

УДК 621.37, 534.2

ВЫСОКОДОБРОТНЫЕ STW-РЕЗОНАТОРЫ. МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ПРИМЕНЕНИЕ В АВТОГЕНЕРАТОРАХ

© 2025 г. А. С. Койгеров^{а,*}, В. Р. Реут^б

^аСанкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина), ул. пр. Попова 5, Санкт-Петербург, 197022 Россия

^бООО “АЭК Дизайн”, Ленинский пр. 140 лит. Б, Санкт-Петербург, 198216 Россия

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

Поступила в редакцию 11.12.2024 г.

После доработки 06.04.2025 г.

Принята к публикации 06.05.2025 г.

Представлены результаты разработки высокодобротных резонаторов на сдвиговых поверхностных волнах или STW (Surface Transverse Waves). Показано, что за счет применения современных вычислительных пакетов (COMSOL Multiphysics), а также усовершенствования и развития уже известных методов расчета (модифицированная модель связанных мод), можно эффективно и быстро проводить расчет устройств на поверхностных акустических волнах. Приведены результаты сравнения теоретической и экспериментальной характеристик коэффициента передачи двухпортового STW-резонатора. Показано, что на основе оптической литографии можно изготавливать высокодобротные резонаторы на частотах 0.5...2.5 ГГц. Типовые значения ненагруженной добротности резонаторов на частоте 500 МГц составляют 27000...29000. Представлены результаты измерений двухпортового STW-резонатора в составе макета малошумящего автогенератора на частоту 500 МГц, которые показывают фазовый шум на уровне -148.7 дБн/Гц при отстройке 1 кГц и -183.5 дБн/Гц при отстройке 1 МГц от несущей частоты, а также джиттер 2.8 фс. Генераторы на STW-резонаторах с низким уровнем фазовых шумов и малым значением джиттера могут быть востребованы в таких областях, где критически необходимо обеспечить максимальный динамический диапазон цифровых трактов обработки сигналов.

Ключевые слова: акустоэлектроника, поверхностные акустические волны, резонатор на ПАВ, кварц, сдвиговые поверхностные волны, COMSOL, jitter, фазовый шум

DOI: 10.31857/S0320791925030056, EDN: JTUUKP

ВВЕДЕНИЕ

Акустоэлектронные устройства, такие как полосовые фильтры, линии задержки, резонаторы и др., на протяжении десятилетий находят широкое применение в системах связи, радиолокации и телекоммуникационной аппаратуре [1]. Благодаря высокой чувствительности к внешним воздействиям, такие устройства также используются в качестве базовых элементов биосенсоров [2] и датчиков различных физических параметров [3, 4], включая устройства для определения электрофизических и вязкостных свойств жидких сред [5]. Среди различных типов акустоэлектронных устройств особый интерес представляют акустические резонаторы на объемных акустических волнах, которые демонстрируют высокие эксплуатационные характеристики как в составе сенсорных систем [6], так и в полосовых фильтрах [7]. Развитие этого направления сопровождается

интенсивными исследованиями пьезоэлектрических преобразователей [8] и свойств поверхностных поперечно-горизонтальных (SH) акустических волн, распространяющихся как в монокристаллических подложках, так и в многослойных структурах [9–11], что позволяет существенно расширить функциональные возможности акустоэлектронных устройств.

Отдельное внимание в последние годы уделяется созданию генераторов на поверхностных акустических волнах (ПАВ) с ультранизким уровнем фазового шума [12–14]. Для достижения требуемых характеристик в подобных устройствах в качестве ключевых элементов предлагается применять высокодобротные резонаторы на сдвиговых поверхностных волнах (STW) [15–18]. Под STW (Surface Transverse Waves) понимаются сдвиговые (поперечные) поверхностные волны, характеризующиеся наличием единственной горизонтальной компоненты механических смещений, ориентированной

параллельно поверхности, на которой расположена электродная структура [16]. Ряд исследований показывает, что использование высокочастотных резонаторов позволяет реализовать генераторы в диапазоне частот 0.5–2.5 ГГц без необходимости многократного умножения частоты [17–21]. В частности, для генераторов на основе STW-резонаторов на частоте 500 МГц достигнут минимальный уровень фазового шума менее -185 дБн/Гц в области “полки”, тогда как для кварцевых генераторов с умножением частоты аналогичный показатель хуже, как минимум, на 12 дБ, при этом уровни шума в ближней зоне остаются сопоставимыми [19]. Обеспечение ультранизкого уровня фазовых шумов и минимального значения джиттера является критически важным условием для достижения максимального динамического диапазона в цифровых трактах обработки сигналов. С этой точки зрения устройства на ПАВ обладают рядом преимуществ: высокой технологичностью изготовления, простотой конструктивного исполнения, а также привлекательными параметрами SWaP (Size, Weight and Power — габариты, масса и энергопотребление). При соответствующем уровне схемотехнической реализации ПАВ-устройства могут рассматриваться, как минимум, в качестве альтернативы лейкосапфировым и диэлектрическим резонаторам, обладая потенциалом превосходить их по стоимости и доступности.

Для обеспечения конкурентоспособности разрабатываемых акустоэлектронных устройств на уровне лучших мировых образцов необходимо владеть полным циклом их проектирования и изготовления, а также обеспечивать достижение максимально возможных для данного класса приборов характеристик. Ключевым этапом этого цикла является предварительный расчет и оптимизация выбранной топологии устройства. Следует отметить, что ошибки на стадии проектирования, связанные с неточным расчетом или неудачным выбором топологии, как правило, не могут быть компенсированы даже применением самых современных технологий производства.

В условиях постоянно ужесточающихся требований к параметрам акустоэлектронных устройств, особенно актуальной становится задача повышения точности расчетов и совершенствования методов их моделирования. Анализ современных исследований [22–24] показывает, что одним из наиболее эффективных инструментов численного моделирования в этой области является метод конечных элементов (МКЭ). В частности, широко используется программный пакет COMSOL Multiphysics (далее — COMSOL), обеспечивающий гибкость и высокую точность при расчете сложных акустических структур.

Целью настоящей работы является демонстрация возможностей двух современных подходов к

моделированию STW-резонаторов: численного расчета на основе МКЭ в среде COMSOL и подхода, основанного на модели связанных мод (МСМ), параметры которой определяются с использованием МКЭ-расчетов. В качестве проверки эффективности предложенных методов приведены результаты расчетов и экспериментальных измерений коэффициента передачи двухпортового STW-резонатора.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ

Существует множество подходов к расчету и моделированию устройств на основе ПАВ. В соответствии с классификацией, представленной в работе [25], данные методы условно разделяются на три основные группы: феноменологические (или аналитические), численные и комбинированные подходы. В настоящей работе рассматриваются два из наиболее распространенных среди разработчиков подходов: численный метод, реализуемый в программной среде COMSOL, и феноменологический подход, основанный на модифицированной модели связанных мод. Конечной целью моделирования устройств на ПАВ является определение одного из наборов параметров четырехполюсника (Z -, Y - или S -параметров), соответствующего заданной топологии устройства. В рамках выбранных подходов (рис. 1) наиболее удобной является процедура расчета Y -параметров с последующим переходом к определению S -параметров.

Развитие вычислительной техники и рост доступных вычислительных мощностей способствуют усилению интереса к численным моделям на основе метода конечных элементов (МКЭ). Особенности применения МКЭ для моделирования устройств на ПАВ в среде COMSOL подробно рассмотрены в работе [22]. Одним из главных недостатков применения МКЭ в режиме полноапертурного трехмерного моделирования в COMSOL является высокий уровень затрат машинного времени и значительная потребность в вычислительных ресурсах. Вместе с тем численные методы обладают рядом важных преимуществ: они позволяют учитывать влияние различных паразитных мод и волн, учитывать рассеяние акустической энергии в глубину подложки, а также моделировать поперечные эффекты, включая волноводный эффект, что особенно важно при анализе устройств с реальными апертурами.

Подход, схематично представленный на рис. 1, позволяет объединить преимущества феноменологического (аналитического) подхода с высокой точностью численных методов расчета. В основе феноменологического подхода лежит модифицированная МСМ, формализованная с применением так называемых P -матриц, описывающих элементы топологии. Ключевой особенностью данного

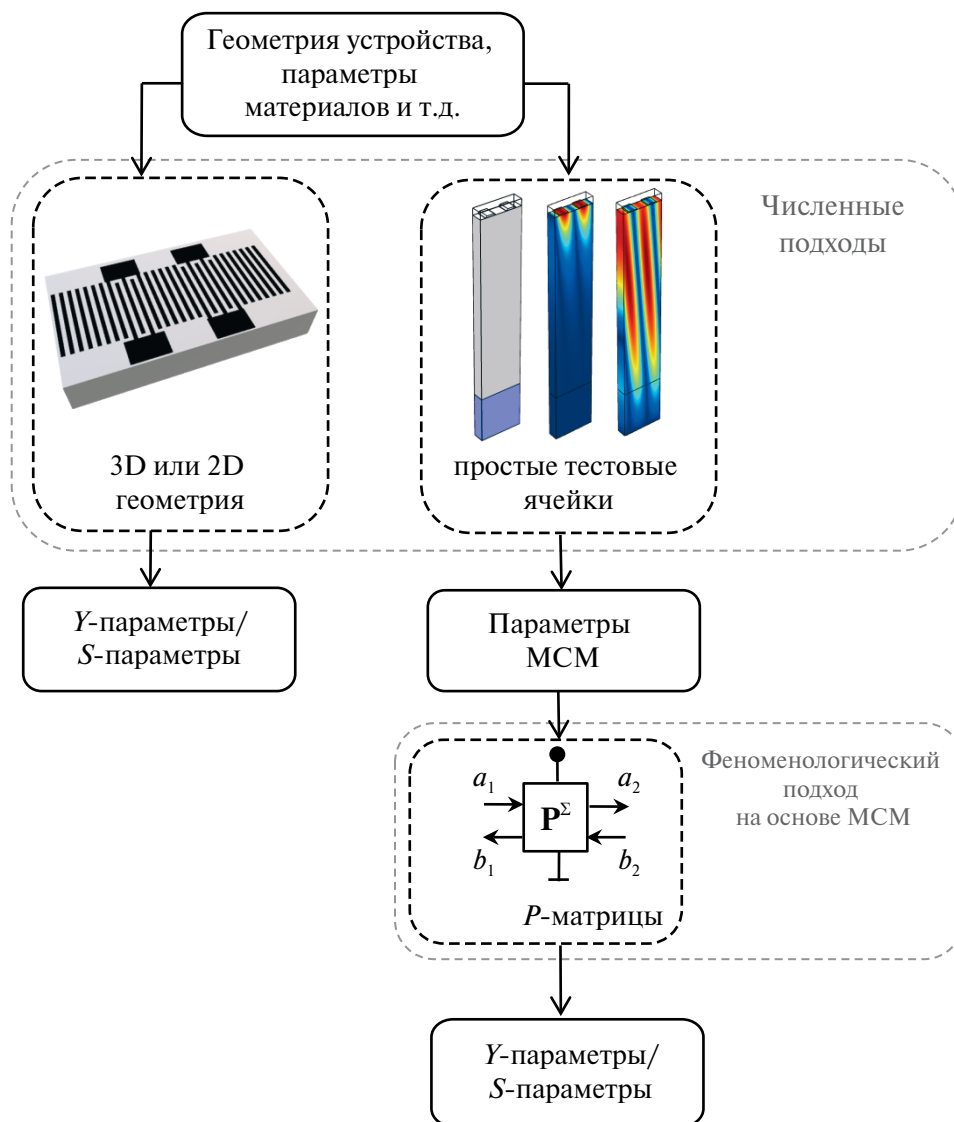


Рис. 1. Популярные подходы к расчету устройств на ПАВ.

подхода является необходимость предварительного определения параметров МСМ, которые впоследствии используются для построения P -матриц отдельных элементов топологии устройства. Получение этих параметров возможно на основе численного анализа относительно простых тестовых моделей или элементарных ячеек конструкции. При этом вычислительные затраты на определение таких параметров существенно ниже по сравнению с полномасштабным численным моделированием всей структуры в целом, что обеспечивает баланс между точностью расчета и экономией вычислительных ресурсов.

МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В COMSOL

Численный подход позволяет учесть большое число физических особенностей распространения

ПАВ в пьезоэлектрической подложке в отличие от аналитических подходов. Связь пьезоэлектрических, механических и электрических свойств в твердых телах можно описать с помощью уравнения состояния в форме [26]:

$$T_{ij} = C_{ijkl}S_{kl} - e_{kij}E_k, \quad (1)$$

$$D_i = \epsilon_{ij}E_j + e_{ijk}S_{jk}, \quad (2)$$

где T и S — тензоры механических напряжений и деформаций; E и D — векторы напряженности и электрической индукции; C , e и ϵ — соответственно тензоры упругих модулей, пьезоэлектрических коэффициентов и диэлектрической проницаемости.

Конечно-элементное моделирование устройства на ПАВ позволяет найти необходимые характеристики в 3D области. С точки зрения наиболее

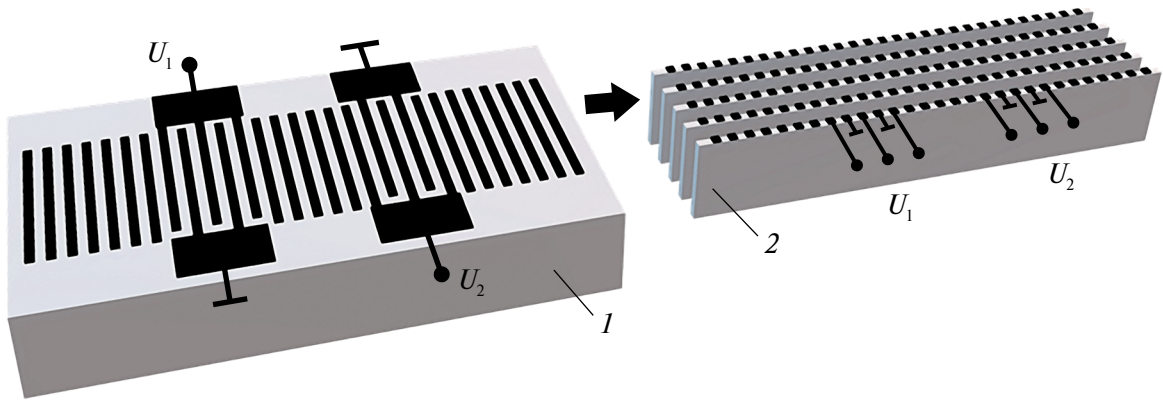


Рис. 2. Способ перехода от полной топологии к упрощенной геометрии устройства: 1 — условное представление топологии с реальной апертурой и контактными шинами; 2 — представление топологии для COMSOL с малым значением апертуры.

полного описания акустических процессов, трехмерное моделирование обеспечивает наивысшую точность, так как позволяет учитывать не только основную волну, но и такие эффекты, как рассеяние волны вглубь подложки, а также возбуждение паразитных акустических мод, связанных с особенностями конкретной топологии и используемого материала. Но поскольку число степеней свободы и конечных элементов при описании устройства в 3D размерности будет очень большим (например, миллион конечных элементов сетки), то реализации такого подхода требуются большие вычислительные ресурсы компьютера и затрат по времени. Однако существует способ, который позволяет существенно сократить модель, но требует определенных ограничений по области применения: 1) преобразователь не должен иметь амплитудную аподизацию; 2) апертура должна быть не менее 10 длин волн (тогда можно пренебречь волновым эффектом); 3) когда расстояние между соседними элементами, такими как встречно-штыревой преобразователь (ВШП) и отражающие структуры (ОС), невелико, можно пренебречь влиянием дифракции. Очевидно, что такие допущения ограничивают набор рассматриваемых топологических решений, однако являются допустимыми и эффективно применимыми для класса резонаторных устройств.

Способ перехода от полной топологии к упрощенной геометрии устройства представлен на рис. 2. Отметим, что полученное решение для фрагмента с малым значением апертуры будет справедливо для полного значения апертуры, но с учетом коэффициента по апертуре. Из расчета исключается также влияние шин или контактных площадок. Алгоритм расчета Y -параметров в среде COMSOL представлен на рис. 3.

Необходимые материальные константы кварца взяты из литературы [27], также можно воспользоваться встроенной библиотекой материалов

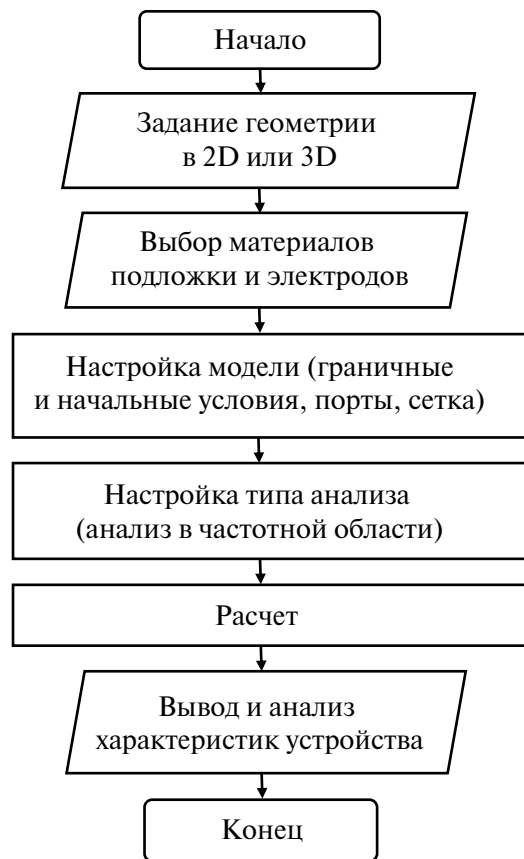


Рис. 3. Блок схема алгоритма расчета с помощью МКЭ в программе COMSOL.

COMSOL. На рис. 4 представлен фрагмент геометрии резонатора с построенной сеткой (рис. 4а) и распределение компонент механического смещения (рис. 4в). Непосредственно результаты расчета амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) устройства будут представлены в следующих разделах.

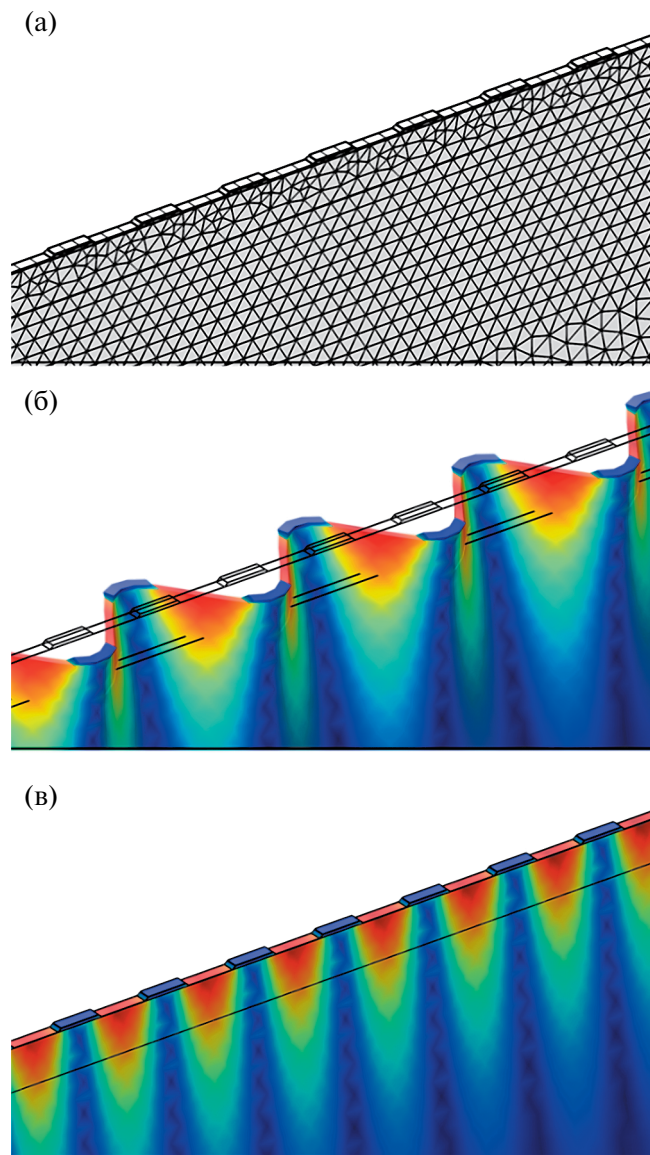


Рис. 4. Область геометрии резонатора: (а) — сетка; (б) — распределение смещения (без нормировки SH-составляющей); (в) — распределение смещения (с нормировкой SH-составляющей).

МОДИФИЦИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ СВЯЗАННЫХ МОД

Подход на основе МСМ позволяет рассматривать двухпортовый резонатор как четырехполюсник (рис. 5а), который описывается в виде Y -параметров. На рис. 5б приведена топология резонатора, состоящего из одного входного ВШП, одного выходного ВШП и трех ОС. Зазоры между ВШП и центральной ОС выделены в отдельные блоки, так как именно они обеспечивают синфазное возбуждение акустических мод. Апертуру и число электродов ВШП и ОС выбирают, исходя из технических

требований: полосы пропускания, минимального вносимого затухания и т.д.

В рамках МСМ каждый элемент устройства может быть представлен в виде блока с двумя акустическими и одним электрическим портом. Основу МСМ составляет анализ взаимодействия двух плоских волн, связанных между собой. Подробная методология данного подхода изложена в работах [25, 28].

В соответствии с идеологией метода P -матриц, топологию фильтра можно представить в виде, показанном на рис. 5в, где акустические порты отдельных блоков соединены последовательно в соответствии с заданной топологией. Акустическая связь между преобразователями и отражающими структурами определяется распределением акустического поля вдоль соответствующих элементов. К входному порту прикладывается потенциал U_1 , к выходному — U_2 , при этом через них проходят токи I_1 и I_2 соответственно [25].

Алгоритм применения метода P -матриц выглядит следующим образом:

1. Формируется эквивалентная акустоэлектрическая схема анализируемой конструкции (рис. 5в);
2. Определяются и рассчитываются P -матрицы каждого элементарного блока устройства;
3. Вычисляется суммарная P -матрица (P^Σ), которая описывает взаимосвязь волн на входе и выходе всего устройства.

Параметры суммарной P -матрицы (P^Σ) можно вычислить путем перемножения отдельных P -матриц для ВШП и ОС. Условно это можно записать как:

$$P^\Sigma = P_{\text{ОС-1}} \times P_{\text{ВШП-1}} \times P_{\text{зазор}} \times P_{\text{ОС-2}} \times P_{\text{зазор}} \times P_{\text{ВШП-3}} \times P_{\text{ОС-3}}. \quad (3)$$

Связь волн на входе и выходе устройства:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ a_8 \\ I_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11}^\Sigma & P_{12}^\Sigma & P_{13}^\Sigma \\ P_{21}^\Sigma & P_{22}^\Sigma & P_{23}^\Sigma \\ P_{31}^\Sigma & P_{32}^\Sigma & (P_{33}^\Sigma)_{ik} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ b_8 \\ U_k \end{bmatrix}_{U_j=0}, \quad (4)$$

($i, k, j = 1, 2$), где I_i , U_k — токи и напряжения на входном ($i, k = 1$) и выходном ($i, k = 2$) электрических портах, $k \neq j$; $(P_{33}^\Sigma)_{ik}$ — элемент итоговой матрицы, отвечающий за определение требуемой проводимости в зависимости от условий на электрических портах; b_1, b_8, a_1, a_8 — амплитуды волн на входе и выходе акустических портов.

На основе суммарной P -матрицы при соответствующей коммутации электрических портов можно сформировать матрицу проводимостей.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

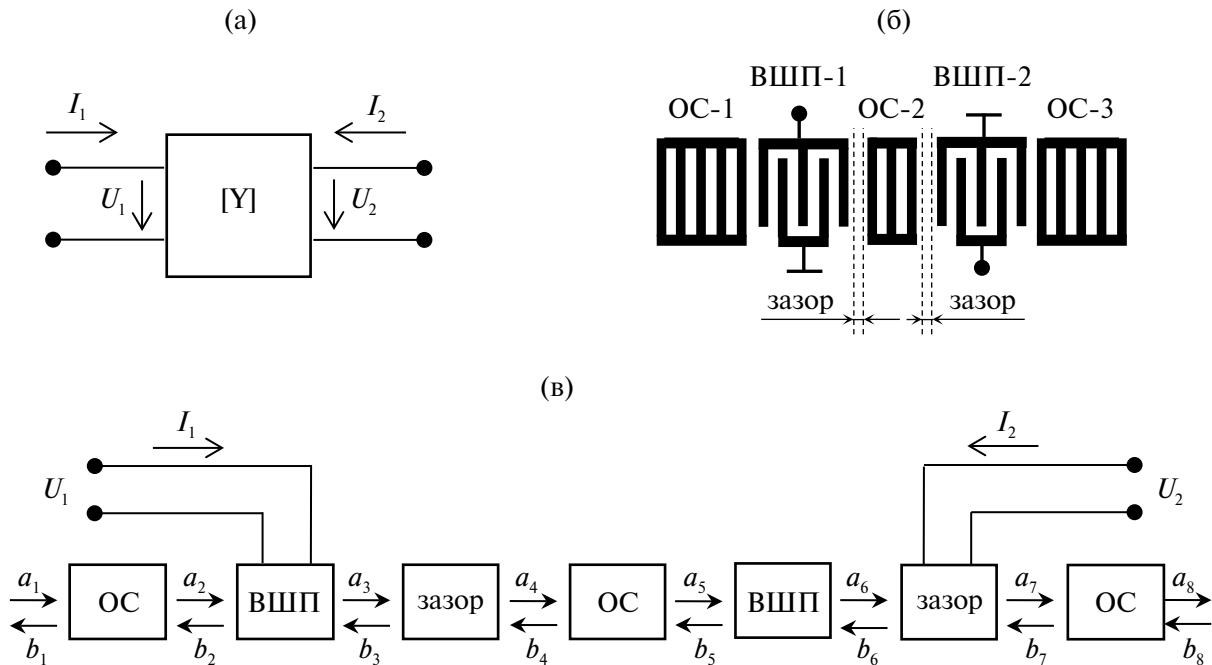


Рис. 5. Эквивалентное представление резонатора: (а) — в форме четырехполюсника; (б) — в виде топологической схемы; (в) — в виде акустоэлектрической схемы для МСМ.

Для успешной реализации МСМ на основе P -матриц необходимо иметь представление о следующих аспектах: 1) физическое значение всех компонентов P -матрицы [28]; 2) правила каскадирования P -матриц [25]; 3) правила перехода от Y -параметров к S -параметрам [25]; 4) способы определения параметров МСМ, которые будут рассмотрены далее.

РАСЧЕТ НЕОБХОДИМЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ МСМ С ПОМОЩЬЮ МКЭ

При разработке устройств на ПАВ с использованием МСМ необходимо определить ряд ключевых параметров [25]: скорость ПАВ на свободной и металлизированной поверхностях; скорость ПАВ в областях под электродами ВШП и ОС; коэффициенты отражения и прохождения ПАВ через электрод; коэффициент пьезоэлектрической связи (КЭМС); параметры затухания волны в подложке и системе электродов; статическую емкость между электродами; фазовый сдвиг между центрами отражения и возбуждения ПАВ.

В процессе определения этих характеристик приходится учитывать множество факторов, которые влияют на конструкцию и технологию изготовления устройств. Среди них [25]: форма и профиль каждого отдельного электрода (ВШП или ОС); тип электродной ОС (закороченная или разомкнутая); тип элементарного отражателя в ОС (например, электрод или канавка); конструкция шин ВШП и контактных площадок; степень

металлизации электродных структур; толщина слоя металлизации. Все эти параметры и факторы вместе формируют сложную задачу, требующую учета большого числа степеней свободы в расчетах и моделировании.

Среди распространенных методов получения параметров МСМ можно выделить два основных подхода:

1. Извлечение параметров из набора экспериментальных данных с последующим построением эмпирических зависимостей;
2. Использование МКЭ для численного расчета параметров без необходимости проведения большого количества физических экспериментов.

В данной работе предлагается рассчитывать требуемые параметры на основе анализа простых тестовых ячеек или моделей пониженного порядка (МПП) с помощью МКЭ в программе COMSOL (рис. 6). В качестве МПП рассмотрены 3 ячейки: свободная поверхность (рис. 6а), полностью металлизированная поверхность (рис. 6б) и поверхность с электродами (рис. 6в).

В качестве тестовой структуры рассмотрим МПП в виде ячейки, размер которой составляет одну длины волны. Глубина анализируемой подложки может составлять порядка 5 длин волн. Граничные условия сформулированы так, что ячейка представляется как бесконечная в направлении апертуры и периодическая вдоль оси распространения ПАВ. С нижней стороны подложка ограничена с помощью идеально согласованного слоя

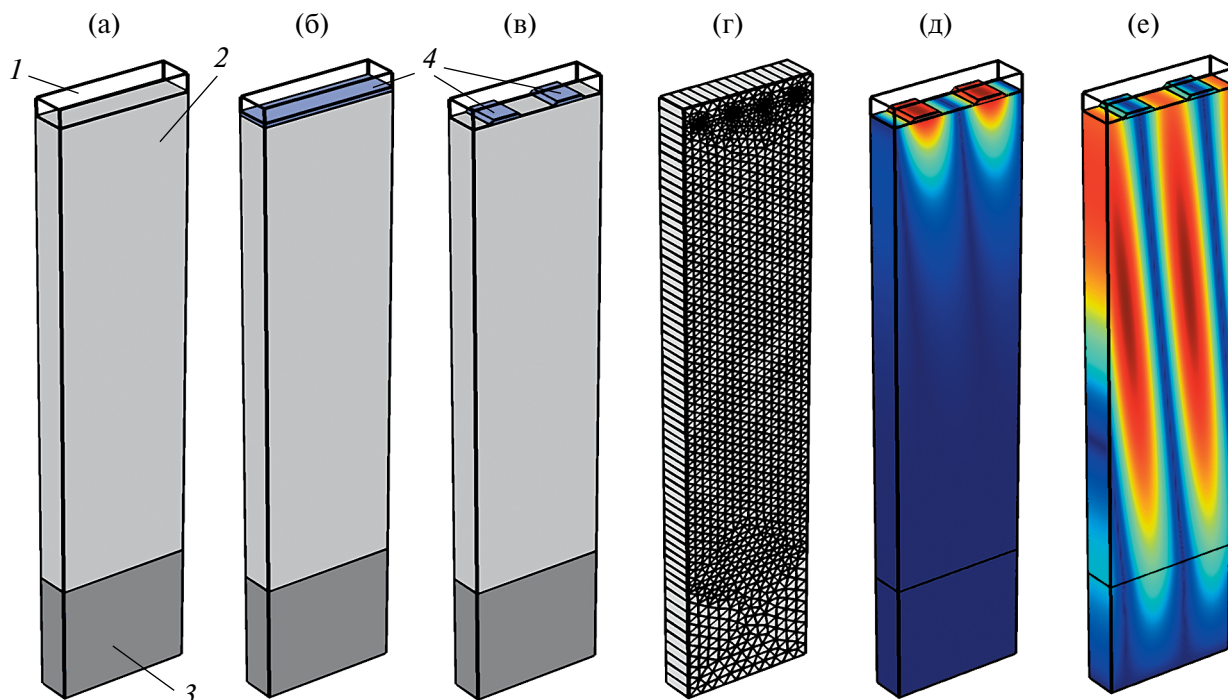


Рис. 6. Набор МПП для анализа распространения и расчета параметров акустических волн: (а) — на свободной поверхности, (б) — под металлизированной поверхностью, (в) — под металлическими электродами; (г) — пример сетки; (д) — результат численного анализа 1-й собственной частоты; (е) — результат численного анализа 2-й собственной частоты. Особенности МПП: 1 — воздушный слой, 2 — пьезоэлектрическая подложка, 3 — идеально согласованный слой (PML), 4 — слой металлизации.

(Perfectly Matched Layer — PML), поглощающего волны. Поскольку ПАВ распространяются на глубине, не превышающей нескольких длин волн, при построении конечно-элементной сетки область, прилегающая к поверхности, дискретизируется более плотно, например, с использованием 20 элементов на длину волны (см. рис. 6г).

В результате расчета (с помощью решателя “Study — Eigenfrequency”) наблюдаем набор собственных частот в виде соответствующих форм. Пример картины механических смещений для STW представлен на рис. 6д, 6е. В случае отсутствия электродов наблюдается одна собственная частота, на основе которой можно определить фазовую скорость ПАВ. При наличии электродной структуры возникают две собственные частоты, что позволяет вычислить фазовую скорость под электродами, а также определить коэффициент отражения [22].

Используя полученные значения собственных частот (f_1 и f_2), можно определить параметры ПАВ с помощью следующих формул [22]:

$$V = \frac{f_1 + f_2}{2} \lambda, \quad (6)$$

$$r = \pi \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1}. \quad (7)$$

Требуется также выполнить расчет проводимости в заданном частотном диапазоне, используя

решатель “Study — Frequency response”. Такую проводимость в литературе называют “гармонический адмиттанс” (рис. 7) и определяют как отношение тока к напряжению, когда гармоническое возбуждение применяется к бесконечной периодической структуре [29].

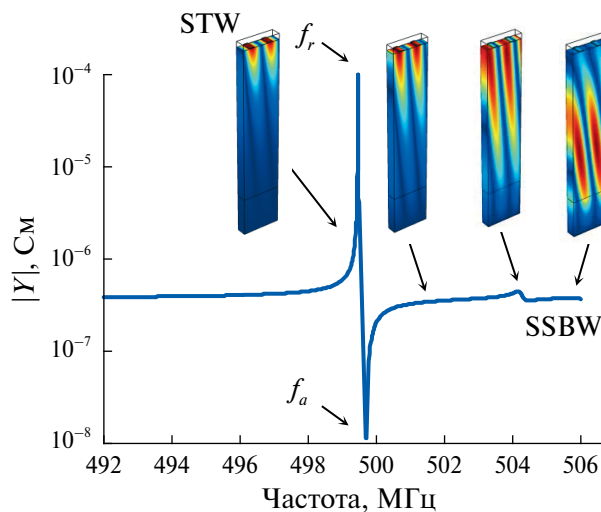


Рис. 7. Проводимость (или “Harmonic admittance”), рассчитанная при коэффициенте металлизации 0.5 и относительной толщине металла $h/\lambda = 1.8\%$.

Проводимость тестовой ячейки позволяет определить эффективный КЭМС [22]:

$$K^2 = \frac{\pi f_r / (2f_a)}{\text{tg}(\pi f_r / (2f_a))}, \quad (8)$$

где f_r — частота последовательного резонанса и f_a — частота параллельного резонанса.

В результате анализа для материала кварца — $37^\circ Y\text{-X}+90^\circ$ среза (углы Эйлера $(0, -53^\circ, 90^\circ)$) получены для относительной толщины металлизации $h/\lambda = 1.8\%$ и коэффициента металлизации $a/p = 0.5$ (a — ширина электрода, p — период следования электродов) следующие параметры $V = 5070.85$ м/с, $K^2 = 0.132\%$, $r = -j0.0168$. Данные параметры будут использованы в качестве ключевых для расчета с помощью МСМ.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ДВУХ ПОДХОДОВ

Результаты расчета АЧХ двухпортового резонатора, выполненные с использованием двух подходов — МСМ и МКЭ, сведены в табл. 1. При расчете было принято, что слева и справа от ВШП расположено по 300 отражателей.

На рис. 8 приведены рассчитанные характеристики. Как видно, имеется незначительное расхождение в правой части полосы заграждения, что, по-видимому, связано с увеличением утечки акустической энергии на высоких частотах и переходом волны типа STW в волну типа SSBW (Surface Skimming Bulk Wave). Тем не менее, анализ полосы пропускания по АЧХ показывает, что это расхождение не оказывает существенного влияния на точность моделирования.

Следует отметить, что в обоих случаях расчетов не учитывались определенные источники потерь, такие как резистивные потери и потери на

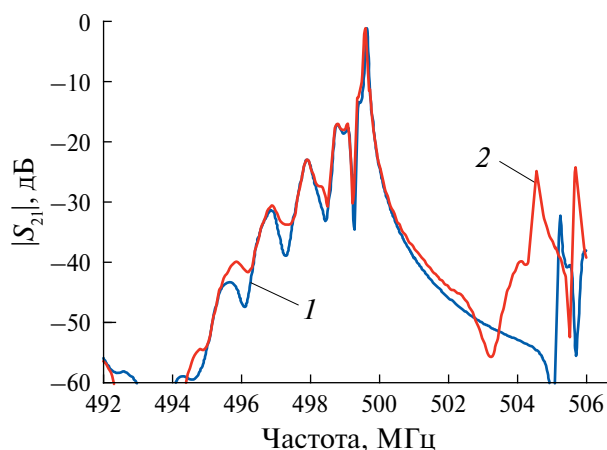


Рис. 8. Сравнение результатов расчетов АЧХ с помощью МСМ (1) и МКЭ (2).

Таблица 1. Сравнение результатов расчета двух подходов.

| | МКЭ | МСМ |
|---|---------|---------|
| Число элементов сетки | 324702 | — |
| Требуемая оперативная память, Гб | 56 | — |
| DOF — Число степеней свободы | 6265845 | — |
| Число точек по оси частот | 101 | 801 |
| Затраченное время на расчет | ~16 ч | 2 с |
| Полоса пропускания по уровню -3 дБ, кГц | 80 | 72 |
| Минимальное вносимое затухание, дБ | -1.58 | -1.4 |
| Центральная частота, МГц | 499.620 | 499.665 |

распространение. Общее количество электродов и ОС составило 860 элементов. Для расчетов методом конечных элементов применялся прямой решатель, а размер сетки составлял около 324702 элементов. Результаты расчета (центральная частота, полоса пропускания и вносимое затухание) для двух совершенно разных подходов приблизительно одинаковые, что является неплохим показателем, характеризующим этап оценки характеристик устройства. Главное отличие состоит в том, что расчет в COMSOL для 101 частотной точки занял порядка 16 ч (без распараллеливания вычислений отдельных частотных точек), а расчет на основе МСМ — порядка 2 с (для 801 частотной точки).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ПРИМЕНЕНИЕ В АВТОГЕНЕРАТОРАХ

На основе предварительного моделирования нами были изготовлены экспериментальные образцы резонаторов на основе проекционной оптической литографии. Сравним результаты расчета на основе МСМ с результатами эксперимента (рис. 9), но подключим к расчету дополнительные источники потерь: резистивные потери, потери на распространение, потери на рассеивание части энергии от электродов (или утечку в объем). Помимо этого, допускается незначительное изменение значений паразитных LC-элементов. В финальном расчете и эксперименте число отражателей слева и справа — 600.

Основные характеристики устройства: вносимое затухание составляет -6.1 дБ, относительная полоса пропускания на уровне -3 дБ — 0.01% или 34 кГц. Сравнение результатов расчетов показывает, что отклонение в полосе пропускания не превышает 0.2 дБ, а в полосе заграждения — не более 5 дБ от ожидаемых (прогнозируемых) значений. Наибольшее расхождение наблюдается справа от полосы пропускания, которое объясняется тем,

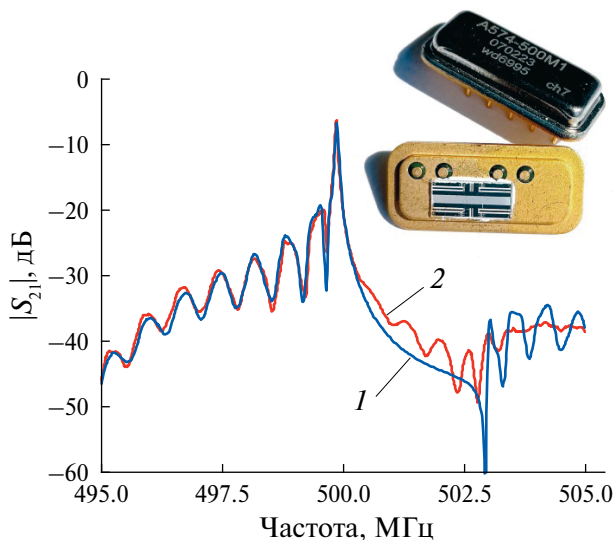


Рис. 9. Сравнение результатов расчета МСМ (1) и эксперимента (2).

что все-таки МСМ — одномерная модель, учитывающая только одну основную акустическую моду, а область справа — это результат перехода STW в SSBW, где дополнительно происходит генерация объемных мод и классический подход в рамках МСМ и не предполагает сходимости. Рассмотренный в работе комбинированный подход на основе

Таблица 2. Параметры измеренных резонаторов.

| Тип | f_0 , МГц | A_0 , дБ | Q_L | Q_{UL} | $f_0 \times Q_{UL}$ |
|-------------|-------------|------------|-------|----------|-----------------------|
| A574-500M1 | 500 | 6.1 | 14700 | 29000 | 1.50×10^{13} |
| A574-896M1 | 896 | 6.2 | 8870 | 17000 | 1.52×10^{13} |
| A574-1000M1 | 1000 | 6.4 | 8000 | 15000 | 1.50×10^{13} |
| A574-2240M1 | 2240 | 10 | 3700 | 5400 | 1.20×10^{13} |

МСМ и значения параметров, полученные с помощью МКЭ, показывают результаты и точность, достаточные для практических целей.

Основные параметры (минимальное вносимое затухание (A_0), ненагруженная (Q_{UL}) и нагруженная (Q_L) добротности) изготовленных резонаторов сведены в табл. 2. Показано, что с помощью стандартной оптической литографии можно изготавливать высокодобротные резонаторы на частотах от 500 МГц до 2.2 ГГц. Типовое значение произведения $f_0 \times Q_{UL}$ составило 1.5×10^{13} , что сопоставимо с лучшими мировыми образцами, представленными в литературе [19]. Уровень собственных шумов в резонаторах измерялся с применением макета автогенератора на основе генератора Пирса при помощи прибора FSWP (Rodhe & Schwarz) в условиях обычного помещения при комнатной температуре. На рис. 10 представлены фазовые шумы

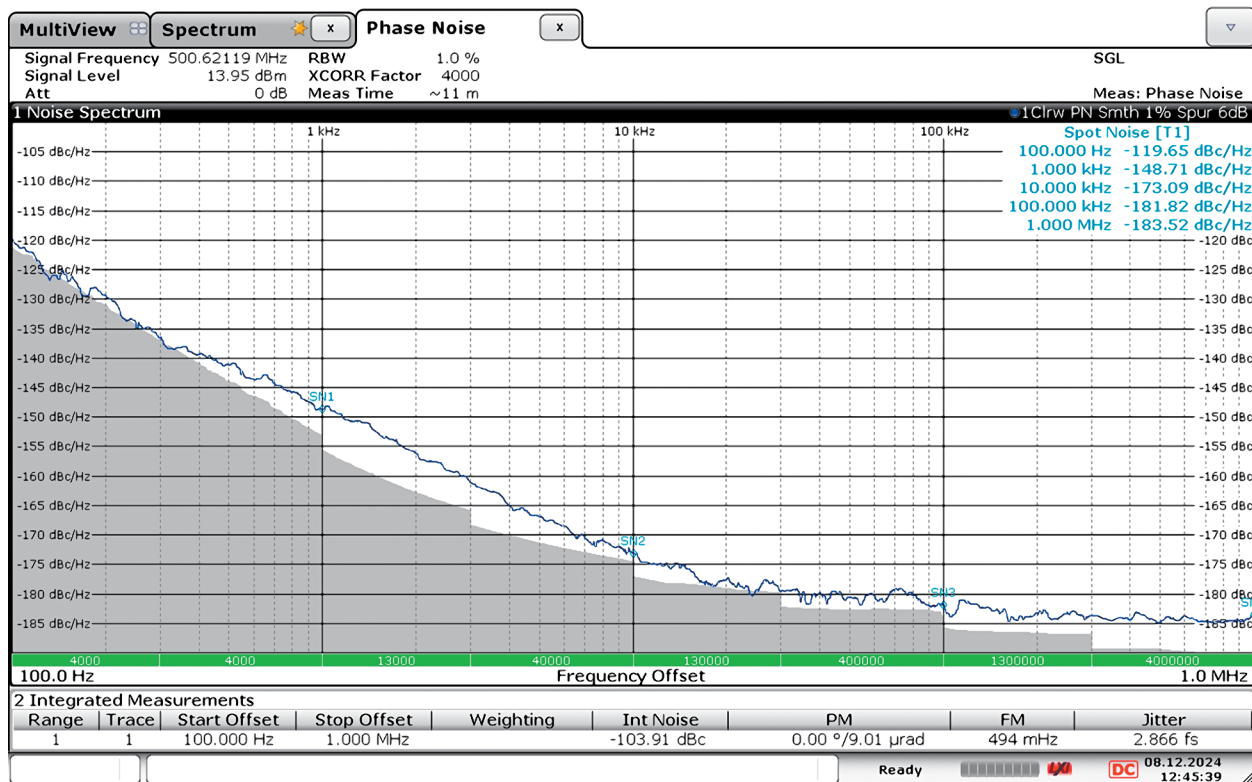


Рис. 10. Фазовый шум тестового автогенератора с резонатором на 500 МГц.

и джиттер генератора с резонатором на частоте 500 МГц. Минимальный уровень фазовых шумов достигает -148.7 дБн/Гц при отстройке на 1 кГц и -183.5 дБн/Гц при отстройке на 1 МГц от несущей частоты. При этом джиттер составляет 2.8 фс, что сопоставимо с лучшими мировыми аналогами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрены два современных подхода к моделированию устройств на ПАВ. Показано, что с помощью модифицированной МСМ можно эффективно и достаточно точно прогнозировать характеристики резонатора. Для работы в рамках подхода МСМ требуется предварительно проанализировать простые тестовые ячейки с помощью МКЭ и извлечь необходимые МСМ-параметры.

Применение такого комбинированного подхода позволило спроектировать двухпортовый резонатор на STW с ненагруженной добротностью 29000 для рабочей частоты 500 МГц. Приведены результаты измерений резонатора в составе макета малошумящего автогенератора на частоте 500 МГц. Они показывают минимальный уровень фазового шума -148.7 дБн/Гц при отстройке на 1 кГц и -183.5 дБн/Гц при отстройке на 1 МГц от несущей частоты, а также джиттер 2.8 фс. Генераторы на STW-резонаторах могут обеспечивать критически необходимый максимальный динамический диапазон цифровых трактов обработки сигналов за счет низкого уровня фазовых шумов и малого значения джиттера.

Полученные результаты свидетельствуют о потенциале использования разработанных резонаторов не только в диапазоне 500 МГц, но и для стабилизации частоты в более высокочастотных диапазонах, включая гигагерцевый и X-диапазон, при условии применения соответствующих схем умножения частоты или смесителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аристархов Г.М., Гуляев Ю.В., Дмитриев В.Ф. и др.* Фильтрация и спектральный анализ радиосигналов. Алгоритмы. Структуры. Устройства. М.: Радиотехника, 2020. 504 С. <https://doi.org/10.2174/97898151965041240101>
2. *Бородин И.А., Зайцев Б.Д., Алсовэиди А.К.М., Караваяева О.А., Гулий О.И.* Биологический датчик на основе акустической щелевой моды с использованием микробных клеток для определения ампициллина // *Акуст. журн.* 2022. Т. 68. № 6. С. 583–588. <https://doi.org/10.31857/S0320791922060028>
3. *Крышталъ Р.Г., Медведев А.В.* Применение резонаторов на поверхностных акустических волнах для измерений сверхмалых изменений температуры // *Известия РАН. Сер. физ.* 2016. Т. 80. С. 1357–1362.

4. *Анисимкин В.И., Кузнецова И.Е.* Селективное детектирование температуры микропроб жидкостей акустическими волнами поверхностного типа // *Радиоэлектроника.* 2019. Т. 64. № 8. С. 831–834. <https://doi.org/10.1134/S0033849419080011>
5. *Шамсутдинова Е.С., Анисимкин В.И., Фионов А.С., Смирнов А.В., Колесов В.В., Кузнецова И.Е.* Совершенствование методов исследования электрофизических и вязкостных свойств жидкостей // *Акуст. журн.* 2023. Т. 69. № 1. С. 56–62. <https://doi.org/10.31857/S0320791922600238>
6. *Семёнов А.П., Зайцев Б.Д., Теплых А.А., Бородин И.А.* Исследование акустических характеристик суспензий на основе глицерина и микрочастиц синтетического алмаза с помощью резонатора с продольным электрическим полем // *Акуст. журн.* 2023. Т. 69. № 6. С. 702–712. <https://doi.org/10.31857/S0320791923600294>
7. *Туральчук П.А., Вендик И.Б.* Синтез полосовых фильтров на объемных акустических волнах с учетом материальных параметров многослойной структуры резонаторов // *Акуст. журн.* 2022. Т. 68. № 6. С. 611–617. <https://doi.org/10.31857/S0320791922050124>
8. *Поликарпова Н.В., Пожар В.Э.* Исследование частотного диапазона работы пьезоэлектрического преобразователя акустооптического фильтра электрическим и оптическим методами // *Акуст. журн.* 2024. Т. 70. № 2. С. 186–192. <https://doi.org/10.31857/S0320791924020061>
9. *Naumenko N.F.* Optimization of aperture in SAW and STW resonators on langasite // 2014 IEEE IUS. Chicago, IL, USA, 2014. P. 2059–2062. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2014.0513>
10. *Wu Z. et al.* Comparative Study of SH-Mode Surface Acoustic Wave Resonators on Lithium Tantalate with Silicon and Silicon Carbide Substrates // *IEEE Trans. on Electron Devices.* 2024. V. 71. № 11. P. 7022–2029. <https://doi.org/10.1109/TED.2024.3467223>
11. *Lee Z.-Q. et al.* Spectrum-Clean Dispersion Engineered YX-LN/SiO₂/Si Wideband SH-SAW Resonators with Crossed Interdigital Transducers // *IEEE Trans. on Electron Devices.* 2024. V. 71. № 6. P. 3880–3887. <https://doi.org/10.1109/TED.2024.3392169>
12. *Ченакин А.* Фазовые шумы в СВЧ генераторах. Методы решения проблемы // *Электроника: наука, технология, бизнес.* 2011. № 4. С. 52–61.
13. *Бобкович П.* Малошумящий источник опорной частоты 3.2 ГГц // *СВЧ-электроника.* 2021. № 3. С. 18–21.
14. *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>
15. *Kosinski J.A., Pastore R., Avramov I.D.* Theoretical and experimental evidence for superior intrinsic Q of STW devices on Rotated Y-cut Quartz // *Proc. of the 1999 Joint Meeting of the European Frequency and the*

- IEEE Int. Frequency Control Symposium. Besancon, France. 1999. P. 867–870.
<https://doi.org/10.1109/FREQ.1999.841442>
16. Плесский В.П., Гуляев Ю.В. Высокочастотные резонаторы на сдвиговых поверхностных волнах // Радиотехника. 2015. № 8. С. 11–16.
 17. Дмитриев В.Ф., Носков А.Н. Теоретическое и экспериментальное исследование резонаторов на квази-поверхностных акустических волнах // Акуст. журнал. 2010. Т. 56. № 4 С. 472–478.
 18. Доберштейн С.А., Веремеев И.В., Разгоняев В.К. Асинхронные резонаторы на STW с высокой добротностью и уменьшенными размерами // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 7. С. 137–144.
<https://doi.org/10.18127/j00338486-202307-14>
 19. Hay C.E., Harrell M.E., Kansy R.J. 2.4 and 2.5 GHz Miniature, Low-Noise Oscillators Using Surface Transverse Wave Resonators and a SiGe Sustaining Amplifier // 2004 IEEE Int. Frequency Control Symposium and Exposition. Montreal, Canada. 2004. P. 174–179.
<https://doi.org/10.1109/FREQ.2004.1418449>
 20. Tatomoulos X. Compact ultra-low noise SAW oscillator with reduced g-sensitivity for radar applications // 2014 Int. Radar Conference. Lille, France. 2014. P. 1–3.
<https://doi.org/10.1109/RADAR.2014.7060383>
 21. De Giovanni G., Chomiki M. New phase noise measurement techniques & Ultra-Low Noise SAW Oscillators // 2010 IEEE Int. Frequency Control Symposium. Newport Beach, CA, USA. 2010. P. 116–118.
<https://doi.org/10.1109/FREQ.2010.5556361>
 22. Койгеров А.С. Применение метода конечных элементов для расчета параметров поверхностных акустических волн и устройств на их основе // Микроэлектроника. 2024. Т. 53. № 2. С. 142–155.
<https://doi.org/10.31857/S0544126924020036>
 23. Квашинин Г.М., Сорокин Б.П., Бурков С.И. Анализ распространения СВЧ волн Лэмба в пьезоэлектрической слоистой структуре на основе алмаза // Акуст. журн. 2021. Т. 67. № 6. С. 595–602.
 24. Маринушкин П.С., Левицкий А.А., Фадеев В.О. Оценивание влияния параметров металлизации на рабочие характеристики компонентов на поверхностных акустических волнах // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. 2024. Т. 17 № 1. С. 82–91.
 25. 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>
 26. Дьелесан Э., Руайе Д. Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов. Пер. с франц. Под ред. Леманова В.В. М.: Наука, 1982. 424 с.
 27. Shimizu Y., Yamamoto Y. SAW propagation characteristics of complete cut of quartz and new cuts with zero temperature coefficient of delay // Proc. 1980 IEEE Ultrasonics Symp. P. 420–423.
<https://doi.org/10.1109/ULTSYM.1980.197431>
 28. Дмитриев В.Ф. Вывод модифицированных уравнений связанных поверхностных акустических волн // РЭ. 2009. Т. 54. № 9. С. 1134–1143.
 29. Malocha S., Abbott B.P., Naumenko N. Numerical Modeling of One-Port Resonators Based on Harmonic Admittance // IEEE Ultrasonics Symposium. Montreal, QC, Canada. 2004. V. 3. P. 2027–2030.
<https://doi.org/10.1109/ultsym.2004.1418233>

The high-Q STW resonators. Calculation methods and application in self-oscillators

A. S. Koigerov^{a,*}, V. R. Reut^b

^aSt. Petersburg State Electrotechnical University “LETI”, Professor Popov st. 5, St Petersburg, 197022, Russia

^bLLC “AEC Design”, Leninskii pr. 140 B, St Petersburg, 198216 Russia

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

The results of the development of highquality resonators based on STW (Surface Transverse Waves) are presented. It is shown that through the use of modern computing programs (COMSOL Multiphysics), as well the improvement and development of already known calculation methods (modified coupling of modes model), it is possible to efficiently and quickly calculate devices on surface acoustic waves. The results of comparing the theoretical and experimental responses of the transmission coefficient of a two-port STW resonator are presented. It is shown that highquality resonators at frequencies of 0.5...2.5 GHz can be manufactured on the basis of standard optical lithography. Typical values of the unloaded Q-factor of resonators at a frequency of 500 MHz are 27000...29000. The measurements of a two-port STW resonator made as part of a 500 MHz low-noise oscillator layout are presented, which demonstrate a phase noise level of –148.7 dBn/Hz at 1 kHz detuning and –183.5 dBn/Hz at 1 MHz detuning from the carrier frequency, a jitter 2.8 fs. Self-oscillators based on STW resonators with a low level of phase noise and a low jitter value can be in demand in areas where it is critically necessary to ensure the maximum dynamic range of digital signal processing paths.

Keywords: acoustoelectronic, surface acoustic waves, SAW resonator, quartz, shear surface waves, COMSOL, jitter, phase noise