Акустические свойства пьезоактивных гетероструктур, выполненных из тонких пластин ниобата лития / В.В. Калинчук, И.Б. Михайлова, А.С. Турчин, В.Б. Широков. – DOI: 10.15593/perm.mech/2025.4.07 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2025. – № 4. – С. 86–97.

Perm Polytech Style: Kalinchuk V.V., Mikhailova I.B., Turchin A.S., Shirokov V.B. Acoustic properties of piezoactive heterostructures made of thin lithium niobate plates. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2025, no. 4, pp. 86-97. DOI: 10.15593/perm.mech/2025.4.07

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 4, 2025
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2025.4.07
УДК 539.3

АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЬЕЗОАКТИВНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ ТОНКИХ ПЛАСТИН НИОБАТА ЛИТИЯ

В.В. Калинчук, И.Б. Михайлова, А.С. Турчин, В.Б. Широков

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, Россия, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 14 августа 2025 г.
Одобрена: 21 сентября 2025 г.
Принята к публикации:
25 сентября 2025 г.

Ключевые слова:

гетероструктура, ниобат лития, тонкие пластины, (X, Y, Z, βY) – срез, поверхностная акустическая волна (ПАВ), коэффициент электромеханической связи (КЭМС).

АННОТАЦИЯ

Разработана и исследована математическая модель возбуждения поверхностных акустических волн (ПАВ) на поверхности пьезоактивной гетероструктуры «пластинка W-среза ниобата лития – подложка кремния», где W – срез, нормаль к поверхности которого имеет направления наиболее распространенных промышленных срезов Z, X, Y, 41Y, 64Y, 128Y. Наряду с ориентацией среза модель учитывает направление распространения волны и толщину пластинки по отношению к длине волны, что позволяет осуществлять выбор кристаллографических и геометрических параметров для эффективного возбуждения ПАВ. Проведено исследование фазовой скорости распространения волн Рэлея и Лява на поверхности гетероструктуры для двух случаев: когда ее поверхность свободна и когда она металлизирована и заземлена. Это позволило вычислить коэффициент электромеханической связи (КЭМС), характеризующий эффективность возбуждения в гетероструктуре как релеевских, так и горизонтально поляризованных сдвиговых ПАВ. Исследование показало, что на пластинках ниобата лития всех типов срезов КЭМС волны Лява достигает более высоких значений по сравнению с КЭМС рэлеевских волн. Из всех промышленных типов срезов пластинок ниобата лития на данной гетероструктуре наиболее эффективными для возбуждения волн Лява оказываются X-, Y- и 128Y-срез, на которых КЭМС достигает значений 0,4, 0,38 и 0,39 соответственно. Дополнительное исследование позволило обнаружить срез 160Y, на котором КЭМС достигает абсолютного максимума. Полученные результаты предоставляют возможность существенно упростить процесс проектирования приборов и устройств на ПАВ за счет выбора оптимальных геометрических параметров гетероструктуры с пластиной ниобата лития заданного среза.

© **Калинчук Валерий Владимирович** – д. ф.-м. наук, член-корреспондент РАН, гл. н. с., e-mail: kalin@ssc-ras.ru.
Михайлова Ирина Борисовна – н. с., e-mail: michailova@ssc-ras.ru.
Турчин Артем Сергеевич – м. н. с., e-mail: Prottei@yandex.ru.
Широков Владимир Борисович – д. ф.-м. н., в. н. с., e-mail: shirokov-vb@rambler.ru.

Valery V. Kalinchuk – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department, e-mail: kalin@ssc-ras.ru.
Irina B. Mikhailova – Researcher, e-mail: michailova@ssc-ras.ru.
Artem S. Turchin – Junior Researcher, e-mail: Prottei@yandex.ru.
Vladimir B. Shirokov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, leading researcher, e-mail: shirokov-vb@rambler.ru.

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

ACOUSTIC PROPERTIES OF PIEZOACTIVE HETEROSTRUCTURES MADE OF THIN LITHIUM NIOBATE PLATES

V.V. Kalinchuk, I.B. Mikhailova, A.S. Turchin, V.B. Shirokov

Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 14 August 2025
Approved: 21 September 2025
Accepted for publication: 25 September 2025

Keywords:

heterostructure, lithium niobate, thin plates, (X, Y, Z, βY)-cut, surface acoustic wave (SAW), electromechanical coupling coefficient (EMCC).

ABSTRACT

A mathematical model of excitation of surface acoustic waves (SAW) on the surface of a piezoactive heterostructure "lithium niobate W-cut plate – silicon substrate" has been developed and investigated, where W is a cut, the normal to the surface of which has the directions of the most common industrial cuts Z, X, Y, 41Y, 64Y, 128Y. Along with the cut orientation, the model takes into account the direction of wave propagation and the plate thickness in relation to the wavelength, which allows choosing crystallographic and geometric parameters for efficient excitation of SAWs. A study of the phase velocity of Rayleigh and Love waves on the heterostructure surface was carried out for two cases: when its surface is free and when it is metallized and grounded. This made it possible to calculate the electromechanical coupling coefficient (EMCC), which characterizes the excitation efficiency of both Rayleigh and horizontally polarized shear SAWs in the heterostructure. The study showed that on lithium niobate plates of all types of cuts, the Love waves EMCC reaches higher values compared to the Rayleigh waves KEMS. Of all the industrial types of lithium niobate plate cuts on this heterostructure, the most effective for exciting Love waves are the X-, Y- and 128Y-cuts, on which the EMCC reaches values of 0.4, 0.38 and 0.39, respectively. An additional study revealed the 160Y cut, on which the EMCC reaches an absolute maximum. The obtained results provide an opportunity to significantly simplify the process of designing SAW devices and devices by selecting the optimal geometric parameters of the heterostructure with a lithium niobate plate of a given cut.

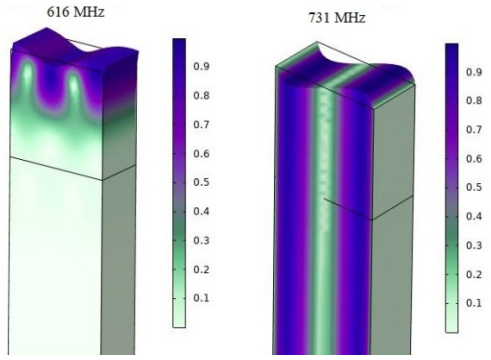
Введение

Элементы на поверхностных акустических волнах (ПАВ) активно применяются в интегральных устройствах микроэлектроники (фильтры, резонаторы, акустоэлектронные модуляторы, фазовращатели, конвольверы, линии задержки, микроэлектромеханические системы, сенсоры и др.), что обусловливает необходимость развития теории, методов расчета и проектирования [1–4]. В качестве активного элемента возбуждения ПАВ наиболее часто используются различные срезы монокристалла сегнетоэлектрика ниобата лития. В литературе можно найти много работ, посвященных исследованию влияния полей различной физической природы на свойства распространяющихся в ниобате лития ПАВ [5–7]. В последние годы особое место занимает развитие приложений, использующих электро- и акустооптические свойства $LiNbO_3$ [8]. Миниатюризация акустоэлектронных устройств делает целесообразным использование в качестве активных элементов тонкие пленки. Высокотемпературные методы нанесения пленок из-за различия коэффициентов теплового расширения пленки и подложки приводят к большим деформациям пленок, что необходимо учитывать при проектировании приборов и устройств на ПАВ из-за изменения материальных констант пленок [9; 10]. Кроме того, процесс осаждения позволял получать пленки ниобата лития фиксированной ориентации, что существенно ограничивало возможность обеспечения максимальной эффективности возбуждения ПАВ за счет выбора оптимальных срезов кристалла. Недавно была разработана технология переноса тонких монокристаллических пластинок ниобата лития на подложки при низких температурах [11–14]. При сохранении преимуществ тонкопленочных структур она устранила негативные последствия, связанные с тепловыми эффектами при осаждении пленки на подложку. При этом низкотемпературные методы нанесения позволяют использовать тонкие пластины различных срезов. Это открывает возможность оптимальным образом ориентировать пластинки ниобата лития с целью использования направлений наиболее эффективного возбуждения ПАВ [13–17]. В то же время используемая при проектировании устройств на ПАВ модель претерпевает существенное усложнение, связанное с учетом изменения материальных констант кристалла при изменении его ориентации [17; 18]. В [19] было проведено детальное исследование акустических свойств указанной выше структуры при различной ориентации срезов кристалла ниобата лития. Детально исследована эффективность возбуждения поверхностных акустических волн ПАВ на 41Y-, 64У-, 128У- и 153У-срезах, нормаль к поверхности которых ориентирована вдоль *y*-оси, повернутой вокруг кристаллографической оси *x* исходного кристалла на угол 41, 64, 128 и 153° соответственно. Анализ показал, что на всех типах срезов более эффективными являются сдвиговые волны. В частности, для X-, Y- и 128Y-срезов имеются ориентации, на которых коэффициент электромеханической связи достигает значений 0,4, 0,38 и 0,39 соответственно. Более детальное исследование показало, что в рассматриваемой гетероструктуре данной геометрии можно достичь еще большей эффективности возбуждения сдвиговых поверхностных акустических волн

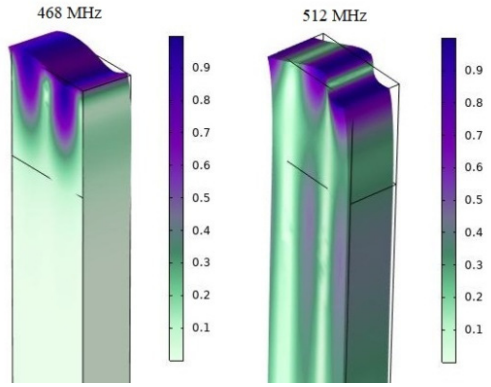
ПАВ, если взять 153Y-срез, для которого коэффициент электромеханической связи (КЭМС) достигает значения 0,43. В настоящей работе исследована эффективность возбуждения ПАВ на гетероструктуре $LiNbO_3$/Si при различной толщине пластинки для всех промышленных срезов ниобата лития. Из поведения КЭМС ранее выбранных направлений на разных срезах кристалла определена оптимальная толщина пластинки в гетероструктуре для наиболее эффективного возбуждения ПАВ.

Особенности ПАВ на гетероструктуре $LiNbO_3/SiO_2$

Рэлеевская ПАВ в значительной степени локализована вблизи поверхности на различных подложках. Для сдвиговых волн степень локализации существенно меньше. Это хорошо видно на рис. 1, на котором представлено распределение амплитуд рэлеевской (левая фигура) и сдвиговой (правая фигура) волн на поверхности монокристаллического кремния (001) среза (*а*) и монокристаллического $LiNbO_3$ Y-среза (*б*). Длина волны для всех структур равна 8 мкм. Нижней линией на всех рисунках отмечена глубина, равная длине волны.



a



b

Рис. 1. ПАВ на кремнии (001) среза (*а*) и монокристаллического $LiNbO_3$ Y-среза (*b*). Слева представлена рэлеевская волна, справа – сдвиговая. Тоновая шкала характеризует относительную величину смещений. Отмечен размер, равный длине волны

Fig. 1. SAW on (001) cut silicon (*a*) and Y-cut single-crystal $LiNbO_3$ (*b*). The Rayleigh wave is shown on the left, and the shear wave is shown on the right. The tone scale indicates the relative magnitude of the shifts. The size equal to the wavelength is highlighted

На рис. 2 представлено распределение амплитуд рэлеевской и сдвиговой волн гетероструктуры, состоящей из пластинки ниобата лития, нанесенной на подложку монокристаллического кремния (001) среза. Видно, что оба вида ПАВ локализуются в верхней части пластинки ниобата лития. Это позволяет управлять процессом возбуждения и распространения ПАВ за счет целенаправленного выбора наиболее оптимальной ориентации среза сегнетоэлектрической пластинки.

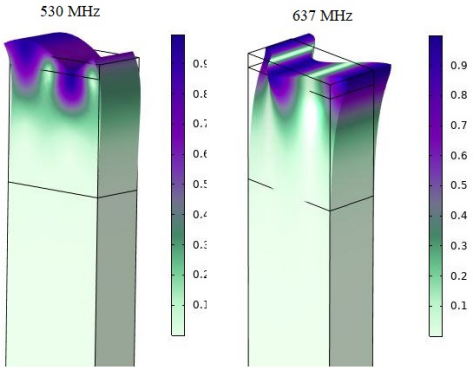


Рис. 2. ПАВ на гетероструктуре $LiNbO_3$/Si. Слева представлена рэлеевская волна, справа – сдвиговая. Тоновая шкала характеризует относительную величину смещений. Отмечены пластина $LiNbO_3$ и величина длины волны

Fig. 2. SAW on the $LiNbO_3$/Si heterostructure. The Rayleigh wave is shown on the left, and the shear wave is shown on the right. The tone scale indicates the relative magnitude of the shifts. The $LiNbO_3$ plate size and the wavelength size are highlighted

Эффективность управления обеспечивается результатами исследования по обнаружению наиболее эффективных для генерации ПАВ параметров гетероструктуры.

Формулировка задачи

В рассмотрение вводится прямоугольная система координат x_1, x_2, x_3 и совпадающая с ней в исходном состоянии кристаллографическая система координат x, y, z [20]. Последняя используется при определении ориентации среза кристалла. Рассматривается задача о возбуждении акустических волн на поверхности сегнетоэлектрической гетероструктуры, состоящей из пьезоэлектрической пластины ниобата лития $0 \le x_3 \le h$, нанесенной на подложку (001) среза монокристаллического кремния $-\infty \le x_1, x_2 \le \infty, x_3 \le 0$.

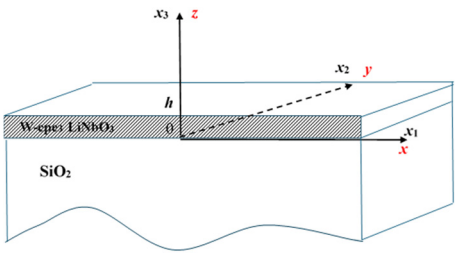


Рис. 3. Геометрия задачи

Fig. 3. Geometry of the problem

Она описывается уравнением движения электроупругой среды [21; 22]:

$$\rho\frac{\partial^2 u_l^{(n)}}{\partial t^2}=\frac{\partial\sigma_{lm}^{(n)}}{\partial x_m}, \tag{1}$$

где n=1,2; l, m=1, 2, 3. Индексом n=1 отмечены величины для пластины ниобата лития, индексом n=2 – кремниевой подложки. $u_l^{(n)}$ – компоненты вектора смещения вдоль координатных осей x_l, $\sigma_{lm}^{(n)}$ – напряжения на соответствующих площадках [23]. Уравнения (1) дополнены уравнением квазистатики для электрической индукции

$$\frac{\partial D_m^{(n)}}{\partial x_m}=0. \tag{2}$$

Выражения для компонент тензора напряжений $T_l^{(1)}$ (в обозначениях Фойгта: $T_i^{(n)}=\sigma_{ii}^{(n)}$, i=1,2,3, $T_4^{(n)}=\sigma_{23}^{(n)}$, $T_5^{(n)}=\sigma_{13}^{(n)}$, $T_6^{(n)}=\sigma_{12}^{(n)}$) и компонент вектора индукции $D_m^{(1)}$ представляются формулами [24; 25]:

$$\begin{aligned}T_i^{(n)}&=c_{ik}^{E(n)}S_k^{(n)}+e_{mi}^{(n)}\frac{\partial\varphi^{(n)}}{\partial x_m},\\ D_m^{(n)}&=e_{mk}^{(n)}S_k^{(n)}-\varepsilon_{ml}^{S(n)}\frac{\partial\varphi^{(n)}}{\partial x_l}.\end{aligned} \tag{3}$$

Здесь по повторяющимся индексам подразумевается суммирование: i, k=1, 2, …6, l, m=1,2,3. Для индексов в представлениях (3) используется нотация Фойгта: $i\to ii$, i=1, 2, 3, 4→23, 5→13, 6→12. Для деформаций приняты обозначения: $S_l^{(n)}=\frac{\partial u_l^{(n)}}{\partial x_l}$, l=1, 2, 3 (нет суммирования),

$S_4^{(n)}=\frac{\partial u_2^{(n)}}{\partial x_3}+\frac{\partial u_3^{(n)}}{\partial x_2}$, $S_5^{(n)}=\frac{\partial u_1^{(n)}}{\partial x_3}+\frac{\partial u_3^{(n)}}{\partial x_1}$, $S_6^{(n)}=\frac{\partial u_1^{(n)}}{\partial x_2}+\frac{\partial u_2^{(n)}}{\partial x_1}$.

$\varphi^{(n)}$ – электрический потенциал, $c_{ik}^{E(n)}$ – упругие постоянные при постоянной напряженности электрического поля, $e_{mi}^{(1)}$ – электроупругие коэффициенты, $e_{mi}^{(2)}=0$, $\varepsilon_{ml}^{S(n)}$ – диэлектрическая проницаемость при постоянной деформации. Подложка (001) среза монокристаллического кремния ориентирована вдоль кубических осей кристалла. Далее рассматривается ряд пластинок из наиболее распространенных промышленных срезов монокристалла ниобата лития с нормалью к плоскости W-среза [19] (W=Z, X, Y, 41Y,64Y,128Y) различной толщины. Материальные постоянные (в обычной записи, которая более удобна для учета изменения констант при повороте кристалла), необходимые для проведения расчетов взяты из [25]: $c_{1111}^{E(1)}$=20,3, $c_{3333}^{E(1)}$=24,24, $c_{2323}^{E(1)}$=5.95, $c_{1212}^{E(1)}$=7,28, $c_{1122}^{E(1)}$=5,73, $c_{1133}^{E(1)}$=7,52, $c_{1123}^{E(1)}$=0,85 (10^{10}Н/м^2); $\varepsilon_{11}^{S(1)}$=7,538, $\varepsilon_{33}^{S(1)}$=2,543 (10^{-10}Ф/м); $e_{333}^{(1)}$=1,7, $e_{311}^{(1)}$=0,2, $e_{113}^{(1)}$=3,7, $e_{222}^{(1)}$=2,5 (Кл/м^2). Для описания процессов на поверхности срезов кристалла ниобата лития различной ориентации наряду с обычной системой координат x_1,x_2,x_3 в рассмотрение вводится новая, повернутая относительно оси x_1 система координат x_1',x_2',x_3'. Обе системы связаны направляющими косинусов $n_{i\alpha}$ между осями x_i' (i=1, 2, 3) и x_α (α=1, 2, 3) в соответствии с таблицей:

	x_1	x_2	x_3
x_1'	n_{11}	n_{12}	n_{13}
x_2'	n_{21}	n_{22}	n_{23}
x_3'	n_{31}	n_{32}	n_{33}.

(4)

Формулы преобразования материальных констант в этом случае имеют вид [26]

$$\begin{aligned}c_{ijml}^{'}&=n_{i\alpha}n_{j\beta}n_{m\delta}n_{l\gamma}c_{\alpha\beta\delta\gamma}\\ e_{ijm}^{'}&=n_{i\alpha}n_{j\beta}n_{m\delta}e_{\alpha\beta\delta}\\ \varepsilon_{ij}^{'}&=n_{i\alpha}n_{j\beta}\varepsilon_{\alpha\beta},\end{aligned} \tag{5}$$

где $c_{\alpha\beta\delta\gamma}$, $e_{\alpha\beta\delta}$, $\varepsilon_{\alpha\beta}$ (α, β, δ, γ = 1, 2, 3 и $c_{ijml}^{'}$, $e_{ijm}^{'}$, $\varepsilon_{ij}^{'}$ (i, j, m, l=1, 2, 3) – упругие, пьезоэлектрические и диэлектрические константы в исходной и повернутой системах координат соответственно. Поверхность гетероструктуры $x_3=h$ предполагается свободной от механических напряжений: $T_k^{(1)}(x_1)=0, |x_1|\le\infty$, $k=3,4,5$. Колебания – установившимися по гармоническому закону. Предметом исследования являются распространяющиеся в направлении x_1 сдвиговые горизонтально-поляризованные (SH) и рэлеевские ПАВ. Подложка (001) среза монокристаллического кремния ориентирована вдоль кубических осей кристалла. Ориентация пластинки в плоскости подложки зависит от выбора направления наиболее эффективной генерации, которое исследовано ранее для h/λ=0,125 (λ – длина волны) [19]. На границе «пластинка – подложка» (x_3=0) задаются условия равенства напряжений и смещений, а также электрических потенциалов и нормальных компонент векторов индукции.

$$\begin{aligned}&u_m^{(1)}(0)=u_m^{(2)}(0),\ D_3^{(1)}(0)=D_3^{(2)}(0),\ m=1,2,3,\\ &T_k^{(1)}(0)=T_k^{(2)}(0),\ k=3,4,5,\ \varphi^{(1)}(0)=\varphi^{(2)}(0).\end{aligned} \tag{6}$$

На верхней поверхности $x_3=h$ пьезоэлектрической пластинки рассмотрены два типа электрических условий:

1 – поверхность металлизирована и заземлена («закорочена» [30] – short)

$$\varphi^{(1)}(x_1)=0, |x_1|\le\infty; \tag{7}$$

2 – поверхность электрически свободна (open)

$$D_3^{(1)}(x_1)=0, |x_1|\le\infty. \tag{8}$$

Разные скорости распространения ПАВ для этих двух случаев позволяют вычислить КЭМС [27–30]

$$K = \sqrt{\frac{c_o^2 - c_s^2}{c_o^2}} \approx \sqrt{2\frac{c_o - c_s}{c_o}}, \quad (9)$$

где c_o – фазовая скорость распространения ПАВ на электрически свободной поверхности, c_s – фазовая скорость распространения ПАВ на закороченной поверхности. Вычисление скоростей производится на основе исследования соответствующих дисперсионных уравнений. Для их построения используется традиционная техника, которая достаточно подробно описана в литературе [31; 32]. Дисперсионное уравнение для SH волны в случае двуслойной среды представляет собой определитель 6-го порядка, для рэлеевских волн – 9-го порядка. Из-за громоздкости выражений элементов, участвующих в представлении определителей, в настоящей статье они не приводятся из-за значительного увеличения ее объема. Дисперсионные уравнения для обоих случаев детально представлены в находящихся в открытом доступе работах [31–33]. Ниже приведены результаты исследования дисперсионных уравнений с учетом соотношений (4) и (5). При записи использованы верхние и нижние индексы. Верхними индексами обозначены скорости и КЭМС соответствующие рэлеевской (*R*) и сдвиговой (*SH*) ПАВ. Нижними индексами *o* и *s* отмечены скорости ПАВ с открытыми (open) и закрытыми (short) граничными электрическими условиями на поверхности гетероструктуры. Ориентация среза (W) пластинки ниобата лития на подложке кремния и направление распространения волны (α) представлена аббревиатурой W-срез $LiNbO_3$ (α)/Si.

Рэлеевская ПАВ

Предметом исследования являются распространяющиеся в направлении x_1 рэлеевские акустические волны, которые удовлетворяют уравнениям (1)–(3) с граничными условиями (6)–(8), а также условиям

$$u_2^{(n)} = 0,\ \partial / \partial x_2 = 0,\ u_k^{(n)} = u_k^{(n)}(x_1, x_3),\ n = 1,2,\ k = 1,3. \quad (10)$$

С учетом (10) условия (6) на границе двух сред в этом случае принимают вид:

$$\begin{aligned} &u_m^{(1)}(0) = u_m^{(2)}(0),\ m = 1,3, D_3^{(1)}(0) = D_3^{(2)}(0), \\ &T_k^{(1)}(0) = T_k^{(2)}(0),\ k = 3,5,\ \varphi^{(1)}(0) = \varphi^{(2)}(0). \end{aligned} \quad (11)$$

Ранее [19] проведено исследование процесса возбуждения акустических волн на поверхности сегнетоэлектрической гетероструктуры, представляющей собой пластину ниобата лития промышленных срезов, толщиной 1 мкм, нанесенной на подложку (001) среза монокристаллического кремния. Исследование рэлеевских волн длиной 8 мкм на срезах Z, X, Y, 41Y, 64Y и 128Y показало существование направлений, на которых реализуется наиболее эффективное их возбуждение. В табл. 1 представлены результаты исследования КЭМС на срезах указанной выше ориентации: величина локального максимума для h/λ=0,125 [19], а также вычисленные в настоящей работе диапазон изменения КЭМС и значение h/λ, при котором достигается глобальный максимум.

Таблица 1

Максимальное значение КЭМС при h/λ=0,125 [19] и значение h/λ, при котором достигается глобальный максимум КЭМС

Table 1

Maximum value of CEMM at h/λ=0.125 [19] and h/λ value for the overall maximum CEMM

Срез	Направление распространения ПАВ	Максимум КЭМС ПАВ Рэлея при h/λ=0.125 [19]	Диапазон изменения КЭМС ПАВ Рэлея	Значение h/λ для глобального максимума КЭМС
Z	0	0,12	0,09–0,16	0,42
X	30	0,15	0,07–0,17	0,07
Y	90	0,12	0,04–0,18	0,30
41Y	90	0,14	0,06–0,25	0,40
64Y	0	0,13	0,05–0,21	0,35
128Y	48	0,15	0,09–0,17	0,08

Z-срез. В этом случае максимальное значение КЭМС рэлеевской ПАВ получается, если угол поворота пластинки относительно подложки равен нулю (угол Эйлера α=0°). Кривые скоростей и КЭМС для такого расположения пластины приведены на рис. 4. Видно, что максимальное значение КЭМС достигается при h/λ=0,425 и равно 0,16, при этом c_0^R =3864 м/с, c_s^R =3814 м/с.

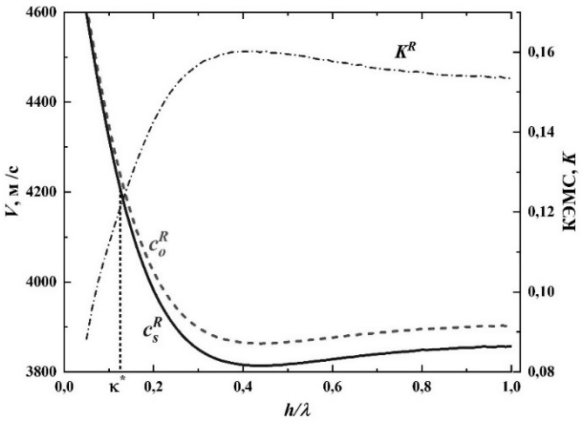


Рис. 4. Зависимость скорости рэлеевской ПАВ и КЭМС на гетероструктуре Z-срез $LiNbO_3$ (0)/Si от h/λ. Сплошная линия – c_s^R, штриховая – c_0^R, штрихпунктирная – K^R

Fig. 4. Rayleigh SAW and EMSC velocity dependence on h/λ on the Z-cut $LiNbO_3$ (0)/Si heterostructure. Solid line – c_s^R, dashed line – c_0^R, dash-dotted line – EMCC

X-срез. В этом случае максимальное значение КЭМС рэлеевской ПАВ получается, если пластинка повернута на угол 30° относительно подложки (угол Эйлера α=30°). Кривые скоростей и КЭМС для такого расположения пластинки приведены на рис. 5. Из рисунка видно, что

максимальное значение КЭМС достигается при h/λ=0,075 и равно 0,17, при этом $c_0^R = 4500$ м/с, $c_s^R = 4432$ м.

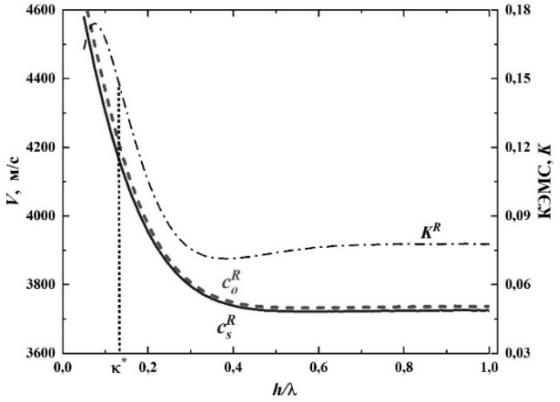


Рис. 5. Зависимость скорости рэлеевской ПАВ и КЭМС на гетероструктуре X-срез $LiNbO_3$ (30)/Si от h/λ. Сплошная линия – c_s^R, штриховая – c_0^R, штрихпунктирная – КЭМС

Fig. 5. Rayleigh SAW and EMSC velocity dependence on h/λ on the X-cut LiNbO3 (30)/Si heterostructure. Solid line – c_s^R, dashed line – c_0^R, dash-dotted line – EMCC

Y-срез. Для этого среза максимальное значение КЭМС рэлеевской ПАВ получается, если пластинка повернута на угол 90° относительно подложки (угол Эйлера α=90°). Кривые скоростей и КЭМС рэлеевской волны приведены на рис. 6. Как следует из рисунка, максимальное значение КЭМС достигается при h/λ=0,31 и равно 0,2, при этом c_0^R =3899 м/с, c_s^R =3825 м/с.

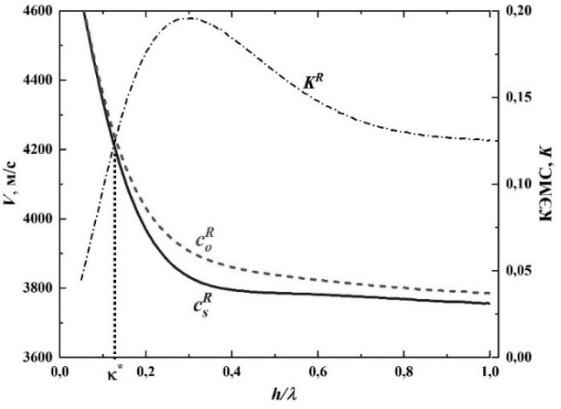


Рис. 6. Зависимость скорости рэлеевской ПАВ и КЭМС от h/λ на гетероструктуре Y-срез $LiNbO_3$ (90)/Si. Сплошная линия – c_s^R, штриховая – c_0^R, штрихпунктирная – КЭМС

Fig. 6. Rayleigh SAW and EMSC velocity dependence on h/λ for Y-cut $LiNbO_3$ (90)/Si heterostructure. Solid line – c_s^R, dashed line – c_0^R, dash-dotted line – EMCC

41Y-срез. Максимальное значение КЭМС рэлеевской ПАВ для этого среза получается, если пластинка повернута на угол 90° относительно подложки (угол Эйлера α=90°). Для такого расположения пластины кривые скоростей и КЭМС приведены на рис. 7. Максимальное значение КЭМС достигается при h/λ=0,431 и равно 0,25, при этом c_0^R =3820 м/с, c_s^R =3799 м/с.

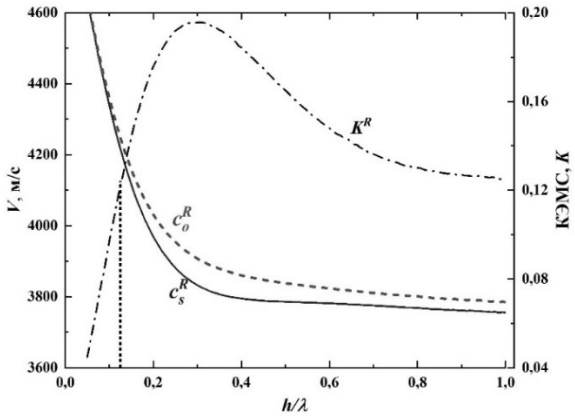


Рис. 7. Зависимость скорости рэлеевской ПАВ и КЭМС от h/λ на гетероструктуре 41Y-срез $LiNbO_3$ (90)/Si. Сплошная линия – c_s^R, штриховая – c_0^R, штрихпунктирная – КЭМС

Fig. 7. Rayleigh SAW and EMSC velocity dependence on h/λ for 41Y-cut $LiNbO_3$ (90)/Si heterostructure. Solid line – c_s^R, dashed line – c_0^R, dash-dotted line – EMCC

64Y-срез. В этом случае максимальное значение КЭМС рэлеевской ПАВ получается, если пластинка повернута на угол 0° относительно подложки (угол Эйлера α=0°). Для такого расположения кривые скоростей и КЭМС приведены на рис. 8. Максимальное значение КЭМС достигается при h/λ=0,375 и равно 0,21, при этом c_0^R =3891 м/с, c_s^R =3802 м/с.

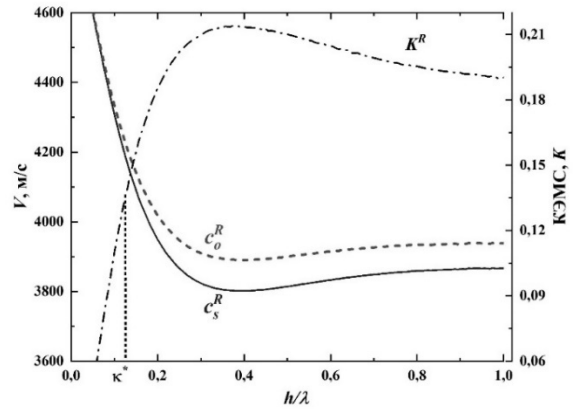


Рис. 8. Зависимость скорости рэлеевской ПАВ и КЭМС от h/λ на гетероструктуре 64Y-срез $LiNbO_3$ (0)/Si. Сплошная линия – c_s^R, штриховая – c_0^R, штрихпунктирная – КЭМС

Fig. 8. Rayleigh SAW and EMSC velocity dependence on h/λ for 64Y-cut $LiNbO_3$ (0)/Si heterostructure. Solid line – c_s^R, dashed line – c_0^R, dash-dotted line – EMCC

128Y-срез. Для этого среза максимальное значение КЭМС рэлеевской ПАВ получается, если пластинка повернута на угол 48° относительно подложки (угол Эйлера α=48°). Для такого расположения кривые скоростей и КЭМС приведены на рис. 9. Максимальное значение КЭМС достигается при h/λ=0,08 и равно 0,16, при этом c_0^R =4466 м/с, c_s=4408 м/с.

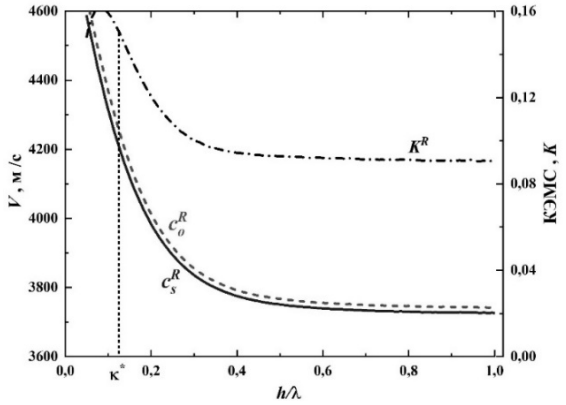


Рис. 9. Зависимость скорости рэлеевской ПАВ и КЭМС на гетероструктуре 128Y-срез $LiNbO_3$ (48)/Si от h/λ. Сплошная линия – c_s^R, штриховая – c_0^R, штрихпунктирная – КЭМС

Fig. 9. Rayleigh SAW and EMSC velocity dependence on h/λ for the 128Y-cut LiNbO3 (48)/Si heterostructure. Solid line – c_s^R, dashed line – c_0^R, dash-dotted line – EMCC

Сдвиговая ПАВ

Задача о возбуждении горизонтально-поляризованных акустических (SH) волн на поверхности сегнетоэлектрической гетероструктуры, состоящей из пластины ниобата лития, нанесенной на подложку (001) среза монокристаллического кремния, описывается уравнениями (1) и (2) с граничными условиями (6)–(8) и условиями

$$u_2^{(n)} = u_2^{(n)}(x_1, x_3), u_1^{(n)} = u_3^{(n)} = 0, \partial / \partial x_2 = 0, \quad n = 1, 2. \quad (12)$$

С учетом (12) условия (6) на границе двух сред в этом случае принимают вид:

$$\begin{aligned} u_2^{(1)}(0) &= u_2^{(2)}(0),\ D_3^{(1)}(0) = D_3^{(2)}(0), \\ T_4^{(1)}(0) &= T_4^{(2)}(0),\ \varphi^{(1)}(0) = \varphi^{(2)}(0). \end{aligned} \quad (13)$$

Исследование процесса распространения сдвиговых горизонтально поляризованных волн на срезах Z, X, Y, 41Y, 64Y и 128Y [19] показало существование направлений, на которых реализуется наиболее эффективное их возбуждение. В табл. 2 представлены результаты исследования КЭМС на срезах указанной выше ориентации: величина локального максимума для h/λ=0,125 [19], а также вычисленные в настоящей работе диапазон изменения КЭМС и значение h/λ, при котором достигается глобальный максимум.

Таблица 2

Максимальное значение КЭМС при h/λ=0,125 и значение h/λ, при котором достигается глобальный максимум КЭМС

Table 2

Maximum value of CEMM at h/λ=0.125 and the value of h/λ for the overall maximum of CEMM

Срез	Направление распространения ПАВ	Максимум КЭМС при h/λ=0.125 [19]	Диапазон изменения КЭМС ПАВ Лява	Значение h/λ для максимума КЭМС
Z	30	0,22	0,14–0,25	0,33
X	173	0,40	0,21–0,47	0,25
Y	90	0,38	0,20–0,47	0,40
41Y	55	0,17	0,08–0,24	0,39
64Y	33	0,24	0,12–0,27	0,35
128Y	90	0,38	0,22–0,43	0,22
153Y	90	0,43	0,24–0,51	0,11

Z-срез. Для этого среза максимальное значение КЭМС сдвиговой ПАВ получается, если пластинка повернута на угол 30° относительно подложки (угол Эйлера α=30°). Кривые скоростей и КЭМС для такого расположения пластины в зависимости от h/λ приведены на рис. 10. На рисунке видно, что глобальный максимум КЭМС достигается при h/λ=0,325 и равен 0,25, при этом c_o=4706 м/с, c_s=4559 м/с.

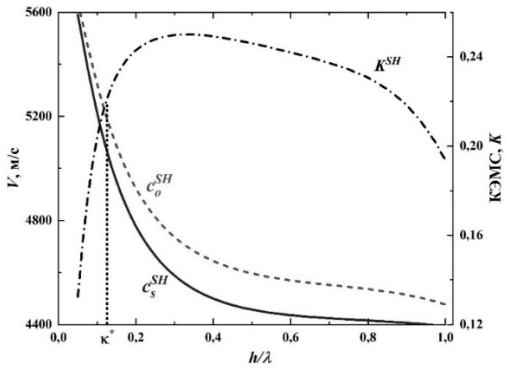


Рис. 10. Зависимость скорости сдвиговой горизонтально поляризованной ПАВ и КЭМС на гетероструктуре Z-срез $LiNbO_3$ (30)/Si от h/λ. Сплошная линия – c_s^{SH}, штриховая – c_0^{SH}, штрихпунктирная – K^{SH}

Fig. 10. Shear horizontally polarized SAW and EMSC velocity dependence on h/λ for the Z-cut $LiNbO_3$ (30)/Si heterostructure. Solid line – c_s^{SH}, dashed line – c_0^{SH}, dash-dotted line – EMCC

X-срез. Для этого среза максимальное значение КЭМС сдвиговой ПАВ получается, если пластинку повернуть на угол 173° относительно подложки (угол Эйлера α=173°). Для такого расположения пластинки кривые скоростей и КЭМС приведены на рис. 11. Глобальный максимум КЭМС достигается при h/λ=0,263 и равен 0,47, при этом c_0^{SH} = 4894 м/с, c_s^{SH} = 4352 м/с.

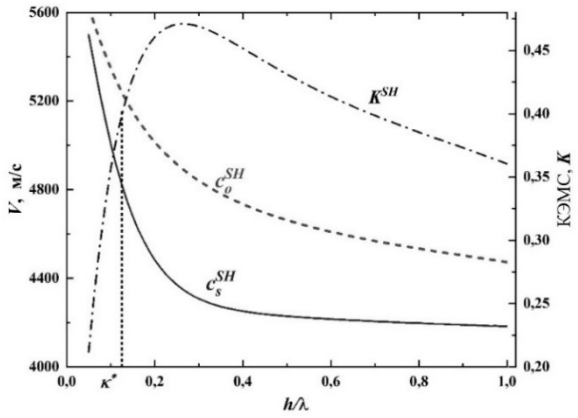


Рис. 11. Зависимость скорости сдвиговой горизонтально поляризованной ПАВ и КЭМС на гетероструктуре X-срез $LiNbO_3$ (173)/Si от h/λ. Сплошная линия – c_s^{SH}, штриховая – c_0^{SH}, штрихпунктирная – K^{SH}

Fig. 11. Shear horizontally polarized SAW and EMSC velocity dependence on h/λ for the X-cut $LiNbO_3$ (173)/Si heterostructure. Solid line – c_s^{SH}, dashed line – c_0^{SH}, dash-dotted line – EMCC

Y-срез. Максимальное значение КЭМС сдвиговой ПАВ в этом случае получается при повороте пластинки Y-среза на 90° относительно подложки (угол Эйлера α=90°). Для такого расположения кривые скоростей и КЭМС приведены на рис. 12. Глобальный максимум КЭМС достигается при h/λ=0,406 и равен 0,47, при этом c_0^{SH} =4736 м/с, c_s^{SH} =4214 м/с.

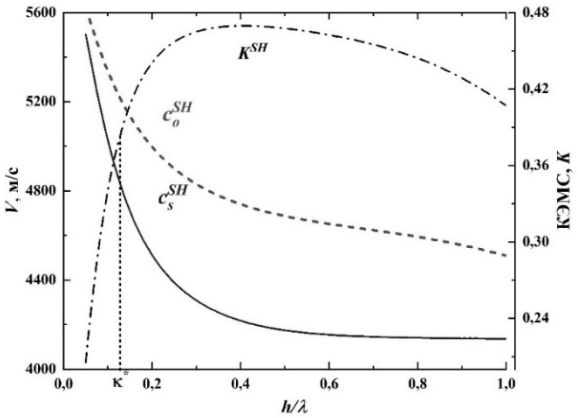


Рис. 12. Зависимость скорости сдвиговой горизонтально поляризованной ПАВ и КЭМС на гетероструктуре Y-срез $LiNbO_3$ (90)/Si от h/λ. Сплошная линия – c_s^{SH}, штриховая – c_0^{SH}, штрихпунктирная – K^{SH}

Fig. 12. Dependence of the shear horizontally polarized SAW and EMSC velocity on the Y-cut $LiNbO_3$ (90)/Si heterostructure on h/λ. Solid line – c_s^{SH}, dashed line – c_0^{SH}, dash-dotted line – EMCC

41Y-срез. Максимальное значение КЭМС сдвиговой ПАВ получается при повороте пластинки на 55° относительно подложки (угол Эйлера α=55°). Для такого расположения дисперсионные кривые скоростей и КЭМС сдвиговой ПАВ приведены на рис. 13. Глобальный максимум КЭМС достигается при h/λ=0,394 и равен 0,23, при этом c_0^{SH} =4492 м/с, c_s^{SH} =4369 м/с.

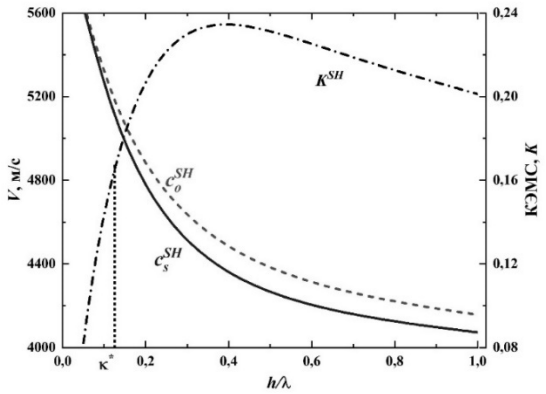


Рис. 13. Зависимость скорости сдвиговой горизонтально поляризованной ПАВ и КЭМС на гетероструктуре пластинка 41Y-среза $LiNbO_3$ (55)/Si от h/λ. Сплошная линия – c_s^{SH}, штриховая – c_0^{SH}, штрихпунктирная – K^{SH}

Fig. 13. Dependence of the shear horizontally polarized SAW and EMSC velocity on the 41Y-cut LiNbO3 (55)/Si plate heterostructure on h/λ. Solid line – c_s^{SH}, dashed line – c_0^{SH}, dash-dotted line – EMCC

64Y-срез. В этом случае максимальное значение КЭМС рэлеевской ПАВ получается при повороте пластинки на 33° относительно подложки (угол Эйлера α=33°). Кривые скоростей и КЭМС для такого расположения пластинки приведены на рис. 14. Как следует из рисунка, глобальный максимум КЭМС достигается при h/λ=0,363 и равен 0,27, при этом c_0^{SH} =4607 м/с, c_s^{SH} =4436 м/с.

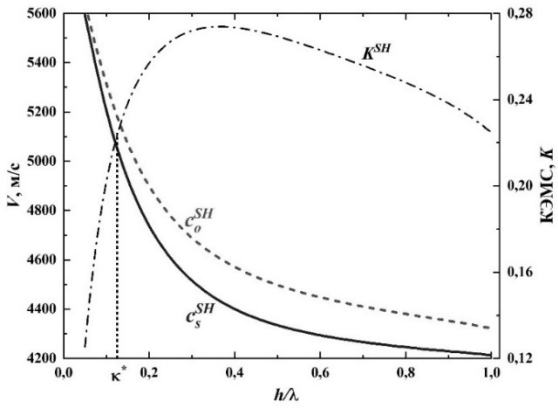


Рис. 14. Зависимость скорости сдвиговой горизонтально поляризованной ПАВ и КЭМС на гетероструктуре 64Y-срез $LiNbO_3$ (33)/Si от h/λ. Сплошная линия – c_s^{SH}, штриховая – c_0^{SH}, штрихпунктирная – K^{SH}

Fig. 14. Dependence of the shear horizontally polarized SAW and EMSC velocity on the 64Y-cut LiNbO3 (33)/Si heterostructure on h/λ. Solid line – c_s^{SH}, dashed line – c_0^{SH}, dash-dotted line – EMCC

128Y-срез. Максимальное значение КЭМС сдвиговой горизонтально поляризованной ПАВ в этом случае получается при повороте пластинки на 90° относительно подложки (угол Эйлера α=90°). Для такого расположения кривые скоростей и КЭМС приведены на рис. 15. Видно, что глобальный максимум КЭМС достигается при h/λ=0,256 и равен 0,43, при этом c_0^{SH} =5046 м/с, c_s^{SH} =4568 м/с.

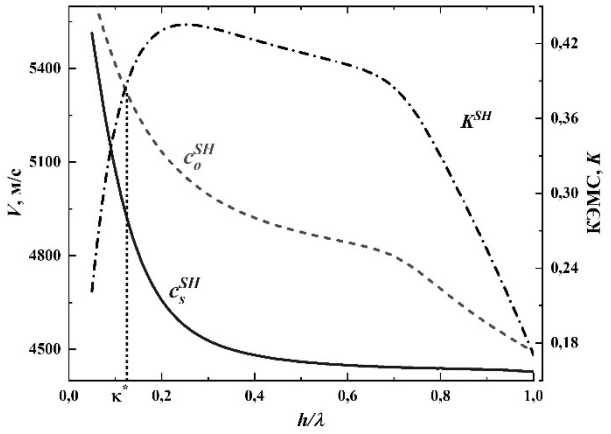


Рис. 15. Зависимость скорости сдвиговой горизонтально поляризованной ПАВ и КЭМС на гетероструктуре 128Y-срез $LiNbO_3$ (90)/Si от h/λ. Сплошная линия – c_s^{SH}, штриховая – c_0^{SH}, штрихпунктирная – K^{SH}

Fig. 15. Dependence of the shear horizontally polarized SAW and EMSC on the 128Y-cut $LiNbO_3$ (90)/Si heterostructure on h/λ. Solid line – c_s^{SH}, dashed line – c_0^{SH}, dash-dotted line – EMCC

Обсуждение полученных результатов

Представленная модель возбуждения ПАВ на гетероструктуре «пластинка W-среза ниобата лития – подложка кремния» позволяет учитывать ориентацию среза, направление распространения волны и толщину пластинки по отношению к длине волны. Анализ эффективности возбуждения рэлеевских и сдвиговых горизонтально поляризованных ПАВ на гетероструктуре показал существование экстремумов КЭМС обоих типов волн при изменении толщины пластинки. Сдвиговые ПАВ наиболее эффективно возбуждаются на X-, Y- и 128Y-срезах, где КЭМС равен K=0,47; 0,47; 0,43 для h/λ =0,263; 0,406; 0,256 соответственно. Это позволяет определить параметры гетероструктуры наиболее эффективной для генерации сдвиговой ПАВ. Если задана частота f, то имеем соотношения $h=(h/\lambda)c/f$, где $\lambda=c/f$. Так, при частоте f=1ГГц для X-среза наиболее эффективной будет гетероструктура с толщиной пластинки h=1,29 мкм при длине волны λ=4,9 мкм, для Y-среза h=1,92 мкм, λ=4,74 мкм, для 128Y-среза h=2,2 мкм, λ=5,05 мкм. Рэлеевские ПАВ на таких гетероструктурах менее эффективны по сравнению со сдвиговыми. В то же время этот вид ПАВ наиболее эффективен на Y-, 41Y-, 64Y- срезах. Для них имеем K=0,2; 0,25; 0,21 для h/λ =0,31, 0,431, 0,375 соответственно.

Ранее в работе [19] была исследована зависимость КЭМС от направления распространения сдвиговых ПАВ на гетероструктурах с различными срезами пластинок ниобата лития для h/λ=0,125. Исследование показало, что максимума КЭМС можно достичь на 153Y-срезе при генерации волны в направлении x_1. Аналогичное исследование в рамках предложенной модели для различных βY-срезов и различных толщин показало, что можно достичь еще большего КЭМС для 160Y-среза. Для него кривые скоростей и КЭМС горизонтально поляризованной ПАВ приведены на рис. 16. На таком срезе максимальное значение КЭМС достигается при h/λ=0,331 и равно 0,51, при этом c_o=4937 м/с, c_s=4292 м/с.

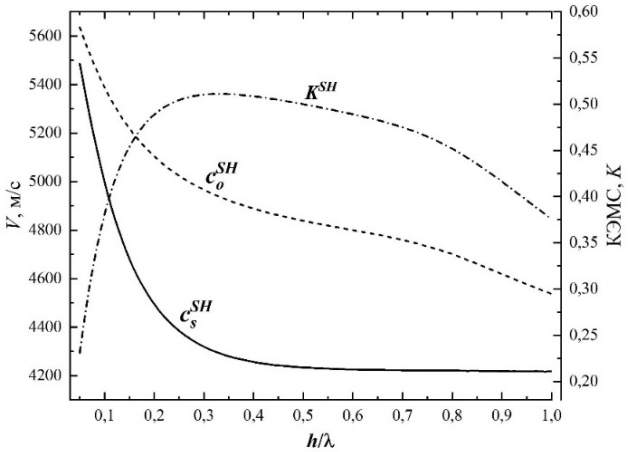


Рис. 16. Зависимость скорости сдвиговой горизонтально поляризованной ПАВ и КЭМС на гетероструктуре 160Y-срез $LiNbO_3$(90)/Si от h/λ. Сплошная линия – c_s^{SH}, штриховая – c_0^{SH}, штрихпунктирная – K^{SH}

Fig. 16. Dependence of the shear horizontally polarized SAW and EMSC on the 160Y-cut LiNbO3 (90)/Si heterostructure on h/λ. Solid line – c_s^{SH}, dashed line – c_0^{SH}, dash-dotted line – EMCC

Заключение

Разработана и исследована математическая модель возбуждения ПАВ на гетероструктуре «пластинка W-среза ниобата лития – подложка (001) кремния», позволяющая учитывать ориентацию среза, направление распространения волны и толщину пластинки по отношению к длине волны. Анализ эффективности возбуждения рэлеевских и сдвиговых горизонтально поляризованных ПАВ на гетероструктуре при различной ориентации среза пластинки ниобата лития показал существование экстремумов КЭМС обоих типов волн при изменении толщины пластинки. Экстремальное поведение КЭМС в зависимости от толщины пластинки ниобата лития позволяет выделить параметры гетероструктур для наиболее эффективного возбуждения ПАВ при использовании различных срезов. На всех типах срезов ниобата лития

КЭМС сдвиговой волны достигает больших значений по сравнению с рэлеевскими волнами. Найдены параметры гетероструктуры (ориентация среза и направление распространения волны), обеспечивающие наиболее высокую эффективность возбуждения ПАВ. Полученные результаты предоставляют возможность обоснованного выбора типа и параметров гетероструктуры с заданной геометрией при создании устройств на ПАВ.

Библиографический список

1. Фильтры на поверхностных акустических волнах (расчет, технология и применение): пер. с англ. / под ред. Г. Мэттьюза. – М.: Радио и связь, 1981, – 472 с.

2. Морган, Д. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах: пер. с англ. / Д. Морган. – М.: Радио и Связь, 1990. – 416 с.

3. Орлов, В.С. Фильтры на поверхностных акустических волнах / В.С. Орлов, В.С. Бондаренко. – М.: Радио и Связь, 1984. – 272 с.

4. Mandal, D. Surface Acoustic Wave (SAW) Sensors: Physics, Materials, and Applications / D. Mandal, S. Banerjee // Sensors (Basel) – 2022. – Vol. 22, no. 3. – P. 820. DOI: 10.3390/s22030820

5. Yasuhiko Nakagawa Third-order elastic constants of litium niobate / Yasuhiko Nakagawa, Kazuhiko Yamanouchi, Kimio Shibayama // Journal of Applied Physics. – 1973. – Vol. 44, no. 9. – P. 3969–3974.

6. Зайцев, Б.Д. Влияние внешнего однородного электрического поля на свойства ПАВ Рэлея в ниобате лития / Б.Д. Зайцев, И.Е. Кузнецова // Акустический журнал. – 1997. – Т. 43, № 1. – С. 116–118.

7. Зайцев, Б.Д. Нелинейное акустическое взаимодействие упругих волн в пластинах ниобата лития / Б.Д. Зайцев, В.Ю. Калинин, И.Е. Кузнецова // Акустический журнал. – 1999. – Т. 45, № 2. – С. 229–234.

8. Advances in lithium niobate photonics: development status and perspectives / G. Chen, N. Li, J.D. Ng, H.-L. Lin, Y. Zhou, Y.H. Fu, L.Y. Ting Lee, Y. Yu, A.-Q. Liu, A.J. Danner // Advanced photonics. – 2022. – Vol. 4, no. 3. – 034003 (pp. 1–43). DOI: 10.1117/1.AP.4.3.034003

9. Shirokov, V.B. Efficiency of generation of surface acoustic waves in barium strontium titanate thin films / V.B. Shirokov, V.V. Kalinchuk, P.E. Timoshenko // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. – 2022. – Vol. 69, no. 5. – P. 1815–1820.

10. Широков, В.Б. Генерация ПАВ сегнетоэлектрической пленкой BST при действии одноосной нагрузки / В.Б. Широков, П.Е. Тимошенко, В.В. Калинчук // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 1. – С. 173–178. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.16

11. Murakami, S. Investigation of the interface between LiNbO3 and Si fabricated via room temperature bonding method using activated Si nano layer / S. Murakami, K. Watanabe, R. Takigawa // Japanese Journal of Applied Physics. – 2023. – Vol. 62. – P. 1–5. DOI: 10.35848/1347-4065/acc2cb

12. Jia L. Wang. Ion-cut lithium niobate on insulator technology: Recent advances and perspectives / Jia L. Wang, F. Chen // Appl. Phys. Rev. – 2021. – Vol. 8. – P. 011307. DOI: 10.1063/5.0037771

13. High-Frequency Surface Acoustic Waves Excited on Thin-Oriented LiNbO3 Single-Crystal Layers Transferred Onto Silicon / Th. Pastureaud, M. Solal, B. Biasse, B. Aspar, J.-b. Briot, W. Daniau, W. Steichen, R. Lardat, V. Laude, A. Laens, J.-m. Friedt, S. Ballandras // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. – 2007. – Vol. 54, no. 4. – P. 870–876. DOI: 10.1109/TUFFC.2007.321

14. Oriented lithium niobate layers transferred on 4” (100) silicon wafer for RF SAW devices / M. Solal, T. Pastureaud, S. Ballandras, B. Aspar, B. Biasse, W. Daniau, J.M. Hodé, S. Calisti, V. Laude // IEEE Ultrasonics Symposium 2002. Proceedings. Munich, Germany. – 2002. – Vol. 1. – P. 131–134. DOI: 10.1109/ULTSYM.2002.1193369

15. Hsu, T.-H. Large Coupling Acoustic Wave Resonators Based on $LiNbO_3/SiO_2/Si$ Functional Substrate / T.-H. Hsu, K.-J. Tseng, M.-H. Li // IEEE Electron Device Letters. – 2020. – Vol. 41, no. 12. – P. 1825–1828. DOI: 10.1109/LED.2020.3030797

16. Surface Acoustic Wave Devices Using Lithium Niobate on Silicon Carbide / S. Zhang, R. Lu, H. Zhou, S. Link, Y. Yang, Z. Li, K. Huang, Ou X., S. Gong // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2020. – Vol. 68, no. 9. – P. 3653–3666. DOI: 10.1109/TMTT.2020.3006294

17. A High-Performance NS-SAW Resonator Using 30° YX-Lithium Niobate / S. Wu, Z. Wu, H. Qian, F. Bao, F. Xu, J. Zou, G. Tang // Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS), Paris, France. – 2022. – P. 1–4. DOI: 10.1109/EFTF/IFCS54560.2022.9850557

18. Warner, A.W. Determination of Elastic and Piezoelectric Constants for Crystals in Class (3m) / A.W. Warner, M. Onoe, G.A. Coquin // J. Acoust. Soc. Am. – 1967. – Vol. 42. – P. 1223–1231. DOI: 10.1121/1.1910709

19. Особенности возбуждения акустических волн на поверхности гетероструктуры LiNbO3/Si / В.Б. Широков, М.С. Пименов, И.Б. Михайлова, А.С. Турчин, В.В. Калинчук // Наука Юга России. – 2024. – Т. 20, № 3. – С. 7–15. DOI: 10.7868/S25000640240302

20. Шаскольская, М.П. Кристаллография / М.П. Шаскольская. – М.: Высш.школа, 1984. – 376 с.

21. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. Т.VII. Теория упругости / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1987. – 248 с.

22. Викторов, И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах / И.А. Викторов. – М.: Наука, 1981. – 288 с.

23. Физическая акустика / под ред. У. Мэзона. – М.: Мир, 1966. – Т.1, Ч. А. – 592 с.

24. Лурье, А.И. Нелинейная теория упругости / А.И. Лурье. – М.: Наука, 1980. – 512 с.

25. Акустические кристаллы / под ред. М.П. Шаскольской. – М.: Наука, 1982. – 632 с.

26. Новацкий, В. Электромагнитные эффекты в твердых телах / В. Новацкий. – М.: Мир, 1986. – 160 с.

27. Royer, D. Elastic waves in solids / D. Royer, E. Dieulesaint. – Springer. Berlin-Heidelberg-New York-Barselona-Hong Kong-London-Milan-Paris-Singapore-Tokyo. – 1996. – 374 p.

28. Collet, B. Bleustein–Gulyaev waves in some functionally graded materials European / B. Collet, M. Destrade, G.A. Maugin // Journal of Mechanics – A/Solids. – 2006. – Vol. 25, no. 5. – P. 695–706.

29. Campbell, J.J. Propagation of Piezoelectric Surface Waves on Cubic and Hexagonal Crystals / J.J. Campbell, W.R. Jones // J. Appl. Phys. – 1970. – Vol. 41. – P. 2796–2801. DOI: 10.1063/1.1659317

30. Поверхностные акустические волны / под ред. А. Олинера. – М.: Мир, 1981. – 390 с.

31. Белянкова, Т.И. Особенности распространения SH-волн в двухслойной структуре из неоднородных пьезоэлектрического и диэлектрического слоев / Т.И. Белянкова, Е.И. Ворович, В.В. Калинчук // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 2. – С. 98–109. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.2.09

32. Белянкова, Т.И. Волны Рэлея в электроупругой среде с преднапряженным неоднородным покрытием / Т.И. Белянкова, Е.И. Ворович, В.В. Калинчук // Вестник СПбГУ. Математика. Механика. Астрономия. – 2023. – Т. 10, № 4. – С. 600–615. DOI: 10.21638/spbu01.2023.402

33. Specific features of SH-waves propagation in structures with prestressed inhomogeneous coating made of piezoceramics based on $LiNbO_3$ / T.I. Belyankova, E.I. Vorovich, V.V. Kalinchuk, O.M. Tukodova // Journal of Advanced Dielectrics. – 2021. – Vol. 11, no. 4–5. – P. 2160007. DOI: 10.1142/S2010135X21600079

References

1. Matthews H. Surface wave filters: design, construction and use. 1977. New York: Wiley. 521 p.

2. Morgan D. Surface Acoustic Wave Filters (With Applications to Electronic Communications and Signal Proceeding). Second Edition. Elsevier, 2007. – 429 p.

3. Orlov V.S., Bondarenko V.S. Filters on surface acoustic waves. – Moskow: Radio and Communications, 1984. – 272 p.

4. Mandal D., Banerjee S. Surface Acoustic Wave (SAW) Sensors: Physics, Materials, and Applications // Sensors (Basel) – 2022 – Jan 21. – V. 22, No. 3: pp. 820. doi: 10.3390/s22030820

5. Yasuhiko Nakagawa, Kazuhiko Yamanouchi, Kimio Shibayama Third-order elastic constants of litium niobate // J. App. Phys., 1973, 44, N 9, p. 3969-3974.

6. Zajcev B.D., Kuzneczova I.E. Vliyanie vneshnego odnorodnogo e`lektricheskogo polya na svojstva PAV Re`leya v niobate litiya // *Akust. zhurnal*, 1997, t.43, №1, S.116-118.

7. Zajcev B.D., Kalinin V.Yu., Kuzneczova I.E. Nelinejnoe akusticheskoe vzaimodejstvie uprugix voln v plastinax niobata litiya // *Akust. zhurnal*, 1999, t.45, №2, S.229-234.

8. Chen G., Li N., Ng J.D., Lin H.-L., Zhou Y., Fu Y.H., Ting Lee L.Y., Yu Y., Liu A.-Q., Danner A.J. Advances in lithium niobate photonics: development status and perspectives // Advanced photonics. – 2022. –Vol. 4, Issue 3. – p. 034003(1-43). doi: 10.1117/1.AP.4.3.034003

9. Shirokov V.B., Kalinchuk V.V., Timoshenko P.E. Efficiency of generation of surface acoustic waves in barium strontium titanate thin films // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2022. Т. 69. № 5. С. 1815-1820.

10. Shirokov V.B., Timoshenko P.E., Kalinchuk V.V. Generaciya PAV segnetoe`lektricheskoj plenkoj BST pri dejstvii odnoosnoj nagruzki // *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2023. No. 1. pp. 173–178. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.16

11. Murakami S., Watanabe K., Takigawa R. Investigation of the interface between LiNbO3 and Si fabricated via roomtemperature bonding method using activated Si nano layer // Japanese *Journal of Applied Physics*. – 2023. – 62, SG1041. – pp. 1–5. doi: 10.35848/1347-4065/acc2cb

12. Jia L. Wang, Chen F. Ion-cut lithium niobate on insulator technology: Recent advances and perspectives // *Appl. Phys. Rev.* 2021.8: pp. 011307. doi: 10.1063/5.0037771

13. Pastureaud Th., Solal M., Biasse B., Aspar B., Briot J.-b, Daniau W., Steichen W., Lardat R., Laude V., Laens A., Friedt J.-m., Ballandras S. High-Frequency Surface Acoustic Waves Excited on Thin-Oriented LiNbO3 Single-Crystal Layers Transferred Onto Silicon // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. – 2007. – 54, I. 4. – p. 870–876(). doi: 10.1109/TUFFC.2007.321

14. Solal M., Pastureaud T., Ballandras S., Aspar B., Biasse B., Daniau W., Hodé J.M., Calisti S., Laude V. Oriented lithium niobate layers transferred on 4” (100) silicon wafer for RF SAW devices // IEEE Ultrasonics Symposium, 2002. Proceedings., Munich, Germany. – 2002. – V.1. – pp. 131–134. doi: 10.1109/ULTSYM.2002.1193369

15. Hsu T.-H., Tseng K.-J., Li M.-H. Large Coupling Acoustic Wave Resonators Based on $LiNbO_3/SiO_2/Si$ Functional Substrate // IEEE Electron Device Letters. – 2020. – V. 41, No. 12. – pp. 1825–1828. doi: 10.1109/LED.2020.3030797

16. Zhang S., Lu R., Zhou H., Link S., Yang Y., Li Z., Huang K., Ou X., Gong S. Surface Acoustic Wave Devices Using Lithium Niobate on Silicon Carbide // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2020. – V. 68, No. 9. – pp. 3653–3666. doi: 10.1109/TMTT.2020.3006294

17.Wu S., Wu Z., Qian H., Bao F., Xu F., Zou J., Tang G. A High-Performance NS-SAW Resonator Using 30° YX-Lithium Niobate // Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS), Paris, France. – 2022. – pp. 1– 4. doi: 10.1109/EFTF/IFCS54560.2022.9850557

18. Warner A.W., Onoe M., and Coquin G.A. Determination of Elastic and Piezoelectric Constants for Crystals in Class (3m) // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1967. – V. 42. – pp. 1223–1231. doi: 10.1121/1.1910709

19. Shirokov V.B., Pimenov M.S., Mixajlova I.B., Turchin A.S., Kalinchuk V.V. Osobennosti vozbuzhdeniya akusticheskix voln na poverxnosti geterostruktury` LiNbO3/Si // *Nauka Yuga Rossii*. 2024. V. 20, No 3. pp. 7–15. DOI: 10.7868/S25000640240302.

20. Shaskol`skaya M.P. Kristallografiya. Moscow: Vy`sshaya shkola. 1984. 376 p.

21. Landau L., Pitaevskii L., Kosevich A., and Lifshitz E. Theory of Elasticity: Volume 7. Elsevier Science, 2012. [Online]. Available: https://books.google.ru/books? id=NXRaWJb4HdkC.

22. Viktorov I.A. Sound surface waves in solids. Moscow: Nauka, 1981. 288 p.

23. Lur`e A.I. Nelinejnaya teoriya uprugosti / Moskow: Nauka. 1980. 512 p.

24. Physical acoustics. Edited by W.P. Mason. vol. 1A. Methods and Devices. Academic Press. New York and London, 1964. 515 p.

25. Acoustic Crystals. Edited by Shaskol’skaya M.P. Moscow: Nauka, 1982. 632 p.

26. Novatsky V. Electromagnetic Effects in Solids. Moscow: Mir, 1986. 160 p.

27. Royer D., Dieulesaint E. Elastic waves in solids. Springer. Berlin-Heidelberg-New York-Barselona-Hong Kong-London-Milan-Paris-Singapore-Tokyo. 1996. 374 p.

28. Collet B., Destrade M., Maugin G.A. Bleustein–Gulyaev waves in some functionally graded materials European // Journal of Mechanics – A/Solids. 2006. V. 25, No 5, pp. 695–706.

29. Campbell J.J., Jones W.R. Propagation of Piezoelectric Surface Waves on Cubic and Hexagonal Crystals // J. Appl. Phys. 1970. V.41, pp. 2796–2801 https://doi.org/ 10.1063/1.1659317

30. Acoustic surface waves. Edited by A.A. Oliner. Springer Verlag. Berlin-Heidelberg-New York. 1978. 331 p.

31. Belyankova T.I., Vorovich E.I., Kalinchuk V.V. Osobennosti rasprostraneniya sh-voln v dvuxslojnoj strukture iz neodnorodny`h p`ezoe`lektricheskogo i die`lektricheskogo sloev // *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2023. №2. pp. 98-109. doi: 10.15593/perm.mech/2023.2.09

32. Belyankova T.I., Kalinchuk V.V. Rayleigh Waves in an Electroelastic Medium with Prestressed Inhomogeneous Coating // Vestnik St. Petersburg University, Mathematics. 2023. V. 56, No. 4. pp. 424–434. doi: 10.1134/S1063454123040040

33. Belyankova T.I., Vorovich E.I., Kalinchuk V.V., Tukodova O.M. Specific features of SH-waves propagation in structures with prestressed inhomogeneous coating made of piezoceramics based on $LiNbO_3$ // Journal of Advanced Dielectrics. 2021. V. 11, No. 4-5. pp. 2160007. doi: 10.1142/S2010135X21600079

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 25-29-00863.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.

Funding. This work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 25-29-00863.
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
The authors' contributions are equal.