

УДК 548:53+534.22

ВЛИЯНИЕ АПЕРТУРЫ ВСТРЕЧНО-ШТЫРЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕГО ВЫХОДНОГО СИГНАЛА В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЕ

© 2020 г. И. Е. Кузнецова^{1, *}, А. В. Смирнов¹, Ю. В. Плеханова², А. Н. Решетилов², Г.-Ц. Ван³

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук”, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Институт биохимии и физиологии микроорганизмов имени Г.К. Скрябина Российской академии наук”, Пущино, Россия

³Национальный университет Чунг Син, Департамент машиностроения, Тайчжун, Тайвань

*E-mail: kuziren@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.12.2019 г.

После доработки 20.01.2020 г.

Принята к публикации 26.02.2020 г.

Исследовано влияние апертуры и количества пар электродов встречно-штыревых преобразователей (ВШП) на характеристики возбуждаемых акустических сигналов A_1 и SH_1 в YX -пластине $LiNbO_3$. Обнаруженные зависимости интенсивности сигналов от параметров эксперимента показывают возможность миниатюризации интегральных датчиков, состоящих из решетки сенсоров на основе линий задержки или одиночных ВШП резонаторов.

DOI: 10.31857/S0367676520060162

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время разработка интегральных датчиков, содержащих несколько линий задержки, вызывает большой интерес у исследователей [1–3]. Также недавно появились работы, в которых предлагается использовать набор встречно-штыревых преобразователей, расположенных на одной пьезоэлектрической подложке, для регистрации обратных [4] и нераспространяющихся [5] пластинчатых акустических волн. Исследование свойств этих волн представляет фундаментальный и практический интерес. Недавно была продемонстрирована возможность создания резонатора на волнах с нулевой групповой скоростью [6].

Тенденцией последних лет является миниатюризация датчиков и устройств обработки сигналов. Одним из способов уменьшения пространственных размеров обсуждаемых устройств является уменьшение апертуры используемых ВШП. Этот вопрос важен именно для датчиков, работающих на частотах порядка десятков МГц. Что касается высокочастотных устройств на ПАВ, то существует большое количество работ, в которых исследуется влияние количества пар электродов и апертуры на характеристики акустических сигналов. Например, в [7] были исследованы ВШП, создаваемые на основе графена и показано, что для

оптимального возбуждения ПАВ на частоте 154 МГц при длине волны $\lambda = 24$ мкм необходимо использовать ВШП с 80 парами электродов и соотношением апертура/длина волны $w/\lambda = 5$. В [8] исследовано влияние количества пар электродов и апертуры ВШП на качество работы однопортового ПАВ-резонатора на структуре AlN /сапфир. Показано, что при $\lambda = 8$ мкм увеличение апертуры и количества пар электродов ВШП приводит к улучшению характеристик акустического сигнала. Однако работы, посвященные исследованию влияния апертуры и количества пар электродов ВШП для устройств с низкой частотой, практически отсутствуют.

В данной статье рассматривается задача об оптимизации таких параметров ВШП как апертура и количество пар электродов для устройств, работающих на частоте от 6 до 10 МГц. Такая оптимизация может быть осуществлена с помощью метода конечных элементов, реализованного в среде мультифизического программирования Comsol Multiphysics.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Для проведения исследования были созданы 9 моделей резонаторов с различным количеством пар электродов (3, 5 и 7) и апертурой (2.5, 5 и 7.5 мм)

Таблица 1. Материальные постоянные для ниобата лития

Модули упругости, C_{ij}^E (10^{10} Н/м ²)						
C_{11}^E	C_{12}^E	C_{13}^E	C_{14}^E	C_{33}^E	C_{44}^E	C_{66}^E
20.3	5.73	7.52	0.85	24.24	5.95	7.28
Пьезомодули, e_{ij} ($\text{К} \cdot \text{м}^{-2}$)				Диэлектрические постоянные, $\epsilon_{ij}^S/\epsilon_0$		Плотность, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$
e_{15}	e_{22}	e_{31}	e_{33}	ϵ_{11}^S	ϵ_{33}^S	ρ
3.83	2.37	0.23	1.3	44.3	27.9	4650

ВШП. В качестве материала подложки использовалась пластина ниобата лития Y -среза. Материальные постоянные для ниобата лития взяты из [9] и приведены в табл. 1. ВШП размещались на поверхности Y -среза пластины LiNbO_3 толщиной 370 мкм, перпендикулярно направлению распространения X . Геометрия модели ВШП показана на рис. 1а. В модели для предотвращения отражения возбуждаемых волн по краям пластины располагался идеально согласующий слой PML (рис. 1б). При реализации этих поглощающих слоев использовались квадратичные функции затухания. В области пластины, свободной от ВШП, использовались механические граничные условия, соответствующие свободным границам, т.е. механические напряжения были равны нулю. В области контакта электродов ВШП с пластиной в качестве механических граничных условий использовались непрерывность смещений и механических

напряжений между электродом и пластиной. Возбуждение акустической волны моделировали, используя периодическое изменение электрического потенциала в области электродов ВШП. На один электрод подавали напряжение, а следующий электрод закорачивали. При составлении модели была сгенерирована ручная сетка. В области под электродами электроды и межэлектродное пространство было разбито на параллелепипеды. При моделировании использовали сетку с линейным размером элемента, равным $\lambda/50$. В области PML использовалась свободная сетка, построенная с помощью функции Comsol “Physics controlled mesh”. Данная сетка представляла собой набор тетраэдров различного размера (рис. 1в, 1г).

Как уже говорилось выше, благодаря использованию PML на границах резонатора отражение волн было исключено, что привело к исчезнове-

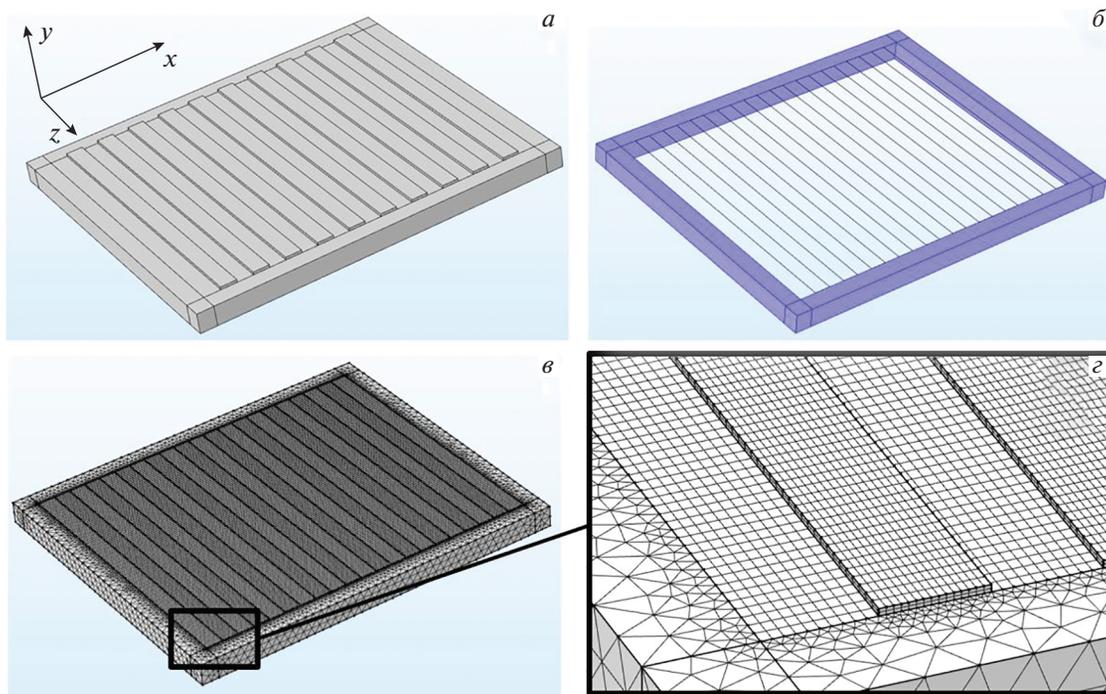


Рис. 1. а – Топология FEM модели; б – расположение PML; в – заданная сетка модели; г – увеличенный фрагмент.

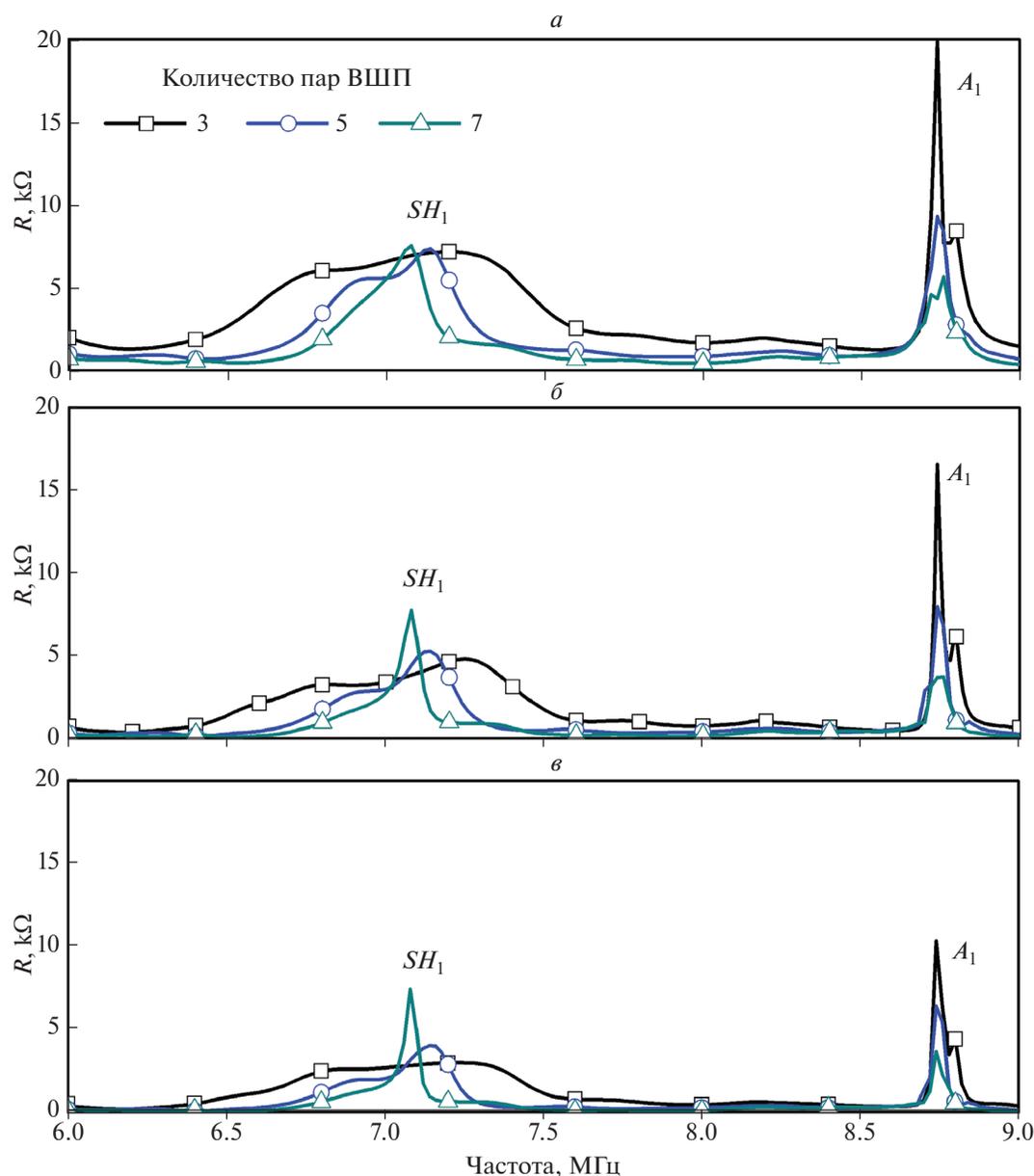


Рис. 2. Частотная зависимость реальной части импеданса при различных количествах пар ВШП и значениях апертуры: $a - 2.5$, $б - 5$, $в - 7.5$ мм.

нию ложных пиков на моделируемой резонансной кривой. В результате проведенного моделирования были получены частотные зависимости действительной части электрического импеданса ВШП для различных значений апертуры ВШП и количества пар электродов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что для пластины YX -ниобата лития в диапазоне $hf = 2.5-4$ км \cdot с $^{-1}$, где h – толщина пластины, f – частота волны, существуют только

две пьезоактивные волны первого порядка: поперечно-горизонтальная SH_1 -волна и антисимметричная A_1 -волна Лэмба [10]. В работе [4] было показано, что при определенных частотах волна A_1 является обратной. На рис. 2 представлены полученные в результате моделирования частотные зависимости реальной части электрического импеданса исследуемого ВШП при различных значениях его апертуры и количества пар штырей.

Анализ показал, что изменение апертуры ВШП практически не влияет на величину импеданса сигнала, соответствующего SH_1 -волне. Увеличение количества пар штырей с 3 до 5, как и сле-

довало ожидать, приводит к значительному сужению полосы пропускания ВШП для SH_1 -волны. Для обратной A_1 -волны было обнаружено, что уменьшение апертуры ВШП с 7.5 до 2.5 мм приводит к возрастанию интенсивности акустического сигнала в два раза. При этом для эффективного возбуждения данной волны достаточно 3 пар электродов. Это, судя по всему, связано с достижением оптимального соотношения между количеством пар штырей и их длиной, приводящего к более полному электрическому согласованию ВШП на данной частоте с внутренним сопротивлением генератора [11].

Полученные результаты показывают возможность миниатюризации гибридных устройств, содержащих несколько линий задержки или ВШП резонаторов и работающих на обратных волнах, путем уменьшения апертуры соответствующих ВШП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе с помощью метода конечных элементов исследовано влияние геометрических параметров ВШП, нанесенных на пластину ниобата лития Y -среза перпендикулярно X -направлению распространения, на характеристики выходных акустических сигналов A_1 и SH_1 . Показано, что в случае реализации устройств на обратных акустических волнах, имеющих рабочую частоту порядка 8.5 МГц, размер ВШП можно существенно уменьшить за счет уменьшения его апертуры и количества пар электродов. Обнаруженные зависимости показывают возможность миниатюризации интегральных датчиков,

состоящих из решетки сенсоров на основе линий задержки или одиночных ВШП-резонаторов.

В части исследования возможности миниатюризации устройств работа выполнялась в рамках проекта РФФ № 18-49-08005. В части применения метода конечных элементов для исследования акустоэлектрических процессов в вибропьезопреобразователях работа выполнялась в рамках проекта РФФИ № 18-57-7802.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анисимкин В.И., Воронова Н.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 8. С. 1010; *Anisimkin V.I., Voronova N.V.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. № 8. P. 911.
2. *Oh H., Fu C., Kim K. et al.* // Sensors-Basel. 2014. V. 14. P. 21660.
3. *Wang Y., Zhang S.Y., Fan L. et al.* // Chin. Phys. Lett. 2015. V. 32. P. 86802.
4. *Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Nedospasov I.A. et al.* // J. Sound Vibr. 2019. V. 442. P. 155.
5. *Kuznetsova I.E., Nedospasov I.A., Smirnov A.V. et al.* // Ultrason. 2019. V. 99. Art. № 105961.
6. *Yantchev V., Arapan L., Katardjiev I. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 99. Art. № 033505.
7. *Zhou J., Shi X., Xiao D. et al.* // J. Micromech. Microeng. 2019. V. 29. Art. № 015006.
8. *Yang S., Ai Y., Zhang Y. et al.* // J. Micromech. Microeng. 2018. V. 28. Art. № 085005.
9. www.bostonpiezooptics.com/lithium-niobate.
10. *Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Borodina I.A. et al.* // Ultrason. 2004. V. 42. P. 373.
11. *Красильников В.А., Крылов В.В.* Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984. 403 с.