

Лабораторная работа 4.3.2
Дифракция света на ультразвуковой волне в жидкости

Яковлева Саша, группа 625

25 февраля 2018 г.

Цель работы: изучение дифракции света на синусоидальной акустической решетке и наблюдение фазовой решетки методом темного поля.

В работе используются оптическая скамья, осветитель, два длиннофокусных объектива, кювета с жидкостью, кварцевый излучатель с микрометрическим винтом, генератор звуковой частоты, линза, вертикальная 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:

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

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:

$$\varphi = knL = \varphi_0(1 + m \cos \Omega x)$$

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:

$$\Lambda \sin \theta_m = m\lambda \quad (1)$$

Этот эффект проиллюстрирован на рисунке 1.

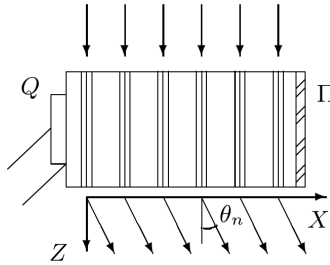


Рис. 1: Дифракция световых волн на акустической решетке

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:

$$\Lambda = m\lambda F/l_m \quad (2)$$

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

$$v = \Lambda\nu \quad (3)$$

1 Определение скорости ультразвука по дифракционной картине

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.

Предварительная настройка установки произведем в соответствии с инструкцией с зеленым фильтром, далее в работе используется красный.

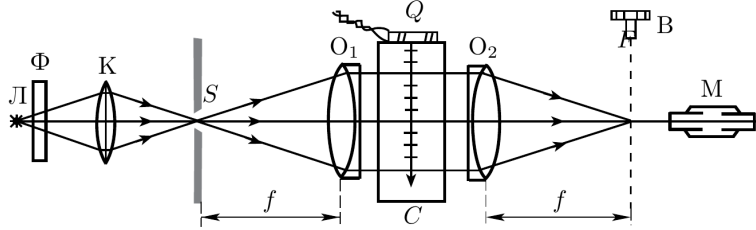


Рис. 2: Схема для наблюдения дифракции на акустической решетке

Параметры установки: фокусное расстояние объектива O_2 $F = 30$ см, одно деление винта микроскопа составляет 4 мкм, погрешность измерений примем равной 2 деления, или 8 мкм.

Исследуем изменения дифракционной картины на зеленом свете. При увеличении частоты УЗ-генератора и приближении к 1,1 МГц проявляется дифракционная решетка; расстояние между максимумами растет.

Измерим положения x_m дифракционных максимумов с помощью микроскопического винта для четырех частот. Результаты измерений занесены в таблицы 1-4 ниже. На основе каждой таблицы построены графики зависимости $x_m(m)$, они изображены на рисунках 3-6. Экспериментальные точки хорошо ложатся на прямую. Проведем ее методом наименьших квадратов. Выражения для коэффициентов прямой $x_m = bm + a$ с указанием погрешностей:

$$b = \frac{\langle mx_m \rangle - \langle x_m \rangle \langle m \rangle}{\langle m^2 \rangle - \langle m \rangle^2}$$

$$a = \langle x_m \rangle - b \langle m \rangle$$

$$\sigma_b = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\langle x_m^2 \rangle - \langle x_m \rangle^2}{\langle m^2 \rangle - \langle m \rangle^2} - b^2}$$

$$\sigma_a = \sigma_b \sqrt{\langle m^2 \rangle - \langle m \rangle^2}$$

Коэффициенты наклона b для каждой прямой занесены в сводную таблицу 5, содержащую вычисления длины ультра-звуковой волны Λ и скорости ее распространения в воде v по формулам (2), (3) с учетом выражения:

$$b = l_m/m \rightarrow \Lambda = \lambda F/b$$

Относительную погрешность определения длины волны Λ будем считать равной относительной погрешности определения коэффициента наклона прямой b .

| | | | | | | | |
|-------------|------|------|------|---|-----|-----|-----|
| m | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| x_m , дел | -115 | -78 | -37 | 0 | 38 | 74 | 106 |
| x_m , МКМ | -460 | -312 | -148 | 0 | 152 | 296 | 424 |

Таблица 1: Измерение координаты m -ого максимума x_m дифракционной картины при частоте генератора $\nu = 1,168$ МГц

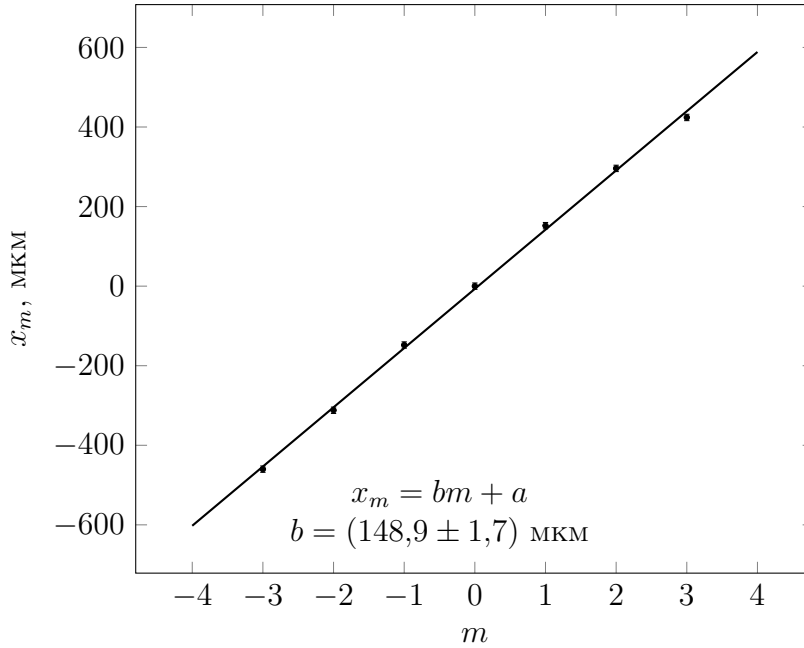


Рис. 3: График зависимости $x_m(m)$ при частоте генератора $\nu = 1,168$ МГц

| | | | | | | | | | |
|-------------|------|------|------|------|---|-----|-----|-----|-----|
| m | -4 | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| x_m , дел | -150 | -116 | -81 | -38 | 0 | 38 | 80 | 120 | 154 |
| x_m , МКМ | -600 | -464 | -324 | -152 | 0 | 152 | 320 | 480 | 616 |

Таблица 2: Измерение координаты m -ого максимума x_m дифракционной картины при частоте генератора $\nu = 1,219$ МГц

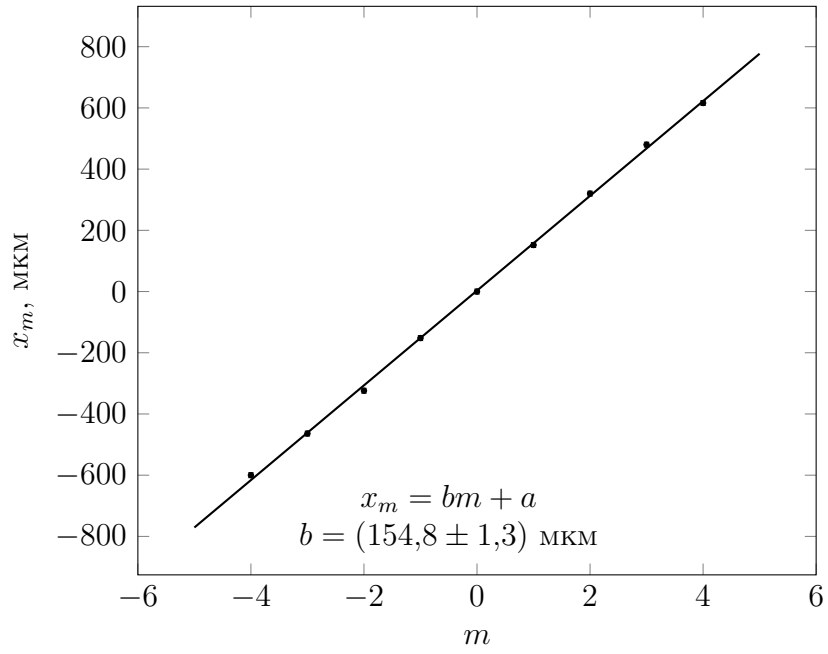


Рис. 4: График зависимость $x_m(m)$ при частоте генератора $\nu = 1,168$ МГц

| | | | | | | | |
|-------------|------|------|------|---|-----|-----|-----|
| m | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| x_m , дел | -116 | -80 | -38 | 0 | 45 | 86 | 126 |
| x_m , мкм | -464 | -320 | -152 | 0 | 180 | 344 | 504 |

Таблица 3: Измерение координаты m -ого максимума x_m дифракционной картины при частоте генератора $\nu = 1,258$ МГц

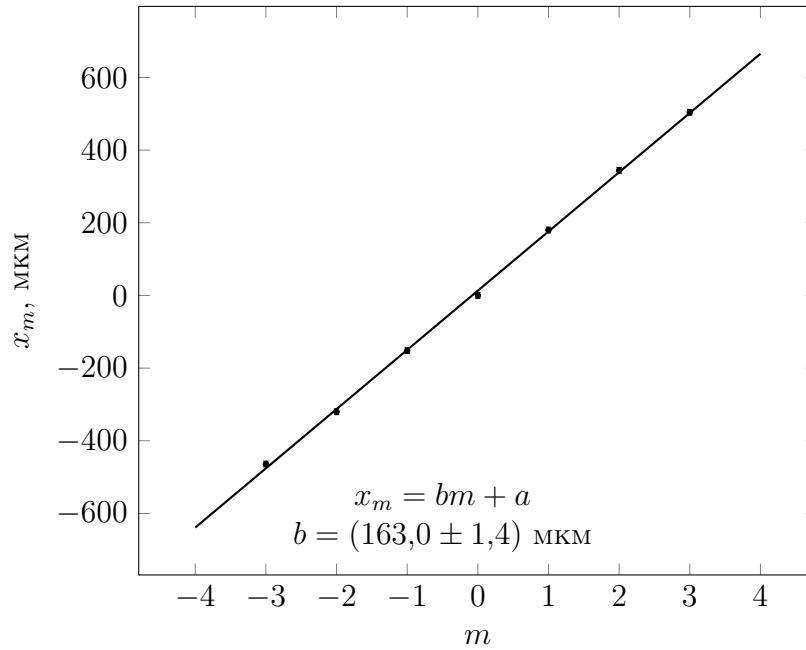


Рис. 5: График зависимость $x_m(m)$ при частоте генератора $\nu = 1,258$ МГц

| | | | | | |
|-------------|------|------|---|-----|-----|
| m | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 |
| x_m , дел | -94 | -43 | 0 | 45 | 85 |
| x_m , МКМ | -376 | -172 | 0 | 180 | 340 |

Таблица 4: Измерение координаты m -ого максимума x_m дифракционной картины при частоте генератора $\nu = 1,331$ МГц

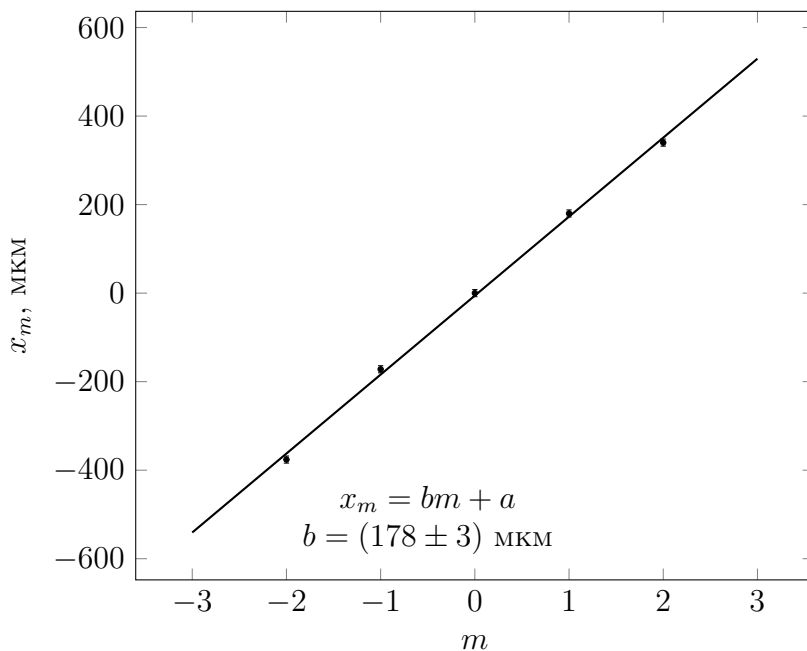


Рис. 6: График зависимость $x_m(m)$ при частоте генератора $\nu = 1,331$ МГц

| ν , МГц | b , МКМ | σ_b , МКМ | Λ , МКМ | $\Delta\Lambda$, МКМ | v , м/с | Δv , м/с |
|-------------|-----------|------------------|-----------------|-----------------------|-----------|------------------|
| 1,168 | 148,9 | 1,7 | 1289 | 15 | 1507 | 17 |
| 1,219 | 154,8 | 1,3 | 1240 | 10 | 1512 | 12 |
| 1,258 | 163,0 | 1,4 | 1178 | 10 | 1482 | 13 |
| 1,331 | 178 | 3 | 1076 | 19 | 1432 | 26 |

Таблица 5: Вычисление длины ультразвуковой волны Λ и скорости распространения ее в воде v

Ошибка при определении Λ и v не превышает 2%. Согласно справочным данным, при комнатной температуре скорость ультразвуковой волны в воде составляет примерно 1490 м/с. Значения, полученные экспериментально, с достаточной точностью соотносятся с ними.

2 Определение скорости ультразвука методом темного поля

Для наблюдения акустической решетки используется метод темного поля, который заключается в устранении центрального дифракционного максимума с помощью непрозрачного экрана. Схема установки показана на рисунке 7.

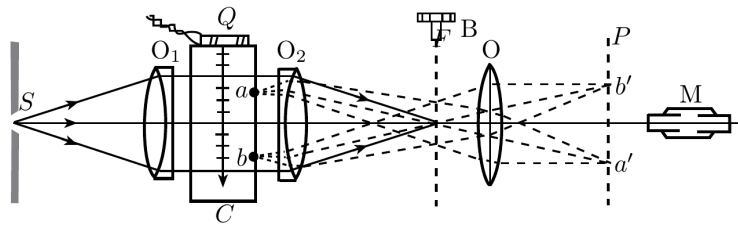


Рис. 7: Схема для наблюдения акустической решетки методом темного поля

Приставим к задней стенке (для светового луча) кюветы стеклянную пластинку с миллиметровыми делениями; сфокусируем микроскоп на изображение пластинки. Определим цену деления окулярной шкалы микроскопа, совместив ее с миллиметровыми делениями: в 6 делениях миллиметровой шкалы убирается 100 маленьких делений окулярной. Значит, **цена деления окулярной шкалы**: $C = 0,06$ мм.

Без применения метода темного поля звуковая решетка не наблюдается. Закроем нулевой максимум вертикальной нитью. Таким образом осевая составляющая фазово-модулированной волны поглощается, а боковые остаются без изменения. Получившееся поле: $f(x) = \frac{im}{2}e^{i\Omega x} + \frac{im}{2}e^{-i\Omega x} = im \cos \Omega x$, интенсивность изменяется по закону: $I(x) = m^2 \cos^2 \Omega x = \frac{1+\cos 2\Omega x}{2} \cdot m^2$. Отсюда получаем, что расстояние между темными полосами есть $\Lambda/2$.

Проведем измерение длины ультра-звуковой волны, приняв ошибку равной цене деления окулярной шкалы. В таблице 6 содержатся количество маленьких делений окулярной шкалы N (цена деления $C = 0,06$), соответствующее n темным полосам акустической решетки. Формулы для расчета длины волны ультразвука Λ и скорости распространения v в воде:

$$\Lambda/2 = NC/(n - 1)$$

$$v = \nu\Lambda$$

Расчеты также приведены в таблице 6.

Ошибка при таком определении скорости звука больше, чем в первой части работы, и составляет около 5%. Сами значения тоже получились больше.

| ν , МГц | Количество делений шкалы окуляра N | Количество темных полос акустической решетки n | Λ , мм | v , 10 м/с | Δv , 10 м/с |
|-------------|--------------------------------------|--|----------------|--------------|---------------------|
| 1,220 | 150 | 15 | 1,29 | 157 | 7 |
| 1,259 | 150 | 16 | 1,20 | 151 | 8 |
| 1,271 | 175 | 18 | 1,24 | 157 | 8 |

Таблица 6: Вычисление длины ультразвуковой волны Λ и скорости распространения ее в воде v методом темного поля

Вывод: в работе изучена дифракция света на акустической решетки, рассчитаны длина волны ультразвука и скорость его распространения в воде. Решетка наблюдалась методом темного поля.