

Быстрый численный расчет параметров поверхностных акустических волн Рэлея для модели связанных мод

А. С. Койгеров^{1✉}, О. Л. Балышева²

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

✉ a.koigerov@gmail.com

Аннотация

Введение. Важнейшим этапом разработки устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ) является математическое моделирование. Успешно применяемые в последние годы компьютерные пакеты моделирования позволяют существенно сократить время и повысить точность расчета характеристик при проектировании. Для быстрого анализа рабочих характеристик проектируемых акустоэлектронных приборов необходимо знание основных параметров акустических волн, распространяющихся в материалах подложек устройств.

Цель работы. Предложение и апробация, на примере анализа волн Рэлея методом конечных элементов, методики расчета ключевых параметров, необходимых для моделирования ПАВ-устройств на основе модели P -матриц и модели связанных мод.

Материалы и методы. Теоретическая часть работы выполнялась с применением математической теории дифференциальных уравнений, использовалось матричное описание и метод конечных элементов. В ходе работы применялась математическая обработка в программах MatLab и COMSOL.

Результаты. Разработана оригинальная методика извлечения параметров ПАВ для модели связанных мод на основе быстрого алгоритма, реализованного в пакете COMSOL. Сравнение результатов расчета таких параметров, как коэффициент электромеханической связи, скорость распространения акустической волны по поверхности подложки, с известными данными из литературных источников показало хорошее совпадение. На основе извлеченных параметров спроектирован ряд трансверсальных фильтров. Выполнено сопоставление результатов расчета и экспериментальных измерений коэффициента передачи.

Заключение. Предложенная методика анализа бесконечных периодических электродов методом конечных элементов на основе анализа собственных частот и статического анализа позволила рассчитать основные параметры волн Рэлея в традиционных подложках ниобата лития, танталата лития и кварца. Практическая значимость состоит в использовании полученных параметров при разработке различных классов акустоэлектронных устройств.

Ключевые слова: акустоэлектронные устройства, поверхностные акустические волны, метод связанных мод, метод конечных элементов, COMSOL, пьезоэлектрические материалы, встречно-штыревой преобразователь, фильтр на ПАВ

Для цитирования: Койгеров А. С., Балышева О. Л. Быстрый численный расчет параметров поверхностных акустических волн Рэлея для модели связанных мод // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 5. С. 67–79. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-5-67-79

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность генеральному директору – генеральному конструктору ООО "АЭК Дизайн" В. Р. Реуту за предоставленные экспериментальные данные.

Статья поступила в редакцию 17.05.2022; принята к публикации после рецензирования 08.07.2022; опубликована онлайн 29.11.2022



Rapid Numerical Calculation of Rayleigh Surface Acoustic Wave Parameters for a Model of Coupling Modes

Aleksey S. Koigerov^{1✉}, Olga L. Balysheva²

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

²Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St Petersburg, Russia

✉ a.koigerov@gmail.com

Abstract.

Introduction. Mathematical modeling is the most important stage in the development of devices based on surface acoustic waves (SAW). Computer simulations that have proven their efficiency in recent years can significantly reduce the time input and improve the accuracy of calculating the designed characteristics. A rapid analysis of the operating characteristics of the designed acoustoelectronic devices requires the knowledge of basic parameters of acoustic waves propagating along the device substrates.

Aim. Proposal and approbation of a methodology for calculating the key parameters necessary for modeling SAW devices based on the models of P-matrix and coupling modes, based on the example of analysis of Rayleigh waves by the finite element method.

Materials and methods. The theoretical part of the work was carried out using the mathematical theory of differential equations presented in a matrix form and the finite element method. Mathematical processing was conducted in the MatLab and COMSOL environments.

Results. An original technique for deriving SAW parameters for a model of coupling modes based on a rapid algorithm implemented in COMSOL was developed. A comparison of the calculated parameters of electromechanical coupling coefficient and velocity of acoustic waves over the substrate surface with those presented in literature showed their good agreement. Based on the derived parameters, a number of transversal filters were designed. A comparison of the calculated and experimentally measured values of the transmission coefficient was performed.

Conclusion. The proposed technique for analyzing infinite periodic electrodes by the finite element method based on an analysis of eigenfrequencies and static analysis made it possible to calculate the main parameters of Rayleigh waves in conventional substrates: lithium niobate, lithium tantalate and quartz. The practical significance lies in the use of the obtained parameters in the development of various classes of acoustoelectronic devices.

Keywords: acoustoelectronic devices, surface acoustic waves, coupling mode model, finite element method, COMSOL, piezoelectric materials, inter-digital transducer, SAW filter

For citation: Koigerov A. S., Balysheva O. L. Rapid Numerical Calculation of Rayleigh Surface Acoustic Wave Parameters for a Model of Coupling Modes. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 5, pp. 67–79. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-5-67-79

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the general director and the general designer "AEC-Design" V. R. Reut for the experimental data provided.

Submitted 17.05.2022; accepted 08.07.2022; published online 29.11.2022

Введение. Акустоэлектронные устройства формирования и обработки сигналов на поверхностных акустических волнах (ПАВ) [1] находят широкое применение в различных радиоэлектронных системах. Появление в последние годы компьютерных пакетов моделирования позволило существенно улучшить эффективность проектирования акустоэлектронных устройств. При разработке устройств с техническими характеристиками, близкими к предельно достижимым

(определяемым физическими свойствами материалов подложек и топологией), а также при заданной высокой точности расчетов (например, требовании отличия экспериментального коэффициента передачи фильтра от расчетного 1–2 %), необходимо иметь инструментарий для предварительного моделирования и расчета характеристик. Принимая во внимание различное функциональное назначение устройств, существующее разнообразие конструктивного испол-

нения, применяемых топологий, типов акустических волн и материалов подложек [2], набор учитываемых при моделировании факторов достаточно большой.

На сегодняшний день с помощью коммерчески доступных пакетов существует возможность полного 3D-моделирования устройств на ПАВ, однако предъявляемые требования к мощности компьютера и временные затраты в ряде случаев неоправданно велики. Кроме того, большое расчетное время практически исключает возможность синтеза устройств, поскольку на одну вычислительную итерацию может тратиться до одной недели. Поэтому при выборе расчетного инструментария необходимо исходить из разумного компромисса между адекватностью и адаптивностью модели, необходимыми вычислительными ресурсами компьютера и требуемым расчетным временем.

Одним из известных методов расчета устройств на ПАВ является метод связанных мод (МСМ) (Coupling of Modes – COM) [1, 3–5]. Метод позволяет рассчитывать характеристики устройств с различными топологиями, содержащих как встречно-штыревые преобразователи (ВШП), так и отражательные структуры (ОС). Существующие ограничения подхода на основе МСМ связаны с учетом "вторичных" эффектов и необходимости определения ключевых параметров акустических волн: фазовой скорости на свободной поверхности и под электродной структурой, коэффициентов отражения и прохождения через отдельный электрод и др. Эти параметры зависят как от геометрии элементов топологии и используемых материалов подложек, так и от технологических особенностей (например, формы поперечного сечения электрода и толщины металлизированного слоя). На определение этих параметров и направлены усилия разработчиков с целью создания средств моделирования, обеспечивающих, по возможности, меньшее расхождение между расчетными и экспериментальными результатами. Использование такого расчетного инструментария позволит повысить эффективность разработки устройств с повышенными требованиями к техническим характеристикам.

Для моделирования устройств на ПАВ можно использовать такие программные пакеты,

как COMSOL Multiphysics и ANSYS, работа которых основана на методе конечных элементов (МКЭ). Например, в [6] показаны результаты анализа устройств с помощью пакета COMSOL Multiphysics во временной области, в [7–10] – в частотной области. Вопросы 3D-анализа рассматриваются в [10, 11].

Цель настоящей статьи – на примере ПАВ Рэлея показать методику получения в пакете COMSOL Multiphysics ключевых параметров, необходимых для расчета акустоэлектронных устройств методом связанных мод на основе P -матриц. Полученные расчетные параметры ПАВ в основных материалах, применяемых в качестве подложек, можно использовать при проектировании различных классов акустоэлектронных устройств.

Постановка задачи. В основе МСМ лежит запись дифференциальных уравнений для связанных акустических волн. Формализовать процесс вычислений удобно с помощью представления падающих и отраженных волн в виде P -матриц. В этом случае устройство на ПАВ представляется в виде комбинации отдельных элементов (электродов ВШП или элементов ОС), для которых вычисляются соответствующие P -матрицы, связывающие комплексные амплитуды волн (рис. 1) на входе и выходе элемента [1]:

$$\begin{bmatrix} B_i \\ A_{i+1} \\ I_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11}^i & P_{12}^i & P_{13}^i \\ P_{21}^i & P_{22}^i & P_{23}^i \\ P_{31}^i & P_{32}^i & P_{33}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_i \\ B_{i+1} \\ U_i \end{bmatrix},$$

где $A_i, A_{i+1}, B_i, B_{i+1}$ – комплексные амплитуды связанных между собой падающих и отраженных волн; I_i – ток, текущий в i -м электроде; U_i – напряжение, подводимое к i -му электроду.

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

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

где r – коэффициент отражения от одиночного электрода; $\beta = 2\pi f/v - \gamma$ – волновое число (v – фазовая скорость под электродом; γ – коэффи-

коэффициент затухания); p – период структуры; k_t – коэффициент прохождения через электрод.

Элементы матрицы P_{13} , P_{23} показывают эффективность возбуждения ПАВ посредством подачи напряжения U_1 на шины ВШП. Элементы P_{31} , P_{32} характеризуют эффективность преобразования ПАВ в электрический ток I_1 в шинах ВШП. P_{13} , P_{23} , P_{31} , P_{32} прямо пропорциональны эффективному значению коэффициента электромеханической связи.

Элемент P_{33} суммарной матрицы канала определяет искомую проводимость ВШП Y :

$$P_{33} = Y(\omega) = G(\omega) + jB(\omega) + j\omega C_0,$$

где $G(\omega)$ и $B(\omega)$ – соответственно, активная и реактивная составляющие проводимости излучения; C_0 – статическая емкость.

При анализе устройств необходимо знание всех элементов P -матрицы. Коэффициент передачи всего устройства на ПАВ получают путем каскадирования P -матриц отдельных элементов. Более подробно с моделью связанных мод и ее формализацией на базе P -матриц можно ознакомиться в [1, 3–5]. Параметры МСМ не могут быть получены в рамках самой модели. Наиболее распространенными способами получения МСМ-параметров являются извлечение параметров из экспериментальных данных с последующим построением эмпирических зависимостей [12], аналитические решения или численные решения на основе МКЭ [13–16].

Для моделирования устройств на ПАВ необходимо определить следующие МСМ-параметры:

- скорость ПАВ на свободной и металлизированной поверхности;
- скорость ПАВ под элементами ВШП и ОС;
- коэффициент отражения ПАВ от электрода;
- коэффициент прохождения ПАВ через электрод;
- коэффициент электромеханической связи;
- затухание ПАВ в подложке;
- статическая емкость.

Причем при моделировании приходится учитывать довольно большое число степеней свободы, относящихся к топологическим, конструктивным и технологическим особенностям

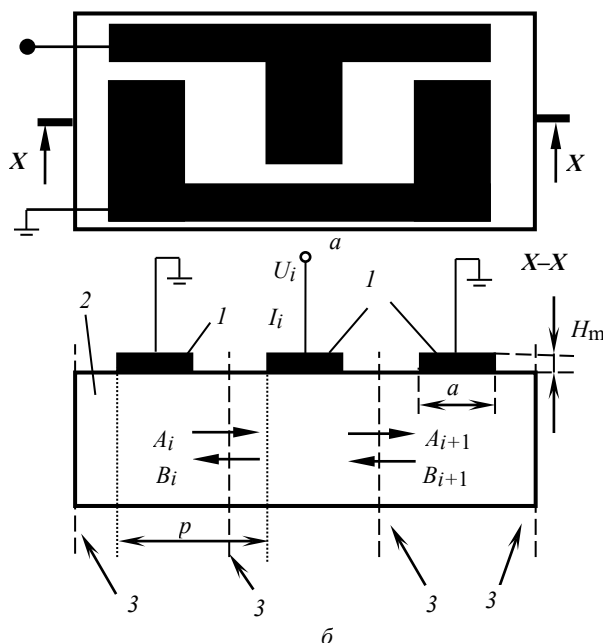


Рис. 1. Фрагмент периодической электродной структуры на подложке: а – вид сверху; б – поперечное сечение (1 – электроды; 2 – подложка; 3 – границы элементарных блоков)

Fig. 1. Fragment of a periodic electrode structure on a substrate: a – top view; б – cross section (1 – electrodes; 2 – substrate; 3 – boundaries elementary blocks of P -matrices)

устройств. Это такие факторы, как:

- геометрия элементарной ячейки ВШП;
- профиль электрода;
- геометрия шин ВШП и контактных площадок;
- тип электродной ОС (закороченная или электрически разомкнутая);
- коэффициент металлизации электродных структур;
- толщина металлизации.

На рис. 1 изображен фрагмент анализируемой периодической структуры электродов. В данной структуре ширина электродов и зазоров между электродами равна и составляет $\lambda/4$, период структуры $p = \lambda/2$ и коэффициент металлизации $K_m = a/p = 0.5$, где λ – длина волны; a – ширина электрода; p – период структуры. Таким образом, задача состоит в нахождении перечисленных МСМ-параметров.

В статье рассматриваются ПАВ Рэлея для следующих широко используемых в акусто-электронных устройствах материалов подложек: ниобата лития (LiNbO_3) срезов $128^\circ Y$ – X и YZ , танталата лития (LiTaO_3) среза X – $112^\circ Y$ и кварца (SiO_2) среза $36^\circ Y$ – X .

Методика анализа МСМ-параметров в пакете COMSOL. Для анализа и расчета МСМ-параметров применяется подход, известный как анализ собственных частот с помощью МКЭ. В данном случае вместо затухающей бегущей волны рассматриваются незатухающие стоячие волны, для которых можно определить собственные частоты.

Расчет и анализ собственных частот – один из возможных способов анализа различных акустических мод, возбуждаемых в изучаемой топологической структуре или элементарной ячейке. Термин "собственные частоты" можно пояснить из аналогии элементарной ячейки и колебательной системы. Если создать условия, при которых ячейке сообщить энергию за счет пьезоэлектрического эффекта с последующим отсутствием внешних воздействий на колебательную систему, то в отсутствие потерь в ней возникнут незатухающие собственные (или свободные) колебания на частотах, называемых собственными. В ограниченных системах, в данном случае в тестовой ячейке с конечным размером, но с бесконечными периодическими условиями, может существовать ограниченный набор собственных колебаний (или акустических мод). Каждая возбуждаемая акустическая мода (ПАВ, вытекающая ПАВ, объемная акустическая волна и их гармоники) на собственных частотах характеризуется собственными формами колебания.

В силу симметрии при рассмотрении ячейки бесконечной периодической системы неоднородностей (металлических электродов) наблюдается пара собственных частот для анализируемой акустической моды. Полоса брэгговского отражения волн в этом случае располагается как раз между этими частотами. Для решетки с конечной протяженностью вдоль направления распространения волны наблюдаемые собственные частоты соответствуют нулям коэффициента отражения ограниченной системы поверхностных неоднородностей. При рассмотрении однородной ячейки без условий для отражения (полностью свободная или металлизированная поверхность) собственная частота для рассматриваемой акустической моды будет единственной, поскольку отсутствует условие Брэгга (т. е. условие синхронного от-

ражения волны от системы периодических неоднородностей).

В пакете COMSOL Multiphysics расчет собственных частот осуществляется с помощью решателя Study – Eigenfrequency. Последовательность расчета предусматривает два этапа. На первом этапе в пакете анализируются собственные частоты, для чего необходимо:

- задать геометрию тестовой структуры;
- выбрать материалы элементов;
- указать начальные и граничные условия;
- задать параметры и построить сетку;
- определить параметры решающего устройства.

На втором этапе выполняется обработка полученного набора собственных частот и оценка основных параметров с использованием приведенных далее формул.

Анализируемые с помощью пакета тестовые структуры представлены на рис. 2. Это свободная и металлизированная поверхности подложки, периодические электродные структуры с периодом $p = \lambda/2$ или $p = \lambda/4$. Размер ячейки составляет одну длину волны (принято $\lambda = 2$ мкм). Глубина анализируемой поверхности составляет 4 длины волн. Граничные условия заданы таким образом, что данная структура рассматривается как бесконечная периодическая решетка металлических электродов. На нижнем торце подложки расположен идеально согласованный слой, поглощающий исходящие волны для ограничения области численного моделирования. Материал электродов – алюминий. Поскольку ПАВ распространяется в поверхностном слое глубиной примерно в одну длину волны, то при построении сетки область у поверхности должна иметь более плотную сетку, например 20 элементов на длину волны, для остальной части предложено использовать менее плотную сетку – 10 элементов на длину волны (рис. 2, д). Это правило создания сетки позволяет значительно сократить время вычислений, особенно при анализе целого устройства, и особенно в режиме 3D. Необходимо отметить, что при анализе ПАВ относительно определения собственных частот не были учтены следующие эффекты: резистивные потери в электродах, дифракция акустической волны, потери за счет вязкостных свойств материала.

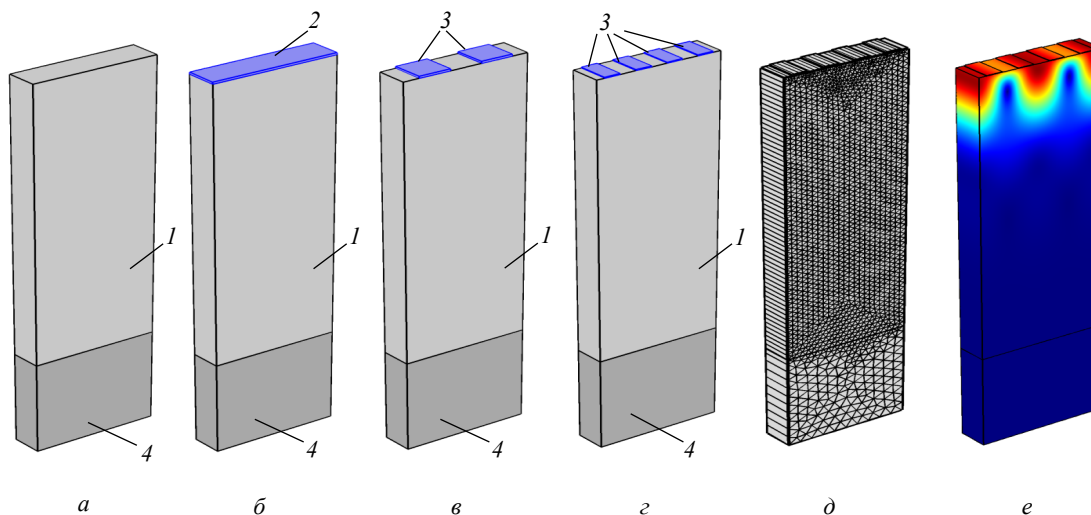


Рис. 2. Тестовые структуры: а – свободная поверхность подложки; б – металлизированная поверхность подложки; в – электродная структура с периодом $p = \lambda/2$ и шириной полоска $\lambda/4$; г – электродная структура с периодом $p = \lambda/4$ и шириной полоска $\lambda/8$; д – пример построения сетки; е – результат расчета МКЭ в виде картины механических смещений. Особенности модели: 1 – пьезоэлектрический материал; 2 – металлизированная поверхность; 3 – металлические электроды; 4 – идеально согласованный слой

Fig. 2. Test structures: а – free surface; б – metallized surface; в – electrode structure with the pitch $p = \lambda/2$ and electrode width $\lambda/4$; г – electrode structure with the pitch $p = \lambda/4$ and electrode width $\lambda/8$; д – meshing example; е – calculation by FEM as a scheme of mechanical displacements. Model features: 1 – piezoelectric material; 2 – metallized surface; 3 – metallized electrodes; 4 – perfectly matched layer

Расчет параметров ПАВ для свободной и металлизированной поверхностей. Для свободной или металлизированной поверхности без системы электродов существует одна собственная частота, которая позволяет рассчитать фазовую скорость ПАВ. Так, скорость ПАВ на свободной и металлизированной поверхностях определяется, соответственно, по формулам

$$v_f = \lambda f_f;$$

$$v_m = \lambda f_m,$$

где f_f , f_m – соответственно, собственные частоты для свободной и металлизированной поверхностей.

Сравнительная картина механических смещений для собственных частот на свободной поверхности для различных материалов представлена на рис. 3.

Коэффициент электромеханической связи (КЭМС) можно оценить по формуле

$$K^2 = \frac{2(v_f - v_m)}{v_f}.$$

Результаты расчета собственных частот и скоростей ПАВ для свободной и металлизированной поверхностей каждого материала сведены в таб-

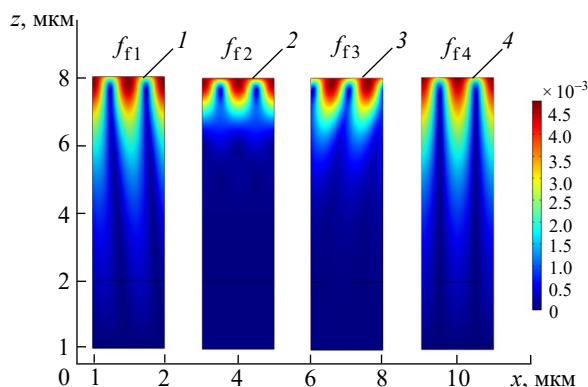


Рис. 3. Результаты анализа в виде картины механических смещений волны Рэлея на собственных частотах основной акустической моды для различных пьезоэлектрических подложек: 1 – Y-Z LiNbO₃; 2 – 128° Y-X LiNbO₃; 3 – X-112° Y LiTaO₃; 4 – 36° Y-X SiO₂

Fig. 3. Analysis results in the form of a scheme of mechanical displacements of a Rayleigh wave at the eigenfrequency of main acoustic mode for various piezoelectric substrates: 1 – Y-Z LiNbO₃, 2 – 128° Y-X LiNbO₃, 3 – X-112° Y LiTaO₃, 4 – 36° Y-X SiO₂

лицу. Данные, полученные с помощью анализа собственных частот, хорошо согласуются с известными данными из [5, 17–20].

Расчетные параметры определяются набором материальных констант, представленных в литературе в виде справочных усредненных значений, причем эти значения отличаются у разных авторов. Кроме того, точность полу-

Параметры волн Рэлея в основных пьезоэлектрических подложках
Parameters of Rayleigh waves in the main piezoelectric substrates

Параметр ПАВ в материале	LiNbO ₃ , Y-Z	LiNbO ₃ , 128°Y-X	LiTaO ₃ , X-112°Y	SiO ₂ , 36°Y-X
Собственная частота для свободной поверхности (f_f), ГГц	1.7445	1.9905	1.651	1.5774
Скорость ПАВ на свободной поверхности (v_f), м/с (расчет)	3489	3981	3302	3154.8
Скорость ПАВ на свободной поверхности (v_f), м/с	3488 [18]	3979 [17]	3300 [17]	–
Собственная частота для металлизированной поверхности ($H_m/\lambda=0.01\%$)(f_m), ГГц	1.7055	1.9354	1.6433	1.5762
Скорость ПАВ на металлизированной поверхности ($H_m/\lambda=0.01\%$)(v_m), м/с (расчет)	3411	3870.8	3286.6	3152.4
Скорость ПАВ на металлизированной поверхности ($H_m/\lambda \approx 0$)(v_m), м/с	3409.5 [18]	3888 [19]	3284 [19]	–
КЭМС (K^2), % (расчет)	4.47	5.54	0.93	0.152
КЭМС (K^2), %	4.5 [18] 4.42 [20]	5.4 [19] 5.46 [20]	0.72 [5] 0.92 [20]	0.155 [5]

ченных результатов также определяется настройками пакета моделирования, в том числе начальными и граничными условиями, а также способом задания и плотностью сетки.

Полученные результаты по скорости ПАВ на свободной и металлизированной поверхностях для трех представленных материалов отличаются от данных, приведенных в литературных источниках, не более чем на 0.08 %. Наибольшее отличие получено для КЭМС, приведенного в одном из источников (расхождение составляет 29 %), в то же время отличие с данными из другого источника не превышает 1 %. Полученные результаты позволяют судить об адекватности предложенной методики расчета и возможности ее применения для других материалов и топологий электродных структур, данные по которым необходимы

разработчикам, но отсутствуют в литературе. Стоит заметить, что отклонение результатов численного моделирования некоторых параметров от справочных и экспериментальных можно объяснить зависимостью характеристик реальных монокристаллов от технологии роста (производства) и способа их измерения.

Анализ параметров ПАВ под системой электродов. Методику анализа параметров ПАВ под системой электродов можно пояснить с помощью блок-схемы, представленной на рис. 4. Данный подход включает в себя два основных направления, связанных с пакетом COMSOL. Первое – это расчет в области собственных частот (Study – Eigenfrequency), второе – статический анализ (Study – Stationary).

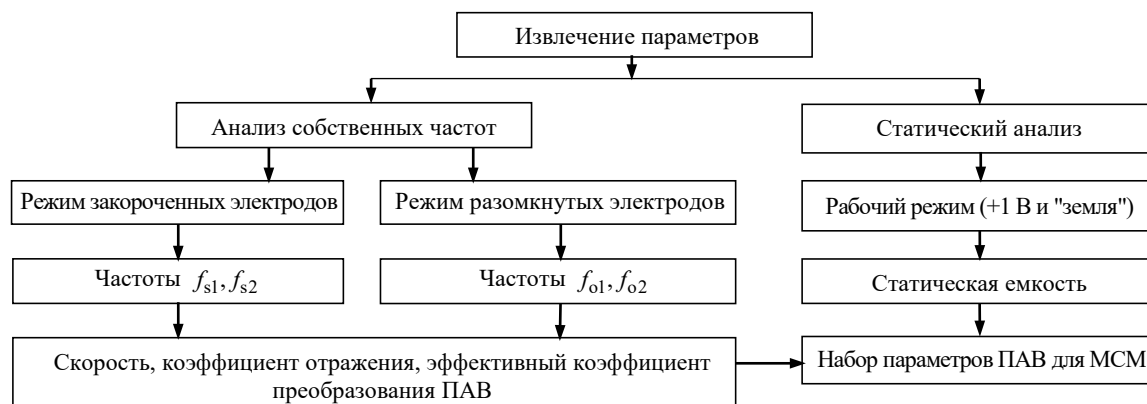


Рис. 4. Методика численного расчета параметров волн Рэлея под системой электродов с помощью COMSOL

Fig. 4. Method of numerical calculation of Rayleigh wave parameters under the electrode system in COMSOL

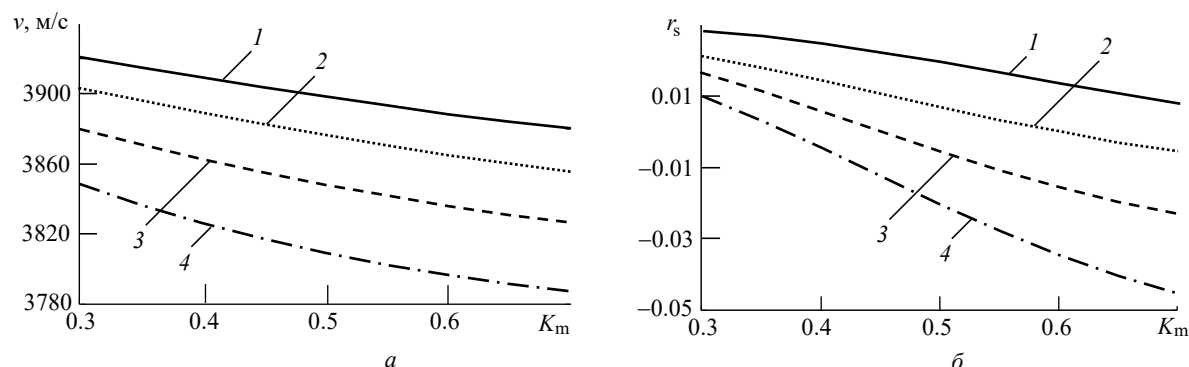


Рис. 5. Зависимость фазовой скорости ПАВ (а) и коэффициента отражения от единичного электрода (б) от коэффициента металлизации на подложке $128^\circ Y-X \text{ LiNbO}_3$ при относительной толщине металлизированного слоя H_m/λ , %: 1 – 0.1; 2 – 2; 3 – 3.5; 4 – 5

Fig. 5. Plots of (a) SAW phase velocity and (b) reflection coefficient of a single electrode vs. metallization coefficient for the $128^\circ Y-X \text{ LiNbO}_3$ substrate for relative metal thickness H_m/λ , %: 1 – 0.1; 2 – 2; 3 – 3.5; 4 – 5

Анализ в области собственных частот.

При наличии на поверхности электродов существует две собственные частоты. Для короткозамкнутой решетки это частоты f_{s1} , f_{s2} , для электрически разомкнутой (открытой решетки) – частоты f_{o2} , f_{o1} .

Зная все эти собственные частоты, можно вычислить следующие параметры [5, 16]:

$$v = \frac{(f_{s1} + f_{s2})}{2} \lambda$$

– фазовая скорость ПАВ под электродом короткозамкнутой решетки;

$$r_s = \pi \frac{(f_{s2} - f_{s1})}{f_{s2} + f_{s1}}$$

– коэффициент отражения ПАВ на один электрод короткозамкнутой решетки;

$$k = \pi \frac{(f_{o2} + f_{o1} - f_{s2} - f_{s1})}{f_{s2} + f_{s1}}$$

– эффективный коэффициент преобразования ПАВ.

По аналогии, зная собственные частоты f_{o2} , f_{o1} , можно рассчитать скорость ПАВ под электрически разомкнутой решеткой.

На основе описанной методики рассчитаны основные параметры МСМ: фазовая скорость волны (v) и коэффициент отражения от единичного электрода (r_s) для тестовой электродной структуры с шириной электрода $\lambda/4$. Полученные расчетные зависимости фазовой ско-

рости и коэффициента отражения на ниобате лития приведены на рис. 5.

Анализ зависимости фазовых скоростей и коэффициентов отражения еще раз подтверждает, что в сильных пьезоэлектрических материалах, таких как ниобат лития, наибольший вклад вносит электрическая нагрузка поверхности, в то время как для слабых пьезоэлектрических материалов наибольшее влияние имеет механическая нагрузка. Это хорошо видно на примере ниобата лития среза $128^\circ Y-X$. Несмотря на то что электрод физически нагружает подложку, существуют такие значения коэффициента металлизации и относительной толщины металлического слоя, при которых коэффициент отражения равен нулю, по-видимому, механическая и электрическая составляющие компенсируют друг друга.

Статический анализ. Данный тип анализа очень полезен и удобен для анализа численного значения статической емкости электродов (иногда данный параметр называют погонной емкостью). Для анализируемой тестовой ячейки необходимо задать потенциалы, под которыми находятся электроды (в данном случае потенциал +1 В и нулевой потенциал или "земля"). После расчета можно наблюдать картину распределения потенциала по глубине подложки (рис. 6, а) и на ее поверхности (рис. 6, б). Встроенными средствами COMSOL позволяет вывести числовое значение статической емкости для анализируемой тестовой ячейки. Так, для расщепленных электродов ($\lambda/8$) статиче-

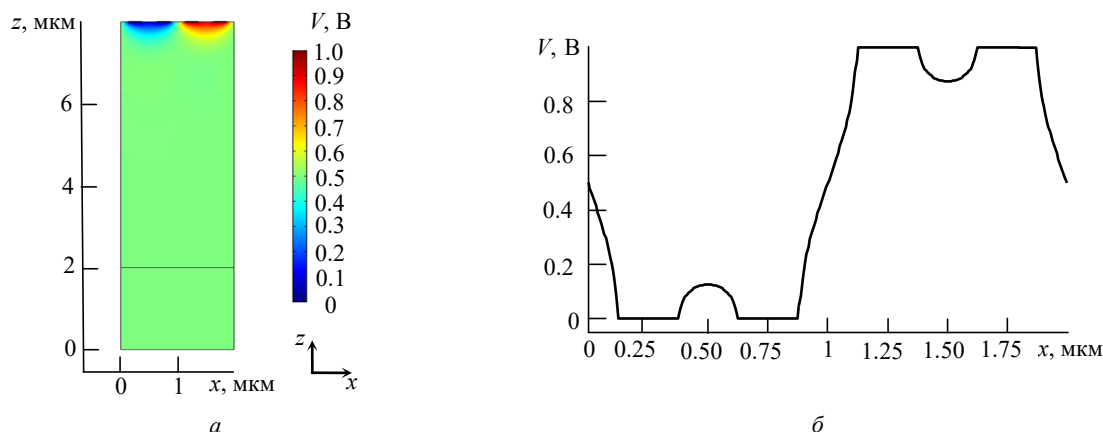


Рис. 6. Пример отображения численного решения для ВШП с расщепленными электродами в пакете COMSOL для статического анализа: *a* – распределение потенциала по глубине подложки; *б* – распределение потенциала по поверхности

Fig. 6. Example of plots a numerical solution for a split-electrode IDT in COMSOL for static analysis: *a* – potential distribution over the depth of the substrate; *б* – surface potential distribution

ская емкость на подложке $128^\circ Y-X LiNbO_3$ составляет $C_1 = 696.1$ пФ/м, а для преобразователя с электродами $\lambda/4$ емкость пары $C_0 = 492.2$ пФ/м. Отношение $C_1/C_0 = 1.41$, что точно соответствует известным теоретическим и экспериментальным данным [17]. Сравнение с известными источниками позволяет сделать вывод об эффективности данного типа анализа. Для материалов с низкой эффективной диэлектрической проницаемостью (различные срезы кварца ($\epsilon \approx 4.5 \dots 5.5$)) необходимо учитывать и добавлять в расчет воздушный слой ($\epsilon = 1$) над электродами.

Сравнение результатов расчета и эксперимента. На основе извлеченных параметров ПАВ были рассчитаны характеристики транс-

версальных фильтров на ПАВ на подложках $128^\circ Y-X LiNbO_3$ и $36^\circ Y-X SiO_2$. Каждый из фильтров состоял из входного и выходного ВШП. Входной преобразователь каждого фильтра имеет амплитудную аподизацию. Выходной ВШП в фильтре на ниобате лития – неаподизованный, а выходной ВШП в фильтре на кварце имеет взвешивание методом удаления электродов. Результаты расчета и измерений амплитудно-частотных характеристик представлены на рис. 7 и показывают хорошее совпадение теоретических и экспериментальных кривых. Вносимые потери для фильтра на ниобате лития (рис. 7, *a*) составили 19.3 дБ, относительная полоса пропускания по уровню -3 дБ – 14.6 %, неравномерность в полосе пропускания 0.4 дБ, подавление в полосе заграждения

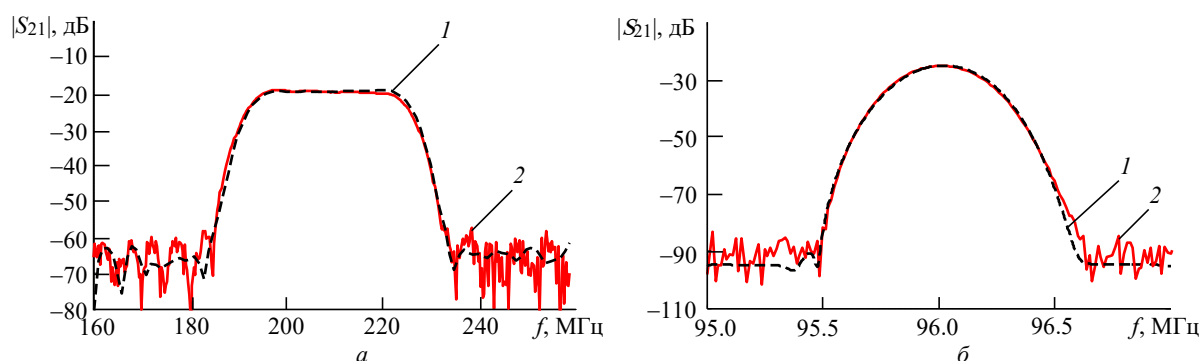


Рис. 7. Амплитудно-частотные характеристики трансверсальных фильтров на ПАВ на подложках $128^\circ Y-X LiNbO_3$ (*a*) и $36^\circ Y-X SiO_2$ (*б*): 1 – расчет на основе МСМ с использованием извлеченных по предложенной методике параметров ПАВ; 2 – эксперимент

Fig. 7. Frequency responses of transversal filters on substrates $128^\circ Y-X LiNbO_3$ (*a*) and $36^\circ Y-X SiO_2$ (*б*): 1 – calculated by COM using the SAW parameters derived by the proposed method; 2 – experimental

–40 дБ. Вносимые потери для фильтра на кварце (рис. 7, б) составили 25.3 дБ, относительная полоса пропускания по уровню –3 дБ – 0.3 %, неравномерность в полосе пропускания 0.1 дБ, подавление в полосе заграждения –60 дБ. Некоторые расхождения расчетных и экспериментальных результатов в полосе заграждения можно объяснить наличием паразитных индуктивностей и емкостей соединительных проводников, контактных шин и корпуса, а также влиянием такого "вторичного" эффекта, как дифракция.

Обсуждение результатов. В статье предложена и апробирована оригинальная методика оценки основных МСМ-параметров ПАВ Рэлея на основе анализа собственных частот и статического анализа с помощью пакета COMSOL Multiphysics. Прежде всего такой методологический подход позволяет отказаться от большого числа экспериментальных исследований для получения требуемых параметров [12], поскольку эксперимент заменяется физико-математическим моделированием. Наличие большого числа степеней свободы при разработке топологий устройств подразумевает под собой и большое число анализируемых тестовых структур и соответствующих экспериментов. Использование же численного анализа позволяет отказаться от эксперимента и сократить затраты на разработку.

По сравнению с уже известными численными методами получения ключевых параметров стоит отметить следующие важные моменты. Во-первых, наиболее популярный численный способ получения МСМ-параметров ПАВ основан на извлечении их из дисперсионных кривых [13–15]. В предложенном подходе нет необходимости рассматривать дисперсионные кривые. Во-вторых, некоторые численные алгоритмы используют анализ полной проводимости тестовой ячейки в зависимости от частоты [7, 10, 16]. Например, известен способ определения эффективного КЭМС с помощью классического метода "резонанса – антирезонанса" в выбранном диапазоне частот, но для точного описания требуется большое число частотных точек, особенно в окрестностях резонансных частот. Если расчет одной пары собственных частот для выбранных параметров геометрии и материала по рассматриваемой в данной статье

методике занимает 3...5 с, то расчет полной проводимости – 15...20 мин в зависимости от числа точек и диапазона частот. При условии что требуется анализ большого числа тестовых структур, такой способ анализа интересен лишь для небольшого набора тестовых структур. В предложенной авторами методике оценки параметров волн Рэлея нет необходимости рассматривать характеристику полной проводимости. Применение для численного анализа пакета COMSOL Multiphysics, в котором методика опирается только на собственные частоты, позволяет получить необходимые МСМ-параметры, сокращая время разработки при анализе тестовых структур. Кроме того, средства COMSOL Multiphysics обеспечивают прорисовку геометрии ВШП любой формы, контролируя при этом все промежуточные этапы анализа (от выбора материальных констант и сетки до визуализации любой механической компоненты волны и глубины ее проникновения в подложку). Сравнение полученных результатов с данными из литературных источников показало расхождение результатов по скорости не более 0.08 %, по КЭМС – не более 1 %.

Практическая значимость работы, по мнению авторов, состоит в следующем:

- данная методика позволяет получить все параметры ПАВ Рэлея, необходимые для моделирования и предварительного расчета характеристик устройств с помощью популярного у разработчиков МСМ;

- предложенная методика распространяется не только на ВШП и ОС с электродами $\lambda/4$, но и на преобразователи с шириной электрода $\lambda/8$ (расщепленными электродами) и $\lambda/6$, на однонаправленные преобразователи типа DART (Distributed acoustic reflection transducer), EWC (Electrode Width Control) [17], а также другие конструкции, для которых можно выделить периодически повторяющуюся геометрию и сконфигурировать тестовую ячейку в одну длину волны;

- предложенный способ получения параметров позволяет сформировать библиотеку параметров ПАВ для каждого материала, профиля электрода, коэффициента и толщины металлизации, соответствующей геометрии ВШП и ОС, к которой можно обращаться при разра-

ботке различного класса устройств на ПАВ: фильтров, резонаторов, линий задержки;

– при необходимости можно анализировать новые материалы и срезы, для которых известны набор физических констант и углы Эйлера и отсутствуют численные данные по параметрам ПАВ.

Среди ограничений применения данной методики следует выделить два основных:

1. Поскольку тестовые структуры рассматриваются как бесконечные решетки, в которых не учитываются такие эффекты, как дифракция и волноводный эффект [21], то результаты будут справедливы для значения апертур более 10 длин волн. При малых апертурах необходимо рассматривать не одну акустическую моду, а несколько мод, и у каждой из них будут свои параметры ПАВ. И если такой эффект, как дифракция, можно рассчитать при использовании МСМ, то волноводный эффект требует отдельного анализа параметров каждой моды.

2. Для работы с другими типами волн, например с псевдоповерхностными волнами, или вытекающими ПАВ, необходимо учитывать еще ряд параметров, два из которых требуют расширения данной методики – это возбуждение объемных мод после некоторой верхней частоты и рассеивание основной моды в объем подложки.

Заключение. Предложена методика оценки основных параметров ПАВ Рэлея в периодических электродных структурах. С использованием пакета COMSOL Multiphysics выполнен расчет параметров ПАВ на свободной, металлизированной поверхностях и под металлическими электродами для подложек из ниобата лития, танталата лития и кварца. Использование рассчитанных параметров необходимо при проектировании различных классов акустоэлектронных устройств. Выполненное сравнение результатов расчета и экспериментальных характеристик коэффициента передачи для ряда трансверсальных фильтров показало хорошее совпадение. Используемая модель связанных мод, матричный подход к формализации вычислений, а также анализ МСМ-параметров в пакете COMSOL Multiphysics предоставляют разработчику эффективный и легко адаптируемый к изменениям топологии инструмент для предварительного расчета характеристик акустоэлектронных устройств.

Описанная методика по аналогии может быть использована при анализе устройств, имеющих более сложную топологическую структуру ВШП и ОС, на подложках из любых материалов, а также устройств на акустических волнах других типов.

Список литературы

1. Фильтрация и спектральный анализ радиосигналов. Алгоритмы. Структуры. Устройства / под ред. Ю. В. Гуляева. М.: Радиотехника, 2020. 504 с.

2. Балышева О. Л. Подложки для функциональных устройств на ПАВ // Техника радиосвязи. 2017. Вып. 1 (32). С. 92–101.

3. Койгеров А. С. Аналитический подход к расчету резонаторного комбинированного фильтра на поверхностных акустических волнах на основе модели связанных мод // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 2. С. 16–28. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-2-16-28

4. Plessky V. P., Koskela J. Coupling-of-modes analysis of SAW devices // Int. J. High Speed Electr. and Syst. 2000. Vol. 10, № 4. P. 867–947. doi: 10.1142/S0129156400000684

5. Hashimoto K. Surface Acoustic Wave Devices in Telecommunications: modeling and simulation. Heidelberg: Springer Berlin, 2000. 330 p. doi: 10.1007/978-3-662-04223-6

6. Sveshnikov B., Koigerov A., Yankin S. Unveiling the polarization of the multimode acoustic fields //

Ultrasonics. 2018. Vol. 82. P. 209–216. doi: 10.1016/j.ultras.2017.08.011

7. A Novel Method to Extract COM Parameters for SAW Based on FEM / Y. Zhang, J. Jin, H. Li, H. Hu // Symp. on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications (SPAWD). Harbin, China, 11–14 Jan. 2019. Piscataway: IEEE, 2019. P. 1–5. doi: 10.1109/SPAWDA.2019.8681838

8. Новая конструкция многоканальной ПАВ-радиометки на основе многополоскового ответвителя / В. Р. Реут, А. С. Койгеров, С. С. Андрейчев, С. П. Дорохов, А. С. Салов // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21, № 10. С. 579–593. doi: 10.17587/nmst.21.579-593

9. Systematical Study of the Basic Properties of Surface Acoustic Wave Devices Based on ZnO and GaN Multilayers / J. Shen, S. Fu, R. Su, H. Xu, F. Zeng, Ch. Song, F. Pan // Electronics. 2021. Vol. 10, № 1. P. 23. doi: 10.3390/electronics10010023

10. Periodic Analysis of Surface Acoustic Wave Resonator with Dimensionally Reduced PDE Model Using COMSOL Code / Q. Zhang, Z. Chen, Y. Chen,

J. Dong, P. Tang, S. Fu, H. Wu, J. Ma, X. Zhao // Micromachines. 2021. Vol. 12, № 2. P. 1–14. doi: 10.3390/mi12020141

11. Full 3D FEM Analysis of Scattering at a Border Between IDT and Reflector in SAW Resonators / A. Iyama, X. Li, J. Bao, N. Matsuoka, T. Omori, K. Hashimoto // IEEE Intern. Ultrasonics Symp. Glasgow, UK, 6–9 Oct. 2019. Piscataway: IEEE, 2019. P. 1235–1238. doi: 10.1109/ULTSYM.2019.8925826

12. Automated COM parameter extraction for SiO₂/LiNbO₃ and SiO₂/LiTaO₃ substrates / S. Malocha, K. J. Gamble, H. Dong, A. Dharmalingam // IEEE Intern. Ultrasonics Symp. Tours, France, 18–21 Sept. 2016. Piscataway: IEEE, 2016. P. 1–4. doi: 10.1109/ULTSYM.2016.7728387

13. Pastureaud T. Evaluation of the P-matrix parameters frequency variation using periodic FEM/BEM analysis // IEEE Ultrasonics Symp. Montreal, Quebec, Canada, 23–27 Aug. 2004. Piscataway: IEEE, 2004. Vol. 1. P. 80–84. doi: 10.1109/ULTSYM.2004.1417673

14. Simulation of wireless passive SAW sensors based on FEM/BEM model / Q. Fu, W. Luo, Y. Wang, J. Wang, D. Zhou // IEEE Ultrasonics Symp. Beijing, China, 2–5 Nov. 2008. Piscataway: IEEE, 2008. P. 1861–1864. doi: 10.1109/ULTSYM.2008.0458

15. Cherednick V. I., Dvoesherstov M. Y. COM Parameters of Langasite Crystal // IEEE Ultrasonics Symp. Proc. New York, USA, 28–31 Oct. 2007. Piscataway: IEEE, 2007. P. 2351–2354. doi: 10.1109/ULTSYM.2007.591

16. Tikka A., Said Al-Sarawi, Abbott D. Acoustic Wave Parameter Extraction with Application to Delay Line Modelling Using Finite Element Analysis // Sensors & Transducers J. 2008. Vol. 95, iss. 8. P. 26–39.

17. Morgan D. Surface Acoustic Wave Filters With Applications to Electronic Communications and Signal Processing. Cambridge: Academic Press, 2010. 448 p.

18. Campbell C. K. Surface Acoustic Wave Devices for Mobile and Wireless Communication. Boston: Academic Press, 1998. 631 p.

19. Inagawa K., Koshiba M. Equivalent networks for SAW interdigital transducers // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. 1994. Vol. 41, № 3. P. 402–411. doi: 10.1109/58.285476

20. Qiao D., Liu W., Smith P. M. General Green's functions for SAW device analysis // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. 1999. Vol. 46, № 5. P. 1242–1253. doi: 10.1109/58.796129

21. Свешников Б. В., Багдасарян А. С. Основные принципы формирования поперечных мод в многослойных волноводах поверхностных акустических волн // Изв. высш. учеб. заведений. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 2. С. 108–123. doi: 10.1007/s11141-016-9713-7

Информация об авторах

Койгеров Алексей Сергеевич – кандидат технических наук (2011), доцент (2021) кафедры микро- и наноэлектроники (МНЭ) Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 35 научных публикаций. Сфера научных интересов – моделирование и проектирование микроприборов и устройств на поверхностных акустических волнах.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: a.koigerov@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-6602-0528>

Балышева Ольга Леонидовна – кандидат технических наук (1998), доцент (2006) кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Автор 50 научных публикаций. Сфера научных интересов – устройства на поверхностных акустических волнах; пьезоэлектрические материалы.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ул. Б. Морская, д. 67, Санкт-Петербург, 190000, Россия

E-mail: balysheva@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2071-074X>

References

1. Aristarkhov G. M., Gulyaev Yu. V., Dmitriev V. F., Zajchenko K. V., Komarov V. V. *Fil'tratsiya i spektral'nyi analiz radiosignalov. Algoritmy. Struktury. Ustroystva* [Filtration and Spectral Analysis of Radio Signals. Algorithms. Structures. Devices]. Ed. by Yu. V. Gulyaev. Moscow, *Radiotekhnika*, 2020, 504 p. (In Russ.)

2. Balysheva O. L. The Substrates for Functional SAW Devices. Radio Communication Technology. 2017, iss. 1 (32), pp. 92–101. (In Russ.)

3. Koigerov A. S. Analytical Approach to Designing a Combined-Mode Resonator Filter on Surface Acoustic Waves Using the Model of Coupling of Modes. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 2, pp. 16–28. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-2-16-28

4. Plessky V. P., Koskela J. Coupling-of-Modes Analysis of SAW Devices. Int. J. High Speed Electr.

and Syst. 2000, vol. 10, no. 4, pp. 867–947. doi: 10.1142/S0129156400000684

5. Hashimoto K. Surface Acoustic Wave Devices in Telecommunications: Modeling and Simulation. Heidelberg, Springer Berlin, 2000, 330 p. doi: 10.1007/978-3-662-04223-6

6. Sveshnikov B., Koigerov A., Yankin S. Unveiling the Polarization of the Multimode Acoustic Fields. Ultrasonics. 2018, vol. 82, pp. 209–216. doi: 10.1016/j.ultras.2017.08.011

7. Zhang Y., Jin J., Li H., Hu H. A Novel Method to Extract COM Parameters for SAW Based on FEM. Symp. on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications (SPAWD). Harbin, China, 11–14 Jan. 2019. IEEE, 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/SPAWDA.2019.8681838

8. Reut V. R., Koigerov A. S., Andreychev S. S., Dorokhov S. P., Salov A. S. The New Design of SAW ID Tags on Base of Multistrip Coupler. Nano- and Microsystems Technology. 2019, vol. 21, no. 10, pp. 579–593. doi: 10.17587/nmst.21.579-593

9. Shen J., Fu S., Su R., Xu H., Zeng F., Song Ch., Pan F. Systematical Study of the Basic Properties of Surface Acoustic Wave Devices Based on ZnO and GaN Multilayers. Electronics. 2021, vol. 10, no. 1, p. 23. doi: 10.3390/electronics10010023

10. Zhang Q., Chen Z., Chen Y., Dong J., Tang P., Fu S., Wu H., Ma J., Zhao X. Periodic Analysis of Surface Acoustic Wave Resonator with Dimensionally Reduced PDE Model Using COMSOL Code. Micromachines. 2021, vol. 12, no. 2, pp. 1–14. doi: 10.3390/mi12020141

11. Iyama A., Li X., Bao J., Matsuoka N., Omori T., Hashimoto K. Full 3D FEM Analysis of Scattering at a Border Between IDT and Reflector in SAW Resonators. IEEE Intern. Ultrasonics Symposium, Glasgow, UK, 6–9 Oct. 2019. Piscataway, IEEE, 2019, pp. 1235–1238. doi: 10.1109/ULTSYM.2019.8925826

12. Malocha S., Gamble K. J., Dong H., Dharmalingam A. Automated COM Parameter Extraction for SiO₂/LiNbO₃ and SiO₂/LiTaO₃ Substrates. IEEE Intern. Ultrasonics Symp. Tours, France, 18–21 Sept. 2016.

Piscataway, IEEE, 2016, pp. 1–4. doi: 10.1109/ULTSYM.2016.7728387

13. Pastureaud T. Evaluation of the P-Matrix Parameters Frequency Variation Using Periodic FEM/BEM Analysis. IEEE Ultrasonics Symp. Montreal, Quebec, Canada, 23–27 Aug. 2004. Piscataway, IEEE, 2004, vol. 1, pp. 80–84. doi: 10.1109/ULTSYM.2004.1417673

14. Fu Q., Luo W., Wang Y., Wang J., Zhou D. Simulation of Wireless Passive SAW Sensors Based on FEM/BEM Model. IEEE Ultrasonics Symp. Beijing, China, 2–5 Nov. 2008. Piscataway, IEEE, 2008, pp. 1861–1864. doi: 10.1109/ULTSYM.2008.0458

15. Cherednick V. I., Dvoesherstov M. Y. COM Parameters of Langasite Crystal. IEEE Ultrasonics Symp. Proc. New York, USA, 28–31 Oct. 2007. Piscataway, IEEE, 2007, pp. 2351–2354. doi: 10.1109/ULTSYM.2007.591

16. Tikka A., Said Al-Sarawi, Abbott D. Acoustic Wave Parameter Extraction with Application to Delay Line Modelling Using Finite Element Analysis. Sensors & Transducers J. 2008, vol. 95, iss. 8, pp. 26–39.

17. Morgan D. Surface Acoustic Wave Filters With Applications to Electronic Communications and Signal Processing. Cambridge, Academic Press, 2010, 448 p.

18. Campbell C. K. Surface Acoustic Wave Devices for Mobile and Wireless Communication. Boston, Academic Press, 1998, 631 p.

19. Inagawa K., Koshiba M. Equivalent Networks for SAW Interdigital Transducers. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 1994, vol. 41, no. 3, pp. 402–411. doi: 10.1109/58.285476

20. Qiao D., Liu W., Smith P. M. General Green's Functions for SAW Device Analysis. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. 1999, vol. 46, no. 5, pp. 1242–1253. doi: 10.1109/58.796129

21. Sveshnikov B. V., Bagdasaryan A. S. The Main Principles of Formation of the Transverse Modes in the Multilayered Waveguides of Surface Acoustic Waves. Radiophysics and Quantum Electronics. 2016, vol. 59, no. 6, pp. 449–460. doi: 10.1007/s11141-016-9713-7

Information about the authors

Aleksey S. Koigerov, Cand. Sci. (Eng.) (2011), Associate Professor (2021) of the Department of Micro- and Nano Electronics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 35 scientific publications. Area of expertise: modeling and design of microdevices based on surface acoustic waves.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: a.koigerov@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-6602-0528>

Olga L. Balyшева, Cand. Sci. (Eng.) (1998), Associate Professor (2006) of the Department of Design and Technology of Electronic and Laser Equipment of Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. The author of 50 scientific publications. Area of expertise: surface acoustic waves microdevices; piezoelectric materials.

Address: Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, Bolshaya Morskaya St., St Petersburg 190000, Russia

E-mail: balyшева@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2071-074X>