обратная ситуация. Следовательно, необходимо использовать подход, разработанный для акустооптических анализаторов спектра [152], и адаптировать его к АОПФ. Для этого достаточно использовать полуэкспериментальный метод измерения, в котором пространственные спады интенсивности света пересчитываются во временные спады [153].

3.6.4. Экспериментальное исследование образцов АОПФ с использованием подхода, учитывающего изучаемую шкалу серого спектра

Для применения этого метода к описанным выше измерениям селективности образцов АОПФ мы использовали экспериментальную установку, показанную на рисунке 3.13.

Источником света, показанным на рисунке 3.13, в наиболее распространенном случае должен быть лазер. С другой стороны, иногда его можно заменить источником белого света, если необходимо выполнить некоторые другие измерения. Прозрачность, показанная на рисунке 5, используется, если установка используется для тестирования АОПФ, предназначенного для обработки изображений; эта прозрачность вводит изображение в систему. Для этой цели использовалась фотопластинка, хотя в дальнейшем предполагается применение пространственного модулятора света на основе жидкого кристалла.

Измерения включали питание ячейки Брэгга сигналом с электрической частотой, которая обеспечивает условия Брэгга акустооптического взаимодействия. Затем проводятся многократные измерения интенсивности света, сканирующие выходную плоскость фотоэлектрическим умножителем (ФЭУ). Затем частота смещается на величину δf , и система настраивается на новое условие Брэгга. Набор измерений повторяется. Затем два графика

измеренных интенсивностей совмещаются в одно изображение, и находится долина между двумя пиками. Согласно методу, разработанному в работе [152], расчеты проводятся с учетом отношения сигнал/шум, необходимого количества уровней серой шкалы и допустимой вероятности пропуска единицы информации.

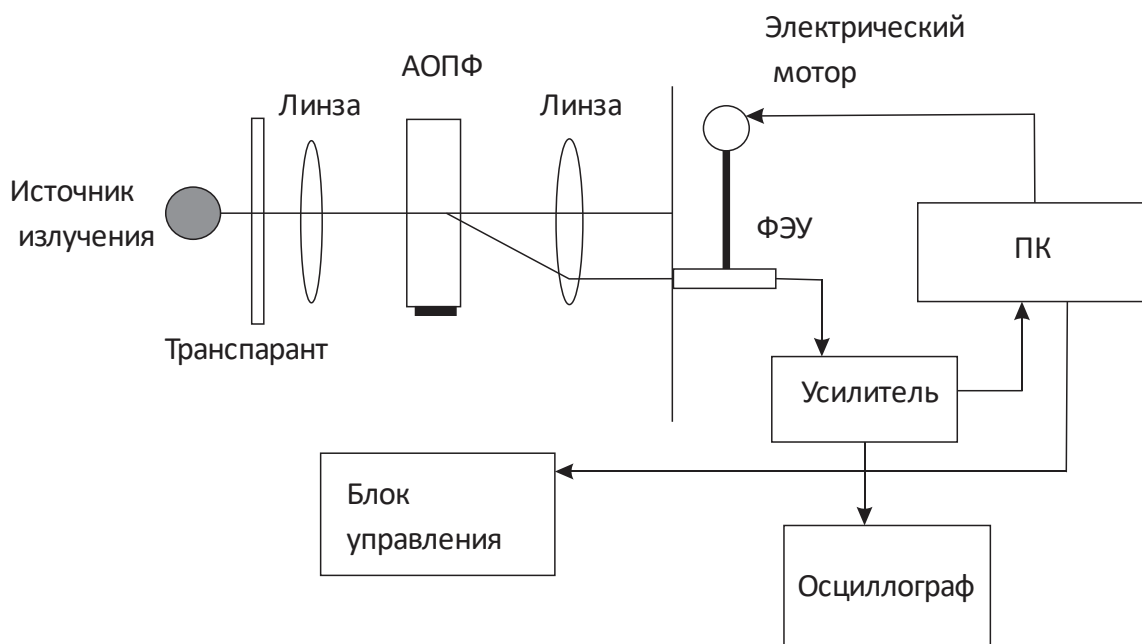


Рис. 3.13. Экспериментальная установка, используемая для измерений селективности длины волны АОПФ

Здесь мы рассматриваем только результаты, относящиеся к спектрометрическим измерениям селективности длины волны АОПФ. В этом случае прозрачность, показанная на рисунке 3.13, не участвует в экспериментах. В нашем случае в качестве источника света использовались сменные полупроводниковые лазеры. Измерения интенсивности света первого порядка производились с помощью фотоэлектрического умножителя, положение которого устанавливалось электродвигателем, управляемым ПК.

Результаты измерений после их пересчета представлены на рисунке 5. Эти результаты получены исходя из допустимой вероятности пропуска одного бита 2,3%, что соответствует превышению сигнала над шумом в два раза.

Рисунок 3.14 иллюстрирует, как селективность длины волны зависит от шкалы серого. Значение m на этом рисунке означает количество распознанных уровней шкалы серого выше нуля. Мы не измеряли и не рассчитывали значение селективности для нескольких сотен уровней серой шкалы, но очевидно, что увеличение $\delta\lambda$ придет к насыщению, как в случае измерений пространственной разрешающей способности в акустооптических спектроанализаторах. Аналогичный вывод можно сделать для зависимости селективности длины волны от вероятности пропуска одного бита. Результаты измерений селективности длины волны показывают, что если исследуемый спектр представлен в двоичном виде, то точность измерений пространственной частоты элементарных решеток рельефа отражающей поверхности может оказаться в 4...5 раз лучше данных, указанных в разделе 2.

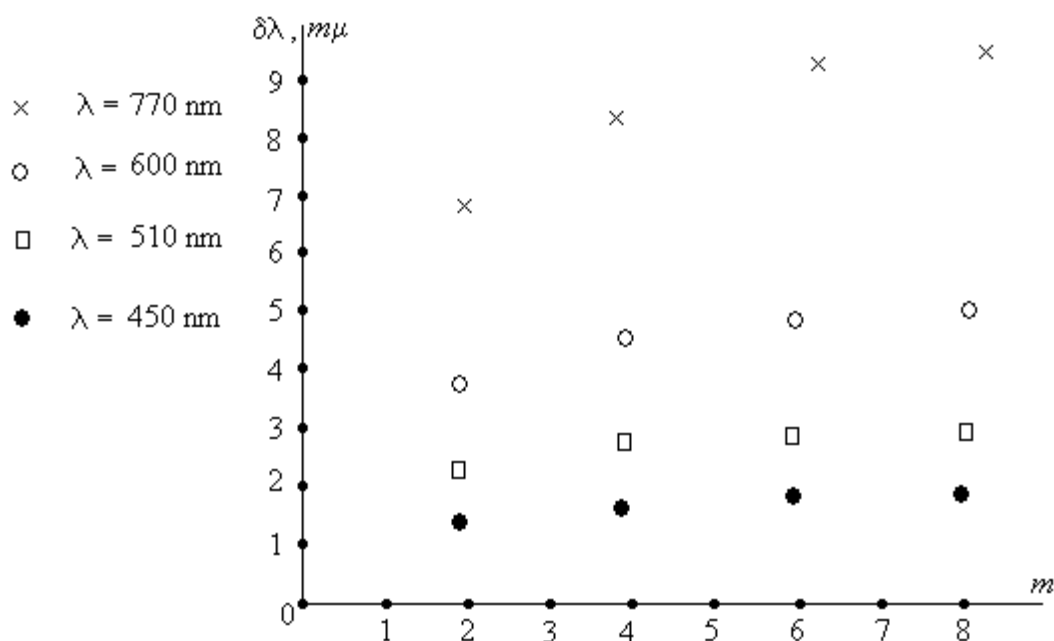


Рис. 3.14. Экспериментальные значения измеренной селективности АОПФ по длине волны на разных длинах волн

Выводы к главе 3

1. Благодаря возможности наложения волновых фронтов, относящихся к разным моментам времени, метод голографической интерферометрии позволяет

получать данные об изменении исследуемых объектов или явлений.

2. Изложенные в главе оригинальные методы записи двухэкспозиционных голографических интерферограмм, позволяют с более высокой точностью исследовать более быстрые изменения объектов и явлений.

3. Использование при восстановлении с голограмм начального состояния одновременно опорного и объектного пучка позволяет получать не только голографические интерферограммы реального времени, но и коррелограммы реального времени. В главе оценены предельные величины получаемых изменений.

4. Рассмотрен вопрос чувствительности спектральных приборов на основе АОПФ и установлен его связь с возможностью прибора передавать информацию. Однако для полного решения этой задачи необходимо учитывать пространственное разрешение прибора. В большинстве случаев пространственная разрешающая способность определяется оптическими компонентами и ПЗС-матрицами. Тем не менее, дальнейшие эксперименты будут включать не только измерения сигнала на большой детализации, но и измерения глубины модуляции света для различных пространственных частот. В этом случае мы полностью измерим информационные возможности спектрального прибора.

5. Исследования разработанных образцов АОПФ на основе монокристаллов TeO_2 показали, что данные АОПФ пригодны для устройств, обеспечивающих подтверждение подлинности различных документов, как путем проверки специально нанесенных поверхностных отражающих рельефных рисунков, так и путем проверки спектрального состава фона и специальных знаков документов.

ГЛАВА 4. ПОВЫШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ЗАПИСИ РЕГИСТРИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

4.1. Регистрация временных процессов и временные ограничения в голографических устройствах

Голографические устройства могут быть использованы не только для хранения информации, но также для регистрации изменения ее, происходящем со временем в источнике информации (например, в объекте или в происходящем физическом или другом процессе). Наиболее подходящими для такой регистрации могли бы быть среды, используемые в динамической голографии, однако, как правило, применения этих сред связаны с определенными техническими трудностями. Использование сред, предназначенных для статической голографической записи, также может быть использовано, и чаще всего используется, для изучения временных процессов либо в реальном времени (как, например, в голографической интерферометрии реального времени), либо в том же масштабе времени, но передаваемым через определенный промежуток времени после окончания процесса. В первом случае, где регистрируется изменения относительно начального состояния скорость изменения результирующей картины идет со скоростью прохождения процесса и эта скорость ограничивается только скоростью после голографической регистрации. Во втором случае необходимо, чтобы голографические процессы записи и воспроизведения изображения происходили внутри интервала времени, меньшего, чем минимальный интервал времени, подлежащий регистрации. Здесь может быть проведена аналогия с кино и телевидением, где создание или одного кадра или замена одного кадра на другой должно быть закончено, интервал времени меньший, например, чем 0,04 сек.

4.1.1. Связь между временными процессами и информационной емкостью голографических устройств

В трехмерной голографической памяти информационная емкость и информационная пропускная способность зависят от многих взаимозависимых параметров и их оптимальный подбор определяет наилучшие возможности использования памяти.

Если не рассматривать взаимосвязь величин N_p , N_s и N_M (рисунок 4.1) и скорости ввода и вывода информации и зависимость их предела от различных физических факторов, то может представиться, что наилучшим вариантом является одновременное увеличение всех четырех величин. В действительности такое

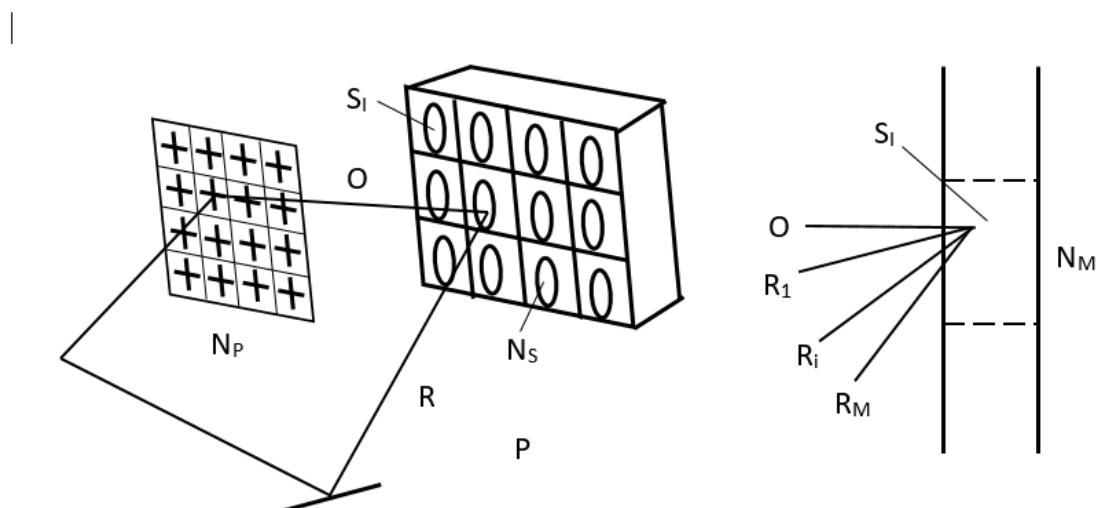


Рисунок 4.1. Распределение информации в звене хранения

увеличение удастся осуществить крайне редко, и для разных сред хранения оптимальными окажутся увеличения одних из этих величин, иногда за счет уменьшения какой либо из N_p , N_s и N_M , или увеличения Δt [154].

Связано это с тем, что для разных сред по-разному действуют такие ограничивающие факторы, как недостаточно широкий динамический диапазон, дифракционная эффективность и потери пространственной информации. Кроме того, независимо от среды, но в зависимости от длины волны света и от геометрии, вносят ограничения дифракционный предел и ограничения,

связанные с шириной диапазона селективности. Каждый ограничивающий фактор имеет свой характер действия. Так, например, динамический диапазон позволяет увеличивать предел количества записываемых пикселей пропорционально корню квадратному из площади поверхности s_h для плоских голограмм и пропорционально $(s_h T)^2$ для объемных голограмм, тогда как дифракционный предел увеличивается пропорционально площади. Кроме того, величина динамического диапазона связано с величиной отношения сигнал/шум, а последнее, как и ряд других факторов, определяющих плотность записи информации, зависит от времени экспозиции при записи и восстановлении и других временных факторов.

Если для определенной величины s_h , динамический диапазон позволяет записать большее число пикселей, чем позволяет дифракционный предел, то с увеличением s_h и, соответственно, N_p , ограничения, связанные с динамическим диапазоном, могут сказываться сильнее. Кроме того, дифракционная эффективность, приходящаяся на один пиксел, падает пропорционально $(N_p N_s)^2$ и увеличение этих двух множителей с некоторых значений сильно ограничивает возможности памяти, тогда как увеличение N_s (т.е. уменьшение площади s_h) до некоторой величины, после которой потребуется уменьшение N_p , может не оказать ограничивающего влияния. Вместе с тем, увеличение N_s требует переключение дефлектора на много позиций для охвата всей матрицы голограмм и, начиная с некоторой величины (более 200 в одном направлении или более $4 \cdot 10^4$ по всей поверхности), реализация отклонений акустооптическими дефлекторами вызывает затруднения, и, во всяком случае, связано с увеличением времени задержки. Однако для голограммы $\sim 1 \text{ мм}^2$ такое количество голограмм уместается на площади $\sim 20 \times 20 \text{ см}^2$, реализовать которую в устройстве хранения информации трудно из-за необходимости использования весьма высококачественной оптики. Размеру голограммы $1 \times 1 \text{ мм}$ соответствует число пикселей, близкое к дифракционному пределу \sim нескольких единиц 10^6 . При таком большом N_p , содержащемся в малой площади голограммы, увеличение N_M может привести к нежелательным результатам. Если, например, при этом

использовано максимальное число мультиплексий $\sim 10^4$, то площадке 1 мм^2 будет соответствовать 10^{10} пикселов. Для этого должно быть отношение сигнал/шум $\sim 10^{10}$ и число светочувствительных доменов в среде должно быть порядка 10^{20} . Даже если принять $L = 1 \text{ мм}$, то размер отдельного домена должен составлять 1 \AA , т.е. соответствовать размеру атома. Хотя существуют зерна с наноразмерными кристаллами, но и в этом случае при идеальных прочих условиях в 1 мм вмещается 10^{18} кристаллов, и при отношении сигнал/шум $\sim 10^9$ должно быть либо 10^5 мультиплексий, либо 10^5 пикселов в 1 голограмме. Но тогда возможно воспользоваться голограммами меньшей площади и большим их количеством.

Таким образом можно установить, что при использовании различных записывающих материалов, имеющих различную дифракционную интенсивность, различный динамический диапазон и различные потери пространственной информации, необходимо устанавливать свои пределы для наиболее критичных из величин N_p , N_s и N_M и Δt , с тем, чтобы другие из этих величин можно было увеличить за счет величины с установленным ограничением.

От величины N_p зависит время электронной адресации необходимого данного, тогда как время оптической адресации заданной голограммы зависит от величины N_s (как в случае тонких, так и в случае объемных голограмм), и от N_M (в случае объемных голограмм). Время регистрации, также входящее во время выборки, зависит от величин N_p и N_M , поскольку от них зависит дифракционная эффективность, и соответственно, при их увеличении для сохранения необходимой энергии на выходе, потребуются увеличение времени поступления слабого светового потока. Таким образом, рассматривая взаимозависимость величин N_p , N_s и N_M , следует к ним присоединить и время выборки t_a , влияющее на информационную пропускную способность, а, следовательно, и производительность системы.

Большое влияние на потери информации и через эти потери на замедление прохождения информации через систему оказывают перекрестные искажения

при мультиплексировании [155-163].

Еще одной величиной, которая должна рассматриваться во взаимосвязи с перечисленными четырьмя величинами является отношение сигнал/помеха, играющая существенную роль и в плоской и в объемной голографической памяти, но в особенности, в объемной.

В работе [164] рассматривается взаимозависимость комбинаций указанных величин, дополняя ее зависимостью от геометрических параметров и aberrаций. Выражения для плотности и емкости голографической объемной памяти можно представить в виде произведения четырех множителей

$$I_{3D} = [A][B][C][D] \quad (4.1)$$

Четыре части описывают четыре разные зависимости. Первая описывает зависимость от длины волны, вторая отражает зависимость от разрешающей способности оптической системы входа-выхода, третья отражает характер мультиплексирования и зависимость от максимально допустимого отношения сигнал/помеха и соответственно Δt . Последняя часть учитывает эффект aberrации линз.

Уравнения (4.1), согласно [164], могут быть использованы для выбора оптимального решения в ГЗУ. Зависимость плотности записи от разрешающей силы оптической системы указывает на возможность выбора между плотностью записи и параллельностью передачи данных и, соответственно, затрачиваемом времени. Этот компромисс проистекает из оптимизации емкости выбором отношения относительных отверстий линз. Увеличение количества пикселей в параллельном наборе данных требует увеличения диаметра линз, но увеличение диаметра приводит к тому, что становится трудно поддерживать высокое относительное отверстие. В результате, начиная с некоторой величины, плотность записи уменьшается. Необходимость компромисса между

параллельностью и плотностью становится более очевидным, когда учитываются эффекты абберации линз.

4.2. Кинетика записи голограмм в средах с различными механизмами записи

В данном разделе рассмотрены особенности носителей, приемлемых для записи голограмм, а также их различия в отношении механизма и характеристик записи. Особое внимание уделено производительности процессов записи во временной области. Изменения, возникающие при хранении голограмм и восстановлении изображений с записанных голограмм, также являются объектами нашего внимания. Различия в механизмах и кинетике записи голограмм позволяют голографически решать различные задачи [165].

Голографический носитель записи представляет собой светочувствительный носитель, отвечающий некоторым дополнительным требованиям, связанным с особенностями записи интерференционных картин, составляющих голограммы. Носитель не обязательно должен быть пригоден для обычной записи, как, например, фазовый носитель записи.

Первым носителем, на котором была осуществлена запись голограмм, является фотопластинка. Благодаря своей высокой чувствительности этот носитель часто используется для записи голограмм и в настоящее время. Широкое развитие голографии и ее применений привело к созданию широкого спектра голографических записывающих сред, различающихся механизмами записи и наборами характеристик, позволяющих использовать эти среды для решения различных задач с помощью голографии.

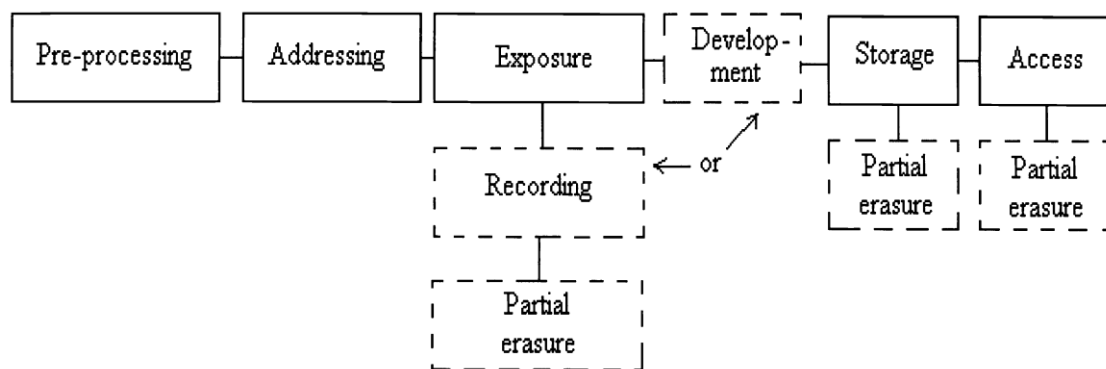


Рисунок 4.2. Цикл записи голограммы — хранения — доступа.

Одним из важнейших параметров является время, затрачиваемое не только на экспозицию, но и на весь цикл записи, который включает в себя, помимо немедленной реакции среды на воздействие света, другие процессы, которые вызывают изменение конечных параметров среды (рис. 4.2). Некоторые среды имеют многоступенчатую конфигурацию записи, где такие процессы, как экспонирование, проявление и т. д., осуществляются последовательно. Фотографические эмульсии и фототермопластичные среды относятся к числу сред, в которых реализуется такая конфигурация. Другие среды используют параллельное выполнение некоторых процессов, но характеристики задержки, скорости и длительности тогда, как правило, хуже [166]. Бывают случаи (примерами являются полимерные среды), когда процесс записи продолжается гораздо дольше, чем экспозиция. Эту значительно длительную пост экспозиционную запись иногда неправильно называют «голографическим самоусилением» [167].

Ниже мы сравним кинетику записи в фотографических эмульсиях, желатине, фоторефрактивных кристаллах, различных полимерах и жидких кристаллах. Изучение кинетики процессов записи голограмм на различных носителях дает материал для улучшения двух важнейших параметров записи: сокращения полного времени записи и повышения дифракционной эффективности записанных голограмм.

4.2.1. Влияние процесса стирания на кинетику записи голограмм

Иногда при записи голограмм, например, запоминающих, требуется, чтобы процесс стирания не происходил. Этого можно добиться только в определенных средах, в которых воздействие света вызывает необратимые изменения показателя преломления. Во многих средах изменения свойств среды нестабильны, и через определенное время среда возвращается в исходное состояние.

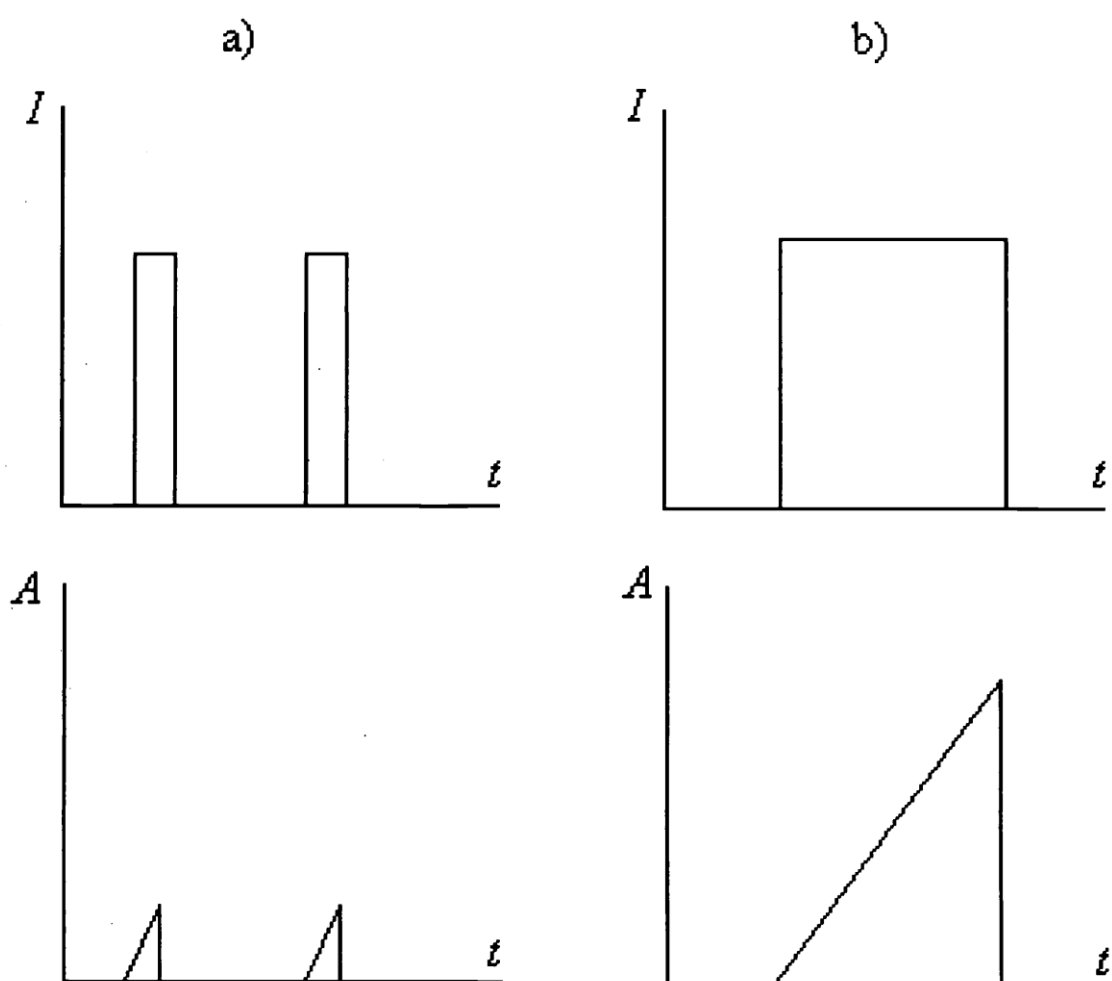


Рисунок 4.3 Формирование голограммы в двух крайних случаях: с мгновенным стиранием (а) и без стирания (b).

Нестабильные изменения имеют место в некоторых случаях фототермической записи, динамической голографии красителей и записи в фоторефрактивных кристаллах. Амплитуда голографической решетки при записи голограммы может быть выражена как

$$A = A_0 [1 - \exp(-t/\tau_r)] \approx (A_0 / \tau_r) t, \quad (4.2)$$

где A_0 — максимальное значение амплитуды решетки, а τ_r — постоянная времени записи. В процессе стирания амплитуда голограммы уменьшается:

$$A = A_1 \exp(-t/\tau_e), \quad (4.3)$$

где τ_e постоянная времени стирания, а A_1 начальное значение амплитуды решетки. Можно показать, что эффективность дифракции для записи одиночной голограммы равна

$$\eta = [(A_0 / \tau_r) \tau_e]^2 \quad (4.4)$$

Очевидно, характер стирания легко описывается в двух крайних случаях:

1. Запись практически с мгновенным стиранием. Этот случай обычно присущ динамической голографии и означает мгновенное воздействие света без накопления голограмма образующего сигнала.

2. Запись практически без стирания, если τ_e очень велико. В этом случае сигнал накапливается в процессе записи.

Оба случая проиллюстрированы на рисунке 4.3. Кинетика записи в промежуточных случаях зависит от величины τ_e . Ниже рассмотрим случаи, когда эта величина достаточно велика.

4.2.2. Кинетика записи голограммы в средствах с послеекспозиционным проявлением, но без какой-либо предэкспозиционной подготовки

В этом разделе мы в основном рассмотрим галогенсеребряные материалы, применяемые в фотографии. Эмульсионный слой галогенсеребряного материала состоит из микрокристаллов (зерен) серебра, диспергированных в желатине. Кроме того, эмульсия содержит некоторые сенсibilизаторы. Эмульсия наносится на прозрачную подложку: стеклянную пластину или гибкую пленку. Толщина эмульсионного слоя обычно составляет от микрометра до десятков микрометров.

Экспонирование интерференционной картины создает скрытое изображение в эмульсионном слое. Это скрытое изображение может быть преобразовано в голограмму после проявления. В процессе проявления экспонированные микрокристаллы галогенсеребряного материала образуют зерна металлического серебра, которые, в свою очередь, создают распределение

пропускания света, т. е. амплитудную голограмму. Размер зерен галогенсеребряного материала имеет большое значение, поскольку определяет как разрешающую способность (что очень важно, в частности, для голографической записи), так и чувствительность среды.

Невозможно совместить высокую чувствительность (выраженную как величина, обратная интенсивности освещения на единицу площади, необходимой для создания качественного изображения) и высокую разрешающую способность на одном и том же фотографическом носителе. Чем выше разрешающая способность, тем хуже чувствительность. Например [168], увеличение разрешающей способности в 30 раз сопровождается снижением чувствительности на четыре порядка. При этом не учитывается, что на той же площади можно разместить большее количество информации, если носитель имеет большую разрешающую способность, а увеличение мощности на единицу информации не столь радикально. Разрешающая способность 100 мм^{-1} весьма распространена для обычной фотографии, а требуемая световая мощность может быть довольно мала. Этого нельзя сказать о носителях, предназначенных для записи голограмм. Для голографии требуется большая разрешающая способность, и для ее обеспечения должна быть большая световая мощность.

На ранних этапах развития голографии используемые эмульсии фактически разрабатывались для других целей, требующих высокой разрешающей способности и не требующих высокой чувствительности (таких как астрономия, эмульсии Липпмана и т. д.). Однако в дальнейшем появились специальные голографические эмульсии [169]. Эти эмульсии позволяли согласовывать спектральную чувствительность слоев с источниками света, используемыми в голографии (в основном, He-Ne, Ar и др. лазеры, работающие как в непрерывном, так и в импульсном режиме). Для всех вновь создаваемых фотографических эмульсий было очень важно получить максимальную амплитудную модуляцию при экспонировании голограммы. Оптимальная

кинетика записи связывалась не только с разработкой новых эмульсий, но и с подбором проявителей и оптимизацией процессов проявления.

Очевидно, что общее время записи голограммы на галогениде серебра намного больше времени экспозиции из-за длительного процесса проявления.

Помимо использования амплитудных голограмм, были сделаны попытки записи фазовых голограмм на носителях на галогениде серебра. После экспонирования и проявления голографических пластин производилось отбеливание фотографических рисунков. В результате процесса металлическое серебро превращалось в прозрачный состав, а поглощающая голограмма — в фазовый. Преимущество отбеленной голограммы заключается в ее большей дифракционной эффективности. Но при этом общее время записи здесь больше за счет дополнительного процесса.

Бихромированный желатин (БХЖ) является очень распространенным носителем для записи голограмм и использования в постоянных запоминающих устройствах.

Желатин — белковое вещество, полидисперсная смесь полипептидов. Его можно получить из коллагена после длительной щелочной обработки некоторых органических материалов. Желатин широко используется в фотопромышленности. После подвергшись процессу записи, VSG поглощает и рассеивает очень мало и практически не распознаётся на стеклянной подложке. VSG обладает высокой дифракционной эффективностью, присущей фазовым носителям с высоким отношением сигнал/шум и разрешающей способностью. Принцип действия VSG напоминает принцип действия фоторезистов [170] и позволяет получить разрешающую способность до 5000 линий/мм.

Процессы записи и доступа к голограмме с точки зрения кинетики схематически проиллюстрированы на рисунке 4.4.

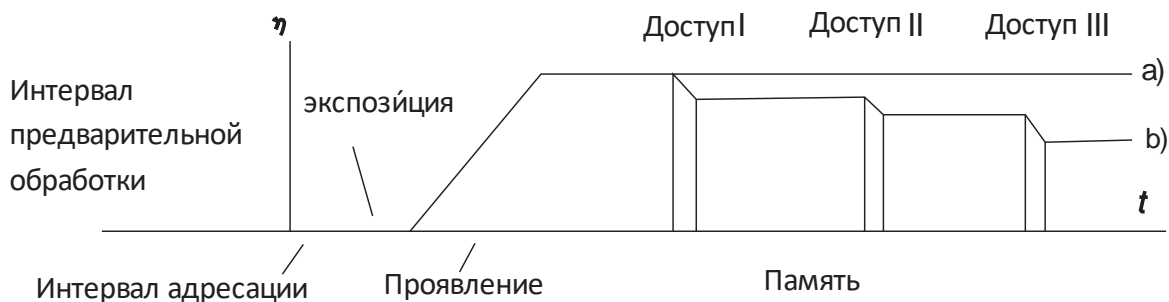


Рисунок 4.4. Запись, проявление и доступ к голограмме, когда считывание не затрагивает запись (а) и частично стирает ее (б).

4.2.3. Кинетика записи голограмм в средах с послеекспозиционным проявлением и с предэкспозиционной подготовкой

Очень важно иметь возможность записывать голограммы на обратимые носители. В связи с этим осталась весьма сложная проблема, как стереть голограмму, не повредив другие, записанные на том же носителе. Существует множество обратимых носителей записи. Однако большинство из них имеют ряд недостатков, препятствующих их использованию в памяти чтения-записи, таких как низкая чувствительность, сложность и длительное время записи. Наиболее распространенными обратимыми носителями для голографических запоминающих устройств чтения-записи с двумерным (2D) распределением голограмм являются термопластичные.

Термопластичные носители имеют чувствительность, близкую к чувствительности голографических сред на основе галогенида серебра, и удовлетворительную разрешающую способность. Они представляют собой дифракционно-эффективные фазовые среды, позволяющие выполнять достаточно большое (хотя и ограниченное) количество циклов записи-считывания. Сухое и довольно быстрое проявление и длительное хранение данных также являются их преимуществами. В списке недостатков — сильная зависимость проявления от многих параметров и необходимость использования специального высоковольтного устройства для записи.

Принцип действия термопластичных сред основан на действии электростатических сил, деформирующих нагретую пленку, когда ее вязкость падает из-за нагрева. Термопластичная пленка с дисперсными частицами органического или неорганического фотопроводника заряжается коронным разрядом. В экспонированных областях электрическое сопротивление пленки падает, и поверхность теряет заряд. В результате на поверхности пленки появляется зарядовый рельеф. Нагрев преобразует этот рельеф под действием электростатических сил в поверхностный геометрический рельеф.

Способы фототермопластической записи бывают одновременными или последовательными. Последовательный способ включает зарядку, экспонирование и термическую обработку. В одновременном способе эти операции выполняются с частичным или полным перекрытием [171,169]. Иногда используются дополнительные операции [173].

Временные режимы записи голограмм в фототермопластах могут изменять отношение сигнал/шум. Основным источником шума являются шумы спонтанной деформации. При этом разрешающая способность носителей, зависящая от толщины термопластичного слоя, практически не зависит от кинетики записи.

4.2.4. Кинетика регистрации в средах с записью во время экспозиции и частично после ее окончания

Существует широкий спектр сред, в которых запись может осуществляться без какой-либо дальнейшей проявки. Затем интерферограмма, составленная объектным и опорным пучками, мгновенно регистрируется с помощью модуляции показателя преломления (реже коэффициента поглощения). Проходящий когерентный световой пучок (опорный или объектный) может реконструировать волну другого пучка (объектного или опорного). Запись и считывание могут осуществляться в разных спектральных областях; в этом случае записывающие пучки не выступают в качестве реконструирующих.

Однако обычно записывающие пучки используются в качестве реконструирующих пучков. В зависимости от механизма записи формирование голограммы завершается или не завершается в течение времени экспозиции. В последнем случае формирование может продолжаться после окончания экспозиции (рис. 4.5). Такая кинетика свойственна стеклообразным халькогенидным полупроводникам [174], некоторым сегнетоэлектрическим кристаллам [175] и различным фотополимерным материалам [176], часто сочетаемым с жидкими кристаллами [177]. Хотя процессы записи в этих материалах могут различаться, их общей чертой является ненужность специальной постэкспозиционной проявки.

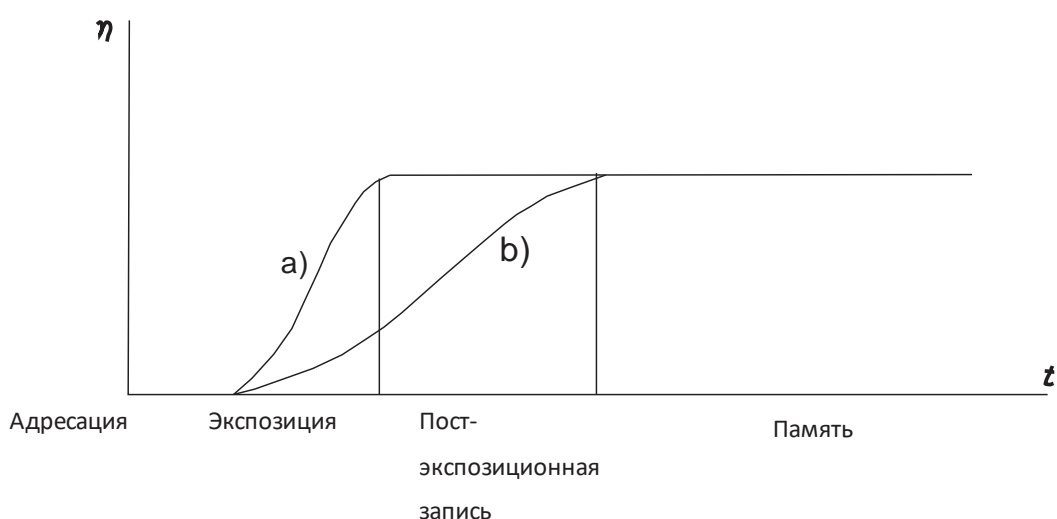


Рисунок 4.5. Формирование голограммы в течение экспозиции (а) и более длительного периода (б).

В последние годы внимание исследователей было сосредоточено на средне- и долгосрочном хранении данных в кристаллах, неразрушающем считывании, а также повышении чувствительности и плотности записываемой в кристаллах информации.

Предложены два основных варианта обеспечения хранения записи. Первый основан на термической фиксации, при которой копия хранимых фазовых решеток (по показателю преломления) изготавливается с помощью термо активированной диффузии. Она создает оптически стабильную решетку

добавления. Основным недостатком этого варианта является длительное время, необходимое для термической фиксации. Другая схема фиксации использует свет двух длин волн. Наиболее распространенным вариантом двухволновой схемы является запись в фоторефрактивных средах, в которых генерация носителей заряда осуществляется двухступенчатым процессом [178]. Когерентные объектный и опорный пучки с длиной волны λ_1 записывают данные в присутствии контрольного пучка с длиной волны λ_2 . Контрольный свет может быть некогерентным и даже широкополосным, поступающим, например, от источника белого света или светодиода [179]. Считывание осуществляется светом λ_1 без контрольного света. В этих случаях кинетика различается в зависимости от разных методов обеспечения неразрушающего считывания. Следовательно, время записи и считывания может различаться для таких носителей.

Существует множество вариантов записи голограмм в фотополимерах с разными механизмами записи и разной кинетикой. Эти среды обычно являются многокомпонентными, что является основной причиной сложности процесса записи.

Механизм формирования фоторефрактивных голографических решеток полимеров связан, в том числе, с процессами изомеризации, особенностями формирования поляризационных голографических решеток, а также созданием голографических решеток через промежуточные тепловые решетки. Кроме того, в качестве таких сред использовались фоторефрактивные полимеры с диспергированными жидкими кристаллами, жидкие кристаллы, легированные красителями и т. д. Молекулярное фото преобразование и фоторефрактивный эффект являются наиболее перспективными явлениями для использования в голографической памяти с голографическим хранилищем высокой чувствительности и пространственной разрешающей способностью. В настоящее время наибольшая разрешающая способность (>10000 линий/мм)

достигается в полимерных жидких кристаллах, а наилучшая чувствительность ($0,1 \text{ Дж/см}^2$) - в жидких кристаллах, легированных красителями [175].

Полимерные материалы или соединения, такие как полимеры с дисперсными жидкими кристаллами, кажутся наиболее подходящими для формирования объемных брэгговских решеток, тогда как жидкие кристаллы, легированные красителями, менее пригодны для этой цели. Кажется, последние хорошо применимы в 2D голографических запоминающих устройствах.

Следует отметить, что изучение большинства явлений, связанных с эффектами, обеспечивающими память, далеко не завершено. Еще предстоит проделать большую работу, чтобы понять эти эффекты с точки зрения передачи и обработки информации. В результате мы узнаем больше о кинетике записи, и, возможно, эти среды станут основой высокоэффективных голографических запоминающих устройств.

4.3. Фототермическая запись в системах хранения данных

В данном разделе исследованы процессы светоиндуцированной тепловой полевой модуляции оптических параметров в средах для фототермической записи. Рассмотрена применимость метода для записи голограмм. Также уделено внимание процессам, вовлеченным в побитовую фототермическую и магнитофототермическую запись [180].

Фототермическая регистрация основана на изменении оптических параметров среды под действием пространственно-временных тепловых полей, индуцированных светом. За это могут отвечать разные механизмы [181,182]. Один из них включает расширение среды, вызванное теплом, что приводит к модуляции плотности и, следовательно, показателя преломления n среды. Такие среды могут модулировать падающий свет.

Время жизни записанных распределений показателя преломления зависит от пространственной частоты и варьируется от долей микросекунд до миллисекунд. Чтобы обеспечить более прочное хранение данных, тепловое

воздействие должно вызывать, например, фазовые переходы. Типичным примером является переход металл-полупроводник в диоксиде ванадия [183].

Другой вариант фототермической записи основан на использовании поликристаллических перитектических сред.

Стабильные тепловые решетки были получены в жидких кристаллах с низкой молярной массой 4. Образование решеток и наблюдаемых эффектов памяти было объяснено структурными переходами при нагреве лазерным лучом и явлениями стеклования, которые приводят к модуляции двулучепреломления.

Термическое воздействие также может быть использовано как вспомогательный фактор проявления. Это имеет место в случае фототермопластических сред и магнитооптической записи.

4.3.1. Фототермическая запись в полупроводниках

Фототермическая запись включает в себя процесс создания пространственно-модулированного температурного поля пространственно-модулированным световым полем, приводящим к формированию пространственного распределения показателя преломления. Для достижения этого эффекта необходимо иметь среду с достаточно высоким коэффициентом распространения и иметь возможность использовать этот эффект в течение короткого интервала времени до стирания записи. Коэффициент распространения температуры оказался достаточно высоким для некоторых аморфных халькогенидных полупроводников, таких как As_2Se_3 [184]. Следовательно, температурное изменение показателя преломления также является значительным. Для этой среды

$$dn/dT=2.87/T, \quad (4.5)$$

где T — температура среды. Следовательно, изменение температуры на $100\text{ }^\circ\text{C}$ вызывает изменение показателя преломления на $0,2$ [189], что позволяет

записывать голограммы с большим числом пикселей. Требуемая мощность довольно мала.

Использование фазового перехода для продления срока хранения данных включает применение явлений гистерезиса. Существует два направления в создании пленок, используемых для хранения данных. Первое включает создание идеальных монокристаллических пленок с достаточно широкими петлями гистерезиса. Другое направление — создание мелкозернистых пленок, таких как FTIROS [183]. В последнем случае процессы записи и хранения данных довольно похожи на те, что происходят в эмульсиях галогенида серебра. Изменение оптических характеристик, по-видимому, пропорционально степени нагрева. Оно определяется широким разбросом ширины петли гистерезиса для различных микрообластей. Поэтому передача серой шкалы становится возможной в таких процессах. Обратимые изменения в различных пространственных областях осуществляются в малых температурных интервалах 10—20 °С. Эксперименты по записи голограмм и формированию фильтров для оптической обработки информации продемонстрировали возможности использования мелкозернистых пленок для записи и извлечения данных.

4.3.2. Жидкие кристаллы как среды для фототермической записи

Пространственная модуляция показателя преломления в результате формирования тепловых решеток может быть получена при освещении некоторых видов жидких кристаллов лазерным излучением [187]. Распределение интенсивности может быть преобразовано в распределение температуры путем слабого поглощения и нагрева в жидких кристаллах, легированных красителями, с целью увеличения поглощения записывающих световых пучков. Это позволяет осуществлять значительный нагрев даже при низких интенсивностях света.

Прямое изменение показателя преломления из-за оптически вызванных изменений температуры часто называют термическим индексированием [187].

Если задана поляризация световых лучей, то изменения показателя преломления, вызванные нагревом, можно описать как

$$n = (dn/dt)\delta T, \quad (4.6)$$

где dn/dt — термооптический фактор, который определяется изменениями плотности и другими скалярными параметрами. Изменение равновесной температуры, вызванное воздействием света, определяется соотношением

$$\delta T = \alpha I / \rho C_p D q^2, \quad (4.7)$$

где α — коэффициент поглощения, ρ — плотность, I — интенсивность падающего света, q — вектор решетки, D — коэффициент тепловой диффузии, а C_p , S — теплоемкость. Если принять $\alpha = 0,1 \text{ см}^{-1}$, $I = 10^4 \text{ Вт/м}^2$, то можно получить

$T \sim 10^\circ \text{C}$ для некоторых сред, а изменение показателя преломления $\delta n \sim 10^{-2}$. Это близко к значению, которое можно было бы достичь путем оптической перестройки. Следовательно, тепловая модуляция в жидких кристаллах может вызывать сильный нелинейный оптический отклик.

Дифракционная эффективность фазовой решетки в приближении плоской волны равна

$$\eta = (\pi d \delta n / \lambda)^2, \quad (4.8)$$

где λ — длина волны лазерного света, а d — толщина пленки. Уравнения (2)—(4) описывают квадратичную зависимость дифракционной эффективности записанных решеток от интенсивности падающего света за счет нагрева материала пленки.

Стабильные тепловые решетки были получены в жидких кристаллах с низкой молярной массой [184]. Здесь решетка интенсивности превращается в температурную решетку, которая, в свою очередь, преобразуется в оптическую. Учитывая, что промежуточные температурные решетки в обычных жидких кристаллах обычно не существуют дольше микросекунды, для того, чтобы хранить данные в течение длительного времени, полученную оптическую

решетку необходимо заморозить. Она может храниться за счет перехода среды в застеклованное состояние. Образование решеток и явления памяти можно объяснить структурными переходами, связанными с лазерным нагревом и явлениями застекловывания, вызывающими модуляцию двулучепреломления.

Таким образом, процесс позволяет хранить информацию о фазе вместо амплитуды, которая сохраняется, если другие терморегистрирующие материалы находятся в эксплуатации. Запись начинается, когда температура ниже температуры стеклования, например, при комнатной температуре. После включения двух интерферирующих лучей аргонового ионного лазера температура в области интерференции повышается, и материал нагревается выше температуры перехода стеклования кристаллической жидкости. Следовательно, возбужденная температурная решетка модулирует как расположение, так и плотность молекул. После того, как лучи были отключены, температура быстро снижается, и модуляция двулучепреломления сохраняется в течение длительного времени, поскольку материал все еще остается застеклованным. Время хранения решетки зависит от температуры. Если температура хранения на 20 °С ниже температуры стеклования, время хранения составляет около месяцев. Нагревание материала выше температуры стеклования может выполнить стирание.

В этом случае эффективность дифракции составляла порядка нескольких процентов и зависела от интенсивности записи (которая составляла около сотен W/cm^2) и от шага решетки, чем выше пространственная частота, тем меньше была эффективность дифракции. Наименьший измеренный шаг составлял около 5 μm , а соответствующая эффективность дифракции 0,01%. Эксперименты показали, что можно было выполнить около 1000 циклов записи/стирания без какого-либо ухудшения эффективности дифракции.

Длительность записи и стирания в жидких кристаллах с низкой молярной массой [187] была того же порядка, что и в фоторефрактивных материалах (несколько миллисекунд), но примерно в тысячу раз быстрее, чем в легированных азокрасителями средах, где оптически индуцированное изменение двулучепреломления обеспечивается сравнительно медленным процессом фотохимической перестройки азогрупп. С другой стороны, мощность записи выше, чем в легированных красителем средах, а требуемая энергия составляет порядка нескольких Дж/см².

4.3.3. Побитная фототермическая запись

Помимо формирования температурных решеток, фототермическая запись может использоваться для побитовой записи, при которой вся мощность исходного луча используется для записи данных в одной точке.

Одним из наиболее часто используемых методов постоянной побитовой записи данных является метод абляции, который заключается в удалении слоя металла, нанесенного на подложку, путем локального нагрева этого слоя лазерным лучом. Формирование отверстия абляции обычно может быть выполнено в слое металла толщиной 30—50 нм, полученном вакуумным осаждением на подложку из стекла или поли(метилметакрилата) (ПММА) [188]. Такое отверстие поглощает 20% и пропускает 20% световой мощности. Гораздо лучшие результаты можно получить, применяя трехслойную структуру. В этом случае подложка покрывается светоотражающим слоем алюминия, затем наносится прозрачный изолирующий слой, а поверх этих слоев наносится тонкий металлический слой. Слои металла и изолятора (путем выбора их толщин, кратных $\lambda/4$) образуют антиотражающую структуру. Тогда 90% падающей мощности будет поглощаться в металлическом слое, что делает структуру в два раза эффективнее, чем в предыдущем случае. Требуемая мощность зависит от температуры плавления металла. Наиболее часто используемый материал - теллур. Алюминиевый слой может создавать нежелательный перенос тепла от металлического слоя, снижая точность

процесса плавления. Этого можно избежать, применяя полимерный изолятор, который более термостойкий, чем обычно применяемый SiO_2 [189].

В пузырьковом методе используется трехслойная структура. Данный метод основан на применении металлического поглощающего слоя, имеющего более высокую температуру плавления (например, титан), и изолятора с низкой температурой испарения [190]. Нагрев металлического слоя лазером приводит к испарению изолятора вокруг области экспозиции. Образующееся давление газа создает напряжение металлического слоя, приводящее к появлению микробоу, нарушающих условие максимального поглощения света. Реконструирующий луч отражается от этих областей, но поглощается в ненапряженных.

Возможно также использование четырехслойных структур со средой, переводящей свое аморфное состояние в кристаллическое под действием тепла [191]. Эти состояния отличаются друг от друга отражательной способностью. Стирание информации и восстановление исходного состояния можно осуществить, продлевая облучение светом мощности, близкой к мощности записывающего луча. Считывание может осуществляться маломощным лучом [192].

Другой носитель для побитовой записи — это среда с мелкодисперсными металлическими частицами, распределенными в органическом полимере [193]. В качестве матричного материала, технологичного для создания однородных слоев, был выбран желатин. Гетерогенный слой имеет хорошую однородность и малую отражательную способность. Во время записи металлические частицы поглощают нагревающий их свет, что приводит к нагреву и расплавлению желатина. В расплавленном желатине происходит интенсивная коагуляция дисперсных частиц, что вызывает значительный рост отражательной способности. В такой среде как запись, так и считывание осуществимы с помощью видимого и ближнего инфракрасного света.

4.3.4. Магнитооптическая фототермическая запись

Магнитооптический метод фототермической записи [194,195] основан на локальном нагреве магнитного слоя записывающим световым лучом для придания ему чувствительности к изменению направления намагниченности под воздействием внешнего магнитного поля. В результате на всем диске в экспонированных областях создаются домены, намагниченные в направлении, противоположном исходному. Считывание менее интенсивным светом, чем тот, который использовался для записи, осуществляется с использованием эффекта Керра, т. е. вращения плоскости поляризации света. Направление вращения зависит от направления намагниченности, что позволяет распознавать записанные данные.

Система записи, использующая эффект Керра, может работать в обратимом режиме. Стираемые диски имеют полимерную или стеклянную подложку, покрытую слоем фотополимера, на котором любым способом могут быть нанесены канавки и знаки форматирования. Несколько слоев, включая слой, используемый для записи данных, покрывают канавки. Этот слой расположен между двумя прозрачными диэлектрическими слоями, обеспечивающими оптическое усиление вращения плоскости поляризации, а также защиту слоя записи от нежелательных внешних воздействий. Слой записи выполнен из сплавов переходных и редкоземельных металлов, что придает ему способность намагничиваться.

Примером такого сплава является TbFeCo. Чистый диск имеет равномерную пространственную намагниченность. Одновременное воздействие внешнего магнитного поля (магнит размещается с противоположной стороны диска) и мощного (до 40 Вт) импульса лазерного облучения длительностью около 100 нс задает ориентацию магнитного поля, противоположную исходной, в месте записи.

Это изменение осуществляется при нагревании области слоя записи до сотен градусов Цельсия, что позволяет слою перестраиваться под действием внешнего магнитного поля. Новое расположение сохраняется, если область быстро охладить. Таким образом, области, подвергшиеся воздействию лазерного импульса, ориентируют намагниченность в направлении, отличном от направления областей, не подвергшихся воздействию импульса. Это вызывает положительное или отрицательное вращение плоскости поляризации отраженного слабого светового луча, используемого для считывания. Магнитооптическая головка (рис. 4.6) может регистрировать знак вращения.

Первый светоделитель в головке отражает весь свет, поляризованный в плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа, и пропускает около 80% света с ортогональной поляризацией. После взаимодействия с носителем информации свет отражается влево и проходит через второй светоделитель, который выделяет часть света для фокусирующих схем.

Основная часть луча, несущего информацию, проходит через полуволновую пластину, поворачивающую плоскость поляризации на 45° . После этого луч встречается с третьим светоделителем, который разделяет его на два. Эти лучи попадают на детекторы, соединенные электрической дифференциальной схемой. Схема вычитает из сигнала довольно большую постоянную составляющую и добавляет малые переменные составляющие.

Малый угол поворота плоскости поляризации в магнитооптической системе требует гораздо более сложной оптической системы в головках, чем в головках CD-ROM и WORM. Это является причиной широких исследований, которые в настоящее время ведутся с целью поиска новых материалов для записывающих слоев, которые обеспечивали бы значительно больший угол поворота плоскости поляризации.

Гранатовые пленки, легированные висмутом, входят в число новых материалов, хотя они еще не разработаны до необходимого уровня. Они

обеспечивают большой угол поворота плоскости поляризации и не очень чувствительны к коррозии, но их недостаток заключается в их значительной зернистости.

Исследования в направлении улучшения характеристик существующих магнитооптических материалов, а также поиска новых материалов продолжаются. В то же время ведется также разработка материалов, позволяющих изменять фазу отраженного считываемого света за счет воздействия записывающего луча. Среди материалов имеются аморфные сплавы селена, теллура и других элементов. Локальный нагрев области такого слоя лазерным импульсом выбранной длительности и мощности вызывает локальную кристаллизацию, что приводит к увеличению отражательной способности. Для обеспечения стирания используется мощный импульс меньшей длительности, переводящий материал в аморфное состояние.

Носители с изменением фазы отраженного луча обеспечивают более значимые сигналы, и можно использовать головку, значительно более простую, чем в магнитооптических дисках. Однако нельзя не учитывать тот факт, что они допускают лишь весьма ограниченное количество циклов записи/стирания.

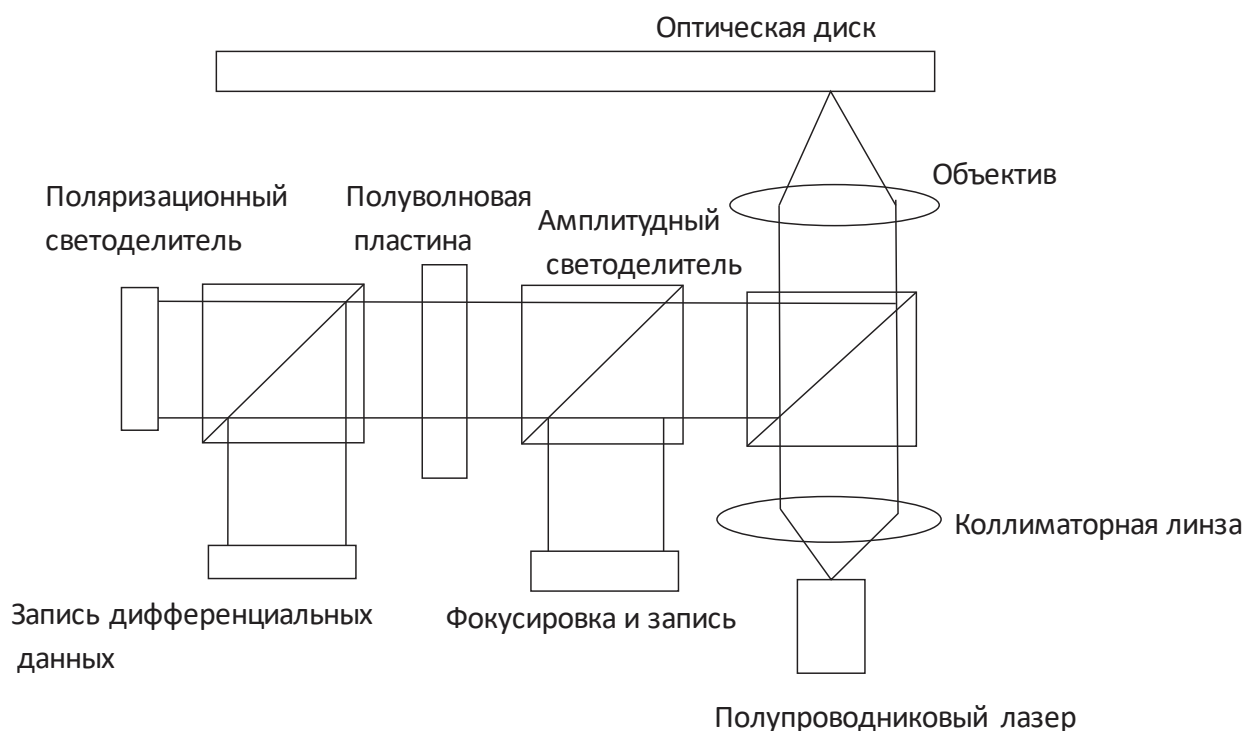


Рисунок 4.6. Схематическое изображение магнитооптической головки.

4.4. Зависимость времени ввода информации от процедуры записи.

Процедуры ввода информации в объемную среду различны для сред с разными характеристиками и зависят от методов мультиплексирования, принятых для конкретного голографического запоминающего устройства. В качестве примера рассмотрим процедуру ввода для дискового устройства, в котором в качестве записывающего устройства использовался фотополимер толщиной около 100 мкм. При этом для получения достаточно плотной записи информации (порядка 10 бит/мкм²), необходимо было кроме углового мультиплексирования воспользоваться перистрофическим мультиплексированием [196]. Скорость, с которой могут быть записаны данные на голографическом диске, если не учитывать издержки мультиплексирования, равна

$$V = N_p / t_h \quad (4.9)$$

Время записи t_h в ней определяется чувствительностью записывающей среды и желаемой дифракционной эффективностью на одну голограмму. Для использованного 100-мкм фотополимера на рисунке 4.7 представлена дифракционная эффективность как функция энергии экспозиции.

Данные рисунка 4.7 получены в результате интегрирования дифракционных эффективностей 50 плоскостолновых перистрофических голограмм, каждая из которых была экспонирована 7 мДж/см^2 с $\lambda = 320 \text{ нм}$ (снаружи 488 нм) и $\theta_r = \theta_s = 19.2^\circ$. Используемая записывающая среда была практически нечувствительной, пока предварительно не экспонировался свет плотностью приблизительно 35 мДж/см^2 . После этого проявляется квазилинейная характеристика записи, которая загибается и

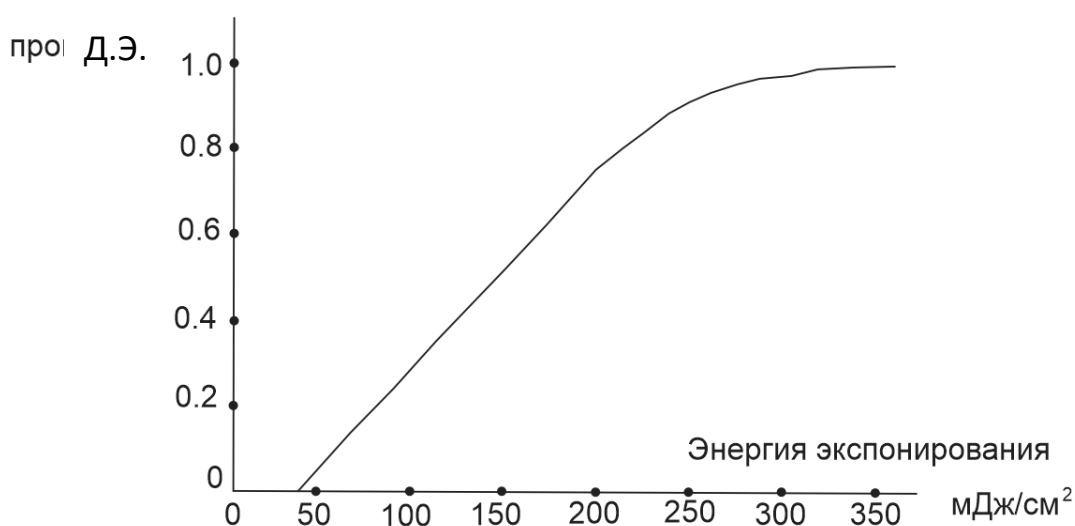


Рисунок 4.7. Зависимость дифракционной эффективности от энергии экспонирования фотополимера.

становится плоской по мере того, как материал приближается к насыщению при около 325 мДж/см^2 .

Это означает, что голограммы, записанные позднее, требуют большего времени экспозиции для получения той же дифракционной эффективности, по сравнению с голограммами, записанными ранее. Использовалась процедура записи, компенсирующую потерю силы решетки по мере приближения к

насыщению среды. Таким образом, использовался весь доступный динамический диапазон. График записи определялся с использованием корня квадратного из величины дифракционной эффективности, приведенной на рисунке 4.5, для получения необходимого размаха решетки голограммы как функции энергии экспозиции. Модуляция каждой голограммы, подлежащей мультиплексированию, может быть заранее определена, если энергия экспозиции распределена правильно по динамическому диапазону фотополимера между голограммами. Чтобы получить одинаковую дифракционную эффективность для всех голограмм, необходимая экспозиция для n -ой голограммы равна:

$$t_n = A_{sat} / M f(E_{n-1}) I \quad (4.10)$$

где t_n - время экспозиции для n -ой голограммы, A_{sat} - амплитуда насыщения, M - число мультиплексных голограмм, E_{n-1} - суммарная энергия экспозиции вплоть до $n-1$ -ой голограммы, и I - интенсивность экспозиции. Перед записью голограмм производится предварительное облучение среды энергией $E_0 = 35$ мДж/см² с тем, чтобы сделать среду более чувствительной.

На рисунке 4.6 представлен график экспозиции для 50 голограмм, рассчитанный по (4.10). Время экспозиции на одну голограмму увеличивается по мере насыщения пленки. Дифракционные эффективности тех 50 голограмм, которые были записаны по графику, представленному на рис.4.5, были более однородны, по сравнению со случаем, когда использовались одинаковые времена экспозиции, однако все же они не одинаковы. Это происходит оттого, что рассчитанное время экспозиции изменяет полную экспозицию, которую пленка получает перед n -ой экспозицией, по сравнению со случаем для графика равных экспозиций, с помощью которого рассчитывался (рисунок 4.8). Интересным побочным результатом записывающей процедуры является то, что амплитуда насыщения решетки увеличивается на несколько процентов в случае записи по графику.

При использовании графика записи время записи различно для каждой

страницы данных и поэтому скорость записи также меняется. Если используется буфер для хранения всех голограмм, которые должны быть записаны в одном месте, то подходящей мерой является средняя скорость записи.

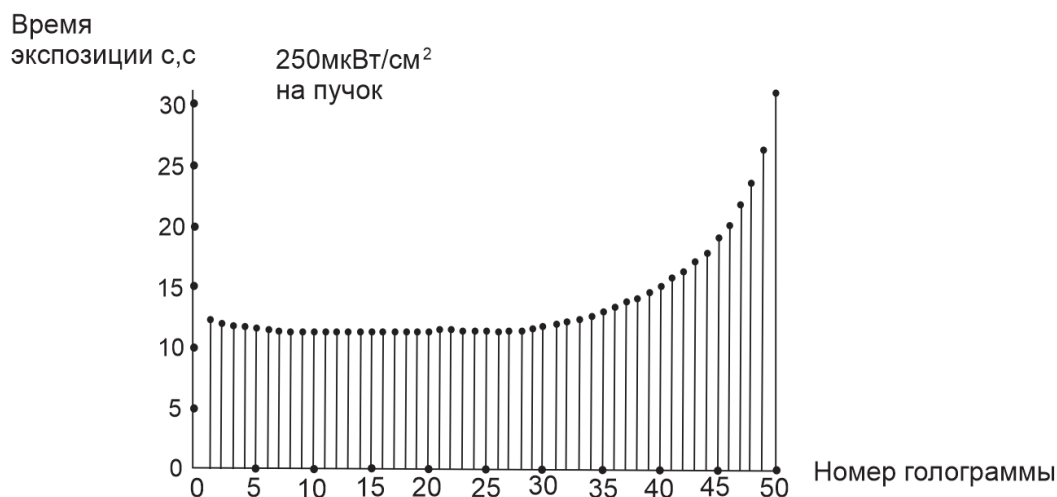


Рисунок 4.8. График экспозиции, вычисленный для 50 голограмм

При выборе времени экспозиции приходится сталкиваемся с обменом дифракционной эффективности на качество восстановления. Ясно, что если используется весь динамический диапазон записывающего материала, то дифракционная эффективность каждой из выровненных голограмм максимизируется. С другой стороны, качество восстановления ухудшается при использовании всего динамического диапазона. Это ухудшение имеет место при попытках записать данные с высокой плотностью в плоскости Френеля. Чтобы минимизировать этот эффект, желательно ограничить запись до приблизительно 30% от динамического диапазона среды.

Для других вариантов объемной памяти и применяемых методов мультиплексирования, процедура ввода информации может варьироваться и, соответственно может изменяться время, затрачиваемое на ввод информации в память.

4.5. Метод записи информации на фототермопласте

Один из методов создания высокопроизводительных голографических систем является сокращения время записи голографической информации и использование в качестве регистрирующих сред реверсивных фотоматериалов. В голографических устройствах в качестве реверсивных сред часто используются фототермопластические материалы. Процесс записи фототермопластических носителей обычно включает пред экспозиционную обработку (зарядка), времени экспозиции и после экспозиционную обработку (нагрев). В целях сокращения процесса записи нами предложена методика записи на фототермопластические носители позволяющая объединить процессы экспозиции и нагрева [197]. Данная методика может быть использованы как для хранения информационных массивов, так и для обработки изображений в реальном масштабе времени.

Обычно для регистрации изображений в инфракрасном диапазоне используют инфрахроматические фотоматериалы, максимум спектральной чувствительности которых в пределах 0,7-1,1 мкм. Инфрахроматические фотоматериалы имеют ряд недостатков такие как: сложность обработки, невозможность мгновенного доступа к записанным информациям, необратимость, зернистые шумы и сильный фоновый свет. Для регистрации излучения CO₂-лазера ($\lambda=10,6$ мкм) используется тонкие пленки висмута или парафина. Их механическая прочность сильно влияет на качество голограммы. В работе [198] для получение голограммы в инфракрасном диапазоне (10,6 мкм) использованы триацетат-целлюлозы (ТАЦ). Недостаткам этих материалов является необратимость записи.

На рисунке 4.9 приведена оптическая схема устройства реализующего предлагаемый способ. Устройство содержит лазер в ИК диапазоне 1, светоделитель 2, расщепляющий луч лазера 1 на два пучка, зеркало 3, линзу 4, коронатор 5 и ТП носитель 6, расположенный в первом пучке; линзу 7 и объект 8, расположенные во втором пучке.

Устройство работает следующим образом. Излучение ИК лазера 1 расщепляется с помощью светоделителя 2 на два пучка, один из которых имеет интенсивность J_1 , отражается от зеркала 3, расширяется линзой 4 и попадает на ТП носитель 6, а другой пучок, имеющий интенсивность J_2 , расширяется линзой 7, проходит через объект 8 и попадает на ТП носитель 6.

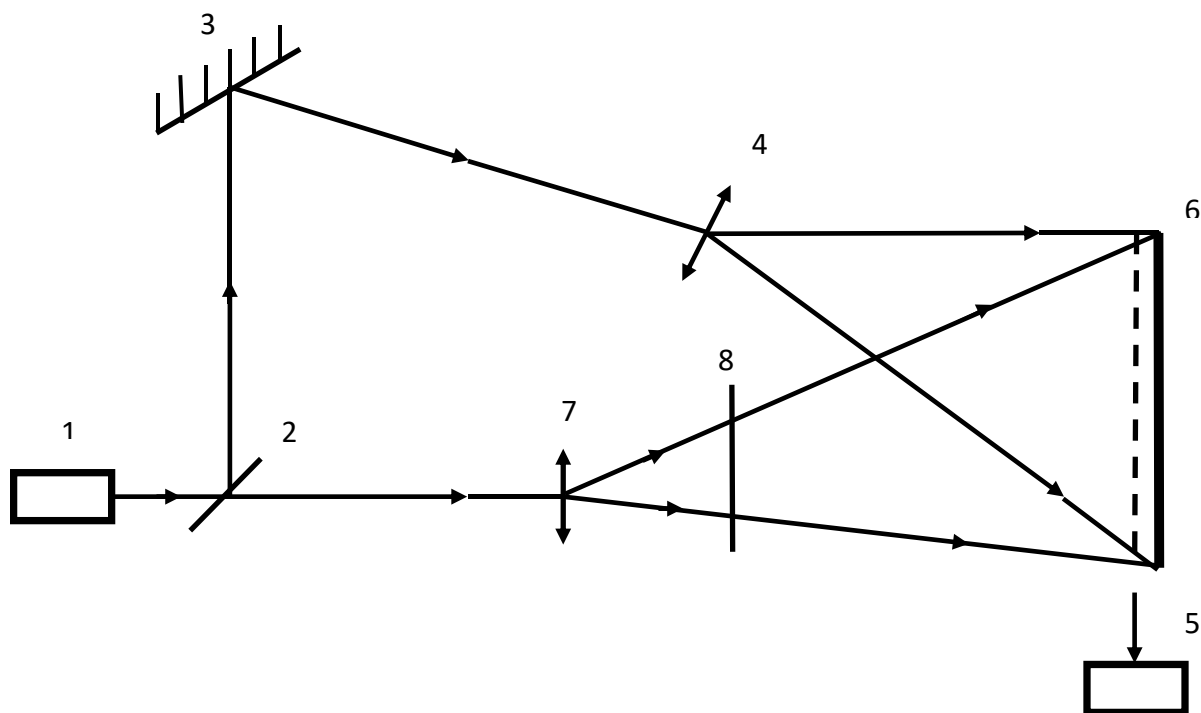


Рисунок 4.9. Устройство для записи информации на ТП носитель в ИК диапазоне: 1 - лазер; 2 - светоделитель; 3 - зеркало; 4,7 - линзы; 5 - коронатор; 6 - ТП-носитель; 8- объект.

Способ заключается в следующем. На поверхность ТП слоя наносят с помощью коронатора равномерный электрический заряд. Затем эту поверхность облучают одновременно двумя пучками ИК излучения, один из которых имеет равномерную по сечению интенсивность J_1 , а второй, несущий информацию пучок, имеет интенсивность $J_2(x,y)$. Интенсивности пучков J_1 и J_2 подбираются таким образом, чтобы обеспечить нагрев ТП слоя в диапазоне температур от T_1 до $T_1+\Delta T$. При этом деформация поверхности ТП слоя под действием приложенного электрического поля достигается не за счет пространственных

вариаций электрических сил, обусловленных неоднородным распределением зарядов, а за счет пространственной модуляции коэффициента поверхностного натяжения $\sigma(T)$, модуля сдвига $G(T)$ и других параметров ТП слоя, обусловленных вариациями интенсивности в несущем информацию ИК пучке.

Известно, что при облучении поверхности термопластического слоя ИК-излучением ее температура определяется формулой [199,200]:

$$T = 2J \frac{A\sqrt{at}}{\sqrt{\pi K}} \quad (4.11)$$

где J - интенсивность излучения;

A - поглощательная способность проводящего покрытия;

a - коэффициент температуропроводности стекла;

t - время воздействия;

K - эквивалентная теплопроводность пленки ТП + S_nO_2

Рассмотрим случай, когда нагрев пленки двумя некогерентными световыми пучками, а второй, несущий информацию пучок, имеет интенсивность $J_1(X, Y)$.

$$J_1 = \frac{T_1\sqrt{\pi K}}{2A\sqrt{at}} \quad (4.12)$$

Для того, чтобы температура слоя при его облучении одновременно двумя ИК пучками лежала в интервале от T_1 до $T_1+\Delta T$, интенсивность J_2 пучка, несущего информацию, должна лежать в диапазоне

$$0 < J_2 < \frac{\Delta T\sqrt{\pi K}}{2A\sqrt{at}} \quad (4.13)$$

Таким образом, одновременное освещение поверхности ТП двумя ИК пучками с интенсивностями J_1 и J_2 обеспечивает его нагрев до температуры, лежащей в диапазоне $T_1 < T < T_1+\Delta T$, что позволяет записывать оптическую информацию в ИК диапазоне на ТП носителя в виде деформации его

поверхности под действием приложенного электрического поля за счет пространственных вариаций физических параметров ТП слоя, зависящих от температуры. Тем самым достигается расширение диапазоны, в котором возможна регистрация информации. Реализация предложенного способа демонстрируется двумя примерами.

По схеме, приведенной на рисунке 4.9, записывался транспарант в виде прямоугольника (рисунок 4.10). В качестве ТП носителя выбран ПКС+3% ТНФ. С помощью коронатора на поверхность ТП носителя наносили равномерный заряд. Луч непрерывного СО₂-лазера ЛГ-74 ($\lambda=10,6\text{мкм}$) расщепляли германиевой пластиной. В качестве устройства управления записью было использовано устройство, описанное [197]. Наиболее качественная запись осуществлялось, когда интенсивности двух некогерентных пучков соотносились как 7:1, а суммарная мощность составляла 3 Вт, время экспонирования 10^{-4} к/м². Расчеты, проделанные по формуле (4.48), показывают, что T_1 и ΔT для данного термопластика составляют 57°C и 5°C соответственно.

Во втором примере проведено экспериментальное исследование записи дифракционной решетки, образованной в результате интерференции двух плоских волн, угол между которыми составлял 90° . На рис. 4.11 приведена схема проведения эксперимента. Излучение лазера 1 (ЛГ-74) расщепляется светоделителем 2 на два пучка; один из пучков с интенсивностью J_1 отражается от зеркала 3 и попадает на ТП слой 4, а другой пучок имеющий интенсивность J_2 отражается от зеркала 5 и попадает на ТП носитель 4. Устройство управления записью на ТП носитель 8 управляет длительностью зарядки и экспонирования. Качество записи контролировалось дифрагированием луча лазера в видимом диапазоне ЛГ-38 ($\lambda=0,63\text{мкм}$) через упомянутую дифракционную решетку.

В случае нагрева ТП слоя двумя когерентными световыми пучками должны выполняться соотношения:

$$J_{min} = J_1 + J_2 - 2\sqrt{J_1 J_2} \geq \frac{T_1 \sqrt{\pi k}}{2A\sqrt{at}} \quad (4.14)$$

$$J_{max} = J_1 + J_2 + 2\sqrt{J_1 J_2} \leq \frac{(T_1 + \Delta T)\sqrt{\pi k}}{2A\sqrt{at}}$$

откуда

$$J_1 = \frac{\sqrt{\pi k}}{8A\sqrt{at}} \left[2T_1 + \Delta T + 2\sqrt{T_1(T_1 + \Delta T)} \right] \quad (4.15)$$

и

$$0 \leq J_2 \leq \frac{\sqrt{\pi k}}{8A\sqrt{at}} \left[2T_1 + \Delta T + 2\sqrt{T_1(T_1 + \Delta T)} \right] \quad (4.16)$$

Интенсивность восстановленной волны измеряли с помощью фотодиода ФД-24К и прибора ФІ95. С помощью фильтра І0 изменяли соотношение интенсивностей J_2 и J_1 .

На рисунке 4.12 приведен график зависимости дифракционной эффективности восстановленной волны от J_2/J_1 при различных временах экспонирования. Для данного типа ТП слоя T_1 начинается от 60° , а ΔT находится в пределах $0-5^\circ\text{C}$.



Рисунок 4.10. Фотография восстановленного изображения с ТП-носителя

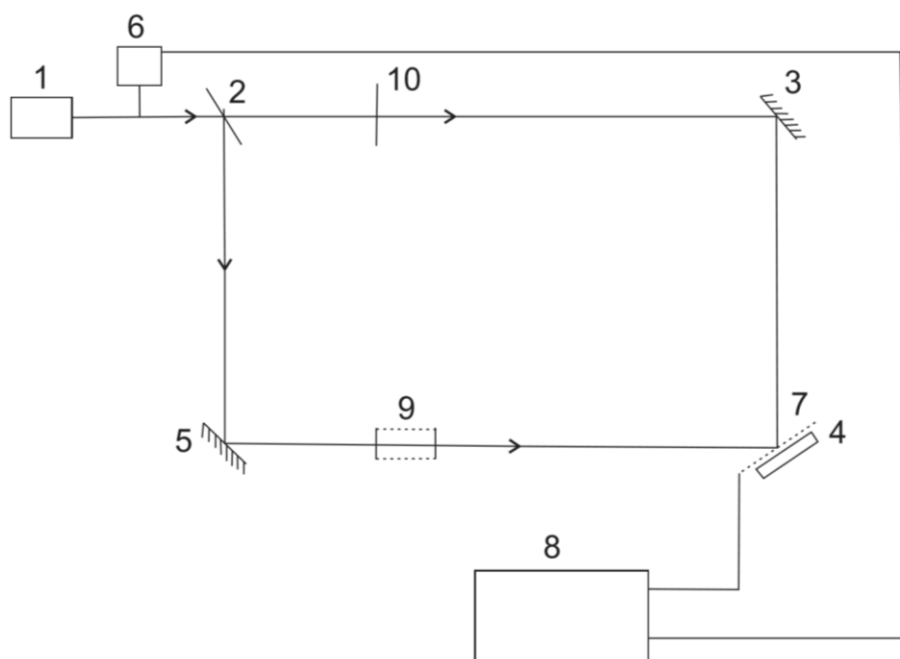


Рисунок 4.11. Схема записи дифракционной решетки на ТП носитель:

1 - лазер; 2 - светоделитель; 3,5 - зеркало; 4 - ТП носитель; 6 - прерыватель пучка; 7 - коронатор; 8 - устройство управления записью; 9 - He-Ne – лазер; 10 - фильтр.

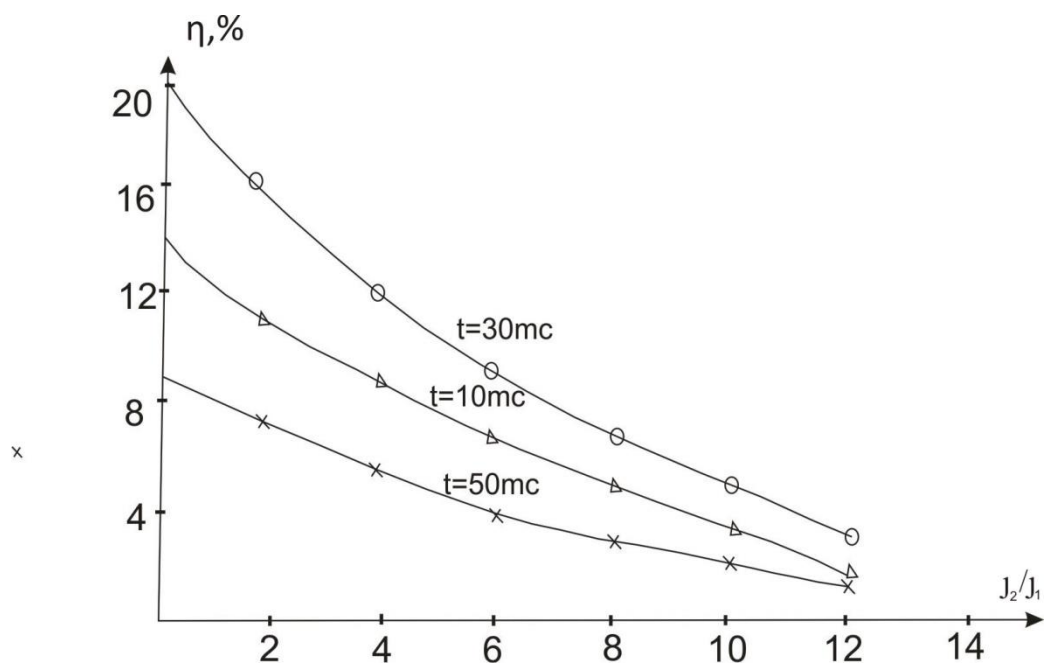


Рисунок 4.12. График зависимости $\eta(J_2/J_1)$ при различных t_3 .

На рисунке 4.13 приведен график зависимости ДЭ от времени зарядки t_3 при $t_{\text{экс}} = 30$ мс. Из графика видно, что при достижении определенного значения плотности заряда (для данного ТП слоя $\sigma = 10^{-4}$ к/м²) наступает уменьшение ДЭ. Это связано с появлением морозного шума. Максимальная дифракционная эффективность ТП носителя составляла $\eta = 20\%$ при $t_{\text{экс}} = 30$ мс и $\sigma = 10^{-4}$ к/м².

Таким образом, одновременное освещение поверхности ТП носителя двумя ИК пучками с интенсивностями J_1 и J_2 , удовлетворяющими соотношениям (4.49) и (4.50), в случае когерентных пучков, обеспечивает его нагрев до температуры, лежащей в диапазоне от T_1 до $T_1 + \Delta T$, что позволяет записывать оптическую информацию в ИК диапазоне на ТП носителя в виде деформации его поверхности под действием приложенного электрического поля за счет пространственных вариаций физических параметров ТП слоя, зависящих от температуры.

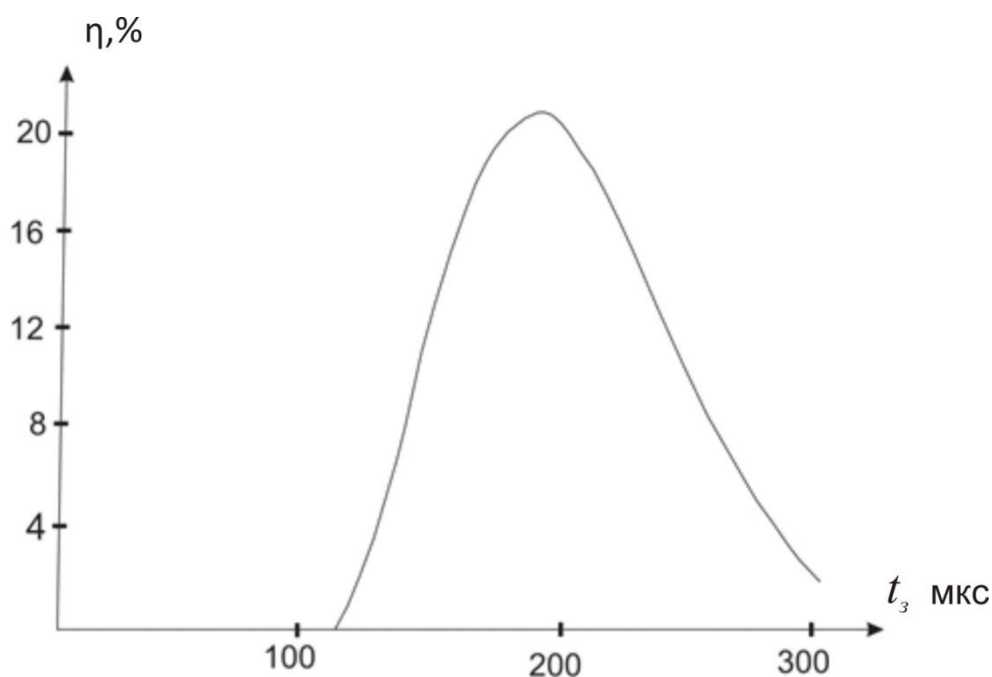


Рисунок 4.13. График зависимости ДЭ $\eta(t_3)$ от времени зарядки

При использовании предлагаемого способа в голографической интерферометрии в десятки раз расширяется ее предел измерения, а также значительно сокращается время регистрации голографической информации.

Выводы к главе 4

1. Исследования временных изменений объектов и происходящих процессов голографическим методом могут быть произведены только с учетом временных задержек прохождения информации в голографическом устройстве.

2. Основные источники увеличения времени задержек прохождения информации связаны с работой ПВМС, дефлекторов, используемых при адресации, процессом записи в матрицу голограмм и процессом преобразования восстановленного набора данных или изображения в электрический сигнал на матрице фотодетекторов.

3. Эти источники могут быть частично компенсированы лучшим выбором компонент голографического устройства, подбором взаимозависимых параметров набора голограмм, и использованием допустимой одновременности в работе компонентов.

4. Рассмотрены особенности носителей, приемлемых для записи голограмм, а также их различия в отношении механизма и характеристик записи. Особое внимание уделено производительности процессов записи во временной области. Изменения, возникающие при хранении голограмм и восстановлении изображений с записанных голограмм, также являются объектами нашего внимания. Различия в механизмах и кинетике записи голограмм позволяют голографически решать различные задачи

5. Методика записи информации на фототермопластические носители с предварительным подогревом при использовании инфракрасного лазера значительно сокращает времени регистрации голографической информации.

6. Исследованы процессы светоиндуцированной тепловой полевой модуляции оптических параметров в средах для фототермической записи. Рассмотрена применимость метода для записи голограмм. Также уделено

внимание процессам, вовлеченным в побитовую фототермическую и магнитофототермическую запись.

ГЛАВА 5. РЕГИСТРАЦИЯ ВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ АКУСТООПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

5.1. Информационная метрология акустооптических перестраиваемых фильтров

Акустооптические перестраиваемые фильтры (АОПФ), помимо прочих функций, позволяют осуществлять многоспектральную обработку изображений. Это означает, что АОПФ обрабатывают информацию во времени, пространстве и диапазоне длин волн. Оптимизация обработки информации с помощью устройств требует особого подхода к метрологии. В настоящей работе подход, разработанный предварительно для других акустооптических устройств, распространяется на АОПФ [199]. Показано, что селективность по длине волны АОПФ можно определить как расстояние между двумя разрешимыми спектральными линиями, в которых с заданной вероятностью можно распознать определенное количество уровней серой шкалы. Экспериментальное определение селективности по длине волны гораздо сложнее, чем определение пространственной или временной селективности. Разработана аппаратура для выполнения этой сложной задачи. Представлены результаты измерений.

Как и другие акустооптические устройства, акустооптические перестраиваемые фильтры (АОПФ) предназначены для обработки и передачи информации. Однако в АОПФ полезная информация вводится иным способом, чем в других акустооптических устройствах [200]. Все данные вводятся в АОПФ с помощью падающего светового луча, тогда как в таком устройстве, как акустооптический анализатор спектра (АОПС), на вход подается электрический сигнал, который через пьезоэлектрический преобразователь подается на ячейку Брэгга. АОПФ также имеет электрический вход, но он предназначен только для служебной информации. Эта информация заранее известна и используется для определения закона, по которому обрабатываются входные оптические данные.

В то же время форма обработки информации АОПФ и АОПС различна. В последнем случае мы рассматриваем зависимость интенсивности света от

пространственной координаты и времени как обработанную информацию, т. е. изучаем мгновенные представления спектра входного сигнала, а также их изменение во времени. В первом случае временная зависимость интенсивности света содержит обработанную информацию, и каждому моменту соответствует определенное значение длины волны входного света. Конечно, это происходит только в том случае, если АОПФ не обрабатывает изображения с пространственно распределенной интенсивностью света.

Основной физической характеристикой, определяющей возможности обработки АОПФ, является селективность по длине волны. Ее определение было предметом изучения еще на самом раннем этапе развития АОПФ [201-203]. Однако она не была связана со способностью передавать определенное количество информации. Тем не менее, информационный критерий разрешающей способности (в пространственной и частотной области) был разработан [204,205]. Задача состоит в том, чтобы применить используемый подход к определению селективности АОПФ.

5.1.1. Принципы информационной метрологии акустооптических приборов

Такие акустооптические приборы, как дефлекторы, анализаторы спектра и некоторые другие, можно охарактеризовать разрешающей способностью (количеством разрешенных пятен) как основным параметром, показывающим их возможности по обработке информации. Этот параметр принято представлять как произведение времени на полосу пропускания $N = \tau \Delta f$, где τ — временная апертура прибора, т. е. время, необходимое для пересечения фронтом акустической волны апертуры падающего светового пучка, а Δf — полоса частот прибора. Это соотношение получено исходя из угловой расходимости светового пучка [206]. Но угловая расходимость обычно тесно связана с критерием Рэлея, который ограничивает угловую ширину пучка расстоянием между двумя нулями, соседними с главным максимумом в дальнем поле.

Для того чтобы обеспечить связь между количеством передаваемой информации и критерием разрешающей способности, ранее был предложен другой критерий [[204,205], согласно которому два пятна считаются разрешенными, если в каждом из них с вероятностью, не меньшей заданной, можно распознать определенное количество уровней серого.

На практике метод измерения разрешающей способности по этому информационному критерию включает следующие шаги:

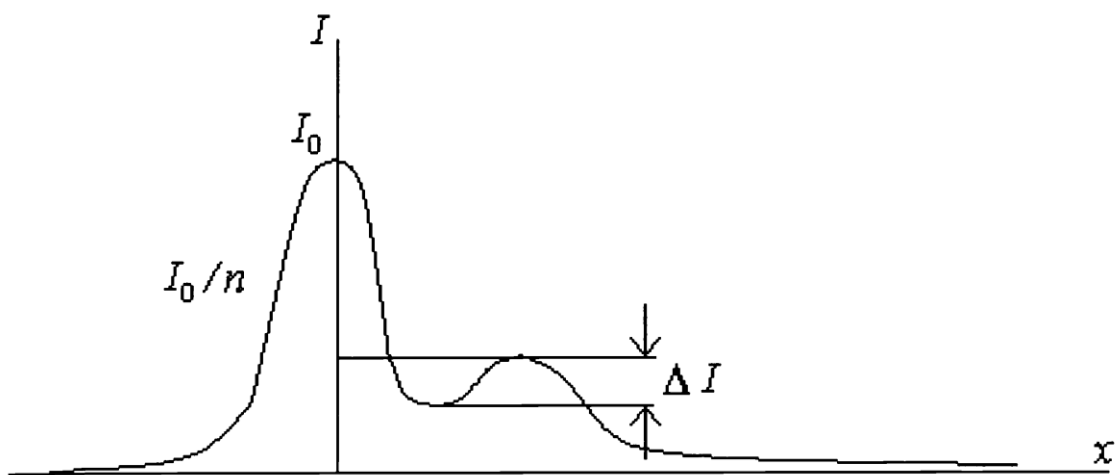


Рисунок 5.1. Форма распределения интенсивности света при измерении разрешающей способности акустооптического прибора по информационному критерию.

1. На устройство подается сигнал, содержащий две соседние частоты; одна компонента сигнала, соответствующая первой частоте, имеет максимальное значение, а значение второй компоненты в n раз меньше, причем n — это число уровней серой шкалы, которые должны быть переданы. Можно найти плоскость распределения интенсивности света фотодетекторной матрицы, подобную той, что показана на рисунке 5.1. Мы исходим из того, что световой луч имеет гауссово поперечное сечение.

2. Значение ΔI измеряется много раз для получения статистических данных.

3. Вычисляется среднее значение ΔI_{cp} , стандартное отклонение $\sigma_{\Delta I}$. Мы ожидаем, что измеренные значения распределены по нормальному закону.

4. Мы считаем соседние точки распознанными, если долина между ними видна больше нуля. Ее вероятность вычисляется из выражения

$$p = \int_0^{\infty} \exp[-m(y - \Delta I_{cp})^2 \Psi^2 / \Delta I_{cp}^2] dy, \quad (5.1)$$

где $\psi = \Delta I_{cp} / \sigma_{\Delta I}$ — отношение сигнал/шум. Следовательно, если вероятность распознавания задана заранее, можно найти необходимое значение ΔI_{cp} .

5. Расстояние между двумя пиками, показанными на рисунке 1, определяет разрешающую способность. Поскольку изображенная кривая может быть описана

$$I = I_0 \exp(-x^2/\sigma^2) + (I_0/n) \exp[-(x - x_1)^2/\sigma^2], \quad (5.2)$$

где x_1 — координата второго пика, а σ — стандартное отклонение гауссовой кривой, описывающей распределение интенсивности в поперечном сечении светового пучка. Расстояние между двумя пиками x_1 и ΔI взаимозависимы. Однако эта зависимость не может быть представлена аналитически. Ранее введен специальная функция «долины» для описания взаимозависимости [205]:

$$\Delta I = I_0 V_n(x_1/2\sigma). \quad (5.3)$$

Эта функция была рассчитана и сведена в таблицу для различных чисел уровней серой шкалы n , и теперь, зная ΔI , можно найти значение x_1 .

В действительности, если мы подадим на акустооптическое устройство две частоты, и если полученная вероятность распознавания окажется лучше ожидаемой, необходимо провести еще одну последовательность измерений с двумя частотами, расположенными ближе друг к другу, чем в предыдущем случае. Расстояние между двумя пиками, соответствующими заданной

вероятности распознавания, определяет фактическую разрешающую способность.

5.1.2. Применение информационной метрологии к акустооптическим настраиваемым фильтрам

Избирательность АОПФ нельзя измерить точно так же, как описано в разделе 2 для АОПС. Теперь различные выбранные компоненты светового луча не разделены в пространстве. Как правило, измерения в пространстве можно заменить последовательными измерениями во времени. Однако тогда потребуется дорогостоящий источник света с непрерывным изменением длины волны. Мы предлагаем полуэмпирический метод, в котором может быть использован стандартный лазер с неизменной длиной волны. Метод включает в себя следующие операции:

1. АОПФ освещается светом от лазера, излучающего на определенной длине волны, тогда как на ячейку Брэгга подается сигнал с частотой, соответствующей условию Брэгга.

2. Измерение интенсивности света выполняется в первом порядке дифракции с помощью одного фотодетектора, например, фотодиода.

3. Частота сигнала смещается на небольшую величину, и измерение интенсивности света выполняется снова. Процедура повторяется до момента, когда интенсивность света, подлежащая измерению, станет близкой к нулю.

4. Измерения повторяются с целью получения статистических данных.

5. Получается кривая усредненных данных.

6. Угол падения изменяется на величину, соответствующую ситуации, при которой частота, смещенная на величину δf , удовлетворяет условию Брэгга. Операции 2—5 повторяются.

7. Суммируются две кривые, полученные по пункту 5. Общая кривая выглядит так, как показано на рисунке 5.2. Значение сигнала вычисляется как глубина впадины между двумя пиками.

8. Шум вычисляется как геометрическая сумма стандартных отклонений для обеих кривых в точке минимума общей кривой.

9. Определяется отношение сигнал/шум; как и в п. 2, его можно определить независимо от того, разрешены ли две длины волн, отличающиеся друг от друга на δf , или нет.

10. Если две длины волны распознаны, измерения и вычисления повторяются с $\delta f_1 < \delta f$. Если они не распознаны, новые измерения выполняются при $\delta f_1 > \delta f$. Критическое значение δf представляет селективность АОПФ.

Рассматриваемый метод не учитывает возможные уровни серой шкалы в измеренных спектральных линиях. Если устройство должно их распознавать, необходимо включить неселективный светофильтр, чтобы подавить один из измеренных пиков в n раз.

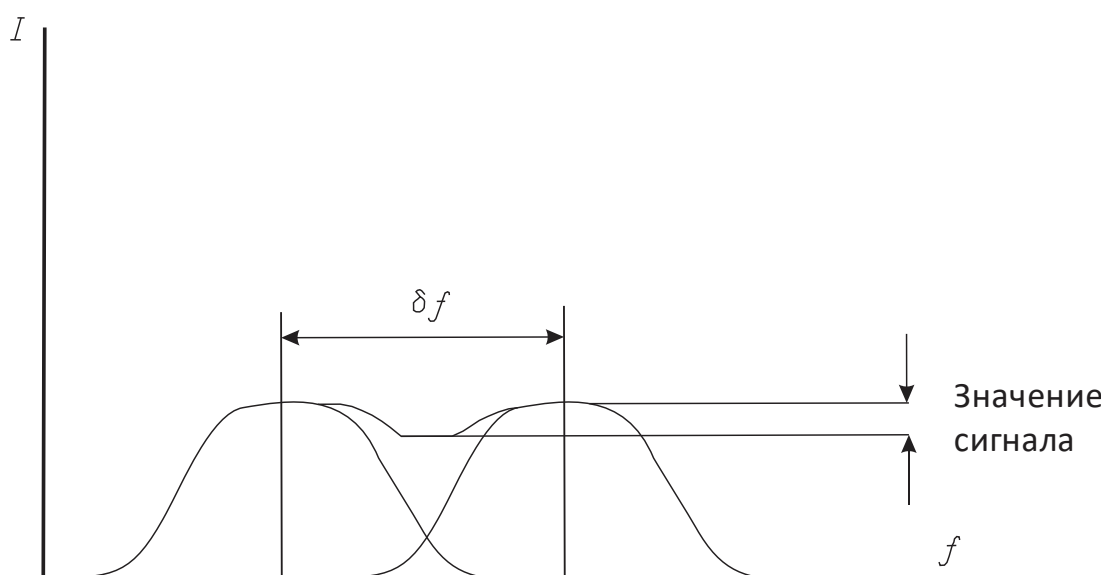


Рисунок 5.2. Форма распределения интенсивности света при измерении разрешающей способности АОПФ по длинам волн согласно информационному подходу.

5.1.3. Экспериментальная реализация информационной метрологии АОПФ

Используя метод, рассмотренный в разделе 3, была измерена селективность АОПФ с неколлинеарным взаимодействием.

Устройство было построено в нашей лаборатории. Оно включает ячейку Брэгга на основе монокристалла TeO_2 . Кристаллографическая конфигурация, принятая для неколлинеарного взаимодействия, показана на рисунке 5.3. Эта геометрия обеспечивает нормальное падение света на переднюю грань кристалла. В устройстве реализована анизотропная дифракция [207]. Длина акустооптического взаимодействия составила около 6,5 мм, а акустическая скорость 660 м/с.

Следует учитывать, что зависимость длины волны от частоты сигнала для случая, когда точно выполняется условие Брэгга, является нелинейной. Эта зависимость представлена на рисунке 5.4.

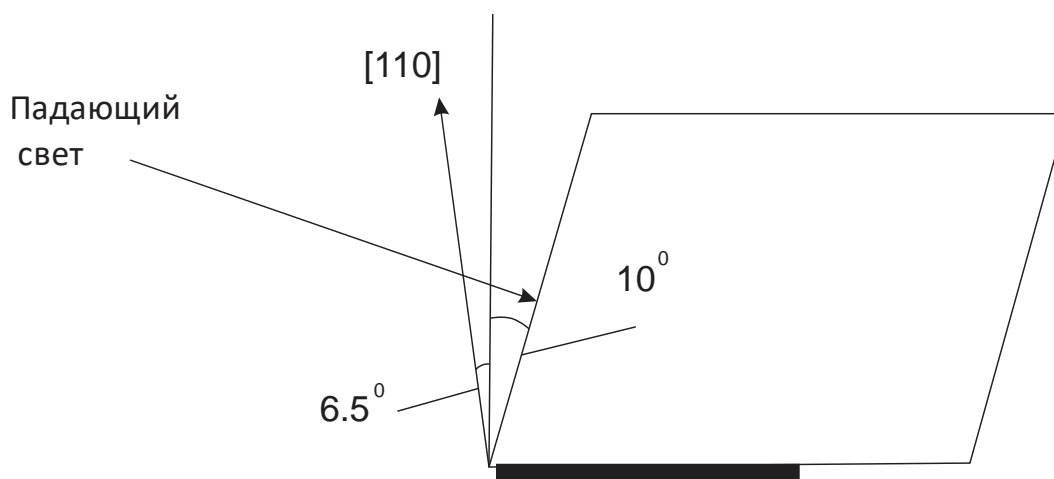


Рисунок 5.3. Кристаллографическая конфигурация ячейки Брэгга АОПФ.

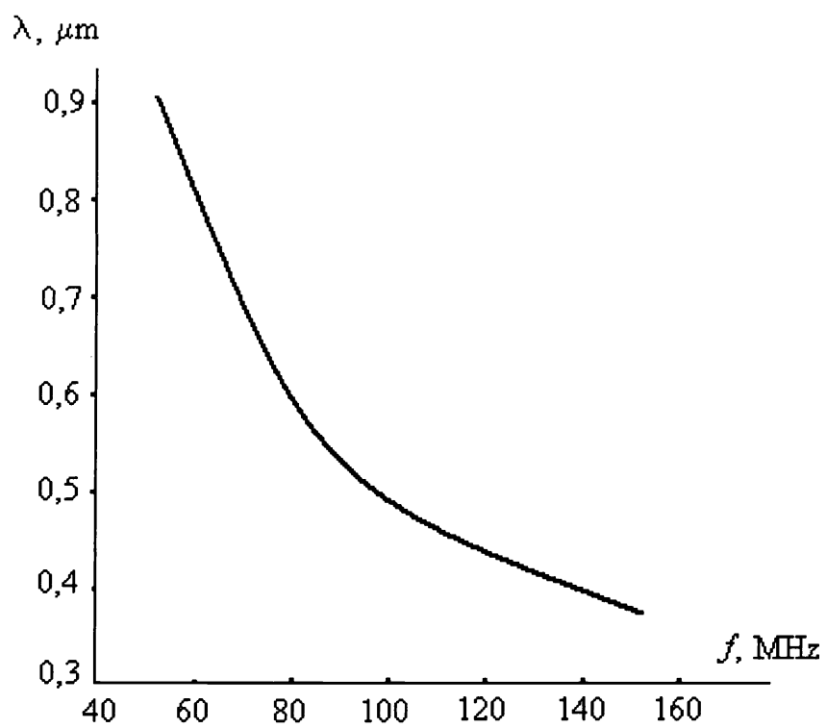


Рисунок 5.4. Зависимость выбранной длины волны от частоты сигнала для случая, когда выполняется условие Брэгга.

Для проведения описанных выше измерений была разработана установка, схематически представленная на рисунке 5.5

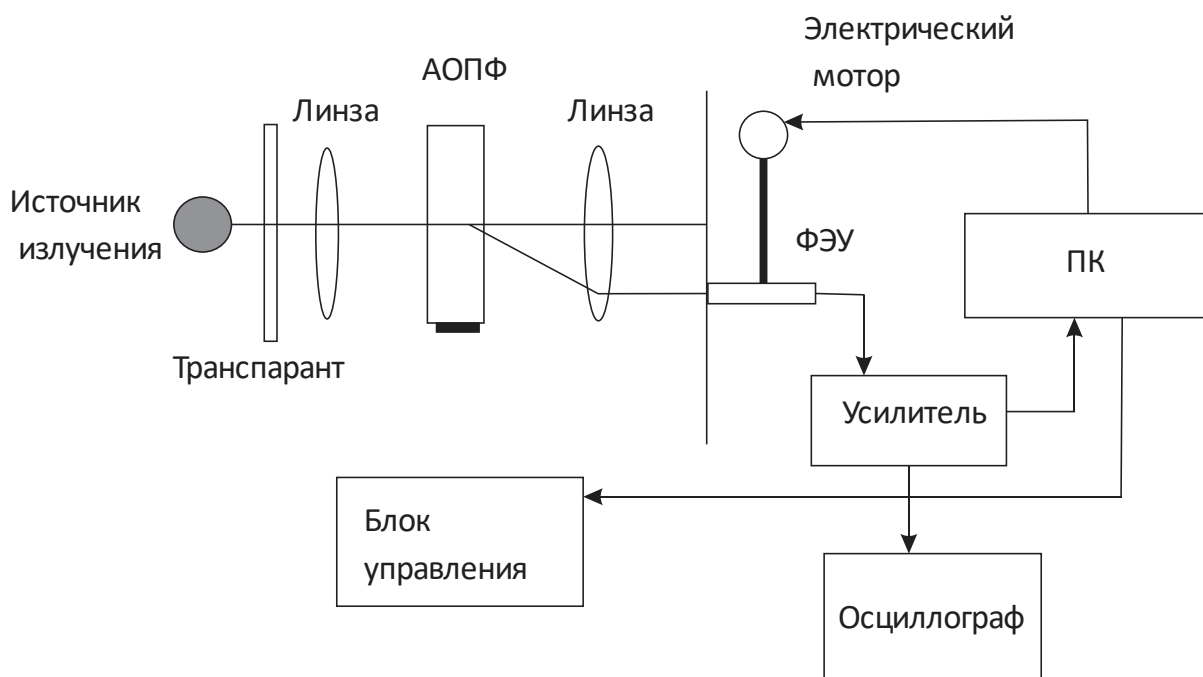


Рисунок 5.5. Установка для измерения спектральных и пространственных характеристик АОПФ.

Установка позволяет изучать не только спектральные, но и пространственные характеристики АОПФ. Здесь мы описываем только спектральные измерения, в которых не используется прозрачность, показанная на рисунке 5.5. В экспериментах источниками света были сменные полупроводниковые лазеры. Измерения интенсивности света проводились с помощью фотоумножителя, расположенного с управляемым ПК шаговым двигателем. Результаты измерений сведены в таблицу 5.1. Результаты соответствуют вероятности пропуска одного бита 2,3% или отношению сигнал/шум 2.

Таблица 5.1. Селективность АОПФ для различных значений длины волны и различного количества уровней серой шкалы.

λ, nm	$\Delta\lambda_1, \text{nm}$	$\Delta\lambda_2, \text{nm}$	$\Delta\lambda_3, \text{nm}$	$\Delta\lambda_4, \text{nm}$
700	6,80	8,39	9,12	9,64
600	3,71	4,58	4,98	5,26
510	2,23	2,74	2,99	3,16
450	1,44	1,78	1,94	2,05

Значения в столбце $\Delta\lambda_1$ соответствуют передаче двоичного сигнала, тогда как значения в столбцах $\Delta\lambda_2$, $\Delta\lambda_3$ и $\Delta\lambda_4$ — передаче 4, 6 и 8 уровней серой шкалы.

Разработан метод измерения спектральной селективности АОПФ, который учитывает передачу каждого бита информации с заданной вероятностью. Этот информационный подход к метрологии АОПФ является развитием подхода, разработанного ранее для других видов акустооптических устройств. Представленный метод охватывает только часть информационного спектра падающих светонесителей. Он выгоден только для спектрометрических АОПФ. Что касается АОПФ, обеспечивающих многоспектральную обработку изображений, метод следует расширить, включив обработку переданной пространственной информации. Разработанный аппарат может быть

использован и в этом случае, и полученные результаты будут представлены в другом месте.

5.2. Взаимосвязь динамического диапазона и информационной емкости акустооптических устройств

Информационная емкость акустооптических устройств зависит как от их разрешающей способности, так и от числа распознаваемых уровней серого. Наименьшая определяется динамическим диапазоном устройства. При этом разрешающая способность зависит от числа уровней серого. Таким образом, между динамическим диапазоном устройства и его информационной емкостью существует достаточно сложная взаимосвязь. Эта взаимосвязь и является предметом изучения в настоящей работе. Тесная, но не одинаковая взаимосвязь имеет место между объемом передаваемой информации и числом уровней серого обрабатываемого сигнала. Исследование этих взаимосвязей проведено исходя из информационного критерия разрешающей способности акустооптического устройства [208]. Показано, что существует оптимальное число уровней серого, при котором акустооптическое устройство может передать максимальный объем информации. Это оптимальное число зависит от допустимой вероятности отказа, а также от уровня шума. Полученные и обсуждаемые экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетами, выполненными исходя из информационного критерия разрешающей способности устройства.

Количественное представление информации было введено Шенноном и Уивером для целей теории связи [209]. Поскольку оптические устройства имеют дело с информацией, представленной в оптической форме, необходимо рассмотреть, как распределяется информация в изображениях.

Процедура получения информации в пространственно распределенной оптической форме может быть представлена экспериментом с некоторой начальной неопределенностью, т. е. априорной энтропией $H_{анр}$. Если принять, что вероятности получения каждого уровня отклика равны друг другу, и если

информация распределена в изображении с N элементами (пространственными и спектральными), и эти элементы статистически независимы, то из теории Шеннона следует, что информация, полученная в результате эксперимента, равна

$$I = N \log_2(m + 1), \quad (5.4)$$

где m — количество распознаваемых уровней серой шкалы (выше нулевого уровня).

Система, предназначенная для обработки световой информации, может быть описана некоторыми информационными характеристиками, которые должны быть сопоставлены с характеристиками объекта, чтобы минимизировать потери информации. Основной характеристикой, определяющей возможности системы по транспортировке информации, является пропускная способность информации. Эта величина измеряется в битах в секунду.

Для характеристики способности системы (или ее отдельного блока) собирать информацию можно использовать такой параметр, как информационная емкость. Количественно она равна максимальному объему информации, которая может одновременно содержаться в системе. Эту характеристику можно в общем виде описать выражением (5.4).

Иногда эти характеристики некорректно отражают информационные возможности системы [210]. Данные могут быть получены системой в таком виде, что система не может их все включить, несмотря на то, что информационная емкость системы (измеряемая в битах) позволяет это сделать. В этом случае требуются дополнительные преобразования информации для ее преобразования в такой вид, который позволил бы компактно включить информацию в систему.

Наиболее распространенным случаем данной ситуации является следующий. Будем считать, что система способна принимать данные, содержащиеся в изображении с N_1 элементами и m_1 уровнями серого. Однако

внешняя информация содержится в изображении с N_2 элементами и m_2 уровнями серого. Предположим также, что $N_1 = aN_2$, $m_1 = bm_2$, где $a > 1$, $a < b < 1$. Это означает, что система может принять объем входной информации, выраженный как

$$I_{np} = N_2 \log_2(m_1 + 1) = N_2 \log_2(bm_2 + 1). \quad (5.5)$$

Потери информации в этом случае можно выразить как

$$I_{nom} = N_2 \log_2(m_2 + 1) - N_2 \log_2(bm_2 + 1) \approx N_2 \log_2(1/b). \quad (5.6)$$

Это выражение получено для случая, если $m_2 \gg 1$.

Из всего вышесказанного следует, что для устранения или минимизации потерь информации необходимо обеспечить оптимальное соотношение между N и m -компонентами информационной емкости прибора. Однако разрешающая способность прибора и его способность распознавать уровни серой шкалы часто зависят друг от друга. Далее мы рассмотрим эту взаимосвязь для акустооптических приборов.

5.2.1. Влияние шкал серого на разрешающую способность акустооптических приборов

Если разрешающая способность акустооптического прибора оценивается по критерию Рэля, то шкала серого вообще не принимается во внимание. Однако легко показать, что при необходимости передачи шкалы серого критерий Рэля становится неприменимым. Более того, даже если не нужно передавать ни одной шкалы серого, применимость критерия Рэля ограничена [211].

Действительно, если необходимо передать двоичный сигнал через устройство, например, акустооптический анализатор спектра (АОСА), два соседних пятна можно различить на расстоянии, которое должно зависеть от уровня шума. С другой стороны, критерий Рэля означает, что долина между двумя пиками различаемых пятен должна иметь значение около 20%. Но на практике вероятность распознать это значение зависит от уровня шума.

Рассмотрим подробнее влияние шкалы серого на разрешающую способность устройства. Если световой луч, отклоненный и модулированный в АОСА, имеет гауссово сечение, а одно из соседних отклоненных пятен имеет в m раз большую интенсивность, чем другое, распределение интенсивности света в дальней зоне можно выразить (в 1-мерном приближении) как

$$I = I_0 \exp(-x^2/\sigma^2) + (I_0/m) \exp[-(x - x_1)^2/\sigma^2], \quad (5.7)$$

где σ — стандартное отклонение обеих гауссовых функций (очевидно, что оно должно быть одинаковым для обеих), x — координата в плоскости дальней зоны, а x_1 — расстояние между этими двумя пиками в этой плоскости.

Чтобы разрешить два пятна, мы должны наблюдать долину между ними. Согласно предложенному ранее критерию [211], эти пятна считаются разрешаемыми, если эта долина наблюдается с заданной заранее вероятностью. Эту долину можно найти как ΔI из рисунка 5.1, где представлено распределение интенсивности света в дальней зоне.

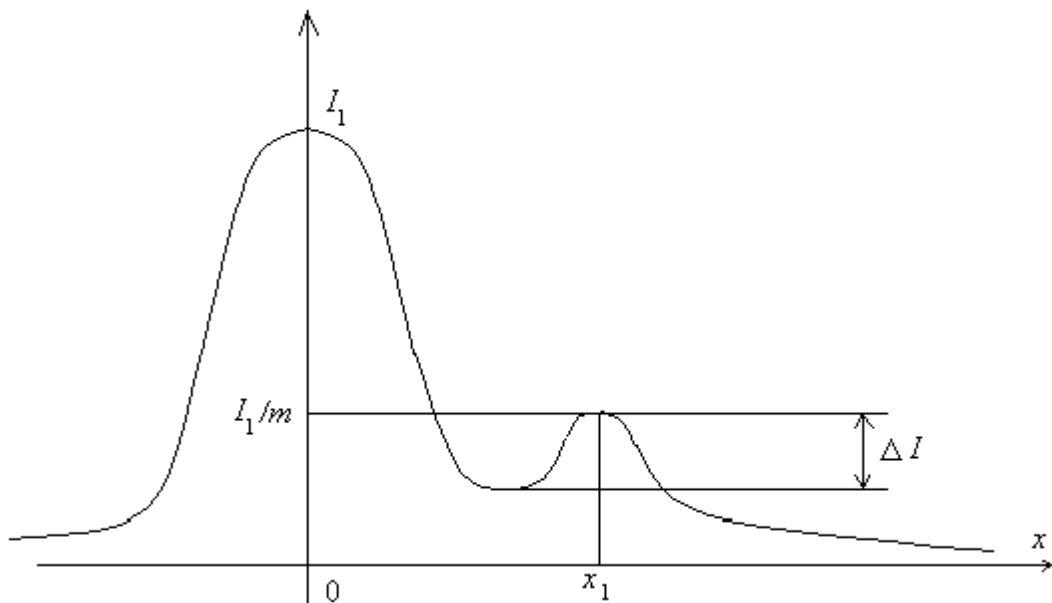


Рисунок 5.4. Распределение интенсивности света в дальней зоне АОСА, если необходимо разрешить два пятна разной интенсивности

Если ΔI слишком мало, чтобы быть распознанным в присутствии шума, очевидно, что два пятна должны быть раздвинуты, чтобы их можно было

различить. Зависимость разрешающей способности от количества уровней серой шкалы может быть выведена из этого факта.

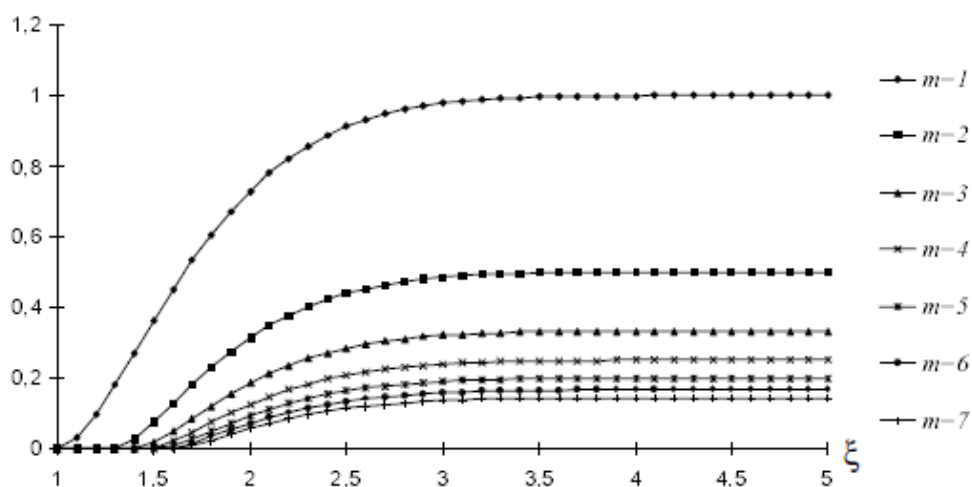


Рисунок 5.5. Семейство функций долины с параметром m как число уровней серой шкалы

Эту зависимость можно рассчитать. Для того чтобы выразить ΔI аналитическим способом, необходимо взять производную от выражения (4) и приравнять ее к нулю. Значение ΔI можно представить как разность третьих и вторых корней этого уравнения. Для упрощения расчетов ΔI была предложена специальная функция долины $V_m(\xi)$, согласно которой

$$\Delta I = I_0 V_m(x_l/\sigma). \quad (5.8)$$

Аргумент функции долины ξ — относительное расстояние между двумя пиками. Было рассчитано семейство функций долины для различных количеств уровней серой шкалы m , и эти функции построены на рисунке 5.5.

Следовательно, если полная световая линия, образованная в AOSA всей полосой частот в плоскости дальней зоны, равна L , то общее количество разрешимых пятен равно $N = L/x_l$. Из выражения (5.8) следует, что x_l зависит от m . Величина ΔI определяется допустимой вероятностью потери единицы информации и отношением сигнал/шум. Из всего вышеизложенного следует, что зависимость количества разрешимых пятен от количества уровней серой шкалы

является односторонней и может быть рассчитана для заданных значений отношения сигнал/шум и вероятности отказа.

5.2.2. Зависимость информационной емкости АОСА от количества уровней серости

Выражение (5.4) определяет зависимость информационной емкости устройства от количества уровней серой шкалы m . Как было показано в предыдущем разделе, количество разрешимых пятен N также зависит от m . Более того, N становится меньше с ростом m . Следовательно, должно существовать оптимальное значение m , при котором информационная емкость имеет максимальное значение [212].

Чтобы проверить это предположение, мы провели эксперимент, используя ту же экспериментальную установку, которая использовалась для информационного критерия разрешающей способности АОСА [211]. Он показан на рисунке 5.6.

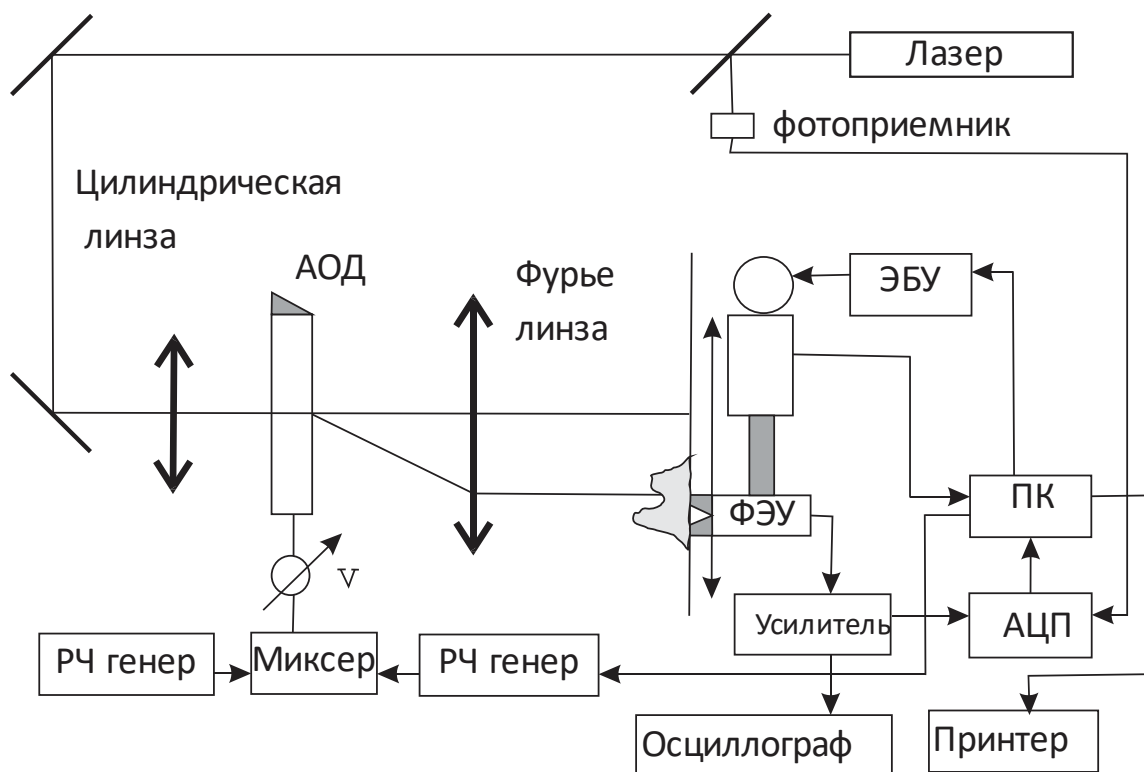


Рисунок 5.6. Экспериментальная установка для исследования пропускания серой шкалы

Свет лазера (обычно используется He-Ne лазер) проходит через цилиндрическую линзу, чтобы заполнить апертуру ячейки Брэгга АОСА. Радиочастотный (РЧ) генератор формирует сигнал в соответствии с данными, полученными от ПК. Другой РЧ генератор вырабатывает сигнал смежной частоты, и, проходя через смеситель, оба сигнала поступают на пьезоэлектрический преобразователь ячейки Брэгга АОСА.

Дифрагированный в 1-м порядке дифракции свет поступает на выходную плоскость, где образует два пика гауссовой формы. Фотоэлектрический умножитель (ФЭУ) перемещается по этой плоскости в направлении x и регистрирует интенсивность света. Перемещение ФЭУ обеспечивается электрическим двигателем, который управляется электронным блоком управления. Сигнал с ФЭУ усиливается усилителем. Затем он преобразуется аналого-цифровым преобразователем и поступает на ПК.

В наших экспериментах мы использовали ячейку Брэгга, изготовленную из монокристалла TeO_2 . Его ориентация обеспечивала поперечное распространение акустической волны в кристаллографическом направлении $[110]$. Ширина полосы частот, используемая в этой ячейке Брэгга, составляла около 10 МГц, а апертура падающего светового пучка – около 6 мм. Это означает, что временная апертура в ячейке Брэгга равна 10 нс.

Мы исходили в своих измерениях из предположения, что могут существовать разные значения вероятности отказа. Более того, мы создали условия, при которых имели место разные значения отношения сигнал/шум. Результатами измерений стали:

- значение сигнала ΔI ,
- значение расстояния между двумя пиками x_1 .

Субъектами расчетов, исходя из измеренных данных, были:

- отношение сигнал/шум,

- количество разрешимых пятен,

- информационная емкость.

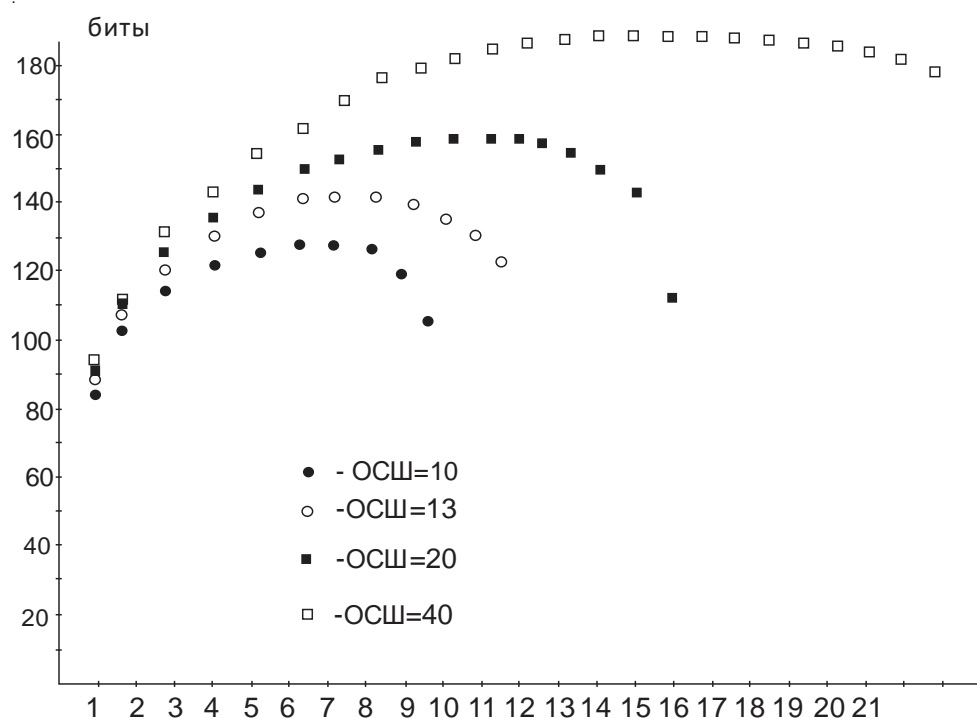


Рисунок 5.7. Зависимости информационной емкости от количества уровней серого при различных значениях отношения сигнал/шум (ОСШ)

Результаты зависимости информационной емкости от числа разрешимых пятен представлены на рисунке 5.7.

Из рисунка 5.7 следует, что для каждого значения отношения сигнал/шум существует число различимых уровней серого, при котором информационная емкость акустооптического устройства достигает некоторого максимального значения. Самый распространенный случай можно описать значением сигнал/шум, равным 20. В этом случае информационная емкость достигает своего максимума, когда динамический диапазон сигнала можно описать 10...13 уровнями серого. Это максимальное значение равно 160 бит. Наравне с этим информационная емкость в случае передачи двоичного сигнала близка к 90 бит.

Вышеуказанное исследование было проведено для случая, когда разрешающая способность акустооптического устройства, определенная по

критерию Рэлея, составляла около 100 разрешимых пятен. В более распространенных случаях эта разрешающая способность составляет порядка нескольких сотен. Соответственно, увеличивается и информационная емкость устройства.

Показано, что проблема того, демонстрирует ли акустооптическое устройство большую информационную емкость, имея дело с полутоновым или бинарным сигналом, не имеет одностороннего решения. Фактически, это означает, что у нас есть возможность заранее варьировать параметры сигнала, поэтому его оцифровка не является обязательным оптимальным способом его предварительной обработки. Однако определенное ограничение числа уровней полутонов представляется приемлемым способом оптимизации информации акустооптического устройства.

5.3. Акустооптический перестраиваемый фильтр с переменной спектральной селективностью

Акустооптический перестраиваемый фильтр (АОПФ) не обязательно лучше, спектральная селективность тоньше. Часто необходимо настраивать спектральную пропускную способность АОПФ в соответствии с определенной задачей. Нами разработан АОПФ с переменными параметрами спектральной пропускной способности [213]. Устройство обеспечивает высокие значения парциальных дифракционных эффективностей при одновременном возбуждении нескольких акустических волн с разными частотами. Селективность длины волны варьируется от 5 до 30 нм, а ее форма также варьируется от гауссовой до почти прямоугольной. Перечислены и обсуждены результаты данного исследования АОПФ. Показано, что специально разработанное программное обеспечение позволяет изменять спектральные характеристики пропускания по любому заданному закону. Также обсуждены возможные области применения такого устройства.

Одним из решающих преимуществ АОПФ по сравнению с другими спектральными приборами является то, что можно настраивать не только

значение выбранной длины волны, но и значение селективности по длине волны. Более того, можно формировать спектральную полосу пропускания АОПФ заданной априорной формы, включая несколько отдельных полос пропускания, работающих одновременно. Управление формой и шириной спектральной полосы пропускания можно сделать программируемым.

Ранние попытки реализовать перестраиваемую полосу пропускания АОПФ были связаны с разработкой АОПФ с коллинеарным взаимодействием [214]. Изменчивость полосы пропускания в этом варианте достигалась за счет распространения акустических импульсов с различной длиной. Некоторые особенности этого метода были использованы и для неколлинеарных АОПФ [214]. Другой метод формирования управляемой полосы пропускания был разработан для АОПФ на основе неколлинеарного взаимодействия в PbMoO_4 [215]. Управление осуществлялось с помощью щели переменной ширины, расположенной поперек дифрагированного луча. Изменение ширины щели приводило к изменению полосы пропускания, а также положения ее центральной длины волны. Однако метод имеет решающий недостаток — ширина щели изменяется механически. Можно использовать электрически управляемую щель, например, на основе жидкокристаллического SLM, но это приводит к значительному усложнению устройства.

Некоторые исследователи используют специальную конструкцию и конфигурацию пьезоэлектрического преобразователя для управления селективностью АОПФ. Например [216], неколлинеарный преобразователь АОПФ можно было бы сделать с массивом отдельных преобразователей, которые обеспечивали аподизацию посредством изменения относительных амплитуд акустического возбуждения в каждом отдельном элементе преобразователя, при этом фазы оставались постоянными.

Волошинов и Мишин [217] предложили еще одну сложную конфигурацию преобразователя, в которой использовались две отдельные пьезоэлектрические ячейки, расположенные под определенным углом друг к другу. Это устройство,

основанное на неколлинеарном взаимодействии в анизотропном кристалле TeO_2 , позволяло работать с расходящимся некогерентным светом, имеющим две спектральные полосы пропускания, причем одна из них могла быть до десяти раз шире другой.

Все описанные методы управления селективностью акустооптического перестраиваемого фильтра (АОПФ) связаны со сложной конструкцией ячейки Брэгга, что делает их достаточно дорогостоящими. Мы предложили альтернативный подход, позволяющий управлять параметрами полосы пропускания электронным способом.

5.3.1. Информативность полосы пропускания и длины волны АОПФ

Акустооптический перестраиваемый фильтр (АОПФ) передает информацию о спектральном составе падающего света. Количество этой информации определяется тремя основными параметрами: шириной полосы длин волн, шириной полосы пропускания и динамическим диапазоном [218]. На основе теории Шеннона [209] для АОПФ можно записать:

$$I = N \log_2(m + 1), \quad (5.9)$$

где $N = \Delta\lambda/\delta\lambda$, $\Delta\lambda$ — ширина полосы длин волн АОПФ, $\delta\lambda$ — полоса пропускания АОПФ, а m — количество распознаваемых уровней серой шкалы в спектре падающего света. Как правило, если $\Delta\lambda$ достаточно велико, полоса пропускания зависит от расположения длины волны внутри полосы пропускания. Поэтому более точное выражение будет выглядеть следующим образом:

$$I = \log_2(m + 1) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [\delta\lambda^{-1}(\lambda)] d\lambda, \quad (5.10)$$

где $\lambda_2 - \lambda_1 = \Delta\lambda$.

Выражение (5.10) описывает общее количество информации, которое можно извлечь из падающего полихроматического света с неизвестным спектром. Однако доступ к этой информации требует времени, которое не

должно быть меньше временной апертуры ячейки Брэгга. Таким образом, вся информация, доступная АОПФ из падающего светового пучка, может быть извлечена за время:

$$T = N\tau, \quad (5.11)$$

где τ — временная апертура ячейки Брэгга. Пропускная способность информации, которая описывает количество информации, обрабатываемой АОПФ за единицу времени, может быть выражена как:

$$I' = (1/\tau)\log_2(m + 1), \quad (5.12)$$

Это значение в N' раз меньше, чем, например, у акустооптического анализатора спектра, где N' — разрешение анализатора спектра. Следовательно, время от τ до T может быть использовано для поиска любого спектрального пика, независимо от того, осуществляется доступ последовательно или случайно.

Все вышесказанное применимо к режиму доступа к данным «полоса за полосой». Этот режим позволяет извлекать всю доступную информацию и подходит, когда все данные одинаково важны. Однако в некоторых случаях скорость доступа к данным может быть важнее объема извлекаемой информации, особенно когда точное спектральное распределение не имеет значения. В таких ситуациях более грубая селективность может быть достаточной.

Возможные подходы к решению задачи можно разделить на два основных направления:

1. Разработка специализированных АОПФ для каждой задачи с различной степенью селективности и другими специфическими свойствами.

2. Разработка универсального АОПФ, в котором параметры, такие как селективность и скорость доступа, могут регулироваться в зависимости от задачи.

Второй подход является более экономичным. Кроме того, с помощью метода управляемой селективности можно создавать программируемые полосы пропускания специальной формы, которые могут быть настроены заранее. Мы разработали и исследовали такие АОПФ, и ниже представлены результаты этого исследования.

5.3.2. Конструкция управляемого полоса пропускания АОПФ

Как обычно, основным элементом управляемого полосового АОПФ является акустооптическая ячейка Брэгга. Она выполнена на основе монокристалла TeO_2 , что позволяет использовать высокую эффективность акустооптического взаимодействия и оптимизировать геометрию взаимодействия.

Кристалл имеет стандартную геометрию для устройств с неколлинеарным взаимодействием, что обеспечивает перпендикулярное падение света на входное окно ячейки Брэгга. Грань кристалла расположена под углом 10° к нормали, проведенной к плоскости пьезоэлектрического преобразователя. При этом кристаллографическая ось $[110]$ отклонена на угол $6,5^\circ$ от той же нормали, в результате чего общий угол между гранью и осью составляет $16,5^\circ$. Оптическая апертура устройства имеет диаметр 3,5 мм.

Мы использовали пьезоэлектрический преобразователь, изготовленный из монокристалла LiNbO_3 , который был соединен с активным кристаллом с помощью вакуумной сварки, выполненной специальным способом⁸. Преобразователь позволяет возбуждать сдвиговую акустическую волну в диапазоне не менее 85... 115 МГц.

Возможность изменения полосы пропускания длины волны была обеспечена за счет специальной конструкции управляемого компьютером электронного блока управления, схематически показанного на рисунке 1.

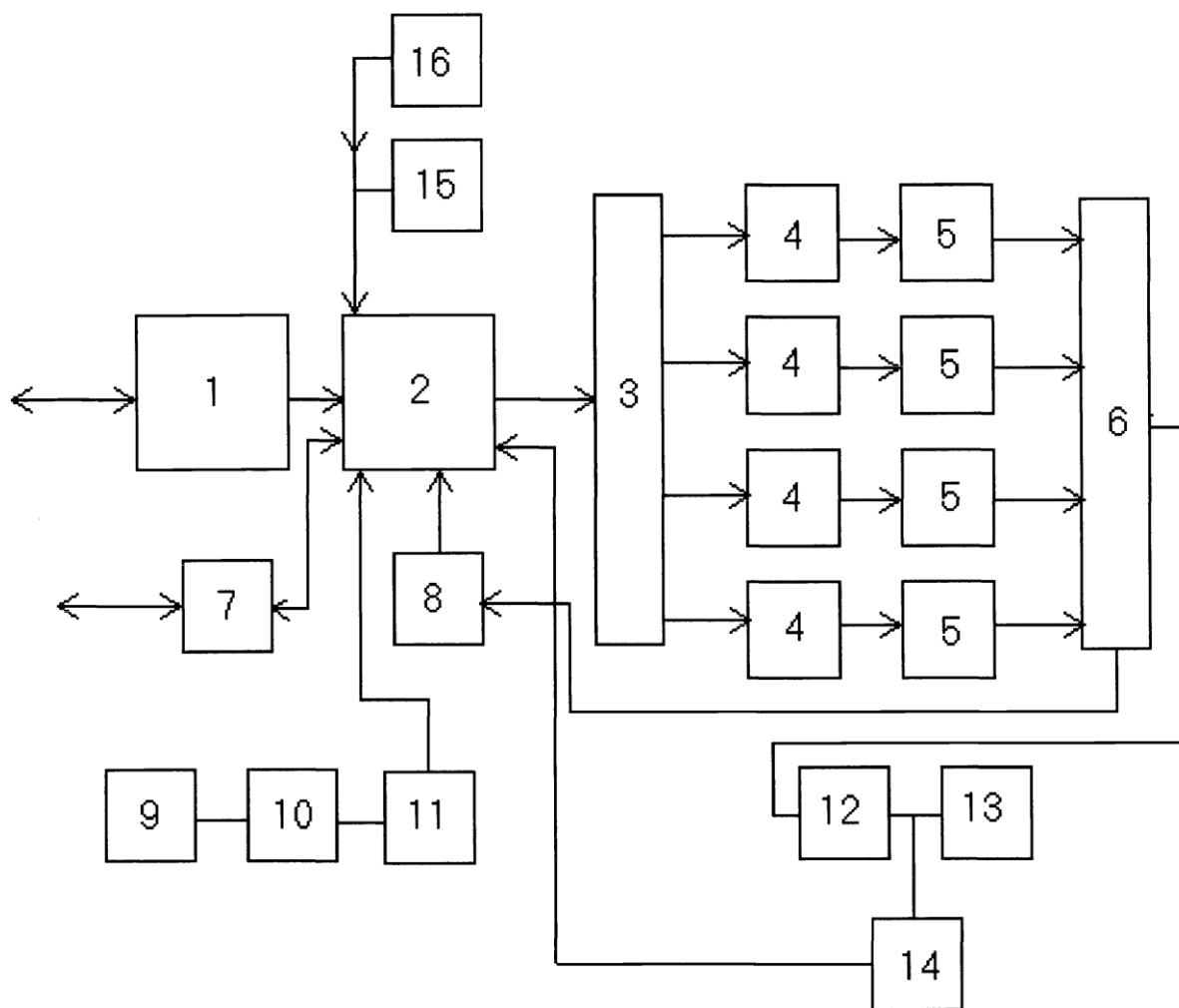


Рисунок 5.8. Схематическое изображение блока управления АОПФ, обеспечивающего изменение полосы пропускания длин волн: 1 — блок согласования, 2 — микрокомпьютер, 3 — блок цифро-аналогового преобразования, 4 — блоки генераторов, 5 — блоки аттенуаторов, 6 — сумматор, 7 — последовательный интерфейс, 8 — блок измерителя частоты, 9 — блок датчиков, 10 — блок усилителей, 11 — аналого-цифровой преобразователь, 12 — усилитель мощности, 13 — АОПФ, 14 — измеритель уровня сигнала, 15 — стабилизатор температуры, 16 — устройство калибровки контрольных частот.

Использование схемы, представленной на рисунке 5.8, позволяет создать управляющий сигнал, состоящий из четырех компонентов. В данном устройстве изменение полосы пропускания может быть реализовано двумя способами:

1. Одновременное возбуждение четырех акустических волн, частоты которых достаточно близки друг к другу, чтобы сформировать единую непрерывную полосу пропускания.

2. Изменение мощности выбранной акустической волны за пределы линейной области, что приводит к расширению полосы пропускания.

Таким образом, управление полосой пропускания может осуществляться как за счет амплитуды сигнала, так и за счет регулировки частоты. Электрический управляющий сигнал, сгенерированный на компьютере, передается в блок согласования, а затем направляется на специализированный микрокомпьютер и далее на цифро-аналоговый преобразователь. Этот преобразователь обеспечивает передачу управляющих сигналов на блоки генератора и аттенюатора. Одновременно микрокомпьютер обеспечивает непрерывный обмен данными с компьютером, получая информацию от стабилизатора температуры, блока калибровки контрольных частот, аналого-цифрового преобразователя, измерителя частоты и измерителя уровня входного сигнала. Аналого-цифровой преобразователь, в свою очередь, принимает сигналы от датчиков, которые передаются через усилители. Сигналы, поступающие с аттенюаторов, суммируются в сумматоре, усиливаются усилителем мощности и затем подаются на вход акустооптического перестраиваемого фильтра (АОПФ). Уровень входного сигнала АОПФ измеряется с помощью измерителя уровня сигнала.

Данное устройство было протестировано, и его селективность по длине волны, а также форма полосы пропускания были исследованы с использованием специальной экспериментальной установки. Установка включала монохроматор, оптические элементы для подачи фильтрованного светового потока в монохроматор, фотоэлектрический умножитель и компьютер. Селективность монохроматора была значительно выше, чем ожидаемая селективность АОПФ.

5.3.3. Управление полосой пропускания изменением амплитуды сигнала

Мы оценили, как изменяется полоса пропускания длины волны АОПФ, если она управляется изменением амплитуды входного электрического сигнала. Измеренные значения приведены в таблице 5.3.1.

Таблица 5.3.1. Полоса пропускания АОПФ и относительная амплитуда выходного сигнала в зависимости от уровня входного электрического сигнала

Амплитуда входного сигнала, относительные единицы	Уровень полосы пропускания АОТФ, нм	Относительная амплитуда выходного пика, относительные единицы
800	6	1
1000	6	0,9
1200	6	0,75
1500	7	0,5
1750	7	0,45
2000	8	0,5
2500	10	0,55
3000	12	0,55
4000	14	0,65

Измерения проводились для центральной длины волны 477 нм. Первый столбец состоит из амплитудных кодов, которые были введены в управляющее программное обеспечение АОПФ. Благодаря исключительно высокому акустооптическому качеству монокристалла TeO_2 с медленной сдвиговой акустической волной несложно достичь значения входной акустической мощности, которое соответствует максимальной эффективности дифракции. Оно зависит от входной мощности по закону синуса. Дальнейшее увеличение

входной мощности вызывает подавление пикового значения, но также и повышение значений боковых наклонов.

Увеличение пикового значения для кодов сигнала в диапазоне 3000...4000 может быть обусловлено вторым периодом синусоидального сигнала, а дальнейшее расширение полосы пропускания — расхождением акустической волны.

Рассмотренный выше метод регулирования полосы пропускания имеет ограниченную область применения. Этот подход исключает возможность передачи серой шкалы, поскольку работа происходит за пределами динамического диапазона акустооптического перестраиваемого фильтра (АОПФ).

5.3.4. Управление полосой пропускания с использованием комбинации нескольких частот сигнала

Конструкция акустооптического перестраиваемого фильтра (АОТФ), описанная в разделе 3, позволяет одновременно генерировать несколько акустических волн с разными частотами в ячейке Брэгга. Рассмотрим спектральный состав выходного света в случае, когда два сигнала с близкими частотами формируют акустическую волну в ячейке Брэгга АОТФ.

Мы создали сигналы с близкими амплитудами (амплитудные коды около 700 для обоих) и частотами 84,8 МГц и 86,1 МГц. Первый сигнал соответствовал длине волны света 566,5 нм, а второй — 560,5 нм. На рисунке 5.9 (а и б) показаны измеренные пики выходного света для случая, когда активен только первый сигнал, и для случая, когда активны оба сигнала одновременно.

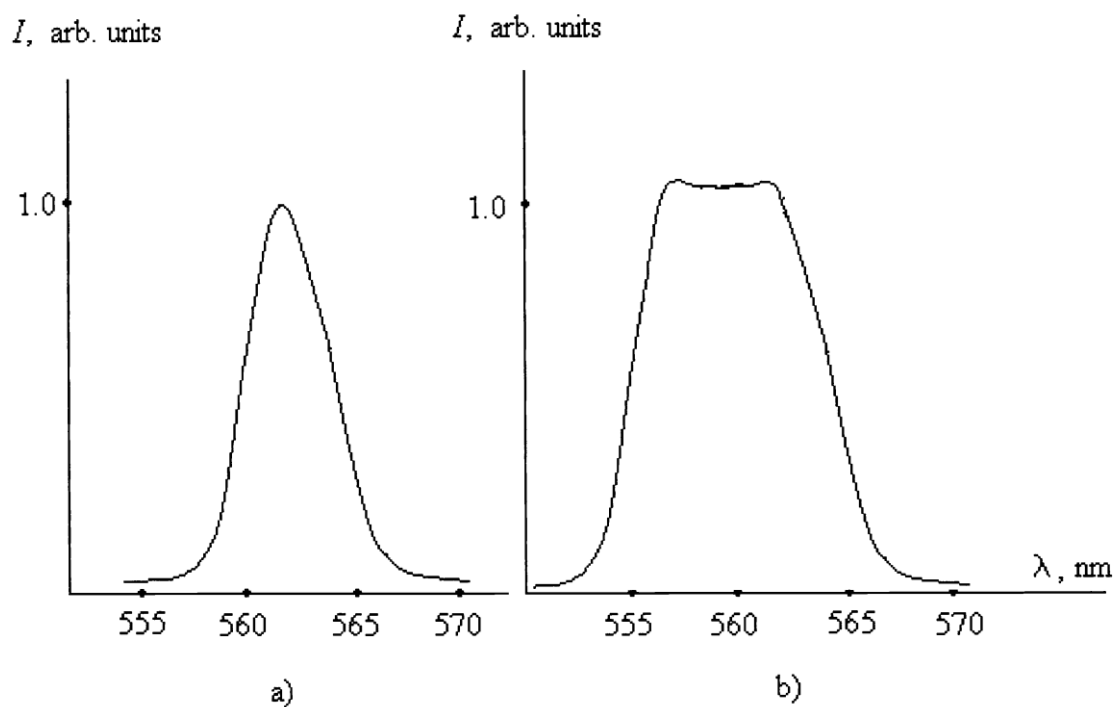


Рисунок 5.9. Измеренные формы полосы пропускания для одночастотного сигнала (а) и для сигнала с двумя частотами (б).

Из рисунка 5.9а видно, что одночастотный сигнал создает пик с полосой пропускания около 7 нм. Рисунок 5.9б демонстрирует, что при использовании двух близких частот можно достичь полосы пропускания шириной 12...13 нм, при этом вершина пика становится практически плоской.

Для получения более широкой прямоугольной формы полосы пропускания можно использовать четыре сигнала. Однако электронные методы позволяют формировать не только прямоугольные, но и другие формы. Например, с помощью четырех сигналов мы смогли добиться формы полосы пропускания, близкой к гауссовой.

Нами введен в ячейку Брэгга сигнал, состоящий из четырех частот. Параметры сигнала приведены в таблице 5.3.2.

Таблица 5.3.2. Параметры четырехчастотных компонент сигнала, используемых для получения гауссовой формы полосы пропускания АОПФ

Параметр	Первый компонент	Второй компонент	Третий компонент	Четвертый компонент
Амплитудный код	600	600	600	600
Частота, МГц	108,5	107,0	105,8	104,6
Центральная длина волны выбрана, нм	473	477	481	485
Компонент селективности, нм	6	6	6	6

Обратите внимание, что амплитудный код соответствовал уровню входного электрического сигнала 75% от значения, обеспечивающего максимум функции передачи синуса.

На рисунке 5.10 представлены в сравнении характеристики полосы пропускания сигнала, содержащего один компонент и четыре компонента.

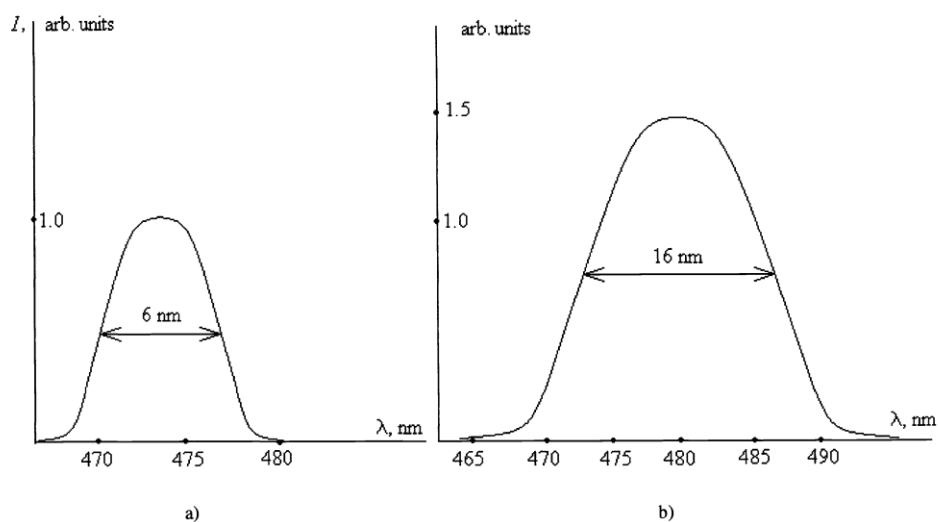


Рисунок 5.10. Гауссова аппроксимация экспериментальных результатов для измерений полосы пропускания АОПФ для: а) одночастотного входного сигнала и б) четырехчастотного входного сигнала.

Специально разработанное программное обеспечение позволяет регулировать ширину и форму полосы пропускания в соответствии с заданным законом. Изменение полосы пропускания происходит без необходимости внесения изменений в оптическую схему акустооптического перестраиваемого фильтра (АОПФ) и без использования механически подвижных элементов. Следует отметить, что кривые, представленные на рисунке 5.10 (а и б), являются гауссовыми аппроксимациями реальных экспериментальных данных. Однако различия между реальными кривыми и их аппроксимациями незначительны и проявляются в виде случайных отклонений в каждой измеренной точке, то есть экспериментальные данные распределяются по обе стороны от аппроксимирующей кривой случайным образом.

Экспериментальные измерения селективности по длине волны в данной работе проводились традиционным методом, без учета уровня шума или допустимой вероятности ошибки при передаче одного бита информации. Тем не менее, измерения позволили оценить не только ширину полосы пропускания, но и ее форму. Представленный АОПФ с возможностью управления шириной и формой полосы пропускания позволяет решать разнообразные задачи, требующие настройки селективности непосредственно в процессе работы. Форма полосы пропускания может изменяться по заранее заданному закону, а частота таких изменений может достигать десятков килогерц.

Разработанное устройство с переменной селективностью по длине волны также может применяться для спектральной обработки изображений, например, в системах обработки цветных графических данных, созданных ранее. Такие системы обеспечивают выборку и передачу графической информации определенного цвета из всего многообразия данных.

Интеграция представленного АОПФ в модуль считывания цветных данных позволяет одновременно выбирать данные нескольких цветов. Более того, устройство может быть настроено для выделения только необходимых данных определенного цвета на основе критерия максимального отношения

сигнал/шум на выходе. Уменьшение ширины полосы пропускания снижает количество передаваемых нежелательных деталей, но может привести к недостаточной интенсивности света в плоскости матрицы сенсора. Возможность изменения полосы пропускания АОПФ позволяет оптимизировать условия обработки и передачи цветowych данных.

5.4. Мультиплексирование голограмм по длине волны с применением акустооптического перестраиваемого фильтра

5.4.1. АОПФ как спектральный прибор с электронным управлением

Акустооптические перестраиваемые фильтры (АОПФ) занимают уникальное место среди акустооптических устройств. Они отличаются от других устройств тем, что модулируют не угол отклонения или интенсивность света, а его длину волны. Основная функция АОПФ заключается в выделении света с определенной длиной волны из полихроматического светового пучка.

Эта функция АОПФ находит применение в различных устройствах. Наиболее распространенными примерами являются спектрометры с электронным управлением [219], а также системы сканирования и формирования многоцветных изображений [220, 221].

Принцип работы АОПФ основан на том же механизме, что и у других акустооптических устройств, — на дифракции света на ультразвуковой волне в ячейке Брэгга. Из полихроматического светового пучка, попадающего на ячейку Брэгга, в первый порядок дифракции направляется только тот свет, длина волны которого удовлетворяет условию Брэгга для частоты ультразвука, возбуждаемого в ячейке. Для достижения максимальной селективности по длине волны кристалл ячейки ориентируется таким образом, чтобы увеличить селективность по углу падения света.

В отличие от таких устройств, как дефлекторы или анализаторы спектра, где основное внимание уделяется расширению полосы частот (в том числе за счет снижения селективности по углу, например, с использованием анизотропной дифракции или решеток фазированных пьезопреобразователей

[220]), в АОПФ решается обратная задача. Поэтому конструкция ячейки Брэгга для АОПФ часто имеет вид, представленный на рисунке 5.11.



Рисунок 5.11. Схематическое представление ячейки Брэгга АОПФ со сносом акустического пучка из-за анизотропии кристалла (случай неколлинеарного взаимодействия)

На рисунке 5.11 видно, что вектор Пойнтинга P , который определяет направление распространения мощности ультразвукового излучения, и вектор N , указывающий направление нормали к волновому фронту акустического пучка, расположены под значительным углом друг к другу. В практически важном случае работы на сдвиговой волне в кристалле парателлурита (TeO_2) этот угол может превышать 50° . Такое явление обусловлено крайне сильной анизотропией индикатрисы скоростей сдвиговой волны в парателлурите. При определенной ориентации кристалла возникает ситуация, показанная на рисунке 8, когда акустическое излучение, соответствующее правой части диаграммы угловой направленности ультразвукового пучка, постоянно опережает излучение, связанное с левой частью диаграммы направленности.

Известно, что условием формирования первого дифракционного порядка максимальной интенсивности в режиме брэгговской дифракции является выполнение условия Брэгга [222].

$$\alpha = \lambda f / v, \quad (5.13)$$

где α — угол падения светового пучка на акустический пучок, λ — длина волны света, f — частота акустической волны, а v — ее скорость. Из выражения (5.13) видно, что оно устанавливает жесткую связь между частотой звука и длиной волны света. Таким образом, при фиксированном угле падения полихроматического светового пучка на ячейку Брэгга условие (5.13) выполняется только для одной определенной длины волны при заданной частоте входного сигнала. Ячейка, изображенная на рис. 4.10, обеспечивает чрезвычайно высокую селективность брэгговской дифракции по длине волны.

Действительно, если обратиться к векторной диаграмме акустооптического взаимодействия для данного случая (см. рисунок 5.12), то можно найти подтверждение этому утверждению [223].

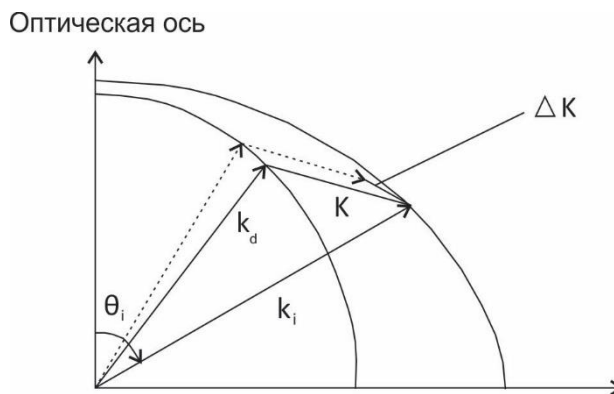


Рисунок 5.12. Векторная диаграмма акустооптического взаимодействия в АОПФ на парателлурите в неколлинеарном случае.

На диаграмме изображены волновые векторы падающего k_i и дифрагированного k_d света. В представленном квадранте также показаны индикатрисы показателей преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей в двулучепреломляющем кристалле, каким является парателлурит. В случае анизотропной брэгговской дифракции свет после взаимодействия с

ультразвуком изменяет плоскость поляризации, и обыкновенный луч превращается в необыкновенный. Величина \mathbf{K} обозначает волновой вектор акустической волны.

Из рисунка 5.12 видно, что даже незначительное отклонение направления падающего светового пучка, вызванное дифракционным расхождением, приводит к существенному рассогласованию по акустическому волновому вектору $\Delta\mathbf{K}$. Таким образом, акустооптический перестраиваемый фильтр (АОПФ) выделяет из общего светового потока только ту компоненту, которая точно соответствует условию Брэгга.

Типичные значения разрешающей способности АОПФ по длине волны находятся в диапазоне 1...5 нм, при этом существуют устройства с разрешением в доли нанометра. Благодаря этому АОПФ превосходят стандартные интерференционные фильтры по селективности к длине волны. Кроме того, АОПФ обладают дополнительным преимуществом: выделяемая длина волны может изменяться в реальном времени путем регулировки частоты сигнала, подаваемого на устройство.

5.4.2. Мультиплексирование по длине волны и его применение совместно с угловым мультиплексированием

Принцип мультиплексирования по длине волны обычно применяется при записи голограмм в объемных средах. Этот метод предполагает запись множества голограмм через один и тот же участок поверхности среды, например, фоторефрактивного кристалла [224]. Каждая голограмма записывается светом с уникальной длиной волны. При этом для обеспечения когерентности длины волн опорного и объектного пучков должны совпадать для каждой отдельной голограммы, но различаться для разных голограмм.

Основная проблема при реализации данного метода - найти подходящий лазер, который бы обеспечивал необходимую перестройку по частоте. Известны некоторые лазеры на красителях, в которых возможна перестройка частоты света в диапазоне длин волн 370...890 нм [227]. Однако для реализации такой перестройки необходимо последовательно использовать множество красителей,

в противном случае диапазон перестройки не превысит 10...20 нм. С другой стороны, принцип построения объемных ГЗУ с мультиплексированием требует использования достаточно мощных лазеров, поскольку дифракционная эффективность отдельной голограммы может оказаться весьма малой при записи большого количества мультиплексных голограмм.

Иногда, однако, можно использовать сочетание различных видов мультиплексирования. Например, для увеличения плотности записи была использована комбинация мультиплексирования по углу и по длине волны [228]. В этой системе обеспечивается до 400 голограмм, мультиплексированных по углу, а для мультиплексирования по длине волны используется 5 различных длин волн. Последний вид мультиплексирования используется в качестве грубого переключения, а угловое - в качестве тонкого. Схема объемного ГЗУ такого типа показана на рисунке 5.13.

В этой системе 200 голограмм, мультиплексированных как по углу, так и по длине волны, записаны через один и тот же участок поверхности регистрирующей среды - кристалла ниобата лития объемом 1,86 см³. В соответствии с [228], входная плоскость совпадает с выходной плоскостью акустооптического дефлектора, осуществляющего угловое мультиплексирование.

Система, показанная на рисунке 5.13, освещалась светом от аргонового лазера, генерировавшего моды с длинами волн 514,5, 501,7, 488,0, 476,5 и 459,7 нм. Эти световые волны были разделены и в дальнейшем вновь объединены посредством системы призм и набора затворов. Затем пучки, как показано на рисунке 5.13, разделялись на объектный и опорный, и в фоторефрактивном кристалле формировались голограммы. Считывание осуществлялось с помощью опорного пучка с параметрами, соответствующими нужной мультиплексной голограмме, и восстановленные данные регистрировались на ПЗС-матрице, и в дальнейшем обрабатывались на ПЭВМ.

Рассматриваемая система объемного ГЗУ достаточно сложна прежде всего из-за необходимости разделять и вновь соединять различные световые моды

аргонового лазера. В следующем разделе рассматривается более простое решение этой проблемы.

5.5. Применение акустооптического перестраиваемого фильтра в качестве мультиплексора длины волны

В отличие от других акустооптических приборов, АОПФ не относится к устройствам, широко используемых в ГЗУ. Такие приборы, как АОПФ имеют дело с полихромным светом. Однако, в вышеописанном случае очевидно, что

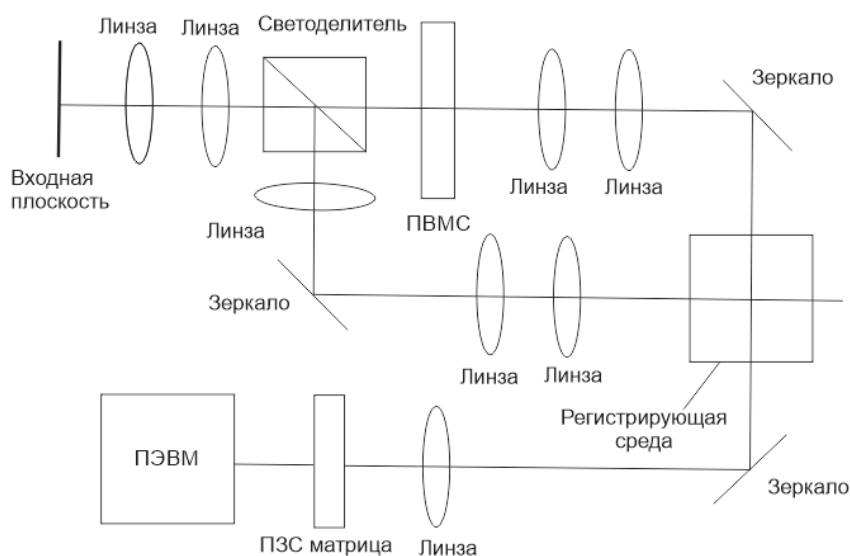


Рисунок 5.13. Схема объемного ГЗУ с применением сочетания мультиплексирования по углу и по длине волны

использование АОПФ может существенно упростить систему. Рассмотрим способ, согласно которому АОПФ применяется в системе, описанной в [228]. На рисунке 5.13 показана схема, в которой АОПФ является частью системы, находящейся слева от входной плоскости, показанной на рисунке 5.13.

АОПФ устанавливается на выходе аргонового лазера, при этом между лазером и АОПФ могут быть установлены дополнительные оптические компоненты, не указанные на рисунке 5.14. Их задача - обеспечивать необходимые форму и размер поперечного сечения оптического пучка. На вход АОПФ подается сигнал, включающий в себя пять различных частот, каждая из

которых создает условия Брэгга для дифракции одной из мод аргонового лазера. Генератор входного сигнала может обеспечивать подачу этих частот как последовательно, так и одновременно в определенных сочетаниях.

АОПФ выбирает необходимую моду лазерного излучения в соответствии с частотой, содержащейся в сигнале. Остальные моды не дифрагируют на акустической волне, поскольку для них условие Брэгга не соблюдается. Для исключения нежелательных бликов прошедшие без дифракции недифрагированные моды устраняются с помощью режекторного фильтра.

В схеме использовался АОПФ, ячейка Брэгга которого была выполнена на базе монокристалла парателлурита, в котором возбуждалась медленная поперечная акустическая волна. Применялась геометрическая конфигурация, соответствующая неколлинеарному акустооптическому взаимодействию.

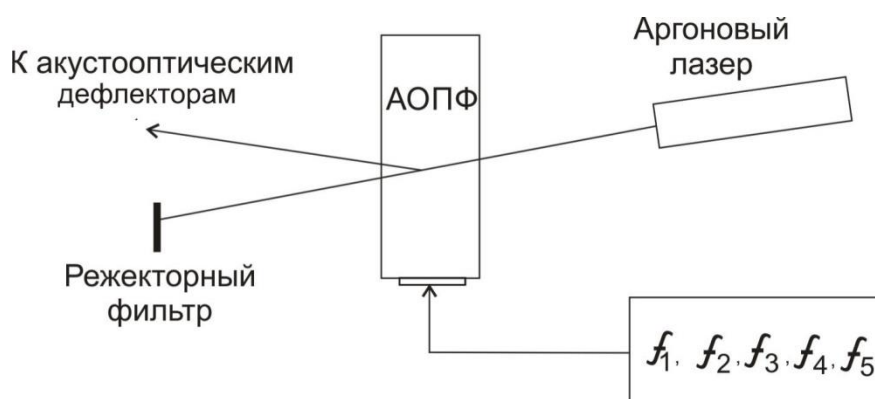


Рисунок 5.14. АОПФ, установленный на выходе лазера для выбора необходимых мод аргонового лазера

Использованные образцы АОПФ были изначально предназначены для систем акустооптической обработки изображений [229]. Однако, исследование их разрешающей способности по селектируемой длине волны, проведенные в соответствии с методикой, разработанной в [230], показали, что они также могут быть использованы для селекции лазерных мод, расположенных даже ближе друг к другу, чем в случае аргонового лазера. Расстояние между модами в

аргоновом лазере по длине волна варьируется в пределах от 12 до 16 нм. При этом АОПФ на базе кристалла парателлуриата позволял выделять моды с шириной 5...7 нм.

5.6. О разрешающей способности АОПФ, обеспечивающего мультиплексирование по длине волны

Для определения разрешения АОПФ, обеспечивающего селекцию лазерных мод для мультиплексирования по длине волны, необходимо исходить из того, что прибор работает корректно, если он выделяет необходимую моду с допустимым уровнем перекрестных искажений. Этот уровень обычно определяется дифракционной эффективностью голограмм, общим числом мультиплексов и необходимым динамическим диапазоном восстановленной голограммы.

Пусть расстояние между модами по шкале длин волн равно $\Delta\lambda$, и три моды расположены на этой шкале таким образом, что $\lambda_1 + \Delta\lambda = \lambda_2$, $\lambda_2 + \Delta\lambda = \lambda_3$ при этом $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ - длины волн соседних мод. Предположим также, что селективность АОПФ зависит от рассогласования по длине волна по гауссову закону (что как раз и имеет место на практике). Также будем полагать, что все моды имеют равную интенсивность. Тогда функция пропускания АОПФ, настроенного на длину волны λ_2 может быть выражена как

$$T(\lambda) = T_0 \exp [-(\lambda - \lambda_2)^2 / \sigma^2], \quad (5.14)$$

где T_0 соответствует дифракционной эффективности ячейки Брэгга, а σ - дисперсия функции селективности. Если зависимость интенсивности каждой моды от длины волны близка к дельта-функции, то можно определить уровень перекрестных искажений, т.е., сигнала от соседних мод, выражаемого как

$$I_{ct} = 2I_0 \exp (-\Delta\lambda^2 / \sigma^2), \quad (5.15)$$

где I_0 - интенсивность моды с длиной волны λ_0 , прошедшей через АОПФ. Если уровень искажений должен быть в N раз меньше, чем интенсивность выделенной моды, то можно сосчитать, что

$$\Delta\lambda = \sigma(\ln 2N)^{1/2}. \quad (5.16)$$

Выражение (5.16) описывает критерий разрешающей способности по длине волны для АОПФ, обеспечивающего мультиплексирование в объемном ГЗУ. Этот критерий может быть сформулирован следующим образом: моды, длины волн которых расположены на расстоянии $\Delta\lambda$ друг от друга, могут быть разрешены с помощью АОПФ с гауссовой селективностью при дисперсии a , если соблюдается условие

$$\sigma \leq \Delta\lambda (\ln 2N)^{-1/2}. \quad (5.17)$$

Отметим, что данное выражение может быть признано справедливым только в случае, если селектируемые лазерные моды достаточно узки. Таким образом, настоящий критерий может оказаться непригодным для некоторых полупроводниковых лазеров. Но лазеры с широкополосными модами, как правило, не могут быть применены для записи голограмм из-за малой когерентности их излучения.

Выводы к главе 5

1. Акустооптические устройства предназначены для исследования временных изменений сигнала и соответственно информации, переносимой сигналом. Задержки в прохождении сигналов определяют интервалы времени и временные частоты, присущие этим устройствам.

2. В главе с помощью акустооптического спектроанализатора с пространственным интегрированием проведен анализ широкополосных

радиочастотных сигналов. Установлены перспективы совершенствования устройств панорамного скоростного обзора и анализа радиоэфира.

3. Рассмотрены возможности мультиплексирования голограмм по длине волны с применением акустооптического перестраиваемого фильтра - спектрального прибора с электронным управлением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, следующие:

1. Классифицированы информационные временные процессы в голографических и акустооптических устройствах; Показаны источники задержек времени передачи информации в отдельных компонентах голографических устройств.

2. Экспериментально и теоретически показаны возможности анализа временных изменений средствами голографической интерферометрии. Предложены и испытаны новые устройства для двух экспозиционных голографических интерферограмм, использующие наряду с объектным пучком два опорных пучка, что позволяет получить серию интерферограмм, отнесенных к различным интервалам времени.

3. Проанализированы процессы, происходящие в голографической интерферометрии реального времени; Показаны возможности одновременно с голографической интерферометрией регистрировать в реальном времени корреляционную функцию изменяющегося во времени объекта.

4. Исследована кинетика процессов голографической записи на различных записывающих средах и их влияние на регистрацию изменяющихся во времени процессов; Продемонстрировано преимущества использования сред записи, в которых процессы записи идут одновременно с временем экспозиции, либо с некоторым сдвигом начала и конца записи.

5. Определены факторы, влияющие на регистрацию временных изменений явлений и объектов и отмечены возможности улучшения временных характеристик.

6. В целях точного совмещения опорного и предметного пучка в процессе записи голограмм, а также упрощения этого процесса, путем исключения сложных компонентов как акустооптические дефлекторы, предложена методика записи голограмм в виде синтезированных с опорным пучком. С точки зрения теории дифракции Френеля- Кирхгофа рассмотрены

синтез голограмм трехмерных объектов.

7. В результате исследования предложено теоретическое обоснование использования в качестве источника опорных волн при записи рентгеновских голограмм возбужденных атомов внутри исследуемой атомной структуры (флуоресцентные атомы) – внутренние источники. Показано, также, что подобные атомы могут быть использованы и при регистрации рентгеновской голограммы – внутренние детекторы.

8. Показано, что голограммы, полученные как с помощью метода внутреннего источника, позволяют восстановить трехмерную структуру вблизи какого-либо флуоресцентного атома. Алгоритм, который позволяет восстановить атомные изображения, основывается на интегральной теореме Гельмгольца-Кирхгофа.

9. Методика записи информации в виде синтезированных Фурье голограмм с требуемыми мультипликацией значительно ускоряет и упрощает процесс ввода информации в голографической системы, а также реализует параллельного записи и считывания нескольких страниц.

10. Методика записи информации на фототермопластические носители с предварительным подогревом при использовании инфракрасного лазера значительно сокращает времени регистрации голографической информации.

11. Рассмотрены временные ограничения, вносимые акустооптическими дефлекторами в голографические системы памяти; Показаны особенности временного прохождения информации в устройствах анализа широкополосных радиочастотных сигналов с использованием акустооптических анализаторов спектра; Показаны возможности применения акустооптического перестраиваемого фильтра для мультиплексирования голограмм по длине волны.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Van Heerden, P. J.** A new optical method of storage and retrieving information [Текст] / P. J. Van Heerden // *Applied Optics*. – 1963. – V. 2. – PP. 387-392.
2. Голографическая ассоциативная память, основанная на записи наложенных голограмм на ФТПН [Текст] / [А. А. Акаев, К. М. Жумалиев, А. А. Жээнбеков, Д. А. Исмаилов] // Сборник трудов по методам оптической информации. – Бишкек: «Илим», 1992. – С. 303-307.
3. **Anderson, L. K.** High-capacity holographic optical memory [Текст] / L. K. Anderson, // *Microwaves*. – 1970 – V. 9. – PP. 62-66.
4. Голографическая память цифровой информации на основе синтезированных голограмм [Текст] / [Д. А. Исмаилов, К. М. Жумалиев, А. А. Жээнбеков А. Д. Аккозов] // Труды международной конференции по фотонике и информационной оптике. – М.: НИЯУ МИФИ, 2015. – С. 185-186.
5. **Исмаилов, Д. А.** Research methods of recording overlapped holograms in archival holographic memory [Текст] / D. A. Ismailov, A. A. Jeenbekov, K. M. Zhumaliev // *Optics and Photonics, Japan, 2014, University of Tsukuba, Tokyo, 2014.* – баDS1. Не указано количество страниц
6. **Акаев, А. А.** Когерентные оптические вычислительные машины [Текст] / А. А. Акаев, С. А. Майоров – Л.: Машиностроение, 1977. – 440 с.
7. **Микаэлян, А. Л.** Системы оптической памяти: состояние и перспективы. [Текст] / А. Л. Микаэлян // М.: Радиотехника и электроника, 1989. – Т. 34. – № 4. – С. 673-694.
8. **Farhat, N. H.** Optical implementation of associative memory based on model of neuron networks [Текст] / N. H. Farhat and D. Psaltis // *Optical Signal Processing*. – NY.: Academic Press, 1987. pp. 129-162.
9. **Гуревич, Б. С.** Пространственные модуляторы света в архитектуре постраничной объемной голографической памяти [Текст] / Б. С. Гуревич, К. М. Жумалиев, А. А. Жээнбеков, С. Б. Гуревич, Д. А. Исмаилов, А. Нуркамилов // Труды международной конференции «Развитие

информационно-коммуникационных технологий в информационном обществе». – Бишкек, 2004. – С. 36-39.

10. **Гуревич, Б. С.** Пространственные модуляторы света. [Текст] / Под ред. проф. С. Б. Гуревича. – Л.: Наука, 1977. – 144 с.

11. Mutual connection of characteristics of holographic memory devices with by-page recording [Текст] / [А. Акаев, В. Gurevich, S. Gurevich, К. Zhumaliev] // Proc. SPIE. – 1997. – V. 3109. – P. 205-212.

12. **Микаэлян, А. Л.** Методы оптической обработки информации. [Текст] / А. Л. Микаэлян. – М.: Машиностроение, 1989. – 224 с.

13. Оптическое изображение: передача, обработка, хранение [Текст] / [А. А. Акаев, К. М. Жумалиев, Б. С. Гуревич, С. Б. Гуревич]. – Бишкек: Учкун, 1999. – 380 с.

14. **Корпел, А.** Акустооптика: Обзор основных принципов [Текст] // ТИИЭР. – 1981. – Т. 69. – № 1. – С. 55-62.

15. **Ли, Дж. Н.** Акустооптические методы обработки сигналов и вычислений [Текст] / Дж. Н. Ли, Э. Вандерлугт // ТИИЭР. – 1989. – Т. 77. – № 10. – С. 158-192.

16. **Акаев, А. А.** Оптические вычислительные машины [Текст] / А. А. Акаев, С. Б. Гуревич, К. М. Жумалиев, Н. К. Джаманкызов. – Бишкек: «Акыл», 1996. – 245 с.

17. Gray scale levels transmission by acousto-optical devices [Текст] / [В. S. Gurevich, S. V. Andreev, P. A. Burov and others] // Proc. SPIE. – 1997. – V. 3160. – PP. 76-81.

18. High-speed acousto-optically addressed optical memory [Текст] / [J. H. Sharp, D. M. Budgett, C. R. Chatwin, B. F. Scott] // Appl. Opt. – 1996. – V. 35. – № 14 – PP. 2339-2402.

19. **Pu, A.** High-density recording in photopolymer-based holographic tree-dimensional disks [Текст] // A. Pu, D. Psaltis / Appl. Opt. – 1996. – V. 35. – PP. 2389-2398.

20. **Burr, G.** Storage of 10000 holograms in LiNbCFiFe [Текст] / G. Burr, F. Мок, D. Psaltis // OSA Technical Digest Series. – 1994. – V. 8. – 9 p.
21. **Heflinger, L. O.** Holographic interferometry [Текст] / L. O. Heflinger, R. F. Wuerker, R. E. Brooks // Journal of Applied Physics, 1966. – V. 37. – PP. 642-649.
22. **Gabor, D. A.** New microscope principle [Текст] / D. A. Gabor // Nature. – 1948. – V. 161. – PP. 777-778.
23. **Денисюк, Ю. Н.** Об отражении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения [Текст] / Ю. Н. Денисюк // ДАН СССР. – 1962. – Т. 144. – С. 1275-1278.
24. **Leith, E. N.** Recontracted wavefronts and communication theory [Текст] / E. N. Leith, J. Upatnieks // J. Opt. Soc. Am. – 1962. – V. 52. – PP. 1123-1130.
25. **Powell, R. L.** Interferometry vibration analysis of three-dimensional objects by wavefronts reconstruction [Текст] / R. L. Powell, K. A. Stetson // J. Opt. Soc. Am. – 1965. – V. 55. – PP. 1593-1598.
26. **Horman, M. H.** An application of wavefront reconstruction [Текст] / M. H. Horman // Appl. Opt. – 1965. – V. 4. – PP. 333-335.
27. **Burch, J. M.** The application of lasers in production engineering [Текст] / J. M. Burch // Prod. Eng. – 1965. – V. 44. – PP. 436-444.
28. **Collier, R. J.** Application of moire techniques to holography [Текст] / R. J. Collier, E. T. Doherty // Appl. Phys. Lett. – 1965. – V. 7. – PP. 223-225.
29. **Stetson, K. A.** Hologram in interferometry [Текст] / K. A. Stetson, R. L. Powell // J. Opt. Soc. Am. – 1965. – V. 55. – P. 1570.
30. **Haines, K. A.** Surface-deformation measurement using the wavefront reconstruction technique [Текст] / K. A. Haines, B. P. Hildebrand // Appl. Opt. – 1966. – V. 5. – PP. 595-602.
31. **Brooks, R. E.** Interferometry with a holographically reconstructed comparison beam [Текст] / R. E. Brooks, L. O. Heflinger, R. F. Wuerher // Appl. Phys. Lett. – 1965. – V. 18 – P. 116.

32. **Heflinger, L. O.** Holographic interferometry [Текст] / L. O. Heflinger, R. F. Wuerther, R. E. Brooks // Journ. Appl. Phys. – 1966. – V. 37. – PP. 642-649.
33. Interferometry holographic investigation of a laser-spark [Текст] / А. Какос, Г. В. Островская, Ю. И. Островский, А. Н. Зайдель // Appl. Phys. Lett. – 1966. – V. 23. – PP. 81-83.
34. Устранение фазовых искажений в устройствах голографической интерферометрии [Текст] / В. М. Козенков, Е. Д. Квасников, Е. Г. Кабышев, В. А. Барачевский // Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр. – 1981. – Т. 21. – С. 137-139.
35. **Островский, Ю. И.** Голографическая интерферометрия [Текст] / Ю. И. Островский, М. М. Бутусов, Г. В. Островская. – М.: Наука, 1977. – 336 с.
36. **Abramson, N.** Sandwich hologram interferometry a new dimension in holographic comparison [Текст] / N. Abramson // Appl. Opt. – 1974. – V. 13. – PP. 2019-2025.
37. **Bolstad, J. O.** Holograms and spatial filters processed and copied in place [Текст] / J. O. Bolstad // Appl. Opt. – 1967. – V. 6. – P. 170.
38. **Fagan, W. F.** The study of vibration patterns using real-time hologram interferometry [Текст] / W. F. Fagan, P. Wadell, W. McCracken // Opt. Laser Technol. – 1972. – V. 4. – PP. 167-169.
39. **Гинзбург, В. М.** Оптическая голография: Практические применения [Текст] / под ред. В. М. Гинзбург, Б. М. Степанова. – М.: Сов. радио, 1974. – 376 с.
40. **Leith, E. N.** Holographic data storage in 3-D media [Текст] / E. N. Leith, A. Kozma, J. Upatnieks, N. Massey // Appl. Opt. – 1966. – V.5. – PP. 1303-1311.
41. **Friesem, A. A.** Experimental investigation of som anomalies in photographic plates [Текст] / A. A. Friesem, J. L. Walker // Appl. Opt. – 1969. – V. 8. – PP. 1504-1505.
42. **Duffy, D. E.** Reducing photographic enulsion shrinkage for real-time holographic interferometry [Текст] / D. E. Duffy // Physics E: Scientific Instruments. – 1970. – V. 3. – PP. 561-562.

43. **Biedermann, K.** Combining hypersensitization and in situ processing for time-average observation in real-time hologram interferometry [Текст] / K. Biedermann, N. E. Molin // *Physics E: Scientific Instruments*. – 1970. – V. 3 – PP. 669-670.
44. **Alwang, W. G.** / W. G. Alwang, L. A. Ceavanangh, R. Burr, E. H. Samartino // *Proc. Electro-Optical System Design Conf.* – 1969. – P. 79.
45. **Исмаилов, Д. А.** Исследование термических деформаций интегральных микросхем и визуализация рельефа ФТПН методом голографической интерферометрии [Текст] / Д. А. Исмаилов // в сб.: *Голографические методы хранения, преобразования и обработки информации*. – Фрунзе: ФПИ, 1983. – С. 81-89.
46. **Александров, Е. Б.** Исследование поверхностных деформаций тел с помощью голограммной техники [Текст] / Е. Б. Александров, А. М. Бонч-Бруевич // *ЖТФ*. – 1977. – Т. 37. – Вып. 2. – С. 360-369.
47. **Solid, J. E.** Holographic interferometry applied to measurement of small static displacement of diffusely reflecting surfaces [Текст] / J. E. Solid // *Appl. Opt.* – 1973. – V. 12. – № 8. – PP. 1951-1956.
48. **Scimmarelle, C. A.** Strain analysis of a disk subjected to diametrical compression by means of holographic interferometry [Текст] / C. A. Scimmarelle, J. A. Gelbert // *Appl. Opt.* – 1969. – V. 8. – № 2. – PP. 1587-1595.
49. **Голдибин, С. П.** Исследование вибраций турболопаток методом голографической интерферометрии [Текст] / С. П. Голдибин, Б. А. Поляничко, С. Н. Трофимюк // в кн.: *Сборник научных трудов Пермского политехнического института*, 1974. – № 153. – С. 50-52.
50. **Листовец, В. С.** Интерференционно-голографические методы анализа вибраций [Текст] / В. С. Листовец, Ю. И. Островский // *ЖТФ*. – 1974. – Т. 44. – № 7. – С. 1345-1372.
51. **Бавельский, Д. М.** Опыт применения голографической интерферометрии для исследования вибрации роторных элементов ГТД [Текст]

/ Д. М. Бавельский, В. В. Трофимский // Проблемы прочности. – 1976. – № 5. – С. 85-87.

52. **Боровцов, П. В.** Голографическая интерферометрия колебаний пьезоэлементов кварцевых резонаторов [Текст] / П. В. Боровцов // в кн.: I Всесоюзная акустическая конференция. – М.: Наука, 1977. – С. 81-82.

53. **Agren, C.** Measuring the wood resonances of treble viol plates by hologram interferometry [Текст] / C. Agren, K. A. Stetson // J. Acoust. Soc. Am. – 1969. – V. 46. – P. 120.

54. **Jonsson, E.** Resonances of violin body studied by hologram interferometry and acoustical methods [Текст] / E. Jonsson, N. E. Molin, H. Sundin // Phys. Scr. – 1970. – V.2. – P. 243.

55. **Зейликович, И. С.** Голографическая диагностика прозрачных сред [Текст] / И. С. Зейликович, Н. М. Спорник. – Минск: Университет, 1988. – 219 с.

56. **Heflinger, L. O.** Holographic interferometry [Текст] / L. O. Heflinger, R. F. Wuerker, R. E. Brooks // J. Appl. Phys. – 1966. – V. 37. – № 2. – PP. 642-649.

57. **Brooks, R. E.** Pulsed laser holograms [Текст] / R. E. Brooks, L.O. Heflinger and R. W. Wuerker // IEEE J. Quant. Electron. – 1966. – V. 2. – № 8. – PP. 275-282.

58. **Burch, J. M.** Holography with a scatter – plate as beam and pulsed ruby laser as light source [Текст] / J. M. Burch, J. W. Gates, R. G. N. Hall // Nature, 1966. – V. 212. – PP. 1347-1348.

59. **Гусев, В. Г.** Голографический метод контроля оптических клиньев [Текст] / В. Г. Гусев, П. В. Горячев // ОМП. – 1986. – № 11. – С. 18-20.

60. **Gates, J. M.** Holography with scatter plates [Текст] / J. M. Gates // J. Phys. Eng. – 1974. – V. 2. – PP. 774-777.

61. **Fraser, S. M.** Large viewing angle holograms [Текст] / S. M. Fraser, K. A. R. Kinloch // J. Phys. Eng. – 1974. – V. 2. – PP. 774-780.

62. **Васильев, Л. А.** Интерферометр с дифракционной решеткой [Текст] / Л. А. Васильев, И. В. Ершов. – М.: Машиностроение, 1976. – 232 с.

63. **Белозеров, А. Ф.** Голографические исследования газового потока с помощью теневого прибора [Текст] / А. Ф. Белозеров, А. Н. Березкин, А. И.

Разумовская // Физические методы исследования прозрачных неоднородностей. – М.: МДНТП, 1975. – С. 22-23.

64. **Зейликович, И. С.** Получение голограмм на интерферометрах сдвига с широким источником света [Текст] / И. С. Зейликович, В. А. Комиссарук, И. И. Комиссарук и др. // ЖТФ. – 1979. – Т. 49. – Вып. 3. – С. 597-600.

65. **Belozjorov, A. F.** Production of holograms with shearing interferometers using a wide light source [Текст] / A. F. Belozjorov, I. S. Zeilikovich, V. A. Komissaruk // Opt. and Laser Technology. – 1979. – V. 11. – № 5. – PP. 265-267.

66. **Комиссарук, В. А.** Элементы прикладной теории интерферометров [Текст] / В. А. Комиссарук // Оптические методы исследований в баллистическом эксперименте: сб. науч. тр. – Л.: Наука, 1979. – С. 32-69.

67. **Спорник, Н. М.** Дифракционный интерферометр с переменным сдвигом волновых фронтов и произвольным направлением полос [Текст] / Н. М. Спорник, В. И. Яничкин // Оптико-механическая промышленность. – 1971. – № 8. – С. 38-40.

68. **Joenathan, C.** Shear interferometer with holographic lenses [Текст] / C. Joenathan, V. Parthiban, S. Sirohi Rajal // Optical Eng. – V. 26. – № 4. – 1987. – PP. 359-364.

69. **Зейликович, И. С.** Интерферометр на голограммных линзах для исследования пространственных неоднородностей [Текст] / И. С. Зейликович, Н. В. Карнаухов // Оптико-механическая промышленность. – 1984. – Вып. 4. – С. 42-44.

70. **Зейликович, И. С.** Голографический интерферометр для исследования пространственных фазовых объектов [Текст] / И. С. Зейликович, Н. М. Спорник // Письма ЖТФ. – 1975. – Т. 1. – № 12. – С. 551-553.

71. **Гусев, В. Г.** Голографический интерферометр для контроля качества линз [Текст] / В. Г. Гусев, Г. С. Кондренчук // Оптические и оптико-электронные приборы и системы. – 1986. – № 10 – С. 57-61.

72. **Zernike, F.** A Precision Method for Measuring Small Phase Differences [Текст] / F. Zernike // J. Opt. Soc. Am. – 1950. – V. 40. – № 326. – PP. 147-161.

73. **Marechal, A. A.** Precision Interferometer with High Light-Gathering Power [Текст] / A. A. Marechal, P. Loslis, and J. Simon. – North-Holland, Amsterdam, 1967. – 278 p.

74. **Коломейцев, Ю. В.** Интерферометрические методы в инженерной практике [Текст] / Ю. В. Коломейцев – М: Машиностроение, 1976. – 264 с.

75. **Исмаилов, Д. А.** Запись серии двухэкспозиционных голографических интерферограмм на плоских регистрирующих средах [Текст] / Д. А. Исмаилов, Т. Э. Кулиш // Журнал «Наука и образование сегодня», Олимп (Иваново), 2018. – № 7 (30). – С. 5-8.

76. **Солодкин, Ю. Н.** Голографический интерферометр как измерительный прибор [Текст] / Ю. Н. Солодкин // Автометрия. – 1973. – № 5. – С. 64-68.

77. **Ennos, A. E.** Measurements of in plane surfase by hologram interferometry [Текст] / A. E. Ennos // J. Sci Instrum. Ser. – 1968. – V. 1. – № 2. – PP. 734-739.

78. **Денисюк, Ю. Н.** Голография [Текст] / Ю. Н. Денисюк // ОМП. – 1978. – № 2. – С. 9-12.

79. **Денисюк, Ю. Н.** Голография и её применение в изобразительной технике [Текст] / Ю. Н. Денисюк, Э. Г. Земцова // Материалы конференции по внедрению в практику работы музеев достижений современной оптики. – М.: «Советская Россия», 1975. – С. 31.

80. **Комар, В. Г.** О возможности создания театрального голографического кинематографа с цветным объёмным изображением [Текст] / В. Г. Комар // Техника кино и телевидения, 1975. – № 4. – С. 31-39.

81. **Исмаилов, Д. А.** Record matrix holograms on dot matrix technology [Текст] / Dj. A. Ismailov, A. A. Jeenbekov, K. M. Zhumaliev, D. A. Ismailov // Optics and Photonics, Japan, 2014, University of Tsukuba, Tokyo, 2014. – 6 p. E 10.

82. Улучшение записи дифракционных решеток в Дот-матрикс голограммах [Текст] / [Д. А. Исмаилов, К. М. Жумалиев, А. А. Жээнбеков,

П. Д. Демьянович и др.] // Труды международной конференции по фотонике и информационной оптике. – М.: НИЯУ МИФИ, 2015. – С. 200-201.

83. **Акаев, А.А.** Когерентные оптические вычисления машины [Текст] / А. А. Акаев, С. А. Майоров – Л.: Машиностроение, 1977. – 440 с.

84. **Микаэлян, А. Л.** Голографические системы памяти [Текст] / А. Л. Микаэлян, В. И. Бобринев // Радиотехника и электроника, 1974. – Т. 19. – № 5. – С. 898-976.

85. **Кольер, Р.** Оптическая голография [Текст] / Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин [пер. с англ. под ред. Ю. И. Островского]. – М.: Мир, 1973. – 1686 с.

86. Multiple storage and erasure of fied holograms in fe-doped [Текст] / [D. L. Staebler, W. L. Burke, W. Phillips, J. J. Amodei] // Appl. Phys. Lett. – 1975. – V. 26. – № 4. – PP. 182-184.

87. **Anderson, L. K.** Holographic optical memory for bulk data storage [Текст] / L. K. Anderson, // Bell. Lab. Rec. – 1968. – V. 46. – PP. 318-325.

88. **Strabler, D. L.** Wave anelysis of holographic storage in Li N603 [Текст] / D. L. Strabler, J. J. Amodei // J. Appl. Phys. –1972. – V. 43. – № 3. – PP. 1043-1049.

89. **Соскин, М. С.** Голографические методы амплитудно-фазового преобразования лазерных пучков [Текст] / М. С. Соскин // Материалы VI Всесоюзной школы по голографии. – Л.: ФТИ, 1973. – С. 231.

90. **Стаселько, Д. И.** Об эффективности преобразования световых пучков на основе сдвиговых объемных фазовых голограмм [Текст] / Д. И. Стаселько, В. Г. Сидорович // ЖТФ. – 1974. – Т. 44. – Вып. 4. – С. 2572-2579.

91. **Степанов, Б. И.** О регистрации плоских и объёмных динамических голограмм в просветляющих средах [Текст] / Б. И. Степанов, Е. В. Ивакин, А. С. Рубанов // ДАН СССР. – 1971. – Т. 196. – С. 567-569.

92. **Денисюк, Ю. Н.** Отображающих свойствах бегущих волн инжективности при записи динамических объёмных голограмм [Текст] / Ю. Н. Денисюк // ЖТФ. – 1974. – Т. 44. – С. 131-137.

93. **Neumann, D. V.** Off-Tabl holography [Текст] / D. V. Neumann, R. C. Pen // Exp. Mech. – 1975. – V. 75. – PP. 241-244.

94. **Морозов, Н. В.** Голографическая интерферометрия движущихся объектов во встречных пучках в реальном времени [Текст] / Н. В. Морозов, Ю. И. Островский, Л. М. Боева // ЖТФ. – 1982. – Т. 52. – Ч. 9. – С. 1854-1858.
95. Пат.1021940 СССР 01В 11/00 Способ определения микроперемещений поверхности диффузно-отражающего объекта [Текст] / В.В. Петров А.Г., А.Г. Гриневский; опубл. 07.06.1983.
96. **Вест, Ч.** Голографическая интерферометрия [Текст] / Ч. Вест [пер. с англ. под ред. Ю. И. Островского]. – М.: Мир, 1982. – 504 с.
97. Holographic interferometry technique [Текст] / [Dj. A. Ismailov, J. J. Jeenbaev, K. M. Joumaliev, He Ching Yu] // International Conference on Holography and Optical Information Processing (ICHOIP '96), 378 (December 31, 1996), Proceeding of SPIE. – V. 2866, – PP. 378-381
98. Временные процессы в голографических устройствах [Текст] / К. М. Жумалиев, С. А. Алымкулов, Ю. Х. Исманов, Д. А.Исмаилов, А.А. Жээнбеков / Журнал: Физика, 2016.- №2.- С.73-78.
99. **Исмаилов, Д. А.** Голографическая память на основе синтезированных голограмм [Текст] / Д. А. Исмаилов, Ю.Х. Исманов, К.М. Жумалиев, А.Д. Аккозов // Проблемы современной науки и образования – Иваново, Россия,2016. -№ 17 (59). - С.6-8.
100. **Исмаилов, Д. А.** Голографическая память цифровой информации на основе синтезированных голограмм [Текст] / Д. А. Исмаилов // Журнал: Физика, 2015. - №1. - С.108-110.
101. Возможности увеличения объема данных, хранимых в плоских и объемных голографических средах [Текст] / [Д. А. Исмаилов, С. Б. Гуревич, К. М. Жумалиев, Б. С. Гуревич и др.] // Труды международной конференции «Развитие информационно-коммуникационных технологий в информационном обществе». – Бишкек, 2004. – С. 28-31.
102. Increasing the density of information stored in a holographic memory with the use of angular multiplexing [Текст] / [К. М. Zhumaliev, А. А. Jeenbekov, Zh. А. Ismailov and others] // The Second International Symposium on Earth Observation for

Arid and Semi-Arid Environments (ISEO 2014) Central Asia: Looking from Space. Issyk-Kul, Kyrgyzstan, 2014. – PP. 48-49.

103. Голографическая память цифровой информации на основе синтезированных голограмм [Текст] / Д. А. Исмаилов, К.М.Жумалиев, А.А.Жээнбеков А.Д. Аккозов //Труды международной конференции по фотонике и информационной оптике. Москва, НИЯУ МИФИ, 2015.- С.185-186.

104. **Исмаилов, Д. А.** Френелевские голограммы трехмерных объектов [Текст] / Д. А. Исмаилов, Ю.Х. Исманов, С. А. Алымкулов // Проблемы современной науки и образования –Иваново, Россия,2016.- № 17 (59).- С.9-11.

105. **Гудмен, Д.** Введение в Фурье-оптику [Текст] / Д. Гудмен. – М.: Мир, 1970. – 311 с.

106. **Ярославский, Л. П.** Цифровая голография. [Текст] / Л. П. Ярославский, Н. С. Мерзляков. – М.: Наука, 1982. – 221 с.

107. **Кейсесент, Д.** Оптическая обработка информации [Текст] / Под ред. Д. Кейсесента – М: Мир, 1975. – 349 с.

108. **Тихонов, А. Н.** Методы решения некорректных задач [Текст] / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин – М.: Наука, 1975. – 451 с.

109. Некоторые особенности синтеза радужных голограмм [Текст] / [К. М. Жумалиев, С. А. Алымкулов, Д. А. Исмаилов, Ю. Х. Исманов] // Бишкек: Физика, 2016. – №2. – С.69-73.

110. Эффект саморепродуцирования в голографии [Текст] / [Ю. Х. Исманов, Д. А. Исмаилов, К. М. Жумалиев, С. А. Алымкулов] // Материалы VI Международной конференции по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2017. – С. 646-647.

111. Алгоритм синтеза мультиплексных голограмм [Текст] / [Ю. Х. Исманов, Н. М. Кулмурзаев, Д. А. Исмаилов, С. А. Алымкулов] // Вестник КГУСТА им. Н. Исанова, 2017. – № 3 (57). – С. 166-171.

112. **Исманов, Ю.Х.** Эффективность флуоресцентной рентгеновской голографии [Текст] / Ю. Х. Исманов, Д. А. Исмаилов // Бишкек: Физика, 2016. – №1. – С. 247-251.

113. **Szoke, A.** Short wavelength coherent radiation [Текст] / A. Szoke // AIP conference proceedings. – New York, 1986. – №. 147. – P. 361.
114. **Tegze, M.** Imaging light atoms by x-ray holography [Текст] // M. Tegze, G. Faigel // London: Nature, 1996. – № 380. – P. 49.
115. **Борн, М.** Основы оптики [Текст] / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1973. – 349 с.
116. **Исмаилов, Д. А.** Методы рентгеновской голографии с внутренним источником [Текст] / Ю. Х. Исманов, Д. А. Исмаилов // Наука, техника и образование. – Иваново, 2016. – № 3 (21). – С. 19-22.
117. Acousto-optic spectrum analyzer with high information productivity [Текст] / B. S. Gurevich, S.V. Andreyev J. A. Ismailov, и др. // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2004.- V. 5447. – pp. 312–320.
118. **Turpin, T.M.** Spectrum analysis using optical processing [Текст] / T.M.Turpin // Proceedings of IEEE, 1981, vol. 69, No. 1. pp. 79-92.
119. Radio air observation using acousto-optic spectrum analyzers [Текст] [B.S.Gurevich. S.V.Andreyev, O.V.Aveltsev и др.]. Proceedings of the SPIE, 2000, vol. 4112. pp. 141-147.
120. **Егоров, Ю.В.** Акустооптические процессоры [Текст] / К.П. Наумов, В.Н. Ушаков– М.: Радио и связь. – 1991.-160 с.
121. **Rhodes, W.T.** Acousto-optic Signal processing: convolution and correlation [Текст] / W.T.Rhodes // Proceedings of IEEE.-1981.- vol. -69, No. 1.- pp. 65-79.
122. Pat. USA 3634749. Acousto-optical signal processing system [Текст] / R.M.Montgomery. Опубл. -1972.
123. Information losses in acoustooptics their reasons, and ways to minimize them [Текст] / B. S.Gurevich. S.V.Andreyev, V.V.Vorobiev, A.A.Rodiontsev и др. // Proceedings of SPIE.- 1998.- vol. 3464.- pp.55-63.
124. Radio air observation using acousto-optic spectrum analyzer [Текст] / B.S.Gurevich, S.V.Andreyev, O.V.Aveltsev и др. // Proceedings of SPIE.- 2000.-vol. 4112.- pp. 141-147.

125. **Egorov, Yu.V.** 2-D acousto-optic spectrum analyzer with spatial and time integration [Текст]/ Yu.V. Egorov, A.I.Eliseyev // Radioelekhnika.- 1985.- №10.- pp. 76-78.
126. **Heflinger, L. O.** Holographic interferometry [Текст] / L. O. Heflinger, R. F. Wuerker, R. E. Brooks // Journal of Applied Physics, 1966. – V. 37. – PP. 642-649.
127. **Haines, K. A.** Surface-deformation measurement using the wave front reconstruction technique [Текст] / K. A. Haines, B. P. Hildebrand // Applied Optics. – 1966. – V. 5. – PP. 595-602.
128. Holographic Interferometer for the study high-speed process [Текст] / [Dj. A. Ismailov, J. J. Jeenbaev, K. M. Joumaliev, He Ching Yu] // International Conference on Holography and Optical Information Processing (IHOIP '96), 297 (December 31, 1996); Proceeding of SPIE. – V. 2866. – PP. 297-303.
129. Holographic interferometry technique [Текст] / [I. A. Akkoziev, Dj. A. Ismailov, T. E. Kulish and others] // Proceedings of the international seminar “Holography and optical information processing”. – Bishkek, 1997. – PP. 24-26.
130. Разработка голографического интерферометра с расширенной областью применения [Текст] / [Д. А. Исмаилов, А. А. Жээнбеков, Н. Н. Романенко и др.] // Труды Международного семинара «Голография и оптическая обработка информации». – Бишкек, 2001. – С. 90-93.
131. Holographic interferometer for study high-speed processes [Текст] / [I. A. Akkoziev, Dj. A. Ismailov, T. E. Kulish, He Cheng Yu] // Proceedings of the international seminar “Holography and optical information processing”. – Bishkek. 1997. – PP. 19-24.
132. Разработка голографического интерферометра с расширенной областью применения [Текст] / [Д. А. Исмаилов, А. А. Жээнбеков, В. С. Гуревич и др.] // Труды международной конференции «Развитие информационно-коммуникационных технологий в информационном обществе». – Бишкек.- 2004. – С. 90-93.

133. **Исмаилов, Д. А.** Моделирование в голографии с использованием второго опорного пучка [Текст] / Ю.Х. Исманов, Д. А. Исмаилов, С. А. Алымкулов // Academy. Иваново, Россия.- 2016.- № 6(9).- С. 10-12.
134. Sensitivity of a spectral device based on acousto-optic tunable filter [Текст] / В. С. Gurevich , S.V. Andreyev, J.A. Ismailov, и др.// Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.- 2005.- V. 5953. – P. 1–6, 59530W.
135. Information properties of acousto-optic tunable filters [Текст] / Б. С. Гуревич, С. В. Андреев, А. В. Беляев и др. // Proceedings of SPIE. — 2000. — Т. 4148. — С. 194–201.
136. Information metrology of acousto-optic tunable filters [Текст] / Б. Гуревич, С. Андреев, А. Беляев и др.// Proceedings of the World Congress on Ultrasonics. — 2003. — С. 349–352.
137. **Гуревич, С. Б.** Efficiency and Sensitivity of Television Systems [Текст] / С. Б. Гуревич. — М.: Энергия, 1964. — 320 с
138. **Акаев, А. А.** Holographic memory [Текст] / А. А. Акаев, С. Б. Гуревич, К. М. Жумалиев. — New York: Allerton Press, Inc., 1998. — 180 с.
139. A transmission function of a generalized acousto-optical device [Текст] / В. Н. Соколов, Б. С. Гуревич, С. Б. Гуревич и др. // Proceedings of SPIE. — 1997. — Т. 3238. — С. 38–45.
140. **Борсук, Г. М.** Photodetectors for acousto-optic signal processors [Текст] / Г. М. Борсук // Proceedings of the IEEE. — 1981. — Т. 69, № 1. — С. 100–118.
141. **Гупта, Н.** Multispectral and hyperspectral imaging AOTF for object recognition [Текст] / Н. Гупта, Р. Дамани // Proceedings of SPIE. — 1999. — Т. 3584. — С. 128–135.
142. **Гупта, Н.** Hyperspectral and polarization imaging application of acousto-optic tunable filters [Текст] / Н. Гупта // Proceedings of World Congress on Ultrasonics. — 2003. — С. 345–348.

143. Investigation of acousto-optic tunable filter operation in color data readout modules [Текст] / В. Н. Соколов, Б. С. Гуревич, С. В. Андреев и др. // 16th European Frequency and Time Forum. — 2002. — С. G058–G061.
144. **Чанг, И. К.** Noncollinear acousto-optic filter with large angular aperture [Текст] / И. К. Чанг // Applied Physics Letters. — 1974. — Т. 25, № 7. — С. 370–372.
145. Gray scale levels transmission by acousto-optical devices [Текст] / Б. С. Гуревич, С. В. Андреев, П. А. Буров и др. // Proceedings of SPIE. — 1997. — Т. 3160. — С. 178–186.
146. Acousto-optic tunable filter with variable spectral selectivity [Текст] / Б. С. Гуревич, С. В. Андреев, А. В. Беляев и др. // Proceedings of SPIE. — 2005. — Т. 5828. — С. 53–59.
147. Acousto-optic tunable filter with variable spectral selectivity [Текст] / Б. С. Гуревич, С. В. Андреев, А. В. Беляев и др. // Proceedings of SPIE. — 2005. — Т. 5828. — С. 53–59.
148. Исследование характеристик поверхности объектов с использованием акустооптического настраиваемого фильтра [Текст] / Б. С. Гуревич, С. В. Андреев, Дж. А. Исмаилов и др. // Proceedings of SPIE. — 2005. — Т. 5953. — С. 1–6.
149. **Антес, Г.** Document having an optical-diffraction authenticating element [Текст] : пат. США № 4568141 / Г. Антес. — 1986.
150. Investigation of acousto-optic tunable filter operation in color data readout modules [Текст] / В. Н. Соколов, Б. С. Гуревич, С. В. Андреев и др. // 16th European Frequency and Time Forum. — St.Petersburg, 2002. — С. G058–G06.
151. **Чанг, И. К.** Noncollinear acousto-optic filter with large angular aperture [Текст] / И. К. Чанг // Applied Physics Letters. — 1974. — Т. 25, № 7. — С. 370–372.
152. **Сиванаягам, А.** High resolution noncollinear acousto-optic filters with variable passband characteristics: design [Текст] / А. Сиванаягам, Д. Финдлей // Applied Optics. — 1984. — Т. 23, № 24. — С. 4601–4608.

153. Gray scale levels transmission by acousto-optical devices [Текст] / Б. С. Гуревич, С. В. Андреев, П. А. Буров и др. // Proceedings of SPIE. — 1997. — Т. 3160. — С. 178–186.
154. Acousto-optic tunable filter wavelength selectivity measurement method [Текст] / Б. С. Гуревич, С. В. Андреев, Дж. Исмаилов и др. // Proceedings of SPIE. — 2005. — Т. 5828. — С. 60–67.
155. Взаимосвязь характеристик устройств голографической памяти с постраничной записью [Текст] / А. А. Акаев, Б. Гуревич, С. Гуревич и др. // Proc. SPIE. — 1997. — Т. 3109. — С. 205–212.
156. Cross-talk-limitestorage capacity of volume holographic memory [Текст] / C. Gu, J. Hong, I. McMichael и др. // J. Opt. Soc. Am. — 1992. — Т. 9. — С. 1978–1983.
157. Cross-talk in a wavelength-multiplexed reflection-type photorefractive fiber hologram [Текст] / F.T.S. Yu, F. Zhao, H. Zhao и др. // Opt. Lett. — 1993. — Т. 18. — С. 1849–1851.
158. Cross-talk in a wavelength-multiplexed reflection-type photorefractive fiber hologram [Текст] / [F.T.S. Yu, F. Zhao, H. Zhao, S. Yin] // Opt. Lett. — 1993. — V. 18. — PP. 1849-1851.
159. **Curtis, K.** Cross-talk in wavelength-multiplexed holographic memories [Текст] / K. Curtis, C. Gu, D. Psaltis // Opt. Lett. — 1993. — V. 18. — PP. 1001-1003.
160. **Curtis, K.** Cross-talk in phase-coded holographic memories II) [Текст] / K. Curtis, D. Psaltis // Opt. Soc. Am. — 1994. — V. 10. — PP. 2547-2550.
161. **Yi, X** Statistical analysis of cross-talk noise and storage capacity in volume holographic memory [Текст] / X Yi., P. Yeh, C. Gu // Opt. Lett. — 1994. — V. 19. — PP. 1580-1582.
162. **Alvarez-Bravo, J.** Cross-talk in multiplexed holograms using angular selectivity in LiNbO₃ [Текст] // J. Alvarez-Bravo, N. Bolognini, L. Arizmendi // Opt. Mater. — 1995. — V. 4. — PP. 414-418.

163. **Campbell, S.** Statistical analysis of cross-talk noise and storage capacity in volume holographic memory II: image plane holograms [Текст] / S. Campbell, P. Yeh, C. Gu // Opt. Lett. – 1995. – V. 20 – PP. 779-781.
164. **Ramberg, R.C.** Holographic information storage [Текст] / R.C. Ramberg // RCA rev. – 1972. – V. 33. – PP. 5-52.
165. Hologram recording kinetics in media with different recording mechanisms [Текст] / С. Б. Гуревич, Б. С. Гуревич, Дж. А. Исмаилов и др. // Proceedings of SPIE. — 2006. — Т. 5946. — С. 1F-1–1F-7.
166. Акаев, А. А. Information Input and Storage in Holographic Memory [Текст] / А. А. Акаев, С. Б. Гуревич, К. М. Жумалиев. — Бишкек: Учкун, 2002. — 250 с.
167. Dynamics of the formation of holograms in a photopolymerizing medium [Текст] / А. А. Акаев, К. М. Жумалиев, С. М. Саидаматов и др. // J. Opt. Technol. — 1998. — Т. 65. — С. 288–292.
168. **Gladden, J. W.** Recording media [Текст] / J. W. Gladden, R. D. Leighty // Handbook of Optical Holography / ed. H. L. Caulfield. — Academic Press, 1979. — С. 277–298.
169. **Кириллов, Н. И.** High Resolution Photographic Materials for Holography and Their Processing [Текст] / Н. И. Кириллов. — М.: Наука, 1979. — 200 с. (на русском языке).
170. **Lin, L. H.** Hologram formation in hardened dichromated gelatin films [Текст] / L. H. Lin // Appl. Opt. — 1969. — Т. 8. — С. 963–966.
171. **Credell, T. L.** Thermoplastic media for holographic recording [Текст] / T. L. Credell, F. W. Spong // RCA Rev. — 1972. — Т. 33. — С. 206–226.
172. **Lin, L. H.** Write-read-erase in situ optical memory using thermoplastic holograms [Текст] / L. H. Lin, H. L. Beauchamp // Appl. Opt. — 1970. — Т. 9. — С. 2088–2092.
173. **Lo, D. S.** Thermoplastic hologram development using CO₂ laser [Текст] / D. S. Lo, L. H. Johnson, R. W. Honeybrink // Proc. SPIE. — 1977. — Т. 123. — С. 32–36.

174. **Urbach, J. C.** Advances in hologram recording materials [Текст] / J. C. Urbach // Proc. SPIE. — 1971. — Т. 25. — С. 31–32.
175. **Petrov, M. P.** Photorefractive Crystals in Coherent Optical Systems [Текст] / M. P. Petrov, S. I. Stepanov, A. V. Khomenko. — New York: Springer, 1991. — 300 с.
176. **Rahn, M. D.** High optical quality and fast response speed holographic data storage in a photorefractive polymer [Текст] / M. D. Rahn, D. P. West, K. Khand и др. // J. Appl. Phys. — 2000. — Т. 84. — С. 892–897.
177. **Luchetti, L.** Soft materials for optical storage [Текст] / L. Luchetti, F. Simoni // Riv. Nuovo Cim. — 2000. — Т. 23. — С. 1–28.
178. **Von der Linde, D.** Multiphoton photorefractive processes for optical storage in LiNbO₃ [Текст] / D. Von der Linde, A. M. Glass, K. F. Rodgere // Appl. Phys. Lett. — 1974. — Т. 25. — С. 155–157.
179. **Guenther, H.** Intensity dependence and white light gating of two color photorefractive gratings in LiNbO₃ [Текст] / H. Guenther, G. Wittmann, R. M. Macfarlane и др. // Opt. Lett. — 1997. — Т. 22. — С. 1305–1307.
180. Photothermic recording in data storage systems [Текст] / А. Рекус, Б. С. Гуревич, Дж. А. Исмаилов и др. // Proceedings of SPIE. — 2005. — Т. 5946. — С. 1–6.
181. **Schwartz, K. K.** Physics of Optical Recording in Dielectrics and Semiconductors [Текст] / K. K. Schwartz. — Riga: Zmatne, 1986. — 180 с.
182. **Гуревич, С. Б.** Information Transmission and Processing by Holographic Methods [Текст] / С. Б. Гуревич, В. Б. Константинов, В. К. Соколов и др. — М.: Сов. радио, 1978. — 220 с.
183. **Mazets, T. F.** Temperature dependence of vitreous As₂₅Se₃ and As₂S₃ layers refractive index near 300K [Текст] / T. F. Mazets, S. K. Pavlov, E. I. Shifrn // Pis'ma Zh. Tekh. Fiz. — 1982. — Т. 8. — С. 1036–1038.
184. **Malcuit, M. S.** Optically switched volume holographic elements [Текст] / M. S. Malcuit, T. W. Stone // Opt. Lett. — 1995. — Т. 20. — С. 1328.

185. Temperature dependence of As₂S₃ and As₂S₃ absorption edge in solid and liquid states [Текст] / A. A. Andreyev, B. T. Kolomiets, T. F. Mazets и др. // Fiz. Tverd. Tela. — 1976. — Т. 18. — С. 53–57.
186. **Danilov, V. V.** [Текст] / V. V. Danilov, A. I. Khrebtov // Opt. Spektrosk. — 1990. — Т. 68. — С. 1149.
187. **Simoni, F.** Nonlinear Optical Properties of Liquid Crystals and Polymer Dispersed Liquid Crystals [Текст] / F. Simoni. — Singapore: World Scientific, 1997. — 300 с.
188. **Bell, A. E.** Antireflection structures for optical recording [Текст] / A. E. Bell, F. W. Spong // IEEE J. Quantum Electron. — 1978. — Т. 14. — С. 487–492.
189. **Bertolini, R. A.** Diode laser optical recording using trilayer structures [Текст] / R. A. Bertolini // IEEE J. Quantum Electron. — 1981. — Т. 17. — С. 69–75.
190. **Bertolini, R. A.** High-density information storage and retrieval [Текст] / R. A. Bertolini // Proc. IEEE. — 1982. — Т. 6. — С. 589–596.
191. **Bell, A. E.** Reversible optical recording in trilayer structures [Текст] / A. E. Bell, F. W. Spong // Appl. Phys. Lett. — 1981. — Т. 38. — С. 920–926.
192. Erasable optical data storage [Текст] // Laser Focus. — 1984. — Т. 6. — С. 44.
193. Drexler. Drexon optical memory media for laser recording and archival data storage [Текст] // J. Vac. Sci. Technol. — 1981. — Т. 18. — С. 87–91.
194. **Smith, D. C.** Magnetic film optics in computer memories [Текст] / D. C. Smith // IEEE Trans. Magn. — 1967. — Т. 3. — С. 61–65.
195. **Mansuripur, M.** Disk storage: magneto-optics leads the way [Текст] / M. Mansuripur // Photon. Spectra. — 1984. — Т. 10. — С. 59–68.
196. **Lucchetti, L.** Soft materials for optical storage [Текст] / L. Lucchetti, F. Simoni // Rivista del nuovo cimento. — 2000. — V. 23. — № 1. — PP. 1-28.
197. Information recording method for photothermoplastic material [Текст] / [J. J. Jeenbaev, Dj. A. Ismailov, J. A. Akkoziev, He Ching Yu] // International Conference on Holography and Optical Information Processing (ICHOIP '96), 378 (December 31, 1996), Proceeding of SPIE. — V. 2866. — PP. 73-78.

198. Запись инфракрасных голограмм в области 10,6 мкм на триацетатцеллюлозе [Текст] / [Э. М. Бархударов, В. Р. Березовский, М. И. Бродзели и др.]. – Опт. и спектр, 1980. – Т. 48. – Вып. 5. – С. 820-822.
199. **Вейко, В. Г.** Лазерная обработка пленочных элементов [Текст] / В. Г. Вейко. – Л.: Машиностроение, 1986. – С. 248.
200. Влияние процессов записи на информационные характеристики записываемых голограмм [Текст] / [Н. К. Джаманкызов, А. М. Пецкус, С. Б. Гуревич, К. М. Жумалиев]. – М.: «Диалог-МИФИ», 2004. – 176 с.
201. Information metrology of acousto-optic tunable filters [Текст] / Б. С. Гуревич, С. В. Андреев, Дж. А. Исмаилов и др. // Proceedings of SPIE. — 2005. — Т. 5946. — С. 1–6.
202. Information properties of acousto-optic tunable filters [Текст] / Б. С. Гуревич, С. В. Андреев, А. В. Беляев и др. // Proceedings of SPIE. — 2000. — Т. 4148. — С. 194–201.
203. **Чанг, И. К.** Tunable acousto-optic filters: an overview [Текст] / И. К. Чанг // Optical Engineering. — 1977. — Т. 16. — С. 455–460.
204. **Оливейра, Ж. Э. Б.** Analysis of off-optical axis anisotropic diffraction in tellurium at 10.6 μm [Текст] / Ж. Э. Б. Оливейра, Э. Л. Адлер // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr. — 1987. — Т. 34. — С. 86–92.
205. **Сиванаягам, А.** High resolution noncollinear acousto-optic filters with variable passband characteristics: design [Текст] / А. Сиванаягам, Д. Финдлей // Applied Optics. — 1984. — Т. 23. — С. 4601–4608.
206. Acousto-optical devices metrology: information approach [Текст] / В. Н. Соколов, Б. С. Гуревич, С. В. Андреев и др. // Eur. Opt. Soc. Topical Meetings Digest Ser. — 1997. — Т. 15. — С. 55–58.
207. Gray scale levels transmission by acousto-optical devices [Текст] / Б. С. Гуревич, С. В. Андреев, П. А. Буров и др. // Proceedings of SPIE. — 1997. — Т. 3160. — С. 178–186.
208. **Корпел, А.** Acousto-optics: a review of fundamentals [Текст] / А. Корпел // Proceedings of IEEE. — 1981. — Т. 69. — С. 48–54.

209. **Диксон, Р. У.** Acoustic diffraction of light in anisotropic media [Текст] / Р. У. Диксон // IEEE J. Quantum Electron. — 1967. — Т. 3. — С. 85–93.
210. Взаимосвязь динамического диапазона и информационной ёмкости акустооптических устройств [Текст] / Б. С. Гуревич, С. В. Андреев, Дж. А. Исмаилов и др. // Proceedings of SPIE. — 2005. — Т. 5953. — С. 1–6.
211. **Шеннон, К. Э.** The Mathematical Theory of Communication [Текст] / К. Э. Шеннон, У. Уивер. — Urbana: University of Illinois Press, 1949. — 117 с.
212. **Бриллюэн, Л.** Science and Information Theory [Текст] / Л. Бриллюэн. — New York: Academic Press, 1956. — 347 с.
213. Gray scale levels transmission by acousto-optic devices [Текст] / Б. С. Гуревич, С. В. Андреев, П. А. Буров и др. // Proceedings of SPIE. — 1997. — Т. 3160. — С. 178–186.
214. Bragg diffraction of light on a sound beam modulated by an analog signal [Текст] / В. Н. Соколов, Б. С. Гуревич, С. В. Андреев и др. // European Optical Society Topical Meetings Digest Series. — 1997. — Т. 12. — С. 144–145.
215. Акустооптический настраиваемый фильтр с переменной спектральной селективностью [Текст] / Б. С. Гуревич, С. В. Андреев, Дж. А. Исмаилов и др. // Proceedings of SPIE. — 2005. — Т. 5828. — С. 53–59.
216. **Фейхтнер, Дж. Д.** Tunable acousto-optic filters and their application to spectroscopy [Текст] / Дж. Д. Фейхтнер, М. Готтлиб, Дж. Дж. Конрой // Proceedings of SPIE. — 1976. — Т. 82. — С. 106.
217. Фуджи, Й. Acousto-optic filters with controllable passband [Текст] / Й. Фуджи, Х. Хаяши // Journal of Applied Physics. — 1973. — Т. 46. — С. 5046.
218. Programmable acousto-optic filter [Текст] / И. К. Чанг, П. Кацка, Дж. Джейкоб и др. // Proceedings, IEEE 1979 Ultrasonic Symposium. — 1979. — С. 40.
219. **Волошинов, В.** Spectral resolution control of acousto-optical cells operating with collimated and divergent beams [Текст] / В. Волошинов, Д. Мишин // Proceedings of SPIE. — 1993. — Т. 2051. — С. 378–385.

220. Гуревич, Б. С. Information properties of acousto-optic tunable filters [Текст] / Б. С. Гуревич, С. В. Андреев, А. В. Беляев и др. // Proceedings of SPIE. — 2000. — Т. 4148. — С. 194–201.
221. **Егоров, Ю. В.** Двумерный акустооптический анализатор спектра с пространственным и временным интегрированием [Текст] / Ю. В. Егоров, А. И. Елисеев. – Радиотехника.- 1985. – № 10. – С. 76-78.
222. **Газаров, Ч. В.** Acousto-optical spectrometer for air pollution monitoring [Текст] / Ч. В. Газаров, В. Е. Пожар, В. Н. Жогун // Proc. SPIE. — 1993. — Т. 2107. — С. 143–147.
223. Денеш, Л. Дж. Акустооптические перестраиваемые фильтры в приложениях обработки изображений [Текст] / Л. Дж. Денеш, М. С. Готтлиб, Б. Камински // Оптическая инженерия. — 1998. — Т. 37, № 4. — С. 1262–1267.
224. **Волошинов, В. Б.** Сканирование оптических изображений путем акустооптической фильтрации света [Текст] / В. Б. Волошинов, Л. А. Кулаков, О. В. Миронов // Радиотехника и электроника.- 1988. – № 10. – С. 2177-2182.
225. **Корпел, А.** Акустооптика: Обзор основных принципов [Текст] / А. Корпел. – ТИИЭР.- 1981. – Т. 69, № 1. – С. 55-62.
226. Информационные ограничения в акустооптических перестраиваемых фильтрах [Текст] / Б. С. Гуревич, С. В. Андреев, А. В. Беляев и др. // Proceedings of SPIE. — 2000. — Т. 4112. — С. 148–156.
227. Wavelength-multiplexed holographic storage in a sensitive photorefractive crystal using a visible light [Текст] / [S. Yin, H. Zhou, F. Zhao, F. T. S. Yu] // Optics Communications.- 1993. – V. 101. – P. 317-321.
228. **Li, H. Y. S.** Three-dimensional holographic disks [Текст] / H. Y. S. Li, D. Psaltis // Applied Optics.- 1996. – V. 33. – P. 3764-3774.
229. **Campbell, S.** Sparse-wavelength angle-multiplexed volume holographic memory system: analysis and advances [Текст] / S. Campbell, P. Yen // Applied Optics.- 1996. – V. 35. – № 14. – P. 2380-2388.
230. Image processing using acousto-optic tunable filters [Текст] / [B. S.

Gurevich, S. V. Andreyev, A. V. Belyaev and others] // Proceedings of International Forum on Wave Electronics and Applications.- 2001. – V. 1. – P. 157.