

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра \_\_\_\_\_ Лазерных систем \_\_\_\_\_  
(полное название кафедры)

Утверждаю

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_

Мирошниченко И.Б.  
(подпись, инициалы, фамилия)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**

Чернова Анна Владимировна  
(фамилия, имя, отчество студента – автора работы)

Пространственный фильтр повышения качества лазерного пучка, используемого для  
(тема работы)

тестирования оптических элементов

Физико-технический факультет  
(полное название факультета)

Направление подготовки 12.03.05 Лазерная техника и лазерные технологии  
(код и наименование направления подготовки бакалавра)

**Руководитель  
от НГТУ**

Мирошниченко Илья Борисович  
(фамилия, имя, отчество)

к.ф.-м.н.  
(ученая степень, ученое звание)

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

**Руководитель  
от организации**

Бордзиловский Дмитрий  
Сергеевич  
(фамилия, имя, отчество)

Вед. инженер – конструктор  
(ученая степень, ученое звание)

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

**Автор выпускной  
квалификационной работы**

Чернова Анна Владимировна  
(фамилия, имя, отчество)

ФТФ ФЛ-61  
(факультет, группа)

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

Новосибирск 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Лазерных систем  
(полное название кафедры)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой Мирошниченко И.Б.  
(фамилия, имя, отчество)

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

**ЗАДАНИЕ  
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ БАКАЛАВРА**

студенту Черновой Анне Владимировне  
(фамилия, имя, отчество)

Направление подготовки 12.03.05 Лазерная техника и лазерные технологии  
(код и наименование направления подготовки бакалавра)

Физико-технический  
(полное название факультета)

Тема Пространственный фильтр повышения качества лазерного пучка,  
используемого для тестирования оптических элементов  
(полное название темы выпускной квалификационной работы бакалавра)

Исходные данные (или цель работы) создать рабочий макет пространственного  
фильтра повышения качества лазерного пучка, используемого для тестирования  
оптических элементов

Структурные части работы аннотация, введение, обзор литературы, схема  
установки, экспериментальные результаты и обсуждение, расчёт экономической  
эффективности выполненной работы, техника безопасности, выводы



## **Аннотация**

В данной дипломной работе представлена схема пространственного фильтра, используемого для тестирования оптических элементов, и её реализация. Описан способ определения диаметров малых отверстий диафрагм, рассчитанных теоретически с помощью размеров первого дифракционного минимума света на исследуемом отверстии. Вычисленные значения размеров исследуемых отверстий диафрагм являлись более точными по сравнению со значениями, полученными с помощью измерительной шкалы микроскопа. Также была определена роль диафрагмы для пространственной фильтрации, от качества изготовления которой зависит форма и качество полученного пучка на выходе. Параметры пучка на выходе из пространственного фильтра изменялись в зависимости от формы и диаметра диафрагмы.

## **Abstract**

This thesis diploma work the scheme of the spatial filter used for testing optical elements, and its implementation. A method for determining the diameters of small orifices of diaphragms, calculated theoretically using the dimensions of the first diffraction minimum of light on the studied orifice, is described. The calculated values of the sizes of the studied orifices diaphragm were more accurate in comparison with the values obtained using the measuring scale of the microscope. The role of the diaphragm for spatial filtration was also determined, the shape and quality of the resulting beam at the output depends on the quality of its manufacturing. The parameters of the beam at the output of the spatial filter changed depending on the shape and diameter of the diaphragm.

## Содержание

<b>Введение</b> .....	7
<b>1. Обзор литературы</b> .....	9
1.1. Бессвильность и пузырность .....	9
1.2. Пространственное преобразование Фурье.....	11
1.3. Принцип, положенный в основу пространственной фильтрации светового пучка .....	14
<b>2. Теоретическая часть</b> .....	16
2.1. Дифракция света.....	16
2.1.1. Дифракция Фраунгофера на круглом отверстии .....	17
2.2. Определение размера диафрагмы по дифракционной картине .....	23
2.3. Шлирен-метод, метод Тёплера .....	24
<b>3. Практическая часть</b> .....	26
3.1. Оптическая схема экспериментальной установки .....	26
3.2. Описание основных узлов и элементов установки .....	27
3.2.1. Лазерный излучатель.....	27
3.2.2. Объектив для фокусировки .....	28
3.2.3. Светофильтр.....	29
3.2.4. Комплект основных диафрагм .....	29
3.2.5. Выходная линза пространственного фильтра .....	31
3.2.6. Вспомогательная диафрагма.....	31
3.2.7. Нож Фуко .....	31
3.2.8. Регистрация распределения в пучке .....	31
3.3. Экспериментальные результаты и обсуждение .....	32
<b>4. Расчёт экономической эффективности выполненной работы</b> .....	43
<b>5. Техника безопасности</b> .....	44
<b>Заключение</b> .....	46
<b>Список литературы</b> .....	48

## Введение

В оптическом приборостроении как промышленном, так и научном, в том числе, в приборах, содержащих лазерные устройства, присутствуют оптические элементы. Перед их монтажом необходим этап контролирования качества оптических элементов, проверка параметров не только каждого из них, но и узлов, представляющих собой закрепленный в оправе одиночный оптический элемент, либо набор таких элементов.

Далеко не все производители контролируют качество изготавливаемых оптических элементов. Дефекты оптических элементов встречаются довольно часто, поэтому входной контроль изделий для разработчика/изготовителя лазеров необходим.

Целью дипломной работы является разработка и создание рабочего макета пространственного фильтра повышения качества лазерного пучка, используемого для тестирования оптических элементов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) изучить принцип пространственной фильтрации светового пучка;
- 2) исследовать влияние размера и положения диафрагмы на пространственные характеристики лазерного излучения;
- 3) создать комплект диафрагм разного диаметра для последующего их использования в установке с целью фильтрации лазерного луча и отсеивания всех гармоник, кроме первой;
- 4) реализовать несколько схем, позволяющих осуществлять проверку качества, как оптических заготовок, так и готовых компонентов для лазерной техники.

Актуальность данной дипломной работы обусловлена тем, что входной контроль качества оптических элементов можно проводить в помещении (стенах) лаборатории, тем самым экономя время и средства (деньги), так как не будет потребности обращаться в специально отведенные лаборатории, которых и так очень мало, а также не будет необходимости покупать дорогостоящее

оборудование, например, интерферометр Штарка-Хартмана, который может выделять подобные дефекты в оптических элементах.

Новизна работы носит технический характер и состоит в создании без привлечения высоких технологий простого и эффективного макета устройства тестирования оптических элементов.

Контролю подлежат как вещество, из которого сделан исследуемый элемент (качество оптического материала), так и его рабочие поверхности [1-3].

В первом случае речь идет об оптических неоднородностях внутри того или иного элемента (призма, линза, зеркало, подложка), возникающих еще на стадии производства оптических материалов (варка стекла, рост кристаллов), которые в последствии могут попасть в заготовки. К такого рода дефектам в стеклах относятся, в основном, свили, пузыри и камни. Во втором случае - под поверхностными дефектами – понимается, чаще всего, некачественная обработка поверхностей (шероховатость, трещины, сколы) и отклонение поверхности от заданной формы. Далее речь пойдет о работе с дефектами первой группы. Рассмотрим эти дефекты подробнее.



## 1. Обзор литературы

### 1.1. Бессвильность и пузырность

Свиль – включение в стекле, имеющее стекловидную структуру, которое по химическому составу и/или внешнему виду отличается от основного стекла.

Пузырь – полость в стекле различных размеров и формы.

Такие определения дает ГОСТ 32361-2013 «Стекло и изделия из него. Пороки. Термины и определения» [4].

Очевидно, что использование оптических элементов, изготовленных из материала со свиллями или с пузырями, приведет к многочисленным проблемам в лазерной технике, таким как: искажение хода лучей, что ухудшает качество оптического изображения, значительное снижение энергетических характеристик, появление рассеянного света в плоскости изображения и различные дефекты, возникающие при передаче изображения. Использование оптики с ярковыраженными вышеперечисленными дефектами недопустимо. Существуют специальные термины и нормы, которыми описываются оптические элементы. На рис. 1.1 представлен пример рабочего чертежа оптического элемента с таблицей, в которой сведены технические требования.

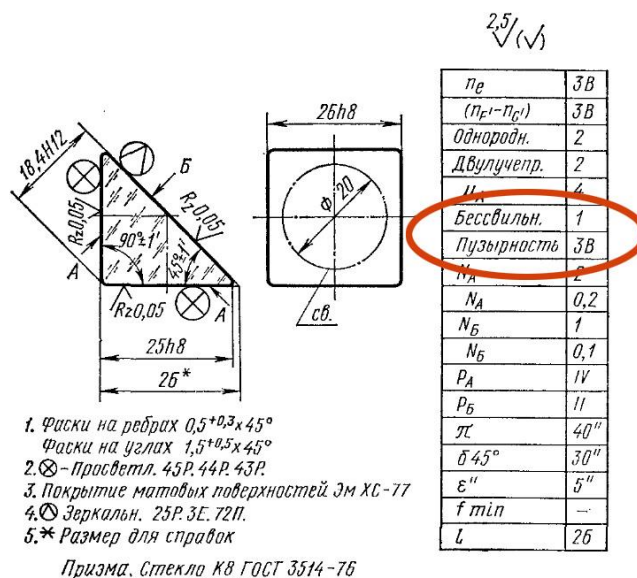


Рис. 1.1. Пример рабочего чертежа призмы.

Видим, что в таблице, приведенной в чертеже, присутствуют два параметра: бессвильность и пузырность. Эти параметры регламентированы многочисленными государственными стандартами. В качестве примера приведем

ГОСТ 3521-81 «Стекло оптическое. Метод определения бессвильности» [5], содержащий описание устройства для выявления свилей. Его оптическая схема представлена на рис. 1.2.

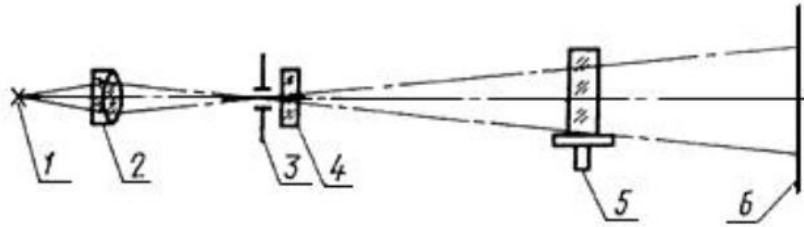


Рис. 1.2. Оптическая схема проекционной установки для определения бессвильности оптического элемента: 1 - источник излучения; 2 - конденсор; 3 - сменная диафрагма; 4 - светофильтр; 5 - держатель для исследуемого элемента; 6 - экран.

Образец освещается точечным источником света. Визуализация свилей осуществляется на экране. Исследуемый образец должен в идеале иметь плоские полированные грани. Поверхности произвольной формы, шлифованные или имеющие сколы, а также полированные, но неплоские (линзы), просматривают с применением иммерсионной жидкости, поместив элемент, например, в кювету. Образец стекла помещают полированными гранями перпендикулярно оси пучка. Если в стекле присутствуют свили, то на экране появится теневая картина, состоящая из ряда темных и светлых полос. Чтобы отличить свили от царапин и прочих поверхностных дефектов, нужно повернуть образец на некоторый угол, тогда тени царапин на экране будут перемещаться вместе с изображением поверхности образца [6].

Метод определения пузырьности оптического бесцветного стекла заключается в просмотре его на темном фоне при направленном боковом освещении, тогда пузыри вследствие рассеяния ими света будут хорошо видны. Оптическое цветное стекло просматривают в проходящем свете, при этом изображение пузырей проецируется на экран или сетчатку глаза.

Для определения пузырьности заготовок из бесцветного стекла с пузырями диаметром более 0,05 мм служит установка, представленная на рис. 1.3.

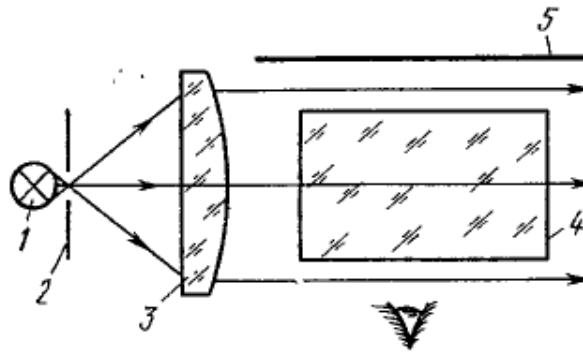


Рис. 1.3. Оптическая схема для контроля пузырьности: 1 - осветитель; 2 - щелевая диафрагма; 3 - конденсор; 4 - заготовка; 5 - темный экран.

Испытуемые образцы стекла в виде заготовок неправильной формы или линзы с полированными поверхностями перед исследованием погружают в кювету с иммерсионной жидкостью. Пузыри рассматривают на темном фоне.

Диаметр пузыря оценивают визуально, сравнением с пузырями контрольных образцов. При определении диаметра наибольшего пузыря просматриваемое стекло освещают пучком света так, чтобы его внутренняя часть была освещена через одну из боковых поверхностей. Поверхности, перпендикулярные освещенной, через которые ведется просмотр, по возможности следует оставлять в тени. Это достигается с помощью диафрагмы, регулирующей диаметр сечения пучка, выходящего из конденсатора.

## 1.2. Пространственное преобразование Фурье

Практически для любой функции – периодической или непериодической – существует свой уникальный, называемый её Фурье-образом, набор тригонометрических функций, таких, как синус и косинус, с определенными значениями периодов, амплитуд и фаз [7, 8]. Особенность этого набора такова, что, в результате алгебраического сложения всех входящих в его состав функций, получается исходная функция. Операция, позволяющая представить функцию или даже дискретный набор данных в виде комбинации гармоник (разложить на гармоники), называется преобразованием Фурье. Это преобразование позволяет выделить в исследуемой функции характерные периодические компоненты, оценить величину вклада каждой из гармоник в общую картину и определить, какие из гармоник могут быть отброшены без существенного искажения

результатов анализа или последующего изучения описываемого ей процесса. В частности, Фурье-анализ временных характеристик исследуемых процессов позволяет определить граничные частоты для соответствующего канала передачи данных. Пример разложения сложного сигнала по гармоникам представлен на рис. 1.4.

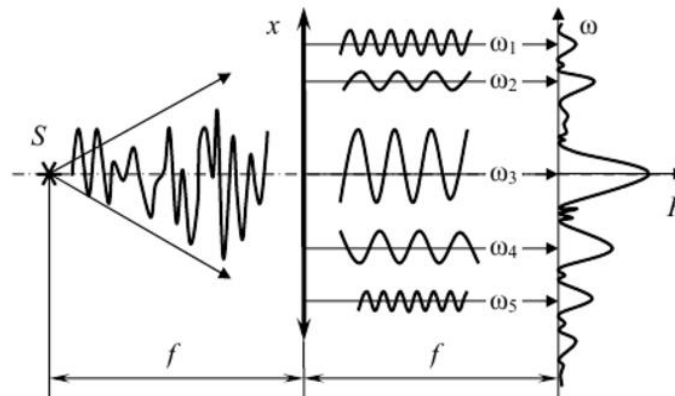


Рис. 1.4. Разложение сложного сигнала по пространственным гармоникам.

Соответственно, к Фурье-образу, являющемуся аналитической функцией, также может быть применено преобразование Фурье. В итоге такого - обратного - преобразования будет получена исходная функция. Если же из Фурье-образа исключить одну или несколько гармонических составляющих, полученная при обратном преобразовании функция будет отличаться от исходной. Такая процедура называется Фурье-фильтрацией.

Плоские полутонные изображения могут быть описаны математически как функции двух переменных – пространственных координат. Эти функции также могут быть подвергнуты преобразованию Фурье. В этом случае компоненты такого двумерного преобразования называют пространственными частотами. Помимо математического существует оптический метод пространственного преобразования Фурье. Рассмотрим его суть на простом примере. Пусть полутонное изображение представляет собой нанесенную на прозрачную подложку плоскую регулярную решетку, у которой оптическая плотность параллельных ориентированных вертикально штрихов меняется по синусоидальному закону, а расстояние между соседними штрихами (постоянная решетки) сравнимо с длинами волн оптического диапазона (синусоидальная

дифракционная решетка). Коллимированный монохроматический когерентный пучок (лазерный пучок), пройдя сквозь решетку, разделится вследствие дифракции на три коллимированных пучка. Основной, непродифрагировавший, не отклонится - распространится в направлении падающего пучка, а два дополнительных пучка симметрично отклонятся от основного вправо и влево – это будут пучки плюс и минус первого порядка дифракции. Если профиль оптической плотности штрихов решетки сделать отличным от синусоидального, в дифракционной картине появятся дополнительные пучки высших порядков:  $\pm 2$ ,  $\pm 3$ ,  $\pm 4$  и т.д. Максимальная доля световой мощности придется на основной пучок, яркость пучков высших порядков будет снижаться, а угол отклонения пучка от оптической оси увеличиваться с ростом номера порядка. Общее число пучков определится максимальной пространственной частотой функции, описывающей профиль оптической плотности штрихов решетки, мощностью падающего пучка и видностью дифракционной картины. Два последних фактора могут привести на практике к снижению числа наблюдаемых пучков по сравнению с теоретически возможным.

Дифракционная картина локализуется на бесконечности. Поместив за дифракционной решеткой объектив (положительную линзу) 1, Рис. 1.5, мы получим в его фокальной плоскости сфокусированные изображения пучков, которые можно наблюдать, установив в этой плоскости экран 2. Размеры сфокусированных пятен (точек) определяются aberrациями объектива. В случае синусоидальной решетки на экране будут присутствовать три пятна, одно, от основного пучка – на оптической оси и два других ( $\pm$  первого порядка) - симметрично на линии, проходящей через ось перпендикулярно направлению штрихов решетки. Схема прямого и обратного преобразования Фурье представлена на рис. 1.5.

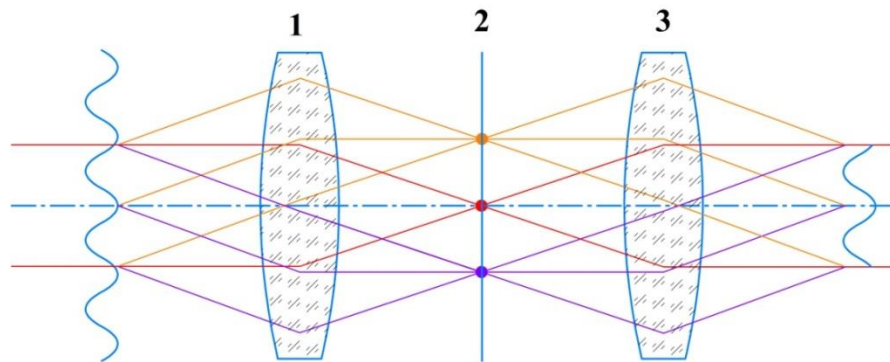


Рис. 1.5. Прямое и обратное преобразование Фурье.

Если длина волны исходного пучка и фокусное расстояние объектива не меняются, то расстояние пятен первого порядка дифракции от оси будет зависеть только от постоянной решетки. Чем меньше постоянная решетки (или, что то же самое, чем выше соответствующая ей пространственная частота), тем больше будет расстояние дифракционных максимумов от центрального максимума (от оптической оси системы). Фокальная плоскость, таким образом, становится плоскостью пространственных частот.

### 1.3. Принцип, положенный в основу пространственной фильтрации светового пучка

Заменив в изложенном выше описании простую синусоидальную решетку сложным двумерным полутоновым изображением (можно взять фотографический слайд), мы сможем на экране, помещенном в фокальной плоскости объектива, наблюдать соответствующую пространственно-частотную картину, в которой будет присутствовать центральный максимум («нулевая» пространственная частота), окруженный ореолом из высших частот [9, 10]. Многомодовый лазерный пучок, характеризуемый как пучок низкого качества, в любом своем поперечном сечении также представляет собой сложное полутоновое изображение. Подвергнув его преобразованию Фурье и проанализировав картину полученных пространственных частот, можно заменить сплошной экран круговой диафрагмой 2, диаметр отверстия которой подбирают в соответствии с размером центрального максимума. На рис. 1.6 представлена оптическая схема прямого и обратного преобразования Фурье с фильтрацией.

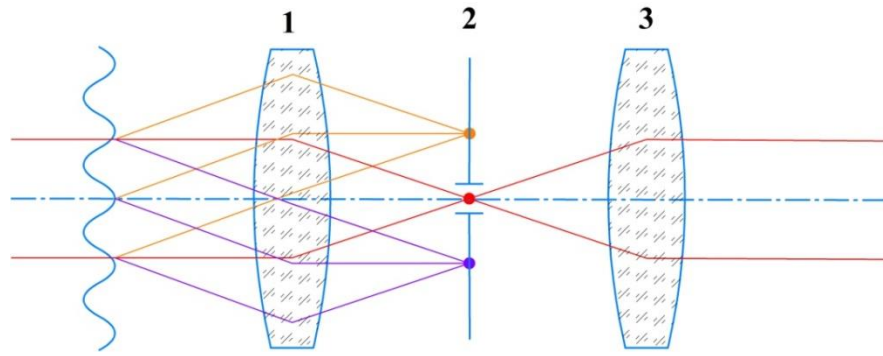


Рис. 1.6. Прямое и обратное преобразование Фурье с фильтрацией.

Диафрагму 2 устанавливают в фокальной плоскости объектива, с максимально достижимой точностью совмещая ее отверстие с центральным максимумом. В этом случае излучение, соответствующее пространственным частотам первого и высших порядков, поглощается, а излучение нулевого порядка беспрепятственно распространяется далее вдоль оси. Его подвергают обратному преобразованию Фурье: установив за диафрагмой второй объектив или линзу и совместив его передний фокус с плоскостью диафрагмы, получают коллимированный отфильтрованный пучок с распределением интенсивности по сечению, близким к гауссову, т.е., пучок высокого качества.

## 2. Теоретическая часть

### 2.1. Дифракция света

Если на пути светового пучка возникает препятствие, то происходит дифракция света.

Дифракция света - это явление перераспределения его интенсивности в пространстве, которое наблюдается после прохождения пучка света вблизи краев непрозрачного или прозрачного препятствия (оптической неоднородности) при условии, что оптические свойства (показатель преломления и коэффициент поглощения) среды и препятствия различаются значительно. Дифракция наблюдается как в проходящем край препятствия свете, так и в свете, отраженном от него [11].

Перечислим некоторые закономерности дифракции света:

1) Дифракция обусловлена волновой природой света и происходит на краях оптических неоднородностей, линейные размеры  $d$  которых больше длины волны света  $\lambda$ :  $d > \lambda$ ;

2) Длина волны света, как и его частота, при дифракции не изменяется;

3) Характер перераспределения интенсивности света (дифракционная картина) не зависит от физико-оптических свойств неоднородности (в частности, от показателя преломления  $n$ ), но зависит от соотношения между размерами области оптической неоднородности  $d$ , длиной волны  $\lambda$  и расстоянием  $L$  от области неоднородности до точки наблюдения при соблюдении условий  $\lambda < d \ll L$ .

Различают два вида дифракции света:

1. Дифракция Френеля или дифракция в сходящихся лучах, когда на препятствие падает плоская или сферическая волна, и дифракционная картина наблюдается на экране, находящемся на конечном расстоянии от него.

2. Дифракция Фраунгофера или дифракция в параллельных лучах, когда на препятствие падает плоская волна, и дифракционная картина наблюдается на большом расстоянии от препятствия, таком, что волновой фронт, приходящий в точку наблюдения, уже плоский.



Принципиально дифракция Фраунгофера не отличается от дифракции Френеля. Количественный критерий, позволяющий установить, какой вид дифракции имеет место, определяется величиной безразмерного параметра  $\frac{d^2}{\lambda L}$ .

При этом:

- если -  $\frac{d^2}{\lambda L} \ll 1$ , наблюдается дифракция Фраунгофера;
- если -  $\frac{d^2}{\lambda L} \approx 1$ , наблюдается дифракция Френеля;
- если -  $\frac{d^2}{\lambda L} \gg 1$ , наблюдается распределение интенсивности в

соответствии с законами геометрической оптики.

### **2.1.1. Дифракция Фраунгофера на круглом отверстии**

Дифракция Фраунгофера на круглом отверстии имеет большое практическое значение, поскольку оправы и диафрагмы большинства оптических приборов круглой формы. Наблюдается в том случае, когда источник света и точка наблюдения бесконечно удалены от препятствия, вызвавшего дифракцию.

Дифракция Фраунгофера на круглом отверстии также лежит в основе работы пространственного фильтра. Рассмотрим подробнее этот вид дифракции.

Дифракция Фраунгофера – дифракции в параллельных лучах имеет место в том случае, когда на отверстие падает плоская волна (параллельный пучок света), а дифракционная картина наблюдается достаточно далеко от преграды с отверстием, (почти в параллельных лучах, в «бесконечности»). Параллельный пучок от источника и наблюдение дифракционной картины на «бесконечности» обеспечивается системой линз. На рис. 2.1 проиллюстрировано явление дифракции Фраунгофера на круглом отверстии.

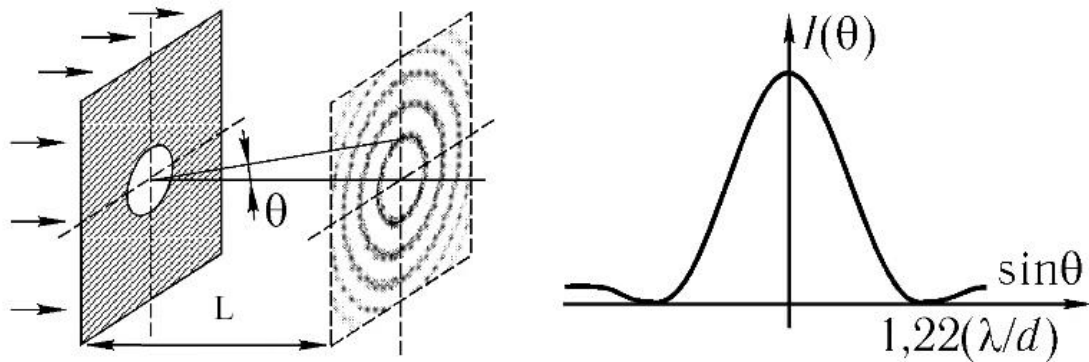


Рис. 2.1. Дифракция Фраунгофера на круглом отверстии.

Согласно принципу Гюйгенса-Френеля результирующая амплитуда  $E(P)$  колебаний вектора напряженности электрического поля электромагнитной волны в точке наблюдения  $P$  равна сумме амплитуд однонаправленных колебаний (когерентные волны), возбуждаемых в точке  $P$  всеми вторичными источниками, которые находятся на выбранной волновой поверхности (2.1):

$$E(P) = \int dE(P), \quad (2.1)$$

где  $dE(P)$  – амплитуда колебаний вторичных волн, приходящих в точку  $P$  с одного элементарного участка волновой поверхности площадью  $dS$  (от одного вторичного точечного источника  $Q$ ). Чтобы получить ожидаемый результат при интегрировании, надо учесть соотношение между амплитудами и фазами вторичных волн в точке  $P$ . Будем считать, что свет монохроматический,  $\omega = \text{const}$ , а по предположению Френеля  $dE(P)$  – пропорциональна площади элементарного участка  $dS$  и амплитуде действительной волны  $E_0(Q)$  в точках  $Q$  выбранной волновой поверхности. Учитывая, что амплитуда вторичных сферических волн уменьшается как  $1/r$ , где  $r$  – расстояние от элементарного участка  $Q$  до точки  $P$ , а разность фаз, которую приобретают вторичные волны, проходя путь от разных точек волновой поверхности  $Q$  к точке  $P$ , равна  $(\vec{k} \cdot \vec{r})$  ( $\vec{k} = k \vec{n} = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{n}$  – волновой вектор, где  $k$  – волновое число,  $\vec{n}$  – единичный вектор), для результирующего колебания в точке  $P$  получим следующую формулу (2.2):

$$E(P) = \int dE(P) = C \int E_0 \frac{e^{-i\vec{k} \cdot \vec{r}}}{r} dS, \quad (2.2)$$

где  $C$  – постоянная или слабо изменяющаяся величина, зависящая от взаимного расположения объекта дифракции и экрана для наблюдения дифракционной картины.

Приближения, используемые при расчете интенсивности света в точках регистрации дифракционной картины при дифракции Фраунгофера на круглом отверстии:

а) на отверстие диаметром  $d$  падает плоская волна (параллельный пучок света), т.е. амплитуда действительной волны и вторичных волн в точках волновой поверхности  $E_0(Q)$ , совпадающей с плоскостью отверстия, – величина постоянная;

б) длина волны  $\lambda$  много меньше диаметра отверстия  $d$ , а расстояние  $L$  от отверстия до наблюдаемой дифракционной картины велико по сравнению с диаметром отверстия  $d$  (дифракция в параллельных лучах):  $\lambda \ll d \ll L$ ;

с) точки наблюдения  $P$  находятся вблизи осевой линии отверстие – экран, на котором наблюдается картина («приближение малых углов дифракции»).

Прошедшая часть волны, дифрагировавшая на краях диафрагмы, подвергается обратному преобразованию Фурье, осуществляемому линзой. В нашем случае мы имеем дифракцию Фраунгофера. Рассмотрим случай плоской волны, падающей на круглое отверстие. Распределение описывается следующим образом:

$$I(r) = I_0 \left[ \frac{2J_1(\chi)}{\chi} \right]^2, \quad (2.3)$$

где  $I_0$  – интенсивность в центре дифракционной картины,  $J_1$  – функция Бесселя первого рода порядка 1,  $\chi = \left( \frac{\pi d}{\lambda} \right) \sin \theta$ ,  $d$  – диаметр отверстия (мкм),  $\lambda$  – длина волны (мкм),  $\theta$  – угол дифракции,  $\sin \theta = \frac{r}{L}$ ,  $L$  – расстояние до экрана (мм),  $r$  – расстояние от центра наблюдаемой картины до светлых или темных колец. На рис. 2.2 приведена фотография распределения интенсивности света при наблюдении дифракции Фраунгофер на круглом отверстии.

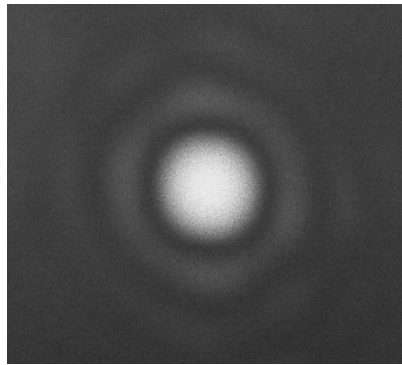


Рис. 2.2. Картина дифракции Фраунгофера на круглом отверстии.

Приняв  $\lambda=0,532$  мкм,  $d=17,5$  мкм,  $L=600$  мм, можно рассчитать зависимость распределения интенсивности на экране от радиуса  $r$ , график которой представлен на рис. 2.3.

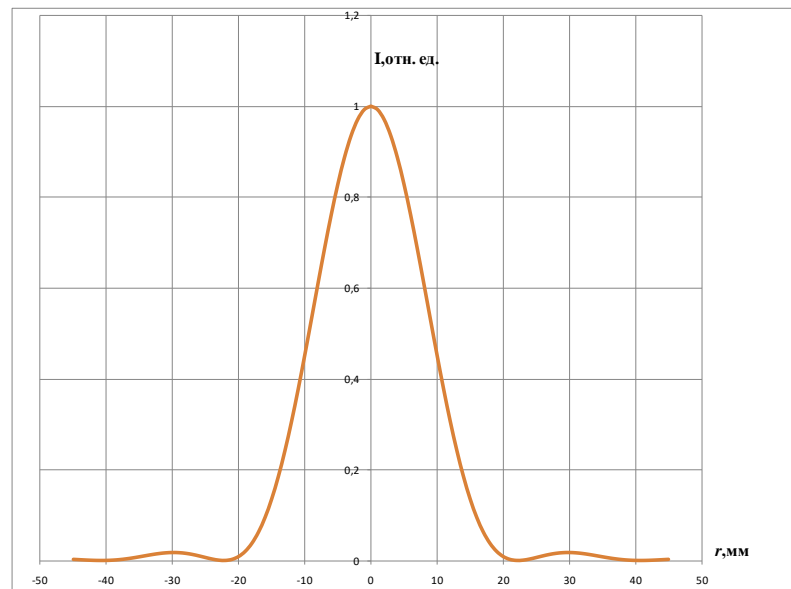


Рис. 2.3. Распределение интенсивности света в дальней зоне для случая дифракции Фраунгофера на круглом отверстии (теоретическая зависимость).

Из графика видно, что основная часть светового потока сосредоточена в центральном максимуме интенсивности, малая часть будет распространяться в пределах первых и высших максимумов, быстро спадая по интенсивности.

Рабочей основой является центральный максимум, второй и последующие максимумы нас не интересуют. Проанализируем центральный максимум. Далее мы будем использовать данные, полученные мной практически, про способы получения распределений и про способы обработки информации будет сказано ниже в практической части работы. На рис. 2.4 представлена фотография

центрального максимума и распределение интенсивности света в диаметральных сечениях, полученные в результате обработки.

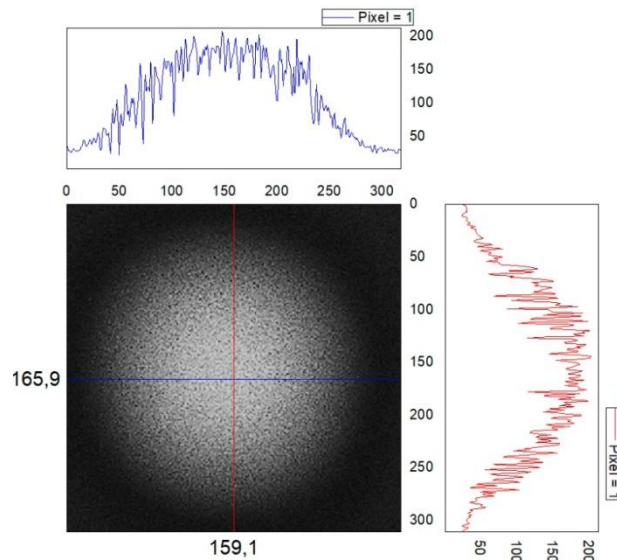


Рис. 2.4. Фотография распределения света в центральном максимуме при дифракции на одиночном отверстии и графические зависимости интенсивности для двух взаимно перпендикулярных диаметральных сечений, полученные в результате обработки.

При рассеянии лазерного излучения от шероховатой поверхности (например, от листа бумаги, стены) можно наблюдать так называемую спекл-картину. Рассеянный от такой поверхности свет состоит из хаотического скопления ярких и темных пятен - спеклов. Спекл - это мелкая пятнистая структура в распределении интенсивности в пятне от пучка когерентного света, падающего на шероховатую поверхность, возникающая в результате взаимной интерференции когерентных лучей [12]. Это явление обусловлено интерференцией вторичных волн от хаотически расположенных элементарных участков поверхности и наблюдается лишь при высокой пространственной когерентности падающего излучения. Формирование спекла часто представляет собой нежелательное явление, например, в голографии и когерентных оптических системах передачи информации, где оно ограничивает пространственное разрешение голограмм и приводит к возникновению так называемого модового шума [13].

От спекла можно избавиться, сгладив данные, как показано на рис. 2.5.

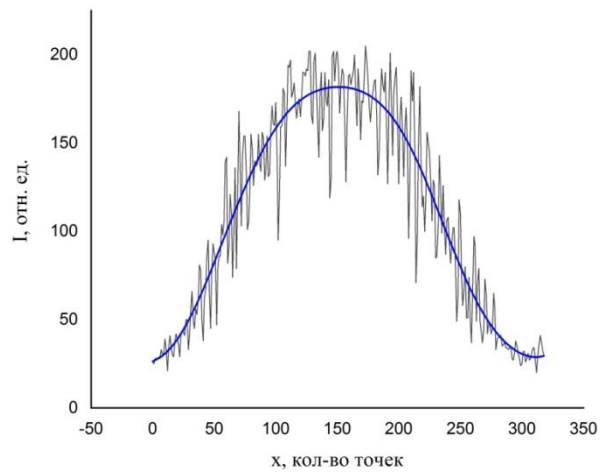


Рис. 2.5. Результат сглаживания данных.

Сделав нормировку распределения интенсивности, можно построить теоретическую зависимость и практически полученные данные на одном графике, сравнив их (рис. 2.6).

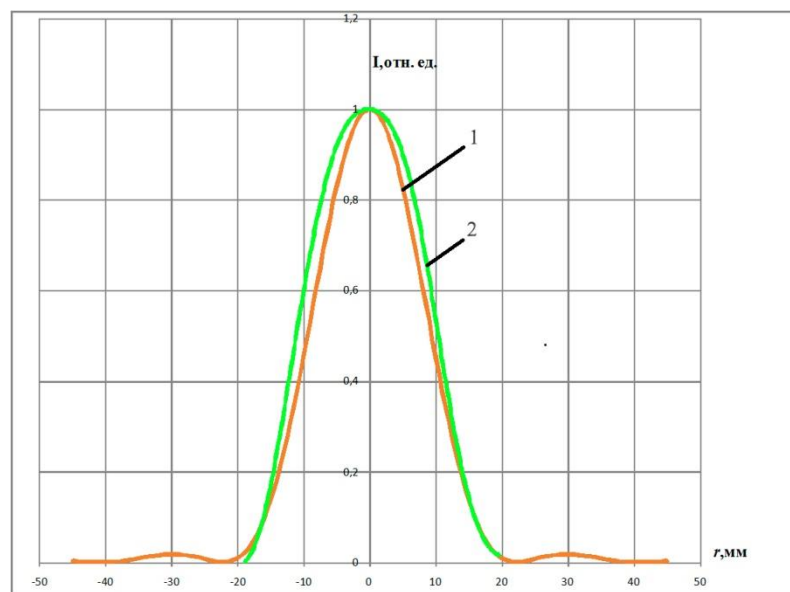


Рис. 2.6. Распределение интенсивности по диаметральному сечению светового пучка: теоретическая зависимость (1) и практически полученные данные (2).

Видим, что графики достаточно хорошо совпали друг с другом. Исходя из этого, можно сделать вывод, что уместно регистрировать распределение фотографическим способом, а также использовать алгоритм сглаживания программы OriginPro, чтобы избавиться от спекла на фотографии [14].

## 2.2. Определение размера диафрагмы по дифракционной картине

Очень часто необходимо знать точный размер отверстия диафрагмы круглой формы. Один из практических методов, которым мы пользовались, это определение диаметра отверстия при помощи микроскопа. Поместив диафрагму под микроскоп и подсветив её снизу, получаем четкое изображение отверстия. При помощи измерительной шкалы с известной ценой деления можно оценить размер отверстия диафрагмы, но определить размер отверстия было затруднительно. Например, между двумя соседними делениями нашего микроскопа 13,6 мкм, а следовало измерить отверстие диафрагмы диаметром 16-18 мкм. Ошибка измерения была велика из-за низкой разрешающей способности прибора, поэтому было решено измерить диаметр первого темного кольца (дифракционный минимум). Сфотографировать и измерить дифракционную картину на экране можно достаточно точно, используя линейку. На рис. 2.7 представлена фотография распределения интенсивности света при наблюдении дифракции Фраунгофера на круглом отверстии с указанным диаметром первого дифракционного минимума.

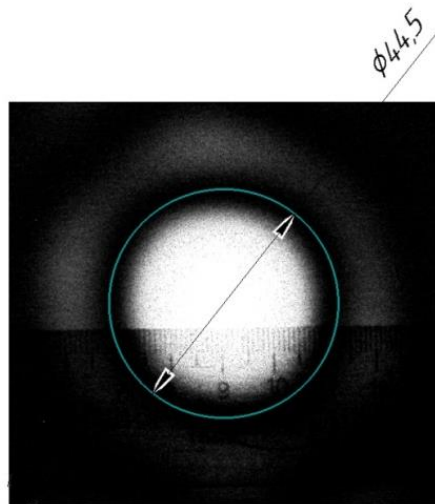


Рис. 2.7. Размер диаметра первого дифракционного минимума.

Из рис. 2.7 видно, что диаметр первого дифракционного минимума составляет 44,5 мм.

Воспользуемся следующей упрощенной формулой из [11] для определения диаметра диафрагмы:

$$\sin \theta = 1,22 \left( \frac{\lambda}{d} \right), \quad (2.4)$$

где  $\sin \theta = \frac{L}{R}$ ,  $R$  - радиус темного кольца. Подставив  $\lambda = 0,532$  мкм,  $R = D/2 = 22,25$  мм,  $L = 600$  мм, получаем значение диаметра диафрагмы  $d = 17,5$  мкм.

Формула (2.4) является частным случаем формулы (2.3) для первого дифракционного минимума. Рассчитанное значение является более точным, чем значение, полученное с помощью измерительной шкалы микроскопа.

### 2.3. Шлирен-метод, метод Тёплера

Для определения контроля качества заготовок используют теневые методы.

Теневой метод или Шлирен-метод (метод Тёплера) – метод обнаружения оптических неоднородностей в прозрачных преломляющих средах и дефектов отражающих поверхностей [15]. Применяется для нахождения так называемых свилей в оптически прозрачных материалах, для исследования качества зеркал и других оптических деталей.

Шлирен-метод предложен немецким учёным А. Тёплером в 1867 г.

Данный метод реализуется с помощью установки, схема которой представлена на рис. 2.8.

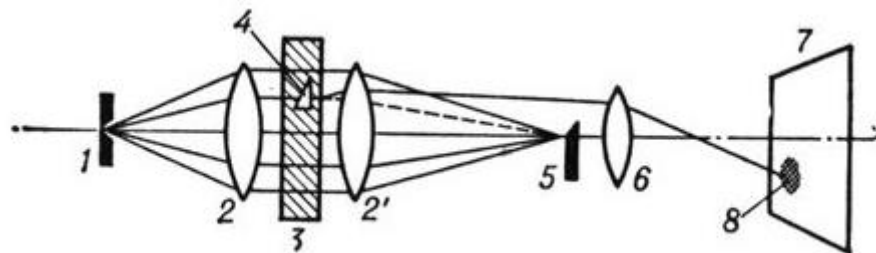


Рис. 2.8. Оптическая схема теневой установки.

Пучок лучей от точечного или щелевого источника света 1 линзой или системой линз 2—2' направляется через исследуемый объект 3 и фокусируется на пластинке 5, так называемом ноже Фуко, с острым прямолинейным краем так, что изображение источника проектируется на край рабочей кромки ножа. Если в исследуемом объекте нет оптических неоднородностей, то все лучи задерживаются пластинкой 5. При наличии оптической неоднородности 4 лучи будут рассеиваться ею и часть их, отклонившись, пройдёт мимо края пластинки.



Поместив за пластинкой 5 проекционный объектив 6, можно спроектировать на экране 7 эти лучи и получить изображение 8 неоднородностей, внесших искажения в пучок. Наличие оптических неоднородностей можно наблюдать на экране визуально, либо регистрировать с помощью фотопленки, цифровой или веб-камеры.

### 3. Практическая часть

#### 3.1. Оптическая схема экспериментальной установки

Рабочая модель пространственного фильтра была собрана на оптическом столе. Оптическая схема экспериментальной установки приведена на рис. 3.1.

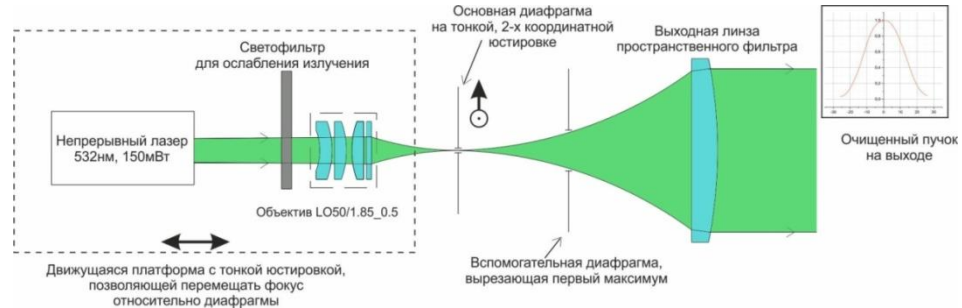


Рис. 3.1. Оптическая схема пространственного фильтра.

Данная схема является базовой, позволяющей получить на выходе лазерный пучок высокого качества. Также были реализованы несколько схем, позволяющих осуществлять проверку качества, как оптических заготовок, так и готовых компонентов для лазерной техники. А именно:

- схема, позволяющая проверить образцы на наличие свилей (рис. 3.2);

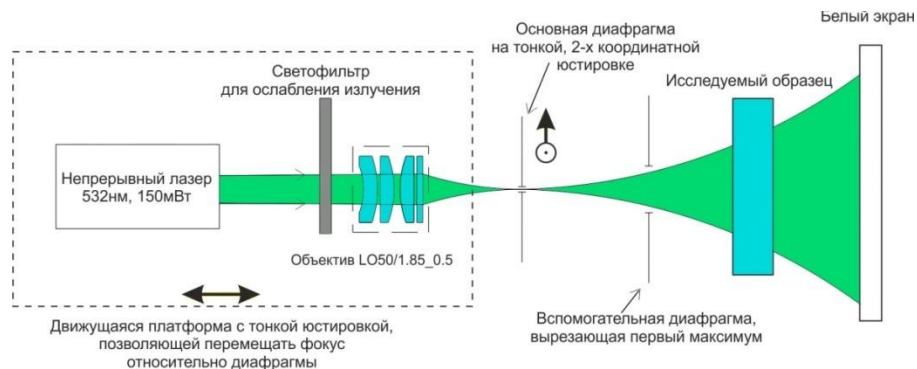


Рис. 3.2. Оптическая схема для проверки исследуемых образцов.

- схема, позволяющая менять диаметр лазерного пучка, используемого для проверки качества изделий после вклейки оптических элементов в оправу, а также для выявления пузырности и клиновидности оптических элементов (рис. 3.3, а, б);

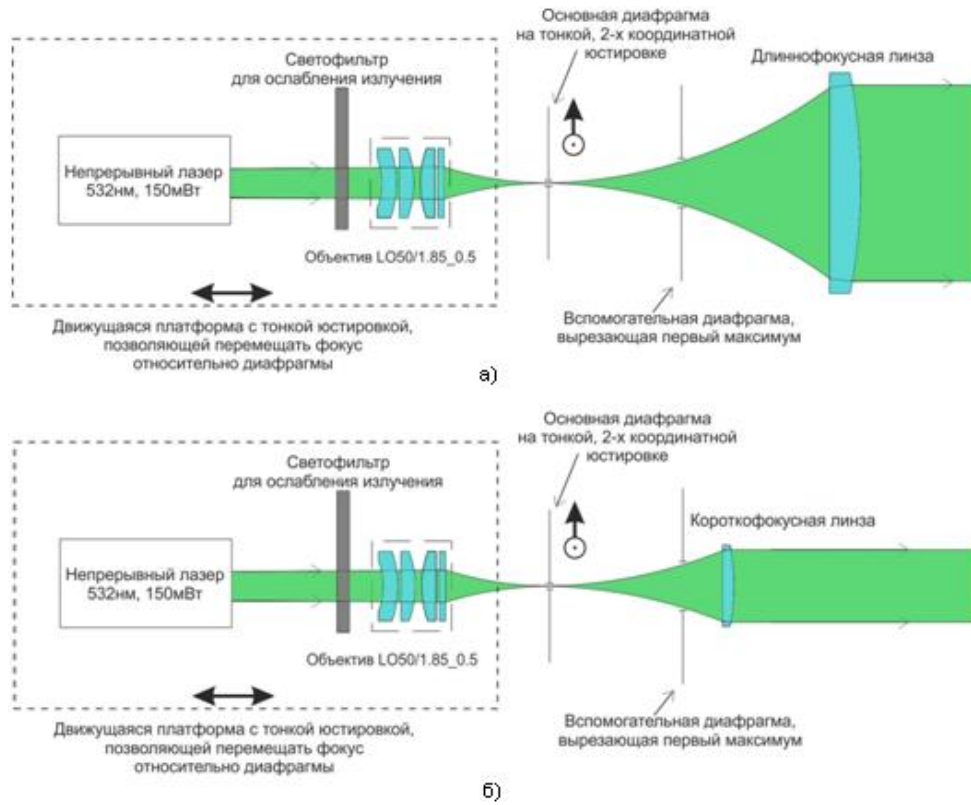


Рис. 3.3. Оптическая схема с использованием длиннофокусной (а) и короткофокусной (б) линз.

- схема с использованием теневого метода (Шлирен-метода), с помощью которой оптические элементы проверяются на наличие дефектов, а также осуществляется визуализация различных процессов в газовой и жидкой средах (рис. 3.4).

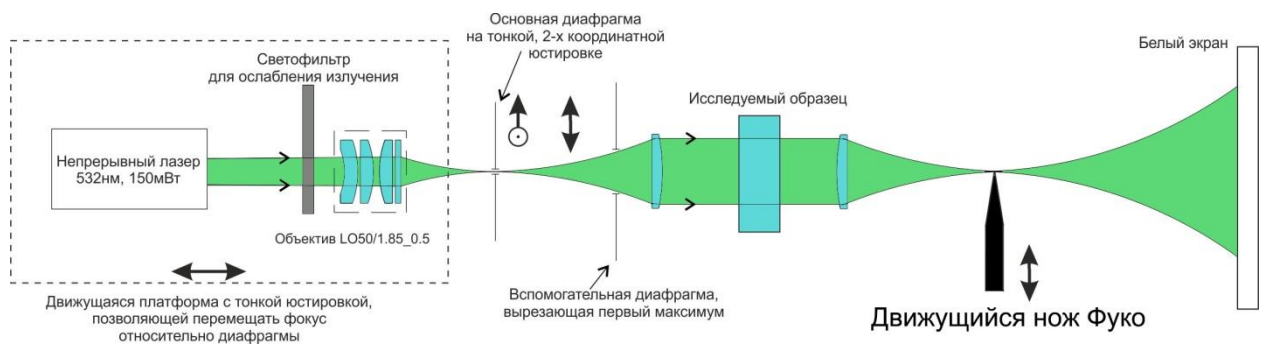


Рис. 3.4. Оптическая схема теневого метода (Шлирен-метода).

## 3.2. Описание основных узлов и элементов установки

### 3.2.1. Лазерный излучатель

В качестве источника света был взят непрерывный лазер с длиной волны 532 нм, мощностью около 150 мВт. Использовался лазер китайского

производства, приобретенный за 30 долларов, его изображение и основные характеристики представлены на рис. 3.5.

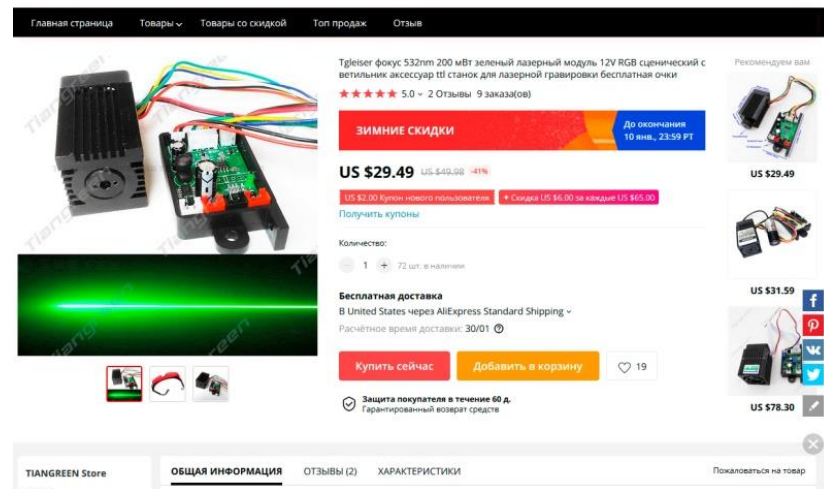


Рис. 3.5. Лазерный излучатель.

Модовый состав излучения данного лазерного модуля представлен на рис. 3.6.

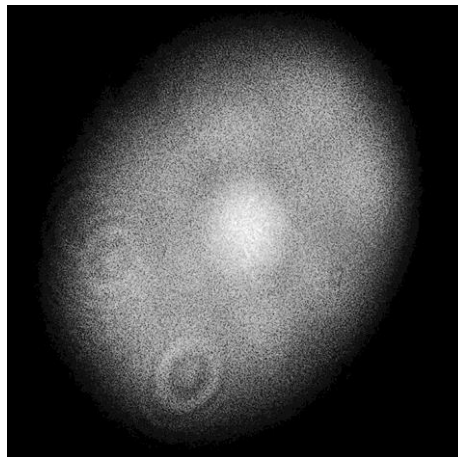


Рис. 3.6. Фотография распределения интенсивности в световом пучке до использования пространственного фильтра.

Данная фотография получена при помощи цифрового фотоаппарата на экране из плотной белой бумаги.

Из фотографии видно, что лазер излучает в многомодовом режиме.

### 3.2.2. Объектив для фокусировки

Коллимация светового пучка осуществлялась объективом LO50/1.85\_05 производства ООО "Оптикор" при ИТМО в Санкт-Петербурге. Далее кратко перечислим характеристики объектива:

1. Максимальный диаметр входного пучка: 22 мм
2. Диаметр фокального пятна: 0,015 – 0,030 мм (по уровню 90 % энергии)
3. Рабочая длина волны:  $532 \pm 20$  нм
4. Фокусное расстояние: 48,5 мм

Данный объектив изготовлен из высококачественных оптических компонентов, поэтому, выбирая между одиночной линзой и объективом, выбор был сделан в пользу объектива.

### 3.2.3. Светофильтр

Светофильтр НС-10 использовался для ослабления интенсивности луча, для удобства регистрирования и наблюдения.

### 3.2.4. Комплект основных диафрагм

Комплект основных диафрагм для пространственного фильтра представляет собой диски с диаметром 7,8 мм, вырезанные из NiMn-фольги толщиной 20 мкм. Диаметр отверстия меняется от изделия к изделию и составляет 30 мкм, 18 мкм, 7 мкм. Конструкция диафрагмоводителя позволяет их легко заменять. На рис. 3.7 представлена типовая диафрагма с диаметром отверстия 18 мкм.

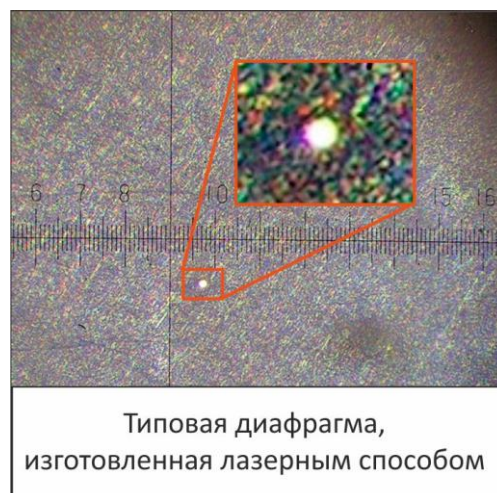


Рис. 3.7. Диафрагма, используемая в пространственном фильтре.

Диафрагмы изготавливались с помощью специального лазерного комплекса, оснащенного лазером с модулированной добротностью. Лазер в составе комплекса является импульсным с частотой повторения импульсов 2 кГц и средней мощностью до 0,8 Вт. Также в составе комплекса имеется лазерный сканатор с фи-тэта линзой, позволяющий программным управлением изменять

траекторию хода луча. Центральное отверстие 7 мкм и 17,5 мкм прожигалось при неподвижном фокусе относительно заготовки. Заданный диаметр отверстия обеспечивался подбором мощности луча. Диафрагма 30 мкм изготавливалась путем перемещения фокального пятна по окружности по заданной программе. Диск вырезался при помощи данного лазерного комплекса.

Из рис. 3.7 видно (насколько позволяет разрешительная способность микроскопа), что отверстие имеет достаточно круглую форму, что является важным при применении данных диафрагм в пространственном фильтре, об этом будет сказано ниже.

Не всегда удавалось добиться идеально круговой формы: иногда искажалась кромка отверстия, а иногда искажалась форма контура, - примеры представлены на рис. 3.8, 3.9. В первом случае, (рис. 3.8), отверстие диафрагмы подобно форме эллипса.

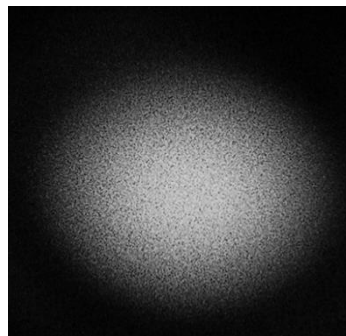


Рис. 3.8. Пучок эллиптической формы.

Во втором случае (рис. 3.9) отверстие диафрагмы имело неправильную форму.

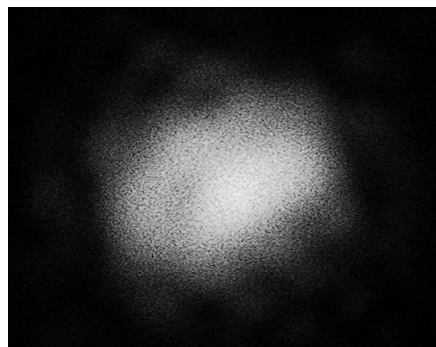


Рис. 3.9. Пучок неправильной формы.

В случаях, когда отверстия диафрагмы имели некачественную кромку, либо их форма отличалась от круговой, изделия отдавались на дополнительную

обработку в институт Теоретической и Прикладной Механики СО РАН Анискину Владимиру Михайловичу. Он дорабатывал их альтернативными методами механическим способом. К сожалению, разрешения нашего микроскопа недостаточно и увидеть различия между доработанными диафрагмами и диафрагмами, полученными лазерным способом, не удалось, тогда форма отверстия диафрагмы определялась косвенным методом по наблюдению формы пучка на экране.

### **3.2.5. Выходная линза пространственного фильтра**

В пространственном фильтре мы также использовали различные выходные линзы.

Фокусное расстояние (мм): 125, 180, 710.

Апертура (мм): 23, 75, 125.

Использование различных выходных линз и основных диафрагм различного диаметра позволило на выходе получить разные размеры пучка - от 10 до 100 мм в диаметре.

### **3.2.6. Вспомогательная диафрагма**

Вспомогательная диафрагма была вырезана из фольги NiMn толщиной 100 мкм с помощью лазерного комплекса. Данная диафрагма использовалась только лишь для удобства, чтобы вырезать первый максимум, который мы будем использовать в работе.

### **3.2.7. Нож Фуко**

Основным элементом ножа Фуко служило лезвие безопасной бритвы, которое помещалось на микровинт вблизи фокальной плоскости объектива. Нож Фуко использовался для Шлирен-метода.

### **3.2.8. Регистрация распределения в пучке**

Распределение интенсивности в луче и его форма регистрировалась фотографическим способом на экране. Экраном являлась мелованная бумага. Фотографическая цифровая камера - Konica Minolta Dimage Z10.

### 3.3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Как было сказано выше, пространственный фильтр используется для выделения основной моды из набора высших мод. Источником излучения служил китайский дешевый лазер, излучающий в многомодовом режиме и имеющий вследствие этого низкое качество пучка. Наша задача выделить моду  $TEM_{00}$ , необходимую нам для проверки качества оптики. Проанализируем распределение излучения во входном луче. Воспользуемся сервисом, который нам предоставляет программа для обработки физических данных OriginPro. Этот сервис позволяет обрабатывать изображения, полученные фотографической камерой (рис. 3.10).

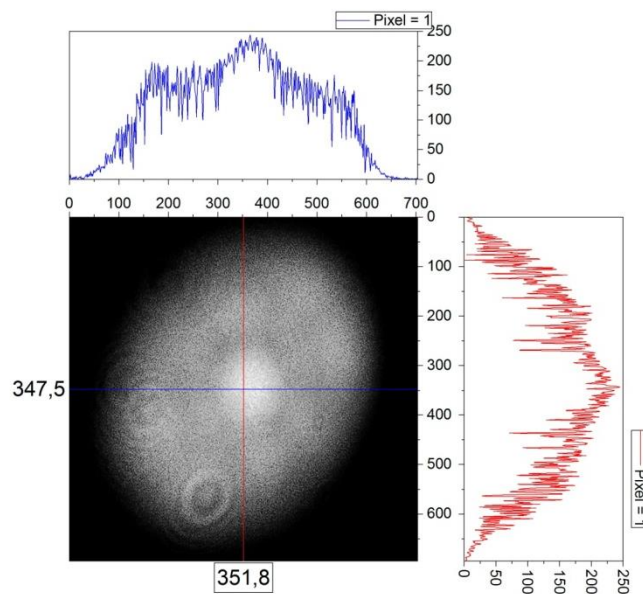


Рис. 3.10. Фотография распределения интенсивности в луче с графиком распределения интенсивности по профилю луча (x-y координата) на выходе из излучателя.

На рис. 3.10 представлены графики распределения интенсивности, в виде градации серого цвета или яркости по сечению пучка. Будем считать яркость точки за величину интенсивности света в данной точке пространства. Шумовая составляющая графиков это и есть результат явления спекл. Избавиться от шумов возможно путем сглаживания графика программной функцией OriginPro. На рис. 3.11 представлен результат такого сглаживания по сечению луча на выходе из излучателя.



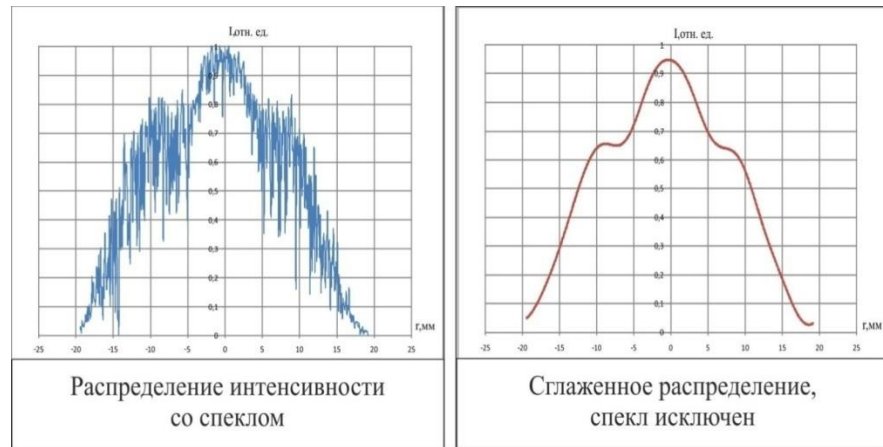


Рис. 3.11. Результат программной обработки фотографии, распределение интенсивности по сечению с шумовой составляющей спекла и усредненное распределение на выходе из излучателя.

Анализируя результат программной обработки, можно уверенно сказать, что данный пучок не является гауссовым. На фото также присутствуют пятна и кольца, вызванные дифракционными потерями на частичках пыли, находящихся на оптических компонентах лазера. Также имеется ярко выраженная эллиптичность луча.

На рис. 3.12 представлены графики распределения градации серого цвета или яркости по диаметральному сечению пучка.

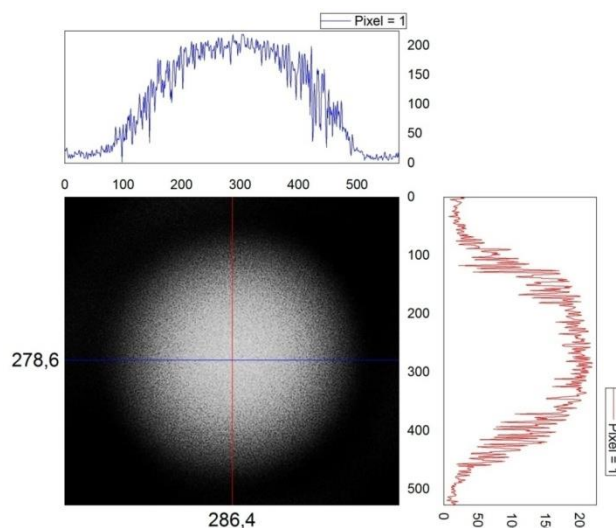


Рис. 3.12. Фотография типового распределения интенсивности в луче с графиком распределения интенсивности по диаметральному сечению пучка (x-y координата) после пространственного фильтра с использованием диафрагмы диаметром 17,5 мкм.

С помощью программной функции OriginPro избавляемся от шумов путем сглаживания графика распределения интенсивности и строим графики. На рис. 3.13. представлен результат такого сглаживания по диаметральному сечению луча.

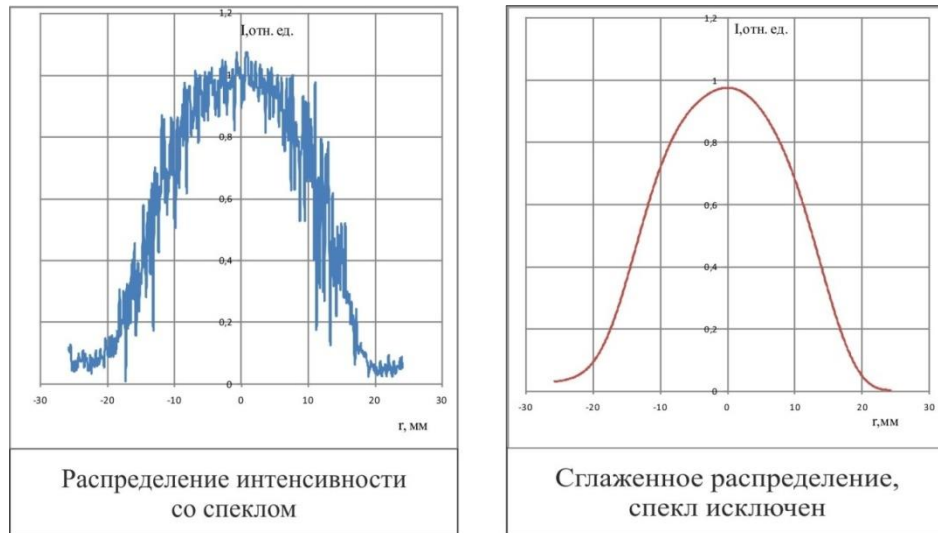


Рис. 3.13. Результат программной обработки фотографии, распределение интенсивности по сечению с шумовой составляющей спекла и усредненное распределение на выходе из пространственного фильтра.

Проанализируем полученное распределение интенсивности в пучке более детально. Мы ожидаем получить на выходе моду  $TEM_{00}$ , которая является гауссовым пучком. Гауссов пучок — волновой пучок электромагнитного излучения, в котором распределение электрического поля и излучения в поперечном сечении хорошо аппроксимируется функцией Гаусса [16].

$$g(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}, \quad (2.5)$$

где параметры  $a$ ,  $b$  и  $c$  - произвольные вещественные числа.

Попробуем аппроксимировать профиль нашего пучка. Ещё раз воспользуемся программой OriginPro, определённой операцией, позволяющей аппроксимировать данные, полученные экспериментально. Результаты аппроксимации распределения интенсивности в пучке представлены на рис.3.14.

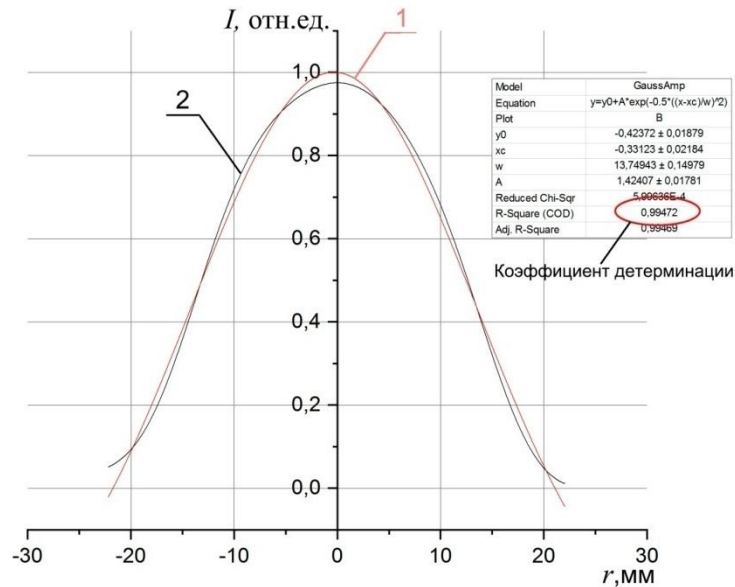


Рис. 3.14. Графики аппроксимация распределения интенсивности в пучке функцией Гаусса: 1 – результат аппроксимации, 2 - экспериментальные данные распределения интенсивности в пучке.

Из Рис. 3.14 видно, что полученный пучок достаточно хорошо описывается функцией Гаусса. Программа OriginPro также позволяет вычислить коэффициент детерминации.

Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) - это доля дисперсии зависимой переменной, объясняемая рассматриваемой моделью. Более точно - это единица минус доля необъяснённой дисперсии [17].

В нашем случае этот коэффициент равен 0,99, что дает нам право здесь и далее называть пучок на выходе из нашей системы гауссовым.

На рис. 3.15 приведено несколько распределений интенсивности по диаметральному сечению полученных гауссовых пучков и теоретическая зависимость, полученная ранее для случая дифракции на отверстии размером 17,5 мкм.

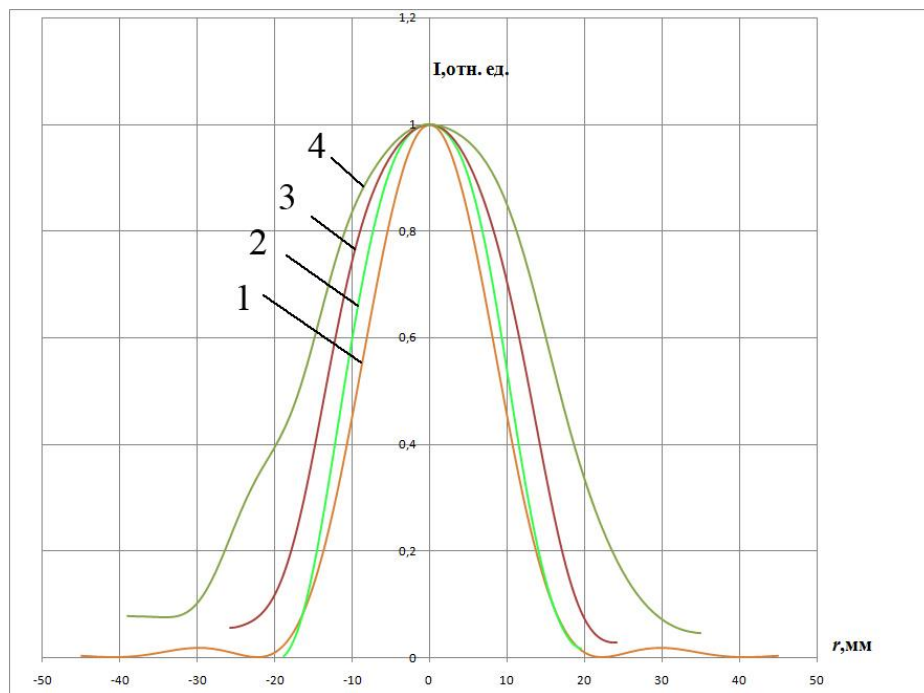


Рис. 3.15. Графики распределения интенсивности: 1 - зависимость, полученная вычислением с использованием размера отверстия 17,5 мкм, 2 – 3 – экспериментально полученные Гауссовы пучки.

Дифракционное распределение, полученное вычислением с использованием отверстия диаметром 17,5 мкм при условии плоской падающей волны.

1- Типовое распределение: дифракция на отверстии диаметра 17,5 мкм при плоской падающей волне

2- Типовое распределение: при фокусировке излучения на отверстие объективом LO 50/1.85\_05 (диафрагма находится в перетяжке)

3- Типовое распределение, при фокусировке излучения на отверстие объективом в 1,5 раза сильнее, чем объектив LO 50 (диафрагма находится в перетяжке)

Во всех случаях профиль пучка регистрировался на расстоянии 600 мм. Интенсивности нормированы и приведены к единице, чтобы можно было получить представление о форме пучка. Можно видеть, что размеры максимума зависят также от того, используем мы фокусировку на отверстие или нет. В случае применения объектива для фокусировки максимум оказался шире, нежели в случае, когда луч просто падал на диафрагму. Также луч оказался шире, примерно в полтора раза, при использовании более сильного объектива, причем

разница в ширине максимума и оказалась пропорционально разнице в оптической силе объективов.

Можно видеть, что во всех случаях форма пучка является одинаковой и хорошо описывается функцией Гаусса.

### 3.3.1. Проверка качества оптической детали после вклейки оптических элементов в оправу

Часто разработчики и изготовители лазерной техники прибегают к соединению оптических элементов путем склеивания друг с другом или с оправой. Для склеивания оптических элементов, изготовленных из неорганических и органических стекол всех марок, кристаллов, ситаллов, а также для склеивания оптических элементов с металлическими оправами ГОСТ 14887-80 «Клеи оптические. Типы» предусматривает обширный набор оптических клеев [18].

На рис. 3.16 представлен лазерный твердотельный излучатель, собранный в лаборатории, цифрами отмечены элементы, которые закреплялись в оправы с помощью клея.

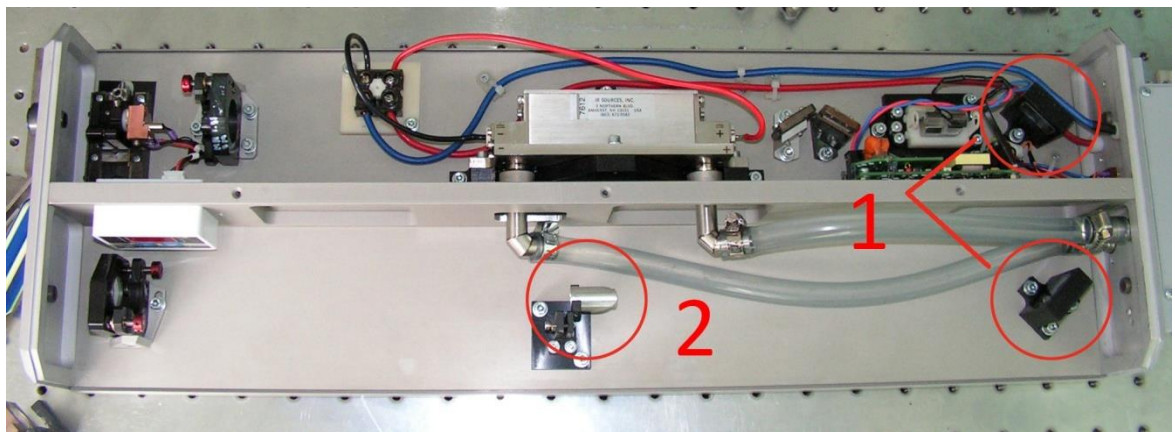


Рис. 3.16. Твердотельный лазерный излучатель.

Соединялись не только наружные, но и внутррезонаторные элементы. Как правило, это поворотные зеркала, различные пластины или поляризаторы. Но у этого метода есть несколько особенностей. Если поверхность металлической оправы низкокачественная, а оптический элемент слишком тонкий, то рабочие поверхности оптических элементов, которые отвечают за направление распространения света, форму волнового фронта и ход лучей, будут отклонять

первоначальную форму луча. На рис. 3.17 показан пример крепления оптического элемента с оправой.



Рис. 3.17. Крепление оптического элемента в оправу с помощью клея.

Изготовленное устройство на основе пространственного фильтра позволяет проверять качество оптического элемента после склейки.

Проверим качество оптического элемента после склейки зеркала. Зеркало поворотное, 45-градусное, диаметром 20 мм.

Поместив в пространственный фильтр диафрагму 30 мкм и выходную линзу с фокусным расстоянием 200 мм, а также пропустив центральный максимум дополнительной диафрагмой, мы получили пучок диаметром приблизительно 10 мм. На расстоянии 15 м от тестируемого зеркала регистрировали форму пучка. На рис. 3.18 приведены фотографии двух пучков: отраженного от зеркала, вклеенного в оправу правильно без последующего искажения волнового фронта, и от зеркала, находящегося в напряженном состоянии. Различия в форме пучков видны отчетливо. Постановка некачественно вклеенных в оправы зеркал в излучатель, особенно внутрь резонатора лазера, также приведет к искажениям волнового фронта и, как следствие, распределение интенсивности в луче и его круглая форма будут нарушены. Как показал опыт, оптические элементы толщиной 5 мм и более не подвержены напряжениям, приводящим к искажению

волнового фронта. Элементы тоньше 5 мм требуют тщательного контроля после склейки на установке, собранной в лаборатории.

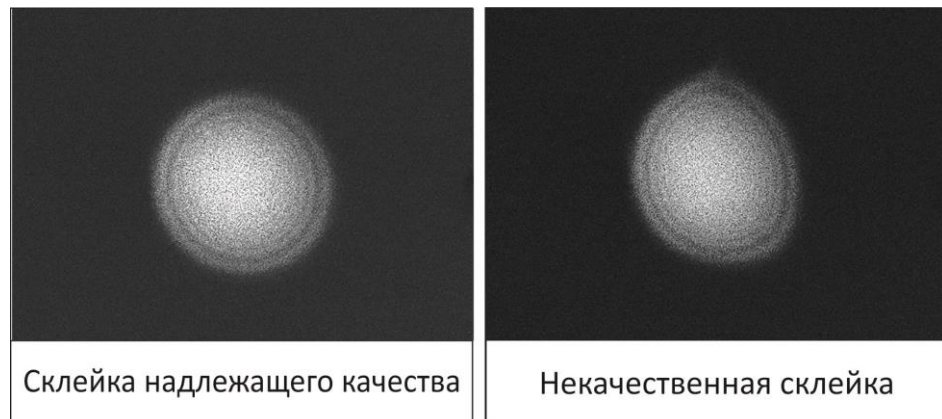


Рис. 3.18. Различие в форме тестового луча, полученного при помощи пространственного фильтра и прошедшего через поворотное зеркало.

### 3.3.2. Проверка качества оптических элементов на наличие свилей

С помощью пространственного фильтра можно проверить оптические элементы на наличие свилей. Для проверки, были подобраны заготовки с типичными дефектами. Каждый образец представляет собой пластину с полированными плоскопараллельными гранями. Перед проверкой данные образцы были отданы на оптический участок Института Лазерной Физики СО РАН на шлифовку и полировку, чтобы исключить поверхностные дефекты образцов. Плоскостность была сделана с точностью  $\frac{\lambda}{4}$ . Исследуемые образцы помещаем в наш пространственный фильтр после вспомогательной диафрагмы. На рис. 3.19 представлена оптическая схема установки для выявления свилей.

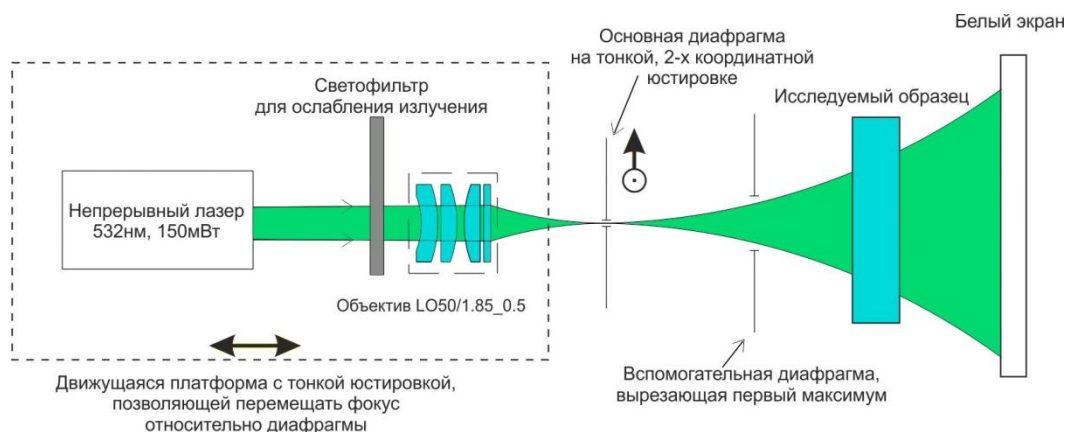


Рис. 3.19. Оптическая схема установки для обнаружения свилей.

На первых двух образцах дефекты не видны. Поместив образцы в пространственный фильтр, можно увидеть, что данные образцы не являются идеальными и имеют свили.

Внутри образца № 1 были обнаружены множественные свили, которые по форме соответствуют нитевидной и располагаются по всей площади образца, представленные на рис. 3.20.

Нитевидная свиль - свиль, имеющая форму четкой или нечеткой, резко ограниченной или с постепенным переходом в массу стекла нити или пучка нитей [4].

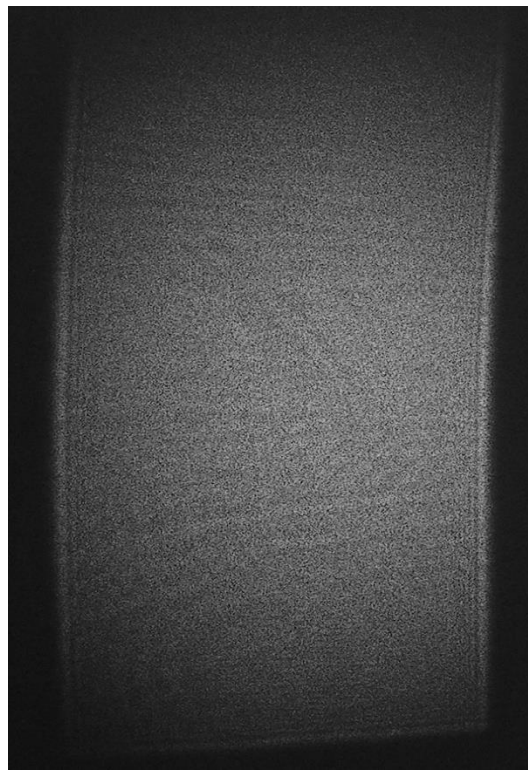


Рис. 3.20. Исследуемый образец № 1 с дефектом множественные нитевидные свили.

Внутри образца № 2 была обнаружена ярко выраженная одиночная свиль, представленная на рис. 3.21.



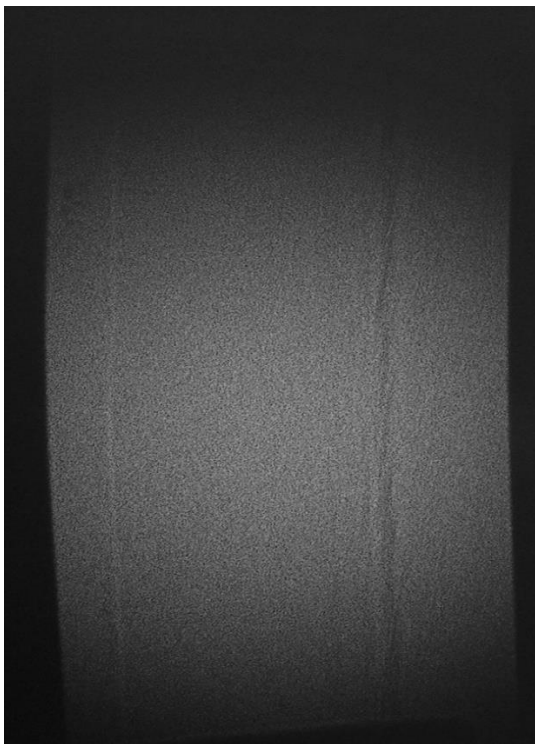


Рис. 3.21. Исследуемый образец № 2 с дефектом одиночная нитевидная свиль.

На образце № 3 дефекты видны невооруженным глазом, однако, поместив исследуемый образец № 3 в пространственный фильтр, можно обнаружить объёмную свиль, представленную на рис. 3.22.

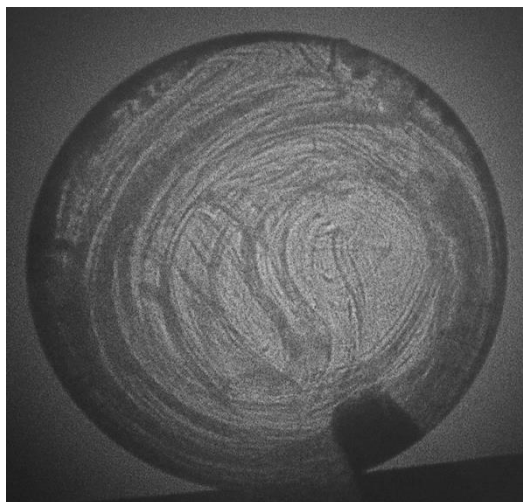


Рис. 3.22. Исследуемый образец № 3 с дефектом объёмная свиль.

Так же образцы можно исследовать с помощью Шлирен-метода, который позволяет просматривать их не только на наличие или отсутствие оптических неоднородностей в прозрачных преломляющих средах и дефекты отражающих поверхностей, но и рассмотреть мелкие объекты. Для этого исследуемый образец

следует поместить в пространственный фильтр после ножа Фуко. На рис. 3.23 показана схема установка для исследования образцов Шлирен-методом.

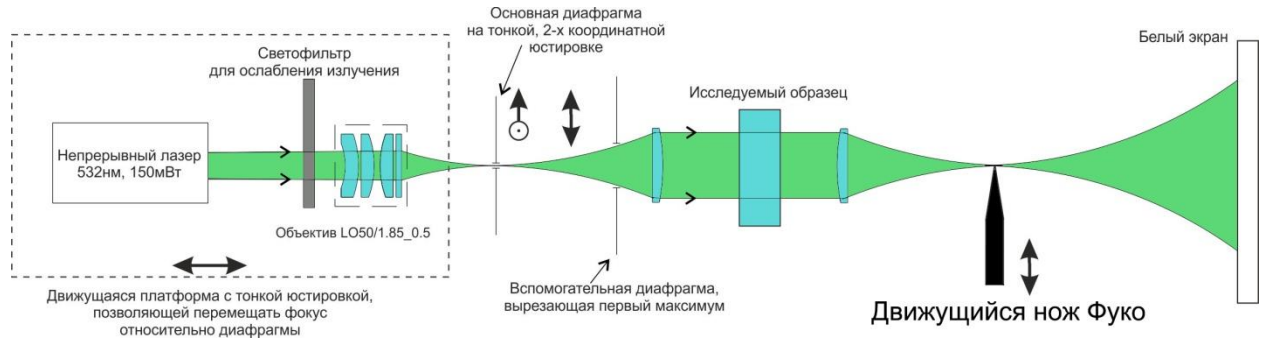


Рис. 3.23. Оптическая схема установки для исследования образцов Шлирен-методом.

Просматривая образец Шлирен-методом, можно рассмотреть мелкие объекты, например, отпечаток пальца, оставленный на исследуемом образце, представленный на рис. 3.24.

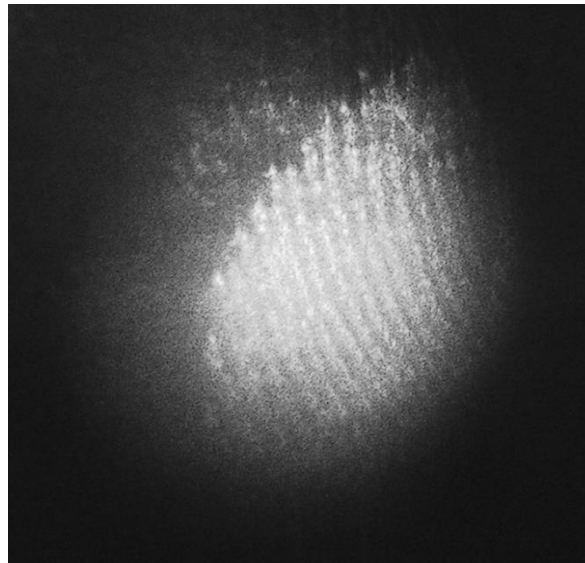


Рис. 3.24. Отпечаток пальца на исследуемом образце, просмотренного с помощью Шлирен-метода.

#### **4. Расчёт экономической эффективности выполненной работы**

Разработка пространственного фильтра для лазерных комплексов решает ряд научно-технических задач. На сайте Thorlabs, компания которого специализируется на конструировании лазерных и волоконно-оптических систем, пространственный фильтр стоит около 72000 руб. [19]. Для создания установки с пространственным фильтром, представленной в данной дипломной работе, основная часть затрат составила около 2000 руб. на приобретение лазерного излучателя. Набор диафрагм изготавливался с помощью технических средств лаборатории, а остальные оптические компоненты, необходимые для установки, были взяты из наличных запасов лаборатории, либо ЗИП других установок.

## 5. Техника безопасности

На экспериментальных установках, эксплуатируемых в лаборатории, присутствуют следующие опасные и вредные производственные факторы [20, 21]:

- лазерное излучение (прямое, рассеянное или отраженное);
- ультрафиолетовое излучение от ламп накачки;
- электромагнитное излучение;
- электрическое напряжение постоянного и переменного тока;
- шум и вибрация.

Важнейшей характеристикой лазерного излучения, характеризующей его биологическое воздействие, является длина волны. В зависимости от длины волны излучение может принадлежать к различным участкам спектра:

- ультрафиолетовый диапазон (180 - 400 нм);
- видимый спектр (400 - 760 нм);
- инфракрасный диапазон (760 нм - 30 мкм).

Перечень мероприятий по обеспечению безопасности работников с лазерными установками во многом определяет класс лазера. Определение класса опасности основано на учёте его выходной энергии (мощности) и предельно допустимых уровней при случайном однократном воздействии генерируемого излучения. Класс опасности лазерных изделий определяется при их разработке и указывается в технических условиях на изделия, эксплуатационной, ремонтной и другой технической и рекламной документации. Лазерные изделия подразделяют на 4 класса опасности и в зависимости от класса опасности лазерного изделия таблички должны иметь дополнительные надписи.

В установке с пространственным фильтром был использован лазер, который по степени опасности генерируемого излучения относится ко 2 классу.

Защиту от лазерного излучения осуществляют организационными, техническими и лечебно-профилактическими мероприятиями и средствами.

К организационным мероприятиям, обеспечивающим безопасность выполнения работ, относится:

- вводный инструктаж;
- инструктаж на рабочем месте;
- инструкции по эксплуатации приборов и установки;
- ознакомление с особенностями функционирования установки;
- ограничение времени воздействия излучения;
- инструкция по оказанию первой помощи при несчастных случаях;
- инструкции по действиям персонала в аварийных ситуациях.

Основные технические средства защиты от лазерного излучения:

- маркировка помещений и установок знаками лазерной опасности;
- ограждающие устройства (защитные экраны, перегородки);
- кодовый замок (на дверях помещений, электромеханические замки на экспериментальных установках);
- дистанционное управление (возможность управления лазерным лучом и изменения режима работы на расстоянии);
- защитные очки со специальными светофильтрами, обеспечивающими подавление интенсивности излучения рабочих длин волн до безопасного уровня;
- специальная одежда - халаты;
- диэлектрические перчатки;
- диэлектрические штанги.

Лечебно-профилактическими методами является:

- контроль за уровнями вредных и опасных факторов на рабочих местах (аттестация рабочих мест по условиям труда);
- контроль за прохождением персоналом первичного (при приеме на работу) и периодического (один раз в год) медицинских осмотров.

К самостоятельной работе с лазерными изделиями студенты не допускаются, все работы на действующих установках выполняются под контролем руководителя или в составе бригады не менее 3 человек.

## Заключение

В результате проделанной работы был создан и исследован ключевой элемент трансформируемой установки, позволяющей проверять качество оптических лазерных элементов, а равно и качество сборок на основе этих элементов. Это лазерный излучатель с пространственным фильтром, на выходе которого имеем Гауссов пучок с высокими оптическими свойствами. Используя этот пучок в качестве основы, становится возможным собрать несколько видов оптических схем для определения различных неоднородностей оптических элементов. Неоднородности могут быть как на оптических поверхностях, так и внутри элементов. На основе этого излучателя были собраны и опробованы схемы для выявления таких дефектов как:

- Пузыри и свилю (наблюдения производились в проходящем свете).
- Механические напряжения, приводящие к искривлению рабочих поверхностей оптических элементов (наблюдения производились в отраженном свете).
- Загрязнения, царапины, дефекты покрытий (Шлирен-метод).

Также было показано, что пространственный фильтр является эффективным средством для выделения основной моды из многомодового пучка.

Был найден способ определения диаметров малых отверстий путем пересчета размеров первого минимума после дифракции света на исследуемом отверстии, вычисленные значения являются более точными, по сравнению со значениями, полученные с помощью измерительной шкалы микроскопа.

Было показано, что диафрагма является ключевым элементом пространственной фильтрации и от того, насколько качественно изготовлена диафрагма, зависит качество пучка.

Понеся относительно небольшие финансовые затраты и приложив собственные усилия, мы получили простой, но эффективный инструмент для проверки качества оптики.

Конкретно мной были проделаны следующие работы:

- Изучено пространственное преобразование Фурье и принцип, положенный в основу пространственной фильтрации светового пучка, а также изучены и практически отработаны такие частные случаи преобразования Фурье, как дифракция на щели и на круглом отверстии, включая детальное изучение математического аппарата.
- Ознакомилась с различными видами дефектов оптических элементов, а также со способами их проверки как теоретически (из литературных источников), так и экспериментально.
- Принимала участие в конструировании, а также в выполнении рабочих чертежей некоторых узлов установки, получила навыки практической работы с программным комплексом машиностроительного черчения «Компас».
- Принимала участие в изготовлении и измерении геометрических параметров набора точечных диафрагм, являющихся ключевым элементом пространственного фильтра.
- Ознакомилась с методикой настройки отдельных элементов и комплекса в целом.
- Освоила метод регистрации распределения интенсивности в пучке путем фотографирования пучка на экране и дальнейшего анализа, используя программные методы OriginPro.

### Список литературы

1. Губанова Л.А., Константинова Ю.А. Оптические технологии: учебно-методическое пособие – СПб: Университет ИТМО, 2018. - 62 с.
2. Пирогов А.В., Васильков С.Д., Савченко В.П. Контроль качества оптических изделий из термопластичных полимерных материалов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2014. – Т.57. - №8. – С.61-64
3. Вильчинская С.С. Оптические материалы и технологии: учебное пособие/ С.С. Вильчинская, В.М Лисицын; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011 – 107 с.
4. ГОСТ 32361-2013. Стекло и изделия из него. Пороки. Термины и определения. – Введ. 01.01.2015. – М.: Стандартинформ, 2014. – 8 с.
5. ГОСТ 3521-81. Стекло оптическое. Метод определения бессвильности. – Взамен ГОСТ 3521-69; введ. 01.01.1983. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998.
6. Ефремов А.А., Сальников Ю.В. Изготовление и контроль оптических деталей: Учебное пособие. - М.: Высш. шк., 1983 г., 255 с.
7. Богатырева В.В., Дмитриев А.Л. Оптические методы обработки информации / Учебное пособие. – СПб: СПбГУИТМО, 2009. -74 с.
8. Лоссов К.И., Маркарян Е.Г. Преобразования Фурье и Лапласа: методические указания. — М.: МИИГАиК, 2017. — 68 с.
9. Локшин Г.Р., Дифракция. Пространственная фильтрация: учебное пособие по курсу Общая физика. Изд. 2-е, испр. и доп. - М.: МФТИ, 2016. -156 с.
10. Ахманов С.А., Физическая оптика: Учебник. 2-е изд. / С.А. Ахманов, С.Ю. Никитин. — М.: Изд-во МГУ: Наука, 2004. – 656 с.
11. Вишнякова С.М. Дифракция света на круглом отверстии и на непрозрачном диске: Методические указания к лабораторной работе О-77 по курсу общей физики. - М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. -27 с.
12. Ковалевская Т.Е., Овсяук В.Н., Белоконев В.М., Дегтярев Е.В. Фотоника: Словарь терминов/Под ред. В.Н. Овсяюка. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2004. -342 с.



13. Андрухова О.В., Андрухова Т.В., Соломатин К.В. Оптика и лазерная физика в медицине. Часть 1, учебное пособие. /О.В. Андрухова, К.В. Соломатин – Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2019. -224 с.

14. Исакова О. П., Тарасевич Ю.Ю., Юзюк Ю.И. Обработка и визуализация данных физических экспериментов с помощью пакета Origin. Анализ и обработка спектров: Учебно-методическое пособие. – Ростов-на-дону, Южный федеральный университет, 2007. –76 с.

15. Васильев А.М., Специальные методы контроля элементов лазерного гироскопа: монография / А.М. Васильев, Е.И. Гребенюк. – М.: Издательство «Русайнс», 2015. – 100 с.

16. Короленко П.В., Оптика когерентного излучения: учебное пособие – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 1997. – 222 с.

17. Магнус Я.Р., Катышев П.К., Пересецкий А.А. Эконометрика. Начальный курс: Учеб. — 6-е изд., перераб. и доп. — М.: Дело, 2004. — 576 с.

18. ГОСТ 14887-80. Клеи оптические. Типы. – Взамен ГОСТ 14887-69; введ. 01.01.1982. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1988. – 22 с.

19. Pinhole Spatial Filter System [Электронный ресурс]: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=13052](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=13052)

20. ГОСТ 31581-2012. Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий. – Введ. 01.01.2014. – М.: Стандартинформ, 2013. – 23 с.

21. Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров. СанПиН 5804-91, утверждены главным государственным санитарным врачом СССР 31 июля 1991 г.