

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ)
ФИЗТЕХ-ШКОЛА ЭЛЕКТРОНИКИ, ФОТОНИКИ
И МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ

Лабораторная работа № 4.3.3

**Исследование разрешающей способности
микроскопа методом Аббе**

выполнил студент 2 курса
группы Б04-006
Белостоцкий Артемий

Долгопрудный, 2022 г.

Цель работы: определение дифракционного предела разрешения объектива микроскопа методом Аббе.

В работе используются: лазер; кассета с набором сеток разного периода; линзы; щель с микрометрическим винтом; оптический стол с набором рейтеров и крепежных винтов; экран; линейка.

Теоретическая часть

Разрешающей способностью оптического прибора называют минимальное расстояние l_{\min} между двумя точками в пространстве предметов, которое прибор может разрешить. Если наблюдения с помощью микроскопа ведутся при внешнем освещении, то, как правило, различные точки предмета рассеивают когерентные волны. Теория разрешающей способности для случая освещаемых объектов была разработана Аббе.

Рассмотрим когерентно освещенный объект, наблюдаемый в объектив микроскопа. Минимальное разрешаемое объективом расстояние определяется условием

$$l_{\min} \approx \frac{\lambda}{\sin A} \approx \frac{\lambda}{D/2f}, \quad (1)$$

где A – апертурный угол микроскопа, D – диаметр диафрагмы. При этом диафрагма, расположенная симметрично, пропускает нулевой и ± 1 дифракционные максимумы.

В нашей работе применяется двумерная решётка – сетка. В таком случае главные максимумы возникают тогда, когда одновременно выполняются условия:

$$\begin{cases} d \sin \theta_x = m_x \lambda, \\ d \sin \theta_y = m_y \lambda, \end{cases} \quad (2)$$

где m_x и m_y – целые числа, характеризующие порядки дифракционных максимумов, θ_x и θ_y – направления на главные дифракционные максимумы в горизонтальное и вертикальной плоскостях соответственно.

Максимумы, удовлетворяющие условию $\theta_x, \theta_y < A$, создают в задней фокальной плоскости F объектива картину дифракции Фраунгофера (рис.??) – первичное изображение.

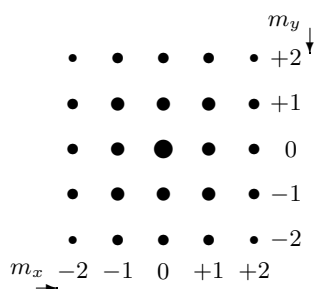


Рис. 1: Дифракция Фраунгофера на двумерной решётке (сетке). Максимумы изображены кружками, размеры которых характеризуют интенсивности.

Если теперь поместить в фокальной плоскости щель так, чтобы через неё проходили дифракционные максимумы с $m_x = 0$ и $m_y = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ (с $m_y = 0$ и $m_x = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$), то в плоскости P_2 получится изображение решётки с горизонтальными (вертикальными) штрихами. Таким образом можно продемонстрировать явление *пространственной фильтрации* – выделение различных структур в изображении.

Экспериментальная установка

Схема модели проекционного микроскопа приведена на рис.???. Предметом служат сетки, расположенные в кассете. Смена сеток осуществляется поворотом внешнего кольца кассеты.

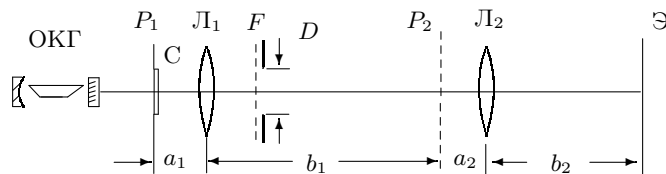


Рис. 2: Схема экспериментальной установки.

Изображение сетки периодически повторяется – *репродуцируется* – в пространстве между сеткой и первой линзой. Для выделения геометрического изображения среди множества репродуцированных изображений сетки на одну из сеток наложена тонкая проволока, то есть непериодический объект, изображение которого не репродуцируется.

Ход работы

Определение периода решеток по их пространственному спектру

Закрепим кассету с двумерными решетками вблизи выходного окна лазера так, чтобы в окошке пол отверстием с сеткой был виден номер сетки.

Вращая наружное кольцо кассеты, наблюдаем на удаленном экране дифракционные картины для разных сеток

Для определения расстояния между соседними максимумами измерим расстояние между удаленными друг от друга максимумами – D и число промежутков между ними – m . Учитывая, что расстояние от сетки до экрана $H = 125$ мм и углы малые ($\theta \approx \tan \theta = \frac{D}{2m}$, где m – порядок максимума). Рассчитаем периоды решеток по формуле 2, данные занесем в Таблицу 1 (измерения для каждой из решеток проводились по порядку, начиная с 1)

Таблица 1: Определение периода решеток по их пространственному спектру

D , мм	m	$D/2$, мм	θ	d , мм
215 ± 1	3	107,5	0,086	0,019
190 ± 1	8	95	0,076	0,056
200 ± 1	16	100	0,080	0,106
46 ± 1	8	23	0,018	0,231
62 ± 1	14	31	0,025	0,300

где погрешности рассчитывались по формулам:

$$\sigma_D = 1 \text{ мм}$$

$$\sigma_\theta = \theta \frac{\sigma_D}{D} \ll \theta \Rightarrow \text{погрешность пренебрежимо мала}$$

$$\sigma_d = d \frac{\sigma_\theta}{\theta} \ll d \Rightarrow \text{погрешность пренебрежимо мала}$$

Определение периода решеток по изображению, увеличенному с помощью модели микроскопа

Соберем модель проекционного микроскопа (рис. 2). Полученные расстояния $a_1 = 130$ мм $a_2 = 36$ мм $b_1 = 530$ мм $b_2 = 630$ мм. Тогда определим период решеток по их увеличенному изображению, используя формулы:

$$\Gamma = \frac{b_1 b_2}{a_1 a_2} = 71,35 \pm 2,06$$

$$d = \frac{D}{\Gamma}$$

Результаты занесем в Таблицу 2 (измерения проводились для всех решеток кроме пятой, по порядку, начиная с 1)

Таблица 2: Определение периода решеток по изображению

D, мм	d, мм
$1,57 \pm 1$	$0,022 \pm 0,01$
$3,63 \pm 1$	$0,051 \pm 0,01$
7 ± 1	$0,098 \pm 0,03$
10 ± 1	$0,140 \pm 0,04$

где погрешности рассчитывались по формулам:

$$\sigma_{a_1} = \sigma_{a_2} = \sigma_{b_1} = \sigma_{b_2} = \sigma_0 = 1 \text{ мм}$$

$$\sigma_{\Gamma} = \Gamma \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{a_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_0}{a_2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_0}{b_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_0}{b_2}\right)^2}$$

$$\sigma_d = d \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\Gamma}}{\Gamma}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_D}{D}\right)^2} \approx d \frac{\sigma_{\Gamma}}{\Gamma}$$

Определение периода решёток по оценке разрешающей способности микроскопа

Поместим щелевую диафрагму в фокальную плоскость линзы \mathcal{L}_1 и определим для каждой решетки минимальный размер диафрагмы – D, при котором на экране еще видно изображение сетки. Данные занесем в Таблицу 3.

Таблица 3: Определение периода решёток по оценке разрешающей способности

D, мм	d, мм
$1,45 \pm 0,01$	0,081
$3,25 \pm 0,01$	0,036
$2,06 \pm 0,01$	0,057
$1,18 \pm 0,01$	0,099
$0,93 \pm 0,01$	0,126

где погрешности рассчитывались по формулам:

$$\sigma_D = 0,01 \text{ мм}$$

$$\sigma_d = d \frac{\sigma_D}{D} \ll d \Rightarrow \text{погрешность пренебрежимо мала}$$

Для проверки теории Аббе построим график зависимости $d = f(1/D)$, взяв периоды сеток, определенные по спектру. Данные возьмем из Таблицы 1 и Таблицы 3.

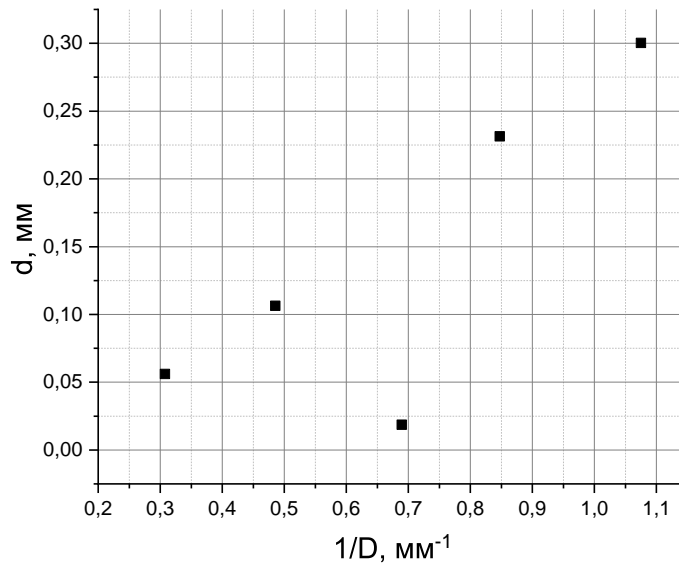


Рис. 3: Зависимость $d = f(1/D)$

Из рис.3 видно, что точка, соответствующая первой дифракционной сетке сильно выпадает из очевидно линейной зависимости. Более того, ее значение более чем в 4 раза отличается от полученного в других опытах. Следовательно, эту точку необходимо исключить.

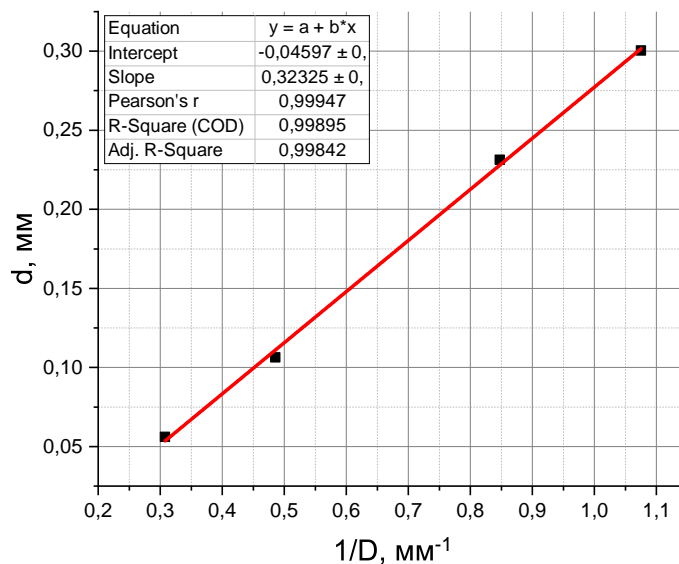


Рис. 4: Зависимость $d = f(1/D)$

Выводы

1. Определили периоды дифракционных решеток тремя различными способами
2. Экспериментально проверили теорию Аббе