

Оптимальный габаритный параметр кольцевого резонатора на поверхностных акустических волнах

С. Ю. Шевченко✉, Д. А. Михайленко

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

✉ syshevchenko@mail.ru

Аннотация

Введение. В предыдущих работах авторами рассматривались частотные характеристики чувствительных элементов из различных материалов в виде кольцевого резонатора на поверхностных акустических волнах, способы их закрепления в корпусе, влияние внешних факторов на чувствительные элементы и оптимальная топология встречно-штыревого преобразователя кольцевого резонатора. На следующем этапе возникла необходимость исследования зависимости чувствительности и максимально испытываемого ускорения от габаритов чувствительного элемента, а также анализа характеристик изготовленных экспериментальных образцов и сравнения их с результатами моделирования.

Цель работы. Определение оптимальных габаритов чувствительного элемента кольцевого резонатора и подтверждение адекватности моделей сравнением характеристик экспериментальных образцов с данными, полученными в результате компьютерного моделирования.

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

Результаты. Предложено 3 габаритных размера чувствительного элемента кольцевого резонатора: 1500, 3000 и 4500 мкм. При помощи программного обеспечения COMSOL Multiphysics исследованы габаритные размеры чувствительных элементов из ниобата лития: частота резонанса для образца 1500 мкм составила 207.99 МГц, для образца 3000 мкм – 104.10 МГц и для образца 4500 мкм – 68.99 МГц. Было установлено, что максимально испытываемое ускорение для консоли с радиусом 1500 мкм составляет 191 132g, для радиуса 3000 мкм – 84 958g и для радиуса 4500 мкм – 37 514g. Представлены графики зависимости максимального ускорения и чувствительности от отношения радиуса консоли к ее высоте. Подтверждена адекватность модели: частота резонанса для экспериментального образца 1500 мкм составила 218.17 МГц (расхождение с компьютерным моделированием 4.67 %), для образца 3000 мкм – 109.23 МГц (4.69 %) и для образца 4500 мкм – 72.88 МГц (5.34 %).

Заключение. Чувствительность и максимальное выдерживаемое ускорение чувствительного элемента кольцевого резонатора на поверхностных акустических волнах прямо зависит от отношения радиуса консоли к ее высоте, причем чем выше чувствительность, тем ниже ускорение. Для каждого материала данные зависимости уникальны. Размер шины встречно-штыревого преобразователя слабо влияет на частотные характеристики. Ранее представленное компьютерное моделирование удалось подтвердить экспериментальными образцами с расхождением частот резонанса менее, чем 5.5 %.

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы, микромеханический акселерометр, чувствительный элемент, кольцевой резонатор, поверхностные акустические волны, встречно-штыревой преобразователь

Для цитирования: Шевченко С. Ю., Михайленко Д. А. Оптимальный габаритный параметр кольцевого резонатора на поверхностных акустических волнах // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 2. С. 89–100. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-2-89-100

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 12.10.2022; принята к публикации после рецензирования 01.03.2023; опубликована онлайн 28.04.2023



Optimal Overall Dimensions of a Surface Acoustic Waves Ring Resonator

Sergey Yu. Shevchenko✉, Denis A. Mikhailenko

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ syshevchenko@mail.ru

Abstract

Introduction. In previous works, the authors considered the frequency characteristics of sensitive elements made of various materials in the form of a ring resonator on surface acoustic waves (SAW), along with their fixing methods in the housing, the influence of external factors, and an optimal topology of the interdigital transducer of the ring resonator. Further, the need arose to study the dependence of the sensitivity of the sensitive element and the maximum acceleration load on its dimensions, as well as to analyze the characteristics of the manufactured experimental samples in comparison with the simulated values.

Aim. To determine optimal dimensions of the sensitive element of a ring resonator and to confirm the adequacy of the constructed models by comparing the characteristics of experimental samples with those obtained by computer simulation.

Materials and methods. The theoretical part of the research was carried out using the finite element method. Mathematical processing was implemented in AutoCAD and COMSOL Multiphysics.

Results. Three overall dimensions of the sensitive element of a ring resonator were proposed: 1500, 3000 and 4500 μm . The characteristics of sensitive elements made of lithium niobate with the above dimensions were studied. Thus, the resonance frequency for 1500, 3000 and 4500 μm samples comprised 207.99, 104.10 and 68.99 MHz, respectively. The maximum acceleration experienced by a cantilever with a radius of 1500, 3000 and 4500 μm was found to be 191 132, 84 958 and 37 514g, respectively. Dependence graphs of the maximum acceleration and sensitivity on the ratio of the radius of the console to its height are presented. The adequacy of the constructed model was confirmed, i. e., the resonance frequency for 1500, 3000 and 4500 μm experimental samples comprised 218.17 MHz (4.67 % discrepancy with computer simulation), 109.23 MHz (4.69 %) and 72.88 MHz (5.34 %), respectively.

Conclusion. The sensitivity and maximum acceleration load of the sensitive element of a SAW ring resonator directly depends on the ratio of the cantilever radius to its height, with higher sensitivity values correlating to lower values of maximum acceleration load. For each material, these dependencies are unique. The interdigital transducer bus size has little effect on the frequency response. The previously presented simulations were confirmed by experimental samples with a difference in resonance frequencies of less than 5.5 %.

Keywords: microelectromechanical systems, micromechanical accelerometer, sensitive element, ring resonator, surface acoustic waves, interdigital transducer

For citation: Shevchenko S. Yu., Mikhailenko D. A. Optimal Overall Dimensions of a Surface Acoustic Waves Ring Resonator. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 2, pp. 89–100. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-2-89-100

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

Submitted 12.10.2022; accepted 01.03.2023; published online 28.04.2023

Введение. Микроэлектромеханические системы (МЭМС) – это технология создания микросхем с малыми механическими элементами, которая стала популярной благодаря глобальной тенденции миниатюризации.

МЭМС представляет собой концепцию, позволяющую уменьшить механические системы и объединить их с электрическими схемами. Итогом данных операций является физи-

ческое устройство, в котором все компоненты взаимосвязаны и объединены для выполнения какого-либо функционала.

Главными преимуществами МЭМС являются:

- минимальные габариты. Все элементы МЭМС в большинстве случаев располагаются на одной плате;

- малая стоимость одного устройства. Производство МЭМС осуществляется на автомати-

зированных предприятиях массовой продукции. Чем большее количество однотипных устройств необходимо изготовить, тем ниже конечная стоимость одного устройства;

– низкое энергопотребление. Потребляемая мощность пропорциональна нагрузке и квадрату рабочего напряжения. Поскольку в МЭМС все мало, нагрузка также очень мала. В настоящее время напряжение в микросхемных схемах составляет около 1...5 В и потребление энергии на уровне единиц ватт;

– высокая частота измерений (от нескольких килогерц и более).

МЭМС, несмотря на большое количество преимуществ, имеют и недостатки в виде малой точности и механической прочности, так как больше подвержены влиянию внешних воздействий.

По совокупности всех факторов микромеханические системы получили широкое распространение в потребительском сегменте, поскольку для данного сегмента цена конечного продукта является главным параметром. На сегодняшний день МЭМС представлены во всех сферах жизнедеятельности человека: робототехнике [1], медицине [2], транспорте [3], геологии [4], игровой индустрии [5], спорте [6].

Акселерометры также были реализованы по технологии МЭМС, благодаря чему сейчас они используются в автомобилях [7], smart-часах [8], смартфонах [9], геймпадах [10], квадрокоптерах [11] и во многих других устройствах и системах. Классические микромеханические акселерометры (ММА) используют в своей конструкции упругий подвес. Эта особенность отражается в низкой виброустойчивости и ударопрочности чувствительных элементов ММА. Как следствие, это ограничивает применяемость данных устройств. Указанных недостатков можно избежать, используя ММА на поверхностных акустических волнах (ПАВ). В связи с тем, что в ММА на ПАВ используется жесткое закрепление чувствительного элемента (ЧЭ), позволяя выдерживать значительно большие перегрузки по сравнению с классическими МЭМС, у данного класса приборов появляются следующие преимущества в дополнение к классическим ММА [12, 13]:

– стабильность и надежность параметров;

– повторяемость характеристик.

Датчики на ПАВ получили наибольшее распространение как системы для анализа магнитного поля [14], контроля температуры [15], анализа газа [16] и контроля вибраций [17]. Благодаря множеству преимуществ при использовании приборов на акустических волнах вариативность построения датчиков практически безгранична [18, 19].

Исследования авторов статьи направлены на совершенствование конструкций ЧЭ прямоугольной и треугольной форм ММА на ПАВ, недостатком которых является одностороннее крепление консоли пьезоэлектрического элемента к корпусу датчика, вследствие чего нагрузка распределяется неравномерно. Ранее авторами была предложена конструкция ММА на ПАВ на основе ЧЭ кольцевой формы [20]. Были проведены исследования по закреплению консоли в корпусе датчика, определению материала ЧЭ, оценке частотных характеристик и влиянию внешних воздействий, таких, как чрезмерное ускорение и температура, на ЧЭ [21], определению оптимальной топологии структуры встречно-штыревого преобразователя (ВШП) [22]. Данная статья посвящена оценке оптимальных габаритных размеров ЧЭ с учетом технологических возможностей и с целью последующего корпусирования ЧЭ, а также сравнению характеристик экспериментальных образцов с данными, полученными с помощью моделирования.

Конструкция ЧЭ. Общий вид ЧЭ кольцевого резонатора взят из [21] с креплением консоли к корпусу с помощью силиконового клея (рис. 1). Резонатор состоит из двух кольцевых ВШП в форме конусов (2) и пьезоэлектрического кристалла, расположенного между преобразователями (1). Вся конструкция ограничена как по глубине, так и по радиусу демпфирующей средой для подавления паразитных отражений волн от внешних границ.

Общая схема ВШП с конусовидными электродами представлена на рис. 2. Используются следующие параметры ВШП: длина периода ВШП на внешнем крае апертуры составляет для первого случая 19.2 мкм, для второго – 38.4 мкм, для третьего – 57.6 мкм при угловом периоде преобразователя $\theta_p = 1$ и высоте $h = 0.2$ мкм.

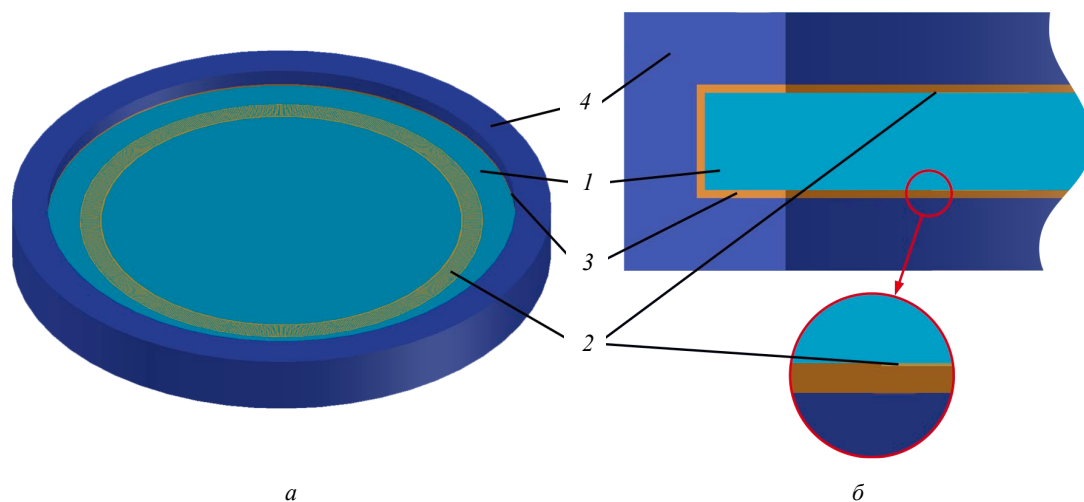


Рис. 1. Конструкция чувствительного элемента на поверхностных акустических волнах: а – общий вид; б – вид спереди (1 – консоль; 2 – встречно-штыревой преобразователь; 3 – силиконовый клей; 4 – корпус)

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)

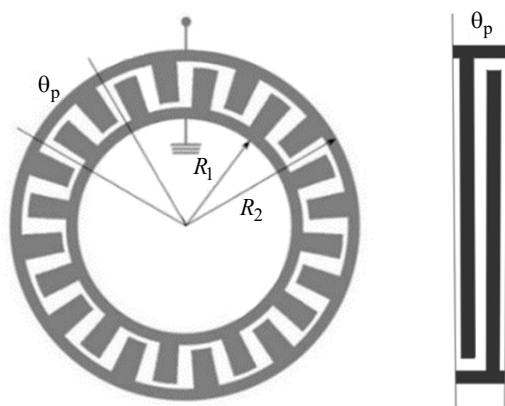


Рис. 2. Встречно-штыревой преобразователь с конусообразными электродами

Fig. 2. Interdigital transducer with cone-shaped electrodes

Высота консоли, согласно техническим характеристикам пластин ниобата лития, используемых для печати экспериментальных образцов на предприятии, равна 350 мкм. Вылет консоли со-

ставляет 1500 мкм для первого, 3000 мкм – для второго и 4500 мкм – для третьего случая. ВШП располагается [21] на расстоянии 1000, 2000 и 3000 мкм от центра консоли для каждого варианта исполнения соответственно. Использование нескольких вариантов габаритных параметров ВШП и консоли обусловлено тем, что, согласно законам физики, при увеличении площади поверхности консоль будет меньше деформироваться и, соответственно, уменьшится чувствительность датчика. Одна из целей описываемой работы – нахождение оптимальных габаритов кольцевого резонатора с точки зрения чувствительности датчика. Габаритные параметры ЧЭ, исследуемых в статье, представлены в табл. 1. Характеристики используемых материалов представлены в табл. 2–5.

Компьютерное моделирование. На первом этапе работы требуется определить частотные

Табл. 1. Габаритные параметры чувствительных элементов

Tab. 1. Dimensions of sensitive elements

Параметр	Значение		
Внутренний радиус (R_1), мкм	1000	2000	3000
Внешний радиус (R_2), мкм	1120	2240	3360
Апертура (W), мкм	12	24	36
Длина периода на внешней части апертуры ($\theta_{\text{внеш}}$), мкм	19.2	38.4	57.6
Угловой период (θ_p), ...°	1		
Высота ВШП (h), мкм	0.2		
Расположение ВШП на консоли (R_3), мкм	1000	2000	3000
Радиус консоли (R_0), мкм	1500	3000	4500
Высота консоли (h_0), мкм	350		

Табл. 2. Характеристики пьезоэлектрических материалов и силиконового клея

Tab. 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	$170 \cdot 10^9$	$25 \cdot 10^6$
Коэффициент Пуассона	0.25	0.48
Предел прочности, Па	$110 \cdot 10^6$	–

Табл. 3. Матричный вид тензора упругости 4-го ранга среза YX/128° ниобата лития, ГПа

Tab. 3. Matrix form of the tensor of elasticity of the 4th rank of the cut YX/128° of lithium niobate, GPa

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

Табл. 4. Матрица связи среза YX/128° ниобата лития, См/м²

Tab. 4. Coupling matrix cut YX/128° of lithium niobate, S/m²

	e_{m1}	e_{m2}	e_{m3}	e_{m4}	e_{m5}	e_{m6}
e_{1n}	0	0	0	0	4.4724	0.2788
e_{2n}	–1.8805	4.4467	–1.5221	0.0674	0	0
e_{3n}	1.7149	–2.6921	2.3136	0.6338	0	0

Табл. 5. Матрица относительной диэлектрической проницаемости среза YX/128° ниобата лития

Tab. 5. Cut YX/128° of lithium niobate relative permittivity matrix

	$\epsilon_{rS_{m1}}$	$\epsilon_{rS_{m2}}$	$\epsilon_{rS_{m3}}$
$\epsilon_{rS_{1n}}$	43.6000	0	0
$\epsilon_{rS_{2n}}$	0	38.1270	–7.0055
$\epsilon_{rS_{3n}}$	0	–7.0055	34.6330

характеристики для моделей с внутренним радиусом ВШП 2000 и 3000 мкм для последующего сравнения полученных данных с экспериментальными образцами. На рис. 3–5 пред-

ставлены частотные характеристики для различных видов исполнения ЧЭ.

Из рисунков видно, что графики частотных характеристик образцов имеют одинаковый

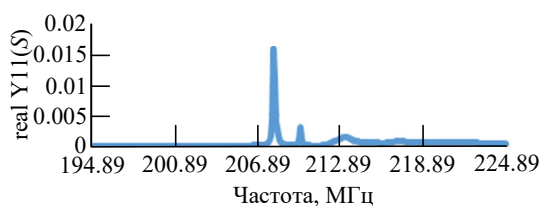


Рис. 3. Реальная составляющая комплексной проводимости для ВШП с внутренним радиусом 1000 мкм [22]

Fig. 3. Real component of the complex conductivity for an interdigital transducer with an inner radius of 1000 μm [22]

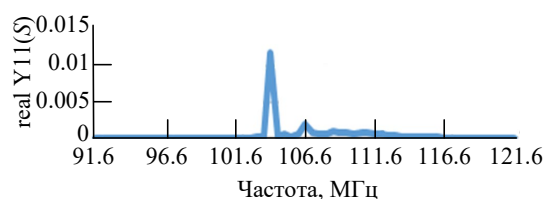


Рис. 4. Реальная составляющая комплексной проводимости для ВШП с внутренним радиусом 2000 мкм

Fig. 4. Real component of the complex conductivity for an interdigital transducer with an inner radius of 2000 μm

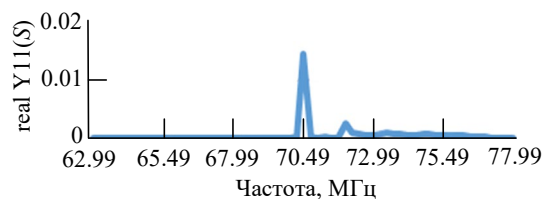


Рис. 5. Реальная составляющая комплексной проводимости для ВШП с внутренним радиусом 3000 мкм

Fig. 5. Real component of the complex conductivity for an interdigital transducer with an inner radius of 3000 μm

вид, а частота резонанса смещена вследствие изменения длины периода ВШП. Частота резонанса для первого образца составляет 207.99 МГц [22], для второго – 104.10 МГц и 68.99 МГц – для третьего.

Следующим этапом работы является определение предельно допустимого ускорения и чувствительности каждого образца. В предыдущих работах [21, 22] за высоту консоли принималось значение, при котором ПАВ, распределяющиеся по основаниям подложки, не взаимодействовали друг с другом (7–8 длин волн).

Сейчас же экспериментальные образцы будут изготавливаться на подложке ниобата лития толщиной 350 мкм, поэтому для возможности сравнения данных необходимо повторное моделирование с новыми параметрами. На рис. 6 представлено распределение нагрузки по консоли для одного из образцов, на рис. 7 – графики распределения нагрузки по диаметральному срезу консоли для трех образцов, а на рис. 8 – график зависимости частоты от ускорения для трех образцов.

Исходя из рис. 7–8 можно сделать вывод, что при одинаковой высоте консоли чувствительность датчика будет расти при увеличении радиуса консоли. Зависимость чувствительности от отношения радиуса консоли к ее высоте можно представить в виде графика (рис. 9).

Максимально испытываемое ускорение для консоли с радиусом 1500 мкм составляет 191 132g, для радиуса 3000 мкм – 84 958g и для радиуса 4500 мкм – 37 514g. Ускорение, кото-

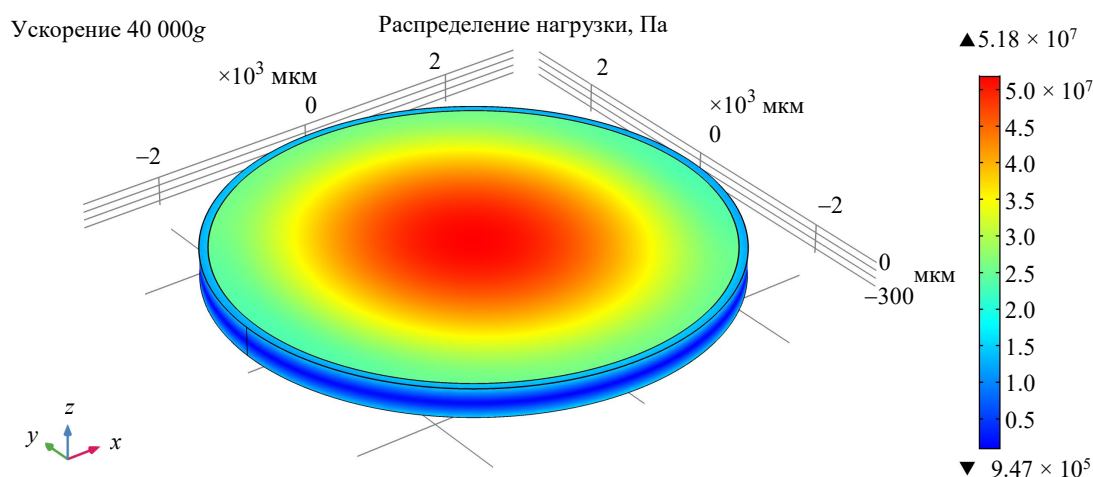


Рис. 6. Распределение нагрузки по консоли для ВШП с внутренним радиусом 2000 мкм

Fig. 6. Load distribution over the console for an interdigital transducer with an inner radius of 2000 μm

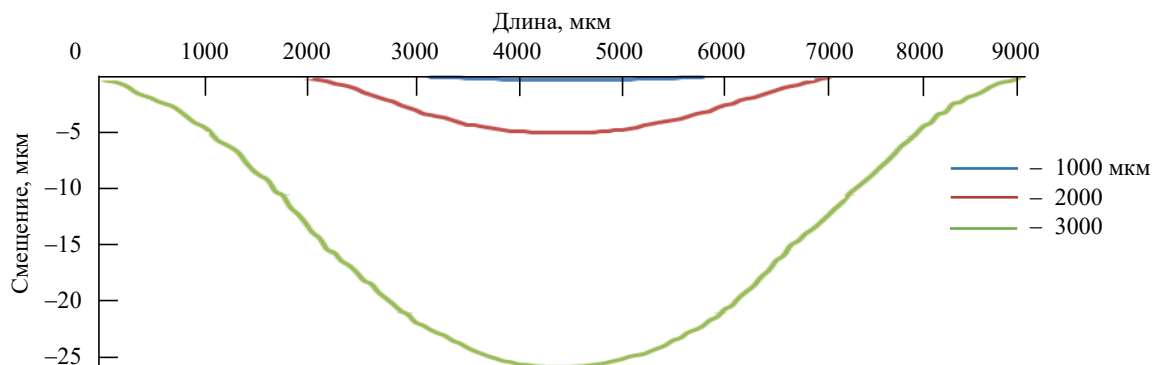


Рис. 7. График распределения нагрузки по диаметральному срезу консоли при ускорении в 40 000g

Fig. 7. Graph of load distribution along the diametrical section of the console at an acceleration of 40 000g

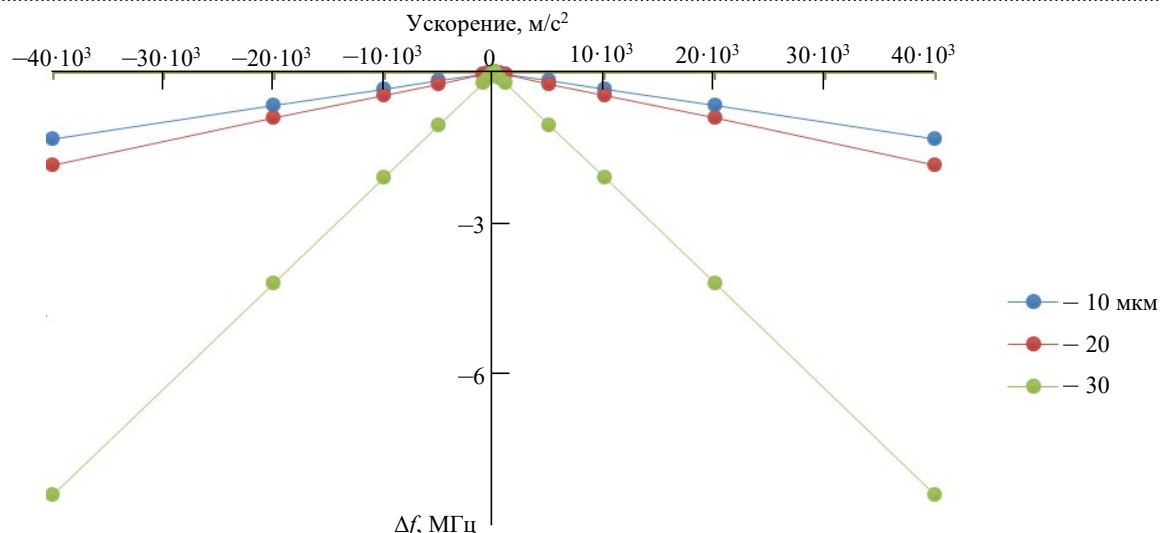


Рис. 8. График зависимости частоты от ускорения

Fig. 8. Graph of frequency alteration under acceleration

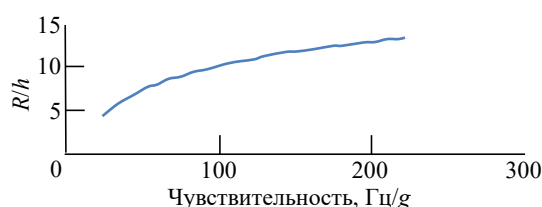


Рис. 9. График зависимости чувствительности от отношения радиуса консоли к ее высоте

Fig. 9. Dependence graph of sensitivity on the ratio of the radius of the console to its height

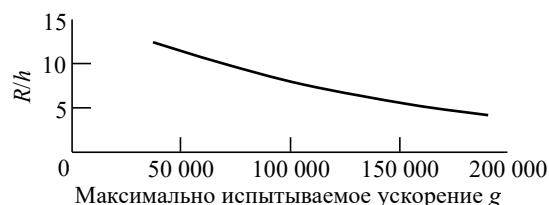


Рис. 10. График зависимости максимального ускорения от отношения радиуса консоли к ее высоте

Fig. 10. Dependence graph of maximum acceleration on the ratio of the radius of the console to its height

рое способна выдержать консоль, зависит от отношения радиуса консоли к ее высоте. Данную зависимость можно также представить в виде графика (рис. 10).

Экспериментальные образцы. Чтобы изготовить экспериментальные образцы, согласно рекомендациям изготовителя внешняя и внутренняя шины ВШП были увеличены в радиусе до 100 мкм для возможности соединения их с контактной площадкой. Для оценки влияния увеличенных шин ВШП на частотные характеристики было проведено дополнительное моделирование. График частотной характеристики

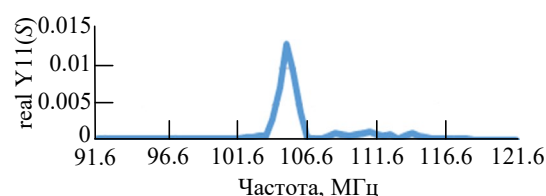


Рис. 11. Реальная составляющая комплексной проводимости для консоли с увеличенными шинами

Fig. 11. Real component of the complex conductivity for the console with enlarged buses

ки для ЧЭ с увеличенными шинами ВШП и внутренним радиусом 2000 мкм представлен на рис. 11.

При сравнении рис. 4 и 11 видно, что увеличение шин мало сказывается на частотной характеристике образца (незначительное увеличение амплитуды пика). Этими изменениями можно пренебречь, поэтому в дальнейшем принимается, что все характеристики моделей и экспериментальных образцов совпадают.

Все экспериментальные образцы выполнены на подложке из среза YX/128° ниобата лития высотой 350 мкм. На рис. 12 представлена фотография экспериментального образца под микроскопом.

На рис. 13 представлен один из образцов кольцевого резонатора с внутренним радиусом ВШП 1000 мкм, а на рис. 14–15 – графики АЧХ для двух экспериментальных образцов ПАВ-резонатора с таким радиусом.

Сравнивая рис. 3 и 14, можно утверждать, что модель, построенная ранее, адекватна, поскольку графики имеют одинаковый вид и ча-

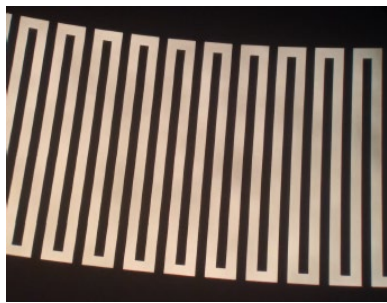


Рис. 12. Структура ВШП под микроскопом в проходящем свете

Fig. 12. Interdigital transducer structure under a microscope in transmitted light

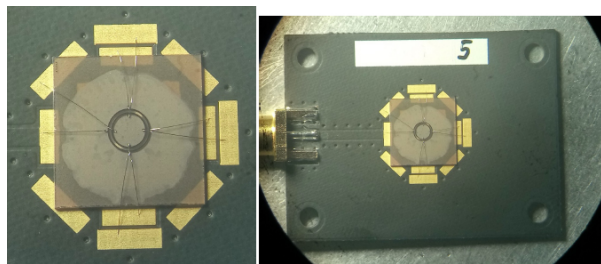


Рис. 13. Образец кольцевого резонатора с внутренним радиусом ВШП 1000 мкм

Fig. 13. A ring resonator sample with an inner radius of the interdigital transducer of 1000 μm

стоты резонанса модели (207.99 МГц) и экспериментального образца (218.17 МГц у образца 1) отличаются менее, чем на 5 %. Образование

второй гармоники в окрестностях частоты резонанса связано с неверным способом закрепления ЧЭ.

Также были изготовлены образцы кольцевого резонатора с внутренним радиусом ВШП в 2000 и 3000 мкм. Полученные данные представлены в табл. 6. Стоит отметить, что расхождение значений резонансных частот, полученных экспериментально и в результате моделирования, может быть вызвано как допущениями, сделанными в процессе моделирования, так и неточностью закрепления ЧЭ на основании.

Вывод. Чувствительность и максимальное выдерживаемое ускорение ЧЭ кольцевого резонатора на ПАВ прямо зависят от отношения радиуса консоли к ее высоте, причем чем выше чувствительность – тем ниже максимальное вы-

Табл. 6. Сравнение частот резонанса моделей и экспериментальных образцов

Tab. 6. Comparison of resonance frequencies of models and experimental samples

Радиус, мкм	Модель	Образец	Расхождение, %
1000	207.99 МГц	218.17 МГц	4.67
2000	104.10 МГц	109.23 МГц	4.69
3000	68.99 МГц	72.88 МГц	5.34

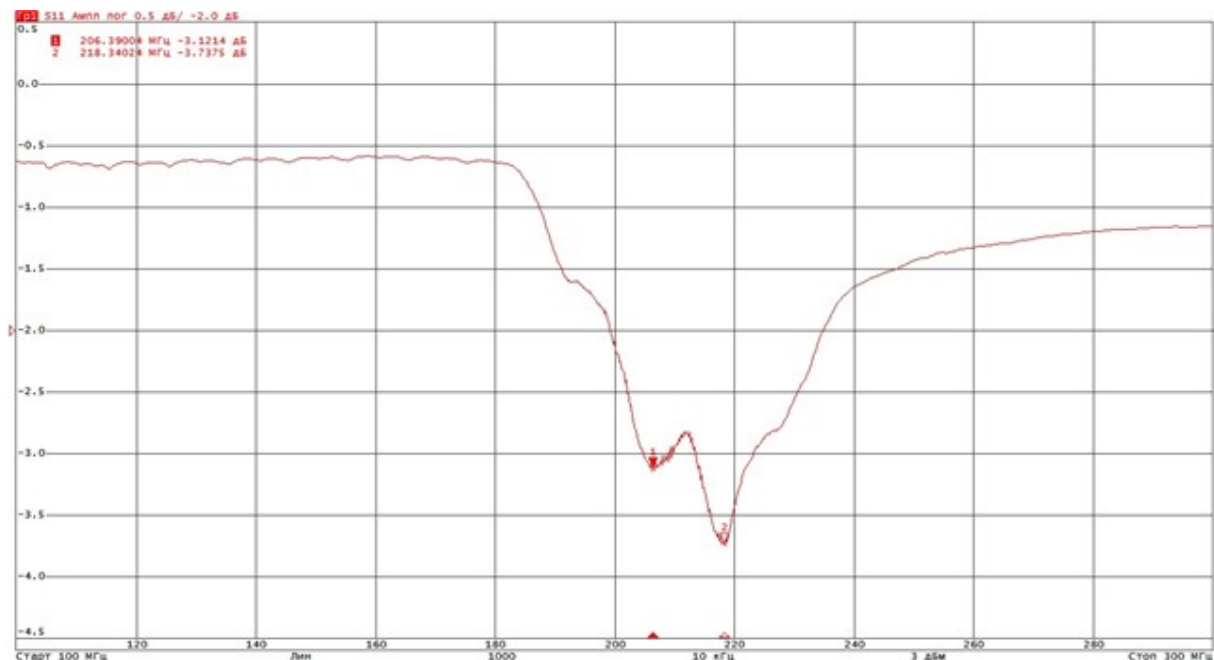


Рис. 14. Амплитудно-частотная характеристика для образца 1 кольцевого резонатора с внутренним радиусом ВШП 1000 мкм

Fig. 14. Frequency response for sample 1 of a ring resonator with an inner radius of the interdigital transducer of 1000 μm

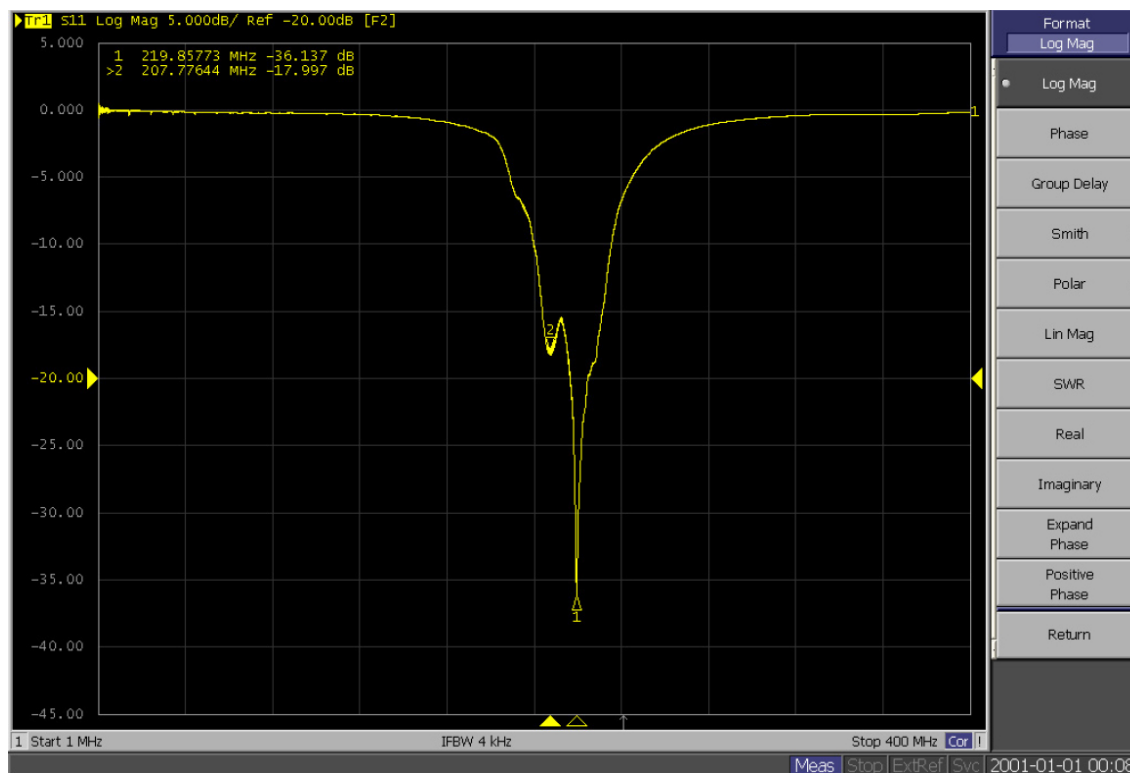


Рис. 15. Амплитудно-частотная характеристика для образца 2 кольцевого резонатора с внутренним радиусом ВПП 1000 мкм со схемой согласования

Fig. 15. Frequency response for sample 2 of a ring resonator with an interdigital transducer inner radius of 1000 μm with a matching circuit

держиваемое ускорение. Для каждого материала данные зависимости уникальны.

Размер шины ВПП слабо влияет на частотные характеристики.

Ранее представленное компьютерное моделирование удалось подтвердить экспериментальными образцами с расхождением частот резонанса менее, чем 5.5 %.

Список литературы

1. Nitride-based materials for flexible MEMS tactile and flow sensors in robotics / C. Abels, V. M. Mastroianni, F. Cuido, T. Dattoma, A. Qualtieri, W. M. Megill, M. De Vittorio, F. Rizzi // *Sensors*. 2017. Vol. 17, № 5. P. 1080. doi: 10.3390/s17051080
2. Shock-induced aluminum nitride based MEMS energy harvester to power a leadless pacemaker / N. Jackson, O. Z. Olszewski, C. O'Murchu, A. Mathewson // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2017. Vol. 264. P. 212–218. doi: 10.1016/j.sna.2017.08.005
3. Sheikh S. A., Naidu H. A Novel Robotics and MEMS Artificial Intelligence based Train Safety Device // 2nd Intern. Conf. on Smart Electronics and Communication (ICOSEC). Piscataway: IEEE, 2021. P. 1–5. doi: 10.1109/ICOSEC51865.2021.9591761
4. A multi-source early warning system of MEMS based wireless monitoring for rainfall-induced landslides / Z. Yang, W. Shao, J. Qiao, D. Huang, H. Tian, X. Lei, T. Uchumura // *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7, № 12.

P. 1234. doi: 10.3390/app7121234

5. 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. von Wantoch, U. Hofmann // *Optical Architectures for Displays and Sensing in Augmented, Virtual, and Mixed Reality (AR, VR, MR) II*. 2021. Vol. 11765. P. 15–32. doi: 10.1117/12.2579695
6. Invisible experience to real-time assessment in elite tennis athlete training: Sport-specific movement classification based on wearable MEMS sensor data / M. Wu, R. Wang, Ya. Hu, M. Fan, Yu. Wang, Ya. Li, Sh. Wu // *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: J. of Sports Engineering and Technology*. 2021. P. 17543371211050312. doi: 10.1177/17543371211050312
7. Сысоева С. Автомобильные акселерометры. Ч. 2. Автомобильные акселерометры – ключевые фигуры систем безопасности и комфорта // *Компо-*

ненты и технологии. 2005. Т. 9. URL: <https://kit-e.ru/sensor/avtomobilnye-akselerometry-chast-2/> (дата обращения 21.08.2022)

8. Apple Watch Series 8 // Apple Inc. URL: <https://www.apple.com/uk/apple-watch-series-8/> (дата обращения 20.09.2022)

9. iPhone 14 Pro and 14 Pro Max – Technical Specifications // Apple Inc. URL: <https://www.apple.com/uk/iphone-14-pro/specs/> (дата обращения 20.09.2022)

10. DualSense wireless controller. The innovative new controller for PS5 // PlayStation. URL: <https://www.playstation.com/en-gb/accessories/dualsense-wireless-controller/> (дата обращения 21.08.2022)

11. Mavic 3 – Характеристики // DJI. URL: <https://www.dji.com/ru/mavic-3/specs> (дата обращения 21.08.2022)

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. Доберштейн С. А., Гончаров И. В. Микроакустика: техника ПАВ и ОАВ в АПОИ. Влияние МЭМС-технологий на АПОИ // Радиотехника, Электроника и Связь ("РЭС-2011"), Омск, 05–08 июля 2011 г. / Омский научно-исследовательский ин-т приборостроения. Омск, 2011. С. 403–411.

14. Multi-mode love-wave SAW magnetic-field sensors / Ju. Schmalz, A. Kittmann, Ph. Durdaut, B. Spetzler, F. Faupel, M. Hoft, E. Quandt, M. Gerken // Sensors. 2020. Vol. 20, № 12. P. 3421. doi: 10.3390/s20123421

15. High-temperature SAW resonator sensors: Electrode design specifics / S. A. Zhgoon, A. S. Shvetsov, S. A. Sakharov, O. Elmazria // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. 2018. Vol. 65, № 4. P. 657–664. doi: 10.1109/TUFFC.2018.2797093

16. Advances in SAW-based gas sensors / C. Caliendo, P. Verardi, E. Verona, A. D'amico, C. Di Natale, G. Saggio, M. Serafini, R. Paolesse, S. E. Huq // Smart materials and structures. 1997. Vol. 6, № 6. P. 689. doi: 10.1088/0964-1726/6/6/005

17. Properties of SAW vibration sensors applicable in the field of power engineering / A. A. Merkulov, S. A. Zhgoon, A. S. Shvetsov, N. A. Belyankin // 3rd Intern. Youth Conf. on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Piscataway: IEEE, 2021. P. 1–5. doi: 10.1109/REEPE51337.2021.9388033

18. Physical principles of a piezo accelerometer sensitive to a nearly constant signal / V. Gupalov, A. Kukaev, S. Shevchenko, E. Shalymov // Sensors. 2018. Vol. 18, № 10. P. 3258. doi: 10.3390/s18103258

19. The effect of a rotating medium on bulk acoustic wave polarization: From theoretical considerations to perspective angular motion sensor design / Ya. Durukan, M. Shevchenko, A. Peregudov, E. Popkova, S. Shevchenko // Sensors. 2020. Vol. 20, № 9. P. 2487. doi: 10.3390/s20092487

20. Shevchenko S. Y., Khivrich M. A., Markelov O. A. Ring-shaped sensitive element design for acceleration measurements: Overcoming the limitations of angular-shaped sensors // Electronics. 2019. Vol. 8, № 2. P. 141. doi: 10.3390/electronics8020141

21. 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. P. 464. doi: 10.3390/s20020464

22. Shevchenko S. Y., Mikhailenko D. A. Topological Optimization of Circular SAW Resonators: Overcoming the Discreteness Effects // Sensors. 2022. Vol. 22, № 3. P. 1172. doi: 10.3390/s22031172

Информация об авторах

Шевченко Сергей Юрьевич – кандидат технических наук (2007), доцент (2013) кафедры лазерных измерительных и навигационных систем 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 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: syshevchenko@mail.ru

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

Михайленко Денис Андреевич – аспирант кафедры лазерных измерительных и навигационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 6 научных работ. 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 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: kratosloaded@mail.ru

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

References

1. Abels C., Mastronardi V. M., Cuido F., Datto-ma T., Qualtieri A., Megill W. M., De Vittorio M., Rizzi F. Nitride-Based Materials for Flexible MEMS Tactile and Flow Sensors in Robotics. *Sensors*. 2017, vol. 17, no. 5, p. 1080. doi: 10.3390/s17051080
2. Jackson N., Olszewski O. Z., O'Murchu C., Mathewson A. Shock-Induced Aluminum Nitride Based MEMS Energy Harvester to Power a Leadless Pacemaker. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2017, vol. 264, pp. 212–218. doi: 10.1016/j.sna.2017.08.005
3. Sheikh S. A., Naidu H. A Novel Robotics and MEMS Artificial Intelligence based Train Safety Device // 2nd Intern. Conf. on Smart Electronics and Communication (ICOSEC). Piscataway, IEEE, 2021, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICOSEC51865.2021.9591761
4. Yang Z., Shao W., Qiao J., Huang D., Tian H., Lei X., Uchumura T. A Multi-Source Early Warning System of MEMS Based Wireless Monitoring for Rainfall-Induced Landslides. *Applied Sciences*. 2017, vol. 7, no. 12, p. 1234. doi: 10.3390/app7121234
5. Petrak O., Schwarz F., Pohl L., Reher M., Janicke C., Przytarski J., Senger F., Albers J., Giese T., Ratzmann L., Blicharski P., Marauska S., von Wantoch T., Hofmann U. Laser Beam Scanning Based AR-Display Applying Resonant 2D MEMS Mirrors. *Optical Architectures for Displays and Sensing in Augmented, Virtual, and Mixed Reality (AR, VR, MR) II*. 2021, vol. 11765, pp. 15–32. doi: 10.1117/12.2579695
6. Wu M., Wang R., Hu Ya., Fan M., Wang Yu., Li Ya., Wu Sh. Invisible Experience to Real-Time Assessment in Elite Tennis Athlete Training: Sport-Specific Movement Classification Based on Wearable MEMS Sensor Data. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: J. of Sports Engineering and Technology*. 2021, p. 17543371211050312. doi: 10.1177/17543371211050312
7. Sysoeva S. Automotive Accelerometers. Part 2. Automotive Accelerometers – Key Figures in Safety and Comfort Systems. Components and Technologies. 2005, vol. 9. Available at: <https://kit-e.ru/sensor/avtomobilnye-akselerometry-chast-2/> (accessed 21.08.2022) (In Russ.).
8. Apple Watch Series 8. Apple Inc. Available at: <https://www.apple.com/uk/apple-watch-series-8/> (accessed 20.09.2022)
9. iPhone 14 Pro and 14 Pro Max – Technical Specifications. Apple Inc. Available at: <https://www.apple.com/uk/iphone-14-pro/specs/> (accessed 20.09.2022)
10. DualSense Wireless Controller. The Innovative New Controller for PS5. PlayStation. Available at: <https://www.playstation.com/en-gb/accessories/dualsense-wireless-controller/> (accessed 21.08.2022)
11. Mavic 3 – Specs. DJI. Available at: <https://www.dji.com/mavic-3/specs> (accessed 21.08.2022)
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. Dobershtein S. A., Goncharov I. V. *Mikroakustika: tekhnika PAV i OAV v APOI. Vliyaniye MEMS-tekhnologiy na APOI* [Microacoustics: SAW and BAW Techniques in APOI. Influence of MEMS-Technologies on APOI]. *Radiotekhnika, Elektronika i Svyaz' ("REiS-2011")*, Omsk, 05–08 July 2011. Omsk Research Institute of Instrument Engineering, 2011, pp. 403–411. (In Russ.)
14. Schmalz Ju., Kittmann A., Durdaut Ph., Spetzler B., Faupel F., Hoft M., Quandt E., Gerken M. Multi-mode Love-Wave SAW Magnetic-Field Sensors. *Sensors*. 2020, vol. 20, no. 12, p. 3421. doi: 10.3390/s20123421
15. Zhgoon S. A., Shvetsov A. S., Sakharov S. A., Elmazria O. High-Temperature SAW Resonator Sensors: Electrode Design Specifics. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2018, vol. 65, no. 4, pp. 657–664. doi: 10.1109/TUFFC.2018.2797093
16. Caliendo C., Verardi P., Verona E., D'amico A., Di Natale C., Saggio G., Serafini M., Paolesse R., Huq S. E. Advances in SAW-Based Gas Sensors. *Smart Materials and Structures*. 1997, vol. 6, no. 6, p. 689. doi: 10.1088/0964-1726/6/6/005
17. Merkulov A. A., Zhgoon S. A., Shvetsov A. S., Belyankin N. A. Properties of SAW Vibration Sensors Applicable in the Field of Power Engineering. 3rd Intern. Youth Conf. on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Piscataway, IEEE, 2021, pp. 1–5. doi: 10.1109/REEPE51337.2021.9388033
18. Gupalov V., Kukaev A., Shevchenko S., Shalymov E. Physical Principles of a Piezo Accelerometer Sensitive to a Nearly Constant Signal. *Sensors*. 2018, vol. 18, no. 10, p. 3258. doi: 10.3390/s18103258
19. Durukan Ya., Shevchenko M., Peregodov 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, p. 2487. doi: 10.3390/s20092487
20. Shevchenko S. Y., Khivrich M. A., Markelov O. A. Ring-Shaped Sensitive Element Design for Acceleration Measurements: Overcoming the Limitations of Angular-Shaped Sensors. *Electronics*. 2019, vol. 8, no. 2, p. 141. doi: 10.3390/electronics8020141
21. 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, p. 464. doi: 10.3390/s20020464
22. Shevchenko S. Y., Mikhailenko D. A. Topological Optimization of Circular SAW Resonators: Overcoming the Discreteness Effects. *Sensors*. 2022, vol. 22, no. 3, p. 1172. doi: 10.3390/s22031172

Information about the authors

Sergey Yu. Shevchenko, Cand. Sci. (2007), Associate Professor (2013) at 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 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: syshevchenko@mail.ru

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

Denis A. Mikhailenko, Postgraduate student of the Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 6 scientific publications. Area of expertise: micromechanical navigation systems and computer simulation of physical processes.

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

E-mail: kratosloaded@mail.ru

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