

EDN: NYPLSM

УДК 621.389

Estimation of the Metallization Parameters Influence on the Performance of Surface Acoustic Waves Components

Pavel S. Marinushkin*,
Alexey A. Levitskiy and Vyacheslav O. Fadeev
*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 01.10.2023, received in revised form 13.01.2024, accepted 24.01.2024

Abstract. The results of studying the influence of the interdigital transducers electrode structure parameters on the main characteristics of surface acoustic waves (SAW) in YZ-cut lithium niobate substrates are presented. As a result of numerical analysis, estimates of the influence of the metallization coefficient and the relative thickness of metallization on the value of the effective wave velocity and reflection coefficient were obtained. The results received can be used to optimize the design of SAW-based acoustoelectronic components.

Keywords: acousto-electronics, metallization, surface acoustic waves, piezoelectricity, filters.

Acknowledgments. The research carried out within the framework of the state assignment of the Siberian Federal University (No. FSRZ-2023–0008).

Citation: Marinushkin P.S., Levitskiy A.A., Fadeev V.O. Estimation of the metallization parameters influence on the performance of surface acoustic waves components. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(1), 82–91.
EDN: NYPLSM



Оценивание влияния параметров металлизации на рабочие характеристики компонентов на поверхностных акустических волнах

П. С. Маринушкин, А. А. Левицкий, В. О. Фадеев
Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния параметров электродной структуры встречно-штыревых преобразователей на основные характеристики поверхностных акустических волн (ПАВ) в подложках ниобата лития YZ-среза. В результате численного анализа получены оценки влияния коэффициента металлизации и относительной толщины металлизации на величину эффективной скорости волны и коэффициент отражения. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации конструкций акустоэлектронных компонентов на ПАВ.

Ключевые слова: акустоэлектроника, металлизация, поверхностные акустические волны, пьезоэлектричество, фильтры.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет (номер FSRZ-2023–0008).

Цитирование: Маринушкин П. С. Оценивание влияния параметров металлизации на рабочие характеристики компонентов на поверхностных акустических волнах / П. С. Маринушкин, А. А. Левицкий, В. О. Фадеев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(1). С. 82–91. EDN: NYPLSM

Введение

Проектирование устройств обработки сигналов на поверхностных акустических волнах (ПАВ) является перспективным направлением научных исследований, имеющим ярко выраженное практическое приложение [1]. В частности, широкое применение в аппаратуре радиосвязи находят полосовые ПАВ-фильтры промежуточных частот, уникальные характеристики которых обеспечивают возможность применения в метровом и дециметровом диапазонах длин волн. Серийные образцы полосовых фильтров на ПАВ работают на частотах от 10 МГц до 2 ГГц и позволяют получать подавление сигнала вне полосы пропускания до –70 дБ при уровне вносимых потерь 2–20 дБ [2].

Амплитудно-частотные характеристики таких устройств определяются как свойствами пьезоэлектрической подложки – звукопровода, так и конструкцией электродных преобразователей ПАВ – встречно-штыревых преобразователей (ВШП). В наиболее простом виде ВШП представляют собой совокупность параллельных металлических электродов с периодической пространственной структурой.

Одним из популярных материалов для использования в качестве подложек в ПАВ-фильтрах является LiNbO_3 , а для электродов наиболее часто используют алюминий с адгезионным подслоем ванадия.

В числе основных параметров, характеризующих приборы, работающие на ПАВ, можно назвать фазовую скорость акустической волны v_0 , коэффициент электромеханической связи $k_{\text{ем}}$ и коэффициент отражения от электродов k_p , в своей совокупности образующих систему так

называемых СОМ-параметров [3–4], и температурную зависимость материальных констант. Отмеченные параметры зависят от ориентации материала (кристаллографического среза) пьезоэлектрической подложки и от направления распространения акустической волны [5]. По известной скорости рэлеевской волны для данного среза v_0 и пространственному периоду электродной структуры ВШП p определяется центральная частота полосового фильтра f_c :

$$f_c = \frac{v_0}{p}.$$

Фазовая скорость v_0 в YZ LiNbO₃ на свободной поверхности составляет порядка 3488 м/с, что вкпе с технологическими возможностями оптической литографии определяет максимальную частоту для ПАВ-приборов на уровне нескольких гигагерц.

Нанесение металлизации на поверхность звукопровода приводит к уменьшению скорости распространения волны, поэтому важно также принимать во внимание толщину металлизации h_c и коэффициент металлизации электродов k_m – отношение ширины электродов ВШП w_m к пространственному периоду p :

$$k_m = \frac{w_m}{p}.$$

Постоянное повышение рабочих частот устройств на ПАВ приводит к необходимости совершенствования методов их расчета [6]. С приближением рабочей частоты прибора к 1ГГц все более заметную роль начинают играть эффекты второго порядка, связанные с вносимыми электродами ВШП возмущениями [7]. Дело в том, что нанесение металлических электродов на поверхность пьезоэлектрика вызывает отражение акустических волн и изменение волновых скоростей, приводя к сдвигу рабочей частоты и искажению формы АЧХ фильтра. При относительно низких рабочих частотах отношение толщины металлизации к длине волны λ пренебрежимо мало и эффектами второго порядка можно пренебрегать, считая электроды бесконечно тонкими. При повышении рабочей частоты толщина металлизации становится сопоставимой с длиной волны и искажения, вносимые электродами, могут быть значительными.

С целью определения характера влияния эффектов второго порядка на характеристики ВШП в настоящей работе проведен анализ указанных эффектов, основанный на использовании метода конечных элементов.

1. Построение модели ВШП

В силу того, что эффективные аналитические методы анализа вторичных эффектов в настоящее время отсутствуют [8], вычисления проводились с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Среди известных программных средств соответствующим функционалом обладают пакеты COMSOL [9–11] и ANSYS [12], но, принимая во внимание наличие развитых возможностей параметрического анализа, предпочтение было отдано COMSOL.

Разработка конечно-элементной модели распространения ПАВ во встречно-штыревом преобразователе потребовала введения ряда упрощений. Существующие вычислительные ресурсы рабочих станций недостаточны для решения трехмерной задачи электроупругости, в особенности когда число электродов составляет десятки и сотни, а отношение толщины ме-

галлизации к размерам подложки $\sim 10^5$. Двумерная постановка может значительно уменьшить количество узлов конечно-элементной сетки и сократить время вычислений. Такая постановка задачи эквивалентна предположению о том, что исследуемое устройство имеет бесконечное рабочее поле (апертуру) в направлении, перпендикулярном рассматриваемому сечению структуры. Также будем исходить из предположения, что амплитуда колебаний мала, а процессы в материалах активного слоя и электродов описываются линейными теориями пьезоэлектричества и упругости. Исключим из рассмотрения объемные силы, действующие на ВШП, и внутренние потери.

Для целей моделирования достаточно ограничиться рассмотрением участка ВШП с длиной $L = \lambda$, содержащего два возбуждающих электрода шириной w_m и толщиной h_e с адгезионным подслоем толщиной h_a (рис. 1), что позволяет использовать периодические граничные условия. Глубину подложки можно ограничить величиной, достаточной для затухания ПАВ, т.е. на уровне нескольких длин волн (5λ в настоящей работе). Кроме того, имеет смысл дискретизировать расчетную область с более высокой плотностью вблизи поверхности ВШП, сгустив её в области электродов. В направлении распространения ПАВ плотность сетки следует поддерживать постоянной.

Для анализа распространения акустических волн в пьезоэлектрической подложке необходимо в пределах расчетной области решить связанную задачу электроупругости с соответствующими граничными условиями: на границах Γ_L и Γ_R задаются периодические граничные условия, на границах Γ_B и Γ_T принимаются условия отсутствия акустического и электрического полей, а на Γ^+ и Γ^- указываются электрические условия, определяющие значения электриче-

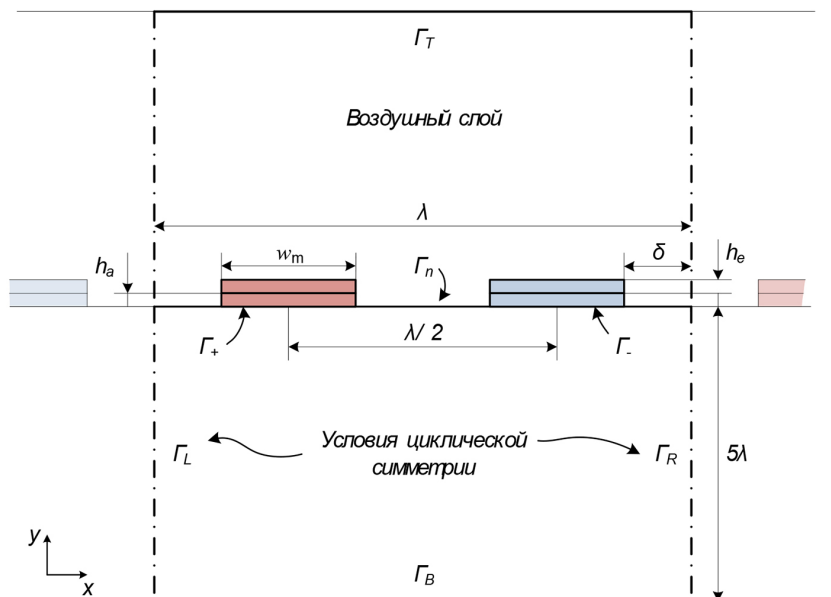


Рис. 1. Геометрия расчетной области ($\Gamma_B, \Gamma_T, \Gamma_n, \Gamma_L, \Gamma_R$ – границы областей; λ – длина волны ПАВ; w_m, h_a, h_e, δ – геометрические параметры электродов)

Fig. 1. Geometry of the computational domain ($\Gamma_B, \Gamma_T, \Gamma_n, \Gamma_L, \Gamma_R$ are the boundaries of the regions; λ is the SAW wavelength; w_m, h_a, h_e, δ are the geometrical parameters of the electrodes)

ских потенциалов, приложенных к электродам. Надо иметь в виду, что в силу рассмотренных выше приближений граничные условия ограничивают результаты расчетов волнами с длиной волны, вдвое превышающей период p . Следовательно, результаты будут корректны только в небольшой полосе частот вокруг резонанса.

На основании исследований сходимости результатов численного моделирования конечно-элементная модель дискретизирована 1183 конечными элементами. Полученное в результате в параметрическом виде конечно-элементное описание позволяет варьировать геометрические размеры модели, физические свойства материалов и рассчитывать структуры ВШП с различной толщиной металлизации и коэффициентом металлизации. Материальные константы используемых в расчетах материалов: значения упругих и пьезоэлектрических модулей, диэлектрических проницаемостей взяты из [13] и пересчитаны в системы координат соответствующих срезов через углы Эйлера.

2. Анализ полей при возбуждении ПАВ

Для идентификации типов возбуждаемых в устройстве волн и определения собственных частот структуры с разработанной конечно-элементной моделью выполнялся модальный анализ. Результатом модального анализа является совокупность собственных частот структуры, каждой из которых соответствует свое распределение объемных и поверхностных волн. Режимы акустических волн (объемные/поверхностные) нельзя определить непосредственно из полученного в результате расчетов списка собственных частот, но можно идентифицировать по собственным формам колебаний, представляющим собой относительные амплитуды перемещений в узлах конечно-элементной сетки и отображаемым с помощью постпроцессора COMSOL.

В качестве примера на рис. 2 приведены формы колебаний ПАВ-структуры на основе YZ LiNbO₃ (длина рабочей волны $\lambda \approx 4$ мкм, толщина Al-электродов – 0,1 мкм, толщина подслоя – 10 нм, электроды короткозамкнуты). Анализ волновой картины ПАВ демонстрирует отчетливое различие форм колебаний: одна из мод имеет нулевую компоненту смещения в направлении X (соответствует частоте f_{sc-}) на обеих границах, а другая мода – нулевую компоненту смещения в направлении Y (соответствует частоте f_{sc+}). Эти моды также называются симметричными и антисимметричными модами ПАВ.

Далее, имея целью оценить влияние эффектов, связанных с параметрами металлизации, была выполнена серия расчетов фазовой скорости для различных толщин электродов и различной степени металлизации k_m . Толщина электродов изменялась в пределах $h_e = 0 \div 0,3\lambda$.

Расчеты проводились по следующей схеме. Задавались граничные условия, соответствующие исследуемой конфигурации электродной структуры. Выполнялся модальный анализ. Из пары полученных в результате модального анализа собственных частот f_{sc+} и f_{sc-} определялась эффективная фазовая скорость ПАВ под электродной структурой по формуле:

$$v = (f_{sc+} + f_{sc-})p.$$

Затем по двум собственным частотам f_{sc+} и f_{sc-} рассчитывался коэффициент отражения k_p , характеризующий отражение акустических волн от периодических неоднородностей, создаваемых электродами ВШП [4]:

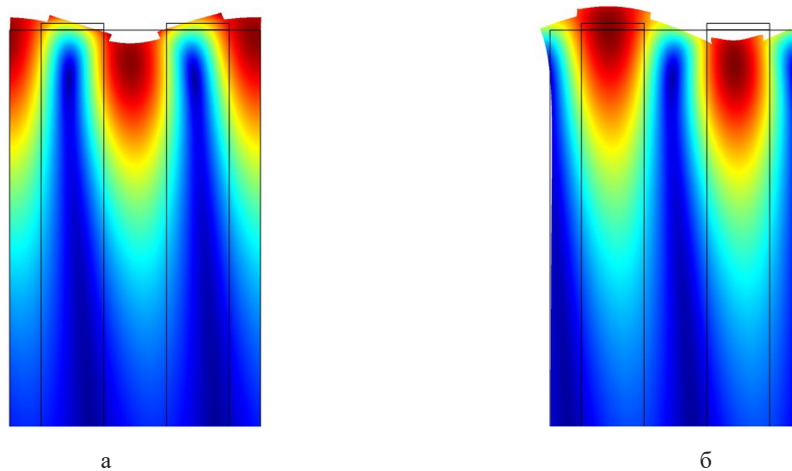


Рис. 2. Формы колебаний ПАВ-структуры на основе YZ LiNbO₃. Мода f_{sc-} (симметричная) соответствует более низкой частоте, мода f_{sc+} (антисимметричная) – более высокой. Для наглядности показана только приповерхностная область структуры, без воздушного слоя

Fig. 2. Vibration modes of the YZ LiNbO₃ based SAW structure. The f_{sc-} (symmetric) mode corresponds to a lower frequency, the f_{sc+} (antisymmetric) mode corresponds to a higher one. For clarity, only the near-surface region of the structure is shown, without the air layer

$$k_p = \pi \frac{f_{sc+} - f_{sc-}}{f_{sc+} + f_{sc-}}.$$

Далее расчеты повторялись для следующего значения параметра h_c или k_m .

3. Обсуждение полученных результатов

Рассмотрим результаты вычисления скоростей ПАВ, полученные при моделировании структур с различной металлизацией (без учета подслоя) на подложках из ниобата лития YZ-среза. На рис. 3 показана скорость ПАВ в зависимости от приведенной толщины электродов h_c/λ (в диапазоне $0 \div 0,3 \cdot \lambda$). Расчеты выполнены для коэффициента металлизации k_m , равного 0,5. Видно, что при $h_c/\lambda = 0$ фазовая скорость ПАВ приближается к скорости рэлеевской волны на свободной поверхности подложки v_0 . Увеличение массы электродов поверх подложки замедляет скорость распространения ПАВ. Как видно, эффект нагрузки от различных металлических материалов обратно пропорционален их плотности. Существенное отличие фазовой скорости в структуре с электродами конечной толщины ($h_c/\lambda \neq 0$) от таковой при допущении бесконечно тонких электродов ($h_c/\lambda = 0$) следует принимать во внимание при проектировании ПАВ-устройств. Так, в представляющем практический интерес диапазоне толщин алюминиевой металлизации $0 \dots 0,1 \cdot \lambda$ ошибка в определении фазовой скорости достигает 6 %, что может приводить к неприемлемым результатам проектирования.

На рис. 4 показана зависимость коэффициента отражения k_p толщины металлизации. Расчеты, выполненные с шагом изменения h_c/λ , равным $0,01 \cdot \lambda$, показали, что для каждой толщины электродов можно подобрать коэффициент металлизации, соответствующий минимальному значению коэффициента отражения, и тем самым реализовать структуру ВШП с малыми внутренними отражениями. Причем для случая металлизации из Au и Cu наблюдается тенденция

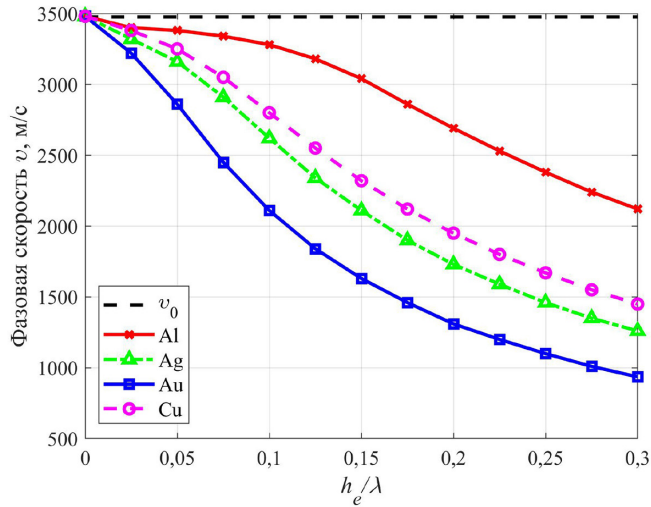


Рис. 3. Скорость ПАВ в подложке LiNbO₃ YZ-среза в зависимости от приведенной толщины металлизации из различных материалов (адгезионный подслои не учитывается)

Fig. 3. SAW velocity in the YZ-cut LiNbO₃ substrate depending on the relative thickness of metallization from different materials (the adhesive sublayer is not taken into account)

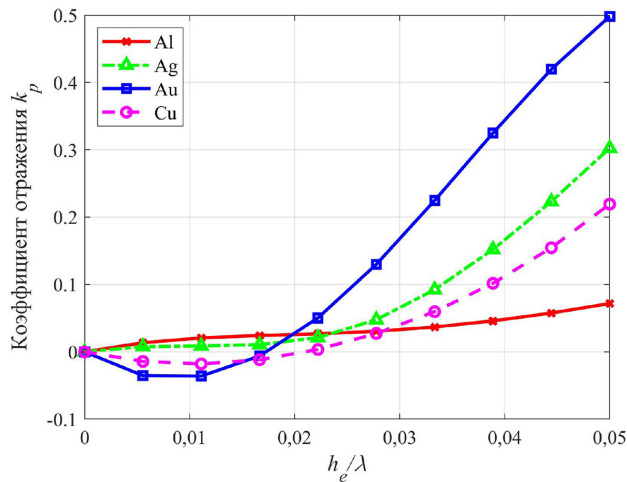


Рис. 4. Влияние относительной толщины металлизации на коэффициент отражения (в режиме короткозамкнутых электродов ВШП) для LiNbO₃ YZ-среза. Коэффициент металлизации k_m равен 0,5, адгезионный подслои не учитывается

Fig. 4. Effect of the relative thickness of metallization on the reflection coefficient (IDT electrodes are short-circuited) for LiNbO₃ YZ-cut. The metallization coefficient k_m is 0,5, the adhesive sublayer is not taken into account

к изменению отрицательной отражательной способности на положительные значения с увеличением k_m . Таким образом, возможно реализовать структуру ВШП с нулевым значением коэффициента отражения.

Для улучшения адгезии пленок металлизации к поверхности звукопровода применяют адгезионный подслои. В случае алюминиевой металлизации в качестве подслоя используют

пленки ванадия толщиной 5–50 нм. Имея целью оценить степень вносимых адгезионным подслоем возмущений, проводились расчеты для толщин подслоя ванадия и хрома h_a от 10 нм до 50 нм и коэффициента металлизации $k_m = 0,5$. На рис. 5 приведены полученные результаты, демонстрирующие заметное влияние адгезионного подслоя на скорость распространения ПАВ. Поэтому при расчетах скорости ПАВ на поверхности звукопровода необходимо учитывать не только толщину слоя основного металла, но и нанометрового адгезионного подслоя.

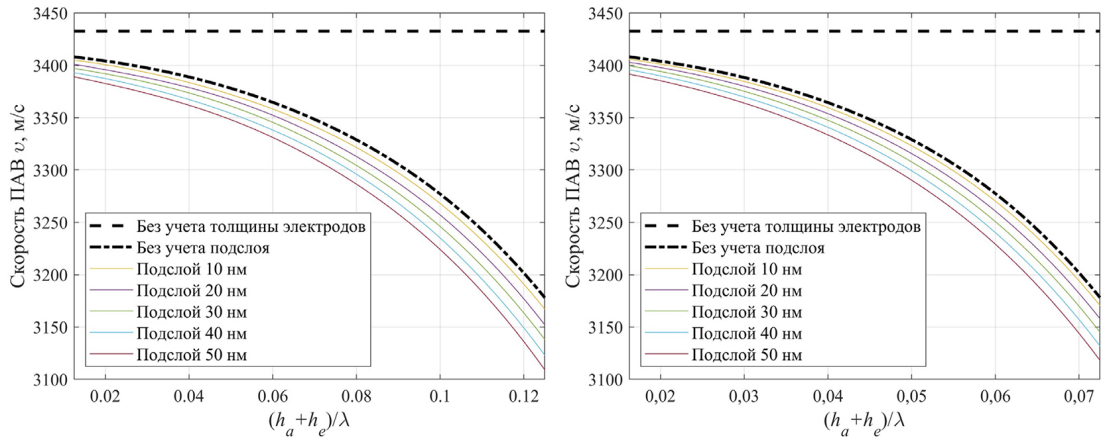


Рис. 5. Скорость ПАВ (в режиме короткозамкнутых электродов ВШП) в подложке LiNbO_3 YZ-среза в зависимости от относительной толщины алюминиевой металлизации ($k_m = 0,5$): *a* – с учетом адгезионного подслоя ванадия, *b* – с учетом адгезионного подслоя хрома

Fig. 5. SAW velocity (IDT electrodes are short-circuited) in the YZ-cut LiNbO_3 substrate depending on the relative thickness of the aluminum metallization ($k_m = 0,5$): *a* – taking into account the vanadium adhesive sublayer, *b* – taking into account the chromium adhesive sublayer

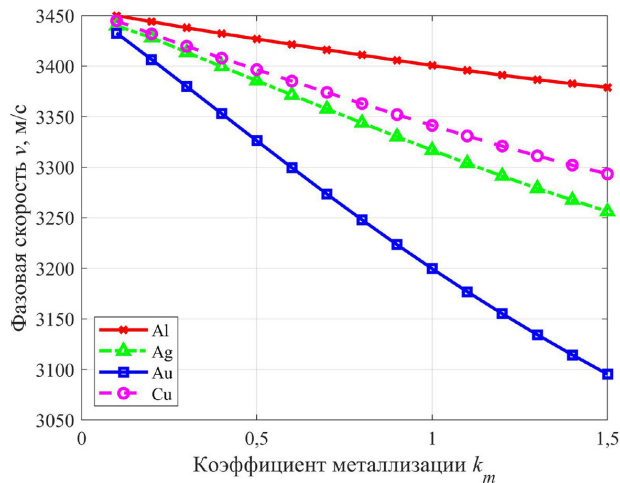


Рис. 6. Скорость ПАВ (в режиме короткозамкнутых электродов ВШП) в подложке LiNbO_3 YZ-среза в зависимости от коэффициента металлизации (толщина металлизации 100 нм)

Fig. 6. SAW velocity (IDT electrodes are short-circuited) in the YZ-cut LiNbO_3 substrate as a function of the metallization coefficient (the metallization thickness is 100 nm)

На рис. 6 приведены расчетные данные по чувствительности скорости акустической волны в подложках различных материалов к величине коэффициента металлизации в диапазоне изменения $0,1 \div 1,5$ (толщина алюминиевой металлизации $0,1$ мкм). Расчеты показали тенденцию к снижению фазовой скорости с увеличением k_m по сравнению со скоростью ПАВ на свободной поверхности из-за влияния нагружающей массы.

Заключение

Результаты проведенного исследования зависимостей коэффициента отражения и эффективной скорости волны могут служить для оценки применимости различных материалов при изготовлении акустоэлектронных компонентов на ПАВ и учета влияния различных факторов на их характеристики. В частности, показано, что учет конечной толщины электродов при расчете ПАВ-преобразователя увеличивает точность расчета скорости волны на величину до 6 %, а учет адгезионного подслоя при расчете электродной структуры дополнительно увеличивает точность расчета характеристик фильтра на 0,5...2 %. На основе полученных результатов может быть выработана система рекомендаций по допускам на отклонения конструктивных параметров полосовых фильтров на ниобате лития, тем самым способствуя увеличению процента выхода годных изделий.

Список литературы / References

- [1] Осетров А. В., Нгуен В. Ш. Расчет параметров поверхностных акустических волн в пьезоэлектриках методом конечных элементов, *Вычислительная механика сплошных сред*, 2011, 4(4), 71–80 [Osetrov A. V., Nguyen V. Sh. Calculation of parameters of surface acoustic waves in piezoelectrics by the finite element method, *Computational mechanics of continuous media*, 2011, 4(4), 71–80 (in Rus.)]
- [2] Иванов А. Б., Левицкий А. А., Маринушкин П. С., Масюгин А. Н., Поляков Д. И. Выбор весовых функций при проектировании встречно-штыревых преобразователей устройств на поверхностных акустических волнах, *Современные проблемы радиоэлектроники: сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции*. Красноярск: СФУ, 2022, 313–319. [Ivanov A. B., Levitsky A. A., Marinushkin P. S., Masyugin A. N., Polyakov D. I. Selection of weight functions when designing interdigital transducers of devices on surface acoustic waves, *Modern problems of radio electronics: proceedings of the All-Russian scientific and technical conference*. Krasnoyarsk: SFU, 2022, 313–319. (in Rus.)]
- [3] Аристархов Г. М., Гуляев Ю. В., Дмитриев В. Ф. и др. *Фильтрация и спектральный анализ радиосигналов. Алгоритмы. Структуры. Устройства*. М.: Радиотехника, 2020. 504 с. [Aristarkhov G. M., Gulyaev Yu. V., Dmitriev V. F. et al. *Filtering and spectral analysis of radio signals. Algorithms. Structures. Devices*, Moscow: Radiotekhnika, 2020. 504 p. (in Rus.)]
- [4] Койгеров А. С., Балышева О. Л. Быстрый численный расчет параметров поверхностных акустических волн Рэля для модели связанных мод, *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*, 2022, 25(5), 67–79. [Koigerov A. S., Balysheva O. L. Fast numerical calculation of the parameters of Rayleigh surface acoustic waves for the coupled mode model, *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika*, 2022, 25(5), 67–79. (in Rus.)]
- [5] Чиа-Чи Сунг, Чич-Юнг Хуанг. Свойства псевдомод поверхностных акустических волн в кварцевых подложках ST-среза и влияние толщины металлических пленок, *Акустический*

журнал, 2006, 52(3), 401–407. [Chia-Chi Sung, Chich-Yung Huang. Properties of pseudomodes of surface acoustic waves in ST-cut quartz substrates and the influence of the thickness of metal films, *Acoustic Journal*, 2006, 52(3), 401–407. (in Rus.)]

[6] Gong S., Lu R., Yang Y., Gao L. and Hassanien A. E. Microwave Acoustic Devices: Recent Advances and Outlook, *IEEE Journal of Microwaves*, 2021, 1(2), 601–609.

[7] Морган Д. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах. М.: Радио и связь, 1990. 415 с. [Morgan D. *Surface Acoustic Waves Devices of Processing of Signals*. Radio and Communication: Moscow, 1990. 415 p.]

[8] Багдасарян А. С., Гуляев Ю. В., Доберштейн С. А., Синицына Т. В. Техника. ПАВ: ближайшие перспективы, *Техника радиосвязи*, 2017, 3(34), 72–84 [Bagdasaryan A. S., Gulyaev Yu. V., Doberstein S. A., Sinitsyna T. V. Technique. SAW: immediate prospects, *Radio communication technology*, 2017, 3 (34), 72–84 (in Rus.)]

[9] Койгеров А. С., Корляков А. В. Моделирование методом конечных элементов устройств на поверхностных акустических волнах с использованием пакета COMSOL, *Микроэлектроника*, 2022, 51(4), 272–282 [Koigerov A. S., Korlyakov A. V. Finite element modeling of surface acoustic wave devices using the COMSOL package, *Microelectronics*, 2022, 51(4), 272–282. (in Rus.)]

[10] Койгеров А. С. Мультифизическое моделирование двухмодового фильтра на ПАВ, *Техника радиосвязи*, 2022, 2(53), 118–127 [Koigerov A. S. Multiphysics modeling of a two-mode SAW filter, *Radio Communication Engineering*, 2022, 2(53), 118–127. (in Rus.)]

[11] Hao W, Liu J, Liu M, Liang Y, He S. Mass Sensitivity Optimization of a Surface Acoustic Wave Sensor Incorporating a Resonator Configuration. *Sensors*. 2016, 16(4), 562.

[12] On the Finite-Element Analysis of Resonance MEMS Structures based on Acoustic Lamb Waves. *Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials*, 2020, 50(3), 179–187.

[13] Auld B. A. *Acoustic Fields and Waves in Solids*. New-York: Wiley, 1973. Vol. 1.