

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 621.37

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ПСЕВДОПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА И ТАНТАЛАТА ЛИТИЯ

© 2021 г. А. С. Койгеров^{а, *}, О. Л. Бальшева^{б, **}

^а Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”,
ул. проф. Попова, 5, Санкт-Петербург, 197376 Российская Федерация

^б Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
ул. Б. Морская, 67, Санкт-Петербург, 190000 Российская Федерация

*E-mail: a.koigerov@gmail.com

**E-mail: balysheva@mail.ru

Поступила в редакцию 03.02.2021 г.

После доработки 15.03.2021 г.

Принята к публикации 19.03.2021 г.

Представлены результаты анализа и расчета параметров распространения вытекающих поверхностных акустических волн в кристаллах ниобата и танталата лития. Приведено описание тестовых структур для анализа на основе метода конечных элементов в пакете COMSOL Multiphysics. Предложен способ определения ключевых параметров, необходимых для проектирования приборов на поверхностных акустических волнах. Рассчитаны фазовая скорость волны, коэффициент электро-механической связи и коэффициент отражения от единичного электрода для промышленно используемых пьезоэлектрических подложек. Рассчитанные ключевые параметры могут быть использованы для проектирования резонаторов и фильтров на их основе на вытекающих поверхностных акустических волнах. Показано, что полученные расчетные данные соответствуют известным данным из литературных источников. Выполнено сопоставление результатов расчета и экспериментальных измерений на примере лестничного фильтра.

DOI: 10.31857/S0033849421120123

ВВЕДЕНИЕ

Задачи частотной фильтрации в диапазоне 300...3000 МГц во входных каскадах коммуникационной аппаратуры решают при помощи использования фильтров на поверхностных акустических волнах (ПАВ) различных типов [1–6]. По сравнению с ПАВ Рэлея, псевдоповерхностные вытекающие ПАВ (ВПАВ) имеют более высокие значения коэффициента электро-механической связи (КЭМС) и скорости распространения, что позволяет увеличить полосы пропускания фильтров и повысить рабочие частоты при такой же топологии устройства [7, 8]. Кроме того, за счет большей, чем у волн Рэлея, глубины проникновения в подложку, фильтры на этом типе волн выдерживают большую мощность без повреждения электродных структур [2].

В последние годы наиболее востребованы фильтры с увеличенной полосой пропускания и сниженными вносимыми потерями [9, 10]. Трансверсальные фильтры, имея широкие полосы пропускания (до 100%), обладают повышенными вно-

симыми потерями и высокой неравномерностью характеристик. Снизить вносимые потери позволяет применение однонаправленных преобразователей, однако для некоторых типов преобразователей ширина электродов составляет менее четверти длины волны (например, для преобразователя с плавающими электродами это $\lambda/12$), что менее привлекательно с технологической точки зрения для фильтров высоких частот. В резонаторных фильтрах, как правило, используют электродные структуры с шириной электродов $\lambda/4$. Наиболее распространенными конструктивными решениями резонаторных фильтров являются фильтры лестничного типа [11, 12] и фильтры на связанных продольных модах [13, 14]. В работах [11, 12] представлен синтез и анализ конструкций лестничных фильтров на ПАВ с относительными полосами пропускания до 5% на подложках танталата и ниобата лития.

Основным элементом фильтра лестничного типа является резонатор, один из вариантов которого образован двумя отражательными структу-

рами (ОС) и расположенным между ними встречно-штыревым преобразователем (ВШП). В качестве ОС используется система электродов или канавок в подложке. Преимуществом электродной ОС служит возможность управления коэффициентом отражения ПАВ за счет нескольких топологических и технологических параметров структуры, а также большая технологичность, поскольку все устройство изготавливается в одном технологическом цикле.

Параметры ВПАВ в электродных ОС и их влияние на характеристики резонаторных фильтров изучено многими авторами (см., например, [15–19]). В этих работах исследовано влияние как ОС в целом (коэффициента металлизации, протяженности), так и отдельных электродов (геометрических размеров, профиля, толщины металла), рассмотрены влияние материала и ориентации подложки, частотная зависимость потерь распространения. Так, например, работа [15] посвящена изучению зависимости потерь распространения ВПАВ от толщины электродов и угла поворота YX среза танталата лития. Следует отметить, что в настоящее время подложки $41^\circ \dots 49^\circ Y-X \text{ LiNbO}_3$, $64^\circ Y-X \text{ LiNbO}_3$, и $36^\circ Y-X \text{ LiTaO}_3$ одобрены для промышленного производства фильтров на ВПАВ благодаря высокому КЭМС и низким потерям распространения.

Отличительной особенностью вытекающих волн является тот факт, что их энергия сконцентрирована в более глубоком слое по сравнению с волнами Рэлея и присутствует утка волны в объеме подложки. Анализ данного механизма потерь ПАВ на примере продольных вытекающих волн в YZ -срезе LiNbO_3 представлен, например, в работе [20].

Анализ упомянутых и других работ показывает, что при разработке фильтров на основе резонаторных структур необходимо учитывать как материал и ориентацию подложки, так и геометрические и технологические параметры электродных ОС, изменение которых часто имеет разнонаправленное влияние на характеристики фильтров. Однако всегда в процессе разработки устройств необходимым этапом является моделирование и предварительный расчет характеристик, для которого требуется знание параметров акустических волн в электродных структурах. Преимущества использования компьютерных пакетов моделирования состоят в сокращении времени и затрат на разработку, возможностях оптимизации топологии и конструктивного исполнения устройства, а также в лучшем понимании физических процессов, лежащих в основе работы таких устройств.

К настоящему времени разработано несколько моделей и подходов к моделированию устройств

на ПАВ — от простейшей модели дельта-функций и до полного 3D-моделирования устройства с учетом влияния эффектов второго порядка и эффектов, вызванных влиянием защитного корпуса устройства. Однако следует подчеркнуть, что для каждой модели, на основе ее преимуществ и недостатков, можно сформулировать также ограничения и целесообразность ее применения для расчета характеристик разрабатываемого устройства. Часто разработчики используют на разных этапах проектирования различные модели и подходы с целью объединения как необходимой точности расчетов и адаптивности модели, так и приемлемых временных и вычислительных ресурсов.

Наиболее эффективны на сегодняшний день аналитические и численные методы, среди которых наибольшее распространение получил метод связанных волн (МСВ) (*англ.* coupled of mode, COM) [4, 21–23]. Достоинствами МСВ служат простота реализации, высокая скорость вычислений и применение к расчету ВШП и ОС любого типа [21].

В связи с ростом производительности современных компьютеров широкое распространение в практике инженерного проектирования получают компьютерные пакеты моделирования на основе метода конечных элементов (МКЭ) [24]. Такие программные пакеты как COMSOL Multiphysics или ANSYS Multiphysics, работа которых основана на МКЭ, позволяют моделировать устройства на ПАВ. Например, в работах [25, 26] показаны результаты анализа устройств в пакете COMSOL Multiphysics во временной области, в работах [24, 27] — в частотной области; вопросы 3D-анализа рассмотрены в работе [28].

В данной статье рассмотрен способ определения ключевых параметров, необходимых для расчета устройств на ВПАВ МСВ на основе P -матриц.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Воспользуемся при моделировании МСВ. Удобным способом формализации процесса вычислений служит представление уравнений связанных волн в матричной форме — с помощью P -матриц [1, 2, 4]. Устройство на ПАВ представляется в виде комбинации отдельных элементов (электродов ВШП или элементов ОС), для которых вычисляются соответствующие им P -матрицы, связывающие комплексные амплитуды волн на входе и выходе k -го элемента:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ R_2 \\ I_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11}^k & P_{12}^k & P_{13}^k \\ P_{21}^k & P_{22}^k & P_{23}^k \\ P_{31}^k & P_{32}^k & P_{33}^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ S_2 \\ U \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Акустические компоненты P_{11} , P_{12} , P_{21} , P_{22} описывают коэффициенты передачи и отражения по акустическим портам и определяются по следующим формулам:

$$P_{11} = r \exp(-j\beta p); \quad P_{12} = k_r \exp(-j\beta p), \quad (2)$$

где r — коэффициент отражения от одиночного электрода; k_r — коэффициент прохождения через электрод; $\beta = 2\pi f/V - j\gamma$ — волновое число; V — фазовая скорость под электродом; γ — потери при распространении. Акустоэлектрические компоненты P_{13} , P_{23} показывают эффективность возбуждения ПАВ при подаче напряжения U на шины ВШП. Электроакустические компоненты P_{31} , P_{32} характеризуют эффективность преобразования ПАВ в электрический ток I в шинах ВШП. Величины P_{13} , P_{23} , P_{31} , P_{32} прямо пропорциональны значению КЭМС или коэффициенту преобразования k_S . Элемент P_{33} суммарной матрицы канала определяет искомую проводимость ВШП Y и определяется по формуле

$$P_{33} = Y(\omega) = Ga(\omega) + jBa(\omega) + j\omega C_0, \quad (3)$$

где $Ga(\omega)$ и $Ba(\omega)$ — соответственно активная и реактивная составляющие проводимости излучения, C_0 — статическая емкость. Для анализа устройств необходимо определить все компоненты P -матрицы.

Известно, что при распространении ВПАВ в пьезоэлектрических материалах волна механических смещений сопровождается волной электрического потенциала, распространяющегося с той же фазовой скоростью. Волна этого типа имеет три компоненты механического смещения (две сдвиговые и одну продольную) с преобладанием горизонтальной сдвиговой (или поперечной) компоненты, лежащей в плоскости на свободной поверхности, в отличие от волн Рэлея, у которых преобладают продольная и вертикальная поперечная компоненты. Учет физических особенностей распространения волн в анизотропных кристаллах возможен при анализе структур с помощью МКЭ.

Расчеты ключевых параметров выполнены для подложек ниобата лития (LiNbO_3) срезов $41^\circ Y-X$, $49^\circ Y-X$ и $64^\circ Y-X$ и танталата лития (LiTaO_3) среза $36^\circ Y-X$, использованы наборы акустических физических констант, приведенные в литературе [29].

2. ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВЫТЕКАЮЩИХ ПАВ

2.1. Алгоритм анализа и расчета. Описание модели

Алгоритм анализа и расчета параметров ВПАВ предусматривает следующие три этапа.

1. Получение и анализ собственных частот. При анализе МКЭ вместо затухающей бегущей волны рассматривают незатухающие стоячие волны, для которых можно определить собственные частоты. В пакете COMSOL Multiphysics расчет собственных частот осуществляется с помощью специального сервиса (в пакете он называется решатель) Study—Eigen-frequency. Необходимо отметить, что при определении собственных частот не были учтены следующие эффекты: резистивные потери в электродах, дифракция акустической волны, потери за счет вязкостных свойств материала, отклонение потока энергии, но все эти “вторичные” эффекты учитываются отдельно в МСВ.

2. Расчет ключевых параметров ВПАВ. На основе полученных значений собственных частот рассчитывают такие параметры ВПАВ, как

- а) фазовая скорость на свободной и металлизированной поверхности;
- б) фазовая скорость под системой электродов;
- в) коэффициент отражения и прохождения для одиночного электрода.

3. Анализ излучения объемных волн. Оценка влияния излучения объемных волн выполняется при расчете полной проводимости в пакете COMSOL Multiphysics с помощью сервиса Study — Frequency response.

Геометрия тестовых структур, для которых будут анализироваться параметры ВПАВ, представлена на рис. 1: свободная поверхность (а), металлизированная поверхность (б), поверхность с электродами (в). Размер ячейки составляет одну длину волны. В расчетах принято значение длины волны $\lambda = 2$ мкм, анализ выполнен для глубин проникновения до 9...10 длин волн (для примера и визуализации на рис. 1 показана ячейка глубиной в 3 длины волны).

Граничные условия заданы таким образом, что электродная структура на поверхности подложки рассматривается как бесконечная периодическая решетка. На нижнем торце подложки расположен идеально согласованный слой, поглощающий распространяющиеся волны, наличие которого позволяет ограничить область численного моделирования. В качестве материала электродов выбран алюминий. Поскольку ВПАВ распространяется вдоль поверхности, то при построении сетки принято, что анализируемая область у поверхности имеет более плотную сетку, например 24 элемента на длину волны, остальная часть может иметь меньшее число элементов, например 12 на длину волны (см. рис. 1г). На этом рисунке показан пример численного анализа в виде картины механических смещений ВПАВ под электродами (для подложки $49^\circ Y-X \text{ LiNbO}_3$). Сравнительная картина механических смещений

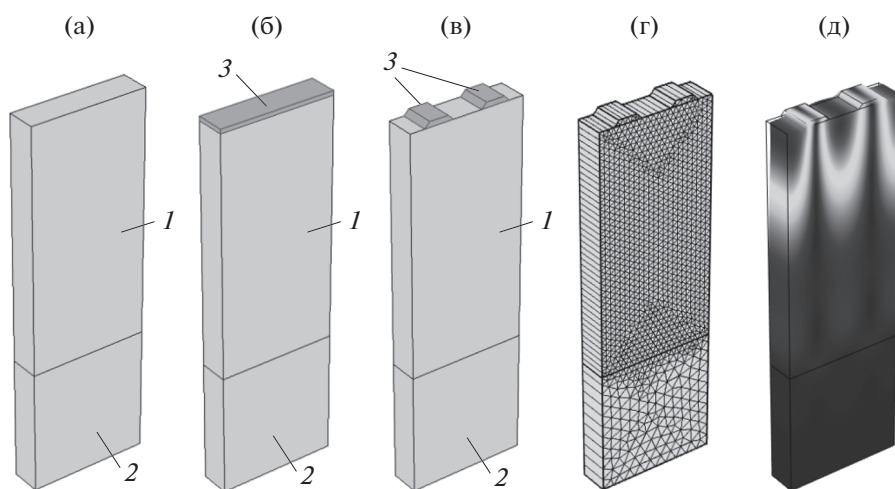


Рис. 1. Тестовые структуры для анализа распространения ПАВ: на свободной поверхности (а); под металлизированной поверхностью (б); под электродами (в); пример построенной сетки (г) и результата численного анализа (д); 1 – пьезоэлектрический материал, 2 – идеально согласованный слой, 3 – металл.

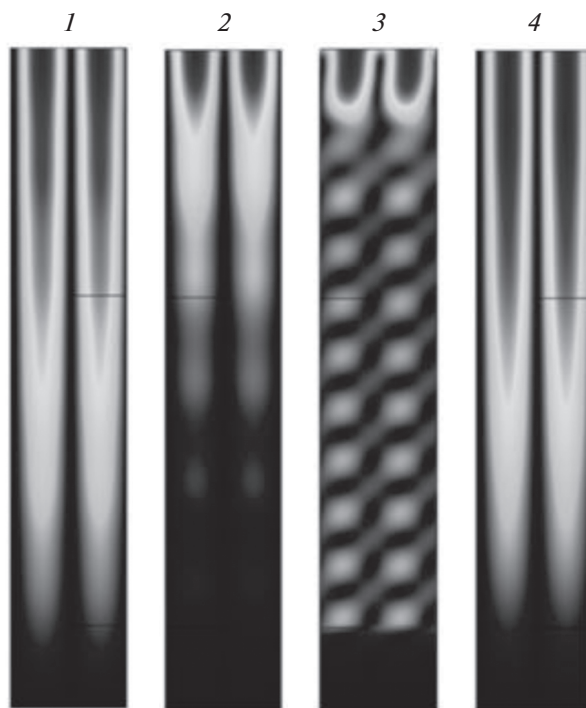


Рис. 2. Картины механических смещений ВПАВ на свободной поверхности для различных пьезоэлектрических подложек: 1 – $41^\circ Y-X LiNbO_3$, 2 – $49^\circ Y-X LiNbO_3$, 3 – $64^\circ Y-X LiNbO_3$, 4 – $36^\circ Y-X LiTaO_3$.

ВПАВ на свободной поверхности для всех исследуемых материалов представлена на рис. 2.

2.2. Расчет параметров ВПАВ для свободной и металлизированной поверхностей

Для свободной или металлизированной поверхностей без системы электродов существует

одна собственная частота, которая позволяет рассчитать фазовую скорость ПАВ. Скорости ПАВ на свободной V_f и металлизированной V_m поверхностях определяются по формулам

$$V_f = \lambda f_f; \quad V_m = \lambda f_m, \quad (4)$$

где f_f и f_m – соответственно собственные частоты для свободной и металлизированной поверхно-

Таблица 1. Параметры ВПАВ для основных подложек согласно расчетам и данным литературы

Параметры ВПАВ в материале	Материал и срез				Источник
	LiNbO ₃ , 41° Y-X	LiNbO ₃ , 49° Y-X	LiNbO ₃ , 64° Y-X	LiTaO ₃ , 36° Y-X	
Скорость ПАВ на свободной поверхности V_f , м/с	4752.8	4748.2	4696.6	4225.4	Д.р.
	4792	—	4742	4212	[3]
	4749.2	—	4690	4224.4	[30]
Скорость ПАВ на металлизированной поверхности V_m , м/с при $H_m/\lambda = 0.01\%$	4378.0	4416.2	4450.8	4107.4	Д.р.
	4379	—	4478	4112	[2]
	4379.8	—	4450	4107.8	[30]
КЭМС K^2 , %	15.77	13.98	10.47	5.59	Д.р.
	17.2	—	11.3	4.7	[2]
	15.56	—	10.25	5.52	[30]

Примечание: Д.р. — данная работа, прочерк означает отсутствие данных в литературе.

стей. Что касается КЭМС K , то его можно оценить по формуле

$$K^2 = \frac{2(V_f - V_m)}{V_f}. \quad (5)$$

Результаты расчета скоростей ВПАВ для свободной и металлизированной поверхностей и КЭМС

каждого материала приведены в табл. 1. Численные данные таблицы показывают, что полученные результаты хорошо согласуются со сведениями из литературных источников.

Рассчитанные зависимости скорости ВПАВ от отношения H_m/λ под металлизированной поверхностью для различных материалов представлены на рис. 3.

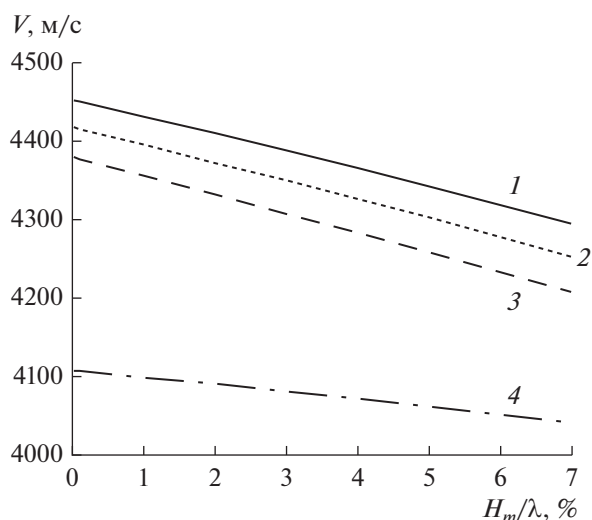


Рис. 3. Зависимость скорости под металлизированной поверхностью от относительной толщины металлического слоя для различных пьезоэлектрических подложек: 1 — 41° Y-X LiNbO₃, 2 — 49° Y-X LiNbO₃, 3 — 64° Y-X LiNbO₃, 4 — 36° Y-X LiTaO₃.

2.3. Расчет параметров ВПАВ под системой электродов

При наличии на поверхности подложки решетки электродов существуют две собственные частоты f_{S1}, f_{S2} — для короткозамкнутой решетки, f_{O2}, f_{O1} — для открытой (не короткозамкнутой) решетки. Значения собственных частот позволяют рассчитать фазовую скорость под электродом короткозамкнутой решетки V_S , коэффициенты отражения r_S и преобразования k_S для одиночного электрода короткозамкнутой решетки по формулам [23, 31]

$$V = \lambda \frac{(f_{S1} + f_{S2})}{2}; \quad r_S = \pi \frac{(f_{S2} - f_{S1})}{f_{S2} + f_{S1}}; \quad (6)$$

$$k_S = \pi \frac{(f_{O2} + f_{O1} - f_{S2} - f_{S1})}{f_{S2} + f_{S1}}.$$

Для четырех материалов подложек на основе приведенных формул рассчитаны значения фазовых

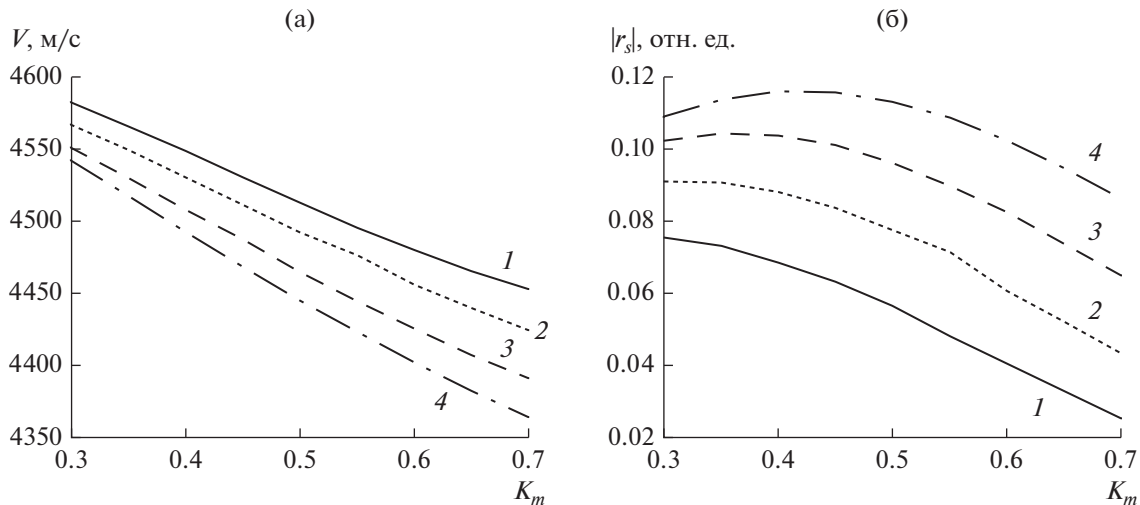


Рис. 4. Зависимость фазовой скорости ВПАВ (а), коэффициента отражения от единичного электрода (б) от коэффициента металлизации для образца $49^\circ Y-X LiNbO_3$ при $H_m/\lambda = 0.2$ (1), 2 (2), 3.7 (3) и 5.2% (4).

скоростей, коэффициентов отражения и преобразования для тестовой структуры с электродами трапецидальной формы (45°) шириной $\lambda/4$ (см. рис. 1в).

Рассчитанные зависимости скорости под решеткой короткозамкнутых электродов и коэффициента отражения от коэффициента металлизации для двух материалов представлены на рис. 4, 5. Как видно из рис. 4а и 5а, с ростом относительной толщины электродов и коэффициента металлизации, за счет влияния эффекта “массовой нагрузки”, наблюдается замедление акустической волны под электродной структурой. Результаты показывают, что коэффициент отражения (рис. 4б и 5б) имеет явно нелинейную зависимость от коэффициента металлизации, а также максимум, выраженный более четко с увеличением относительной толщины электродов. Причем для танталата лития (см. рис. 5б) этот максимум заметно смещается вправо при увеличении толщины электродов. Поскольку исследуемые подложки являются сильными пьезоэлектрическими материалами, то на коэффициент отражения влияет не только массовая нагрузка электрода, но и электрическая компонента. Поэтому зависимости коэффициента отражения (см. рис. 4б и 5б) являются нелинейными, и существуют такие соотношения H_m/λ и K_m , при которых наблюдается явный максимум коэффициента отражения. Точное знание параметров отражения для соответствующего набора коэффициентов H_m/λ и K_m позволяет управлять частотными характеристиками элементов на ПАВ.

2.4. Анализ излучения объемных волн

Учет влияния объемных акустических волн (ОАВ), возбуждаемых в преобразователе, наряду с возбуждением ВПАВ, осуществляется с помощью Study – Frequency response. Для этого рассчитывают полную проводимость, а ток вычисляют как функцию частоты. Анализ графика полной проводимости периодической тестовой структуры на примере подложки $41^\circ Y-X LiNbO_3$ (рис. 6а) показывает, что кроме основной моды – ВПАВ, в правой части частотной характеристики присутствует излучение ОАВ. Излучение ОАВ ярко видно и на вещественной части проводимости $Re Y$. Известно, что вещественная часть проводимости характеризует мощность акустического излучения в подложку, а излучение ОАВ в данном случае является одним из побочных “вторичных” эффектов, вносящих искажения в частотную характеристику устройства. Процедура анализа и оценки влияния ОАВ может быть полезна для оптимизации параметров ОС (например, выбора оптимальной толщины электродов) при минимальном объемном излучении для каждого конкретного среза кристалла. Сравнительные графики проводимости для подложек $64^\circ Y-X LiNbO_3$ и $36^\circ Y-X LiTaO_3$ представлены на рис. 6б.

При расчетах необходимо оценивать вклад ОАВ в общую характеристику. Полную проводимость Y можно представить в виде суммы трех составляющих: проводимости ВПАВ $Y_{ВПАВ}$, проводимости за счет излучения ОАВ $Y_{ОАВ}$ и проводимости емкостной составляющей

$$Y = Y_{ВПАВ} + Y_{ОАВ} + j\omega C_0, \quad (7)$$

где C_0 – статическая емкость преобразователя.

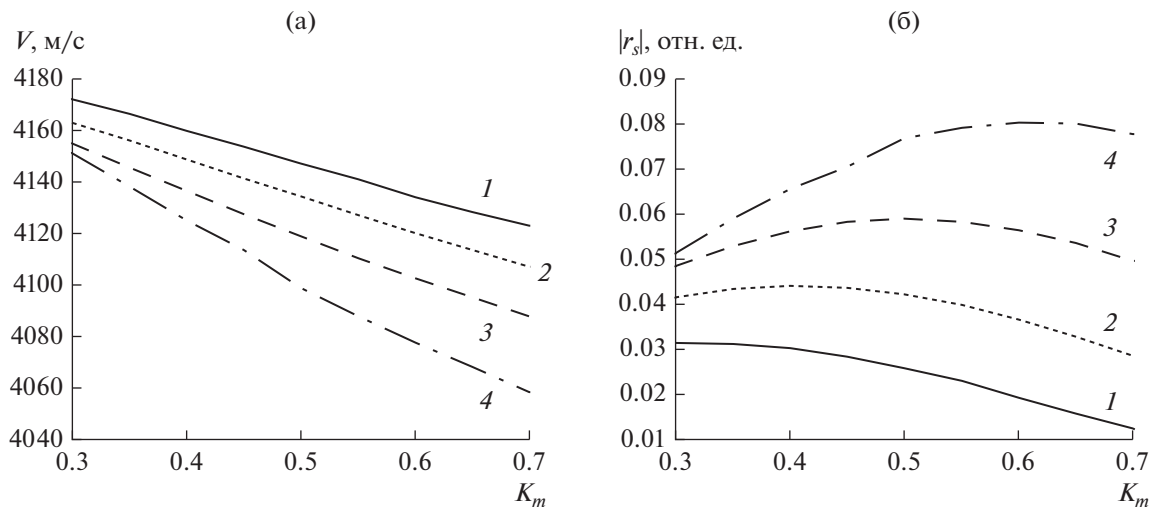


Рис. 5. Зависимость фазовой скорости ВПАВ (а), коэффициента отражения от единичного электрода (б) от коэффициента металлизации для образца $36^\circ Y-XLiTaO_3$: при $H_m/\lambda = 0.2$ (1), 1.6 (2), 3 (3) и 4.6% (4).

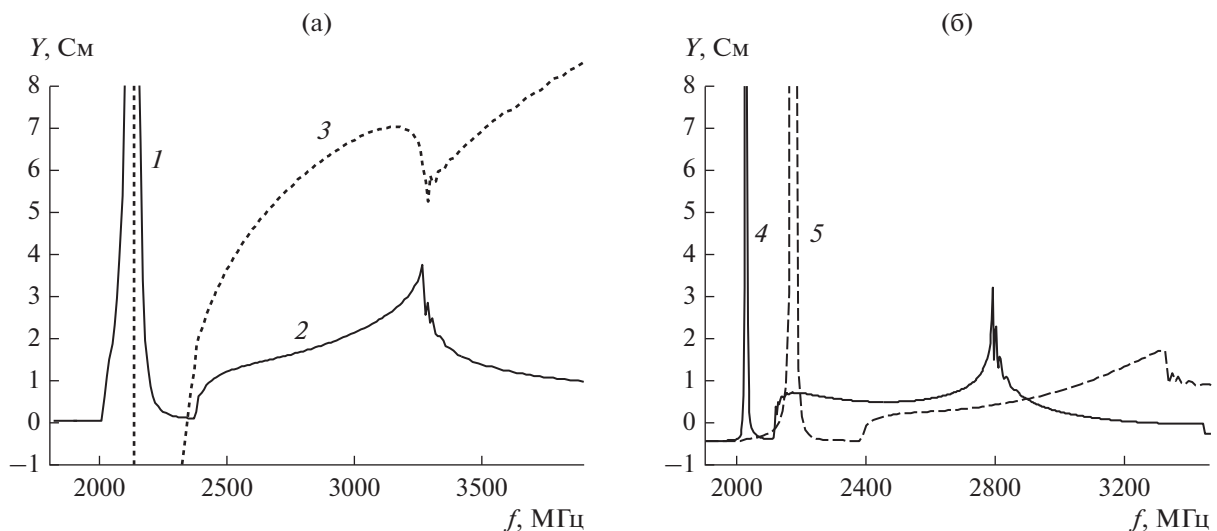


Рис. 6. Частотная зависимость проводимости периодического преобразователя: а) 1 – $Re Y$ для $41^\circ Y-XLiNbO_3$ – мода вытекающей ПАВ, 2 – $Re Y$ для $41^\circ Y-XLiNbO_3$ – излучение ОАВ, 3 – $Im Y$ для $41^\circ Y-XLiNbO_3$, б) 4 – $Re Y$ для $36^\circ Y-XLiTaO_3$, 5 – $Re Y$ для $64^\circ Y-XLiNbO_3$.

Только составляющая $Y_{ВПАВ}$ зависит от рассчитанных параметров и определяется компонентой P_{33} P -матрицы. А для учета составляющей $Y_{ОАВ}$ необходимо отдельно измерять частотную зависимость проводимости и добавлять ее к значению P_{33} .

3. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА И ЭКСПЕРИМЕНТА

На основе рассчитанных МСВ параметров был спроектирован и изготовлен лестничный фильтр

на подложке $49^\circ Y-XLiNbO_3$ при значениях относительной толщины электродов $H_m/\lambda = 3.5\%$ и коэффициента металлизации $K_m = 0.48$. Фильтр состоял из 10 резонаторов (пять из которых включены последовательно и пять параллельно) и двух согласующих цепей (входной и выходной). Результаты расчета и измерений коэффициента передачи фильтра с учетом цепей согласования представлены на рис. 7 и показывают хорошее совпадение теоретической и экспериментальной кривых. Вносимые потери фильтра составили 7.4 дБ, относительная полоса пропускания по

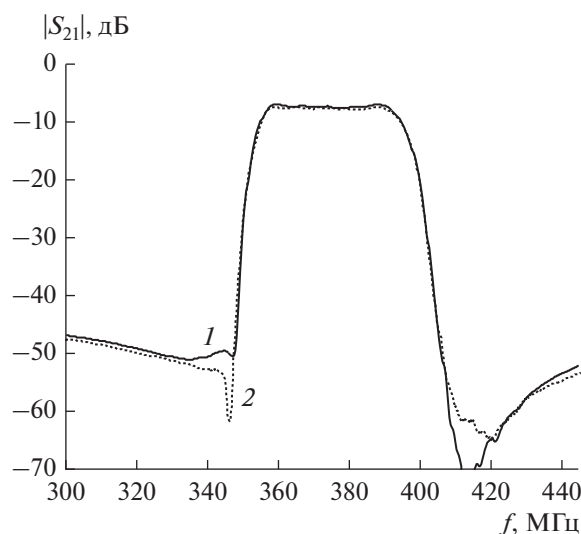


Рис. 7. Коэффициент передачи лестничного фильтра: 1 — измерение, 2 — расчет.

уровню -3 дБ — 10.6% , неравномерность в полосе пропускания 0.5 дБ, подавление в полосе заграждения -40 дБ. Некоторые расхождения расчетных и экспериментальных результатов в полосе заграждения можно объяснить наличием паразитных индуктивностей и емкостей соединительных проводников, контактных шин и корпуса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен и реализован алгоритм численного анализа и расчета параметров ВПАВ в кристаллах ниобата и танталата лития. Приведено описание тестовых структур для анализа с помощью МКЭ. Рассчитаны фазовая скорость волны, КЭМС и коэффициент отражения от единичного электрода для четырех промышленно рекомендованных подложек фильтров на ВПАВ. Проанализировано влияние на основные параметры ВПАВ относительной толщины электродов и коэффициента металлизации электродной ОС. Рассчитанные параметры могут быть использованы при разработке фильтров, имеющих в составе резонаторы на ВПАВ, и фильтров на связанных продольных модах. Полученные расчетные данные соответствуют данным из известных источников. Выполненное сравнение результатов расчета и эксперимента для лестничного фильтра показало хорошее совпадение.

Результаты численного анализа ключевых параметров акустических волн, модель связанных мод и матричный подход к формализации вычислений предоставляют разработчику эффективный и легко адаптируемый к изменениям тополо-

гии инструмент для расчета характеристик акустоэлектронных устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аристархов Г.М., Гуляев Ю.В., Дмитриев В.Ф. и др. Фильтрация и спектральный анализ радиосигналов. Алгоритмы. Структуры. Устройства. Монография / Под ред. Ю.В. Гуляева. М.: Радиотехника, 2020.
2. Campbell C.K. Surface Acoustic Wave Devices for Mobile and Wireless Communication. Boston: Academic Press, 1998.
3. Morgan D. Surface Acoustic Wave Filters with Applications to Electronic Communications and Signal Processing. L.: Academic Press, 2007.
4. Балышева О.Л., Григорьевский В.И., Гуляев Ю.В. и др. Акустоэлектронные устройства обработки и генерации сигналов. Принципы работы, расчета и проектирования принципов работы, расчета и проектирования. М.: Радиотехника, 2012.
5. Никитов С.А., Багдасарян А.С., Кондратьев С.Н. и др. // РЭ. 2016. Т. 61. № 4. С. 825.
6. Балышева О.Л., Бугаев А.С., Кулаков С.В., Смирнов Ю.Г. // РЭ. 2017. Т. 63. № 4. С. 389.
7. Huiling Liu, Qiaozhen Zhang, Xiangyong Zhao et al. // Japan J. Appl. Phys. 2021. V. 60. № 3. P. 031002.
8. Suzuki M., Kakio S. // Proc. 40th Symp. on Ultrasonic Electronics (USE 2019), Tokyo. 25–27 Nov. 1. P. 3–6.
9. Багдасарян А.С., Гуляев Ю.В., Добершутейн С.А., Сунцица Т.В. // Техника радиосвязи. 2019. Вып. 3(42). С. 86.
10. Plessky V.P., Koskela J., Hammond R. // Proc. 2018 IEEE Int. Ultrasonics Symposium (IUS). Kobe. 22–25 Oct. N.Y.: IEEE, 2018. P. 8580172.
11. Дмитриев В.Ф. // ЖТФ. 2002. Т. 72. № 8. С. 95.
12. Веремеев И.В. // Техника радиосвязи. 2017. № 3(34). С. 85.
13. Morita T., Watanabe Y., Tanaka M., Nakazawa Y. // Proc. 1992 IEEE Ultrasonic Symp. Tucson. 20–23 Oct. N.Y.: IEEE, 1992. V. 1. P. 95.
14. Meltaus J., Plessky V.P., Harma S., Salomaa M.M. // IEEE Trans. 2005. V.UFFC-52. № 6. P. 1013.
15. Hashimoto K.-Y., Yamaguchi M., Mineyoshi S. et al. // Proc. 1997 IEEE Ultrasonic Symp. Toronto. 5–8 Oct. N.Y.: IEEE, 1997. V. 1. P. 245.
16. Kawachi O., Mineyoshi S., Endoh G. et al. // IEEE Trans. 2001. V. UFFC-48. № 5. P. 1442.
17. Naumenko N., Abbott B. // Proc. 2006 IEEE Ultrasonic Symp. Vancouver. 2–6 Oct. N.Y.: IEEE, 2006. P. 493.
18. Naumenko N., Abbott B. // Proc. 2003 IEEE Ultrasonic Symp. Honolulu. 5–8 Oct. N.Y.: IEEE, 2003. V. 2. P. 2110.
19. Plessky V., Koskela J., Hong S.Su. // Proc. 2006 IEEE Ultrasonics Symp. Vancouver. 2–6 Oct. N.Y.: IEEE, 2006. P. 1504.
20. Makkonen T., Plessky V., Steichen W. et al. // IEEE Trans. 2006. V. UFFC-53. № 2. P. 393.

21. Димитриев В.Ф. // РЭ. 2009. Т. 54. № 9. С. 1134.
22. Plessky V.P., Koskela J. // Int. J. High Speed Electronics and Systems. 2000. V. 10. № 4. P. 867.
23. Hashimoto K. Surface Acoustic Wave Devices in Telecommunications, Modelling and Simulation. Berlin: Springer, 2000.
24. Yantchev V., Turner P., Plessky V. // Proc. 2016 IEEE Int. Ultrasonic Symp.(IUS). Tours. 18–21 Sept. N.Y.: IEEE, 2016. P. 7728546.
25. Syeshnikov B., Koigerov A., Yankin S. // Ultrasonics. 2018. V. 82. P. 209.
26. Elsherbini M.M., Elkordy M.F., Gomaa A.M. // J. Electrical and Electronics Engineering Research. 2016. V. 8. № 1. P. B89A6B359713.
27. Реут В.Р., Койгеров А.С., Андрейчев С.С. и др. // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21. № 10. С. 579.
28. Iyama A., Li X., Bao J. et al. // Proc. 2019 IEEE Int. Ultrasonic Symp. (IUS). Glasgow. 6–9 Oct. 2019. P. 1235.
29. Kovacs G., Anhorn M., Engan H.E. et al. // Proc. 1990 IEEE Ultrasonic Symp. Honolulu. 4–7 Dec. N.Y.: IEEE, 1990. V. 1. P. 435.
30. Qiao D., Liu W., Smith P.M. // IEEE Trans. 1999. V. UFFC-46. № 5. P. 1242.
31. Bauerschmidt P., Lerch R., Machui J. et al. // Proc. 1990 IEEE Ultrasonic Symp. Honolulu. 4–7 Dec. N.Y.: IEEE, 1990. V. 1. P. 421.