

**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 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

1. Введение.....	4
2. Теоретические и экспериментальные основы определения интенсивности ультразвуковых колебаний.....	7
2.1 Соотношение между интенсивностью ультразвука и амплитудой относительной деформации в волне.....	7
2.2 Определение интенсивности звука по параметрам пьезоэлектрического преобразователя.....	8
2.3 Электромагнитный способ.....	9
2.4 Калориметрический способ.....	11
2.5 Емкостной способ.....	11
3. Лабораторная работа.....	12
4. Подготовка и характеристики образцов для измерений.....	14
5. Цель работы.....	15
6. Порядок выполнения работы.....	15
7. Требования к отчету.....	16
8. Литература.....	17

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.

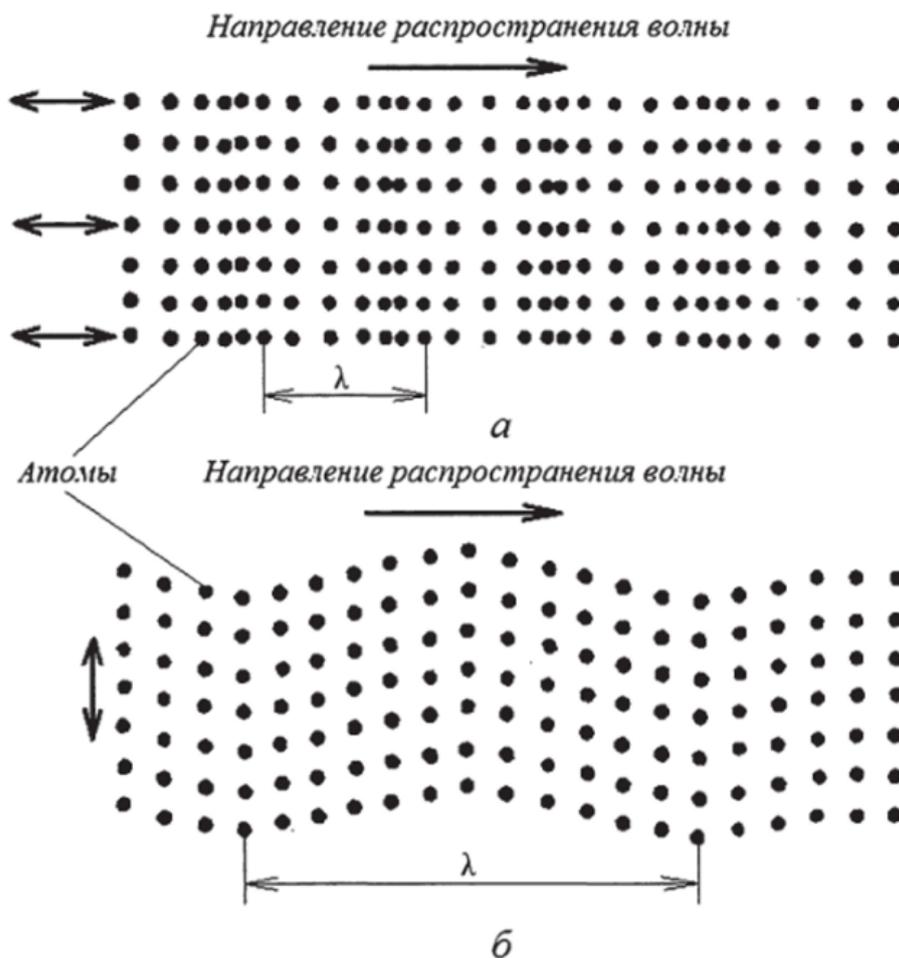


Рис.1 Схема формирования ультразвуковой волны в твердом теле:
а) продольная волна; б) поперечная (сдвиговая волна).

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 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, ω – круговая частота колебаний, t – время, k – волновое число. Вынося k за скобку, получим

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

В этой формуле величина $v = \omega/k$ определяет скорость ультразвука в упругой среде. Скорость ультразвука в воздухе составляет около 330 м/с, в воде равна 1500 м/с, в кварце достигает 5700 м/с, в стали превышает 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 является полной энергией, отнесенной к единице объема (плотность энергии), и она 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 ρv называется акустическим сопротивлением среды Z . Интенсивность звука J сравнительно просто можно связать с амплитудным значением относительной деформации ξ в волне, определяемой как $\xi = 2\pi A/\lambda$, где λ – 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 $(\delta/l)_k$ 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 74×10^{-12} м/В [5]). Пренебрегая потерями акустической мощности в контактном слое между кварцевым преобразователем и образцом, и не учитывая изменения эквивалентного сопротивления преобразователя при подключении акустической нагрузки, можно получить формулу для расчета интенсивности J акустической волны в образце по известному значению пьезокоэффициента кварцевого излучателя e_{11} , величине эффективного напряжения $V_{\text{эфф}}$ на частоте ν_0 , плотности образца ρ 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 длиной l на его концах развивается э.д.с. индукции

$$\mathcal{E} = \int_0^l B U dl, \quad (8)$$

где 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, ν – скорость звука в образце, $U = \omega A$ – амплитуда колебательной скорости, A – амплитуда смещений. Принимая амплитудное значение U колебательной скорости постоянной на длине приемника d , где d – диаметр ультразвукового пучка, на основании (8) получим для э.д.с. индукции

$$\mathcal{E} = UBd \sin \omega t. \quad (9)$$

Отсюда путем непосредственных измерений магнитной индукции B , длины проводника l и амплитуды переменного электрического напряжения на его

контактах \mathcal{E}_0 могут быть определены амплитуда колебательной скорости $U_0 = \mathcal{E}_0 / (Bl)$, амплитуда колебаний в ультразвуковой волне $A_0 = \mathcal{E}_0 / (Bl\omega)$ и интенсивность звуковых колебаний

$$J = \rho v \mathcal{E}_0^2 / (2B^2 l^2), \quad (10)$$

где v – скорость звука в образце, A_0 – амплитуда смещений, ρ – плотность образца. При этом величина относительной деформации

$$\xi = \mathcal{E}_0 / (Blv). \quad (11)$$

Для оценки чувствительности электромагнитного приемника ультразвуковых колебаний примем $\rho v = 20 \times 10^6 \text{ кг/м}^2 \text{ с}^{-1}$, $B = 1 \text{ Тл}$, $l = 2 \text{ см} = 0,02 \text{ м}$. При этих значениях величин, входящих в формулу (9), получаем чувствительность $s = \mathcal{E}_0^2 / J = 4 \times 10^{-11} \text{ в}^2 \text{ м}^2 / \text{Вт}$. При интенсивности ультразвука $J = 1 \text{ Вт/см}^2 = 10^{-4} \text{ Вт/м}^2$ получим величину $\mathcal{E}_0 \sim 0,8 \text{ мВ}$.

Если в образце распространяется сдвиговая ультразвуковая волна, то для работоспособности рассматриваемого метода необходимо образец ориентировать вдоль магнитных силовых линий, при этом величина э.д.с индукции, наводимой в металлизированной полоске будет по-прежнему определяться по формуле (9) 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 (11) показывают, что минимальное значение величины ξ , 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, попадающий 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 A/d , регистрируемых

емкостным способом, можно определить по формуле $A/d = U_{\sim}/U_0$, где d – зазор между пластиной и торцом образца. Из этой формулы следует, что величину относительной деформации можно определить из соотношения

$$z = 2\pi A/\lambda = 2\pi dU_{\sim}/(U_0\lambda). \quad (12)$$

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 датчика.

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

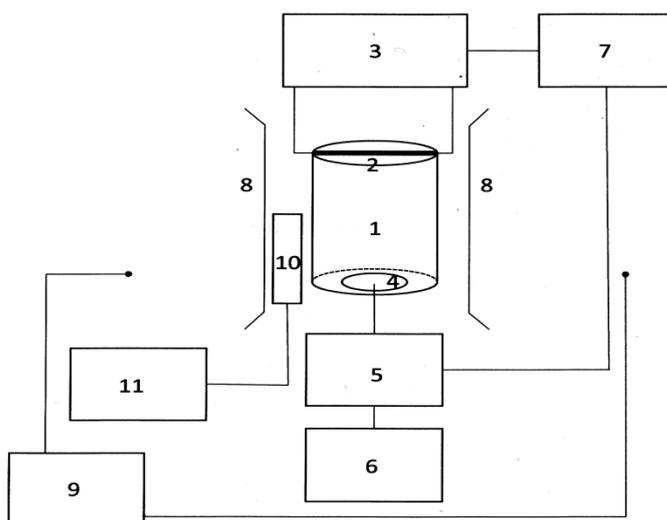


Рис. 2.

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 мТл при зазоре 50 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.

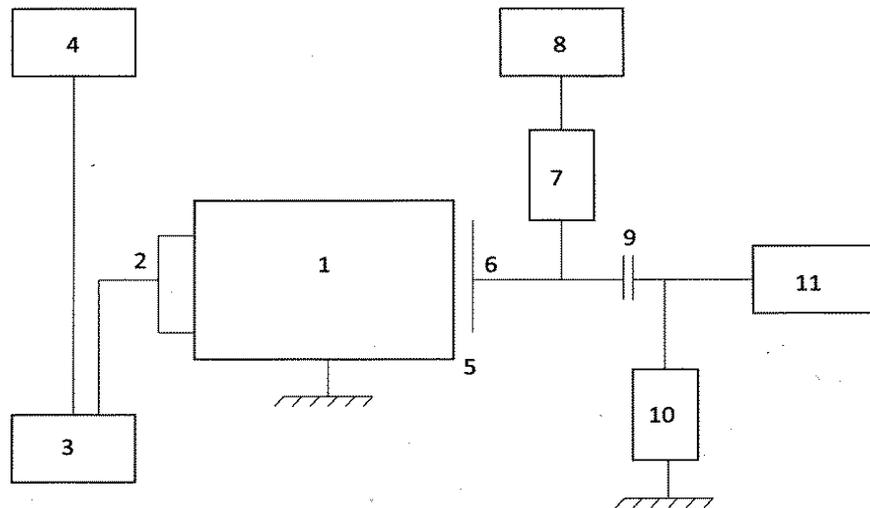


Рис. 3.

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 $\rho_{al} = 2,7 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$. Образец имеет форму цилиндра диаметром 30 мм и высотой – 20 мм, плоскопараллельность торцов 2 мкм. Скорость продольных ультразвуковых колебаний $v_L = 5200 \text{ м/с}$, скорость сдвиговых колебаний $v_T = 3130 \text{ м/с}$ [5].

На нижний торец образца посредством акустической склейки приклеен тонкий пьезоэлектрический преобразователь из монокристалла 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 LiNbO_3 среза $Y+163^\circ$ для возбуждения сдвиговых колебаний с резонансной частотой 10 МГц. Необходимо помнить, что при измерениях величины z 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 с плотностью $\rho_{ст.} = 2,2 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$, имеет форму в виде цилиндра с размерами как образцы № 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 заключается в том, что на нижнем торце приклеен тонкий пьезоэлектрический преобразователь из монокристалла LiNbO_3 среза $Y+163^\circ$ для возбуждения сдвиговых колебаний с резонансной частотой 10 МГц.

При применении емкостного способа для определения относительных деформаций ξ изучают только продольные колебания, возбужденные с помощью пьезоэлектрического преобразователя из ниобата лития среза $Y+3b^0$ в образцах алюминия и кварцевого стекла, при этом для проведения лабораторной работы 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 кварцевого 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 мТл) и удостовериться, что величина э.д.с. индукции превышает сигнал наводки при этих условиях.

Далее можно продолжить проводить исследования амплитудных, полевых и частотных зависимостей величины наводимой э.д.с. 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 кварцевого стекла) тщательно и надежно заземлены. При смене образца источник постоянного напряжения должен быть выключен. Далее проводят измерение амплитудных, полевых и частотных зависимостей величины U_{\sim} (см. соотношение (12)) при различных значениях частоты (в пределах полосы частот эффективного излучения ультразвука), и амплитуды переменного напряжения на пьезопреобразователе (10–100В), и при различных значениях разности потенциалов (10–100В) 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 (10);
- 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 атомно-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, с. 379.
7. И.Г. Михайлов, В.А. Шутилов. Акустический журнал, 1964, 10,1, с. 98.
8. В.А. Шутилов, Г.Л. Антокольский, В.М. Сарнацкий, Л.Н. Ферштат. Приборы и техника эксперимента, 1973, № 4, с. 253.
9. Б.М. Горкунов, И.В. Тюба, Л.В. Глебова. Методы и приборы прикладной акустики 2010, т.25, с.116.