

Приборы и системы измерения на основе акустических, оптических и радиоволн

УДК 531.768

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-6-70-83>

Выбор материала чувствительных элементов акселерометров на основе ПАВ

С. Ю. Шевченко[✉], Д. А. Михайленко, Д. П. Лукьянов

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

[✉] syshevchenko@mail.ru

Аннотация

Введение. Датчики на основе поверхностных акустических волн (ПАВ) являются стремительно развивающимся направлением и перспективной заменой классических датчиков, особенно в тех сферах, где длительная работоспособность последних под вопросом. Принцип работы датчиков на ПАВ основан на акустических колебаниях, поэтому выбор пьезоэлектрического материала консоли с учетом внешних влияний на будущее устройство и его условий работы является важнейшей задачей. Синтезировано и создано множество монокристаллических структур и их срезов для устройств на поверхностных акустических волнах. Основными материалами, применяемыми для изготовления подложек, являются кристаллы кварца (SiO_2), ниобата лития (LiNbO_3), танталата лития (LiTaO_3) и пленочный нитрид алюминия (AlN). Производятся новые кристаллические структуры: лангасит ($\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$), лангатат ($\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$), ланганит и др. Проблема применения подобных материалов для изготовления консолей – отсутствие систематизированных данных о важных характеристиках для распространения ПАВ, к примеру тензора упругости 4-го ранга. Чтобы преодолеть указанный недостаток, предложена конструкция микромеханического акселерометра на основе ПАВ, основанного на мембранном чувствительном элементе (ЧЭ) для более равномерного распределения нагрузки по поверхности ЧЭ. Одна из ключевых проблем для дальнейшего развития датчиков на основе ПАВ – одностороннее закрепление прямоугольных и треугольных ЧЭ в корпусе датчика.

Цель работы. Показать преимущества использования AlN как материала чувствительного элемента кольцевого волнового резонатора на поверхностных акустических волнах.

Материалы и методы. Применение метода конечных элементов и математическая обработка в AutoCAD 2019 и COMSOL Multiphysics 5.4.

Результаты. Предложено использовать AlN в качестве материала чувствительного элемента для измерения ускорения на основе ПАВ. Предлагаемое решение сравнивалось с существующими прототипами, основанными на использовании мембран $\text{SiO}_2/\text{LiNbO}_3$, которые характеризуются сильными анизотропными свойствами. Создана 3D-модель ЧЭ кольцевого волнового резонатора на поверхностных волнах. Используя компьютерное моделирование и программное обеспечение COMSOL Multiphysics доказано, что конструкция способна выдерживать воздействия свыше $10\,000\text{ g}$ и чувствительный элемент на основе изотропного AlN преодолевает ограничения как низкой чувствительности SiO_2 , так и малой температурной стабильности LiNbO_3 . AlN демонстрирует почти двойную устойчивость к необратимым механическим деформациям по сравнению с SiO_2 , что, в свою очередь, позволяет дополнительно повысить чувствительность в 1.5 раза по сравнению с датчиками на основе кварца.

Заключение. Исходя из созданной модели, можно сделать вывод о перспективности использования нитрида алюминия как материала для чувствительного элемента, особенно для измерения больших значений ускорения, но с ограничениями по температурной чувствительности материала.

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы, микромеханический акселерометр, чувствительный элемент, поверхностные акустические волны, встречно-штыревой преобразователь, анизотропный материал, изотропный материал

Для цитирования: Шевченко С. Ю., Михайленко Д. А., Лукьянов Д. П. Выбор материала чувствительных элементов акселерометров на основе ПАВ // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 6. С. 70–83. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-6-70-83

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. С. Ю. Шевченко и Д. А. Михайленко благодарят Российский Научный Фонд за поддержку в рамках проекта № 20-19-00460.

Статья поступила в редакцию 08.06.2020; принята к публикации после рецензирования 29.10.2020; опубликована онлайн 29.12.2020



Selection of the Material for the Sensitive Elements of SAW-based Accelerometers

Sergey Yu. Shevchenko✉, Denis A. Mikhailenko, Dmitriy P. Lukyanov

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ syshevchenko@mail.ru

Abstract

Introduction. At the present, sensors based on surface acoustic waves (SAW) is a rapidly developing direction and a promising replacement for classical sensors, especially in those areas where long-term performance of latter is questionable. The principle of operation of SAW sensors is based on acoustic vibrations, therefore, the choice of piezoelectric material of a console, considering external influences on a future device and its operating conditions, is the most important task. Currently, many monocrystalline structures and their sections have been synthesized and created for the devices using SAW. The main materials used for the manufacture of substrates are crystals of quartz (SiO_2), lithium niobate (LiNbO_3), lithium tantalate (LiTaO_3) and film aluminum nitride (AlN). Also, new crystal structures: langasite ($\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$), langatate ($\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$), langanite and others were produced. The problem of using such materials for the manufacture of consoles is the lack of systematized data on important characteristics for the propagation of surfactants, for example, the elasticity tensor of the 4th rank. One of the key problems for the further development of SAW-based sensors is the one-way fastening of rectangular and triangular sensitive elements (SE) in sensor housing. In order to overcome the above drawback an MMA surfactant thing based on a membrane SE for a more uniform distribution of a load over the surface of the SE was proposed.

Aim. To show the advantages of using AlN as the SE material of a ring wave resonator on SAW.

Materials and methods. The theoretical part of the research was carried out using the finite element method. Mathematical processing was implemented in AutoCAD 2019 and in COMSOL Multiphysics 5.4.

Results. The use of AlN, which acts as the SE material for measuring an acceleration based on SAW was proposed. The proposed solution was compared with existing prototypes based on the use of SiO_2 / LiNbO_3 membranes, which were characterized by strong anisotropic properties. A 3D model of the SE of a ring wave resonator on surface waves was created. Using computer simulations and COMSOL Multiphysics software, it was shown that the thing was capable to withstand exposures in excess of 10 000 g, and an isotropic AlN sensor overcame the limitations of both the low sensitivity of SiO_2 and the low temperature stability of LiNbO_3 . AlN demonstrated almost double resistance to irreversible mechanical deformations as compared to SiO_2 , which, in turn, allows an additional 1.5-fold increase in sensitivity compared to quartz – based sensors.

Conclusion. Based on the data obtained by the modeling, it can be concluded that the use of AlN as SE material is promising, especially for measuring high acceleration values, but with restrictions on temperature sensitivity of the material.

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

For citation: Shevchenko S. Yu., Mikhailenko D. A., Lukyanov D. P. Selection of the Material for the Sensitive Elements of SAW-based Accelerometers. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 6, pp. 70–83. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-6-70-83

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments. S. Yu. Shevchenko and D. A. Mikhailenko are grateful to the Russian Science Foundation for funding within the Project no. 20-19-00460.

Submitted 08.06.2020; accepted 29.10.2020; published online 29.12.2020

Введение. В течение всего XX в. традиционные конструкции акселерометров характеризовались чрезмерными массой и размерами, что препятствовало их широкому использованию. С развитием микроэлектронных технологий размеры датчиков существенно уменьшились, но в то же время значительно снизилась их точность и механическая прочность. Прочность торсионов, используемых в классических датчиках микроэлектромеханических систем (МЭМС), сильно ограничена, что приводит к их неспособности противостоять перегрузкам, вызванным чрезмерным ускорением и/или внешними механическими силами.

Датчики на основе поверхностных акустических волн (ПАВ), хотя и менее развиты на сегодняшний день, являются достаточно перспективным направлением и многообещающей альтернативой классическим системам. Последние разработки на основе монокристаллических конструкций характеризуются относительно высокой стабильностью параметров и низким энергопотреблением (0.5...1 Вт) [1]. Хотя микроэлектромеханические акселерометры на основе ПАВ (ММА) в настоящее время все еще находятся в стадии разработки, на рынке доступны датчики ПАВ, которые широко используются в других областях – от медицины и безопасности жизнедеятельности до беспилотных устройств, например паро- и газоанализаторы [2–4], системы контроля температуры [5, 6], а также системы обнаружения давления [7].

Одним из ключевых требований для дальнейшего развития ММА на основе ПАВ и подобных устройств является поиск новых пьезоэлектрических материалов для консоли чувствительного элемента (ЧЭ), которые могли бы преодолеть типичные ограничения существующих прототипов [8–11].

Недавно [12] была предложена конструкция ММА на основе ПАВ, основанного на кольцевом ЧЭ для более равномерного распределения нагрузки по поверхности ЧЭ, чтобы преодолеть недостатки прямоугольных [13, 14] и треугольных ЧЭ [15]. В данном исследовании расширяются предыдущие выводы в отношении:

- оптимизации крепления ЧЭ в корпусе;
- поиска лучшего материала для перспективной конструкции ЧЭ в соответствии с его частотными характеристиками;

– оценки потенциальных внешних воздействий, таких, как чрезмерное ускорение и температуры на ЧЭ, оцениваемых с помощью компьютерного моделирования с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics.

Программный пакет COMSOL Multiphysics позволяет моделировать большинство мультифизических процессов, а также задавать параметры и свойства материалов: плотность, теплопроводность, модуль Юнга и многие др., в том числе тензор упругости 4-го ранга, матрицу связи и матрицу относительной диэлектрической проницаемости, согласно которым материалу задается анизотропия.

Конструкция чувствительного элемента. Общий вид мембранного чувствительного элемента представлен на рис. 1. Модель выполнялась в программном пакете AutoCAD-2019 с последующим импортом модели в COMSOL Multiphysics вследствие ограниченных возможностей САД-редактора последнего. Резонатор состоит из двух встречно-штыревых преобразователей (ВШП) в форме кольца (3) и пьезоэлектрического кристалла, расположенного между преобразователями (1). Вся конструкция ограничена по глубине и по радиусу демпфирующей средой для подавления паразитных отражений волн от внешних границ.

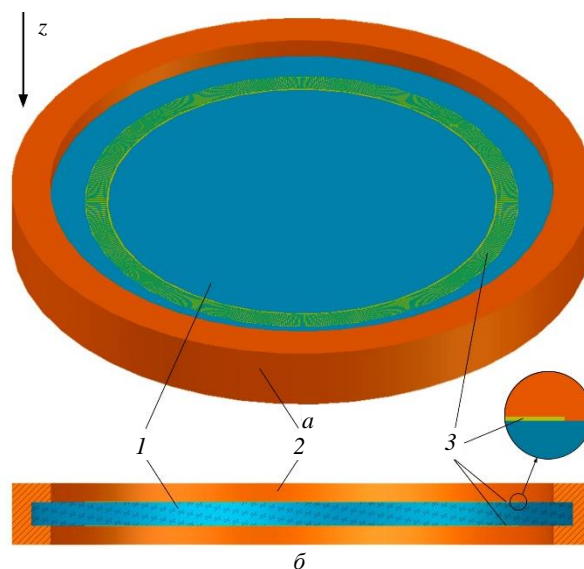


Рис. 1. Мембранный чувствительный элемент (а – общий вид, б – вид спереди): 1 – мембрана; 2 – корпус; 3 – встречно-штыревой преобразователь

Fig. 1. Membrane sensitive element (а – general view, б – front view): 1 – membrane; 2 – housing; 3 – inter-digital transducer

Конструкция ВШП представлена на рис. 2. Начальные габаритные характеристики ВШП взяты из [16, 17]. Согласно расчетам, при угловом периоде преобразователя $\theta_p = 1^\circ$ и высоте $h = 0.2$ мкм длина периода ВШП в центре кольца составляет 18.5 мкм. Принимая данное значение за длину волны (λ) и учитывая, что ПАВ затухают примерно на глубине трех длин волн, толщина мембраны составит 8λ .

Также необходимо учесть, что нитрид алюминия является пленочным материалом и для его

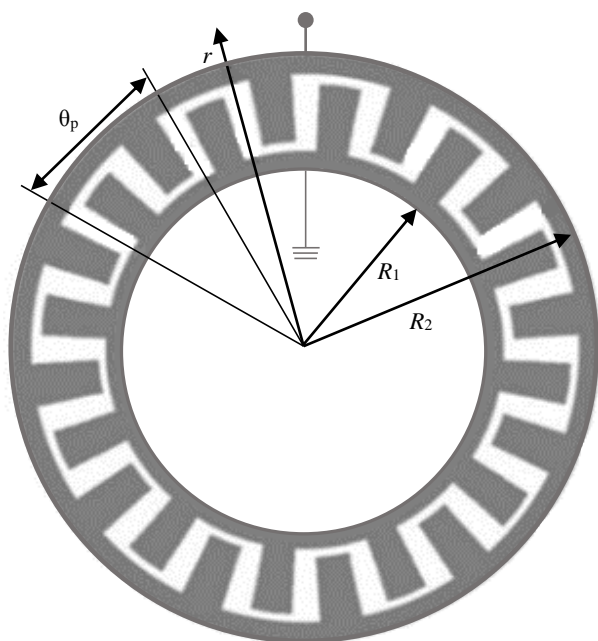


Рис. 2. Встречно-штыревой преобразователь
 Fig. 2. Inter-digital transducer

использования требуется напыление. В качестве подложки нитрида алюминия используется кварц толщиной 4λ . На подложку с двух сторон напыляется нитрид алюминия толщиной 4λ на каждую сторону.

Для удобства сравнения результатов будут использоваться одинаковые габаритные характеристики модели, поэтому общая высота мембран из всех используемых материалов составит 12λ , или 222 мкм. Радиус консоли равен 1500 мкм.

Компьютерное моделирование. Способ крепления чувствительного элемента. Для определения оптимального способа крепления мембраны к корпусу и нахождения распределения нагрузки требуется создать внешнее воздействие в виде ускорения. Характеристики используемых материалов представлены в табл. 1–7. Диапазон задаваемых значений – $0 \dots 40\,000$ g. Ускорение действует перпендикулярно плоскости мембраны, или по оси z (рис. 1). Используются две модели крепления мембраны: с помощью силиконового клея и без него (рис. 3). Закрепляемое расстояние мембраны в корпусе (l_{fix}) составляет 50 мкм. Толщина силиконового клея, включенного в расчеты первой модели, равна 10 мкм с каждой стороны мембраны. Распределение нагрузки и смещений по диаметральному срезу консоли из SiO_2 при ускорении $40\,000$ g представлено на рис. 4 и 5 соответственно.

Табл. 1. Характеристики пьезоэлектрических материалов и силиконового клея
 Table 1. Characteristics of piezoelectric materials and silicone adhesive

Характеристика	ST-срез SiO_2	YX-128°-срез LiNbO_3	AlN	Силиконовый клей
Скорость распространения волны, м/с	3158	3961	5705	–
Плотность, кг/м ³	2650	4640	3300	1700
Модуль Юнга, Па	–	–	$310 \cdot 10^9$	$25 \cdot 10^6$
Коэффициент Пуассона	–	–	0.24	0.48
Предел прочности, Па	$48 \cdot 10^6$	$110 \cdot 10^6$	$250 \cdot 10^6$	–
Коэффициент теплового расширения, К ⁻¹	$13.37 \cdot 10^{-6}$	$14.8 \cdot 10^{-6}$	$5.6 \cdot 10^{-6}$	$275 \cdot 10^{-6}$
Теплопроводность, Вт/(м·К)	6.5	4.6	170	1.375
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	744	630	780	1175

Табл. 2. Матричный вид тензора упругости 4-го ранга ST-среза кварца, ГПа
 Table 2. Matrix form of the tensor of elasticity of the 4th rank of ST-cut quartz, GPa

	$C_{E_{1n}}$	$C_{E_{2n}}$	$C_{E_{3n}}$	$C_{E_{4n}}$	$C_{E_{5n}}$	$C_{E_{6n}}$
$C_{E_{m1}}$	86.736	27.522	-8.626	0.293	0	0
$C_{E_{m2}}$	27.522	97.744	-5.4184	13.010	0	0
$C_{E_{m3}}$	-8.626	-5.418	130.841	-0.704	0	0
$C_{E_{m4}}$	0.293	13.010	-0.701	40.614	0	0
$C_{E_{m5}}$	0	0	0	0	30.052	6.802
$C_{E_{m6}}$	0	0	0	0	6.802	67.805

Табл. 3. Матрица связи ST-среза кварца, См/м²
 Table 3. Coupling matrix ST-cut quartz, S/m²

	e_{1n}	e_{2n}	e_{3n}	e_{4n}	e_{5n}	e_{6n}
e_{m1}	0.17100	-0.03492	-0.13608	0.8000	0	0
e_{m2}	0	0	0	0	0.06702	-0.09538
e_{m3}	0	0	0	0	-0.07562	0.10762

Табл. 4. Матрица относительной диэлектрической проницаемости ST-среза кварца
 Table 4. ST-cut quartz relative permittivity matrix

	$\epsilon_{rS\ 1n}$	$\epsilon_{rS\ 2n}$	$\epsilon_{rS\ 3n}$
$\epsilon_{rS\ m1}$	4.4280	0	0
$\epsilon_{rS\ m2}$	0	4.5434	0.1022
$\epsilon_{rS\ m3}$	0	0.1022	4.5186

Табл. 5. Матрица связи среза YX/128⁰ ниобата лития, См/м²
 Table 5. 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. 6. Матрица относительной диэлектрической проницаемости среза YX/128⁰ ниобата лития
 Table 6. 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
$\epsilon_{rS\ m3}$	0	-7.0055	34.6330

Табл. 7. Матричный вид тензора упругости 4-го ранга среза YX/128° ниобата лития, ГПа
 Table 7. Matrix form of the tensor of elasticity of the 4th rank of the cut YX/128° 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

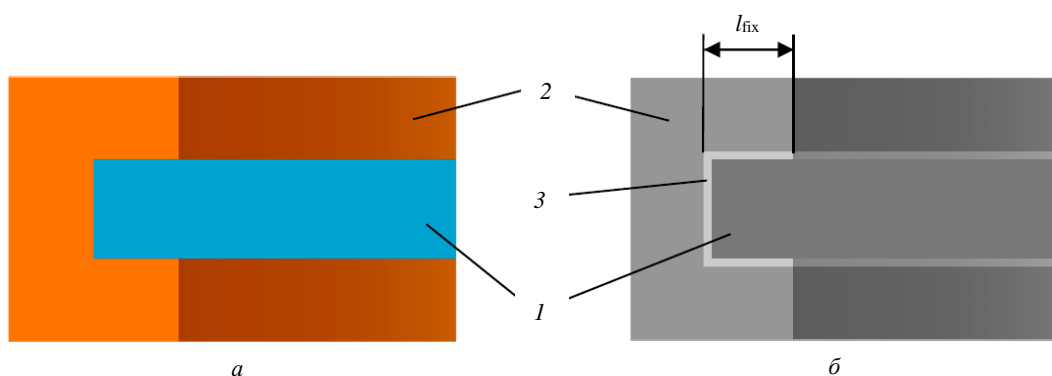


Рис. 3. Способы крепления консоли: а – жесткое; б – с использованием силиконового клея
 (1 – консоль; 2 – корпус; 3 – силиконовый клей)

Fig. 3. Console attachment methods: a – rigid and б – using silicone adhesive (1 – console; 2 – housing; 3 – silicone adhesive)

Ниобат лития и кварц являются анизотропными материалами, а нитрид алюминия – изотропным. На рис. 4 показано, что смещения материала были неравномерными из-за анизотропии, когда кварц использовался в качестве материала подложки. Однако для нитрида алюминия такой

эффект не наблюдался и смещения материала были однородными.

Результаты моделирования показали, что при жестком креплении консоли в корпусе датчика нагрузка сосредоточивается в районе крепления, что пагубно повлияет на чувствительность

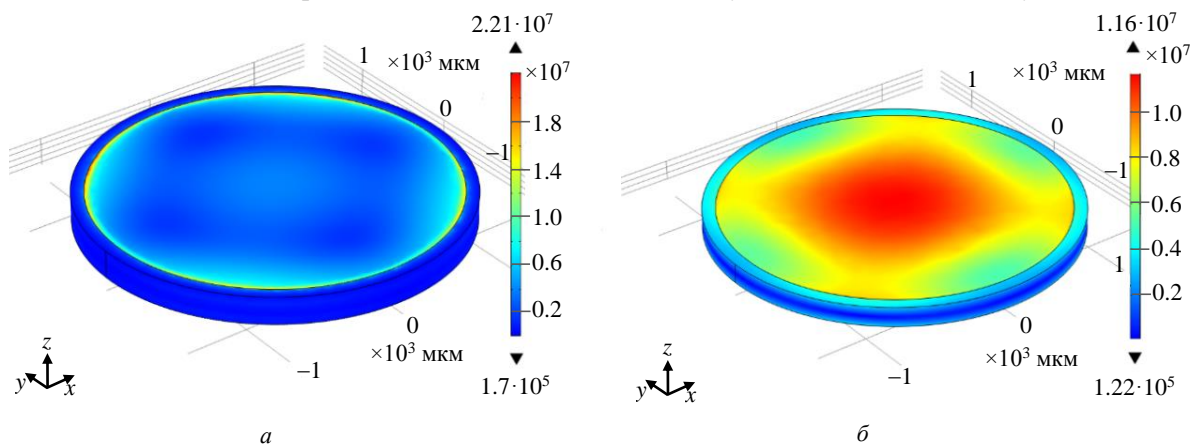


Рис. 4. Распределение нагрузки по консоли из ST-среза SiO₂: а – при жестком креплении; б – при использовании силиконового клея

Fig. 4. Load distribution over the console made of ST-cut SiO₂: а – for rigid attachment and б – silicone adhesive

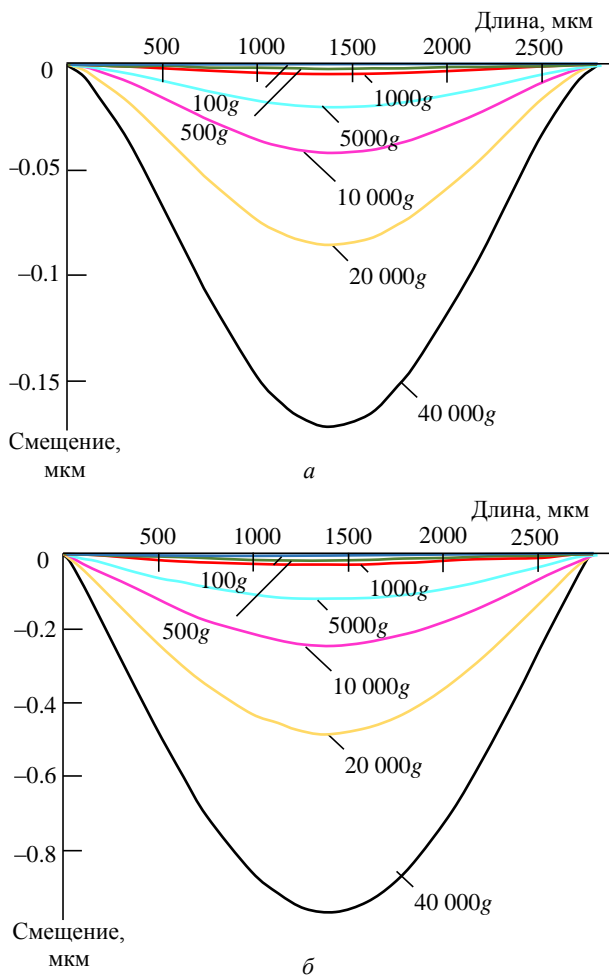


Рис. 5. Графики распределения нагрузки по диаметральному срезу консоли из ST-среза SiO_2 : а – при жестком креплении; б – при использовании силиконового клея
 Fig. 5. Console displacement over the console made of ST-cut SiO_2 : a – with rigid attachment and б – silicon adhesive

акселерометра, поскольку консоль испытывает малую деформацию по оси чувствительности. При использовании силиконового клея для крепления консоли нагрузка равномерно распределяется по площади консоли. Оптимальное расстояние для размещения структуры ВШП – 1090 мкм от центра консоли. Моделирование проводилось для трех материалов, выборка из трех значений для демонстрации эффекта представлена в табл. 8.

Частотные характеристики. При определении резонансной моды для каждого материала принимается длина одного периода ВШП в 18.5 мкм согласно габаритным характеристикам ЧЭ (рис. 6). Для свободной поверхности резонансная частота для SiO_2 составила 168.21 МГц, LiNbO_3 – 212.38 МГц, AlN – 316.49 МГц. Необходимо принимать во внимание, что частично

или полностью металлизированная поверхность уменьшит скорость распространения волны по поверхности материала, что приведет к уменьшению резонансной частоты.

Поскольку вся структура ЧЭ однотипна, для определения комплексной проводимости материалов в моделировании возможно использование одного периода ВШП. На рис. 7 для примера представлен пятиградусный сегмент консоли ЧЭ, иллюстрирующий распространение по ниобату лития. Видно, что акустические волны распро-

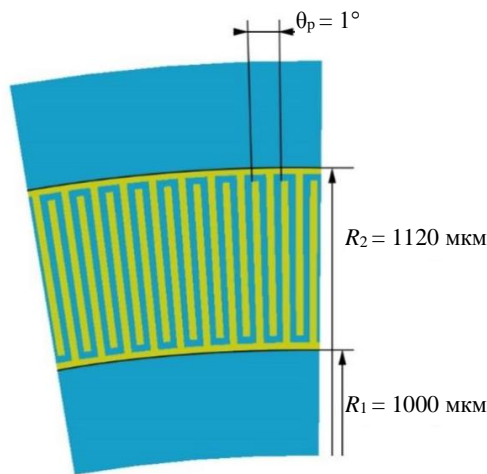


Рис. 6. Геометрия встречно-штыревого преобразователя
 Fig. 6. Inter-digital transducer geometry

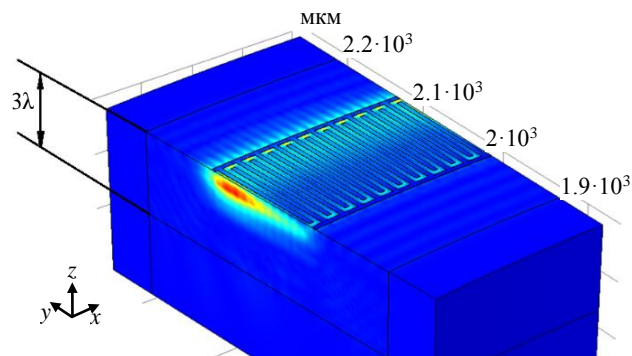


Рис. 7. Распределение ПАВ по поверхности консоли
 Fig. 7. SAW-distribution on console surface

Табл. 8. Смещения консоли при использовании силиконового клея, мкм

Table 8. Deformation of the console when using silicone adhesive, μm

Ускорение, g	SiO_2	LiNbO_3	AlN
50	0.00130	0.00131	0.00048
1000	0.02611	0.02626	0.00940
40 000	0.98475	1.05050	0.38802

страняются на глубине до 3λ , что характеризует их как поверхностные акустические волны. Графики реальной и мнимой комплексных проводимостей представлены на рис. 8 и 9.

Сравнивая рис. 9 и [16, 17], можно увидеть, что пиковые частоты расходятся на $\sim 10\%$ (286 МГц [16] и 316.5 МГц). Это свидетельствует об адекватности используемой модели. Разница частот связана с тем, что за последние 10 лет пьезоэлектрические характеристики алюминия были уточнены. Также в описываемом исследовании использовался только функционал программного обеспечения, а в [16, 17] помимо моделирования был задействован аналитический метод. В проведенном исследовании не рассматривались более высокие частоты, поскольку это нецелесообразно для микромеханических датчиков на основе ПАВ из-за резкого увеличения потерь энергии. Также точность модели в этой полосе сомнительна из-за отсутствия экспериментальной проверки.

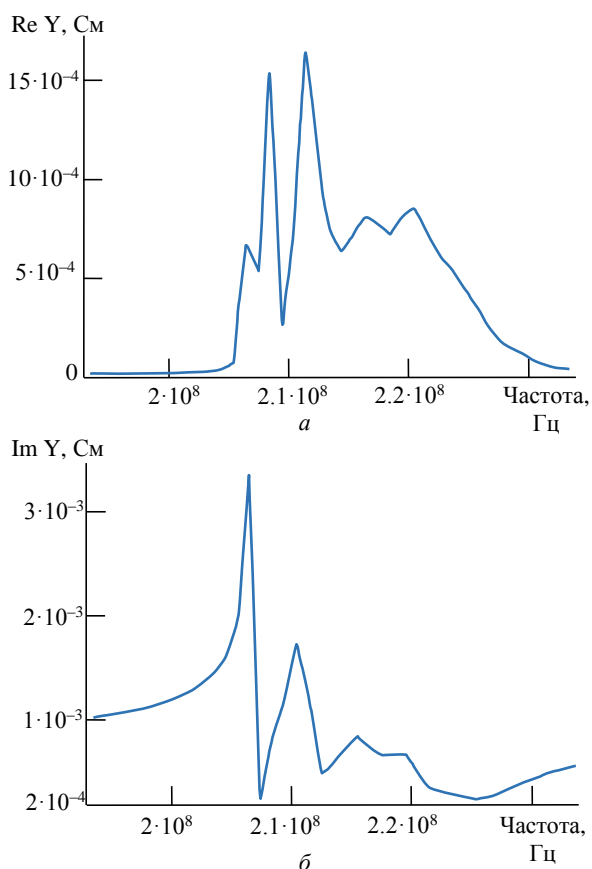


Рис. 8. Составляющие комплексной проводимости для LiNbO₃: *a* – реальная составляющая; *b* – мнимая составляющая

Fig. 8. Admittance component for LiNbO₃: *a* – real and *b* – imaginary

Особенностью кольцевого волнового резонатора на ПАВ является то, что первая гармоника и, следовательно, максимальное значение реальной составляющей комплексной проводимости располагаются на внешней части апертуры ВШП, а вторая – в центральной. По результатам моделирования наибольшее значение реальной составляющей комплексной проводимости для SiO₂ составляет 0.168 мСм, для LiNbO₃ – 88.5 мСм, для AlN – 0.887 мСм.

Возможна оценка элемента чувствительности. На рис. 10 показан график изменения частоты от ускорения при изготовлении консоли из различных материалов.

Чувствительность элемента к воздействию ускорению при использовании SiO₂ составляет 65 Гц/g, LiNbO₃ – 87 Гц/g, AlN – 43 Гц/g в диапазоне до 40 000 g.

Делая вывод из рис. 7–9, можно отметить, что утечка энергии очень значительна. Количествен-

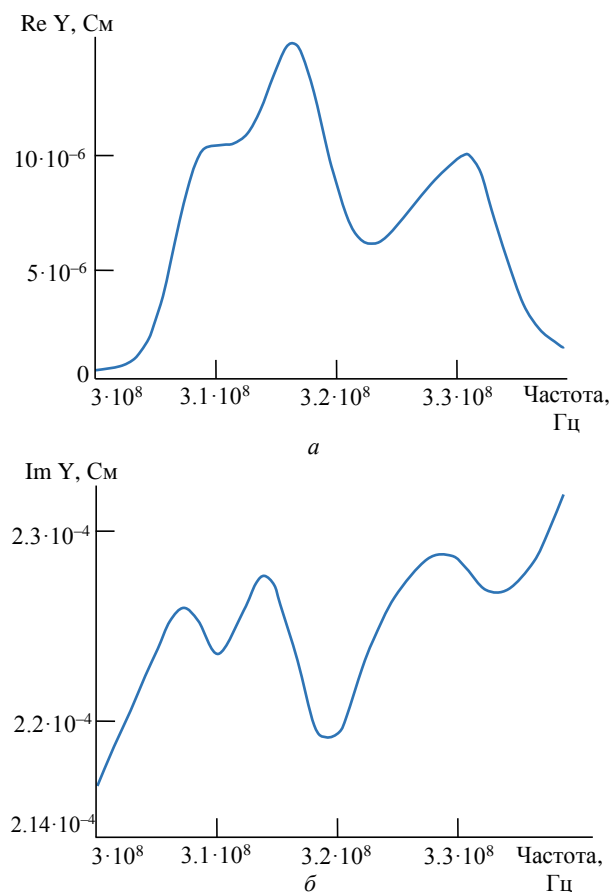


Рис. 9. Составляющие комплексной проводимости для AlN: *a* – реальная составляющая; *b* – мнимая составляющая

Fig. 9. Admittance component for AlN: *a* – real and *b* – imaginary

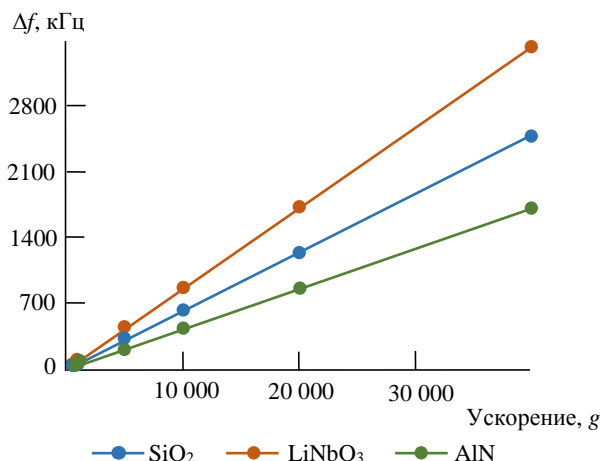


Рис. 10. Зависимость изменения частоты от ускорения
 Fig. 10. Dependence of the frequency change under acceleration

но она зависит от показателя добротности: чем ниже добротность, тем больше энергии покидает систему. В выполненном исследовании модель имеет добротность ~ 170 . Эта модель была использована для подтверждения ее адекватности [16, 17]. Чтобы уменьшить потери в системе и повысить добротность, необходимо использовать более высокие частоты либо увеличить диаметр кольцевого резонатора. Также, если рассматривать деформации консоли из различных материалов под воздействием ускорения, можно сделать вывод, что из-за анизотропии ниобата лития и кварца консоль деформируется неравномерно и при попытке подвести первую гармонику под внешнюю часть апертуры ВШП либо рассеивается больше энергии по сравнению с изотропным материалом, либо появляется дополнительная гармоника.

Влияние внешних воздействий на ЧЭ. Температура существенно влияет на пьезоэлектрические материалы. При помощи датчиков на ПАВ возможно измерение температуры среды. В описываемом исследовании температура вносила погрешность в измерение ускорения. Для оценки ее влияния и определения диапазона рабочих температур проводилось моделирование с использованием модели с силиконовым клеем в диапазоне температур от -40 до $+60$ °C с шагом в 5 °C для трех материалов. Графики распределения нагрузки и смещений для кварца представлены на рис. 11. В табл. 9 приведена выборка значений для демонстрации эффекта.

Нагрузка распределяется равномерно по площади консоли. Сжатие или растяжение материала

происходят от центральной части консоли. На рис. 12 представлен график изменения частоты от температуры.

Табл. 9. Деформация консоли при нагреве и охлаждении, мкм
 Table 9. Deformation of the console when heating or cooling, μm

Температура, °C	SiO ₂	LiNbO ₃	AlN
-40	-0.0610	-0.0780	-0.0278
-20	-0.0409	-0.0525	-0.0185
0	-0.0204	-0.0275	-0.0097
+20	0	0	0
+40	0.0203	0.0275	0.0095
+60	0.0408	0.0521	0.0186

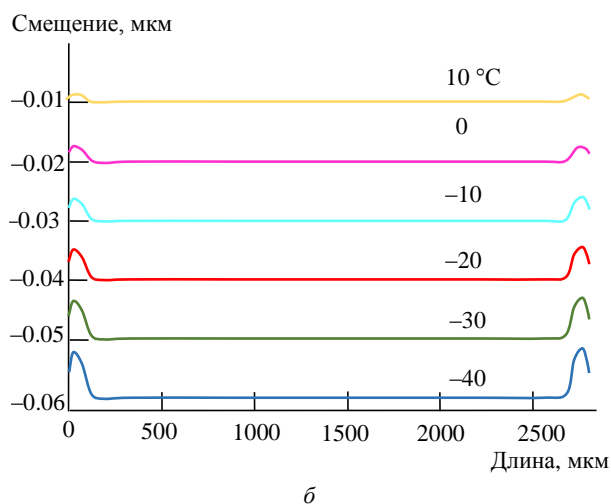
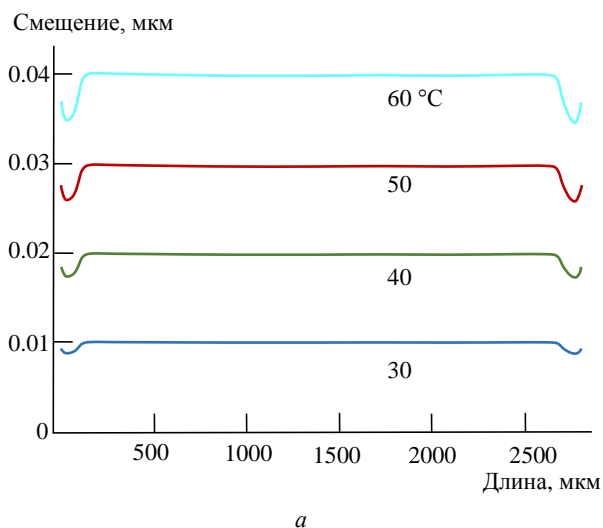


Рис. 11. График распределения нагрузки по диаметральному срезу SiO₂: а – нагрев; б – охлаждение
 Fig. 11. Graphs for quartz: a – load distribution and б – displacement

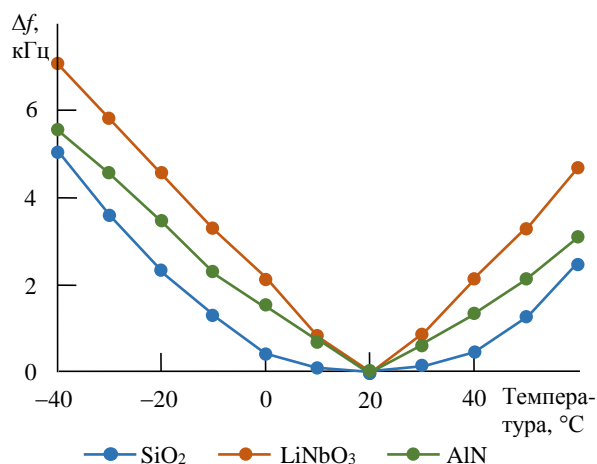


Рис. 12. Зависимость изменения частоты от температуры
Fig. 12. Dependence of the frequency change under temperature

Материалом, наименее подверженным воздействию температуры, является кварц. Его зависимость от температуры имеет вид параболы. Материал, наиболее подверженный воздействию температуры, – ниобат лития. Чувствительность к воздействию температуры при использовании SiO₂ – ~43 Гц/°C, LiNbO₃ – ~107 Гц/°C, AlN – ~77 Гц/°C в диапазоне от –40 до +60 °C.

Также моделировалось взаимное влияние ускорения и температуры на ЧЭ в диапазонах 0...40 000g и –40...+60 °C. В табл. 10–12 представлены выборки значений результатов моделирования для трех материалов, а на рис. 13 – график изменения частоты в зависимости от температуры при ускорении в 100 g.

Исходя из полученных данных делаем вывод,

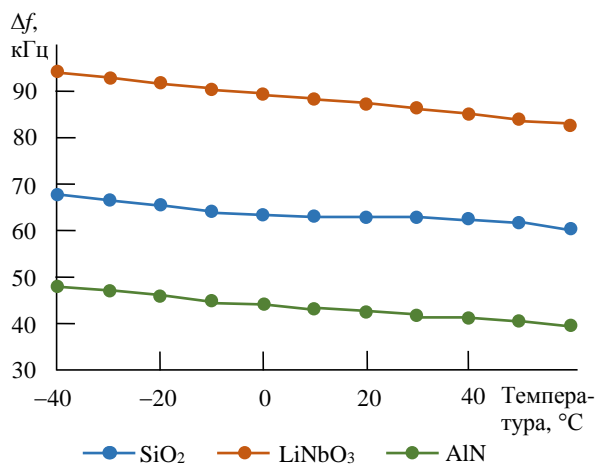


Рис. 13. Зависимость изменения частоты от температуры при ускорении 100 g

Fig. 13. Dependence of the frequency change depending on the temperature at an acceleration of 100 g

Табл. 10. Деформация консоли из кварца при нагреве/охлаждении и действии ускорения, мкм/МПа

Table 10. Deformation of the quartz console when heating or cooling and acceleration, μm/MPa

Температура, °C	50 g	500 g	5000 g	40 000 g
-40	-0.062/ 43.41	-0.072/ 43.43	-0.180/ 43.69	-1.024/ 46.05
-10	-0.031/ 21.70	-0.042/ 21.73	-0.150/ 22.00	-0.994/ 27.21
+10	-0.011/ 7.237	-0.022/ 7.263	-0.130/ 7.554	-0.975/ 16.87
+40	0.021/ 14.46	0.032/ 14.44	0.140/ 14.60	0.985/ 22.01
+60	0.042/ 28.93	0.052/ 28.91	0.160/ 28.99	1.004/ 32.35

Табл. 11. Деформация консоли из ниобата лития при нагреве/охлаждении и действии ускорения, мкм/МПа

Table 11. Deformation of the lithium niobate console when heating or cooling and acceleration, μm/MPa

Температура, °C	50 g	500 g	5000 g	40 000 g
-40	-0.079/ 53.81	-0.090/ 53.81	-0.208/ 53.81	-1.125/ 59.75
-10	-0.040/ 26.90	-0.052/ 26.90	-0.170/ 26.92	-1.087/ 41.39
+10	-0.014/ 8.969	-0.026/ 8.968	-0.144/ 9.189	-1.061/ 29.17
+40	0.027/ 17.94	0.039/ 17.94	0.157/ 18.01	1.074/ 35.26
+60	0.053/ 35.87	0.065/ 35.88	0.183/ 35.92	1.100/ 47.49

Табл. 12. Деформация консоли из нитрида алюминия при нагреве/охлаждении и действии ускорения, мкм/МПа

Table 12. Deformation of the aluminum nitride console when heating or cooling and acceleration, μm/MPa

Температура, °C	50 g	500 g	5000 g	40000 g
-40	-0.028/ 25.19	-0.032/ 25.14	-0.074/ 25.59	-0.395/ 40.88
-10	-0.014/ 12.59	-0.018/ 12.57	-0.060/ 13.70	-0.381/ 29.42
+10	-0.005/ 4.194	-0.009/ 4.228	-0.050/ 6.064	-0.372/ 21.78
+40	0.010/ 8.405	0.014/ 8.455	0.055/ 9.881	0.377/ 25.58
+60	0.019/ 16.80	0.023/ 16.85	0.064/ 17.52	0.386/ 33.21

что вносимая погрешность, в зависимости от сжатия или расширения материала, складывается или вычитается соответственно из значения изменения частоты при действующем ускорении и $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Если учитывать, что полезный сигнал должен в 3 раза превосходить шум, то измерения возможны с определенного значения ускорения. График минимально определяемого значения ускорения представлен на рис. 14.

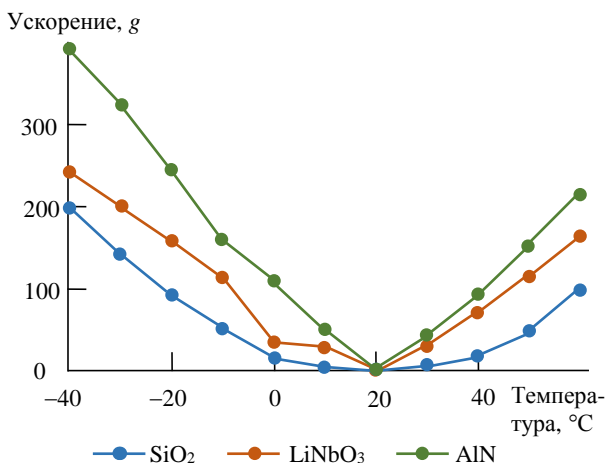


Рис. 14. Зависимость минимально определяемого значения ускорения от температуры
 Fig. 14. The dependence of the minimum detectable acceleration values of the temperature

Для ниобата лития среднее минимально определяемое значение ускорения $3.5\text{ g}/^{\circ}\text{C}$, для нитрида алюминия – $5.4\text{ g}/^{\circ}\text{C}$, кварца – $1.7\text{ g}/^{\circ}\text{C}$. Использовать нитрид алюминия как материал ЧЭ нежелательно в больших диапазонах изменения температуры, так как консоль из данного материала характеризуется малой чувствительностью при воздействии ускорения и значительным изменением частоты при колебаниях температуры.

Размещение инерционной массы на консоли. Для повышения чувствительности устройства, являющегося следствием увеличения деформации консоли, возможно размещение инерционной массы (ИМ) в виде цилиндра в центре консоли. Как следует из данных, представленных в табл. 1 и в табл. 10–12, кварц испытывает напряжение, близкое к пределу прочности, а ниобат лития и нитрид алюминия имеют двукратный и четырехкратный запасы прочности соответственно при самых высоких значениях внешних воздействий ($40\,000\text{ g}$ и $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$). Согласно этому, для кварца размещение ИМ будет сопровождаться уменьшением исследуемых диапазонов, воздействующих на ЧЭ, ускорений или температур.

Для других материалов, использованных в исследовании, возможно моделирование по всем примененным внешним воздействиям.

Для примера, на консоли из кварца был размещен кварцевый цилиндр объемом 0.049 мм^3 . Моделирование влияния ускорения и температуры проводилось по значениям $0\dots 40\,000\text{ g}$ и $-40\dots +60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поле напряжений ЧЭ представлено на рис. 15, а на рис. 16 приведен график чувствительности консоли с размещенной на ней ИМ.

По результатам моделирования можно сделать вывод (рис. 15), что при значениях воздействующего ускорения свыше $20\,000\text{ g}$ и температуре $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ кварц разрушается. Чувствительность устройства при отсутствии воздействия температуры увеличилась с 65 до $86\text{ Гц}/\text{g}$.

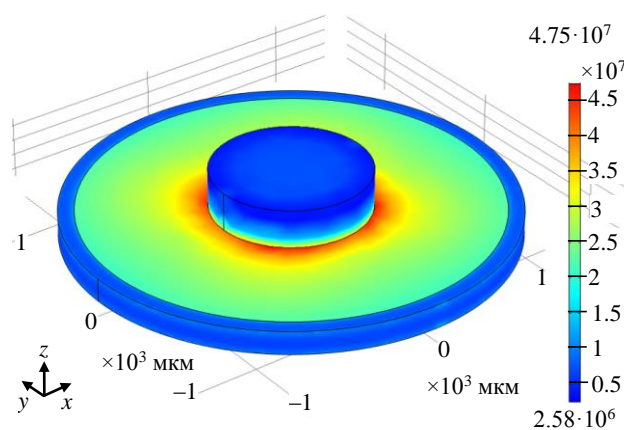


Рис. 15. Распределение нагрузки по консоли с инерционной массой
 Fig. 15. Load distribution in the presence of IM

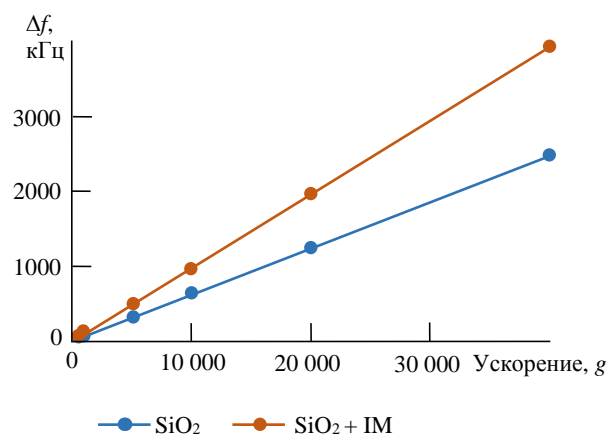


Рис. 16. Зависимость изменения частоты от ускорения при размещении и отсутствии инерционной массы на консоли
 Fig. 16. Dependence of frequency change on acceleration when placing and no inertial mass

Общие рекомендации к изготовлению конструкции. На основании результатов исследования рекомендуется следующий дизайн и технические характеристики:

- Консоль должна быть прикреплена к корпусу на расстоянии 50 мкм от ее центра с помощью силиконового клея.
- При использовании таких же габаритных характеристик консоли, как в описанном исследовании, требуется разместить встречно-штыревые преобразователи на расстоянии 1090 мкм от центра консоли.
- Чувствительность ЧЭ к ускорению составляет приблизительно 65 Гц/g для SiO₂, 87 Гц/g для LiNbO₃ и 43 Гц/g для AlN при ускорениях до 40 000 g.
- Чувствительность к температуре составляет приблизительно ~43 Гц/°C для SiO₂; ~107 Гц/°C для LiNbO₃; ~77 Гц/°C для AlN, по крайней мере в пределах исследуемого диапазона от –40 до +60 °C.
- При преимуществе использования нитрида алюминия в качестве материала консоли вследствие меньших потерь энергии системой / отсутствия дополнительных гармоник изготовление консоли ЧЭ из данного материала нежелательно, если ожидаются выраженные колебания температуры, так как AlN очень чувствителен к ним.
- Для дальнейшего повышения чувствительности рекомендуется размещать ИМ в центре консоли, хотя следует учитывать, что наличие ИМ уменьшит диапазон измерений.

Список литературы

1. Днепровский В. Г., Карапетьян Г. Я. Устройства на поверхностных акустических волнах. Р. н/Д: Изд-во Южного федерального ун-та, 2014. 186 С.
2. Пассивный беспроводный датчик на поверхностных акустических волнах для измерения параметров газовых и жидких сред / Г. Я. Карапетьян, В. Г. Днепровский, С. А. Багдасарян, А. С. Багдасарян, А. Л. Николаев, Е. М. Кайдашев // Инженерный вестн. Дона. 2012. Т. 20, № 2. С. 186–190.
3. Thiele J. A., Da Cunha M. P. High temperature LGS SAW gas sensor // Sensors and Actuators B: Chemical. 2006. Vol. 113, № 2. P. 816–822. doi: 10.1016/j.snb.2005.03.071
4. Development of a SAW gas sensor for monitoring SO₂ gas / Y. J. Lee, H. B. Kim, Y. R. Roh, H. M. Cho, S. Baik // Sensors and Actuators A: Physical. Nov. 1998. Vol. 64, № 2. P. 173–178. doi: 10.1016/s0924-4247(98)80011-3
5. Кронидов Т. В., Калинин В. А. Беспроводной пассивный датчик температуры на ПАВ-метке // Вопросы радиоэлектроники. 2012. Т. 1, № 1. С. 115–123.
6. SAW temperature sensor with mirror topology / I. Antcev, S. Bogoslovsky, G. Sapozhnikov, S. Zhgoon, A. Shvetsov // European Frequency and Time Forum (EFTF), IEEE, Apr. 2018. P. 101–104. doi: 10.1109/eff.2018.8409008
7. GaN membrane supported SAW pressure sensors with embedded temperature sensing capability / A. Müller, G. Konstantinidis, I. Giangu, G. C. Adam, A. Stefanescu, A. Stavriniadis, G. Stavriniadis, A. Kostopoulos, G. Boldeiu, A. Dinescu // IEEE Sensors J. 2017. Vol. 17, № 22. P. 7383–7393. doi: 10.1109/JSEN.2017.2757770
8. Irzhak D., Roshchupkin D. Measurement of independent piezoelectric moduli of Ca₃NbGa₃Si₂O₁₄, La₃Ga_{5.5}Ta_{0.5}O₁₄ and La₃Ga₅SiO₁₄ single crystals // J. of Applied Crystallography. 2018. Vol. 51, № 4. P. 1174–1181. doi: 10.1107/s1600576718009184
9. A high sensitive SH-SAW biosensor based 36° YX black LiTaO₃ for label-free detection of Pseudomonas Aeruginosa / J. Ji, Ch. Yang, F. Zhang, Zh. Shang, Y. Xu, Y. Chen, M. Chen, X. Mu // Sensors and Actuators B: Chemical. 2019. Vol. 281. P. 757–764. doi: 10.1016/j.snb.2018.10.128
10. Maskay A., Ayes A., da Cunha M. P. Stability of Pt/Al₂O₃-based electrode langasite SAW sensors with Al₂O₃ capping layer and yttria-stabilized zirconia sensing layer // IEEE Intern. Ultrasonics Symp. (IUS), IEEE, Sept. 2017. P. 1–4. doi: 10.1109/ultsym.2017.8092442
11. Peculiar Properties of Phase Transitions in Na_{0.5}Bi_{0.5}TiO_{3-0.06}BaTiO₃ Lead-free Relaxor Ferroelectrics Seen Via Acoustic Emission / E. Dul'kin, J. Tiagunova, E. Mojaev, M. Roth // Functional Materials Letters. 2017. T. 10, № 4. P. 1750048. doi: 10.1142/S1793604717500485
12. 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, № 2. 141 p. doi: 10.3390/electronics8020141
13. Micromechanical accelerometers based on surface acoustic waves / D. Lukyanov, S. Shevchenko, A. Kukaev, E. Filippova, D. Safronov // In Proc. of the NORCHIP 2014 32nd Conf.: The Nordic Microelectronics Event, Tampere, Finland, 7–28 Oct. 2014. P. 1–4. doi: 10.1109/NORCHIP.2014.7004701
14. Microaccelerometer based on surface acoustic waves / D. Lukyanov, S. Shevchenko, A. Kukaev, E. Filippova, D. Safronov // In Proc. of the 2014 Symp. on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications, Beijing, China, 30 Oct. – 2 Nov. 2014. P. 18–21. doi: 10.1109/SPAWDA.2014.6998515
15. Surface-acoustic-wave sensor design for acceleration measurement / S. Shevchenko, A. Kukaev, M. Khivrich, D. Lukyanov // Sensors. 2018. Vol. 18, № 7. P. 2301. doi: 10.3390/s18072301
16. Ring waveguide resonator on surface acoustic waves: First experiments / S. V. Biryukov, H. Schmidt, A. V. Sotnikov, M. Weinhacht, T. Yu. Chemekova,

Yu. N. Makarov // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 106, № 12.
P.126103. doi: 10.1063/1.3272027
17. Biryukov S. V., Schmidt H., Weihnacht M. Single-

mode ring waveguide resonator on SAW // Proc. IEEE
Ultrason. Symp. 2010. P. 2099–2102. doi:
10.1109/ultsym.2010.5935471

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 (2019) кафедры ЛИНС Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). 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>

Лукьянов Дмитрий Павлович – доктор технических наук (1974), профессор (1979) кафедры лазерных измерительных и навигационных систем (ЛИНС) Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Заслуженный деятель науки РФ (1996). Автор более 200 научных публикаций. Сфера научных интересов – лазерная гироскопия. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: dplukyanov@mail.ru

References

1. Dneprovsky V. G., Karapetyan G. Ya. Devices on surface acoustic waves. Rostov-on-don: Southern Federal University, 2014, 186 p. (In Russ.)
2. Karapetyan G. Ya., Dneprovskiy V. G., Bagdasaryan S. A., Bagdasaryan A. S., Nikolaev A. L., Kaidashev E. M. Passive wireless sensor on surface acoustic waves for measuring parameters of gas and liquid media. *Inzhenernyj vestnik Dona. Iz-vo: Rostovskoe regional'noe otделение Obshcherossijskoj obshchestvennoj organizacii "Rossijskaya inzhenernaya akademiya"*, 2012, vol. 20, no. 2, pp. 186–190. (In Russ.)
3. Thiele J. A., Da Cunha M. P. High temperature LGS SAW gas sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2006, vol. 113, no. 2, pp. 816–822. doi: 10.1016/j.snb.2005.03.071
4. Lee Y. J., Kim H. B., Roh Y. R., Cho H. M., Baik S. Development of a SAW gas sensor for monitoring SO₂ gas. *Sensors and Actuators A: Physical*. Nov. 1998, vol. 64, no. 2, pp. 173–178. doi: 10.1016/s0924-4247(98)80011-3
5. Kronidov T. V., Kalinin V. A. Wireless passive surface acoustic wave temperature sensor and tag. 2012, vol. 1, no. 1, pp. 115–123. (in Russ.)
6. Antcev I., Bogoslovsky S., Sapozhnikov G., Zhgoon S., Shvetsov A. SAW temperature sensor with mirror topology. *European Frequency and Time Forum (EFTF)*. IEEE, Apr. 2018, pp. 101–104. doi: 10.1109/eftf.2018.8409008

7. Müller A., Konstantinidis G., Giangu I., Adam G. C., Stefanescu A., Stavrinidis A., Stavrinidis G., Kostopoulos A., Boldeiu G., Dinescu A. GaN membrane supported SAW pressure sensors with embedded temperature sensing capability. *IEEE Sensors J.* 2017, vol. 17, no. 22, pp. 7383–7393. doi: 10.1109/JSEN.2017.2757770
8. Irzhak D., Roshchupkin D. Measurement of independent piezoelectric moduli of Ca₃NbGa₃Si₂O₁₄, La₃Ga₅Ta_{0.5}O₁₄ and La₃Ga₅SiO₁₄ single crystals. *J. of Applied Crystallography*. 2018, vol. 51, no. 4, pp. 1174–1181. doi: 10.1107/s1600576718009184
9. Ji J., Yang Ch., Zhang F., Shang Zh., Xu Y., Chen Y., Chen M., Mu X. A high sensitive SH-SAW biosensor based 36° YX black LiTaO₃ for label-free detection of *Pseudomonas Aeruginosa*. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2019, vol. 281, pp. 757–764. doi: 10.1016/j.snb.2018.10.128
10. Maskay A., Ayes A., da Cunha M. P. Stability of Pt/Al₂O₃-based electrode langasite SAW sensors with Al₂O₃ capping layer and yttria-stabilized zirconia sensing layer. *IEEE Intern. Ultrasonics Symp. (IUS)*. IEEE, Sept. 2017, pp. 1–4. doi: 10.1109/ultsym.2017.8092442
11. Dul'kin E., Tiagunova J., Mojaev E., Roth M. Peculiar Properties of Phase Transitions in Na_{0.5}Bi_{0.5}TiO_{3-0.06}BaTiO₃ Lead-free Relaxor Ferroelectrics Seen Via Acoustic Emission. *Functional Materials Letters*. 2017, vol. 10, no. 4, pp. 1750048. doi: 10.1142/S1793604717500485
12. 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, no. 2, 141 p. doi: 10.3390/electronics8020141

13. Lukyanov D., Shevchenko S., Kukaev A., Filippova E., Safronov D. Micromechanical accelerometers based on surface acoustic waves / In Proc. of the NORCHIP 2014 32nd Conf.: The Nordic Microelectronics Event, Tampere, Finland, 7–28 Oct. 2014, pp. 1–4. doi: 10.1109/NORCHIP.2014.7004701

14. Lukyanov D., Shevchenko S., Kukaev A., Filippova E., Safronov D. Microaccelerometer based on surface acoustic waves. In Proc. of the 2014 Symp. on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications, Beijing, China, 30 Oct. – 2 Nov. 2014, pp. 18–21.

doi: 10.1109/SPAWDA.2014.6998515

15. Shevchenko S., Kukaev A., Khivrich M., Lukyanov D. Surface-acoustic-wave sensor design for acceleration measurement. *Sensors*. 2018, vol. 18, no. 7, 2301 p. doi: 10.3390/s18072301

16. Biryukov S. V., Schmidt H., Sotnikov A. V., Weihnacht M., Chemekova T. Yu., Makarov Yu. N. Ring waveguide resonator on surface acoustic waves: First experiments. *J. Appl. Phys.* 2009, vol. 106, no. 12, pp. 126103. doi: 10.1063/1.3272027

17. Biryukov S. V., Schmidt H., Weihnacht M. Single-mode ring waveguide resonator on SAW. Proc. IEEE Ultrason. Symp. 2010, pp. 2099–2102. doi: 10.1109/ultsym.2010.5935471

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 (2019) of the Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. 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>

Dmitriy P. Lukyanov, Dr. Sci. (Eng.) (1974), Professor (1979) of the Department of Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. Honored Scientist of the Russian Federation (1996). The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: laser gyroscope.

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

E-mail: dplukyanov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8171-4475>