

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 539.4.016.2

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.02.004

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В $YBa_3(PO_4)_3$ КРИСТАЛЛЕ

Ринат Миргазиянович Тазиев

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, пр. ак. Лаврентьева, 13, 630090, Новосибирск, Россия  
taziev@isp.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9164-8245>

**Аннотация.** Новые пьезоэлектрические материалы всё более востребованы для использования в различного рода устройствах (датчиках и т.д.), работающих в широком диапазоне рабочих температур. Технология поверхностных акустических волн (ПАВ) позволяет проводить совместную обработку сигналов с многофункциональных сенсорных элементов датчиков. Новый кристалл  $YBa_3(PO_4)_3$  имеет кубическую симметрию и обладает пьезоэлектрическими свойствами. В работе представлено численное исследование свойств поверхностной акустической волны (ПАВ) в кристалле  $YBa_3(PO_4)_3$ . Фазовая скорость ПАВ, коэффициент электромеханической связи и угол отклонения потока энергии волны исследуется для различных кристаллических срезов кубического кристалла  $YBa_3(PO_4)_3$ . Для Z-среза и направления распространения волны вдоль оси X+45° показано, что ПАВ имеет максимальное значение коэффициента электромеханической связи (0,17%) в кристалле. Для Z+45°-среза и направления распространения волны вдоль оси X коэффициент электромеханической связи равен 0,1%. Оба эти среза кристалла представляют потенциальный интерес для ПАВ-устройств.

**Ключевые слова:**  $YBa_3(PO_4)_3$ , поверхностная акустическая волна.

---

**Для цитирования:** Тазиев Р.М. Численное исследование свойств поверхностных акустических волн в  $YBa_3(PO_4)_3$  кристалле // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19, № 2. С. 172–178. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.02.004.

---

Original article

## NUMERICAL STUDY OF SURFACE ACOUSTIC WAVE PROPERTIES IN $YBa_3(PO_4)_3$ CRYSTAL

Rinat M. Taziev

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 13 Lavrentiev aven., Novosibirsk, 630090, Russia  
taziev@isp.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9164-8245>

**Abstract.** New piezoelectric materials are increasingly in demand for use in various kinds of devices (sensors, etc.) operating in a wide range of temperatures. The technology of surface acoustic waves (SAW) allows one to carry out joint signal processing from multifunctional sensor elements. A new  $YBa_3(PO_4)_3$  crystal has cubic symmetry and possesses piezoelectric properties. The paper presents a numerical study of the surface acoustic wave properties in a new piezoelectric orthophosphate  $YBa_3(PO_4)_3$  crystal. The SAW phase velocity, electromechanical coupling coefficient and power flow deflection angle are studied for different crystal cuts of  $YBa_3(PO_4)_3$ . It is shown that SAW has the maximum value of electromechanical coupling coefficient (0.17%) on the Z-cut and wave propagation direction along the X+45°-axis of the crystal. For the Z+45°-cut and wave propagation direction along the X-axis of crystal, the SAW piezoelectric coupling coefficient is equal to 0.1%. These two cuts of the crystal are potentially useful for SAW device applications.

**Keywords:**  $YBa_3(PO_4)_3$ , surface acoustic wave.

**For citation:** Taziev, R. M. (2022). Numerical study of surface acoustic wave properties in  $\text{YBa}_3(\text{PO}_4)_3$  crystal. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 2(19), 172–178. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.02.004.

## Введение

Новые многофункциональные кристаллические материалы, такие как ортофосфат бария  $\text{YBa}_3(\text{PO}_4)_3$ , привлекают пристальное внимание не только из-за возможности использования в нелинейно-оптической и лазерной областях, но из-за потенциального интереса как пьезокристаллу с возможностью использования в ПАВ-устройствах [1, 2]. Устройства на ПАВ эффективно функционируют в качестве классических ПАВ-фильтров и комбинированных сенсоров давления и температуры [3-5]. Кроме того, в последнее время они активно используются также в системе манипуляции с нано-, микро-объёмами биожидкостей, их взаимном смешивании и переносе (транспорте) микрокапель в заданном направлении на поверхности пьезокристаллических материалов, таких как альфа-кварц, ниобат лития и т. д. [6-9]. Датчики на поверхностных акустических волнах измеряют параметры исследуемой среды, такие как температура, давление, электрическая проводимость, плотность, вязкость и т. д. Устройства на основе новых пьезоэлектрических кристаллах могут работать при высоких температурах до 1000 °С [10-13]. Новый пьезоэлектрический  $\text{YBa}_3(\text{PO}_4)_3$  кристалл кубической симметрии (точечная группа  $\bar{4}3m$ ) имеет температуру плавления 1800 °С [1]. Ни численно, ни экспериментально ранее не были исследованы свойства поверхностных акустических волн в этом кристалле.

## Постановка задачи

Целью настоящей работы является численное исследование характеристик поверхностных акустических волн в Z-, Z- повернутых срезах кристалла  $\text{YBa}_3(\text{PO}_4)_3$ . Для расчета параметров поверхностных акустических волн: фазовой скорости  $V$ , коэффициента электромеханической связи (КЭМС), угла отклонения потока энергии волны от ее волновой нормали мы использовали программу [14]. В численных расчетах использовались материальные константы  $\text{YBa}_3(\text{PO}_4)_3$ , экспериментально найденные в работах [1, 3]. Коэффициент электромеханической связи ПАВ ( $\Delta V/V$ ), определяется

как относительная разность фазовых скоростей волны на свободной и металлизированной поверхностях пьезоэлектрика. Угол среза кристалла задается двумя углами Эйлера ( $\alpha$ ,  $\mu$ ), а направление распространения волны в этой плоскости – углом  $\theta$ . Учитывая симметрию исследуемого кристалла, при фиксированном значении угла  $\alpha=0^\circ$  угол  $\mu$  (угол среза кристалла) варьировался в диапазоне углов от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  с шагом  $2^\circ$ , а угол  $\theta$  (направление распространения волны в плоскости среза) – в диапазоне углов от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  с шагом  $2^\circ$ .

## Результаты численных расчетов и обсуждение

Численные исследования, представленные на рис.1, показали, что в кристалле  $\text{YBa}_3(\text{PO}_4)_3$  имеются следующие экстремальные значения параметров поверхностной волны:

1) Скорость волны меняется в диапазоне для от 2227 м/с до 2245 м/с.

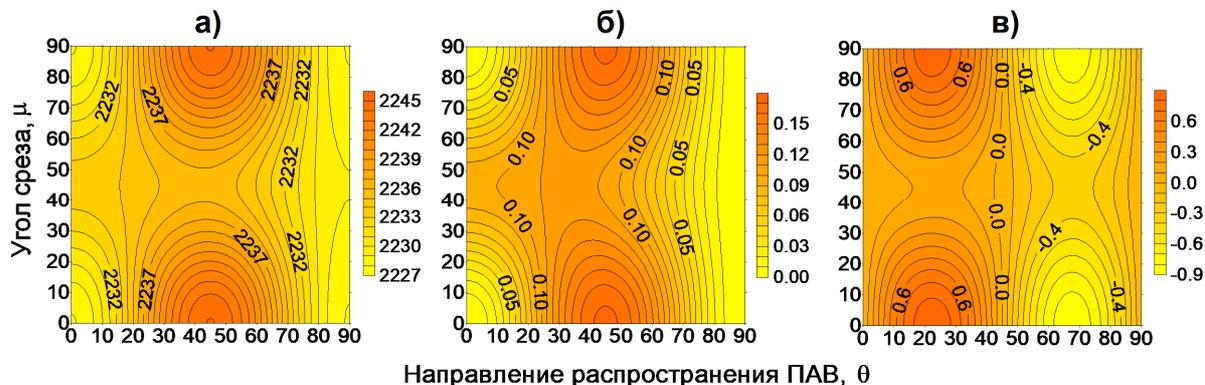
2) Коэффициент электромеханической связи волны меняется в диапазоне от 0% до 0.17%.

3) Угол отклонения потока энергии волны от ее волновой нормали меняется в диапазоне от  $-1^\circ$  до  $0,6^\circ$ .

Характеристики поверхностной акустической волны приведены на рис.1 для различных срезов  $\text{YBa}_3(\text{PO}_4)_3$ , определяемых углами Эйлера ( $\alpha=0^\circ$ ,  $\mu=0^\circ \div 90^\circ$ ,  $\theta=0^\circ \div 90^\circ$ ). Зависимость фазовой скорости и коэффициента электромеханической связи ПАВ от направления распространения волны для Z-среза более детально приведены на рис.2. Из рис.1 видно, что в кристалле существуют ориентации с достаточно большим значением КЭМС, необходимым для эффективного возбуждения поверхностной волны. Они находятся в области значения углов Эйлера  $\mu \approx 0^\circ \div 90^\circ$  и  $\theta \approx 0^\circ \div 75^\circ$ . В этой же области есть и направления распространения волны с нулевыми значениями угла отклонения потока энергии. Следует отметить, что для этой области угол отклонения потока энергии волны мал и не превышает  $1^\circ$ . Максимальное значение КЭМС поверхностной волны с нулевым значением угла отклонения потока энергии от вол-

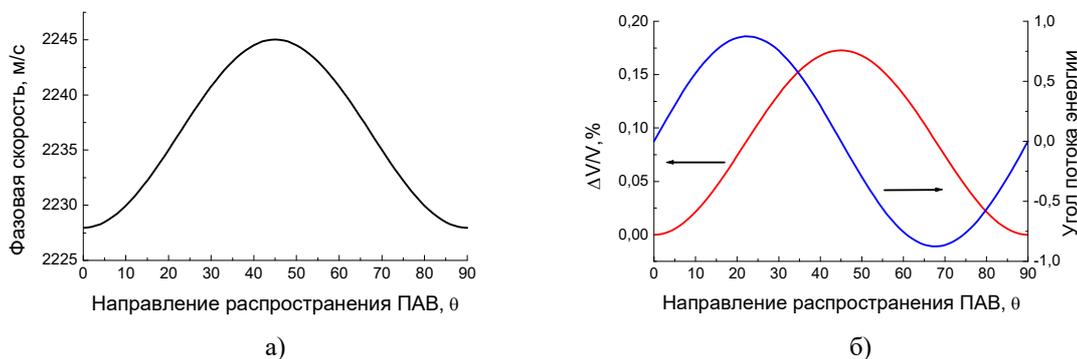
новой нормали, как видно из рис.2, находится в Z-срезе и направлении распространения волны вдоль оси  $X+45^\circ$  кристалла и составляет величину 0,17%. Это значение КЭМС больше почти в 3 раза, чем КЭМС в известном ST-срезе

альфа-кварца. Коэффициенты электромеханической связи поверхностной волны в кристалле  $YBa_3(PO_4)_3$  находятся в промежуточной области между ее значениями в кристаллах альфа-кварца и танталата лития [15-16].



**Рис.1.** Контурные изолинии: а) фазовой скорости (м/с), б)  $\Delta V/V$  (%), в) угла отклонения потока энергии (градусы) поверхностной волны как функция угла среза  $\mu$  и направления распространения ПАВ  $\theta$  в кристалле  $YBa_3(PO_4)_3$

**Fig.1.** Contour contour lines: a) phase velocity (m/s), b)  $\Delta V/V$  (%), c) angle of deviation of the energy flux (degrees) of the surface wave as a function of the cut angle  $\mu$  and direction of SAW propagation  $\theta$  in the  $YBa_3(PO_4)_3$  crystal



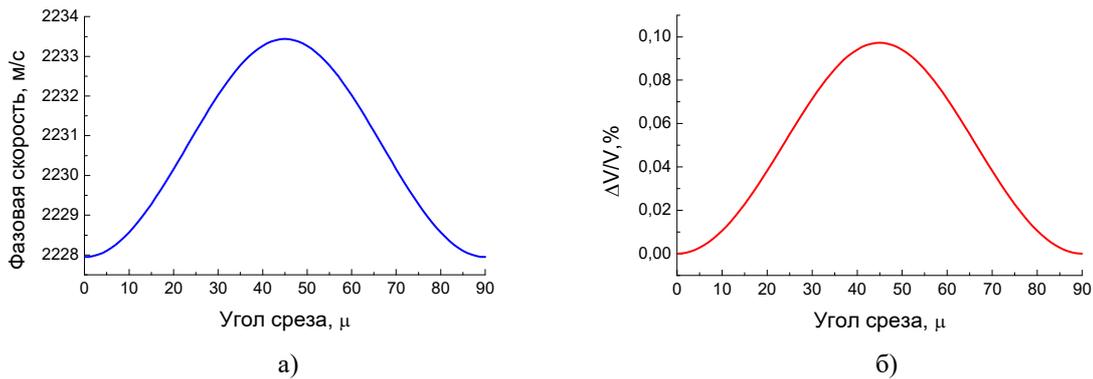
**Рис.2.** Зависимость от направления распространения волны  $\theta$ : а) фазовой скорости, б)  $\Delta V/V$  и угла отклонения потока энергии (градусы) для Z-среза кристалла  $YBa_3(PO_4)_3$

**Fig.2.** Dependence on the direction of wave propagation  $\theta$ : a) phase velocity, b)  $\Delta V/V$  and the angle of deviation of the energy flux (degrees) for the Z-cut of the  $YBa_3(PO_4)_3$  crystal

На рис.2 представлены свойства ПАВ от направления распространения  $\theta$  волны в Z-срезе кристалла. Максимальное значение  $\Delta V/V$  составляет величину 0,17% и реализуется при направлении распространения волны вдоль оси  $X+45^\circ$  кристалла (см. рис.2б). ПАВ имеет фазовую скорость 2245 м/сек и нулевое значение угла отклонения потока энергии волны. Эта ориентация кристаллического среза потенциально полезна для ПАВ-устройств.

На рис.3 показаны зависимости скорости и коэффициента электромеханической связи волны от угла среза  $\mu$  при фиксированном значе-

нии направления распространения волны вдоль оси  $X$  кристалла. Для угла среза  $\mu=45^\circ$  (Z+45°, X-срез) кристалла акустическая волна имеет максимальное значение  $\Delta V/V = 0,1\%$ . Следует отметить, что для направления распространения волны вдоль оси  $X$  при любом значении угла среза  $\mu$  кристалла волновой вектор и вектор потока энергии волны коллинеарны, т.е. угол отклонения потока энергии волны от её волновой нормали равен нулю. Эта ориентация кристалла также представляет потенциальный интерес для ПАВ-устройств.



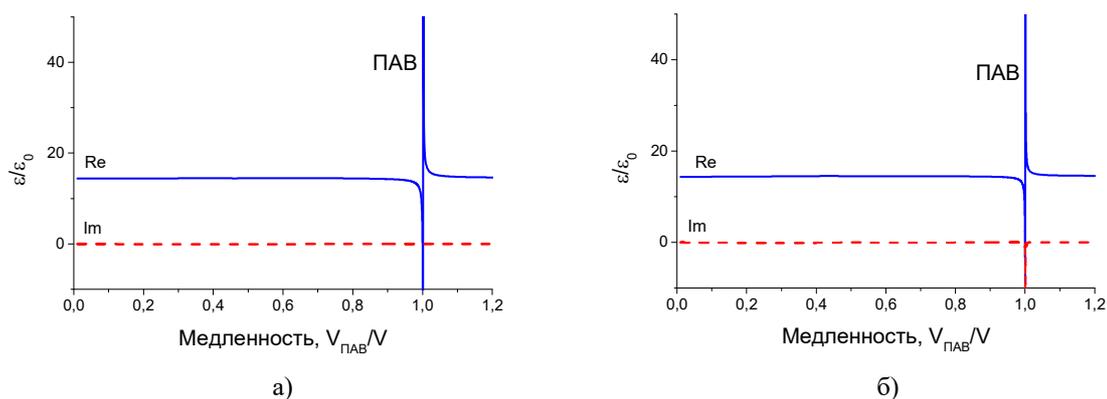
**Рис.3.** Зависимость от угла среза  $\mu$ : а) фазовой скорости, б)  $\Delta V/V$  в кристалле  $\text{YBa}_3(\text{PO}_4)_3$

**Fig.3.** Dependence on the cut angle  $\mu$ : a) phase velocity, b)  $V/V$  in  $\text{YBa}_3(\text{PO}_4)_3$  crystal

Таким образом, как видно из рис.2 и 3, срезы кристалла с углами Эйлера ( $\alpha=0^\circ$ ,  $\mu=0^\circ$ ,  $\theta=45^\circ$ ) ( $\alpha=0^\circ$ ,  $\mu=45^\circ$ ,  $\theta=0^\circ$ ) потенциально интересны для применений в ПАВ-устройствах, поскольку для этой ориентации в кристалле практически не возбуждаются объемные волны, а коэффициенты электромеханической связи поверхностной волны равен 0.17% и 0.1%, соответственно. В этом срезе кристалла возбуждение объемных акустических волн практически отсутствует, что делает этот срез перспективным для использования в ПАВ-фильтрах, резонаторах, сенсорах [13, 16-20].

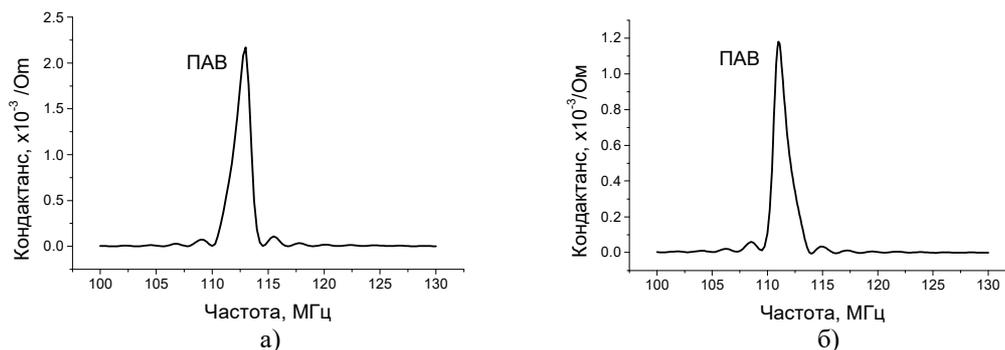
Эффективные относительные диэлектрические постоянные для Z-, и  $Z^{+45^\circ}$ -срезов, приведенные на рис.4, показывают, что вдоль осей  $X+45^\circ$  и X кристалла возбуждается единственная поверхностная акустическая волна на поверхности кристалла. В этих же направлениях

вдоль поверхности кристалла сдвиговые и продольные объемные акустические волны не распространяются. На рис.5 представлены контактансы встречно-штыревых преобразователей (ВШП) от частоты для обоих срезов кристалла. ВШП имел периодическую структуру из 100 электродов с шириной 5 мкм и толщиной электродов из алюминия равной 0,4 мкм. Как видно из рис.5, единственный резонансный всплеск контактанса имеет место приблизительно на частоте синхронизма поверхностной волны  $f_0 = V_{\text{ПАВ}}/\lambda$ , здесь,  $V_{\text{ПАВ}}$  – скорость ПАВ на свободной поверхности,  $\lambda=20$  мкм – период структуры ВШП. Различный наклон контактансов для двух разных срезов кристалла на рис.5 обусловлен различием фазы коэффициента отражения ПАВ от электродов преобразователя.



**Рис.4.** Эффективная относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon/\epsilon_0$ : а) для Z-среза и направления распространения волны вдоль оси  $X+45^\circ$ , б) для  $Z^{+45^\circ}$ -среза и направления распространения волны вдоль оси X кристалла, здесь,  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная вакуума

**Fig.4.** Effective relative permittivity  $\epsilon/\epsilon_0$ : a) for Z-cut and the direction of wave propagation along the  $X+45^\circ$  axis, b) for  $Z^{+45^\circ}$ -cut and the direction of wave propagation along the X-axis of the crystal, here,  $\epsilon_0$  is the vacuum dielectric constant

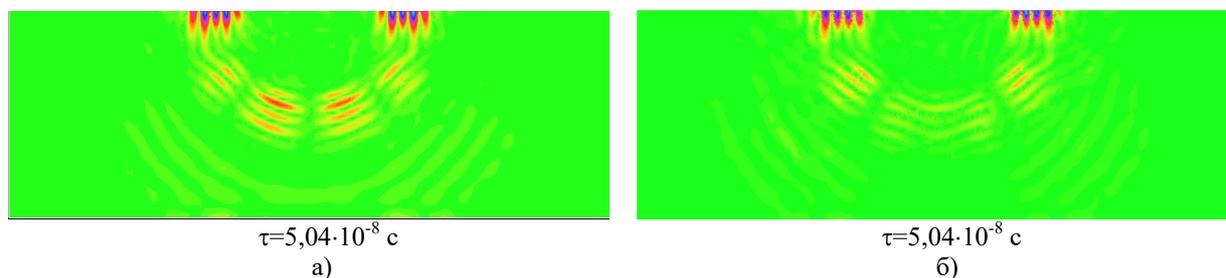


**Рис.5.** Зависимость кондуктанса преобразователей от частоты: а) для Z-среза и направления распространения волны вдоль оси  $X+45^\circ$ , б) для  $Z^{+45^\circ}$ -среза и направления распространения волны вдоль оси X кристалла

**Fig.5.** The dependence of the conductance of the transducers on the frequency: a) for the Z-cut and the direction of wave propagation along the  $X+45^\circ$  axis, b) for the  $Z^{+45^\circ}$ -cut and the direction of wave propagation along the X axis of the crystal

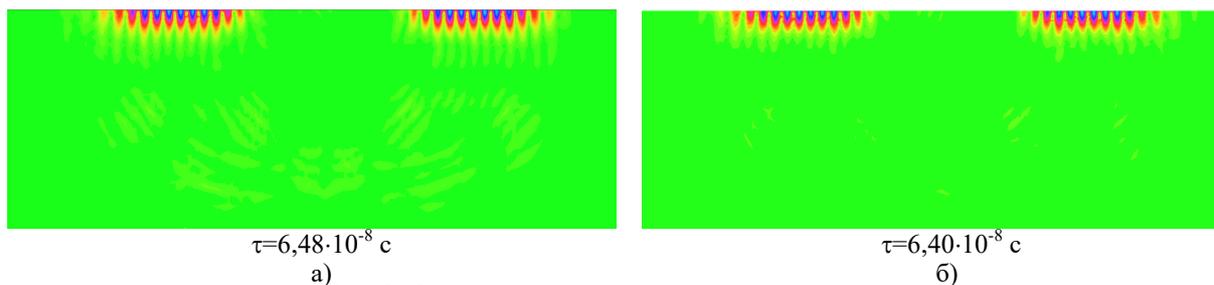
Представляет интерес исследовать возбуждение акустических волн коротким “цугом” гармонического сигнала электрического напряжения, подаваемым на преобразователь, расположенного на поверхности пьезокристалла. На рис.6 показаны результаты моделирования методом конечных элементов (МКЭ) возбуждения акустических волн преобразователем, имеющего одну пару встречно-штыревых электродов, на поверхности  $YBa_3(PO_4)_3$ . Преобразователь находился в центре на поверхности кристалла (см. рис.6). Для МКЭ моделирования использовалась программа FlexPDE6 [17]. Преобразователь имел бесконечно тонкие электроды шириной 5 мкм, и расстояние между соседними электродами составляла величину 5 мкм. Источником возбуждения акустических волн является короткий гармоническим сигнал (цуг) электрического потенциала длительностью в 2 периода гармонического синусоидального сигнала, подаваемый на один из электродов (“сигнальный”), а соседний с ним электрод находил-

ся с нулевым электрическим потенциалом (был заземлён). Возникающее электрическое поле между соседними электродами генерирует акустические волны на поверхности пьезоэлектрика. Для многоэлектродного преобразователя “сигнальный” и заземленный электроды периодически чередовались друг с другом вдоль всей структуры преобразователя. Частота гармонического сигнала для  $Z+45^\circ$ -среза была равна  $f_0 = 111$  МГц, а для Z-среза, она составляла величину  $f_0 = 113$  МГц, и они были равны частотам максимумов кондуктансов преобразователей для двух срезов кристалла, приведенных на рис.5. Как можно видеть из рис.6, что все возбужденные акустические волны – это поверхностные волны и объемные акустические волны, уходящие с поверхности в глубь кристалла. Следует отметить, что для преобразователя с пятью парами электродов интенсивность возбуждения объемных волн существенно снижается, чем для случая с двумя электродами (см. рис.7).



**Рис. 6.** Модуль смещения  $(U_3^2 + U_1^2)^{1/2}$  акустических волн, возбуждаемых преобразователем, имеющего одну пару встречно-штыревых электродов: а) для  $Z^{+45^\circ}$ -среза и направления распространения волны вдоль оси X б) для Z-среза и направления распространения волны вдоль оси  $X+45^\circ$  в кристалле  $YBa_3(PO_4)_3$ .  $\tau$  – время, прошедшее с момента начала возбуждения волн встречно-штыревым преобразователем

**Fig.6.** Displacement modulus  $(U_3^2 + U_1^2)^{1/2}$  of acoustic waves excited by a transducer having one pair of interdigital electrodes: a) for  $Z^{+45^\circ}$ -cut and direction of wave propagation along the X axis, b) for Z-cut and direction of wave propagation along the  $X+45^\circ$  axis in the  $YBa_3(PO_4)_3$  crystal.  $\tau$  – time elapsed since the start of wave excitation by the interdigital transducer



**Рис.7.** Модуль смещения  $(U_3^2+U_1^2)^{1/2}$  акустических волн, возбуждаемых преобразователем, имеющего пять пар встречно-штыревых электродов: а) для  $Z^{+45^\circ}$ -среза и направления распространения волны вдоль оси X, б) для Z-среза и направления распространения волны вдоль оси  $X+45^\circ$  в кристалле  $\text{YBa}_3(\text{PO}_4)_3$ .  $\tau$  – время, прошедшее с момента начала возбуждения волн преобразователем

**Fig.7.** Displacement module  $(U_3^2+U_1^2)^{1/2}$  acoustic waves excited by the transducer, which has five pairs of interdigital electrodes: a) for  $Z^{+45^\circ}$ -cut and the direction of wave propagation along the X axis, b) for Z-cut and the direction of wave propagation along the  $X+45^\circ$  axis in the  $\text{YBa}_3(\text{PO}_4)_3$  crystal.  $\tau$  – time elapsed since the start of excitation of waves by the transducer

### Заклучение

В результате численных исследований свойств поверхностных акустических волн в новом кристалле  $\text{YBa}_3(\text{PO}_4)_3$  показано, что поверхностная волна имеет максимальное значение коэффициента электро-механической связи (0,17%) в Z-срезе кристалла. Для случая  $Z+45^\circ$ -среза и направления распространения волны вдоль оси X кристалла коэффициент электро-механической связи ПАВ равен 0,1%. Рассчитана частотная зависимость проводимости встречно-штыревых преобразователей (ВШП) для этих двух срезов. Преобразователь имел 100 электродов с периодом структуры в 20 микрон для двух срезов кристалла  $\text{YBa}_3(\text{PO}_4)_3$ . В обоих случаях возбуждение объемных акустических волн преобразователем отсутствует. Моделирование МКЭ временной зависимости возбуждения акустических волн коротким цугом гармонического сигнала показывает отсутствие распространяющихся вдоль поверхности кристалла объемных волн. Приведенные исследования указывают, что кристалл  $\text{YBa}_3(\text{PO}_4)_3$  является перспективным материалом для применений в устройствах на ПАВ.

### Список литературы

1. Wu G., Fan M., Jiang C., Chen F., Yu F., Cheng X., Zhao X. Noncentrosymmetric orthophosphate  $\text{YM}_3(\text{PO}_4)_3$  (M=Sr, Ba) crystals: single crystal growth, structure, and properties // *Cryst. Growth Des.* 2020. V. 20. P. 2390–2397.
2. Wu G., Kong L., Fan M., Yu F., Jiang C., Cheng X., Zhao X. Electro-elastic features of  $\text{YBa}_3(\text{PO}_4)_3$  and  $\text{YbBa}_3(\text{PO}_4)_3$  crystals with pure face-shear mode for acoustic wave sensor applications // *Journal of Materiomics.* 2021. V. 7. P. 828–836.
3. Bausk E.V., Taziev R.M., Lee A. Synthesis of slanted and quasi-slanted SAW transducers // *IEEE Trans. on Ultrason. Ferroelectrics, and Freq. Control.* 2004. V. 50. P. 1002–1009.
4. Sinha B.K., Tanski W.J., Lukaszek T., Ballato A. Influence of biasing stress on the propagation of surface waves // *J. Appl. Phys.* 1985. V. 57. P. 767–776.
5. Taziev R.M., Kolosovsky E.A., Kozlov A.S. Deformation-sensitive cuts for surface acoustic waves in alpha-quartz // *Proc. 1993 IEEE International Frequency Control Symposium.* 1993. 660.
6. Kielczyn'ski P., Szalewski M., Balcerzak A. Effect of a viscous liquid loading on Love wave propagation // *International Journal of Solids and Structures.* 2012. V. 49. P. 2314–2319.
7. Shilton R.J., Travagliati M., Beltram F., Cecchini M. Nanoliter-droplet acoustic streaming via ultra high frequency surface acoustic waves // *Advanced materials.* 2014. 26. P. 4941–4946.
8. Beyssen D., Brizouala L., Elmazriaa O., Alnota P. Microfluidic device based on surface acoustic wave // *Sensors and Actuators B.* 2006. V. 118, N. 1-2. P. 380–385.
9. Yeo L.Y., Friend J.R. Ultrafast microfluidics using surface acoustic waves // *Biomicrofluidics.* 2009. V. 3, N. 1. 012002.
10. Haines J., Cambon O., Keen D.A., Tucker M.G., Dove M.T. Structural disorder and loss of piezoelectric properties in  $\alpha$ -quartz at high temperature // *Appl. Phys. Lett.* 2002. V. 81. P. 2968–2970.
11. Zu H., Wu H., Wang Q.-M. High-temperature piezoelectric crystals for acoustic wave sensor applications // *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.* 2016. V. 63. P. 486–505.

12. Jiang X., Kim K., Zhang S., Johnson J., Salazar G. High-temperature piezoelectric sensing // *Sensors*. 2014. V. 14. P. 144–169.
13. Zhang S., Yu F. Piezoelectric materials for high temperature sensors // *J. Amer. Ceram. Soc.* 2011. V. 94. P. 3153–3170.
14. Taziev R.M. FEM/BEM for simulation of LSAW devices // *IEEE Trans. on Ultrason. Ferroelectrics, and Freq. Control*. 2007. V. 54. P. 2060–2069.
15. Slobodnik A.J. Surface Acoustic Waves and SAW Materials // *Proc. IEEE*. 1976. V. 64. P. 581–596.
16. Morgan D.P. Surface-Wave Devices for Signal Processing. N.Y.: Elsevier, 1985. 448 p.
17. FrexPDE6 [Электронный ресурс] / Официальный сайт <https://www.pdesolutions.com>. Дата обращения 29.03.2022.

### Информация об авторах

Р. М. Тазиев – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН.

### References

1. Wu, G., Fan, M., Jiang, C., Chen, F., Yu, F., Cheng, X. & Zhao, X. (2020). Noncentrosymmetric orthophosphate  $YM_3(PO_4)_3$  ( $M=Sr, Ba$ ) crystals: single crystal growth, structure, and properties. *Cryst. Growth Des.*, (20), 2390–2397.
2. Wu, G., Kong, L., Fan, M., Yu, F., Jiang, C., Cheng, X. & Zhao, X. (2021). Electro-elastic features of  $YBa_3(PO_4)_3$  and  $YbBa_3(PO_4)_3$  crystals with pure face-shear mode for acoustic wave sensor applications. *Journal of Materiomics*, (7), 828–836.
3. Bausk, E. V., Taziev, R. M. & Lee, A. (2004). Synthesis of slanted and quasi-slanted SAW transducers. *IEEE Trans. on Ultrason. Ferroelectrics, and Freq. Control*, (50), 1002–1009.
4. Sinha, B. K., Tanski, W. J., Lukaszek, T. & Ballato, A. (1985). Influence of biasing stress on the propagation of surface waves. *J. Appl. Phys.*, (57), 767–776.
5. Taziev, R. M., Kolosovsky, E. A. & Kozlov, A. S. (1993). Deformation-sensitive cuts for surface acoustic waves in alpha-quartz. *Proc. 1993 IEEE International Frequency Control Symposium*, 660.
6. Kielczyn'ski, P., Szalewski, M. & Balcerzak, A. (2012). Effect of a viscous liquid loading on Love wave propagation. *International Journal of Solids and Structures*, (49), 2314–2319.
7. Shilton, R. J., Travagliati, M., Beltram, F. & Cecchini, M. (2014). Nanoliter-droplet acoustic streaming via ultra high frequency surface acoustic waves. *Advanced materials*, (26), 4941–4946.
8. Beyssen, D., Brizouala, L., Elmazriaa, O. & Alnota, P. (2006). Microfluidic device based on surface acoustic wave. *Sensors and Actuators B*, 1-2(118), 380–385.
9. Yeo, L. Y. & Friend, J. R. (2009). Ultrafast microfluidics using surface acoustic waves. *Biomeicrofluidics*, 1(3), 012002.
10. Haines, J., Cambon, O., Keen, D. A., Tucker, M. G. & Dove, M. T. (2002). Structural disorder and loss of piezoelectric properties in  $\alpha$ -quartz at high temperature. *Appl. Phys. Lett.*, (81), 2968–2970.
11. Zu, H., Wu, H. & Wang, Q.-M. (2016). High-temperature piezoelectric crystals for acoustic wave sensor applications. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, (63), 486–505.
12. Jiang, X., Kim, K., Zhang, S., Johnson, J. & Salazar, G. (2014). High-temperature piezoelectric sensing. *Sensors*, (14), 144–169.
13. Zhang, S. & Yu, F. (2011). Piezoelectric materials for high temperature sensors. *J. Amer. Ceram. Soc.*, (94), 3153–3170.
14. Taziev, R. M. (2007). FEM/BEM for simulation of LSAW devices. *IEEE Trans. on Ultrason. Ferroelectrics, and Freq. Control*, (54), 2060–2069.
15. Slobodnik, A. J. (1976). Surface Acoustic Waves and SAW Materials. *Proc. IEEE*, (64), 581–596.
16. Morgan, D. P. (1985). Surface-Wave Devices for Signal Processing. N.Y.: Elsevier. P. 448.
17. FrexPDE6 [Electronic resource] / Official site <https://www.pdesolutions.com>. Date of the application 29.03.2022.

### Information about the authors

R. M. Taziev – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 29.03.2022; одобрена после рецензирования 11.04.2022; принята к публикации 18.04.2022.

The article was received by the editorial board on 29 Mar. 22; approved after reviewing on 11 Apr. 22; accepted for publication on 18 Apr. 22.