

## АКУСТИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО НЕРЕЗОНАНСНОГО ТИПА ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ЧАСТОТАХ 500-1200 МГц

А.Р. Булатов, Х.Г. Богданова

Казанский физико-технический институт имени Е.К. Завойского КНЦ РАН,  
Сибирский тракт 10/7, 420029 Казань, Россия, abrphdr.bulatov@yandex.ru

Описано разработанное авторами акустическое устройство нерезонансного типа для генерации высокочастотных акустических волн в широком диапазоне частот. Реализованная в конструкции геометрия электродов обеспечивает высокую однородность и перпендикулярность вектора напряженности  $E$  электрического поля, необходимые для возбуждения ультразвуковых волн в широком диапазоне частот  $f = 500-1200$  МГц, что невозможно осуществить с помощью акустических устройств резонансного типа. Уменьшение электрических потерь акустического устройства достигается согласованием его с кабелями и выходным каскадом ВЧ усилителя по волновому сопротивлению. Приводится перечень научных результатов по изучению фазовых переходов, скоростей, модулей упругости ультразвука в магнитных полупроводниках, полученных с использованием данного акустического устройства.

### Введение

Одним из информативных методов для исследования твердых тел является высокочастотная ультразвуковая (УЗ) спектроскопия. Этот метод обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами.

Во-первых, использование высокочастотных ультразвуковых волн дает возможность исследовать неоднородные и многофазные образования в исследуемых объектах размерами сотен нанометров при соответствии неоднородностей длине УЗ волн.

Во-вторых, скорости ультразвуковых волн зависят от характера упругих и магнитоупругих взаимодействий, которые значительно изменяются при изменении кристаллической структуры исследуемого вещества. Например, выводы о структурных неоднородностях в манганитах основывались на результатах распространения УЗ волн в частотном диапазоне 1-3 МГц [1]. Однако длина УЗ волн для данного мегагерцового диапазона  $\lambda = 5-10$  мм превышала на много порядков размеры предполагаемых неоднородностей в манганитах. Для исследования особенностей формирования структурных и магнитных неоднородностей вблизи фазовых переходов с помощью ВЧ - ультразвуковой спектроскопии нами разработано оригинальное акустическое устройство нерезонансного типа.

### Основная часть

На рис. 1 представлена конструкция акустического устройства. Оно выполнено из немагнитного медного сплава (латунь) и состоит из двух идентичных акустических ячеек (передающей и приемной) 10, соединенных друг с другом болтами 11. Внутри ячеек располагаются нерезонансные пьезоэлементы цилиндрической или параллелепидной формы 8, изготовленные из ниобата лития  $x$  и  $z$ - срезов разной длины в зависимости от условий эксперимента. Между пьезоэлементами при помощи акустической связки вклеивается исследуемый образец 9. Связка должна обеспечить наиболее полное согласование пьезоэлектрика и образца как для продольных, так и для поперечных волн. Кроме того, связка должна обладать малыми потерями энергии, быть доста-

точно упругой, чтобы различие коэффициентов теплового расширения пьезопреобразователя и образца не приводило к ее разрыву. Удовлетворительные результаты дало применение в качестве связки силиконового масла ГКЖ, а также эпоксидной смолы с добавлением пластификатора. Используемые смазки выдерживают весь цикл изменения температуры от комнатной до гелиевой и обратно.

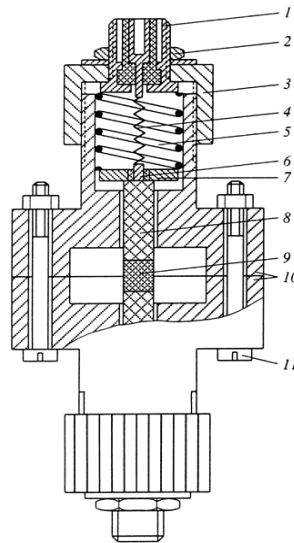


Рис. 1. Конструкция акустического устройства: 1 - разъем стандартного типа (СРГ-50-273); 2 - гайка  $\varnothing 0.15$ ; 3 - гайка  $\varnothing 1.2$ ; 4 - пружина; 5 - пружина; 6, 7 - электрод; 8 - нерезонансные пьезоэлементы цилиндрической или параллелепидной формы из ниобата лития  $x$  или  $z$ -срезов; 9 - исследуемый образец; 10 - конструкция акустического устройства; 11 - болты

Высокочастотный электромагнитный импульс, с помощью которого на поверхности пьезопреобразователя возбуждаются объемные ультразвуковые волны, подводится через разъем стандартного типа (СРГ-50-273) 1, закрепленный гайкой 2, и пружину 4 к центральному излучающему электроду 6. При этом, значительное уменьшение электрических потерь акустического устройства достигалось согласованием его с кабелями и вы-

ходным каскадом ВЧ усилителя по волновому сопротивлению. Применение в устройстве входного разъема, согласованного по волновому сопротивлению, свело задачу согласования к определению оптимальных геометрических размеров входной части акустического блока. Входное волновое сопротивление в данной конструкции главным образом определяется длиной  $l_{in}$  и радиусом  $r_{in}$  его входной части, а также радиусом  $r_{spr}$  подводящей пружины 4. Поскольку шаг  $h$  центральной пружины 4 в рабочем сжатом положении был намного меньше его радиуса ( $h \ll r_{spr}$ ), то при оценке входной емкости и индуктивности было использовано приближение коаксиальных цилиндров ( $r_{in} \gg r_{spr}$ ). В этом приближении входная емкость акустической ячейки  $C_{in}$  определялось из соотношения:

$$C_{in} = \frac{2\pi \epsilon_0 l_{in}}{\ln(r_{in}/r_{spr})}, \quad (1)$$

и, соответственно, индуктивность  $L_{in}$ :

$$L_{in} = \frac{l_{in}}{2\pi} \left[ \mu_0 \ln \frac{r_{in}}{r_{spr}} + \frac{\mu_w^4}{2(r_w^2 - r_{in}^2)^2} \cdot \ln \frac{r_w}{r_{in}} - \frac{\mu_w^2}{2(r_w^2 - r_{spr}^2)^2} \right], \quad (2)$$

$$r_w = r_{in} + w,$$

где  $r_{in}$ ,  $r_w$  - внутренний и внешний радиусы входной части акустической ячейки,  $r_{spr}$  - радиус центральной пружины,  $w$  - толщина стенки [2]. В расчетах магнитная проницаемость  $\mu$  принималась равной  $\mu_0$ , так же  $\mu = (1+\chi)\mu_0$ , где  $\chi$  - магнитная восприимчивость диамагнитного материала латунь, равная  $\chi=10^{-5}$ .

Геометрия и радиусы входной части акустической ячейки определялись ее конструктивными особенностями, в первую очередь, размерами подводящего стандартного разъема и размерами пьезопреобразователей. В данной конструкции диаметр цилиндра входной части был выбран равным 10 мм ( $r_{in} = 5$  мм), а его длина  $l_{in} = 15$  мм.

Исходя из этого, максимальное согласование достигалось варьированием диаметра подводящей пружины 4 ( $r_{spr}$ ). Исследование величины входного волнового сопротивления  $|Z_{in}| = \sqrt{L_{in}/C_{in}}$ , от функции радиуса  $r_{spr}$  при выбранных значениях других размеров, позволило найти оптимальное значение  $r_{spr} = 1.5$  мм, при которых  $|Z_{in}|$  принимает значение близкое к 50 Ом. Следует отметить, что вращением гайки 3 можно было изменить степень сжатия пружины 4, добиваясь точного согласования по волновому сопротивлению за счет малого изменения шага пружины и надежного соприкосновения электрода 6 с торцевой поверхностью пьезопреобразователя. В свою очередь, электрод 7 прижимался к пьезопреобразователю пружинкой 5, удерживаемой гайкой 3.

Применение в конструкции электрода пружинного типа 4 и удерживающей пружины 5, за счет подвижности электродов 6 и 7, дало возможность исследовать образцы различных толщин, достигая при этом значительной жесткости и надежности крепления, а также юстировки образца. Наличие полости, образованной акустическими ячей-

ками, позволяло размещать образцы, размеры которых в несколько раз превышают диаметр преобразователя, что в свою очередь уменьшало влияние боковых стенок образца (отражение, дифракция).

Реализованная в конструкции геометрия электродов обеспечивала высокую однородность поля и перпендикулярность вектора напряженности  $E$  электрического поля, необходимые для возбуждения ультразвуковых волн в широком диапазоне частот  $f = 500-1200$  МГц, что невозможно осуществить с помощью акустических устройств резонансного типа (объемные акустического резонаторы). Надежная изоляция и защита от пробоя между электродами 6 и 7 достигались за счет применения тонкого, плотно прилегающего фторопластового кольца. Напряженность электрического поля в зазоре между электродами 6 и 7 в зависимости от мощности ВЧ-генератора могла составлять свыше 2000 В/мм, обеспечивая тем самым возбуждение ультразвуковых колебаний в образце на генерируемых частотах с амплитудой, достаточной для регистрации приемным устройством.

При проведении экспериментов акустическое устройство помещается в разработанный нами гелиевый криостат, который позволяет использовать как жидкий гелий, так и азот. Акустическое устройство, обладая малыми размерами ( $60 \times 25$  мм<sup>2</sup>), позволяет, в случае необходимости, ориентировать образец внутри "пальца" криостата как относительно оси криостата, так и относительно внешних полей в пределах от 0° до 45°. Выводы от устройства выполнены из коаксиального кабеля (ПК - 50-2-21), проложенного внутри трубок из нержавеющей стали, которые выводились на крышку криостата и оканчивались герметичными высокочастотными разъемами (СРГ-50-273Ф). Для устранения влияния криогенной жидкости на акустические свойства образца (снятия акустической нагрузки) при сборке акустического устройства использовались прокладки из тонкой (0.5 мм) вакуумной резины, а соединения пропаявались вакуумным припоем. Конструкция второй приемной акустической ячейки, с которой снимался сигнал акустического отклика, аналогична описанной выше.

Акустическое устройство данного типа позволяет выполнять измерения по схеме «на прохождение», когда высокочастотное возбуждающее напряжение прикладывается при помощи емкостного датчика (электроды 6 и 7) к торцу первого пьезоэлемента, а сигнал акустического отклика, прошедшего через образец и преобразователи, снимается при помощи аналогичного датчика с торца второго преобразователя. Для генерации ультразвуковых колебаний на частотах 500-1200 МГц использовался метод поверхностного возбуждения, основанный на использовании собственного пьезоэффекта ниобата лития с коэффициентом электромеханической связи ~17% [2]. Экспериментально было установлено, что амплитуда неосновных типов волн не превышала 1-2% к заданной акустической моде.

Временные параметры (длительность, интервалы) измеряются на цифровом запоминающем

двухканальном осциллографе АСК-3106. С осциллографа информация о сигнале подается на персональный компьютер, с помощью которого производится запись, накопление и обработка полученного сигнала.

На экране монитора наблюдается эхо-экспонента, являющаяся результатом многократного отражения акустического импульса от торцов образца и несущая в себе информацию о затухании и скорости распространения высокочастотных ультразвуковых волн в образце. Полученные эхо-экспоненты многократно усредняются по времени, после чего записываются в память персонального компьютера для дальнейшей обработки

### Заключение

С использованием данного акустического устройства в акустическом спектрометре исследован процесс микроскопического расслоения в манганитах состава  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  с  $x = 0.125$  и  $0.175$  по изменению сдвиговых и продольных модулей упругости ВЧ ультразвуковых волн с длиной волны  $\lambda = 5-10$  мкм [3]; обнаружена модовая трансформация продольной акустической волны в квазипоперечную волну в образце манганита  $\text{La}_{0.825}\text{Sr}_{0.175}\text{MnO}_3$  [4]; доказано существование областей ближнего и дальнего порядков янтеллеровски искаженных октаэдров  $\text{MnO}_6$  и их влияние на упругие, магнитные и транспортные

характеристики слаболегированных лантан-стронциевых манганитов [5]; обнаружены новые высокотемпературные структурные переходы в лантан-стронциевых манганитах состава  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  с  $x = 0.125, 0.15, 0.175$  [6].

### Список литературы

1. *Darling T.W.* Measurement of the elastic tensor of a single crystal of  $\text{La}_{0.83}\text{Sr}_{0.17}\text{MnO}_3$  and its response to magnetic fields. *Phys. Rev. B.* 1998. V.57. №9. P.5093-5097.
2. *Матвеев А.Н.* Электричество и магнетизм М.: Высшая школа, 1983. 463 с.
3. *Богданова Х.Г., Булатов А.Р., Голенищев – Кутузов В.А. и др.* Микроскопические неоднородности в кристалле манганита  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x = 0.175$ ) и генерация на них когерентных магнитоупругих колебаний. *Письма в ЖЭТФ.* 2003. Т. 78. Вып. 5. С. 753-756.
4. *Богданова Х.Г., Булатов А.Р., Голенищев – Кутузов В.А. и др.* Трансформация акустической моды вблизи структурного и магнитного фазовых переходов в кристалле  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x = 0.175$ ) *Известия РАН. Сер. Физ.* 2009. Т. 73. № 8. С. 1080-1082.
5. *Богданова Х.Г., Булатов А.Р., Голенищев – Кутузов В.А. и др.* Решеточные, электрические и магнитные эффекты в манганитах лантана  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  ( $x = 0.125; 0.15; 0.175$ ) *Спб.: ФТТ.* 2010. Т. 52. № 11. С. 2238-2243.
6. *Bulatov A.R., Bogdanova Kh.G., Golenishev-Kutuzov V.A. et al.* Structural, Magnetic and Electrical Properties of the Slightly Doped Lanthanum Manganites. *Solid State Phenomena.* 2011. V. 168-169. P. 481-484.

## ACOUSTIC DEVICE OF THE NON-RESONANT TYPE FOR THE EXCITATION OF ACOUSTIC VIBRATIONS AT FREQUENCIES OF 500-1200 MHz

A.R. Bulatov and Kh.G. Bogdanova

*Zavoisky Physical-Technical Institute, Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia, abphdr.bulatov@yandex.ru*

An acoustic device of the non-resonant type for the generation of high-frequency acoustic waves in a wide frequency range developed by the authors is described. The electrode geometry implemented in the construction provides the high homogeneity and perpendicularity of the electric field strength vector  $E$  necessary for the excitation of the ultrasound waves in the wide frequency range  $f = (500-1200)$  MHz that is not possible to implement using acoustic devices of the resonant type. The decrease in the electric losses of the acoustic device is achieved by its wave impedance matching with cables and the high-frequency amplifier output stage. A list of scientific results on studying phase transitions, velocities, elastic modulus of ultrasound in magnetic semiconductors obtained using this acoustic device is presented.