

Краевая научно-практическая конференция
учебно-исследовательских работ учащихся 6-11 классов
«Прикладные и фундаментальные вопросы математики»

**Изучение дифракционного оптического элемента –
зонной пластинки Френеля**

Старков Александр Евгеньевич
11 кл., МБОУ «Лицей № 1», г. Пермь

Герцен Татьяна Анатольевна
к.х.н., доцент ПНИПУ

Пермь 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
1. Введение	3
2. Теоретическая часть	4
3. Экспериментальная часть	8
4. Заключение	11
5. Список литературы	12
6. Приложение	13

ВВЕДЕНИЕ

Наступило время оптических приборов нового поколения. Уже широко стали использоваться вместо толстых стеклянных линз тонкие плоские пластинки. Они представляют собой один из видов дифракционных оптических элементов (ДОЭ). Первыми ДОЭ были и остаются дифракционные решетки. Первые из них были изготовлены из пера (1673 – J. Gregory, волоса 1785 – D.Rittenhouse, проволоки 1821 – J. Fraunhofer). В 1982-1988 г. были синтезированы ДОЭ с заданными параметрами для видимого и инфракрасного диапазонов (0,63 -10,6 мкм) [1]. Примером ДОЭ являются также зонные пластинки Френеля. Все ДОЭ изменяют оптический фронт, «вырезая» его часть [2].

ДОЭ применяются в системах обработки информации, используются при разработке вычислительной техники нового типа, их изучение, моделирование и проектирование является актуальным направлением в оптике и акустике. Эти устройства находят применение и в быту. Так, в отделах оптики можно приобрести гибкую пластиковую пластинку «Помощник», используемую как обычное, но очень удобное (тонкое, легкое) «увеличительное стекло». Целью данной работы явилось изучение свойств такой пластинки и возможности использования этого устройства в школьном курсе физики.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Дифракцией называется совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света вблизи границ тел, прохождении сквозь малые отверстия и связанных с отклонениями от законов геометрической оптики. То есть происходит огибание светом препятствий и проникновение в область геометрической тени. Но эти явления заметны, если размеры препятствий сравнимы с длиной волны λ .

Объяснение дифракционных явлений дает принцип Гюйгенса-Френеля: каждый элемент волновой поверхности рассматривается как источник вторичной сферической волны, амплитуда которой пропорциональна площади элемента поверхности. Разбиение волновой поверхности на вторичные источники (зоны), в ряде случаев упрощающие расчеты, предложил О. Френель (метод зон Френеля).

Например, возьмем точечный источник света и представим зоны в виде колец так, чтобы расстояния от краев каждой зоны до точки P отличалось на $\lambda/2$ (рис.1. Приложение).

$$b_m = b + m \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

Поэтому волны от соседних зон приходят в точку P в противофазе ($\delta = \pi$) и соответственно «гасят» друг друга. Сложение амплитуд колебаний при этом можно представить в виде:

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + \dots + A_m \quad (2)$$

Где A – амплитуда результирующего колебания, A_m – амплитуда колебаний от m -й зоны Френеля.

Площадь m -й зоны равна

$$\Delta S = S_m - S_{m-1} \quad (3)$$

Расчеты площади зон и их радиусов (рис.2. Приложение) дают:

$$r_m^2 = a^2 - (a - h_m)^2 = (b + m \frac{\lambda}{2})^2 - (b + h_m)^2$$

$$h_m = \frac{bm\lambda + m^2 (\frac{\lambda}{2})^2}{2(a+b)} \approx \frac{bm\lambda}{2(a+b)}$$

$$S_m = 2\pi a h_m = \frac{\pi ab}{a+b} m\lambda \quad (4)$$

$$\Delta S_m = \frac{\pi ab \lambda}{a+b}$$

Площади зон при небольших номерах m практически одинаковы. Но с увеличением номера зоны возрастает угол между нормалью к поверхности и луча, направленного на точку наблюдения, а также увеличивается и расстояние до этой точки (Рис.3). Поэтому амплитуда колебаний уменьшается:

$$A_1 \rangle A_2 \rangle A_3 \dots A_m \rangle$$

Формулу (2) можно записать в виде:

$$A = \frac{A_1}{2} + \left(\frac{A_1}{2} - A_2 + \frac{A_3}{2} \right) + \left(\frac{A_3}{2} - A_4 + \frac{A_5}{2} \right) + \dots = \frac{A_1}{2}$$

Так как площади соседних зон близки, то выражения в скобках практически равны нулю, и в результате сложения амплитуд получим $A_1/2$, то есть результирующая амплитуда равна половине амплитуде, создаваемой одной лишь центральной зоной, а интенсивность $I \sim A^2$, тогда полностью открытый фронт дает интенсивность $I = I_1/4$

Радиусы зон можно оценить, считая, что $h_m \ll a$

$$r_m^2 = 2ah_m - h_m^2$$

$$r_m^2 \approx 2ah_m \quad (5)$$

Подставив в (5) h_m , получим радиус кольцевой зоны m :

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b}} m\lambda \quad (6)$$

Если на пути световой волны поместить небольшое круглое отверстие, то в точке наблюдения P (в центре дифракционной картины) наблюдается максимум освещенности (светлый) или минимум (темное). Этот результат определяется числом зон в плоскости отверстия: если в плоскости отверстия укладывается нечетное число зон, то в центре – максимум, если четное число, то – минимум (рис. 4).

Если закрыть все четные или все нечетные зоны Френеля, то в точке наблюдения будет усиление освещенности. Свет от всех открытых зон в этом случае приходит в точку наблюдения в одной и той же фазе. Такого вида зонные пластинки называются **амплитудными** (Рис.5). Этот результат похож на фокусирование света линзой.

Формулу (4) можно переписать в виде:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{m\lambda}{r_m^2} = \frac{1}{F} \quad (7)$$

Это выражение выглядит так же, как формула тонкой линзы. То есть зонная пластинка «работает» как линза с фокусным расстоянием F .

Если $a \rightarrow \infty$, то $b = F$, значит, параллельный пучок лучей собирается в фокусе.

Зонную пластинку можно также считать простейшей голограммой – голограммой объекта-точки.

Более эффективно по сравнению с амплитудной является **фазовая** зонная пластинка. Она состоит из таких же кольцевых зон, но при этом прозрачных с оптической толщиной в половину длины волны ($\lambda/2$) (Рис. 6). Поэтому все четные и нечетные зоны дают вклад в освещенность центра в точке P , и светосила фазовой пластинки выше, чем у амплитудной. Зонные пластинки сложной формы для

фокусировки и создания заданного распределения интенсивности (энергии) в фокальной плоскости называются киноформами.

Но затем возникает вопрос: как различить зонные пластинки и линзы Френеля. Действие зонных пластинок основано на явлении дифракции и интерференции. А действие линзы Френеля – на преломлении света прозрачной средой, размеры кольцевых зон при этом велики по сравнению с длинами волн. Также используют термин «фазовая линза Френеля». Они могут иметь вид объемной детали в виде конической ступенчатой пирамидки со ступенькой в $\lambda/2$. Такую линзу также рассматривают как фазовую пластинку с плавным криволинейным профилем (рис. 8 Приложение).

В качестве примера спроектируем модель пластинки с несколькими зонами для фокусировки монохроматического светового потока с $\lambda = 550$ нм (середина видимого спектра). Показатель преломления примем $n = 1,5$. Тогда высота рельефа может быть рассчитана как

$$h = \frac{\lambda}{2(n-1)} \quad (8)$$

$h \sim 550$ нм (0,0055 мм), хотя здесь взята разность хода в полволны, рельеф может быть и выше.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1 . Приборы и оборудование

1. Лупа «Помощник».
2. Линейка $\Delta = 1$ мм.
3. Штангенциркуль $\Delta = 0,05$ м.
4. Микроскоп школьный.
5. Устройство для удержания источника (фонарика) (Рис. 10).
6. Подвижное устройство для удержания и перемещения лупы (Рис. 11).
7. Источники света: лампа накаливания – 50 Вт, фонарик.
8. Экран (стена белого цвета или в лаборатории – пластиковая панель).
9. Обрезанная рулетка, которая выполняет функцию линейки.
10. Набор луп «Помощник» с перекрытыми частями рабочей поверхности (Рис.12).

2.2 Порядок проведения опытов

1. Измерить диаметр рабочей части лупы линейкой.
2. Измерить толщину пластинки штангенциркулем.
3. В микроскоп рассмотреть вид и определить размеры «бороздок» пластинки (Рис.15).
4. Обеспечить условия проведения измерений: поместить оборудование, приготовить измерительные инструменты.
 - 1) Берем фонарик и закрепляем его на неподвижном удерживающем устройстве (в моем случае - молоток).
 - 2) Создаем устройство, которое может двигаться и удерживать лупу, линзу или другие тела (рис.11).
 - 3) Для дальнейших измерений фокуса и т.д. Вводим ось x , в моем случае – это обрезанная рулетка, которая равна расстоянию от источника света до экрана (стена подоконника).

Таким образом, мы обустроили место для проведения экспериментов и сделали установку для наших дальнейших анализов и расчетов.

5. Измерить фокусное расстояние пластинки, сочетания пластинок; для этого закрепляем фонарик на неподвижном удерживающем устройстве (молоток); лупу

помещаем на подвижное устройство. Вводим ось x (обрезанная рулетка) – фонарик, экран и лупа должны располагаться перпендикулярно этой оси; добиваемся четкого изображения на экране и линейкой измеряем фокусное расстояние. Полученные данные записываем в таблицу №1.

6. Повторяем п.5 для наложенных друг на друга луп (2-х, 3-х, 4-х и 5-и) (Табл. №1).

7. Повторяем п. 5 для луп с перекрытиями (Рис.12,13).

8. Сравниваем освещенность экрана для всех случаев пп.5-7 (Рис.14).

2.3. Анализ полученных результатов

Измерения показали, что диаметр рабочей поверхности $d = 45$ мм, толщина $h = 0,15$ мм.

Таблица №1

Число пластинок	1	2	3	4	5
Фокусное расстояние, см.	18	8.3	4.8	3.6	2.7

Построим график зависимости фокусного расстояния от числа пластинок при падении на линзу плоской волны.

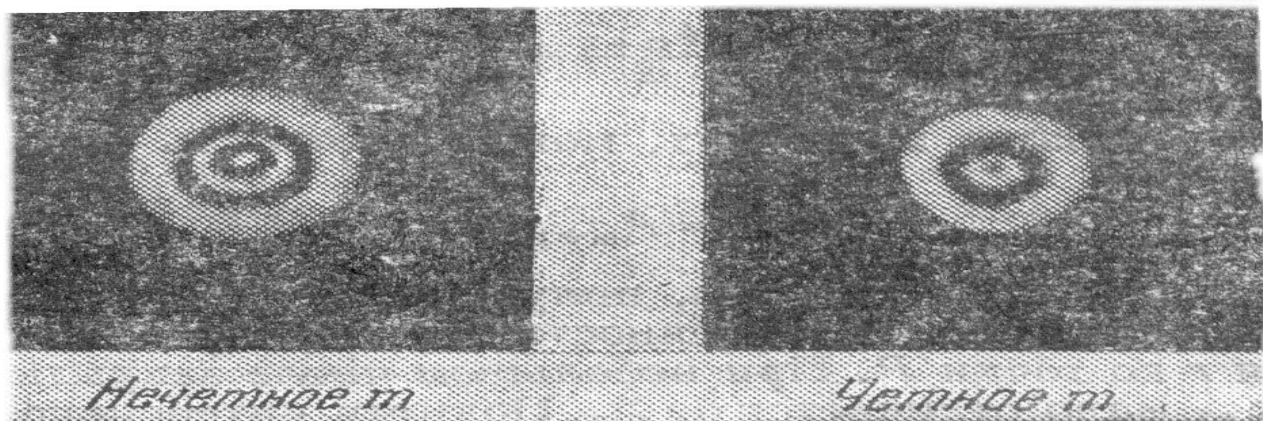
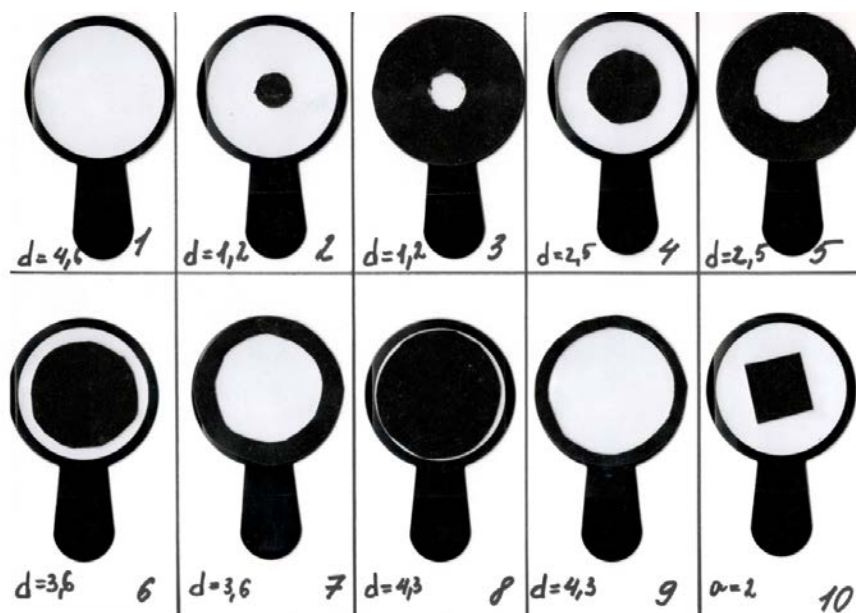
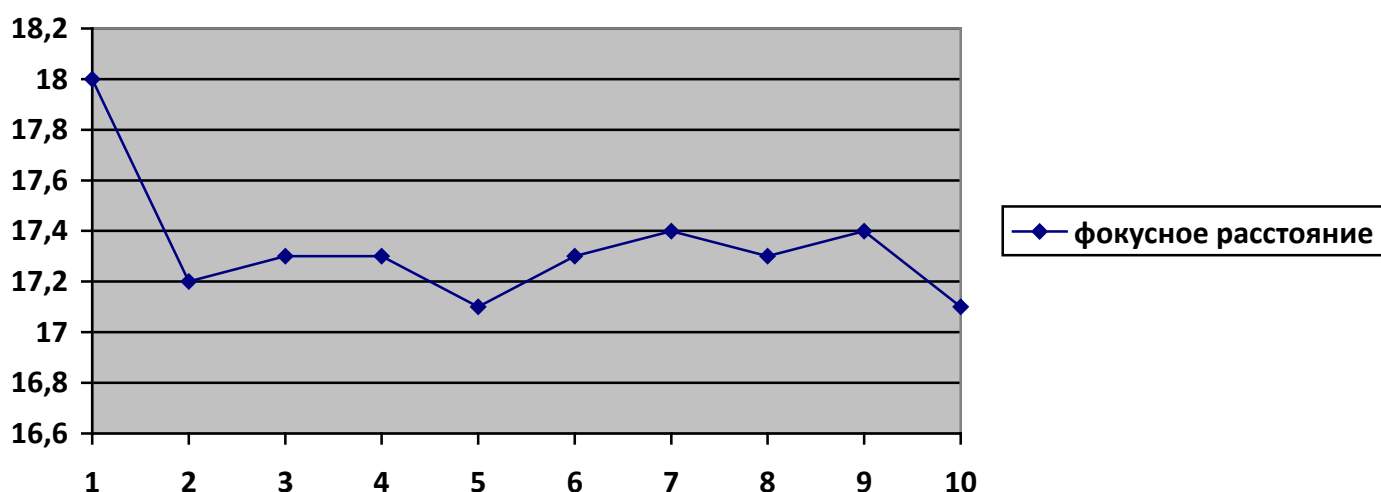


Таблица №2

Пластинка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Фокусное расстояние, см	18	17.2	17.3	17.3	17.1	17.3	17.4	17.3	17.4	17.1



Построим график зависимости фокусного расстояния от пластинок с различными перекрытиями.



С увеличением числа пластинок, фокусное расстояние такой системы уменьшается (табл.1). Размер перекрытых областей практически на величину фокусного расстояния не влияет. Сравнение освещенностей экрана показало: на нее в большей степени оказывает влияние не число пластинок (она несколько увеличивается, так как фокус становится с увеличением число луп более резким), а величина перекрытой области; освещенность падает при увеличении площади перекрытия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание и совершенствование различных оптических элементов, которые широко используются в научных исследованиях, при решении производственных проблем и даже в быту, очень важное направление в науке. Проводить исследования в этой области крайне актуально. В работе рассмотрен очень простой оптический элемент – лупа «Помощник», представляющая собой тонкую пластиковую, штампованную пластинку с рельефом в виде концентрических колец. Это устройство действует как обычная лупа, то есть фокусирует поток света. В ходе выполнения работы были определены параметры устройства, получен ряд зависимостей. Анализ полученных результатов показал, что этот исследуемый объект, скорее всего, является фазовой зонной пластинкой Френеля с равномерным рельефом. Это доступное недорогое устройство, с помощью которого можно изучать интересные явления волновой оптики. Результаты исследований нашли применение в школьных лабораторных работах по физике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юнусов Р.Ф., Юнусова Э.Р. определение фокусного расстояния зонной пластинки Френеля. Исследования в различных направлениях современной науки. Сб. материалов V111 международной научно-практической конференции [Электронный ресурс]. М.: Изд-во «Олимп». 2016. С.1341-1356.
2. Дифракционная компьютерная оптика под ред. В.А. Сойфера.. М.: Физматлит. 2007
3. Мякишев Г.Я. Оптика. Квантовая физика. 11 кл.: Учеб. для углубленного изучения физики. – М.: Дрофа.- 2001. – 464 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

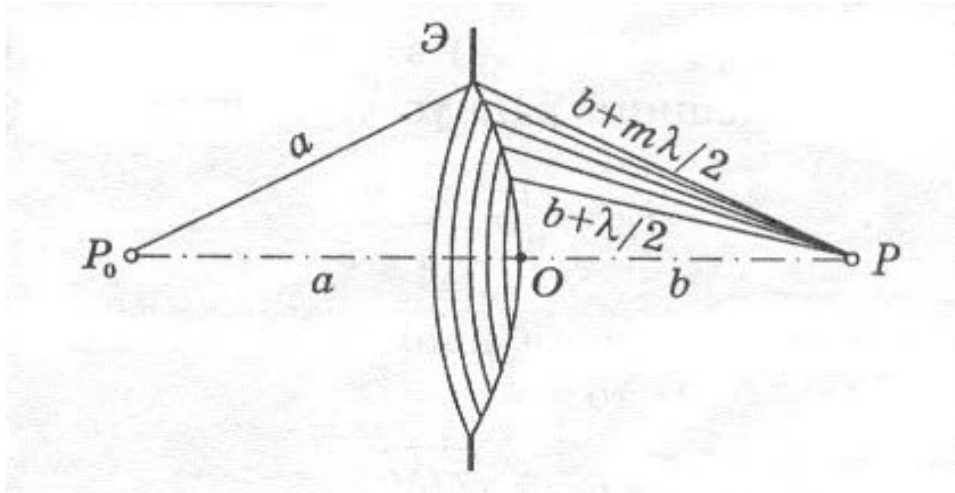


Рис. 1. Разбиение волнового фронта на зоны Френеля (вторичные источники)

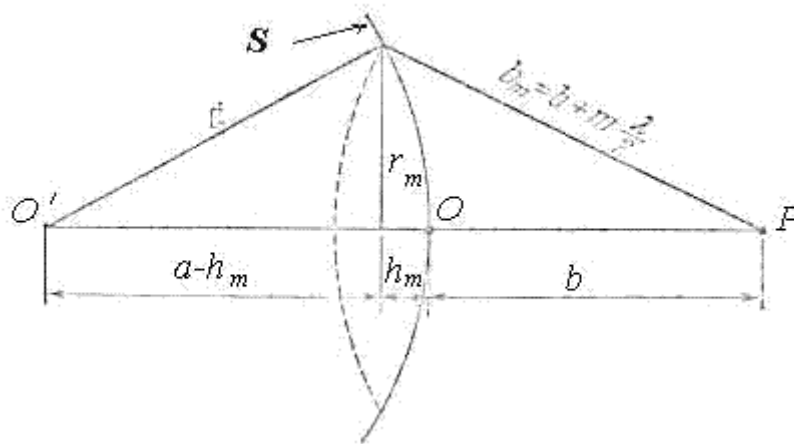


Рис. 2. К расчету радиусов зон Френеля

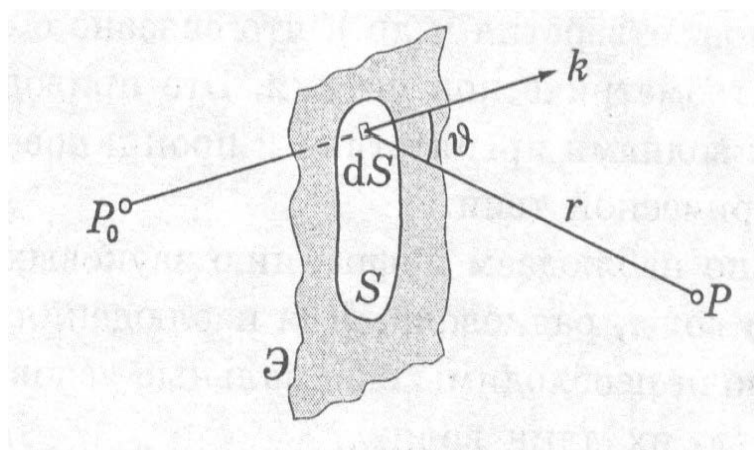


Рис. 3. Площадь произвольной зоны Френеля.

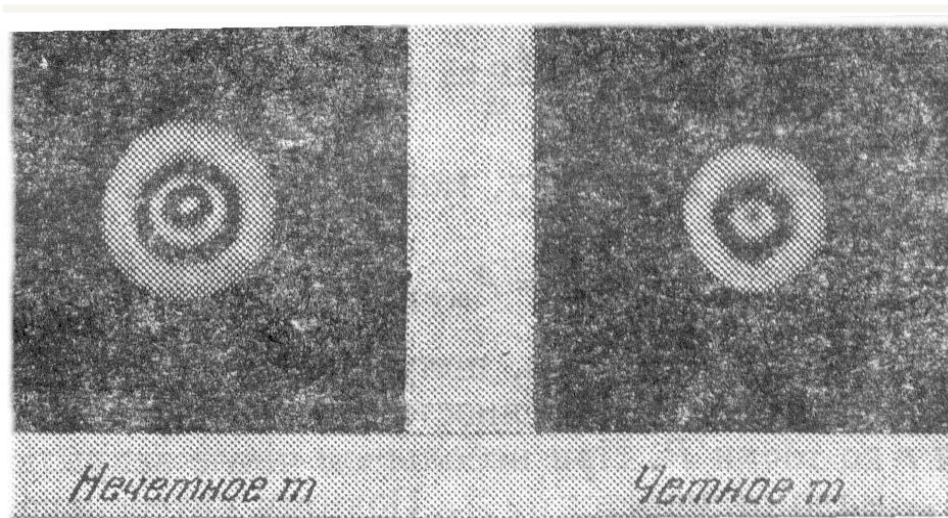


Рис. 4. Фотография наблюдения дифракции на круглом отверстии в лаборатории (из учебника)

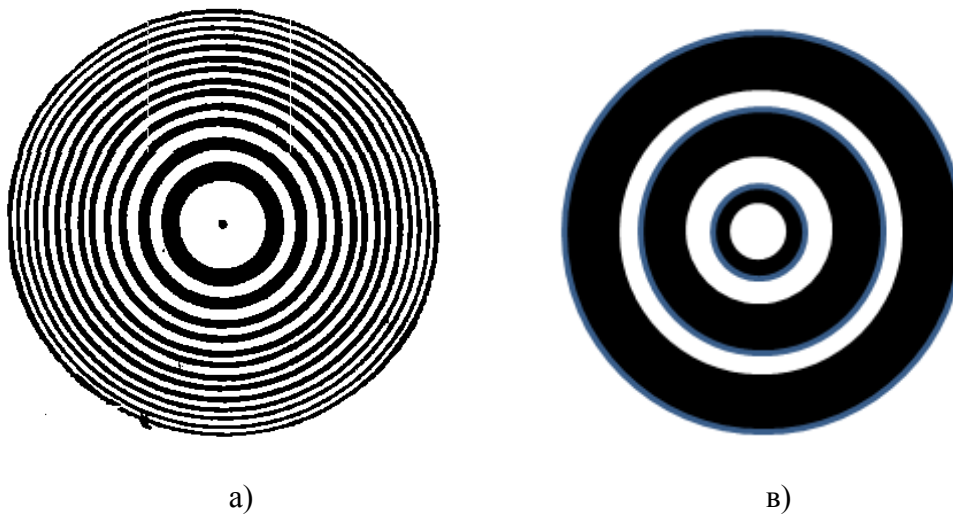


Рис. 5. Амплитудные зонные пластинки Френеля

а) с закрытыми четными зонами в) с закрытыми нечетными зонами

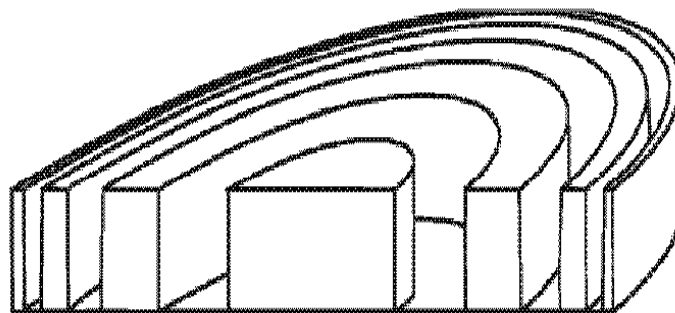


Рис. 6. Фазовая зонная пластинка (кольцевая)

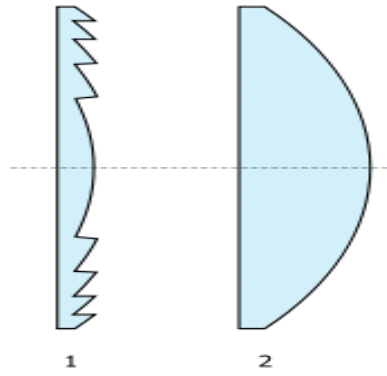


Рис. 7. Профили линзы Френеля и обычной линзы

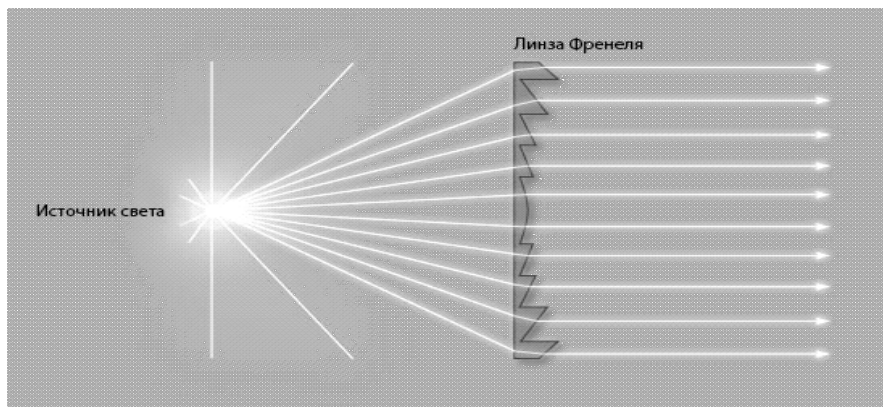


Рис. 8. Получение параллельного пучка линзой Френеля.

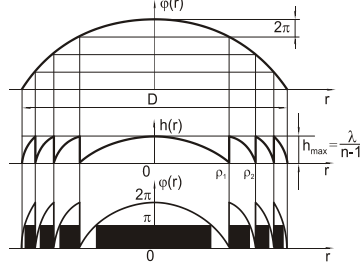
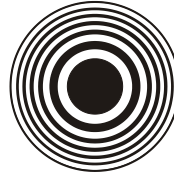
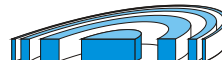
Дифракционная
решетка ФраунгофераАмплитудная
маскаФазовый
микрорельефЛинза
ФренеляБазовые характеристики ДОЭ:
- длина волны λ ;
- границы зон;
- профиль зон.Зонная пластинка
Релея-СорэАмплитудная
маскаФазовый
микрорельеф

Рис. 9. Дифракционные оптические элементы [2].

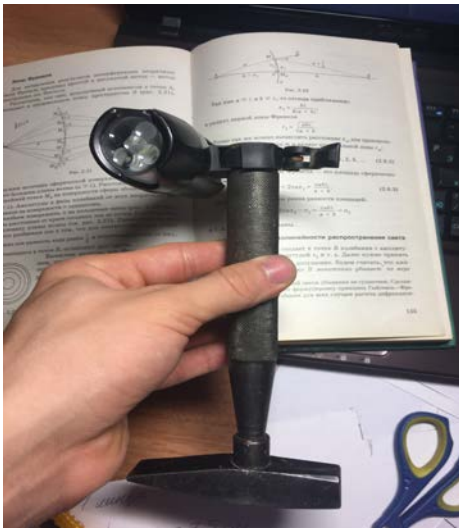


Рис.10. Устройство для удержания источника (фонарика)



Рис. 11. Подвижное устройство для удержания и перемещения линзы

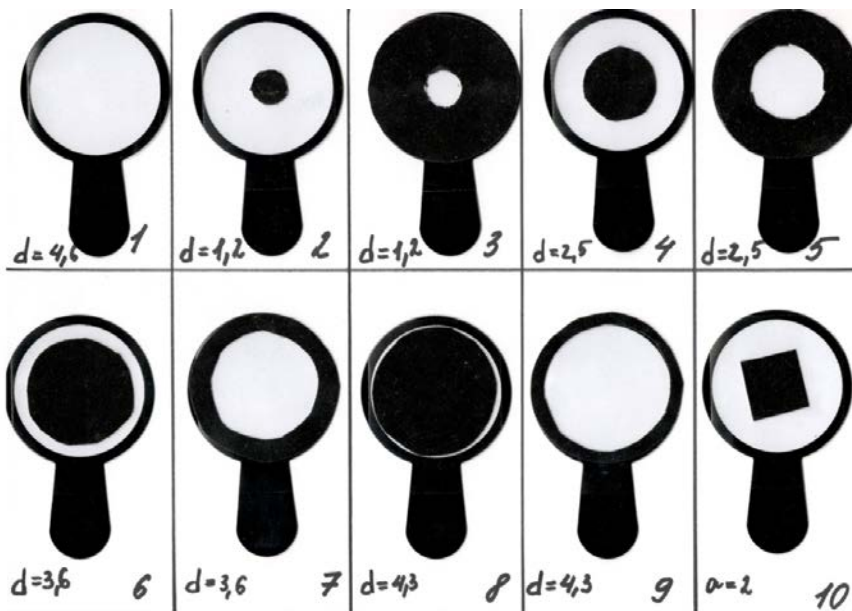


Рис. 12. Набор линз «Помощник» с перекрытыми частями рабочей поверхности



Рис. 13. Измерение фокусного расстояния линзы с перекрытием

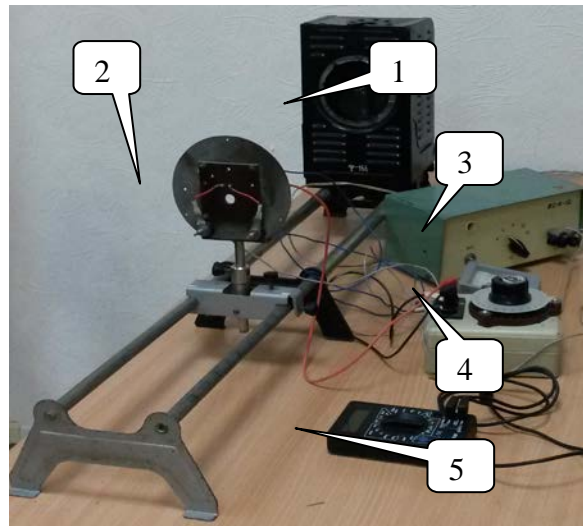


Рис.14. Установка для измерения освещенности

1 - источник света (лампа накаливания), 2 – фоторезистор, 3 – выпрямитель, 4 – реостат, 5 – амперметр.

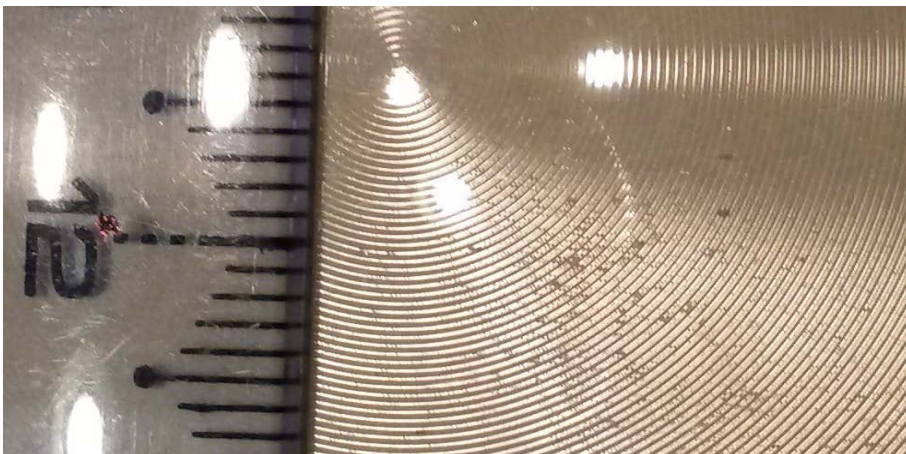


Рис. 15. Лупа «Помощник» под микроскопом.



Рис.16. Фото лупы «Помощник»



Рис.17. Приборы и оборудование.

