

Работа 4.3.2

Дифракция света на ультразвуковой волне в жидкости

Лось Денис (группа 611)

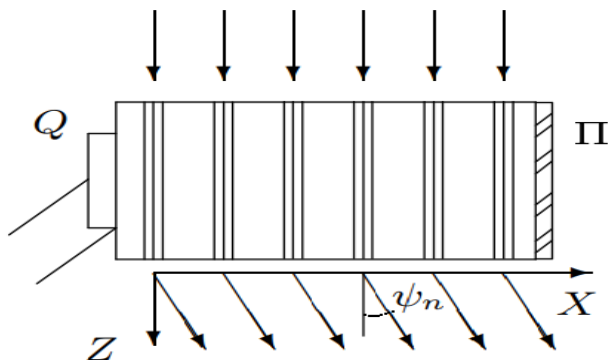
21 февраля 2018

Цель работы: изучение дифракции света на синусоидальной акустической решётке, наблюдение фазовой решётки методом тёмного поля, определение скорости ультразвука в воде, а также периода акустической решётки.

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

Введение в теоритическую часть

При прохождении ультразвуковой волны через жидкость в ней возникают периодические оптические неоднородности, обусловленные разницей значений коэффициента преломления в областях сжатия и разрежения. Эти периодические неоднородности играют роль своеобразной дифракционной решётки для проходящего сквозь жидкость света.



При небольших амплитудах звуковой волны показатель преломления жидкости n меняется по закону

$$n = n_0 (1 + \alpha \cos Kx),$$

где $K = 2\pi/\Lambda$ — волновое число для ультразвуковой волны (Λ — длина ультразвуковой волны), α — глубина модуляции показателя преломления, определяемая интенсивностью ультразвуковой волны.

Приняв фазу световых колебаний на передней по ходу лучей поверхности жидкости равной нулю, на задней поверхности ($z = 0$) будем иметь

$$\varphi = knL = kn_0L(1 + \alpha \cos Kx),$$

где L — толщина слоя в кювете. k — волновое число для света.

Получается, в плоскости $z = 0$ фаза световых колебаний является периодической функцией координаты, т.е. ультразвуковая волна создаёт в жидкости фазовую дифракционную решётку.

Для зависимости угла поворота волнового фронта световой волны $\Theta(x)$ от координаты x можем записать:

$$\Theta(x) = \frac{dz}{dx} = \frac{1}{k} \frac{d\varphi}{dx} = -Kn_0L \cdot \alpha \sin(Kx)$$

Качественный критерий, при выполнении которого можно пренебречь искривлением световых лучей в кювете, и, следовательно, считать акустическую решётку чисто фазовой:

$$|\Theta(x)_{\max}|L \ll \Lambda \quad \text{или} \quad \alpha \ll \left(\frac{\Lambda}{L}\right)^2$$

В случае слабой фазовой модуляции после прохождения через кювету световое поле представимо в виде совокупности трёх, а в общем случае некоторого большого числа плоских волн, которые распространяются под углами, определяемыми из условия

$$\Lambda \sin \psi_m = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (1)$$

При этом каждая из этих волн соответствует одному из максимумов в дифракционной картине Фраунгофера.

Наблюдение дифракции на акустической решётке

Экспериментальная установка

Схема установки для наблюдения дифракции на акустической решётке изображена на рис.1.

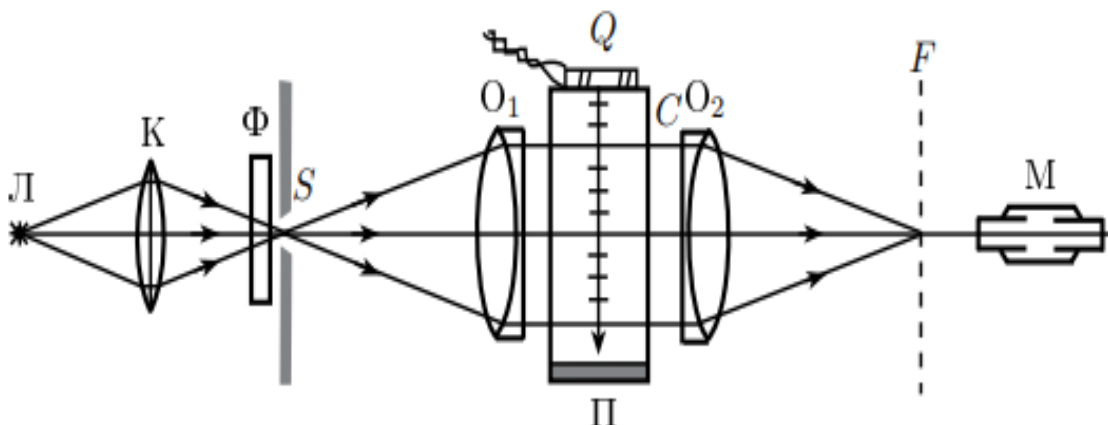


Рис. 1: Схема для наблюдения дифракции на акустической решётке

Источник света Л через **светофильтр Ф** и **конденсор К** освещает **щель S**, которая расположена в фокусе **объектива O₁**. Выходящий из объектива параллельный пучок света проходит через **кювету С**, перпендикулярно направлению распространения ультразвуковых волн, которые возбуждаются пьезокварцевой **пластинкой Q**, на которую подаётся напряжение ультразвуковой частоты от генератора. В фокальной плоскости **F** второго **объектива O₂** образуется дифракционная картина, наблюдаемая при помощи **микроскопа М**. Пористая резина **П** в данной установке отсутствует, а следовательно, в кювете образуется стоячая волна, что позволяет использовать в данной работе метод тёмного поля.

В данной экспериментальной установке фокусное расстояние объектива **O₂**

$$f = 30 \text{ см}$$

В качестве светофильтра **Ф** используется красный фильтр с полосой пропускания

$$\lambda = (640 \pm 20) \text{ нм}$$

Методика измерений

В силу малости углом ψ_m формула (1) может быть приведена к виду

$$l_m = mf \frac{\lambda}{\Lambda}, \quad (2)$$

где l_m — измеренное на опыте расстояние между m -м и нулевым максимумами, а f — фокусное расстояние объектива O_2 .

Соответственно предлагается измерить положения нескольких дифракционных максимумов x_m с помощью микрометрического винта микроскопа для нескольких частот УЗ-генератора. Построив график зависимости $x_m - x_0$ от порядка m дифракционного максимума, по методу наименьших квадратов найти коэффициент наклона полученной прямой $\beta = \Delta x_m / \Delta m = l_m / m$.

Далее для каждой частоты генератора при помощи формулы (2) найти длину ультразвуковой волны $\Lambda = f\lambda/\beta$. Затем рассчитав для каждой частоты скорость распространения ультразвуковой волны $v = \Lambda \cdot \nu$, где ν — частота генератора ультразвуковой частоты, и усреднив полученные результаты, получить искомую скорость ультразвуковой волны $v_{уз}$.

Погрешность коэффициента наклона β мы определяем согласно методу наименьших квадратов, принимая во внимание тот факт, что, измеряя x_m с помощью микрометрического винта с ценой деления 4 мкм, мы будем иметь для них приборную погрешность Δ_{x_m} , равную 2 мкм. Частоту ультразвукового генератора мы определяем с точностью до 10^{-3} МГц.

Тогда принимая σ за обозначение относительной погрешности рассматриваемых величин получим финальные формулы для расчёта погрешностей

$$\begin{aligned} \Delta_{\Lambda} &= \Lambda \cdot \sqrt{\sigma_{\lambda}^2 + \sigma_{\beta}^2} \\ \Delta_v &= v \cdot \sqrt{\sigma_{\lambda}^2 + \sigma_{\beta}^2 + \sigma_{\nu}^2} \\ \Delta_{v_{уз}} &= \frac{1}{n} \cdot \sqrt{\Delta_{v_1}^2 + \dots + \Delta_{v_n}^2} \end{aligned}$$

Применение метода тёмного поля

Экспериментальная установка

Чтобы получить видимое изображение фазовой акустической решётки, прежде всего необходимо получить в поле зрения микроскопа изображение задней плоскости (считая по ходу световых лучей) кюветы. Достигнуть этого можно с помощью **вспомогательной линзы O_1** , которую необходимо расположить на оптической скамье за фокальной плоскостью объектива O_2 . Данная схема приведена на рис.2. Остальные элементы и их характеристики, изображённые на рис.2. описаны в пояснении к схеме, изображённой на рис.1. Источник света, светофильтр и конденсор здесь не показаны.

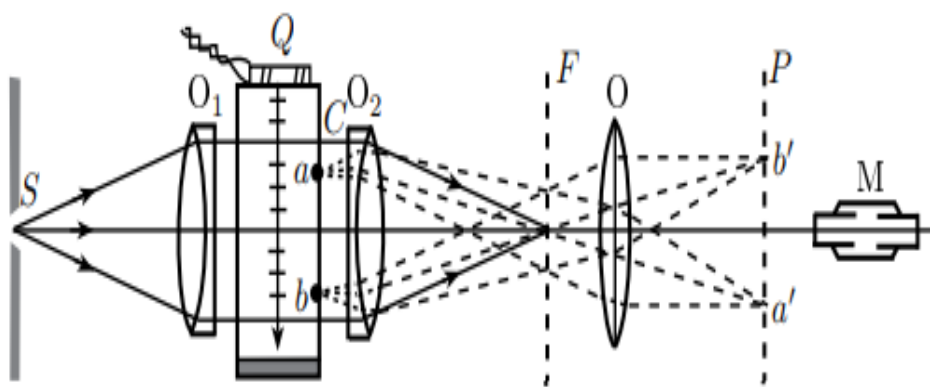


Рис. 2: Схема для наблюдения акустической решётки методом тёмного поля

Методика измерений

Прежде чем приступить непосредственно к методу тёмного поля, необходимо найти цену деления окулярной шкалы микроскопа, которая нам потребуется для дальнейших измерений. Для этого, прижав к задней стенке кюветы стеклянную пластинку с миллиметровыми делениями, совместим её деления с делениями окулярной шкалы и определим количество тех и других делений.

Далее закрыв центральный максимум вертикальной нитью и убедившись, что после этого в поле зрения видны тёмные и светлые полосы, будем измерять расстояние между самыми дальними из хорошо видимых тёмных полос, а также просчитывать число промежутков между ними. Согласно теории метода тёмного поля расстояние между тёмными полосами соответствует смещению в плоскости кюветы на $\Lambda/2$. Следовательно, исходя из вышесказанного, длина ультразвуковой волны может быть определена как

$$\Lambda = 2 \frac{s \cdot \delta_y}{N},$$

где s — число делений между самыми дальними из хорошо видимых тёмных полос, N — число промежутков между ними, а δ_y — цена деления окулярной шкалы.

Приведём соответствующие формулы для расчёта погрешностей определения длины ультразвуковой волны, а также её скорости распространения $v_{\text{уз}}$.

$$\begin{aligned}\Delta_{\Lambda} &= \Lambda \cdot \sigma_s \\ \Delta_v &= v \cdot \sqrt{\sigma_{\Lambda}^2 + \sigma_{\nu}^2} \\ \Delta_{v_{\text{уз}}} &= \frac{1}{n} \cdot \sqrt{\Delta_{v_1}^2 + \dots + \Delta_{v_n}^2}\end{aligned}$$

Ход работы

Наблюдение дифракции на акустической решётке

l_m , дел	m
0	0
39	1
81	2
121	3
-42	-1
-82	-2
-123	-3

Таблица 1: Таблица измерений l_m от m при частоте $\nu = 1.221$ МГц

l_m , дел	m
0	0
43	1
91	2
-48	-1
-92	-2

Таблица 2: Таблица измерений l_m от m при частоте $\nu = 1.355$ МГц

l_m , дел	m
0	0
37	1
76	2
118	3
-40	-1
-76	-2
-114	-3

Таблица 3: Таблица измерений l_m от m при частоте $\nu = 1.136$ МГц

Построенные графики

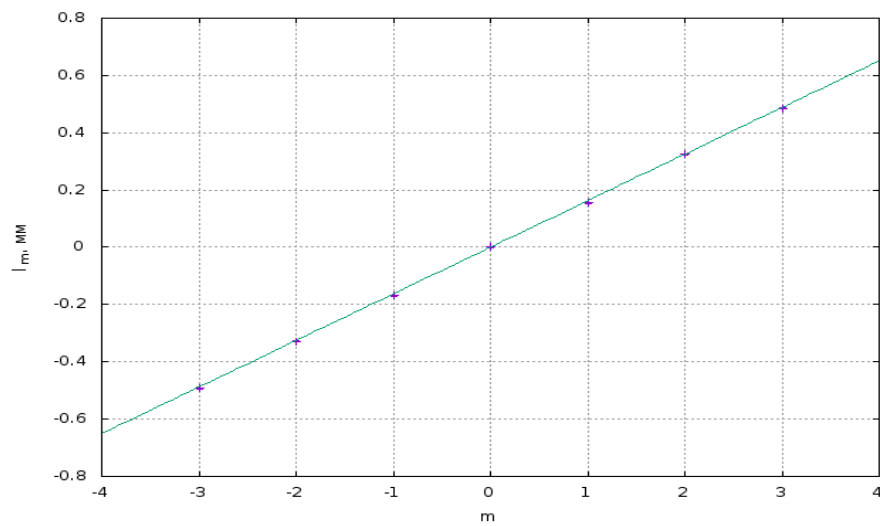


Рис. 3: График зависимости l_m от m при $\nu = 1.221$ МГц

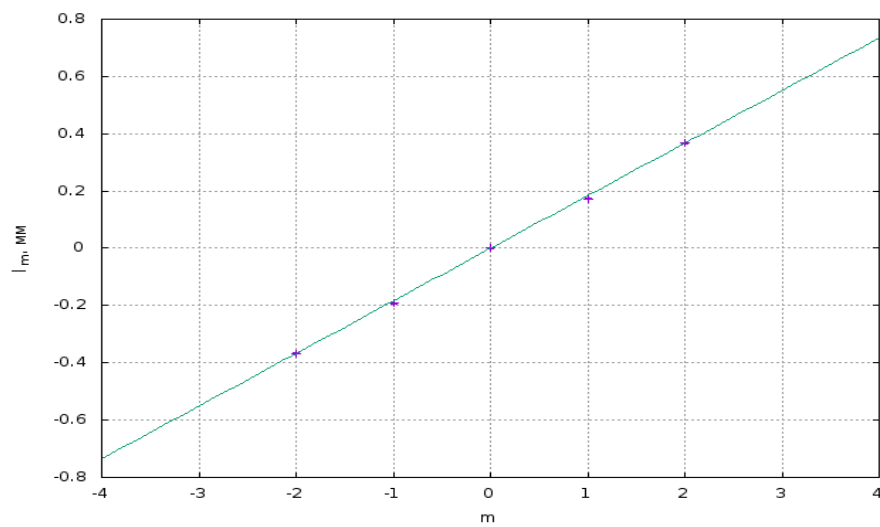


Рис. 4: График зависимости l_m от m при $\nu = 1.355$ МГц

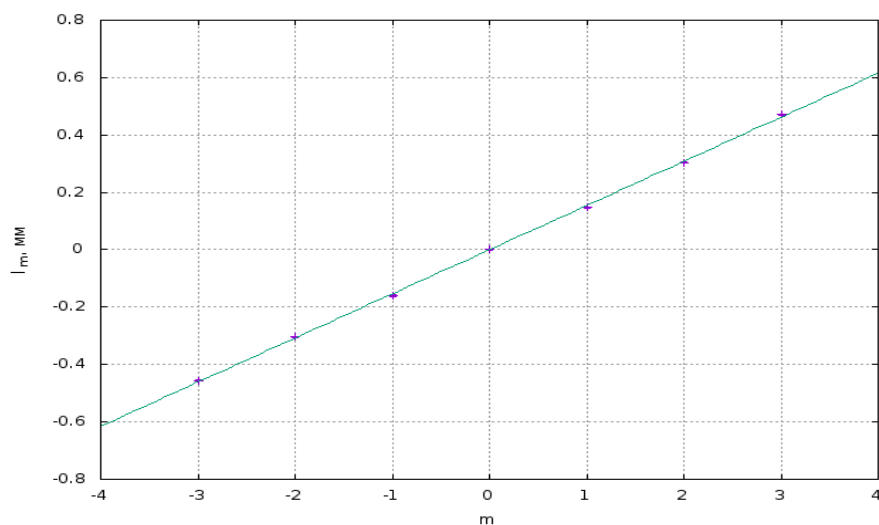


Рис. 5: График зависимости l_m от m при $\nu = 1.136$ МГц

Найденные с помощью МНК коэффициенты наклона β

ν , МГц	β , мм	Δ_β , мм	σ_β , %
1.221	0.1627	0.0009	0.6
1.355	0.1840	0.003	1.6
1.136	0.1539	0.0012	0.8

Рассчитанные длины УЗ-волн для каждой из частот

ν , МГц	Λ , мм	Δ_Λ , мм	σ_Λ , %	v , м / с	Δ_v , м / с
1.221	1.18	0.04	3.4	1441	49
1.355	1.04	0.04	3.8	1414	54
1.136	1.24	0.04	3.2	1417	45

В результате получившаяся скорость распространения ультразвуковой волны в воде

$$v_{\text{уз}} = (1420 \pm 30) \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Применение метода тёмного поля

Калибровка окулярной шкалы микроскопа

Принимая за a — число делений миллиметровой пластинки, b — число делений окулярной шкалы микроскопа, а за δ_y — цену деления окулярной шкалы, получим

a , дел	b , дел
13	170

А следовательно, $\delta_y = 76$ мкм.

Определение длины и скорости распространения ультразвуковой волны методом тёмного поля Принимая за s — расстояние между самыми дальними их хорошо видимых в поле зрения тёмных полос, а за N — число промежутков между ними, получим

ν , МГц	s , дел	N	Λ , мм	Δ_Λ , мм	σ_Λ , %	v , м / с	Δ_v , м / с
1.187	162	20	1.231	0.008	0.6	1461	9
1.292	145	19	1.160	0.008	0.7	1498	9
1.437	150	22	1.036	0.007	0.7	1489	10

В результате получившаяся скорость распространения ультразвука в воде, найденная с помощью метода тёмного поля

$$v_{\text{уз}} = (1483 \pm 5) \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Выводы

В ходе работы нам удалось пронаблюдать явление дифракции световой волны на акустической решётке, создаваемой ультразвуковой волной в воде. Также мы наблюдали непосредственно саму фазовую решётку, используя для этого метод тёмного поля. Как в ходе наблюдения дифракции, так и в ходе наблюдения акустической решётки с помощью метода тёмного поля нами были получены длина ультразвуковой волны при различных частотах, а также скорость распространения ультразвуковой волны в воде. Приведём повторно полученные результаты

$$v_{\text{зв. дифр}} = (1420 \pm 30) \frac{\text{м}}{\text{с}}$$
$$v_{\text{зв. т. поле}} = (1483 \pm 5) \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Полученные результаты согласуются с известным табличным значением для скорости распространения ультразвуковой волны в воде

$$v_{\text{табл}} = 1481 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$