

**МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ  
ИНТЕНСИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ  
ВОЛН И ОТНОСИТЕЛЬНЫХ  
ДЕФОРМАЦИЙ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ**

Описание лабораторной работы

Санкт-Петербург

2020 г.

Печатается по решению Ученого совета физического факультета  
Санкт-Петербургского государственного университета.  
Протокол № от февраля 2020 г.

В.М.Сарнацкий, В.М.Микушев, А.С.Хомутова. Методы измерения  
интенсивности ультразвуковых волн и относительных деформаций  
в твердых телах.

Описание лабораторной работы.

Оригинал макет представлен авторами.

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов –  
бакалавров 4 курса, обучающихся на кафедре физики твердого тела  
по учебной дисциплине “Специальный лабораторный практикум по  
акустике и ЯМР конденсированных сред “, и для студентов –  
магистрантов, слушающих спецкурс “Методы спектроскопии” и  
проходящих «Практикум по ультразвуковой спектроскопии  
дисперсных систем».

Рецензенты: доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры  
электроники твердого тела Вывенко О.Ф., кандидат физ.-мат. наук,  
доцент кафедры физики твердого тела Подорожкин Д.Ю.

## Содержание

<b>1. Введение.....</b>	<b>4</b>
<b>2. Теоретические и экспериментальные основы определения интенсивности ультразвуковых колебаний.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1 Соотношение между интенсивностью ультразвука и амплитудой относительной деформации в волне.....</b>	<b>7</b>
<b>2.2 Определение интенсивности звука по параметрам пьезоэлектрического преобразователя.....</b>	<b>8</b>
<b>2.3 Электромагнитный способ.....</b>	<b>9</b>
<b>2.4 Калориметрический способ.....</b>	<b>11</b>
<b>2.5 Емкостной способ.....</b>	<b>11</b>
<b>3. Лабораторная работа.....</b>	<b>12</b>
<b>4. Подготовка и характеристики образцов для измерений.....</b>	<b>13</b>
<b>5. Цель работы.....</b>	<b>15</b>
<b>6. Порядок выполнения работы.....</b>	<b>15</b>
<b>7. Требования к отчету.....</b>	<b>16</b>
<b>8. Литература.....</b>	<b>17</b>

## 1. Введение

Одним из методов исследования свойств твердых тел является возбуждение и регистрация прошедших через них упругих колебаний. Традиционно упругие колебания называют ультразвуковыми колебаниями, хотя частоты колебаний в твердых телах могут на много порядков превышать диапазон частот, обычно используемый в ультразвуковой технике. Основное применение ультразвука: измерение упругих констант, изучение дефектов кристаллической решетки, изучение электронной структуры металлов и сверхпроводников, изучение магнитоакустических, спин-фононных, электрон-фононных и прочих взаимодействий [1]. Все это помимо широкого применения ультразвука в технике и в медицине [2]. Все частоты механических колебаний выше частоты слышимости человеческим ухом (свыше 20 кГц) называют ультразвуком. Источником звука может быть любое колеблющееся тело в любом агрегатном состоянии. Звуковые волны представляют собой продольные и поперечные механические колебания атомов и молекул в веществе. При этом колеблющиеся атомы образуют области сжатия и расширения, распространяющиеся с определенной скоростью. Скорость распространения упругих волн в веществе в первую очередь зависит от механических свойств среды. В твердых телах могут распространяться как поперечные (деформация сдвига), так и продольные волны (деформация сжатия). У продольных волн смещение частиц происходит в том же направлении, в котором движется волна. У поперечных волн смещение частиц перпендикулярно движению волны. Очень важной величиной, определяющей применимость ультразвука в практических целях, является интенсивность ультразвуковых колебаний  $J$ . В системе СИ величина  $J$  измеряется в  $вт/м^2$ , и является средней по времени энергией, переносимой звуковой волной через единичную площадку, перпендикулярную к направлению распространения волны, в единицу времени.

На рис.1 показана схема формирования продольной и сдвиговой ультразвуковой волны в твердом теле.

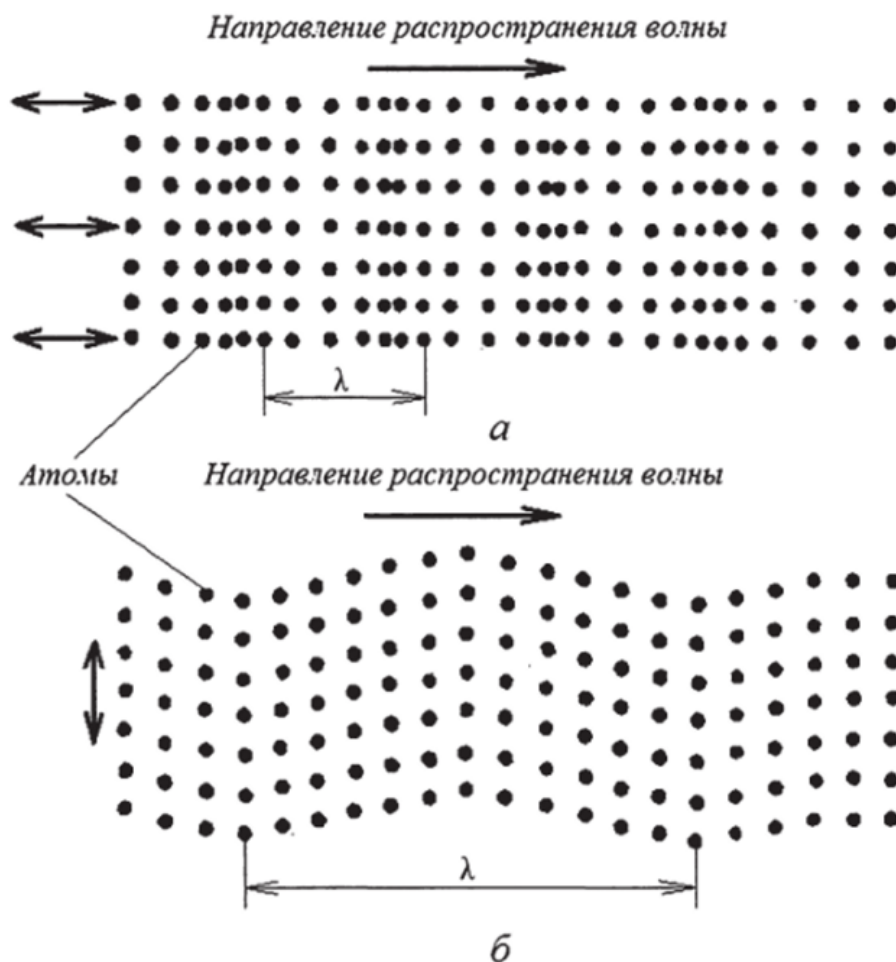


Рис.1 Схема формирования ультразвуковой волны в твердом теле  
а) продольная волна; б) поперечная (сдвиговая волна).

Волна, показанная на рис.1а, называется продольной, т.к. колебания частиц в ней происходят в направлении ее распространения. Поскольку в ней проявляются деформации растяжения и сжатия, ее также называют волной растяжения и сжатия. Эти волны могут возбуждаться в твердых, жидких и газообразных средах.

В твердых телах также возможен еще один тип волны - поперечная или сдвиговая (рис 1б). Эта волна также движется слева направо, однако частицы в ней колеблются не в направлении распространения волны, а в перпендикулярном направлении, т.е. поперечно.

Следует отметить, что ценность количественной информации, получаемой при исследованиях различных физико-химических процессов, в ряде случаев в существенной мере определяется степенью надежности абсолютных измерений амплитуды или интенсивности ультразвуковых волн в образце. Это относится, например, к исследованию ядерного акустического резонанса [1], электронного парамагнитного акустического резонанса [2], к магнитоакустическим исследованиям проводников и полупроводников. В последние годы информация о перемещении объекта исследований или измерительной иглы (кантилевера) над ним стало актуальной задачей при использовании ультразвуковых сканеров в туннельных и атомно-силовых микроскопах [3].

В настоящее время ультразвук наряду с МРТ используется практически во всех областях медицинской практики и относится к наиболее важным современным методам диагностики и лечения. Интенсивности УЗ волн, применяемых в медицине, подразделяются на три интервала: малая  $0,05 - 0,6 \text{ Вт/см}^2$ , средняя  $0,6 - 1,2 \text{ Вт/см}^2$ , большая свыше  $1,2 \text{ Вт/см}^2$ , а в биологических исследованиях до  $20 \text{ Вт/см}^2$  [4]. Ультразвук, используемый в диагностике при уровнях интенсивности менее  $0,1 \text{ Вт/см}^2$ , практически не оказывает вредного воздействия на биологические объекты. Однако при более высоких уровнях высокочастотного ультразвука возможно его значительное влияние на жизнедеятельность человека, что обусловлено механическим, тепловым и химическим действием. Таким образом, знание и умение определять интенсивность ультразвуковых колебаний является актуальной и необходимой задачей.

## 2. Теоретические и экспериментальные основы определения интенсивности ультразвуковых колебаний.

### 2.1 Соотношение между интенсивностью ультразвука и амплитудой относительной деформации в волне.

Плоская ультразвуковая волна, движущаяся по направлению  $x$ , описывается формулой  $y = A \sin(\omega t - kx)$ , где  $y$  - смещение колеблющихся частиц,  $A$  - амплитуда смещения,  $\omega$  - круговая частота колебаний,  $t$  - время,  $k$  - волновое число. Вынося  $k$  за скобку, получим

$$y = A \sin [k(v t - x)]. \quad (1)$$

В этой формуле величина  $v = \omega/k$  определяет скорость ультразвука в упругой среде. Скорость ультразвука в воздухе составляет около 330 м/с, в воде – 1500 м/с, в кварце – 5700 м/с, в стали – 6000 м/с.

Скорость движения частиц  $V_{\text{част.}}$  в среде не имеет ничего общего со скоростью распространения ультразвука. Скорость частиц можно найти, дифференцируя (1) по времени:

$$V_{\text{част.}} = A\omega \cos(\omega t - kx). \quad (2)$$

Как показывает формула (2), скорость частиц гармонически зависит от времени. Амплитуда их колебаний равна  $A\omega$ . Найдем кинетическую энергию, отнесенную к единице объема колеблющейся среды:

$$E_{\text{кин}} = \frac{1}{2}\rho V_{\text{част.}}^2 = \frac{1}{2}\rho(A\omega)^2 \cos^2(\omega t - kx). \quad (3)$$

При гармонических колебаниях потенциальная энергия волны в среднем равна кинетической. Сумма этих энергий – полная энергия, отнесенная к единице объема (плотность энергии), равна

$$E_{\text{полн}} = E_{\text{кин}} + E_{\text{пот}} = \frac{1}{2}\rho(A\omega)^2. \quad (4)$$

Поток энергии, пересекающий единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны, называется интенсивностью звука  $J$  и он равен

$$J = \frac{1}{2} \rho v (A\omega)^2 \quad (5)$$

Входящая в эту формулу величина  $\rho$  называется акустическим сопротивлением среды  $Z$ . Интенсивность звука сравнительно просто можно связать с амплитудным значением относительной деформации в волне, определяемой как  $\xi = 2\pi A/\lambda$ , где  $\lambda$  - длина волны ультразвука  $\lambda = v/\nu$

$$J = \frac{1}{2}\rho v^3(\xi)^2. \quad (6)$$

## 2.2 Определение интенсивности звука по параметрам пьезоэлектрического преобразователя.

Ультразвуковые колебания в твердых телах традиционно возбуждают и регистрируют с помощью пьезоэлектрических преобразователей, с применением обратного и прямого пьезоэлектрического эффектов. Обратный пьезоэффект заключается в изменении размеров пьезоэлектрика, помещенного в электрическое поле. Если обозначить относительную деформацию  $(\delta l/l)_k$  через  $r_k$ , то величина относительной деформации пьезоэлектрика в статическом электрическом поле с напряженностью  $E$  рассчитывается из выражения  $r_k = e_{ik}E_i$  (суммирование по значку  $i$ ), где  $e_{ik}$  - пьезокоэффициенты. Для кристалла кварца  $X$  среза, предназначенным для возбуждения продольных ультразвуковых волн и являющимся относительно слабым пьезоэлектриком по сравнению с кристаллом ниобата лития, величина  $e_{11}$  равна  $2,3 \times 10^{-12}$  м/в (для сравнения в ниобате лития пьезокоэффициент  $e_{15}$ , ответственный за возбуждение продольных волн равен  $74 \times 10^{-12}$  м/в [5]). Если пренебречь потерями акустической мощности в контактном слое между кварцевым преобразователем и образцом, и не учитывать изменение эквивалентного сопротивления преобразователя при подключении акустической нагрузки, то можно получить формулу для расчета интенсивности акустической волны в образце  $J$  по известному значению пьезокоэффициента кварцевого излучателя  $e_{11}$ , величине эффективного напряжения  $V_{эфф}$ , частоте  $\nu_0$ , плотности образца  $\rho$  и скорости распространения продольной ультразвуковой волны  $v$



$$J = 4 V_{\text{эфф}}^2 \nu_0^2 e_{11}^2 \rho \nu. \quad (7)$$

Опыт показал значительное различие измеренной величины  $J$  от значений, рассчитанных по формуле при одинаковых значениях величины  $V_{\text{эфф}}$ . При этом расчетные данные для интенсивности ультразвуковых колебаний по формуле (7) являются существенно преувеличенными вследствие неучтенных потерь акустической и электрической мощности.

### 2.3 Электромагнитный способ

Сущность этого метода состоит в следующем. На грань диэлектрического образца, противоположную излучателю ультразвука, наносится тонкий металлический слой в виде узкой полоски, играющей роль приемника ультразвуковых колебаний [6]. Если образец поместить в магнитное поле с индукцией  $B$ , то при колебаниях проводника на его концах развивается эдс индукции  $E = \int_0^l B U dl$ ,  $l$  - длина проводника, и  $U$  - колебательная скорость его элементов. Пусть магнитное поле однородно и вектор магнитной индукции направлен по оси  $z$  прямоугольной системы координат, проводник ориентирован вдоль оси  $x$ , и в направлении оси  $y$  распространяется плоская продольная ультразвуковая волна  $A = A_0 \sin\{\omega(t - y/\nu)\}$ , где  $\omega = 2\pi\nu$  - круговая частота,  $\nu$  - скорость звука в образце,  $U = \omega A$  - амплитуда колебательной скорости,  $A$  - амплитуда смещений. Принимая амплитудное значение колебательной скорости постоянной на длине приемника  $d$ , где  $d$  - диаметр ультразвукового пучка, на основании (1) получим для эдс

$$E = UBd \sin \omega t. \quad (8)$$

Отсюда путем непосредственных измерений магнитной индукции  $B$ , длины проводника  $l$  и амплитуды переменного электрического напряжения на его контактах  $E_0$  может быть определена амплитуда колебательной скорости  $U_0 = E_0/(Bl)$ , амплитуда колебаний в ультразвуковой волне  $A_0 = E_0/(Bl\omega)$  и интенсивность звуковых колебаний

$$J = \rho v E_0^2 / (2B^2 l^2), \quad (9)$$

где  $v$  - скорость звука в образце,  $A_0$  - амплитуда смещений,  $\rho$  - плотность образца. При этом величина относительной деформации

$$\xi = E_0 / (B l v) \quad (10)$$

Для оценки чувствительности электромагнитного приемника ультразвуковых колебаний примем  $\rho v = 20 \times 10^6 \text{ кг/м}^2 \text{ сек}$ ,  $B = 1 \text{ Тл}$ ,  $l = 2 \text{ см} = 0,02 \text{ м}$ . При этих значениях величин, входящих в формулу (9), получаем чувствительность  $s = E_0^2 / J = 4 \times 10^{-11} \text{ в}^2 \text{ м}^2 / \text{вт}$ . При интенсивности ультразвука  $J = 1 \text{ вт/см}^2 = 10^{-4} \text{ вт/м}^2$  получим величину  $E_0 \sim 0,8 \text{ мв}$ .

Если в образце распространяется сдвиговая ультразвуковая волна, то для работоспособности рассматриваемого метода необходимо образец ориентировать вдоль магнитных силовых линий, при этом величина эдс, наводимой в металлизированной полоске будет по-прежнему определяться по формуле (8) независимо от ориентации полоски относительно вектора индукции магнитного поля (проявляется аксиальная симметрия). При исследовании металла в качестве образца необходимо заизолировать металлизированную полоску от образца путем нанесения диэлектрического покрытия, например, слоя лака.

Оценки по формуле (10) показывают, что минимальное значение величины  $\xi$ , которое можно зафиксировать рассматриваемым способом равно  $10^{-8}$  в поле  $0,5 \text{ Тл}$  при длине полоски  $0,02 \text{ м}$  и среднем значении скорости звука в твердом теле равной  $5 \times 10^3 \text{ м/с}$ .

Следует отметить преимущества электромагнитного способа:

1. возможность проведения измерений для продольных и сдвиговых колебаний;
2. возможность проведения измерений в импульсном и стационарном режиме возбуждения ультразвуковых колебаний;
3. применение магнитного поля позволяет учесть сигнал наводки попадающего в приемный тракт от генератора.

## 2.4 Калориметрический способ

Интенсивность ультразвуковых колебаний в жидкости можно с небольшой точностью  $\sim 30-40\%$  определить на основе теплового действия ультразвука. Авторы работы [7] сконструировали прибор, в котором связали интенсивность ультразвука и скорость поднятия жидкости в капилляре, вставленном в теплоизолированный сосуд с жидкостью, нагреваемой за счет энергии ультразвуковой волны. Калибровка прибора производилась по известным характеристикам электрического нагревателя. Преимущества разработанного прибора заключается в возможности измерения интенсивности продольных и сдвиговых колебаний. Небольшая переделка в конструкции прибора позволила применить его для измерения интенсивности ультразвука в твердых телах [8].

## 2.5 Емкостной способ

В этом способе смещение металлизированного торца образца измеряется динамическим конденсатором, образованным торцом образца и неподвижной металлической пластиной. При подаче на пластину постоянного напряжения  $U_0$  колебания торца образец с частотой ультразвуковых колебаний будут периодически изменять величину емкости, и как следствие индуцировать переменное напряжение  $U_{\sim}$ . Амплитуду продольных ультразвуковых деформаций, регистрируемых емкостным способом можно определить по формуле  $A/d = U_{\sim} / U_0$ , где  $d$  - зазор между пластиной и торцом образца. Из формулы следует, что величину относительной деформации можно определить из соотношения

$$\xi = 2\pi A/\lambda = 2\pi d U_{\sim} / (U_0 \lambda). \quad (11)$$

В работе [9] предложено внести изменения в конструкцию емкостного датчика, касающиеся формы электродов, составляющих

емкостной зазор. Эти изменения по расчетам авторов должны привести к повышению чувствительности.

Достоинством емкостного способа является самая высокая чувствительность из рассмотренных выше способов. Для величины  $z$  она достигает  $10^{-12}$  на частоте  $10 \text{ МГц}$  при зазоре  $10^{-5} \text{ м}$ .

К недостаткам метода относится:

- 1) невозможность его применения для определения относительной деформации сдвиговых колебаний;
- 2) возможность электрического пробоя емкостного зазора при больших значениях напряженности электрического поля.

### 3 Лабораторная работа

Блок-схема экспериментальной установки для проведения измерений относительных деформаций электромагнитным способом приведена на рис.2.

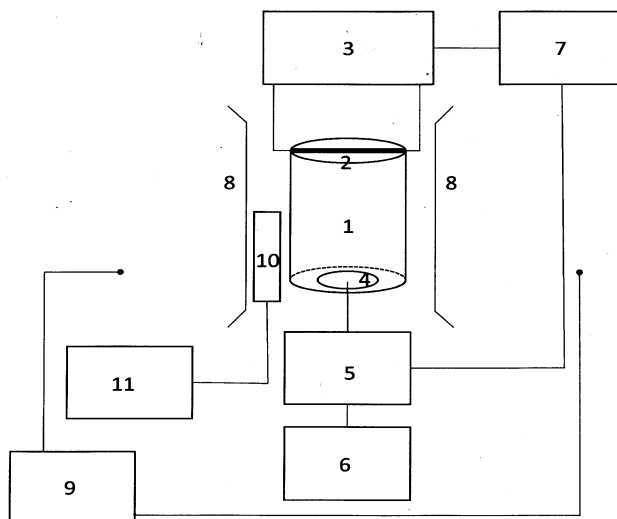


Рис. 2

1 – образец, 2 – металлизированная полоска, 3 – усилитель уЗ-29, 4 – пьезоэлектрический преобразователь, 5 – генератор ГЗ-41, 6 – частотомер, 7 – осциллограф, 8 – электромагнит с индукцией магнитного поля от 0 до  $500 \text{ мТ}$  с зазором  $50 \text{ мм}$ , 9 – блок питания электромагнита, 10 – датчик Холла, 11 – измеритель индукции магнитного поля ИМИ-3.

Ниже на рис.3 приведена блок-схема установки для определения относительных деформаций емкостным способом.

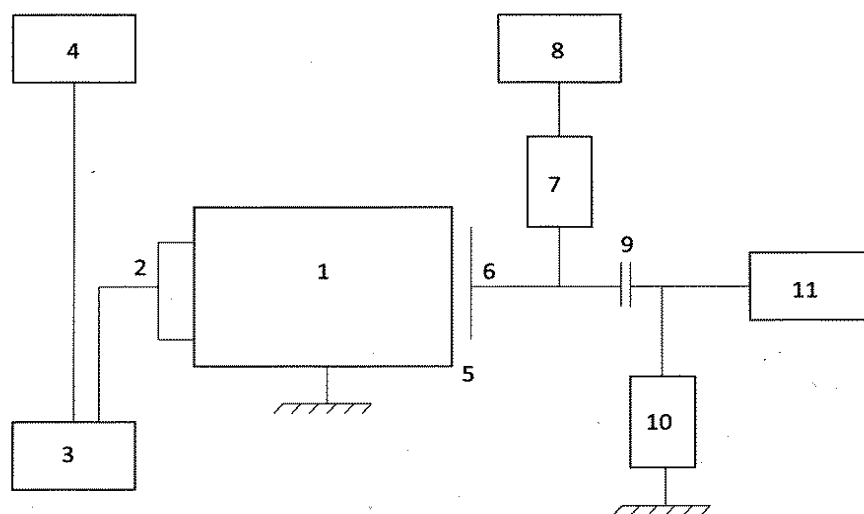


Рис. 3

1 - образец, 2 - пьезоэлектрический преобразователь для продольных колебаний с резонансной частотой 10 МГц, 3 - генератор непрерывных колебаний ГЗ-41, 4 - частотомер, 5 - емкостной зазор, установленный равным 40 мкм между образцом с металлизированной поверхностью и металлическим электродом 6, 7 - блокировочное сопротивление, 8 - источник постоянного напряжения, 9 - разделительная емкость, 10 - сопротивление нагрузки, 11 - микровольтметр или калиброванный осциллограф.

#### 4. Подготовка и характеристики образцов для измерений

Образец № 1. Материал алюминий, плотность  $\rho_{al} = 2,7 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ , форма - цилиндр, диаметр 30 мм, высота - 20 мм, плоскопараллельность торцов 2 мкм. Скорость продольных ультразвуковых колебаний  $v_L = 5200 \text{ м/с}$ , скорость сдвиговых колебаний  $v_T = 3130 \text{ м/с}$  [9]. На нижний торец посредством акустической склейки приклеен тонкий пьезоэлектрический преобразователь из монокристалла  $\text{LiNbO}_3$  среза  $Y+36^\circ$  для возбуждения продольных колебаний с резонансной частотой 10 МГц, на верхнем торце

через слой лака нанесен слой проводящей пленки с выводами на боковой поверхности цилиндра.

Образец № 2, материал и параметры те же, что и в образце № 2, отличие в том, что на нижний торец посредством акустической склейки приклеен тонкий пьезоэлектрический преобразователь из монокристалла  $\text{LiNbO}_3$  среза  $Y+163^0$  для возбуждения сдвиговых колебаний с резонансной частотой 10 МГц. Необходимо помнить, что при измерениях величины  $\xi$  в образцах 2 и 4 для сдвиговых колебаний ось цилиндра образцов вместе с держателем должны быть ориентированы в зазоре магнита вдоль направления магнитного поля.

Образец № 3 выполнен из кварцевого стекла, имеет плотность  $\rho_{\text{ст.}} = 2,2 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ , форма – цилиндр с размерами как № 1 и № 2, на верхнем торце нанесена металлическая проводящая полоска, на нижнем торце укреплен пьезопреобразователь для продольных волн, как в образце № 1. Скорость продольных ультразвуковых колебаний  $v_L = 5600 \text{ м/с}$ , скорость сдвиговых колебаний  $v_T = 3800 \text{ м/с}$ .

Образец № 4 также выполнен из кварцевого стекла с параметрами, что и образец № 3, отличие – на нижнем торце приклеен тонкий пьезоэлектрический преобразователь из монокристалла  $\text{LiNbO}_3$  среза  $Y+163^0$  для возбуждения сдвиговых колебаний с резонансной частотой 10 МГц.

При применении емкостного способа для определения относительных деформаций  $\xi$  изучают только продольные колебания с помощью пьезоэлектрического преобразователя из ниобата лития среза  $Y+36^0$ , при этом подготовлено по 1 образцу алюминия (образец № 5) и стекла (образец № 6) той же формы и размеров, как №1 и №3, но без проводящих полосок на торце. Для осуществления емкостного зазора и подачи на него постоянного напряжения с образцом из стекла проведена реакция «химического зеркала».

## 5. Цель работы

Проведение экспериментальных исследований по определению интенсивности ультразвуковых волн и относительных деформаций в образцах алюминия и кварцевого стекла электромагнитным и емкостным способом.

## 6. Порядок выполнения работы

Перед началом проведения работ студент должен детально ознакомиться с настоящим учебно-методическим пособием, блок-схемами применяемых экспериментальных установок, работой измерителя магнитной индукции ИМИ-3, должен быть проинструктирован с правилами техники электробезопасности.

Перед включением приборов, входящих в состав экспериментальной установки с применением электромагнитного метода, необходимо установить образец в специальный держатель в зазоре электромагнита так, чтобы контакты металлической полоски на боковой поверхности образца плотно касались пружинящих контактов в держателе образца. Затем подсоединить высокочастотный кабель от контактов в держателе образца с усилителем УЗ-29. Затем провести включение всех приборов, кроме блока питания магнита. При включении выходного напряжения от генератора ГЗ-41 может появиться на экране осциллографа сигнал наводки той же частоты. Необходимо уменьшить величину усиления приемного усилителя УЗ-29, и включить блок питания электромагнита, установив небольшую величину индукции магнитного поля (например,  $50 \text{ мТ}$ ) и удостовериться, что величина ЭДС индукции превышает сигнал наводки при этих условиях.

Далее можно продолжить проводить исследования амплитудных, полевых и частотных зависимостей величины наводимой ЭДС. Полученные результаты записываются в память компьютера и анализируются при

подготовке отчета. В такой последовательности проводятся исследования для образцов 1 - 4. Перед заменой образцов блок питания электромагнита должен быть выключен.

Перед началом работы на установке с применением емкостного метода студент должен удостовериться в том, что источник постоянного напряжения, подаваемого на металлический электрод, отключен, и образцы № 5 (из алюминия) и № 6 (из посеребренного стекла) тщательно и надежно заземлены. При смене образца источник постоянного напряжения должен быть выключен. Далее проводят измерение амплитудных, полевых и частотных зависимостей величины при различных значениях частоты (в пределах полосы частот эффективного излучения ультразвука), и амплитуды переменного напряжения на пьезопреобразователе (10 - 100 В), и при различных значениях разности потенциалов 10 – 100 В постоянного электрического поля (на емкостном зазоре)

## 7. Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- краткое описание актуальности проблемы;
- цель работы;
- результаты исследования амплитудной, полевой и частотной зависимости ЭДС индукции, наводимой при взаимодействии ультразвуковых колебаний продольной и сдвиговой поляризации и потока магнитной индукции на полоске металла нанесенной на образцы алюминия и стекла;
- графики, отражающие зависимости относительной деформации для продольных и сдвиговых колебаний в образцах стекла и алюминия от напряжения на пьезоэлектрическом преобразователе и от частоты в пределах полосы генерации пьезоэлектрического преобразователя;
- сравнение результатов экспериментов и теоретических расчетов интенсивности ультразвуковых колебаний по формулам (7) и (9);



- сравнение результатов измерения относительных деформаций продольных колебаний электромагнитным и емкостным способом при одинаковых условиях (переменное напряжение на пьезоэлектрическом преобразователе и частота колебаний) в образце стекла и алюминия.

## 8. Литература

1. Р. Труэл, Ч.Эльбаум, Б.Чик Ультразвуковые методы в физике твердого тела. Мир, Москва, 1972.307 с.
2. И.П. Голямина. Ультразвук, Маленькая энциклопедия. Москва. 1979, 400 с.
3. Д.А.Усанов, Р.К.Яфаров. Исследование поверхности материалов методом сканирующей отомно-силовой микроскопии. УМП для студентов фак. Нано и биомедицинских технологий Изд.-во Саратовского ун - та, 2006. 23 с.
4. И.И. Резников, В.Н. Федорова, Е.В.Фаустов, А.Р.Зубарев, А.К. Демидова. Физические основы использования ультразвука в медицине. Учебное пособие Москва 2015. 97 с.
5. Акустические кристаллы, справочник под ред. М.П.Шаскольской, Москва, Наука, 1982, 473 с.
6. И.Г.Михайлов, В.А.Шутилов Акустический журнал, 1957, 4, 379-380.
7. И .Г.Михайлов, В.А.Шутилов Акустический журнал, 1964, 10,1, 98-104.
8. В.А.Шутилов, Г.Л.Антокольский, В.М.Сарнацкий, Л.Н.Ферштат Приборы и техника эксперимента, 1973, № 4,253.
9. Б.М.Горкунов, И.В.Тюба, Л.В.Глебова Методы и приборы прикладной акустики 2010, т.25 стр.116-125.