

Способы подключения микроакселерометра на поверхностных акустических волнах с концентрической формой электродов

М. А. Сорвина✉, А. С. Кукаев

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

✉ masorvina@etu.ru

Аннотация

Введение. В современном мире датчики ускорения востребованы в сферах от пользовательской электроники до космической техники. Микроакселерометры обладают достоинствами в виде компактных габаритов, малой массы, простоты интеграции с другими компонентами. Наиболее распространены акселерометры на микроэлектромеханических системах. Однако, ввиду хрупкости упругих подвесов, они обладают низкой ударопрочностью, что не позволяет применять их на высокодинамичных объектах, обладающих ускорениями до 50 000 g. Авторами предлагается использовать микроакселерометры на поверхностных акустических волнах, представляющие собой твердотельные монолитные конструкции, способные выдерживать высокие ударные нагрузки. В предыдущих работах была предложена концепция концентрической формы электродов, обладающей более высокой энергоэффективностью по сравнению с линейными конструкциями. Тем не менее, такую форму сложно подключить к электрической схеме, так как нет возможности подвести шины напрямую. Поэтому в данной статье описываются и моделируются 5 альтернативных методов подключения чувствительного элемента.

Цель работы. Выбрать оптимальный с точки зрения сохранения целостности электродов и минимального влияния на распространение поверхностных акустических волн способ подключения чувствительного элемента микроакселерометра.

Материалы и методы. Моделирование методом конечных элементов в программе Comsol Multiphysics.

Результаты. Предложены и проанализированы 5 способов подключения: навесной монтаж; удаление сектора электродов; заливка металлом отверстий в электродах и подложке; протягивание проводов через отверстия в подложке; вывод контактных шин по боковой грани. Проведено компьютерное моделирование. Представлены графики амплитудно-частотной характеристики.

Заключение. Из рассмотренных способов подключения чувствительного элемента наиболее целесообразным представляется метод № 3 с отверстиями в электродах и выводом контактов на нижнюю сторону подложки, так как график амплитудно-частотной характеристики практически совпадает с характеристикой датчика без подключений (образцового). Направление будущих исследований – создание опытного образца и проведение с ним испытаний в лабораторных условиях.

Ключевые слова: микроакселерометр, чувствительный элемент, поверхностные акустические волны, методы подключения, концентрическая топология

Для цитирования: Сорвина М. А., Кукаев А. С. Способы подключения микроакселерометра на поверхностных акустических волнах с концентрической формой электродов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 4. С. 81–90. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-81-90

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках гранта РНФ 23-79-10259 в форме субсидий в сфере научной и научно-технической деятельности.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 06.03.2024; принята к публикации после рецензирования 14.06.2024; опубликована онлайн 27.09.2024



Methods for Connecting a Concentrically Shaped Sensing Element of Microaccelerometers on Surface Acoustic Waves

Maria A. Sorvina✉, Alexander S. Kukaev

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ masorvina@etu.ru

Abstract

Introduction. At present, acceleration sensors are in demand in various areas, from consumer electronics to space technology. Microaccelerometers exhibit the advantages of compact dimensions, light weight, and ease of integration with other components. The most common accelerometers are based on microelectromechanical systems. However, due to the fragility of elastic suspensions, these devices are characterized by low impact resistance, which impedes their application in highly dynamic objects with accelerations of up to 50 000 *g*. The authors propose to use microaccelerometers based on surface acoustic waves, which are solid-state monolithic structures capable of withstanding high shock loads. Previous work has proposed the concept of concentric electrodes, which are more energy efficient compared to linear designs. However, concentric elements are difficult to connect to the electrical circuit, due to the impossibility of connecting the busbars directly. Therefore, the authors describe and simulate five alternative methods for connecting the sensing element of such devices.

Aim. To select an optimal method for connecting the sensing element of microaccelerometers from the standpoint of maintaining the integrity of the electrodes and ensuring minimal influence on the propagation of surface acoustic waves.

Materials and methods. Finite element simulation in the COMSOL Multiphysics software.

Results. Five connection methods, including point-to-point wiring, removing the electrode sector, filling holes in the electrodes and substrate with metal, pulling wires through holes in the substrate and bringing out contact bars along the side face, were proposed and analyzed. Computer simulation was carried out. Graphs of the amplitude-frequency characteristic are presented.

Conclusion. Among the considered methods for connecting the sensing element, the most appropriate seems to be method No. 3, which implies holes in the electrodes and contacts on the bottom side of the substrate. Here, the graph of the amplitude-frequency characteristic practically coincides with that of the sensor without connections (reference). Future work will focus on creating a prototype and its experimental testing.

Keywords: microaccelerometer, sensing element, surface acoustic waves, connection methods, concentric topology

For citation: Sorvina M. A., Kukaev A. S. Methods for Connecting a Concentrically Shaped Sensing Element of Microaccelerometers on Surface Acoustic Waves. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 4, pp. 81–90. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-81-90

Source of funding. The work was carried out with financial support from the Russian Science Foundation within the framework of the Russian Science Foundation grant 23-79-10259 in the form of subsidies in the field of scientific and scientific-technical activities.

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

Submitted 06.03.2024; accepted 14.06.2024; published online 27.09.2024

Введение. Сегодняшний мир уже трудно представить без акселерометров, датчиков ускорения, применяемых повсеместно в пользовательской электронике, производственной робототехнике, медицине, геофизике, автомобилестроении, воздушном, железнодорожном и морском транспорте [1–6]. Наибольшим спросом на рынке сейчас пользуются микроакселерометры, которые в отличие от "традиционных" типов обладают зна-

чительно меньшими габаритами, что позволяет легко уменьшать размеры механических деталей и совмещать их с электронными компонентами на одной монтажной подложке. Существует 3 группы микроакселерометров:

1) реализованные на микроэлектромеханических системах (МЭМС): они делятся по типу чувствительного элемента (ЧЭ) на пьезоэлектрические, пьезорезистивные и емкостные;

- 2) кварцевые маятниковые;
- 3) акселерометры на объемных и поверхностных акустических волнах (ПАВ).

При выборе акселерометра под конкретную техническую задачу необходимо учитывать следующие параметры датчика: диапазон измерений в единицах g ; чувствительность, т. е. минимальное изменение ускорения, которое датчик может зафиксировать; полосу пропускания; диапазон рабочих частот, в котором датчик способен измерять ускорение; масштабный коэффициент, представляющий собой отношение полного диапазона измерений акселерометра к полному диапазону полезного сигнала на выходе датчика (в милливольт на g); ударопрочность и тип подключения [7].

Несколько десятков лет назад [8] была предложена реализация датчиков ускорения на акустических волнах. Эксперименты показали, что они могут составить достойную конкуренцию акселерометрам на МЭМС, так как при схожести основных параметров, описанных выше, акустические сенсоры обладают более высокой вибро- и ударопрочностью. Конструкция микроакселерометров на акустических волнах представляет собой твердотельную монокристаллическую подложку, выполненную из пьезоэлектрического материала, на поверхность которой нанесены методом фотолитографии встречно-штыревые преобразователи (ВШП) [9]. Несомненным преимуществом твердотельных монокристаллических конструкций является их высокая ударопрочность. Так, в [10] приведены результаты моделирования монокристаллической конструкции акселерометра на подложке из пьезоэлектрической керамики на ударопрочность. Длина подложки составляет 200 мм, что не позволяет относить такой датчик к категории микроустройств. Однако, как показали расчеты, датчик сохраняет свою конструкцию без повреждений при ударе силой до 200 000 g и при этом по-прежнему выдает выходной линейный сигнал. Это позволяет сделать вывод, что микроакселерометр на ПАВ с концентрической формой топологии ЧЭ также будет обладать данным замечательным свойством. Для подтверждения этого в дальнейшем планируется провести компьютерное моделирование удар-

ного воздействия и оценить его влияние на искажение выходного сигнала.

Лидером по масштабам производства на рынке микроакселерометров сейчас являются МЭМС-датчики. Их малые габариты и вариации комбинаций технических параметров позволяют применять их во многих задачах. Однако есть специализированные области, например, где используются высокочастотные объекты, и там применение МЭМС невозможно ввиду хрупкости упругих подвесов, на которые крепится инерционная масса, что составляет основу принципа работы датчика. Предлагается применять датчики на акустических волнах, которые обладают схожими техническими параметрами с акселерометрами на МЭМС, а также более высокой вибро- и ударопрочностью.

На рынке уже получили широкое применение в бытовой радиоаппаратуре и профессиональной электронике различные датчики, реализованные на ПАВ, например такие, как радиочастотные фильтры и дуплексоры, изготовленные по технологии DSSP (die-sized SAW packaging), позволяющей значительно уменьшить габариты компонентов [11]. На НПП "Радар ММС" реализуются ПАВ-датчики температуры, давления, влажности и микроперемещений [12].

Типовая технологическая схема процесса изготовления фильтров, линий задержки и резонаторов на ПАВ подразумевает следующие этапы: изготовление звукопровода из пьезоэлектрического кристалла, изготовление фотошаблона, металлизацию подложки методом фотолитографии, формирование ВШП и контактных шин, монтаж, сборку и последующую герметизацию устройства [13]. Исходя из фактов о востребованности датчиков на ПАВ на рынке и идентичности процесса изготовления ЧЭ микроакселерометра с уже отработанными технологиями для других устройств, можно верить, что ПАВ-акселерометры также займут свою достойную нишу в ближайшем будущем.

"Классический" линейный вариант исполнения ЧЭ на ПАВ описан в [8]. Принцип работы такого акселерометра заключается в деформации подложки под действием внешних сил, возникновении соответствующих внутренних напряжений в пьезоматериале и последующем изменении фазы выходного сигнала. Именно по

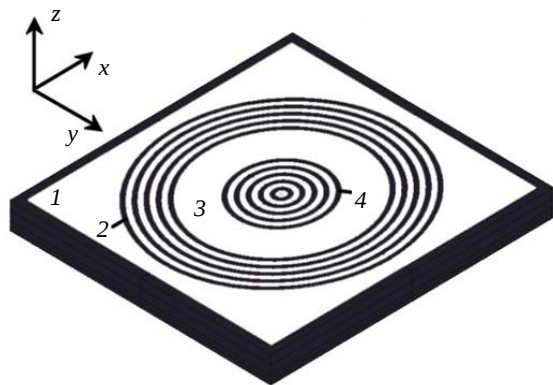


Рис. 1. ЧЭ микроакселерометра на ПАВ с концентрической формой топологии электродов

Fig. 1. Sensing element (SE) of a microaccelerometer on surface acoustic waves (SAW) with concentric electrodes

сдвигу фазы можно судить об ускорении объекта, на котором установлен датчик. В последние годы ученые пытаются попробовать новые нестандартные концепции организации ЧЭ, чтобы добиться более высоких характеристик сенсоров. Так, например, в [14, 15] была предложена кольцевая форма резонатора. Авторы данной статьи предлагают концентрическую топологию, подробно описанную в [16, 17]. Предлагаемая концепция представлена на рис. 1. На пьезоэлектрическую подложку 1 из ниобата лития нанесены возбуждающий и приемный ВШП (2 и 4 соответственно), 3 – рабочая область линии задержки. Форма электродов является эллиптической в связи с анизотропией монокристалла,

влияющей на скорость распространения волны. Данная концепция видится перспективной для исследования, потому что выдвигается гипотеза о более высокой энергоэффективности по сравнению с линейными топологиями за счет отсутствия рассеивания энергии.

Для изготовления опытного образца концентрического ЧЭ необходимо рассмотреть вопрос подключения такой конструкции к электрической схеме, поскольку стандартный метод подвода контактов напрямую через контактные дорожки не возможен ввиду особенностей организации электродов. Цель описываемой работы – предложить и теоретически проанализировать методы съема сигнала, а также провести сравнительное компьютерное моделирование наиболее многообещающих идей.

В модели концентрического ЧЭ присутствуют 4 группы электродов (рис. 2, 4–7): возбуждающие, на которые подается входной гармонический сигнал (обозначены голубым цветом); возбуждающие, которые выступают в роли заземления (желтый цвет); приемные изопотенциальные (серый цвет); приемные изопотенциальные 2 (зеленый цвет). К каждой из этих групп необходимо подвести общую шину.

В методе № 1 предлагается использовать навесной монтаж, чтобы подводить провода напрямую к электродам (рис. 2). Также можно

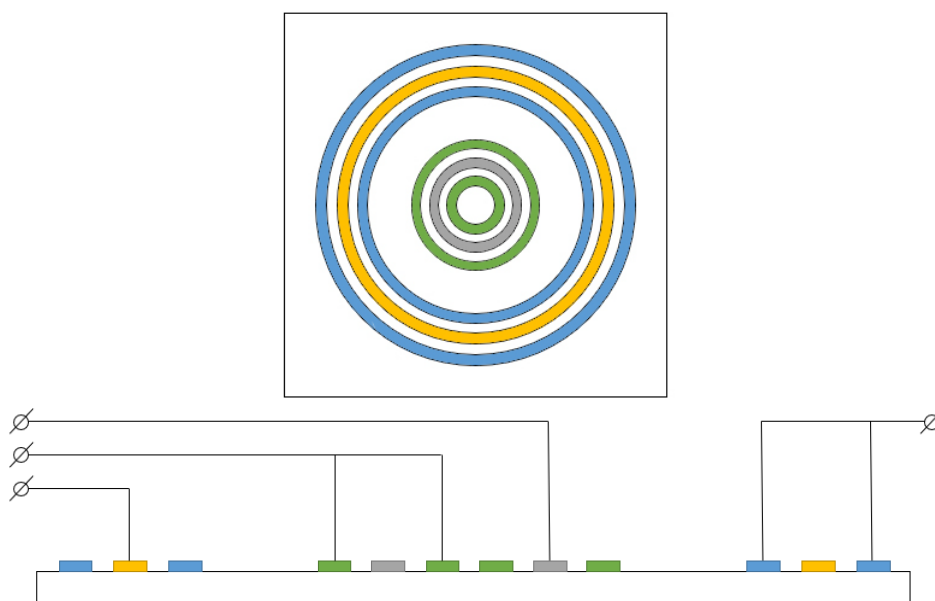


Рис. 2. Метод № 1. Навесной монтаж ЧЭ микроакселерометра на ПАВ

Fig. 2. Method No. 1. Point-to-point wiring of the SE of a SAW microaccelerometer

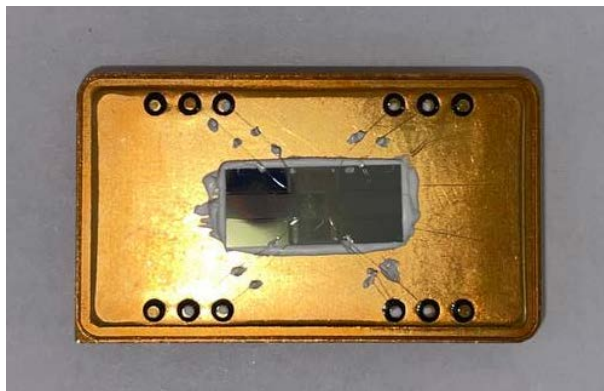


Рис. 3. Образец ЧЭ с навесным монтажом

Fig. 3. Sample of a point-to-point wired SE

подключить приемные ВШП, просверлив дополнительное отверстие в центре подложки и выводя провода через него на заднюю сторону для дальнейшей припайки.

В качестве дополнительных мягких опор предлагается использовать клей, что позволит избежать короткого замыкания проводов (рис. 3).

Недостатком данного метода является потеря главного преимущества микроакселерометров на ПАВ – высокой ударопрочности, так как провода легко могут оторваться при ударе. Также технологический процесс пайки усложняется ввиду необходимости организации контакта с ВШП, шириной, не превышающей $1/4$ длины акустической волны, что составляет 0.1828 мм для расчетной частоты 5 МГц. При этом диапазон частот, на котором работают устройства на ПАВ, составляет от 5 до 433 МГц. Соответственно, с увеличением частоты, согласно формуле

$$\lambda = v/v,$$

где v – скорость волны; v – частота, длина волны λ еще уменьшится, что приведет к сужению поверхности электрода и к возникновению дополнительных технических трудностей при реализации процесса пайки.

В методе № 2 вырезается один сектор из кольцевых ВШП, на освободившейся поверхности подложки проводятся две шины к возбуждающей и приемной группам электродов. Далее шины ведут к четырем контактными площадкам для припаивания ЧЭ к электрической схеме (рис. 4).

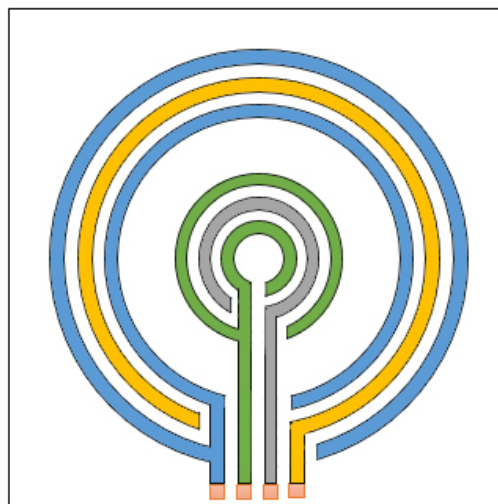


Рис. 4. Метод № 2. Организация шин в разрывах концентрических ВШП

Fig. 4. Method No. 2. Organization of busses in ruptures of concentric interdigital transducers (IDTs)

Безусловным недостатком второго метода является нарушение концентрической структуры электродов, что, вероятно, способно негативно повлиять на распространение ПАВ в области линии задержки.

В рамках метода № 3 предлагается подключать электроды по группам (обозначены на рис. 5, а красной пунктирной линией) через заранее просверленные в них отверстия. Отверстие заливается металлом, и с обратной стороны подложки к нему подводится металлическая дорожка, которая служит общей шиной для каждой определенной группы электродов. При этом, во избежание появления перекрестной электрической связи предлагается разносить отверстия на угол 90° друг относительно друга (рис. 5, б).

В методе № 4 в отличие от предыдущего предлагается просверлить отверстия рядом с электродом и протянуть через них провода на нижнюю поверхность ЧЭ (рис. 6, а, б). В таком случае отсутствуют общие шины, что позволяет выстроить отверстия в одну линию.

Стоит отметить, что недостатками и третьего, и четвертого методов являются потребность в дополнительной операции сверления и необходимость освободить нижнюю поверхность подложки. Вторым недостатком не является проблемной задачей, так как возможно закрепление ЧЭ микроакселерометра по периметру звукопровода, позволяющее оставить и верхнюю, и нижнюю поверхности свободными.

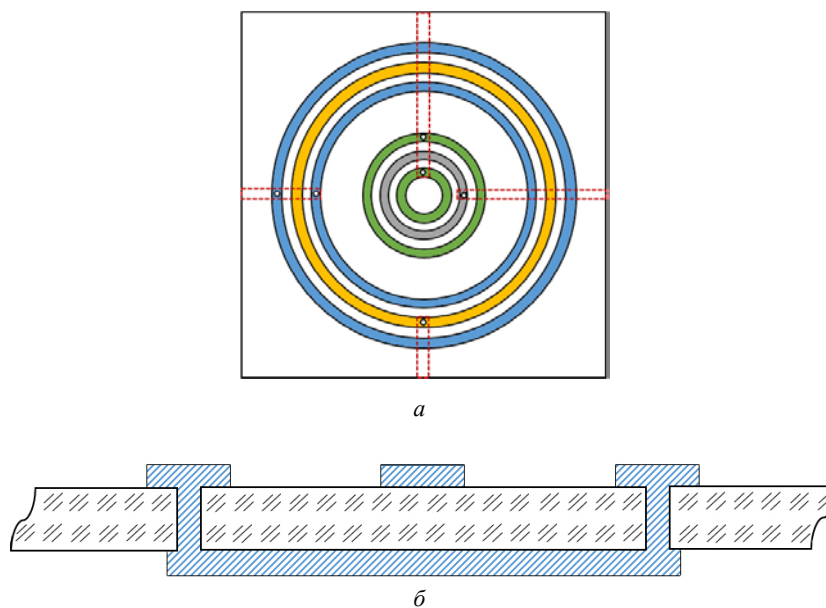


Рис. 5. Метод № 3. Подвод контактов к ЧЭ через отверстия в ВШП: *a* – вид сверху; *б* – боковой разрез
Fig. 5. Method No. 3. Mounting contacts to the SE through holes in the IDTs: *a* – top view; *б* – side section

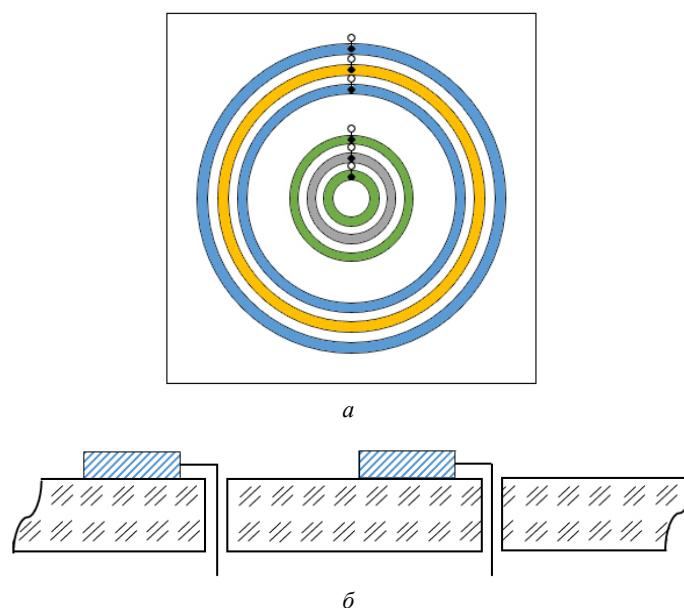


Рис. 6. Метод № 4. Подвод контактов к ЧЭ через отверстия в подложке: *a* – вид сверху; *б* – боковой разрез
Fig. 6. Method No. 4. Mounting contacts to the SE through holes in the substrate: *a* – top view; *б* – side section

В методе № 5 (рис. 7) предлагается вырезать отверстие в подложке и через боковые поверхности 1 и 2 провести дорожки от групп электродов на противоположную сторону подложки. Во избежание возникновения электрических перекрестных связей предлагается разнести дорожки следующим образом: возбуждающую группу, обозначенную голубым цветом, вести по ребру 1, заземляющую группу, изображенную желтым цветом, – по ребру 2, и две приемные группы

(здесь зеленая и серая) аналогично проводить по ребрам 1 и 2 соответственно.

Следует отметить, что создание отверстий в материале подложки (методы № 3–5) и контактных шин на ее поверхности (метод № 2) могут влиять на распространение акустической волны. Вероятнее всего наибольшее влияние будут вносить отверстия рядом с электродами в материале подложки (метод № 4). Таким образом, с точки зрения наименьших потерь для распространения

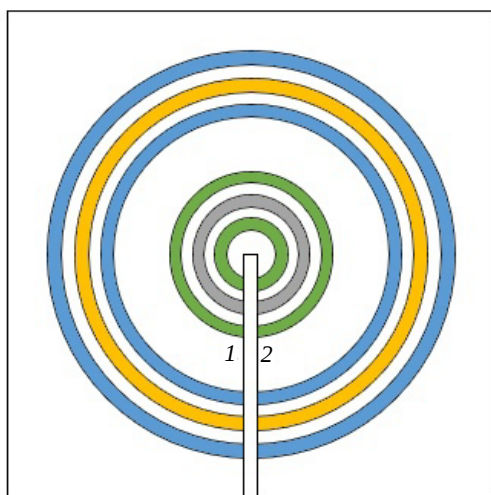


Рис. 7. Метод № 5. Вывод контактов через вырезанное отверстие в подложке

Fig. 7. Method No. 5. Output of contacts through a cut hole in the substrate

ПАВ наилучшим выглядит метод № 3. Для дальнейшего рассмотрения и окончательного выбора предлагается осуществить компьютерное моделирование распространения ПАВ для описанных случаев.

Материалы и методы. Компьютерное моделирование позволяет произвести симуляцию различных вариаций датчика без длительного и затратного процесса изготовления опытных образцов. Моделирование ЧЭ проводилось в программном обеспечении Comsol Multiphysics. Данная программа обладает тем преимуществом над иными способами моделирования, что производит одновременный учет как прямого и обратного преобразования электрического сигнала в акустический, так и явлений, сопровождающих возбуждение, распространение и детектирование акустических волн.

В качестве материала подложки используется монокристалл ниобата лития, для материала электродов и контактных шин выбран алюминий. Их характеристики представлены в таблице.

Моделирование методом конечных элементов предусматривало следующие стадии:

Параметры материалов в чувствительном элементе

Material parameters in the sensing element

Параметр	Ниобат лития 128° YX-среза	Алюминий
Скорость распространения волны, м/с	3961	–
Плотность, кг/м ³	4640	2712
Модуль упругости, ГПа	170	68.5
Коэффициент Пуассона	0.25	0.33
Предел прочности, МПа	110	90

- 1) выбор физики для соответствующей задачи и типа решателя;
- 2) создание геометрии модели ЧЭ;
- 3) задание материала, граничных условий и нагрузок на модель;
- 4) разбиение сеткой на конечные элементы;
- 5) автоматическое численное решение уравнений;
- 6) анализ результатов.

Таким образом, для моделирования способов подключения ЧЭ была создана трехмерная модель шириной 1/4 длины волны. Тип физики – пьезоэлектрика, включающая в себя подразделы: электростатика и механика. Расчет велся в частотной области от 4.5 до 5.5 МГц с шагом 0.01 МГц. На модель были заданы материалы (материал подложки: ниобат лития, материал электродов: алюминий), гармонический сигнал амплитудой 1 В, заземление, граничные условия на боковые грани, симулирующие продолжение по осям x и y материалов подложки и электродов, жесткое закрепление по периметру нижней грани подложки и PML-слой, являющийся квазибесконечным пространством, в котором гаснет акустическая волна для избежания возникновения эффектов переотражения от границ модели.

Результаты. Созданные компьютерные модели для методов № 1, 3, 4 показаны на рис. 8.

Графики амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) для этих случаев представлены на рис. 9.

Как видно из рисунка, АЧХ в методах № 1 и № 3 достигает пикового значения –60 дБ. Наличие этого значения не представляет существенного интереса в рамках описываемой работы, потому что сейчас используется намного меньшее количество электродов (5 штук) по сравнению с реальными датчиками, где оно составляет 50–100 штук. Также для моделирования используется псевдотрехмерная модель, чтобы сократить время расчета. Цель данного моделирования – сравнить АЧХ ЧЭ без подключения с вариациями подключений, считая

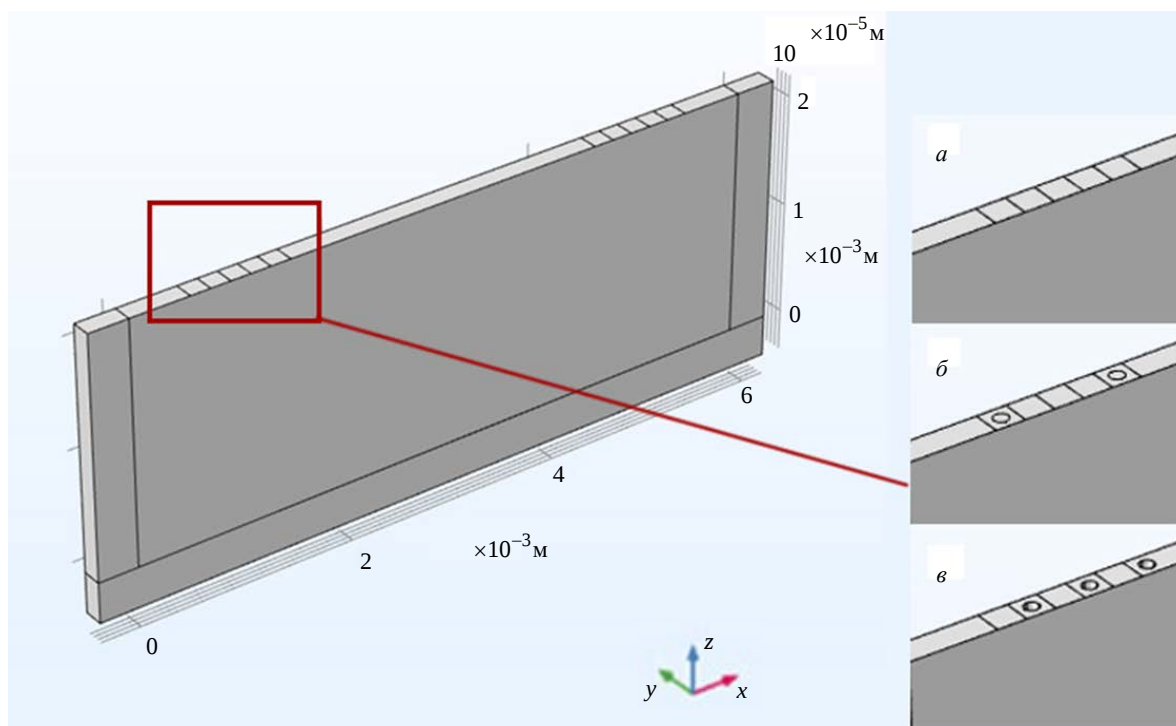


Рис. 8. Моделирование методов подключения: а – метод № 1; б – метод № 3; в – метод № 4
Fig. 8. . Simulation of connection methods: a – method No. 1; б – method No. 3; в – method No. 4

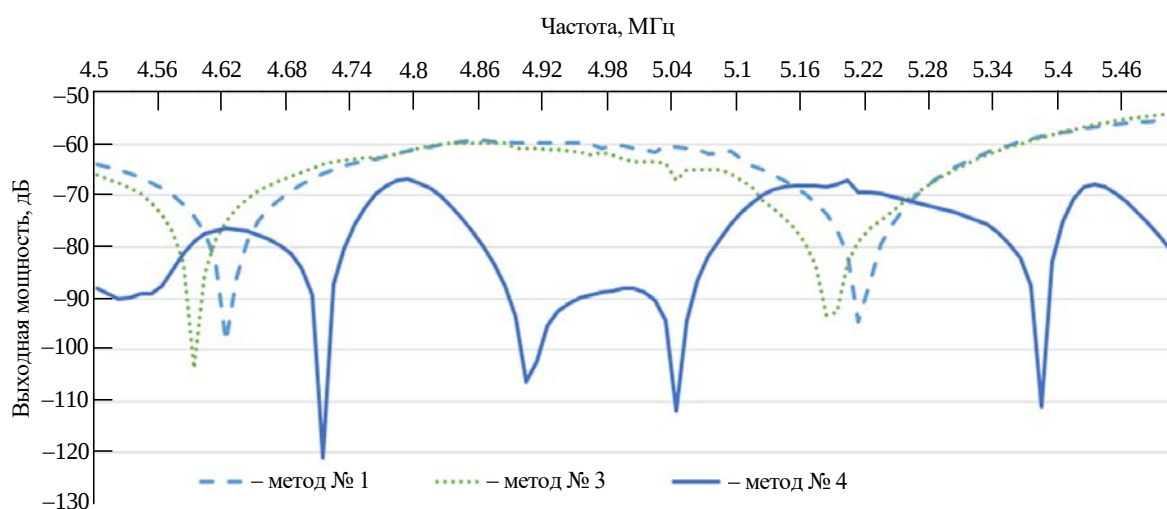


Рис. 9. АЧХ ЧЭ для разных методов подключения
Fig. 9. Amplitude-frequency characteristic of SE for different connection methods

АЧХ для метода № 1 идеальной. Как видно из графиков, метод № 3 является самым перспективным, так как сдвиг АЧХ минимален.

Закключение. Таким образом, в ходе работы были описаны 5 методов подключения, смоделированы 3 наиболее перспективных из них. Из всех рассмотренных способов подключения ЧЭ наиболее подходящим представляется метод № 3 с отверстиями в электродах, так как его АЧХ близка к АЧХ датчика без подключений. Метод № 4 приводит к значительным искажениям

характеристики. Финальный выбор метода подключения будет производиться на стадии выбора технического процесса исполнения датчика. Так как при высокочастотных применениях электроды будут еще более узкими, потребуется консультация технолога по способу пайки.

Направление будущих исследований – моделирование методов № 2 и 5 на полноразмерной трехмерной модели, создание опытного образца и проведение с ним испытаний в лабораторных условиях.

Список литературы

1. Marek J. MEMS for automotive and consumer electronics // IEEE Intern. Solid-State Circuits Conf. (ISSCC), Francisco, USA, 07–11 Feb. 2010. IEEE, 2010. doi: 10.1109/ISSCC.2010.5434066
2. Khorgade M. P., Gaidhane A. Applications of MEMS in Robotics and BioMEMS // UkSim 13th Intern. Conf., Cambridge, UK, 30 March–01 Apr. 2011. IEEE, 2011. doi: 10.1109/UKSIM.2011.106
3. Panescu D. MEMS in medicine and biology // IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine. 2006. Vol. 25, iss. 5. P. 19–28. doi: 10.1109/MEMB.2006.1705742
4. Application of MEMS accelerometer to geophysics / Takao Aizawa, Toshinori Kimura, Toshifumi Matsuoka, Tetsuya Takeda, Youichi Asano // Intern. J. of the JCRM. 2009. Vol. 4, iss. 2. P. 33–36. doi: 10.11187/ijcrm.4.33
5. MEMS Sensors for Automotive Applications: A Review / G. Bhatt, K. Manoharan, P. S. Chauhan, Sh. Bhattacharya // Sensors for Automotive and Aerospace Applications. Springer, Singapore, 2019. P. 223–229. doi: 10.1007/978-981-13-3290-6_12
6. Пешехонов В. Г. Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28, № 2 (109). С. 3–10. doi: 10.17285/0869-7035.0028
7. Классификация акселерометров и сферы применения. URL: <https://inelso.ru/library/statyi/klassifikatsiya-akselerometrov-i-sfery-primeneniya/> (дата обращения 14.02.2024)
8. Лукьянов Д. П., Лучинин В. В., Скворцов В. Ю. Микроакселерометр на поверхностных акустических волнах // Микросистемная техника. 2001. № 2. С. 3–7.
9. Micro rate gyroscopes based on surface acoustic waves / D. Lukyanov, S. Shevchenko, A. Kukaev, A. Ivanov, R. Telichkin // NORCHIP. Tampere, Finland, 27–28 Oct. 2014. IEEE, 2014. doi: 10.1109/NORCHIP.2014.7004702
10. Structural Design of MEMS Acceleration Sensor Based on PZT Plate Capacitance Detection / Min Cui, Senhui Chuai, Yong Huang, Yang Liu, Jian Li // Micromachines. 2023. Vol. 14, iss. 8. P. 1565. doi: 10.3390/mi14081565
11. Балышева О. Л. Акустоэлектронная компонентная база // Журн. радиоэлектроники. 2014. № 6. С. 1–28.
12. Секреты высокой точности. URL: <https://topwar.ru/78855-sekret-y-vysokoy-tochnosti.html> (дата обращения 14.02.2024)
13. Никонова Г. С., Аржанов В. А. Исследование характеристик генераторов на поверхностных акустических волнах // Омский науч. вестн. 2012. № 3. С. 331–334.
14. 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
15. 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
16. Сорвина М. А. Исследование концентрической топологии для применения в чувствительных элементах инерциальных датчиков на поверхностных акустических волнах // XXIV конф. молодых ученых "Навигация и управление движением", Санкт-Петербург, 15–18 марта 2022 г. С. 217–219.
17. Sorvina M. A. Concentric Topology for Sensitive Elements of Surface Acoustic Wave Devices // Seminar on Microelectronics, Dielectrics and Plasmas (MDP), St Petersburg, Russia, 20 Nov. 2023. IEEE, 2023. doi: 10.1109/MDP60436.2023.10424262

Информация об авторах

Кукаев Александр Сергеевич – кандидат технических наук (2016), и. о. заведующего кафедрой прикладной механики и инженерной графики, доцент кафедры лазерных измерительных и навигационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов: системы и устройства навигации; 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: askukaev@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9525-8412>

Сорвина Мария Александровна – аспирантка кафедры лазерных измерительных и навигационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор четырех научных публикаций. Сфера научных интересов: навигационные датчики на акустических волнах; 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: masorvina@etu.ru

<https://orcid.org/0009-0006-0309-5641>

References

1. Marek J. MEMS for Automotive and Consumer Electronics. IEEE Intern. Solid-State Circuits Conf. (ISSCC), Francisco, USA, 07–11 Feb. 2010. IEEE, 2010. doi: 10.1109/ISSCC.2010.5434066
2. Khorgade M. P., Gaidhane A. Applications of MEMS in Robotics and BioMEMS. UkSim 13th Intern. Conf., Cambridge, UK, 30 March 2011–01 Apr. 2011. IEEE, 2011. doi: 10.1109/UKSIM.2011.106
3. Panescu D. MEMS in Medicine and Biology. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine. 2006, vol. 25, iss. 5, pp. 19–28. doi: 10.1109/EMMB.2006.1705742
4. Takao Aizawa, Toshinori Kimura, Toshifumi Matsuoka, Tetsuya Takeda, Youichi Asano. Application of MEMS Accelerometer to Geophysics. Intern. J. of the JCRM. 2009, vol. 4, iss. 2, pp. 33–36. doi: 10.11187/ijjcrm.4.33
5. Bhatt G., Manoharan K., Chauhan P. S., Bhattacharya Sh. MEMS Sensors for Automotive Applications: A Review. Sensors for Automotive and Aero-space Applications. Springer, Singapore, 2019, pp. 223–229. doi: 10.1007/978-981-13-3290-6_12
6. Peshekhonov V. G. The Author of Precision Gyroscope. Gyroscopy and Navigation. 2020, vol. 28, no. 2, pp. 3–10. doi: 10.17285/0869-7035.0028 (In Russ.)
7. Classification of accelerometers and scope of application. Available at: <https://inelso.ru/library/statyi/klassifikatsiya-akselerometrov-i-sfery-primeneniya/> (accessed 14.02.2024)
8. Lukyanov D. P., Luchinin V. V., Skvortsov V. Yu. Microaccelerometer on Surface Acoustic Waves. Microsystem Technology. 2001, no. 2, pp. 3–7. (In Russ.)
9. Lukyanov D., Shevchenko S., Kukaev A., Ivanov A., Telichkin R. Micro Rate Gyroscopes Based on Surface Acoustic Waves. NORCHIP. Tampere, Finland, 27–28 Oct. 2014. IEEE, 2014. doi: 10.1109/NORCHIP.2014.7004702
10. Min Cui, Senhui Chuai, Yong Huang, Yang Liu, Jian Li. Structural Design of MEMS Acceleration Sensor Based on PZT Plate Capacitance Detection. Micromachines. 2023, vol. 14, iss. 8, p. 1565. doi: 10.3390/mi14081565
11. Balysheva O. L. Acoustoelectronic Component Base. J. of Radioelectronics. 2014, no. 6, pp. 1–28. (In Russ)
12. Secrets of High Accuracy. Available at: <https://topwar.ru/78855-sekret-y-vysokoy-tochnosti.html> (accessed 14.02.2024)
13. Nikonova G. S., Arzhanov V. A. Study of the Characteristics of Generators on Surface Acoustic Waves. Omsk Bulletin. 2012, no. 3, pp. 331–334. (In Russ.)
14. Shevchenko S. Yu., Mikhailenko D. A., Nyamweiru B. Optimizing the Design of Surface-Acoustic-Wave Ring Resonator by Changing the Interdigitated Transducer Topology. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 6, pp. 51–62. (In Russ.)
15. Shevchenko S. Yu., Mikhailenko D. A. Optimal Overall Dimensions of a Surface Acoustic Waves Ring Resonator. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 2, pp. 89–100. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-2-89-100 (In Russ.)
16. Sorvina M. A. Investigation of Concentric Topology for Application in Sensitive Elements of Inertial Sensors on Surface Acoustic Waves. XXIV Conf. of Young Scientists "Navigation and Traffic Control", St Petersburg 15–18 March 2022, pp. 217–219. (In Russ.)
17. Sorvina M. A. Concentric Topology for Sensitive Elements of Surface Acoustic Wave Devices. Seminar on Microelectronics, Dielectrics and Plasmas (MDP), St Petersburg, Russia, 20 Nov. 2023. IEEE, 2023. doi: 10.1109/MDP60436.2023.10424262

Information about the authors

Alexander S. Kukaev, Cand. Sci. (2016), Head of the Department of Applied Mechanics and Engineering Graphics, Associate Professor of the Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: navigation systems and devices; computer modeling of physical processes.

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

E-mail: askukaev@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9525-8412>

Maria A. Sorvina, Postgraduate student of the Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 4 scientific publications. Area of expertise: navigation sensors based on acoustic waves, computer modeling of physical processes.

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

E-mail: masorvina@etu.ru

<https://orcid.org/0009-0006-0309-5641>