



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ _____ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА _____

КАФЕДРА _____ ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ _____

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ

НА ТЕМУ:

«Разработка и исследование характеристик
тонкослойных дифракционных решеток на основе
жидких кристаллов»

Студент _____
РЛ2-81Б
(Группа)

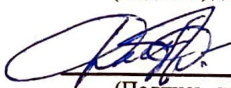


(Подпись, дата)

Д.Д. Барма

(И.О.Фамилия)

Руководитель ВКР



(Подпись, дата)

Д.Г. Денисов

(И.О.Фамилия)

Консультант

(Подпись, дата)

(И.О.Фамилия)

Консультант

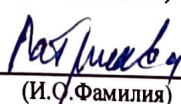
(Подпись, дата)

(И.О.Фамилия)

Нормоконтролер



(Подпись, дата)




(И.О.Фамилия)

2021 г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой _____
(Индекс)


_____ (И.О.Фамилия)
« _____ » _____ 20 ____ г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы бакалавра

Студент группы РЛ2-81Б

Барма Дарья Денисовна
(фамилия, имя, отчество)

Тема квалификационной работы «Разработка дифракционных решеток на основе жидких кристаллов»

Источник тематики (НИР кафедры, заказ организаций и т.п.)

Лаборатория жидких кристаллов ФНИЦ «Кристаллогра-
-фия и оптоэлектроника» РАН

Тема квалификационной работы утверждена распоряжением по факультету
№ _____ от « _____ » _____ 20 ____ г.

Часть 1. Научно-исследовательская

Провести обзор современных источников исследования с целью изучения современного состояния научного вопроса, посвящённого современным эффективным дифракционным тонкоплёночным структурам к классу изделий которых относятся дифракционные решётки, функционирующие на пропускание электромагнитного излучения. Проанализировать выходные параметры данных структур и технологии их создания. Провести математическое моделирование физического явления объёмной дифракции при прохождении электромагнитной волны с определённым типом поляризации (состоянием годографа вектора электрической напряжённости) на элементах объёмной дифракционной решётки, состоящей из жидкого кристалла типа E7 с характеристиками: двулучепреломление $\Delta n = 0.224$ (при $\lambda = 589$ нм), диэлектрическая анизотропия $\Delta \epsilon = +13.8$ ($\epsilon_{\text{ра}} = 19.0$), вязкость 0.19 Па·с, коэффициенты упругости $K_{11} = 11.1$ пН, $K_{22} = 6.5$ пН,

$K_{33}=17.1$ пН. Проанализировать полученные результаты моделирования (дифракционную эффективность на длине волны 550 нм) при различных номинальных значениях напряжения.

Часть 2. Проектно - конструкторская

Разработать оптимальную конструкцию ЖК ячейки, а также предложить функциональную схему системы записи голограммы на исходной полужелатинизированной пластине и функциональную схему стенда контроля дифракционной эффективности ДЭ на основе ЖК ячейки. Разработать схему оптическую микрообъектива системы записи голограмм, имеющую следующие характеристики: Фокусное расстояние $f'=60$ мм; Диаметр входного зрачка $D_{вх}=20$ мм; Угловое поле в пространстве изображений $2\omega'=8^\circ$; Ахроматизация для длины волны лазера $\lambda=457$ нм;

Часть 3. Технологическая

Разработать технологический процесс изготовления дифракционной ЖК ячейки, с пояснением ключевых операций на этапах разработки её конструктивных параметров.

Оформление квалификационной работы:

Расчетно-пояснительная записка на 65 листах формата А4.

Перечень графического (иллюстративного) материала (чертежи, плакаты, слайды и т.п.)

- 1) 1-А1 – «Моделирование и результаты эксперимента».
- 2) 1-А1 – «Оптический выпуск».
- 3) 1-А1 – «Сборочный чертёж установки для измерения интенсивности».
- 4) 1-А1 – «Схема функциональная устройства записи голограммы».
- 5) 1-А1 – «Эскизы основных операций технологии создания ЖК ячейки».

Дата выдачи задания «10» февраля 2021 г.

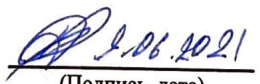
В соответствии с учебным планом выпускную квалификационную работу выполнить в полном объеме в срок до « ____ » _____ 20 ____ г.

Руководитель квалификационной работы


(Подпись, дата)

(И.О. Фамилия)

Студент


(Подпись, дата)

(И.О. Фамилия)

Примечание:

1. Задание оформляется в двух экземплярах: один выдается студенту, второй хранится на кафедре.

РЕФЕРАТ

Расчетно-пояснительная записка 65 с., рисунков 44, таблиц 5, источников 24, приложений 1.

ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА, ДИФРАКЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ, УГОЛ ДИФРАКЦИИ, ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ, ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ ЯЧЕЙКА, ПОВОРИТ ПОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ, ГОЛОГРАФИЧЕСКОЕ ЭКСПОНИРОВАНИЕ.

Объектом исследования являются дифракционные решетки, работающие на пропускание.

Предметом исследования свойства и структура тонкослойных дифракционных решеток на основе жидких кристаллов.

Целью выпускной квалификационной работы является разработка дифракционных решеток на основе жидких кристаллов, получение оптимальных электрооптических свойств и высокой дифракционной эффективности.

Для достижения поставленной цели изучения основных принципов дифракции и проведения сравнительного анализа дифракционных решеток, изготовленных разными методами. Для проведения эксперимента собирается ячейка на жидком кристалле и исследуются ее основные характеристики. Далее с помощью методов компьютерного моделирование производится моделирование системы жидко кристаллической ячейки по заданным параметрам. Сравнивается результат эксперимента и моделирования.

СОДЕРЖАНИЕ

РЕФЕРАТ	2
СОДЕРЖАНИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Основные положения теории дифракции.....	7
1.1 Дифракционные решетки	8
1.1.1 Пропускающие дифракционные решетки	12
1.2 Сравнительный анализ ДР по основным параметрам.....	12
1.3 Математический аппарат расчета объёмной ДЭ исходя из параметров решетки.....	20
2 Технология создания ДР на основе ЖК ячеек	23
2.1 Расчет схемы записи голограммы	26
2.1.1 Синтез объектива	27
2.2 Описание установки для проведения эксперимента	35
3 Проведение эксперимента.....	37
3.1 Эксперимент первый	37
3.2 Эксперимент второй	40
4 Моделирование	45
4.1 Выводы к главе.....	52
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	54
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	55
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	58

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В настоящее время все больше компаний начинают разрабатывать системы дополненной и виртуальной реальности, которые в будущем найдут широкое применение в различных областях науки и техники, в медицине и других прикладных сферах.

Дифракционные решетки в таких системах применяются для ввода и вывода излучения, поэтому основные характеристики, какими они должны обладать – это высокая дифракционная эффективность при больших углах вывода излучения. Эти решетки должны обладать сравнительно малыми размерами, чтобы их легко можно было встроить в систему очков дополненной или виртуальной реальности. На данный момент большинство разработок в данной сфере основано на применении голографических решеток. Но все больший интерес вызывает использование дифракционных решеток на основе жидких кристаллов, а именно ЖК полимеров.

Актуальность использования ЖК при создании решеток является возможность управления свойствами решетки при приложении напряжения. В частности, мы можем изменять показатель преломления до нужной величины, большей, чем у простых дифракционных решеток. Данное свойство делает ЖК решетки привлекательными для использования в устройствах дополненной реальности. Помимо этого, решетку можно создать на основе ЖК полимера, нанеся его в несколько слоев. Такая решетка не будет переключаться, но будет обладать более качественными характеристиками. Данный способ позволяет не зависеть от толщины ячейки и перейти к малым периодам решетки.

Жидкокристаллическая технология позволяет расширить возможности применения дифракционных решеток. За счет периодического изменения ориентации директора жидкого кристалла (ЖК) достигается необходимая модуляция показателя преломления. В нашем случае направление ориентации

задается с помощью лазерной записи интерференционной картины (голограммы) в тонком слое дихроичного красителя на подложке, который используется в качестве ориентирующего слоя ЖК. Период голографической решетки определяется углом между двумя интерферирующими пучками [1]. ДР на основе ЖК применяются в устройствах управления и формирования лазерного пучка [2],[3], лидарах [4], ЖК линзах с перестраиваемым фокусным расстоянием [5],[6],[7],[8].

Решетки на ЖК могут иметь многочисленные применения в фотонных системах и дисплеях, включая высоко эффективные проекционные дисплеи, в широкоугольных и узконаправленных дисплеях и мультиплексорах [9].

Целью выпускной квалификационной работы является разработка дифракционных решеток на основе жидких кристаллов, получение оптимальных электрооптических свойств и высокой дифракционной эффективности.

Для ее достижения были выполнены следующие **задачи**:

1. Провести сравнительный анализ характеристик дифракционных решеток, работающих на пропускание оптического излучения.
2. Проанализировать возможность и целесообразность применения дифракционных решеток нового поколения на основе жидких кристаллов в оптических схемах спектральных приборов для различных приложений.
3. Ознакомится с математическим аппаратом расчета дифракционных решеток, основанном на численном решении уравнений Максвелла.
4. Изучить технологию создания ЖК ячеек и дифракционных решёток на их основе, методику измерения их свойств и в частности электрооптических.
5. Провести анализ влияния двулучепреломления ЖК и толщины ячейки на дифракционную эффективность дифракционных решеток.
6. Разработать методику экспериментальной апробации основных теоретических положений, сделанных в научной работе.

Исследования в рамках выпускной квалификационной работы проводились на базе ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в лаборатории жидких кристаллов.

Основные результаты выпускной квалификационной работы опубликованы в журнале «Успехи прикладной физики» [10].

Апробация результатов работы. Основные результаты докладывались на двух научных мероприятиях:

- X Международная конференция по фотонике и информационной оптике, НИЯУ МИФИ, 27-29 января 2021 г;
- Студенческая научно-техническая конференция «Студенческая научная весна», 28-30 апреля 2021г.

1 Основные положения теории дифракции

В геометрической оптике широко пользуются понятием луча, т.е. элемента лучевого пакета или пучка света, распространяющегося прямолинейно. Мы знаем о законе прямолинейного распространения света, подтверждения которому найти очень просто. Одним из них является образование тени позади непрозрачного препятствия, находящегося на пути света, излучаемого точечным источником. Границы тени определяются лучами света, которые проходят мимо препятствия, касаясь его поверхности.

Однако с позиции волновой теории прямолинейность распространения света не так очевидна. Согласно принципу Гюйгенса, каждую точку поля волны можно рассматривать как источник вторичных волн, распространяющихся, в том числе и в область геометрической тени препятствия. Тогда откуда же возникает тень, если свет имеет волновую природу? Опыты показали, что закон прямолинейного распространения света заметно нарушается при прохождении света сквозь достаточно узкие щели и отверстия, а также при освещении небольших непрозрачных препятствий. В этих случаях на экране, установленном за отверстием или препятствием, вместо четко разграниченных областей света и тени наблюдается система интерференционных максимумов и минимумов освещенности (рис. 1).

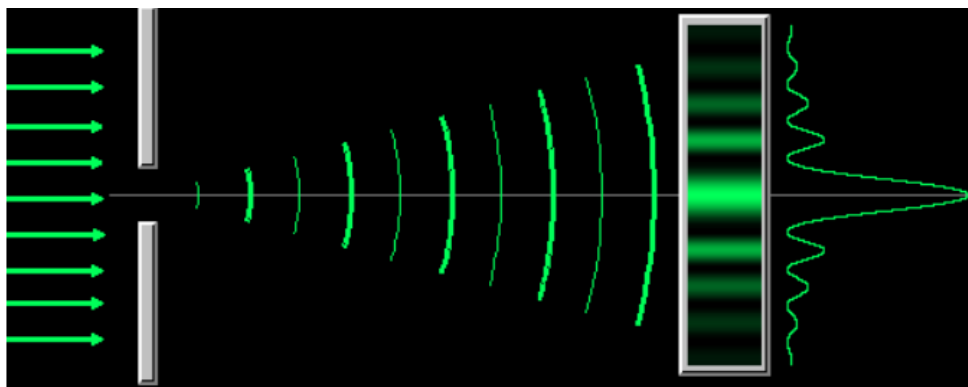


Рисунок 1 – Дифракция на отверстии.

Таким образом явление дифракции позволяет управлять осью диаграммы направленности оптического пучка, что даёт возможность перераспределять энергию в заданный дифракционный порядок на заданное угловое положение. Так, в частности данное физическое явление возможно наблюдать при взаимодействии электромагнитного излучения с профилем дифракционной решётки, имеющим определённые геометрические характеристики, определяющие как эффективность дифракции, так и угол дифракции.

Далее рассмотрим особенности существующих дифракционных решёток.

1.1 Дифракционные решетки

Для перераспределения световой энергии и разложения света в спектр используются дифракционные решетки. Классическая дифракционная решетка – это оптический элемент, действие которого основано на явлении интерференции, приводящей к отклонению направления распространения света от нормали. Это может быть набор дифрагирующих элементов, таких как узор из прозрачных щелей или отверстий в непрозрачном экране, или набор отражающих канавок на подложке (рис. 2). Дифракция на решетке является в свою очередь многолучевой интерференцией согласно принципу Гюйгенса-Френеля [11], по которому в каждой точке пространства поле волны можно рассматривать как источник вторичных волн, распространяющихся, в том числе, и в области геометрической тени препятствия. Таким образом, дифракционная картина, возникающая, например, на экране, определяется как результат процесса интерференции электромагнитных волн, приходящих от всех щелей. Поскольку щели разделены одинаковым расстоянием, разности хода лучей, поступающих из двух соседних щелей, будут для выделенного направления идентичны по всей решетке.

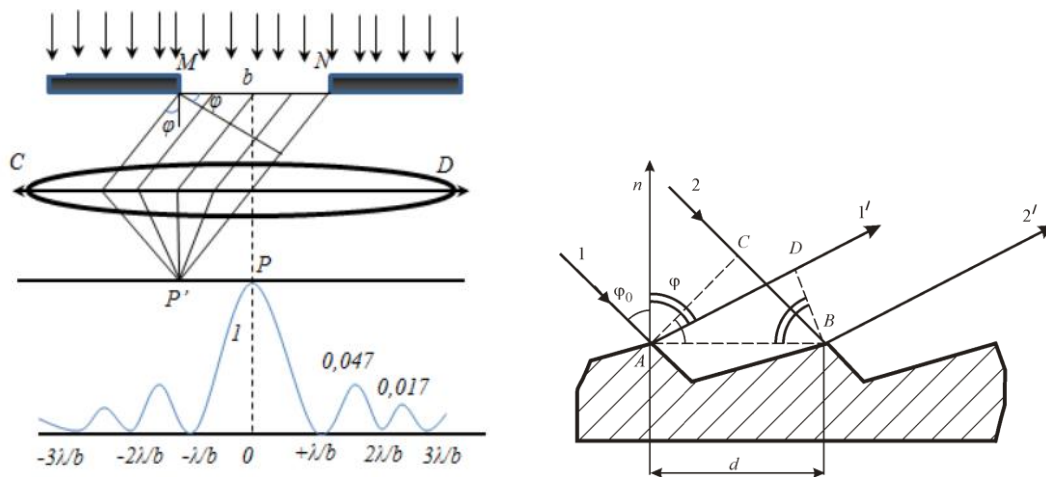


Рисунок 2 – Дифракционные решетки: пропускающая и отражающая.

Для профиля дифракционной решётки, изображённой на рисунке 2, можно видеть, что разность хода волн от двух соседних щелей и разность фаз между ними равны.

$$\Delta = d \cdot \sin \varphi,$$

где d - период решетки, мм.

Волны от соседних щелей усиливают друг друга при условии

$$\Delta = k \cdot \lambda,$$

где λ – длина волны излучения, мкм.

Тогда получаем условие для главных максимумов дифракционной решетки

$$d \cdot \sin \varphi = k \cdot \lambda \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

Основными характеристиками [11] дифракционных решеток являются:

- период решетки d
- угловая дисперсия D_φ , мм^{-1}
- дисперсионная область $\Delta\lambda$, мкм
- разрешающая способность R
- угол дифракции φ , $^\circ$
- дифракционная эффективность η , %

Остановимся поподробнее на некоторых из этих параметров.

Угловая дисперсия характеризует угловое расстояние между близкими спектральными линиями и находится по формуле:

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{m}{d\cos\varphi} = \frac{m}{\sqrt{d^2 - m^2 \cdot \lambda^2}}$$

где m – это порядок дифракционного максимума (рис. 2).

Дисперсионная область.

$$G = \Delta\lambda = \frac{\lambda}{m}$$

Предельная ширина спектрального интервала $\Delta\lambda$, при которой спектры соседних порядков (m и $m + 1$) перекрываются только своими границами, называется дисперсионной областью G . Поскольку в дифракционных решетках используются спектры низких порядков, то решетки характеризуются широкими областями дисперсии. Они пригодны для исследования широких участков спектра.

Разрешающая способность.

$$R = \lambda / \delta\lambda = m \cdot N$$

Спектральные линии с близкими длинами волн λ и λ' считаются разрешенными, если главный максимум дифракционной картины для одной длины волны совпадает по своему положению с первым интерференционным минимумом в том же порядке для другой длины волны. Повышения этой характеристики добиваются увеличением общего количества штрихов, имеющих в дифракционной решетке.

Дифракционная эффективность определяется количеством дифрагированного на решетке света, а значит определяет эффективность работы самой решетки, как дифракционного элемента.

$$\eta = \frac{I_i}{I_{пад}}, \quad (1)$$

где I_i – интенсивность i -го максимума, Вт;

$I_{пад}$ – интенсивность света, падающего на ячейку, Вт.

Как уже упоминалось ранее, дифракционные решетки по принципу работы делятся на пропускающие и отражающие. В нашей работе мы подробнее остановимся на пропускающих ДР.

1.1.1 Пропускающие дифракционные решетки

Периодическая структура дифракционных решеток, работающих на пропускание создается путем вырезания или гравировки на прозрачной подложке параллельных штрихов. На такой поверхности свет может рассеиваться.

Пропускающие решетки (рис. 3) обладают низкой поляризационной чувствительностью в отличие от отражающих решеток, поскольку падающий свет не отражается от зеркального покрытия, такого как алюминий.

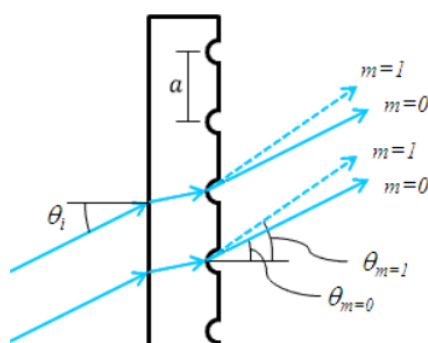


Рисунок 3 – Ход лучей через решетку.

В случае ДР на основе жидких кристаллов происходит взаимодействие фазы поляризованного света с регулярно модулированным показателем преломления. Поэтому ДР на основе ЖК решетка является фазовой ДР [2]. ДР на основе ЖК можно переключать электрическим полем.

1.2 Сравнительный анализ ДР по основным параметрам

В ходе работы был проведен сравнительный анализ дифракционных решеток, полученных разными методами. Так как, создание дифракционных решеток – это тема, получившая свое широкое распространение довольно давно,

то к сегодняшнему моменту существует огромное количество методов. Рассмотрим некоторые из них.

Первыми рассмотрим пропускающие решетки, работающий в УФ, видимом и ИК диапазонах, полученные методом **репликации из дифракционной решетки эталона** [12]. Так как предельная длина волны рабочей области спектра решетки определяется полным внутренним отражением света на гранях дифракционных полос, то необходимо выбрать материал подложки и реплицирующий материал с соответствующими показателями преломления. В статье 15 в качестве реплицирующего материала использовалась смола PGMF. Линии на решетках-оригиналах были нанесены алмазным резцом на алюминиевом подслое. Из-за этого мы можем менять угол профиля, а соответственно и угол блеска (Одна из характеристик решетки. Это угол, под которым решетка «блестит», т.е. зеркально отражает свет от рабочих граней штрихов. Этот угол соответствует центру основного дифракционного максимума в отраженном от решетки свете, когда свет падает по нормали к зеркальной грани штриха) в широких пределах. Единственным ограничением является предельно достижимый угол шлифования алмазной фрезы. При этом возможности заточки алмазных фрез ограничены углом 90° .

На рисунке 4 показана зависимость ДЭ решеток с одинаковым периодом для разных углов блеска.

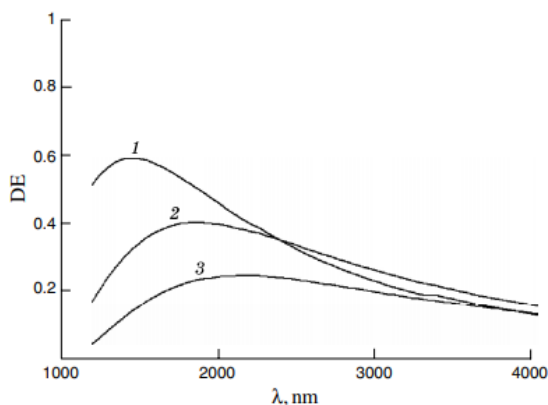


Рисунок 4 – Зависимость ДЭ от угла блеска для решеток с периодом 150 лин/мм. 1- 30° , 2- 40° , 3- 50° [12].

Видно, что увеличение угла блеска решеток до значений выше 40° заметно снижает ДЭ в коротковолновой части рабочей области и сохраняет ее значение в длинноволновой части.

На рисунке 5 представлены графики распределения ДЭ решеток в зависимости от периода.

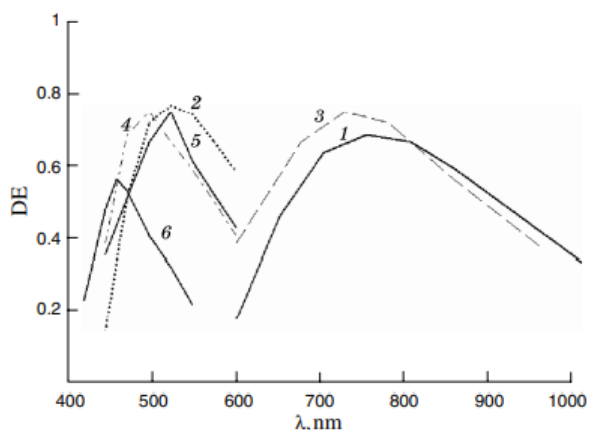


Рисунок 5 – Зависимость ДЭ от периода. 1-50 лин/мм, 2-100 лин/мм, 3- 120 лин/мм, 4 – 150 лин/мм, 5 -300 лин/мм, 6- 600 лин/мм [12].

На рисунке 6 показаны рассчитанные дифракционные эффективности решетки с углом скольжения $7,7^\circ$ и частотой 100 лин/мм для различных углов между гранями профиля.

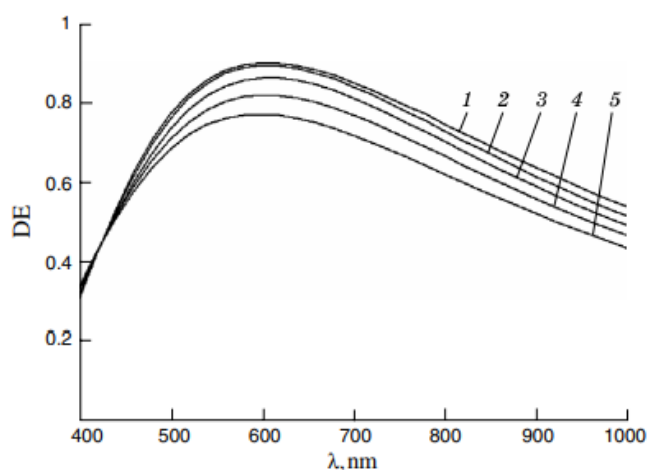


Рисунок 6 – Зависимость ДЭ от угла профиля. 1-80°, 2-90°,3-100°,4-110°, 5-120° [12].

Далее для сравнения характеристик будем приводить решетки, которые имеются в продаже у компаний, занимающихся разработкой оптических элементов.

Рассмотрим **объемно-фазовые голографические решетки (VRH)** от Wasatch Photonics [13].

Объемная фазовая голографическая решетка работает по принципу интерференции, рассеивая свет из-за модуляции показателя преломления в материале решетки. VRH решетки компании Wasatch Photonics работают в режиме пропускания, используя дихромированный желатин (DCG) в качестве активного материала.

Компания предлагает три основных технологии проектирования решеток, работающих на пропускание: стандартные / улучшенные решетки, решетки Диксона (в них используется более толстый слой дихроичного красителя, в котором модуляция показателя преломления выбрана так, чтобы оптимизировать эффективность s и p поляризаций). А также решетки HD (решетки с высокой дисперсией, обеспечивающие значительно меньшую зависимость в очень широком диапазоне полосы пропускания). Они имеют различные преимущества в отношении ширины полосы, эффективности и поляризации.

Ниже приведена таблица с параметрами решеток и графики зависимости дифракционной эффективности от длины волны для значений частоты 250 и 1800 лин/мм (рис.7-9).

	WP-250/1250-xx	WP-600/600-xx	WP-1800/532-xx	WP-600/1550-xx
Nominal Wavelength	900 - 1800 nm	450 - 750 nm	450 - 650 nm	1300 - 1800 nm
Efficiency (ave pol)	≥ 70% at 1310 nm	≥ 80% at 633 nm	≥ 88% at 532 nm	≥ 90% at 1550 nm
Spatial Frequency	250 ± 0.5 lines/mm	600 ± 0.5 lines/mm	600 ± 0.5 lines/mm	600 ± 0.5 lines/mm
Angle of Incidence	9° @ 1250 nm	10.4° @ 600 nm	28.6° @ 532 nm	27.7° @ 1550 nm
Sizes Available (-xx)	30 mm Ø x 3.0 mm	25.4 mm Ø x 3.0 mm 50.8 mm Ø x 6.0 mm	25.4 mm Ø x 3.0 mm 50.8 mm Ø x 6.0 mm	25.4 mm Ø x 3.0 mm 50.8 mm Ø x 6.0 mm
Wavefront Distortion	Standard: $\lambda/5$ rms Enhanced: $\lambda/10$ rms (@ 632.8 nm)			
Surface Quality	60-40 scratch-dig			
AR Coating	Standard: R <math>< 1.0\%</math> Enhanced: R <math>< 0.5\%</math> (over bandwidth)			

Рисунок 7 – Параметры голографических решеток [13].

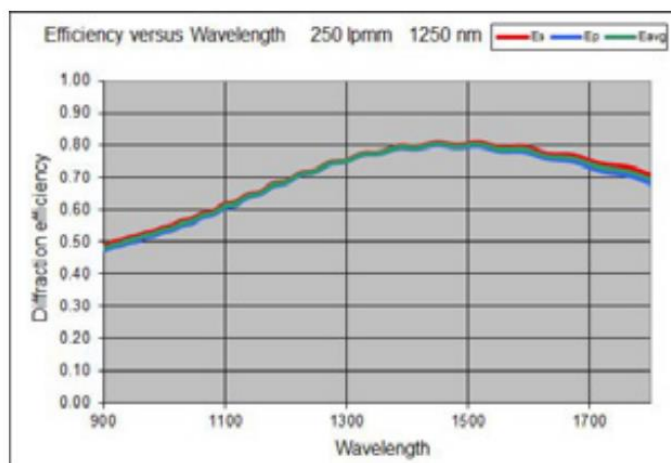


Рисунок 8 – Зависимость ДЭ от λ при 250лин/мм [13].

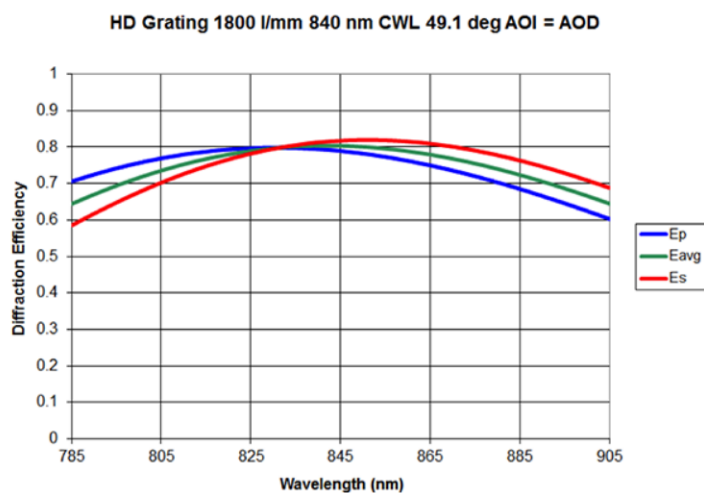


Рисунок 9 – Зависимость ДЭ от λ при 1800лин/мм [13].

Цвета на графиках определяются следующим образом: красный- для s-поляризованного света, синий для р-поляризованного света и зеленый- для циркулярно-поляризованного света.

Производитель Thorlabs предлагает дифракционные решетки работающие в видимой части спектра на основе субстрата Schott B270 [14]. В таких решетках углы дифракции увеличиваются с увеличением плотности канавок, из-за преломляющих свойств материала подложки ограничивается пропускание на более высоких длинах волн (рис. 10).

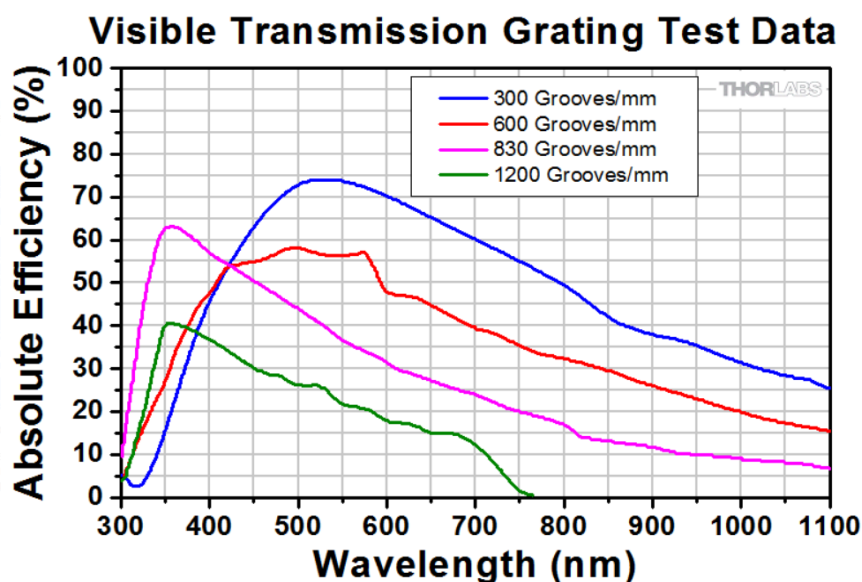


Рисунок 10 – Зависимость ДЭ от длины волны [14].

Акустооптические модуляторы (рис. 11) также могут выполнять роль дифракционной решетки, их действие основано на изменении показателя преломления вещества под действием давления [15]. Чаще всего это давление создается ультразвуковыми волнами. Источником этих волн в свою очередь является пьезоэлектрический преобразователь. С помощью акустической волны в кристалле создается структура с периодически изменяющимся показателем преломления. Эта структура и играет роль дифракционной решетки.

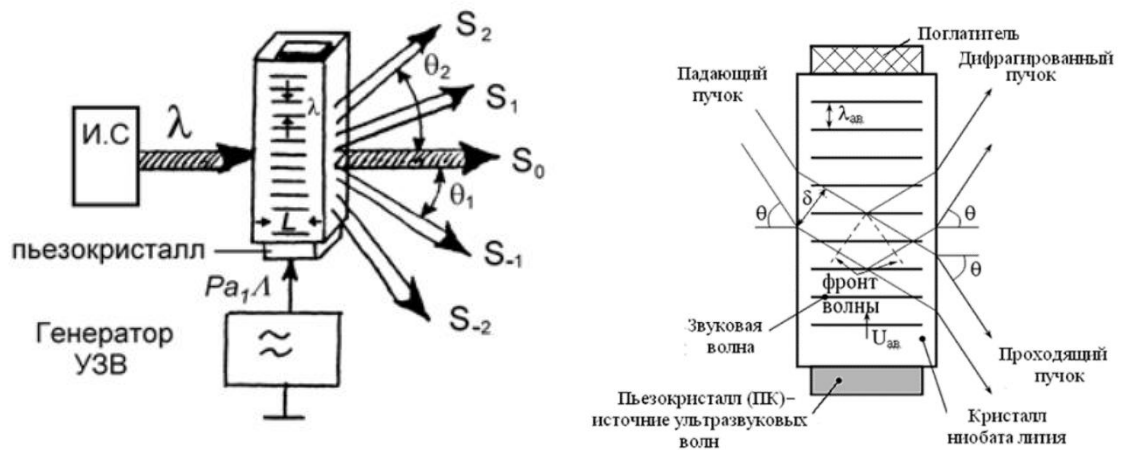


Рисунок 11 – Акустооптический модулятор [15].

В статье 13 рассматриваются две модификации акустооптических модуляторов на кристалле $\text{KG}(\text{WO}_4)_2$ (KGW) и $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ (KYW). Для обоих этих кристаллов в ходе эксперимента была вычислена дифракционная эффективность (рис. 12) проходящего света в зависимости от угла распространения акустической волны по отношению к оси N_g (одна из главных осей показателя преломления кристалла).

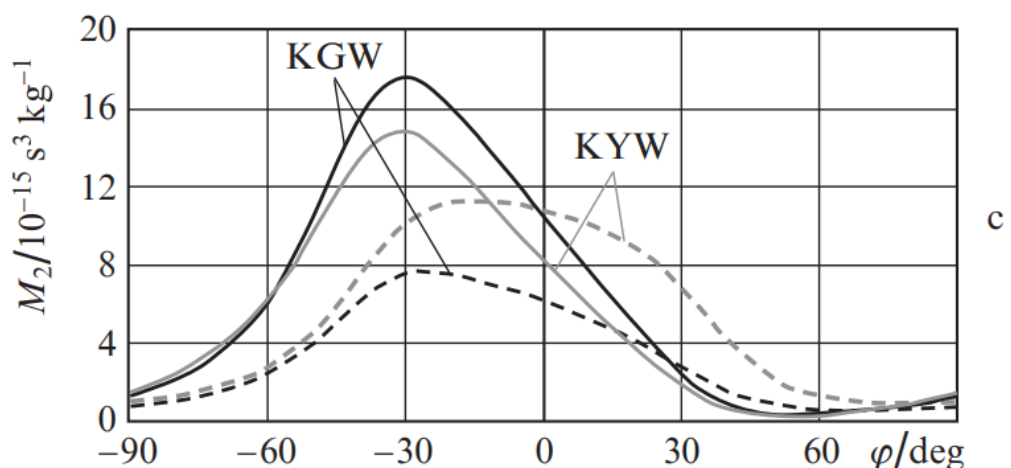


Рисунок 12 – Зависимость дифракционной эффективности поляризованной волны в направлении N_g (---) и N_m (-----) в зависимости от угла распространения акустической волны [15].

Также дифракционные решетки можно изготавливать на основе ЖК ячеек. В случае ДР на основе жидких кристаллов происходит взаимодействие фазы поляризованного света с регулярно модулированным показателем преломления. Поэтому ДР на основе ЖК решетка является фазовой ДР. Подробнее технология создания самой ЖК ячейки описана ниже.

Рассмотренные выше материалы обобщены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение характеристик ДР

	Метод получения	Угол дифракционного максимума	Дифракционная Эффективность	Частота, лин/мм	Длина волны, нм
1	Репликация		70%	300	532
2	Объемно-фазовая голографическая решетка		>88%	600	532
3	Голографическая решетка (на основе субстрата Schott B270)		75%	300	535
4	ЖК ячейка (Круговая поляризация)	6°	60% (центр)	300	532
5	ЖК ячейка (Линейная поляризация)		95,6% (центр)	300	532
6	Акустооптический кристалл RGW		64%		1060

1.3 Математический аппарат расчета объёмной ДЭ исходя из параметров решетки

Поскольку рассматриваемые в данной работе ДР являются объёмными, т.е. дифракция происходит в толще оптического материала, то для начала целесообразней рассмотреть общие принципы дифракции электромагнитного излучения на объёмной решётке.

Режим работы (рис. 13) объёмных решеток определяется безразмерным параметром дифракции:

$$Q = \frac{2\pi\lambda \cdot d}{\bar{n}\Lambda^2}, \quad (2)$$

где Λ - период решетки, мкм;

λ – длина волны вакуума, мкм;

d – толщина ячейки, мм;

\bar{n} – средний показатель преломления соответственно.

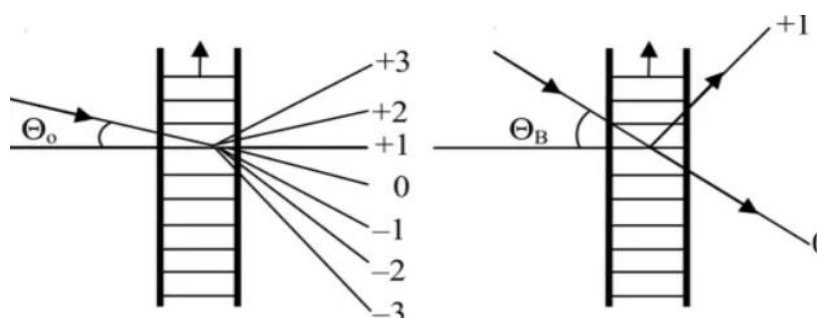


Рисунок 13 – Режим Р-Н и Брэгга [14].

Режим Рамана-Ната ($Q < 1$) (рис. 13) имеет несколько порядков дифракции.

Режим Брэгга ($Q > 10$) (рис. 13). Решетки работающие в режиме Брэгга, имеют резко избирательный угловой и спектральный отклик и могут обеспечить

до 100% эффективности в одном порядке, когда падающая волна распространяется вдоль угла Брэгга в среде решетки:

$$\sin\theta_B = \lambda/2n_{cp}L$$

Определение угла ориентации решетки:

$$\Phi(x, z) = \pi x / \Lambda_x + \varphi z / d$$

где φ – угол закрутки слоя, °;

Λ_x – период на поверхности, мкм;

Угол наклона θ_G равен

$$\theta_G = \arctan(\varphi\Lambda_x / d\pi).$$

Для режимов Брэгга и Рамана-Ната в жидко-кристаллических средах используют такие термины как тонкая и толстая решетки соответственно [16]. Для каждого режима дифракционная эффективность описывается своей функцией в зависимости от параметра γ (рис. 14). Этот параметр зависит от параметров самой дифракционной решетки, и его можно найти по формуле:

$$\gamma = \frac{\pi\varepsilon_1 d}{2\lambda\varepsilon_0^{1/2}},$$

где ε_1 и ε_0 это диэлектрические проницаемости, ф/м.

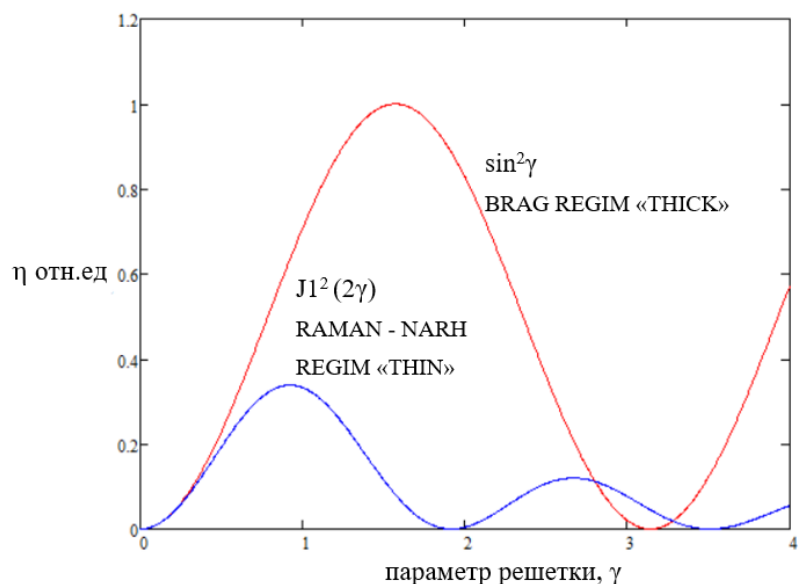


Рисунок 14 – Распределение дифракционной эффективности в зависимости от параметров решетки для режимов Брэгга и Рамана-Ната [16].

Максимальный эффективный угол падения θ_P связан с углом наклона уравнением

$$\sin \left(\frac{1}{\sin \left(\frac{n_{in}}{n_{cp}} \sin \theta_p \right)} - \theta_G \right) = \sin \theta_B$$

где n_{in} – показатель преломления падающей среды.

Для решеток без наклонной плоскости ($\theta_G = 0$) максимальная дифракционная эффективность возникает, когда угол падения $\theta_{in} = \theta_P = \theta_B$.

2 Технология создания ДР на основе ЖК ячеек

На основе вышеприведённых теоретических исследований с целью подтверждения эффективности функционирования ДЭ на основе жидких кристаллов в работе был разработан технологический процесс изготовления ЖК ячеек, который включает следующие основные операции:

1. Из плоских полированных заготовок, выполненных из оптического стекла марки К8 вырезаются подложки нужной конфигурации 2x2 см.
2. Далее на предварительно отчищенную подложку с прозрачным электродом методом центрифугирования наносят дихроичный азокраситель (ПЧЖ – «протравной чисто-желтый» [17]).
3. После нанесения азокрасителя подложку необходимо высушить. Для этого используют специальную печь, куда помещают образец на 30 минут для сушки при температуре 185-200° С.
4. Далее для задания ориентации ЖК подложку с красителем натирают на установке Bench Top Rubbing Machine. Валик оставляет на красителе следы, по которым ориентируется директор ЖК, приобретая планарную ориентацию.
5. Затем, используя установку, схема которой показана на рисунке 16, на пленку красителя проецируют голографическую решетку (длина волны лазера 457 нм), возникающую в результате интерференции двух пучков лучей с левой и правой круговыми поляризациями голографа вектора электрической напряжённости, в соответствии со схемой на рисунке 23 [1]. Таким образом мы получаем решетку с синусоидальным профилем. Период записанной решетки $\Lambda=5.2$ мкм.

На вторую подложку для ЖК-ячейки также наносится краситель с последующим натиранием для получения планарной ориентации ЖК.

6. Далее на подложку напыляются калиброванные сферические пластиковые спейсеры Micropearl (Sekisui) диаметром 4 мкм, задающие величину зазора, в собранной ячейке.

7. После подготовки двух подложек, они складываются между собой с небольшим сдвигом. Это необходимо для того, чтобы к электродам можно было припаять контакты, а также для дальнейшего заполнения ячейки. Вид ячейки представлен на рисунке 15.

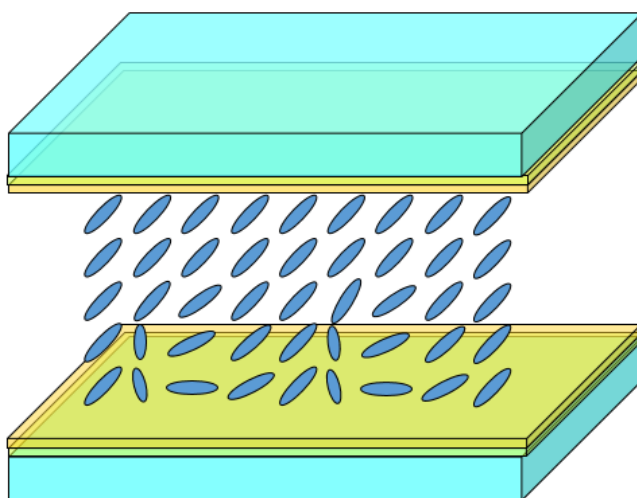


Рисунок 15 – Схематическая иллюстрация ЖК-ячейки.

8. Ячейка заполняется капиллярным методом нематической ЖК смесью E7 (Merck). На фотографии на рисунке 17(б) показана фотография заполненной ЖК ячейки расположенной между скрещенными поляризаторами.

Лазерная запись представляет собой голографическое экспонирование, производящееся по схеме, представленной на рисунке ниже (рис. 16):

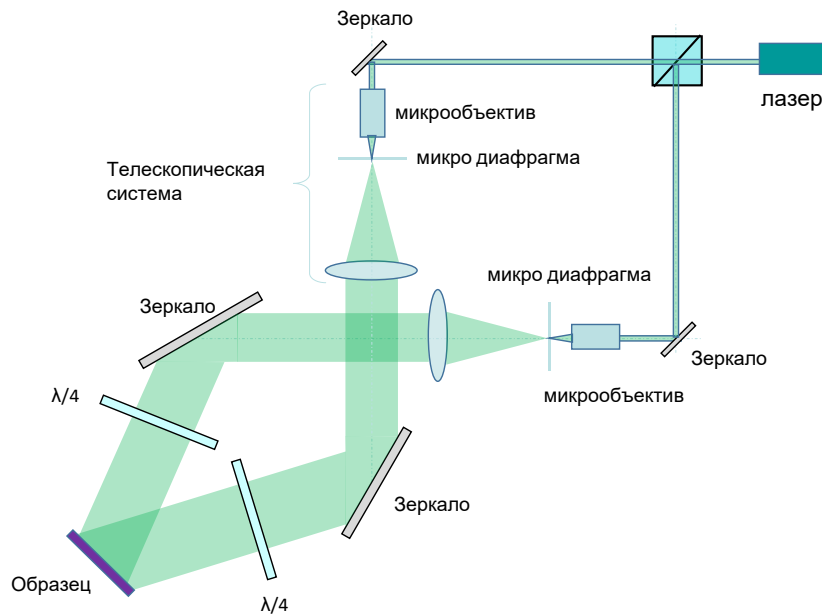


Рисунок 16 – Схема записи голограммы.

Голографическое экспонирование происходит следующим образом: свет от одного из лазеров (с длиной волны $\lambda=457$ нм) проходя через светоделительную пластину (куб) делится на два пучка. С помощью микрообъективов свет фокусируется на диафрагме (pin-hole – диафрагма с очень маленьким отверстием, пропускает ограниченный световой пучок), а далее вновь расширяется линзами до нужного диаметра. Так как для записи голограммы нам необходимы два пучка с различными направлениями круговой поляризации, то на пути лучей необходимо установить поляризационную пластинку $\lambda/4$. Два луча с разной поляризацией с помощью зеркал сводятся в одно место на подготовленной подложке, в соответствии с выше приведённым технологическим процессом, с нанесенным на нее красителем. Происходит интерференция, тем самым в некоторых местах краситель вытравливается меньше, в некоторых больше, и мы можем наблюдать ДР на ограниченном по диаметру участке (рис. 17(a)) Угол между сходящимися пучками θ_{rec} определяется периодом записываемой решетки Λ и длиной волны лазера λ .

$$\theta_{rec} = \frac{2}{\sin\left(\frac{\lambda_{rec}}{2\lambda}\right)}$$

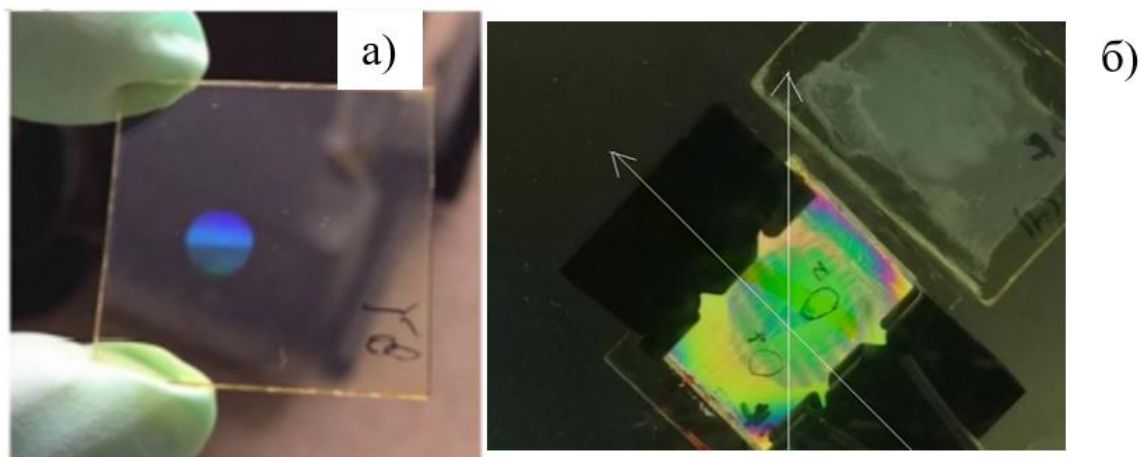


Рисунок 17 – Результат экспонирования на красителе (а) , вид ячейки в скрещенных поляризаторах (б).

2.1 Расчет схемы записи голограммы

Схема записи голограммы (рис 16) имеет две ветви по которым проходит лазерное излучение. В конечном итоге два пучка лучей сводятся на образце под углом θ . В этом месте образуется интерференционная картина.

Для того чтобы получить диаметр пятна на подложках заданного размера необходимо, чтобы все компоненты функциональной схемы (рис.18) были правильно расположены друг относительно друга. Произведем расчет одного из наиболее важных компонентов схемы: объектива – позиция 5.

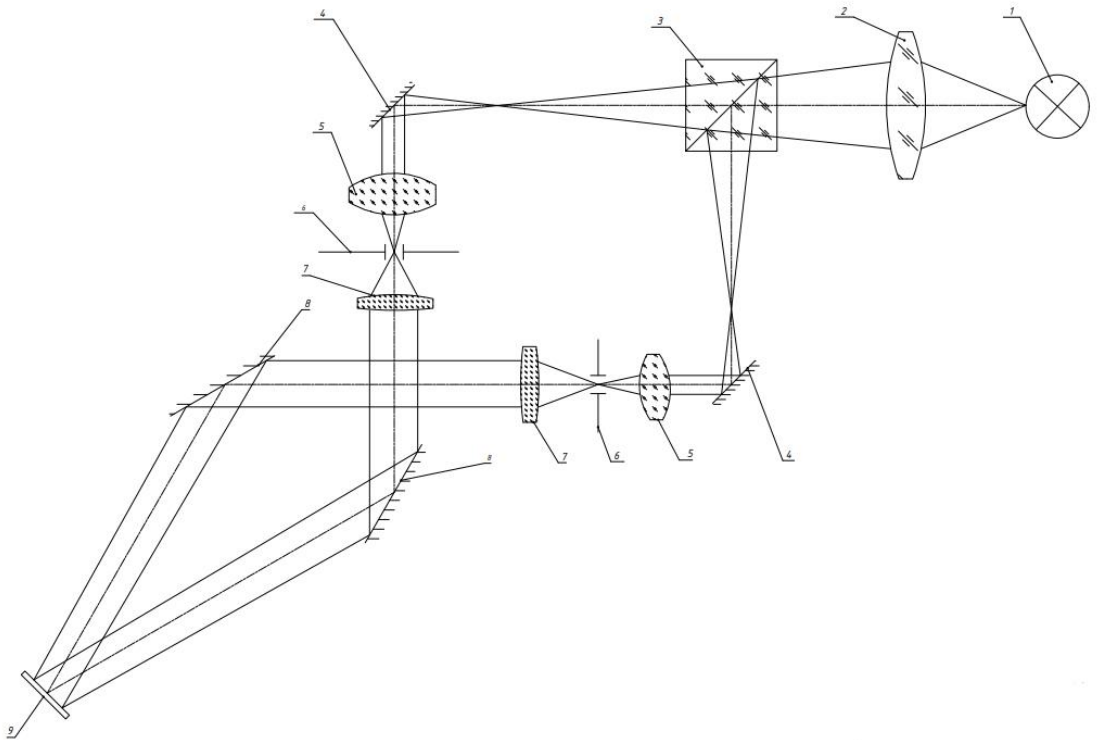


Рисунок 18 – Функциональная схема записи голограммы. 1- источник лазерного излучения, 2-светоделительный куб, 3- зеркало, 4 объектив, 5 pin-hole диафрагма, 6- колиматорная линза, 7- зеркало, 8 – образец.

2.1.1 Синтез объектива

Входными характеристиками для расчета зададим:

Фокусное расстояние $f' = 60$ мм;

Диаметр входного зрачка $D_{\text{вх}} = 20$ мм;

Угловое поле в пространстве изображений $2\omega' = 8^\circ$;

Ахроматизация для длины волны лазера $\lambda = 457$ нм.

Из входных данных получаем относительное отверстие объектива

$$D / f' = 20 / 60 = 1/3$$

Синтез системы произведем в программном обеспечении Zemax Optics Studio. Начнем с задания склейки двух компонентов, которая позволяет скорректировать сферическую aberrацию и кому. Склейка задается при небольших относительных отверстиях и малом угловом поле, чтобы избежать полевых aberrаций. Далее к склейке добавим силовой компонент, который позволяет повысить светосилу объектива, то есть увеличить относительное отверстие. Затем добавим корректор кривизны поля и увеличим угловое поле до нужной величины. Для получения приемлемого качества изображения завершающим этапом синтеза будет ахроматизация объектива.

В программе Zemax Optics Studio задание системы начинается с задания основных параметров системы: апертуры, равной диаметру входного зрачка; углового поля, длины волны, а также выбора каталога оптических материалов.

Далее синтезируем склейку, которая состоит из положительного и отрицательного компонентов. Входной зрачок такой системы располагается на первой поверхности, поэтому задаем $d=0$. В качестве плоскости анализа задается плоскость Гаусса (плоскость идеального изображения). После задания радиусов кривизны и толщин компонентов оптимизируем склейку на нужное фокусное расстояние, стараясь сохранить дифракционное качество системы. Оптимизация проводится по минимизации размера пятна рассеяния. Полученная система имеет вид представленные на рисунке 19.

Качество полученной системы отражено на рисунке 20.

Surface Type	Comment	Radius	Thickness	Material	Coating	Clear Semi-Dia	Chip Zone	Mech Semi-Dia	Conic	TCE
0 OBJECT	Standard	Infinity	Infinity			Infinity	0.000	Infinity	0.0...	
1	Standard	Infinity	0.000			8.000	0.000	8.000	0.0...	
2 STOP	Standard	Infinity	0.000			8.000	0.000	8.000	0.0...	
3	Standard	83.802 V	7.000	LZ_CT...		8.007	0.000	8.007	0.0...	
4	Standard	-38.368 V	5.000	LZ_TF5		7.824	0.000	8.007	0.0...	
5	Standard	-4290... V	110.0... V			7.663	0.000	8.007	0.0...	
6 IMAGE	Standard	Infinity	-			2.044	0.000	2.044	0.0...	

EFFL: 117 WFNO: 7.31252 ENPD: 16 TOTR: 122.006

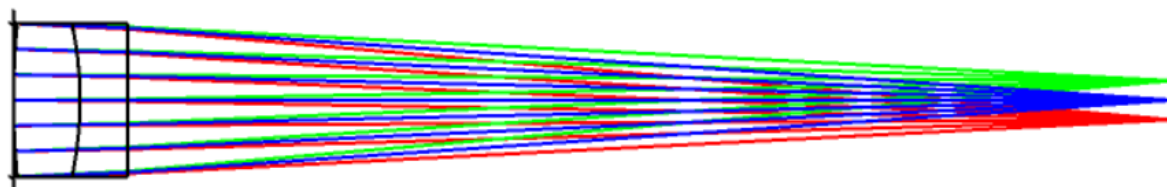


Рисунок 19 – Склейка.

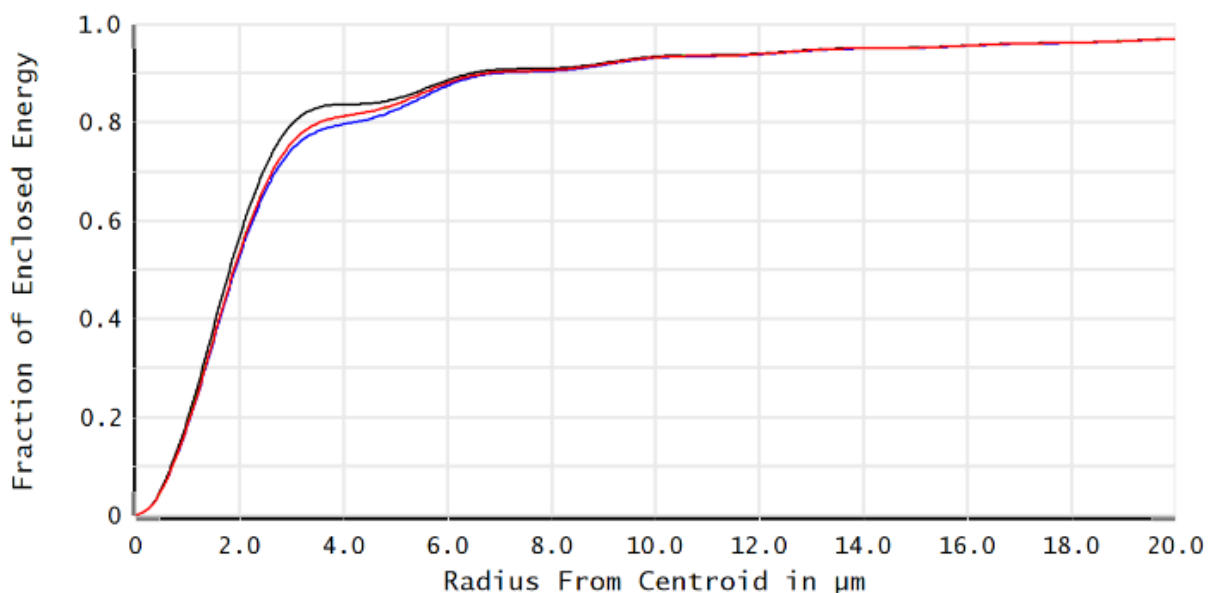
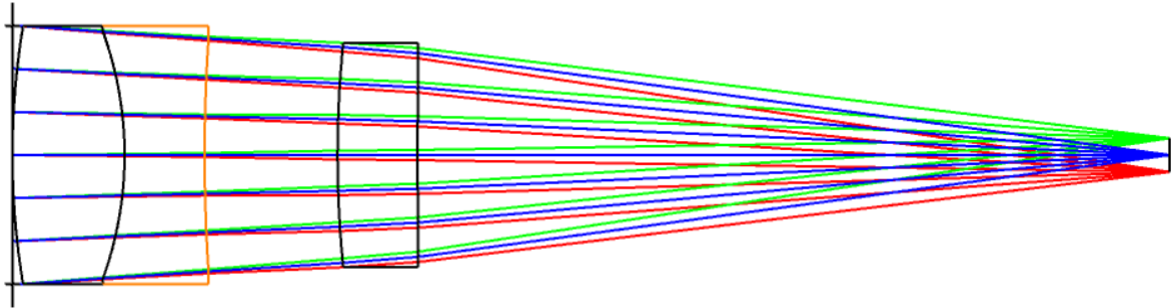


Рисунок 20 – Качество изображения. Черная кривая – дифракционная, синяя – точка на оси, красная – для точек поля.

Видим, что качество полученной системы близко к дифракционному (рис. 20), поэтому делаем следующий шаг и добавляем положительный силовой компонент. Расстояние между компонентами зададим равным 5 мм. Для минимизации количества используемых стекол, выберем для данного компонента марку СТК9. Радиусы задаются таким образом, чтобы получить фокусное расстояние 60 мм. После задания силового компонента оптимизируем его на минимум сферической аберрации, так как в предыдущей системе мы ее

исправили. И для получения лучшего качества оптимизируем в целом всю систему по радиусам. Полученная после второго этапа система имеет вид, представленный на рисунке 21.



Surface Type	Comment	Radius	Thickness	Material	Coating	Clear Semi-Dia	Chip Zone	Mech Semi-Dia	Conic	TCE
0 OBJECT	Standard	Infinity	Infinity			Infinity	0.000	Infinity	0.0...	
1	Standard	Infinity	0.000			8.000	0.000	8.000	0.0...	
2 STOP	Standard	Infinity	0.000			8.000	0.000	8.000	0.0...	
3	Standard	48.666 V	7.000	LZ_CT...		8.012	0.000	8.012	0.0...	
4	Standard	-22.357 V	5.000	LZ_TF5		7.705	0.000	8.012	0.0...	
5	Standard	108.1... V	8.300 V			7.338	0.000	8.012	0.0...	
6	Standard	68.556 V	5.000	LZ_CT... P		6.957	0.000	6.957	0.0...	
7	Standard	1259... V	46.930 V			6.632	0.000	6.957	0.0...	
8 IMAGE	Standard	Infinity	-			1.047	0.000	1.047	0.0...	

EFFL: 60 WFNO: 3.74927 ENPD: 16 TOTR: 72.2302

Рисунок 21 – Склейка с силовым компонентом.

Получили систему с хорошим качеством (рис. 22), радиус пятна рассеяния около 2-х мкм.

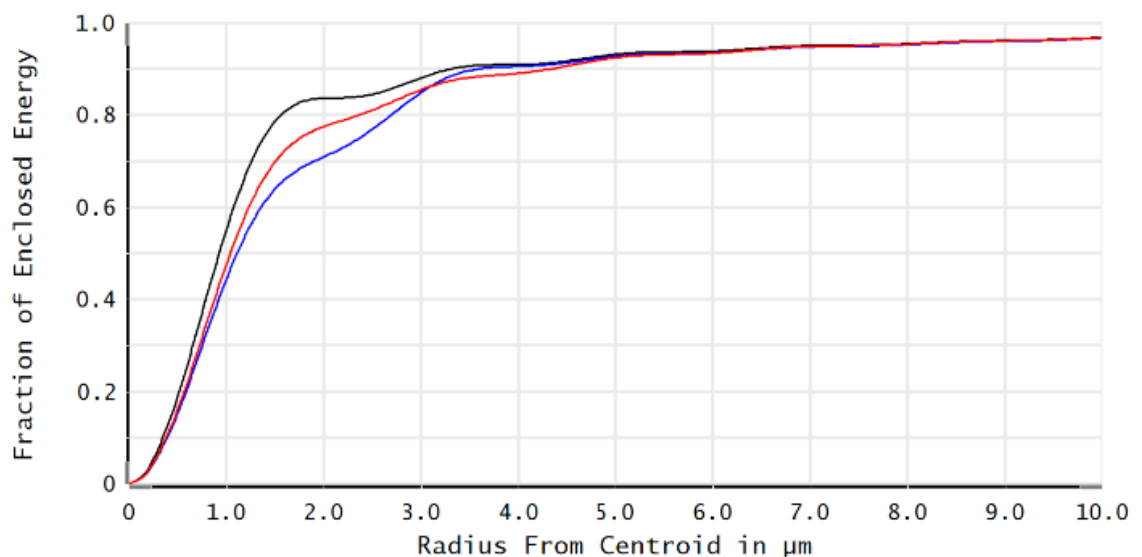


Рисунок 22 – Качество изображения.

Третим этапом будет развитие углового поля системы, для того чтобы получить заданные $2\omega'$. При увеличении поля качество для точки на оси ухудшается незначительно, а для точки поля сильно проседает, что обусловлено влиянием кривизны поля (отрицательной по знаку рис. 23). Оптимизация не позволяет улучшить качество, так как выбранное сочетание компонентов нацелено на исправление сферической аберрации и комы. Поэтому добавляем еще один компонент. В качестве корректора кривизны поля может выступать биапланатическая линза или линза Смита. Будем использовать линзу Смита, которая представляет собой тонкую отрицательную линзу, которая располагается вблизи фокуса системы. Данная линза должна быть выполнена из флинта, поэтому назначим ей стекло ТФ5. Радиусы подбираются так, чтобы кривизна поля линзы компенсировала кривизну поля предыдущих компонентов.

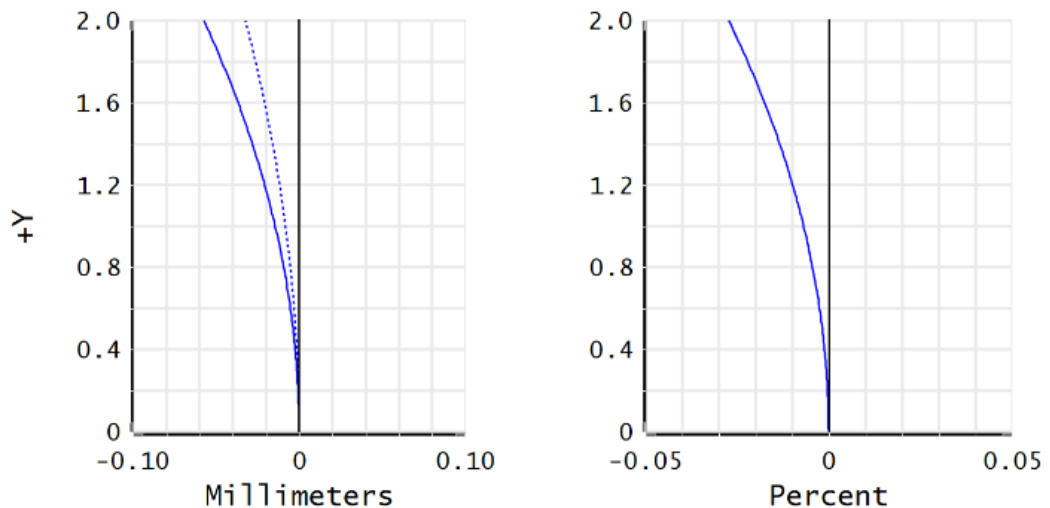


Рисунок 23 – Кривизна поля склейки и силового компонента.

Проводим оптимизации по радиусам всех компонентов и получаем систему (рис. 24). На рисунке 25 представлен график распределения энергии, отражающий качество системы.

a)

	Surface Type	Comment	Radius	Thickness	Material	Coating	Clear Semi-Dia	Chip Zone	Mech Semi-Dia	Conic	TC
0	OBJECT	Standard	Infinity	Infinity			Infinity	0.000	Infinity	0.0...	
1		Standard	Infinity	0.000			8.000	0.000	8.000	0.0...	
2	STOP	Standard	Infinity	0.000			8.000	0.000	8.000	0.0...	
3		Standard	116.3... V	7.000	LZ_CT...		8.010	0.000	8.010	0.0...	
4		Standard	-25.519 V	5.000	LZ_TF5		7.956	0.000	8.010	0.0...	
5		Standard	1663... V	8.300			7.925	0.000	8.010	0.0...	
6		Standard	33.876 V	5.000	LZ_CT... P		7.878	0.000	7.878	0.0...	
7		Standard	87.426 V	45.000			7.417	0.000	7.878	0.0...	
8		Standard	-5.181 V	1.000	LZ_TF5 P		2.090	0.000	2.218	0.0...	
9		Standard	-6.031 V	0.900			2.218	0.000	2.218	0.0...	
10	IMAGE	Standard	Infinity	-			2.108	0.000	2.108	0.0...	

б)

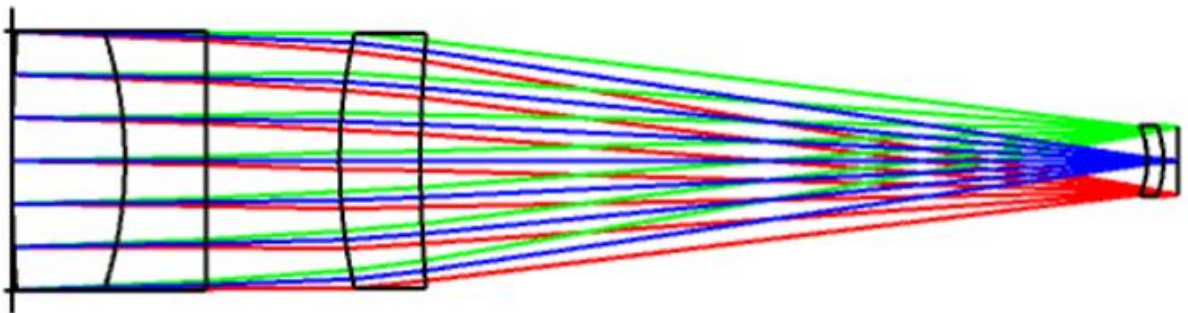


Рисунок 24 – Конструктивные параметры системы (а), ход лучей (б).

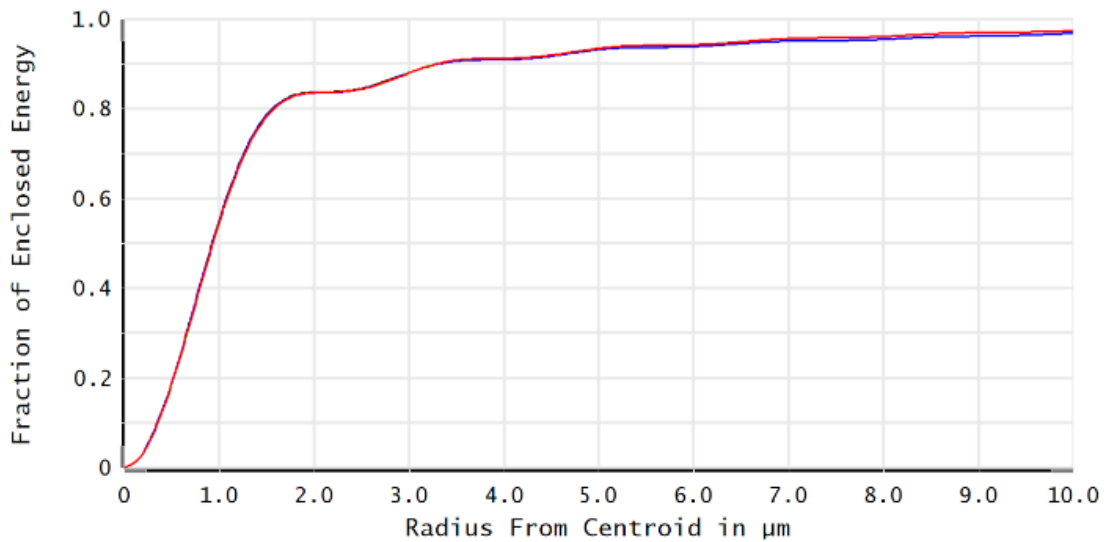


Рисунок 25 – Распределение энергии.

Теперь необходимо увеличить угловое поле до нужных размеров. Увеличив, угловое поле для 8° получаем систему (рис. 26) близкую к дифракционной (рисунок 27).

a)

Surface	Surface Type	Comment	Radius	Thickness	Material	Coating	Clear Semi-Dia	Chip Zone	Mech Semi-Dia
0	OBJECT	Standard	Infinity	Infinity			Infinity	0.000	Infinity
1		Standard	Infinity	0.000			10.000	0.000	10.000
2	STOP	Standard	Infinity	0.000			10.000	0.000	10.000
3		Standard	76.645 V	7.000	LZ_CTK9 S		10.046	0.000	10.046
4		Standard	-33.531 V	5.000	LZ_TF5 S		9.962	0.000	10.046
5		Standard	640.225 V	0.261			9.879	0.000	10.046
6		Standard	31.908 V	5.000	LZ_CTK9 S		9.861	0.000	9.861
7		Standard	52.897 V	45.747 V			9.248	0.000	9.861
8		Standard	-7.184 V	1.000	LZ_TF5 S		4.055	0.000	4.324
9		Standard	-9.335 V	0.900			4.324	0.000	4.324
10		Standard	Infinity	0.000			4.335	0.000	4.335

б)

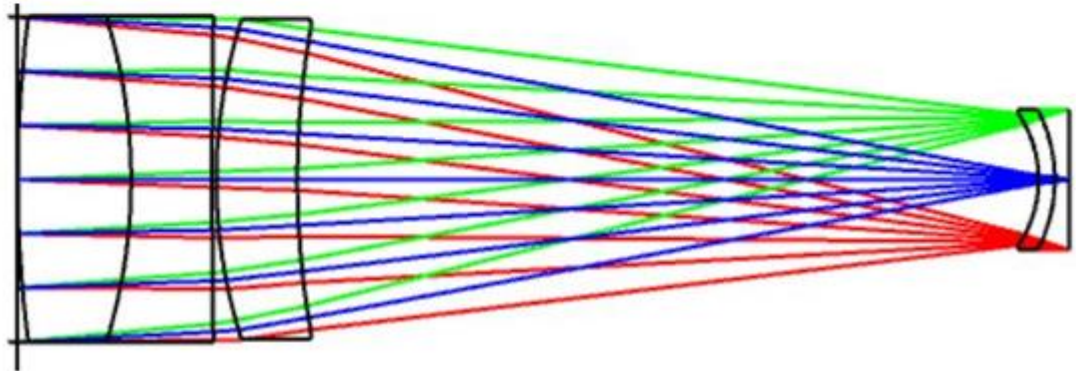
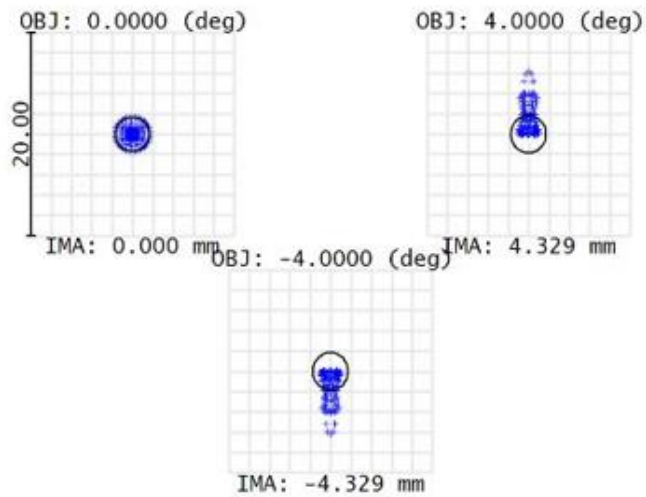


Рисунок 26 – Конструктивные параметры системы (а), ход лучей (б).

По данным полученным из программы Zemax (рис. 27) можно судить о хорошем дифракционном качестве систему, достаточным для записи голограммы на подложки. Нам необходимо было получить удовлетворительное качество, так как искаженный волновой фронт для двух интерферирующих пучком исказил бы рисунок голограммы, а соответственно ориентация ЖК была бы неравномерной. Это во многом определяет ДЭ, которую мы можем получить.

a)

0.457



surface: IMA

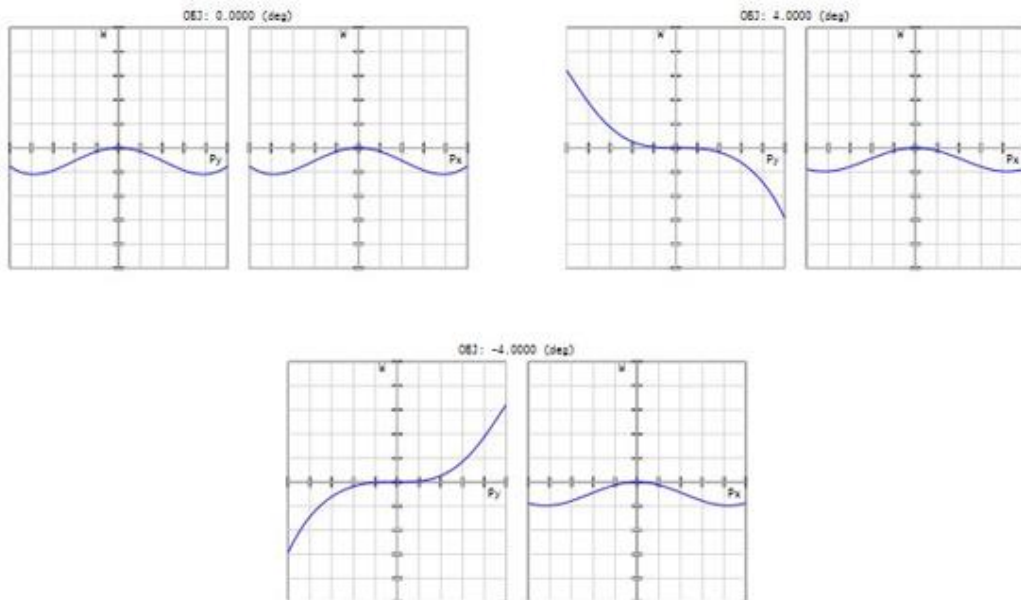
Spot Diagram

13.04.2021
 Units are μm , Airy Radius: 1.669 μm . Legend items refer to Wavelengths
 Field : 1 2 3
 RMS radius : 1.130 2.303 2.303
 GEO radius : 1.716 6.228 6.228
 Scale bar : 20 Reference : Chief Ray

Zemax
 Zemax OpticStudio 21.1

LENS.ZMX
 Configuration 1 of 1

b)



Optical Path Difference

13.04.2021
 Maximum Scale: ± 1.000 Waves.
 0.457

Zemax
 Zemax OpticStudio 21.1

Рисунок 27 – Диаграмма пятна рассеяния (а), полевые aberrации (б).

Результаты проведенного синтеза оформлены в оптический выпуск.

2.2 Описание установки для проведения эксперимента

В ходе эксперимента необходимо измерять дифракционную эффективность решетки в проходящем свете косвенным методом. Для этого мы использовали установку, представленную на рисунке 28.

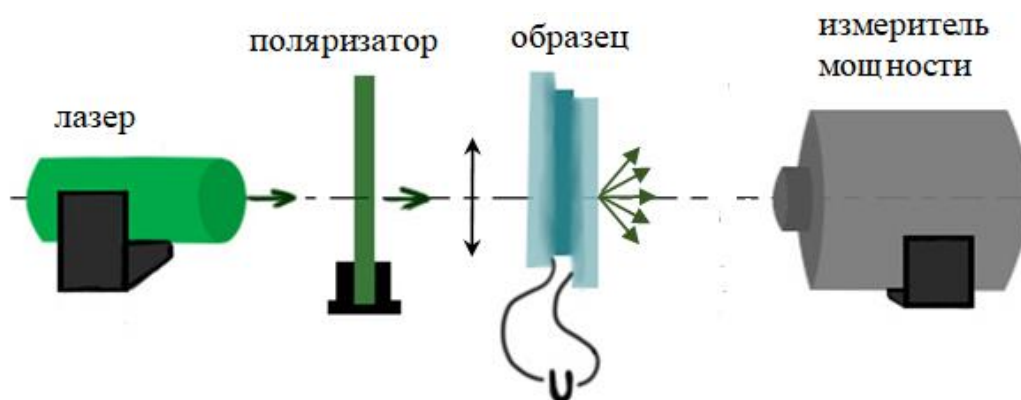


Рисунок 28 – Схема экспериментальной установки.

Метод является косвенным, так как мы измеряем интенсивность прошедшего через решетку света, а не саму дифракционную эффективность. Далее измерив, интенсивность до решетки, мы можем вычислить ДЭ по формуле 1. Интенсивность света измеряется с помощью измерителя мощности, установленного на подвижной платформе, для того чтобы можно было померить интенсивность каждого дифракционного максимума. За измерителем мощности можно установить белый экран с горизонтальной шкалой (как будет показано далее). На этом экране мы будем видеть светящиеся точки (максимумы дифракции), зная положение экрана относительно образца, мы сможем вычислить углы дифракции.

Установка включает в себя источник излучения: лазерный диод на длине волны 532 нм. Мощность источника не должна превышать 40 мВт, чтобы приемник не зашкаливал. Для данной длины волны достигается оптимальное

соотношение угла дифракции первого максимума и дифракционной эффективности (это показано в моделировании). Измеритель мощности имеет кремниевый приемник.

Далее по ходу луча ставится поляризатор, необходимый чтобы выделить одну поляризацию из лазерного излучения. После поляризатора устанавливают образец, к электродам которого подключены зажимы от генератора напряжения. Это необходимо, чтобы провести исследование зависимости ДЭ от прикладываемого напряжения.

Все элементы закреплены в оправках, которые на специальных креплениях устанавливаются на оптический стол. В ходе работы был выполнен сборочный чертеж этой установки.

3 Проведение эксперимента

3.1 Эксперимент первый

В качестве исследуемого образца была взята ЖК ячейка с $d=4,3$ мкм. На подложки был нанесен ПЧЖ краситель и на нем с помощью лазера была записана голограмма с периодом 6 мкм. Между подложками располагается жидкий кристалл E7.

Схема записи решетки соответствует рисунку 29 [1].

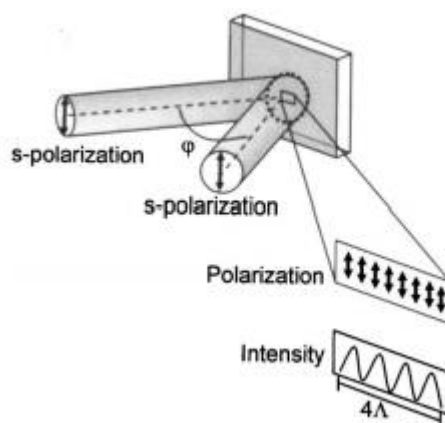


Рисунок 29 – Схематическая иллюстрация голографического экспонирования [1].

С помощью лабораторной установки (рис. 28) и измерителя мощности лазерного излучения LP1 (Sanwa) было проведено измерение интенсивности и углов дифракции для разных дифракционных максимумов (рис. 31) на длине волны 532 нм (падающий пучок имеет линейную поляризацию). Дифракционная эффективность была вычислена по формуле (1).

Измеритель лазерного излучения, используемый в эксперименте, представляет собой устройство с оптическим датчиком в виде кремниевого фотодиода (светочувствительный диаметр 9 мм). Данный прибор способен измерять в диапазоне длин волн от 400 до 1100 нм. Диапазон измерения напряжения до 40 мВт.

Фотодиод представляет из себя фотоэлектрический приемник излучения, принцип работы которого основан на внутреннем фотоэффекте, то есть переходе электрона из связанного с атомом состояния в свободное при поглощении энергии ОИ, что является переходом из валентной зоны в зону проводимости. Чувствительность фотодиодов определяется шириной запрещенной зоны, то есть количеством энергии, которое необходимо чтобы электрон попал в зону проводимости. Ширина запрещенной зоны различна для различных материалов: для германия $Ge = 0,66$ эВ; для кремния $Si = 1,12$ эВ. Из-за большей ширины запрещенной зоны темновой ток у кремниевых фотодиодов меньше, но больше его зависимость от температуры. Таким образом у кремниевых фотодиодов меньше влияние шумов.

В качестве источника использовался полупроводниковый лазерный диод (в оправе), излучающий на длине волны 532 нм. Лазерный диод — полупроводниковый лазер, построенный на базе диода. Его работа основана на возникновении инверсной населённости в области p-n перехода при инжекции носителей заряда. Если в простом диоде на анод подается положительное напряжение, то речь идет о смещении диода в прямом направлении. Дырки из области «р» инжектируются в область «n» p-n перехода, а из области «n» в область «р» полупроводника. При расположении дырки и электрона рядом друг с другом, то они рекомбинируют и выделяют фотонную энергию с некоторой длиной волны. Этот процесс получил название спонтанного излучения. В светодиодах он является главным источником.

Ход проведения эксперимента можно видеть на рисунке 30, а результаты на основе проведенных измерений сведены в таблицу 2 на основе которой

построена графическая зависимость дифракционной эффективности от угла дифракционного максимума, представленная на рисунке 31.

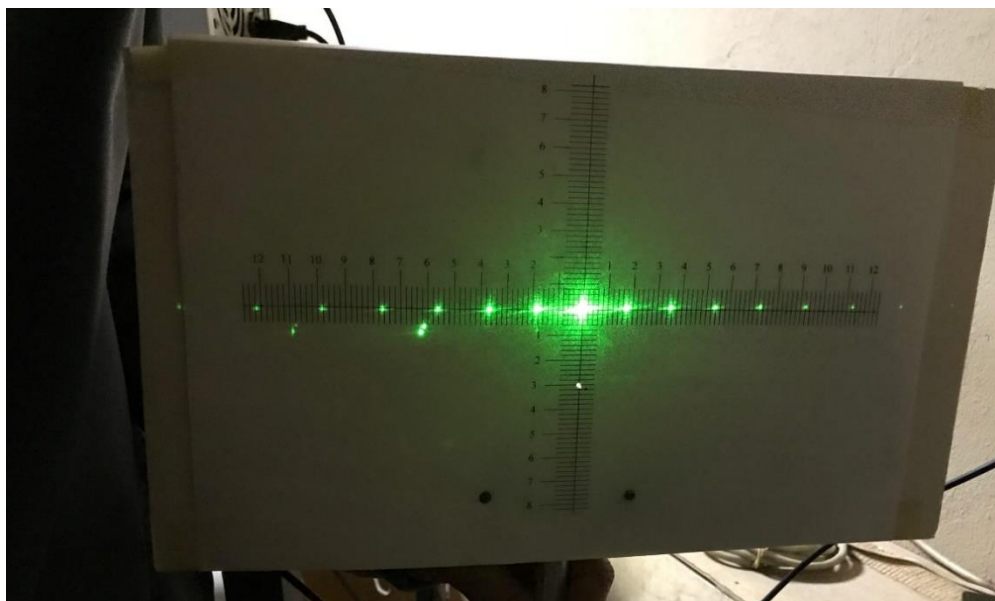


Рисунок 30 – Дифракция на ЖК ячейке. Расстояние до экрана 30 см.

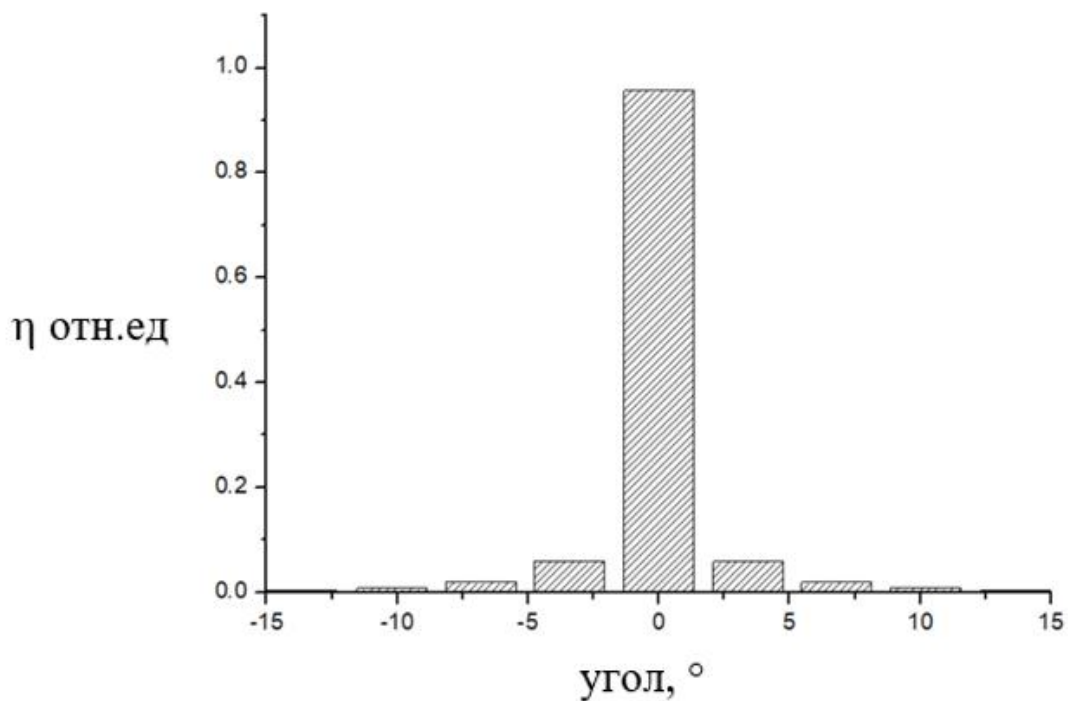


Рисунок 31 – Зависимость дифракционной эффективности от угла максимума.

Таблица 2 – Результаты первого эксперимента

Порядок максимума	Интенсивность, мкВт	Угол максимума, °	Расчетный угол, °
Без ячейки			
	230		
Решетка на красителе			
0	230		
1	1		
ЖК ячейка с решеткой			
0	220	270	0
1	13,4	266,5	3,43
2	4,3	262,5	6,8
3	1,7	259	10,2
4	1	255	13,676
5	0,7	251,5	17
6	0,4	247,5	20,47
7	0,15	243	23,59
8	0,07	239	26,9

3.2 Эксперимент второй

В качестве исследуемого образца была взята ЖК ячейка с $d=4,3$ мкм. На подложки был нанесен дихроичный краситель, и на одной из подложек с

помощью голографического экспонирования лазерным пучком была записана голограмма с периодом 5.2 мкм. Между подложками инжестировался жидкий кристалл E7.

Схема записи решетки соответствует рисунку 32 [1]. В этом случае при экспонировании используется круговая правая и левая поляризация. В схему записи решетки добавляются пластинки $\lambda/4$.

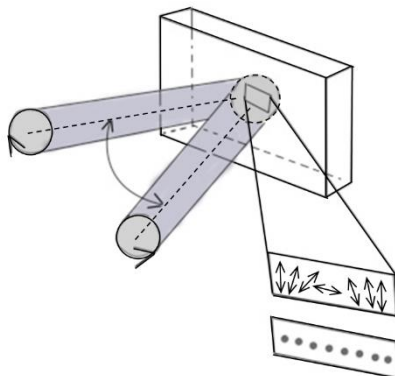


Рисунок 32 – Схематическая иллюстрация голографического экспонирования.

На образец поступала волна с круговой поляризацией, при этом было замечено, что интенсивность отрицательных и положительных максимумов (слева (-) и справа (+) от центрального) различна.

Результаты эксперимента оформлены в таблицу 3.

Таблица 3 – Результат второго эксперимента

Порядок максимума	Интенсивность, мкВт	Угол максимума, °	Расчетный угол, °
Без ячейки			
	105		
ЖК ячейка с решеткой			
0	63	270	0
-1	9	277	-5,99≈6
-2	0,7	282	-11,9≈-12
+1	4,5	263	6
+2	1,2	258	12

На основе полученных экспериментальных данных построена графическая зависимость дифракционной эффективности от угла дифракции (рис. 33).

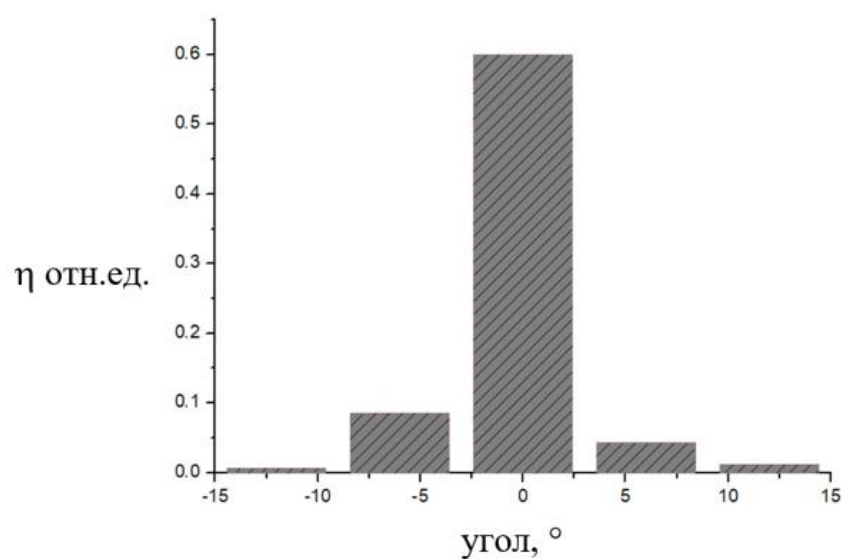


Рисунок 33 – Зависимость дифракционной эффективности от угла максимума.

Далее была исследована зависимость интенсивности на выходе от прикладываемого к ячейке напряжения, при этом на вход поступала циркулярно-поляризованная волна (правая). Результаты эксперимента скомпонованы в таблицы 4 и 5.

Таблица 4 – Зависимость ДЭ от напряжения для положительных максимумов

Порядок максимума	Значение прикладываемого напряжения, В					
	10	8	6	4	2	0
	Мощность излучения, мкВт					
0	430	470	420	408	360	730
1	4,8	10,5	15,5	12,9	53	48
2	0	0,1	0,3	0,8	5,5	0,5

Таблица 5 – Зависимость ДЭ от напряжения для отрицательных максимумов

Порядок максимума	Значение прикладываемого напряжения, В					
	10	8	6	4	2	0
	Мощность излучения, мкВ					
0	430	470	420	408	360	730
1	2	5	8,5	15	57	31
2	0,4	2,1	1,4	1,5	1,4	3

В этих таблицах легко прослеживается зависимость между интенсивностью левых и правых максимумов от напряжения. Чем больше напряжение, тем меньше интенсивность крайних максимумов (рис. 34).

Отметим, что интенсивность отрицательных и положительных максимумов (слева (-) и справа (+) от центрального максимума) не одинакова. Это может быть связано как с локальной неоднородностью ЖК ячейки, так и с наличием доменов, которые задают неодинаковые величины фазовой задержки для ортогональных круговых поляризаций. Мы исследовали зависимость дифракционной эффективности первого порядка от напряжения на электродах ЖК ячейки (рис. 35). Видно, что при приложении напряжения ДЭ падает. Это происходит из-за того, что под действием поля директор ЖК переориентируется и фазовая решетка в объеме ЖК исчезает.

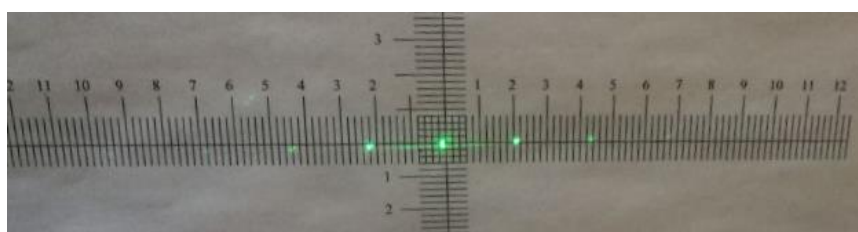


Рисунок 34 – Дифракция при 10 В (экран на расстоянии 20 см).

Ниже представлен график зависимости дифракционной эффективности ячейки от прикладываемого напряжения.

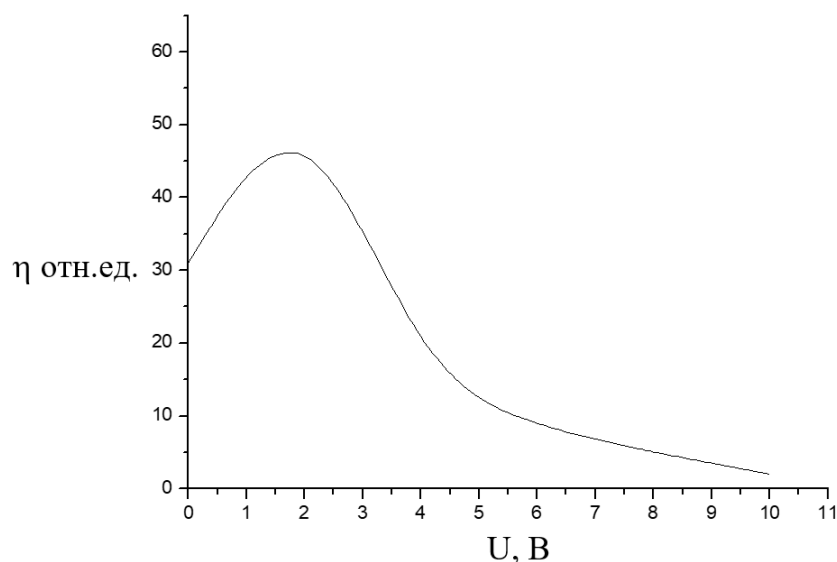


Рисунок 35 – График зависимости ДЭ от U.

Таким образом такую ячейку можно использовать, если нам необходимо погасить излучение, проходящее в определенном направлении.

4 Моделирование

Для моделирования использовалось программное обеспечение LCDTDK 4.0 (автор С.П. Палто) (рис. 36). В основе оптических расчетов лежит нахождение распределения директора ЖК в объеме жидкого кристалла путем решения уравнений континуальной теории ЖК с последующим решением уравнений Максвелла [18]. Для решения уравнений Максвелла и, соответственно, оптической задачи используется матричный метод Берремана [19]. Берреман рассматривает оптическую среду с непрерывно изменяющимися параметрами. В ходе решения оптической задачи используются матрицы 4×4 . Эти матрицы определяют линейное преобразование тангенциальных составляющих электрического и магнитного полей от компонентов поля на входе к соответствующим компонентам на выходе.

В программе мы использовали параметры ЖК E7 [20]: двулучепреломление $\Delta n = 0.224$ (при $\lambda = 589$ нм), диэлектрическая анизотропия $\Delta \epsilon = +13.8$ ($\epsilon_{par} = 19.0$), вязкость 0.19 Па·с, коэффициенты упругости $K_{11} = 11.1$ пН, $K_{22} = 6.5$ пН, $K_{33} = 17.1$ пН [21]. На первой поверхности ЖК слоя задавалось распределение директора по циклоиде с периодом, соответствующим экспериментальному.

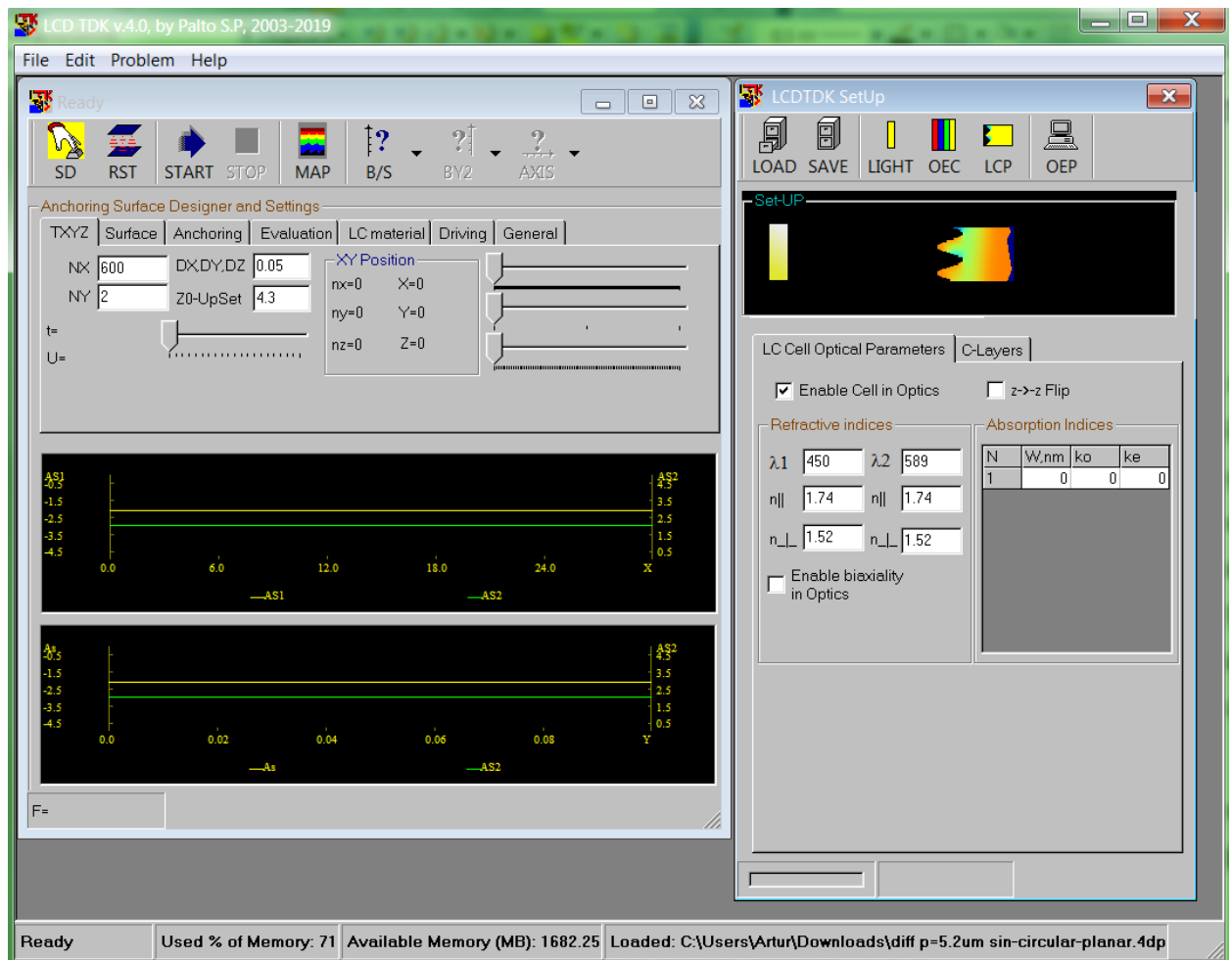
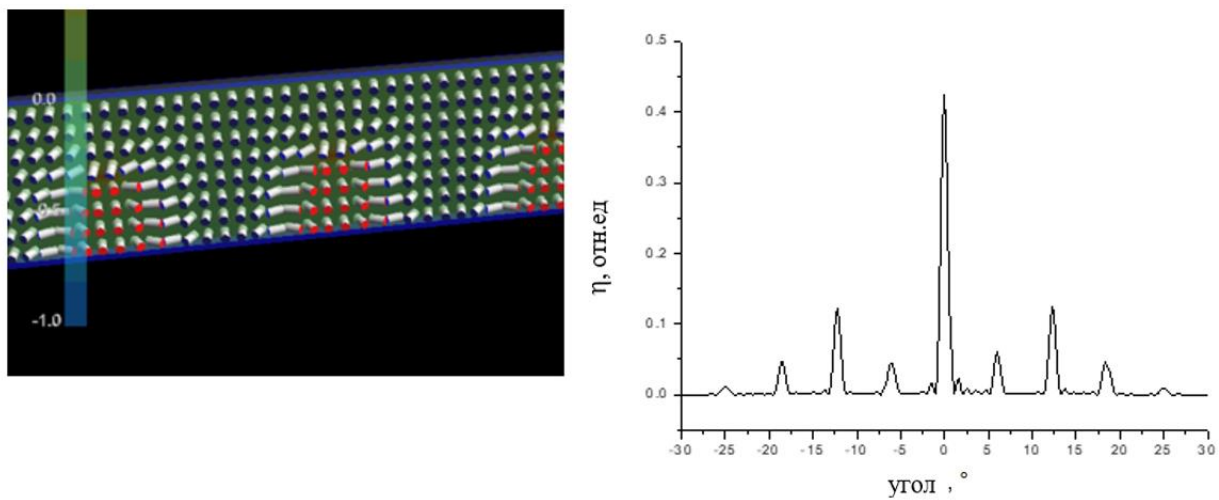


Рисунок 36 – Пользовательский интерфейс программы LCD TDK 4.0.

Ниже приведены рассчитанные графики (рис. 37, 38) распределения директора ЖК вдоль вектора решетки с периодом $\Lambda=5.2$ мкм (толщина ячейки $d=4.3$ мкм) и рассчитанная для данного распределения дифракционная эффективность на длине волны 550 нм:

1) Начальный момент времени, $V=0$ В



2) $t=20$ мс, $V=0$ В

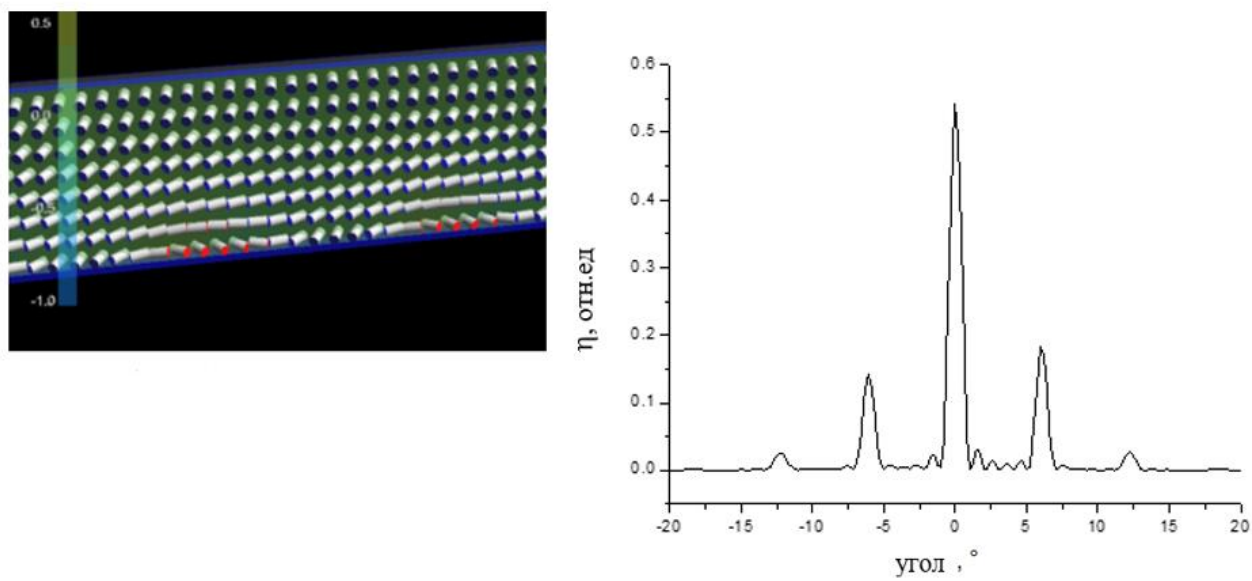
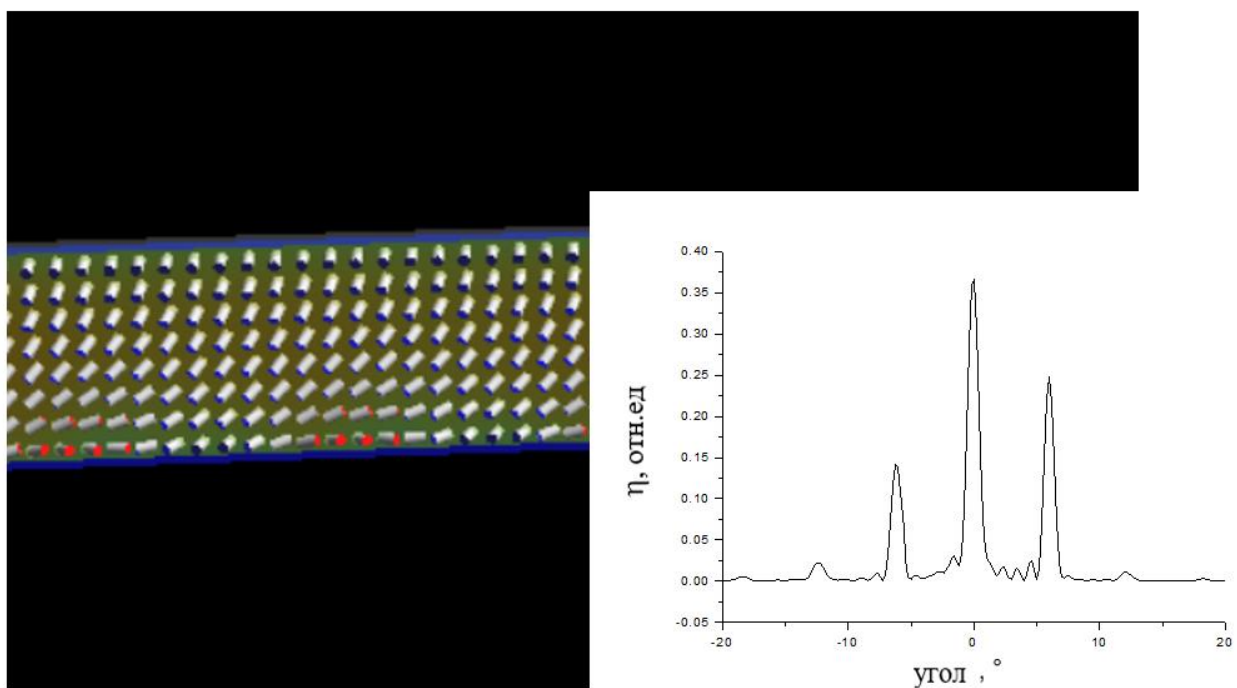


Рисунок 37 – ДЭ от угла при приложении напряжения.

3) $t=60$ мс, $V=2$ В



4) $t=80$ мс, $V=10$ В

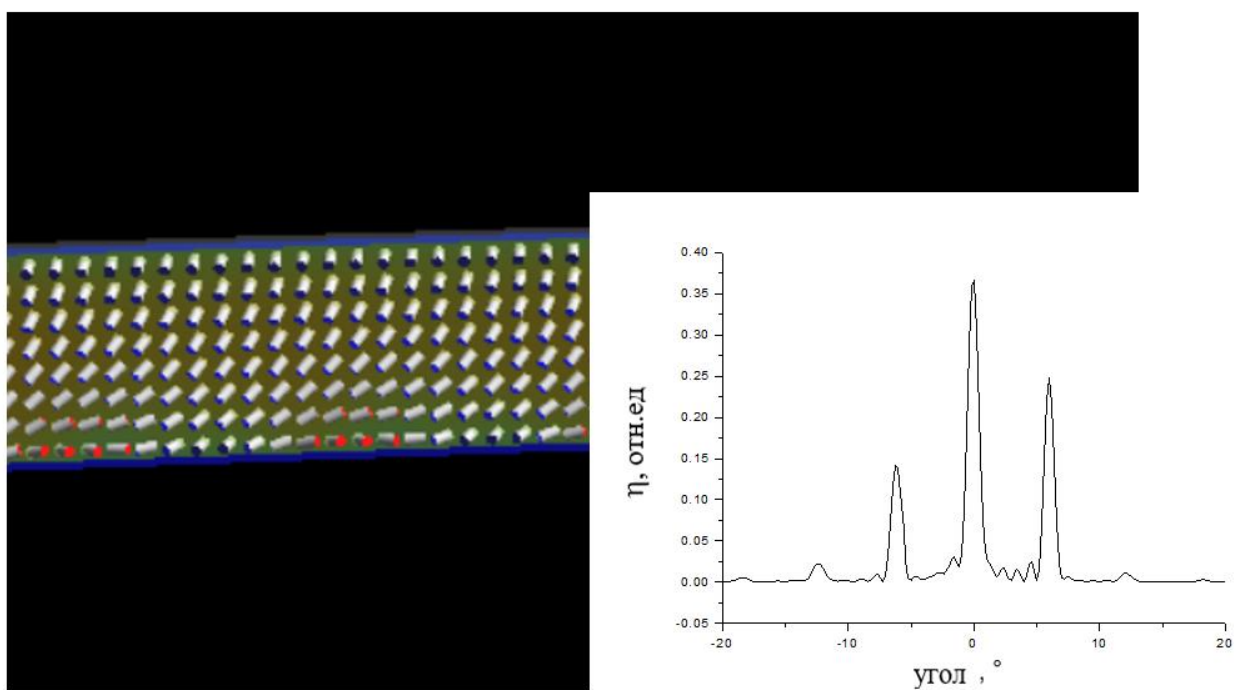


Рисунок 38 – ДЭ от угла при приложении напряжения.

Ниже представлен график (рис. 39) зависимости эффективности первого максимума (угол 6°) от приложенного напряжения, полученный при моделировании.

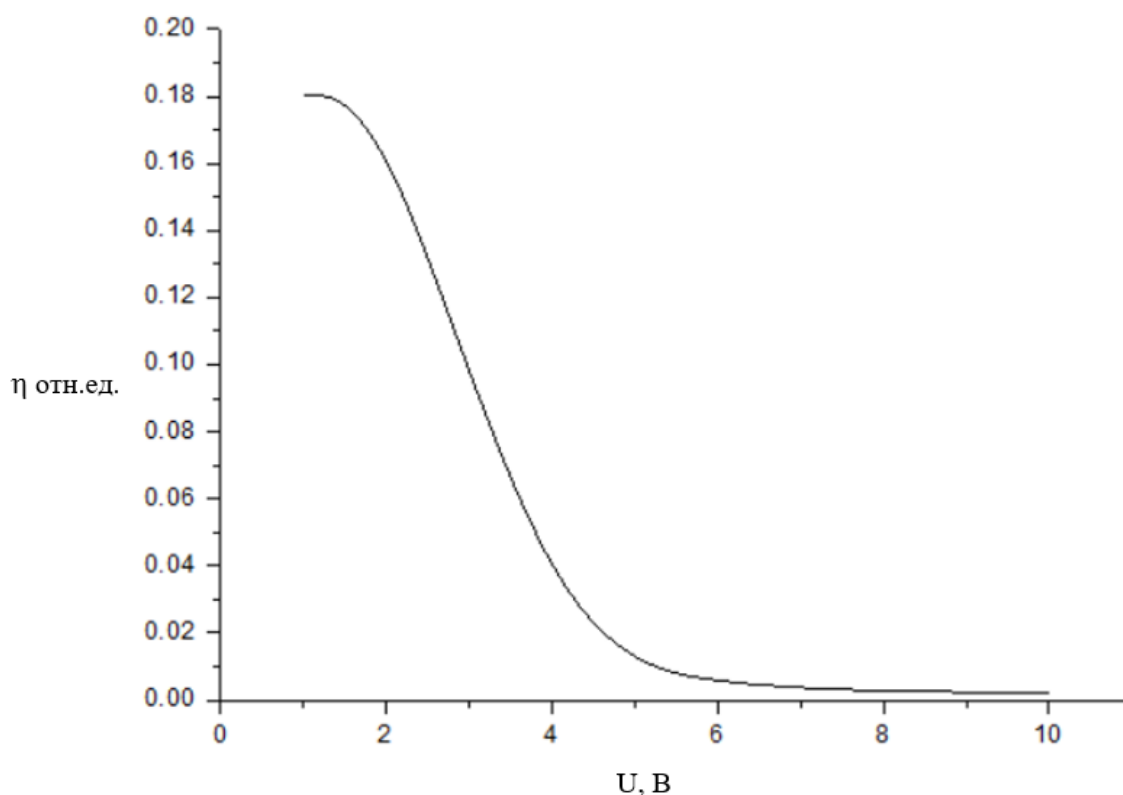


Рисунок 39 – ДЭ от угла при приложении напряжения.

График зависимости дифракционной эффективности ($\lambda=550$ нм) первого порядка от напряжения на электродах ЖК ячейки.

Отметим, что при включении внешнего поля в объеме ЖК в середине слоя начинает устанавливаться гомеотропная ориентация и при напряженностях поля, превышающих пороговые, большая часть ЖК слоя превращается в квази-одноосный кристалл [22],[23],[24], в котором свет распространяется вдоль оптической оси, таким образом эффект внесения фазовой задержки между ортогональными поляризациями подавляется. Причем заметно, что при напряжении 10 В планарно-ориентированным остается, только близкий к поверхности пленки красителя подслой ЖК. Это объясняется сцеплением ЖК с поверхностью.

Для сравнительной оценки результатов моделирования, полученных в программном обеспечении, с данными эксперимента, был построен график зависимости дифракционной эффективности от прикладываемого напряжения (рис. 40).

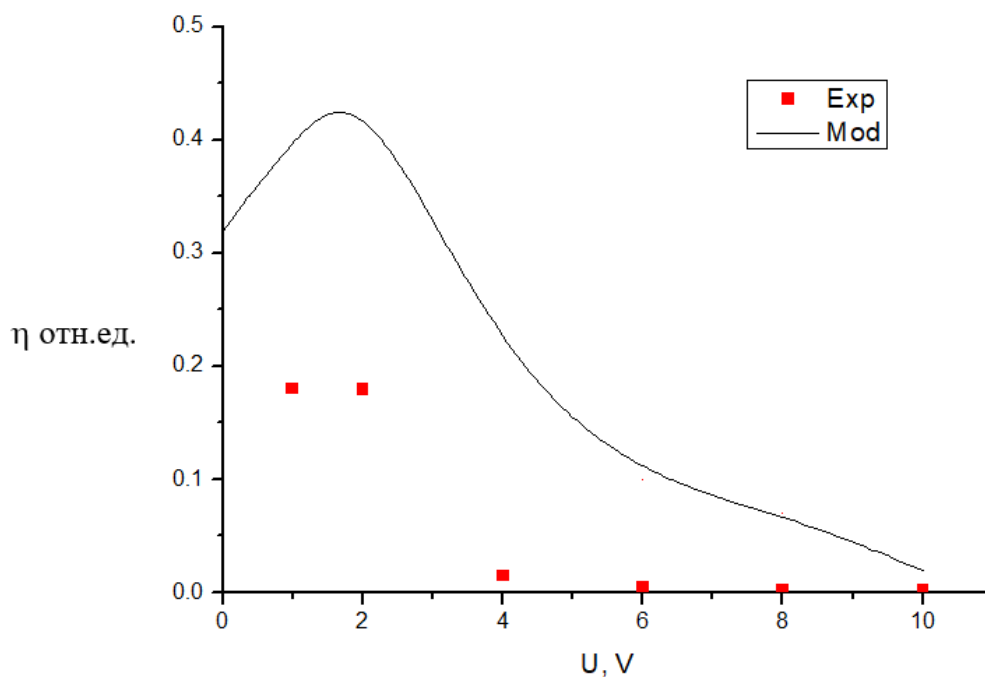


Рисунок 40 – Зависимость дифракционной эффективности от прикладываемого напряжения.

Данный график (рис.40) наглядно демонстрирует качественную сходимость характеров распределений ДЭ, полученных численными методами и в результате эксперимента. Различие по амплитуде обусловлено наличием методических и инструментальных погрешностей, возникающих в ходе эксперимента.

Рассмотрим изменение дифракции при нулевом напряжении при отклонении толщины ячейки на ± 0.5 мкм. С увеличением толщины эффективность дифракции возрастает (рис. 41).

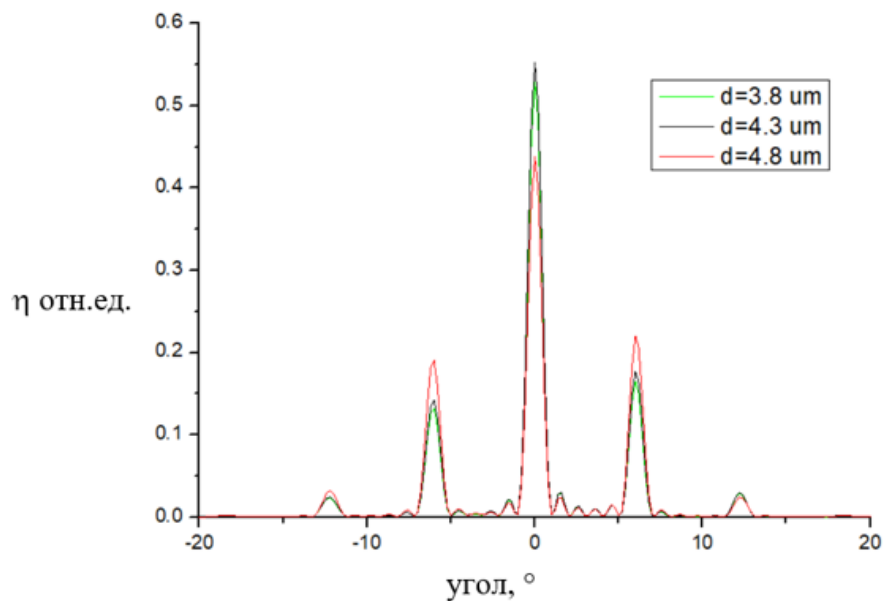


Рисунок 41 – Зависимость ДЭ от толщины ячейки ($\lambda=550$ нм).

В зависимости от двулучепреломления ЖК материала (рис. 42) дифракционная картина также будет изменяться. ДЭ в первом порядке будет увеличиваться при увеличении двулучепреломления. Также установлено, что при отклонении угла падения от нормали на несколько градусов положение дифракционных максимумов пропорционально смещается по углу.

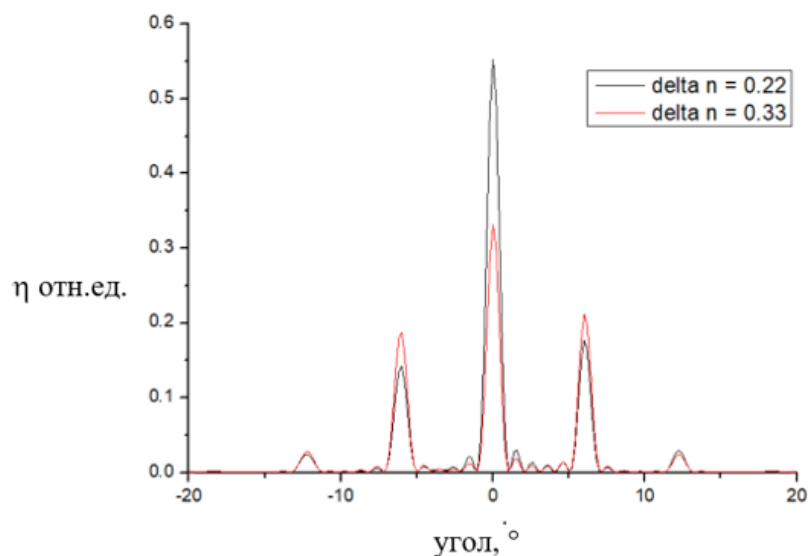


Рисунок 42 – Зависимость ДЭ от двулучепреломления $\lambda=550$ нм.

В ходе моделирования мы также провели оценку зависимости положения дифракционных максимумов от длины волны падающего света. Так, например, на рисунке 43 прослеживается тенденция увеличения угла дифракции для первого максимума и падения ДЭ при увеличении длины волны источника излучения.

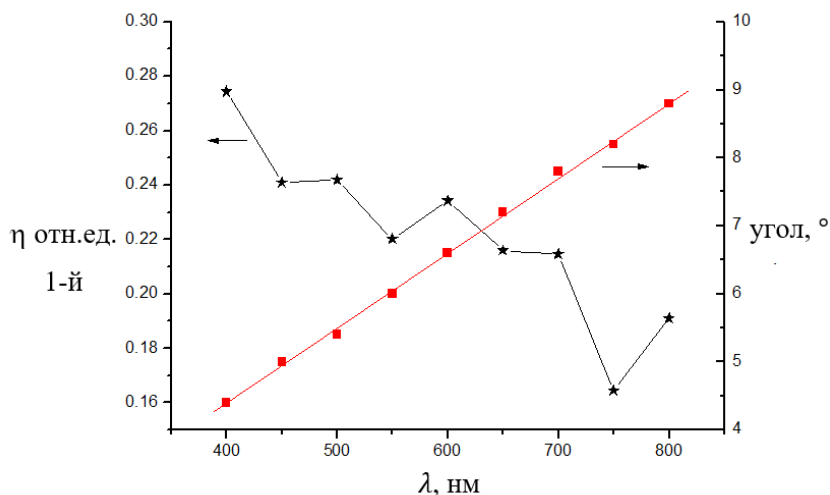


Рисунок 43 – Зависимость дифракционной эффективности и угла дифракции в первом порядке от длины волны.

4.1 Выводы к главе

Мы можем видеть расхождение в графиках (рис. 44), полученных экспериментальным путем и при моделировании системы ЖК ячейки. Эти расхождения обусловлены тем, что в действительности, помимо ЖК на подложку наносится слой красителя, который необходим для ориентации. Он также влияет на дифракции, хоть и в меньшей степени, чем слой ЖК.

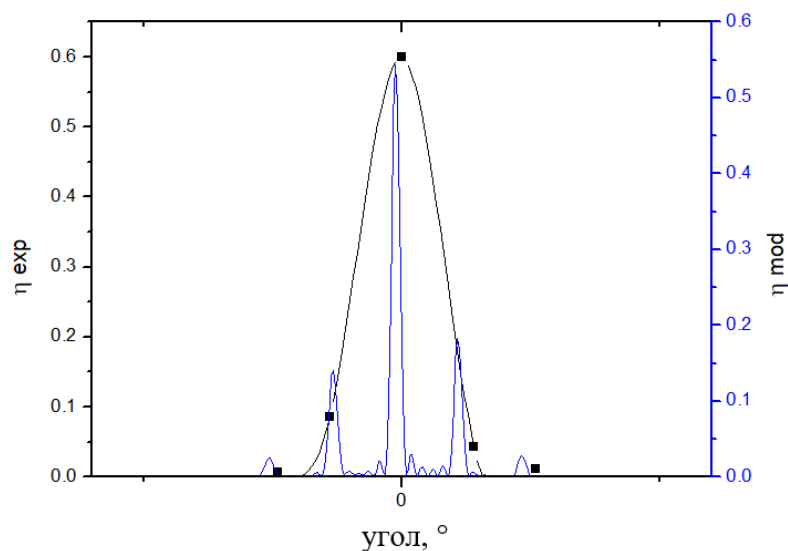


Рисунок 44 – Сравнение результатов моделирования и эксперимента.

В угловой зависимости ДЭ (рис. 44), полученной экспериментальным путем и при моделировании ЖК ячейки, наблюдается некоторое расхождение. Дело в том, что в экспериментальном модулированном слое ЖК могут быть домены, отличающиеся углом преднаклона, которые снижают ДЭ. Также более низкая ДЭ в экспериментальном случае обусловлена не идеальностью изготовления ячейки. После записи голограммы в месте интерференционной картинке наблюдается муар, который и ухудшает ДЭ. Этот муар обусловлен переотражениями от второй поверхности подложки. Для предотвращения этого эффекта необходимо выводить излучение из стекла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных теоретических исследований и полученных экспериментальных результатов, в работе можно сделать следующие ключевые выводы:

1. В ходе исследовательской работы был проведен сравнительный анализ характеристик дифракционных решеток, изготовленных по разной технологии. Результатом исследований является сводная таблица данных представленная на странице 19 на основе анализа которой можно рекомендовать необходимые для проведения экспериментов виды дифракционных решёток.
2. Для экспериментального исследования были изготовлены дифракционные ЖК ячейки двух типов: для первой ячейки голограмма записывалась с линейной осцилляцией голографа вектора электрической напряжённости электромагнитного света, а для второй с левой и правой его циркулярной траекторией. В ходе моделирования достигнута ДЭ в первом порядке 14% (длина волны 532 нм). На оптическом столе была собрана установка для измерения интенсивности дифрагированного света. По полученным данным посчитана дифракционная эффективность и вычислены углы дифракционных максимумов.
3. Для сравнения экспериментальных и теоретических данных в программе LCD TDK было проведено моделирование ЖК ячейки и получены графики распределения интенсивности (стр. 47 - 48). Также данное программное обеспечение позволило исследовать зависимость ДЭ от толщины решетки (рис. 41), от используемого жидкого кристалла (рис. 42), а также зависимость ДЭ и угла дифракции первого порядка в зависимости от длины волны лазера (рис. 43).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Crawford P. et al. Liquid-crystal diffraction gratings using polarization holography alignment techniques // *Journal of Applied Physics*. 2005. Vol 98. №. 123102.
2. Gao K. et al. High-efficiency large-angle Pancharatnam phase deflector based on dual-twist design // *Optics Express*. 2017. Vol. 25. № 6. P. 6283.
3. Tien C.-L., Lin R.-J., Su S.-H., Horng C.-T. Electrically Tunable Diffraction Grating Based on Liquid Crystals // *Advances in Condensed Matter Phys.* 2018. Article ID 7849529. DOI: 10.1155/2018/7849529.
4. Seldomridge N. L., Shaw J. A., Repasky K. S. Dual-polarization lidar using a liquid crystal variable retarder // *Optical Engineering*. 2006. Vol. 45. P. 106202.
5. Соломатин А.С. Линзы на основе жидких кристаллов с неоднородным радиальным распределением директора // *Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика*. 2016. № 3. С. 37–45.
6. Ye M., Wang B., Takahashi T., Sato S. Properties of Variable-Focus Liquid Crystal Lens and Its Application in Focusing System // *Optical Review*. 2007. Vol. 14. № 4. P. 173-175.
7. Gao K. et al. Thin-film Pancharatnam lens with low f-number and high quality // *Opt. Express*. 2015. Vol. 23. № 20. P. 26086 –26094.
8. Lee Y. H. et al. Switchable lens based on cycloidal diffractive waveplate for AR and VR applications // *SID Symp. Digest of Technical Papers*. 2017. Vol. 72. № 4. P. 1061-1064.
9. Xiao Xiang et al. Nanoscale liquid crystal polymer Bragg polarization gratings // *Optics Express*. 2017. Vol. 25. № 16. P. 19298.

10. Барма Д. Д., Гейвандов А. Р., Денисов Д. Г., Эффективность дифракционных решеток на основе жидких кристаллов // Успехи прикладной физики. 2021. Том 9. № 2. Стр. 144-152.
11. Борн М., Вольф Э. Основы оптики издание 2-с. Перевод с английского. Издательство «Наука». 1973.
12. Znamenski M. Yu. et al. Transmissive ruled diffraction gratings for the UV, visible, and IR regions // Journal of Optical Technology. 2014. Vol. 81. № 3. P. 51-54.
13. [Электронный ресурс] // Wasatch Photonics – компания-разработчик современных оптических устройств.. URL: <https://wasatchphotonics.com/applications/vph-gratings-flexible-design/> (дата обращения 20.02.2021).
14. [Электронный ресурс] // Thorlabs – компания оптического оборудования. URL: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1123 (дата обращения 20.02.2021).
15. Mazur M.M. et al. Acousto-optic modulators of high-power laser radiation on the basis of KGW and KYW crystals // Quantum Electronics. 2020. Vol. 50. №10. P. 957-961.
16. Gaylord T. K. and Moharam M. G. Thin and thick gratings: terminology clarification // Applied Optics. 1981. Vol. 20. № 19. P. 3271-3273.
17. Petrova S. S., Shaverdova V. G. Investigation of circular dichroism spectra in protectant azo dyes // Technical Physics. 2007. Vol. 77. No. 5. P. 65-68.
18. Palto S.P. On far field calculations In LCD TDK V.1.0 Software // Crystallography Reports. 2004. Vol. 48. № 1. P. 124-140.
19. Палто С.П. Алгоритм решения оптической задачи для слоистых анизотропных сред // ЖЭТФ. 2001. Том 19. Выпуск 4. Стр. 552-560.
20. J. Li, C. H. Wen, S. Gauza , S.-T. Wu. Refractive indices of liquid crystals for display applications // J. Disp. Technol. 2005. Vol. 1. P. 51-61

21. S.Pestov, V.Vill. Liquid Crystals in Springer Handbook of Materials Data 2018. P. 959–991.
22. Блинов Л.М. Жидкие кристаллы: Структура и свойства. М.: Книжный дом «Либроком», 2013-480с.
23. Jihwan Kim et al. Fabrication of ideal geometric-phase holograms with arbitrary wavefronts // Optics Express. 2015. Vol. 25. № 16. P. 19298-19308.
24. Tomoyuki Sasaki et al. Coupled-wave analysis of vector holograms: effects of modulation depth of anisotropic phase retardation // Applied Optics. 2010. Vol. 49. № 28. P. 5205-5211.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

В графическую часть диплома входят:

- Сборочный чертеж установки для измерения дифракционной эффективности (рис. А1)
- Функционально-оптическая схема установки записи голограммы (рис. А3)
- Технологический лист с эскизами основных операций (рис. А4)
- Оптический выпуск объектива из схемы записи голограммы (рис. А5)
- Лист с результатами моделирования (рис. А6)
- Лист с результатами эксперимента (рис. А7)

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание	
				<u>Документация</u>			
			Р/Л2.00.00.00СБ	Сборочный чертеж установки измерения интенсивности	1		
				<u>Сборочные единицы</u>			
		1	Р/Л2.00.01.00СБ	Держатель	3		
		2	Р/Л2.00.02.00СБ	Крепление источника излучения	1		
		3	Р/Л2.00.03.00СБ	Крепление образца	1		
		4	Р/Л2.00.04.00СБ	Крепление поляризатора	1		
				<u>Детали</u>			
		5	Р/Л2.00.00.01	Крепление ПИ	1		
		6	Р/Л2.00.00.02	Крепление с рельсой	1		
		7	Р/Л2.00.00.03	Образец	1		
				<u>Стандартные изделия</u>			
		8		Винт установочный М1.6-30 ГОСТ1478-92	4		
		9		Винт крепежный М4х6ГОСТ 4759-1-2015	4		
				<u>Покупные изделия</u>			
		10		Лазер 532нм	1		
		11		Лалка CF155_CM	3		
		12		Оптический стол 520х100	1		
		13		Поляризатор LPVISE2х2	1		
		14		ПИ S121С	1		
			Р/Л2.00.00.00СБ				
			Изн.	Лист	№ докум	Подпись	
			Разраб.	Барма		15.02	
			Пров.				
			Нач. отд.				
			Н. кантр				
			Чтв.				
			Установка для измерения интенсивности			Литера	
			МГТУ им.Н.Э.Баумана Группа Р/Л2-81Б			Лист	
						1	
						Листов	
						2	

Копировал

Формат А4

Рисунок А2 – Спецификация к сборочному чертежу.

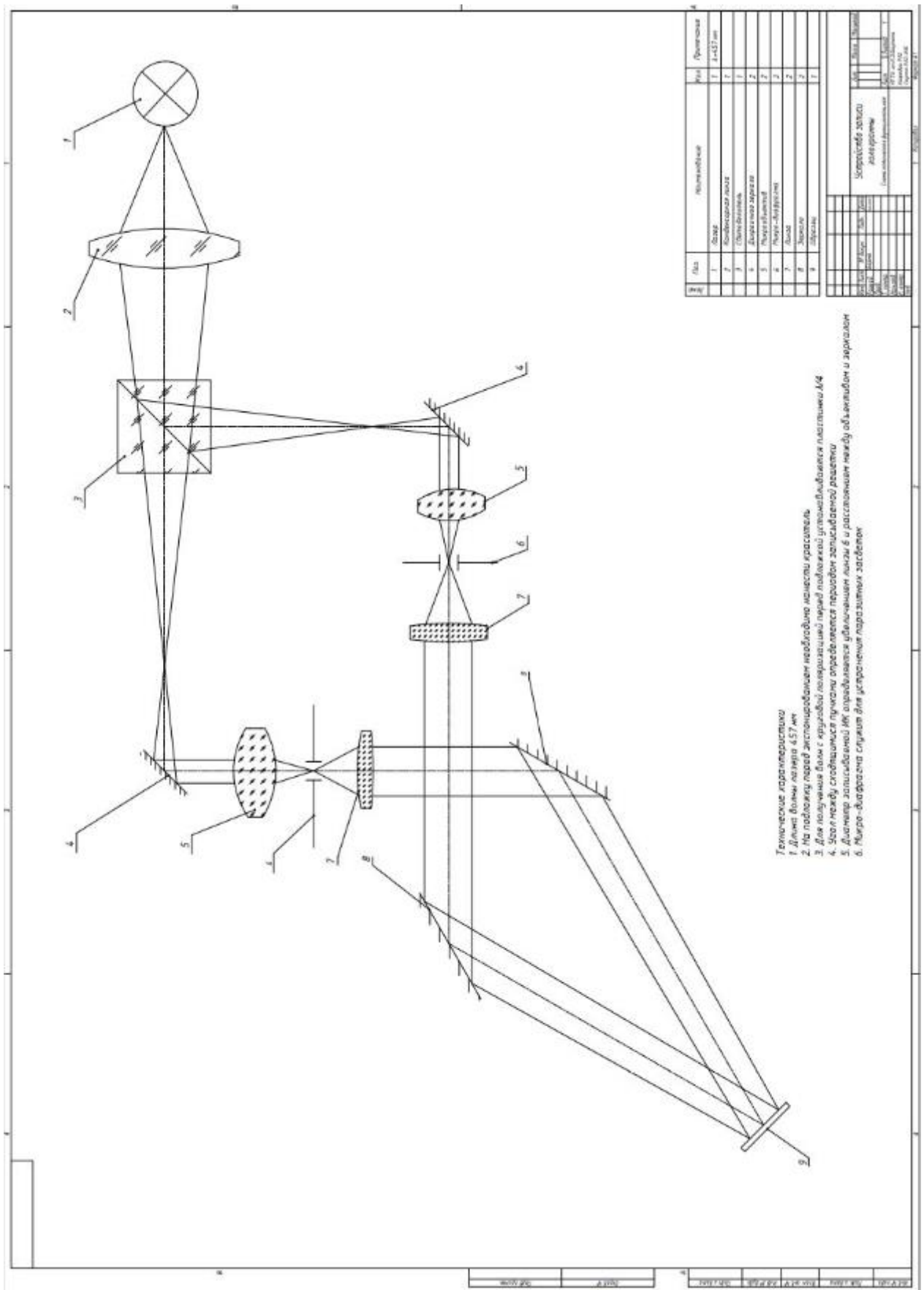


Рисунок А3 – Функционально-оптическая схема установки записи голограммы.

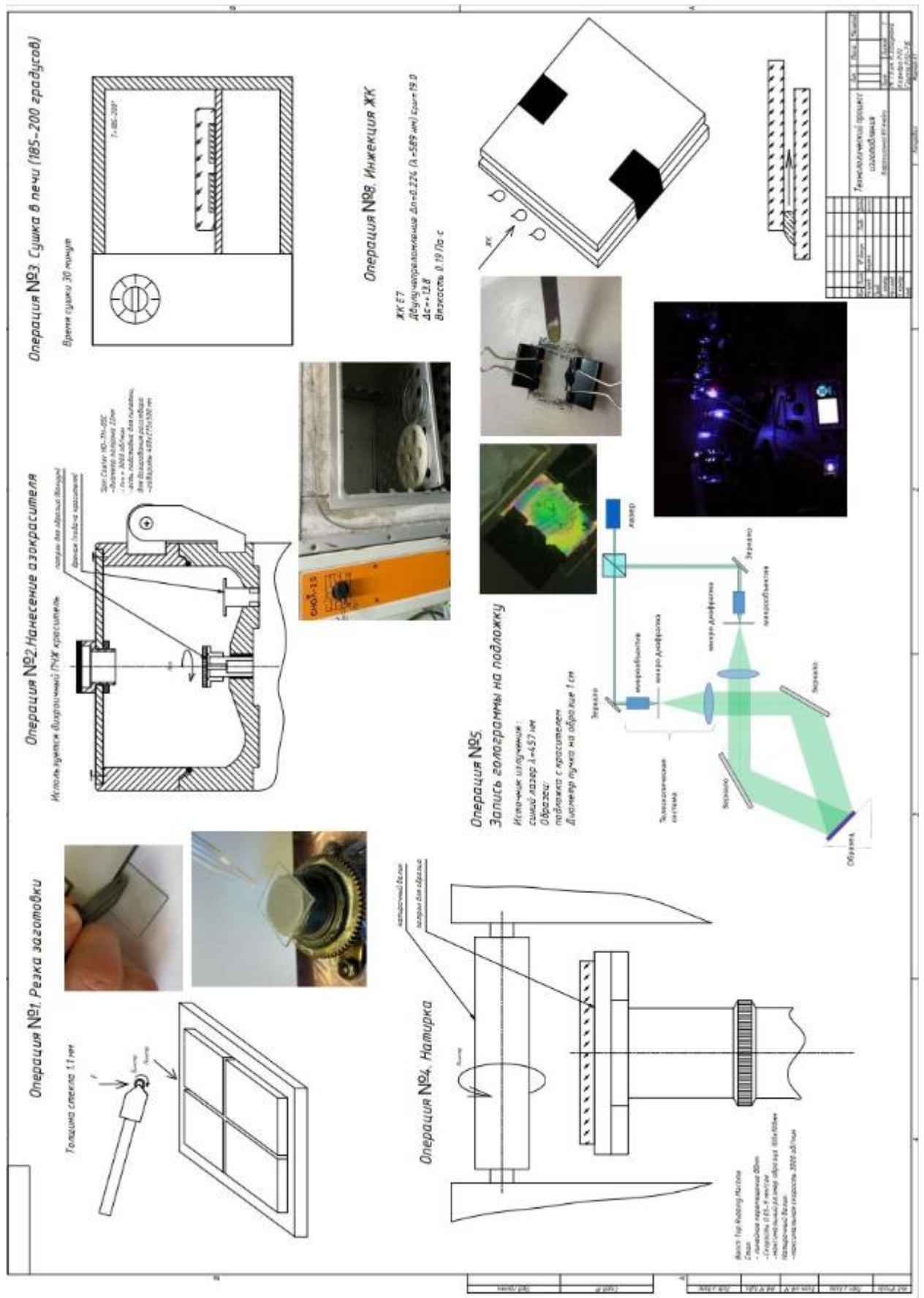


Рисунок А4 – Технологический лист с эскизами основных операций.

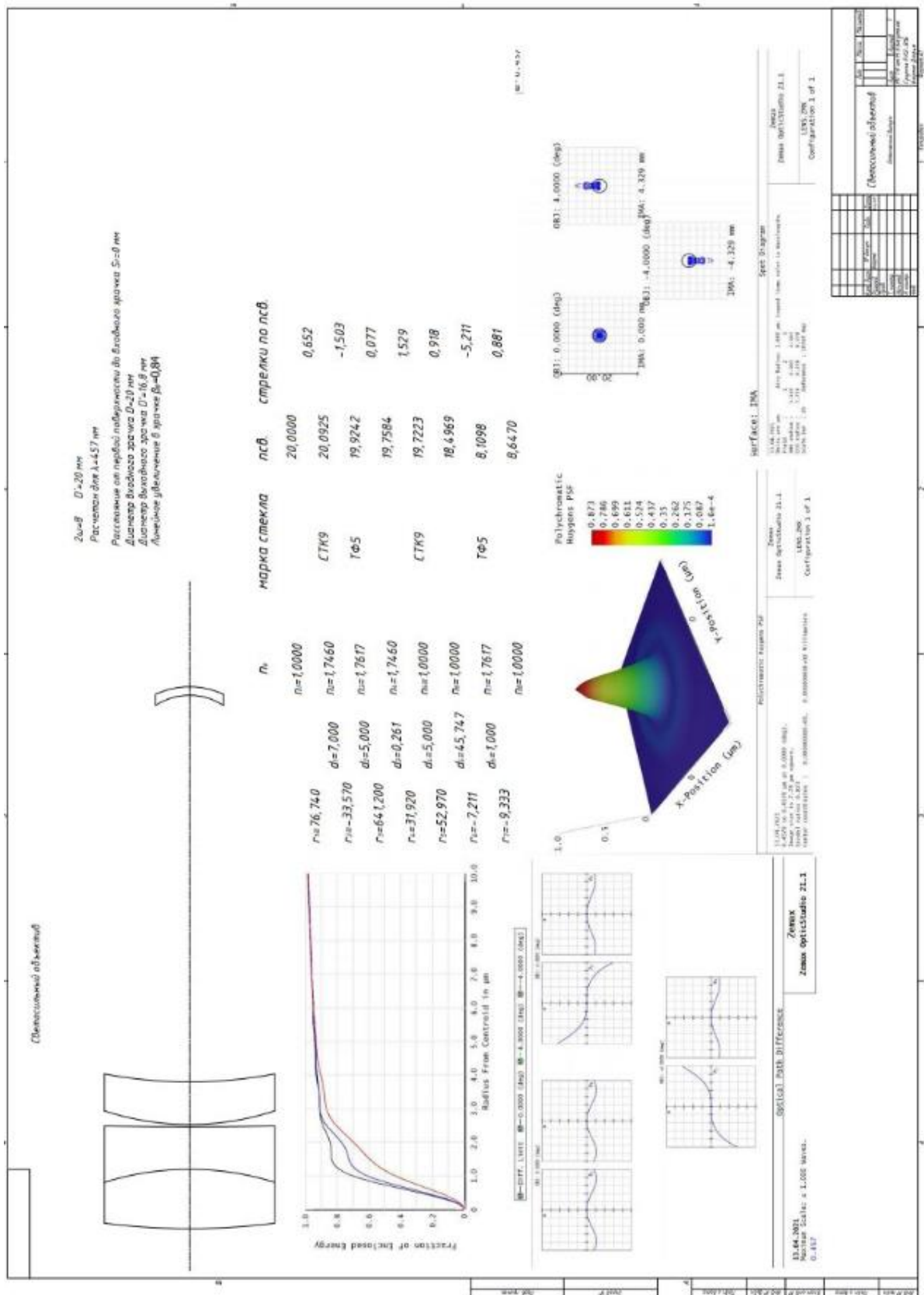


Рисунок А5 – Оптический выпуск объектива из схемы записи голограммы.

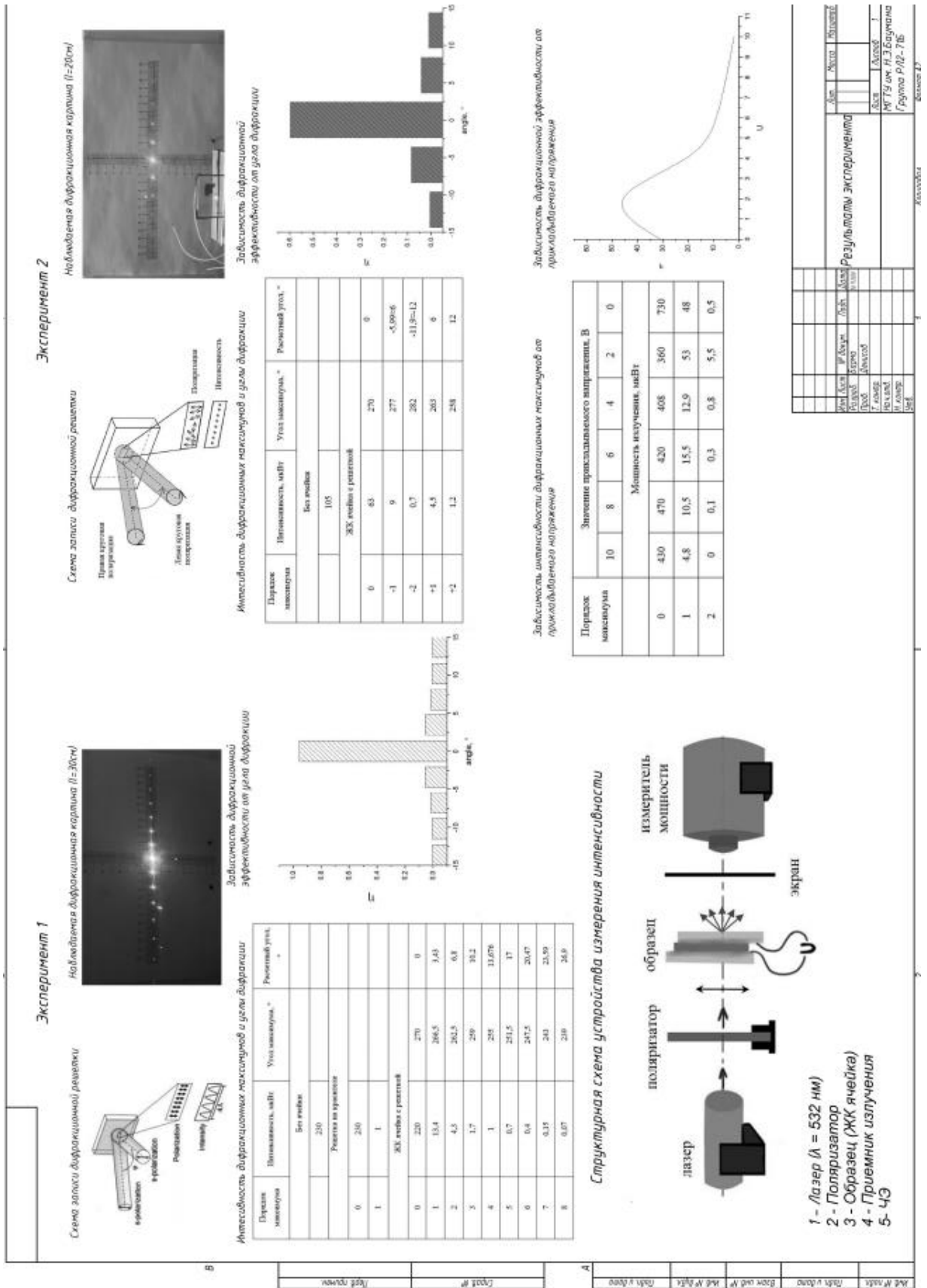


Рисунок А6 – Результаты эксперимента.

