



ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 1. С. 62–75
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 62–75
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-62-75>, EDN: МРІJKU

Научная статья
УДК 621.37

Приборы на ПАВ на частотных гармониках. Особенности расчета параметров ПАВ методом конечных элементов

А. С. Койгеров

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Россия, 197376, г. Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, д. 5

Койгеров Алексей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники, a.koigerov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6602-0528>, AuthorID: 570937

Аннотация. Работа посвящена вопросам расчета параметров поверхностных акустических волн (ПАВ) основной и кратных частотных гармоник с помощью метода конечных элементов. Рассмотрена методика и основные особенности анализа ПАВ численным методом. В качестве основной модели исследования выбраны простые тестовые ячейки в одну длину волны. Показано, что, используя данные параметры ПАВ в аналитической модифицированной модели связанных мод, можно предварительно рассчитывать амплитудно-частотные характеристики приборов на ПАВ с применением частотных гармоник высших порядков. Проведено сравнение результатов расчета с экспериментальными измерениями коэффициента передачи фильтра и линии задержки на ПАВ.

Ключевые слова: устройства на ПАВ, линия задержки, акустоэлектронные устройства, гармоники ПАВ, модель связанных мод, МКЭ, COMSOL, фильтры на ПАВ

Благодарности: Автор выражает благодарность генеральному директору – генеральному конструктору ООО «АЭК Дизайн» В. Р. Реуту за предоставленные экспериментальные данные.

Для цитирования: Койгеров А. С. Приборы на ПАВ на частотных гармониках. Особенности расчета параметров ПАВ методом конечных элементов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 1. С. 62–75. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-62-75>, EDN: МРІJKU

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

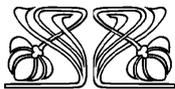
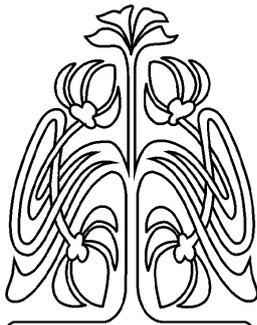
SAW devices on frequency harmonics. Features of calculation of SAW parameters by the finite element method

A. S. Koigerov

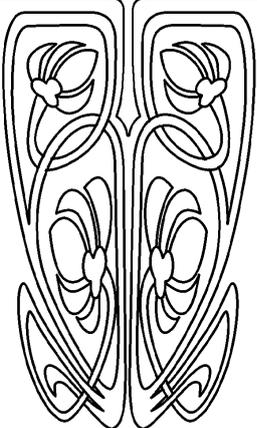
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 5 Professora Popova St., St. Petersburg 197376, Russia

Aleksey S. Koigerov, a.koigerov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6602-0528>, AuthorID: 570937

Abstract. Background and Objectives: Acoustoelectronic devices (filters, delay lines, resonators, etc.) are used in a wide range of applications in various industries. Surface acoustic waves (SAW) filters are key elements of wireless communication systems, such as base stations, satellite communication and mobile systems. The aim of this work was to investigate the issue of designing SAW devices on frequency harmonics, which potentially allows you to work at higher frequencies.



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ





To design devices using a model of coupling of modes (COM), a set of SAW parameters is required. **Materials and Methods:** A technique for extracting SAW parameters of the main and multiple frequency harmonics under the electrodes using the finite element method in COMSOL are presented. The methodology and the main features of the analysis of SAW by the numerical method are considered. Then, based on the extracted parameters, a quartz SAW filter and a lithium niobate SAW delay line were calculated using transducers operating at the 3rd harmonic. The results of calculating the frequency response were compared with the results of the experiment. **Results and Conclusions:** The proposed algorithm allows to extract the SAW parameters of each of the harmonics and take them into account in quick calculations on base COM. The results of numerical analysis of the SAW parameters, a COM model and a matrix approach to formalizing calculations provide the developer with an effective and easily adaptable tool for calculating the frequency responses of SAW devices.

Keywords: surface acoustic waves devices, delay line, acoustoelectronic devices, SAW harmonics, coupling of modes, FEM, COMSOL, SAW filter

Acknowledgements: The author expresses his gratitude to the general director and the general designer "AEC Design" Vladimir R. Reut for the experimental data provided.

For citation: Koigerov A. S. SAW devices on frequency harmonics. Features of calculation of SAW parameters by the finite element method. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2024, vol. 24, iss. 1, pp. 62–75 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-1-62-75>, EDN: МРІJKU

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC0-BY 4.0)

Введение

Акустоэлектронные приборы (фильтры, линии задержки (ЛЗ), резонаторы и др.) используются в широком спектре приложений в различных отраслях промышленности. Так, фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ) [1] и объемных акустических волнах (ОАВ) [2] являются ключевыми элементами систем беспроводной связи, таких как базовые станции, системы спутниковой и мобильной связи. ПАВ-радиометки и ПАВ-датчики [3–5] используются в системах промышленной автоматизации для таких задач, как мониторинг, управление и измерение технологических процессов. Кроме того, датчики на ПАВ используются в автомобильной электронике для таких приложений, как системы контроля давления в шинах, системы управления двигателем и системы обнаружения столкновений [6]. Резонаторы на ПАВ используются в качестве частотоопределяющих элементов в генераторах [7].

Область приборов на ПАВ продолжает развиваться благодаря постоянным исследованиям и разработкам. Некоторые из ключевых направлений развития устройств на ПАВ включают:

- миниатюризацию и интеграцию с другими технологиями,
- работу на более высоких частотах,
- исследование новых материалов и конструкций устройств.

Приборы, использующие ПАВ, традиционно применяются в частотном диапазоне от десятков мегагерц до 2.5–3 ГГц. Однако возрастает интерес к разработке приборов на ПАВ для работы на еще более высоких частотах, что подталкивает к изучению последних достижений в области материалов, технологий изготовления и конструкций таких устройств.

Известно, что встречно-штыревой преобразователь (ВШП) может генерировать гармонические частоты, кратные основной частоте устройства на ПАВ.

Проектирование устройств на ПАВ представляет собой сложную техническую задачу, поскольку существуют сложные акустические взаимосвязи между топологическими элементами (ВШП и отражательными структурами), резонансные особенности акустических процессов, чувствительность электрических характеристик от геометрии топологических элементов. Все эти аспекты также зависят от параметров акустических волн и свойств пьезоэлектрического материала. Единых подходов и программ для расчета приборов на ПАВ не существует; каждый разработчик использует разные подходы к моделированию и использует собственное программное обеспечение.

Наиболее часто встречаются два подхода:

- на основе быстрых аналитических моделей, например метод эквивалентных схем [8], и модель связанных мод (МСМ, англ. coupling-of-modes (COM)) [9, 10],
- на основе численных расчетов [11–13].

Единственным более-менее унифицированным подходом можно назвать численный подход, основанный на методе конечных элементов (МКЭ).

Цель работы – показать возможность проектирования приборов на ПАВ, работающих с использованием высших частотных гармоник, и особенности анализа гармоник ПАВ на основе МКЭ в среде COMSOL Multiphysics (далее COMSOL).

1. Частотные гармоника ПАВ

На генерацию гармоник в устройствах на ПАВ могут влиять различные факторы, такие как топологические особенности конструкции.



Эти особенности включают в себя коэффициент металлизации (отношение ширины электрода a к шагу электродов ВШП p , обозначаемое как $C_m = a/p$), толщину металлизации (h), форму электрода и тип преобразователя. Исследование методов оптимизации генерации гармоник в устройствах на ПАВ, включая проектирование конкретных структур преобразователя, выбор материалов и методов контроля параметров гармоник является довольно сложной, но актуальной на сегодняшний день задачей. Некоторые исследования по данной теме представлены в работах [14–20]. Гармоники волны Рэлея рассматриваются в работе [14], гармоники вытекающих ПАВ представлены в [15]. Экспериментальные и теоретические исследования гармонического режима для различных классов устройств на ПАВ представлены в [16–20], например двухпортовые резонаторы [16], фильтры [17], метки [18], датчики [19], устройства с температурной компенсацией ПАВ [20].

Подход проектирования устройств с использованием высших гармоник позволяет изготавливать устройства на ПАВ, работающие на частотах выше 2.5 ГГц, без применения методов субмикронной литографии. На рис. 1 представлен пример расчета проводимости ВШП в COMSOL с помощью решателя (Study – Frequency Domain). Преобразователь состоит из $N = 6$ (пар расщепленных электродов). Как видно, помимо отклика на основной частоте в окрестности 1.5 ГГц, присутствует отклик в районе частоты 4.5 ГГц (работа на 3-й гармонике).

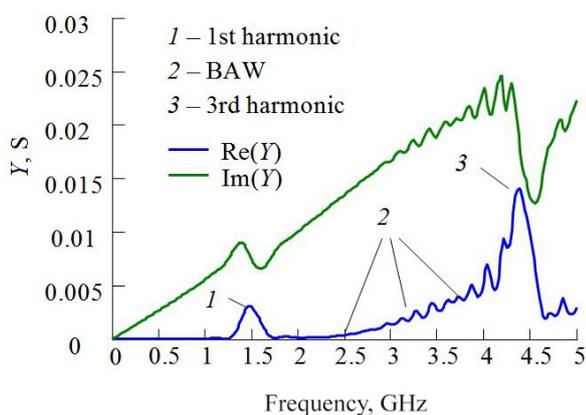


Рис. 1. Проводимость ВШП с расщепленными электродами (число пар $N = 6$, электродов – 24) на материале $128^\circ\text{Y-X LiNbO}_3$ (цвет онлайн)

Fig. 1. IDT admittance with split electrodes (number of periods $N = 6$, electrodes – 24) on material $128^\circ\text{Y-X LiNbO}_3$ (color online)

Стоит отметить ряд недостатков, присущих гармоникам:

- 1) высокие вносимые потери с увеличением частоты,
- 2) наличие спектра объемных акустических волн, возбуждаемых в том же диапазоне частот,
- 3) наличие нежелательных гармоник, которые могут возбуждаться одновременно.

Как правило, разработчики и пользователи хотели бы, чтобы устройства на ПАВ работали на одной выбранной гармонике, подавляя нежелательные другие гармоники.

На сегодняшний день наиболее популярными программами для численного моделирования акустоэлектронных устройств на ПАВ и ОАВ являются COMSOL и ANSYS [21, 22].

2. Модель ячейки в COMSOL

Метод конечных элементов – хороший инструмент для анализа свойств и расчета характеристик различных устройств и материалов. Применение МКЭ позволяет получать сведения о физических процессах в твердых телах, минуя необходимость изготовления физического прототипа. Для формирования модели возможно использование различных пакетов мультифизического моделирования, таких как, например, COMSOL.

COMSOL позволяет моделировать как конечные структуры, в виде отдельных ВШП, так и устройства в целом (например, в составе двух, трех преобразователей и групп отражательных решеток). При проведении моделирования возможно непосредственное определение частотных зависимостей проводимостей (Y_{11} , Y_{12} , Y_{21} , Y_{22}), на основе которых можно вычислить S -параметры. Тем не менее, учет большого числа параметров при трехмерном моделировании реальных полноапертурных устройств сопровождается значительным увеличением требований к вычислительным ресурсам и продолжительности времени анализа. Расчет устройств таким способом на основе численного анализа может занимать до 10–20 часов на одну итерацию. Одним из самых быстрых и эффективных методов расчета устройств на ПАВ является МСМ. Наиболее быстро и эффективно можно считать устройства на ПАВ с помощью МСМ. Расчет одной итерации занимает секунды, поскольку основан на матричных вычислениях. Особенностью данного подхода на основе МСМ является необходимость предварительного анализа параметров.



Эти параметры можно получить, например, с использованием численных методов, при анализе простых ячеек и конструкций, что не требует значительных временных и ресурсных затрат. Важно отметить, что точность расчетов при использовании МКЭ и МСМ будет сопоставима при применении адекватных параметров, которые точно описывают волновые процессы и соответствуют физико-математической модели. Однократный расчет параметров ПАВ на базе простых ячеек позволяет сформировать «библиотеку» материалов, к которой можно в будущем обращаться при моделировании широкого круга устройств (резонаторы, ЛЗ, фильтры).

Для разработки приборов на ПАВ требуется учесть следующие основные параметры [21]:

- скорость распространения волны на свободной поверхности;
- скорость распространения волны под металлизированной поверхностью;
- скорость волны под элементами преобразователя и отражательных решеток;
- коэффициент отражения волны от одиночного электрода;
- коэффициент прохождения волны через одиночный электрод;
- коэффициент, определяющий эффективность акустоэлектронного преобразования или коэффициент электромеханической связи (КЭМС);
- добротность ячейки, характеризующая потери за счет утечки волны в объем подложки;
- затухание ПАВ в подложке (потери на распространение, резистивные потери);
- статическая емкость электрода.

Отметим, что при определении указанных параметров необходимо учитывать значительное количество степеней свободы, связанных с топологическими, конструктивными и технологическими особенностями устройств. Среди таких факторов следует выделить [21]:

- геометрию элементарной ячейки преобразователя;
- профиль металлического электрода;
- вид металлической электродной ОС (закороченная или электрически разомкнутая);
- коэффициент металлизации электрода;
- толщину металлизации электрода [21].

В настоящей работе представлен анализ периодических электродных структур на пьезоэлектрических подложках, основным типом волны в которых является волна Рэлея на основной и 3-й гармониках. В качестве ВШП рассматривается преобразователь с расщепленными электродами. Численные расчеты можно проводить в различных областях, подключая решатели: область собственных частот, частотную область и стационарный режим. В результате численного расчета, например, в области собственных частот, будет получен набор акустических мод или собственных частот, по которым можно перейти к ряду необходимых параметров ПАВ по известной методике [21].

Одной из основных особенностей и проблем, связанных с использованием МКЭ, является значительное потребление ресурсов компьютера и времени, что представляет вызов для разработчика. На рис. 2 представлен подход, направленный на уменьшение и упрощение рассматриваемой задачи.

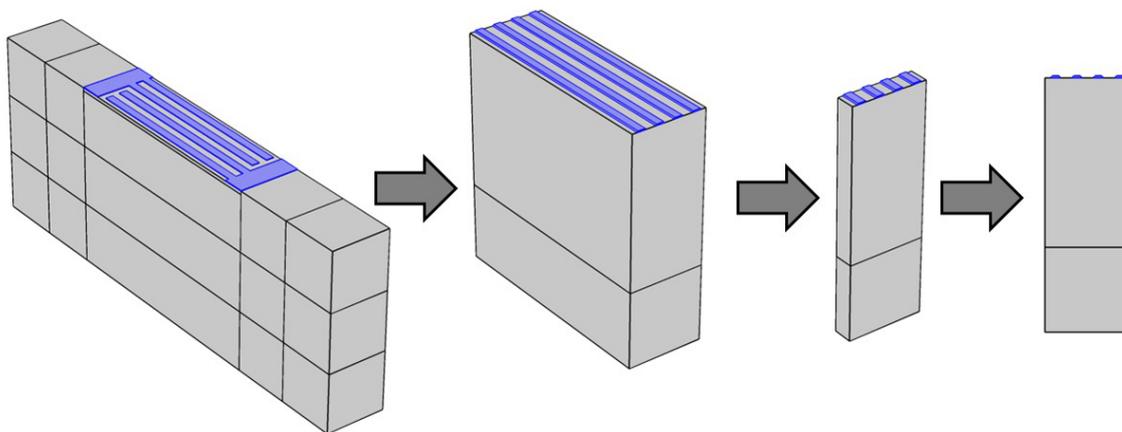


Рис. 2. Принцип перехода от 3D к 2D геометрии при анализе преобразователя с расщепленными электродами
 Fig. 2. Principle of transition from 3D to 2D geometry for analyzing a transducer with split electrodes



На рис. 3 представлен пример анализируемых тестовых структур, осуществленный при помощи программного пакета COMSOL. Речь идет о периодических электродных структурах с заданными параметрами: периодом $p = \lambda/4$ и шириной электродов $a = \lambda/8$. Размер ячейки установлен в пределах одной длины волны ($\lambda = 2$ мкм). Глубина анализируемой поверхности равна 4 длинам волн. Граничные условия сконфигурированы таким образом, что данная структура рассматривается как бесконечная периодическая решетка металлических электродов. В нижней части подложки размещен идеально согласованный слой, который поглощает исходящие волны с целью ограничения области численного моделирования. Материал электродов – алюминий. Учитывая, что поверхностная волна распространяется на глубину, приблизительно равную одной длине волны, при построении сетки область у поверхности должна содержать более плотную сетку, например 20 элементов на длину волны. Для остальной части структуры рекомендуется

использовать менее плотную сетку – 10 элементов на длину волны (см. рис. 3).

3. Анализ параметров ПАВ

Принцип анализа параметров ПАВ под системой электродов с использованием МКЭ может быть проиллюстрирован с помощью блок-схемы, изображенной на рис. 4. Этот подход включает в себя использование трех решателей в программном пакете COMSOL:

- расчет в области собственных частот (Study – Eigenfrequency),
- расчет в частотной области (Study – Frequency Domain),
- статический анализ (Study – Stationary).

Отдельно поясним смысл собственных мод ПАВ [21]. Расчет собственных частот представляет собой один из подходов по анализу различных акустических мод, которые могут возбуждаться в изучаемой тестовой ячейке. Понятие «собственные частоты» может быть пояснен через аналогию с колебательной системой. Если создать условия, при которых ячейка получит энергию

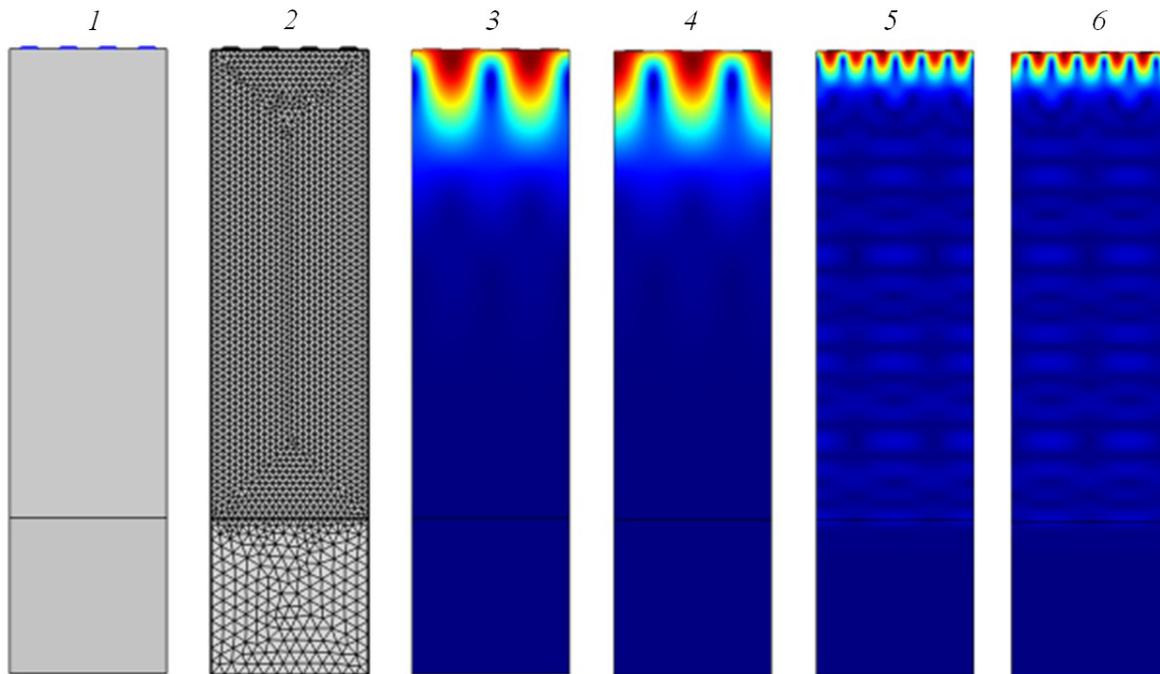


Рис. 3. Иллюстрация тестовой ячейки для проведения анализа параметров акустических волн под металлическими электродами в кристалле 128°Y-X LiNbO₃: 1 – геометрия, 2 – сетка, 3, 4 – результаты численного анализа основной гармоники первой собственной частоты (3) и второй собственной частоты (4) соответственно; 5, 6 – результаты численного анализа 3-й гармоники первой собственной частоты (5) и второй собственной частоты (6) соответственно (цвет онлайн)

Fig. 3. Illustration of a test cell for analyzing the parameters of acoustic waves under metal electrodes in a 128°Y-X LiNbO₃ crystal: 1 – geometry, 2 – mesh, 3, 4 – results of numerical analysis of the main harmonic of the first eigenfrequency (3) and the second eigenfrequency (4), 5, 6 – results of numerical analysis of the 3rd harmonic of the first eigenfrequency (5) and the second eigenfrequency (6) (color inline)

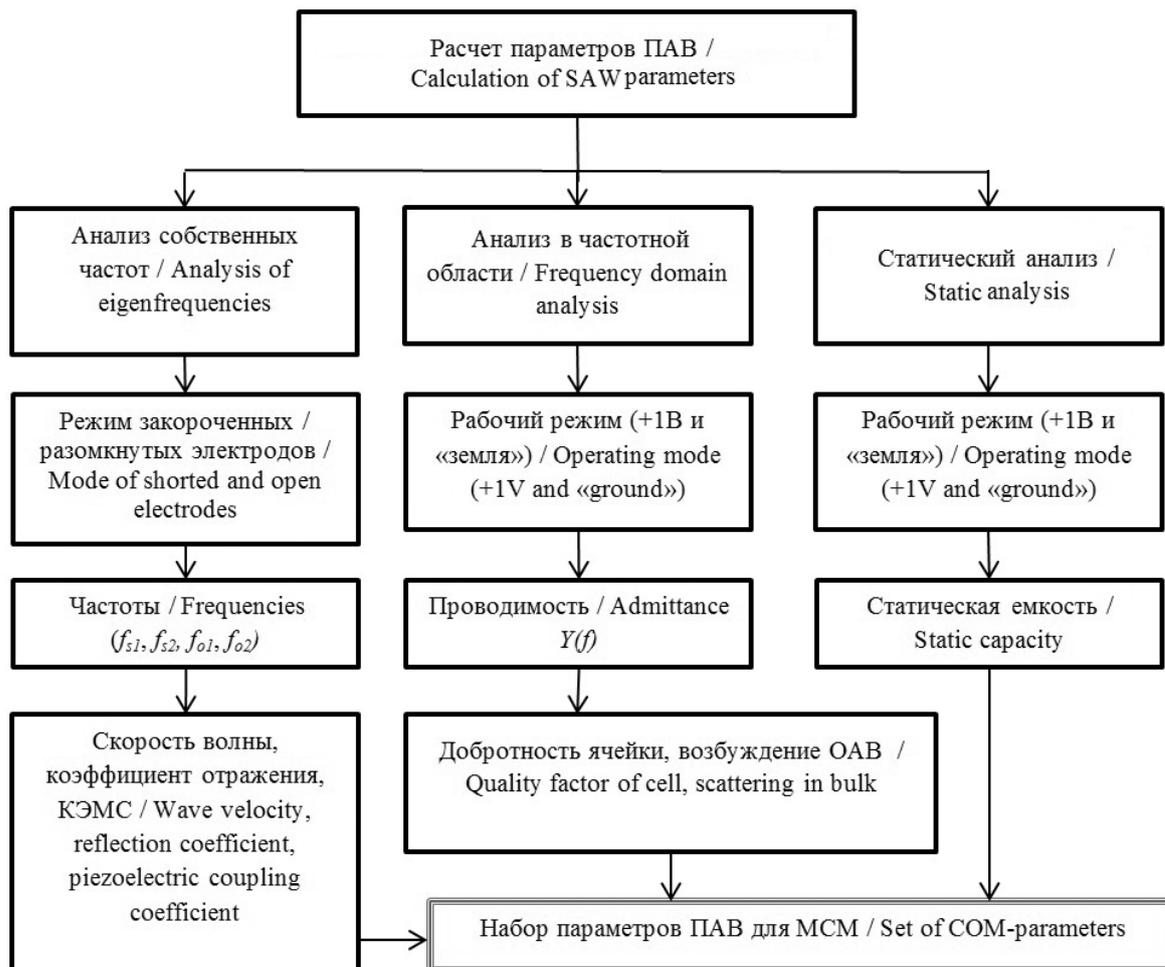


Рис. 4. Методика расчета и анализа параметров ПАВ основной и кратных частотных гармоник под системой электродов с помощью COMSOL

Fig. 4. A technique for extracting and analyzing the SAW parameters of the main and multiple frequency harmonics under the electrodes using COMSOL

благодаря пьезоэлектрическому эффекту, с последующим отсутствием внешних воздействий на колебательную систему, то в отсутствие потерь в ней возникнут незатухающие собственные (или свободные) колебания на частотах, называемых собственными. Каждая возбуждаемая акустическая мода (поверхностные акустические волны, псевдоповерхностные акустические волны, объемные акустические волны и их гармоники) на собственных частотах характеризуется собственными формами колебания [21].

При анализе ячейки бесконечной периодической системы неоднородностей (металлических электродов) можно выделить пару собственных частот для рассматриваемой акустической моды. В данном случае полоса брэгговского отражения волн размещается именно между этими частотами. Если рассматривать однородную ячейку

без условий для отражения (с полностью свободной или металлизированной поверхностью), то собственная частота для рассматриваемой акустической моды будет единственной, так как отсутствует условие Брэгга, т. е. условие синхронного отражения волны от системы периодических неоднородностей [21].

Поэтому для расчета полного набора MCM-параметров необходимо проанализировать как минимум три тестовых ячейки: свободная поверхность, полностью металлизированная поверхность и поверхность с электродами.

Пример отображения пары собственных частот для основной и 3-й гармоники представлен на рис. 3. Подробно методика расчета на примере основной гармоники рассмотрена в статье [21], существенным дополнением, представленным в данной работе, является анализ про-



димости в заданном частотном диапазоне, что позволяет оценить рассеяние волны в объем подложки.

Для поверхности без системы электродов, будь то свободная или металлизированная, имеется единственная собственная частота, которая позволяет вычислить фазовую скорость ПАВ. Скорость ПАВ на свободной поверхности (V) и на металлизированной поверхности (V_m) определяется следующими формулами [21]:

$$V_0 = f_0 \cdot \lambda, \quad (1)$$

$$V_m = f_m \cdot \lambda, \quad (2)$$

где f_0, f_m представляют собой собственные частоты для свободной и металлизированной поверхности соответственно.

Исходя из известных скоростей для свободной (V) и металлизированной (V_m) поверхности (при $h/\lambda \rightarrow 0$), можно определить КЭМС следующим образом [21]:

$$K^2 = 2 \frac{V_0 - V_m}{V_0}. \quad (3)$$

Определив набор собственных частот (f_1 и f_2) для электродных структур можно произвести расчет таких параметров ПАВ, как скорость

распространения и коэффициент отражения [21]:

$$V = \frac{f_1 + f_2}{2} \cdot \lambda, \quad (4)$$

$$r = \pi \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1}. \quad (5)$$

Рассеяние волны или утечку волны в объем можно выразить через добротность ячейки. Один из методов анализа утечки волны заключается в исследовании резонансного пика характеристики проводимости (расчет в разделе Study – Frequency Domain). Добротность определяется следующим образом:

$$Q = \frac{f_r}{\Delta f_{-3dB}}, \quad (6)$$

где f_r – частота резонанса, Δf_{-3dB} – ширина полосы характеристики проводимости на уровне –3 дБ.

Некоторые результаты анализа параметров ПАВ представлены на рис. 5 и рис. 6. Так, на рис. 5, а представлены зависимости скоростей волны Рэлея под электродами для подложки $128^\circ\text{Y-X LiNbO}_3$ для ВШП с расщепленными электродами. Скорость основной гармоники (для ВШП с электродами $\lambda/8$) имеет практически линейную зависимость как от коэффициента металлизации (C_m), так и толщины электрода (h).

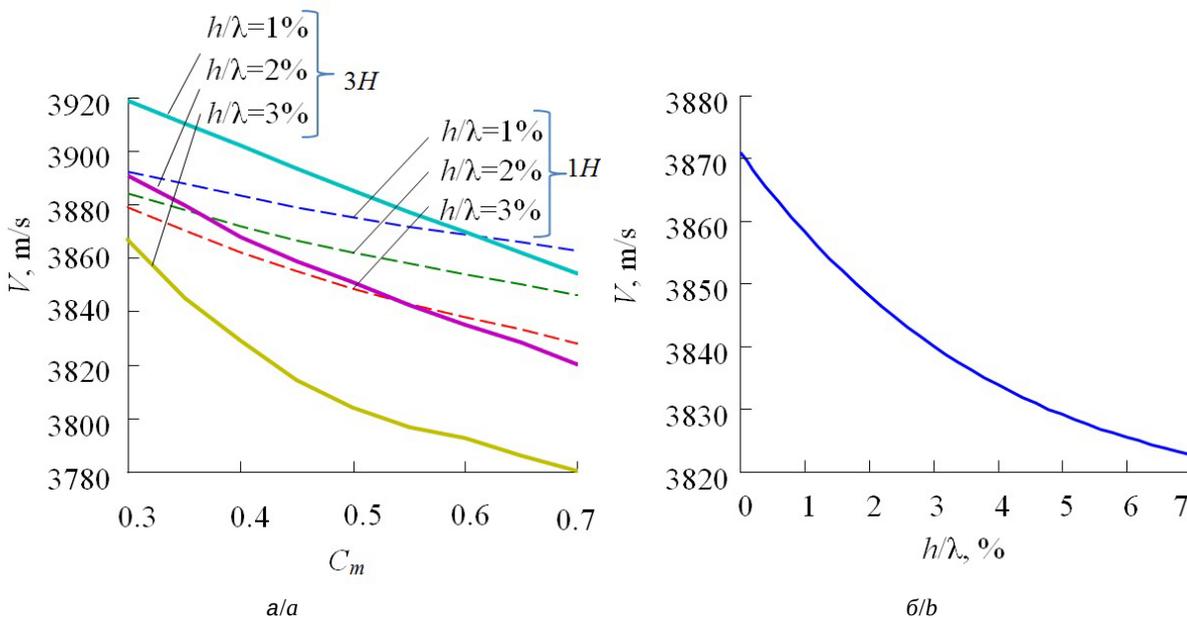


Рис. 5. Результаты расчета скоростей ПАВ через собственные частоты: а – зависимость скорости волны под электродами преобразователя с расщепленными электродами от относительной толщины металлизации и коэффициента металлизации для 1-й гармоники (1H) и 3-й гармоники (3H), б – зависимость скорости ПАВ под полностью металлизированной поверхностью (цвет онлайн)

Fig. 5. Result of calculation of SAW velocities via eigenfrequencies: а – dependence of SAW velocity under the IDT with split electrodes on the relative thickness metallization and the metallization coefficient for the 1st harmonic (1H) and the 3rd harmonic (3H), б – dependence of SAW velocity under metallization surface (color online)

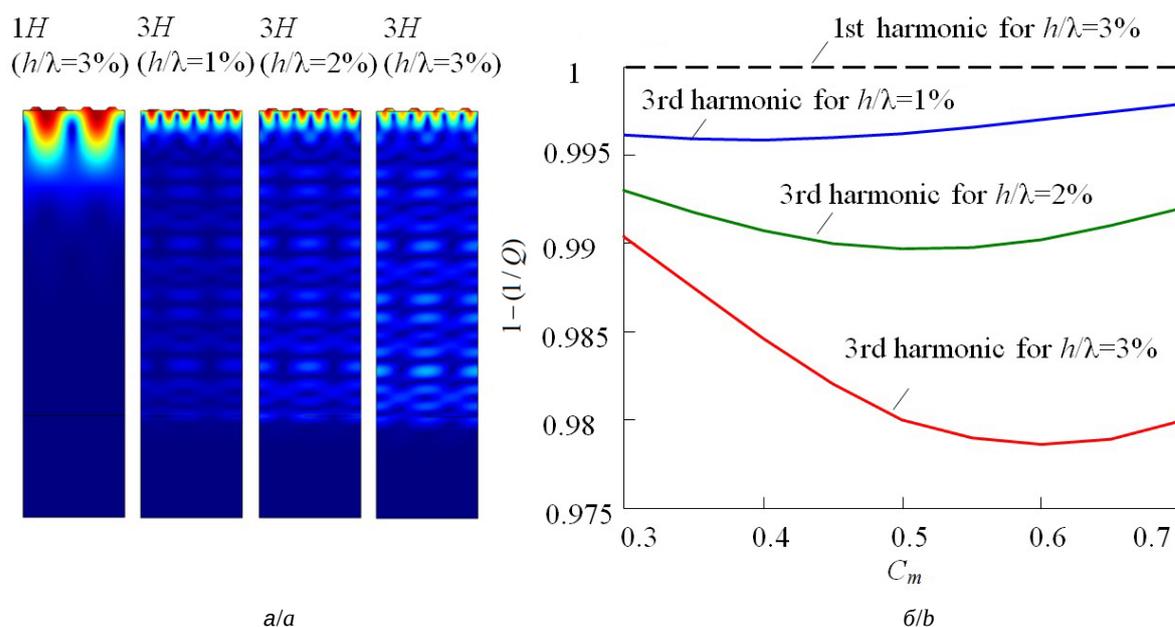


Рис. 6. Результаты анализа рассеяния волны основной (1H) и 3-й (3H) гармоник в объем подложки: а – формы механического смещения для различных относительных толщин металлизации ВШП для одной из собственных частот, б – коэффициент потерь, выраженный через добротность ячейки (цвет онлайн)

Fig. 6. Results of the analysis of wave scattering of the main (1H) and 3rd (3H) harmonics into the volume of the substrate: а – forms of mechanical displacement for various relative thickness metallization of IDT for one of the eigenfrequencies, б – loss factor expressed in terms of the quality factor of a cell (color inline)

В то время как для волны на 3-й гармонике (ВШП с электродами $3\lambda/8$) с ростом h/λ проявляется небольшая нелинейность. С ростом «массовой нагрузки» от металла волна замедляется, и наблюдаем уменьшение скорости ПАВ. На рис. 5, б представлена зависимость скорости ПАВ под полностью металлизированной поверхностью от толщины металлизации. Расчетная скорость на свободной поверхности составила 3981 м/с, в то время как в [23] – 3979 м/с. Расчетная скорость под металлом (при $h/\lambda \rightarrow 0$) составляет 3871 м/с, в [23] – 3871.6 м/с. Как видно, различие в определении скорости при условии свободной поверхности и металлизированной поверхности не превышает 0.05%. Соответственно расчетный КЭМС составляет 5.54%, а из [23] – 5.4%.

Рассеяние или утечку волны в объем можно выразить через добротность ячейки. На рис. 6, а представлены формы колебаний основной и 3-й гармоник для $C_m = 0.5$ соответствующих толщин металлизации на подложке $128^\circ\text{Y-X LiNbO}_3$. Четко видно, что для волны Рэлея и её основной гармоники отсутствует какая-либо дополнительная утечка в подложку, в то время как для волны на 3-й гармонике можно наблюдать

паразитное рассеивание в объем подложки с ростом толщины металлизации. Расчет в COMSOL в частотной области и пересчет добротности ячейки по формуле (6) подтвердил это. Результаты расчета зависимости величины рассеивания от толщины металлизации и коэффициента металлизации можно наблюдать на рис. 6, б.

Результаты статического анализа показывают, что для ВШП с расщепленными электродами (ширина электрода – $\lambda/8$) статическая емкость на подложке $128^\circ\text{Y-X LiNbO}_3$ составляет $C_1 = 696.1$ пФ/м, в то время как для преобразователя с электродами $\lambda/4$ емкость пары $C_0 = 492.2$ пФ/м. Отношение $C_1/C_0 = 1.41$ [21], что полностью соответствует известным теоретическим и экспериментальным данным [23]. Сопоставление с литературными источниками позволяет заключить о эффективности данного метода анализа.

Численный расчет позволяет оценить параметры ПАВ в довольно широком диапазоне относительных значений толщин металлизации (например, $h/\lambda = 0.1\% - 7\%$) и коэффициентов металлизации (например, $C_m = 0.3 - 0.7$) без существенных временных затрат, поскольку расчет пары собственных частот занимает секунды.



4. Результаты эксперимента

На основе вычисленных параметров ПАВ были созданы модели трансверсальных устройств на ПАВ с использованием подложек $128^\circ\text{Y-X LiNbO}_3$ и 36°Y-X SiO_2 . Каждое из устройств включало в себя входной и выходной ВШП. Входной преобразователь в приборе на кварцевой подложке использует метод взвешивания путем удаления электродов, электроды – расщепленные (работа на 3-й гармонике). Выходной ВШП имеет амплитудную аподизацию (работа на 1-й гармонике). Входной и выходной ВШП в ЛЗ на ниобате лития – неаподизованные. Приборы изготавлива-

лись при относительных толщинах металлизации $h/\lambda = 1\%$.

На рис. 7 представлены результаты расчета и измерений амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), демонстрирующие отличное соответствие между расчетом и экспериментом. Для кварцевого фильтра (рис. 7, а) зарегистрированы потери в размере 25.3 дБ, относительная полоса пропускания на уровне -3 дБ составила 0.3%, неравномерность в полосе пропускания составила 0.1 дБ, а подавление в полосе заграждения достигло -60 дБ. ЛЗ включала в себя два преобразователя: входной двунаправленный с шестью парами электродов шириной $\lambda/4$, ра-

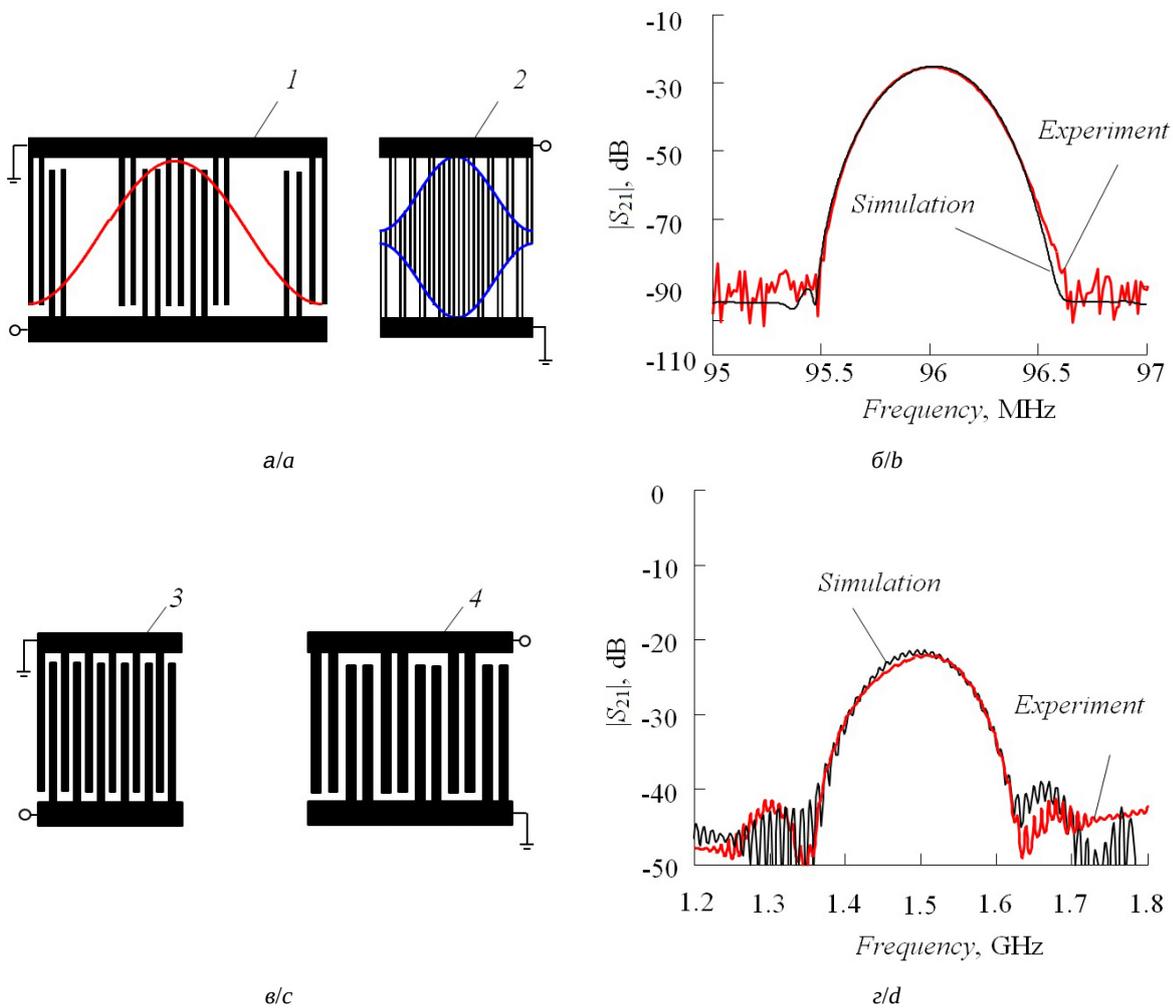


Рис. 7. Результаты расчета и эксперимента: а – топология трансверсального фильтра на ПАВ на подложке 36°Y-X SiO_2 : 1 – входной ВШП со взвешиванием с селективным удалением электродов, 2 – выходной ВШП – аподизованный (взвешивание изменением перекрытия соседних электродов); б – АЧХ трансверсального фильтра; в – топология ЛЗ на ПАВ на подложке $128^\circ\text{Y-X LiNbO}_3$: 3 – входной ВШП с электродами $\lambda/4$, 4 – выходной ВШП с электродами $3\lambda/8$, г – АЧХ ЛЗ
Fig. 7. Results of simulation and experiment: а – transversal SAW filter topology on substrate 36°Y-X SiO_2 : 1 – input IDT using withdrawal weighting, 2 – output IDT using Overlap Weighting; б – frequency response of a transversal filter; в – SAW delay line topology on substrate $128^\circ\text{Y-X LiNbO}_3$: 3 – IDT with $\lambda/4$ electrodes, 4 – IDT with split electrodes (electrode width $3\lambda/8$), д – frequency response of SAW delay line



ботающий на основной гармонике, и выходной с четырьмя парами расщепленных электродов шириной $3\lambda/8$, работающий на 3-й гармонике. Вносимое затухание ЛЗ на ниобате лития (рис. 7, б) составило 19.3 дБ, относительная ширина полосы пропускания на уровне -3 дБ – 14.6%, неравномерность АЧХ составила 0.4 дБ, а подавление в полосе заграждения составило 40 дБ.

Незначительные отклонения между расчетом и экспериментом в области полосы заграждения могут быть ассоциированы с присутствием паразитных индуктивностей и емкостей соединительных проводников, контактных площадок и влиянием корпуса. Определенное влияние оказывает такой «вторичный» эффект, как дифракция.

5. Обсуждение результатов

Одним из широко признанных методов теоретического моделирования устройств, использующих ПАВ, является применение МСМ. Для эффективного применения этого метода требуется набор параметров акустических волн, зависящих от геометрии элементов топологии, материалов подложек и технологических особенностей. Если обратиться к работам В. Ф. Дмитриева и Т. В. Сеницыной (ведущих в России специалистов по МСМ), то в работах [24, 25] либо просто упоминается необходимость данных параметров для МСМ, либо рассмотрен вариант расчета данных параметров через большой объем экспериментальных исследований.

В данной публикации представлена и протестирована уникальная методика оценки фундаментальных параметров высших гармоник ПАВ с использованием анализа собственных частот, анализа в частотной области и статического анализа в среде COMSOL численным способом. Использование такого комплексного подхода позволяет избежать необходимости проведения множества экспериментальных исследований для получения требуемых параметров. Физико-математическое моделирование заменяет экспериментальные исследования, что способствует более эффективному анализу. Серьезным достоинством предложенного подхода является то, что рассматриваемые простые тестовые ячейки не требуют большого вычислительного времени и ресурсов.

Обозначим несколько вопросов, которые могут возникнуть при изучении статьи:

- 1) практическая значимость,
- 2) научная новизна,

- 3) возможность проектирования устройств на гармониках для диапазона частот 5-6 ГГц (новый диапазон мобильной связи),
- 4) ограничения применения методики.

Практическая значимость данного исследования заключается в том, что предложенная методика позволяет:

- получить необходимые параметры акустических волн для последующего моделирования и предварительного расчета характеристик приборов с использованием МСМ, которая широко применяется в разработках;
- анализировать различные материалы и типы волн: волны Рэлея, вытекающие ПАВ, волны с горизонтальной поляризацией (например, STW – surface transverse waves);
- проводить анализ не только эквидистантных преобразователей с шириной электрода $\lambda/8$, $\lambda/6$ и $\lambda/4$, но и однонаправленных преобразователей вида FEUDT (floating electrode unidirectional transducer), и других, если для таких преобразователей возможно выделить регулярную геометрию, которую можно адаптировать для создания тестовой ячейки с длиной, соответствующей одной длине волны;
- проводить анализ новых материалов и срезов, имеющих известный набор физических констант и углов Эйлера;
- анализировать не только пьезоэлектрические монокристаллические подложки, но и слоистые структуры на основе пьезоэлектрической пленки / монокристалл (не пьезоэлектрический).

В качестве научной новизны можно выделить следующее: на основании большого объема численных исследований формируется «библиотека», которая устанавливает связь основных параметров поверхностных волн для МСМ в зависимости от характеристик и формы электродной структуры, а также вида применяемого пьезоэлектрического материала. Эти параметры обеспечивают согласование теоретических и экспериментальных данных в рамках одной итерации, вместо обычных 2-3. Используя данную «библиотеку», можно рассчитывать различные классы приборов на ПАВ: фильтры, резонаторы, линии задержки.

Для оценки частотного диапазона работы приборов на ПАВ в современных реалиях рассмотрим ниобат лития $128^\circ\text{Y-X LiNbO}_3$ (волна Рэлея, $V_0 = 3981$ м/с) и кварц $36^\circ\text{Y-X}+90^\circ$ (волна STW, $V_0 = 5000$ м/с). Это подложки на традиционных монокристаллических материалах. Слоистые



структуры типа алмаза и сапфира с пьезоэлектрическими пленками в данной работе не рассматриваются. Возьмем ширину электрода, равную $0.35 \mu\text{m}$, и рассмотрим два типа ВШП – эквидистантный (с шириной электрода $\lambda/4$) и с расщепленными электродами (с шириной электрода $\lambda/8$). Частоту основной гармоники можно оценить как $f = V/\lambda$. Сведем результаты в таблицу.

Из таблицы видно, что потенциально на 3-й гармонике можно при той же разрешающей способности оборудования и том же технологическом процессе сделать более высокочастотное устройство.

Изготовление приборов до 6 ГГц на традиционных монокристаллических подложках в теории возможно с применением электроннолучевой литографии, но найдет ли это широкое применение из-за сложности технологии, высокой цены производства и степени надежности? Чем выше частота, тем больше потери на распространение (в итоге растут вносимые потери), тем выше требования к поверхности подложки. Требуется

довольно тонкие и равномерные слои металлизации. Возникнут серьезные ограничения по допустимой мощности, подаваемой на устройство. В этом отношении конкурирующие технологии [26] на ОАВ, микроволновые фильтры диапазоне 5-6 ГГц заметно выигрывают по совокупности параметров.

Методика, предложенная в работе по изучению свойств и параметров ПАВ высших гармоник, является универсальной. С использованием вычисленных параметров и модели связанных мод, основанной на формализации с использованием P -матриц, возможно провести расчет устройства на частоте 5-6 ГГц, поскольку все вторичные эффекты, потери на распространения, резистивные потери, утечка в объем добавляются при расчете МСМ.

Назовем ограничения в применении данной методики.

1. Так как тестовые структуры анализируются с использованием периодических условий по апертуре, не учитываются факторы, такие как дифракция и волноводный эффект. Следователь-

Частоты гармоник в зависимости от типа преобразователя и материала

Table 1. Harmonic frequencies depending on the transducer type and material

Тип преобразователя / Transducer type	Материал (тип волны) / Material (type of wave)	Частота основной гармоники / Main harmonic frequency, GHz	Частота 3-й гармоники / 3rd harmonic frequency, GHz
Эквидистантный ВШП (рис. 8, а) / equidistant IDT (Fig. 8, a)	LiNbO ₃ , 128°Y-X (волна Рэлея / Rayleigh wave)	2.84	–
	Quartz, 36°Y-X+90° (wave STW)	3.57	–
ВШП с расщепленными электродами (рис. 8, б) / IDT with split electrodes (Fig. 8, b)	LiNbO ₃ , 128°Y-X (волна Рэлея / Rayleigh wave)	1.4	4.2
	Quartz, 36°Y-X+90° (wave STW)	1.78	5.34

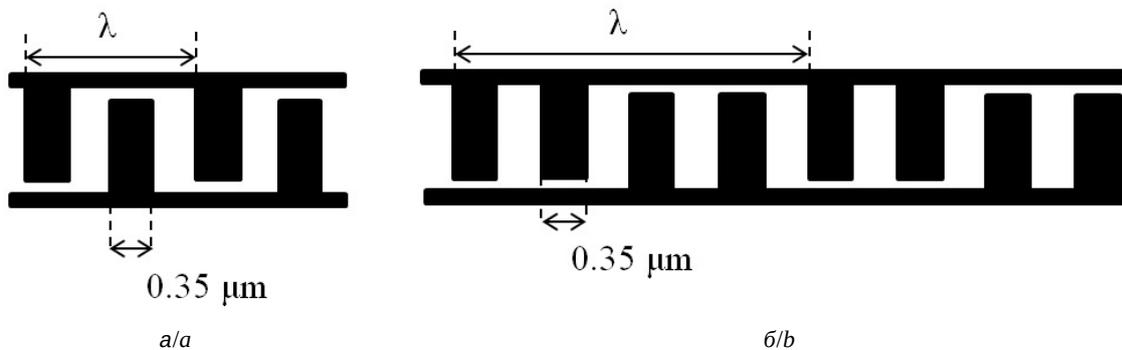


Рис. 8. Типы ВШП: а – эквидистантный ВШП с шириной электрода $\lambda/4$, б – ВШП с расщепленными электродами с шириной электрода $\lambda/8$

Fig. 8. Types of IDT: a – equidistant IDT with electrode width $\lambda/4$, b – IDT with split electrodes with electrode width $\lambda/8$



но, полученные результаты будут применимы при значениях апертуры, превышающих 10 длин волн. При апертурах менее 8–10 длин волн начинает проявляться волноводный эффект, требующий учета нескольких акустических мод с соответствующими параметрами ПАВ для каждой из них.

2. Представленный в работе расчет в COMSOL построен таким образом, что не привлекаются такие параметры, как резистивные потери и вязкостные потери на распространение, но данный вид потерь легко и удобно добавлять непосредственно в МСМ.

Заключение

Демонстрируется подход по расчету параметров ПАВ методом конечных элементов для быстрой аналитической модели связанных мод. Показано, что кроме основной акустической моды для расщепленных электродов присутствуют еще гармоники высших порядков. Предложенный алгоритм позволяет рассчитать параметры ПАВ каждой из гармоник и учитывать их при быстрых расчетах. Рассчитанные параметры могут быть применены при проектировании фильтров и линий задержек, включающих преобразователи с расщепленными электродами. Сравнение результатов расчета двух устройств с экспериментом продемонстрировало высокую степень соответствия АЧХ устройств.

Численный анализ основных параметров акустических волн, применение модели связанных мод и матричного подхода в формализации вычислений предоставляют разработчикам эффективный и гибко адаптируемый инструмент для расчета характеристик акустоэлектронных устройств с учетом возможных изменений в их топологии.

Список литературы

1. Багдасарян А., Сеницына Т., Машинин О., Иванов П., Егоров Р. Устройства частотной селекции на ПАВ в современных системах связи, радиолокации и телекоммуникации // *Электроника : наука, технология, бизнес*. 2013. № 8. С. 128–136.
2. Туральчук П. А., Вендик И. Б. Синтез полосовых фильтров на объемных акустических волнах с учетом материальных параметров многослойной структуры резонаторов // *Акустический журнал*. 2022. Т. 68, № 6. С. 611–617. <https://doi.org/10.31857/S0320791922050124>
3. Гуляев Ю. В., Сучков С. Г., Янкин С. С., Никитов С. А., Сучков Д. С., Плесский В. П. Радиочастотная идентификационная метка на поверхностных акустических волнах в диапазоне частот 6 ГГц // *Радиотехника и электроника*. 2015. Т. 60, № 4. С. 429–432. <https://doi.org/10.7868/S0033849415040087>

4. Дорохов С. П. Многопараметрический транспондер на основе пассивной радиометки на поверхностных акустических волнах // *Датчики и системы*. 2018. № 11. С. 35–41.
5. Анцев И. Г., Богословский С. В. Эволюция систем мониторинга на основе меток и датчиков на поверхностных акустических волнах // *Инновации*. 2015. № 12. С. 115–122.
6. Елисеев Н. Перспективные ПАВ-датчики Transense / Honeywell // *Электроника : Наука, Технология, Бизнес*. 2008. № 1. С. 40–45.
7. Лойко В. А., Добровольский А. А., Кочемасов В. Н., Сафин А. Р. Автогенераторы на поверхностных акустических волнах (обзор) // *Изв. вузов России. Радиоэлектроника*. 2022. Т. 25, № 3. С. 6–21. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-3-6-21>
8. Веремеев И. В., Добриштейн С. А., Разгоняев В. К. Моделирование ПАВ-резонаторов и лестничных ПАВ-фильтров методом Р-матриц // *Техника радиосвязи*. 2018. № 3 (38). С. 61–71.
9. Дмитриев В. Ф. Вывод модифицированных уравнений связанных поверхностных акустических волн // *Радиотехника и электроника*. 2009. Т. 54, № 9. С. 1134–1143.
10. 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. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-2-16-28>
11. Кузнецова И. Е., Смирнов А. В., Плеханова Ю. В., Решетилов А. Н., Ван Г.-Ц. Влияние апертуры встречно-штыревого преобразователя на характеристики его выходного сигнала в пьезоэлектрической пластине // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2020. Т. 84, № 6. С. 790–793. <https://doi.org/10.31857/S0367676520060162>
12. Тимошенко П. Е., Широков В. Б., Калинин В. В. Конечно-элементное моделирование характеристик ПАВ-фильтров на основе тонких пленок титаната бария стронция // *Экологический вестник научных центров ЧЭС*. 2020. Т. 17, № 4. С. 48–56. <https://doi.org/10.31429/vestnik-17-4-48-56>
13. Квашинин Г. М., Сорокин Б. П., Бурков С. И. Анализ распространения СВЧ волн Лэмба в пьезоэлектрической слоистой структуре на основе алмаза // *Акустический журнал*. 2021. Т. 67, № 6. С. 595–602. <https://doi.org/10.31857/S0320791921060058>
14. Campbell C. K. Obtaining the fundamental and harmonic radiation conductances of a reflective SAW interdigital transducer // *1998 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings*. 1998. Vol. 1. P. 169–173. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.1998.762124>
15. Asakawa S., Suzuki M., Kakio S., Tezuka A., Mizuno J. Resonance Properties of Leaky SAW Harmonics on Bonded Dissimilar-Material Structures // *2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*. 2020. P. 1–3. <https://doi.org/10.1109/IUS46767.2020.9251535>
16. Sato T., Otsuka S., Okajima H., Motegi R. Experimental investigation on the operation of SAW devices at harmonic frequencies with stepped-finger interdigital transducer // *1996 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings*. 1996.



- Vol. 1. P. 267–270. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.1996.583971>
17. Huegli R. GHz filters with third harmonic unidirectional transducers // IEEE Symposium on Ultrasonics. 1990. Vol. 1. P. 165–168. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.1990.171345>
18. Chen Y., Wu T., Chang K. A COM Analysis of SAW Tags Operating at Harmonic Frequencies // 2007 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. 2007. P. 2347–2350. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2007.590>
19. Hikita M., Kato Y., Matsuda J., Watanabe T., Nakano A. Self-temperature-compensation characteristics at 1st- and 3rd-harmonic frequencies for SAW gas sensor used in sensor network // 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium. 2009. P. 2496–2499. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2009.5441984>
20. Chauhan V., Weigel R., Hagelauer A., Mayer M., Ruile W., Moellenbeck D., Ebner T., Wagner K. C., Bleyl I., Mayer E., Mayer A. A Nonlinear FEM Model to Calculate Third-Order Harmonic and Intermodulation in TC-SAW Devices // 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). 2018. P. 1–9. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2018.8580153>
21. Койгеров А. С., Бальшиева 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. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-5-67-79>
22. Tikka A., Al-Sarawi S., 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.
23. Morgan D. Surface Acoustic Wave Filters With Applications to Electronic Communications and Signal Processing. Academic Press, 2010. 448 p.
24. Аристархов Г. М., Гуляев Ю. В., Дмитриев В. Ф., Зайченко К. В., Комаров В. В., Воробьев А. В., Звездинов Н. В., Исаяев В. М., Кабанов И. Н., Кац Б. М., Корчагин А. И., Мещанов В. П. Фильтрация и спектральный анализ радиосигналов. Алгоритмы. Структуры. Устройства / под ред. Ю. В. Гуляева. М.: Радиотехника, 2020. 504 с.
25. Синицына Т. В. Методы моделирования высокоизбирательных устройств частотной селекции на поверхностных акустических волнах: автореф. ... дис. д-ра техн. наук. М., 2019. 31 с.
26. Liu Y., Cai Y., Zhang Y., Tovstopyat A., Liu S., Sun C. Materials, Design, and Characteristics of Bulk Acoustic Wave Resonator: A Review // Micromachines. 2020. Vol. 11. P. 630. <https://doi.org/10.3390/mi11070630>
- Acoust. Phys., 2022, vol. 68, pp. 569–574. <https://doi.org/10.1134/S106377102205016>
3. Gulyaev Y. V., Nikitov S. A., Suchkov S. G., Yankin S. S., Suchkov D. S., Plessky V. P. SAW Radio Frequency Identification Tag for the 6 GHz Band. *J. Commun. Technol. Electron.*, 2015, vol. 60, pp. 402–405. <https://doi.org/10.1134/S1064226915040087>
4. Dorokhov S. P. Multivariable transponder based on the passive RFID-tag by surface acoustic waves. *Sensors and Systems*, 2018, no. 11 (230), pp. 35–41 (in Russian).
5. Antcev I. G., Bogoslovsky S. V. Development of monitoring systems on the basis of tags and sensors based on surface acoustic waves. *Innovations*, 2015, no. 12, pp. 115–122 (in Russian).
6. Eliseev N. Transense/Honeywell’s advanced SAW sensors. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2008, no. 1, pp. 40–45 (in Russian).
7. Loiko V. A., Dobrovolsky A. A., Kochemasov V. N., Safin A. R. Self-Oscillators Based on Surface Acoustic Waves (A Review). *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2022, vol. 25, no. 3, pp. 6–21 (in Russian). <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-3-6-21>
8. Veremeev I. V., Dobershtein S. A., Razgonyaev V. K. P-Matrix Modeling of Saw Resonators and Ladder-Type Saw Filters. *Radio Communication Technology*, 2018, iss. 3 (38), pp. 61–71 (in Russian). <https://doi.org/10.33286/2075-8693-2018-38-61-71>
9. Dmitriev V. F. Modified equations of coupled surface acoustic waves. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2009, vol. 54, no. 9, pp. 1077–1086. <https://doi.org/10.1134/S1064226909090137>
10. 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 (in Russian). <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-2-16-28>
11. Kuznetsova I. E., Smirnov A. V., Plekhanova Y. V., Reshetilov A. N., Wang G.-J. Effect of the aperture interdigital transducer on the characteristics of its output signal in a piezoelectric plate. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2020, vol. 84, no. 6, pp. 644–647. <https://doi.org/10.3103/S1062873820060143>
12. Timoshenko P. E., Shirokov V. B., Kalinchuk V. V. Finite-element modeling of SAW-filters based on thin films of barium strontium titanate. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2020, vol. 17, no. 4, pp. 48–56 (in Russian).
13. Kvashnin G. M., Sorokin B. P., Burkov S. I. Study of propagation of microwave lamb waves in a piezoelectric layered structure. *Acoust. Phys.*, 2021, vol. 67, pp. 590–596. <https://doi.org/10.1134/S1063771021060051>
14. Campbell C. K. Obtaining the fundamental and harmonic radiation conductances of a reflective SAW interdigital transducer. *1998 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings*, 1998, vol. 1, pp. 169–173. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.1998.762124>

References

1. Bagdasaryan A., Sinitzina T., Mashinin O., Ivanov P., Egorov R. SAW frequency selection devices for modern communication, radiolocation and telecommunication systems. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2013, no. 8, pp. 128–136 (in Russian).
2. Turalchuk P. A., Vendik I. B. Synthesis of the bulk-acoustic-wave bandpass filters taking into account the material parameters of the resonators multilayer structure.



15. Asakawa S., Suzuki M., Kakio S., Tezuka A., Mizuno J. Resonance Properties of Leaky SAW Harmonics on Bonded Dissimilar-Material Structures. *2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2020, pp. 1–3. <https://doi.org/10.1109/IUS46767.2020.9251535>
16. Sato T., Otsuka S., Okajima H., Motegi R. Experimental investigation on the operation of SAW devices at harmonic frequencies with stepped-finger interdigital transducer. *1996 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings*, 1996, vol. 1, pp. 267–270. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.1996.583971>
17. Huegli R. GHz filters with third harmonic unidirectional transducers. *IEEE Symposium on Ultrasonics*, 1990, vol. 1, pp. 165–168. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.1990.171345>
18. Chen Y., Wu T., Chang K. A COM Analysis of SAW Tags Operating at Harmonic Frequencies. *2007 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings*, 2007, pp. 2347–2350. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2007.590>
19. Hikita M., Kato Y., Matsuda J., Watanabe T., Nakano A. Self-temperature-compensation characteristics at 1st- and 3rd-harmonic frequencies for SAW gas sensor used in sensor network. *2009 IEEE International Ultrasonics Symposium*, 2009, pp. 2496–2499. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2009.5441984>
20. Chauhan V., Weigel R., Hagelauer A., Mayer M., Ruile W., Moellenbeck D., Ebner T., Wagner K. C., Bleyl I., Mayer E., Mayer A. A Nonlinear FEM Model to Calculate Third-Order Harmonic and Intermodulation in TC-SAW Devices. *2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2018, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2018.8580153>
21. 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 (in Russian). <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-5-67-79>
22. Tikka A., Al-Sarawi S., 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.
23. Morgan D. *Surface Acoustic Wave Filters with Applications to Electronic Communications and Signal Processing*. Academic Press, 2010. 448 p.
24. Aristarkhov G. M., Gulyaev Yu. V., Dmitriev V. F., Zaichenko K. V., Komarov V. V., Vorob'yov A. V., Zvezdinov N. V., Isaev V. M., Kabanov I. N., Kats B. M., Korchagin A. I., Meshchanov V. P. *Fil'tratsiya i spektral'nyi analiz radiosignalov. Algoritmy. Struktury. Ustroystva* [Gulyaev Yu. V., ed. Filtering and Spectral Analysis of Radio Signals. Algorithms. Structures. Devices]. Moscow, Radiotekhnika, 2020. 504 p. (in Russian).
25. Sinitzina T. V. *Metody modelirovaniya vysokoizbiratel'nykh ustroystv chastotnoi selektsii na poverkhnostnykh akusticheskikh volnakh. Dis. doct. tekhn. nauk* [Modeling methods for highly selective frequency selection devices based on surface acoustic waves: Thesis Diss. Dr. Sci. (Tech.)]. Moscow, 2019. 31 p. (in Russian).
26. Liu Y., Cai Y., Zhang Y., Tovstopyat A., Liu S., Sun C. Materials, Design, and Characteristics of Bulk Acoustic Wave Resonator: A Review. *Micromachines*, 2020, vol. 11, pp. 630. <https://doi.org/10.3390/mi11070630>

Поступила в редакцию 22.06.2023; одобрена после рецензирования 03.10.2023; принята к публикации 12.10.2023
 The article was submitted 22.06.2023; approved after reviewing 03.10.2023; accepted for publication 12.10.2023