

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2025-87-4-514-526

**НЕКОТОРЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУР  
С ТОНКИМИ ПЛАСТИНАМИ ТАНТАЛАТА ЛИТИЯ  
НА ПОДЛОЖКЕ (0001) СРЕЗА  $\alpha$ -САПФИРА\***

© 2025 г.

**Калинчук В.В., Пименов М.С.,  
Турчин А.С., Широков В.Б.**

*Южный научный центр Российской академии наук,  
Ростов-на-Дону, Российская Федерация*

*vkalin415@mail.ru*

*Поступила в редакцию 20.10.2025*

Разработана перспективная для создания акустоэлектронных устройств широкого назначения математическая модель пьезоактивной гетероструктуры «пластинка  $W$ -среза кристалла танталата лития, нанесенная через буферный слой диоксида кремния на подложку (0001) среза  $\alpha$ -сапфира», где  $W$  определяет нормаль к поверхности среза кристалла. Модель позволяет учитывать ориентацию среза кристалла, направление распространения сдвиговой горизонтально поляризованной волны, а также геометрические размеры составляющих элементов гетероструктуры. Это позволяет в широком диапазоне изменять ее параметры с целью достижения максимальных значений коэффициента электромеханической связи. Проведено исследование свойств гетероструктуры при наличии и в отсутствие буферного слоя. Для последнего случая анализ позволил определить наиболее оптимальные ориентацию среза пластинки танталата лития и его толщину, при которых возможно достижение оптимального уровня коэффициента электромеханической связи. Максимальное значение этого коэффициента при заданной ориентации среза и определенных геометрических параметрах гетероструктуры достигается путем выбора направления распространения волны. Исследование гетероструктуры с буферным слоем диоксида кремния показало, что его введение значительно увеличивает коэффициент электромеханической связи. Проведено детальное исследование распределения амплитуды акустической волны и плотности потока энергии по глубине гетероструктуры. Расчеты показали, что амплитуда волны и степень локализации упругой энергии в пьезоактивном слое зависят от наличия буферного слоя и от толщины пьезоактивного слоя. Это напрямую сказывается на значении коэффициента электромеханической связи. Его максимум наблюдается при небольшой толщине пьезоактивного слоя. Таким образом, существуют оптимальные значения параметров гетероструктуры, позволяющие достичь максимального значения коэффициента электромеханической связи. Проведенное исследование представляет интерес для разработчиков акустоэлектронных приборов и устройств широкого назначения.

---

\*Выполнено при финансовой поддержке РНФ, проект № 25-29-00863.

*Ключевые слова:* сдвиговые горизонтально поляризованные волны, гетероструктура с участием tantalата лития, тонкие пластины  $W$ -среза кристалла tantalата лития, (0001) срез  $\alpha$ -сапфира, поверхностная акустическая волна, коэффициент электромеханической связи, плотность потока энергии.

## Введение

В разработке устройств акустоэлектроники значительную роль играют элементы, использующие поверхностные акустические волны (ПАВ). Элементы с ПАВ активно применяются в интегральных устройствах микроэлектроники (фильтры, резонаторы, линии задержки) [1–3], в микроэлектромеханических системах [4], сенсорах [5, 6], акустооптических системах [7]. Миниатюризация акустоэлектронных устройств и повышение их рабочих частот приводят к необходимости использовать в качестве активных элементов тонкие пленки. Однако методы нанесения тонких пленок не позволяют выбирать ориентацию с наиболее эффективным возбуждением ПАВ. Кроме того, высокотемпературные методы нанесения пленок из-за различия коэффициентов теплового расширения у пленки и подложки приводят к большим деформациям и полидоменности пленок. Недавно появились методы переноса тонких монокристаллических пластинок ниобата лития [7–10] на подложки при низких температурах. Это позволяет ориентировать пластинки ниобата лития для использования направлений наиболее эффективного возбуждения ПАВ [7, 8, 11–14]. Танталат лития ( $\text{LiTaO}_3$ ) наряду с ниобатом лития широко применяется в качестве активного элемента в интегральных устройствах микроэлектроники. Благодаря высоким пьезоэлектрическим показателям и стабильным свойствам этот материал используют в качестве подложек для устройств на основе ПАВ. Существенным преимуществом tantalата лития по сравнению с ниобатом является его высокая механическая прочность, что имеет важное значение при применении планарных технологий для создания микроэлектронных систем. Новые методы переноса тонких монокристаллических пластинок на подложки при достаточно низких температурах [9, 10] позволяют ориентировать монокристаллические пластинки для использования направлений наиболее эффективного [13, 14] возбуждения ПАВ. Поверхностная волна локализуется вблизи поверхности гетероструктуры. Эффективность возбуждения волны зависит от величины локализации волны в сегнетоэлектрическом слое, это связано с материалом подложки. Поэтому для каждой гетероструктуры необходим анализ влияния ориентации и толщины активного слоя, материала подложки на эффективность возбуждения ПАВ. Такой анализ для гетероструктуры ниобат лития/кремний выполнен в [15]. В настоящей статье представлены результаты анализа акустических свойств гетероструктуры «пластинка  $W$ -среза кристалла tantalата лития, нанесенная через буферный слой плавленого кварца на подложку (0001) среза  $\alpha$ -сапфира» при различной толщине пластины tantalата лития и фиксированной толщине диоксида кремния. Исследовалось влияние параметров гетероструктуры на эффективность возбуждения ПАВ, амплитуду смещений и распределение плотности потока энергии. Исследование показало, что наличие буферного слоя существенно увеличивает коэффициент электромеханической связи (КЭМС) гетероструктуры. Степень увеличения напрямую зависит от толщины пьезоактивного слоя. В частности, увеличение толщины пьезоактивного слоя при фиксированной толщине буферного слоя уменьшает КЭМС.

## 1. Формулировка задачи

В рассмотрение вводятся прямоугольная декартова система координат  $x_1x_2x_3$  и совпадающая с ней в исходном состоянии кристаллографическая система координат  $XYZ$  [16]. Подложка (0001) среза монокристаллического сапфира ориентирована вдоль оси  $x_3$  – тригональной оси кристалла. Ось  $x_1$  лежит в плоскости симметрии и ортогональна оси  $x_3$ . Ось  $x_2$  ортогональна указанным осям и составляет с ними правую систему координат. Оси  $X, Y, Z$  – кристаллографические оси, связанные с направлениями  $[10\bar{1}0], [\bar{1}2\bar{1}0], [0001]$  соответственно. Угол  $\beta$  – один из углов Эйлера, характеризует поворот пластиинки вокруг оси  $X$ . Направление распространения поверхностной волны в 3D-расчетах – вдоль оси  $x_1$ . Геометрия задачи представлена на рис. 1.

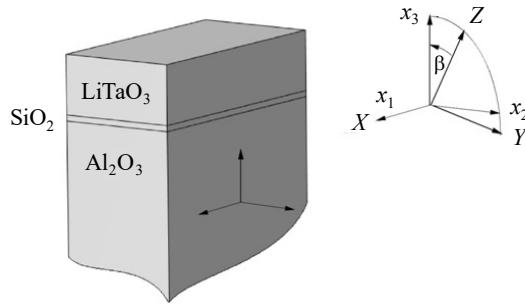


Рис. 1. Гетероструктура с tantalатом лития и кристаллографические оси tantalата лития

Рассматривается задача о возбуждении акустических волн на поверхности сегнетоэлектрической гетероструктуры, состоящей из пьезоэлектрической пластины tantalата лития ( $h_2 \leq x_3 \leq h_2 + h_1, |x_1|, |x_2| \leq \infty$ ), нанесенной на буферный слой диоксида кремния  $0 \leq x_3 \leq h_2, |x_1|, |x_2| \leq \infty$ . Последний лежит на поверхности подложки (0001) среза монокристаллического  $\alpha$ -сапфира  $x_3 \leq 0, |x_1|, |x_2| \leq \infty$ , ориентированного вдоль тригональной оси кристалла. Движение гетероструктуры описывается уравнениями движения [17, 18]

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

где  $n = 1, 2, 3; l, m = 1, 2, 3$ . Индексом  $n = 1$  отмечены величины для пластины tantalата лития, индексом  $n = 2$  – для буферного слоя диоксида кремния, индексом  $n = 3$  – для сапфировой подложки;  $u_l^{(n)}$  – компоненты вектора смещения вдоль координатных осей  $x_l$ ;  $\sigma_{lm}^{(n)}$  – напряжения на соответствующих плоскостях пластины. Уравнения (1) дополнены уравнениями квазистатики для электрической индукции

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

Выражения для компонент тензоров напряжений  $T_l^{(1)}$  и компонент векторов индукции  $D_m^{(1)}$  представляются формулами

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

Здесь по повторяющимся индексам подразумевается суммирование:  $i, k = \overline{1, 6}$ ,  $l, m = 1, 2, 3$ . Для  $i, k$  в представлениях (3) используется нотация Фойгта [19]:  $i \rightarrow ii$ ,  $i = 1, 2, 3, 4 \rightarrow 23, 5 \rightarrow 13, 6 \rightarrow 12$ . Для напряжений приняты обозначения:  $T_i^{(n)} = \sigma_{ii}^{(n)}$ ,  $i = 1, 2, 3$ ,  $T_4^{(n)} = \sigma_{23}^{(n)}$ ,  $T_5^{(n)} = \sigma_{13}^{(n)}$ ,  $T_6^{(n)} = \sigma_{12}^{(n)}$ ; для деформаций:  $S_j^{(n)} = \partial u_j^{(n)} / \partial x_j$ ,  $j = 1, 2, 3$  (нет суммирования),  $S_4^{(n)} = \partial u_2^{(n)} / \partial x_3 + \partial u_3^{(n)} / \partial x_2$ ,  $S_5^{(n)} = \partial u_1^{(n)} / \partial x_3 + \partial u_3^{(n)} / \partial x_1$ ,  $S_6^{(n)} = \partial u_1^{(n)} / \partial x_2 + \partial u_2^{(n)} / \partial x_1$ ;  $\varphi^{(n)}$  – электрический потенциал,  $c_{ik}^{E(n)}$  – компоненты тензора упругости,  $e_{mi}^{(1)}$  – электроупругие коэффициенты,  $e_{mi}^{(2)} = e_{mi}^{(3)} = 0$ ,  $\varepsilon_{ml}^{S(n)}$  – диэлектрическая проницаемость при постоянной деформации. Предварительные исследования показали, что, как и в случае ниобата лития [15], эффективность возбуждения поперечных упругих волн (SH-волн) намного выше эффективности возбуждения рэлеевских волн. В связи с этим далее рассматриваются сдвиговые горизонтально поляризованные волны, удовлетворяющие условиям:

$$u_2^{(n)} = u_2^{(n)}(x_1, x_3), \quad u_1^{(n)} = u_3^{(n)} = 0, \quad \partial / \partial x_2 = 0, \quad n = 1, 2, 3. \quad (4)$$

Поверхность гетероструктуры  $x_3 = h_1 + h_2$  с нормалью  $x_3$  предполагается свободной от механических напряжений:  $T_k^{(1)}(x_1) = 0$ ,  $|x_1| \leq \infty$ ,  $k = 3, 4, 5$ , колебания – установившимися по гармоническому закону. На границах пластиинка – буферный слой ( $x_3 = h_2$ ) и буферный слой – подложка ( $x_3 = 0$ ) задаются условия равенства напряжений и смещений, а также электрических потенциалов и нормальных компонент векторов индукции:

$$u_m^{(1)}(h_2) = u_m^{(2)}(h_2), \quad \varphi^{(1)}(h_2) = \varphi^{(2)}(h_2), \quad (5)$$

$$T_k^{(1)}(h_2) = T_k^{(2)}(h_2), \quad D_3^{(1)}(h_2) = D_3^{(2)}(h_2),$$

$$u_m^{(2)}(0) = u_m^{(3)}(0), \quad \varphi^{(2)}(0) = \varphi^{(3)}(0), \quad (6)$$

$$T_k^{(2)}(0) = T_k^{(3)}(0), \quad D_3^{(2)}(0) = D_3^{(3)}(0).$$

На верхней поверхности пластиинки  $x_3 = h_1 + h_2$  рассмотрены два типа электрических условий:

– открытые

$$D_3^{(1)}(h_1 + h_2) = 0; \quad (7)$$

– закрытые

$$\varphi^{(1)}(h_1 + h_2) = 0. \quad (8)$$

Различие скоростей распространения ПАВ для этих двух случаев позволяет вычислить КЭМС по формуле

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

где  $c_f$  – скорость распространения ПАВ на электрически свободной поверхности (индекс  $f$  – free),  $c_g$  – скорость распространения ПАВ на закороченной (металлизированной и заземленной) поверхности (индекс  $g$  – ground). Вдоль направления распространения волны  $x_1$  заданы периодические граничные условия. В конечно-элементной задаче вдоль оси  $x_2$  заданы периодические условия с нулевым периодом или условия непрерывности, что не влияет на ПАВ. Размер подложки в численных

расчетах задан равным 150 мкм. Нижняя поверхность подложки заземлена. Далее рассмотрим особенности ПАВ на гетероструктурах  $\text{LiTaO}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  с различными срезами пластинки танталата лития.

## 2. Влияние ориентации среза пластины $\text{LiTaO}_3$ на эффективность возбуждения ПАВ

Как уже отмечалось, КЭМС для рэлеевской волны значительно меньше КЭМС сдвиговой волны. В связи с этим в настоящей статье рассматриваются только сдвиговые поверхностные волны. Значения величин материальных постоянных в уравнении (3) для танталата лития ( $\rho = 7450 \text{ кг/м}^3$ ) представляются в виде таблицы [20]:

$$\begin{pmatrix} c^E (\text{ГПа}) & e^T \\ e (\text{Кл/м}^2) & \epsilon/\epsilon_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 232,97 & 46,89 & 80,23 & -11,03 \\ 46,89 & 232,97 & 80,23 & 11,03 \\ 80,23 & 52,91 & 275,36 & \\ -11,03 & 11,03 & & 93,90 \\ & & 93,90 & -11,03 \\ & & -11,03 & 93,04 \\ & & 2,596 & \\ & & -1,589 & \\ & & 2,596 & \\ & & -1,589 & \\ & & 40,9 & \\ & & 40,9 & \\ & & 43,3 & \end{pmatrix} \quad (10)$$

Упругие константы для сапфира ( $\rho = 3970 \text{ кг/м}^3$ ,  $\epsilon_{11}/\epsilon_0 = \epsilon_{22}/\epsilon_0 = 9,4$ ,  $\epsilon_{33}/\epsilon_0 = 11,5$ ) задаются таблицей [21]

$$c(\text{ГПа}) = \begin{pmatrix} 497,5 & 162,6 & 115,5 & 22,5 \\ 162,6 & 497,5 & 115,5 & -22,5 \\ 115,5 & 115,5 & 503,3 & \\ 22,5 & -22,5 & & 147,4 \\ & & 147,4 & 22,5 \\ & & 22,5 & 167,4 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Константы для прослойки из плавленого кварца имеют значения:  $\rho = 2220 \text{ кг/м}^3$ ,  $\epsilon/\epsilon_0 = 3,8$ ,  $c_{11} = 78,22 \text{ ГПа}$ ,  $c_{12} = 15,69 \text{ ГПа}$  [22].

На рис. 2 приведены результаты вычисления КЭМС для SH ПАВ на гетероструктуре  $\text{LiTaO}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  при толщине пластинки танталата лития 1 мкм и толщине буферного слоя плавленого кварца 200 нм в зависимости от двух углов  $\alpha$  и  $\beta$ . Угол  $\beta$  определяет ориентацию среза пластинки кристалла танталата лития, угол  $\alpha$  – направление распространения волны в плоскости пластинки. Как следует из рисунка, максимум КЭМС достигается при  $\alpha = 0$ ,  $\beta = 63^\circ$ . Поэтому в дальнейшем будем исследовать КЭМС для различных углов при направлении распространения волны вдоль оси  $x_1$ .

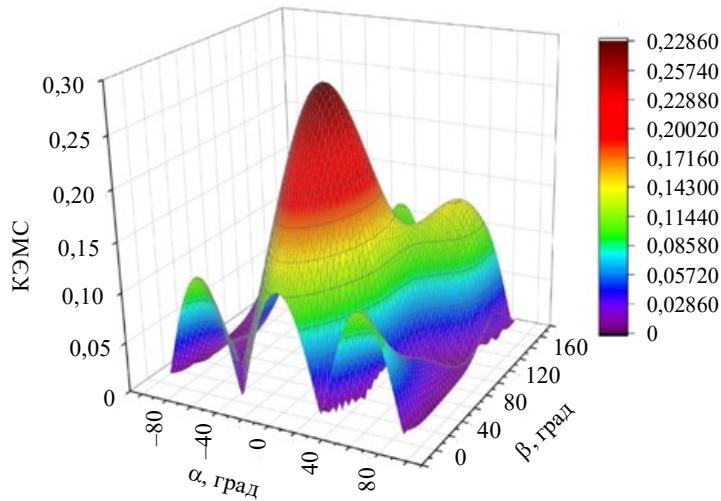


Рис. 2. Зависимость КЭМС сдвиговой ПАВ на поверхности гетероструктуры от эйлеровых углов

### 3. Эффективность возбуждения ПАВ в гетероструктуре $\text{LiTaO}_3/\text//\text{Al}_2\text{O}_3$

Исследуется зависимость КЭМС гетероструктуры  $\text{LiTaO}_3/\text//\text{Al}_2\text{O}_3$  от толщины пластиинки танталата лития  $h_1$ , отнесенной к длине волны  $\lambda$ . На рис. 3 представлена зависимость фазовых скоростей ПАВ на свободной и закороченной поверхностях и КЭМС в зависимости от угла  $\beta$  для гетероструктуры  $\text{LiTaO}_3/\text//\text{Al}_2\text{O}_3$ . Здесь толщина пластиинки  $h_1 = 1$  мкм, длина волны  $\lambda = 4$  мкм, то есть  $h_1/\lambda = 0,25$ . Результаты расчетов при других значениях толщины пластиинки  $h_1$  от 0,15 до 2 мкм, но при фиксированном  $h_1/\lambda = 0,25$  практически не отличаются от результатов, приведенных на рис. 3.

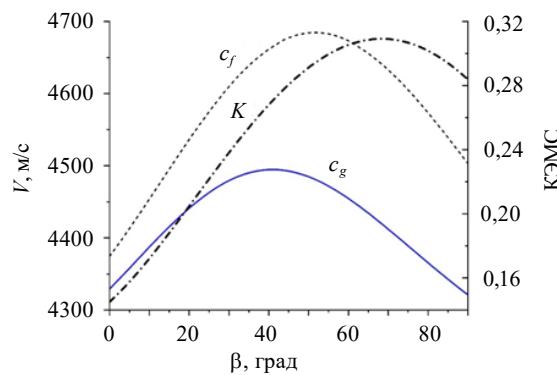


Рис. 3. Зависимости скоростей  $c_g$  на закороченной и  $c_f$  на свободной поверхностях гетероструктуры  $\text{LiTaO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  и КЭМС сдвиговой ПАВ от угла  $\beta$

Как следует из рисунка, максимальное значение КЭМС в рассматриваемом случае достигается при  $\beta = 69^\circ$  и равно 0,309. Изменение КЭМС в пределах одного процента вблизи максимума наблюдаются в интервале углов от 69 до  $75^\circ$ . Для угла  $\beta = 67^\circ$  из этого интервала проведен расчет КЭМС для различных значений  $h_1/\lambda$ . Эти результаты приведены на рис. 4. Здесь изменение КЭМС вблизи максимума  $K = 0,315$  в пределах одного процента наблюдаются в интервале  $h_1/\lambda$  от 0,27 до 0,37.

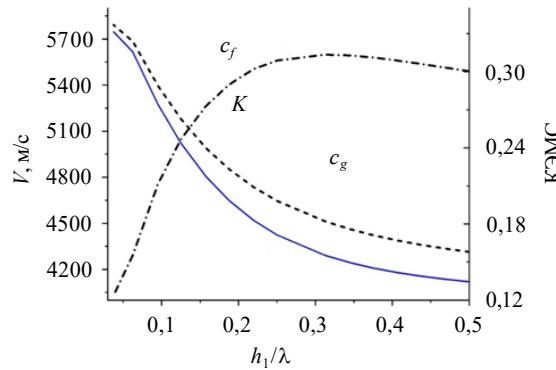


Рис. 4. Зависимости скоростей  $c_g$  на закороченной и  $c_f$  на свободной поверхностях гетероструктуры  $\text{LiTaO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  и КЭМС сдвиговой ПАВ от величины  $h_1/\lambda$  ( $\beta = 67^\circ$ )

#### 4. Эффективность возбуждения ПАВ в гетероструктуре $\text{LiTaO}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

Введение буферного слоя существенно влияет на степень локализации ПАВ в сегнетоэлектрическом слое гетероструктуры и на КЭМС. В статьях [9, 10, 12] исследовано влияние параметров гетероструктуры с участием ниобата лития на эффективность возбуждения ПАВ. В настоящей статье исследуется степень локализации ПАВ при различной толщине пластины  $\text{LiTaO}_3$  и фиксированной толщине  $\text{SiO}_2$  в гетероструктуре  $\text{LiTaO}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ . Влияние буферного слоя на степень локализации волны иллюстрируют рис. 5–7, на которых представлены распределения амплитуды смещения  $u_2$  (рис. 5) и плотности потока упругой энергии  $W$ , SH ПАВ (рис. 6, 7) в гетероструктуре  $\text{LiTaO}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  в зависимости от глубины при различных значениях длины волны  $\lambda$  таких, что  $h_1/\lambda = 0,25$  (на рис. 5 это значение отмечено индексом  $\kappa_0$ ). Цифрами 1, 2, 3 и 4 на всех рисунках отмечены кривые, соответствующие толщине пластины танталата лития 0,25, 0,5, 1,0 и 2,0 мкм соответственно. Толщина  $\text{SiO}_2$  фиксирована и равна 0,2 мкм. Цифрой 5 отмечена кривая, соответствующая отсутствию буферного слоя. Интервалы  $[\kappa_0, \kappa_1]$ ,  $[\kappa_0, \kappa_2]$ ,  $[\kappa_0, \kappa_3]$  и  $[\kappa_0, \kappa_4]$  определяют размер фиксированной толщины слоя диоксида кремния при  $h_1/\lambda = 0,25$  и различных значениях  $h_1$ , равных 0,25; 0,5; 1,0 и 2,0 мкм соответственно.

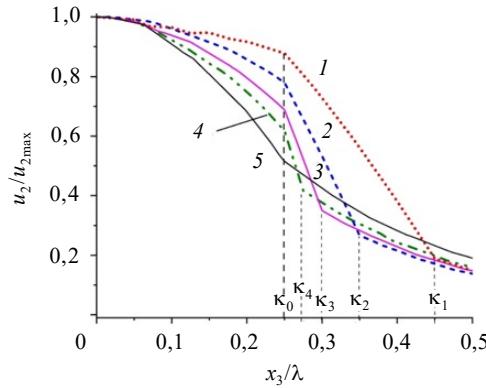


Рис. 5. Зависимость относительного смещения  $u_2$  сдвиговой ПАВ для гетероструктур с танталатом лития от глубины  $x_3$

Как следует из рисунка, наличие прослойки существенно увеличивает амплитуду ПАВ в сегнетоэлектрическом слое. Максимальная амплитуда наблюдается при минимальной толщине пластины, равной 0,25 мкм. Увеличение  $h_1$  приводит к уменьшению амплитуды волны. Ее минимум наблюдается при максимальной толщине пластины, равной 2,0 мкм.

Аналогично ведет себя и плотность потока упругой энергии, распределение которого по толщине гетероструктуры  $\text{LiTaO}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  в зависимости от глубины при различных значениях длины волны таких, что  $h_1/\lambda = 0,25$ , представлено на рис. 6 и 7 (фрагмент). На фрагменте (см. рис. 7) значение  $h_1/\lambda = 0,25$  отмечено индексом  $\kappa_0$ . Интервалы  $[\kappa_0, \kappa_1]$ ,  $[\kappa_0, \kappa_2]$ ,  $[\kappa_0, \kappa_3]$  и  $[\kappa_0, \kappa_4]$  определяются фиксированной толщиной прослойки относительно  $h_1 = 0,25; 0,5; 1,0$  и 2,0 мкм соответственно. Как следует из рис. 6, наличие прослойки существенно увеличивает степень локализации ПАВ в сегнетоэлектрическом слое. Максимальная локализация энергии наблюдается при толщине пластины, равной 0,25 мкм. Увеличение  $h_1$  приводит к уменьшению плотности потока энергии волны. Ее минимум наблюдается при максимальной толщине пластины, равной 2,0 мкм.

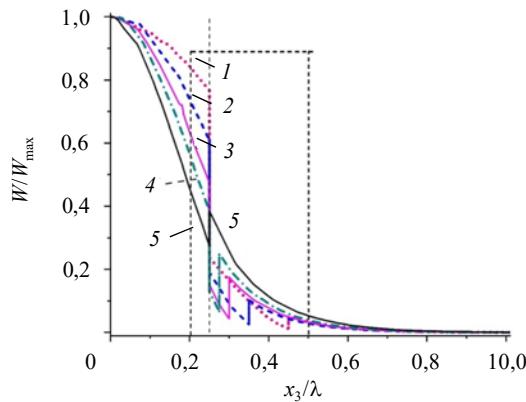


Рис. 6. Распределение плотности потока упругой энергии SH ПАВ для гетероструктуры  $\text{LiTaO}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  по толщине при различных значениях  $h_1$ , но фиксированных значениях  $h_1/\lambda = 0,25$  и  $h_2 = 0,2$  мкм

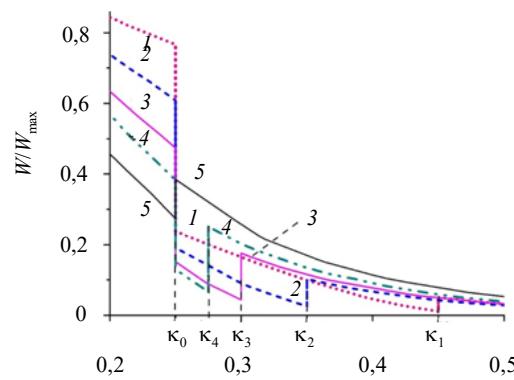


Рис. 7 (фрагмент). Распределение плотности потока упругой энергии SH ПАВ по толщине гетероструктуры  $\text{LiTaO}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  при различных  $h_1$ , но фиксированных значениях  $h_1/\lambda = 0,25$  и  $h_2 = 0,2$  мкм

На рис. 8 представлены графики зависимости КЭМС от угла  $\beta$  для гетероструктуры  $\text{LiTaO}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  для различных толщин сегнетоэлектрического слоя танталата лития при фиксированных значениях  $h_1/\lambda = 0,25$  и  $h_2 = 0,2$  мкм. Цифрами 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 7 отмечены кривые, соответствующие  $h_1 = 0,5; 0,75; 1,0; 1,25; 1,75; 2,0$  мкм. Цифрой 8 отмечена кривая, соответствующая отсутствию прослойки ( $h_2 = 0$ ).

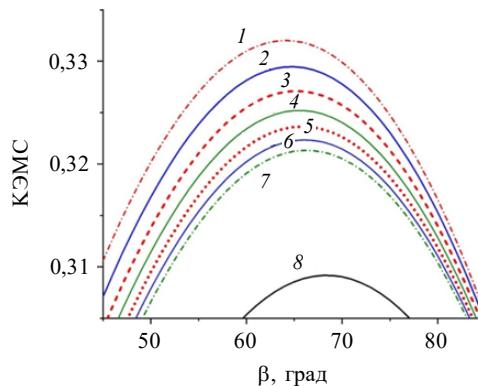


Рис. 8. Зависимость КЭМС сдвиговой ПАВ на поверхности гетероструктуры  $\text{LiTaO}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  от угла  $\beta$

Как следует из графиков, наличие прослойки  $\text{SiO}_2$  приводит к существенному увеличению КЭМС, значение которого зависит от толщины  $\text{LiTaO}_3$ . В частности, при толщине пластины 0,5 мкм нанесение прослойки  $\text{SiO}_2$  сразу повышает КЭМС на 20%. Дальнейшее увеличение толщины пластины ниобата лития приводит к уменьшению КЭМС. От наличия прослойки зависит также ориентация среза танталата лития, на котором достигается максимум КЭМС. В отсутствие прослойки он достигается при  $\beta = 70^\circ$ . Нанесение буферного слоя при  $h_1 = 0,5$  мкм уменьшает этот угол на  $6^\circ$ . Дальнейшее увеличение толщины пластины  $\text{LiTaO}_3$  увеличивает значение угла, на котором достигается максимум КЭМС, в пределах  $65\text{--}68^\circ$ .

### Заключение

В конечно-элементной среде COMSOL-Multiphysics разработана математическая модель пьезоактивной гетероструктуры « $W$ -срез  $\text{LiTaO}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ », где  $W$  определяет нормаль к поверхности кристалла. Модель позволяет учитывать геометрические размеры гетероструктуры, ориентацию среза кристалла и направление распространения волны. Для гетероструктуры « $W$ -срез  $\text{LiTaO}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ » в широком диапазоне изменения параметров изучено влияние ориентации среза кристалла, направления распространения волны, а также геометрических размеров буферного слоя на КЭМС сдвиговых горизонтально поляризованных ПАВ. Пьезоактивная составляющая гетероструктуры представляет собой пластину  $W$ -среза танталата лития, нанесенную с буферным слоем плавленого кварца на подложку (0001) среза  $\alpha$ -сапфира. Найдены ориентации срезов пластин танталата лития с максимальным КЭМС для возбуждения сдвиговых волн. Расчеты выполнены для различных толщин пластин при фиксированном отношении толщины пластины к длине волны, равном 0,25. При уменьшении толщины пьезоактивного слоя для гетероструктуры с прослойкой наблюдается увеличение КЭМС, что связано с локализацией упругой энергии в пьезоактивном слое. Для гетероструктуры без про-

слойки  $\text{SiO}_2$  при фиксированном значении  $h_1/\lambda = 0,25$  максимальное значение КЭМС равно 0,31 при угле  $\beta = 69^\circ$ . Изменение КЭМС вблизи максимума в пределах одного процента наблюдается в интервале углов от 60 до  $75^\circ$ . Для угла  $\beta = 67^\circ$  из этого диапазона рассчитано поведение КЭМС при различных значениях  $h_1/\lambda$ . Изменения КЭМС вблизи максимума, равного 0,31, в пределах одного процента здесь наблюдаются в интервале  $h_1/\lambda$  от 0,27 до 0,37. Включение в гетероструктуру дополнительного диэлектрического слоя  $\text{SiO}_2$  толщиной 200 нм приводит к увеличению КЭМС и сдвигу максимального значения в сторону меньших углов  $\beta$ . Это связано с увеличением локализации упругой энергии в пьезоактивном слое.

#### Список литературы

1. Matthews H. *Surface Wave Filters: Design, Construction and Use*. New York: Wiley, 1977. 521 p.
2. Морган Д. *Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах*. М: Радио и связь, 1990. 416 с.
3. Орлов В.С., Бондаренко В.С. *Фильтры на поверхностных акустических волнах*. М.: Радио и Связь, 1984. 272 с.
4. Beeby S., Ensel G., White N.M., Kraft M. *MEMS Mechanical Sensors*. Boston–London: Artech House, 2004. 269 p.
5. Priya R.B., Venkatesan T., Pandlyrayarajan G., Pardya H.M. A short review of SAW sensors. *Journal of Environmental Nanotechnology*. 2015. Vol. 4. Iss. 4. P. 15–22. DOI:10.13074/jent.2015.12.154171.
6. Mandal D., Banerjee S. Surface acoustic wave (SAW) sensors: Physics, materials, and applications. *Sensors*. 2022. Vol. 22. Iss. 3. P. 1–38. <https://doi.org/10.3390/s22030820>.
7. 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. Iss. 3, P. 034003-1 – 034003-43). DOI: 10.1111/1.AP.4.3.034003.
8. Solal M., Pastureaud T., Ballandras S., Aspar B., Biaisse B., Daniau W., Hode J.M., Calisti S., Laude V. Oriented lithium niobate layers transferred on 4" (100) silicon wafer for RF SAW devices. *IEEE Ultrasonics Symposium, Proceedings*. Munich, Germany. 2002. Vol. 1. P. 131–134. DOI: 10.1109/ULTSYM.2002.1193369.
9. Pastureaud Th., Solal M., Biaisse B., Aspar BBriot, 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  $\text{LiNbO}_3$  single-crystal layers transferred onto silicon. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2007. Vol. 54. Iss. 4. P. 870–876. DOI: 10.1109/TUFFC.2007.321.
10. Wang Jia L., Chen F. Ion-cut lithium niobate on insulator technology: Recent advances and perspectives. *Applied Physics Reviews*. 2021. Vol. 8. No 1. Article No011307. DOI: 10.1063/5.0037771.
11. Murakami S., Watanabe K., Takigawa R. Investigation of the interface between  $\text{LiNbO}_3$  and Si fabricated via room-temperature bonding method using activated Si nano layer. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2023. Vol. 62. P. SG1041-1 – SG1041-5. DOI: 10.35848/1347-4065/acc2cb.
12. Hsu T.-H., Tseng K.-J., Li M.H. Large coupling acoustic wave resonators based on  $\text{LiNbO}_3/\text{SiO}_2/\text{Si}$  functional substrate. *IEEE Electron Device Letters*. 2020. Vol. 41. Iss. 12. P. 1825–1828. DOI: 10.1109/LED.2020.3030797.
13. 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. Vol. 68. Iss. 9. P. 3653–3666. DOI: 10.1109/TMTT.2020.3006294.
14. Wu S., Wu Z., Qian H., Bao F., Xu F., Zou J., Tang G. A high-performance NS-SAW resonator using  $30^\circ$  YX-lithium niobate. *Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS)*. Paris, France. 24–28 Apr. 2022. P. 1–4. DOI: 10.1109/EFTF/IFCS54560.2022.9850557.

15. Shirokov V.B., Pimenov M.S., Mikhailova I.B., Turchin A.S., Kalinchuk V.V. Features of excitation of acoustic waves on the surface of the  $\text{LiNbO}_3/\text{Si}$  heterostructure. *Science of the South of Russia*. 2024. Vol. 20. No 3. P. 7–15. DOI: 10.7868/S25000640240302.
16. Шаскольская М.П. *Кристаллография*. М.: Высшая школа, 1984. 376 с.
17. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Теоретическая физика. Т. VII. Теория упругости*. М.: Наука, 1987. 248 с.
18. Викторов И.А. *Звуковые поверхностные волны в твердых телах*. М.: Наука, 1981. 288 с.
19. *Физическая акустика. Т. 1. Часть А. Методы и приборы ультразвуковых исследований*. Под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1966. 592 с.
20. Warner A.W., Onoe M., Coquin G.A. Determination of elastic and piezoelectric constants for crystals in class (3m). *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1967. Vol. 42. No 6. P. 1223–1231.
21. Gladden J.R., So Jin H., Maynard J.D., Saxe P.W., Le Page Y. Reconciliation of ab initio theory and experimental elastic properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . *Applied Physics Letters*. 2004. Vol. 85. No 3. P. 392–394. DOI: 10.1063/1.1773924.
22. *Акустические кристаллы*. Под ред. М.П. Шаскольской. М.: Наука, 1982. 632 с.

#### References

1. Matthews H. *Surface Wave Filters: Design, Construction and Use*. New York. Wiley. 1977. 521 p.
2. Morgan D. *Surface Acoustic Wave Filters*. Amsterdam. London. Academic Press. 2007. 429 p.
3. Orlov V.S., Bondarenko V.S. *Filtры на поверхностных акустических волнах* [Filters on Surface Acoustic Waves]. Moscow. Radio i Svyaz Press. 1984. 272 p. (In Russian).
4. Beeby S., Ensel G., White N.M., Kraft M. *MEMS Mechanical Sensors*. Boston. London. Artech House. 2004. 269 p.
5. Priya R.B., Venkatesan T., Pandlyrayarajan G., Pardya H.M. A short review of SAW sensors. *J. Environ. Nanotechnol.* 2015. Vol. 4. Iss. 4. P. 15–22. DOI: 10.13074/jent.2015.12.154171.
6. Mandal D., Banerjee S. Surface acoustic wave (SAW) sensors: Physics, materials, and applications. *Sensors*. 2022. Vol. 22. Iss. 3. P. 1–38. <https://doi.org/10.3390/s22030820>.
7. Chen G., Li N., Ng J.D., Lin H.-L., Zhou Y., Fu Y.H., Ting Lee L.Y., Yu Y., Liu A.-Q., Daner A.J. Advances in lithium niobate photonics: development status and perspectives. *Adv. Photonics*. 2022. Vol. 4. Iss. 3. P. 034003-1–034003-43. DOI: 10.1117/1.AP.4.3.034003.
8. Solal M., Pastureaud T., Ballandras S., Aspar B., Biassé 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: Proceedings*. Munich, Germany. 2002. Vol. 1. P. 131–134. DOI: 10.1109/ULTSYM.2002.1193369.
9. Pastureaud Th., Solal M., Biassé B., Aspar BBriot., 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  $\text{LiNbO}_3$  single-crystal layers transferred onto silicon. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2007. Vol. 54. Iss. 4. P. 870–876. DOI: 10.1109/TUFFC.2007.321.
10. Wang Jia L., Chen F. Ion-cut lithium niobate on insulator technology: Recent advances and perspectives. *Appl. Phys. Rev.* 2021. Vol. 8. No 1. Article No011307. DOI: 10.1063/5.0037771.
11. Murakami S., Watanabe K., Takigawa R. Investigation of the interface between  $\text{LiNbO}_3$  and Si fabricated via room-temperature bonding method using activated Si nano layer. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2023. Vol. 62. P. SG1041-1–SG1041-5. DOI: 10.35848/1347-4065/acc2cb.
12. Hsu T.-H., Tseng K.-J., Li M.H. Large coupling acoustic wave resonators based on  $\text{LiNbO}_3/\text{SiO}_2/\text{Si}$  functional substrate. *IEEE Electron Device Letters*. 2020. Vol. 41. Iss. 12. P. 1825–1828. DOI: 10.1109/LED.2020.3030797.
13. 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. Vol. 68. Iss. 9. P. 3653–3666. DOI: 10.1109/TMTT.2020.3006294.

14. 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. 24–28 Apr. 2022. P. 1–4. DOI: 10.1109/EFTF/IFCS54560.2022.9850557.
15. Shirokov V.B., Pimenov M.S., Mikhailova I.B., Turchin A.S., Kalinchuk V.V. Features of excitation of acoustic waves on the surface of the  $\text{LiNbO}_3/\text{Si}$  heterostructure. *Science of the South of Russia*. 2024. Vol. 20. No 3. P. 7–15. DOI: 10.7868/S25000640240302.
16. Shaskolskaya M.P. *Kristallografiya [Crystallography]*. Moscow. Vysshaya shkola Publ. 1984. 376 p. (In Russian).
17. Landau L., Pitaevskii L., Kosevich A., Lifshitz E. *Theory of Elasticity*. Vol. 7. Elsevier Science. 2012. [Online]. <https://books.google.ru/books?id=NXRaWJb4HdkC>.
18. Viktorov I.A. *Zvukovye poverkhnostnye volny v tverdykh telakh [Sound Surface Waves in Solids]*. Moscow. Nauka Publ. 1981. 288 p. (In Russian).
19. *Physical Acoustics. Principles and Methods*. Eds. W.P. Mason, R.N. Thurrston. New York. Academic Press. 1981. 390 p.
20. Warner A.W., Onoe M., Coquin G.A. Determination of elastic and piezoelectric constants for crystals in class (3m). *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1967. Vol. 42. No 6. P. 1223–1231.
21. Gladden J.R., So Jin H., Maynard J.D., Saxe P.W., Le Page Y. Reconciliation of ab initio theory and experimental elastic properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . *Appl. Phys. Lett.* 2004. Vol. 85. No 3. P. 392–394. DOI: 10.1063/1.1773924.
22. *Akusticheskie kristally [Acoustic Crystals]*. Ed. M.P. Shaskolskay. Moscow. Nauka Publ. 1982. 632 p. (In Russian).

**SOME ACOUSTIC PROPERTIES OF HETEROSTRUCTURES  
WITH THIN LITHIUM TANTALATE PLATES  
ON A (0001)-CUT  $\alpha$ -SAPPHIRE SUBSTRATE\***

**Kalinchuk V.V., Pimenov M.S., Turchin A.S., Shirokov V.B.**

*Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,  
Rostov-on-Don, Russian Federation*

vkalin415@mail.ru

Received by the Editor 2025/10/20

A promising mathematical model for the creation of wide-purpose acoustoelectronic devices has been developed for a piezoactive heterostructure consisting of a  $W$ -cut lithium tantalate crystal plate deposited through a silicon dioxide buffer layer onto a (0001)-cut  $\alpha$ -sapphire substrate, where  $W$  defines the normal to the crystal cut surface. The model takes into account the crystal cut orientation, the direction of propagation of a horizontally polarized shear wave, and the geometric dimensions of the heterostructure's constituent elements. This allows for a wide range of parameter variations to achieve maximum values of the electromechanical coupling coefficient. The heterostructure's properties have been studied with and without a buffer layer. For the latter case, the analysis allowed for determining the optimal orientation of the lithium tantalate plate cut and its thickness, which would ensure the optimal level of electromechanical coupling. The maximum value of this coefficient, for a given cut orientation and specific geometric parameters of the heterostructure, is achieved by selecting the wave propagation direction. A study of a heterostructure with a silicon dioxide buffer layer revealed that its introduction significantly increases the electromechanical coupling coefficient. A detailed study of the

\* The research was supported by Russian Science Foundation (project No 25-29-00863).

acoustic wave amplitude and energy flux density distribution across the heterostructure's depth was conducted. Calculations revealed that both the wave amplitude and the degree of elastic energy localization in the piezoactive layer depend on the presence of the buffer layer and the thickness of the piezoactive layer, which directly affects the electromechanical coupling coefficient. Its maximum is observed at a small piezoactive layer thickness. Thus, optimal heterostructure parameter values exist that allow for achieving the maximum electromechanical coupling coefficient. This study is of interest to developers of acoustoelectronic devices and general-purpose devices.achieving maximum EMCC. This study is of interest to developers of acoustoelectronic devices and general-purpose devices.

*Keywords:* shear, horizontally polarized waves, lithium tantalate-based heterostructure, thin *W*-cut lithium tantalate crystal slabs, (0001)-cut  $\alpha$ -sapphire, surface acoustic wave, electromechanical coupling coefficient, energy flux density.