

Приборы и системы измерения на основе акустических, оптических и радиоволн

УДК 531.768

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-6-51-62>

Оптимизация конструкции встречно-штыревого преобразователя кольцевого резонатора на поверхностных акустических волнах

С. Ю. Шевченко^{1✉}, Д. А. Михайленко¹, Б. Ньямверу²

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

² Колледж бизнес-образования СВЕ, Дар-эс-Салам, Танзания

✉ syshevchenko@mail.ru

Аннотация

Введение. В предыдущих публикациях авторами рассматривались частотные характеристики и способы закрепления чувствительных элементов в виде волнового кольцевого резонатора на поверхностных акустических волнах в корпусе из различных материалов, а также влияние внешних факторов на чувствительные элементы. При анализе полученных результатов было замечено, что полоса пропускания достаточно широкая, что может отрицательно сказаться на детектировании сигнала при измерении ускорения с помощью разрабатываемого чувствительного элемента. Возникла необходимость уменьшить полосу пропускания чувствительного элемента за счет изменения конструкции встречно-штыревого преобразователя (ВШП). Используя компьютерное моделирование COMSOL Multiphysics, было продемонстрировано несколько вариантов ВШП и показано, что эта цель может быть достигнута изменением геометрии штыря ВШП.

Цель работы. Продемонстрировать оптимальную топологию ВШП с малой полосой пропускания, что влечет за собой улучшение детектирования сигнала при влиянии ускорения на чувствительный элемент.

Материалы и методы. Применение метода конечных элементов и математическая обработка в AutoCAD и COMSOL Multiphysics.

Результаты. Предложено 9 типов топологий встречно-штыревых преобразователей. Проведены исследования при помощи программного обеспечения COMSOL Multiphysics вышеуказанных типов ВШП на подложках из ниобата лития, выступающего в качестве материала чувствительного элемента, и представлены частотные характеристики. Проведена оценка полученных данных и сделаны выводы об оптимальной конструкции кольцевого резонатора: наиболее эффективной структурой является ВШП с прямоугольными штырями без селективного изъятия.

Заключение. Генерация волны в кольцевом резонаторе может быть выполнена при изъятии не более одной пары ВШП на 10 и более периодов. При этом изъятие ВШП должно быть равномерным. При увеличении количества изъятых ВШП нарушается геометрия кольцевого резонатора и волна покидает конструкцию. Наличие общей шины позволяет удерживать поверхностную акустическую волну внутри конструкции ВШП, а сужение периодов к внутренней части конструкции позволяет улучшить частотные характеристики кольцевого резонатора на поверхностных акустических волнах.

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы, микромеханический акселерометр, чувствительный элемент, поверхностные акустические волны, встречно-штыревой преобразователь, анизотропные материалы, изотропные материалы, топология

Для цитирования: Шевченко С. Ю., Михайленко Д. А., Ньямверу Б. Оптимизация конструкции встречно-штыревого преобразователя кольцевого резонатора на поверхностных акустических волнах // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 6. С. 51–62. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-6-51-62

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета по науке и высшей школе Санкт-Петербурга в рамках гранта в форме субсидий в сфере научной и научно-технической деятельности.

Статья поступила в редакцию 11.11.2021; принята к публикации после рецензирования 13.12.2021; опубликована онлайн 29.12.2021



Optimizing the Design of Surface-Acoustic-Wave Ring Resonator by Changing the Interdigitated Transducer Topology

Sergey Yu. Shevchenko^{1✉}, Denis A. Mikhailenko¹, Boniface Nyamweru²

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

²College of Business Education CBE, Dar es Salaam, Tanzania

✉syshevchenko@mail.ru

Abstract

Introduction. Previous works considered the frequency characteristics and methods for fixing sensitive elements in the form of a wave ring resonator on surface acoustic waves in a housing made of various materials, as well as the influence of external factors on sensitive elements. It was found that the passband in such a case is sufficiently wide, which can affect adversely signal detection when measuring acceleration using the sensitive element under development. Therefore, it has become relevant to reduce the sensitive element's bandwidth by changing the design of the interdigitated transducer (IDT).

Aim. To demonstrate an optimal topology for an IDT with a low bandwidth, leading to improved signal detection when acceleration affects the sensitive element.

Materials and methods. The finite element method and mathematical processing in AutoCAD and in COMSOL Multiphysics.

Results. Nine topologies of IDT are proposed. All these types were investigated using the COMSOL Multiphysics software on lithium niobate substrates, which material acts as a sensitive element. The frequency characteristics are presented. The data obtained allowed an optimal design of the ring resonator to be proposed: an IDT with rectangular pins without selective withdrawal.

Conclusion. Self-generation in a ring resonator can be performed by withdrawing no more than one pair of IDTs for 10 or more periods. In this case, the withdrawal of IDTs should be uniform. With an increase in the number of IDT withdrawals, the geometry of the ring resonator is violated, and the wave leaves the structure. The presence of a shared bus keeps the surface acoustic wave inside the IDT structure, and the narrowing of the periods towards the inner part of the structure makes it possible to improve the frequency characteristics of the ring resonator on surface acoustic waves.

Keywords: microelectromechanical systems, micromechanical accelerometer, sensitive element, surface acoustic waves, interdigitated transducer, anisotropic material, isotropic material, topology

For citation: Shevchenko S. Yu., Mikhailenko D. A., Nyamweru B. Optimizing the Design of Surface-Acoustic-Wave Ring Resonator by Changing the Interdigitated Transducer Topology. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 6, pp. 51–62. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-6-51-62

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

Acknowledgements. This research was funded by the Committee for Science and Higher Education of St. Petersburg within the framework of a grant in the form of subsidies in the field of scientific and scientific-technical activities.

Submitted 11.11.2021; accepted 13.12.2021; published online 29.12.2021

Введение. В настоящее время одним из главных компонентов большинства современных устройств можно назвать микроэлектромеханические системы (МЭМС), которые сочетают в себе минимальные габариты благодаря размещению элементов на одной плате, низкую стоимость за счет массового производства и низкое потребление энергии на уровне единиц ватт. Также МЭМС имеют высокую частоту измерений. За счет применяемых технологий при изготовлении микроэлектроники размер датчиков

можно уменьшать до спичечной головки, но при этом точность и механическая прочность будут снижаться. Последние 2 параметра, считающиеся недостатками, не являются определяющими в потребительском сегменте, что и позволило МЭМС получить широкое распространение в медицине [1], спорте [2], игровой индустрии [3] и особенно в портативной технике [4–6].

В начале XXI в. акселерометры также были реализованы как МЭМС, что позволило им получить

распространение в таких устройствах, как смартфон [7], геймпад [8], контроллер движения [9], жесткий диск [10], видеорегиcтpатор автомобиля [11], и во многих др. Классические микроакселерометры имеют такие же недостатки, как и все МЭМС-датчики – малую точность и механическую прочность. Малая прочность связана с низкой прочностной характеристикой торсионов, что приводит к их неспособности выдерживать перегрузки, вызванные чрезмерным ускорением и/или внешними механическими силами.

Датчики на основе поверхностных акустических волн (ПАВ), хотя и менее развиты на сегодняшний день, но представляют собой разумную и, в значительной степени, многообещающую альтернативу. Датчики ПАВ в своей конструкции не имеют торсионов, а чувствительный элемент жестко закреплен на корпусе датчика, что позволяет выдерживать значительно большие перегрузки по сравнению с классическими МЭМС. Последние разработки на основе монокристаллических конструкций характеризуются относительно высокой стабильностью параметров и низким энергопотреблением (0.5...1 Вт) [12].

Вариации конструкции датчиков, основанных на воздействии акустических волн, практически безграничны. Таким образом, можно построить датчики на поверхностных акустических волнах, чувствительные к слабым постоянным сигналам [13], а также датчики углового движения на объемных акустических волнах [14] из-за поляризации волн.

В настоящее время акселерометры на ПАВ создаются малым количеством компаний [15], а наибольшее распространение получили датчики на ПАВ как системы для анализа пара и газа [16], контроля температуры [17] и определения давления [18]. Основные исследования в области акселеро-

метров на ПАВ и схожих датчиков направлены на поиск новых пьезоэлектрических материалов для консоли чувствительных элементов (ЧЭ), которые могли бы преодолеть типичные ограничения существующих материалов (SiO_2 , LiNbO_3).

Исследования авторов статьи направлены на совершенствование конструкций чувствительного элемента прямоугольной и треугольной форм, которым сейчас присущ недостаток в виде одностороннего крепления консоли пьезоэлектрического элемента к корпусу датчика, вследствие чего нагрузка распределяется неравномерно. Ранее авторы предложили конструкцию микромеханического акселерометра на ПАВ на основе чувствительного элемента кольцевой формы [19], а также рассмотрели оптимальное крепление консоли в корпусе, материал для перспективной конструкции ЧЭ в соответствии с его частотными характеристиками и оценили потенциальное влияние внешних воздействий, таких, как чрезмерное ускорение и температура на ЧЭ [20]. В предыдущей работе также была выявлена широкая полоса пропускания, поэтому в данной работе рассматривается оптимизация предложенной ранее конструкции и уменьшение ширины полосы пропускания с уменьшением боковых лепестков мод. Работа проводилась с использованием компьютерного моделирования в программном пакете COMSOL Multiphysics 5.5.

Конструкция чувствительного элемента. Общий вид чувствительного элемента мембраны соответствует ЧЭ из [20] с креплением консоли к корпусу с помощью силиконового клея (рис. 1). Модель была построена в программе AutoCAD с последующим импортом модели в COMSOL Multiphysics 5.5 из-за ограниченных возможностей редактора САПР последнего. Резонатор состоит из двух кольцевых

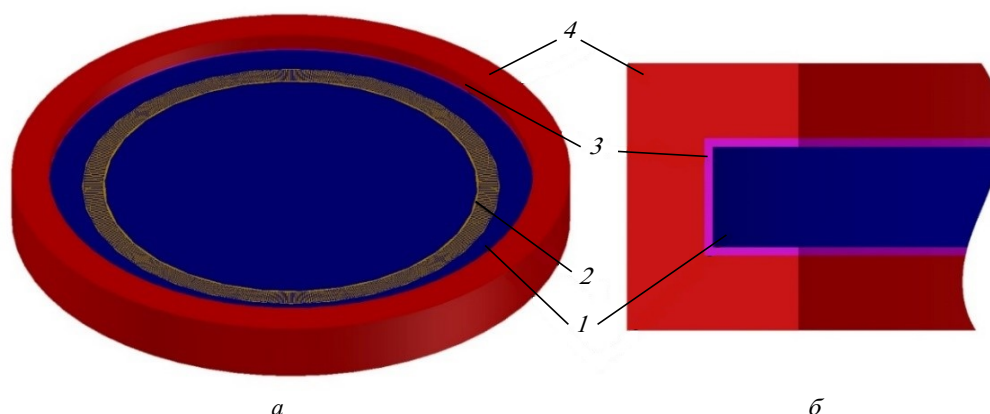


Рис. 1. Конструкция чувствительного элемента на поверхностных акустических волнах: а – общий вид; б – вид спереди (1 – консоль; 2 – встречно-штыревой преобразователь; 3 – силиконовый клей; 4 – корпус)

Fig. 1. The design of the sensitive element based on surface acoustic waves: а – general view; б – front view (1 – console; 2 – inter-digital transducer; 3 – silicone adhesive; 4 – case)

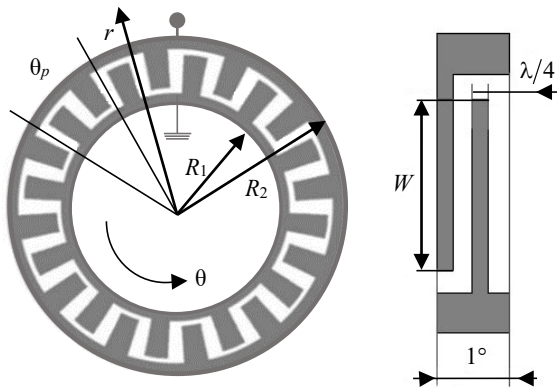


Рис. 2. Встречно-штыревой преобразователь
 Fig. 2. Inter-digital transducer

встречно-штыревых преобразователей (1) и пьезоэлектрического кристалла, расположенного между преобразователями (2). Вся конструкция ограничена как по глубине, так и по радиусу демпфирующей средой для подавления паразитных отражений волн от внешних границ.

Общая схема встречно-штыревого преобразователя (ВШП) представлена на рис. 2. В работе используются следующие параметры ВШП: длина периода ВШП в центре кольца составляет 19.2 мкм при угловом периоде преобразователя $p = 1$ и высоте $h = 0.2$ мкм. Принимая это значение за длину волны (λ) и учитывая, что ПАВ затухают на глубине около 3λ , высота структуры будет 7λ , или 134.4 мкм. Вылет консоли составляет 1500 мкм. Габаритные параметры чувствительного элемента представлены в табл. 1.

Свойства ВШП полностью определяются их конструктивными характеристиками, а именно геометрией электродов (переменная ширина электродов, аподизация – изменение взаимного перекрытия соседних электродов на длине ВШП по какому-либо функциональному закону) и их расположением (апертура, периодичность, наклон, число электродов). Также взаимное расположение

Табл. 1. Габаритные параметры чувствительного элемента
 Table 1. Dimensional parameters of the sensitive element

Параметр	Значение
Угловой период θ_p	1°
Внутренний радиус R_1	1000 мкм
Внешний радиус R_2	1120 мкм
Высота ВШП h	0.2 мкм
Апертура W	12 мкм
Радиус консоли R_0	1500 мкм
Высота консоли h_0	134.3 мкм

преобразователей определяет время задержки сигнала и относительную неравномерность фазовой характеристики, возможность коррекции фронта (например, пленочными волноводами) и ответвление энергии ПАВ в соседние каналы. Существенно влияет и способ подключения к общим потенциальным шинам (емкостный, оптический, многофазный, с делением потенциала).

Простой ВШП имеет постоянные пространственный период и длину электродов по апертуре и АЧХ вида $\sin x/x$ с низкой избирательностью. Для повышения селективных требований можно воспользоваться различными методами взвешивания (амплитудное или аподизация) ВШП, которые достигаются изменением, например, периода, длины, ширины электродов.

Поскольку полоса пропускания ВШП обратно пропорциональна числу его электродов, то в эквидистантном аподизованном ВШП сильно возрастают отражения, которые можно снизить, применив структуру ВШП с расщепленными электродами, с прореженными электродами или с изломом электродов.

Преобразователь является частотно-избирательным элементом, поэтому его амплитудно-частотная характеристика имеет максимум на частоте акустического синхронизма f_0 и описывается выражением

$$H(f) = NA \frac{\sin\left(\frac{\pi N(f-f_0)}{f_0}\right)}{\pi N \frac{f-f_0}{f_0}},$$

где N – число пар электродов; A – амплитуда волны; f_0 – рабочая частота преобразователя; f – текущее значение частоты преобразователя. Частота акустического синхронизма определяется как

$$f_0 = v_{\text{п}} / (2h_{\text{эл}}),$$

где $v_{\text{п}}$ – скорость распространения ПАВ в материале; $h_{\text{эл}} = \lambda_{\text{п}}/2$; $\lambda_{\text{п}}$ – расстояние между центрами пар электродов.

Полоса пропускания характеризуется числом пар электродов N и определяется по уровню

$$0.707H(f_0) : \Delta f = 1/T = v_{\text{п}}/L = v_{\text{п}}/(N\lambda_{\text{п}}) = f_0/N,$$

где T – длительность выходного импульса; L – расстояние между близлежащими краями входного и выходного преобразователей.

Напылить резонатор в виде кольца на сегодняшний день технологически сложно, поэтому в работе рассматривается возможность сегментации преобразователя. Качество и метод изготовления прототипов во многом определяют характеристики устройств с ПАВ. Наиболее распространенным прецизионным методом нанесения топологии на пьезоэлектрическую подложку является фотолитография – метод создания фрагментов на поверхности из-за чувствительности покрытий к интенсивному энергетическому излучению, позволяющий воссоздать определенное взаимное расположение и форму заданных элементов.

Существует 3 основных типа фотолитографии: контактная, проекционная и безмасочная лазерная (электронный луч).

Контактная фотолитография используется для прототипирования и производства мелкосерийной продукции. Для этого типа используется более дешевое и простое оборудование, чем для других видов фотолитографии. В процессе работы устройства специальный шаблон плотно прилегает к полупроводниковой пластине, на ее поверхность предварительно наносится фоторезист. Ртутная или светодиодная лампа освещает изображение топологии, а ее длина волны отвечает за минимальные параметры образуемого фрагмента, расположенного на пластине. Современные прецизионные показатели оборудования контактной фотолитографии составляют 0.5...1.0 мкм. Этот тип имеет ряд недостатков: ограниченное количество циклов (не более 70) и снижение качества продукта при каждом последующем выпуске.

Для уменьшения некачественной продукции из-за контакта был разработан метод литографии с микрозазором, суть которого заключается в том, что фотографический шаблон "отодвигается" от самой подложки на несколько микрометров. Это позволяет полностью обработать пластину за один проход. Данный метод получил широкое

распространение в серийном производстве изделий с точностью около 1 мкм.

При изготовлении полупроводниковых приборов применяется проекционная фотолитография, что исключает использование контактного метода, так как минимальные параметры топологического фрагмента оборудования (до 20 нм) намного меньше разрешающей способности машин для контактного способа производства. Основное преимущество метода – отсутствие контакта фотошаблона и фоторезиста на пластине. Таким образом, шаблон не повреждается и может служить долго. Также возможно достичь минимального разрешения 20 нм.

Для лазерной фотолитографии без масок используются источники сфокусированного лазерного излучения или электронный столб, генерирующий сфокусированный электронный луч, для освещения фоторезиста и создания желаемой топологии (изображения) на подложке или фотомаске. Сфокусированный лазерный луч освещает изображение топологии, а его длина волны отвечает за минимальные параметры образуемого фрагмента, расположенного на пластине.

Оборудование для контактной фотолитографии значительно дешевле, что делает его рентабельным для использования в научно-исследовательских лабораториях, университетах, исследовательских центрах и на небольших предприятиях.

Основной способ смены ВШП в работе – удаление определенного количества электродов из конструкции с заменой общей шины. Отсутствие общей шины, согласно теории ПАВ, приводит к самогенерации волны.

Метод взвешивания, при котором не изменяется степень перекрытия электродов разной полярности, называется методом селективного удаления (рис. 3). Принцип состоит в том, чтобы выборочно исключить некоторые источники поверхностно-активных веществ из исходной не-

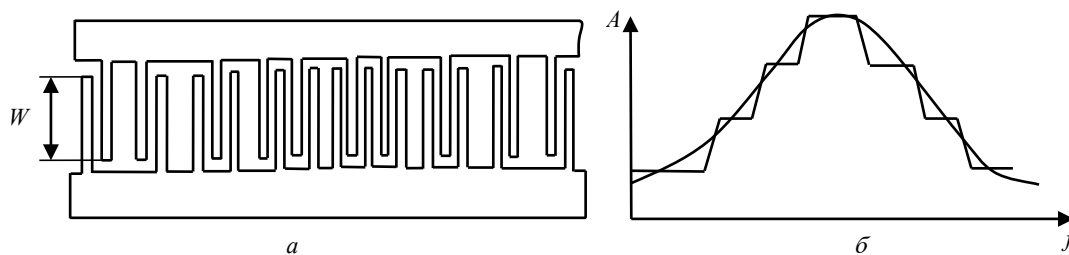


Рис. 3. ВШП с весовой обработкой с удалением электродов: а – весовая обработка с выборочным снятием электродов; б – амплитуда весовой функции

Fig. 3. IDT following weight processing and electrode withdrawal: а – weight processing with selective electrode withdrawal; б – amplitude of the weight function

Табл. 2. Характеристики пьезоэлектрических материалов и силиконового клея

Table 2. Characteristics of piezoelectric materials and silicone adhesive

Параметр	Срез YX-128° LiNbO ₃	Силиконовый клей
Скорость распространения волны, м/с	3961	–
Плотность, кг/м ³	4640	1700
Модуль упругости, Па	170·10 ⁹	25·10 ⁶
Коэффициент Пуассона	0.25	0.48

Табл. 3. Матричный вид тензора упругости 4-го ранга среза YX-128⁰ ниобата лития, ГПа

Table 3. Matrix form of the tensor of elasticity of the 4th rank of the cut YX/128⁰ of lithium niobate, GPa

	$C_{E_{1n}}$	$C_{E_{2n}}$	$C_{E_{3n}}$	$C_{E_{4n}}$	$C_{E_{5n}}$	$C_{E_{6n}}$
$C_{E_{m1}}$	202.900	69.985	57.842	12.846	0	0
$C_{E_{m2}}$	69.985	193.970	90.330	9.312	0	0
$C_{E_{m3}}$	57.842	90.330	221.160	8.003	0	0
$C_{E_{m4}}$	12.846	9.312	8.003	75.323	0	0
$C_{E_{m5}}$	0	0	0	0	56.860	-5.092
$C_{E_{m6}}$	0	0	0	0	-5.092	77.919

Табл. 4. Матрица связи среза YX/128⁰ ниобата лития, См/м²

Table 4. Coupling matrix cut YX/128⁰ of lithium niobate, S/m²

	e_{1n}	e_{2n}	e_{3n}	e_{4n}	e_{5n}	e_{6n}
e_{m1}	0	0	0	0	4.4724	0.2788
e_{m2}	-1.8805	4.4467	-1.5221	0.0674	0	0
e_{m3}	1.7149	-2.6921	2.3136	0.6338	0	0

Табл. 5. Матрица относительной диэлектрической проницаемости среза YX/128⁰ ниобата лития

Table 5. Cut YX/128⁰ of lithium niobate relative permittivity matrix

	$\epsilon_{rS 1n}$	$\epsilon_{rS 2n}$	$\epsilon_{rS 3n}$
$\epsilon_{rS m1}$	43.6000	0	0
$\epsilon_{rS m2}$	0	38.1270	-7.0055

аподизированной ВШП.

Из-за дополнительной дискретизации импульсной характеристики и интерференции волн от разных групп электродов в АЧХ преобразователя появляются ангармонические характеристики, уровень которых вблизи полосы пропускания составляет 35...40 дБ и уменьшается до 15...20 дБ с ростом частоты. Взвешивание выборочным удалением электродов более точно аппроксимирует за-

данный импульсный отклик при увеличении количества электродов, поэтому метод подходит для реализации узких полос пропускания.

Характеристики используемых материалов представлены в табл. 2–5. Для данной работы был выбран материал ниобат лития, так как он имеет наибольшую температурную стабильность по сравнению с другими материалами, представленными в [20]. Также чувствительный элемент с подложкой из

ниобата лития проще в изготовлении по сравнению с нитридом алюминия, так как нитрид алюминия является пленочным материалом и должен наноситься на подложку, например, кварца.

Компьютерное моделирование. На рис. 4–12 представлены виды ВШП, характеристики которых моделировались в данной работе.

Как видно из рис. 4–12, основным методом модернизации конструкции является селективное изъятие ВШП. Также при моделировании одного

из видов ВШП (рис. 4) была предложена отличная от других конструкция ВШП с сохранением прямоугольности штырей и периода 19.2 мкм на внешнем радиусе конструкции.

Моделирование частотных характеристик проводилось в COMSOL Multiphysics для консоли из пьезоэлектрического материала LiNbO_3 в диапазоне от 190 до 230 МГц. На рис. 13–21 представлены результаты моделирования для всех видов ВШП, указанных на рис. 4–12.

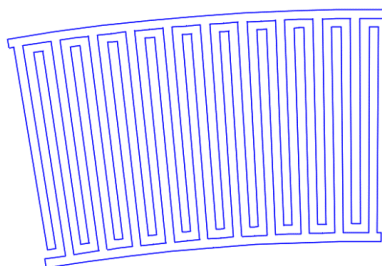


Рис. 4. Первый вид ВШП. Первоначальный вид ВШП. Все штыри конические. На всех участках от внешнего до внутреннего радиусов расстояние между штырями $\pi/4$

Fig. 4. First type of IDT. Initial view of IDT. All pins are tapered. In all areas from the outer to the inner radii, equal distances ($\pi/4$) are observed between the pins

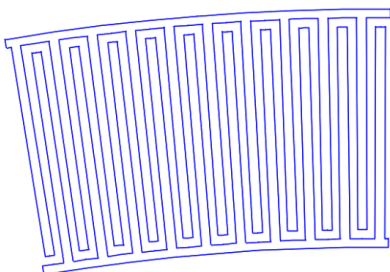


Рис. 5. Второй вид ВШП. Штыри прямоугольные. На внешнем радиусе период составляет 19.2 мкм

Fig. 5. The second type of IDT. Rectangular pins. At the outer radius, the period is 19.2 μm

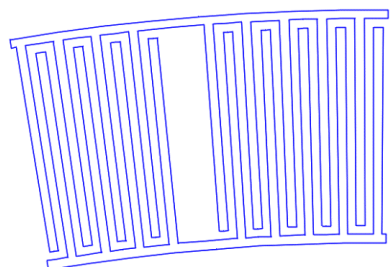


Рис. 6. Третий вид ВШП. Селективное удаление. Каждая десятая пара штырей удаляется, но есть общая шина

Fig. 6. The third type of IDT. Selective withdrawal. Every tenth pair of pins is withdrawn. A shared bus

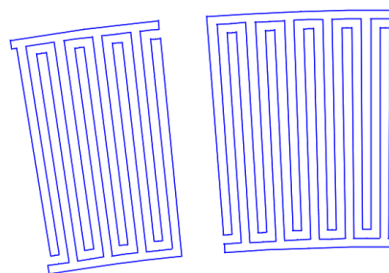


Рис. 7. Четвертый вид ВШП. Селективное удаление. Каждая десятая пара штырей удаляется. Общая шина отсутствует

Fig. 7. The fourth type of IDT. Selective withdrawal. Every tenth pair of pins is withdrawn. No shared bus

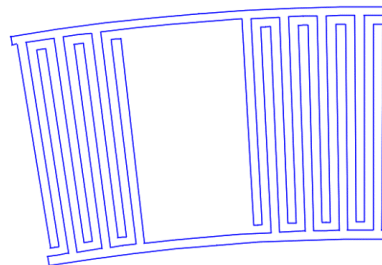


Рис. 8. пятый вид ВШП. Селективное удаление. Через каждые 10 пар штырей удаляются 3 пары штырей. Присутствует общая шина

Fig. 8. The fifth type of IDT. Selective withdrawal. Every ten pairs of pins, 3 pairs of pins are withdrawn. A shared bus

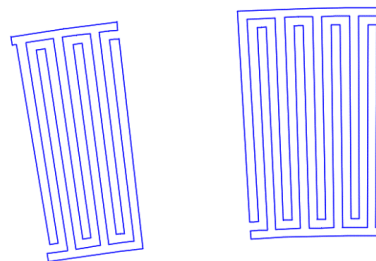


Рис. 9. Шестой вид ВШП. Селективное удаление. Через каждые 10 пар штырей удаляются 3 пары штырей. Отсутствует общая шина

Fig. 9. Sixth type of IDT. Selective withdrawal. Every ten pairs of pins, 3 pairs of pins are withdrawn. No shared bus

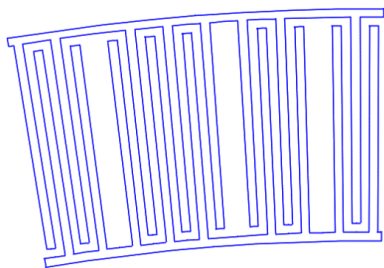


Рис. 10. Седьмой вид ВШП. Селективное удаление. Через каждые 3–4 пары штырей удаляется один штырь из пары. Присутствует общая шина

Fig. 10. The seventh type of IDT. Selective withdrawal. Every 3–4 pairs of pins, one pin is withdrawn from the pair. A shared bus

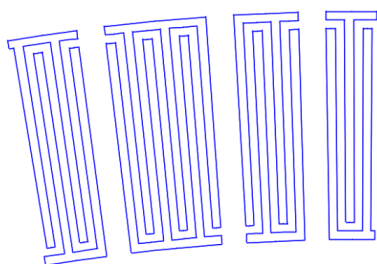


Рис. 11. Восьмой вид ВШП. Селективное удаление. Через каждые 3–4 пары штырей удаляется один штырь из пары. Общая шина отсутствует

Fig. 11. The eighth type of IDT: selective withdrawal. Every 3–4 pairs of pins, one pin is withdrawn from the pair. No shared bus

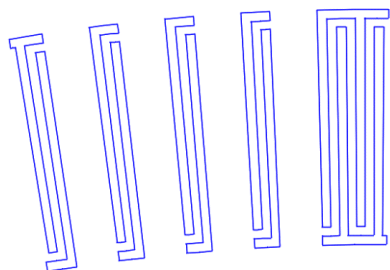


Рис. 12. Девятый вид ВШП. Селективное удаление. Каждая вторая пара штырей удаляется. Отсутствует общая шина.

Fig. 12. Ninth type of IDT. Selective withdrawal. Every other pair of pins is withdrawn. No shared bus

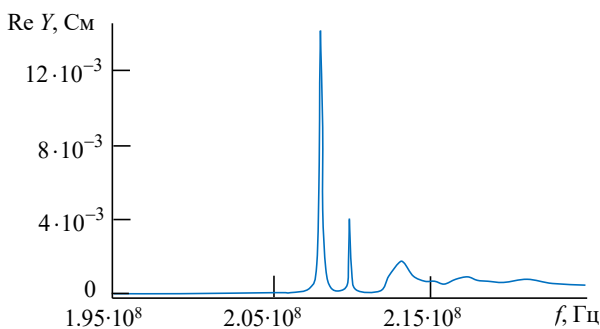


Рис. 13. Реальная составляющая комплексной проводимости для первого типа ВШП

Fig. 13. Real component of the complex conductivity for the first type of IDT

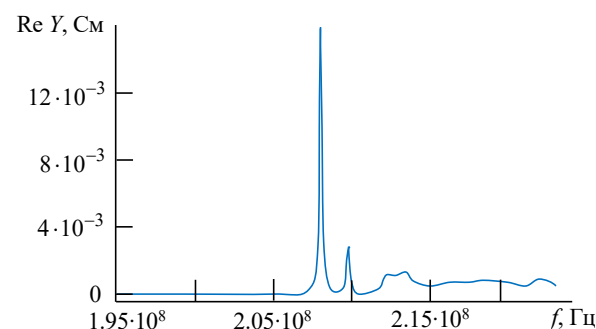


Рис. 14. Реальная составляющая комплексной проводимости для второго типа ВШП

Fig. 14. Real component of the complex conductivity for the second type of IDT

Как видно из графиков, частота резонанса во всех случаях различна и имеет разброс в диапазоне 207.9...211.4 МГц, поскольку поверхность консоли имеет различный процент металлизации.

Из анализа полученных данных следует, что наиболее эффективной структурой является ВШП с прямоугольными штырями без селективного изъятия: значение максимума первой моды (0.01592 См) превосходит более чем в 5 раз значение максимума второй моды (0.003 См), что соответствует правилу трех сигм. Полоса пропускания составляет 107 кГц, что является достаточно малым значением по отношению к данным, полученным в [18]. Полосы пропускания и максимальное значение первой моды для всех видов ВШП представлены в табл. 6.

Следующим по эффективности типом ВШП является ВШП с радиальным распределением штырей без селективного изъятия. Отношение максимума первой моды ко второй равно 3.5.

Использование третьего и четвертого видов ВШП возможно при создании чувствительного элемента, поскольку отношение максимальных значений первой моды ко второй равно или больше трех и первая мода значительно превосходит сигнал, полученный объемными акустическими волнами.

Пятый и седьмой виды ВШП не рекомендуются к использованию, поскольку максимальные значения первой и второй мод схожи, что негативно скажется на определении выходного сигнала при некоторых значениях ускорения.

Шестой, восьмой и девятый тип ВШП не рекомендуется использовать из-за малого полезного сигнала по отношению к сигналу от объемных акустических волн.

Сравнивая схожие типы ВШП (3–4, 5–6, 7–8), можно заключить, что общая шина в кольцевом резонаторе позволяет сохранить больше энергии и получить больший сигнал.

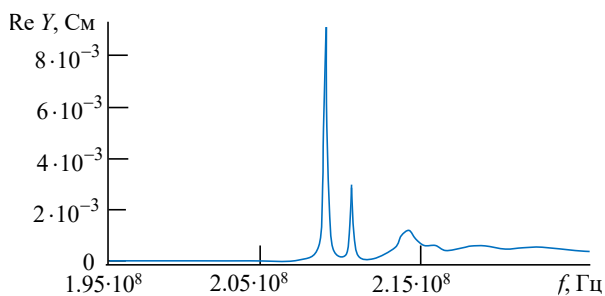


Рис. 15. Реальная составляющая комплексной проводимости для третьего типа ВШП

Fig. 15. Real component of the complex conductivity for the third type of IDT

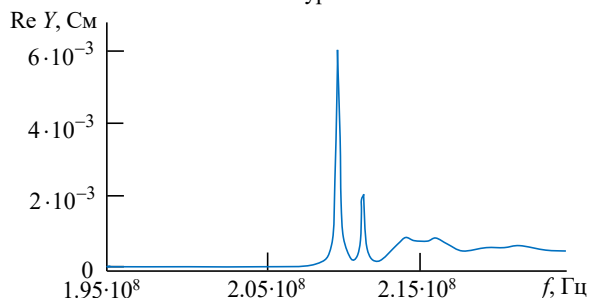


Рис. 16. Реальная составляющая комплексной проводимости для четвертого типа ВШП

Fig. 16. Real component of the complex conductivity for the fourth type of IDT

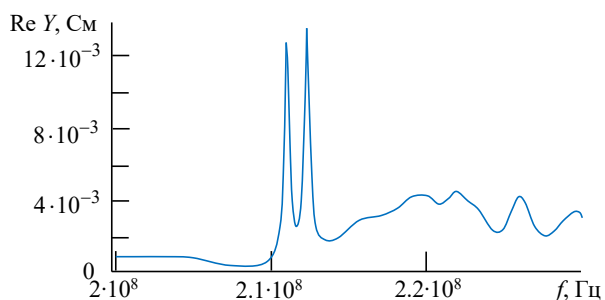


Рис. 17. Реальная составляющая комплексной проводимости для пятого типа ВШП

Fig. 17. Real component of the complex conductivity for the fifth type of IDT

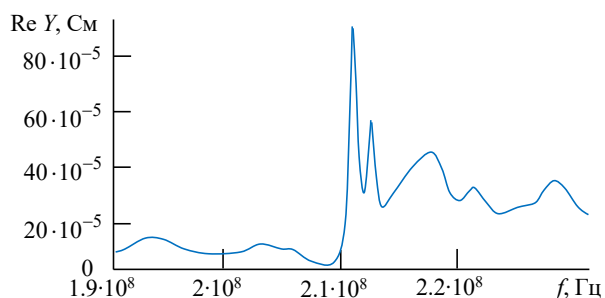


Рис. 18. Реальная составляющая комплексной проводимости для шестого типа ВШП

Fig. 18. Real component of the complex conductivity for the sixth type of IDT

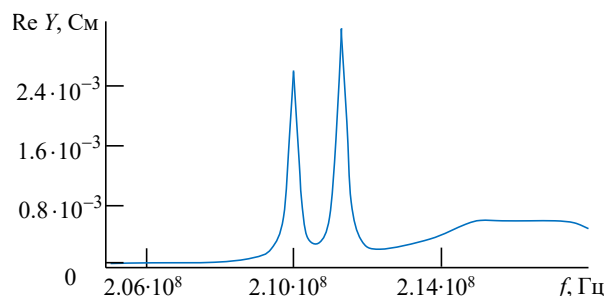


Рис. 19. Реальная составляющая комплексной проводимости для седьмого типа ВШП

Fig. 19. Real component of the complex conductivity for the seventh type of IDT

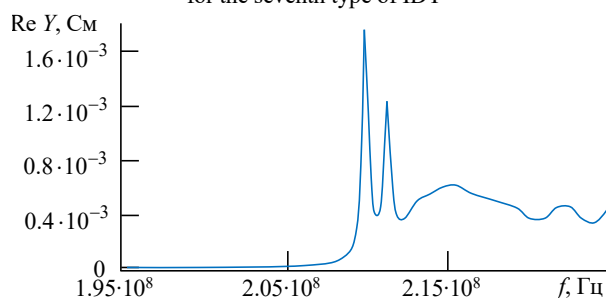


Рис. 20. Реальная составляющая комплексной проводимости для восьмого типа ВШП

Fig. 20. Real component of the complex conductivity for the eighth type of IDT

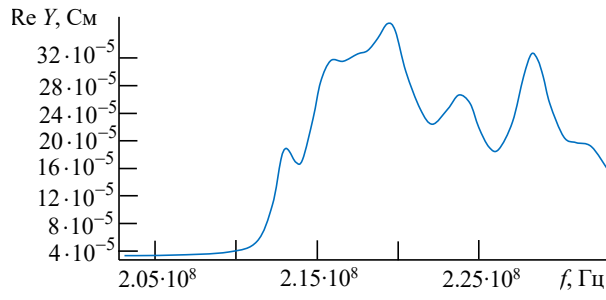


Рис. 21. Реальная составляющая комплексной проводимости для девятого типа ВШП

Fig. 21. Real component of the complex conductivity for the ninth type of IDT

Табл. 6. Максимальное значение первой моды и полоса пропускания по результатам моделирования

Table 6. Maximum value of the first harmonic and bandwidth according to the simulation results

Вид ВШП	Максимальное значение первой моды, См	Значение полосы пропускания, кГц
1	0.01420	169
2	0.01592	107
3	0.00906	138
4	0.00605	196
5	0.00132	310
6	0.00091	520
7	0.00320	304
8	0.00173	345
9	–	–

Вывод. Автогенерация в кольцевом резонаторе может быть выполнена при изъятии не более одной пары ВШП на 10 и более периодов. При этом изъятие ВШП должно быть равномерным. При увеличении количества изъятых ВШП нарушается геометрия кольцевого резонатора и волна покидает конструкцию.

Наличие общей шины позволяет удерживать

поверхностную акустическую волну внутри конструкции ВШП.

Сужение периодов к внутренней части конструкции позволяет улучшить частотные характеристики кольцевого резонатора на поверхностных акустических волнах, а именно:

- увеличить соотношение максимальных значений первой моды ко второй;
- уменьшить полосу пропускания.

Список литературы

1. Design and analysis of a capacitive MEMS accelerometer as a wearable sensor in identifying low-frequency vibration profiles / M. Preeti, K. Guha, K. L. Baishnab, A. S. C. S. Sastry; ed. by G. Dutta, A. Biswas, A. Chakrabarti // *Modern Techniques in Biosensors: Detection Methods and Commercial Aspects*. Singapore: Springer, 2021. P. 37–61. doi: 10.1007/978-981-15-9612-4_2
2. Tang W., Chen C. Motion recognition system of table tennis players based on MEMS sensor // *Multimedia Technology and Enhanced Learning, ICMTTEL 2021* / ed. by W. Fu, Y. Xu, S.-H. Wang, Y. Zhang. Cham.: Springer, 2021. P. 128–141. doi: 10.1007/978-3-030-82565-2_11
3. Laser beam scanning based AR-display applying resonant 2D MEMS mirrors / O. Petrak, F. Schwarz, L. Pohl, M. Reher, C. Janicke, J. Przytarski, F. Senger, J. Albers, T. Giese, L. Ratzmann, P. Blicharski, S. Marauska, T. Wantoch, U. Hofmann // *Proc. SPIE*. 2021. Vol. 11765. P. 1–18. doi: 10.1117/12.2579695
4. Single-pixel MEMS imaging systems / G. Zhou, Z. H. Lim, Y. Qi, G. Zhou // *Micromachines*. 2020. Vol. 11, № 2. P. 219. doi: 10.3390/mi11020219
5. Kourani A., Yang Y., Gong S. A Ku-band oscillator utilizing overtone lithium niobate RF-MEMS resonator for 5G // *IEEE Microwave and Wireless Components Lett.* 2020. Vol. 30, № 7. P. 681–684. doi: 10.1109/LMWC.2020.2996961
6. A MEMS-based multi-parameter integrated chip and its portable system for water quality detection / Z. Wu, J. Wang, C. Bian, J. Tong, S. Xia // *Micromachines*. 2020. Vol. 11, № 2. P. 63. doi: 10.3390/mi11010063
7. iPhone 12 Pro and iPhone 12 Pro Max – Technical Specifications. URL: <https://www.apple.com/uk/iphone-12-pro/specs/> (дата обращения 07.11.2021)
8. DualSense wireless controller. The innovative new controller for PS5. URL: <https://www.playstation.com/en-gb/accessories/dualsense-wireless-controller/> (дата обращения 07.11.2021)
9. PlayStation VR. Technical specifications. URL: <https://www.playstation.com/en-gb/ps-vr/tech-specs/> (дата обращения 07.11.2021)
10. Momentus 7200.2. Product Overview // Seagate. URL: https://www.seagate.com/docs/pdf/marketing/po_momentus_7200_2.pdf (дата обращения 07.11.2021)
11. Car DVR camera system: PROTECT 802 (2 channels, GPS, accelerometer). URL: https://www.dipolnet.com/car_dvr_camera_system_prote
- ct_802_2_channels_gps_accelerometer__m70802.htm (дата обращения 07.11.2021)
12. Morgan D., Paige E. G. S. Propagation effects and materials // *Surface Acoustic Wave Filters*. 2nd ed. Oxford: Academic Press, 2007. P. 87–113. doi: 10.1016/B978-0-12-372537-0.X5000-6
13. Physical principles of a piezo accelerometer sensitive to a nearly constant signal / V. Gupalov, A. Kukaev, S. Shevchenko, E. Shalymov, V. Venediktov // *Sensors*. 2018. Vol. 18, № 10, 3258. P. 1–5. doi: 10.3390/s18103258
14. The effect of a rotating medium on bulk acoustic wave polarization: From theoretical considerations to perspective angular motion sensor design / Y. Durukan, M. Shevelko, A. Peregudov, E. Popkova, S. Shevchenko // *Sensors*. 2020. Vol. 20, № 9, 2487. P. 1–11. doi: <https://doi.org/10.3390/s20092487>
15. Product Finder // PCB Piezotronics. URL: <https://www.pcb.com/products/product-finder?tx=15> (дата обращения 07.11.2021)
16. Constantinoiu I., Viespe C. Development of Pd/TiO₂ porous layers by pulsed laser deposition for surface acoustic wave H₂ gas sensor // *Nanomaterials*. 2020. Vol. 10, № 4, 760. P. 1–10. doi: 10.3390/nano10040760
17. Optimization of SAW devices with LGS/Pt structure for sensing temperature / X. Li, W. Wang, S. Fan, Y. Yin, Y. Jia, Y. Liang, M. Liu // *Sensors*. 2020. Vol. 20, № 9, 2441. P. 1–13. doi: 10.3390/s20092441
18. Water Pressure Monitoring Using a Temperature-compensated WP-SAW pressure sensor / Z. Tang, W. Wu, J. Gao, P. Yang, J. Luo, C. Fu // *IEEE 18th Intern. Conf. on Industrial Informatics (INDIN)*, Warwick, United Kingdom, 20–23 July 2020. Piscataway: IEEE, 2020. P. 354–357. doi: 10.1109/INDIN45582.2020.9442222
19. Shevchenko S. Y., Khivrich M. A., Markelov M. A. Ring-shaped sensitive element design for acceleration measurements: overcoming the limitations of angular-shaped sensors // *Electronics*. 2019. Vol. 8, 141. P. 1–12. doi: 10.3390/electronics8020141
20. Shevchenko S. Y., Mikhailenko D. A., Markelov O. A. Comparison of AlN vs. SiO₂/LiNbO₃ membranes as sensitive elements for the SAW-based acceleration measurement: Overcoming the anisotropy effects // *Sensors*. 2020. Vol. 20, № 2, 464. P. 1–13. doi: 10.3390/s20020464

Информация об авторах

Шевченко Сергей Юрьевич – кандидат технических наук (2007), доцент (2013) кафедры ЛИНС Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 80 научных публикаций. Сфера научных интересов – микросенсоры навигационных систем. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: syshevchenko@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4047-7757>

Михайленко Денис Андреевич – аспирант кафедры ЛИНС Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор трех научных публикаций. Сфера научных интересов – микромеханические системы навигации и компьютерное моделирование физических процессов. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: kratosloaded@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8274-1475>

Ньямверу Бонифаций – студент Департамента правовой и промышленной метрологии Колледжа бизнес-образования СВЕ. Сфера научных интересов – оптические метрологические системы. Адрес: Колледж бизнес-образования СВЕ, ул. Биби-Тити-Мохаммед, Дар-эс-Салам, 1968, Танзания
E-mail: bonifacenyamweru23@gmail.com

References

1. Preeti M., Guha K., Baishnab K. L., Sastry A. S. C. S. Design and Analysis of a Capacitive MEMS Accelerometer as a Wearable Sensor in Identifying Low-Frequency Vibration Profiles. *Modern Techniques in Biosensors: Detection Methods and Commercial Aspects*. Ed. by G. Dutta, A. Biswas, A. Chakrabarti. Singapore, Springer, 2021, pp. 37–61. doi: 10.1007/978-981-15-9612-4_2
2. Tang W., Chen C. Motion Recognition System of Table Tennis Players Based on MEMS Sensor. *Multimedia Technology and Enhanced Learning. ICMTEL 2021*. Ed. by W. Fu, Y. Xu, S.-H. Wang, Y. Zhang. Cham, Springer, 2021, pp. 128–141. doi: 10.1007/978-3-030-82565-2_11
3. Petrak O., Schwarz F., Pohl L., Reher M., Janicke C., Przytarski J., Senger F., Albers J., Giese T., Ratzmann L., Blicharski P., Marauska S., Wantoch T., Hofmann U. Laser Beam Scanning Based AR-Display Applying Resonant 2D MEMS Mirrors. *Proc. SPIE*. 2021, vol. 11765, pp. 1–18. doi: 10.1117/12.2579695
4. Zhou G., Lim Z. H., Qi Y., Zhou G. Single-Pixel MEMS Imaging Systems. *Micromachines*. 2020, vol. 11, no. 2, p. 219. doi: 10.3390/mi11020219
5. Kourani A., Yang Y., Gong S. A Ku-Band Oscillator Utilizing Overtone Lithium Niobate RF-MEMS Resonator for 5G. *IEEE Microwave and Wireless Components Lett.* 2020, vol. 30, no. 7, pp. 681–684. doi: 10.1109/LMWC.2020.2996961
6. Wu Z., Wang J., Bian C., Tong J., Xia S. A MEMS-Based Multi-Parameter Integrated Chip and Its Portable System for Water Quality Detection. *Micromachines*. 2020, vol. 11, no. 2, p. 63. doi: 10.3390/mi11010063
7. iPhone 12 Pro and iPhone 12 Pro Max – Technical Specifications. Available at: <https://www.apple.com/uk/iphone-12-pro/specs/> (accessed 07.11.2021)
8. DualSense wireless controller. The innovative new controller for PS5. Available at: <https://www.playstation.com/en-gb/accessories/dualsense-wireless-controller/> (accessed 07.11.2021)
9. PlayStation VR. Technical Specifications. Available at: <https://www.playstation.com/en-gb/ps-vr/tech-specs/> (accessed 07.11.2021)
10. Momentus 7200.2. Product Overview. Available at: https://www.seagate.com/docs/pdf/marketing/momentus_7200_2.pdf (accessed 07.11.2021)
11. Car DVR camera system: PROTECT 802 (2 channels, GPS, accelerometer). Available at: https://www.dipolnet.com/car_dvr_camera_system_protect_802_2_channels_gps_accelerometer_M70802.htm (accessed 07.11.2021)
12. Morgan D., Paige E. G. S. Propagation Effects and Materials. *Surface Acoustic Wave Filters*. 2nd ed. Oxford, Academic Press, 2007, pp. 87–113. doi: 10.1016/B978-0-12-372537-0.X5000-6
13. Gupalov V., Kukaev A., Shevchenko S., Shalymov E., Venediktov V. Physical Principles of a Piezo Accelerometer Sensitive to a Nearly Constant Signal. *Sensors*. 2018, vol. 18, no. 10, 3258, pp. 1–5. doi: 10.3390/s18103258
14. Durukan Y., Shevelko M., Peregudov A., Popkova E., Shevchenko S. The Effect of a Rotating Medium on Bulk Acoustic Wave Polarization: From Theoretical Considerations to Perspective Angular Motion Sensor Design. *Sensors*. 2020, vol. 20, no. 9, 2487, pp. 1–11. doi: <https://doi.org/10.3390/s20092487>
15. Product Finder. PCB Piezotronics. Available at: <https://www.pcb.com/products/product-finder?tx=15> (accessed 07.11.2021)
16. Constantinoiu I., Viespe C. Development of Pd/TiO₂ Porous Layers by Pulsed Laser Deposition for

Surface Acoustic Wave H₂ Gas Sensor. *Nanomaterials*. 2020, vol. 10, no. 4, 760, pp. 1–10. doi: 10.3390/nano10040760

17. Li X., Wang W., Fan S., Yin Y., Jia Y., Liang Y., Liu M. Optimization of SAW Devices with LGS/Pt Structure for Sensing Temperature. *Sensors*. 2020, vol. 20, no. 9, 2441, pp. 1–13. doi: 10.3390/s20092441

18. Tang Z., Wu W., Gao J., Yang P., Luo J., Fu C. Water Pressure Monitoring Using a Temperature-Compensated WP-SAW Pressure Sensor. *IEEE 18th Intern. Conf. on Industrial Informatics (INDIN)*. 2020, pp. 354–357. doi: 10.1109/INDIN45582.2020.9442222

19. Shevchenko S. Y., Khivrich M. A., Markelov M. A. Ring-Shaped Sensitive Element Design for Acceleration Measurements: Overcoming the Limitations of Angular-Shaped Sensors. *Electronics*. 2019, vol. 8, 141, pp. 1–12. doi: 10.3390/electronics8020141

20. Shevchenko S. Y., Mikhailenko D. A., Markelov O. A. Comparison of AlN vs. SiO₂/LiNbO₃ Membranes as Sensitive Elements for the SAW-Based Acceleration Measurement: Overcoming the Anisotropy Effects. *Sensors*. 2020, vol. 20, no. 2, 464, pp. 1–13. doi: 10.3390/s20020464

Information about the authors

Sergey Yu. Shevchenko, Cand. Sci. (2007), Associate Professor (2013) of the Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 80 scientific publications. Area of expertise: microsensors of navigation systems.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: syshevchenko@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4047-7757>

Denis A. Mikhailenko, Postgraduate of the Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 3 scientific publications. Area of expertise: micromechanical navigation systems and computer simulation of physical processes.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: kratosloaded@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8274-1475>

Boniface Nyamweru, student at the Department of Legal and Industrial Metrology, College of Business Education CBE. Area of expertise: optical metrology systems.

Address: College of Business Education CBE, Bibi Titi Mohamed St., Dar es Salaam 1968, Tanzania

E-mail: bonifacenyamweru23@gmail.com
