КРИСТАЛЛОГРАФИЯ, 2024, том 69, № 1, с. 71–78

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ

УДК 54.03, 621.38

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В МОНОКРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ С ПЛЕНКОЙ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

© 2024 г. О. Л. Балышева[1,*], А. С. Койгеров[2], Б. Ц. Ракшаев[2]

[1]*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия*

[2]*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия*

**E-mail: balysheva@mail.ru*

Поступила в редакцию 08.02.2023 г.
После доработки 20.02.2023; 02.03.2023 г.
Принята к публикации 2.03.2023 г.

Приведены результаты расчетов характеристик поверхностных акустических волн в структурах монокристалл ниобата лития/пленка диоксида кремния, используемых для повышения термостабильности акустоэлектронных устройств на монокристаллических подложках. Выполнено моделирование методом конечных элементов в пакете COMSOL и рассчитаны скорость, коэффициент электромеханической связи и температурный коэффициент частоты в структурах с ниобатом лития различных срезов. Сравнение полученных результатов с известными данными из литературных источников показало хорошее совпадение. Практическая значимость заключается в использовании полученных параметров при разработке различных классов акустоэлектронных устройств.

DOI: 10.31857/S0023476124010105, **EDN:** sxmsmk

ВВЕДЕНИЕ

Устройства акустоэлектроники составляют значительную часть применений монокристаллов ниобата лития. Благодаря сильно выраженному пьезоэлектрическому эффекту ниобат лития на протяжении нескольких десятков лет успешно используется для подложек фильтров на поверхностных акустических волнах (**ПАВ**). Для применения в качестве подложек устройств на ПАВ выделяют ряд важнейших параметров, знание которых необходимо для разработки устройств. К ним относятся: скорость ПАВ в монокристалле, коэффициент электромеханической связи (**КЭМС**), температурные коэффициенты скорости (**ТКС**), частоты (**ТКЧ**), задержки (**ТКЗ**), затухание ПАВ в материале, угол отклонения потока энергии от направления фазовой скорости, диэлектрическая проницаемость, емкость электродной структуры. Скорость ПАВ в кристаллах определяет рабочие частоты фильтров и их габаритные размеры. От величины КЭМС зависят относительная ширина полосы пропускания и вносимые потери фильтра, а температурные коэффициенты задают стабильность параметров при изменении температуры.

Изменение температуры приводит к "уходу" частоты фильтров на ПАВ. Температурная стабильность, желательная для всех устройств на ПАВ, для ряда применений является необходимой. Например, для полосовых фильтров систем мобильной связи, осуществляющих частотную фильтрацию в условиях перенасыщенного частотного спектра. Поэтому анализ различных пьезоэлектрических кристаллов и поиск решений по улучшению их термостабильных свойств для практического применения устройств акустоэлектроники актуален и сегодня. В [1–3] рассматривались различные вопросы, связанные с термостабильными свойствами подложек и ПАВ-устройств в целом. В частности, исследование термостабильных ориентаций в пьезокристаллах лангасита и лангатата [1], анализ особенностей температурного коэффициента частоты танталата лития [2], влияние слоистой структуры электродов на характеристики устройств на ПАВ на срезах кварца [3].

Один из способов улучшения температурной стабильности монокристаллических подложек – нанесение пленки диоксида кремния (SiO_2) [4–7]. Однако нанесение пленки сопряжено с изменением условий распространения акустических волн и изменением всех важнейших параметров ПАВ.

Целью данной работы является исследование параметров поверхностных акустических волн

Таблица 1. Плотность, упругие, пьезоэлектрические и диэлектрические константы используемых материалов

Константа	Обозначение	Численное значение	
		$LiNbO_3$ [10]	SiO_2 [11, 12]
Упругие модули (коэффициенты жесткости), определенные при постоянной напряженности электрического поля, c_{ij}^E, ГПа	c_{11}	198.4	78.5
	c_{12}	54.7	16.1
	c_{13}	65.1	16.1
	c_{14}	7.88	
	c_{33}	227.9	78.5
	c_{44}	59.6	31.2
Пьезоэлектрические константы, e_{ki}, Кл/м^2	e_{15}	3.69	
	e_{22}	2.42	
	e_{31}	0.3	
	e_{33}	1.77	
Коэффициенты диэлектрической проницаемости ε_{kn}^S, 10^{-11}Ф/м	ε_{11}	45.6	3.32
	ε_{33}	26.3	3.32
Плотность, кг/м^3	ρ	4650	2185

в структурах пленка $SiO_2/LiNbO_3$. В качестве инструмента исследований выбран метод конечных элементов (**МКЭ**) и математический пакет COMSOL.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Известно, что физические свойства кристаллов характеризуются материальными константами – коэффициентами, связывающими между собой упругие и электрические переменные, входящие в уравнения состояния [8, 9].

В табл. 1 приведен перечень упругих и пьезоэлектрических констант для ниобата лития и диоксида кремния.

Изменение физических свойств кристаллов при изменении температуры позволяет оценить температурные коэффициенты материальных констант, показывающие относительное изменение констант при изменении температуры на один градус [8, 13, 14]. Температурные коэффициенты констант ниобата лития и диоксида кремния приведены в табл. 2.

В устройствах на ПАВ с монокристаллическими подложками важнейшим следствием изменения температуры является изменение частоты, скорости и задержки ПАВ, распространяющихся в подложке. Для количественной оценки вводят температурные коэффициенты частоты, скорости и задержки. Для любого из трех упомянутых параметров можно ввести температурный коэффициент n-го порядка:

$$T_P^{(n)} = \frac{1}{P \cdot n!} \cdot \frac{\partial^n P}{\partial T^n}, \quad (1)$$

где P – соответствующий параметр (частота, скорость или задержка), T – температура.

Полностью температурное поведение материалов описывается набором температурных коэффициентов материальных констант n-го порядка, и нулевой температурный уход частоты обеспечивается при нулевых коэффициентах 1-го и 2-го порядков и отсутствии всех коэффициентов высших порядков. Однако на практике (учитывая наличие в литературе численных данных о температурных коэффициентах 1-го и иногда 2-го порядков, а также их зависимость от технологии выращивания монокристаллов) часто ограничиваются рассмотрением температурных коэффициентов первого порядка. При использовании методов температурной компенсации добиваются существенного снижения или обнуления ТКЧ 1-го порядка.

Одним из эффективных методов реализации термокомпенсированных ПАВ-устройств является использование пленочных структур $SiO_2/LiNbO_3$ [6, 7]. Механизм температурной компенсации в такой структуре основан на уникальной особенности пленки SiO_2 с повышением температуры становиться “жестче”, тогда как ниобат лития “умягчается”. Соединение материалов с температурными коэффициентами разных знаков уменьшает температурные коэффициенты всей структуры пленка/монокристалл.

В последнее время все больше и больше разработчиков устройств на ПАВ пользуются МКЭ для анализа основных параметров ПАВ [12, 17, 18]. Численные подходы к моделированию, к которым относится и МКЭ, основаны на физических

Таблица 2. Температурные коэффициенты используемых материалов

Температурный коэффициент	Обозначение	Численное значение	
		$LiNbO_3$ [15]	SiO_2 [11, 16]
Температурные коэффициенты упругих модулей, $\times10^{-4}$/°C	Tc_{11}	–1.74	2.39
	Tc_{12}	–2.52	5.84
	Tc_{13}	–1.59	5.84
	Tc_{14}	–2.14	
	Tc_{33}	–1.53	2.39
	Tc_{44}	–2.04	1.51
	Tc_{66}	–1.43	1.51
Температурные коэффициенты пьезоэлектрических констант, $\times10^{-4}$/°C	Te_{15}	1.47	
	Te_{22}	0.79	
	Te_{31}	2.21	
	Te_{33}	8.87	
Температурные коэффициенты диэлектрических констант, $\times10^{-4}$/°C	$T\varepsilon_{11}$	3.23	–0.085
	$T\varepsilon_{33}$	6.27	–0.085
Коэффициенты линейного расширения, $\times10^{-4}$/°C	α_{11}	0.154	0.55
	α_{33}	0.075	0.55

процессах, происходящих в устройствах, а исходными данными для расчетов служат материальные константы. Преимуществом является возможность применения МКЭ для исследования кристаллов различных классов симметрии и произвольных ориентаций, а также комбинаций различных материалов без экспериментальных измерений.

МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Комплексный анализ характеристик распространения ПАВ различных акустических мод в зависимости от толщины слоя SiO_2 моделируется МКЭ в COMSOL на базе тестовых структур. Тестовая структура представляет собой фрагмент участка топологии в одну длину волны (λ = 2 мкм). На рис. 1 изображен пример анализируемой периодической структуры электродов, расположенных на поверхности подложки. В данной структуре ширина электродов и зазоров между электродами равны и составляют $\lambda/4$, период структуры – $p = \lambda/2$ и коэффициент металлизации $K_m = a/p = 0.5$. Толщина алюминиевых электродов $H_m/\lambda = 3\%$, параметры алюминия: плотность 2695 кг/м^3, модуль Юнга 70 ГПа, коэффициент Пуассона 0.33. Периодичные граничные условия применяются к границам (Γ_1, Γ_2) и (Γ_3, Γ_4), вследствие чего ячейка рассматривается как бесконечная периодическая решетка (рис. 1). Наличие контактных шин не учитывается, и апертура считается бесконечной. На нижнем торце подложки

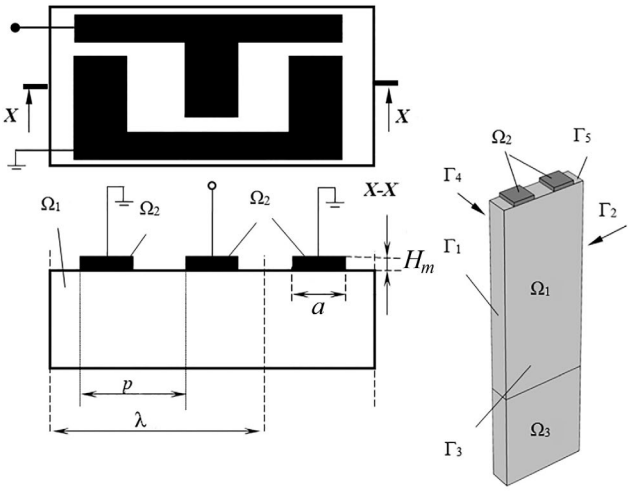

Рис. 1. Фрагмент периодической электродной структуры на пьезоэлектрической подложке: Ω_1 – подложка, Ω_2 – металлические электроды, p – период структуры, a – ширина электрода, H_m – толщина металлизированного слоя, λ – длина волны (размер тестовой ячейки), Ω_3 – область идеально согласующего слоя, Γ_i – границы элементов.

расположен идеально согласованный слой, поглощающий распространяющиеся волны, наличие которого позволяет ограничить область численного моделирования. Электрические условия на границе пленка/воздух – нулевой заряд.

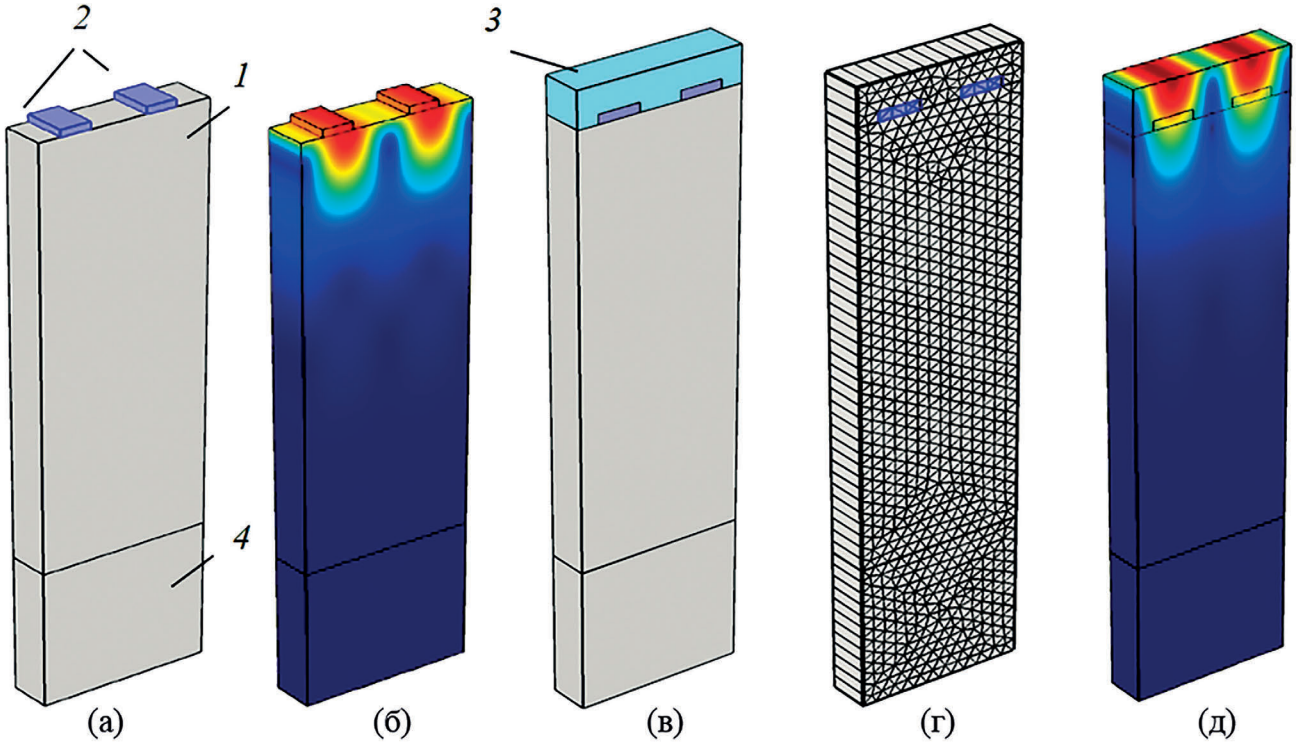

Рис. 2. Тестовые структуры: электродная структура с периодом $p = \lambda/2$ (а), картина механических смещений для одной из собственных частот (б), электродная структура со слоем SiO_2 (в), пример построения сетки (г), картина механических смещений для одной из собственных частот слоистой структуры (д). Особенности модели: *1* – пьезоэлектрический кристалл, *2* – металлические электроды, *3* – слой SiO_2, *4* – идеально согласованный слой.

Для требуемого анализа с помощью МКЭ были построены модели тестовых структур ниобата лития и пленки SiO_2 (рис. 2).

При расчете использовали численные значения констант и температурных коэффициентов используемых материалов из литературных источников, приведенные в табл. 1 и 2. В работе и в рассматриваемой модели в COMSOL пленка диоксида кремния представлена в виде изотропного материала, но в базисе упругих констант C_{ij}. В данном случае все упругие константы выражены через две независимых константы Ламэ и отражены в табл. 1. В данном случае $C_{14} = 0$, так же как и температурный коэффициент $TC_{14} = 0$ для данного материала. Температурный коэффициент для диэлектрической проницаемости SiO_2 взят из [19].

Температурная зависимость материальных констант определена на основе выражения [1]:

$$k_{ij}(T) = k_{ij}(T_0) \cdot (1 + Tk_{ij}(T - T_0)), \qquad (2)$$

где $k_{ij}(T)$ – материальная константа для каждого соответствующего значения температуры, $k_{ij}(T_0)$ – значение материальной константы при комнатной температуре (табл. 1), T – температура, T_0 – комнатная температура (25°C в данной работе), Tk_{ij} – температурный коэффициент (табл. 2). Под материальными константами понимаются: константы упругости, пьезоконстанты, диэлектрические константы и плотность. Температурный коэффициент плотности кристалла можно вычислить по известным значениям коэффициентов линейного расширения. Подробнее описано в [1, 20].

Расчеты в COMSOL проводили в области собственных частот и в заданном частотном диапазоне [21]. Поскольку анализируются ПАВ, диапазон скоростей которых для рассматриваемых подложек ниобата лития лежит в пределах 3300–4700 м/с в области существования волн Рэлея и вытекающих ПАВ (**ВПАВ**), то для длины волны в 2 мкм это будет соответствовать частотам 1.6–2.2 ГГц. Подробнее об анализе в области собственных частотах изложено в [22].

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчеты показали, что нанесение пленки позволяет улучшить температурную стабильность структур. Расчетное значение ТКЧ составляет 0 ppm/°C для толщины пленки $H_{SiO2} \approx 30\%$. Однако наряду с существенным уменьшением ТКЧ при нанесении

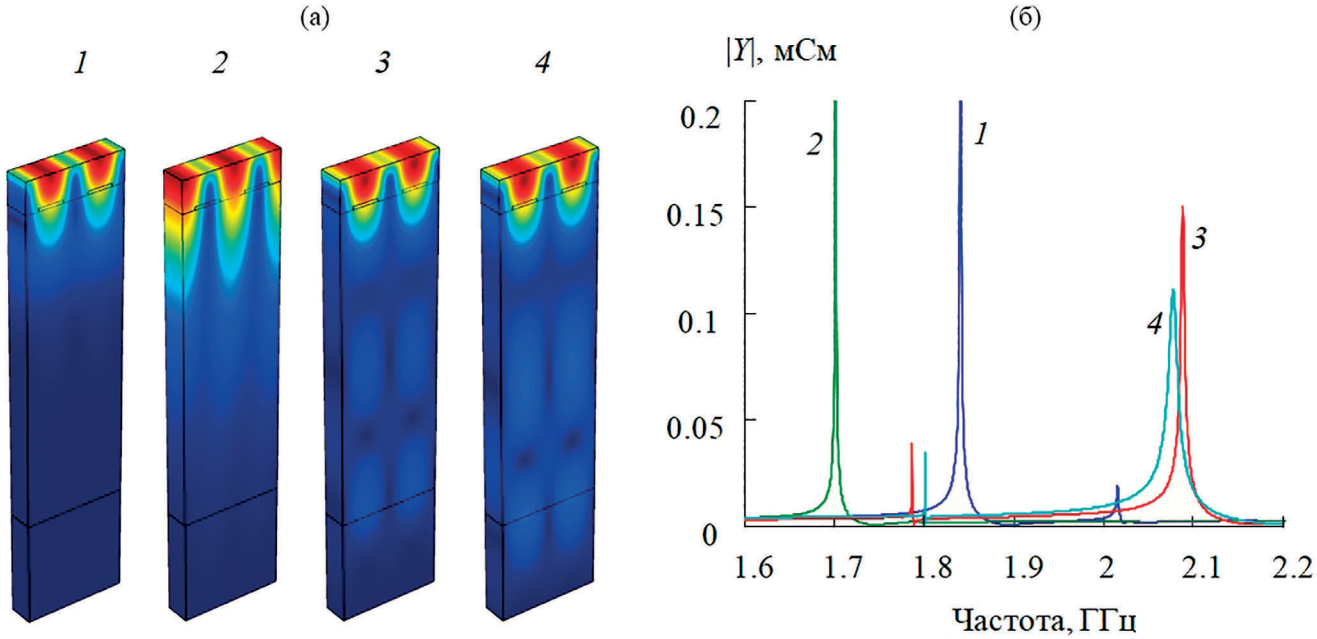

Рис. 3. Картины механических смещений (а) и соответствующие частотные зависимости модуля проводимости периодического преобразователя (б) для различных пьезоэлектрических подложек: *1* – 128° *Y–X* $LiNbO_3$, *2* – *Y–Z* $LiNbO_3$, *3* – 64° *Y–X* $LiNbO_3$, *4* – 49° *Y–X* $LiNbO_3$.

пленки, по сравнению с вариантом без пленки, сопутствующим фактором является изменение остальных параметров ПАВ. Нанесение пленки приводит к уменьшению скорости и КЭМС (при относительной толщине более 0.1λ), что является нежелательным. Причем при оптимальной толщине пленки (по критерию нулевого ТКЧ) не удается максимизировать КЭМС и скорость ПАВ. Полученные зависимости КЭМС от толщины пленки в подложках ниобата лития различных ориентаций существенно различаются при тонких пленках и близки по значениям при нанесении относительно толстых пленок (~0.45λ).

Анализ собственных частот конструкции тонкая пленка/монокристалл показал, что энергия основной моды ПАВ будет сконцентрирована в слое у поверхности пленки (рис. 3а). При моделировании в COMSOL существует возможность выводить как отдельные компоненты механического смещения, так и u_t – полное смещение (англ. *total displacement*):

$$u_t = \sqrt{(u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)}. \quad (3)$$

На рис. 3а представлено значение u_t, на рис. 3б – данные расчета проводимости периодической тестовой структуры для различных срезов ниобата лития. Резонансные пики для 128° *Y–X* $LiNbO_3$ и *Y–Z* $LiNbO_3$ соответствуют волнам Рэлея, для 64° *Y–X* $LiNbO_3$ и 49° *Y–X* $LiNbO_3$ основной модой является ВПАВ, для которой скорость волны более 4400 м/с. По анализу резонансного пика характеристики проводимости (рис. 3б) можно определить добротность тестовой структуры [21]. Из рис. 3 видно, что наибольшие потери наблюдаются в материалах, где в качестве основной акустической моды используется ВПАВ, наиболее четко это проявляется на подложке 49° *Y–X* $LiNbO_3$. Это объясняется дополнительными потерями для данного типа волн, обусловленными утечкой волны в глубину подложки по мере распространения акустических волн вдоль поверхности. Поэтому с точки зрения потерь при работе с пленками SiO_2 выбор материала, где основной модой является волна рэлеевскго типа, выглядит более предпочтительным.

Рисунок 4 показывает зависимость КЭМС и ТКЧ для различных пьезоэлектрических подложек от толщины пленки SiO_2. Для всех материалов наблюдается уменьшение значения ТКЧ с ростом относительной толщины пленки SiO_2. Монокристалл *Y–Z* $LiNbO_3$ обладает наибольшим ТКЧ, поэтому для термокомпенсации требуется и большая толщина пленки ($H_{SiO2}/\lambda \approx 42\%$), что хорошо согласуется с данными [23]. Для 128° *Y–X* $LiNbO_3$, 64° *Y–X* $LiNbO_3$, 49° *Y–X* $LiNbO_3$ требуется примерно одинаковое значение толщины пленки SiO_2 для получения ТКЧ = 0. Но стоит обратить внимание на то, что характер поведения КЭМС в окрестностях точки $H_{SiO2}/\lambda \approx 30\%$ существенно различается.

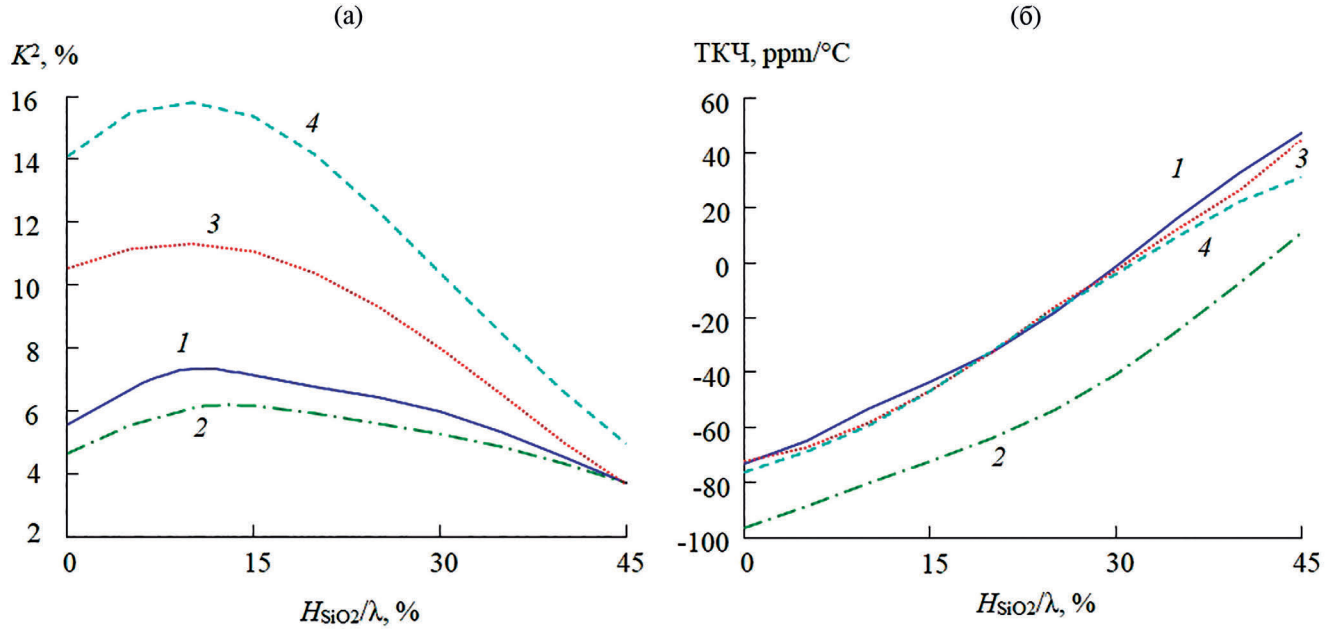

Рис. 4. Зависимость КЭМС (а) и ТКЧ (б) от толщины пленки для различных пьезоэлектрических подложек: *1* – 128° *Y–X* $LiNbO_3$, *2* – *Y–Z* $LiNbO_3$, *3* – 64° *Y–X* $LiNbO_3$, *4* – 49° *Y–X* $LiNbO_3$.

Зависимость КЭМС для 128° *Y–X* $LiNbO_3$ хорошо совпадает с зависимостями, представленными в [24], а ТКЧ – в [11]. Если для волн Рэлея на 128° *Y–X* $LiNbO_3$ КЭМС в точке полной температурной компенсации изменяется незначительно, то для ВПАВ на 64° *Y–X* LiNbO3 и 49° *Y–X* $LiNbO_3$ он снижается (относительно случая подложки без пленки) на 23 и 28% соответственно. Кроме того, будет наблюдаться и уменьшение скорости ВПАВ. Сопоставимые результаты для ВПАВ на подложках 64° *Y–X* $LiNbO_3$ и 41° *Y–X* $LiNbO_3$ представлены в [24]. Важно подчеркнуть, что столь существенное уменьшение КЭМС и скорости приведет к деградации всех частотных характеристик фильтра (например, изменению центральной частоты, сужению полосы пропускания, росту неравномерности в полосе пропускания и т.д.). Поэтому решение задачи улучшения температурной стабильности устройств требует аккуратного и точного подбора толщины пленки и дополнительных расчетов параметров ВПАВ при использовании данных подложек. В ряде случаев для ВПАВ целесообразно выбирать толщину пленки, обеспечивающую рабочую точку с ТКЧ ≈ –40...–25 ppm/°C, поскольку в таком случае параметры ВПАВ изменяются незначительно, что не приведет к существенному ухудшению частотных характеристик.

Зависимости скорости ПАВ для свободной и закороченной поверхности 128° *Y–X* $LiNbO_3$ (рис. 5) хорошо согласуются с экспериментальными данными [6]. Некоторые расхождения можно объяснить погрешностью задания температурных коэффициентов материалов как для монокристаллов, так и для пленок, поскольку в разных источниках они могут различаться до 20%, но в целом характер зависимостей верен.

Проведенные исследования проводимости в частотной области периодического преобразователя для структуры SiO_2/Al/128° *Y–X* $LiNbO_3$ показали, что в ней могут распространяться следующие типы акустических мод:

– ПАВ Рэлея, распространяющиеся близко к внешней поверхности SiO_2. У акустических мод этого типа энергия сосредоточена близко к внешней поверхности слоя SiO_2;

– ПАВ, распространяющиеся вдоль границы между слоем SiO_2 и подложкой 128° *Y–X* $LiNbO_3$. Энергия этих волн концентрируется вблизи металлической решетки. Эта волна имеет ярко выраженную горизонтально-сдвиговую поляризацию, близкую по структуре к *SH*-типу ПАВ. Из рис. 6 видно, что *SH*-мода располагается вблизи “антирезонансной” частоты на характеристике проводимости. Мода такого типа в ПАВ-устройствах, особенно в фильтрах лестничной структуры, является источником разного рода искажений частотных характеристик устройств в полосе пропускания [25, 26].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования свойств поверхностных акустических волн в монокристаллах ниобата лития с пленкой диоксида кремния методом

конечных элементов показано, что зависимости значений таких параметров, как скорость ПАВ и КЭМС, от толщины пленки SiO_2 имеют нелинейный характер. Рассчитаны значения ТКЧ для ряда ориентаций кристаллов ниобата лития. Показано, что для волн Рэлея на анализируемых подложках можно достичь ТКЧ ≈ 0 ppm/°C без существенного изменения параметров ПАВ (КЭМС, скорость ПАВ), в то время как для ВПАВ целесообразно выбирать рабочую точку ТКЧ ≈ –40...–25 ppm/°C, иначе характеристики ПАВ сильно деградируют.

Разработанная в ходе исследования модель в COMSOL позволяет на стадии моделирования оценивать основные параметры ПАВ для различных толщин пленок диоксида кремния и различных срезов ниобата лития. Выбор в качестве объекта исследований ниобата лития и пленки диоксида кремния определяется отмеченными выше преимуществами монокристалла и необходимостью температурной компенсации устройств на ПАВ. Однако данная модель и использованная методика расчетов позволяют оценивать характеристики ПАВ и в других структурах монокристалл/пленка, что необходимо для разработки перспективных устройств с управляемыми характеристиками.

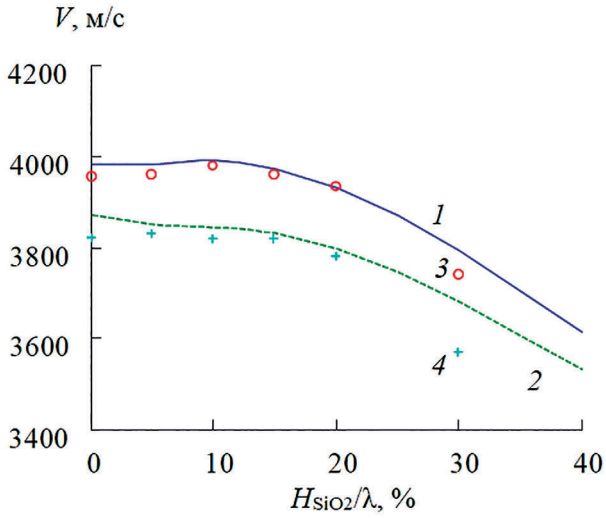

Рис. 5. Скорость ПАВ для подложки 128° *Y–X* $LiNbO_3$: *1* – на свободной поверхности (расчет), *2* – под закороченной поверхностью (расчет), *3* – на свободной поверхности (эксперимент [6]), *4* – под закороченной поверхностью (эксперимент [6]).

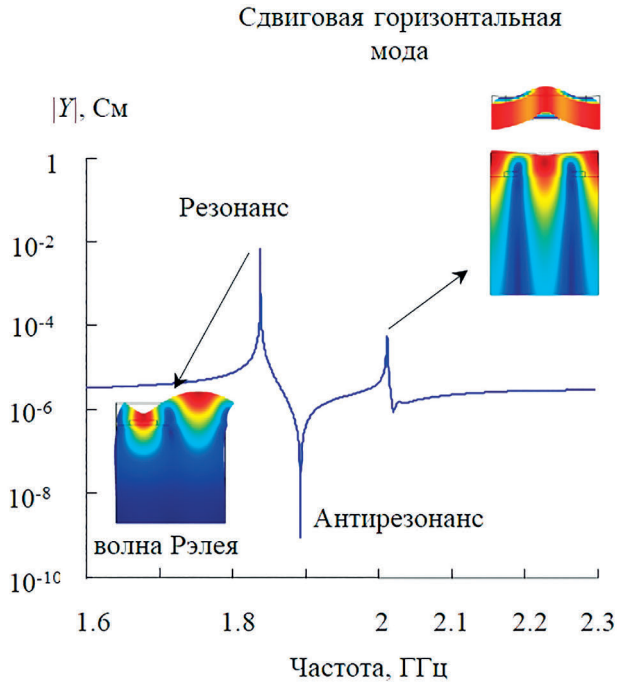

Рис. 6. Адмиттанс и картины механических смещений для тестовой электродной структуры на подложке 128° *Y–X* $LiNbO_3$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Двоешерстов М.Ю., Петров С.Г., Чередник В.И и др.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. № 4. С. 89.
2. *Туркин И.А.* // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 3. С. 24.
3. *Сучков С.Г.* // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51. № 4. С. 504.
4. *Багдасарян А.С., Синицына Т.В., Дорофеева С.С.* // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2017. Т. 17. № 1. С. 1.
5. *Zhgoon S., Shvetsov A., Patel M.S. et al.* // 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium. 2009. P. 2647.
6. *Yamanouchi K., Sato H., Meguro T. et al.* // IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control. 1995. V. 42. P. 392.
7. *Балышева О.Л.* // Радиотехника. 2017. № 5. С. 57.
8. *Зеленка И.* Пьезоэлектрические резонаторы на объемных и поверхностных акустических волнах: Материалы, технология, конструкция, применения: Пер. с чешск. М.: Мир, 1990. 584с.
9. *Дьелесан Э., Руайе Д.* Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов. Пер. с франц. / Под ред. Леманова В.В. М.: Наука, 1982. 424 с.
10. *Kovacs G., Anhorn M., Engan H. et al.* // Proc. 1990 IEEE Ultrasonics Symposium. 1990. V. 1. P. 435.
11. *Wang Y., Liu X., Shang S. et al.* // 2019 14th Symposium on Piezoelectrcity, Acoustic Waves and Device Applications (SPAWDA). 2019. P. 1.
12. *Aslam M.Z., Jeoti V., Karuppanan S. et al.* // International Conference on Intelligent and Advanced System (ICIAS). 2018. P. 1.
13. *Morgan D.* Surface Acoustic Wave Filters With Applications to Electronic Communications and

Signal Processing. Amsterdam; London: Academic Press. 2007, 448p.

14. *Campbell C.K.* Surface Acoustic Wave Devices for Mobile and Wireless Communications. San Diego: Academic Press, 1998. 631 p.
15. *Smith R.T., Welsh F.S.* // J. Appl. Phys. 1971. T. 42. № 6. P. 2219.
16. *Ma R., Liu W., Sun X. et al.* // Micromachines. 2022. V. 13. P. 202.
17. *Hao W., Luo W., Zhao G. et al.* // 2019 13th Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications (SPAWDA). 2019. P. 362.
18. *Кузнецова И.Е., Смирнов А.В., Плеханова Ю.В. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 6. С. 790.
19. *Tomar M., Gupta V., Sreenivas K.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2003. V. 36. P. 1773.
20. *Andrew J., Slobodnik Jr.* // IEEE Trans. on Son. and Ultrason. 1973. V. SU-20. № 4. P. 315.
21. *Койгеров А.С., Корляков А.В.* // Микроэлектроника. 2022. Т. 51. № 4. С. 272.
22. *Койгеров А.С., Балышева О.Л.* // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25. № 5. С. 67.
23. *Parker T.E., Schulz M.B.* // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1974. P. 295.
24. *Hickernell F.S.* // Advances in Surface Acoustic Wave Technology, Systems and Applications. V. 1. Eds. Ruppel C.C.W., Fieldly T.A. Singapore: World Scientific, 2001. 324 p.
25. *Goto R., Fujiwara J., Nakamura H. et al.* // Jpn. J. Appl. Phys. 2018. V. 57. 07LD50.
26. *Goto R., Nakamura H., Hashimoto K.-y.* // 2019 International Ultrasonics Symposium. 2019. P. 2075.