

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Лабораторная работа 4.3.3

Исследование разрешающей способности микроскопа
методом Аббе

Выполнил:

Гисич Арсений

Б03-102

Долгопрудный

2023

1 Аннотация

В данной работе был определён период сеток сначала по их спектру на удалённом экране, затем по увеличенному с помощью модели микроскопа изображению сеток на экране и, наконец, по результатам измерения разрешающей способности микроскопа; наблюдались явления саморепродукции, пространственной фильтрации и мультиплицирования.

2 Теоретические сведения

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:

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

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.

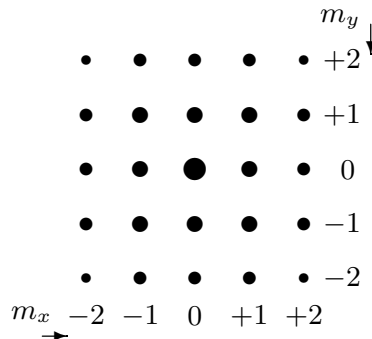


Рис. 1: Дифракция Фраунгофера на двумерной решётке (сетке). Максимумы изображены кружками, размеры которых характеризуют интенсивности.

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.

3 Методика измерений

Схема модели проекционного микроскопа приведена на рис. 2. Предметом служат сетки, расположенные в штативе.

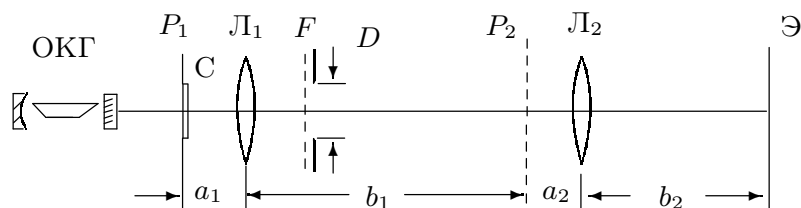


Рис. 2: Схема экспериментальной установки — модель проекционного микроскопа.

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.

4 Используемое оборудование

1. лазер;
2. кассета с набором сеток разного периода;
3. линзы;
4. щель с микрометрическим винтом;
5. оптический стол с набором рейтеров и крепёжных винтов;
6. экран;
7. линейка.

5 Результаты измерений и обработка данных

Параметры установки:

$$F_1 = 110 \text{ мм}$$

$$F_2 = 25 \text{ мм}$$

$$\lambda = 532 \text{ нм}$$

5.1 Определение периода решёток по их пространственному спектру

Установим кассету с двумерными решётками вблизи выходного окна лазера. Измерения расстояния между соседними (горизонтальными и вертикальными) дифракционными максимумами и периода решётки представлены в таб. 1. 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.

Номер решётки	l , см	d , мкм
1	$6,3 \pm 0,1$	$9,9 \pm 0,2$
2	$2,5 \pm 0,1$	$25,0 \pm 1,0$
3	$1,3 \pm 0,1$	$48,2 \pm 3,7$

Таблица 1: Результаты измерений периода решёток по их дифракционной картине

Расстояние от сетки до экрана $H = 117,7 \pm 1$ см.

5.2 Определение периода решёток по изображению, увеличенному с помощью модели микроскопа

Соберём модель проекционного микроскопа (рис. 2). Для того, чтобы выделить изображение сетки, соответствующее законам геометрической оптики, найдём резкое изображение проволоочки, расположенной на сетках.

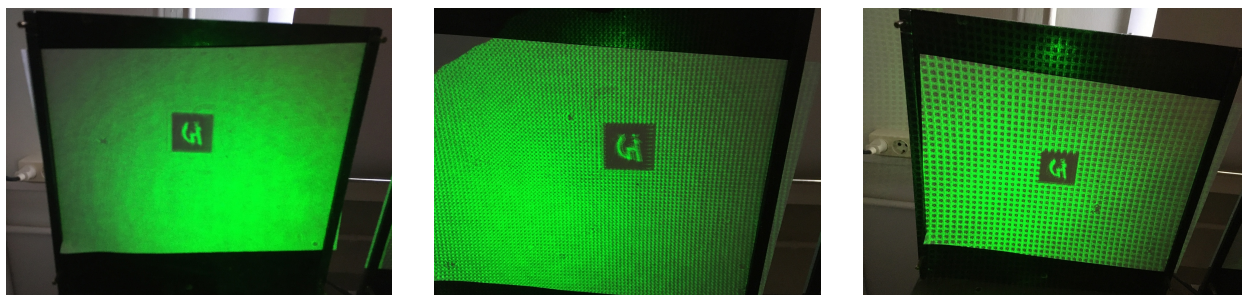


Рис. 3: Изображения дифракционных решёток

Полученные значения расстояний:

$$a_1 = 15 \pm 1 \text{ см}$$

$$b_2 = 63 \pm 1 \text{ см}$$

$$(b_1 + a_2) = 61,5 \pm 1 \text{ см}$$

Результаты измерения периода дифракционной решётки методом изображения представлены в таб. 2. Периоды решёток определяются по формуле $d = l/\Gamma$, где $\Gamma = \frac{b_1 b_2}{a_1 a_2} = 510$ — увеличение оптической системы.

Номер решётки	l , см	d , мкм
1	0,14	2,8
2	0,33	6,5
3	0,6	11,8

Таблица 2: Результаты измерений периода решёток по их изображению в модели микроскопа

5.3 Определение периодов решёток по оценке разрешающей способности микроскопа

Поместим щелевую диафрагму с микрометрическим винтом в фокальную плоскость F линзы L_1 . Из формулы (1) следует, что $d = 2\lambda f_1/D$. Результаты измерений представлены в таб. 3.

Номер решётки	D , мкм	d , мкм
1	6760	17,3
2	3200	36,6
3	1120	104,5

Таблица 3: Результаты измерений периода решёток по оценке разрешающей способности микроскопа

5.4 Сравнение результатов

Результаты измерения периодов дифракционных решёток различными способами представлены в таб. 4.

Номер решётки	d_1 , мкм	d_2 , мкм	d_3 , мкм
1	9,9	2,8	17,3
2	25,0	6,5	36,6
3	48,2	11,8	104,5

Таблица 4: Результаты измерений периода решёток различными способами

Для проверки справедливости формулы (1) построим график зависимости $d = f(1/D)$, взяв периоды сеток, определённые по спектру (рис. 4).

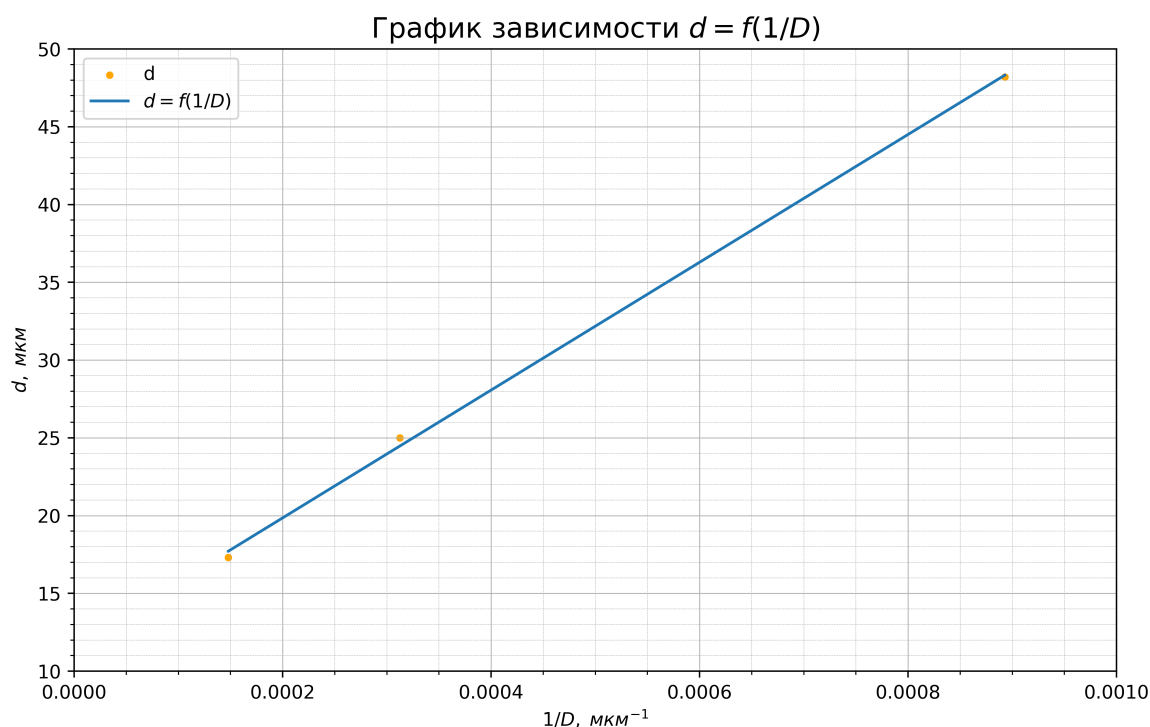


Рис. 4: График зависимости периода решётки от минимального размера диафрагмы

5.5 Пространственная фильтрация и мультиплицирование

Поворачивая щель относительно оси системы, получим изображения решёток при различных ориентациях щели. Для вертикального и горизонтального положения, когда видны только соответствующие дифракционные максимумы, получаем период $l \approx 3 \text{ мм}$. Для наклонного положения решётки под углом 45° , когда пропускаются максимумы с $m_x = m_y$, получим $l \approx 2 \text{ мм}$, т. е. меньше в $\sqrt{2}$ раз. Это объясняется тем, что расстояние между вторичными источниками волн составляет $\frac{d}{\sqrt{2}}$.

Для наблюдения мультиплицирования поменяем местами сетку и щель. Подберём такую ширину щели, чтобы на экране можно было наблюдать мультиплицированное изображение для всех сеток. При уменьшении периода сетки период полос на экране увеличивается (рис. 5). При увеличении ширины щели наблюдается ухудшение картины (рис. 6).

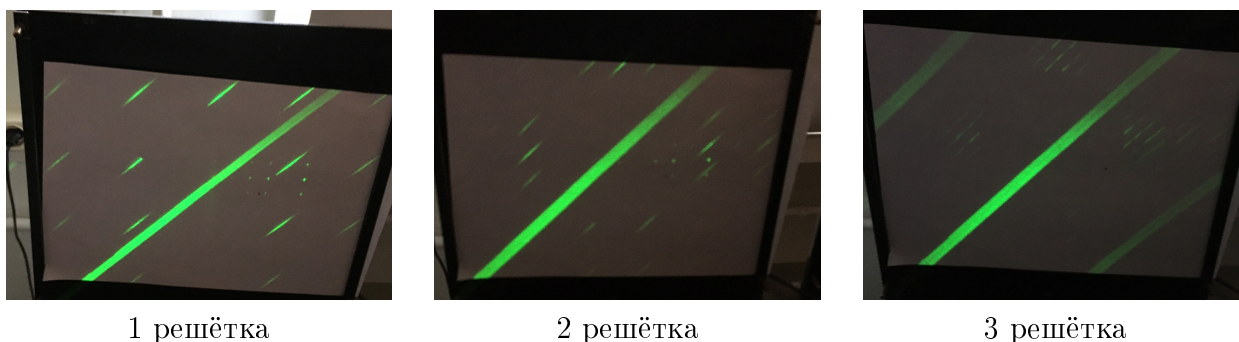


Рис. 5: Мультиплицирование изображений дифракционных решёток

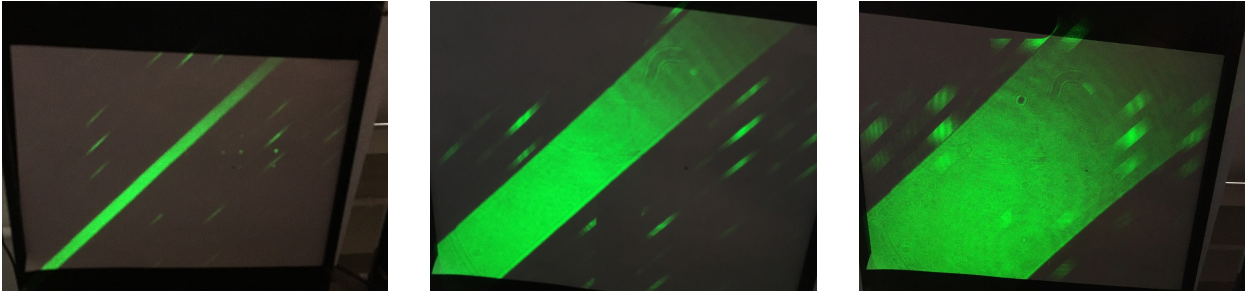


Рис. 6: Ухудшение картины при увеличении ширины щели для 2 решётки

6 Обсуждение результатов и выводы

В данной работе были определены периоды сеток 3 разными способами: по их спектру на экране, по увеличенному с помощью модели микроскопа изображению и по результатам измерения разрешающей способности микроскопа. Результаты измерений представлены в таб. 4. Полученные значения существенно различаются, но совпадают по порядку величины. Расхождение результатов можно объяснить случайной погрешностью, связанной с точностью юстировки системы. Из графика зависимости (рис. 4) $d = f(1/D)$ следует справедливость теории Аббе (1). Также в данной работе были качественно рассмотрены явления пространственной фильтрации и мультипликации.