МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

Институт информатики, математики и электроники
Факультет электроники и приборостроения
Кафедра наноинженерии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

«ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ, ФОРМИРУЕМОГО ДИФРАКЦИОННЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ РАЗЛИЧНЫХ АПЕРТУР»

по направлению подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника
(уровень бакалавриата)
направленность (профиль) «Нанотехнологии электроники и фотоники»

Выпускник Юров Никита Олегович

Руководитель к.ф.-м.н., доц. Меженин А.В.

Нормоконтролёр к.т.н., доц. Саноян А.Г.

Самара 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

Кафедра наноинженерии

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ /_____/
(подпись) *И.О.Фамилия*
«____»_____20___ г.

Задание на выпускную квалификационную работу (ВКР)

Студенту Юрову Никите Олеговичу
(ФИО, полностью)
группы 6467-110304D
1.Тема ВКР: Диагностические системы для контроля параметров излучения, формируемого дифракционными оптическими элементами различных апертур
утверждена приказом по университету от «____»_____20___ г. №____
2.Перечень вопросов, подлежащих разработке в ВКР: _____
2.1 Исследование возможностей изменения размера пучка в безколлиматорной схеме
2.2 Регулирование апертуры пучка в оптических системах с использованием коллиматоров
2.3 Экспериментальное исследование параметров дифракционных оптических элементов различных апертур

3.Консультанты по разделам ВКР*(при наличии):*
раздел ВКР:_____
разрабатываемые вопросы: _____
_____ /_____/
должность, степень *подпись* *И.О.Фамилия*

4.Дата выдачи задания: «____»_____20___ г.
5.Срок представления на кафедру законченной ВКР: «____»_____20__г.

Руководитель ВКР
доц., к.ф.-м.н. _____ /А.В. Меженин /
должность, степень *подпись* *И.О.Фамилия*

Задание принял к исполнению _____ /Н.О. Юров/
подпись студента *И.О.Фамилия студента*

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка: 37 с., 21 рисунок, 17 источников.

Презентация: 18 слайдов Microsoft PowerPoint.

СИСТЕМА ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ, ЭЛЕМЕНТ ДИФРАКЦИОННЫЙ, ИЗЛУЧЕНИЕ ИНФРАКРАСНОЕ, ЛАЗЕР УГЛЕКИСЛОТНЫЙ, СХЕМА ГАЛИЛЕЯ, СХЕМА КЕПЛЕРА, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ.

Объектом исследования являются оптические системы, предназначенные для диагностики элементов дифракционной оптики, работающих в дальнем инфракрасном (ИК) диапазоне.

Цель работы – определение возможностей диагностических систем с точки зрения исследования параметров излучения, формируемого дифракционными оптическими элементами (ДОЭ) различной апертуры.

Проведен расчет оптических систем, предлагаемых для контроля параметров ДОЭ, на основе положений дифракционной теории.

Определены пределы регулирования размера освещающего выходного пучка в схемах с использованием и без использования коллиматоров.

Выполнены эксперименты по исследованию параметров излучения, сформированного ДОЭ различных апертур.

Значимость работы заключается в ее прикладной направленности: предлагаемые оптические системы могут использоваться для комплексного исследования параметров дифракционных элементов дальнего ИК-диапазона с апертурой от 2 до 40 мм, за исключением области от 10 до 20 мм.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение……..……..…5
1 Состав оптических систем……..…….....…….……...7
2 Расчет размера освещающего пучка в оптических схемах……11
2.1 Безколлиматорная схема……....…….…….……...……..…11
2.2 Расчет коллиматора по схеме Галилея.……..…...……...…14
2.3 Расчет коллиматора по схеме Кеплера…….16
3 Расчет и изготовление дифракционных оптических элементов…….…...…20
4 Экспериментальное исследование распределений интенсивности, формируемых дифракционными элементами различных апертур……...…28
4.1 Дифракционная решетка…….……...……28
4.2 Бинарная цилиндрическая линза..……...…….…….30
4.3 Линза Френеля……...…….…….32
Заключение……..……..……...…...…...35
Список использованных источников……...……36

ВВЕДЕНИЕ

Технологические процессы термической обработки, основанные на локальном нагреве конструкционных материалов лазерным излучением, с высокой экономической эффективностью применяются при изготовлении деталей и узлов различных машин и агрегатов. Для обработки материалов в настоящее время широко используются полупроводниковые, волоконные и газоразрядные CO_2-лазеры [1].

Несмотря на очевидные преимущества лазерных источников перед традиционными (высокая концентрация энергии, возможность автоматизации процесса обработки и т. д.), их применение в машиностроении и производстве аэрокосмической техники целесообразно только при использовании соответствующих систем преобразования излучения, позволяющих осуществить необходимое температурное воздействие [2].

Одним из способов управления лазерным излучением является применение дифракционных оптических элементов (ДОЭ). Так, например, формирование требуемого профиля интенсивности излучения в фокальной плоскости позволяют обеспечить фокусаторы лазерного излучения [3]. Внешне такой оптический элемент представляет собой пропускающую или отражающую пластинку с тонким фазовым микрорельефом, рассчитанным в рамках теории дифракции [4].

Основными параметрами, характеризующими ДОЭ с точки зрения управления излучением, являются распределение интенсивности пучка в фокальной плоскости и энергетическая эффективность, представляющая собой отношение энергии, попавшей в заданную область фокальной плоскости, к энергии освещающего пучка. Важнейшим требованием к ДОЭ является обеспечение расчетных значений этих параметров [5].

Из определения энергетической эффективности видно, что измерение этого параметра, тесно связано с контролем распределения интенсивности пучка. Поэтому диагностика профиля излучения, преобразованного ДОЭ, является ключевым фактором оценки качества изготовления фокусатора.

Целью работы является создание диагностических систем для контроля параметров излучения, формируемого ДОЭ различной апертуры.

1 Состав оптических систем

Установить соответствие параметров излучения, сформированного ДОЭ, расчетным значениям, т. е. определить, как работает элемент, можно лишь в условиях натурного эксперимента. Для исследования распределения интенсивности излучения, формируемого ДОЭ, необходимо определить состав оптических систем, позволяющих формировать преобразованный пучок и изучать его характеристики.

Предполагается, что исследуемые ДОЭ рассчитаны для работы на отражение когерентного монохроматического излучения CO_2-лазера дальнего ИК-диапазона (длина волны – 10,6 мкм), имеют различную апертуру и работают под углом 45°. Поскольку вклад в формирование излучения вносят как центральная, так и периферические зоны фокусаторов, исследуемые элементы должны освещаться коллимированным либо близким к коллимированному лазерным пучком, покрывающим всю поверхность.

Регистрацию распределения интенсивности планируется проводить в режиме реального времени с помощью камеры, работающей в дальнем инфракрасном диапазоне. Поскольку ИК-камеры имеют существенные ограничения по интенсивности входного сигнала, получать распределение интенсивности предполагается не на самой матрице, а на матовом экране, окрашенном в черный цвет. Для уверенного захвата всей области, в которой формируется изображение, экран должен иметь размеры не менее 10×10 см. Регистрация формируемого ДОЭ распределения интенсивности на практике выполняется с расстояний 20–60 см. Следовательно, поле камеры обзора по вертикальной и горизонтальной координатам должно быть порядка 20° [6].

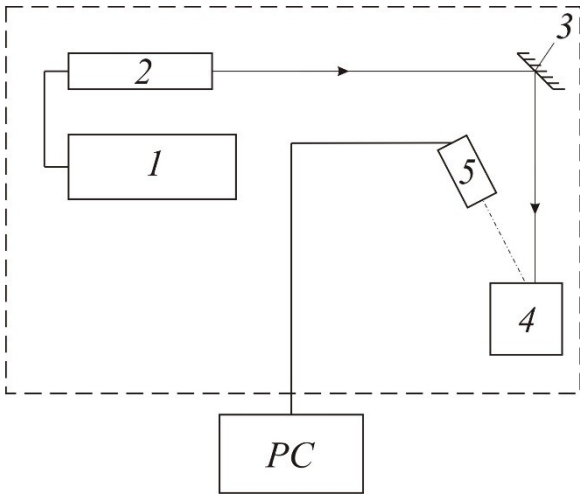
Для регистрации распределения интенсивности в данном случае оптимально подходит болометрическая ИК-камера XPORT-317 фирмы «Xenics», работающая в диапазоне длин волн 8–14 мкм [7]. Она имеет приемную матрицу 320×240 точек, что позволяет оценить разрешение полученного изображения 1000 точек на дюйм.

Наличие инфракрасной камеры в оптической системе влечет за собой установление ограничений по мощности лазерного пучка. По этой причине в качестве источника излучения планируется использовать CO_2-лазер LCD-1A рязанской фирмы «Плазма» с номинальной выходной мощностью 1 Вт. Это минимальная мощность для газовых лазеров, излучающих на длине волны 10,6 мкм, выпускаемых отечественными производителями. Максимальная мощность такого источника при работе в одномодовом режиме составляет 3,2 Вт.

Диаметр выходного пучка лазера LCD-1A составляет всего 1,8 мм и, очевидно, он меньше размеров апертур ДОЭ. Поэтому освещение всей поверхности фокусатора может быть обеспечено двумя путями: за счет естественной расходимости лазерного пучка (безколлиматорная схема) либо использованием в оптической системе двухлинзового коллиматора.

Как сказано ранее, высокая выходная мощность лазера предполагает регистрацию распределения интенсивности с экрана. В этом случае ИК-камера должна быть расположена под небольшим углом к нему. Компоновку диагностических систем предполагается осуществить на лабораторном оптическом столе фирмы «Standa» размерами 150×80 см.

На рисунке 1 показан состав безколлиматорной оптической системы, которую планируется применять для исследования ДОЭ небольших апертур, поскольку расходимость излучения CO_2-лазера LCD-1A, указанная в паспорте прибора – 9,5 мрад.



1 – источник питания,

2 – лазер,

3 – ДОЭ,

4 – экран,

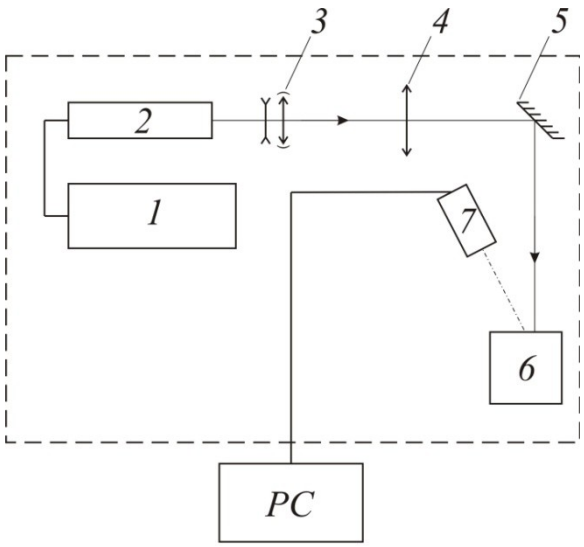
5 – ИК-камера,

PC – персональный компьютер

Рисунок 1 – Оптическая система для исследования ДОЭ малых апертур

Несмотря на то, что излучение лазера характеризуется высокой направленностью, передача его энергии на большие расстояния требует уменьшения расходимости лазерного пучка. Для этого используются коллиматоры – оптические приборы, предназначенные для имитации объекта, расположенного на бесконечно большом расстоянии [8]. Наиболее рациональной схемой для уменьшения расходимости лазерного пучка является схема двухкомпонентиой системы. Первый компонент такой системы может быть как положительным, так и отрицательным.

На рисунке 2 показана диагностическая схема в случае использования оптического коллиматора. Коллимирование лазерного пучка не только позволяет увеличить его размеры, но и одновременно уменьшить угловую расходимость, что важно при получении изображений.



1 – источник питания,

2 – лазер,

3, 4 – линзы коллиматора,

5 – ДОЭ,

6 – экран,

7 – ИК-камера,

PC – персональный компьютер

Рисунок 2 – Оптическая система для исследования широкоапертурных ДОЭ

В экспериментах предполагается использовать два типа коллиматоров, собранных по схемам Галилея (первая линза отрицательная) и Кеплера (первая линза положительная). Формируемые коллимированные пучки должны полностью покрывать до оптическую поверхность исследуемых дифракционных элементов.

2 Расчет размера освещающего пучка в оптических схемах

Поскольку целью данной работы является создание диагностических систем для контроля параметров излучения, формируемого ДОЭ различных апертур, на основе имеющегося лабораторного оборудования, расчет размера освещающего пучка будет проводиться, исходя из размеров оптического стола, характеристик излучателя и фокусных расстояний линз, образующих коллиматоры в схемах Галилея и Кеплера.

2.1 Безколлиматорная схема

В схеме, не предусматривающей наличие оптического коллиматора (рисунок 3), расширение лазерного пучка происходит за счет естественной расходимости излучения. Как было сказано, такую схему целесообразно применять для исследования пучков, формируемых ДОЭ малых апертур.

Расчет размера освещающего пучка выполним в дифракционном приближении [9], исходя из следующих данных:

– λ=10,6 мкм – длина волны излучения лазера;

– $2y$=1,8 мм – диаметр выходного пучка лазера;

– 2ω=9,5 мрад – угол расходимости лазерного пучка;

– a_1=0,1…0,9 м – отрезок от перетяжки лазера до осевого сечения ДОЭ (диапазон дан с учетом габаритов излучателя и оптического стола).

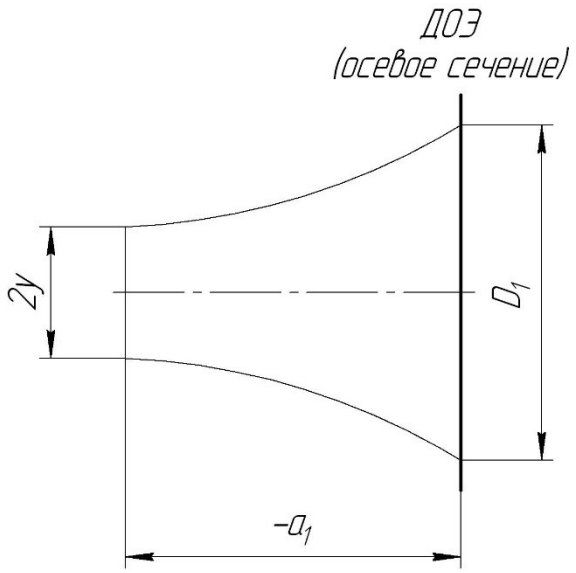


Рисунок 3 – Расчетная схема для безколлиматорной системы

Согласно дифракционной теории вначале определяется конфокальный параметр $R_э$ лазерного пучка из соотношения, которым он связан с углом расходимости 2ω для основной моды $2\omega = 2\sqrt{2\lambda/(\pi R_э)}$. Откуда имеем

$$R_э = 8\lambda/\pi(2\omega)^2. \qquad (1)$$

Подставляя значения величин, приведенные выше, находим $R_э$=300 мм.

Тогда диаметр пучка в центральном сечении дифракционного элемента можно рассчитать по формуле

$$D_1 = 2y\sqrt{1+\xi_1^2}, \qquad (2)$$

где $\xi_1 = 2a_1/R_э$.

Варьируя a_1 с шагом 0,1 м, получаем результаты, представленные графически на рисунке 4.

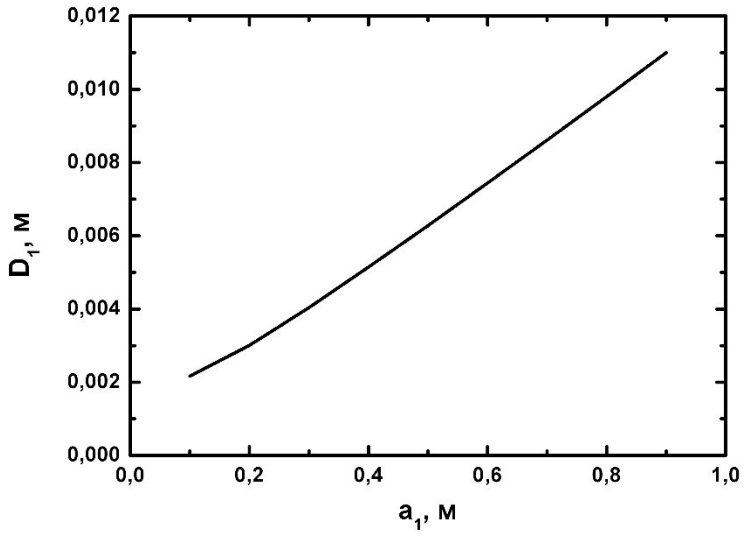


Рисунок 4 – Зависимость диаметра освещающего пучка от длины отрезка между перетяжкой лазера и ДОЭ в случае безколлиматорной схемы

Таким образом, при изменении расстояния от перетяжки лазера до дифракционного элемента в пределах габаритов оптического стола (за вычетом размеров излучателя) диаметр освещающего пучка в случае использования безколлиматорной схемы может регулироваться в пределах от 2 до 11 мм. Полученная зависимость $D_1(a_1)$ близка к линейной.

Помимо малого размера исследуемых ДОЭ безколлиматорная схема имеет и другой недостаток, связанный с дифракционной расходимостью сформированного пучка лазера. В плоскости регистрации размер изображения получается больше размера изображения, полученного при освещении ДОЭ коллимированным излучением, т. е. результаты эксперимента требуют корректировки с использованием численных методов.

Значительное увеличение размеров освещающего пучка может быть достигнуто за счет установки в оптическую систему двухлинзового коллиматора. Это позволит значительно снизить угловую расходимость исходного пучка и обеспечит возможность экспериментировать с элементами больших апертур. Ниже будет проведен расчет размеров освещающего пучка в оптических системах с использованием коллиматоров, построенных по схемам Галилея и Кеплера.

2.2 Расчет коллиматора по схеме Галилея

Коллиматор, построенный по схеме Галилея (рисунок 5), состоит из входной рассеивающей и выходной собирающей линз [10]. Его расчет выполним, исходя из следующих данных:

– λ=10,6 мкм – длина волны излучения лазера;

– $2y$=1,8 мм – диаметр выходного пучка лазера;

– 2ω=9,5 мрад – угол расходимости лазерного пучка;

– f_1'=-2000 мм – фокусное расстояние первого компонента;

– f_2'=5000 мм – фокусное расстояние второго компонента;

– L=300 мм – длина насадки;

– a_1=0,1…0,6 м – отрезок от перетяжки лазера до первого компонента (диапазон дан с учетом габаритов излучателя и оптического стола).

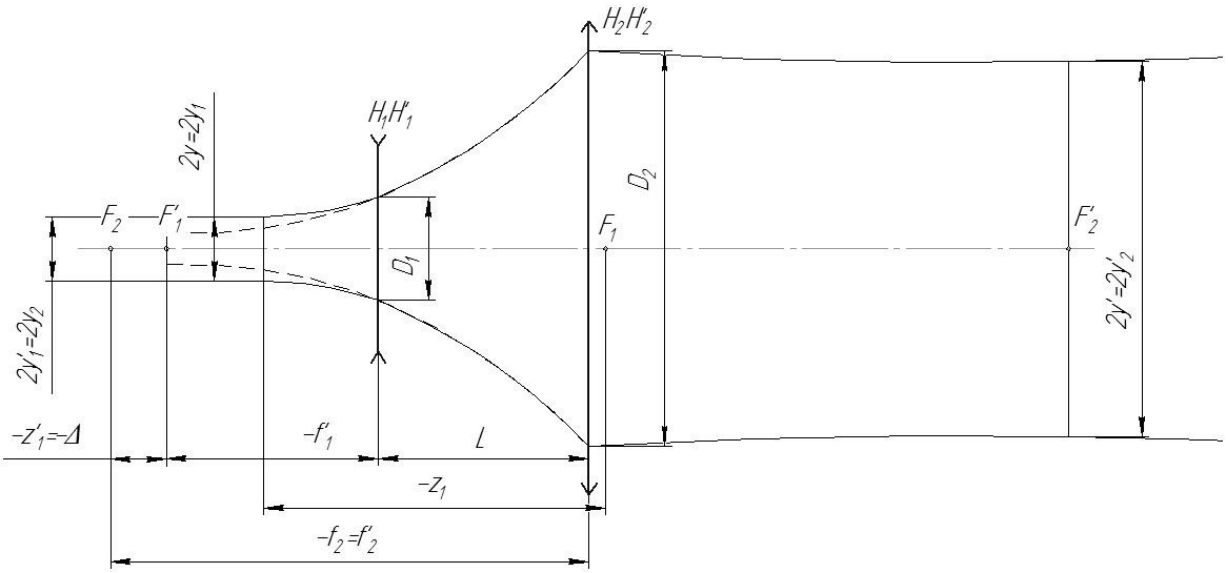


Рисунок 5 – Расчетная схема для системы с коллиматором, построенным по схеме Галилея

Расчет двухкомпонентной системы будем проводить на основании формул, полученных из дифракционной теории, приведенных в [9]. Конфокальный параметр лазерного пучка, как и в п. 2.1, $R_э$=300 мм. Процедура вычислений состоит в определении следующих величин.

1) Диаметр пучка на первой линзе

$$D_1 = 2y'\sqrt{1+\xi_1^2}, \qquad (3)$$

где $\xi_1 = 2a_1 / R_э$.

2) Оптический интервал Δ, определяющий смещение заднего фокуса первого компонента относительно переднего фокуса второго компонента

$$\Delta = z_1' = f_1' + f_2' - L, \qquad (4)$$

в соответствии с исходными данными $\Delta = z_1'$=2700 мм=2,7 м.

3) Конфокальный параметр $R_{э1}'$ пучка, преобразованного первым компонентом

$$R_{э1}' = \frac{R_{э1}}{\left(1 - a_1 / f_1'\right)^2 + \left[R_{э1} / \left(2f_1'\right)\right]^2}. \qquad (5)$$

4) Диаметр $2y_1'$ перетяжки пучка, преобразованного первым компонентом:

$$2y_1' = \sqrt{2\lambda R_{э1}' / \pi}. \qquad (6)$$

5) Диаметр D_2 пучка на втором компоненте

$$D_2 = 2y_1'\sqrt{1+\xi_2^2}, \qquad (7)$$

где $\xi_2 = -2f_2' / R_{э1}'$.

Варьируя a_1 с шагом 0,05 м, получаем результаты, представленные графически на рисунке 6.

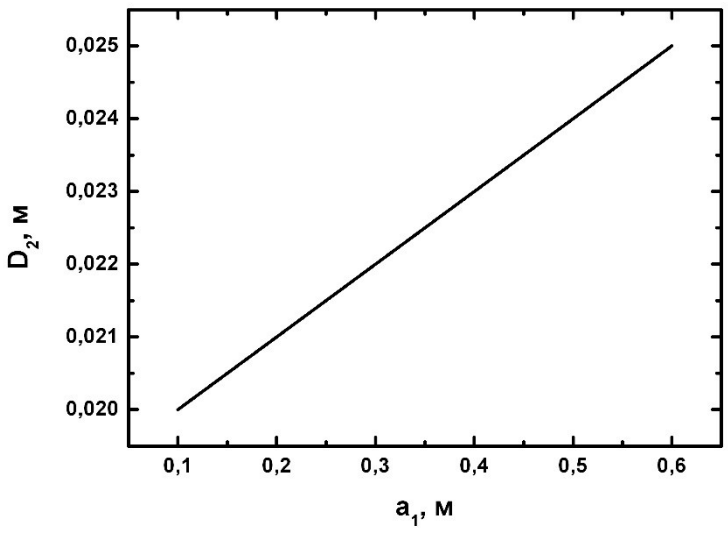


Рисунок 6 – Зависимость диаметра освещающего пучка от длины отрезка между перетяжкой лазера и первым компонентом (схема Галилея)

Данные, приведенные на рисунке 6, свидетельствуют, что, как и в случае безколлиматорной схемы, зависимость диаметра пучка, освещающего ДОЭ, от длины отрезка между перетяжкой лазера и первым компонентом практически линейная. Изменение расстояния от перетяжки до первого компонента в рамках габаритов оптического стола позволяет регулировать размер пучка на дифракционном элементе в пределах от 20 до 25 мм.

Оптические системы с коллиматором, собранным по схеме Галилея, являются предпочтительными при работе в лабораторных условиях, так как в них не происходит фокусировка пучка между линзами. Это обстоятельство важно с точки зрения требований техники безопасности.

2.3 Расчет коллиматора по схеме Кеплера

Расчет коллиматора, построенного по схеме Кеплера (рисунок 7) [10], выполним, исходя из следующих данных:

– λ=10,6 мкм – длина волны излучения лазера;

– $2y$=1,8 мм – диаметр выходного пучка лазера;

– 2ω=9,5 мрад – угол расходимости;

– $f_1^{'}$=15 мм – фокусное расстояние первого компонента;

– $f_2^{'}$=185 мм – фокусное расстояние второго компонента;

– a_1=0,1…0,7 м – отрезок от перетяжки лазера до первого компонента (диапазон дан с учетом габаритов излучателя и оптического стола).

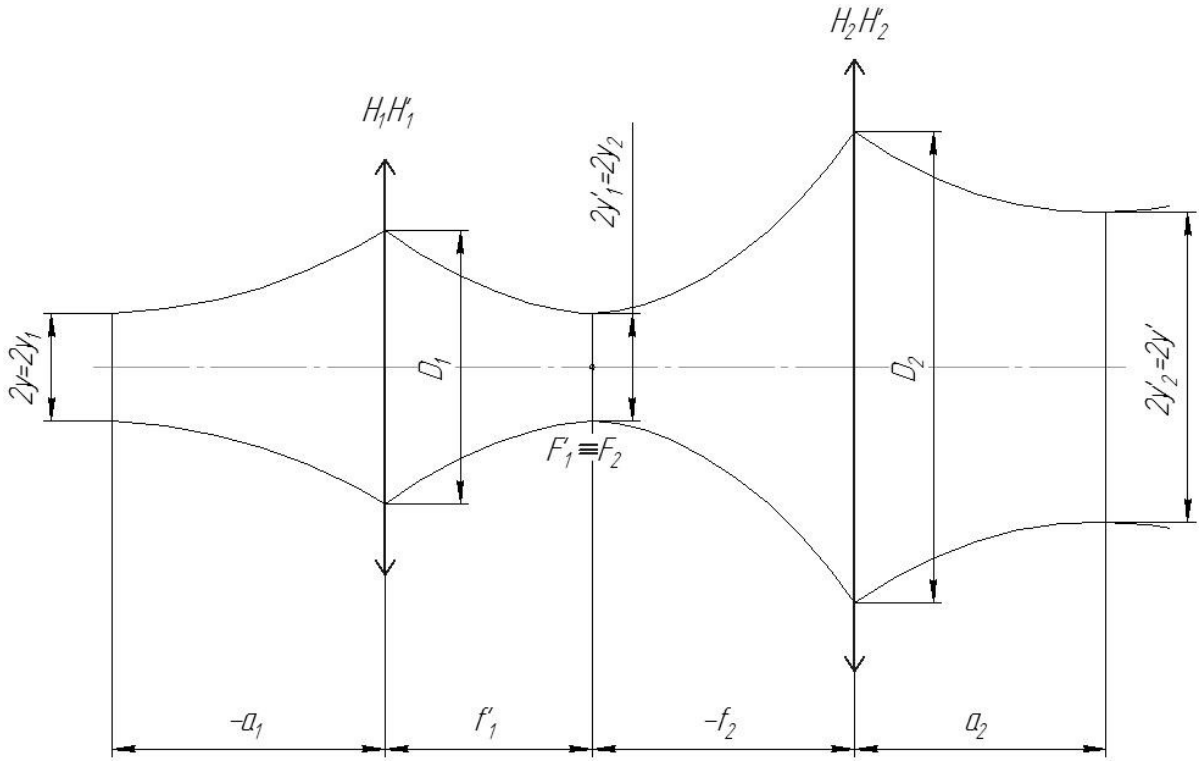


Рисунок 7 – Расчетная схема для системы с коллиматором, построенным по схеме Кеплера

Расчет данной системы будем проводить аналогично предыдущей на основании формул дифракционной теории образования изображения [9] (Конфокальный параметр лазерного пучка, как и в пп. 2.1, 2.2, $R_э$=300 мм).

1) Диаметр пучка на первой линзе

$$D_1 = 2\,y^{'}\sqrt{1+\xi_1^2}, \qquad (8)$$

где $\xi_1 = 2\,a_1 / R_э$.

2) Совместим задний фокус первого компонента с передним фокусом второго, тогда оптический интервал $\Delta = z_1^{'} = 0$.

3) Конфокальный параметр $R_{э1}^{'}$ пучка, преобразованного первым компонентом

$$R_{э1}^{'}=\frac{R_{э1}}{\left(1+a_1/f_1^{'}\right)^2+\left[R_{э1}/\left(2f_1^{'}\right)\right]^2}. \qquad (9)$$

4) Диаметр $2y_1^{'}$ перетяжки пучка, преобразованного первым компонентом:

$$2y_1^{'}=\sqrt{2\lambda R_{э1}^{'}/\pi}. \qquad (10)$$

5) Диаметр D_2 пучка на втором компоненте

$$D_2=2y_1^{'}\sqrt{1+\xi_2^2}, \qquad (11)$$

где $\xi_2=-2f_2^{'}/R_{э1}^{'}$.

Варьируя a_1 с шагом 0,05 м, получаем результаты, представленные графически на рисунке 8.

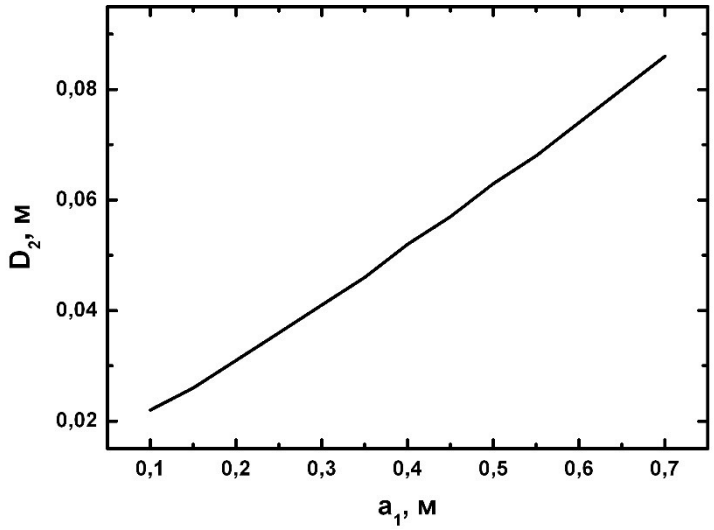


Рисунок 8 – Зависимость диаметра освещающего пучка от длины отрезка между перетяжкой лазера и первым компонентом (схема Кеплера)

Полученная зависимость диаметра освещающего пучка от длины отрезка между перетяжкой лазера и первым компонентом (рисунок 8), как и в предыдущих расчетах, близка к линейной. Изменение расстояния между перетяжкой и первым компонентом в рамках габаритов оптического стола позволяет регулировать размер коллимированного пучка от 22 до 86 мм.

Использование оптических систем с коллиматором, собранным по схеме Кеплера, дает значительные преимущества с точки зрения получения широкоапертурных параллельных пучков, хотя из-за фокусировки излучения между линзами такая система проигрывает с точки зрения техники безопасности при работе в лабораторных условиях.

Кроме того, в лаборатории имеются походящие по параметрам расчета собирающие линзы со световым диаметром до 40 мм. Поскольку доступная оптика ограничивает размер пучка на втором компоненте, результаты расчета целесообразно представить, как показано на рисунке 9.

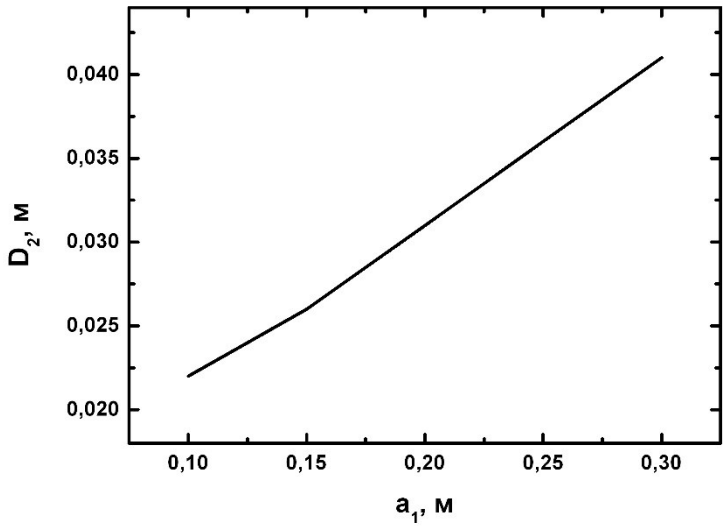


Рисунок 9 – Зависимость диаметра освещающего пучка от длины отрезка между перетяжкой лазера и первым компонентом (схема Кеплера), полученная с учетом ограничений по диаметру второго компонента

Таким образом, с помощью схемы Кеплера в лабораторных условиях можно получить пучки коллимированного излучения диаметром 22–40 мм.

Оптические системы с коллиматором, собранным по схеме Кеплера, менее безопасны при работе в лабораторных условиях, так как в них происходит фокусировка пучка между линзами. Это требует дополнительных мер безопасности для оператора (установка защитных кожухов и т. д.). Однако такие оптические системы, как правило, более компактны.

В итоге, можно заключить, что безколлиматорная схема и системы с коллиматорами, построенными по схемам Галилея и Кеплера, которые доступны для реализации в лаборатории позволяют регулировать размер освещающего пучка от 2 до 40 мм, исключая область от 10 до 20 мм.

3 Расчет и изготовление дифракционных оптических элементов

В данной работе в качестве исследуемых ДОЭ, формирующих лазерное излучение, выбраны отражающие: дифракционная решетка с квадратной апертурой 10×10 мм, бинарная цилиндрическая линза с квадратной апертурой 20×20 мм и линза Френеля с круговой апертурой диаметром 40 мм.

Дифракционная решетка может использоваться для разделения энергии исходного пучка излучения по заданному количеству порядков. В самом простом случае, что происходит формирование дифракционных максимумов в –1 и +1 порядках. В данной работе предполагается изготовление фазового отражающего элемента с бинарным рельефом, поверхность которого имеет регулярный периодический профиль.

Напомним, что периодом *d* дифракционной решетки называют величину равную сумме ширины ступеньки и уступа. В настоящей работе с учетом возможностей изготовления фотошаблона принимаем, что период *d* =600 мкм. Фотошаблон дифракционная решетка представлен на рисунке 10. Поскольку элемент работает на отражение под углом 45°, фотошаблон «растянут» по одной координате в $\sqrt{2}$ раз.

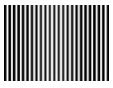


Рисунок 10 – Фотошаблон дифракционной решетки

Углы, под которыми будут формироваться –1 и +1 дифракционные порядки можно определить по формуле

$$\varphi = \pm \arcsin\left(\lambda / d\right), \qquad (12)$$

где λ=10,6 мкм – длина световой волны. В данном случае $\varphi \approx \pm 1°$.

Бинарная цилиндрическая линза. Другим исследуемым элементом выбрана отражающая цилиндрическая линза. Ее фазовая функция в параксиальном приближении имеет вид:

$$\varphi(u) = -k\frac{u^2}{2f}, \qquad |u| \ll \frac{D}{2}, \tag{13}$$

приведенный к интервалу [0, 2π), с границами зон – прямыми линиями. Здесь k – волновое число; u – координата, отсчитываемая от центра элемента; f – фокусное расстояние; D – апертура линзы. Фотошаблон бинарной цилиндрической линзы приведен на рисунке 11. Он также «растянут» по ширине в $\sqrt{2}$ раз, поскольку элемент работает на отражение под углом 45°.

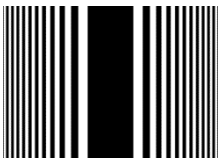


Рисунок 11 – Фотошаблон бинарной цилиндрической линзы

Линза Френеля. В качестве третьего исследуемого элемента выбрана линза Френеля со ступенчатым микрорельефом, близким к полутоновому. Ее фазовая функция в параксиальном приближении имеет вид:

$$\varphi(u,v) = -k\frac{\left(u^2+v^2\right)}{2f}, \ |u| \le \frac{D}{2}, \ |v| \le \frac{D}{2}, \tag{14}$$

приведенный к интервалу [0, 2π). Здесь k – волновое число; u, v – координаты, отсчитываемые от центра элемента; f – фокусное расстояние; D – апертура. На рисунке 12 приведен фотошаблон этого элемента.

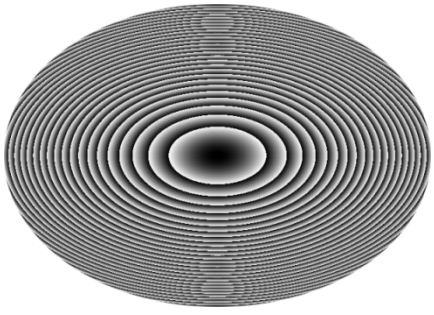


Рисунок 12 – Фотошаблон линзы Френеля

Технологический процесс изготовления первых двух ДОЭ состоит из следующих этапов: очистка подложки, напыление защитной маски, литография и травление маски, плазмохимическое травление и напыление отражающего слоя. Ниже приведено краткое описание отдельных операций.

Первичная очистка подложки осуществлялась путем промывки в проточной дистиллированной воде. Для удаления органических соединений использовалось обезжиривающее средство, которое впоследствии также удалялось проточной дистиллированной водой [11].

Удаление неорганических соединений проводилось в пероксидно-кислотном растворе, состоящем из концентрированной серной кислоты и перекиси водорода в пропорции 3:1 при комнатной температуре с выдержкой более 20 мин. Раствор удалялся промывкой в дистиллированной воде с последующей сушкой под струей сжатого воздуха.

Защитный маскирующий слой алюминия толщиной 150 нм был нанесен магнетронным распылением. Для этого использовалась установка ЭТНА 100-МТ в НОЦ «Нанотехнологий» Самарского университета.

Первым этапом литографии являлось нанесение однородной пленки фоторезиста на алюминиевую маску методом центрифугирования с контролем ее толщины. После нанесения резиста проводолась его задубливание (сушка). Для этого образец выдерживался 12 мин. на специальной плитке с закрытой крышкой при температуре 95 °С. Этот этап был необходим для испарения растворителя, содержащегося в фоторезисте. Перед экспонированием подложку охлаждали до комнатной температуры.

Процесс экспонирования заключался в засветке позитивного фоторезиста через фотошаблон УФ-излучением ртутной лампы.

После экспонирования подложка погружалась в раствор NaOH и H_2O (в соотношении 1:3), в котором происходило стравливание проявленного фоторезиста и алюминиевой маски под ним. Сразу после полного снятия незащищенной фоторезистом маски подложка промывалась в проточной деионизированной воде для исключения подтравливания. После проверки

маски, подложка погружалась в раствор ацетона для удаления непроявленного фоторезиста. Ацетон удалялся деионизированной водой методом вытеснения. Сушка проводилась потоком очищенного воздуха.

Плазмохимическое травление осуществлялось в Bosch-процессе [12], представляющем собой разновидность технологии пассивации боковой стенки на основе тефлона. В этом процессе газы пассивации и травления подаются отдельно и попеременно в технологическую камеру и подложка травится в плазме высокой плотности в ходе циклов пассивации и травления. В каждом цикле пассивации тонкая тефлоновая пленка из частиц C_4F_8 осаждается на боковых стенках структур травления. В течение последующего цикла травления часть этой пленки удаляется с боковой стенки, защищенной от удара вертикальными ионами. В то же время дно траншеи свободно от фторуглеродного полимера и травится радикалами фтора, полученными из плазмы SF_6. Обычно переключение между шагами происходит в пределах от нескольких секунд до 1 минуты в зависимости от требуемой шероховатости боковой стенки [13], [14].

Bosch-процесс требует значительных концентраций пассивирующих радикалов и радикалов фтора для получения высоких скоростей травления. При этом давление в реакторе во время технологического процесса находится в пределах от 1 до 10 Па. Для Bosch-процесса необходим источник плазмы высокой плотности, например, источник индуктивно-связанной плазмы.

Для хорошего контроля ускорения ионов независимо от возбуждения плазмы ее потенциал должен быть низким, близким к нулевому потенциалу. Это необходимо для развязки зоны возбуждения плазмы и области подложки. Энергия потока ионов, бомбардирующих поверхность пластины, управляется независимо от возбуждения плазмы, с помощью напряжения смещения.

Для травления подложки использовалась установка плазмохимического травления ЭТНА 100-ПТ в НОЦ «Нанотехнологий» Самарского университета. Мощность источника плазмы составляла 300 Вт. Напряжение смещения на нижнем источнике было выставлено на отметке 80 В.

Этапы травления можно разделить на циклические и нециклические.

Первый этап является нециклическим и представляет собой «продувку» труб системы подачи газов. Во время этого этапа кислород O_2, октафторциклобутан C_4F_8 и аргон Ar подаются в камеру в течение 200 с при объемном расходе 99 $см^3/с$.

Второй этап также нецикличен. Во время него напускается рабочая атмосфера из аргона и кислорода. Скорость подачи аргона равна 30 $см^3/с$, кислорода – 50 $см^3/с$. Время напуска – 120 с.

Этапы 3 и 4 являются цикличными и представляют собой процессы пассивации и травления. На этапе пассивации в камеру подается смесь газов: SF_6 – 1 $см^3/с$, C_4F_8 – 99 $см^3/с$ и Ar – 35 $см^3/с$. Время подачи составляет 5 с. На этапе травления объемные расходы подаваемых газов равны: SF_6 – 45 $см^3/с$, C_4F_8 – 5 $см^3/с$, Ar – 5 $см^3/с$. Подача осуществляется в течение 4,5 с. На этапе травления также подается напряжение смещения.

Заключительный 5 этап вновь является нецикличным. Это этап окисления и продувки камеры от продуктов травления. В камеру на протяжении 30 с подаются кислород и аргон (расход каждого 20 $см^3/с$).

Первичное количество циклов было выбрано равным 20. После контроля толщины на интерферометре белого света была определена средняя скорость травления за цикл. Исходя из этого, выбиралось количество циклов в следующих этапах для приближения к требуемому значению глубины – 3,75 мкм. После каждого этапа также осуществлялся контроль высоты полученного микрорельефа на интерферометре.

В качестве отражающего материала была выбрана медь. Для ее нанесения также, как и для напыления алюминия, использовалась установка магнетронного распыления ЭТНА 100-МТ в НОЦ «Нанотехнологий» Самарского университета. Однако из-за плохой адгезии меди на кремнии сначала напылялась «подслойка» хрома толщиной около 10 нм. Толщина слоя меди составляла 300 нм. Для улучшения адгезии подложка нагревалась до температуры 150 °С.

В настоящее время существует довольно большое количество методов, позволяющих получать микрорельеф с близким к полутоновому профилем различной высоты и разрешения:

1) отбеливание фотоматериалов,
2) проявка полутонового фоторезиста,
3) вымывание задубленной желатины или материала «целлофот»,
4) использование массопереноса в полимерных средах,
5) лазерно-стимулированное травление,
6) травление полимерных материалов жестким УФ-излучением.

Однако универсального метода, позволяющего создавать непрерывный профиль микрорельефа со сложным рисунком на поверхности и высотой от долей до десятков микрон для разных областей спектра оптического диапазона, в настоящее время нет [15].

Наиболее известны и доступны способы получения непрерывного рельефа на желатиновых слоях. Особенность использования желатина в качестве рельефообразующего материала заключается в необходимости сильного задубливания его в тех местах, где рельеф должен иметь большую высоту, с последующим вымыванием в горячей воде менее задубленного слоя [16]. Существует, по крайней мере, три хорошо известных способа селективного задубливания желатина:

1) метод дубящего проявления,
2) дубящее отбеливание фотослоев с галогенидами серебра,
3) световое дубление бихромированного желатина.

Для достижения высоких пространственных частот (свыше 1000 мм$^{-1}$) при высотах рельефа порядка 0,1–0,3 мкм используются сложные способы проявления, включая термодубление и обработку в растворе серной кислоты [17]. Однако при высотах рельефа порядка нескольких микрон резко падает пространственное разрешение и вследствие разной задубленности при изготовлении пластинок максимально достижимая высота рельефа может отличаться в 2–3 раза [16].

Еще недавно широко использовался метод формирования микрорельефа с использованием бихромированного желатина (БХЖ). На начальном этапе освоения производства ДОЭ желатиновая технология дала определенные положительные результаты. Но относительно простой метод формирования микрорельефа на основе БХЖ не нашел широкого применения в производстве ДОЭ, главным образом, из-за шероховатости поверхности микрорельефа, снижающей его эффективность, которая не превышает 60 %, и ограниченной разрешающей способности, не позволяющей выполнять элементы с числовой апертурой выше 0,1 [15].

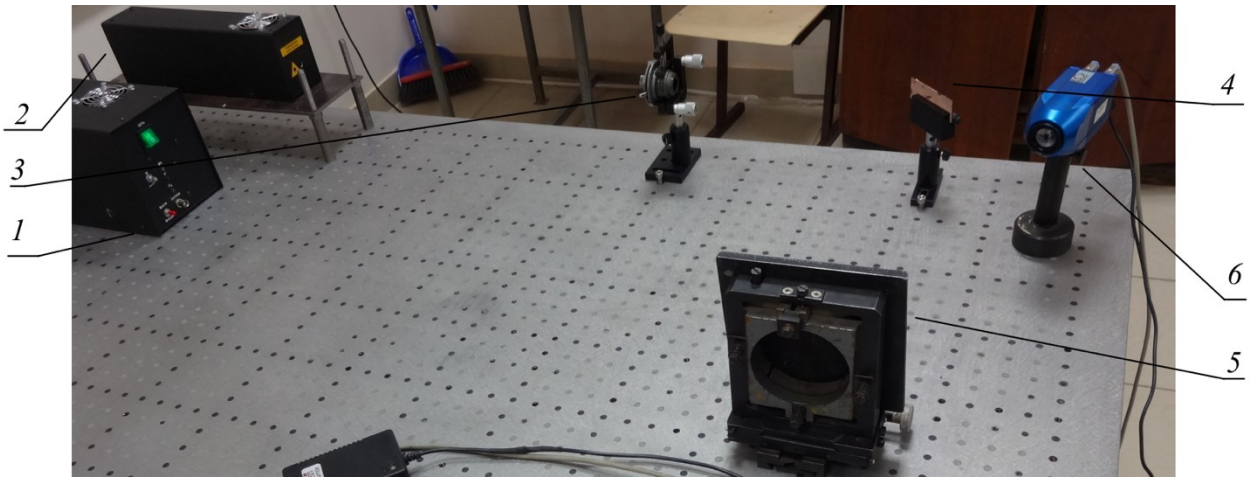
Светорассеяние присуще всем технологиям, основанным на вымывании полимерных материалов с различной степенью полимеризации или задубленности, что обусловлено интенсивным растворением материала в жидком проявляющем растворе. Поэтому изготовление качественных элементов представляет определенную трудность [17]. В данной работе исследуется отражающая линза Френеля с многоуровневым микрорельефом, изготовленным с помощью желатиновой технологии.

4 Экспериментальное исследование распределений интенсивности, формируемых дифракционными элементами различных апертур

Все диагностические системы, расчет которых приведен в п. 2, могут быть реализованы в лабораторных условиях. Настоящая глава посвящена описанию экспериментов с ДОЭ, выбранными в качестве исследуемых, процесс изготовления которых описан в п. 3.

4.1 Дифракционная решетка

Внешний вид диагностической системы для контроля параметров излучения, формируемого дифракционной решеткой, показан на рисунке 13.



1 – источник питания;

2 – излучатель;

3 – диафрагма;

4 – ДОЭ;

5 – экран;

6 – ИК-камера;

Рисунок 13 – Диагностическая система для контроля параметров излучения, сформированного дифракционной решеткой

Для регистрации распределения интенсивности сформированного пучка использовалось программное обеспечение X-Control, поставляемое с камерой XPORT-317. На рисунке 14 показано распределение интенсивности лазерного излучения, полученное после прохождения диафрагмы.

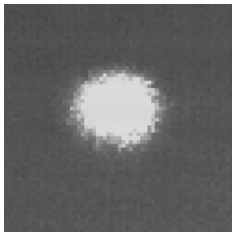


Рисунок 14 – Распределение интенсивности излучения после диафрагмы

Рисунок 15 иллюстрирует формирование делителем пучка на экране двух симметрично расположенных максимумов.

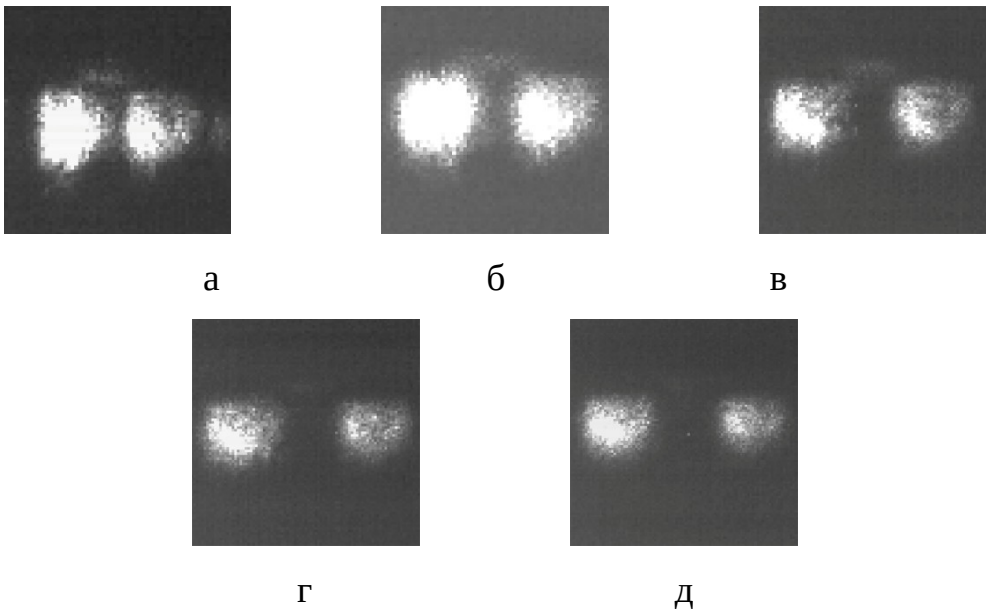
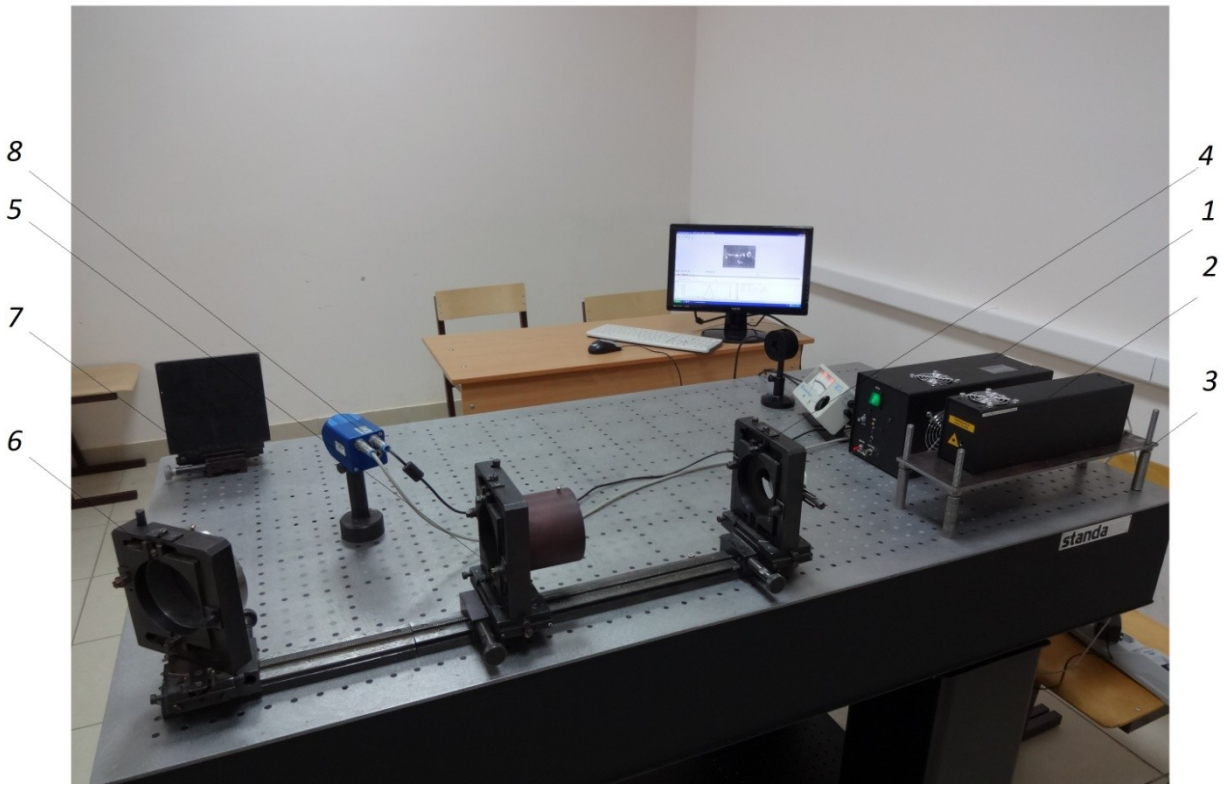


Рисунок 15 – Формирование максимумов на экране, расположенном от оси ДОЭ на расстояниях: а – 20 см, б – 30 см, в – 40 см, г – 50 см, д – 60 см

Видно, что расстояние между максимумами увеличивается с удалением экрана от ДОЭ. Расчетный угол расхождения выдержан.

4.2 Бинарная цилиндрическая линза

На рисунке 16 показана оптическая система для контроля параметров излучения, сформированного бинарной цилиндрической линзой.



1 – источник питания,

2 – излучатель,

3 – подставка под излучатель,

4, 5 – линзы коллиматора,

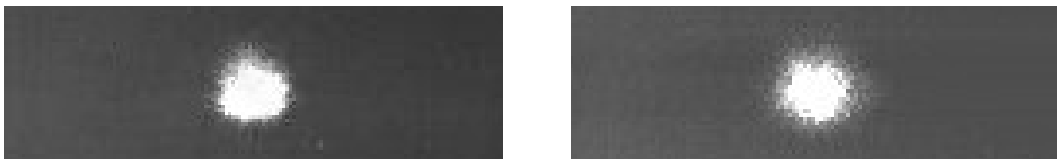
6 – ДОЭ,

7 – экран,

8 – ИК-камера

Рисунок 16 – Диагностическая система для контроля параметров излучения, сформированного бинарной цилиндрической линзой

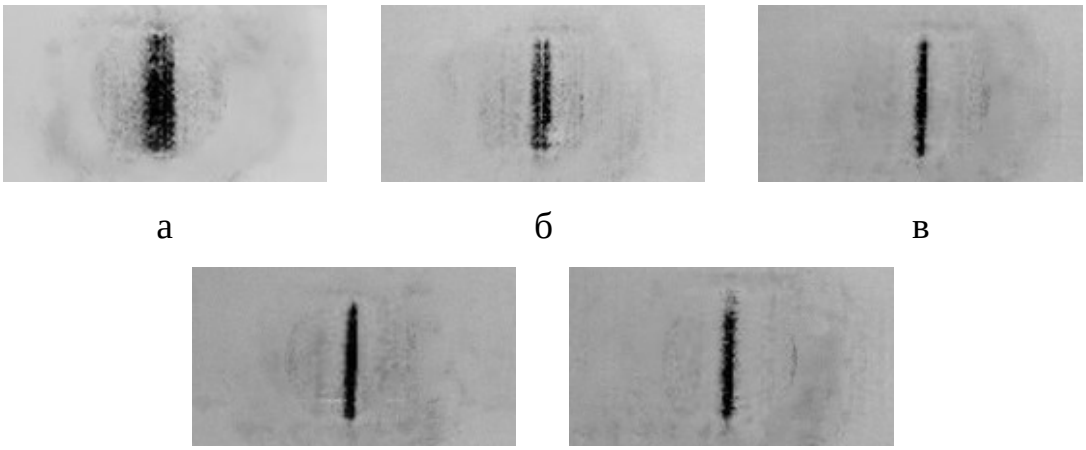
Диаметр лазерного пучка (рисунок 17) на выходе коллиматора составил 24 мм, что хорошо согласуется с расчетными значениями.



а б

Рисунок 17 – Вид коллимированного пучка на экране, расположенном на расстояниях от выходной линзы коллиматора: а – 150 мм, б – 600 мм

На рисунке 18 показаны распределения интенсивности (изображения инверсны), формируемые бинарной цилиндрической линзой в фокальной плоскости (60 см от ДОЭ) и нескольких компланарных плоскостях. Лучшее качество фокусировки достигается на расстоянии, соответствующем расчетному положению фокальной плоскости. Четкие контуры вертикальных отрезков сохраняются на расстояниях в диапазоне 40–80 см от ДОЭ.



а б в

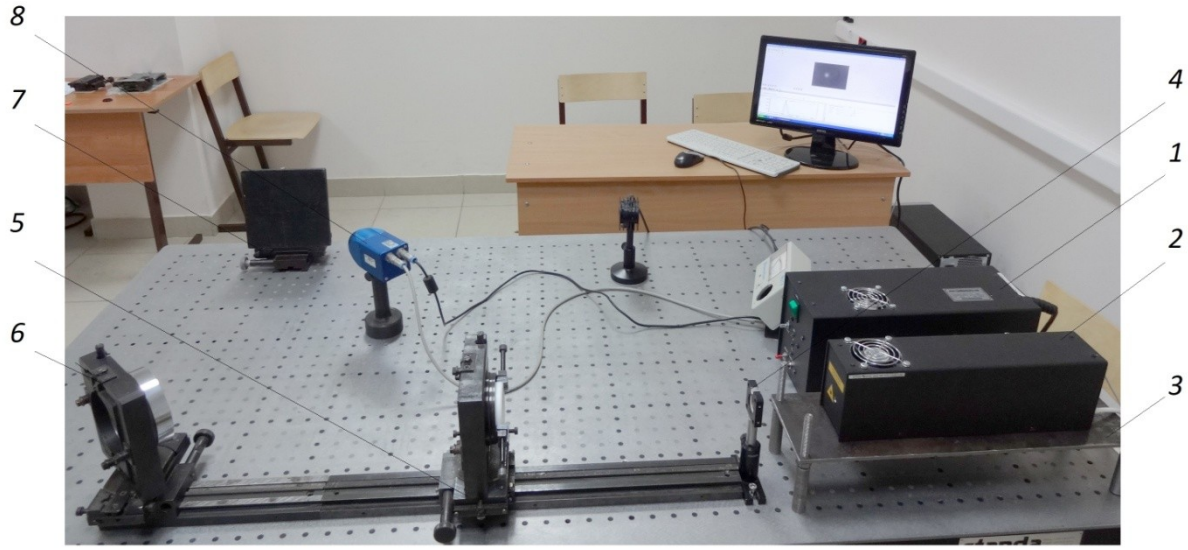
г д

Рисунок 18 – Распределения интенсивности излучения, преобразованного бинарной цилиндрической линзой, в плоскостях, расположенных на расстояниях от ДОЭ: а – 40 см, б – 50 см, в – 60 см, г – 70 см, д – 80 см

В целом, качество формирования пучка бинарной линзой достаточно высокое, глубина фокуса (расстояние, на котором отрезок сохраняет четкие контуры) составляет ±10 см от положения фокальной плоскости.

4.3 Линза Френеля

Имеющееся лабораторное оборудование также позволяет реализовать диагностическую систему для контроля параметров излучения, сформированного линзой Френля (рисунок 19).



1 – источник питания,

2 – излучатель,

3 – подставка под излучатель,

4, 5 – линзы коллиматора,

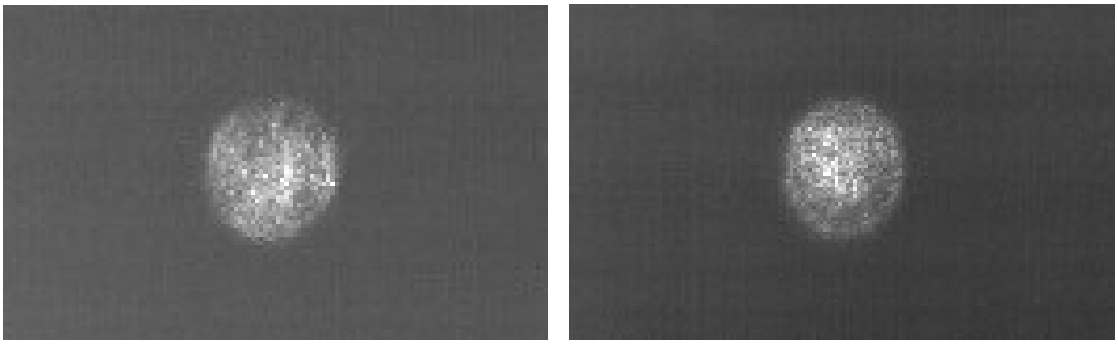
6 – линза Френеля,

7 – экран,

8 – ИК-камера

Рисунок 19 – Оптическая система для исследования характеристик излучения, сформированного линзой Френеля

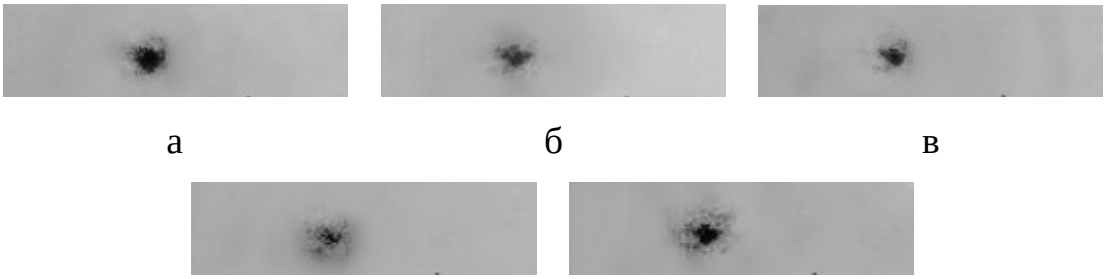
Контроль размеров пучка на выходе коллиматора выполнялся с помощью камеры XPORT-317, имеющей параметры, приведенные в п. 1. Диаметр одномодового пучка (рисунок 20) составил 40 мм, что существенно превышает расчетное значение этой величины данного расстояния между лазером и первой линзой коллиматора.



а б

Рисунок 20 – Вид коллимированного пучка на расстояниях от выходной линзы коллиматора: а – 150 мм, б – 500 мм

Рисунок 21 иллюстрирует формирование излучения линзой Френеля. В данном случае фокусировка происходит в круговую область. Области, занятые излучением, на снимках не имеют резких границ, что говорит о присутствии дефектов отражающего микрорельефа. Значительное размытие интенсивности имеет место и в пределах фокального пятна.



а б в

г д

Рисунок 21 - Распределения интенсивности излучения, преобразованного линзой Френеля, в плоскостях, расположенных на расстояниях от ДОЭ: а – 50 см, б – 60 см, в – 70 см, г – 80 см, д – 90 см

Диаметр пятна в фокальной плоскости составляет около 5 мм. Следовательно, микрорельеф характеризуется значительными отклонениями от расчетного профиля. Качество фокусировки излучения линзой Френеля можно оценить как невысокое.

Таким образом, эксперименты с дифракционной решеткой, бинарной цилиндрической линзой и линзой Френеля, выполненные с целью оценки качества работы этих элементов на основе регистрации распределений интенсивности в фокальных и компланарных плоскостях, показали пригодность реализованных диагностических систем для контроля параметров излучения, сформированного ДОЭ различных апертур. Созданные оптические системы позволяют проводить диагностику параметров пучка, формируемого дифракционными элементами, имеющими апертуру от 2 до 40 мм, исключая область от 10 до 20 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целях исследования функциональных возможностей ДОЭ различной апертуры как средства управления лазерным излучением определен состав диагностических систем, позволяющих регистрировать формируемое ими распределение интенсивности.

На основе положений дифракционной теории проведен расчет оптических систем, предлагаемых для контроля параметров ДОЭ, определены пределы регулирования размера освещающего пучка в безколлиматорной схеме и схемах, предусматривающих наличие коллиматора.

Диагностические системы, реализованные в лабораторных условиях, были протестированы на ДОЭ различных апертур. Эксперименты показали пригодность оптических систем для контроля параметров излучения, сформированного ДОЭ как малой апертуры, так и широкоапертурных.

Значимость работы заключается в ее прикладной направленности. Созданные оптические системы позволяют диагностировать параметры пучка, формируемого ДОЭ дальнего инфракрасного диапазона, имеющими апертуру от 2 до 40 мм, исключая область от 10 до 20 мм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Григорьянц, А.Г. Технологические процессы лазерной обработки [Текст]/А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.

2 Кононенко, В.В. Алмазная дифракционная оптика для мощных CO_2-лазеров [Текст]/В.В. Кононенко, В.И. Конов, С.М. Пименов, А.М. Прохоров, В.С. Павельев, В.А. Сойфер//Квантовая электроника. – 1999. – № 1. – С. 9-10.

3 Данилов, В.А. Оптические элементы, фокусирующие когерентное излучение в произвольную фокальную линию [Текст]/В.А. Данилов, В.В. Попов, А.М. Прохоров, Д.М. Сагателян, Е.В. Сисакян, И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер//Препринт № 69 ФИАН СССР. – М.:ФИАН СССР. – 1983. – С. 41.

4 Волков, А.В. Методы формирования микрорельефа для синтеза дифракционных оптических элементов [Текст]/А.В. Волков//Вестник СГТУ, Физ.-мат. науки, – 1999. – №7. – С. 127-140.

5 Сойфер, В.А. Дифракционная компьютерная оптика: учебник [Текст]/В.А. Сойфер. – М.: Физматлит. – 2007. – С. 736.

6 Мирошников, М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов [Текст]/М.М. Мирошников. 3-е изд. – СПб: Лань, 2010. – 704 с.

7 X-Control XPORT Version 0.5: User Manual [Text]. – Leuven: XenICs, 2006. – 28 p.

8 Методы компьютерной оптики: учебник [Текст]/Под ред. В.А. Сойфера. – М.: «Физматлит», 2003. – 688 с.

9 Заказнов, Н.П. Прикладная оптика [Текст]/Под ред. Н.П. Заказнова. 3-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», − 2009. – 320 с.

10 Заказнов, Н.П. Теория оптических систем [Текст]/Н.П. Заказнов, С.И. Кирюшин, В.Н. Кузичев. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение. − 1992. – 448 с.

11 Шмаков, М.В. Школа производства ГПИС. Очистка поверхности пластин и подложек [Текст]/М.В. Шмаков, В.М. Паршин, А.М. Смирнов// Технологии в электронной промышленности. – 2008. – № 5. – С. 77-78.

12 Pat. 5501893 A US, Int. Cl.6 C25F 3/12; B44C 1/22. Method of anisotropically etching silicon [Text]/Laermer F., Schilp A.; the applicant and the patentee Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Germany. – № 5,501,893; PCT Filed27.11.93; PCT Pub. Date 23.06.94, PCT Pub. № WO94/14187. – 6 p.

13 Запевалин, А.И. Обзор высоко-аспектных процессов травления кремния [Электронный ресурс]/А.И. Запевалин//Современная техника и технологии.– 2014. – № 6. – URL: http://technology.snauka.ru/2014/06/3970. (дата обращения: 10.02.2018).

14 Bhardwaj, J. Dry silicon etching for MEMS [Text]/J. Bhardwaj, H. Ashraf, A. McQuarrie//Presented at the The Symposium on Microstructures and Microfabricated Systems at the Annual Meeting of the Electrochemical Society, Montreal, Quebec, Canada, May 4-9, 1997. Surface Technology Systems Limited, 1997. – P.1–13.

15 Волков, А.В. Формирование микрорельефа дифракционных оптических элементов с использованием достижений микроэлектроники [Текст]/А.В. Волков, Р.В. Скиданов//Компьютерная оптика. – 2001. – Т. 63, № 22. – С. 65-71.

16 Бруй, Е.Б. Особенности использования тонких слоев фотоэмульсии ПЭ-2 для получения низкочастотных рельефных голографических структур [Текст]/Е.Б. Бруй, С.Н. Корешев//Оптика и спектроскопия. − 1989. − Т. 67, № 3. − С. 685-688.

17 Корешев, С.Н. О форме профиля низкочастотных голограммных структур, получаемых на тонких слоях фотоэмульсии ПЭ-2 [Текст]/С.Н. Корешев, Гиль С.В.//Оптика и спектроскопия. − 1990. − Т. 68, № 2. – С. 422.