

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
ФАКУЛЬТЕТ ОБЩЕЙ И ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ

Лабораторная работа № 4.3.3
**Исследование разрешающей способности микроскопа
методом Аббе**

Серебренников Даниил
Группа Б02-826

Долгопрудный, 2020 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.

1 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. 1) – первичное изображение.

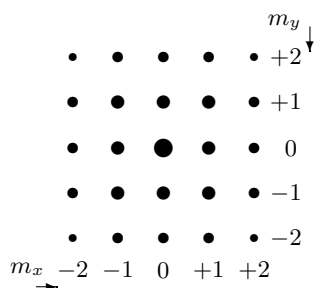


Рис. 1: Дифракция Фраунгофера на двумерной решётке (сетке). Максимумы изображены кружками, размеры которых характеризуют интенсивности.

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.

2 Экспериментальная установка

Схема модели проекционного микроскопа приведена на рис. 2. Предметом служат сетки, расположенные в кассете. Смена сеток осуществляется поворотом внешнего кольца кассеты.

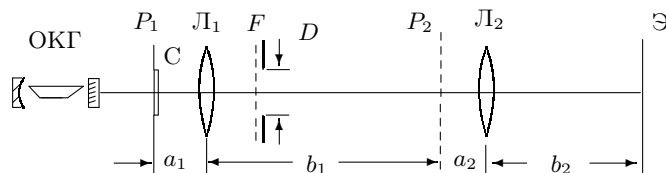


Рис. 2: Схема экспериментальной установки – модель проекционного микроскопа.

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.

3 Ход работы

1. Определение периода решёток по их пространственному спектру
2. Определение периода решёток по изображению, увеличенному с помощью модели микроскопа
3. Определение периодов решёток по оценке разрешающей способности микроскопа
4. Наблюдение явлений пространственной фильтрации и мультиплицирования.

4 Экспериментальные данные

Измерим расстояние $L = 140$ см от сетки до экрана и определим периоды решёток по их пространственному спектру. Для этого из формулы (2) выразим $d = m\lambda/\sin\theta$, причем $\sin\theta \approx (l/n)/L$ и $m = 1$, где l – расстояние между удалёнными друг от друга максимумами. Используемый нами лазер имеет длину волны $\lambda = 532$ нм.

Таблица 1: Результаты измерений 1 способом.

N	1	2	3	4	5
n	1	1	3	5	6
l , мм	38	27	39	32	29
d , мкм	19,6	27,6	57,3	116	154

Измерим расстояния $a_1 = 145$ мм, $b_1 + a_2 = 655$ мм, $b_2 = 1200$ мм, $a_2 \approx f_2 = 25$ мм, $f_1 = 110$ мм и определим периоды решёток по изображению, увеличенному с помощью микроскопа по очевидной формуле $d = (l/n)/\Gamma$, где $\Gamma = \frac{b_1 b_2}{a_1 a_2} = 209$ – увеличение для оптической системы.

Таблица 2: Результаты измерений 2 способом.

N	1	2	3	4	5
n	20	10	10	5	5
l , мм	52	40	77	80	105
d , мкм	12,5	19,14	36,8	76,6	100

Определим для каждой решётки минимальный размер диафрагмы D , при котором на экране ещё видно изображение сетки. Из формулы (1) следует, что $d = 2\lambda f_1/D$.

Таблица 3: Результаты измерений 3 способом.

N	3	4	5
D , мкм	1660	840	510
d , мкм	70,5	139	229

Сравним результаты расчетов периодов решёток разными способами.

Таблица 4: Сравнение результатов.

N	1	2	3	4	5
d_1 , мкм	19,6	27,6	57,3	116	154
d_2 , мкм	12,5	19,14	36,8	76,6	100
d_3 , мкм	–	–	70,5	139	229

5 Обработка результатов

Для проверки теории аббе построим график зависимости $d = d(1/D)$, взяв периоды сеток, определенные по спектру.

Таблица 5: Данные для построения $d = d(1/D)$.

N	3	4	5
$1/D, \text{ нм}^{-1}$	0,602	1,05	1,96
$d, \text{ мкм}$	57,3	116	154

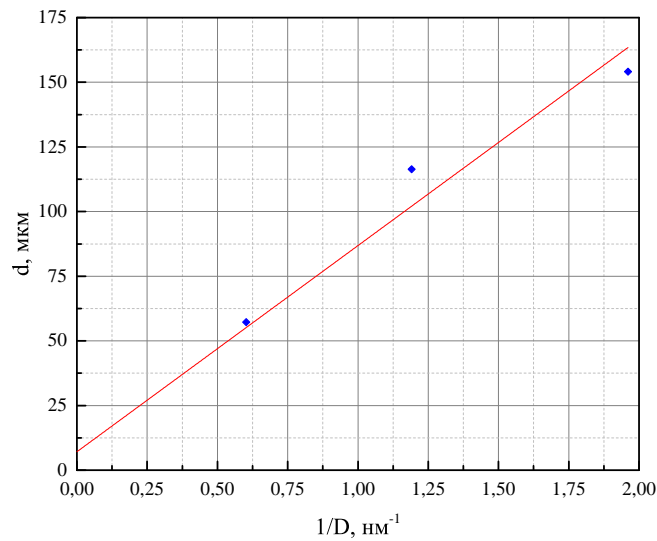


Рис. 3: Зависимость $d = d(1/D)$.

6 Обсуждение результатов

В ходе данной лабораторной работы мы определили периоды дифракционных решёток различными способами (табл. 4). Полученные результаты отличаются друг от друга существенно (наименьший от наибольшего в два раза), хотя имеют одинаковый порядок величины. Это может быть связано с приближенным характером используемой теории, неточностью определения величин a_2 и b_1 , неисправностью источника света, который в ходе выполнения лабораторной работы периодически выключался.

Стоит отметить, что у всех величин, полученных прямым измерением, мы пренебрегли случайной погрешностью, так как она мала по сравнению с систематической, которая явным образом повлияла на разброс результатов.

Не смотря на расхождения, нам удалось убедиться в справедливости формулы (1), то есть проверка теории Аббе оказалась положительной. Действительно, периоды решёток, определенные в первом и третьем способах, отличаются от их среднего значения на 20 %, что может навести на мысль о том, что во втором способе, скорее всего, имеется грубая ошибка и эксперимент требует повторного проведения.

Выход из строя источника света не позволил пронаблюдать за явлениями фильтрации и мультиплицирования.

7 Выводы

1. Вычислили периоды решёток различными способами;
2. Метод Аббе по определению дифракционного предела разрешения объектива микроскопа даёт верные результаты.