

## Лабораторная работа по оптике

### 4.3.3. Исследование разрешающей способности микроскопа методом Аббе

Выполнила студентка группы Б06-103:  
Фитэль Алена

# 1 Аннотация

**Цель работы:** определение дифракционного предела разрешения объектива микроскопа.

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

# 2 Теоретические сведения

Для иммерсионного микроскопа разрешающая способность объектива при некогерентном освещении

$$\ell_{min} \approx \frac{0.61\lambda}{\sin u}, \quad (1)$$

где  $u$  – апертурный угол объектива микроскопа (угол между оптической осью и лучом, направленным из центра объекта в край линзы).

Метод Аббе для оценки разрешающей способности состоит в разделении хода лучей на две части: сначала рассматривается картина в задней фокальной плоскости  $F$  объектива – она называется первичным изображением. Это первичное изображение рассматривается как источник волн, создающий вторичное изображение в плоскости  $P_2$ , сопряжённой плоскости предмета.

Первичное изображение есть картина дифракции Фраунгофера (на дифракционной решётке), если её период  $d$ , то для направления максимальной интенсивности  $\varphi_m$ .

$$d \sin \varphi_m = m\lambda. \quad (2)$$

При этом проходят пучки только с  $\varphi_m < u$ . Можно условием разрешения считать, что  $u > \varphi_1$ , иначе говоря:

$$\sin u \geq \lambda/d.$$

или

$$d \geq \frac{\lambda}{\sin u} \approx \frac{\lambda}{D/2f}, \quad (3)$$

где  $D$  – диаметр линзы,  $f$  – фокусное расстояние.

Сетку можно рассматривать как две перпендикулярные друг другу решетки, для максимумов которых выполняется соотношение

$$d \sin \varphi_x = m_x \lambda, \quad d \sin \varphi_y = m_y \lambda. \quad (4)$$

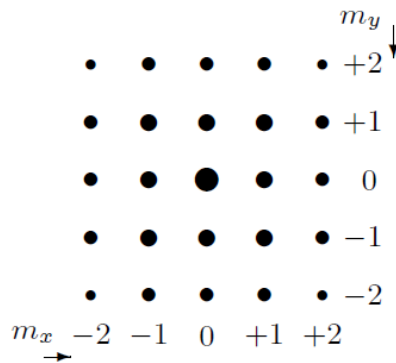


Рисунок 1: Дифракция Фраунгофера на двумерной решётке (сетке). Максимумы изображены кружками, размеры которых характеризуют интенсивности.

### 3 Экспериментальная установка

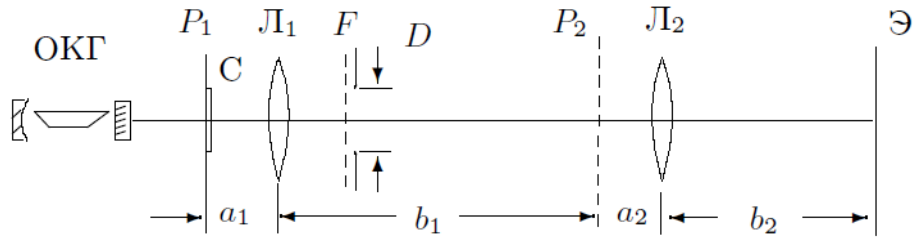


Рисунок 2: Схема установки

Схема установки приведена на Рис. 2. Предметом  $P_1$  служат сетки в касете  $C$ . Линза  $Л_1$  длиннофокусная, а  $Л_2$  короткофокусная. В  $F$  устанавливаются диафрагмы  $D$ , с помощью сеток с разными  $d$  и щелевой диафрагмы можно проверить соотношение (3). Период сеток может быть измерен либо по расстоянию между дифракционными максимумами на экране, либо по увеличенному с помощью микроскопа изображению. Пространственную фильтрацию (получение наклонного изображения решётки) можно получить с помощью подбора угла наклона и ширины вспомогательной щели.

### 4 Обработка результатов

Запишем данные лабораторной установки:

$\lambda$ , нм	$f_1$ , мм	$f_2$ , мм
532	110	25

#### 4.1 Определение периода решеток по их пространственному спектру

Расстояние от дифракционной решетки до экрана  $H = 1257 \pm 3$  мм. Для каждой сетки определим расстояние между вертикальными и горизонтальными максимумами  $l_v$  и  $l_h$  соответственно, их количество ( $n_v$   $n_h$ ) и посчитаем период вертикальных и горизонтальных сеток  $d_v$  и  $d_h$  соответственно по формуле (2) с учётом  $\varphi = \frac{l}{H}$  период решеток  $d = \frac{n\lambda}{l}H$ . Результаты приведены в Таблице 1.

$N$	$l_h$ , мм	$n_h$	$d_h$ , мкм	$\delta d_h$ , мкм	$l_v$ , мм	$n_v$	$d_v$ , мкм	$\delta d_v$ , мкм
1	43	3	49.9	1.2	214	4	13,38	0.07
2	89	9	72.4	0.8	230	9	30.00	0.12
3	88	7	56.9	0.6	144	11	54,7	0.4
4	45	3	47.7	1.1	214	4	13,38	0.06
5	73	7	68.6	0.9	200	8	28,62	0.14
6	87	7	57.6	0.7	86	7	58,2	0.7

Таблица 1: Период решеток, определенный методом пространственного спектра.

#### 4.2 Определение периода решеток по изображению, увеличенному с помощью микроскопа

Запишем параметры настроенного микроскопа:

$a_1, \text{ мм}$	$b_1 + a_2, \text{ мм}$	$b_2, \text{ мм}$
$130 \pm 5$	$1195 \pm 5$	$250 \pm 5$

Приняв  $a_2 = f_2 = 25$  мм найдем:  $b_1 = 380 \pm 5$  мм. Увеличение получившейся системы:

$$\Gamma = \frac{b_1 b_2}{a_1 a_2} = 92 \pm 4$$

Запишем количество периодов сетки и расстояние между ними, а так же посчитаем период по формуле  $d = l/(n\Gamma)$ . Результаты измерений и расчетов приведены в Таблице 2.

$N$	$l_v, \text{ мм}$	$n_v$	$d_v, \text{ мкм}$	$\delta d_h, \text{ мкм}$
1	10	10	10.9	1.2
2	10	5	22	2
3	10	2	54	6
4	10	3	36	4
5	10	5	22	2
6	10	13	8.4	0.9

Таблица 2: Период вертикальной решетки, определенный микроскопом.

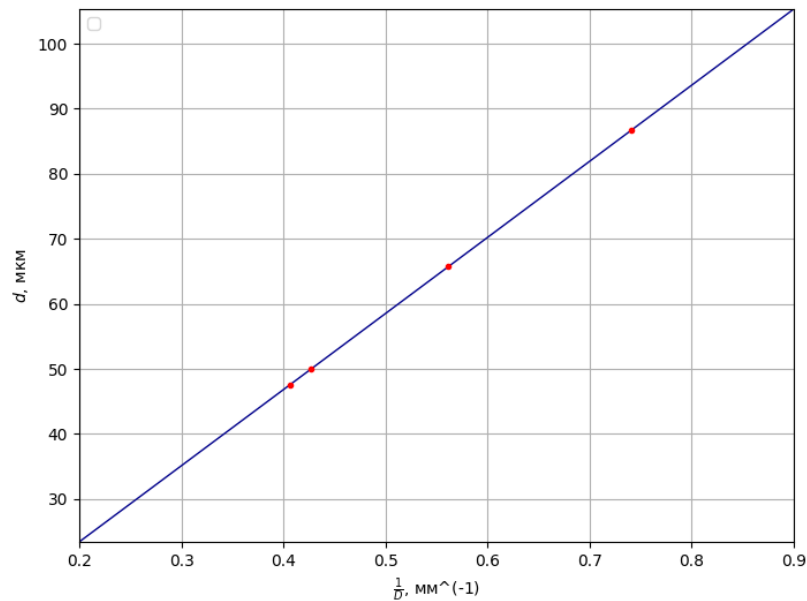
### 4.3 Определение периодов решеток по оценке разрешающей способности микроскопа

Если поместить в фокальную плоскость линзы  $\mathcal{L}_1$  щелевую диафрагму, то при минимальном раскрытии, при котором будет видна решетка, ее период будет определяться:  $d = \frac{2\lambda f_1}{D}$ . Запишем результаты проведенных измерений и расчетов в Таблицу 3.

$N$	$D, \text{ мм}$	$d, \text{ мкм}$	$1/D, 1/\text{мм}$	$\delta D, \text{ мм}$	$\delta d, \text{ мкм}$	$\delta(1/D), 1/\text{мм}$
1	-	-	-	-	-	-
2	2,34	50,0	0,43	0,01	0,2	0,002
3	1,35	86,7	0,74	0,01	0,6	0,005
4	-	-	-	-	-	-
5	2,46	47,6	0,41	0,01	0,2	0,002
6	1,78	65,8	0,56	0,01	0,4	0,003

Таблица 3: Периоды решеток по измерению размера диафрагмы.

Проверим справедливость этой формулы построив график  $d = f(1/D)$ . Угловой коэффициент прямой из МНК  $k = (117 \pm 3) \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ , в пределах погрешности он совпадает с теоретическим  $2\lambda F_1 = 117 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ . Таким образом, теория Аббе подтвердилась.



#### 4.4 Пространственная фильтрация и мультиплицирование

1. Для наблюдения пространственной фильтрации откроем щель так, чтобы она пропускала только максимум нулевого порядка и, поворачивая щель, наблюдаем за изменением картины. Полученные фото представлены на Рис 3.

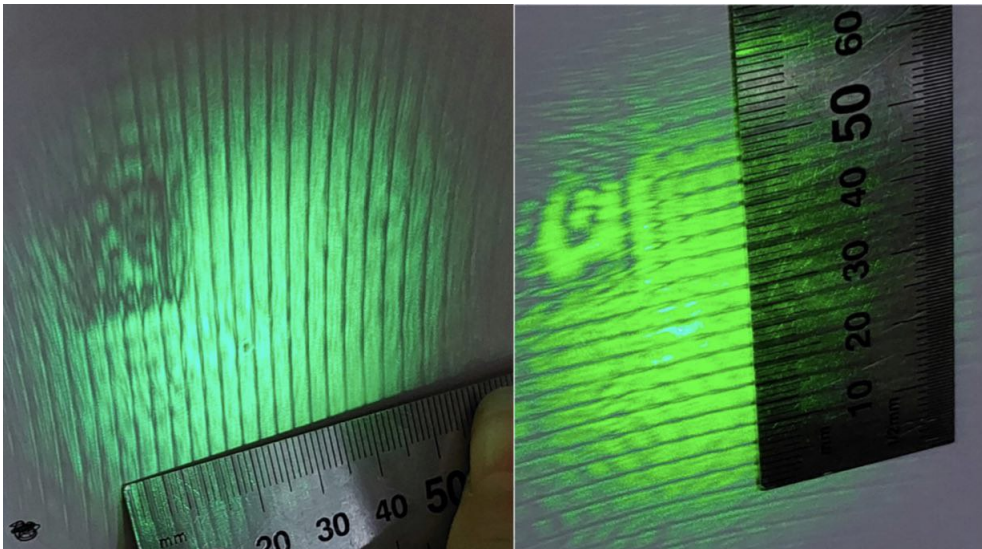


Рисунок 3: Слева направо: вертикальная щель  $(m_x, 0)$ , горизонтальная щель  $(0, m_y)$ .

2. Поворачивая щель относительно оси, добьёмся того, чтобы щель занимала наклонное положение под  $45^\circ$ . Тогда будет осуществляться пространственная фильтрация, то есть выделение из спектра максимумов  $m_x = m_y$  (диагональных максимумов). Полученные полосы располагаются под углом  $45^\circ$ .
3. Пронаблюдаем мультиплицирование, то есть рассеяние фурье-образа щели сеткой. Такой эффект создаётся, если в нашей установке поменять местами сетку и щель. Результат представлен на Рисунке 4.

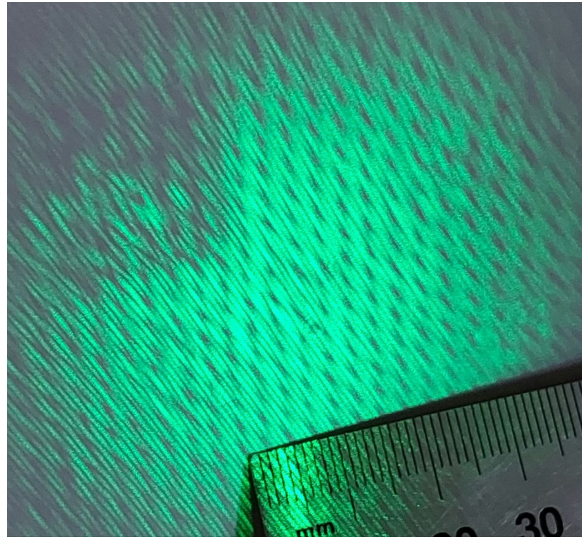


Рисунок 4: Явление мультипликации.

## 5 Вывод

В ходе данной лабораторной работы были определены периоды дифракционных решёток различными способами. Полученные результаты отличаются друг от друга существенно, хотя имеют одинаковый порядок величины. Способ измерения с помощью дифракционной картины более точен, чем метод с моделью микроскопа, что связано с большой погрешностью расчёта расстояний между линзами и изображениями. Расхождение результатов в разных способах может быть связано с приближенным характером используемой теории, неточностью определения величин  $a_2$  и  $b_1$ . Построив график  $d = f(1/D)$  мы убедились в справедливости формулы(), то есть проверка теории Аббе оказалась положительной. Качественно были рассмотрены явления фильтрации и мультиплицирования.