

Лабораторная работа 4.3.2А: Дифракция света на ультразвуковой волне в жидкости

М.Шлапак

Изучено явление дифракции света на синусоидальной акустической решётке, проведено наблюдение фазовой решётки методом тёмного поля.

Ключевые слова: дифракция света, синусоидальная решётка, фазовая решётка, метод тёмного поля, скорость ультразвука

1. Введение

В данной работе опытным путём была измерена скорость ультразвука в воде путём измерений на акустической решетке, попутно был освоен метод тёмного поля - один из методов, помогающих в визуализации фазового объекта.

2. Теоретические основы

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:

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

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

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

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

, где 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. Зная положение дифракционных максимумов, по формуле (3) 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:

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

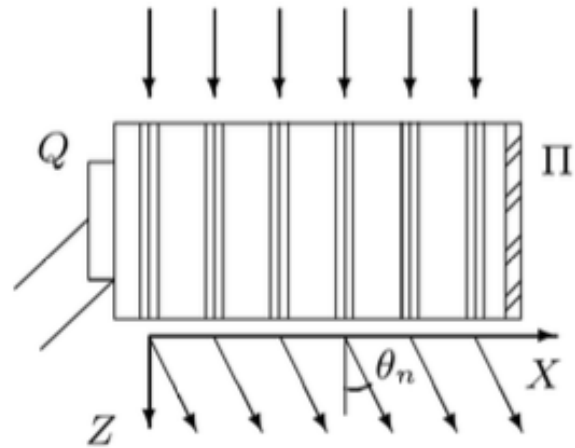


рис. 1. Дифракция световых волн на акустической решетке

3. Экспериментальная установка

(а) Схема наблюдения дифракции на акустической решётке



рис.2 Экспериментальная установка

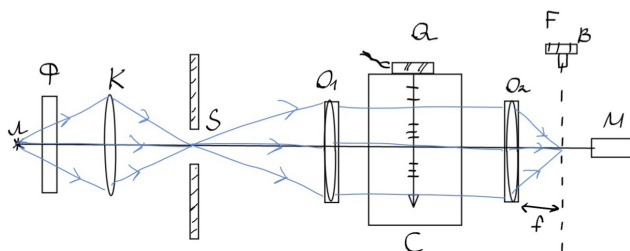


рис.3 Наблюдение дифракции на акустической решётке

(b) Наблюдение акустической решетки методом тёмного поля

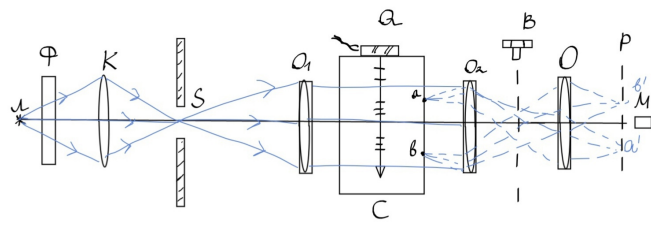


рис.4 Наблюдение акустической решётки методом тёмного поля

Л - источник света, Ф - светофильтр, К - конденсор, О1 и О2 - объективы, С - кювета, М - микроскоп, О - вспомогательная положительная линза

4. Результаты эксперимента

Запишем начальные данные: $f = 30 \text{ см}$, $\lambda = 605 \text{ нм}$

(a) Определение скорости ультразвука по дифракционной картине

1) После сборки установки и яркого освещения щели с помощью конденсора получим в поле зрения микроскопа систему дифракционных полос.

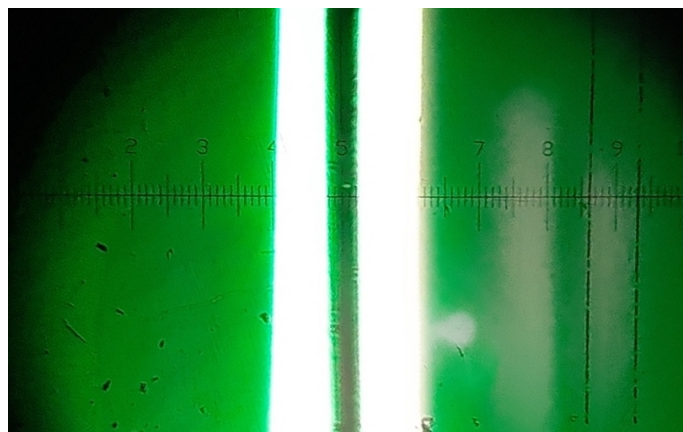


рис.5 Дифракционные полосы для зелёного светофильтра

2) Заменим широкополосный зелёный фильтр красным и измерим положения x_m дифракционных максимумов с помощью микрометрического винта для трёх частот.

2.1)

m	-2	-1	0	1	2
x_m , мкм	1980	1840	1720	1580	1440

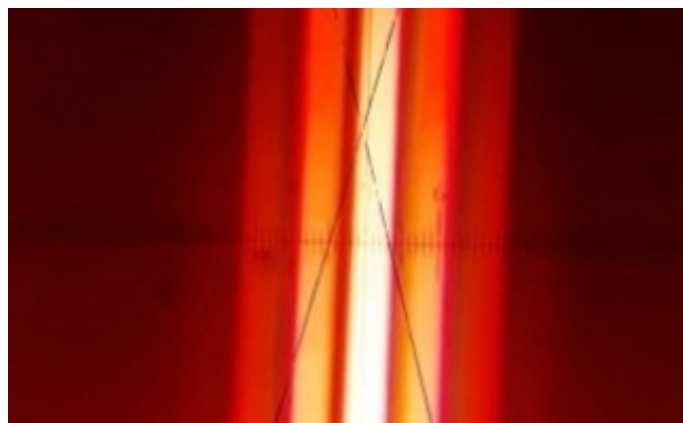


рис.6 Дифракционная картинка на частоте $\nu = 1,115 \text{ МГц}$

2.2)

m	-1	0	1
x_m , мкм	1900	1720	1540

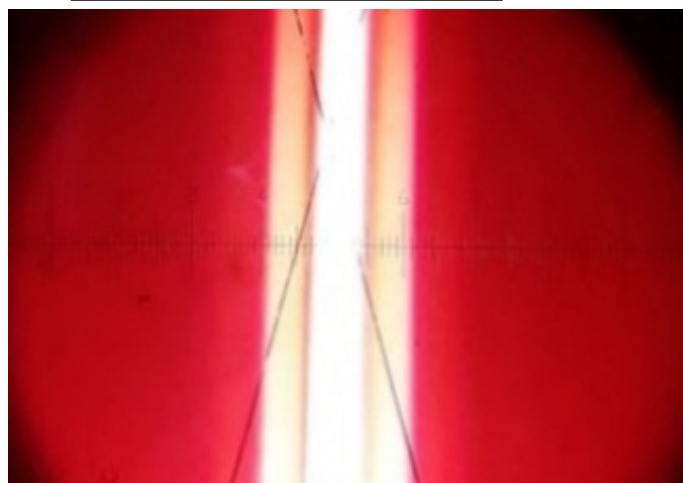


рис.7 Дифракционная картинка на частоте $\nu = 1,477 \text{ МГц}$

2.3)

m	-1	0	1
x_m , МКМ	1980	1720	1460

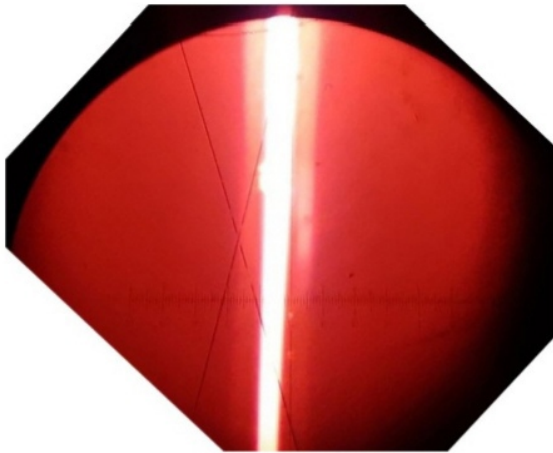


рис.8 Дифракционная картинка на частоте $\nu = 2,106 \text{ МГц}$

3) Для каждой из трёх частот построим график зависимости координаты x_m от порядка m и по наклону прямой определим расстояние между соседними полосами:

$$\frac{l_m}{m} = \frac{\Delta x_m}{\Delta m} = \text{tg } \alpha$$

Рассчитаем длину Λ УЗ-волны по формуле (4), а скорость ультразвука по формуле (5). Результаты занесём в таблицу:

ν , МГц	1,115	1,477	2,106
$\text{tg } \alpha$, МКМ	134	180	260
$\sigma_{\text{tg } \alpha}$, МКМ	10	10	10
Λ , мм	1,35	1,01	0,70
σ_Λ , мм	0,07	0,05	0,03
v , м/с	1510	1489	1470
σ_v , м/с	76	75	74

4) Таким образом, скорость ультразвука в воде по результатам экспериментов получилась:

$$v_{\text{exp}} \approx (1490 \pm 110) \text{ м/с}$$

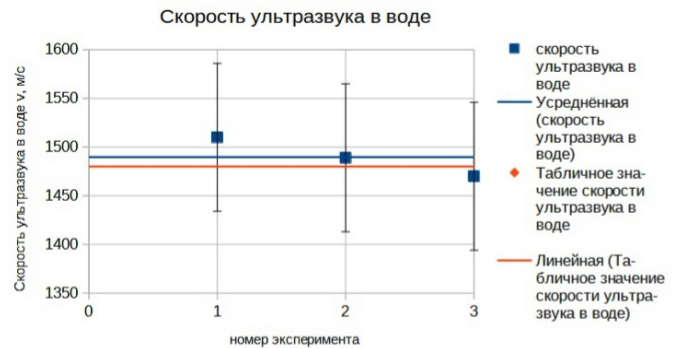


рис.10 Результаты эксперимента и среднее экспериментальное значение скорости ультразвука в воде

(b) **Определение скорости ультразвука методом тёмного поля**

5) Соберем схему, изображенную на рисунке 4. Найдём цену деления шкалы микроскопа для последующих измерений: $\delta = 0,048 \text{ мм}$. После закрытия нулевого максимума остаточное поле:

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

Картина интенсивности:

$$I(x) = m^2 \cos^2 \Omega x \quad (7)$$



рис.9 Зависимость координаты максимума от порядка для различных частот

6) После закрытия проволокой центрального максимума определяем координаты первой x_1 и последней x_2 хорошо видимых полос и количество светлых промежутков между ними n . Картины наблюдения получились только при частотах

$$\nu_1 = 0,819 \text{ МГц} \quad \nu_2 = 1,052 \text{ МГц}$$

Определим для этих данных скорость звука и длину волны:

ν , МГц	x_1 , мм	σ_{x_1} , мм	x_2 , мм	σ_{x_2} , мм	n
1,052	0,029	0,05	1,651	0,05	10
0,819	0,038	0,05	1,699	0,05	13

С помощью формул (4) и (5) определим скорость ультразвука в воде методом тёмного поля:

ν , МГц	l_m , мм	Λ , мм	v , м/с	σ_v , м/с
1,052	0,16	1,1	1190	370
0,819	0,13	1,4	1140	440

Таким образом, скорость ультразвука в воде, измеренная с помощью метода темного поля, получилась:

$$v_{exp} \approx (1160 \pm 440) \text{ м/с}$$

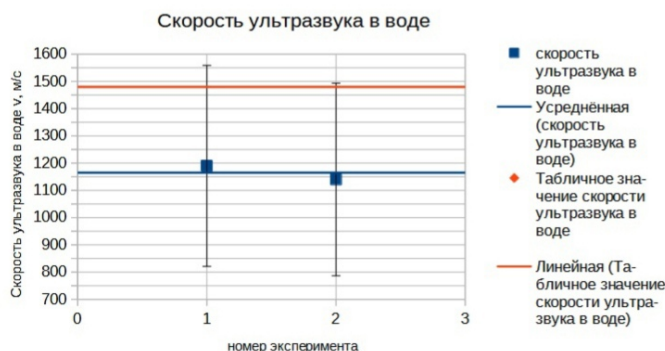


рис.11 Результаты эксперимента по методу тёмного поля

5. Заключение

В данной работе было изучено явление дифракции света на синусоидальной акустической решётке, а также наблюдалась фазовая решётка с помощью метода тёмного поля. Для двух экспериментов была вычислена скорость ультразвука в воде. Экспериментальные значения сходятся с теоретическими в пределах погрешности.

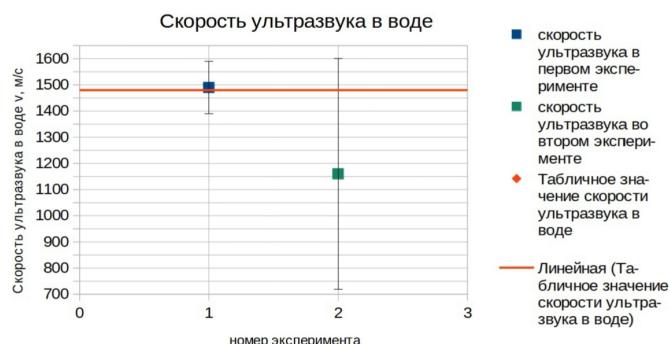


рис.12 Значения скорости ультразвука в воде для двух опытов

1. Общий курс физики. Оптика, Д.В.Сивухин
2. Лабораторный практикум по общей физике. Оптика, А.В. Максимычев