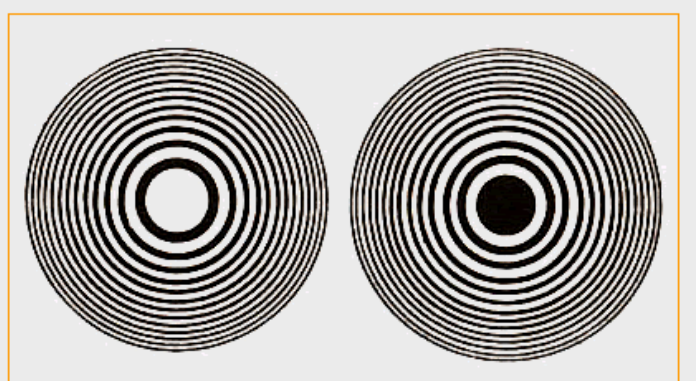


Фазовая зонная пластинка

Цель работы: изучить принцип действия и познакомиться со свойствами фазовой зонной пластинки (ФЗП).

Для расчета дифракционных картин Френель предложил приближенный способ, основанный на представлении о так называемых полуволновых зонах (зонах Френеля).

Из определения зон Френеля для точки наблюдения P следует, что световые волны, испускаемые четными зонами Френеля, приходят в точку P в одной фазе, а нечетными – в противоположенной. Таким образом, волны от четных и нечетных зон взаимно ослабляют друг друга. Если каким-либо способом «выключить» все четные или все нечетные зоны, можно получить



Зонные пластинки Френеля. Слева - открыты нечетные зоны, справа - четные

существенное увеличение суммарной напряженности электрического поля и, соответственно, интенсивности света в точке P . Эта идея лежит в основе простого оптического устройства, называемого *зонной пластинкой Френеля*.

На рис.1 показана векторная диаграмма сложения амплитуд напряженностей полей в точке P , созданных нечетными зонами Френеля.

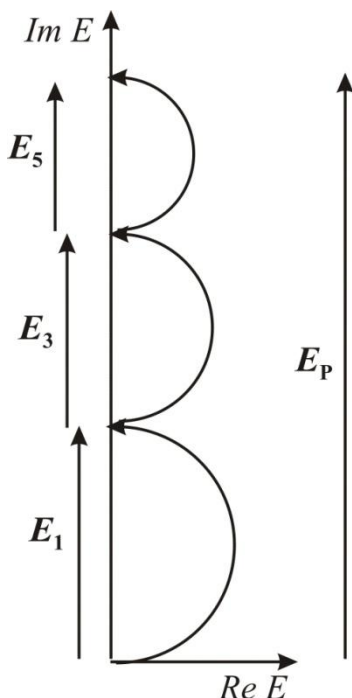


Рис.1. Векторная диаграмма для зонной пластинки Френеля. Векторы E_1, E_3, E_5, \dots изображают вклады в амплитуду суммарного поля открытых нечетных зон Френеля. Амплитуда суммарного поля E_P многократно превышает амплитуду поля E_∞ , которое наблюдалось бы в точке P в отсутствии зонной пластинки.

Видно, что зонная пластинка существенно увеличивает амплитуду (и интенсивность) светового поля в точке P . Поскольку зонная пластинка не может увеличить мощность падающей на нее световой волны, то следует сделать вывод, что она перераспределяет энергию в пространстве, сосредотачивая её в определенных областях. Другими словами,

зонная пластинка фокусирует свет, аналогично тому, как это делает линза.

Расстояние от точечного источника до зонной пластинки a (рис.2) и от зонной пластинки до точки наблюдения P связаны с радиусами зон Френеля r_m следующим соотношением:

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b}} m\lambda, \quad (1)$$

где m - номер зоны, λ - длина волны света.

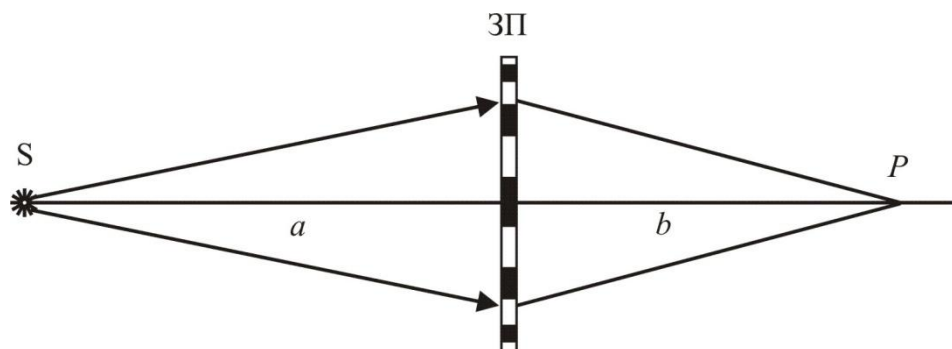


Рис.2. Создание изображения зонной пластинкой

Соотношение (1) можно переписать в виде:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{m\lambda}{r_m^2} = \frac{1}{f}, \quad (2)$$

где величина $f = \frac{r_m^2}{m\lambda}$ – называется фокусным расстоянием зонной пластинки.

Характерной особенностью зонной пластинки по сравнению с линзой является то, что ее фокусное расстояние зависит от длины волны. Это явление называют хроматизмом. Чем больше длина волны, тем меньше фокусное расстояние.

Фокусирующее действие зонной пластинки будет наблюдаться и в случае, когда в каждой открытой кольцевой зоне будет укладываться по 3, 5, ... и.т.д. зон Френеля. Следовательно, в отличие от линзы, для каждой длины волны зонная пластинка имеет несколько фокусов. Это обстоятельство аналогично наличию максимумов различных порядков у дифракционных решеток.

Фокусирующее действие зонной пластинки будет иметь место и тогда, когда лучи света падают на пластинку под небольшим углом. Следовательно, с помощью зонной пластинки можно получить изображение протяженных источников или предметов.

При прохождении света через амплитудную зонную пластинку половина световой энергии падающей волны теряется из-за поглощения в непрозрачных областях пластинки.

Для того, чтобы избежать этих потерь и увеличить эффективность сбора световой энергии в точке P , используют фазовую зонную пластинку (ФЗП). Она изменяет фазу колебаний от всех четных зон на π . При этом амплитуда результирующего колебания по сравнению с амплитудной зонной пластинкой увеличивается в точке P в два раза, а интенсивность, соответственно, в четыре (рис.3).

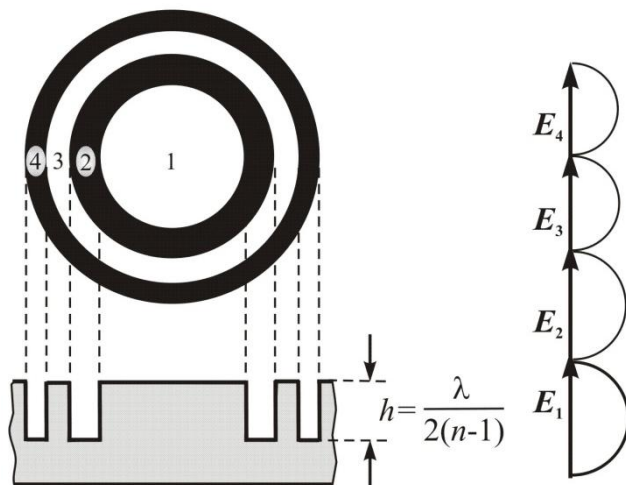


Рис.3. Профиль двухуровневой фазовой зонной пластинки.

Чтобы изменить фазу волны на π , следует изменить оптический путь на $\lambda/2$. Для этого толщину стеклянной пластинки в местах, соответствующих четным зонам Френеля, нужно уменьшить или увеличить на величину h , равную:

$$h = \frac{\lambda}{2(n-1)}. \quad (3)$$

Сечение такой пластинки показано на рис. 3. Для видимого света величина h приблизительно равна 0,5 мкм.

Двухуровневая ФЗП способна сконцентрировать в точке P до 40% световой энергии, падающей на нее.

Еще больше увеличить амплитуду колебаний в точке P можно с помощью трехуровневой ФЗП (рис.4).

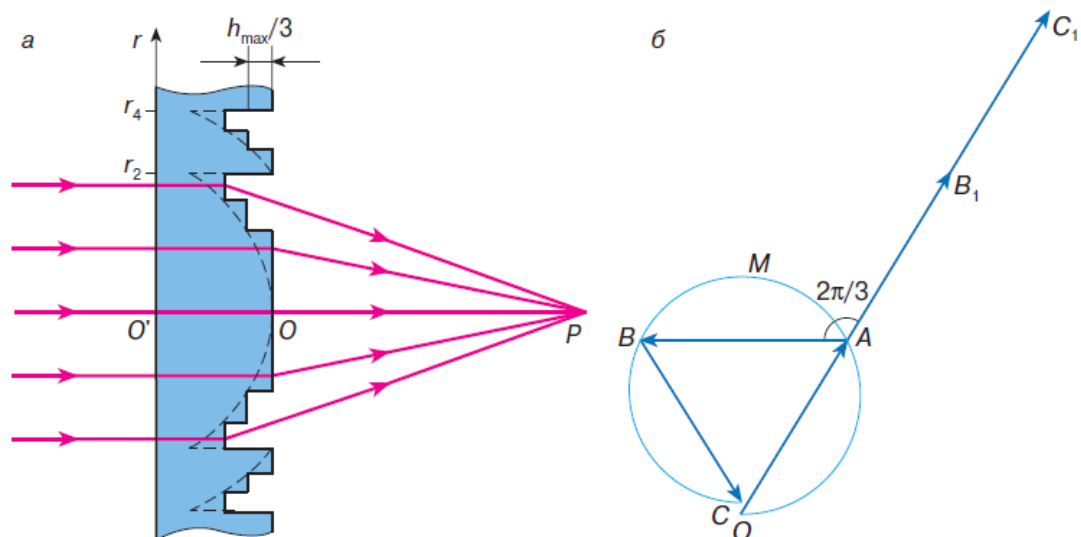


Рис.4. Профиль рельефа трехуровневой ФЗП (а). Справа (б) показана векторная диаграмма, поясняющая как определяется суммарная амплитуда колебаний от двух первых зон.

Для создания такой ФЗП поверхность двух соседних зон, например, 1 и 2, разбивается на три кольцевые части равной площади (очевидно, что они будут отличаться по ширине). Вклад от каждой части на векторной диаграмме изобразится векторами **OA**, **AB** и **BC**, а их сумма равна нулю (рис.4б). Чтобы сделать модуль суммы этих векторов максимальным, необходимо, очевидно, повернуть вектор **AB** на угол $2\pi/3$, а вектор **BC** – на $4\pi/3$. Этого можно достичь уменьшением фазы волн от этих участков. Для этого необходимо вторую кольцевую часть углубить на величину $h_{\max}/3$, а третью – на $2h_{\max}/3$. Профиль такой ФЗП показан на рис.4а.

Амплитуда колебаний в точке P , создаваемая трехуровневой ФЗП, в $\frac{3\sqrt{3}}{4}$ раза больше амплитуды, создаваемой двухуровневой ФЗП, а интенсивность, соответственно, в 27/16 раз (см. рис.3 и 4).

В данной работе используется трехуровневая ФЗП. Она освещается немонахроматическим светом газоразрядной неоновой лампы. Излучение неона в видимой области (рис.5) богато линиями в красной и оранжевой областях спектра (этим объясняется характерный красноватый оттенок свечения).

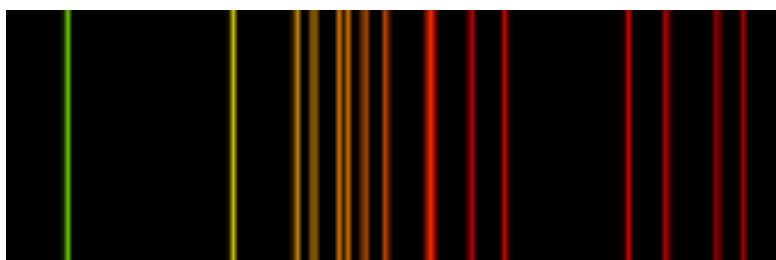


Рис.5. Спектр излучения неона в видимой области

Выше было отмечено, что ФЗП обладает сильным хроматизмом: для разных длин волн она имеет разные фокусные расстояния (см. формулу (2)). Если свет неоновой лампы направить на ФЗП, то после нее световые волны разной длины волны соберутся в разных точках P_i (рис.6).

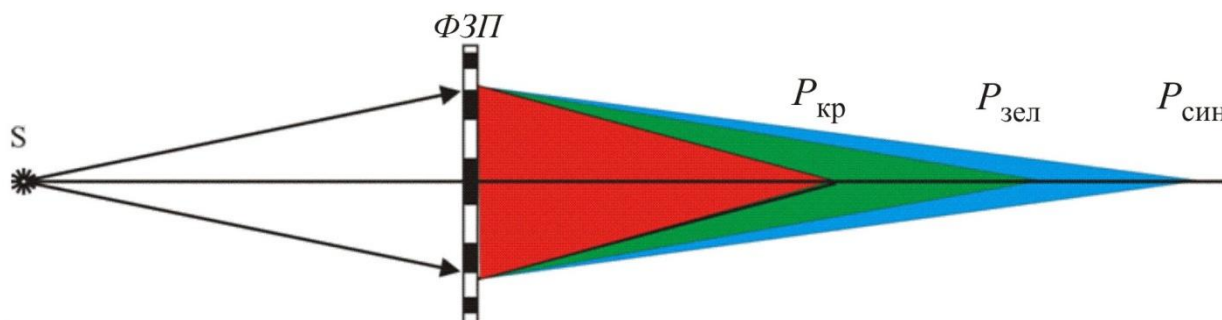


Рис.6. Хроматизм зонной пластинки

Если призма разлагает немонахроматический свет в спектр в направлении, перпендикулярном к направлению распространения волны, то ФЗП разлагает свет в спектр вдоль направления распространения волны.

Решаемые задачи:

- визуально пронаблюдать фокусировку световой волны ФЗП;
- определить фокусные расстояния для различных длин волн и определить радиусы зон Френеля ФЗП.

Оптические элементы и аппаратура (рис.7):

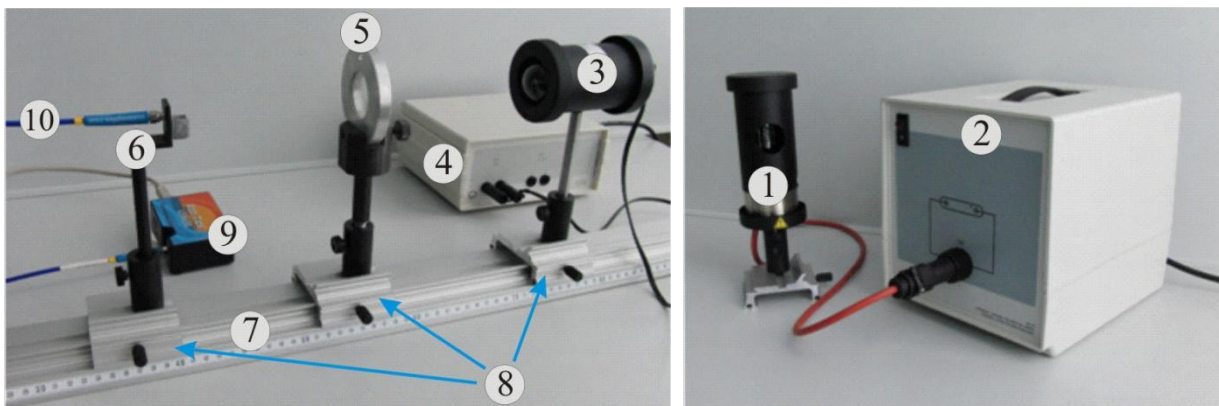


Рис.7. Общий вид экспериментальной установки

- ✓ неоновая лампа (1) с блоком питания (2);
- ✓ лампа накаливания (3) с блоком питания (4);
- ✓ фазовая зонная пластинка (5) в держателе;
- ✓ держатель оптического волокна (6);
- ✓ оптическая скамья (7) с рейтерами (8);
- ✓ спектрометр Red Tide USB650 (9);
- ✓ оптическое волокно (10), соединенное со спектрометром;
- ✓ компьютер с установленной программой Spectra Suit.

Принцип работы спектрометра Red Tide USB650.

Ниже схематично показан путь света через оптический модуль спектрометра.

Свет через оптическое волокно поступает на входную щель 1 (рис.8). Она представляет собой узкую прорезь, сделанную в непрозрачной пластине, и имеет фиксированную ширину 25 мкм.

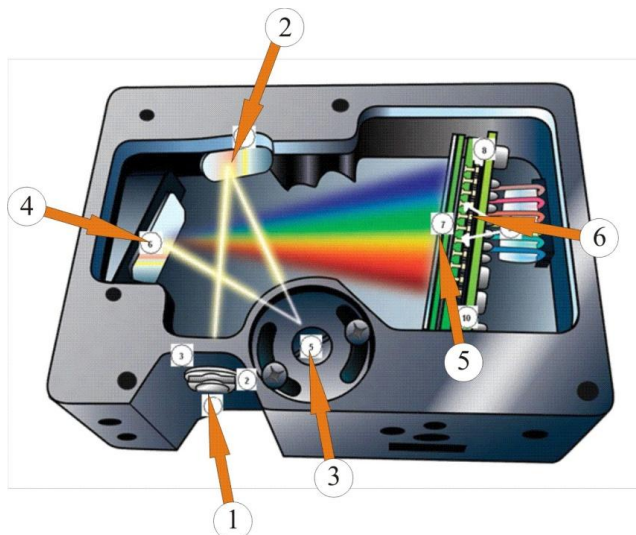



Рис.8. Схема спектрометра Red Tide USB-650.

Коллимирующее сферическое зеркало 2 преобразует расходящийся световой пучок в параллельный и направляет его на отрагательную дифракционную решетку 3. Разложенный в спектр свет с помощью

фокусирующего зеркала 4 и собирающей линзы 5 фокусируется на поверхности детектора 6 (кремниевый линейный ПЗС - детектор). Этот детектор содержит 650 светочувствительных элементов (пикселей), размер которых 14 x 200 мкм. Один отсчет элемента соответствует регистрации 75 фотонов. Все элементы выстроены вдоль одной прямой таким образом, что каждый светочувствительный пиксел соответствует определенной длине волны света. После аналого-цифрового преобразования электрических сигналов с пикселей спектр в цифровом виде передается программе SpectraSuite.

Настройка спектрометра и программной оболочки.

Откройте программу Spectra Suit, используя пиктограмму  на рабочем столе компьютера. Подсоедините спектрометр к компьютеру через USB порт.

Закройте в рабочем окне программы (рис.9) вспомогательные окна 1 и 2. Регистрируемый спектр будет выводиться в окне 3.

Кнопки работы со спектрами находятся на панели, показанной на рис.10:

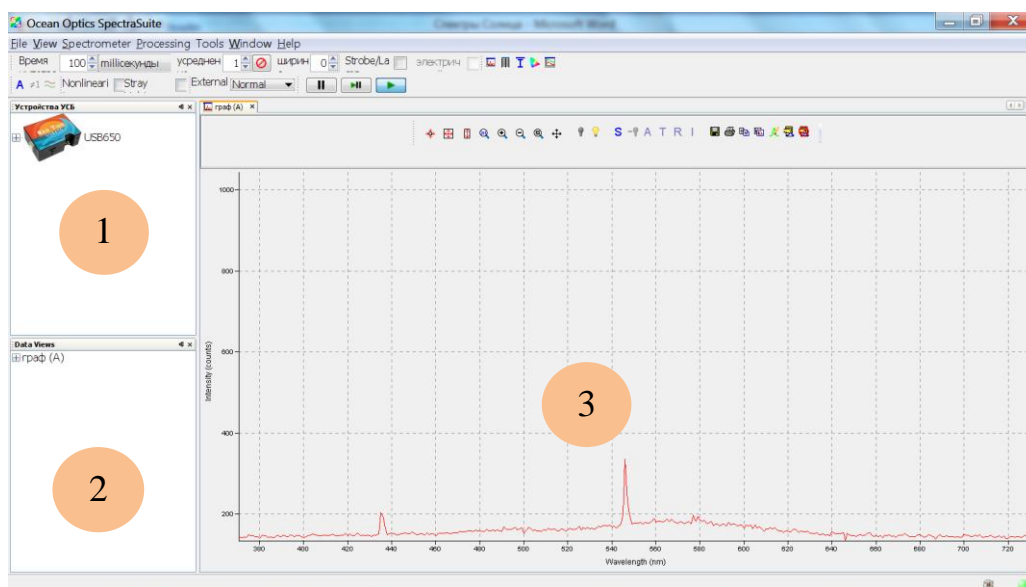













Рис.9. Рабочее окно программы



Рис.10. Кнопки работы со спектрами








- вывод на дисплей всего спектрального диапазона (от 350 до 1000 нм).

-  - масштабирование спектра по осям X и Y на весь экран.
-  - масштабирование спектра по оси Y на весь экран.
-  - ручная установка масштабов по осям X и Y.
-  и  - кнопки увеличения и уменьшения размеров спектра (можно также воспользоваться прокруткой колеса мыши)
-  - увеличение масштаба выбранной области. Нажав левую клавишу мыши выделите прямоугольную область на экране, которую Вы хотите увеличить.
-  - кнопка просмотра нескольких спектров на одном слое.
-  - кнопка сохранения темнового спектра.
-  - кнопка сохранения эталонного спектра.
-  - выбор режима регистрации.
-  - вычитание темнового спектра.

В зависимости от выбора режима возможна регистрация спектров оптической плотности A , пропускания $T = I/I_0$, коэффициента отражения R и относительной освещенности I .

Группа кнопок позволяет осуществить ввод/вывод спектров:

-  - сохранение спектра в различных форматах (Grams SPC, JCAMP, binary (only SpectraSuite can read) or tab-delimited (can be opened in an Excel spreadsheet)).
-  - распечатка спектра.
-  - копирование спектра в буфер.
-  - сохранение текущего спектра в качестве верхнего слоя.
-  - удаление спектров верхнего слоя.

При регистрации спектра важно, чтобы регистрируемый сигнал не превышал 4000 отсчетов (один отсчет соответствует попаданию на светочувствительную матрицу 75 фотонов). Для этого необходимо правильно выбрать время накопления сигнала, которое задается с помощью кнопок «Время», расположенных в верхней левой части экрана (рис.11). Диапазон изменения этого параметра составляет от 3 мс до 65 с. Чем больше время накопления сигнала, тем больше сигнал. Рекомендуется подбирать этот параметр таким, чтобы сигнал не превышал 3500 отсчетов.

С помощью кнопок «Усреднение» можно выводить на экран усредненный спектр. Число спектров, которые Вы хотите усреднить, задается в соответствующем окошке (рис.11).

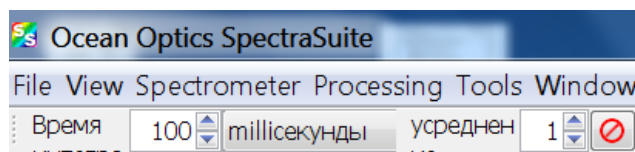


Рис.11. Строка выбора времени регистрации и числа усредняемых спектров.

Порядок выполнения работы:

Упражнение 1. Визуальное наблюдение фокусировки световой волны ФЗП.

1. Установите на правом конце оптической скамьи 7 лампу накаливания 3 (рис.7). Если на кожухе лампы установлена матовая пластинка, аккуратно снимите её.

2. Примерно на расстоянии 50 см от лампы установите зонную пластинку 5 в держателе.

3. Подключите лампу накаливания к разъемам 6V блока питания. Подключите блок питания к сети. Для выключения лампы достаточно отсоединить один из разъемов лампы от блока питания.

4. Возьмите лист белой бумаги и получите на нем, как на экране, изображение нити накаливания, создаваемое ФЗП. Перемещайте лист вдоль оптической оси системы и наблюдайте, как меняется цвет изображения. Обратите внимание, что изображение нити накаливания в красном цвете образуется ближе к ЗП, чем изображение нити в зеленом цвете. Дайте этому объяснение.

5. Приближайте лист бумаги ближе к ФЗП. Примерно на расстоянии 15 см от нее вновь возникает уменьшенное изображение нити накала. Объясните причину его появления.

Упражнение 2. Определение радиусов зон Френеля ФЗП.

1. Уберите осветитель и установите на правом конце оптической скамьи 7 неоновую лампу 1 (рис.7). Правый край рейтера лампы должен располагаться на отметке 100 см.

2. Установите рейтер с ФЗП на отметке 47 см (по правому краю). Измерьте расстояние между источником и ФЗП (величина a в формуле (2)).

3. Установите держатель 6 с оптическим волокном на отметке 7 см.

4. Установите центры всех элементов на одной высоте (например, на высоте 20 см от поверхности стола).

5. Подсоедините к блоку питания неоновую лампу и включите её.

6. Установите центр ФЗП на одной оси, соединяющей лампу и входное отверстие оптического волокна (небольшое отверстие в держателе оптического волокна). Для этого нужно ослабить винт крепления ФЗП. Наблюдая за изображением светящегося газа на поверхности держателя, перемещайте ФЗП в направлении, перпендикулярном оптической оси и

совместите изображение с входным отверстием оптического волокна. Убедитесь, что плоскость ФЗП перпендикулярна оптической оси.

7. Включите компьютер и войдите в программу Spectra Suit. В окне программы Spectra Suit установите время интегрирования 50 мсек, а число усредняемых спектров – 6.

8. С помощью клавиши  выведите на экран область спектра от 550 до 800 нм. Щелкните мышью по кнопке  и масштабируйте спектр по оси Y на весь экран.

9. Подведите курсор мыши к максимуму линии 585 нм и щелкните правой клавишей мыши. Появится линия курсора: ее положение по длинам волн будет показано в нижнем окне, а справа от этого окна выводится интенсивность сигнала на этой длине волны. Изменяя время интегрирования следует добиться, чтобы сигнал не превышал 3800 отсчетов. В дальнейшем нужно за этим внимательно следить. Если сигнал существенно «скачет» со временем, то увеличьте число усредняемых спектров.

10. Плавно перемещайте держатель с оптическим волокном вдоль оптической скамьи и найдите такое положение, при котором интенсивность линии примет максимальное значение. Это означает, что для данной длины волны приемник (входное отверстие оптического волокна) находится в точке P. Измерьте расстояние между входным отверстием оптического волокна и ФЗП (величина b в уравнении (2)).

11. Повторите пункты 9 и 10 для других 8 -10 спектральных линий и заполните таблицу 1:


$\lambda/\text{нм}$	$10^7/\lambda$	$b/\text{см}$	$\frac{ab}{a+b}/\text{см}$

12. Постройте график зависимости величины $\frac{ab}{a+b}$ от $10^7/\lambda$ и определите по графику величину $\frac{r_m^2}{m}$. Приведите значения радиусов первых зон: r_1, r_2, r_3 .

Упражнение 3. Регистрация спектра излучения неона при различных положениях ФЗП.

1. Вновь подведите курсор мыши к максимуму линии 585 нм. Изменяя время интегрирования добейтесь, чтобы сигнал не превышал 3000 отсчетов.

2. Плавно перемещайте держатель с оптическим волокном вдоль оптической скамьи и найдите такое положение, при котором интенсивность этой линии примет максимальное значение. Сохраните этот спектр, нажав

клавишу  (сохранение спектра возможно в различных форматах (Grams SPC, JCAMP, binary (только для программы SpectraSuite) или tab-delimited (может быть открыта в Excel)).

3. Повторите пункты 1 и 2 для линии 724 нм.
4. Постройте на одном графике оба спектра. Объясните, почему наблюдается перестройка этих линий.

Вопросы к обсуждению с преподавателем.

1. Дифракция Френеля на круглых отверстиях и дисках. Зоны Френеля.
2. Зонная пластинка. Фазовая зонная пластинка. Линза как фазовая зонная пластинка.
3. Почему зонная пластинка обладает несколькими фокусами. Почему они зависят от длины волны.
4. Вывести рабочие формулы.
5. Каким образом Вы определили радиусы зон Френеля?

Рекомендуемая литература.

1. Ландсберг Г.С. Оптика, Изд.6, М., Физматлит, 2006. §§33,34,35.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. т.4. Оптика. Изд.3. М., Физматлит, 2005. §39, 40.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. Изд.10, М., Физматлит, 2008. §126, 127.
4. Бутиков Е.И. Оптика. Изд.2, С-Пб., Невский диалект, 2003. §6.1
5. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. М., МГУ, 1998. Лекция 15, Дополнение 12.
6. Фишман А.И. Фазовые оптические элементы – киноформы. Соросовский образовательный журнал, N12, 1999. С.76 – 83.
(<http://lasers.org.ru/forum/attachments/kinoform-pdf.5469/>).