
Московский Физико-Технический Институт
(государственный университет)

Лабораторная работа по курсу общей физики № 4.3.2

Дифракция света на ультразвуковой волне в жидкости

Автор:

Филиппенко Павел Б01-001



Долгопрудный, 2021

Аннотация

Цель и оборудование

1. **Цель работы:** изучение дифракция света на синусоидальной акустической решётке и наблюдение фазовой решётки методом тёмного поля.
2. **В работе используются:** оптическая скамья, осветитель, два длиннофокусных объектива, кювета с жидкостью, кварцевый излучатель с микрометрическим винтом, генератор ультразвуковой частоты, линза, вертикальная нить на рейтере, микроскоп.

Теоретическое введение

В работе используются оптическая скамья, осветитель, два длиннофокусных объектива, кювета с жидкостью, кварцевый излучатель с микрометрическим винтом, генератор звуковой частоты, линза, горизонтальная нить на рейтере, микроскоп.

При прохождении ультразвуковой волны через жидкость в ней возникают периодические неоднородности коэффициента преломления, создается фазовая решетка, которую мы считаем неподвижной ввиду малости скорости звука относительно скорости света. Показатель преломления n изменяется по закону:

$$n = n_0(1 + m \cos \Omega x) \quad (1)$$

Здесь $\Omega = 2\pi/\Lambda$ — волновое число для ультразвуковой волны, m — глубина модуляции n ($m \ll 1$).

Положим фазу ϕ колебаний световой волны на передней стенке кюветы равной нулю, тогда на задней поверхности она равна:

$$\phi = knL = \phi_0(1 + m \cos \Omega x) \quad (2)$$

Здесь L — толщина жидкости в кювете, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число для света.

После прохождения через кювету световое поле есть совокупность плоских волн, распространяющихся под углами θ , соответствующими максимумам в дифракции Фраунгофера:

$$\Lambda \sin \theta_m = m\lambda \quad (3)$$

Этот эффект проиллюстрирован на рисунке 1.

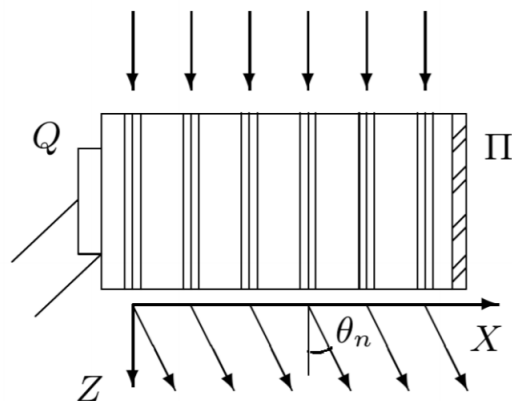


Рис. 1: Дифракция световых волн на акустической решетке

Зная положение дифракционных максимумов, по формуле (1) легко определить длину ультразвуковой волны, учитывая малость θ : $\sin \theta \approx \theta \approx l_m/F$, где l_m — расстояние от нулевого до последнего видимого максимума, F — фокусное расстояние линзы. Тогда получим:

$$\Lambda = m\lambda F/l_m \quad (4)$$

Скорость ультразвуковых волн в жидкости, где ν — частота колебаний излучателя:

$$v = \Lambda\nu \quad (5)$$

Экспериментальная установка

Схема установки. Схема установки приведена на рисунке 2. Источник света Л через светофильтр Ф и конденсор К освещает вертикальную щель S, находящуюся в фокусе объектива O_1 . После объектива параллельный световой пучок проходит через кювету С перпендикулярно акустической решетке, и дифракционная картина собирается в фокальной плоскости объектива O_2 , наблюдается при помощи микроскопа М.

Предварительную настройку установки произведем в соответствии с инструкцией с зеленым фильтром, далее в работе используется красный.

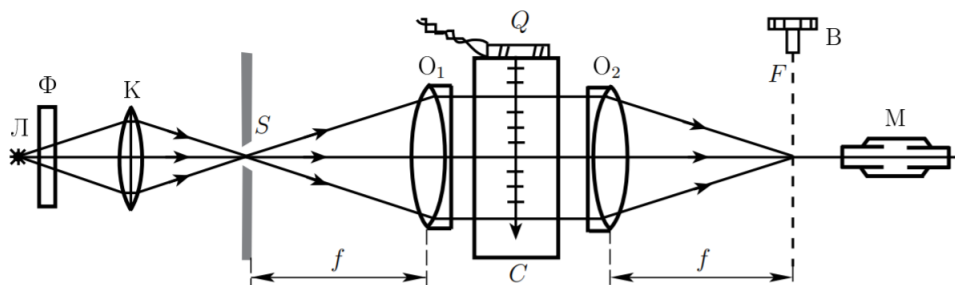


Рис. 2: Схема для наблюдения дифракции на акустической решетке

Параметры установки: фокусное расстояние объектива $F = 30$ см, одно деление винта микроскопа составляет 20 мкм, полоса пропускания фильтра $\lambda = 6400 \pm 200 \text{ \AA}$.

Для определения скорости ультразвука методом темного поля будем использовать следующую установку.

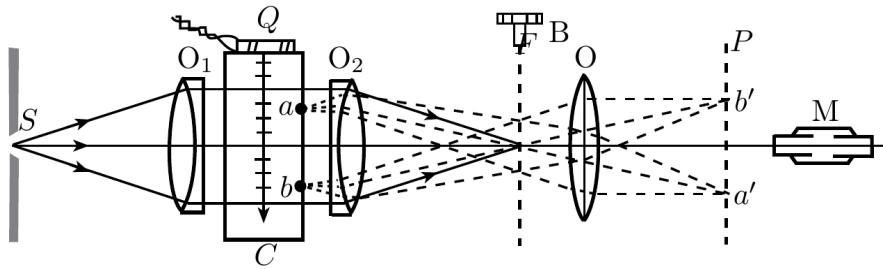


Рис. 3: Схема для определения скорости ультразвука методом темного поля

Ход работы

Определение скорости ультразвука по дифракционной картине

Проводить эксперимент будем с использованием установки рис 2. Запишем параметры установки.

Фокусные расстояния объективов: $F_1 = F_2 = 30$ см

Длина волны и полоса пропускания для зеленого света: $\lambda_{\text{зел}} = 546 \pm 495$ нм

Длина волны и полоса пропускания для красного света: $\lambda_{\text{крас}} = 640 \pm 20$ нм

Исследуем изменение дифракционной картины в зеленом и красном свете. **Полученные выводы:**

1. При уменьшении мощности УЗ число дифракционных полос уменьшается.
2. При замене светофильтра с зеленого на красный качество дифракционной картины улучшается.
3. При наблюдении дифракционной картины в немонахроматическом свете качество дифракционной картины ухудшается. Это связано с временной когерентностью.

Измерим положение x дифракционных максимумов на разных частотах, по полученным данным построим графики зависимости $x(n)$.

Экспериментальные данные приведены в таблицах 1, 2, 3 и 4.

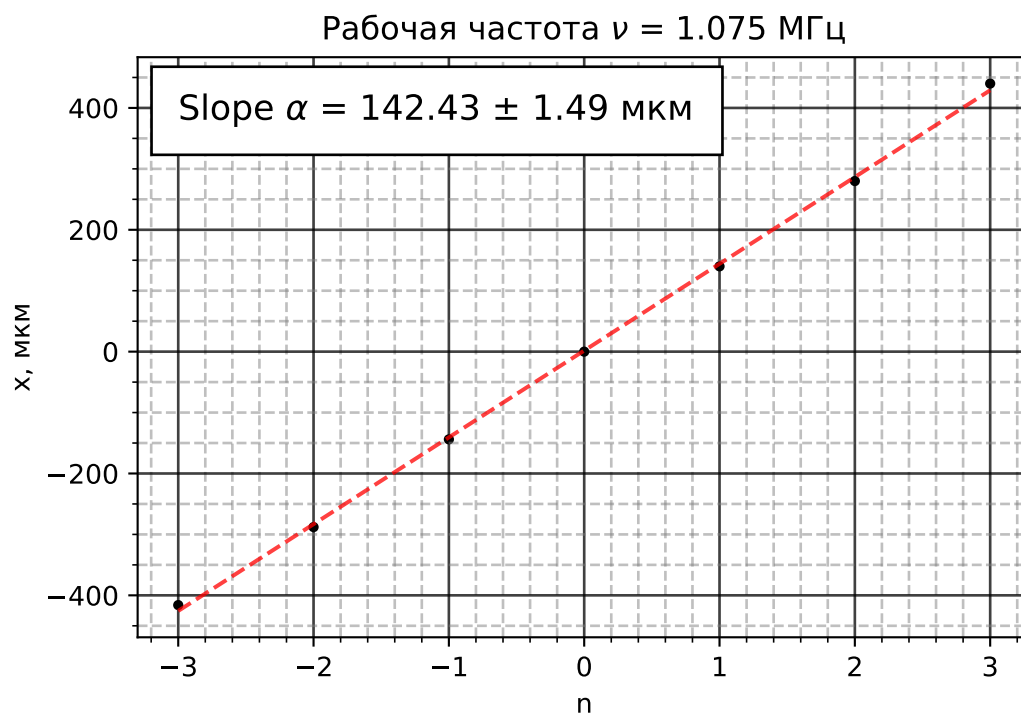
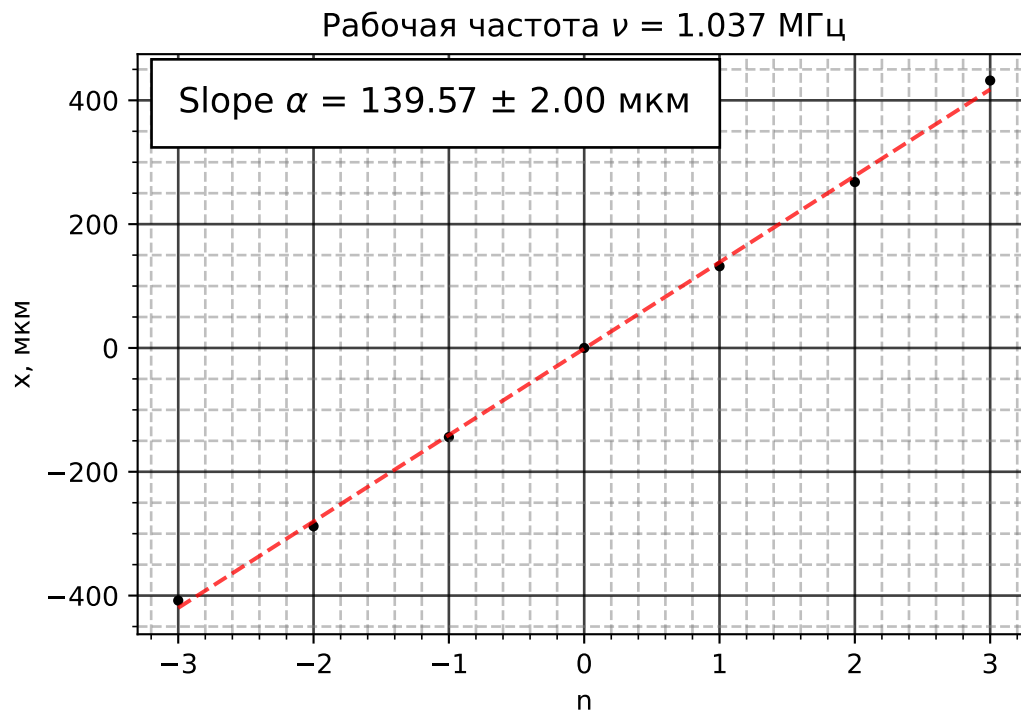
n	-3	-2	-1	0	1	2	3
x , дел	-102	-72	-36	0	33	67	108
x , мкм	-408	-288	-144	0	132	268	432

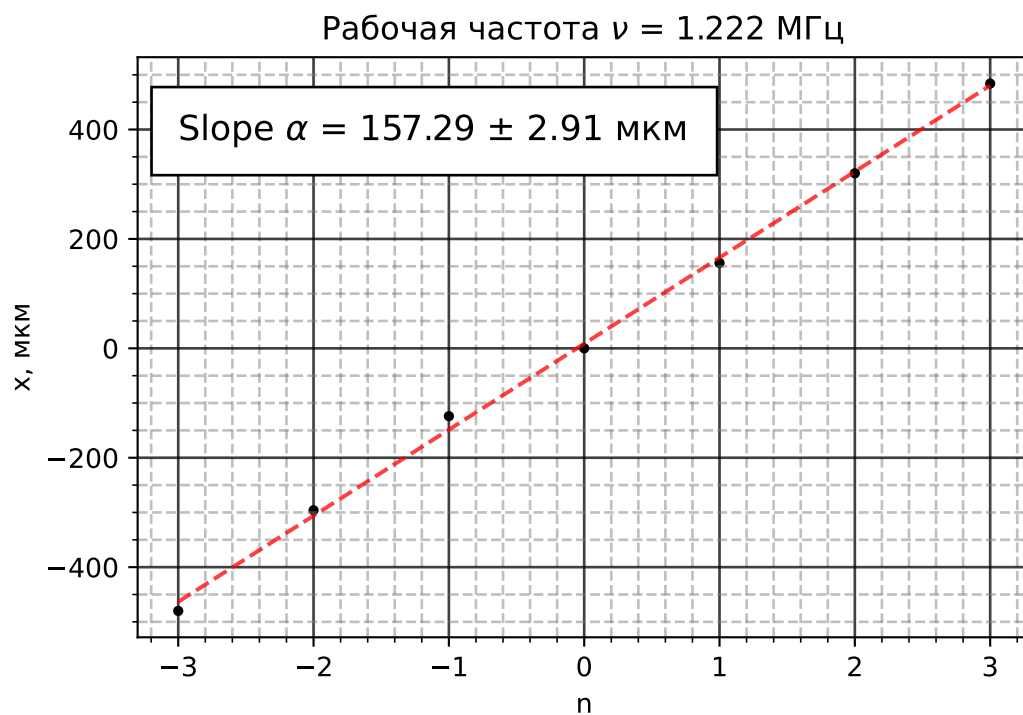
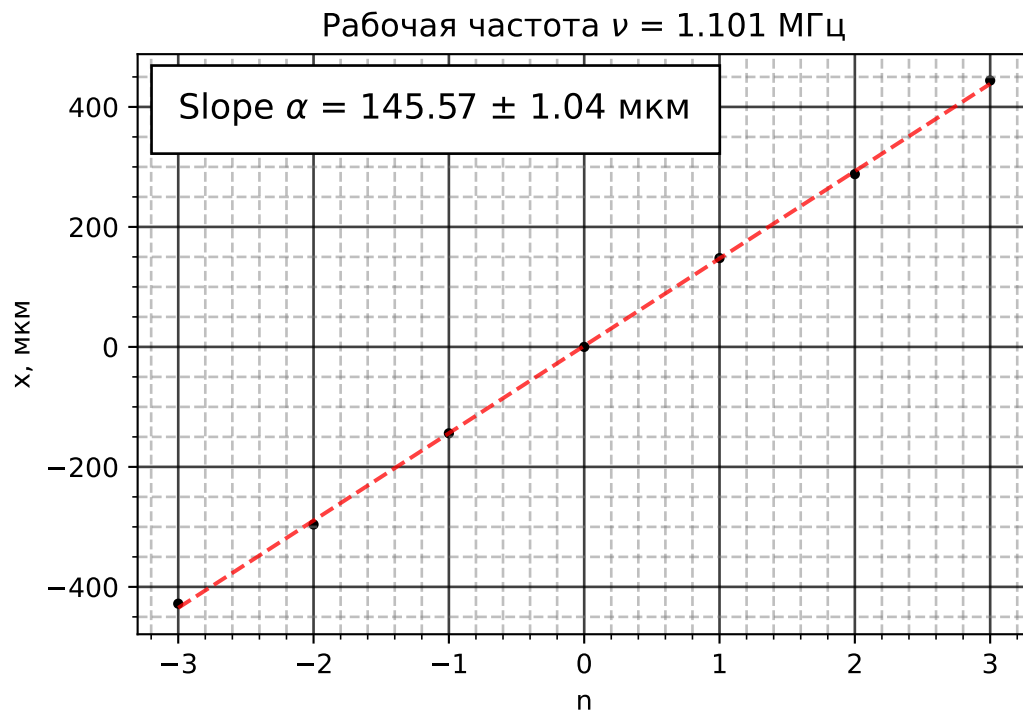
Таблица 1: Положение максимумов при $f = 1.03678$ МГц

По наклону каждого графика можно определить среднее расстояние между двумя максимумами, а зная длину волны найдем длину ультразвуковой волны по формуле:

$$\alpha = \frac{l_m}{m} = f \frac{\lambda}{\Lambda}$$

где l_m – среднее расстояние между максимумами, α – наклон графика, Λ – длина УЗ волны. Зная величину Λ можем вычислить скорость УЗ по формуле





n	-3	-2	-1	0	1	2	3
x , дел	-104	-72	-36	0	35	70	110
x , мкм	-416	-288	-144	0	140	280	440

Таблица 2: Положение максимумов при $f = 1.07482$ МГц

n	-3	-2	-1	0	1	2	3
x , дел	-107	-74	-36	0	37	72	111
x , мкм	-428	-296	-144	0	148	288	444

Таблица 3: Положение максимумов при $f = 1.10083$ МГц

n	-3	-2	-1	0	1	2	3
x , дел	-120	-74	-31	0	39	80	121
x , мкм	-480	-296	-124	0	156	320	484

Таблица 4: Положение максимумов при $f = 1.22206$ МГц

$$v = \Lambda \nu$$

Расчет погрешностей

$$\frac{\sigma_{\Lambda}}{\Lambda} = \frac{\sigma_{\alpha}}{\alpha} \Rightarrow \sigma_{\Lambda} = \frac{\sigma_{\alpha}}{\alpha} \Lambda$$

$$\sigma_v = \sqrt{\varepsilon_{\Lambda}^2 + \varepsilon_{\nu}^2} v$$

где ν – частота УЗ. Результаты вычислений приведены в таблице 5.

f , МГц	α , мкм	σ_{α} , мкм	Λ , мкм	σ_{Λ} , мкм	v , м/с	σ_v , м/с
1,037	139,57	2,00	1 375,65	19,71	1 426,55	20,44
1,075	142,43	1,49	1 348,03	14,10	1 449,13	15,16
1,101	145,57	1,04	1 318,95	9,42	1 452,17	10,38
1,222	157,29	2,91	1 220,68	22,58	1 491,67	27,60

Таблица 5: Результаты вычислений

Определение скорости ультразвука методом темного поля

Для данного эксперимента будем использовать установку 3. Установим цену деления окулярной шкалы в условиях опыта. В нашем случае цена деления 0.5 мм.

Получим изображение УЗ решетки, с помощью окулярной шкалы найдем расстояние между двумя удаленными минимумами и посчитаем количество полос между ними.

Без применения метода темного поля звуковая решетка не наблюдается. Закроем нулевой максимум горизонтальной нитью. Таким образом, осевая составляющая фазово-модулированной волны поглощается, а боковые остаются без изменения. Получившееся поле:

$$f(x) = \frac{im}{2} e^{i\Omega x} + \frac{im}{2} e^{-i\Omega x} = im \cos \Omega x I(x) = m^2 \cos^2 \Omega x = m^2 \frac{1 + \cos^2 2\Omega x}{2} \quad (6)$$

Отсюда получаем, что расстояние между темными полосами есть $\Lambda/2$.

ν , МГц	Количество делений N	Количество темных полос n	Λ , мм	v , м/с
1,220	150	15	1,29	1570
1,259	150	16	1,20	1510
1,271	175	18	1,24	1570

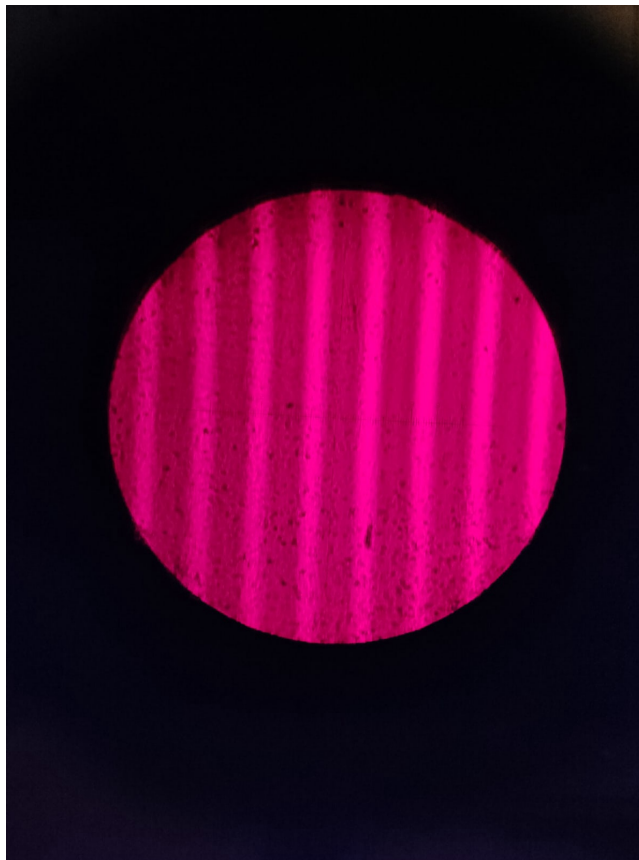


Рис. 4: фазовая решетка закрыт нулевой максимум

Проведем измерение длины ультразвуковой волны, приняв ошибку равной цене деления окулярной шкалы.

Формулы для расчета длины волны ультразвука Λ и скорости распространения v в воде:

$$\Lambda/2 = NC/(n - 1), \quad v = \nu\Lambda \quad (7)$$

Качественные наблюдения

Если последовательно закрывать нулевой, первый и второй максимумы дифракционной картины, то качество наблюдаемой УЗ решетки будет ухудшаться (см. рис 4, 6, ??).

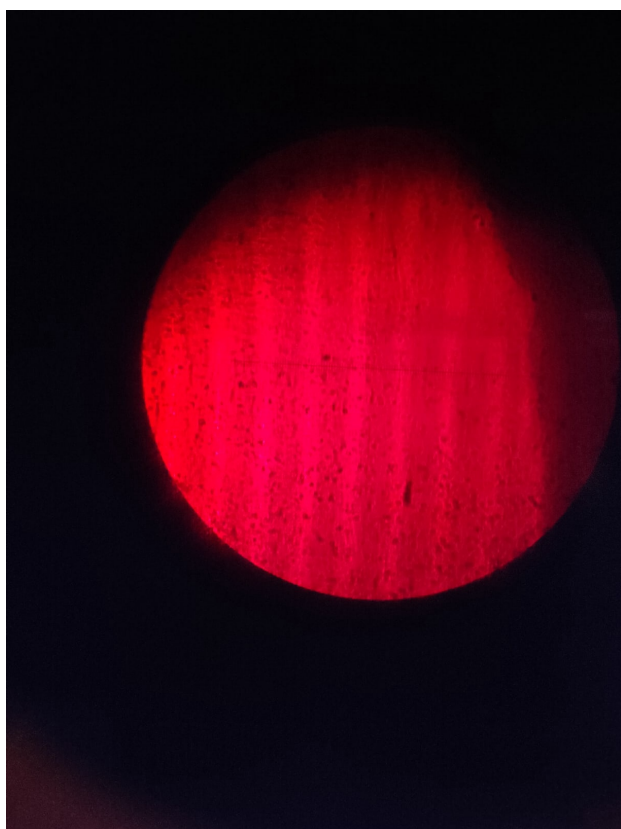


Рис. 5: фазовая решетка закрыт первый максимум

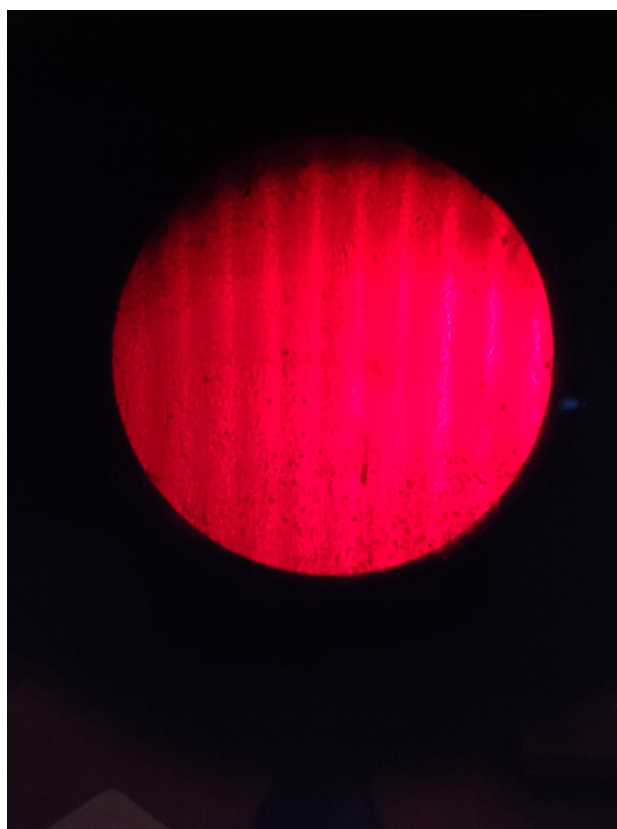


Рис. 6: фазовая решетка закрыт второй максимум