

4.3.2(5.14А). ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНЕ В ЖИДКОСТИ

А. Установка с вертикальной щелью

6-VI-2017 г.

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ

В работе используются: оптическая скамья, осветитель, светофильтры, конденсор, щель, два длиннофокусных объектива, кювета с водой, кварцевый излучатель с микрометрическим винтом, генератор УЗ-частоты, частотомер, линза, отсчётное устройство, микроскоп.

Экспериментальная установка для наблюдения дифракции света на УЗ-волнах изображена на рис. 2.

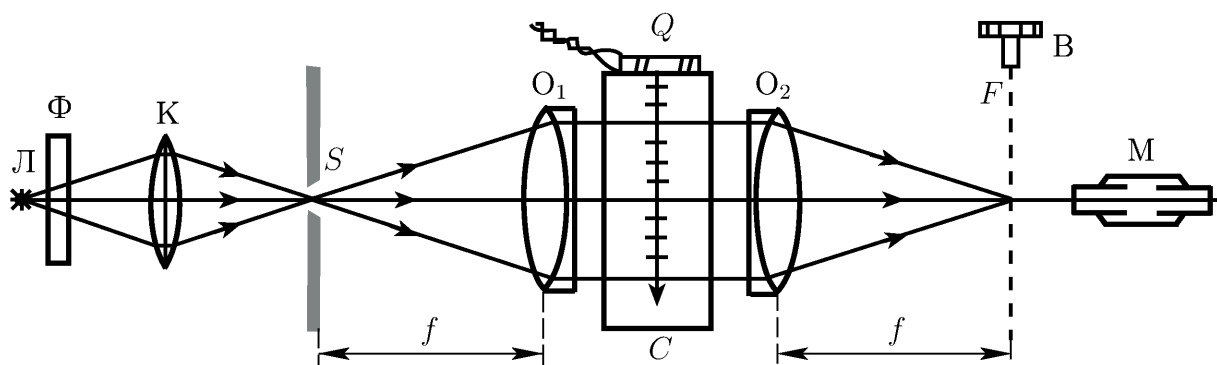


Рис. 2. Схема наблюдения дифракции на акустической решётке

Источник света Л через светофильтр Ф и конденсор К освещает щель S, которая расположена в фокусе объектива O_1 . Выходящий из объектива параллельный пучок света проходит через кювету C перпендикулярно направлению распространения УЗ-волн. Эти волны возбуждаются в жидкости пьезокварцевой пластинкой Q, прикреплённой к стенке кюветы. На кварцевую пластинку подаётся синусоидальное напряжение ультразвуковой частоты от генератора (на рис. 2 не показан). В результате взаимодействия света с ультразвуковой волной в фокальной плоскости второго объектива O_2 образуется дифракционная картина, наблюдаемая при помощи микроскопа М. При этом обязательно применяют монохроматическое излучение (красный светофильтр).

Дифракционные полосы ориентированы вертикально. Расстояние между ними можно измерить с помощью специального отсчётного устройства с микрометрическим винтом В. Этот винт передвигает размещённые на стекле отсчётного устройства (рис. 6) тонкую реперную линию Рл, перекрестие П и толстую проволоку Пр, которая используется в методе тёмного поля. Все измерительные линии должны быть расположены в плоскости F резкого изображения щели.

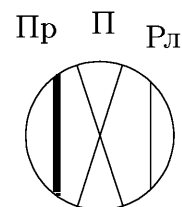


Рис. 6. Проволока Пр, перекрестие П и реперная линия Рл на стекле отсчётного устройства

Чёткость дифракционных полос зависит от ряда факторов, например, от ширины щели S , от её наклона по отношению к вертикали, от угла наклона кюветы к падающему лучу и т. д.

Длина Λ ультразвуковой волны определяется по формуле

$$\Lambda \sin \Theta_m = m\lambda; \quad (4)$$

в силу малости углов Θ_m окончательное выражение может быть представлено в виде

$$l_m = mf \frac{\lambda}{\Lambda}. \quad (6)$$

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

Скорость v распространения звука в воде можно рассчитать, если известна частота ν кварцевого излучателя:

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

Наблюдение оптических неоднородностей, создаваемых ультразвуковыми волнами в жидкости методом тёмного поля. Попробуем теперь получить видимое изображение фазовой акустической решётки. Для этого прежде всего необходимо получить в поле зрения микроскопа изображение задней плоскости (считая по ходу световых лучей) кюветы. Это достигается с помощью вспомогательной положительной линзы O , которую располагают на оптической скамье за фокальной плоскостью объектива O_2 (рис. 3).

Перемещая микроскоп вдоль оптической скамьи, фокусируют его на плоскость P , где расположено чёткое изображение $a'b'$ какого-либо предмета ab , вплотную прижатого к стенке кюветы. Можно ли теперь увидеть в микроскоп акустическую решётку — УЗ-волну? Ясно, что чисто фазовая решётка является невидимой, если, конечно, выполнено условие (3): $m \ll \frac{\Lambda}{L} \sqrt{\frac{\lambda}{L}}$.

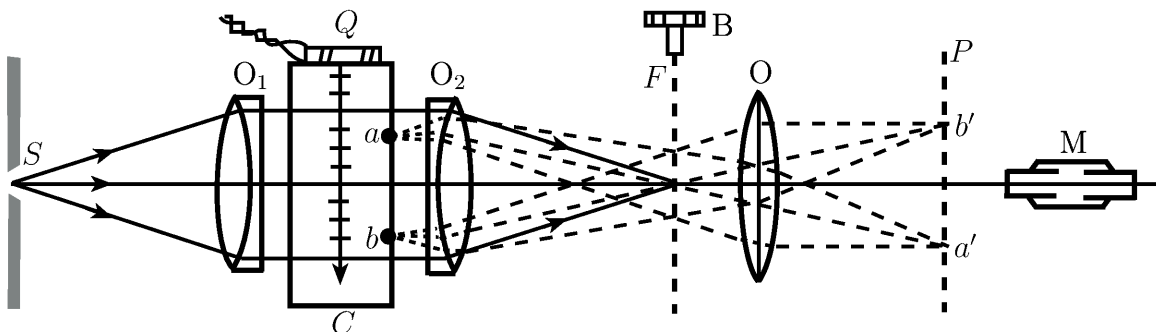


Рис. 3. Наблюдение акустической решётки методом тёмного поля

Для наблюдения акустической решётки в работе используется *метод тёмного поля*, основанный на устранении центрального дифракционного максимума с помощью специального экрана (проволочки). В поле зрения

микроскопа наблюдаются чередующиеся светлые и тёмные полосы, причём расстояние между тёмными полосами соответствует смещению в плоскости кюветы на $\Lambda/2$. Таким образом, наблюдается характерное для метода тёмного поля удвоение числа деталей рассматриваемой структуры.

Этот опыт можно проводить только со стоячими волнами, т.к. в случае бегущей волны визуальное наблюдение оказывается невозможным: глаз не успевает следить за быстро перемещающейся волной.

ЗАДАНИЕ

В работе предлагается измерить координаты дифракционных полос, образующихся при дифракции света на акустической решётке, а также определить период этой решётки методом тёмного поля. По результатам измерений рассчитывается скорость ультразвука в воде. Все измерения ведутся на стоячей волне.

I. Определение скорости ультразвука по дифракционной картине

1. Соберите схему согласно рис. 2. Для получения параллельного пучка щель S должна быть установлена на фокусном расстоянии от главной плоскости объектива O_1 (положение главной плоскости и фокусное расстояние объектива указаны на установке). Объективы O_1 и O_2 одинаковы ($f = 30$ см), поэтому ход лучей в правильно настроенной системе должен быть симметричным.
2. Ярко осветите щель с помощью конденсора. Предварительную настройку можно вести с зелёным фильтром.

Убедитесь, что световое пятно на щели равномерно освещено. Затем с помощью листа бумаги найдите резкое изображение щели S в фокальной плоскости F объектива O_2 . В случае необходимости отцентрируйте источник света и конденсор (см. Техническое описание — ТО, пп. 1 и 2).

Настройте микроскоп и отсчётное устройство (см. пп. 3–4 ТО).

3. Получите в поле зрения микроскопа систему дифракционных полос (см. п. 5 ТО). Картина видна наиболее чётко, когда в кювете образуется стоячая УЗ-волна.
4. Замените широкополосный зелёный фильтр красным. Изменяя ширину щели S , её наклон и положение конденсора, добейтесь оптимальных условий наблюдения дифракционных полос.
5. Проследите, как изменяется число дифракционных полос при изменении мощности ультразвука.
6. Снова получите чёткую дифракционную картину. Перемещая излучатель с помощью микрометрического винта, оцените на месте длину УЗ-волны как удвоенное расстояние между наиболее чёткими дифракционными картинками.

Определите рабочую частоту по показаниям частотомера. По результатам измерений оцените на месте скорость звука в воде, используя формулу (5).

7. Для выбранной частоты определите положения x_m шести-восьми дифракционных максимумов с помощью микрометрического винта отсчётного устройства (по перекрестию).

Не следует использовать для этих измерений окулярную шкалу микроскопа, т.к. цена деления её неизвестна, а калибровка шкалы с помощью винта поперечного перемещения микроскопа даёт большую погрешность.

Определите рабочую частоту.

8. Повторите измерения п. 7 для четырёх–пяти частот в интервале от одного до семи–восьми МГц. Отключите сигнал генератора, не выключая его из сети.
9. Запишите фокусное расстояние объектива O_2 и полосу пропускания светового фильтра, указанные на установке.
10. Для каждой частоты постройте график зависимости координаты x_m от порядка m и по наклону прямой определите расстояние между соседними полосами $l_m/m = \Delta x_m / \Delta m$. Рассчитайте длину Λ УЗ-волны по формуле (6).
11. Рассчитайте скорость ультразвука в воде по формуле (5). Оцените погрешность эксперимента и сравните результат с теоретическим.

II. Определение скорости ультразвука методом тёмного поля

12. Для перехода к методу тёмного поля (рис. 3), не смещая микроскоп, введите микрометрическим винтом в поле зрения микроскопа вертикальную нить (проволочку): резкое изображение нити должно совпадать с резким изображением щели. Запишите соответствующие показания винта, это облегчит вам подготовку к выполнению следующего упражнения.

Не меняя положения отсчётного устройства, отодвиньте микроскоп и поставьте дополнительную линзу сразу за отсчётным устройством.

13. Опустите в воду пластинку с миллиметровыми делениями и прижмите её к задней (по ходу луча) стенке кюветы.

Откройте пошире входную щель. С помощью листа бумаги найдите плоскость, в которой располагается резкое изображение линейки, созданное двумя линзами. Передвигая микроскоп, сфокусируйте его на изображение линейки.

14. Определите цену деления окулярной шкалы в условиях опыта. Для этого совместите самые дальние из хорошо видимых в поле зрения миллиметровых делений пластинки с делениями окулярной шкалы и запишите количество тех и других делений¹.

Проведённая калибровка соответствует определённому положению микроскопа, поэтому не следует перемещать микроскоп вдоль скамьи до конца эксперимента.

15. Уберите пластинку из кюветы и уменьшите ширину входной щели. Включите генератор и попытайтесь увидеть звуковую решётку. Если решётка видна без применения метода тёмного поля (при открытом нулевом максимуме), значит она не чисто фазовая, а сложная амплитудно-фазовая. В этом случае приведённая выше теория плохо применима. Уменьшая мощность излучателя, добейтесь исчезновения видимого изображения решётки в поле зрения микроскопа.

¹ Вместо калибровки окулярной шкалы можно найти соответствие между делениями поперечного микрометрического винта и линейки в кювете.

16. Закройте центральный дифракционный максимум вертикальной нитью. Удобно устанавливать нить в отсутствие УЗ-сигнала. В этом случае нет никаких максимумов, кроме нулевого (изображения щели), так что правильно установленная нить должна полностью затемнять поле зрения (отсюда название *метод тёмного поля*).
17. Включите генератор и найдите изображение акустической решётки.
18. Определите длину УЗ-волны в воде. Для этого с помощью окулярной шкалы измерьте расстояние между самыми дальними из хорошо видимых в поле зрения тёмных (или светлых) полос и просчитайте число промежутков между ними.

Определите частоту с помощью частотомера.

Проведите измерения для трёх–четырёх частот.
19. В заключение работы сделайте качественные эксперименты.

Перемещая проволоку, закрывайте последовательно максимумы первого, второго и т.д. порядков. Как изменяется картина звукового поля? Объясните явление.

Убрав проволоку из поля зрения, постепенно отодвигайте микроскоп от линзы, пока не увидите изображение звуковой решётки. Объясните явление.
20. Рассчитайте длину УЗ-волны Λ с учётом удвоения числа деталей, наблюдаемых методом тёмного поля. Определите скорость ультразвука в воде и оцените погрешность эксперимента.

НЕКОТОРЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ТЕРМИНЫ

1. ЮСТИРÓВКА (лат. *justus* — правильный) — настройка системы: центрирование оптических элементов для получения высокого качества изображения.

2. ЁРИСОВАЯ (греч. *iris* — радуга) диафрагма — приспособление для регулирования освещённости объекта; состоит из заходящих друг за друга тонких серповидных пластинок, образующих круглое отверстие. (Сравните <ирис> в медицине — радужная оболочка глаза.)

3. КОНДЁНСОР (лат. *condensare* — сгущать) — линза или система линз, используемая для освещения объекта. (Сравните <конденсатор> в электричестве — накопитель зарядов.)

4. КОЛЛИМА́ТОР (*collimare* — искажённое лат. *collineare* — направлять по прямой линии) — оптическое устройство для получения пучка параллельных лучей. (Сравните <коллинеарный> в математике.)

5. КА́МЕРА (лат. *camera* — свод, комната) — часть прибора, где получается изображение. (Иногда так называют весь прибор: <кино-, фотокамера>.)

6. ТА́УТОХРОНИ́ЗМ (лат. *tautos* — тот же самый, *chronos* — время) — свойство линз, заключающееся в том, что все лучи, выходящие из одной точки-предмета, после прохождения линзы придут в точку-изображение за одно время, т.е. линза не вносит дополнительной разности фаз между лучами, проходящими через разные участки линзы.

6-VI-2017 г.