

Лабораторная работа 4.3.3. Исследование разрешающей способности микроскопа методом Аббе

Калинин Даниил, Б01-110

9 февраля 2023 г.

Цель работы: Изучение дифракционного предела разрешения объектива микроскопа.

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

Теоритическая справка:

Принцип двойной дифракции и формирование оптического изображения: Формирование изображения с помощью линзы можно рассматривать, основываясь на идее пространственного спектрального разложения. Монохроматическую волну, идущую от предмета, представим в виде суперпозиции плоских волн разных направлений α , т. е. разных пространственных частот $u = k \sin \alpha$. Каждая гармоника фокусируется линзой в определённую точку фокальной плоскости, и там возникает картина пространственного спектра. По этой причине фокальную плоскость линзы называют фурье-плоскостью.

В процессе распространения света от предмета до фурье-плоскости осуществляется преобразование Фурье светового поля (по терминологии Аббе – первая дифракция). Процесс распространения света от фурье-плоскости до плоскости изображения (рис. 1) – вторая дифракция.

Можно сказать, что в процессе образования изображения происходит два последовательных преобразования Фурье: от входной плоскости Π_1 к фурье-плоскости – первая дифракция, и затем от фурье-плоскости с помощью линзы \mathcal{L}_2 к выходной плоскости Π_2 – вторая дифракция.

Пространственная фильтрация: В фурье-плоскости возможно избирательное воздействие на разные пространственные гармоники: установив в любой точке x этой плоскости пластинку, вносящую определённое поглощение, мы изменим амплитуду и фазу плоской волны с пространственной частотой $u = kx/f$, не изменяя амплитуд и фаз других плоских волн.

Мультипликация изображения: Изображение, возникающее в плоскости Π_2 , представляет собой периодически повторяющееся с периодом

$$d_0 = \lambda f / d$$

изображение объекта с функцией пропускания $f_0(x)$. Соседние элементы периодической структуры, видимой в Π_2 , $f(x) = \Sigma f_0(x - nd_0)$, не налагаются друг на друга при условии

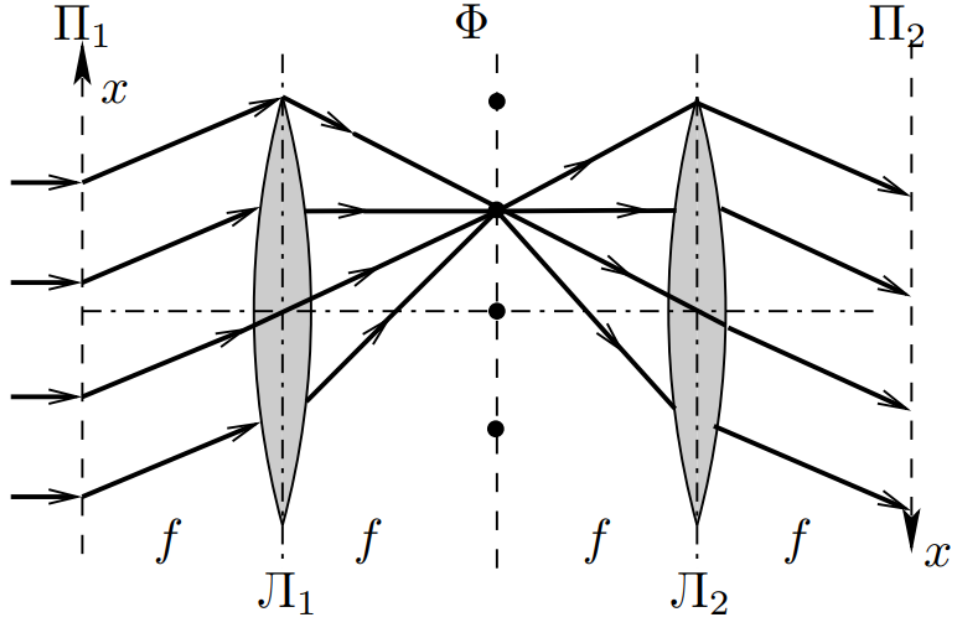


Рис. 1. Двойная дифракция Аббе

$d_0 > a$, где a – размер объекта. Число элементов N размноженного изображения определяется шириной главного максимума картины дифракции Фраунгофера на отдельной щели решётки:

$$N \approx 2b/d_0.$$

Разрешающая способность. Критерий Рэлея: Согласно качественному критерию, предложенному Рэлеем, два источника света различимы, если дифракционный максимум одного приходится на минимум другого. Т. е, расстояние между центрами пятен Δx равно полуширине пятна Эйри:

$$\Delta x = 1.22 \frac{\lambda}{D} z,$$

где z – расстояние от диафрагмы до плоскости наблюдения, а D – диаметр диафрагмы. Отсюда минимальное угловое разрешение равно:

$$\alpha_{min} \approx 1.22 \frac{\lambda}{D}.$$

Расчётные формулы:

Минимально разрешаемое объективом расстояние:

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

где f – фокусное расстояние линзы.

Условия главных максимумов:

$$d \sin \theta_x = m_x \lambda, \quad d \sin \theta_y = m_y \lambda, \quad (2)$$

где $m_{x,y}$ – порядок дифракционных максимумов.

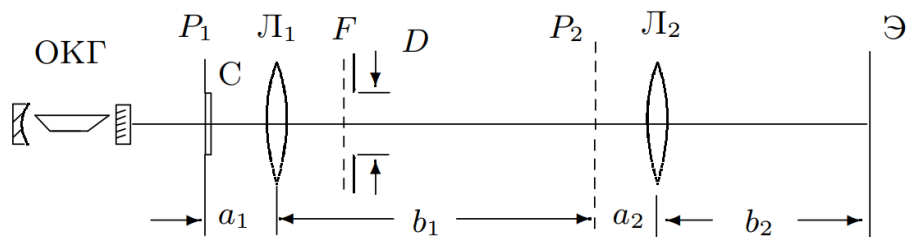


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Увеличение системы собирающих линз (в условиях опыта):

$$\Gamma = \frac{b_1 b_2}{a_1 a_2}, \quad (3)$$

где a , b – соответствующие расстояния на рис. 2.

Экспериментальная установка:

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 2. Излучение лазера (ОКГ) почти перпендикулярно падает на сетку С, установленную вблизи фокальной плоскости линзы L_1 – объектива. Вторичное изображение из плоскости P_2 проецируется на экран Э линзой L_2 .

Установка имеет следующие параметры:

1. Длина волны лазера: $\lambda = 532$ нм.
2. Фокусное расстояние линзы L_1 : $f_1 = 110$ мм.
3. Фокусное расстояние линзы L_2 : $f_2 = 25$ мм.

Ход работы:

1. Определение периодов решеток.

Расстояние от сетки до экрана: $H = 120$ см. Из формул (2), где $\sin \theta \sim a/H$ и a – период изображения, получим результат в табл. 1.

Номер решетки	Период изображения, мм.	Период решетки, мм.
1	30.0	0.0213
2	22.5	0.0284
3	12.0	0.0532
4	5.0	0.1277
5	3.7	0.1725

Таблица 1. Результаты вычислений периодов решеток по картине спектра

2. Соберем микроскоп со следующими параметрами.

$$a_1 = 19 \text{ см},$$

$$b_1 = 48.7 \text{ см},$$

$$a_2 = 2.5 \text{ см},$$

Номер решетки	Период изображения, мм.	Период решетки, мм.
1	1.0	0.0126
2	2.0	0.0252
3	3.3	0.0415
4	6.0	0.0755
5	9.0	0.1133

Таблица 2. Результаты вычислений периодов решеток по увеличенному изображению

$$b_2 = 77.5 \text{ см.}$$

По формуле (3), $\Gamma = 79.46$. Тогда найдём период решётки (табл. 2).

3. Определим периоды решеток с помощью критерия Ризля.

Измерим наименьший размер диафрагмы, при котором еще видно изображение сетки. А далее по формуле (1) определим периоды решеток. Результат занесем в таблицу 3.

Номер решетки	Минимальный размер диафрагмы, мм.	Период решетки, мм.
1	-	-
2	4.0	0.0293
3	2.5	0.0459
4	1.6	0.0732
5	1.1	0.1064

Таблица 3. Результаты вычислений периодов решеток по критерию Ризля

4. Проверим метод Аббе.

Построим график $d = f(1/D)$, где d – периоды решеток, рассчитанные по спектрам, а D – минимальный размер диафрагмы.

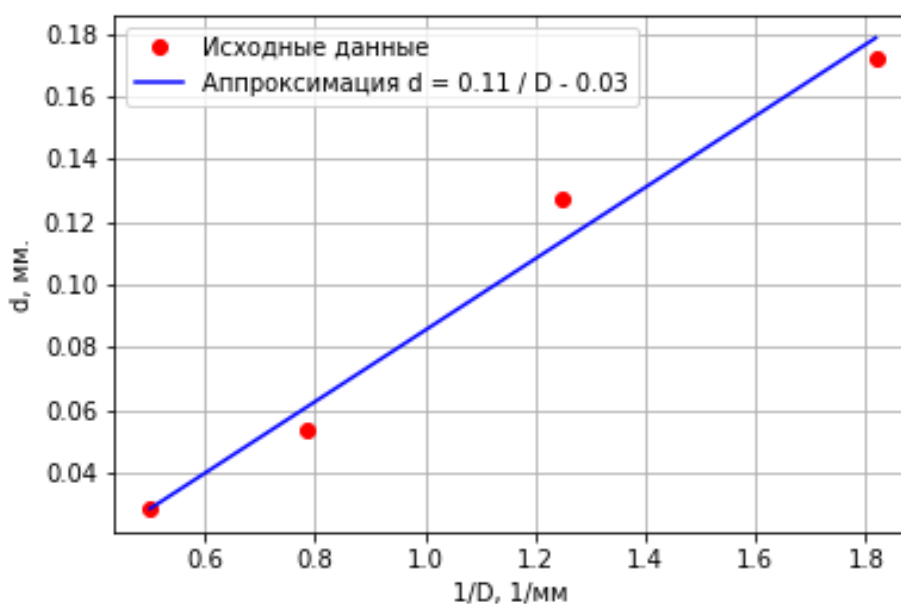


Рис. 3. График зависимости $d(1/D)$

Из графика получаем экспериментальный коэффициент: $k_{\text{эксн}} = 0.114$, в то время как теоретический: $k_{\text{теор}} = 2\lambda f = 0.117$. Как видно, они хорошо совпадают, а значит метод

Аббе работает верно.

Заключение:

В ходе работы мы определили несколькими способами периоды решёток, исследовали зависимость дифракционного предела разрешения объектива микроскопа от его диаметра. Отличия в полученных значениях периодов решоток могут быть связаны с общим недостатком метода, например, с точным определением фокусного расстояния: изображение может быть достаточно четким на довольно большом диапазоне расстояний и др.