

Санкт-Петербургский государственный университет

**ФАЗОВАЯ И ГРУППОВАЯ СКОРОСТЬ УЛЬТРАЗВУКА  
В ЖИДКОСТИ.  
ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА УЛЬТРАЗВУКЕ**

**Описание лабораторной работы № 21  
ПРОБНАЯ ВЕРСИЯ**

Разработчики описания: А.С. Губарев,  
Ю.С. Манучаров

Санкт-Петербург

2014

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
1. Некоторые теоретические вопросы физики ультразвука .....	4
1.1. Параметры акустической волны .....	4
1.2. Фазовая и групповая скорость ультразвука .....	6
1.3. Сложение акустических колебаний .....	8
1.4. Дифракция света на ультразвуке .....	10
1.5. Излучатели и приёмники ультразвуковых колебаний .....	13
2. Методика проведения эксперимента .....	15
2.1. Описание экспериментальной установки .....	15
2.1.1. Измерение фазовой и групповой скоростей ультразвука .....	15
2.1.2. Дифракция света на ультразвуке .....	16
2.2. Постановка эксперимента. Методика и техника измерений .....	17
2.2.1. Измерение фазовой скорости .....	17
2.2.2. Измерение групповой скорости .....	19
3. Техника безопасности по работе с приборами .....	21
4. Порядок выполнения лабораторной работы .....	22
4.1. Измерение фазовой скорости ультразвука .....	22
4.1.1. Сборка и настройка установки .....	22
4.1.2. Измерения скорости ультразвука прямым фазовым методом .....	24
4.1.3. Измерения скорости ультразвука частотно-фазовым методом .....	24
4.1.4. Измерения скорости ультразвука интерференционным методом .....	24
4.2. Измерение групповой скорости ультразвука .....	25
4.3. Дифракция света на ультразвуке .....	26
5. Обработка результатов эксперимента, требования, предъявляемые к отчёту .....	29
6. Контрольные вопросы .....	30
Список рекомендуемой литературы и справочные данные .....	31

## Введение

Под ультразвуком понимаются различные упругие волны с частотой, лежащей выше предела слышимости человеческого уха, т.е. выше 15 – 16 кГц. Современная ультразвуковая техника позволяет генерировать и детектировать ультразвуковые колебания с частотами до 10 – 100 ГГц, т.е. до частот, приближающихся к диапазону частот инфракрасного света. При столь высоких частотах длины ультразвуковых волн (называемых в диапазоне выше 1 ГГц гиперзвуковыми) становятся сравнимыми с межмолекулярными расстояниями. Но уже и при более низких частотах распространение ультразвуковых волн в различных средах становится чувствительным к особенностям строения вещества на молекулярном, атомном, электронном и даже ядерном уровнях. В связи с этим ультразвуковые методы оказались весьма информативным средством для изучения структуры веществ и различных происходящих в них физических процессов [1].

Результаты исследований процессов, происходящих в ультразвуковых полях в тех или иных средах, образуют обширную область знаний, которую обобщённо называют «физической акустикой» или «физической ультраакустикой». При этом внутри физической ультраакустики сформировались довольно крупные самостоятельные разделы, такие как молекулярная акустика, квантовая акустика, акустоэлектроника, акустооптика и др.

Настоящая лабораторная работа знакомит учащихся с некоторыми методами измерения одной из основных акустических характеристик веществ – скорости ультразвука, а также с явлениями, связанными с взаимодействием ультразвука со светом.

# 1. Некоторые теоретические вопросы физики ультразвука

## 1.1. Параметры акустической волны

Для того, чтобы могли возникнуть акустические колебания необходимо существование силы, возвращающей систему в положение равновесия – силы упругости. В газах и жидкостях существуют силы упругости только по отношению к объёмной деформации, в твёрдых телах – также и по отношению к деформации сдвига, т.е. могут существовать сдвиговые (поперечные) волны. В настоящей работе рассматривается распространение упругих волн в жидкостях, т.е. продольных акустических волн.

Продольную акустическую волну можно охарактеризовать различными параметрами:

- смещение частиц среды от положения равновесия –  $A$ ;
- колебательная скорость частиц среды –  $v$ ;
- переменное акустическое давление –  $p$ .

Рассмотрим бегущую монохроматическую волну; для неё зависимость всех акустических параметров от координат и времени имеет один и тот же вид и выражается гармонической функцией. В частности, для смещения можно записать

$$A = A_0 \cos(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t + \varphi). \quad (1.1)$$

Аргумент косинуса называется фазой волны, вектор  $\mathbf{k}$  – волновым вектором. Амплитуда  $A$  и начальная фаза  $\varphi$  монохроматической волны не зависят от  $r$  и  $t$ , т.е. одинаковы во всём пространстве во все моменты времени.

На ультразвуковых частотах можно создать волну, для которой все характеризующие её величины являются функциями времени и только одной координаты, например,  $x$ , если ось  $x$  совпадает с направлением распространения волны. Для такой волны уравнение поверхности постоянной фазы (или волновой поверхности)  $kx - \omega t = \text{const}$  определяет в пространстве плоскость, перпендикулярную направлению распространения волны (поэтому такие волны называются *плоскими*). Эта плоскость перемещается в пространстве вдоль направления  $x$  со скоростью

$$c = \omega/k, \quad (1.2)$$

где  $k$  – модуль волнового вектора, называемый *волновым числом*. Скорость перемещения поверхности постоянной фазы в пространстве называется *фазовой скоростью волны*. Период изменения смещения частиц в пространстве – это *длина волны*  $\lambda$ :

$$\lambda = 2\pi/k = 2\pi c/\omega = cT = c/f, \quad (1.3)$$

т.е. длина волны представляет собой то расстояние, на которое перемещается плоскость постоянной фазы за время, равное одному *периоду колебаний*  $T = 2\pi/\omega$ .

Рассмотрим связь между параметрами акустической волны. Колебательная скорость частиц среды – это производная смещения по времени. В монохроматической волне:

$$v = dA/dt = \omega A. \quad (1.4)$$

Переменное звуковое давление в волне связано с колебательной скоростью через параметр среды, в которой происходит распространение волн, называемый акустическим импедансом, который является, в общем случае, комплексной величиной  $p = \check{Z}v$ . В простейшем случае излучения в бесконечную среду, т.е. без учёта отражённых волн, акустический импеданс является действительной величиной  $Z = \rho c$ , где  $\rho$  – плотность среды. В этом случае:

$$p = \rho c v. \quad (1.5)$$

Энергетической характеристикой звука является интенсивность  $I_{зв}$  (измеряется в Вт/м²):

$$I_{зв} = \frac{1}{2} p v = \frac{1}{2} v^2 \rho c = \frac{1}{2} p^2 / \rho c. \quad (1.6)$$

Для того, чтобы оценить порядки величин акустических параметров, проведём оценку их значений на частоте, входящей в диапазон частот слышимости ухом человека (20 Гц – 18 кГц). Существует понятие «порог слышимости» – минимальный уровень звука, воспринимаемый человеческим ухом (усреднённое значение). На частоте, соответствующей максимальной чувствительности уха (1 кГц), он составляет по звуковому давлению 20 мкПа. Расчёт по формулам (1.4) – (1.6) (для воздуха  $\rho \approx 1$  кг/м³,  $c = 330$  м/с) даёт для амплитуды сме-

щения значение  $A_0 = 0,1 \text{ \AA}$ , что в десятки раз меньше размеров атомов. В твёрдых телах на мегагерцовых частотах удаётся даже измерять амплитуды смещения, равные размеру нуклонов (протона и нейтрона).

Скорость звука определяется модулем упругости вещества  $K$ :

$$c = \sqrt{K/\rho}. \quad (1.7)$$

Распространение акустических колебаний представляет собой адиабатический процесс [2], поэтому величина  $K$  является адиабатическим модулем упругости. Поскольку модуль упругости связывает два тензора второго ранга – тензор упругого напряжения  $\sigma_{ik}$  и тензор деформации  $\varepsilon_{jl}$ , он является в общем случае (в анизотропных телах) тензором 4-го ранга –  $K_{ikjl}$

$$\sigma_{ik} = K_{ikjl} \varepsilon_{jl}.$$

Таким образом, в анизотропных телах (например, в кристаллах) значение скорости звука зависит от направления; в частности, измерения скорости ультразвука, дают возможность с большой точностью измерять модули упругости кристаллов.

В жидкостях модуль упругости является скалярной величиной, и скорость звука не зависит от направления.

## 1.2. Фазовая и групповая скорость ультразвука

Фазовая скорость для данного вещества в общем случае не является константой, в том или ином диапазоне частот она зависит от частоты. Зависимость фазовой скорости от частоты (или длины волны) называется дисперсией.

Первоначально понятие скорости возникло в механике для описания движения частицы (материальной точки). В волновом движении происходит перенос состояния (т.е. значений поля) из одного места в другое. В общем случае понятие скорости здесь неоднозначно. В среде без дисперсии всякое возмущение распространяется без изменения своей формы и введение скорости волнового движения не вызывает затруднений. Но в среде с дисперсией возмущение по мере распространения деформируется, и понятие скорости становится неопределённым. Понятие фазовой скорости, строго говоря, применимо только

к монохроматической волне, бесконечно протяжённой в пространстве и времени.

Бегущую волну любой формы в линейной среде можно рассматривать как интерференционную картину, образованную наложением монохроматических волн разной длины, бегущих со своими фазовыми скоростями (разложение Фурье). В отсутствие дисперсии фазовые скорости компонент одинаковы и вся интерференционная картина, а значит, и профиль волны, движутся, не меняясь, с той же скоростью.

В диспергирующих же средах скорости монохроматических волн разной длины различны, и по мере распространения они «расфазировываются» друг с другом.

Если, однако, волна квазимонохроматическая (т.е. в её спектре представлен с заметной интенсивностью только узкий диапазон  $\Delta k$  волновых чисел), то она изображается гармонической функцией с плавно меняющимися амплитудой и фазой (рис. 1.1) и в этом случае имеется элемент интерференционной картины, мало меняющийся при распространении: это – огибающая профиля волны.

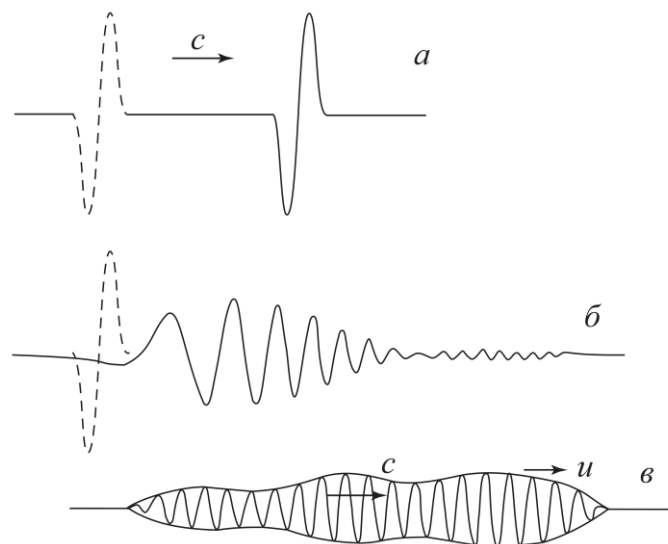


Рис. 1.1. а – волна, распространяющаяся без искажения формы; б – волна, меняющая форму при распространении; пунктир – профиль волны в начальный момент, сплошная линия – форма волны в некоторый последующий момент времени; в – распространение квазимонохроматической волны:  $c$  – фазовая скорость,  $u$  – групповая скорость (скорость огибающей).

Форма огибающей определяется фазовыми соотношениями между компонентами волны. Разность фаз между какими-нибудь компонентами  $\cos(\omega_1 t -$

$k_1 x$ ) и  $\cos(\omega_2 t - k_2 x)$  равна  $(\omega_2 - \omega_1)t - (k_2 - k_1)x$ . В момент  $t + \Delta t$  та же разность фаз окажется в точке  $x + [(\omega_2 - \omega_1)/(k_2 - k_1)]\Delta t$ . Таким образом, эта разность фаз перемещается со скоростью  $(\omega_2 - \omega_1)/(k_2 - k_1)$ . Такие же выражения получатся и для разности фаз любых других компонент.

При достаточно узком спектре волны можно приближённо считать все эти величины равными производной  $d\omega/dk$  для некоторой средней частоты (так называемая несущая частота данной квазимонохроматической волны). Следовательно, вся картина фазовых соотношений, а значит, и огибающая движется почти без изменений с этой же скоростью – *групповой скоростью*  $u = d\omega/dk$ . При этом сама волна бежит внутри огибающей с фазовой скоростью  $c = \omega/k$ , соответствующей несущей частоте. Можно показать, что

$$u = c + (dc/dk) = c - \lambda(dc/d\lambda). \quad (1.8)$$

В отсутствие дисперсии групповая скорость равна фазовой скорости волн. В диспергирующих средах групповая скорость может быть как меньше фазовой (например, гравитационные волны на поверхности жидкости,  $u = c/2$ ), так и больше неё (изгибные волны,  $u = 2c$ ). Возможны и нулевая групповая скорость (огибающая стоит на месте) и отрицательная – огибающая движется навстречу перемещению фазы.

### 1.3. Сложение акустических колебаний

В ультразвуке (в отличие от оптики) чаще всего происходит сложение когерентных волн, т.е. волн, имеющих одинаковую частоту и постоянную разность фаз – наблюдается интерференция волн. При этом квадрат амплитуды  $A$  колебаний поля в данной точке не равен сумме квадратов амплитуд складывающихся волн (что, казалось бы, должно следовать из закона сохранения энергии). Например, для двух волн с амплитудами  $A_1$  и  $A_2$

$$A = A_1 + A_2 + 2 A_1 A_2 \cos \varphi. \quad (1.9)$$

Для интерферирующих волн, бегущих в близких направлениях, квадрат амплитуды поля пропорционален плотности энергии волн. Следовательно, при интерференции имеет место нарушение энергетического сложения волн: в разных точках интерференционной картины результирующая плотность энергии



может быть как больше, так и меньше суммы плотностей энергии каждой из составляющих волн в отдельности. Таким образом, при интерференции звука происходит перераспределение акустической энергии в пространстве.

Очень важный случай интерференции наблюдается при наложении двух встречных плоских волн с одинаковой амплитудой. Возникающий в результате колебательный процесс называется стоячей волной. Практически стоячие волны возникают при отражении от преград с коэффициентом отражения близким к единице.

Просуммируем смещение частиц среды двух встречных волн:

$$A_1 = A_0 \cos(\omega t - kx)$$

$$A_2 = A_0 \cos(\omega t + kx)$$

$$A = A_1 + A_2 = 2A_0 \cos kx \cos \omega t = 2A_0 \cos(2\pi x/\lambda) \cos \omega t. \quad (1.10)$$

Или  $A = A^* \cos \omega t$ , где  $A^* = 2A_0 \cos(2\pi x/\lambda)$  – суммарная амплитуда.

Когда суммарная амплитуда равна максимальному значению  $A^* = 2A$  – это *пучности* стоячей волны. Координаты пучностей:  $x = \pm n\lambda/2$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ).

Когда суммарная амплитуда колебаний равна нулю – это *узлы* стоячей волны. Координаты узлов:  $x = \pm (n + 1/2) \lambda/2$ .

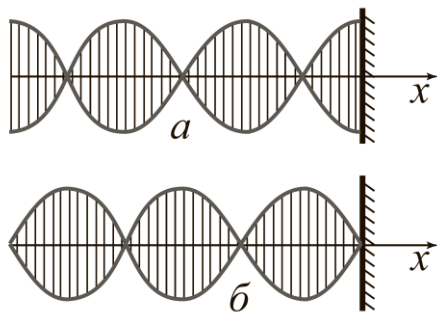


Рис. 1.2. Отражение волны от акустически более плотной(а), менее плотной(б) среды.

Если среда, от которой происходит отражение, акустически более плотная (т.е. имеет больший акустический импеданс), в месте отражения возникает узел смещения (рис. 1.2 а), если менее плотная – пучность смещения (рис. 1.2 б).

Определим расстояние  $\Delta x$  между соседними узлами (пучностями): так как  $k\Delta x = \pi$  имеем:

$\Delta x = \pi/k = \lambda/2$  – расстояние между соседними пучностями, как и соседними узлами, одинаково и составляет половину длины волны. Пучности и узлы сдвинуты друг относительно друга на четверть длины волны.

## 1.4. Дифракция света на ультразвуке

Дебай и Сирс и независимо от них Люка и Бикар обнаружили в 1932 г. дифракцию света на ультразвуковых волнах в жидкости. Это открытие привело к развитию большого количества новых методов исследования ультразвуковых явлений и положило начало *акустооптике* – области физики, изучающей взаимодействие электромагнитных волн со звуковыми волнами и, одновременно, области техники, в которой создаются приборы на основе этих явлений.

Явления дифракции света на ультразвуковых волнах можно объяснить следующим образом. Бегущая ультразвуковая волна представляет собой следующие друг за другом зоны сжатия и разрежения. Таким образом, мы имеем дело со средой, плотность которой, меняется периодически (с периодом  $\lambda$ ) в направлении распространения звуковой волны. Вместе с плотностью изменяется и показатель преломления; их связь для изотропных тел даётся формулой Лоренца-Лоренца:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} = R\rho,$$

где  $R$  – удельная рефракция – величина практически постоянная, которая слабо зависит от агрегатного состояния вещества и температуры. В ультразвуковых волнах, применяемых для измерений, относительные отклонения плотности от среднего значения  $\Delta\rho/\rho$  не превышают  $10^{-5}$ ; при столь малых отклонениях показатель преломления линейно зависит от плотности, и, следовательно, периодически изменяется по закону

$$n = n_0(1 + a \cos kx), \quad (1.11)$$

где  $n_0$  – показатель преломления невозмущённой среды; значение коэффициента  $a$  зависит от акустического давления в волне ( $a \ll 1$ ).

Пусть плоская световая волна проходит в направлении оси  $z$  через среду, в которой в направлении оси  $x$  распространяется пучок ультразвуковых волн толщиной  $D$ . Примем начальную фазу световых колебаний (при входе в область распространения ультразвука) равной нулю. Тогда напряжённость электрического поля равна:

$$E_z = E_0 \cos (\Omega t - Kz), \quad (1.12)$$

где  $\Omega$  – частота,  $K$  – волновое число световой волны:  $K = 2\pi/\Lambda$ , где  $\Lambda$  – длина световой волны. Рассмотрим частный случай, когда направление распространения света почти перпендикулярно направлению распространения ультразвука ( $\Theta \ll 1$ ) и, кроме того, выполняется условие низкочастотности ультразвука (так называемая дифракция Рамана-Ната) (рис. 1.3 )

$$(\Lambda D/\lambda^2) \ll 1. \quad (1.13)$$

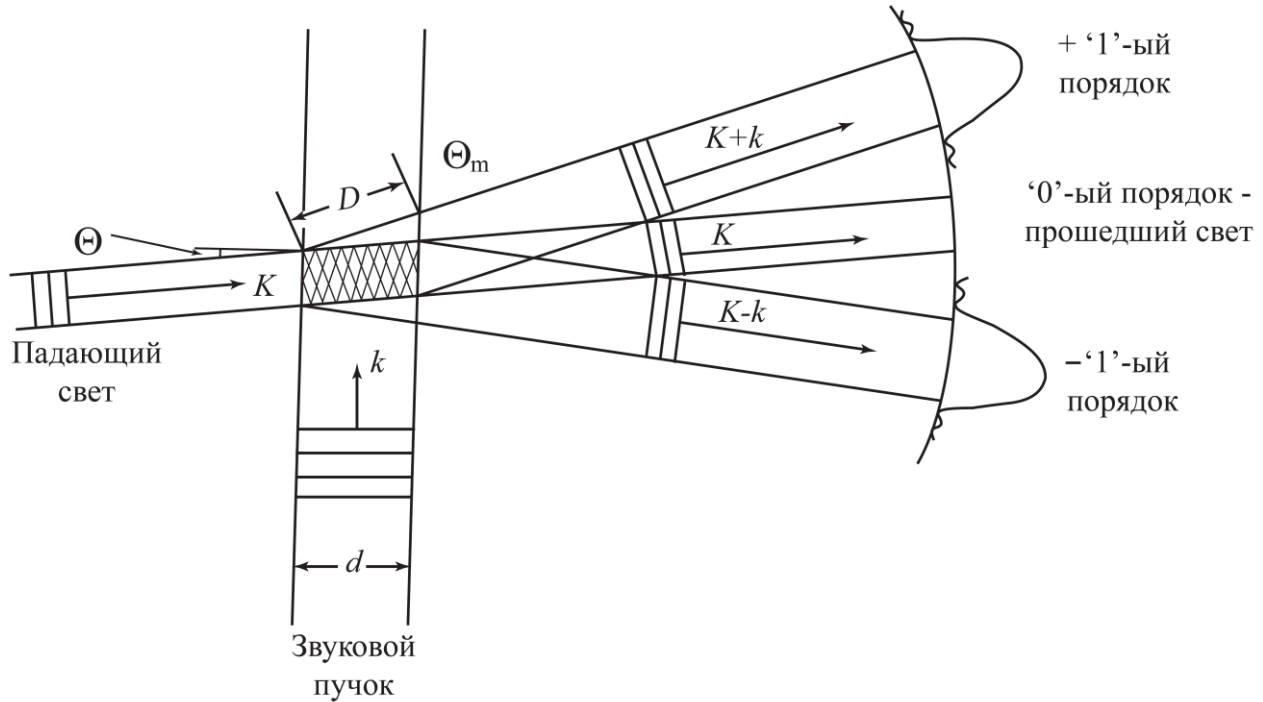


Рис.1.3. Схема дифракции света на ультразвуке.

Пройдя через ультразвуковой пучок оптический путь  $nD$ , световая волна будет иметь вид

$$E_z(x,t) = E_0 \cos(\Omega t - Kz + KnD).$$

Или, подставив показатель преломления из (1.11):

$$E_z(x,t) = E_0 \cos(\Omega t - Kz + \Phi_0 + \Phi_0 a \cos kx). \quad (1.14)$$

Таким образом, фаза световых колебаний после прохождения через ультразвуковой пучок становится периодической функцией координаты  $x$ , другими словами ультразвуковая волна формирует в среде фазовую решётку.

Дифракционная картина, возникающая при прохождении света через фазовую решётку, представляет собой несколько максимумов, направление на которые определяется условием

$$\lambda \sin \Theta_m = m\Lambda, \quad (1.15)$$

где  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Таким образом, возникает аналогия с картиной, наблюдаемой при прохождении света через обычную дифракционную решётку ( $d \sin \Theta_m = m\Lambda$ ), причём роль расстояния между щелями  $d$  играет длина ультразвуковой волны. То обстоятельство, что фазовая решётка движется со скоростью ультразвука  $c$ , не влияет на дифракционную картину, так как скорость ультразвука в конденсированных средах (жидкости и твёрдые тела) в среднем на 5 порядков величины меньше скорости света (в газах на 6 порядков).

Движение фазовой решётки, однако, приводит к тому, что в результате эффекта Доплера возникает сдвиг частоты дифрагированного света  $\Omega_m = \Omega_0 \pm m\omega$ . Частота света, отклонённого в сторону распространения ультразвуковой волны, увеличивается (знак  $+$ ), отклонённого в противоположную сторону — уменьшается. Для частот ультразвука, соответствующих условию (1.13) (обычно это не выше 10 МГц), относительный сдвиг частоты  $(\Omega_m - \Omega_0)/\Omega_0$  не превышает  $10^{-6}$ , но это изменение может быть надёжно измерено с помощью спектральных приборов высокого разрешения (например, интерферометр Фабри-Перо) [3].

Интенсивность излучения света в дифракционный максимум порядка  $m$  определяется формулой:

$$I_m = I_{00} J_m^2(MD\sqrt{I_{зв}}), \quad (1.16)$$

где  $I_{00}$  — интенсивность падающего света,  $J_m$  — функция Бесселя 1-го рода порядка  $m$  (будет изучаться на 3-м курсе), величина  $M$  определяет акустооптические качества материала (например, эффективность применения его в акустооптических устройствах). График зависимости  $J_m$  для  $m = 0, 1, 2, 3$  от  $D$  или от звукового давления  $p \sim \sqrt{I_{зв}}$  (см. (1.6)) представлен на рис. 1.4.

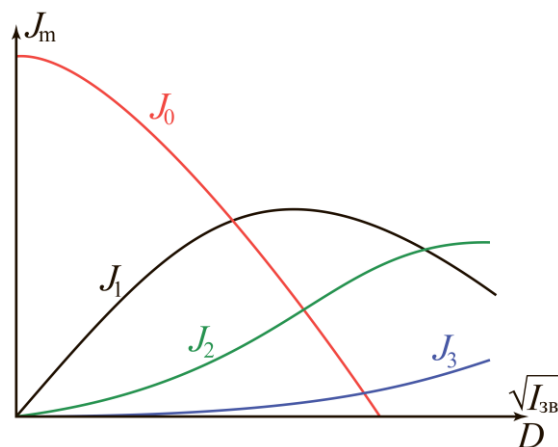


Рис. 1.4. Зависимость интенсивности света, отклонённого в различные порядки при дифракции Рамана-Ната, от длины взаимодействия  $D$  или амплитуды давления в ультразвуковой волне.

При малых интенсивностях звука интенсивность дифрагированного света составляет малую долю от интенсивности падающего. При увеличении  $I_{зв}$  вначале увеличивается интенсивность каждого дифракционного максимума. При дальнейшем увеличении интенсивности ультразвука интенсивность света, отклонённого в различные порядки дифракции, осциллирует, сложным образом распределяясь между различными порядками.

### 1.5. Излучатели и приёмники ультразвуковых колебаний

Для генерации и приёма высокочастотных ультразвуковых волн (с частотами выше 1 МГц) наиболее широко используются преобразователи, основанные на эффекте пьезоэлектричества. Пьезоэлектричество – это возникновение электрической поляризации под действием механических напряжений или возникновение деформации под действием электрического поля в некоторых анизотропных диэлектриках и полупроводниках (как монокристаллических, так и поликристаллических).

Если пьезоэлектрическую пластинку, вырезанную из монокристалла определённым образом, подвергнуть действию механических напряжений (сжатию, растяжению, сдвигу), то на её поверхности появляются электрические заряды, обусловленные поляризацией – это так называемый *прямой пьезоэффект*, а при внесении пластинки в электрическое поле возникает деформация, линейно зависящая от напряжённости поля – *обратный пьезоэффект*.

Механизм прямого пьезоэффекта объясняется возникновением дипольного момента элементарной ячейки кристаллической решётки в результате смещения зарядов под действием механических напряжений.

Обратный пьезоэффект обусловлен тем, что при действии электрического поля на элементарные заряды в ячейке происходит их перемещение и как следствие – изменение средних расстояний между ними, т.е. деформация.

Пьезоэлектрический эффект был открыт в 1880 г. П. и Ж. Кюри, наблюдавшими его у кварца. Сейчас известно более 1500 соединений, обладающих пьезоэлектрическим эффектом.

Необходимое условие существования пьезоэлектрического эффекта – отсутствие у кристалла центра симметрии. Только в этом случае приложение механических напряжений может привести к возникновению не скомпенсированного электрического заряда, т.е. к возникновению поляризации. Например, кристалл кварца  $\text{SiO}_2$ , относящийся к тригональной системе, при повышении температуры до 800 К теряет пьезоэлектрические свойства, так как происходит фазовый переход второго рода в более симметричную гексагональную систему.

Если приложить к пьезоэлектрической пластинке (в дальнейшем пьезоэлемент) переменное электрическое напряжение с частотой  $f$ , то под действием обратного пьезоэффекта она будет колебаться с той же частотой. Опустив пьезоэлемент в жидкость мы получим плоскую ультразвуковую волну. Опустив в жидкость другой такой же пьезоэлемент получаем приёмник ультразвука – под действием прямого пьезоэффекта на пьезоэлементе возникает электрическое напряжение.

## 2. Методика проведения эксперимента

### 2.1. Описание экспериментальной установки

#### 2.1.1. Измерение фазовой и групповой скоростей ультразвука

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.1.

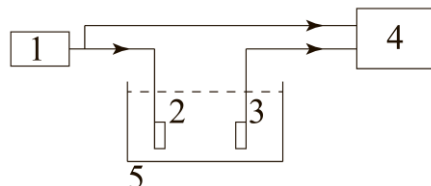


Рис. 2.1. Схема экспериментальной установки: 1 – генератор непрерывных и импульсных сигналов; 2 – пьезоэлектрический излучатель ультразвуковых колебаний; 3 – пьезоэлектрический приёмник ультразвуковых колебаний; 4 – осциллограф; 5 – сосуд с исследуемой жидкостью.

Непрерывный или импульсный электрический сигнал, вырабатываемый генератором 1, поступает на пьезопреобразователь 2, который излучает ультразвуковую волну, форма которой определяется формой сигнала генератора. Ультразвуковые колебания воздействуют на приёмный пьезопреобразователь 3; он преобразует их в электрические колебания, которые подаются на один из входов осциллографа 4.

Одновременно на другой вход подаётся непосредственно сигнал с генератора 1 и развертка осциллографа синхронизируется этим сигналом. При таком включении при перемещении приёмника ультразвука относительно излучателя вдоль соединяющей их оси, синусоидальный сигнал на экране осциллографа также перемещается (если синхронизировать развёртку непосредственно принятым сигналом, сигнал на экране перемещаться не будет).

Генератор 1 в режиме непрерывных колебаний вырабатывает периодические колебания, частоту которых можно изменять в пределах от 3 до 5 МГц. Колебания, вырабатываемые генератором, не гармонические (в этом можно убедиться с помощью осциллографа), но поскольку излучающий и приёмный пьезоэлементы представляют собой колебательную систему (с добротностью  $Q \approx 10$ ) принятый сигнал представляет собой почти синусоиду (искажения синусоидальной формы становятся заметными при частотах, значительно отличающихся от резонансной частоты пьезоэлементов).

Для измерений групповой скорости используется импульсный режим работы генератора. В этом случае запуск горизонтальной развёртки осциллографа, устанавливаемой в ждущем режиме, производится с выхода TRIGGER.

### 2.1.2. Дифракция света на ультразвуке

Выражение (1.14), определяющее направления на главные максимумы дифракции света на ультразвуковой фазовой решётке можно записать в виде:

$$\lambda = m \Lambda / \sin \Theta_m. \quad (2.1)$$

Следовательно, измерив угол  $\Theta_m$  можно определить длину волны ультразвука и, зная его частоту  $f$ , определить скорость ультразвука по формуле (1.3).

При использовании обычных дифракционных решёток измеряется именно угол дифракции (с помощью гониометра). Однако для ультразвуковых решёток такой способ трудно применить, поскольку постоянная решётки (длина волны ультразвука) очень велика. Например, в жидкостях, где скорость ультразвука имеет порядок 1000 м/с, на частоте 5 МГц длина волны составляет 0,2 мм. Оценка угла отклонения по формуле (2.1) даёт  $\Theta_1 = 3 \cdot 10^{-3} \approx 10$  угловых минут, что сравнимо с реальной погрешностью гониометров, используемых в лабораторном практикуме. Поэтому целесообразно применять экспериментальную схему, приведённую на рис. 2.2 (вид сверху).

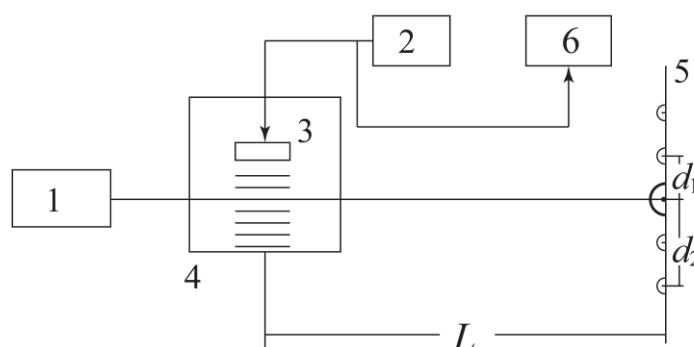


Рис. 2.2. 1 – лазер; 2 – генератор электрических колебаний; 3 – излучатель ультразвука; 4 – сосуд с жидкостью; 5 – экран, 6 – осциллограф,  $L$  – расстояние от ультразвуковой волны до экрана, на котором наблюдается изображение,  $d_m$  – расстояние между центральным максимумом и максимумом  $m$ -го порядка.

Поскольку угол  $\Theta$  очень мал, можно заменить  $\sin \Theta_m$  отношением  $d_m/L$ . Тогда

$$\lambda = m \Lambda L / d_m. \quad (2.2)$$



Таким образом, зная  $L$  и  $\Lambda$  и измерив  $d_m$ , можно получить величину длины волны ультразвука и, зная частоту, рассчитать фазовую скорость ультразвука  $c$  по формуле (1.3).

## 2.2. Постановка эксперимента. Методика и техника измерений

### 2.2.1. Измерение фазовой скорости

Непосредственно в этих экспериментах измеряется длина волны. Наиболее прямой метод заключается в изменении расстояния  $l$  между излучателем и приёмником ультразвука на целое число длин волн  $\Delta l = n\lambda$ . Для этого фиксируют на экране осциллографа положение определённой фазы синусоидального сигнала (например, максимальное значение). Плавно перемещая приёмник отсчитывают число  $n$  максимумов, проходящих через выбранное место на экране, и отсчитывают соответствующее расстояние  $\Delta l$ . Строят зависимость  $\Delta l$  от  $n$  и из наклона прямой вычисляется длина волны. Скорость ультразвука вычисляют, применяя формулу (1.3).

Однако в данной установке эта методика измерений имеет большую погрешность, так как установка не имеет точной системы отсчёта расстояния – погрешность отсчёта достигает 1 мм. Поскольку длина волны в большинстве жидкостей на резонансной частоте пьезоэлементов не превышает 0,3 мм, даже при отсчёте 30-ти положений максимума (т.е.  $n=30$ ), изменение расстояния не превышает 10 мм, то есть  $\Delta l$  определяется с большой погрешностью  $\approx 10\%$ .

Поэтому целесообразно применять другую методику, в которой путём изменения в небольших пределах частоты  $f$  определяется число длин волн, укладывающихся между излучателем и приёмником при различных расстояниях между ними.

Если менять частоту ультразвуковых колебаний при фиксированном расстоянии  $l$  между излучателем и приёмником, то изменится длина волны, а следовательно, и число длин волн между ними. Пусть при частоте  $f_1$  это число равно  $n_1$ . Тогда

$$l = \lambda_1 n_1 = c n_1 \sqrt{f_1}. \quad (2.3)$$

Для частоты, соответствующей изменению  $n$  на  $m$  длин волн  $-f_m$ , можно записать

$$l = \lambda_m n_m = c(n_l + m)/f_m.$$

Сравнивая (9) и (10) получаем:

$$n_l = mf_l/(f_m - f_l). \quad (2.4)$$

Мы нашли число длин волн, укладывающихся между излучателем и приёмником, но, поскольку расстояние между ними неизвестно, скорость звука из этих данных вычислить нельзя. Изменим расстояние  $l$  на  $\Delta l$  и, таким же способом, найдём число длин волн  $n_{l+\Delta l}$ , укладывающихся на расстоянии  $l + \Delta l$ . Таким образом, на расстоянии  $\Delta l$  укладывается число длин волн равное  $n_{l+\Delta l} - n_l$ . Отсюда находим длину волны и скорость ультразвука

$$c = \frac{\Delta l}{\frac{n_{l+\Delta l}}{f_{l+\Delta l}} - \frac{n_l}{f_l}}. \quad (2.5)$$

Более точный результат должен получаться, если определять изменение (перемещение) фазы колебаний интерференционным методом. В общем случае наблюдать интерференцию радиочастотных электрических колебаний гораздо проще, чем в оптике (даже если применяются оптические квантовые генераторы – лазеры), по следующим причинам:

а) колебания, вырабатываемые радиочастотными генераторами, имеют несравненно меньшую частоту, чем колебания оптического диапазона;

б) временная и оптическая когерентность радиочастотных генераторов гораздо больше оптических.

В данной работе используется интерференция колебаний, пришедших на сумматор (осциллограф в режиме суммирования) от приёмного пьезоэлемента, и колебаний, выработанных радиочастотным генератором.

Оценим чувствительность этого метода измерения фазы. Сложим два когерентных сигнала одинаковой амплитуды, находящиеся почти в противофазе (зафиксировать минимум суммарного сигнала можно гораздо точнее, чем максимум). Поэтому реально это будет разность сигналов  $\Delta A$ :

$$\Delta A = A_0 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_0 \sin(\omega t + \varphi_2), \text{ где } \varphi_1 = \varphi_2 + \pi + \Delta\varphi.$$

Здесь  $\Delta\varphi$  – отклонение от точной «противофазности», именно эта величина определяет чувствительность метода.

$$\text{Тогда: } \Delta A = 2A_0 \sin((2\omega t + \pi + \Delta\varphi)/2) \cos((-(\pi + \Delta\varphi)/2))$$

Амплитуда:  $\Delta A_0 = 2A_0 \cos(\pi/2 + \Delta\varphi/2) = 2A_0 \sin \Delta\varphi/2$ . Поскольку аргумент синуса – величина малая, имеем:  $\Delta A_0 = A_0 \Delta\varphi$ ; отсюда

$$\Delta\varphi = \Delta A_0 / A_0 \quad (2.6)$$

Таким образом, высокая чувствительность (соответствующая малой величине  $\Delta\varphi$ ) может быть получена, если суммарный сигнал, наблюдаемый на экране осциллографа в противофазе, существенно (в десятки – сотни раз) меньше амплитуды каждого из сигналов. Уменьшению величины  $\Delta A_0$  до нуля препятствуют шумы приёмного устройства (осциллографа), а также различие в форме сигналов. Поскольку форма колебаний на выходе приёмного пьезоэлемента близка к синусоидальной, а на выходе генератора далека от гармонической, между генератором и входом осциллографа ставится пропускающий LC-фильтр, настроенный на резонансную частоту пьезоэлементов и имеющих сравнимую с ними добротность.

Изменение интерференционной картины (чередование максимумов и минимумов) происходит как при взаимном перемещении пьезоэлементов, так и при изменении частоты. Расчёт скорости ультразвука, соответственно, производится по формулам (1.3) и (2.5).

### 2.2.2. Измерение групповой скорости

Измерение групповой скорости производится так называемым прямым импульсным методом. Прямоугольный импульс на выходе генератора преобразуется излучающим пьезоэлементом в акустический импульс. Время распространения этого импульса в среде пропорционально расстоянию и обратно пропорционально скорости ультразвука:

$$t = l/c. \quad (2.7)$$

Но расстояние между излучающим и приёмным пьезоэлементами неизвестно, так как они находятся в держателях, изолирующих пьезоэлементы от

воздействия сред, в которые они помещаются. Поэтому в жидкостях один из пьезоэлементов перемещают относительно другого на расстояние  $\Delta l$ , тогда время распространения изменится на величину  $\Delta t$ . Измеряя это изменение по смещению импульса на экране осциллографа получают скорость ультразвука:

$$c = \Delta l / \Delta t. \quad (2.8)$$

### 2.2.3. Дифракция света на ультразвуке

В экспериментальной схеме рис. 2.2 луч лазера проходит через жидкость и попадает на экран 5. В отсутствие ультразвука на экране наблюдается одинокое яркое пятно. Если подать на излучающий пьезоэлемент 3 непрерывные колебания от генератора 2, то по обе стороны от центрального пятна возникнут сателлиты. Их количество в зависимости от величины выходного напряжения генератора и качества юстировки варьирует от 1 до 3 (с каждой стороны).

Измерив расстояние между сателлитами одного порядка и расстояние  $L$ , по формуле (2.2) можно найти длину волны и по формуле (1.3) – скорость ультразвука. Однако величина  $L$  имеет некоторую неопределённость, так как неизвестно от какого места ультразвукового пучка её отсчитывать (а он должен быть достаточно широким для получения большего количества дифракционных максимумов (см. формулу (1.16) и рис. 1.4)). Поэтому обычно величину  $L$  определяют, используя эталонные вещества, т.е. те вещества, в которых скорость ультразвука измерена другими методами с заведомо меньшей погрешностью. В этом качестве обычно используются вещества, которые могут быть получены в больших объёмах (например, вода), так как при прочих равных условиях погрешность измерения тем меньше, чем больше акустический путь.

Зная скорость звука в эталонном веществе, можно рассчитать значение  $\lambda$  на данной частоте и, измерив  $d_m$ , по формуле (2.2) найти значение  $L$ , а затем, не меняя оптического пути и частоты ультразвука, провести измерения в исследуемом веществе.

При использовании высококачественной оптической схемы такая методика даёт возможность измерять скорость ультразвука с погрешностью меньше, чем 0,01 %.

### **3. Техника безопасности по работе с приборами**

В данной работе в качестве источника света используется диодный лазер. Несмотря на то, что его мощность невелика, излучение этого, как и любого другого лазера, опасно для зрения.

Ни в коем случае нельзя допускать прямого попадания лазерного излучения в глаз человеку.

Нужно также следить, чтобы в глаз не попал луч лазера, отражённый от любой зеркально отражающей поверхности.

Для того, чтобы контролировать положение луча, нужно использовать матовую поверхность, диффузно отражающую излучение (в качестве экрана используется матовое неполированное стекло).

Необходимо следить за тем, чтобы не направить лазерный луч в глаз своему коллеге.

## 4. Порядок выполнения лабораторной работы

### 4.1. Измерение фазовой скорости ультразвука

#### 4.1.1. Сборка и настройка установки

На рис. 4.1 изображен общий вид установки для измерения фазовой скорости ультразвука.

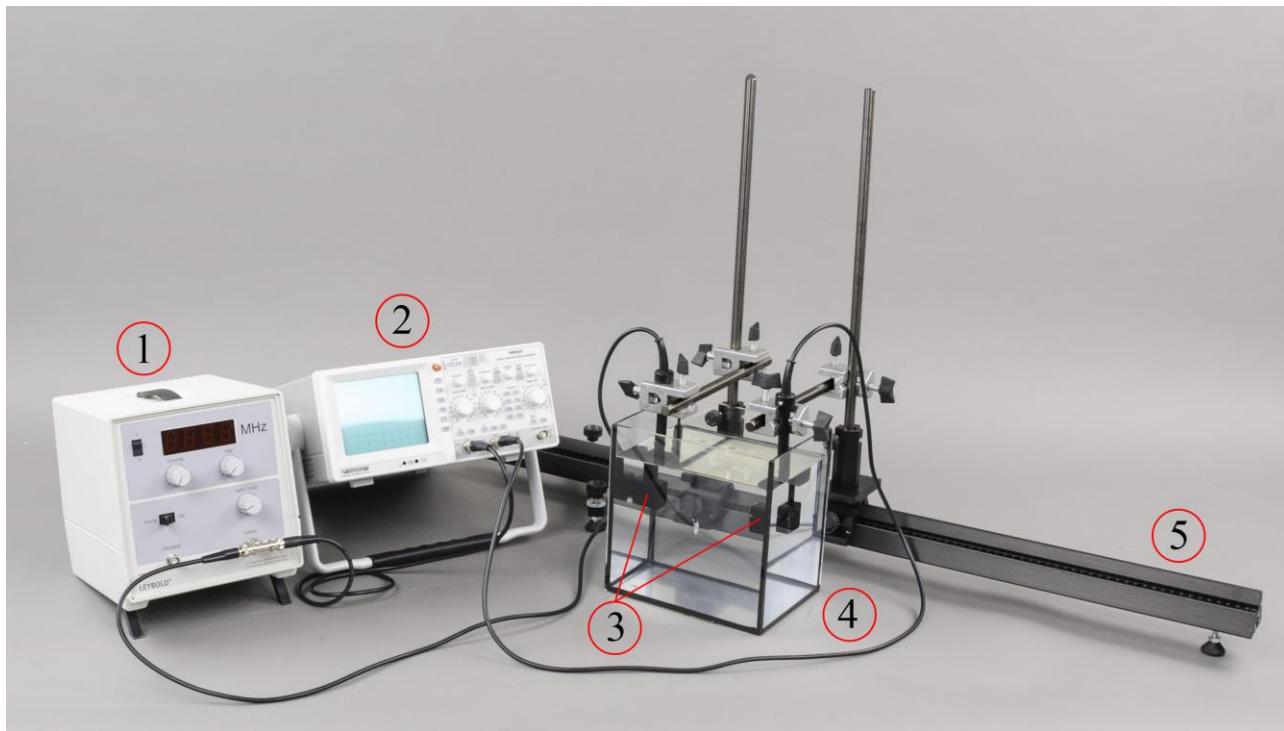


Рис. 4.1. 1 – генератор электрических колебаний; 2 – осциллограф двухканальный; 3 – пьезоэлементы; 4 – ванна для измерения скорости ультразвука в воде; 5 – оптическая скамья.

Закрепите пьезоэлементы (3) с помощью системы держателей на оптической скамье (5). Пьезоэлементы помещены в герметичную оболочку; рабочая поверхность (излучающая или приёмная в зависимости от Вашего выбора) направлена в более длинную относительно стержня сторону. Противоположная поверхность пьезоэлемента нагружена на материал с очень высоким затуханием ультразвука для того, чтобы исключить интерференционные явления в пьезоэлементе.

Опустите оба пьезоэлемента в ванну (4) с водой. Их верхние поверхности должны находиться на расстоянии в несколько сантиметров от поверхности воды, боковые поверхности – не ближе 5 сантиметров от стенки. Установите пье-

зоэлементы на одинаковую высоту так, чтобы рабочие поверхности были обращены друг к другу, а расстояние между ними составляло 5-8 сантиметров.

Подключите один из пьезоэлементов к выходу генератора (1) – этот пьезоэлемент будет излучающим, второй – к входу канала 1 осциллографа (2). Развёртка также синхронизируется от канала 1 – для этого в модуле “TRIGGER” нажмите кнопку CH 1. Установите на генераторе режим непрерывных колебаний (CW). На экране осциллографа при правильном подборе длительности развёртки (ручка TIME/DIV) должна изобразиться синусоида. Изменяя частоту генератора, найдите частоту, соответствующую максимальному сигналу, – это резонансная частота пьезоэлементов  $f_{рез}$ . После этого проведите юстировку пьезоэлементов – последовательно поворачивая их в горизонтальной и вертикальной плоскостях на несколько градусов, добейтесь максимального значения сигнала.

Подключите к входу канала 2 осциллографа выход генератора (с помощью тройника) и переключите синхронизацию развёртки на канал 2. Получите на экране осциллографа изображения от обоих каналов (кнопка выбора двухканального режима “DUAL”). Сигнал с выхода генератора сильно отличается от синусоидального, в то время как на выходе приёмного пьезоэлемента – синусоида с небольшими искажениями, характер которых изменяется в зависимости от частоты. Это явление связано с тем, что пьезоэлементы, представляющие собой колебательную систему с добротностью  $Q \approx 20$ , эффективно выделяют основную частоту генератора.

Перемещая один из пьезоэлементов относительно другого, убедитесь в том, что “акустический сигнал” перемещается вдоль линии развёртки (а сигнал с выхода генератора неподвижен). Амплитуда акустического сигнала при этом периодически изменяется (подумайте почему). Перемещение сигнала должно происходить также при изменении частоты.

Перед началом измерений скорости ультразвука измерьте температуру воды.

#### 4.1.2. Измерения скорости ультразвука прямым фазовым методом

Максимально раздвиньте пьезоэлементы, зафиксируйте положение одного из них на оптической скамье стопорящим винтом. Плавно перемещая другой пьезоэлемент вдоль оптической скамьи, добейтесь того, чтобы определённая фаза синусоидального сигнала (например, максимум) совпала с выбранной вертикальной линией на экранной шкале. Произведите отсчёт по шкале на оптической скамье. Затем продолжите перемещение, отсчитывая число периодов  $n$ , соответствующих изменению расстояния на  $\Delta l$ . Перемещение необходимо производить как можно более плавно, так как длина волны составляет доли миллиметра и даже при небольшом скачке можно пропустить целый период колебаний (или отсчитать лишний).

Постройте график зависимости  $\Delta l$  от  $n$  и по его наклону определите длину волны. Рассчитайте фазовую скорость ультразвука, используя формулу (1.3).

#### 4.1.3. Измерения скорости ультразвука частотно-фазовым методом

Проведите измерения скорости ультразвука, используя соотношения (2.4) и (2.5), то есть последовательно изменяя частоту при различных фиксированных расстояниях между пьезоэлементами и измеряя значения  $f_m$ , соответствующие совпадением выбранной фазы сигнала с выбранным местом на экране. Частоту необходимо изменять в обе стороны от резонансной частоты до тех пор, пока форма колебаний не начнёт заметно отличаться от синусоидальной (подумайте, почему это происходит?). Число значений  $m$  должно быть не меньше 10. По формуле (2.4) найдите среднее значение  $n_l$ .

Переместите пьезоэлемент на расстояние  $\Delta l$  (2–3 см) и определите значение  $n_{l+\Delta l}$ . Число фиксированных расстояний должно быть не меньше 3-х. Скорость ультразвука определяется по формуле (2.5).

#### 4.1.4. Измерения скорости ультразвука интерференционным методом

Подключите выход генератора к каналу 2 осциллографа через фильтр нижних частот (ФНЧ), не пропускающий колебания высоких частот (выше, чем основная частота генератора). Убедитесь в том, что сигнал стал близок к синусоидальному. Установите двухканальный режим изображения сигналов на



экране осциллографа (кнопка “DUAL”). Плавно изменяя усиление одного из каналов установите равенство амплитуд акустического сигнала и сигнала на канале 2. (Для этого нажмите на ручку VOLTS/DIV выбранного канала – светодиодный индикатор начнёт мигать; это означает, что можно плавно менять усиление (режим VAR). Повторное нажатие восстанавливает калибровку чувствительности.

Плавно перемещая один из пьезоэлементов, добейтесь совпадения фаз сигналов. Переключите осциллограф в режим алгебраического суммирования сигналов (кнопка “ADD”). Убедитесь в том, что амплитуда суммарного сигнала в 2 раза больше амплитуды каждого из интерферирующих сигналов. Далее, перемещая пьезоэлемент, добейтесь минимума суммарного сигнала (временно переключив осциллограф в режим “DUAL”, убедитесь в том, что сигналы при этом находятся в противофазе), измерьте его амплитуду и по формуле (2.6) определите чувствительность данной методики к изменению фазы сигнала ( $\Delta\varphi$ ).

Проведите измерения аналогично пп. 4.1.2 и 4.1.3, но фиксируя не совпадение определённой фазы колебаний с выбранным местом на экране, а интерференционные минимумы. Все расчётные формулы остаются справедливыми.

Сделайте вывод о том, применение какой из методик даёт наименьшую погрешность измерений. Определите наиболее надёжное значение скорости ультразвука в воде при данной температуре.

## **4.2. Измерение групповой скорости ультразвука**

Переведите генератор в импульсный режим – поставьте переключатель режимов в положение “PULSE”. Развёртку осциллографа переключите на режим внешнего запуска (кнопка “EXT” в модуле “TRIGGER”), подайте на разъём внешнего запуска (“EXT.TRIG”) сигнал с выхода генератора “TRIGGER”.

Измерьте параметры импульса, вырабатываемого генератором, – полярность, амплитуду и длительность импульса.

Установите расстояние между излучающими поверхностями пьезоэлементов в пределах 5-10 см и, пользуясь измеренными значениями фазовой скорости, оцените время прохождения ультразвуковым импульсом расстояния

между пьезоэлементами. Установите длительность развёртки осциллографа несколько большую, чем это время, и найдите импульсный сигнал, прошедший ультразвуковой тракт. Переключите осциллограф в режим внутренней синхронизации – сигнал переместится в начало развёртки. Увеличьте скорость развёртки для того, чтобы увидеть структуру сигнала. Обратите внимание на то, что его форма отличается от формы импульса, вырабатываемого генератором – внутри импульса появляется заполнение с частотой, соответствующей резонансной частоте пьезоэлементов – импульс по существу превращается в радиоимпульс (объясните это явление).

Переключите осциллограф в режим внешнего запуска. Изменяя расстояние между пьезоэлементами, по экрану осциллографа отсчитывайте соответствующие им значения времён задержки импульса  $\Delta t$ . По графику зависимости  $\Delta l$  от  $\Delta t$  найдите значение групповой скорости ультразвука. Число экспериментальных точек на графике должно быть не менее 7-ми.

Сравните полученное значение групповой скорости с результатами измерений фазовой скорости. Сделайте вывод о равенстве или неравенстве этих значений.

### **4.3. Дифракция света на ультразвуке**

Соберите экспериментальную схему, изображённую на рис. 4.2.

Поскольку расстояние между дифракционными максимумами различных порядков пропорционально расстоянию  $L$  от ультразвукового пучка до экрана, последний необходимо разместить на самом краю оптической скамьи или, если есть возможность, ещё дальше, на расстоянии 2-3 м от кюветы. Расстояние между излучающей поверхностью пьезоэлемента и параллельной ей стенкой кюветы должно быть порядка 1 см, луч лазера должен проходить приблизительно посередине этого расстояния.

Включите генератор (1); амплитуда колебаний измеряется осциллографом (2). Реально нужно измерять размах (между максимумом и минимумом), так как для несинусоидального сигнала измерение амплитуды затруднительно.

Установите максимальный сигнал на выходе генератора – на экране по обе стороны от центрального пятна должны появиться дифракционные максимумы.

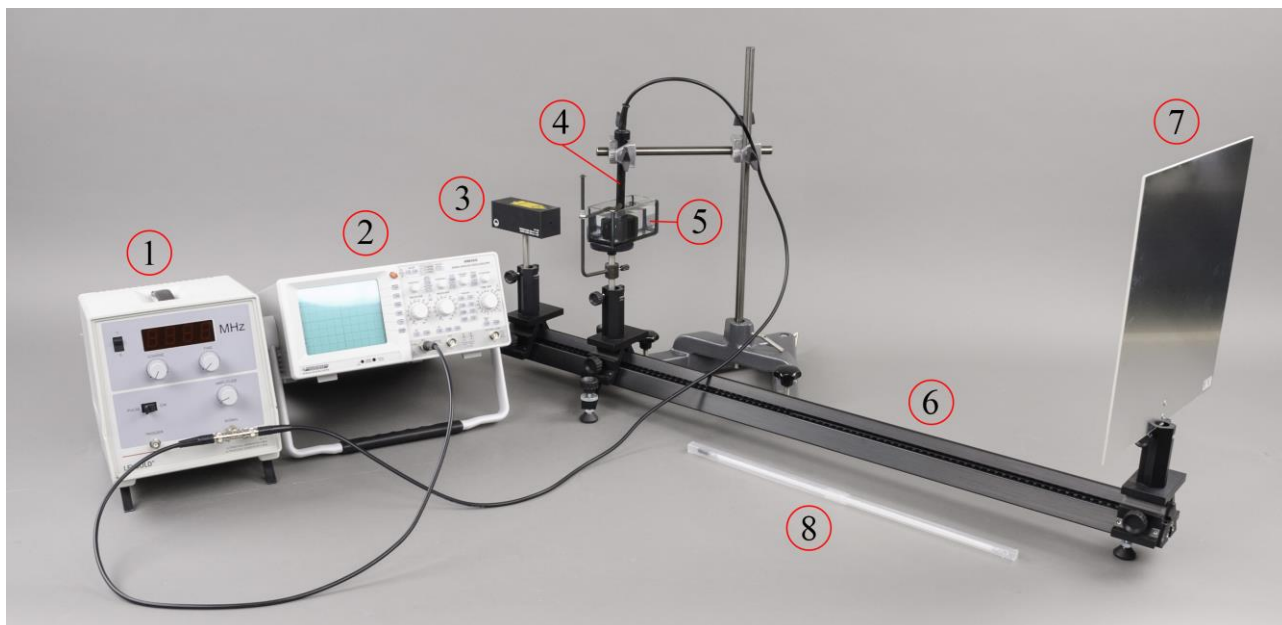


Рис. 4.2. 1 – генератор электрических колебаний; 2 – осциллограф двухканальный; 3 – лазер,  $\Lambda = 635$  нм; 4 – пьезоэлемент; 5 – кювета для наблюдения дифракции света на ультразвуке; 6 – оптическая скамья; 7 – экран; 8 – термометр.

Перемещайте кювету (5) в небольших пределах, чтобы получить стоячую волну – при этом амплитуда ультразвуковых колебаний возрастает и можно получить большее число порядков дифракции. Перемещение должно быть небольшим – поступательное в направлении распространения ультразвуковой волны не более, чем на 1-2 мм, угол поворота – не более 10 градусов. Добейтесь максимально возможного числа порядков дифракции – не менее 2-х (с каждой стороны).

Изменяя уровень сигнала генератора, определите, при каких напряжениях становятся видны различные порядки дифракции. Попробуйте оценить, какой области графика на рис. 1.4 соответствует дифракционная картина при максимальном напряжении на выходе генератора.

Измерьте расстояния  $d_m$  линейкой, а расстояние  $L$  от середины ультразвукового пучка до экрана – рулеткой; по формуле (2.2) рассчитайте длину волны, а по формуле (1.3) – скорость ультразвука в воде. Оцените погрешность эксперимента и сравните полученный результат с данными предыдущих экспери-

ментов (п. 4.1.) по определению фазовой скорости ультразвука. Используя значение скорости ультразвука в воде, полученное в п. 4.1, определите значение  $L$  для данной акустооптической системы.

Снимите с установки кювету с водой, стараясь не изменить положение пьезоэлемента, и залейте вместо воды этиловый (или изопропиловый) спирт. Установите кювету на прежнее место, измерьте величины  $d_m$  и рассчитайте скорость ультразвука в спирте. Сравните полученные данные с табличными значениями:  $c = 1165$  м/с в этиловом спирте,  $c = 1179$  м/с в изопропиловом спирте.

## **5. Обработка результатов эксперимента, требования, предъявляемые к отчёту**

Отчёт должен содержать:

- формулировку цели лабораторной работы;
- экспериментальную схему для измерения фазовой и групповой скоростей ультразвука;
- экспериментальную схему для наблюдения дифракции света на ультразвуке;
- рабочие формулы;
- непосредственные результаты измерений;
- описание методов обработки результатов измерений;
- результаты обработки экспериментальных данных;
- обсуждение результатов измерений;
- выводы.

## 6. Контрольные вопросы

Ниже приведены вопросы, на которые должен уметь отвечать студент для того, чтобы осознанно выполнять лабораторную работу.

1. Какие параметры характеризуют акустическую волну?
2. Что такое акустический импеданс?
3. Что такое фазовая скорость волны?
4. Что такое групповая скорость волны?
5. Что такое интерференция волн?
6. Как возникают стоячая волны?
7. Что такое фазовая решётка?
8. При каких условиях наблюдается дифракция Рамана-Ната?
9. Что такое прямой и обратный пьезоэффект?
10. Какое необходимое условия существования пьезоэффекта в кристаллах.

## **Список рекомендуемой литературы и справочные данные**

1. Шутилов В.А. *Основы физики ультразвука: Учебное пособие*. Издательство ЛГУ.1980.280 с.
2. Сивухин Д.В. *Общий курс физики. Учебное пособие для вузов. Т.2. Термодинамика и молекулярная физика.* – 4-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 576 с.
3. Бутиков Е.И. *Оптика: Учебное пособие. 3-е изд., доп.* СПб.: Издательство «Лань». 2012. 608 с.
4. *Ультразвук. Маленькая энциклопедия.* М.: «Советская энциклопедия». 1979.400 с.