

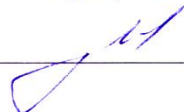
МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

Институт *высокоточных систем им. В.П. Грязева*
Кафедра «Приборы управления»

Утверждено на заседании кафедры
«Приборы управления»
« 22 » января 20 24 г., протокол № 1

Заведующий кафедрой


_____ В.В. Матвеев

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по проведению лабораторных работ
по дисциплине (модулю)
«Основы оптики»

основной профессиональной образовательной программы
высшего образования – программы бакалавриата

по направлению подготовки
12.03.03 Фотоника и оптоинформатика

с направленностью (профилем)
Интеллектуальные фотонные системы
Форма обучения: очная

Идентификационный номер образовательной программы: 120303-01-24

Разработчик методических указаний:

Матвеев В.В., зав. каф., д.т.н., доц. _____



Содержание

Лабораторная работа №1. Знакомство с составом и устройством оптической скамьи ОСК-2ЦЛ	4
Лабораторная работа № 2. «Определение расстояния между щелями в опыте Юнга»	29
Лабораторная работа № 3. «Исследование закона Малюса»	33
Лабораторная работа № 4. «Исследование оптических компакт-дисков»	37
Лабораторная работа № 5. «Определение фокусного расстояния и кардинальных элементов, фотографического объектива»	46
Лабораторная работа № 6. «Определение увеличения лупы и зрительной трубы»	55
Лабораторная работа № 7. «Выполнение линейных измерений с помощью отсчетного микроскопа»	61
Лабораторная работа № 8. Аберрации оптических систем	66

Лабораторная работа №1. Знакомство с составом и устройством оптической скамьи ОСК-2ЦЛ

Целью данной лабораторной работы является изучение конструкции, состава и основных принципов функционирования оптической скамьи ОСК-2ЦЛ. В ходе выполнения работы студенты должны:

1. Изучить назначение и общее устройство оптической скамьи ОСК-2ЦЛ.
2. Ознакомиться с основными элементами и узлами, входящими в состав скамьи, такими как источник света, оптические элементы (линзы, диафрагмы, призмы и др.), приемники излучения и механизмы юстировки.
3. Освоить методы крепления, центрирования и регулировки положения оптических элементов на оптической скамье.
4. Изучить принципы сборки и юстировки простейших оптических схем на скамье ОСК-2ЦЛ.
5. Приобрести практические навыки работы с оптической скамьей, включая включение, настройку и выключение ее элементов.
6. Научиться проводить элементарные измерения и наблюдения оптических явлений с использованием оптической скамьи.

Назначение

Скамья оптическая ОСК-2ЦЛ предназначена для исследования оптических и оптико-электронных систем, а также отдельных оптических деталей по качеству изображения, для измерения оптических и пространственно-энергетических характеристик. Оптическая скамья может быть использована для макетирования, сборки и юстировки различных оптических систем, для демонстрационно-учебных и научно-исследовательских работ. Наличие в комплекте двухкоординатного стола с цифровым отсчетным устройством значительно расширяет функциональные возможности скамьи при исследовании оптико-электронных систем и фотоэлектрических устройств, обеспечивает индикацию результатов измерений на цифровом табло и вывод их на цифропечать и (или) ЭВМ.

Наличие газового лазера дает возможность проводить исследовательские работы в когерентном свете. Оптическая скамья является лабораторным прибором, поэтому в помещении, где она установлена, должна поддерживаться температура $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ и относительная влажность не более 80%.

Конструкция и оборудование оптической скамьи дают возможность хорошо отцентрировать и обеспечить постоянство центрировки оптической оси контролируемых деталей с оптической осью измерительных узлов, входящих в комплект скамьи, чтобы затем вести измерения методами, разработанными на основе законов геометрической оптики.



Рисунок 1 – Общий вид приспособлений скамьи оптической

Оптическая скамья (рисунок 1) оснащена целым рядом столиков и держателей для крепления круглых деталей, призм, зеркал, готовых телескопических и иных систем, осветителями различного типа, столиками с микрометрическими барабанами и фотоэлектрическими преобразователями, являющимися точными приборами и предназначенными для универсального использования в процессе эксплуатации.

Все столики, держатели и другие элементы и приспособления могут быть закреплены на станине в необходимом порядке в зависимости от характера работ.

Устройство скамьи

Оптическая скамья (рисунок 1) оснащена целым рядом столиков и держателей для крепления круглых деталей, призм, зеркал, готовых телескопических и иных систем, осветителями различного типа, столиками с микрометрическими барабанами и фотоэлектрическими преобразователями, являющимися точными приборами и предназначенными для универсального использования в процессе эксплуатации.

Все столики, держатели и другие элементы и приспособления могут быть закреплены на станине в необходимом порядке в зависимости от характера работ.

Станина

В скамье применены станины с профилем направляющих, близким к профилю, применяемому в станкостроении. Такой профиль обеспечивает постоянное и устойчивое перпендикулярное положение рейтеров относительно направляющих станин (независимо от того, зажат рейтер или нет), надежную центровку всех рейтеров относительно коллиматора, а также возможность съема и установки рейтера без протягивания его через всю длину станины. Расположение верхних площадок обеих направляющих в одной плоскости позволяет закреплять на станине любое приспособление с плоским основанием. Средний паз станины служит для закрепления устанавливаемых рейтеров и приспособлений. Общий вид станины представлен на рисунке 2. Установка состоит из трех станин. Длина двух станин 2 м. Длина третьей – 1 м.

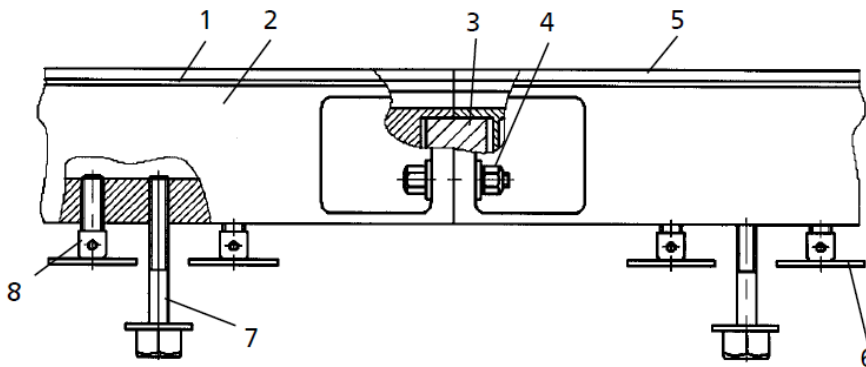


Рисунок 2 – Станина

Станины 2 и 5 соединяются между собой при помощи четырех соединительных болтов 4 с шайбами. К станине 2 привернута шпонка 3, а в станине 5 имеется шпоночный паз. При соединении станин шпонка обеспечивает совпадение призматических направляющих без сдвига, а наличие точных присоединительных торцевых плоскостей обеспечивает совпадение их по направлению.

Станины устанавливают в горизонтальном положении на двадцати четырех установочных опорах 8, под которые ставят опорные пластины 6. На станине имеется миллиметровая шкала 1 для фиксации положения рейтеров на скамье. Вся установка станины может быть закреплена на рабочем месте при помощи прижимных болтов 7. Дополнительную станину длиной 1 м можно установить под углом 90° к основной станине.

Рейтеры

В комплекте оптической скамьи применены рейтеры трех типов (рисунок 3), отличающиеся друг от друга по высоте, размерам оснований и диаметрам отверстий для колонок.

Перед установкой рейтеров на станину кольцо 2 устанавливают таким образом, чтобы стрелка, нанесенная диаметрально, совпадала с направлением паза станины, в который вставляется хвостовик зажимного винта 5. Рейтер устанавливают на станину,

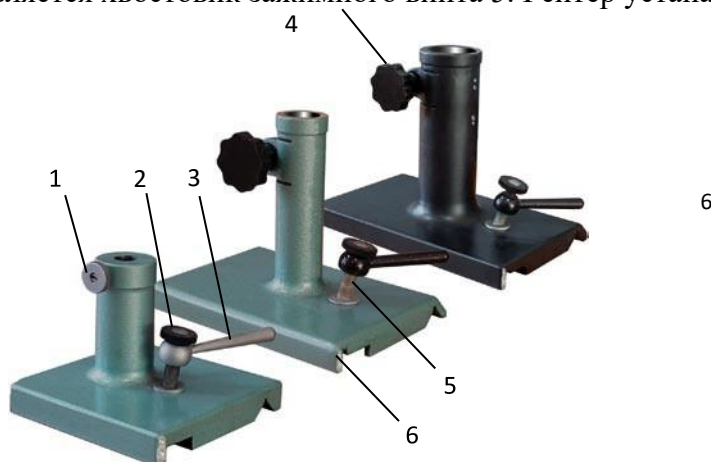


Рисунок 3 – Рейтеры

поворачивают кольцо 2 до отказа в сторону, указанную стрелкой с надписью «Зажать», и закрепляют рейтер поворотом зажимной рукоятки 3.

Для снятия рейтера со станины без протягивания его через всю длину станины продельывают вышеописанный процесс в обратной последовательности.

Рейтеры заканчиваются колонками, диаметры отверстий которых равны 15, 24 и 30 мм. Внутри колонок могут быть закреплены стойки столиков, оправ и осветителей. Для зажима

стоек в необходимом положении по высоте на колонках имеются зажимные винты 1 и 4. На рейтерах имеется индекс 6 для определения положения рейтеров вдоль станины.

Коллиматор

Конструкция объектива и общий вид коллиматора представлены на рисунках 4 и 5.

Объектив 2 (рисунок 4) коллиматора, состоящий из двух линз, закреплен в оправе 3 с помощью пружинящего кольца 4. Оправа объектива через промежуточные резьбовые втулки 5 привернута тремя болтами 6 к обойме 1, которая соединена с трубкой коллиматора. Такая конструкция позволяет точно выставить ось объектива параллельно оси трубы коллиматора, что имеет существенное значение для таких длиннофокусных объективов.

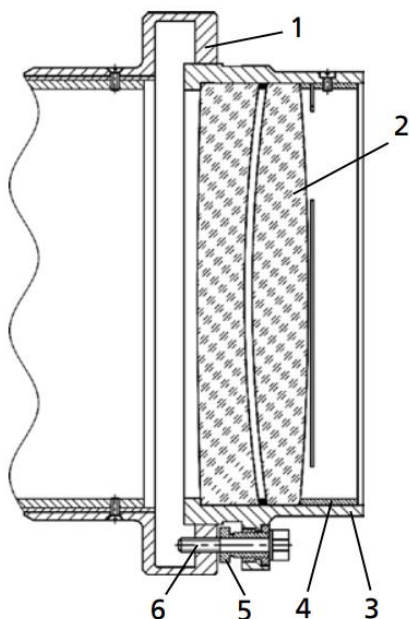


Рисунок 4 – Объектив

На трубе 3 (рисунок 5) коллиматора закреплены цапфы торической поверхности, с помощью которых коллиматор опирается на прямоугольные призмы своего основания, что дает возможность небольшого наклона коллиматора в горизонтальной плоскости. Одна пара призм выполнена на основании и со стороны объектива неподвижна, другая пара выполнена на вилке 14, которая вместе с направляющей 12 типа ласточкин хвост перемещается вертикально с помощью винтовой пары. Для выбора люфта винтовой пары и создания плавного хода при подъеме и опускании служит пружина в узле винтовой пары. Вращением маховичка 11, жестко соединенного с винтом винтовой пары, осуществляется поворот коллиматора в вертикальной плоскости. Для поворота коллиматора в небольших пределах в горизонтальной плоскости необходимо отвернуть заглушку 1 и вращением винтов, находящихся под заглушкой, регулировать положение трубы.

Механизм фокусировки коллиматора состоит из корпуса 5, привернутого к обойме 4, и трубы 9, перемещающейся с помощью трубки и рейки, закрепленной на трубе 9. Фокусировка осуществляется вращением маховичка 10. Отсчет производится по линейной шкале и нониусу.

Втулка 6 имеет посадочное отверстие диаметром 34А и служит для зажима сменных элементов коллиматора: револьвера с мирами 8, регулируемой сетки и переходных втулок для окуляра-микрометра и других окуляров.

Коллиматор с основанием устанавливается на станину прибора и закрепляется с помощью зажимных болтов аналогично закреплению рейтеров на станине. Зажим осуществляется вращением рукоятки 15. Для предохранения объектива от запыления предусмотрен специальный колпачок 16.

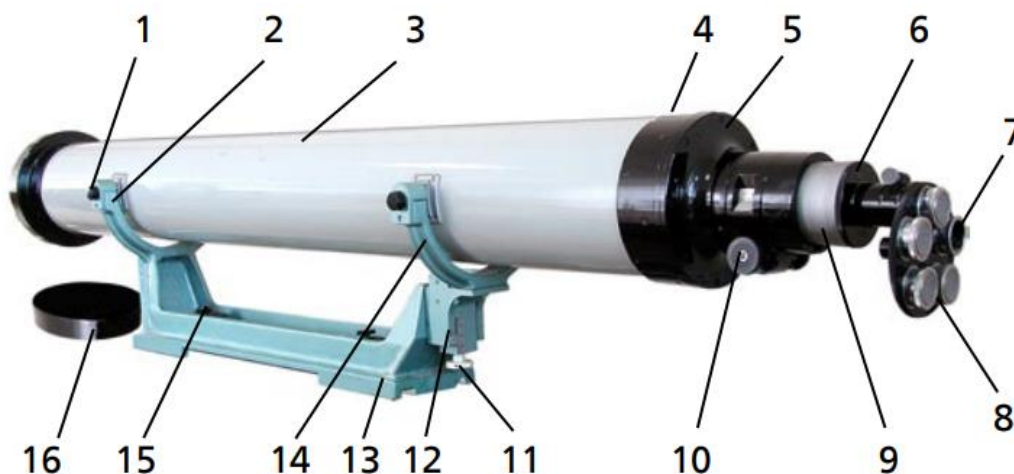


Рисунок 5 – Коллиматор

Микроскоп

Микроскоп (рисунок 6) используется для рассматривания на скамье изображения, даваемого исследуемым объективом оценки его качества, а также при измерении фокусного расстояния объектива. Конструкция штатива, наличие механизмов перемещения по всем трем координатным осям позволяют использовать микроскоп и для других работ, в частности для визуального наблюдения объектов, расположенных на вертикальных поверхностях, и для их линейных измерений.

Штативом микроскопа служит асимметричный рейтер 8, устанавливаемый на скамье. Вертикальная колонка рейтера оканчивается двумя приливами, в которых размещены реечный механизм для вертикального перемещения микроскопа и зажимной механизм 7 для зажима микроскопа на установленной высоте.

Вращением маховичков 1, жестко закрепленных на оси трибки, перемещаются по высоте рейка и жестко связанная с ней вертикальная стойка 6 по цилиндрической направляющей. Шпонка внутри рейтера предохраняет микроскоп от поворота в горизонтальной плоскости.

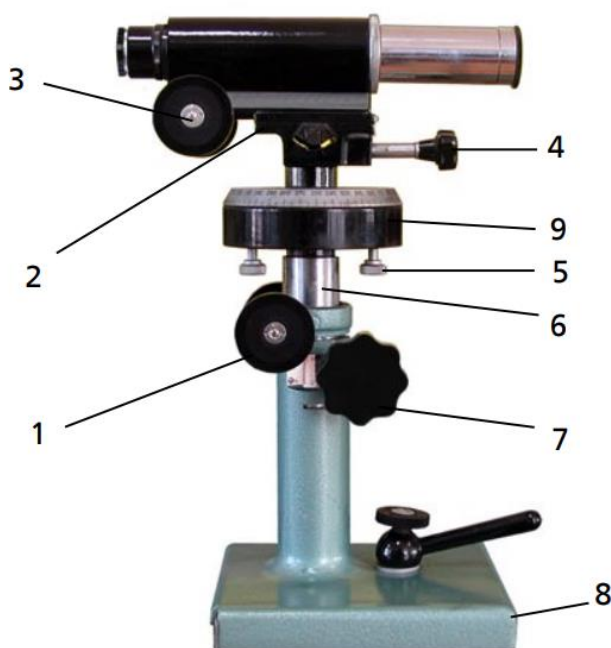


Рисунок 6 – Микроскоп

К перемещающейся вертикальной стойке 6 крепится оправа с лимбом 9 для поворота микроскопа вокруг вертикальной оси. Винты 5 служат для закрепления микроскопа при развороте на заданный угол. К оправе с лимбом крепится корпус 2, в котором помещается реечный механизм для поперечного перемещения микроскопа. Перемещение происходит по направляющим типа ласточкин хвост.

Механизм фокусировки микроскопа представляет собой обычный реечный механизм, применяемый в биологических микроскопах. Вращением маховичков 3 на оси трибки, сцепленной с рейкой, жестко закрепленной на тубусе микроскопа, производят фокусировку микроскопа. Вращением маховичка 4 производят поперечную подвижку микроскопа.

Суппорт с вращающейся оправой

Суппорт с вращающейся оправой (рисунок 7) предназначен для крепления исследуемых линз, объективов при контроле качества изображения, измерения оптических характеристик.

Способ крепления оправы допускает ее снятие и замену специальной оправой 3, 4, 5 требуемого диаметра. Вся оправа 6 вращается в шариковом подшипнике вокруг горизонтальной оси, и ее положение может быть зафиксировано зажимным винтом 2. Оправа суппорта 1 перемещается с помощью реечного механизма по направляющим типа ласточкин хвост.

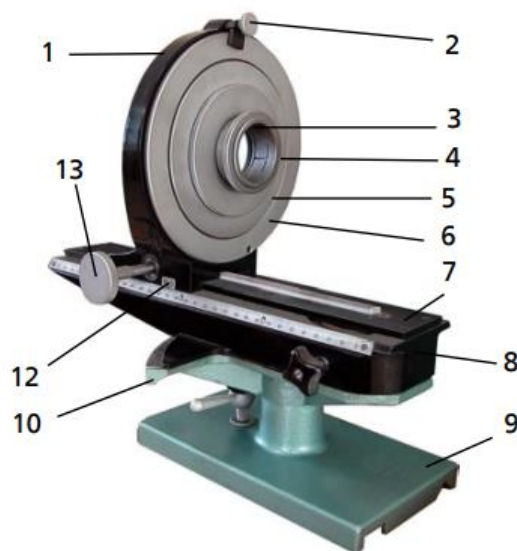


Рисунок 7 – Суппорт с вращающейся оправой

9

Вращая маховичок 13, одновременно вращаем трибку, закрепленную в оправе, и осуществляем перемещение оправы вдоль рейки 7. Трибка вращается в эксцентриковом подшипнике. Диапазон перемещения оправы 240 мм. Кроме того, оправу можно снять с направляющих и надеть ее другой стороной. На оправе для производства отсчета по миллиметровой шкале крепятся с обеих сторон два индекса 12.

Направляющая и рейка крепятся к салазкам 8, которые могут разворачиваться относительно основания 9 на $\pm 40^\circ$. Угол разворота может быть отсчитан по угловой шкале 10 и индексу. Суппорт можно закрепить в любом положении зажимным винтом. Основание 9, неразъемно связанное с салазками 8, устанавливается на скамье и крепится зажимным винтом.

Оправа универсальная

Универсальная оправа (рисунок 8) служит для крепления круглой оптики в оправе и без оправ диаметром от 10 до 85 мм. Крепление может производиться как по наружному диаметру оправы оптики, так и по внутреннему. Универсальная оправа имеет плавное юстировочное движение по высоте в осевом и поперечном направлениях.

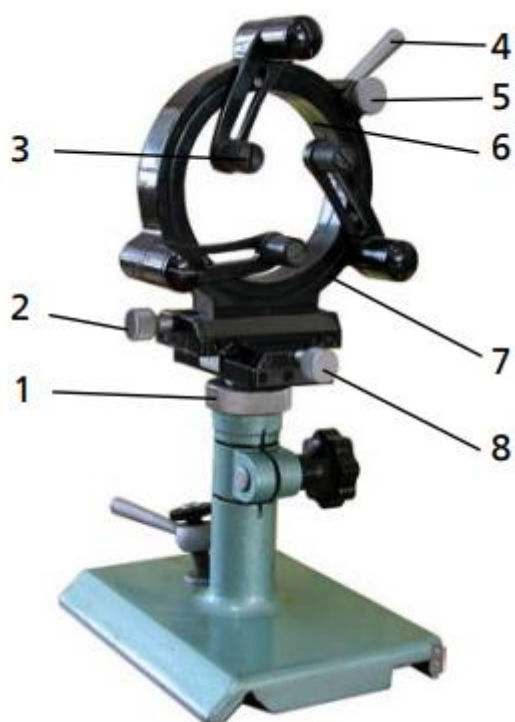


Рисунок 8 – Оправа универсальная

Для плавного перемещения по высоте колонка имеет по своему внешнему диаметру ленточную резьбу. При вращении гайки 1 по часовой стрелке оправа поднимается, а при вращении в обратном направлении оправа под действием своего веса опускается. Для предохранения от поворота колонки при вращении гайки в колонке имеется продольный паз, а в колонке рейтера – шпонка, входящая в этот паз. Диаметр стойки под универсальную оправа равен 24 мм. Диапазон перемещения оправы по высоте равен 50 мм, осевое (продольное) и поперечное движения оправы равны ± 5 мм. Движение оправы происходит по направляющим типа ласточкин хвост и осуществляется винтовой парой.

При вращении винта 2 кольцо 7, составляющее одно целое с салазками, перемещается вдоль оси винта.

Круглая оптика зажимается тремя роликами 3, раздвигающимися с помощью механизма, напоминающего ирисовую диафрагму, и отличается от последней своей массивностью и жесткостью. Раздвижение роликов осуществляется вращением внутреннего кольца 6 за рукоятку 4. Установленное положение роликов по диаметру зажимаемой детали фиксируется винтовым зажимом 5. Для улучшения крепления деталей на ролики надета резиновая трубка.

Механизм продольного перемещения аналогичен механизму поперечного перемещения и осуществляется поворотом маховичка 8.

Держатели для исследуемых коллиматоров и зрительных труб

Конструкция держателей (рисунок 9) позволяет установить зрительную трубу или коллиматор диаметром от 60 до 90 мм.

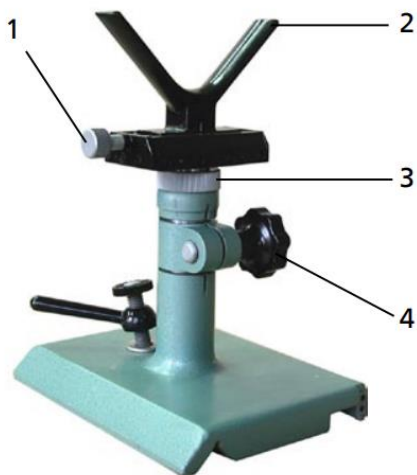


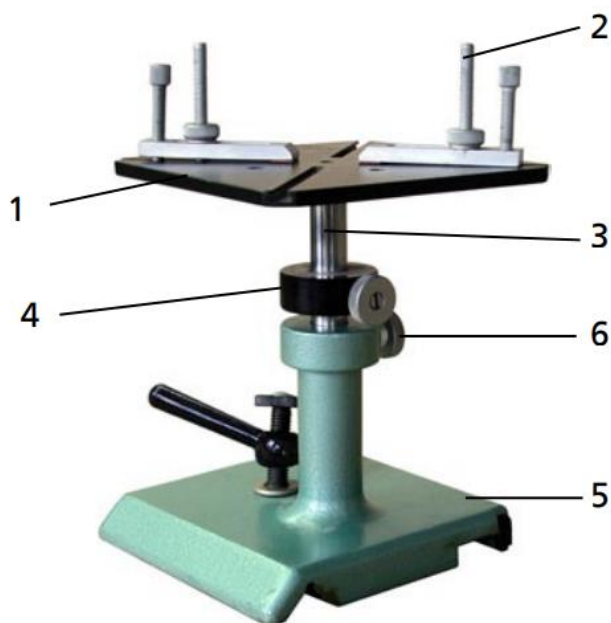
Рисунок 9 – Держатель для исследуемых коллиматоров и зрительных труб

Держатели состоят из двух одинаковых стоек 2, закрепляемых в двух рейтерах. V-образная стойка имеет поперечное юстировочное движение в салазках в пределах ± 5 мм. Поперечное перемещение осуществляется маховичком 1. С помощью гайки 3 стойку можно плавно передвигать по высоте. Фиксация по высоте осуществляется винтом 4. Наличие этих движений позволяет произвести выверку трубы в вертикальной и горизонтальной плоскостях и одновременно параллельное смещение трубы в обоих указанных направлениях.

Столик упрощенный

Столик упрощенный показан на рисунке 10. Это плоский столик 1 без всяких подвижек, за исключением подвижки по высоте. Размер столика 130×130 мм. Столик имеет пять резьбовых отверстий М6 для крепления исследуемых деталей или элементов схем и четыре T-образных паза для установки специального прижима 2 (струбцинки), позволяющего зажимать на столике детали разных конфигураций и размеров. Столик накручен на колонку 3, вместе с которой он может перемещаться по высоте от руки на 60 мм.

На колонке имеется упорный хомутик 4, который можно закреплять в любом положении и который служит для предохранения столика от опускания при ослаблении зажима 6 в колонке рейтера 5. В случае необходимости стойку можно удлинить путем ввертывания дополнительной стойки. Для этого нижний конец колонки имеет резьбовое отверстие. Наружный диаметр колонки равен 15 мм.



11

Рисунок 10 – Столик упрощенный

Столик с крестообразным кремальберным перемещением

Внешний вид столика показан на рисунке 11. Верхняя плоскость столика 3 перемещается в двух взаимно перпендикулярных направлениях с помощью реечных механизмов вращением рукояток 1. Перемещение производится по направляющим типа ласточкин хвост. Диапазон перемещения в каждом направлении ± 30 мм. Зажим столика в любом положении осуществляется тормозной колодкой с помощью зажимных винтов 2. Отсчет перемещения производится по линейным шкалам, цена деления шкал 1 мм. Размер столика 130X130 мм.

Закрепление исследуемых деталей или элементов схем аналогично креплению на простом плоском столике; данный столик имеет пять резьбовых отверстий М6 и четыре Т-образных паза, в которые устанавливается специальный прижим 4 (струбцинка).

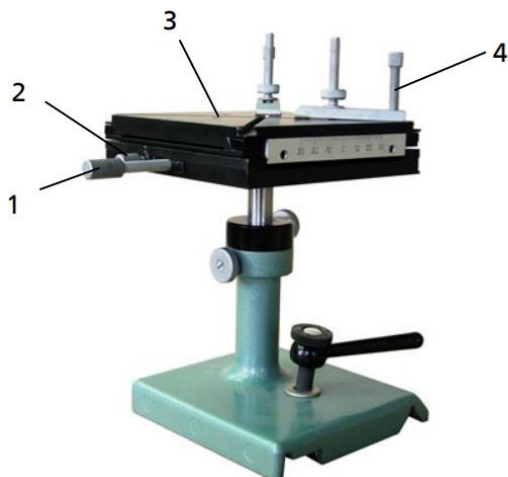


Рисунок 11 – Столик с крестообразным кремальберным перемещением

Столик с одним микрометрическим перемещением

Столик (рисунок 12) служит для всевозможных линейных измерений, требующих точности порядка 0,01 мм. Цена деления микрометрического винта 0,01 мм. По конструкции столик можно отнести к прецизионным приборам. Он может найти широкое применение в лабораторной практике.

С помощью вертикальной колонки столик крепится в рейтере обычного типа. Колонка имеет внешнюю ленточную резьбу.

Подъем и опускание столика производится с помощью резьбовой гайки 2 при ослабленном зажимном винте 3. Отсутствие шпонки позволяет производить микрометрическое перемещение столика в любом направлении в горизонтальной плоскости.

Мертвый ход микрометрической пары выбирается за счет разрезной гайки, стягиваемой резьбовым коническим кольцом, а постоянный контакт между винтом и кареткой обеспечивается двумя пружинами, преодолевающими силу трения в шариковых направляющих.

Для обеспечения правильной работы микропары контакт между винтом и кареткой осуществляется через каленый шарик, запрессованный в микровинте, и каленый подпятник из высоколегированной стали, запрессованный в каретке.

Верхняя плоскость столика имеет резьбовые отверстия М6 для крепления исследуемых деталей.

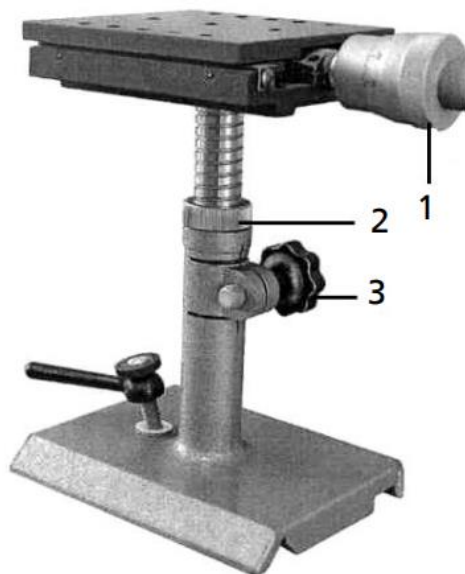


Рисунок 12 – Столик с одним микрометрическим перемещением

Столик поворотный

Поворотный столик (рисунок 13) дает возможность поворачивать закрепленные на нем элементы в двух взаимно перпендикулярных направлениях: вокруг вертикальной оси по горизонту в пределах $\pm 15^\circ$ с точностью отсчета в $1'$ и вокруг горизонтальной оси по высоте в пределах $\pm 3^\circ$. На цилиндрической поверхности резьбовой гайки 3 имеется линейная шкала, указывающая число градусов поворота стола. Индексом для этой шкалы служит срез барабана 2. Минутные деления отсчитываются по шкале, нанесенной на барабане.

Поворот вокруг вертикальной оси осуществляется при помощи особого механизма, суммирующего работу червячной и винтовой пар. Механизм состоит из червячного сектора и червяка, у которого один из подшипников является резьбовой гайкой 3. Вращением маховичка 1 червяк получает одновременно вращательное движение вокруг своей оси и поступательное – вдоль своей оси. Один оборот червяка придает столику поворот на 3° .

Поворот вокруг горизонтальной оси осуществляется с помощью винта, имеющегося на нижней плоскости столика.

Пружина обеспечивает контакт верхнего столика и подъемного винта.

Габарит верхней плиты столика 130×170 мм.

Верхняя плоскость столика имеет четыре Т-образных паза и резьбовые отверстия М6 для крепления исследуемых деталей.

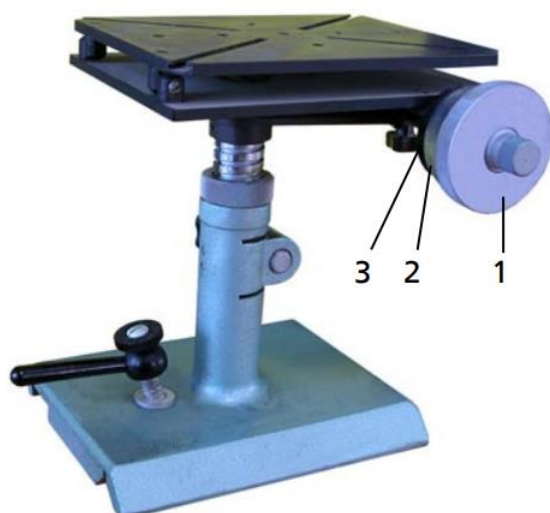


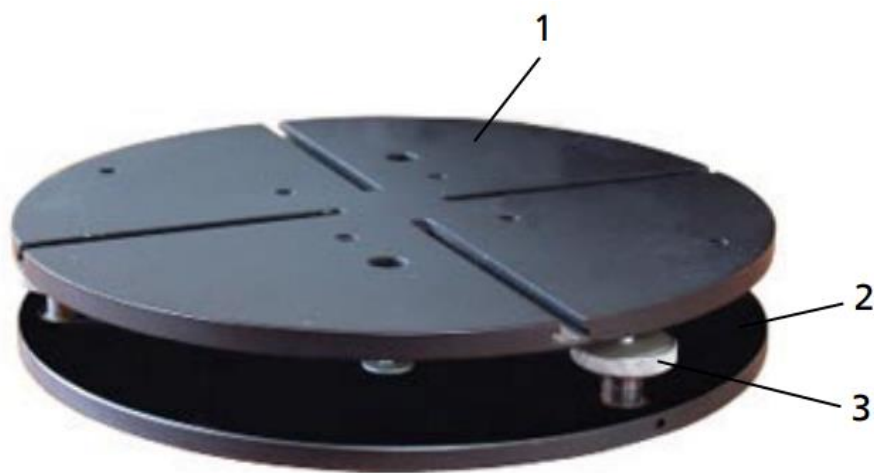
Рисунок 13 – Столик поворотный

Столик качающийся

Таких столиков в комплекте два, $d=150$ и 200 мм. Внешний вид столика показан на рисунке 14. Столики применяются для наклона исследуемых деталей от горизонтальной плоскости в различных направлениях. Угол наклона верхней плоскости столика $\pm 3^\circ$. Конструкция столика проста. Верхняя плоскость столика 1 под действием пружины находится в постоянном контакте с тремя регулировочными винтами 3, которые вращаются во втулках, закрепленных на нижнем диске 2. Вращая регулировочные винты 3, производят наклон верхней плоскости столика.

Верхняя плоскость столика имеет Т-образные пазы, в которые вставляются прижимы, и резьбовые отверстия М6 для крепления исследуемых деталей.

Качающийся столик $d=150$ мм можно поставить при необходимости на столик с одним микрометрическим перемещением, а столик $d=200$ мм – на столик с двумя микрометрическими перемещениями, закрепив их винтами.



3

Рисунок 14 – Столик качающийся

Осветитель с конденсором

Осветитель (рисунок 15) состоит из лампы РН8-20-1, представляющей собой достаточно мощный источник излучения, и двухлинзового конденсора. В оправу конденсора могут быть вставлены сменные светофильтры 7.

Для получения равномерно рассеянного света вместо светофильтра можно вставить матовое или молочное стекло 5, 6 в оправу.

При использовании двух светофильтров одновременно применяется переходное кольцо, в которое вставляются с двух сторон светофильтры в оправках, а затем они вместе вставляются в оправу конденсора. Для закрепления оправы светофильтра в оправе конденсора служит винт 3. Для смены лампы нужно вынуть патрон из патрубка осветителя 2, отвернуть затяжную гайку патрона 1 и вставить новую лампу. В корпусе осветителя имеются отверстия, через которые происходит охлаждение осветителя. Осветитель с конденсором жестко соединен с вертикальной колонкой. Перемещение осветителя по высоте производится аналогично перемещению столиков.

Питание лампы осуществляется через блок питания.

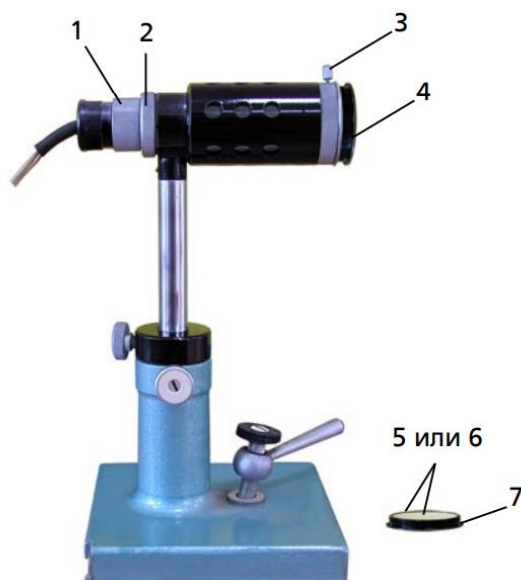


Рисунок 15 – Осветитель с конденсором

Осветитель с ртутно-кварцевой лампой ДРТ240

Осветитель и лампа показаны на рисунках 16 и 17.

Питание ртутно-кварцевой лампы ДРТ240 осуществляется от сети переменного тока с частотой 50 Гц и напряжением 220 В через пусковое устройство.

Пусковое устройство выпускается заводом для работы от сети напряжением 220 В с вставкой плавкой ВП1-1-5,0 А 250 В. После включения в сеть несколько раз быстро нажмите кнопку на пусковом устройстве до загорания лампы. Установившийся рабочий режим лампы наступает через 10–15 минут после ее включения. Пусковое устройство с открытым кожухом включать в сеть ЗАПРЕЩАЕТСЯ.

Для предохранения глаз от действия ультрафиолетового излучения необходимо надевать защитные стекла. Одновременно следует принимать меры предосторожности во избежание ожогов, вызываемых действием ультрафиолетовых лучей.

Лампа находится внутри специального кожуха 3 (рисунок 16), имеющего вентиляционные прорези.

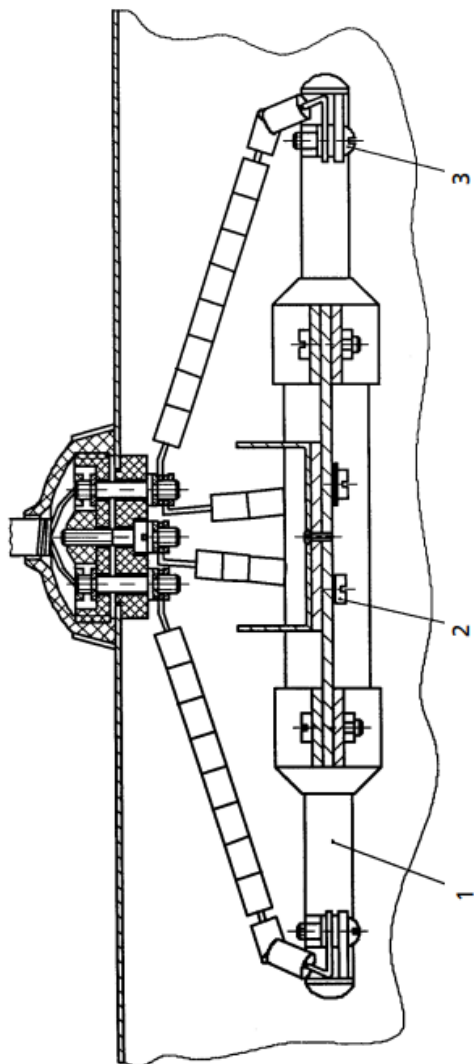
Для охлаждения лампы предусмотрена подводка сжатого воздуха давлением 0,196–0,294 МПа. Сжатый воздух подается в кожух через штуцер 7 и оттуда распределяется горизонтальной трубкой с отверстиями на всю длину лампы. В кожухе имеется съемная крышка 5, позволяющая иметь доступ к лампе. Небольшое круглое отверстие на крышке дает выход света в нужном направлении. Это отверстие может быть закрыто прилагаемыми светофильтрами 4 или матовыми стеклами. Кожух крепится через кронштейн 6 к вертикальной колонке 2, закрепляемой на рейтере. Лампа со стойкой может быть поднята и опущена относительно оптической оси и закреплена в необходимом положении винтом 1.

Для смены лампы ДРТ240 необходимо отвернуть винты на крышке 5, снять крышку, освободить винты 3 (рисунок 17), снять скобы с концов лампы, отвернуть винты 2 и вынуть лампу 1.

При работе с лампой необходимо включать охлаждение лампы сжатым воздухом.



Рисунок 16 – Общий вид осветителя с ртутно-кварцевой лампой ДРТ240



16

Рисунок 17 – Лампа осветителя

Пластинка плоскопараллельная

Плоскопараллельная пластинка (рисунок 18) применяется для выявления параллакса зрительных труб и коллиматоров при помощи автоколлимации.

Пластинка 5 имеет световой диаметр 146 мм. Клиновидность пластинки не превышает 1", плоскостность – 0,5 полосы. Пластинка пружинным кольцом 1 закрепляется в оправе 6, которая устанавливается на мостике 4. Для регулировки положения пластинки имеются три установочных винта 3, которые вращаются в разрезных втулках, служащих для устранения люфта и качки установочных винтов. Винт 2 служит для закрепления мостика с плоскопараллельной пластинкой на столике.



Рисунок 18 – Плоскопараллельная пластинка

Столик двухкоординатный с преобразователями линейных перемещений

Столик (рисунок 19) перемещается в двух взаимно перпендикулярных направлениях при помощи механизмов перемещения маховичками 1 и 3. Линейные преобразователи позволяют регистрировать величину перемещения с выводом информации на табло цифрового отсчетного устройства (УЦО).

Столик с колонкой крепится в рейтере и имеет вертикальное перемещение гайкой 5. Рукоятка 6 позволяет зафиксировать столик с колонкой в установленном положении по высоте.

17

Круглый стол 2 вращается от руки, имеет пазы и резьбовые отверстия для крепления исследуемых деталей и элементов.

Рейтер со столиком устанавливается на оптической скамье и фиксируется рукояткой 4.

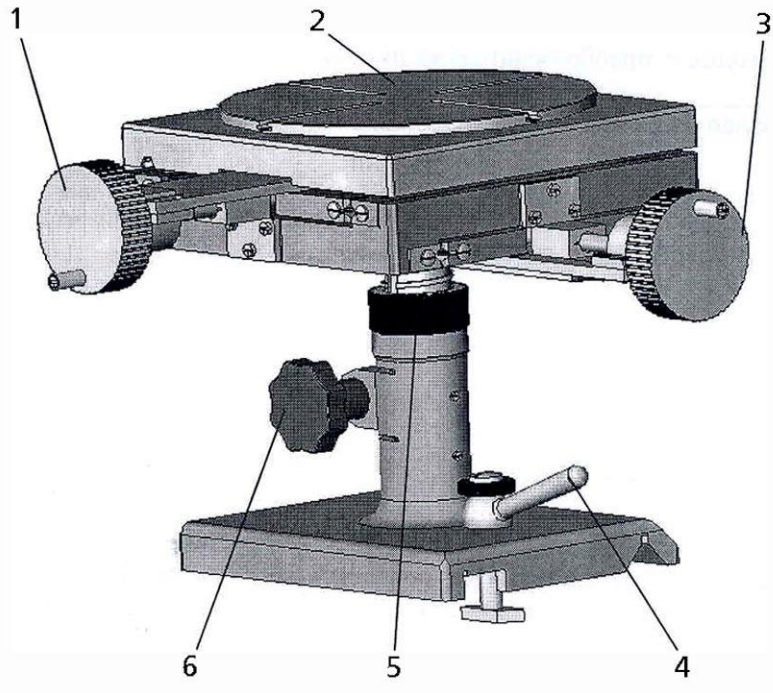


Рисунок 19 – Столик двухкоординатный с преобразователями линейных перемещений

Электронная часть столика

Электронная часть столика включает в себя преобразователи линейных перемещений и цифровое отсчетное устройство. Блок- схема показана на рисунке 20.

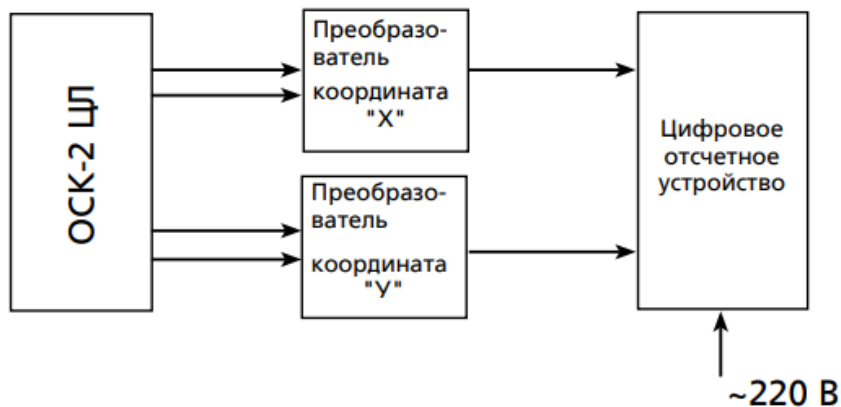


Рисунок 20 – Блок-схема с преобразователями линейных перемещений

Описание и принцип работы цифрового отсчетного устройства даны в руководстве по эксплуатации на УЦО.

Примечание – Руководство по эксплуатации на УЦО поставляется совместно с УЦО.
Объектив

Конструкция и внешний вид объектива показаны на рисунке 21. Оправа 1 предназначена для крепления сменных объективов 2 с фокусными расстояниями 250 и 500 мм. Оправа имеет подвижку вокруг горизонтальной оси и фиксируется в требуемом положении маховичками 3,

5. Оправа закреплена на колонке 4, которая устанавливается в рейтере. Крепление колонки в рейтере аналогично креплению колонки столика, показанного на рисунке 13.



Рисунок 21 – Объектив

Микрообъектив

Конструкция и внешний вид микрообъектива показаны на рисунке 22. Микрообъектив 3 с диафрагмой 2 предназначен для расширения луча лазера и улучшения фронта волны. Он закреплен в корпусе 4, вращающемся вокруг горизонтальной оси в кронштейне 7. В нужном положении корпус фиксируется маховичками 5. Диафрагма размещена в фокусе микрообъектива и перемещается в двух взаимно перпендикулярных направлениях маховичками 1. Кроме того, она имеет возможность двигаться вдоль оптической оси микрообъектива с помощью винта 6.

Кронштейн навинчен на колонку 9, перемещающуюся в рейтере. В нужном положении колонка фиксируется маховичками 8, 10.

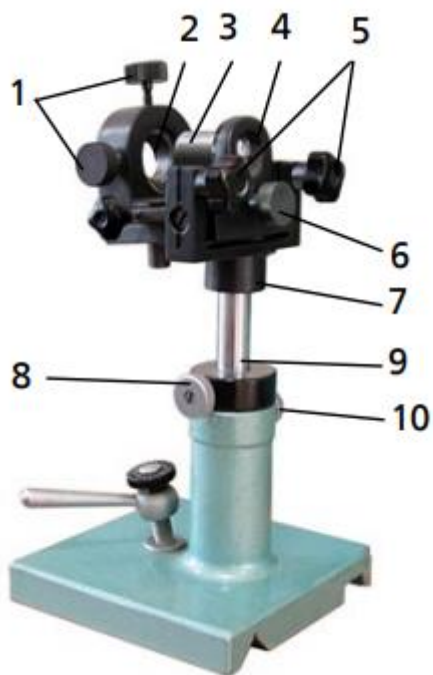


Рисунок 22 – Микрообъектив

Держатель для лазера газового

Держатель (рисунок 23) предназначен для установки лазера газо- вого.



20

Рисунок 23 – Держатель для лазера газового

Держатель имеет два кронштейна 2, 8, скрепленных между собой пружинящей пластинкой. Кронштейн 8 крепится к колонке. Колонка имеет на своей внешней цилиндрической поверхности ленточную резьбу с крупным шагом и с помощью гайки 7 может плавно перемещаться вверх и вниз

относительно рейтера. Это обеспечивает необходимое удобство и точность при установке по вертикали. Винт 6 служит для закрепления подвижной колонки в необходимом положении по высоте. Для предохранения подвижной колонки от поворота в горизонтальной плоскости во время ее подъема в конструкции имеются шпонка внутри рейтера и шпоночный паз на всю длину подъема. Горизонтальное перемещение кронштейна 2 производится винтом 4, вертикальное – винтом 5. Держатель уста- навливается на станине и закрепляется зажимом.

Лазер устанавливается во втулке 3 и зажимается винтом 1.

Блок питания

Питание ламп осветителей типа ОП8-0,6 и РН8-20-1 осуществля- ется от сети переменного тока через блок питания, имеющий два выхода, один из которых регулируемый.

Электрические характеристики блока питания

Напряжение сети, В	220
Суммарная выходная мощность, Вт	25
Напряжение на каждом выходе, В	8
Максимальный ток по каждому выходу, А	3,1
Частота, Гц	50

Блок питания имеет кожух, предохраняющий от случайного прикосновения к частям, находящимся под напряжением, и защи- щающий их от механических повреждений, от попадания внутрь жидкостей и загрязнений.

Для жесткого крепления блока питания к столу винтами или шу- рупами в корпусе его имеются два отверстия.

Уровень накладной

Накладной уровень (рисунок 24) предназначен для горизонталь- ной установки станины, столиков, любых плоскостей и труб, а также для определения угла их наклона (если он достаточно мал). Уровень состоит из корпуса 2 и заглипсованной внутри него ампулы 1. Кор- пус привертывается к основанию 3, на нижней плоскости которого имеется продольный паз с углом 120°.

Ребро от пересечения плоскостей угла 120° строго параллельно оси ампулы и нижней плоскости основания.

Продольный паз облегчает установку уровня на цилиндрических поверхностях различных диаметров.

Цена деления ампулы уровня 1'. Чувствительность уровня 12".

Уровень входит в комплект автоколлиматора АКТ-15. 21



Рисунок 24 – Уровень накладной

Щель спектральная с переходной втулкой

Щель спектральная 1 (рисунок 25) с ценой деления на барабане 0,001 мм скрепляется с переходной втулкой 3 шестью винтами 2. Переходная втулка по диаметру 34Д может быть вставлена в коллиматор или универсальную оправу. При максимальном раскрытии щели до 0,4 мм погрешность отсчета – не более 0,006 мм.



Рисунок 25 – Щель спектральная

Комплект мир, светофильтров, сеток, окуляров и приспособлений автоколлимационных

В комплекте скамьи имеются миры, диафрагмы, сетки, свето- фильтры и окуляры, которые могут быть использованы при работе с коллиматором.

Миры

Предельные разрешения от 0,64 до 41,3”.

Миры изготовлены фотопутем и заклеены покровным стеклом для предохранения их от порчи. Миры являются дорогостоящими деталями, поэтому оправка, в которой закреплена мира, имеет дополнительное защитное стекло. Миры используются при работе на коллиматоре для определения разрешающей способности и качества изображения ²²оптических систем, объективов, плоскопараллельных пластин, призм и т.д.

В имеющийся револьвер 8 (рисунок 5) коллиматора могут быть вставлены сразу все 5 мир, и исследователь может включить необ- ходимую из них.

Светофильтры

Для работы в монохроматическом свете прилагаются зеленый, красный, оранжевый и синий светофильтры. Светофильтры в своей оправе надеваются на любой из осветителей. На осветитель также может быть надето матовое или молочное стекло.

Чтобы иметь возможность одновременно использовать и свето- фильтры и матовое или молочное стекло, в комплекте предусмот- рена переходная оправка 4 (рисунок 15).

Сетки

На рисунке 26 показаны двенадцать сеток I-XII и контрольная пластинка XIII.

Типы сеток

- перекрестие простое с тонким штрихом.
- перекрестие простое с утолщенным штрихом. III – узкий биссектор.
- широкий биссектор.
- узкий и широкий биссекторы одновременно. VI – двойное перекрестие под углом 8° .
- VII – двойное перекрестие под углом 16° . XIII – разные комбинации перекрестий.
- IX – с биссектором. X – с биссектором. XI – с биссектором. XII – с биссектором.

Сетки закреплены в оправках 3 (рисунок 27). Любая из оправ со своей сеткой вставляется во втулку 2 и вынимается из нее с помощью специального проволочного ключа, приложенного к комплекту сеток.

Втулка со вставленной в нее оправой с сеткой может быть зажата в окулярной части коллиматора или через втулку 1 в зрительной трубе.

На контрольной пластинке XIII (рисунок 26) нанесены шкала и перекрестие. В обе стороны от перекрестия нанесено по 25 делений. Цена деления – 1 мм.

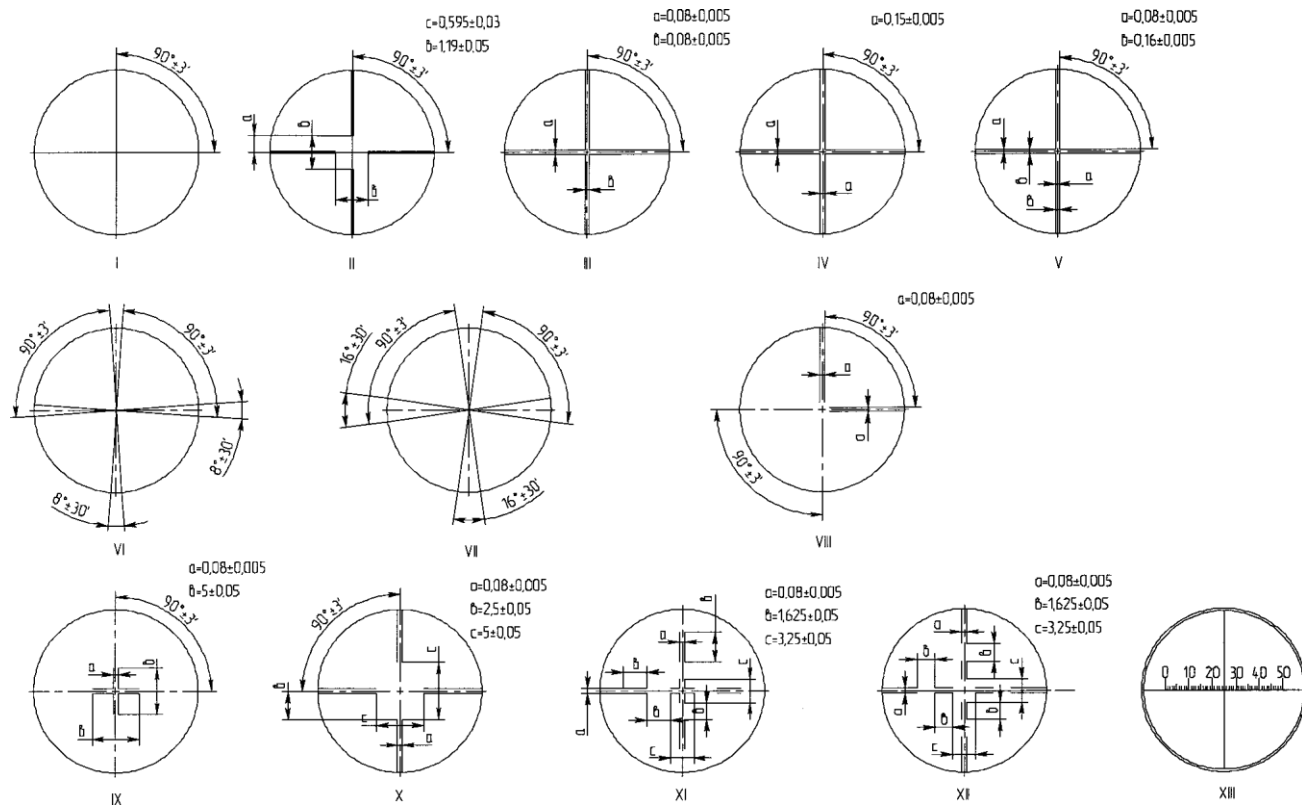


Рисунок 26 – Сетки и контрольная пластинка

Окуляры

Оптические характеристики

Фокус окуляра, мм	Увеличение, крат	Рабочее расстояние, мм	Поле зрения, мм	Диаметр тубуса, мм
12,41	20	-3,18	10	23,2
14,94	16,7	-4,92	13	23,2
19,74	12,5	-13,94	17	23,2
25	10	-8,6	17	23,2
30,2	8,3	-28,36	17	23,2
41,63	6	-36,08	9,5	23,2

Все окуляры имеют одинаковый посадочный диаметр, равный 23,2X мм, фокусировка окуляров на сетке производится от руки за счет продольного движения окуляров во втулке, поэтому любым из имеющихся в комплекте окуляров можно рассматривать любую сетку.

Автоколлимационный окуляр бх типа Гаусса отличается от обыкновенного окуляра тем, что за глазной линзой помещается наклонная плоскопараллельная пластинка и в тубусе окуляра имеется отверстие для доступа света от осветителя, помещаемого сбоку окуляра. Свет от осветителя, попадая на наклонную пластинку, отклоняется последним по направлению к сетке, освещает ее и тем самым дает возможность видеть при соответствующих условиях автоколлимационное изображение сетки. Фокус окуляра выбран сравнительно большим, чтобы получить при данной конструкции (однолинзовой) большой рабочий отрезок для размещения наклонной пластинки. Наклонная пластинка изготовлена из стекла, имеет светоделительное покрытие, обеспечивает достаточное освещение сетки и вместе с тем пропускает при обратном ходе лучей достаточно света для рассматривания автоколлимационного изображения сетки.

Кроме указанных окуляров, в комплект прибора включен окуляр-микрометр обычного типа с точностью отсчета в 0,01 мм. Окуляр-микрометр может быть закреплен через переходную втулку на коллиматоре.

Наличие окуляра-микрометра расширяет возможность использования скамьи как измерительного прибора.

Приспособления автоколлимационные

Автоколлимационные приспособления показаны на рисунке 27.

Автоколлимационное приспособление 8 с кубиком состоит из специальной оправы, внутри которой закреплены призма-куб, автоколлимационная сетка и простая сетка. На автоколлимационной сетке имеются перекрестия и угловая шкала в пределах $\pm 5'$ через $15''$.

Призма-куб состоит из двух прямоугольных призм, склеенных вместе, причем в плоскости склейки имеется светоотражающее покрытие, отражающее 25 процентов света. Свет на автоколлимационную сетку поступает от осветителя, прикрепленного сбоку к окуляру.

Приспособление своим посадочным цилиндром $\varnothing 34$ мм крепится одним концом в окулярную часть коллиматора, а в другой может быть вставлен любой из имеющихся в комплекте окуляров для рассматривания автоколлимационного изображения сетки.

Автоколлимационное приспособление 4 с пластинкой, склеенной из двух частей под углом 45° , представляет собой плоскопараллельную пластинку, склеенную из двух частей по плоскости, расположенной под углом в 45° к оптической оси окуляра. В плоскости склейки нанесен светоотражающий слой с коэффициентом отражения $\rho = (50 \pm 5)\%$ и коэффициентом пропускания $\tau = (50 \pm 5)\%$. Пластинка находится в оправе, которая может быть вставлена во втулку 2. Сюда же могут быть вставлены окуляры 12,5х; 8,3х.

Общее действие пластинки таким образом сводится к следующему. Свет от осветителя через отверстие во втулке и оправе пластинки попадает на наклонную плоскость, частично отражающую свет, отражается от нее и освещает автоколлимационное перекрестие. При обратном ходе лучей частично отражающий слой пропускает достаточно света для рассматривания изображения.

Таким образом, это приспособление позволяет так же, как окуляр Гаусса, иметь автоколлимационное изображение перекрестия, находящегося на оптической оси прибора, и отличается преимуществом: использование более сильных окуляров с меньшим рабочим расстоянием.

Автоколлимационное приспособление со склейкой сетки призмой представляет собой следующее. На сетке выше центра нанесена шкала в $\pm 6'$ через $15''$. Шкала заклеена призмой, в катет которой поступает свет для освещения шкалы. Сетка с приклеенной призмой в оправе находится в своей втулке, которая, в свою очередь, может быть закреплена в окулярной части коллиматора. Аналогично предыдущим окулярам для рассматривания изображения могут быть использованы любые из окуляров, имеющихся в комплекте, рабочее расстояние которых больше 5 мм. Общее действие приспособления сводится к следующему. Свет от осветителя поступает в приклеенную призму и освещает шкалу. После автоколлимации будем иметь изображение шкалы в нижней части поля зрения, рассматриваемое любым окуляром с соответствующим рабочим расстоянием.

Все приспособление представляет собой разновидность автоколлимационного окуляра Аббе, в котором поле зрения доступно исследованию окулярами разной силы.

К коллиматору прикладывается регулируемая сетка в оправе со шкалой в пределах $\pm 20'$ с ценой деления $30''$. Сетка, в основном, предназначена для измерения фокусов объективов, она не приспособлена для использования вместе с окуляром. Эта сетка крепится к оправе 6 (рисунок 27) и имеет юстировочное движение с помощью винтов 5 по обоим направлениям координатных осей. Снаружи сетка защищена стеклом 7.

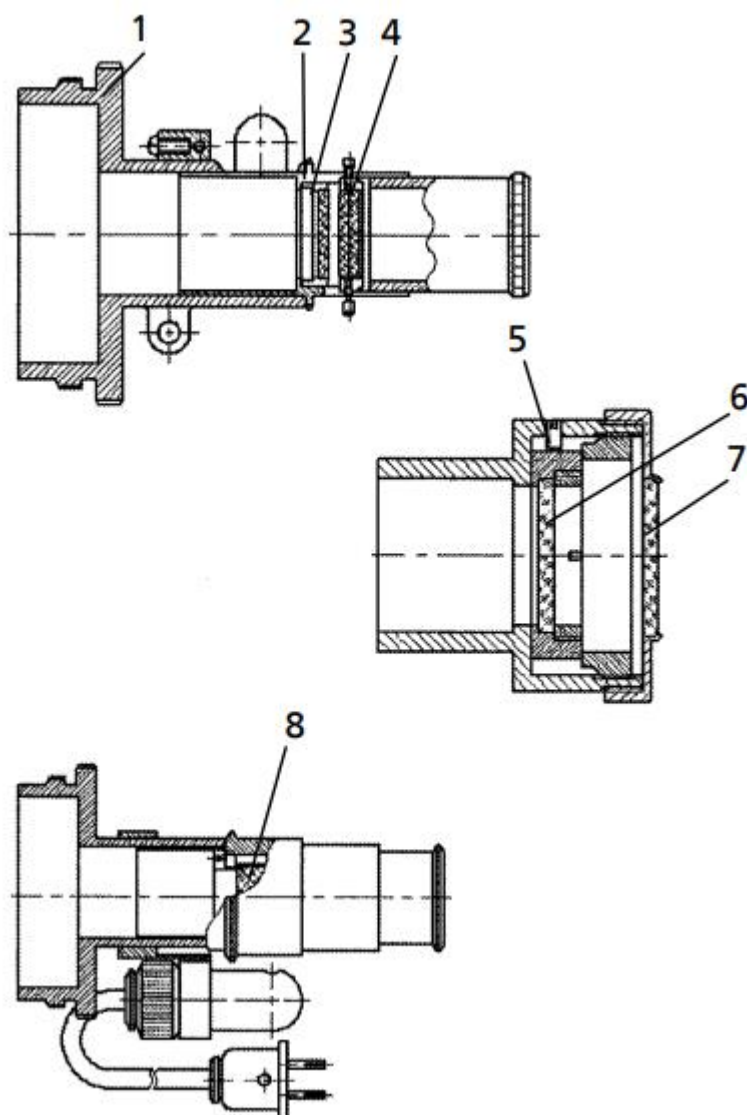


Рисунок 27 – Автоколлимационные приспособления

Вопросы для самоконтроля

1. Что представляет собой оптическая скамья ОСК-2ЦЛ?
2. Какие основные элементы входят в состав оптической скамьи ОСК-2ЦЛ?
3. Для каких целей предназначена оптическая скамья ОСК-2ЦЛ?
4. Какие типы оптических элементов можно размещать и исследовать на скамье ОСК-2ЦЛ?
5. Как осуществляется крепление и центрирование оптических элементов на скамье?
6. Какие механизмы регулировки элементов предусмотрены в конструкции ОСК-2ЦЛ?
7. Какие типы источников света можно использовать на оптической скамье?
8. Как обеспечивается юстировка и выставление оптической схемы на скамье ОСК-2ЦЛ?
9. Какие виды измерений можно проводить с помощью оптической скамьи ОСК-2ЦЛ?
10. Каким образом осуществляется фокусировка светового пучка на скамье?
11. Какие демонстрационные эксперименты можно выполнять на ОСК-2ЦЛ?
12. Как производится смена и перемещение приемника излучения на скамье?
13. Какие типы оптических явлений можно исследовать с использованием ОСК-2ЦЛ?

14. Каково назначение выдвижных штативов в конструкции оптической скамьи?
15. Какие дополнительные приспособления и аксессуары могут применяться с ОСК-2ЦЛ?

Лабораторная работа № 2. «Определение расстояния между щелями в опыте Юнга»

1. Цель и задачи работы

Определение расстояния между щелями по интерференционной картине в схеме опыта Юнга.

2. Основные теоретические положения

Одним из первых ученых кто наблюдал явление интерференции был Томас Юнг, который в 1802 году получил интерференционную картину в установке показанной на рисунке 1. Свет, предварительно прошедший через светофильтр, проходя через отверстие S в экране A , падал на экран B , в котором были проделаны две тонкие щели S_1 и S_2 . Эти щели являлись когерентными источниками света и давали достаточно четкую картину интерференции на экране C . В настоящей лабораторной установке вместо обычного источника света со светофильтром для повышения степени когерентности используется лазер. Принцип формирования интерференционной картины представлен на рисунке 2.

Где S_1 и S_2 – источники когерентного излучения, s_1 и s_2 – пути света от источников до точки наблюдения P , d – расстояние между щелями, L – расстояние между экранами B и C . Разность фаз колебаний возбужденных волнами, приходящими в точку P от источников S_1 и S_2 , равна:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta,$$

где $\Delta = ns_2 - ns_1$; n – показатель преломления среды.

Отсюда следует, что если в Δ укладывается целое число длин волн ($\pm m\lambda_0$), где λ_0 – длина волны в вакууме, то разность фаз оказывается кратной 2π , и в этой точке будет наблюдаться интерференционный максимум.

Если в Δ укладывается полуцелое число длин волн [$\pm (m+1/2)\lambda_0$], то будет возникать интерференционный минимум.

Из геометрии рисунка 2 видно, что

$$s_1^2 = L^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2; \quad s_2^2 = L^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2$$

откуда

$$s_1^2 - s_2^2 = (s_2 + s_1)(s_2 - s_1) = 2xd.$$

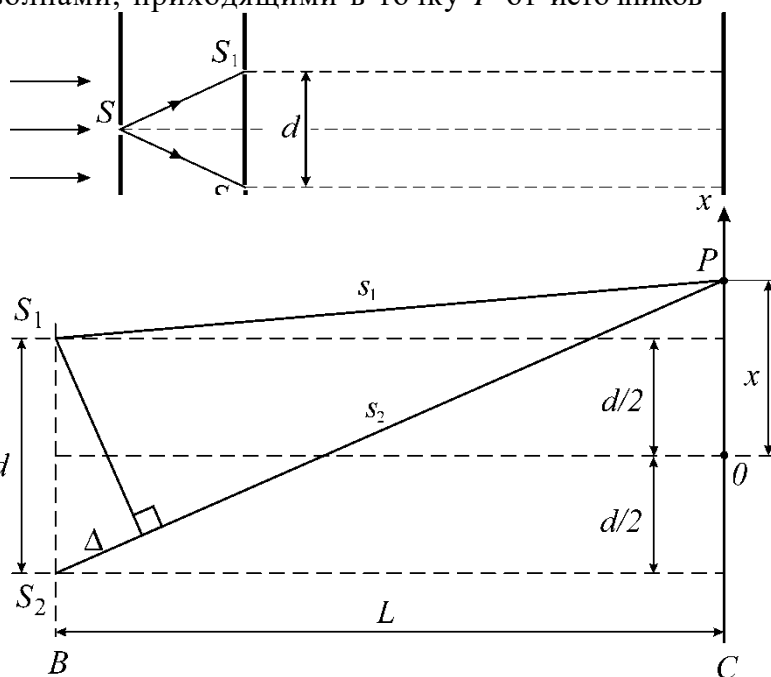


Рисунок 2

Учитывая, что $d \ll L$ и умножив последнее равенство на n – показатель преломления среды получим оптическую разность хода $\Delta = n \frac{xd}{L}$.

Подставим в это выражение условия наблюдения максимума и минимума интерференции; получим соответственно:

$$x_{\max} = \pm m \frac{L}{d} \lambda,$$

$$x_{\min} = \pm \left(m + \frac{1}{2} \right) \frac{L}{d} \lambda;$$

где ($m = 0, 1, 2, \dots$).

Ширина интерференционной полосы на экране будет определяться соотношением

3. Объекты и средства исследования

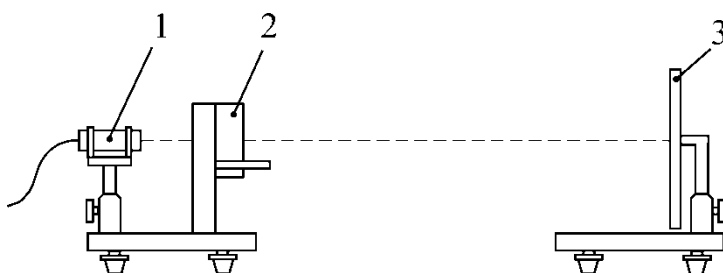


Рисунок 3 – Схема лабораторной установки

Схема лабораторной установки представлена на рис.3. Источником света служит полупроводниковый (GaAs) лазер 1. Параллельный световой пучок освещает фотолитографический тест-объект 2 (см. рис.4), который представляет собой тонкий стеклянный диск с непрозрачным покрытием, на котором по кругу параллельно радиусу нанесены пары щелей с разными расстояниями между ними (ряд С). Пары щелей равной ширины объединены в группы по четыре. В пределах групп изменяются расстояния между щелями. Свет, интерферируя на паре щелей падает на экран 3, на котором и проводятся измерения параметров интерференционной картины (Δx).

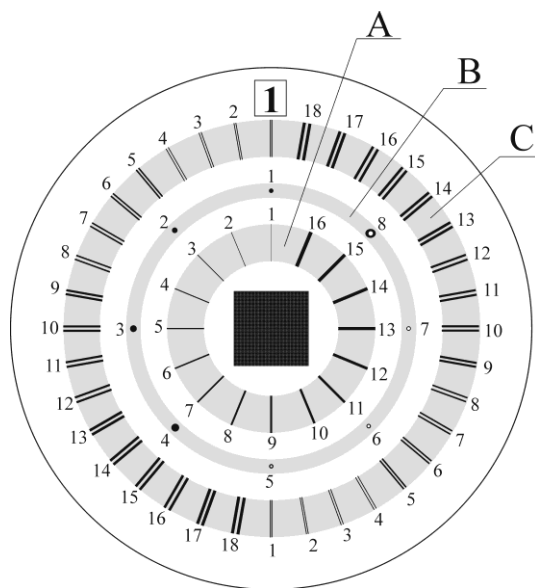


Рисунок 4 - Фотолитографический тест-объект

4. Задание на работу

Определить расстояние между щелями тест-объекта.

Таблица 1

№ варианта	Номера пар щелей			
	1	1	5	9
2	2	6	10	14
3	3	7	11	15
4	4	8	12	16
5	1	6	11	16
6	2	7	12	17
7	3	8	13	18
8	4	6	9	14

5. Порядок выполнения работы

1. Добиться четкого изображения интерференционных полос.
2. Провести пять измерений ширины интерференционной полосы для каждой из пар щелей, указанных в таблице 1. Полученные данные усреднить. Данные занести в таблицу 2, где $\Delta\tilde{x}$ - усредненное значение ширины интерференционной полосы.

Таблица 2

№ изм.	Номер пары щелей			
	1			
2				
3				
4				
5				
$\Delta\tilde{x}$				

3. По результатам измерений, зная величину L (она равна сумме расстояний между экраном и зеркалом и зеркалом и фотолитографическим объектом) и длину волны излучения лазера ($\lambda = 632,8$ нм) рассчитать расстояние между щелями по формуле:

$$d = \frac{L}{\Delta x} \lambda .$$

Получится по одному значению d для каждой пары щелей из группы. Полученные результаты занести в таблицу 3.

Таблица 3

№ пары щелей				
d (мкм)				

6. Содержание отчета

Отчет должен содержать результаты экспериментальных измерений, а также результаты расчетов в соответствии с пунктами работы.

7. Контрольные вопросы

1. Что такое интерференция?
2. Как зависит положение максимумов и минимумов от расстояния между щелями в опыте Юнга?
3. Как устроена установка для наблюдения интерференционной картины в опыте Юнга?

Лабораторная работа № 3. «Исследование закона Малюса»

1. Цель и задачи работы

Проверка экспериментальным путем закона Малюса.

2. Основные теоретические положения

Из электромагнитной теории света следует, что световая волна является поперечной, то есть три вектора: напряженность электрического поля E , напряженность магнитного поля H и волновой вектор k взаимно перпендикулярны. Свет от обычных источников состоит из множества цугов волн, световой вектор E которых ориентирован в поперечной плоскости случайным образом, а колебания различных направлений равновероятны. Такой свет называется естественным.

Свет, в котором направления колебаний светового вектора упорядочены каким-либо образом, называется *поляризованным*. Процесс получения поляризованного света называется *поляризацией*. Если колебания вектора E происходят в одной плоскости относительно луча, то свет считается *плоскополяризованным* (или *линейно поляризованным*). Свет, в котором имеется преимущественное направление колебаний вектора E , называют *частично поляризованным*.

Плоскость, содержащую волновой вектор k и магнитный вектор B (т.е. перпендикулярную вектору напряженности электрического поля E), называют *плоскостью колебаний* или плоскостью поляризации.

Поляризация света наблюдается при отражении, преломлении и при прохождении света через анизотропные вещества. Всякий прибор, служащий для получения поляризованного света (независимо от физических эффектов, используемых при этом), называется *поляризатором*. Визуально поляризованный свет нельзя отличить от неполяризованного. Исследование поляризованного света осуществляют с помощью того же прибора, называемого в этом случае *анализатором*.

Закон Малюса.

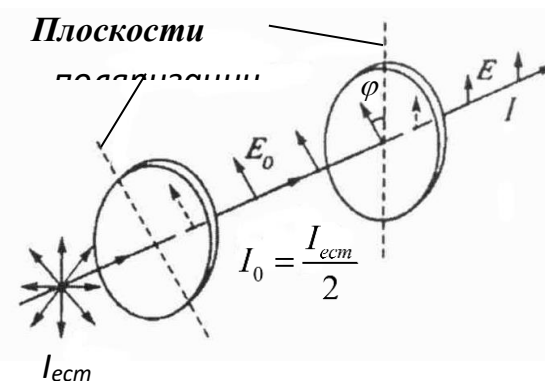


рис. 1

Пусть свет на своем пути проходит через поляризатор и анализатор, причем угол между их плоскостями поляризации составляет φ (рис. 1). После поляризатора выйдет свет, интенсивностью I_0 . Согласно *закону Малюса* после анализатора мы получим свет, интенсивность которого определяется выражением

$$I = I_0 \cdot \cos^2 \varphi.$$

В справедливости этого выражения нетрудно убедиться, вспомнив, что интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды E .

Если частично поляризованный свет пропускать через анализатор, то интенсивность I прошедшего света будет меняться в зависимости от положения плоскости поляризации анализатора. Она достигает максимального значения, если плоскость поляризации анализатора и плоскость преимущественных колебаний частично поляризованного света совпадают. Если же эти плоскости перпендикулярны друг другу, то интенсивность света, прошедшего через анализатор, будет минимальной.

ЭЛЛИПТИЧЕСКАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА.

Две когерентные плоскополяризованные световые волны, плоскости колебаний которых взаимно перпендикулярны, при наложении друг на друга дают эллиптически поляризованную световую волну (рис. 2). Координаты конца результирующего вектора E определяются выражениями

$$E_x = A_1 \cdot \cos \omega t, \quad E_y = A_2 \cdot \cos(\omega t + \delta).$$

где δ – разность фаз между компонентами вектора.

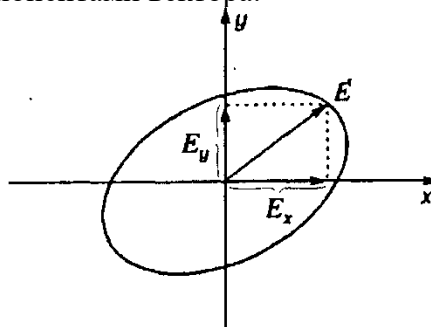


Рис. 2

При разности фаз δ , равной нулю или π , эллипс вырождается в прямую и получается плоскополяризованный свет. При $\delta = \pi/2$ и равенстве амплитуд складываемых волн эллипс превращается в окружность - получается свет, поляризованный по кругу. В зависимости от направления вращения вектора E различают правую и левую эллиптическую поляризацию. Если по отношению к направлению луча вектор E вращается по правилу правого винта, поляризация называется правой, в противном случае - левой.

ПРОХОЖДЕНИЕ ПЛОСКОПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА ЧЕРЕЗ КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ ПЛАСТИНКУ.

При прохождении света через прозрачные кристаллы может наблюдаться явление *двойного лучепреломления*, заключающееся в том, что упавший на кристалл луч разделяется внутри кристалла на два луча - *обыкновенный* и *необыкновенный*. Исследования показывают, что помимо прочих различий эти лучи полностью поляризованы во взаимно перпендикулярных направлениях, связанных с собственными осями кристалла. Оптической осью кристалла называют некоторое выделенное направление, относительно которого свойства кристалла обладают симметрией.

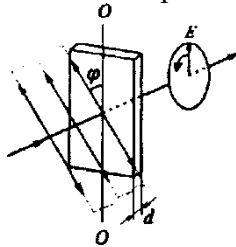


Рис. 3

	2													
\bar{I} , мА														

2. Произвести указанные измерения дважды и рассчитать средние значения тока \bar{I} по результатам измерений.

3. Построить график зависимости $\bar{I} = f(\cos^2 \varphi)$.

6. Содержание отчета

- 1) краткие теоретические сведения,
- 2) описание эксперимента,
- 3) результаты экспериментальной проверки закона Малюса,
- 4) выводы по полученным экспериментальным данным.

7. Контрольные вопросы

1. Какой свет называется поляризованным?
2. Что называется поляризатором?
3. Что такое четвертьволновая пластинка?
4. Чем различаются обыкновенный и необыкновенный лучи?
5. Что такое двойное лучепреломление и какие оптические материалы его осуществляют?
6. Что описывает закон Малюса?
7. Какие существуют виды поляризации?
8. Что такое плоскость поляризации?

Лабораторная работа № 4. «Исследование оптических компакт-дисков»

1. Цель и задачи работы

Знакомство с устройством и принципами хранения информации на оптических лазерных дисках. Использование явления дифракции света для определения плотности записи и объема записанной информации. Оценка максимально достижимой плотности записи на лазерных компакт-дисках и минимальных размеров привода CD ROM.

2. Основные теоретические положения

Цифровой способ записи данных применяется не только в компьютерной технике. Эта форма записи очень устойчива к различного рода помехам. При считывании цифровой записи амплитуда сигнала, в отличие от аналоговой формы, не важна. Важно лишь наличие или отсутствие сигнала. Поэтому в настоящее время этот способ хранения информации используется в очень многих отраслях науки и техники. Самым доступным примером этому являются audio- и video-диски.

Все виды оптических дисков имеют разную плотность записи в различной кодировке, что приводит к большим отличиям в их информационной емкости.

Внимание !!!

В этой работе речь идет только об однократно записываемых оптических компакт-дисках. Работа оптических дисков, позволяющих многократно реализовывать цикл запись-стирание, основана на других физических принципах.

Принцип записи и хранения информации на CD

В отличие от магнитных носителей (FDD и HDD), где 1 и 0 отличаются наличием или отсутствием намагниченности магнитного слоя накопителя, на лазерных дисках каждый *бит* записан в виде наличия или отсутствия отражения лазерного луча от поверхностного оптического диска. Различают два основных технологических процесса изготовления компакт-дисков: для индивидуальной записи и для выпуска серии одинаковых дисков.

Индивидуальная запись

Осуществляется на пишущем CD ROM непосредственно на компьютере. В этом случае она ведется на специальные матрицы с тонким (несколько микрометров) слоем напыленного в вакууме металла с высоким коэффициентом отражения в ИК-области спектра. Для этого чаще всего используется Au.

Металлический отражательный слой наносится на непрозрачное пластиковое термопластичное основание и сверху покрывается слоем прозрачной пластмассы, призванной защищать его от внешних воздействий.

Перед началом записи в записывающем устройстве матрица немного подогревается.

В процессе записи в месте фокусировки луча ИК-лазера в нагретом термопласте подстиляющего слоя происходит фотохимическая реакция, в результате которой происходит структурная перестройка поверхностного слоя — ранее гладкая поверхность становится матовой. Поскольку на подстиляющий слой предварительно нанесен отражающий металлический слой, то в данном месте он также становится матовым. Из-за потери зеркальности луч лазера, попадающий на этот участок поверхности при считывании, рассеивается, а в приемный фотодатчик света попадает значительно меньше, чем от неповрежденного зеркального участка.



Рис.1. Примерно так выглядит поверхность компакт-диска при большом увеличении (черным цветом показаны участки с нарушенным отражающим слоем)

Сигнал, пришедший от зеркального участка отражающего слоя, интерпретируется как 1, а от матового — как 0.

Эти участки диска (матовый и зеркальный) получили название пиксели. На каждом из таких пикселей записывается 1 бит информации. Иногда их еще называют пикселиками.

И при записи и при считывании диск вращается с постоянной угловой скоростью. Поэтому пиксели должны были бы представлять собой очень маленькие отрезки дуг, длина которых зависит от радиуса. Однако с помощью регулировки длительности лазерного импульса в зависимости от расстояния до оси вращения, длина всех пикселей делается одинаковой.

При выпуске серии компакт-дисков

на отражающей поверхности (она здесь открыта) сначала записывается так называемый мастер-диск.

При этом лазерный луч уже прожигает (испаряет) отражательный слой. В результате получается зеркальный металлический слой с рядом мельчайших отверстий (пикселей).

Далее на отражательный слой, содержащий информацию в виде пикселей, химическим или другим путём осаждается слой другого металла (чаще, никеля) в несколько миллиметров толщиной.

После отделения (например, растворения) первого отражательного слоя получается штамп с микроскопическими выступами в тех местах, где лазер при записи уничтожил отражательный слой.

С помощью полученного штампа на термопластичной пластмассе изготавливается нужное количество копий мастер-диска. При этом каждому отверстию в отражающем слое мастер-диска на штампованной копии соответствует углубление в термопласте.

После штамповки на каждый диск в вакууме напыляется Al, а поверх него наносится защитный слой прозрачной пластмассы (лака).

В результате вид записанной информации на штампованном *серийном диске*, становится несколько иным, чем на *индивидуальном*.

Понять происходящие при этом процессы может помочь схема, показанная на Рис.2.

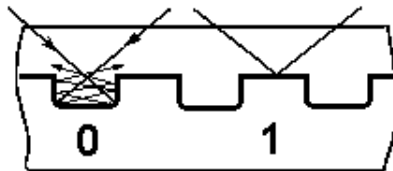


Рис.2. Схематичный разрез компакт-диска, изготовленного штамповкой

Из-за реальных размеров пиков (пикселей) в несколько мкм определяющую роль здесь играют уже волновые свойства света (о них речь пойдет ниже). Но и такая (грубая и, в общем, не очень корректная с этой точки зрения) геометрическая интерпретация поведения световых лучей показывает, что при попадании на углубление (0) свет рассеивается и в апертуру приемной линзы его попадет уже во много раз меньше, чем при отражении от ровной поверхности (1).

Размеры пика (пикселя) зависят от характеристик лазерного излучения, параметров фокусирующей линзы, скорости вращения диска при записи и

расстояния до оси вращения. Однако в среднем по всей поверхности диска можно с достаточной для оценки степенью точности считать длину *пика (пикселя)* равной ширине.

Устройство считывающей головки CD-привода

Считывание информации с CD производится с помощью специальной головки, устройство которой схематично показано на Рис.3.

И фокусировка лазерного излучения и соби́рание отраженного от поверхности CD света осуществляется одной линзой.

Часть излучения лазера светоделительным кубиком направляется на линзу и фокусируется на отражающую поверхность оптического диска. Если лазерный луч попадает на неповрежденный участок зеркального покрытия, то отраженное от него излучение собирается той же самой линзой и, пройдя светоделитель, попадает на фотоприемник, который регистрирует наличие сигнала — это 1. Если покрытие не отражает — фотоприемник ничего не регистрирует, то есть отсутствие сигнала эквивалентно 0.

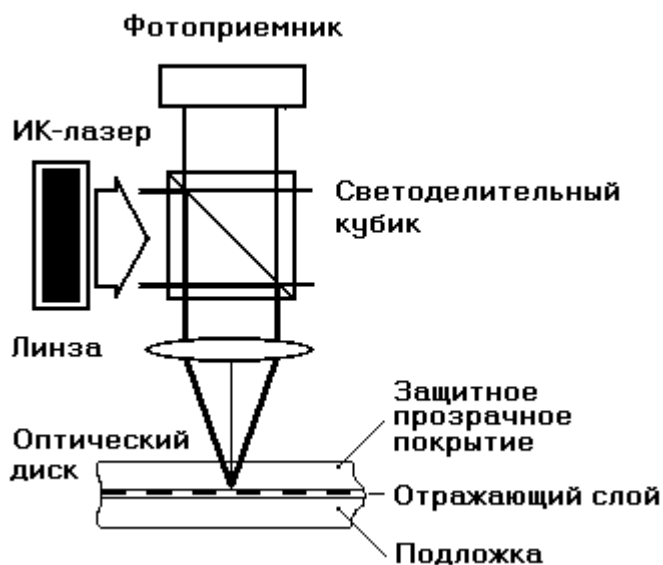


Рис.3. Схема устройства считывающей головки CD ROM

Конечно, на светоделителе половина интенсивности лазера и отраженного сигнала теряется, но другие преимущества (компактность, надежность и низкая себестоимость) данной схемы компенсируют этот недостаток.

По сравнению с магнитными носителями способ хранения информации на оптических дисках отличается повышенной помехоустойчивостью и надежностью. Защищающий отражательную поверхность слой прозрачной пластмассы может быть и поцарапан и запылен и облит чем-либо. Однако это приведет лишь к тому, что от лазера до отражающего слоя (и обратно до фотоприёмника) дойдет только несколько меньше света, поскольку луч лазера фокусируется строго на отражающую поверхность, проходя слой защитной пластмассы в расфокусированном виде. В результате на дефектах защитного слоя происходит только рассеяние части лазерного пучка. А поскольку интенсивность излучения лазерного диода и чувствительность фотоприёмника взяты с большим запасом, то на возможности считывания информации это практически никак не скажется.

Вообразите подобную ситуацию с обычной дискетой — о записанных на ней данных можно забыть! Не спасает и тефлоновое покрытие.

Разумеется, если поцарапать защитный слой CD специально (вплоть до отражающего слоя), то диск тоже можно будет выкинуть. Однако во многих случаях оптический диск даже с основательно поврежденным прозрачным защитным слоем можно спасти простой полировкой его поверхности (например, пастой ГОИ). Естественно, при

некачественной полировке надежность считывания информации понизится, но чаще всего после такой обработки диск можно использовать еще очень долго.

Необходимо также отметить, что наиболее опасными (с точки зрения последствий и возможности восстановления) являются царапины, ориентированные по дуге окружности диска или по хорде (особенно во внешней от центра области). Поскольку запись идет по окружности, такие царапины перекрывают большую часть записанной подряд информации. Радиальные царапины гораздо менее опасны.

Audio- и video-диски реагируют на присутствие повреждений гораздо слабее компьютерных. Это происходит потому, что потеря одного-двух (и даже нескольких подряд) битов практически никак не сказывается на воспроизведении звука и изображения. Компьютерные диски с этой точки зрения более чувствительны к погрешностям записи. Но и здесь специальными алгоритмами кодирования можно добиться снижения чувствительности к потере нескольких битов.

Тем не менее, бережливое отношение к компакт-дискам поможет избежать больших неприятностей, связанных с потерей записанной на них информации.

Теория метода измерения плотности записи

Структуру оптического диска, который предназначен для записи и хранения информации в цифровом виде, можно представить как плоскую отражательную дифракционную решётку, состоящую из концентрических штрихов, образованных цепочками пикселей.

Чтобы считать записанную на компакт-диске информацию необходимо сфокусировать лазерный луч в пятно, соизмеримое с размерами пикселя. А вот если использовать пучок диаметром в несколько десятков или сотен пикселей, то можно получить интегральную по сечению пучка информацию о размерах самих пикселей.

Существующая на компакт-диске дифракционная решётка, имея малый период, обладает достаточно высокой дифракционной эффективностью.

Под дифракционной эффективностью понимается отношение интенсивности излучения, *дифрагированного* в первом и высших порядках, к интенсивности излучения, *падающего* на решётку.

Для положения главных максимумов этой решётки в общем случае можно записать следующее:

$$k\lambda = d(\sin\alpha + \sin\beta), \quad (1)$$

где

- λ — длина волны;
- d — период решётки;
- α — угол дифракции;
- β — угол падения луча на решётку.

Известно, что угловая D дисперсия это первая производная угла дифракции по длине волны, то есть, дифференцируя уравнение (1), получаем

$$D = k/(d \cdot \cos\alpha). \quad (2)$$

При малых изменениях углов угловая дисперсия D дифракционной решётки, в пределах одного порядка дифракции, будет величиной постоянной.

Из формулы (1) видно, что определение постоянной решетки дает возможность определить характерный геометрический параметр плотности записи информации на оптическом диске, поскольку постоянная решётки d как раз и является параметром площади пикселя – элементарного участка записи информации на диске.

По определению, d — это расстояние между центрами штрихов дифракционной решётки или суммарная ширина пикселя и промежутка между дорожками из пикселей. То есть ширина каждого пикселя может быть принята равной $d/2$. Если же считать, что длина 1 пикселя равна его ширине, то на площади

$$S_{\text{bit}} = d (d/2) = 0.5 (d^2)$$

будет записан 1 бит информации.

Таким образом, величина

$$W = 1/S_{\text{bit}} = 2/(d)^2 \quad (3)$$

представляет собой плотность записи информации или просто плотность информации. Для удобства использования параметр плотности информации W рассчитывается из расчета количества битов на 1 мм^2 . То есть $[W] = \text{бит}/\text{мм}^2$.

Отсюда следует, что зная общую площадь S_{data} , занятую информацией на диске, по формуле

$$K_{\text{data}} = S_{\text{data}} W \quad (4)$$

можно определить информационную емкость K_{data} оптического диска в битах.

Разрешающая способность линзы

Если освещающий свет идет от объекта к линзе, то он попадет в линзу, только если находится в пределах удвоенного угла θ , называемого *апертурой линзы* (Рис.4).

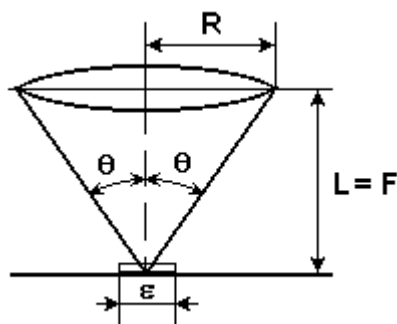


Рис.4. К определению разрешающей способности линзы

В этом случае *разрешающая способность* линзы θ , то есть минимальные размеры изображения, которое еще можно отделить от других, определяется выражением

$$\varepsilon = 0.5 \cdot \frac{\lambda}{n \cdot \sin \theta}.$$

Здесь

n — показатель преломления среды, в которой находится линза;

θ — *апертура* линзы;

λ — длина волны.

Для когерентного света это означает, что в пределах апертуры должен находиться хотя бы первый порядок дифракции. Если в апертуру линзы попадают и лучи, соответствующие дифракционным максимумам более высоких порядков, то качество получаемого изображения повышается. Но условие попадания первого дифракционного максимума является обязательным.

Произведение $A = n \cdot \sin \theta$ называется *числовой апертурой линзы*.

Учитывая, что линза располагается в воздухе ($n = 1$) и на фокусном расстоянии от объекта, из (4) с учетом рис.4 для числовой апертуры получаем

$$A = \frac{R}{\sqrt{R^2 + F^2}}. \quad (5)$$

Здесь R — радиус линзы, а F — ее фокусное расстояние.

Тогда формулу (4) можно записать в виде

$$\varepsilon = \frac{\lambda}{2A}. \quad (6)$$

Поскольку *линейные размеры пикселя* на оптическом диске должны быть не меньше разрешающей способности линзы θ , определяемой формулой (6), то появляется

возможность оценки минимально допустимого размера (радиуса) линзы, способной работать в считывающем устройстве CD ROM.

Эта же формула определяет и минимальный диаметр пятна, в который может быть сфокусирован свет линзой.

Методика проведения измерений

Определение плотности записи и общей информационной ёмкости оптического диска проводится с помощью гелий-неонового лазера ($\lambda=632,8$ нм) или полупроводникового лазерного диода ($\lambda \approx 655$ нм), работающих в видимом диапазоне спектра.

На рис.5 приведена схема экспериментальной установки.

Луч лазера через отверстие в экране направляется на поверхность оптического компакт-диска, помещенного в юстируемый зажим. Зажим с помощью юстировочных винтов позволяет поворачивать плоскость диска вокруг вертикальной и горизонтальной осей, а также перемещать его в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

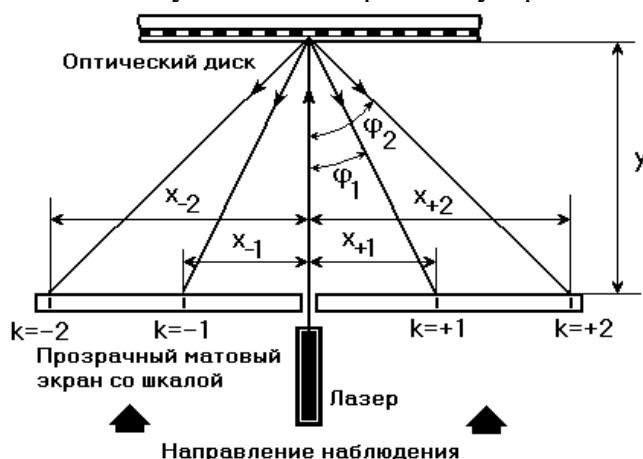


Рис.5. Принципиальная схема экспериментальной установки

Компакт-диск следует установить так, чтобы лазерный пучок падал на него нормально, на одну из точек горизонтального диаметра диска. В этом случае луч нулевого порядка дифракции отразится обратно в отверстие на экране, а лучи, соответствующие первому и второму порядкам дифракции, попадут на экран и расположатся симметрично центральному отверстию. Абсолютно строгой симметрии можно не добиваться, поскольку измеренные расстояния от нулевого до положительного и отрицательного максимумов каждого порядка усредняются при дальнейшей обработке.

Поскольку записанная на компакт-диске дифракционная решетка образована концентрическими линиями, форма дифракционных максимумов на экране может для некоторых участков быть дугообразной.

При правильной юстировке дифракционная картина имеет вид, подобный показанному на рис.6.

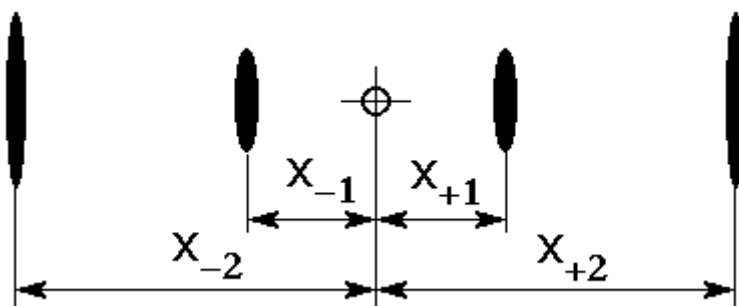


Рис.6. Вид дифракционной картины на экране (без учёта масштаба)

Если дифракционные максимумы расположены вдоль наклонной прямой, то луч лазера попадает на диск выше или ниже горизонтального диаметра. В этом случае диск надо сместить в вертикальной плоскости в нужную сторону.

После измерения соответствующих расстояний диск передвигается вдоль горизонтального радиуса, и цикл повторяется для новой точки падения луча.

Задания

Все перечисленные ниже задания выполняются для трёх разновидностей оптических дисков: audio, video и PC.

3. Объекты и средства исследования

Дифракционная решетка компакт диска

Состав оборудования:

Лазерный диод видимого диапазона.

Юстируемый зажим для оптического диска.

Экран со шкалой.

Линейка и штангенциркуль

Набор оптических дисков с разным типом записанной информации (audio, video, PC).

4. Задание на работу

1. Измерение периода дифракционной решетки CD
2. Измерение информационной емкости CD
3. Определение размеров линзы считывающей головки привода CD ROM
4. Оценка максимально допустимой плотности записи информации с ИК лазерами

5. Порядок выполнения работы

Задание 1. Измерение периода дифракционной решетки CD

Исследуемый оптический диск закрепить в зажим так, чтобы луч лазера попадал на него в ближней к внутреннему краю диска зоне с записанной информацией.

С помощью юстировочных винтов, расположенных на зажиме с диском, отраженное от него излучение лазера направить в отверстие экрана, через которое луч лазера попадает на диск.

Измерить расстояние от диска до экрана (y).

По шкале экрана определить значения x_{+1} , x_{+2} , x_{-1} и x_{-2} для первых двух порядков дифракции.

Провести описанные в пункте 4 измерения для разных точек на поверхности оптического диска на разных расстояниях от его оси (количество проведенных измерений должно быть не менее восьми). Для этого следует сдвигать экран со шкалой вместе с закрепленным на нем лазерным диодом.

По формуле (7), полученной из (1), в предположении нормального падения луча лазера на диск,

рассчитать набор значений d для периода дифракционной решетки.

$$d = k \frac{\lambda}{x} \sqrt{x^2 - \lambda^2} \quad (7)$$

Здесь x является средним значением для $+k$ и $-k$ порядков дифракции.

Полученные экспериментальные и расчетные данные занести в таблицу 1.

Провести статистическую обработку, то есть определить среднее значение и доверительный интервал периода дифракционной решетки d оптического диска.

Таблица 1

N П/П	r, мм	k	x(+), мм	x(-), мм	x, мм	d, мкм	\bar{d} , мкм	$\square d$, мкм
1.		1						
		2						
... ..								
8.		1						
		2						

Поскольку индивидуальные и серийные компакт-диски изготавливаются по разной технологии, попробуйте найти и объяснить отличия в дифракционной картине, создаваемой этими дисками. Для этого выньте диск из держателя (или разверните его) и направьте отраженное от диска излучение на стену. На расстоянии в 1÷2 м ширина дифракционных максимумов увеличится и разница, если она, конечно, есть, проявится более отчетливо.

Задание 2. Измерение информационной емкости CD

Площадь, занятая на диске информацией, определяется формулой

$$S = \frac{\pi}{4} (D_2^2 - D_1^2) \quad (8)$$

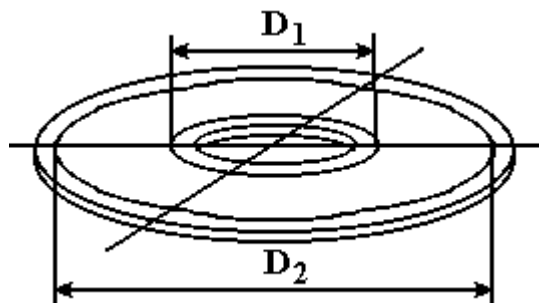


Рис.7. Параметры для определения части площади оптического диска, занятой информацией

С помощью линейки и(или) штангенциркуля измерить внутренний D_1 и внешний диаметры D_2 зоны оптического диска, на которой записана информация (рис.7).

По формулам (3, 4 и 8), используя полученные в **Задании 1** результаты, вычислить среднюю информационную ёмкость K оптического диска (в Мбайт).

Построить график зависимости плотности информации W (ордината) от радиуса r (абсцисса) диска.

Задание 3. Определение размеров линзы считывающей головки привода CD ROM

На основе серии, проведенных в **Задании 1**, измерений по формуле (6) определить среднее значение угловой дисперсии D оптического диска.

По полученной угловой дисперсии D определить угол дифракции в 1 и 2 порядках для набора (930 нм, 1100 нм и 1240 нм) длин волн излучения полупроводникового ИК-лазера.

Исходя из найденных углов дифракции и ориентируясь на геометрию эксперимента (рис.5), рассчитать максимальный радиус входной линзы R_L считывающей головки устройства для чтения компакт-дисков при указанных длинах волн излучения полупроводниковых лазеров.

Оценить возможность использования одной линзы для всех указанных длин волн. Определить диаметр такой линзы.

Принять, что линза располагается на расстоянии $L=5$ мм от поверхности оптического диска и в неё должны попадать только лучи первого порядка дифракции.

Задание 4. Оценка максимально допустимой плотности записи информации с ИК лазерами

Поскольку *линейные размеры пикселя* на оптическом диске должны быть *не меньше разрешающей способности линзы* \square , определяемой формулой (5), то появляется возможность оценки минимально допустимого размера (радиуса) линзы, способной работать в считывающем устройстве CD ROM. Для этого достаточно считать $d = \square$.

Приняв фокусное расстояние линзы $F=5$ мм, для полученного в **Задании 3** значения радиуса линзы по формуле (4 и 5) определите максимально возможную плотность записи W_{\max} на длинах волн ИК диапазона, приведенных в **Задании 3**.

Сравните расчетные значения плотности записи с полученными экспериментально.

Оцените максимальное количество информации (в Мбайт), которое может быть записано на стандартном 5-ти дюймовом компакт-диске при рассчитанной плотности записи.

6. Содержание отчета

1. Схема и описание работы экспериментальной установки.
2. Результаты сделанных измерений.
3. Обработка погрешностей измерений.
4. Результаты расчетов и графики.
5. Анализ полученных результатов и выводы, сделанные на их основе.
6. Ответы на теоретические вопросы по теме лабораторной работы в письменной форме (вопросы следует получить у преподавателя).

7. Контрольные вопросы

1. В чём заключается явление дифракции света? Какие условия являются необходимыми для наблюдения дифракции?
2. Чем обусловлено конечное значение разрешающей способности линзы?
3. Объясните принципы записи информации на компакт-дисках.
4. Опишите методику определения информационной ёмкости оптического компакт-диска.
5. Как изменится методика проведения измерений при не нормальном (не перпендикулярном) падении зондирующего лазерного луча на оптический компакт-диск?
6. Почему плотность записи информации на компакт-дисках зависит от длины волны используемого лазера?
7. Как устроена считывающая головка привода CD ROM? Чем лимитированы размеры её оптических элементов?

Лабораторная работа № 5. «Определение фокусного расстояния и кардинальных элементов, фотографического объектива»

1. Цель и задачи работы

Приобретение навыков измерения фокусного расстояния и координатных точек фотообъектива.

2. Основные теоретические положения

Образование оптических изображений

Пусть точечный источник A расположен на оси собирающей линзы (рис.1). Расходящаяся от источника сферическая волна деформируется линзой за счет меньшей скорости распространения волны в теле линзы по сравнению со скоростью распространения в окружающей среде и при достаточном удалении источника от линзы может превратиться в сходящуюся волну, направленную на A' .

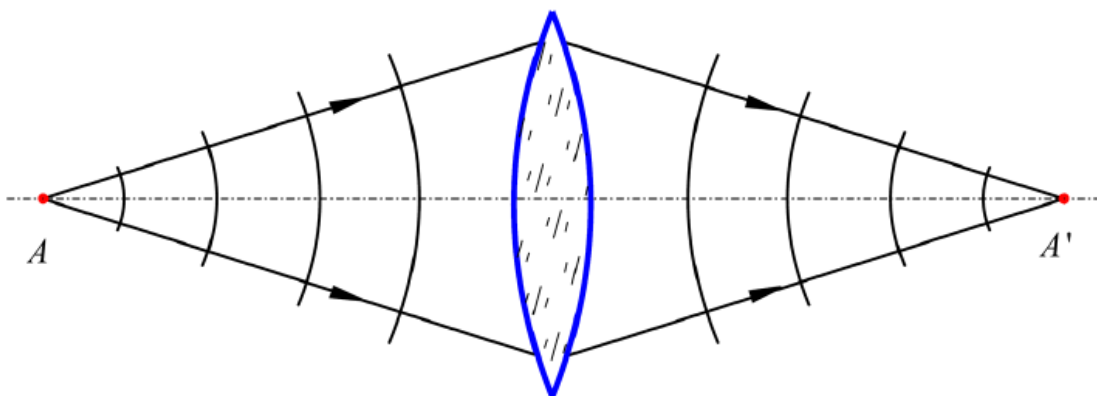


Рис.1. Формирование изображения точечного источника сферической линзой

Если отвлечься от дифракционных явлений на краях линзы, то можно представить себе идеальную линзу, в которой время, затраченное любыми участками волны на путь от A до A' , одинаково. Возбуждаемые ими в A' колебания имеют одну и ту же фазу и в результате интерференции усиливаются. Благодаря этому энергия точечного источника A концентрируется в A' и эту точку можно считать его действительным изображением. Большая оптическая скамья 2-17

Распространение волны от A к A' можно описать при помощи лучей – нормалей к волновым поверхностям, испытывающих преломление на границе раздела сред. Пользуясь законом преломления, можно для любой конкретной оптической системы, состоящей в общем случае из многих линз, определить положение и величину изображения при заданных положении и величине предмета. Такие расчеты, называемые габаритными, составляют основное содержание геометрической оптики, лежащей в основе теории оптических приборов. При габаритных расчетах предполагается, что пучок лучей, вышедший из некоторой точки источника, называемый гомоцентрическим, сохраняет гомоцентричность после прохождения оптической системы, т.е. вновь собирается в точку.

Для расчета изображений в оптических системах значительно более удобным, чем учет преломления лучей на каждой поверхности, является применение формализованной теории, предложенной математиком Гауссом и называемой теорией идеальной оптической системы. В теории Гаусса действие всех преломляющих поверхностей в сложной системе заменяется действием некоторых двух условных плоскостей. Эти две плоскости, называемые главными плоскостями, а также две точки на оптической оси, называемые

фокусами, полностью определяют действие системы. Если задано положение главных плоскостей и фокусов, то расчет изображений осуществляется при помощи простых формул, одинаковых как для одиночной линзы, так и для сложной многолинзовой системы. Положение главных плоскостей и фокусов сложной системы определяется параметрами входящих в систему линз, их взаимным расположением и может быть вычислено теоретически, либо определено экспериментально.

Одной из задач предлагаемой лабораторной работы является экспериментальное определение положений главных плоскостей и фокусов сложного фотографического объектива.

Теория идеальной оптической системы

Рассмотрим оптическую систему, состоящую из ряда сферических поверхностей, разделяющих среды с различными показателями преломления (например, набора линз). Пусть центры кривизны поверхностей лежат на одной прямой – оптической оси системы. Такие системы называют центрированными. Оптическая ось является осью симметрии.

Назовем пространством предметов ту область трехмерного пространства, в которой располагаются изображаемые оптической системой предметы. Область пространства, в которой возникают оптические изображения этих предметов, назовем пространством изображений. В общем случае оба пространства могут перекрываться.

Оптическая система называется идеальной, если каждой точке, прямой и плоскости из пространства предметов однозначно соответствуют сопряженные с ними (т.е. являющиеся их изображениями) точка, прямая и плоскость в пространстве изображений. Отсюда следует, что гомоцентрическому пучку в пространстве предметов соответствует сопряженный с ним гомоцентрический пучок в пространстве изображений. Плоскость, проходящая через оптическую ось, называется меридиональной. Меридиональной плоскости в пространстве предметов соответствует сопряженная с ней меридиональная плоскость в пространстве изображений. Из соображений симметрии следует, что плоскости, перпендикулярной оптической оси в пространстве предметов, соответствует сопряженная плоскость в пространстве изображений, также перпендикулярная оптической оси. Геометрическая оптика 2-18

Заметим, что реальная оптическая система обладает перечисленными свойствами идеальной, если изображения создаются параксиальными лучами, т.е. лучами, распространяющимися вблизи оптической оси и составляющими малый угол с оптической осью. При этих условиях излагаемая ниже теория целиком приложима для описания работы реальных оптических систем.

Изобразим условно оптическую систему, указав первую 1 и последнюю 2 преломляющие поверхности (рис.2), и будем для конкретности считать, что пространство предметов расположено слева от системы, а пространство изображений – справа.

Фокусы системы. Введем понятие фокусов системы. Направим луч 1 в пространстве предметов параллельно оптической оси и будем считать, что сопряженный луч 1' пересекает оптическую ось в пространстве изображений в точке F' (рис.2). Сопряженная с точкой F' точка в пространстве предметов находится на пересечении сопряженных прямых (луч 1 и оптическая ось) и лежит на бесконечности. Очевидно, что в F' пересекаются все лучи, параллельные оптической оси в пространстве предметов.

Точка F' , являющаяся изображением бесконечно удаленной точки на оптической оси, называется задним фокусом системы.

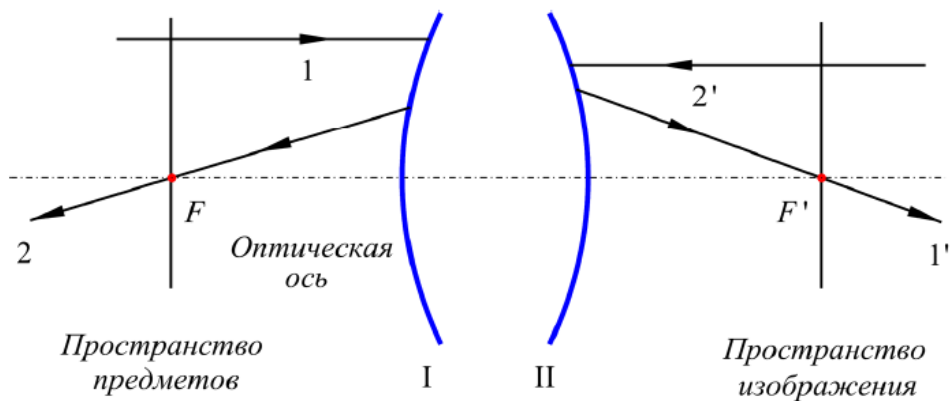


Рис.2. Фокусы и фокальные плоскости оптической системы

Направим некоторый луч $2'$ в пространстве изображений параллельно оптической оси и будем считать, что сопряженный луч 2 пересекает ось в пространстве предметов в точке F . Изображение точки F лежит на оптической оси в пространстве изображений и находится на бесконечности. Точка F называется передним фокусом системы. Плоскости, проходящие через точки F и F' , перпендикулярные оптической оси, называются, соответственно, передней и задней фокальными плоскостями.

Главные плоскости. Введем понятие главных плоскостей системы. Направим луч 1 параллельно оптической оси на высоте h от нее (рис.3). Сопряженный луч $1'$, по определению пройдет через задний фокус системы F' . Случай, когда луч 1 также параллелен оптической оси системы, относится к особому классу телескопических систем, которые в настоящей работе не рассматриваются. Проведем через передний фокус F луч 2 с таким расчетом, чтобы сопряженный луч $2'$, параллельный оптической оси, также находился на высоте h . Продолжим луч 2 до пересечения с лучом 1 в точке R , а луч $1'$ с лучом $2'$ в точке R' . Точки R и R' , лежащие на пересечении сопряженных лучей, также являются сопряженными. Большая оптическая скамья 2-19

Проведем через них плоскости, перпендикулярные оси и пересекающие ее в точках H и H' (сами плоскости принято обозначать теми же буквами).

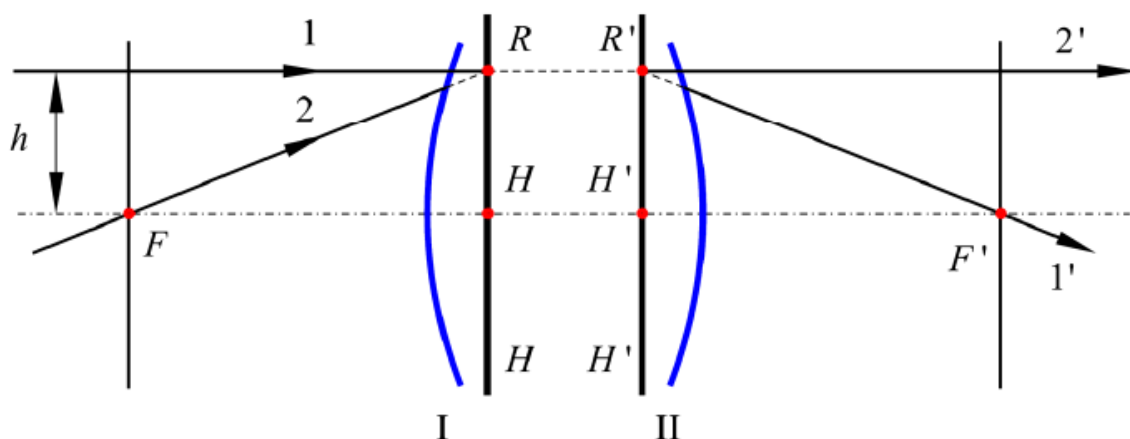


Рис.3. Главные плоскости и кардинатные точки оптической системы

Отрезок $R'H'$ является изображением отрезка RH . По построению $RH=R'H'$. Сопряженные плоскости H и H' , для которых линейное увеличение $\beta = \frac{R'H'}{RH} = 1$, называются главными плоскостями. Плоскость H , принадлежащая пространству предметов, называется передней главной плоскостью, плоскость H' , принадлежащая пространству изображений – задней главной плоскостью. Любой луч в пространстве предметов, пересекающий плоскость H на высоте h , входит в пространство изображений,

пересекая H' на той же высоте. Это свойство главных плоскостей существенно упрощает определение хода лучей через оптическую систему.

Точки F , F' , H и H' называются кардинальными точками оптической системы.

Приведенное на рис.3 расположение кардинальных точек относительно преломляющих поверхностей приблизительно соответствует случаю симметричной двояковыпуклой линзы. Для линз другой формы и для сложных оптических систем это расположение может быть другим и, в частности, плоскости H и H' могут находиться вне оптической системы.

При расчете оптических систем взаимное расположение элементов системы, включая положение предмета и его изображения, задается путем указания их координат вдоль оптической оси. Эти координаты отсчитываются от заранее оговоренного начала отсчета и могут выражаться как положительными, так и отрицательными числами. В геометрической оптике обычно принимают, что свет распространяется слева направо, и это направление считается положительным. Величина предмета l или его изображения l' в меридиональной плоскости задается координатой крайней точки, отсчитываемой от оптической оси в перпендикулярном направлении. Положительным считается направление вверх.

Начала отсчета координат и принятые для них обозначения приведены на рис.4. Направления отсчета указаны стрелками на размерных линиях. Как это принято в геометрической оптике, буквенные обозначения отрицательных координат указаны на чертеже со знаком минус. Благодаря этому отрицательные координаты описываются положительными величинами, которые могут быть использованы в геометрических соотношениях, считываемых с чертежа.

Координаты предмета на оптической оси отсчитываются от передней главной плоскости H или от переднего фокуса F . Координаты изображения, соответственно, отсчитываются от точек H' и F' . Геометрическая оптика 2-20

Координаты фокусов отсчитываются относительно соответствующих главных плоскостей.

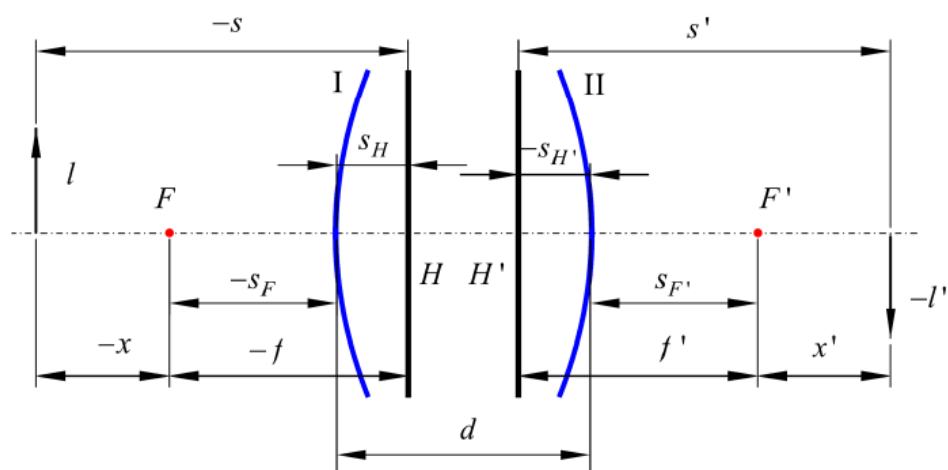


Рис.4. Координаты основных точек в оптической системе и принятые для них обозначения

Положение кардинальных точек H и F в реальной оптической системе определяется относительно первой (по ходу луча) преломляющей поверхности 1, положение кардинальных точек H' и F' - относительно последней поверхности 2.

Очевидно, что расположение кардинальных точек относительно преломляющих поверхностей не зависит от того, с какой стороны системы расположен источник. При повороте системы на 180° относительно направления, перпендикулярного оптической оси, кардинальные точки H , F и H' , F' , меняются ролями.

Заметим, что в литературе по геометрической оптике координаты элементов вдоль оптической оси называют «отрезками» или «расстояниями», которым приписываются определенные знаки. В частности, величины f и f' называются, соответственно, передним

и задним фокусными расстояниями. Они играют основную роль при описании работы оптических систем.

Величины sF и sF' называются, соответственно, передним и задним фокальными отрезками. С их помощью оценивается расположение предмета и изображения относительно крайних преломляющих поверхностей системы.

Применение изложенной выше теории к описанию работы реальных оптических систем показывает, что соотношение между фокусными расстояниями в конкретной оптической системе определяется отношением показателей преломления сред, расположенных по обе стороны системы:

$$\frac{n'}{n} = -\frac{f'}{f}$$

В частности, для преломляющей оптической системы в воздухе ($n=n'=1$) имеем $f=-f'$. Фокусные расстояния в этом случае одинаковы по величине, но имеют разные знаки, т.е. отсчитываются в разные стороны от соответствующих главных плоскостей. Оптические системы, для которых $f'>0$, называют положительными. Примером положительной оптической системы является собирающая линза в воздухе, а также сложные многолинзовые объективы различных приборов, в которых создаются действительные изображения.

Оптические системы, у которых $f'<0$, называются отрицательными. Примером отрицательной системы является рассеивающая линза.

Выведем некоторые соотношения, описывающие действие оптической системы и необходимые при выполнении экспериментальной части работы. Рассмотрим положительную оптическую систему (рис.5), заданную главными плоскостями и фокусами.

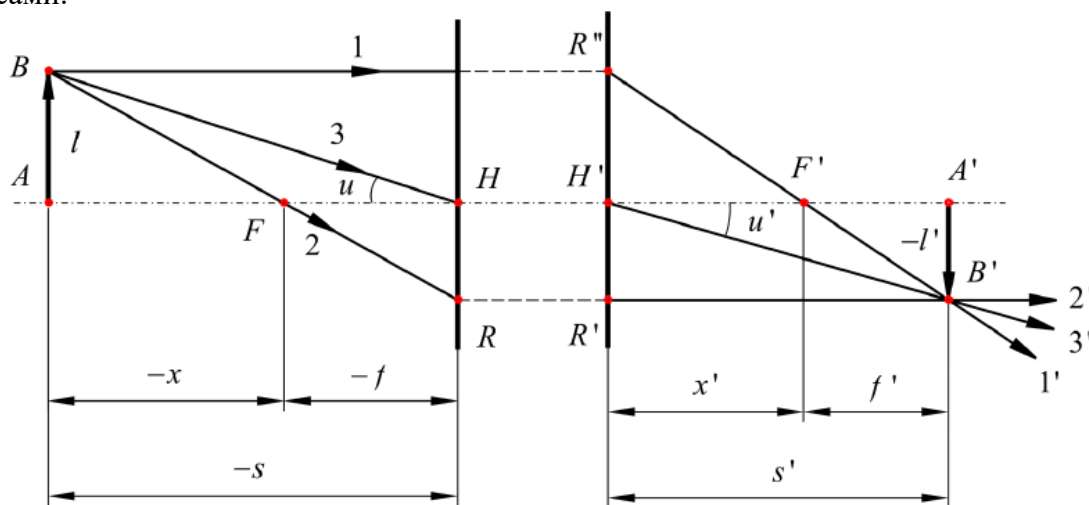


Рис.5. Построение изображения в оптической системе, заданной ее кардинальными точками

Пусть предмет, ограниченный точками А и В, имеет длину l и расположен на расстоянии s от передней главной плоскости. Выберем из всех лучей, выходящих из точки В, луч 1, параллельный оптической оси, и луч 2, направленный на передний фокус F . Сопряженный с лучом 1 луч $1'$ пересечет плоскость H' на высоте l и пройдет через задний фокус F' . Луч $2'$, сопряженный с лучом 2, пересечет плоскость H' на высоте $-l'$ и далее пойдет параллельно оптической оси. Точка B' пересечения лучей $1'$ и $2'$ будет изображением точки В. В эту точку соберутся все лучи, выходящие из точки В и попадающие в оптическую систему (в том числе луч 3, о роли которого см. ниже). Точку A' , являющуюся изображением точки А, найдем, опустив перпендикуляр из B' на оптическую ось.

Из подобия треугольников $\triangle ABF$ и $\triangle FHR$, $\triangle A'B'F'$ и $\triangle F'H'R'$ (рис.5) имеем

$$\frac{-l'}{l} = \frac{-f}{-x}; \quad \frac{-l'}{l} = \frac{x'}{f'}$$

Заметим, что формулы (1) непосредственно определяют линейное увеличение $\beta=l/l'$. Сопоставляя оба равенства, получим формулу Ньютона

$$xx' = ff' \quad (2)$$

Подставляя в формулу (2) значения $x = s - f$ и $x' = s' - f'$, вытекающие непосредственно из чертежа, получим формулу Гаусса

$$\frac{f'}{s'} + \frac{f}{s} = 1 \quad (3)$$

Формулы Ньютона и Гаусса позволяют определить положение изображения при заданном положении предмета.

Прибавляя к обеим частям (2) величину xf' , получим

$$x(x' + f') = f'(x + f)$$

или (см. рис.5)

$$xs' = f's \quad (4)$$

Сопоставляя выражения (1) и (4), найдем еще одно выражение для линейного увеличения:

$$\beta = -\frac{f}{f'} \cdot \frac{s'}{s} \quad (5)$$

Формулы (1), (2), (3) и (5) достаточно полно описывают действие оптической системы.

Сопоставим далее углы u и u' , образуемые сопряженными лучами 3 и $3'$ с оптической осью. Из рис.5 имеем

$$\operatorname{tg} u' = \frac{-l'}{s'}; \quad \operatorname{tg} u = \frac{l}{-s} \quad (6)$$

Отсюда следует, что для оптической системы в воздухе ($f = -f'$) углы u и u' равны. Благодаря этому лучи 3 и $3'$ также оказываются удобными для построения изображения.

Используем полученный результат для вывода соотношения, применяемого в экспериментальной части работы. Пусть малый объект высоты l находится в передней фокальной плоскости системы 1 (рис.6). В этом случае $x_1=0$ и, как это следует из (2), изображение будет находиться на бесконечности. Изображение точки В создается параллельным пучком, составляющим с оптической осью угол

$$u_1 = u_1' = \operatorname{arctg} \frac{l}{-f_1} = \operatorname{arctg} \frac{1}{f_1'} \quad (7)$$

Изображение точки А создается пучком лучей, параллельных оптической оси. Поэтому (7) определяет также угловую величину объекта и одновременно его изображения. Система 1 представляет собой так называемый коллиматор – оптическое устройство, предназначенное для получения параллельных пучков лучей.

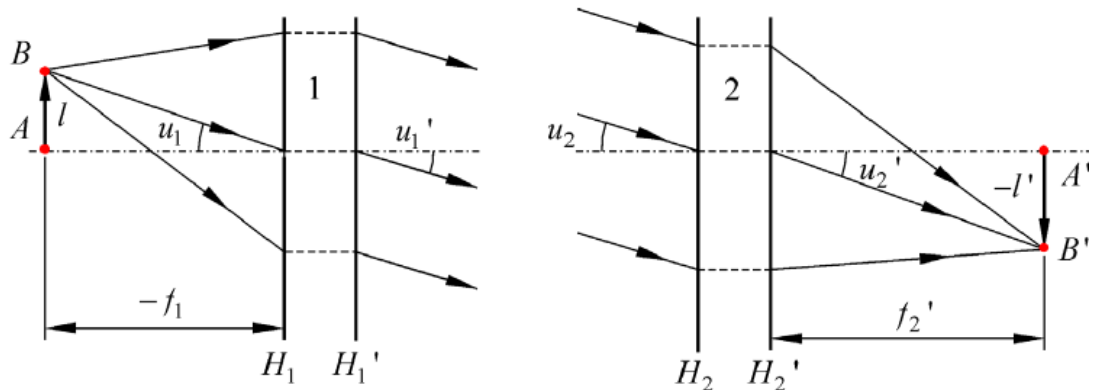


Рис.6. Формирование изображения в задней дипольной плоскости оптической системы (2) при расположении предмета АВ в передней фокальной плоскости коллиматора (1)

Пусть далее параллельные пучки, выходящие из коллиматора, падают на систему 2, также находящуюся в воздухе. Для системы $x_2 = \infty$ и, следовательно, $x_2' = \infty$. Изображение l' возникает в задней фокальной плоскости системы 2, причем:

$$\operatorname{tg} u_2' = -\frac{l'}{f_2'} \quad (8)$$

Так как $u_2 = u_2' = u_1 = u_1'$ то

$$\frac{l'}{l} = -\frac{f_2'}{f_1'} \quad (9)$$

Формулу (9) используют при определении фокусного расстояния и при оценке разрешающей способности исследуемой оптической системы, роль которой выполняет система 2.

3. Объекты и средства исследования

Для выполнения поставленной задачи используются оптические устройства, входящие в комплект большой оптической скамьи ОСК-2.

Схема экспериментальной установки приведена рис.11, где 1 – осветитель; 2 – мира; 3 – коллиматор; 4 – испытуемая оптическая система, укрепленная в специальной оправе; 5 – действительное изображение мира; 6 – горизонтальный микроскоп, используемый для рассматривания изображения, создаваемого исследуемой оптической системой; 7 – глаз наблюдателя; 8 – рельс; 9 – миллиметровая горизонтальная шкала.

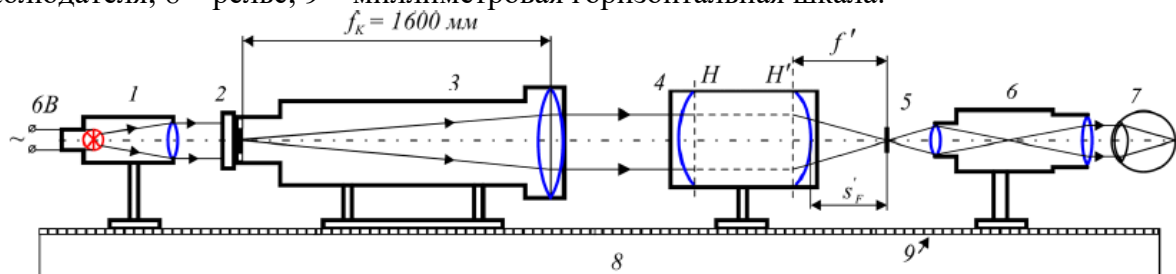


Рис.11. Оптическая схема экспериментальной установки



Рис.12. Внешний вид лабораторной установки

4. Задание на работу

Определение положения кардинальных точек оптической системы относительно ее крайних преломляющих поверхностей.

Основной частью коллиматора является длиннофокусный ($f_K = 1600$ мм) объектив, в фокальной плоскости которого установлены испытательные миры. Миры размещены в револьверной головке (рис.13), закрепленной на тубусе коллиматора. Смена миры производится поворотом головки. Микроскоп имеет механизм отсчетного перемещения по трем координатным осям.



Рис.13. Револьверная головка с мирами

5. Порядок выполнения работы

Для определения положения кардинальных точек исследуемой оптической системы предлагается следующая методика:

1. Перемещая микроскоп 4 вдоль скамьи, экспериментально определить положение задней фокальной плоскости системы. В этой плоскости возникает изображение предмета (миры), помещенного в передней фокальной плоскости объектива коллиматора. Найденное положение микроскопа зафиксировать по горизонтальной шкале перемещений.
2. Используя отсчетную шкалу окуляра микроскопа (видимую в поле зрения окуляра) экспериментально определить величину изображения миры l' . Пользуясь формулой (9), определить фокусное расстояние системы f' , располагая известными величинами l – базой В миры и фокусным расстоянием f_K коллиматора.
3. Экспериментально определить отрезок sH' . Для этого, перемещая микроскоп вдоль оптической оси, навести его на резкое изображение поверхности линзы, обращенной к микроскопу (для облегчения наводки поверхность линзы можно слегка припудрить). Зафиксировать по горизонтальной шкале новое положение микроскопа. Абсолютное значение разности отсчетов по горизонтальной шкале перемещений равно отрезку sF' . По найденным значениям f' и sF' найти отрезок

$$s_{H'} = f' - s_{F'}$$

(см. рис.4).

Таким образом, оказываются найденными положения кардинальных точек H' и F' относительно одной преломляющей поверхности.

4. Повернуть исследуемую систему на 180° к источнику. В этом случае найденные в предыдущем пункте кардинальные точки будут играть роль передней главной плоскости H и переднего фокуса F . Повторив измерения по пунктам 1-3, найти положения задней главной плоскости H' и заднего фокуса F' в новом положении оптической системы.
5. По заданному расстоянию d между крайними преломляющими поверхностями найти расстояние HH' между главными плоскостями (см. рис.4) из соотношения

$$d = s_H + HH' - s_{H'}$$

6. Выполнить чертеж исследованной оптической системы, указав положения найденных кардинальных точек относительно первой и последней преломляющих поверхностей системы.

6. Содержание отчета

1. Схема и описание работы экспериментальной установки.
2. Результаты сделанных измерений.
3. Обработка погрешностей измерений.
4. Результаты расчетов и графики.
5. Анализ полученных результатов и выводы, сделанные на их основе.

7. Контрольные вопросы

1. Каким образом возникают действительные изображения в оптических системах?
2. В чем сущность теории идеальной оптической системы? Какими параметрами характеризуется идеальная оптическая система?
3. Приведите пример графического построения изображений в оптической системе, используя ее кардинальные точки.
4. Какой метод определения кардинальных точек рекомендуется в предлагаемой лабораторной работе?
5. Поясните, каким образом явление дифракции света ограничивает разрешающую способность оптических систем.
6. Какую величину принимают в качестве меры разрешающей способности оптических систем?
7. В чем состоит метод практического определения разрешающей способности, используемой в лабораторной работе?

Лабораторная работа № 6. «Определение увеличения лупы и зрительной трубы»

1. Цель и задачи работы

Приобретение навыков измерения углового поля оптических систем.

2. Основные теоретические положения

Угловое поле зрительной трубы в пространстве предметов (2ω) – это угол, образованный главными лучами, идущими на противоположные края полевой диафрагмы (или угол, под которым из центра входного зрачка (т.Р) видны края полевой диафрагмы (ПД) – рис.10.

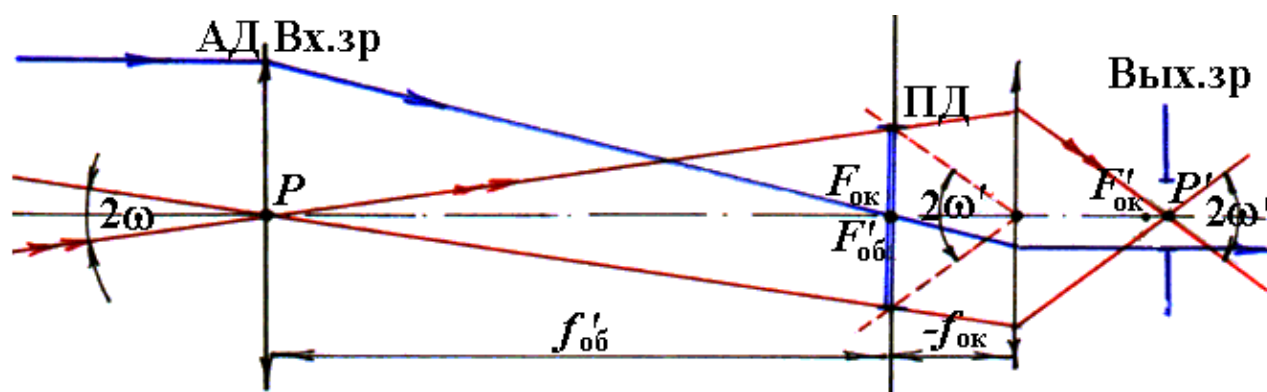


Рис.10

Для определения углового поля в пространстве предметов необходимо знать диаметр $D_{ПД}$ полевой диафрагмы и фокусное расстояние $f'_{об}$ объектива зрительной трубы. Тогда в соответствии с рис.10 можно записать:

$$\operatorname{tg} \omega = \operatorname{tg} \omega_{об} = D_{ПД} / 2f'_{об}; \quad \operatorname{tg} \omega' = \operatorname{tg} \omega_{ок} = D_{ПД} / 2f'_{ок}.$$

Если по каким-то причинам измерить $f'_{об}$ и $D_{ПД}$ нельзя, то угловое поле в пространстве предметов находят по формуле

$$\operatorname{tg} \omega = y / 2s.$$

Для этого на расстоянии s от объектива зрительной трубы устанавливают рейку и, рассматривая ее через окуляр трубы, отсчитывают число делений рейки, видимых в пределах всего поля трубы. Произведение $n\tau$, где τ – цена деления рейки, численно равно размеру $2y$ рассматриваемого предмета. Расстояние s измеряют рулеткой; s и $2y$ выражают в мм и вычисляют $2\omega = 2\arctg(y/2s)$.

В лабораторных условиях поле зрительных труб принято измерять при помощи коллиматора (**коллиматор** – оптическая система, создающая пучок параллельных лучей; коллиматор имитирует бесконечность). Схема установки для измерения углового поля зрительной трубы представлена на рис.11.

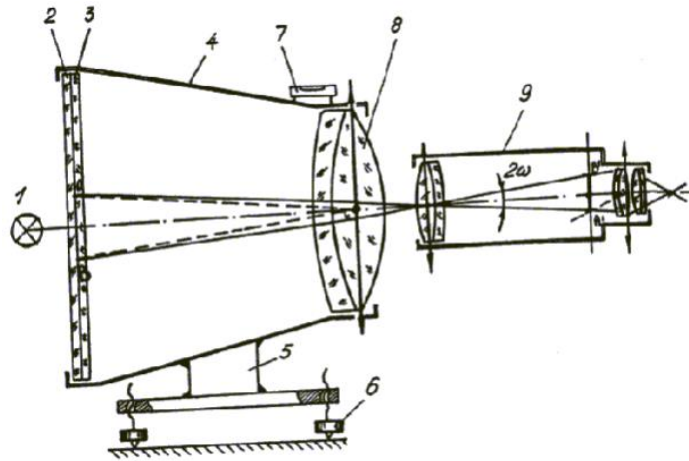


Рис.11

Широкоугольный коллиматор 4 имеет угловое поле $2\omega = 50...60^\circ$ и состоит из высококачественного объектива 8, в фокальной плоскости которого помещена стеклянная сетка 3 с угломерной шкалой. Цена деления шкалы $\tau = 15'$. Для получения равномерного освещения шкалы перед ней установлено матовое стекло 2, которое подсвечивается лампой 1. Коллиматор устанавливают на подставке, снабженной регулировочными винтами 6. Для правильной ориентации оптической оси коллиматора относительно горизонтальной плоскости на объективе помещен уровень 7. Телескопическую систему (зрительную трубу) 9 помещают перед объективом коллиматора и рассматривают через нее сетку 3 коллиматора.

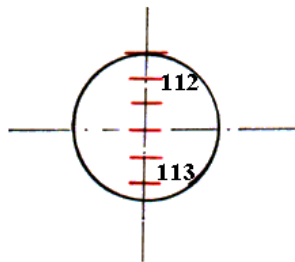


Рис.12.

Сначала трубу фокусируют на резкое видение сетки 3, а затем определяют количество делений шкалы коллиматора, видимых по всему полю (рис.12). Умножив цену деления шкалы τ в угловой мере на число сосчитанных делений n , получают величину углового поля 2ω зрительной трубы в пространстве предметов в угловой мере: $2\omega = n\tau$. На рис.12 в поле зрительной трубы видно 5,5 делений сетки, следовательно, $2\omega = 15' \cdot 5,5 = 1^\circ 22'$.

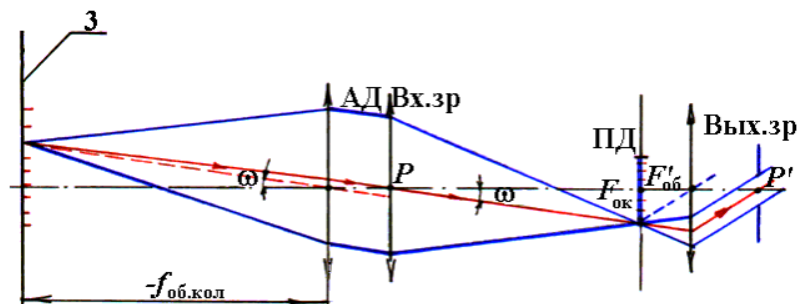


Рис.13

На рис.13 представлен ход лучей в оптической схеме установки "коллиматор+зрительная труба" при определении углового поля. Пунктирной линией проведены вспомогательные лучи для выполнения построений. Из рис.13 видно, что полевая диафрагма, установленная в фокальной плоскости объектива и окуляра, ограничивает угловое поле трубы.

Определение поля лупы

Поле лупы измеряют в угловой (2ω) или линейной мере ($2y$). Линейное поле определяется диаметром круга, который виден через лупу при неподвижном глазе наблюдателя. Для измерения линейного поля лупы необходимо взять линейку и рассматривать деления линейки через лупу. Число делений линейки, укладываемых по диаметру поля, умноженных на цену ее деления, и есть линейное поле лупы. Например, $2y = 1 \text{ мм} \cdot 50 \text{ дел.} = 50 \text{ мм}$. Угловое поле лупы равно отношению диаметра оправы лупы $D_{\text{л}}$ к расстоянию от глаза до лупы. Если глаз поместить в точку $F'_{\text{л}}$, то $\text{tg}\omega = D_{\text{л}}/2f'_{\text{л}}$

Определение увеличения лупы

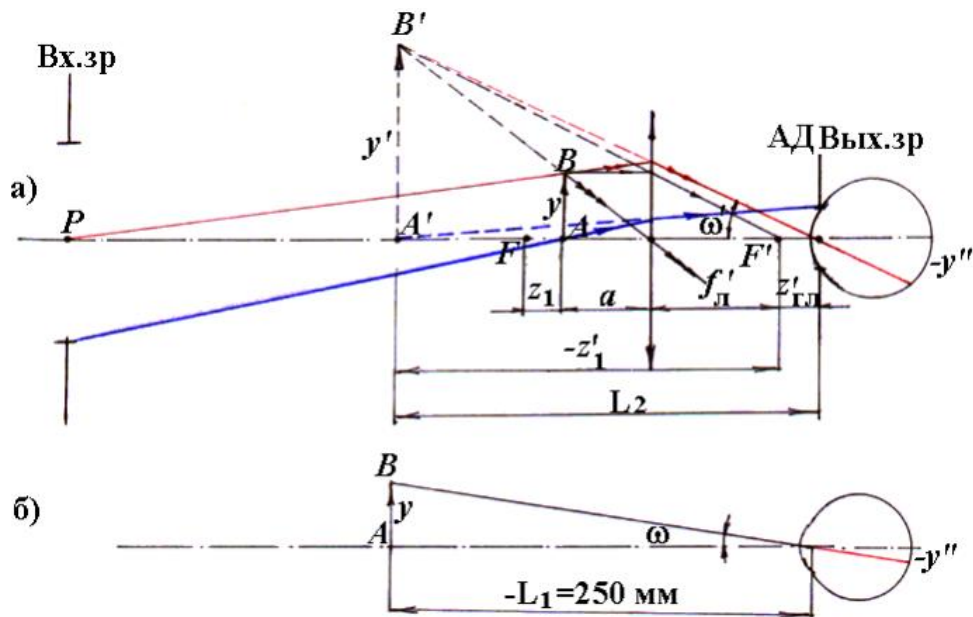


Рис.14

Под увеличением лупы понимают отношение тангенса угла ω' , под которым видно изображение предмета $A'B'$ через лупу (рис.14 а), к тангенсу угла ω , под которым виден предмет AB без лупы (рис.14 б) или отношение линейных размеров изображений на сетчатке глаза одного и того же предмета, полученных с лупой и без лупы. Таким образом видимое увеличение лупы

$$\text{tg}\omega'/\text{tg}\omega = y'/y.$$

Если предмет поместить в передний фокус (т.Ф) лупы, то $=250/f'_{\text{л}}$, поэтому достаточно измерить $f'_{\text{л}}$ лупы, чтобы вычислить ее увеличение.

Для производственных целей можно с достаточной точностью определить увеличение при помощи клетчатой бумаги (или с помощью двух шкал с миллиметровыми делениями). На рис.15 показано, что при рассматривании клетчатой бумаги две клетки укладываются в увеличенной через лупу одной клетке, следовательно, увеличение лупы на рис.15 будет равно 2^x .

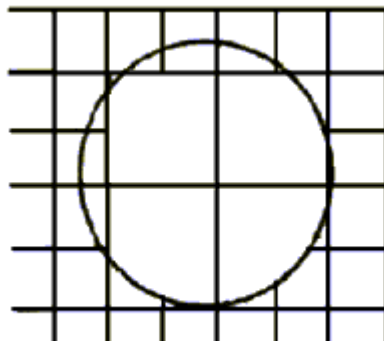


Рис.15

Определение увеличения зрительной трубы

Видимое увеличение зрительной трубы Γ_T определяется по формулам

$$\Gamma_T = \text{tg}\omega' / \text{tg}\omega = -f'_{\text{об}} / f'_{\text{ок}};$$

Но увеличение зрительной трубы можно определить по формуле $\Gamma_T = -D / D'$

Из формул следует, что для определения увеличения необходимо знать фокусные расстояния объектива и окуляра или диаметры входного и выходного зрачков. Измерим диаметры входного и выходного зрачков (рис.16). Так как апертурная диафрагма в зрительной трубе Кеплера совпадает с оправой объектива, то входной зрачок тоже совпадает с оправой объектива и его величину можно измерить насадкой 1 со шкалой, которую одевают прямо на оправу объектива (рис.16, а). Цена деления шкалы $\tau_1 = 1$ мм. Выходной зрачок 3 – это изображение апертурной диафрагмы в прямом ходе лучей через последующую систему, т.е. окуляр. На рис.16, б построено изображение выходного зрачка 3.

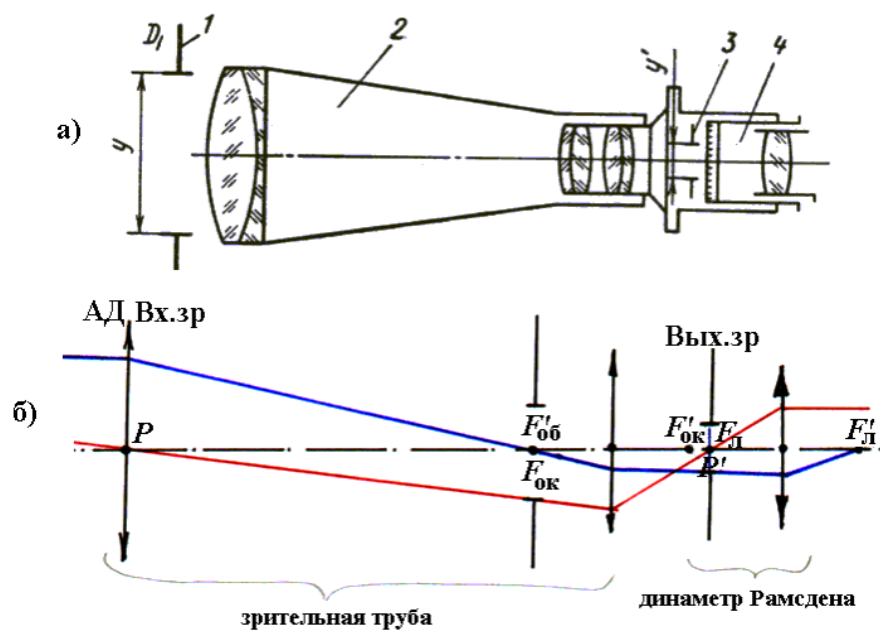


Рис.16.

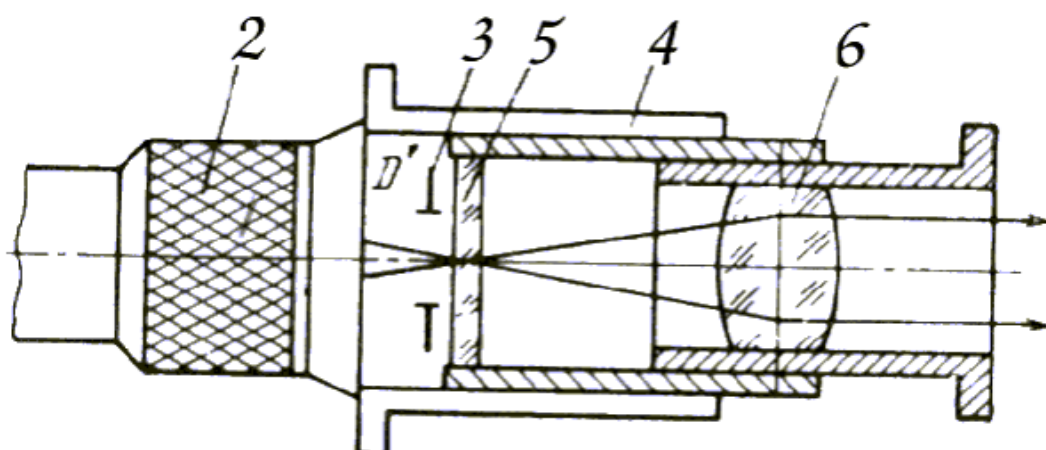


Рис.17.

Величину выходного зрачка можно измерить с помощью динаметра Рамсдена (рис.17), который представляет собой лупу 6, в передней фокальной плоскости которой расположена шкала 5 с ценой деления $\tau_2 = 0,1$ мм

Динаметр следует расположить за окуляром зрительной трубы 2 так, чтобы его шкала 5 совпала с выходным зрачком 3 трубы 2. Наблюдатель должен четко видеть шкалу динаметра и изображение зрачка (рис.18). Для определения диаметра выходного зрачка необходимо посчитать, сколько делений шкалы динаметра умещается по диаметру выходного зрачка. Число делений шкалы n_2 , умноженное на цену деления τ_2 , и даст размер выходного зрачка. Тогда

3. Объекты и средства исследования

4. Задание на работу

Измерить фокусное расстояние лупы и зрительной трубы.

5. Порядок выполнения работы

1. Зафиксировать зрительную трубу на резкое видение сетки.
2. Определить количество делений шкалы коллиматора, видимых по всему полю.
3. Рассчитать угловое поле зрительной трубы.
4. Повторить действия 1-3 для лупы.

6. Содержание отчета

1. Схема и описание работы экспериментальной установки.
2. Результаты сделанных измерений.
3. Обработка погрешностей измерений.
4. Результаты расчетов и графики.
5. Анализ полученных результатов и выводы, сделанные на их основе.

7. Контрольные вопросы

1. Каким образом возникают действительные изображения в оптических системах?
2. В чем сущность теории идеальной оптической системы? Какими параметрами характеризуется идеальная оптическая система?
3. Приведите пример графического построения изображений в оптической системе, используя ее кардинальные точки.
4. Какой метод определения кардинальных точек рекомендуется в предлагаемой лабораторной работе?
5. Поясните, каким образом явление дифракции света ограничивает разрешающую способность оптических систем.
6. Какую величину принимают в качестве меры разрешающей способности оптических систем?
7. В чем состоит метод практического определения разрешающей способности, используемой в лабораторной работе?

Лабораторная работа № 7. «Выполнение линейных измерений с помощью отсчетного микроскопа»

1. Цель и задачи работы

Научиться производить измерения линейных размеров малых тел.

2. Основные теоретические положения

Чем больше угол зрения, под которым мы видим какой – либо предмет, тем больше деталей мы можем на нем различить. Величина угла зрения зависит как от размеров рассматриваемого предмета, так и от расстояния до него.

Однако возможности глаза ограничены. Глаз плохо различает предметы под углом зрения, меньшим минуты (это угол, под которым, например, виден отрезок длиной 10^{-2} м на расстоянии 34 м).

Если предмет приблизить к глазу чрезмерно близко, то аккомодация становится затруднительной и болезненной.

Наименьшее расстояние D , на котором предмет рассматривается глазом без утомления, называется расстоянием наилучшего видения (для нормального глаза оно равно 0,25 м).

Рассмотрение мелких предметов требует искусственного увеличения угла зрения. Это осуществляется с помощью различных оптических приборов, которые принято делить на две группы:

1. Приборы для рассматривания малых тел (лупа, микроскоп);
2. Приборы для рассматривания удаленных предметов (зрительная труба, телескоп, бинокль).

Изучим приборы первой группы.

Лупа – двояковыпуклая короткофокусная линза (или система линз), через которую рассматриваются малые объекты, располагаемые между линзой и ее главным фокусом. При рассматривании лупа находится непосредственно перед глазом. При указанном расположении предмета глаз видит его мнимое, прямое и увеличенное изображение (рис. 1).

Назначение лупы получить изображение наилучшего видения D . Угловое увеличение лупы β измеряется соотношением угла α , под которым мы видим предмет через лупу, к углу α_1 , под которым мы видим его невооруженным глазом на расстоянии наилучшего видения.

$$\beta = \frac{\alpha}{\alpha_1} \quad \text{или} \quad \beta = \frac{D}{F} \quad (1)$$

где F – фокусное расстояние лупы (обычно F для лупы равно 0.01- 0.1м).

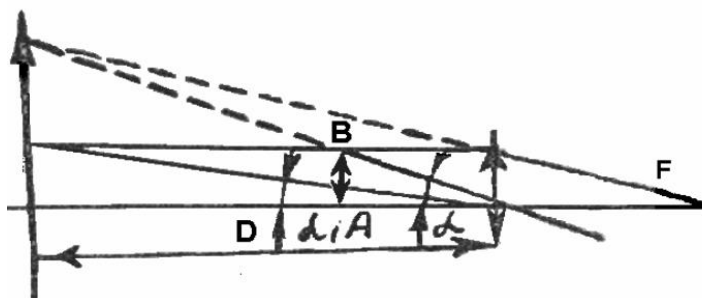


Рис. 1.

Микроскоп. Оптическая система микроскопа состоит из короткофокусного объектива и окуляра. Ход лучей в микроскопе изображен на рис. 2. Изображение, даваемое объективом, рассматривается в окуляре, как в лупу, т.е. окуляр располагается таким образом, чтобы мнимое увеличенное изображение предмета оказалось на расстоянии наилучшего видения. Различают линейное N и угловое γ – увеличение микроскопа.

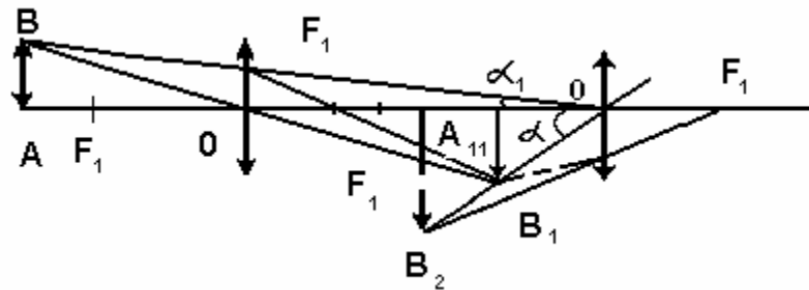


Рис.2

Линейное увеличение микроскопа N определяется из следующего соотношения

$$N = N_{об} \cdot N_{ок} \quad (2)$$

где $N_{об}$ – увеличение объектива, равное Δ / f_1 ;

$N_{ок}$ – увеличение окуляра, равное D / f_2 ;

f_1, f_2 – фокусные расстояния объектива и окуляра;

Δ – расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра;

D – расстояние наилучшего видения.

Подставляя значения $N_{об}$ и $N_{ок}$ в выражение (2), получаем:

$$N = \frac{\Delta D}{f_1 \cdot f_2} \quad (3)$$

Угловое увеличение γ микроскопа измеряется отношением угла α , под которым видно изображение предмета в микроскоп, к углу α_1 , под которым он виден невооруженным глазом:

$$\gamma = \frac{\alpha}{\alpha_1} \quad (4)$$

Можно показать, что линейное увеличение микроскопа равно угловому увеличению. Практически увеличение микроскопа не может превышать 3000. Это связано с ограничением разрешающей способности микроскопа, обусловленной дифракционными явлениями на краях оправ объектива. Пределом разрешающей способности микроскопа называется наименьшее расстояние ΔZ между двумя точками, изображение которых в микроскопе получается раздельно. Расчеты показали, что ΔZ определяется из формулы

$$\Delta Z = 0,61 \frac{\lambda}{n \cdot \sin \frac{u}{2}} \quad (5)$$

где λ – длина световой волны;

n – показатель преломления вещества, находящегося между объективом и предметом;

U – апертурный угол (угол, образованный крайними лучами пучка, попадающего в объектив, рис. 3)

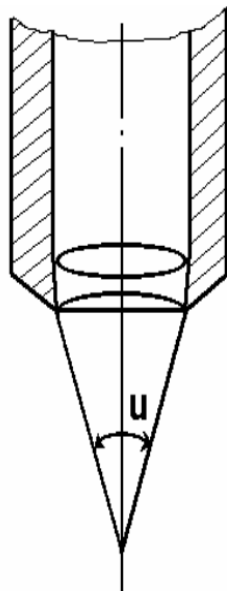


Рис. 3

Произведение, равное $n \cdot \sin U/2$, называется числовой апертурой. Как видно из соотношения (5), для повышения разрешающей способности микроскопа необходимо увеличить его числовую апертуру.

Однако возможности увеличения числовой апертуры ограничены. Во-первых, $\sin U/2$ не может быть больше единицы, во-вторых, иммерсионные жидкости, которые вводят между объективом и предметом, имеют показатель преломления, не превышающий 2.0 (например, для глицерина $n=1,47$; для кедрового масла $n=1,52$).

Следовательно, минимальные размеры рассматриваемого предмета не должны быть меньше $2/3$ (примерно 0.3 мкм), что следует из того же соотношения (5). Ограниченность разрешающей способности микроскопа обуславливает предел его увеличения.

В качестве объектива и окуляра микроскопа обычно используются центрированные системы линз, различных по форме и составу стекла, размещенные в цилиндрической оправе. Объектив ввинчивается в нижнюю часть так называемого тубуса (пустотелой цилиндрической трубки), окуляр вставляется в его верхнюю часть. Тубус устанавливается на неподвижном массивном основании. Он состоит из двух трубок, вставленных друг в друга (в одну трубку вставляется объектив, в другую – окуляр). Такое устройство тубуса дает возможность изменять расстояние между объективом и окуляром. Тубус в целом перемещается с помощью винтов грубой и точной наводки вверх или вниз, приближая или удаляя объектив от исследуемого предмета.

На штативе неподвижно укреплен предметный столик с отверстием в центре. На столик кладут исследуемый предмет. Для освещения предмета, под предметным столиком размещены конденсатор (система линз) и зеркало.

Устройство винтового окулярного микроскопа

При решении определенных практических вопросов возникает необходимость не только рассматривать мелкие объекты, но и определять их размеры. Для этих целей используется винтовой окулярный микрометр с крестом нитей (рис.4) представляющий собой специальную окулярную насадку к обычному микроскопу, которая устанавливается на верхний конец его тубуса вместо окуляра. Окулярный микрометр служит для измерения линейных размеров предметов, рассматриваемых в микроскоп, и крепится к тубусу с помощью винта 1. В переднем фокусе окуляра находится шкала с ценой деления 0.001 м стеклянная пластинка с нанесенным на ней косым перекрестием нитей и двумя штрихами-рисками (рис.5)

Пластинка связана с микрометрическим винтом. При вращении микрометрического винта перекрестие и риски перемещаются в поле окуляра относительно неподвижной шкалы. Шаг винта равен 10^{-3} м. При повороте барабана винта 2 на один оборот риски и перекрестие перемещаются на одно деление шкалы. Неподвижная шкала служит для отсчета полных оборотов винта барабана. Барабан винта разделен на 100 делений. Поворот барабана на одно деление соответствует перемещению перекрестия на 10^{-5} м.

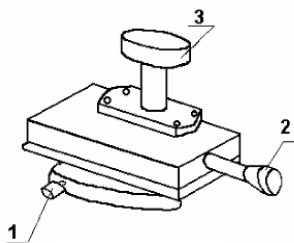


Рис. 4

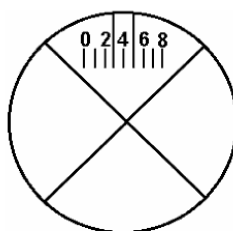


Рис. 5

3. Объекты и средства исследования

Микроскоп, винтовой окулярный микрометр, эталонная шкала с ценой деления 10^{-5} м, исследуемый предмет.

4. Задание на работу

1. Определить цену деления окулярного микроскопа.
2. Определить линейные размеры малого предмета.

5. Порядок выполнения работы

Определение цены деления окулярного микроскопа.

1. Опустите окулярную насадку вниз. Наденьте на верхнюю часть тубуса до упора вместо нее винтовой окулярный микрометр (рис. 4) и закрепите винтом 1. Вращая окуляр за накатанную часть 3, добейтесь резкого изображения перекрестия.

Для определения увеличения объектива микроскопа используйте эталонную шкалу с ценой деления 10^{-5} м, которую устанавливают на столике микроскопа.

Включив, осветитель, с помощью зеркала, осветите поле зрения микроскопа, добейтесь резкого изображения эталонной шкалы в плоскости окулярного микрометра. Возможный перекося делений эталонной шкалы относительно делений шкалы окулярного микрометра устраняется поворотом эталонной шкалы (или поворотом винтового микрометра, опустив винт крепления).

2. По эталонной шкале выберите в центральной части ее деления (20-30 делений). Перекрестие установите в середине первого штриха выбранного участка эталонной шкалы. Произведите отсчет K_1 : по шкале окулярного микрометра (число целых миллиметров) и по отсчетному барабану (число десятых и сотых долей миллиметра).

3. Перекрестие установите на середину последнего деления исследуемого участка эталонной шкалы и произведите второй отсчет K_2 .

Разность ($K_1 - K_2$) показывает, сколько делений шкалы окулярного микрометра укладывается в n делениях эталонной шкалы.

Цена деления окулярного микрометра, очевидно, будет равна

$$k_0 = \frac{0,01n}{k_2 - k_1} \quad (6)$$

Определение линейных размеров малых предметов.

1. Измеряемый предмет разместите на предметном столике микроскопа, следя за тем, чтобы измеряемые стороны предмета были параллельны перемещению перекрестия. Перекрестие установите на один конец измеряемой стороны, затем – на другой, и определите разность отсчётов ($K_2 - K_1$).

Длина измеряемой стороны вычисляется по формуле

$$l = K_0 |K_2' - K_1'| \quad (7)$$

Результаты измерений запишите в таблицу, составленную самостоятельно.

6. Содержание отчета

1. Схема и описание работы экспериментальной установки.
2. Результаты сделанных измерений.
3. Обработка погрешностей измерений.
4. Результаты расчетов и графики.

Лабораторная работа № 8. Аберрации оптических систем

Цель работы: Знакомство с возможными дефектами изображений предметов, получаемых с помощью сферических линз, и экспериментальное определение продольной сферической аберрации, астигматизма линзы и продольной хроматической аберрации.

Оборудование: Осветитель с сеткой и набором светофильтров, оптическая скамья с миллиметровой шкалой, конденсорная линза, изучаемая линза с градусной шкалой поворота линзы вокруг вертикальной оси, экран.

Элементы теории

Любая реальная оптическая система, в том числе и одиночная линза, дают изображения, в какой-то мере отличающиеся от изображаемого предмета. Точка, прямая, плоскость изображаются в виде пятна, кривой, неплоской поверхности. Кроме того, вследствие дисперсии материала линзы (зависимости показателя преломления от длины волны), изображения разного цвета не совпадают между собой по величине и положению, создавая окрашенность изображения. Все эти дефекты, приводящие к отступлению реального изображения от идеального, называются **абберациями**. Все аберрации делятся на два класса: монохроматические и хроматические. К первому классу относятся искажения изображений, возникающие в свете одной длины волны, ко второму – искажения изображений, получаемых в свете разных длин волн (чаще всего в белом свете).

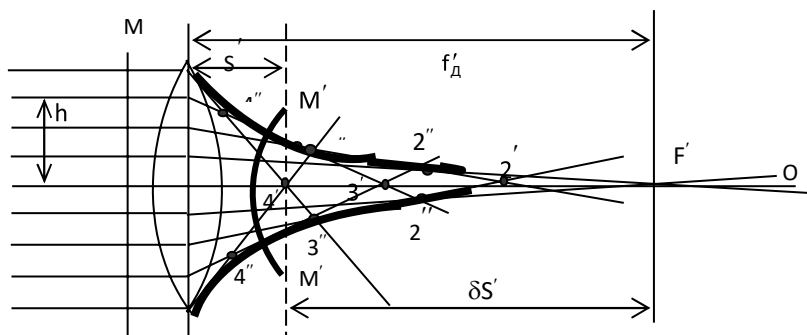
К монохроматическим аберрациям относятся: сферическая аберрация, кома, астигматизм, кривизна поля, дисторсия.

К хроматическим аберрациям относятся: продольная хроматическая аберрация и хроматическая разность увеличений.

1. Сферическая аберрация. Пучки лучей света, выходящие из одной точки или собирающиеся в одной точке, называются **гомоцентрическими**. Этим лучам соответствуют сферические волновые поверхности. Нарушение гомоцентричности пучков, прошедших через оптическую систему без нарушения симметрии этих пучков, называется **сферической аберрацией**.

Пусть лучи света (1-4) идут параллельно главной оптической оси собирающей линзы (рис. 1). В случае идеальной оптической системы такой пучок после прохождения линзы должен сойтись в одной точке, являющейся изображением бесконечно удаленной точки, расположенной слева от линзы. Изображение этой точки получило название второго главного фокуса F_2 . Для реальных сферических линз этим законам следуют только лучи, расположенные вблизи оптической оси и образующие с ней малые углы. Такие лучи называются **параксиальными**. На рис.1 такими лучами будут только лучи 1-1. Лучи 2-2, 3-3, 4-4 и др. сходятся после преломления в линзе соответственно в точках 2', 3', 4' и др. Это приводит к тому, что плоская волновая поверхность MM_1 после преломления в линзе превращается в симметричную поверхность M_2M_3 , имеющую постепенно изменяющуюся кривизну. Центрами кривизны элементов этой поверхности будут следующие точки: точка 2'', являющаяся пересечением лучей 2-1, точка 3'', являющаяся пересечением лучей 3-2, точка 4'', являющаяся пересечением лучей 4-3, и т.д., а также точки на оптической оси 2', 3', 4' и т.д., являющиеся пересечением лучей 2-2, 3-3, 4-4, и т.д. и точка F_2 для параксиальных лучей 1-1. Множество этих точек образует поверхность, огибающую совокупность лучей преломленного пучка,

которая называется *каустической поверхностью* (или просто *каустикой*), а ее сечение любой плоскостью, проходящей через луч, – *каустической кривой*. При сферической aberrации кастика приобретает вид поверхности, обладающей осью симметрии, совпадающей с главной оптической осью линзы. На рис. 1 жирные линии представляют каустическую кривую в плоскости рисунка, а сама кастика получается вращением рисунка относительно оси OO .



В отсутствие сферической aberrации каустическая поверхность превращается в точку F , т.к. все преломленные лучи соберутся именно в этой точке. Таким образом, главный фокус F для широких пучков параллельных лучей, падающих на реальную линзу, не имеет определенного положения на оптической оси вследствие сферической aberrации. Мерой продольной сферической aberrации δS служит разность отрезков от центра линзы до изображений, даваемых широкими параллельными пучками. В нашем случае (см. рис.1):

$$\delta S = S' - f'_D, \quad (1)$$

где f'_D – фокусное расстояние линзы для желтых лучей (желтые спектральные линии натрия с λ_D), S' – расстояние от центра линзы до точки, в которой определяется сферическая aberrация.

Для собирающих линз продольная сферическая aberrация имеет отрицательный знак.

Из рис. 1 видно, что отрезок $\delta S'$ тем больше, чем дальше от оптической оси расположены входящие в линзу пучки света. Откладывая по оси ординат высоту входящих лучей h , а по оси абсцисс значение $\delta S'$ находят характеристику продольной сферической aberrации линзы.

Для ослабления сферической aberrации в оптические системы вводят диафрагмы, ограничивающие световые лучи. При этом возрастает глубина резкости, которая оценивается отрезком вдоль оптической оси, на протяжении которого изображение предмета кажется наблюдателю достаточно резким.

2. Астигматизм. Этот дефект линз возникает в том случае, если линза имеет неодинаковую кривизну в некоторых двух сечениях или при косом падении лучей на правильную линзу. В этом случае изображение точки предмета лежит в двух разных плоскостях. Благодаря этому плоскости изображения вертикальных и горизонтальных линий предмета разделены в пространстве. На рис. 2 показан астигматический пучок лучей. Все лучи, лежащие в вертикальных – меридиональных плоскостях этого пучка, пересекаются по линии AB , а лучи, лежащие в горизонтальных – сагитальных плоскостях, пересекаются по линии CD . Радиусами кривизны для астигматического пучка лучей будут расстояния $OE=r_1$ и $OG=r_2$.

Величина

$$\delta r = r_2 - r_1 \quad (2)$$

называется *астигматической разностью*.

Астигматизм оптической системы может быть исправлен в результате определенного выбора радиусов кривизны преломляющих поверхностей и их фокусных расстояний. Оптическая система, свободная от астигматизма, называется *анастигматом*.

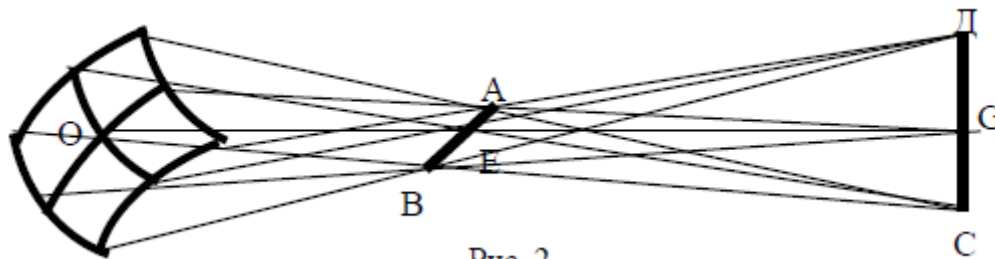


Рис. 2

Кома. Этим видом aberrации называется асимметрия пучка лучей, испускаемых точечным источником, находящимся вне главной оптической оси. Эти лучи после преломления не собираются в одну точку, а имеют вид вытянутого несимметричного пятна. Кому можно устранили соответствующей комбинацией собирающих и рассеивающих линз.

Дисторсия. Этот дефект линз заключается в искажении изображения плоских фигур вследствие непостоянства линейного увеличения в разных точках плоскости изображений. На рис. 3а показан предмет в виде сетки, на рис. 3б – его изображение с бочкообразной дисторсией, на рис. 3в – изображение с подушкообразной дисторсией. Дисторсия, так же как и кома, устраняется соответствующей комбинацией собирающих и рассеивающих линз.

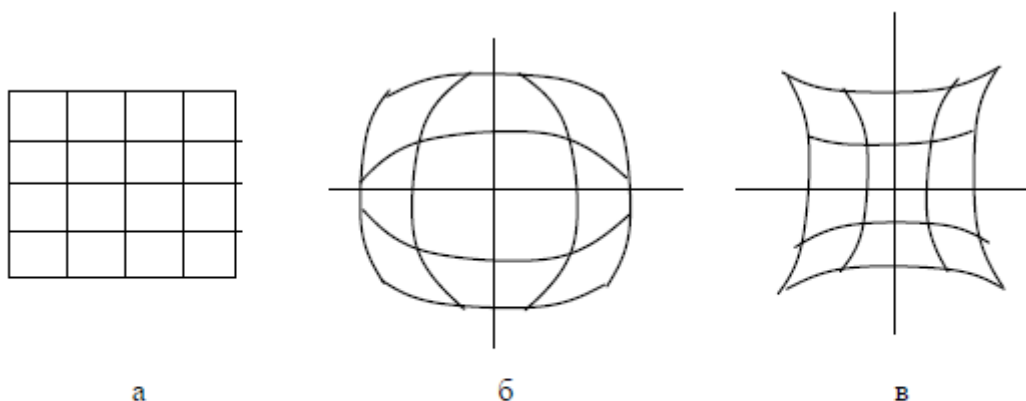


Рис. 3

5. Хроматическая aberrация. Эта погрешность линз заключается в том, что в монохроматическом свете изображение всегда окрашено, особенно по его краям.

Зависимость второго фокусного расстояния линзы f_2 от радиусов ее преломляющих поверхностей r_1 и r_2 и показателя преломления материала линзы n выражается формулой:

$$\frac{1}{f_2} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (3)$$

А так как показатель преломления зависит от длины световой волны вследствие явления дисперсии, то фокусное расстояние f_2 для различных длин волн будет различно. Для красных лучей оно максимально, для фиолетовых – минимально. Отсюда следует различие в положении изображения предмета для различных длин волн.

Обычно фокусное расстояние линзы задается для определенной длины волны; часто для желтой линии натрия $\lambda_D = 586$ нм. Поэтому в данной работе продольная хроматическая aberrация ΔS определяется разностью между положением второго главного фокуса для различных длин волн f_{λ} и для желтой линии натрия f_D :

$$\Delta S = f_{\lambda} - f_D. \quad (4)$$

Для сведения хроматической aberrации к минимуму пользуются комбинацией линз, изготовленных из специально подобранных материалов с разными показателями преломления.

Одновременно исправить все aberrации оптических систем невозможно. В каждом конкретном приборе устраняется тот или иной недостаток в зависимости от назначения данного прибора.

Описание установки

Схематическое изображение установки приведено на рис. 4. На оптической скамье 1 со шкалой с миллиметровыми делениями установлен осветитель 2 с сеткой 2а на выходе, барабан с четырьмя свето-фильтрами 3 и переключателем фильтров 4, конденсорная линза 5 с диафрагмой 5а, изучаемая линза 6, способная поворачиваться относительно вертикальной оси. Угол поворота регистрируется на круговом лимбе 7. В конце оптической скамьи установлен экран 8, на котором производятся наблюдения.

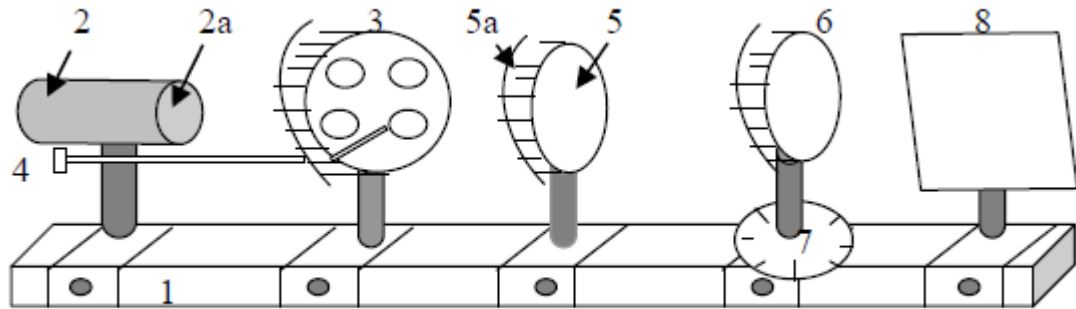


Рис. 4

Упражнение 1

Изучение продольной сферической аберрации

1. Ввести в световой луч желтый светофильтр.
2. Конденсорную линзу 5 установить на деление 320 оптической скамьи.
3. Изучаемую линзу установить на деление 400. Диафрагму перед линзой открыть до диаметра, равного 50 мм (на шкале деление 50).
4. Перемещая экран, добиться четкого изображения центра сетки на экране. Сделать отсчет положения экрана и записать его в табл. 1.
5. Последовательно уменьшать диаметр диафрагмы до 40 мм, 30 мм, 20 мм и 10 мм. Перемещая экран, добиться наиболее резкого изображения центра сетки. Отсчеты положения экрана занести в табл. 1.
6. Повторить измерения при изменении диаметра диафрагмы по 5 раз. Результаты занести в табл. 1. Получить средние значения. 7. При каждом предыдущем измерении производить определение глубины резкости изображения путем перемещения экрана вдоль оптической скамьи до появления слегка размытого изображения в ту и другую сторону относительно исследуемой линзы. Разность отсчетов положения экрана для крайних несколько размытых изображений дает величину глубины резкости $DS\zeta$.
8. Принимая расстояние от линзы до изображения сетки при наименьшей диафрагме (параксиальные лучи) за фокусное расстояние $\delta S'$, вычислить по ф. (4) сферическую аберрацию $dS\zeta$ для каждой диафрагмы, при этом следует учесть знак $\delta S'$.
9. По полученным данным построить графики зависимостей аберрации $\delta S'$ и глубины резкости $\Delta S'$ от диаметров диафрагм и определить ошибку измерений аберрации для минимальной и максимальной диафрагмы. Данные занести в табл. 2. Ошибка определяется по общим законам:

$$\Delta x = \sqrt{\frac{\sum (\delta S'_{\text{ср.}} - \delta S'_i)^2}{n-1}}$$

и $\Delta(\delta S') = t\Delta x$, где t – коэффициент Стьюдента. Для 5 измерений и доверительной вероятности 0,95: $t=2,57$.

$$\Delta(\delta S') = \dots$$

Таблица 1

Диаметр диафрагмы	№№ п/п	Расстояние от линзы до экрана S'	Глубина резкости $\Delta S'$	Величина aberrации $\delta S'$
50 мм	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
	Ср.			
40 мм	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
	Ср.			
...
10 мм	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
	Ср.			

Таблица 2

Диафрагма	$\delta S'_{\text{ср.}}$	NN п/п	$\delta S'_{\text{ср.}} - \delta S'_i$	$(\delta S'_{\text{ср.}} - \delta S'_i)^2$	$\Sigma(\delta S'_{\text{ср.}} - \delta S'_i)^2$
50 мм		1			
		2			
		3			
		4			
		5			
10 мм		1			
		2			
		3			
		4			
		5			

Упражнение 2

Изучение астигматизма линзы

1. Установить желтый светофильтр.
2. Исследуемую линзу открыть полностью.
3. Поставить линзу так, чтобы ее оптическая ось совпадала с направлением лучей света (0° на круговом лимбе).
4. Перемещая экран, получить наиболее резкое изображение вертикальных линий сетки. Занести положение r_2 на шкале оптической скамьи в табл. 3. Затем, перемещая экран, добиться наиболее резкого изображения горизонтальных линий сетки. Положение экрана r_1 занести в табл. 3.
5. Повторить измерения 5 раз.
6. Повернуть линзу относительно вертикальной оси последовательно на 100, 200, 300 и т.д. Определить величины r_1 и r_2 и их значения занести в табл. 3. Для каждого угла поворота измерения провести по 5 раз.
7. По полученным данным рассчитать астигматические разности $dr = r_2 - r_1$ для всех углов поворота.
8. Построить график зависимости астигматических разностей dr от углов поворота.

Таблица 3

φ	№№ п/п	r_1	r_2	δr
0°	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
10°	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•
•	•	•	•	•

Упражнение 3

Изучение продольной хроматической аберрации

1. Установить диафрагму, для которой глубина резкости $\Delta S'$ оказалась наименьшей.
2. Устанавливая поочередно светофильтры, получить передвижением экрана наиболее резкое изображение сетки для каждого цвета. Расстояние от экрана до линзы будет равно фокусному расстоянию линзы в свете лучей определенной длины волны λ' . Повторить каждое измерение по 5 раз и определить среднее значение. Результаты занести в табл. 4.
3. Принимая за наиболее вероятное фокусное расстояние линзы измеренное значение в желтых лучах f' и пользуясь формулой 4, вычислить хроматическую аберрацию $\delta S'$.
4. По полученным данным построить график зависимости аберрации от длины волны пропускания светофильтра.

Таблица 4

Цвет	λ , нм	№№ п/п	Положе- ние экрана а	Среднее значение a_{cp}	Положе- ние линзы в	$f_{\lambda}' = a_{cp} - v$	$\delta S'$
Красный		1 ... 5					
Желтый		1 ... 5					
Зеленый		1 ... 5					
Синий		1 ... 5					

Литература

1. Ландсберг Г. С. Оптика. – М.: Наука, 1976.
2. Лабораторный практикум по физике / Под ред. А.С. Ахматова. – М.: Высшая школа, 1980.
3. Лабораторные занятия по физике / Под ред. Л.Л. Гольдина. – М.: Наука, 1983.
4. Физический практикум / Под ред. В.И. Ивероновой. – М.: Наука, 1968.

Лабораторная работа № 9. ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКОЙ ТРУБЫ

Цель работы: Изучить устройство и ход лучей в оптической трубе, выяснить возможность этого прибора для практического использования, освоить метод определения увеличения изображений предметов, экспериментально определить это увеличение, а также поле зрения оптической трубы, оценить ошибки измерений.

Оборудование: Зрительная труба, линейки с делениями, рулетка.

Теория

Оптическая (зрительная) труба и микроскоп относятся к приборам, расширяющим возможности глаза человека. В общем случае, рассматривая различные приборы, вооружающие глаз, следует всегда помнить, что в каждом случае эти приборы и глаз образуют единую оптическую систему, существенным элементом которой является хрусталик глаза. Вся эта система в целом дает изображение предмета на сетчатке глаза и кажущаяся величина предмета оценивается по величине этого изображения.

Зрительная труба представляет собой оптическую систему, предназначенную для наблюдения удаленных предметов. Если лучи от предмета приходят в трубу в виде параллельных пучков, то оптическая система трубы называется телескопической.

Простейшая телескопическая система состоит из двух элементов: обращенного к объекту наблюдения и называемого объективом и обращенного к глазу наблюдателя и именуемого окуляром. Если в качестве окуляра применена положительная оптическая система (собирающая линза), то такая оптическая система называется системой Кеплера. Она дает обратное изображение, поэтому для земных наблюдений в окуляр вставляют дополнительную призму, обращающую изображение. Системы данного типа используют в зрительных трубах, геодезических и астрономических инструментах. Если в качестве окуляра применена отрицательная оптическая система (рассеивающая линза), то такая система называется системой Галилея. Она применяется в тех случаях, когда не требуется большого увеличения, например, в театральных биноклях. Прежде чем приступить к изучению оптической схемы зрительной трубы, необходимо тщательно изучить теорию работы 4-1. На рис. 1 представлена оптическая схема зрительной трубы Кеплера. Она состоит из объектива O_1 с большим фокусным расстоянием и окуляра O_2 – системы с небольшим фокусным расстоянием. Очень часто второй главный фокус $1 F_2$ объектива совпадает с первым главным фокусом F_2 окуляра, благодаря чему падающий в объектив параллельный пучок выходит из окуляра также параллельным пучком (рис. 2).

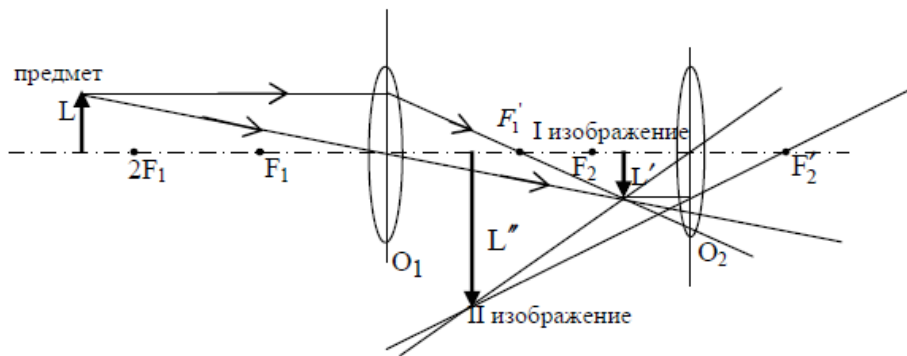


Рис. 1. Оптическая схема зрительной трубы

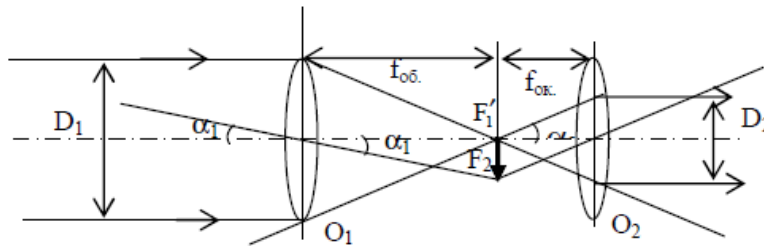


Рис. 2. Оптическая схема зрительной трубы с совмещенным фокусом

Как показано на рис. 1, объектив O_1 образует обратное действительное уменьшенное изображение $L\phi$ бесконечно удаленного предмета L . Окуляр O_2 устанавливается так, что изображение $L\phi$ (I изображение) располагается между фокусом F_2 окуляра и самим окуляром. Поэтому второе изображение предмета $L\phi\phi$ (II изображение) является заметно увеличенным и мнимым.