

ПРИМЕНЕНИЕ СОСТАВНОГО АКУСТИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. И. Хижный, В. В. Тараканов, Т. М. Хижная

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,
12, ул. Академика Проскуры, Харьков, 61085, Украина*

E-mail: khizh@ire.kharkov.ua

Описана методика измерений поглощения и дисперсии скорости высокочастотных ультразвуковых волн, основанная на использовании составного акустического резонатора. Указанная методика реализована при исследовании малых изменений поглощения и дисперсии фазовой скорости звука в борате железа FeBO_3 толщиной ~ 140 мкм на частоте ~ 200 МГц. Ил. 8. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: высокочастотная ультразвуковая волна, составной акустический резонатор, поглощение звука, дисперсия фазовой скорости звука, борат железа.

Метод резонансной ультразвуковой спектроскопии (РУС) в настоящее время широко применяется в технике физического эксперимента и успешно конкурирует с импульсными методами измерений [1]. Методом РУС достигнута самая высокая точность измерения упругих модулей материалов, он позволяет также наиболее быстро и точно осуществлять неразрушающий контроль материалов [1-3]. Этим методом изучается резонансный отклик составного акустического резонатора в некотором частотном домене, затем решается обратная задача нахождения скорости и затухания акустических волн по измеренным спектрам. Согласно известным данным минимальные размеры исследуемых образцов методом РУС $\sim 1\text{мм}^3$. В работе [4] предложена процедура нахождения акустических параметров образцов (субмиллиметровых размеров) в СВЧ диапазоне, основанная на измерении и анализе частотных зависимостей амплитуды и фазы коэффициента отражения электромагнитных волн от составного акустического резонатора. Она эффективна лишь при относительно больших абсолютных уровнях сигнала, при условии несогласованного режима измерений, а также требует специально подготовленных широкополосных пьезопреобразователей.

Предметом нашей работы является обоснование методики измерений малых изменений поглощения и скорости объемных акустических волн в субмиллиметровых пластинках твердых тел. Она основана на использовании составного акустического резонатора (САР), который включает слой исследуемого вещества (образец), два пьезопреобразователя и два экранирующих слоя металла. В режиме непрерывной генерации измеряется «на проход» амплитуда и фаза акустической волны в САР на частоте механических резонансов образца. Точность измерений изменения поглощения и скорости звука определяется стабильностью СВЧ генератора и чувствительностью регистрирующего амплитуду и фазу прибора. В условиях данных опытов точность относительных

измерений вариации скорости звука $\sim 10^{-5}$, а поглощения $\sim 10^{-3}$ на частоте $f \sim 200$ МГц.

В качестве примера применения данной методики представлены результаты измерения изменения поглощения и дисперсии скорости продольного звука в 140 мкм пластинке бората железа (FeBO_3) - легкоплоскостном антиферромагнетике. Изучен акустический отклик образца на процесс его монодоменизации во внешнем подмагничивающем поле, лежащем в его базисной плоскости. При этом обнаружены осцилляции скорости и особенности поглощения продольного звука, связанные с динамикой магнитных структур при монодоменизации бората железа.

1. Модель. Резонансные особенности коэффициента прохождения акустических волн при изменении частоты имеют место всякий раз, когда на толщине структуры укладывается целое число полуволн. Форма амплитудно- и фазо-частотной характеристик существенно зависят от поглощения и скорости звука в составляющих резонатор средах [5]. Поэтому для адекватного выбора модели необходимы априорные данные эксперимента об амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) характеристиках САР. Будем предполагать, что толщины всех слоев «сэндвича» САР известны, а образец имеет наибольшую толщину d_6 , т. е. $d_6 \gg d_j$, j – номера слоев. Будем также полагать, что интегральная рабочая полоса пьезопреобразователей включает не менее двух собственных механических резонансов образца. В наших экспериментах это требование выполнялось для 15 и $20,5$ мкм LiNbO_3 – пьезопреобразователей и 140 мкм пластинки бората железа. Интегральная рабочая полоса частот преобразователей $\sim 170 - 250$ МГц позволяла наблюдать три резонанса на образце с номерами $n = 6 - 8$ ($n = d / (\lambda / 2)$, λ – длина волны звука в образце), с частотным интервалом повторения ~ 30 МГц (скорость продольного звука в борате железа - $8,6 \cdot 10^5$ см/с) (рис. 1,а).

САР в разрезе показан на рис. 2. Все слои последовательно пронумерованы. Здесь 1, 11 – полубесконечный «согласующий» слой; 2, 10 – слои пьезоэлектрика; 3, 5, 7, 9 – промежуточные слои акустической связки; 4, 8 – медные прокладки; 6 – образец с плоскопараллельными гранями.

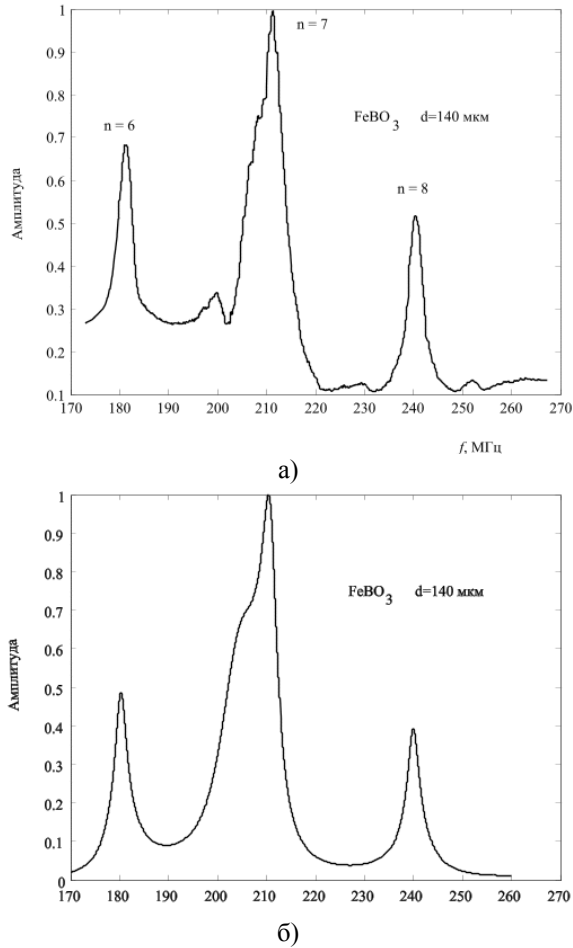


Рис. 1. Запись АЧХ САР: а) эксперимент; б) расчет

Пьезопреобразователи сами по себе представляли составной акустический резонатор: металлический электрод (держатель и демпфер) - акустический клей (эпокси) - пьезоэлектрик, обеспечивающий возбуждение заданной моды.

Комплексный коэффициент прохождения D акустической волны САР и методика его расчета для произвольного числа слоев подробно рассмотрен в работе [5]. В нашем случае D имеет вид

$$D = \prod_{j=1}^{11} \frac{(z_{in}^{(j)} + z_j) \exp(i\varphi_j)}{z_{in}^{(j)} + z_{j+1}}, \quad (1)$$

$$z_{in}^{(j)} = \frac{(z_{in}^{(j-1)} - iz_j \operatorname{tg}(\varphi_j))}{(z_j - iz_{in}^{(j-1)} \operatorname{tg}(\varphi_j))} z_j, \quad (2)$$

где z_j - акустический импеданс j -го слоя; $z_{in}^{(j)}$ - входной акустический импеданс системы “сн-

двича” из j -слоев; φ_j - набег фазы в j -м слое; $\varphi_j = k_j d_j$, k_j - волновой вектор звука.

2. Численное моделирование. Дальнейшая процедура расчета частотной характеристики $D(\omega)$ в САР состоит из двух этапов. На первом этапе для простейшего случая пластинки образца, нагруженной с двух сторон произвольными акустическими импедансами, мы получим и исследуем аналитическое выражение для $D(\omega)$. Во втором – путем численного расчета рассмотрим реальный САР рис. 2.

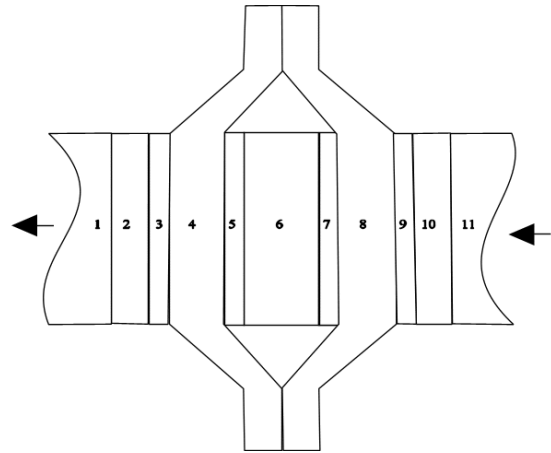


Рис. 2. Разрез САР. Описание нумерации слоев дано в тексте статьи

Для пластинки (или слоя) с акустическим импедансом z_2 , нагруженной на импедансы z_1 и z_3 , общий вид решения уравнений (1) и (2) для D в терминах импедансов z и фаз φ дано во многих публикациях, см. например [5]. Здесь для наглядности мы приведем решение в виде, позволяющем исследовать форму линии механических резонансов. Для этого введем коэффициент отражения на границах слоя

$$V_{12} = (z_1 - z_2)/(z_1 + z_2),$$

$$V_{23} = (z_2 - z_3)/(z_2 + z_3).$$

Положим $z_1 = z_3$, тогда $V_{12} = -V_{23} = V$ (здесь $V > 0$). Далее введем коэффициент поглощения звука в слое $k_2 = \beta - i\alpha$, $\beta = \omega/v$, где α - коэффициент поглощения; v - скорость звука в слое. С учетом этого получаем согласно (1) и (2) выражение для D , которое после выделения амплитуды и фазы имеет вид

$$D = \frac{2^{-1/2}(1-V^2)\exp(\gamma)}{(\operatorname{ch}2\Gamma - \cos 2\beta d)^{1/2}} \exp(i\Psi), \quad (3)$$

$$\Psi = -\operatorname{arctg}(\operatorname{tg}(\beta d) \operatorname{cth}\Gamma), \quad (4)$$

здесь $\Gamma = \alpha d + \gamma$ - «эффективный» коэффициент поглощения; $\gamma = |\ln V|$. Заметим, что выражение для амплитуды $|D|$ из (3) после тождественных преобразований сводится к приведенному в работе [6]. Следуя [6], находим механическую добротность Q и условие механического резонанса - экстремум (минимум) знаменателя $|D|$ (3):

$$\sin 2\beta d = -\frac{1}{2Q} \operatorname{sh}\left(\frac{\beta d}{Q}\right). \quad (5)$$

Для типичных добротностей рис. 1,а ($n = 6; 8$) $Q \sim 80$ условие резонанса с высокой точностью можно считать

$$\beta d \cong n\pi, \quad (6)$$

поскольку $\sin 2\beta d$ в (5) отличается от нуля на величину $\sim 10^{-3}$. При условии (6) добротность имеет вид

$$Q = \frac{n\pi}{2\arcsin(\operatorname{sh}\Gamma)}, \quad (7)$$

а максимум амплитуды в резонансе $|D|_{\max}$ определяется эффективным поглощением

$$|D|_{\max} = (1 - V^2) \exp(\gamma) (\operatorname{sh}\Gamma)^{-1}. \quad (8)$$

Формулы (3)-(8) имеют простой смысл. Изменение фазового набега на образце $\varphi = \beta d$ приводит к смещению резонансной линии на оси частот без изменения ее формы, а изменение эффективного поглощения Γ приводит к ее уширению (или сужению) без смещения на оси частот. В общем случае, при изменении и поглощения и фазы (скорости звука), измеряемая амплитуда (или фаза) сигнала на фиксированной частоте есть функция как поглощения, так и скорости звука.

Оценим далее влияние вариаций фазы на амплитуду $|D|$ и поглощение на фазу Ψ в области механического резонанса для коэффициента прохождения. Для этого разложим функции $|D|$ (3) и Ψ (4) в ряд по малым изменениям $\Delta\Gamma = \Gamma - \Gamma_0$ и $\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0$ в области резонанса и ограничимся линейными членами. Полагаем, что изменение поглощения и фазы есть следствие изменения «внешнего» параметра (например, магнитного поля), а Γ_0 и φ_0 соответствующие резонансные значения в отсутствии «внешнего» параметра. При этом условии малости влияния $\Delta\varphi$ на измерения амплитуды имеют вид

$$\left| \operatorname{sh}(2\Gamma_0) \Delta\Gamma \right| \gg \left| \frac{1}{2Q_0} \operatorname{sh}\left(\frac{\varphi_0}{Q_0}\right) \Delta\varphi \right|, \quad (9)$$

а условие малости влияния $\Delta\Gamma$ на измерения фазы имеют вид

$$\left| \frac{\operatorname{cth}\Gamma_0}{\cos^2\varphi_0} \Delta\varphi \right| \gg \left| \frac{\operatorname{tg}\varphi_0}{\operatorname{sh}^2\Gamma_0} \Delta\Gamma \right|. \quad (10)$$

Для наглядности мы приводим соответствующие зависимости для изменения амплитуды $|D|/|D|_{\max}$ (3) от вариации абсолютной величины фазы $\varphi = \beta d - n\pi$ ($n = 6$) при постоянном поглощении Γ_0 (рис. 3) и изменения фазы ψ (4) от поглощения Γ при постоянной фазе φ_0 (рис. 4). На вставке рис. 4 показана зависимость добротности Q от поглощения Γ для номеров резонанса 6, 7, 8 (7). Оба приведенных рисунка соответствуют частоте резонанса с $n = 6$ (рис. 1,а). Как видно на рис. 4, возможные изменения поглощения Γ в интервале 0,1 – 0,16 (60%) изменяют фазу ψ всего лишь на $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ градуса, тогда как изменения фазы φ на 1° дают относительное изменение амплитуды $\sim 10^{-2}$ (рис. 3) для добротностей $Q \sim 70-90$. Согласно рис. 4 (см. вставку) добротности $Q \approx 80$ (резонанс с $n = 6$ рис. 1,а) соответствует «эффективное» поглощение $\Gamma \sim 0,12$. Заметим, что увеличение добротности может существенно изменить все соотношения (рис. 3, 4) в худшую сторону. В реальном эксперименте изменения поглощения и фазы – произвольны. Поэтому исходной предпосылкой применимости методики измерений амплитуды и фазы, и дальнейшего анализа данных является экспериментальный частотный спектр коэффициента прохождения звука, наличие механических резонансов и значения их измеренных добротностей.

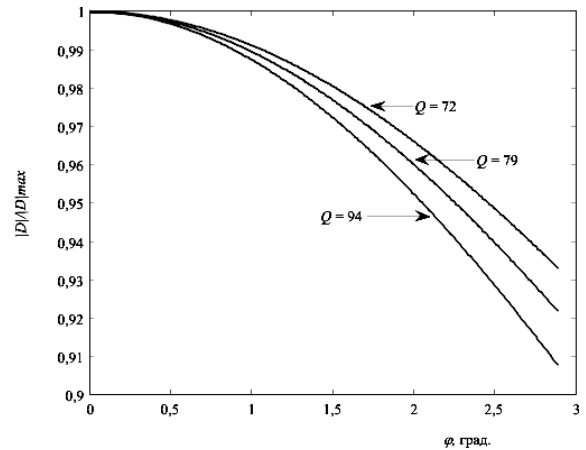


Рис. 3. Зависимость $|D|/|D|_{\max}$ (3) от фазы φ при постоянном поглощении

Рассмотрим далее реальный САР рис. 2. Математическая зависимость коэффициента прохождения акустической волны и частоты в реальном САР чрезвычайно сложна. Поэтому для на-

хождения $D(\omega)$ и $\Psi(\omega)$, а также зависимостей, аналогичных приведенным на рис. 3, 4, был проведен численный расчет. На первом шаге вычислений согласно (2) последовательно вычислялись входные акустические импедансы всех слоев САР. Затем вычислялось произведение (1). Численные значения всех акустических импедансов и скоростей звука для материалов слоев хорошо известны, и их можно найти в работе [7]. Исключение составляет борат железа и слой акустического клея (*Nonaq Stopcock*). Согласно нашим данным для бората железа $z = 36,8 \cdot 10^6$ кг/м²с, для клея $z \sim 3 \cdot 10^6$ кг/м²с, $v \sim 1,5 \cdot 10^5$ см/с. При расчетах использовались следующие соотношения для толщин и поглощения промежуточных слоев (см. рис. 2): $d_j = 2$ мкм; $\alpha_j \sim 70$ см⁻¹ ($j = 3, 5, 7, 9$); $d_j = 12$ мкм; $\alpha_j \sim 70$ см⁻¹ ($j = 4, 8$). Для бората железа $\alpha \approx 7-8$ см⁻¹, а для слоя пьезоэлектрика $\alpha \approx 9$ см⁻¹. Все численные значения поглощения α_j брались для частоты 200 МГц и полагались постоянными в исследуемом интервале частот. Заметим, что поскольку поглощение в САР есть аддитивная величина, то имелась некоторая «свобода» в выборе поглощения в промежуточных слоях.

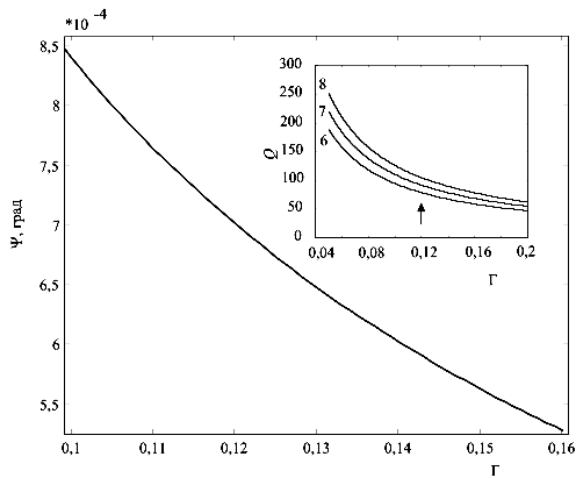


Рис. 4. Зависимость ψ (4) от поглощения Γ при постоянной фазе. На вставке приведена зависимость добротности Q от поглощения Γ для номеров резонансов 6, 7 и 8

Как видно на рис. 2, две внешние акустические нагрузки «сэндвича» САР с номерами 1 и 11 представляют собой полубесконечные слои. Смысл введения их состоит в следующем. Нами использовались стандартные пьезопреобразователи, которые сами по себе представляли собой составной акустический резонатор. Это система слоев: пьезоэлектрик + нагрузка - слой клея (эпоксидная смола -1-2 мкм) и металлическая заглушка (демпфер-держатель толщиной 2 мм). Такой преобразователь несложно рассчитать по

методу [7], который дает зависимость его входного электрического импеданса Z_e от акустических импедансов нагрузок Z_1 и Z_2 , что имеет смысл при работе «на отражение». При этом Z_e есть сумма электрического импеданса емкости преобразователя и некоторого вклада «акустического» импеданса [7]. Поэтому при решении акустической задачи «на проход» вклад электрических цепей преобразователей представляет собой некоторую «электрическую» добавку в акустический импеданс пьезоэлектрика. Пользуясь матричной формулой (1.4.18) [7] эту добавку можно рассчитать и учитывать при численном расчете.

Однако если ввести слои 1 и 11 (рис. 2), то условие наилучшего согласования экспериментальной АЧХ и расчетной (по добротностям резонансов) требует равенства действительной части входного акустического импеданса двойного слоя (клей - металлическая заглушка) преобразователей и импедансов слоев 1 и 11. Это указывает на то, что электрическое согласование в исследуемой полосе частот (по уровню КСВН - 1,5) соответствовало компенсации реактивной части нагрузок преобразователей, вносимых электрическими цепями акустическим импедансом. Поэтому внешние акустические нагрузки САР 1 и 11 имели величину $z \sim (2-2,6) \cdot 10^6$ кг/м²с. По сути, это были практически единственные «подгоночные» параметры задачи.

Результат расчета АЧХ САР - $|D|/|D|_{\max}$ показан на рис. 1,б. Сравнение рис. 1,а и рис. 1,б указывает на согласование расчета и эксперимента. Согласно рис. 1 область частот ~ 210 МГц соответствует перекрытию центра полосы пропускания преобразователей и резонанса образца с номером 7, это должно затруднять интерпретацию результатов измерений на этом резонансе. В этой области частот имеем неоднородное уширение линии резонанса из-за изменения фазы при отражении на промежуточных слоях «сэндвича», оно сопровождается немонотонными зависимостями фазовой характеристики (которая здесь не приведена).

Проведем далее численные оценки для влияния вариации фазы и амплитуды на комплексный коэффициент прохождения D для САР, подобные приведенным выше для простого случая одиночной нагруженной пластинки. Результат численного моделирования для частоты, соответствующей резонансу с $n = 6$, показан на рис. 5, 6. Из него следует, что за исключением дополнительного фазового сдвига (рис. 6) картина практически не отличается от случая одиночной пластинки. На вставке к рис. 6 показано влияние отстройки от точного значения резонанса $\Delta f/f_{\text{рез}}$ ($f_{\text{рез}} = 180,282$ МГц) на зависимость

измеряемой фазы Ψ от затухания (поглощения) в образце - αd . Эта отстройка согласно рис. 6 не должна превышать $\sim |2 \cdot 10^{-4}|$ для добротностей рис. 5 и уменьшается при увеличении добротности. Обычно резонансную частоту можно поддерживать на уровне 10^{-5} - 10^{-6} без применения специальных средств.

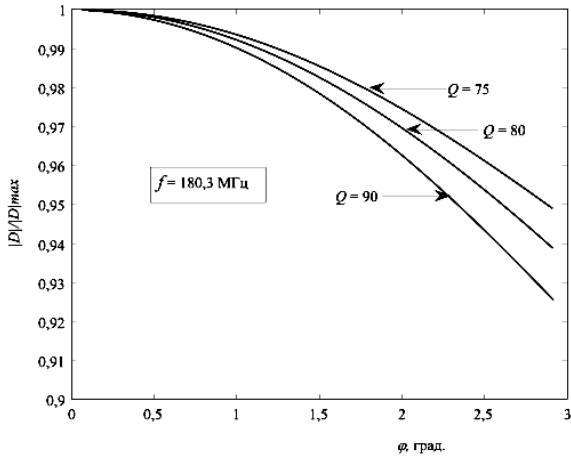


Рис. 5. Расчетная зависимость $|D|/|D|_{\max}$ (3) от фазы φ при постоянном поглощении для САР

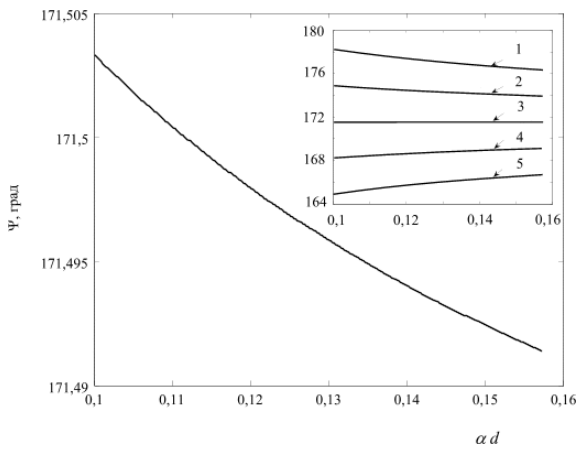


Рис. 6. Расчетная зависимость ψ (4) от затухания в образце αd при постоянной фазе для САР. На вставке приведено влияние отстройки от точного значения резонанса $\Delta f/f_{\text{рез}}$ ($f_{\text{рез}}=180,282$ МГц) на зависимость измеряемой фазы от затухания: 1 - $\Delta f/f_{\text{рез}} = -7,3 \cdot 10^{-4}$; 2 - $\Delta f/f_{\text{рез}} = -4,5 \cdot 10^{-4}$; 3 - $\Delta f/f_{\text{рез}} = -1,7 \cdot 10^{-4}$; 4 - $\Delta f/f_{\text{рез}} = 1,03 \cdot 10^{-4}$; 5 - $\Delta f/f_{\text{рез}} = 3,8 \cdot 10^{-4}$

Резюмируя вышесказанное, отметим, что измерения девиации поглощения и скорости звука в описанной методике возможны только при наличии адекватной информации о реакции САР на внешнее возмущение. Она включает величины

механических добротностей и порядок изменения поглощения и фазы в функции внешнего параметра. В данном случае для добротности $Q \sim 100$ (и менее) измерения девиации фазы на резонансной частоте дают прямую информацию о скорости звука в образце. Однако для получения адекватной информации об изменении поглощения необходимо учитывать (корректировать) результаты измерений амплитуды с учетом соотношений между изменением фазы и амплитуды.

Поясним это на примере. Пусть измеренные зависимости амплитуды - $\Delta U_{\Sigma}(H)$ и фазы - $\Delta \Psi(H)$ (H - внешний параметр, а символ Δ означает изменение сигнала при введении H). Тогда

$$\Delta U_{\Sigma}(H) = \Delta U(H) + \Delta U_{\Psi}(H) \quad (11)$$

где $\Delta U(H)$ - искомое изменение амплитуды; $\Delta U_{\Psi}(H)$ - вклад в амплитуду изменения фазы. Второе слагаемое (11) находим следующим образом. Измеряем калибровочные зависимости $\Delta U_{\Psi}(\varphi)$ (см. рис. 5) и $\Delta \Psi(\varphi)$ при малых девиациях φ в резонансе (т. е. девиациях частоты, полагая, что поглощение в образце при этом не изменяется). Затем калибровочные кривые аппроксимируем полиномами соответственно второй и первой степени по φ . В нашем случае они хорошо совпали с расчетными (рис. 5). Далее программными средствами на ПК находим зависимость $\varphi(\Delta \Psi(H))$ и $\Delta U_{\Psi}(\Delta \Psi(H)) = \Delta U_{\Psi}(H)$.

Кратко описанный здесь алгоритм входил в разработанный нами пакет программных средств обработки экспериментальных данных измерений поглощения и скорости акустических волн в твердых телах.

Далее приводится пример применения выше описанной методики в измерениях изменения поглощения и дисперсии скорости для бората железа в магнитном поле.

3. Эксперимент и обсуждение результатов. Методика эксперимента по измерению фазовой скорости звука и образцы бората железа - FeBO_3 ранее нами были описаны в работе [8]. В настоящих экспериментах панорамный приемник заменялся векторметром (фазометром) с рабочим диапазоном 10-1000 МГц, чувствительностью - 80 дБ/Вт по амплитуде и $0,2^\circ$ по фазе. Имелся также дополнительный канал опорного сигнала: ВЧ генератор - фазометр. В полосе частот рис. 1,а акустическая измерительная ячейка (рис. 2) согласовывалась по входу и выходу на уровне КСВН-1,5. Данное значение КСВН обеспечивало оптимальное наблюдение трех последовательных механических резонансов на образце бората железа. Измерительная ячейка располагалась в термостате при комнатной температуре.

АЧХ САР регистрировалась на ПК при изменении частоты генератора. Измерения девиации поглощения и фазы в магнитном поле проводились при настройке частоты генератора на резонанс САР с точностью не хуже 10^{-5} . Для введения данных на ПК мы использовали звуковую плату ПК, имеющую широкий динамический диапазон (~ 120 дБ), малый уровень шума на частоте временной выборки сигнала 8 кГц. С этой целью сигналы постоянного тока (амплитуда и фаза) с фазометра поступали на блок преобразователя (ключа), с которого амплитудно-модулированный НЧ сигнал поступал на ПК. Вся дальнейшая обработка сигналов: цифровая фильтрация, демодуляция и т. д. проводилась программными средствами на ПК.

Экспериментальные записи фазы $\Psi = \Psi(H) - \Psi(H=0)$ и амплитуды $A = A(H)/A(H=0)$ для звука продольной поляризации при его распространении по нормали к базисной плоскости образца FeVO_3 приведены соответственно на рис. 7, 8. Частота эксперимента соответствовала резонансу с $n=6$ (рис. 1,а), $f \sim 180$ МГц. Для оценки отношения сигнал / шум приведены данные без фильтрации шумов. Запись рис. 8 приведена после коррекции по алгоритму, приведенному выше. На вставке к этому рисунку представлен фрагмент записи при $H \sim 40$ Э, где имеется максимальное изменение фазы, следовательно, и максимальная коррекция амплитудных данных. Здесь пунктиром приведена кривая без коррекции, а сплошная кривая – с ее учетом. Максимальное изменение фазы $\Psi \sim 5^\circ$ в поле $H \sim 40$ Э соответствовало поправке к амплитуде $\sim 3 \cdot 10^{-3}$, тогда как максимальное относительное изменение амплитуды A было на уровне $\sim 10^{-1}$. Как видим, в данном случае приведенными поправками можно пренебречь.

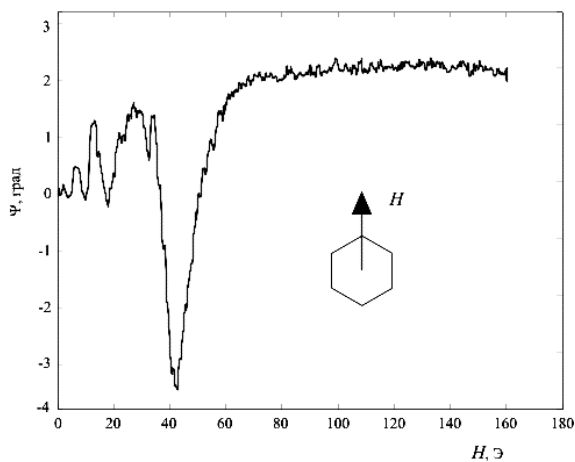


Рис. 7. Экспериментальная запись полевой зависимости фазы сигнала $\Psi(H)$ в 140 мкм пластинке бора железа

Согласно нашим измерениям максимальная дисперсия скорости рис. 7 составляет величину $|\Delta v/v| \cong 4,77 \cdot 10^{-4}$ ($H \sim 40$ Э), а минимальная для монотонного хода ($0 < H < 160$ Э) - $|\Delta v/v| \cong 1,77 \cdot 10^{-4}$.

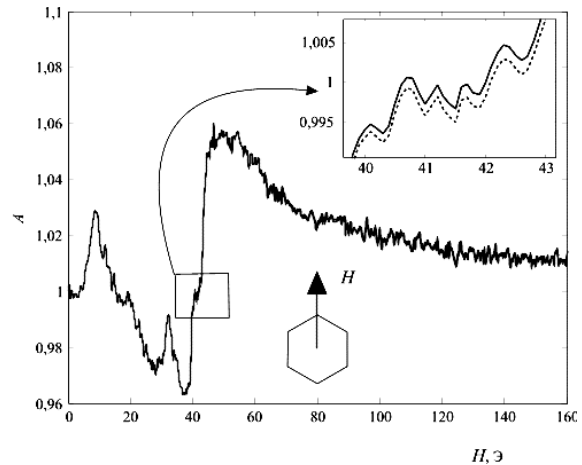


Рис. 8. Экспериментальная запись полевой зависимости амплитуды сигнала - $A=A(H)/A(H=0)$ с учетом коррекции. На вставке приведен фрагмент записи: сплошная линия - с учетом коррекции; штриховая - без коррекции

Относительное изменение поглощения с учетом (8) можно видеть на рис. 8: для монотонного хода - $1,5 \cdot 10^{-2}$ и $9 \cdot 10^{-2}$ - для немонотонной зависимости.

Как показано на рис. 7, 8 магнитное поле было направлено вдоль зеркальной оси симметрии C_2 кристалла. Намагничивание образца сопровождается движением и последовательным выходом из образца доменных стенок блоховского типа. Выход доменной стенки приводит к уменьшению поглощения звука и дает дисперсию его фазовой скорости. Детальное изучение обнаруженного явления выходит за рамки данного сообщения и требует дальнейших экспериментальных и теоретических исследований. Заметим, однако, что полученные зависимости в поле H свидетельствуют о наличии связи упругой подсистемы (продольных акустических фононов) с магнитными неоднородностями - доменными стенками. Важно отметить, что для продольной звуковой волны такая связь возможна лишь при наличии пьезомагнетизма бора железа.

Выводы. Таким образом, обоснована и реализована методика измерения малых изменений поглощения и скорости высокочастотных звуковых волн в магнитных образцах субмиллиметровых размеров. Методика основана на измерениях и численном моделировании коэффициента прохождения волн в САР и измерении амплитуды и фазы акустического сигнала в резонанс-

ных условиях. Для кристаллов антиферромагнетика бората железа на частоте ~ 200 МГц в данной методике обнаружено относительное изменение поглощения $(1,5-9) \cdot 10^{-2}$ и дисперсия скорости $(1,8-4,8) \cdot 10^{-4}$ продольных ультразвуковых волн в подмагничивающем магнитном поле. Данный результат указывает на наличие пьезомагнетизма бората железа.

Авторы выражают благодарность А. П. Королюку за полезные обсуждения результатов работы.

1. *Leisure R. G., Willis F. A.* Resonant ultrasound spectroscopy // *J. Phys.: Condens. Matter.* - 1997. - 9, - P.6001-6029.
2. *Migliori A., Darling T. W.* Resonant ultrasound spectroscopy for materials studies and non-destructive testing // *Ultrasonics.* - 1996. - 34, - P.473-476.
3. *Petit S., Duquennoy M., Ouafitouch M., Deneuille et al.* Non-destructive testing of ceramic balls using high frequency ultrasonic resonance spectroscopy // *Ultrasonics.* - 2005. - 43, - P.802-810.
4. *Крутов Б. Н., Мансфельд Г. Н., Френк Ф. Д.* Определение акустических параметров тонких слоев и пленок по электрическим характеристикам составного резонатора // *Акустический журн.* - 1994. - 40, №4. - С.633-639.
5. *Бреховских Л. М., Годин О. А.* Акустика слоистых сред. - М.: Наука, 1989. - 416 с.
6. *Мэзон У.* Физическая акустика / Пер. с англ. под ред. Л. Д. Розенберга. - М.: Мир, 1966. - Т.1. - 592 с.
7. *Кайно Г.* Акустические волны / Пер. с англ. под ред. О. В. Руденко. - М.: Мир, 1990. - 652 с.
8. *Тараканов В. В., Хижный В. И.* Смягчение «немагнитной» упругой моды в пластинке антиферромагнетика FeBO_3 // *Физика низких температур.* - 1996. - 22, №7. - С.752-757.

APPLICATION OF COMPOUND ULTRASOUND RESONATOR FOR MAGNETIC MATERIALS INVESTIGATION

V. I. Khizhnyi, V. V. Tarakanov, T. M. Khizhnaya

A method of high-frequency ultrasound waves absorption and velocity dispersion based on application of a compound acoustic resonator has been described. This method is realized for investigation of small absorption variation and velocity dispersion of sound in iron borate FeBO_3 with a thickness ~ 140 μm at frequency ~ 200 MHz.

Key words: high-frequency ultrasound wave, compound acoustic resonator, absorption of sound, phase velocity dispersion of sound, iron borate.

ЗАСТОСУВАННЯ СКЛАДОВОГО АКУСТИЧНОГО РЕЗОНАТОРА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ МАГНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ

В. І. Хижний, В. В. Тараканов, Т. М. Хижна

Описано методику вимірів поглинання і дисперсії швидкості височастотних ультразвукових хвиль, яка застосована на використанні складового акустичного резонатора. Зазначена методика реалізована при дослідженні малих змін поглинання і дисперсії фазової швидкості звуку у бораті заліза FeBO_3 завтовшки ~ 140 мкм на частоті ~ 200 МГц.

Ключові слова: височастотна ультразвукова хвиля, складовий акустичний резонатор, поглинання звуку, дисперсія фазової швидкості звуку, борат заліза.

Рукопись поступила 13 ноября 2007 г.