

**Исследование пьезоэлектрических резонаторов с поперечным электрическим полем**Б. Д. Зайцев<sup>1,\*</sup>, А. М. Шихабудинов<sup>1</sup>, И. А. Бородина<sup>1</sup>, А. А. Теплых<sup>1</sup>, И. Е. Кузнецова<sup>2</sup><sup>1</sup>*Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Россия, 410019, Саратов, ул. Зеленая, д. 38*<sup>2</sup>*Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова, Россия, 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7*

(Статья поступила 13.11.2014; Подписана в печать 28.11.2014)

В последние годы разработчики акустических жидкостных датчиков обращают особое внимание на пьезоэлектрические резонаторы с поперечным электрическим полем. Основная трудность при их создании это подавление нежелательных колебаний. Для достижения этой цели существуют, по крайней мере, два варианта. Во-первых, это выбор оптимальной формы электродов и точная их ориентация относительно кристаллографических осей пластины. Однако форма и размеры электродов зависят от формы пластины и от ее размеров. Во-вторых, нанесение поглощающего слоя вокруг резонатора, включая часть электродов. В работе экспериментально исследовано влияние ширины зазора между электродами и ширины области покрытия электродов поглощающим слоем на частоту и добротность последовательного и параллельного резонансов и на коэффициент электро-механической связи. Электроды прямоугольной формы с размерами  $5 \times 10$  мм располагались на пластине ниобата лития — среза толщиной 0,5 мм. Ширина зазора между электродами и ширина области покрытия менялись от 1 до 5 мм. Поперечное электрическое поле было направлено вдоль оси  $Y$ . Было показано, что резонанс достигается на продольной акустической волне, бегущей вдоль оси  $X$  между электродами. Было установлено, что изменение ширины зазора между электродами и ширины области покрытия электродов меняет частоту последовательного и параллельного резонансов в пределах 1%. При этом добротности последовательного и параллельного резонансов изменяются в пределах 500–13000 и 500–1800, соответственно. Изменение коэффициента электро-механической связи лежит в пределах 1–4%.

PACS: 43.20.+g

УДК: 534.2

Ключевые слова: резонатор с поперечным полем, ниобат лития, параллельный резонанс, последовательный резонанс, коэффициент электромеханической связи.

**ВВЕДЕНИЕ**

В последние годы в связи с разработкой и совершенствованием акустоэлектрических датчиков для исследования свойств различных жидкостей, включая биологические, исследователи стали обращать особое внимание на пьезоэлектрические резонаторы с поперечным электрическим полем. В настоящее время существует большое количество статей, посвященных этим резонаторам, некоторые из которых приведены в списке литературы [1–9]. Хотя основные параметры таких резонаторов исследованы недостаточно подробно, их возможности для работы в качестве жидкостных сенсоров убедительно продемонстрированы [1–5, 8]. Основная трудность при конструировании таких резонаторов это подавление нежелательных колебаний с целью обеспечения четкой резонансной частотной зависимости реальной и мнимой частей электрического импеданса/адмиттанса. Для достижения этой цели существуют, по крайней мере, два варианта. Во-первых, это выбор оптимальной формы электродов и точная их ориентация относительно кристаллографических осей пластины [1–5, 8]. В указанных работах традиционно используются электроды в виде полукруга. Во-вторых,

нанесение поглощающего слоя на определенную часть резонатора, который подавляет паразитные колебания и позволяет сформировать четкую резонансную частотную зависимость реальной и мнимой частей электрического импеданса/адмиттанса [6, 7, 9]. На основе такого резонатора был создан биологический датчик, позволяющий осуществлять детекцию бактериальных клеток непосредственно в жидкой фазе при их взаимодействии с бактериофагами [10], миниантителами [11] и антителами [12]. Однако детальное исследование влияния ширины зазора между электродами и ширины поглощающего слоя на резонансную частоту и добротность ранее не проводилось. Поэтому в настоящей работе детально исследовалось влияние ширины покрытия на резонансную частоту и добротность при последовательном и параллельном резонансах для различной ширины зазора между электродами. В результате экспериментально удалось определить области существования чистых резонансов и границы изменения значений резонансной частоты, добротности и эффективного коэффициента электромеханической связи.

**1. ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТА**

В работе экспериментально исследован пьезоэлектрический резонатор с поперечным возбуждающим электрическим полем на основе пластины ниобата

\*E-mail: zai-boris@yandex.ru

лития  $X$ -среза толщиной 500 мкм. На одной стороне пластины наносились два алюминиевых тонкопленочных электрода прямоугольной формы с размерами  $5 \times 10 \text{ мм}^2$ . Электроды ориентировались таким образом, чтобы поперечное поле было сориентировано вдоль кристаллографической оси  $Y$ . Эта компонента поля возбуждала продольную акустическую волну, переотражающуюся между сторонами пластины с наибольшим коэффициентом электромеханической связи [6, 7]. Исследовались пять электродных конфигураций с шириной зазора  $L$  между электродами 1, 2, 3, 4, и 5 мм. Электроды толщиной 2000 Å напылялись в вакууме через специальные маски путем термического испарения алюминия. Пространство вокруг электродов покрывалось тонким слоем демпфирующего лака шириной примерно 5 мм, и с помощью LCR измерителя измерялись частотные зависимости реальной и мнимой частей

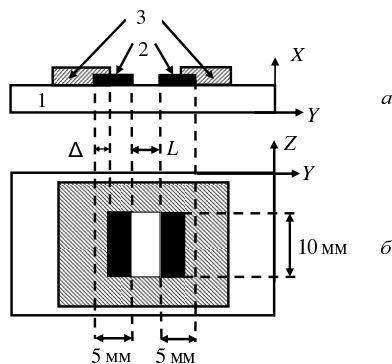


Рис. 1: Резонатор с поперечным электрическим полем, вид сбоку (а) и сверху (б): 1 — пластина из ниобата лития, 2 — электроды, 3 — поглощающее покрытие

электрического импеданса и адмиттанса. Затем на каждый электрод наносилась полоска лака шириной 0,2–0,3 мм, ориентированная вдоль наибольшего размера электродов (см. рис. 1), и после этого вновь проводились указанные измерения. Данная процедура повторялась до полного покрытия электродов поглощающим слоем. Таким образом, ширина покрытия  $\Delta$  менялась от 0 до 5 мм с шагом 0,2–0,3 мм. Полученные зависимости позволили определить значения резонансной частоты и добротности для последовательного и параллельного резонанса в зависимости от  $\Delta$  для указанных выше значений ширины зазора  $L$ .

## 2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Были получены зависимости частоты (а) и добротности (б) последовательного резонанса от ширины покрытия  $\Delta$  при различных значениях ширины зазора между электродами, которые представлены на рис. 2. Видно, что при ширине зазора  $L = 1$  мм частота последовательного резонанса с ростом  $\Delta$  увеличивается

ся, проходит максимум, затем практически не меняется при изменении  $\Delta$  в пределах 2–4 мм и существенно уменьшается в диапазоне  $\Delta = 4$ –5 мм. Для этого значения ширины зазора частота последовательного резонанса является максимальной. Для других значений ширины зазора резонансная частота практически не зависит от  $L$  и плавно уменьшается с ростом  $\Delta$ . Относительно добротности последовательного резонанса видно, что при  $L = 1$  мм она является минимальной и практически не зависит от величины  $\Delta$ . В остальных случаях добротность с ростом  $\Delta$  вначале увеличивается, достигает максимума и затем плавно уменьшается. При этом зависимость добротности от ширины зазора является немонотонной.

На рис. 3 представлены аналогичные зависимости для частоты (а) и добротности (б) параллельного резонанса. Видно, что резонансная частота с ростом ширины зазора увеличивается и для  $L = 3$  и 4 мм практически не зависит от  $\Delta$ . Для  $L = 1$  и 2 мм наблюдается существенное уменьшение частоты в диапазонах  $\Delta = 4$ –5 мм и  $\Delta = 4,5$ –5 мм, соответственно. Что касается добротности параллельного резонанса, то при значениях  $L = 1, 2$  и 3 мм она практически не меняется с ростом  $\Delta$  вплоть до  $\Delta = 4$  мм, но затем существенно уменьшается. При  $L = 4$  мм добротность практически не зависит от величины  $\Delta$ . Таким образом, результаты исследований показывают, что размер активной части резонатора несколько больше ширины зазора. С ростом ширины зазора добротность увеличивается, достигает максимума при  $L = 3$  мм и затем уменьшается.

Измерения частот последовательного ( $f_{ser}$ ) и параллельного ( $f_{par}$ ) резонансов позволили определить эффективный коэффициент электромеханической связи  $K^2$  в соответствии с известной формулой [13]

$$K^2 = (\pi/2)^2 (f_{par} - f_{ser}) / f_{par} \quad (1)$$

На рис. 4 представлены зависимости  $K^2$  от ширины области покрытия  $\Delta$  при различной ширине зазора между электродами. Видно, что для  $L = 2, 3$  и 4 мм коэффициент электромеханической связи практически не зависит от величины  $\Delta$ . Исключение составляет случай ширины зазора  $L = 1$  мм, для которого указанная зависимость имеет локальные максимум и минимум в диапазоне  $\Delta = 1$ –2 мм. С точки зрения физического смысла  $K^2$  соответствует удвоенному относительному изменению скорости волны при выключении поперечного пьезоэффекта. При этом, как известно,  $K^2$  зависит не только от соответствующих материальных констант, но и от апертуры волны [6, 7], т. е. от значения  $L$ . Кроме того, было исследовано влияние различных паразитных колебаний на характеристики резонатора. Качественный анализ показал, что паразитные колебания в данном случае связаны, в основном, с волнами Лэмба, которые генерируются нормальными компонентами электрического поля под электродами и которые переотражаются боковыми краями кристалла [6, 7]. На рис. 5 представлена диаграмма, каждая

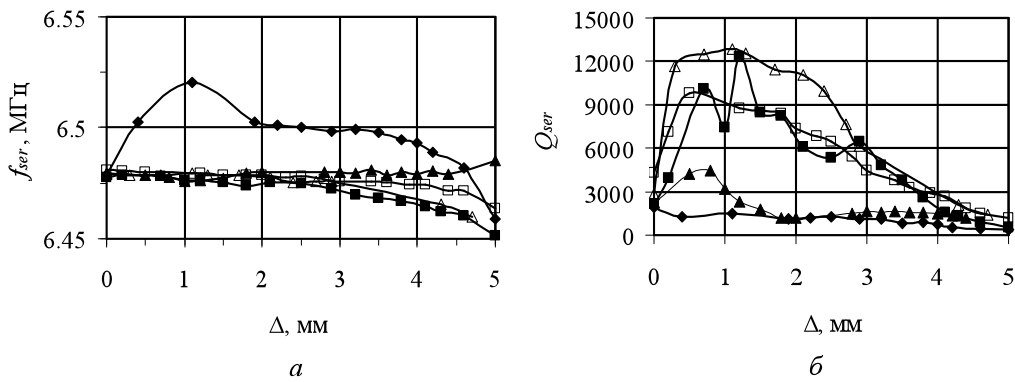


Рис. 2: Зависимости резонансной частоты (а) и добротности (б) последовательного резонанса от ширины области покрытия  $\Delta$  при различных значениях ширины зазора между электродами:  $L = 1$  мм (ромбы),  $L = 2$  мм (черные квадраты),  $L = 3$  мм (черные треугольники),  $L = 4$  мм (пустые треугольники),  $L = 5$  мм (пустые квадраты)

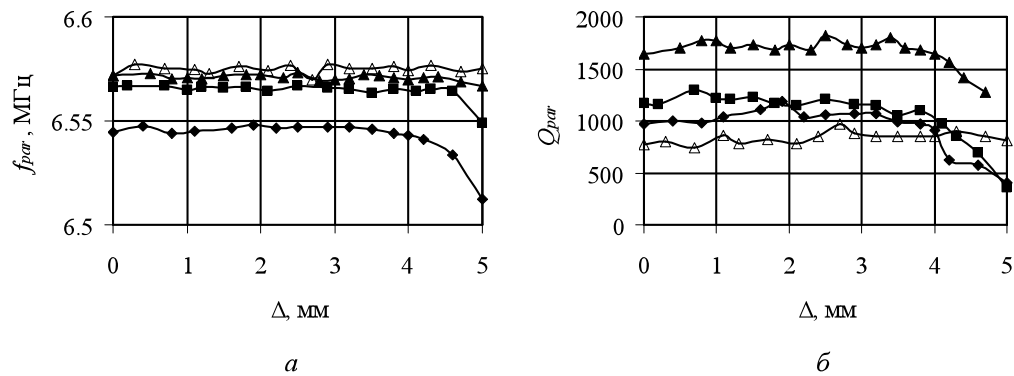


Рис. 3: Зависимости резонансной частоты (а) и добротности (б) параллельного резонанса от ширины области покрытия  $\Delta$  при различных значениях ширины зазора между электродами:  $L = 1$  мм (ромбы),  $L = 2$  мм (черные квадраты),  $L = 3$  мм (черные треугольники),  $L = 4$  мм (пустые треугольники)

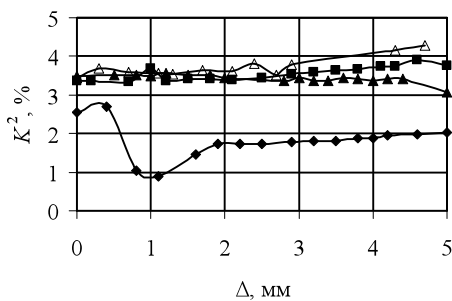


Рис. 4: Зависимости квадрата коэффициента электромеханической связи от ширины области покрытия  $\Delta$  при различных значениях ширины зазора между электродами:  $L = 1$  мм (ромбы),  $L = 2$  мм (черные квадраты),  $L = 3$  мм (черные треугольники),  $L = 4$  мм (пустые треугольники)

строка которой соответствует определенному значению ширины зазора, изменяющемуся от 1 до 5 мм. По горизонтали отложена ширина области покрытия  $\Delta$ , также

$\Delta$ , мм $L$ , мм	1	2	3	4	5
1	—————	—————	—————	—————	—————
2	—————	—————	—————	—————	—————
3	—————	—————	—————	—————	—————
4	—————	—————	—————	—————	—————
5	—————	—————	—————	—————	—————

Рис. 5: Диаграмма, показывающая области значений ширины покрытия  $\Delta$  (по горизонтали) и ширины зазора между электродами  $L$  (по вертикали), в которых отсутствуют паразитные колебания вблизи частот последовательного (пунктир) и параллельного (сплошная линия) резонансов

изменяющаяся от 1 до 5 мм. Сплошная и пунктирная линии, соответствующие последовательному и параллельному резонансам, обозначают области, когда паразитные колебания отсутствуют. Видно, что для ширины зазора  $L = 1$  и 2 мм паразитные колебания отсутствуют при всех значениях ширины покрытия  $\Delta$ . Для других значений ширины зазора паразитные колебания

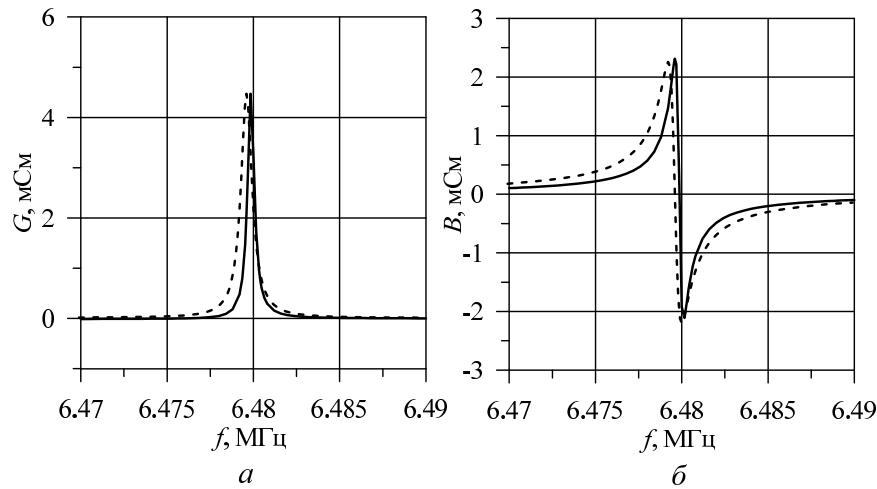


Рис. 6: Частотные зависимости реальной (а) и мнимой (б) частей электрического адмиттанса, соответствующие условиям максимальной добротности последовательного резонанса ( $Q_{ser} = 12800$ ):  $L = 4$  мм и  $\Delta = 1,1$  мм. Сплошная линия — теория, пунктир — эксперимент

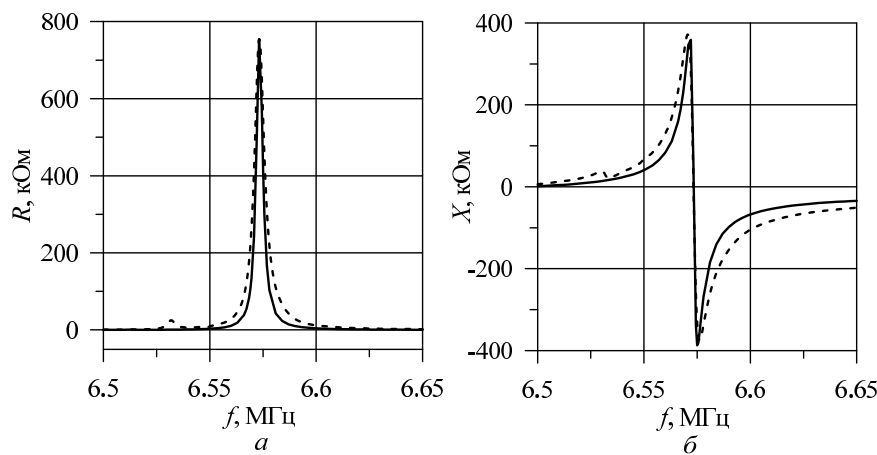


Рис. 7: Частотные зависимости реальной (а) и мнимой (б) частей электрического импеданса, соответствующие условиям максимальной добротности параллельного резонанса ( $Q_{par} = 1800$ ):  $L = 3$  мм и  $\Delta = 2,5$  мм. Сплошная линия — теория, пунктир — эксперимент

отсутствуют только в определенных областях параметра  $\Delta$ . При этом оказалось, что максимальное значение добротности последовательного резонанса  $Q = 12800$  ( $L = 4$  мм и  $\Delta = 1,1$  мм) примерно на порядок больше максимального значения добротности параллельного резонанса  $Q = 1800$  ( $L = 3$  мм и  $\Delta = 2,5$  мм). Соответствующие частотные зависимости электрического адмиттанса и импеданса представлены на рис. 6 и 7, соответственно, пунктирными линиями. Эти зависимости были получены с помощью LCR измерителя (4285A, Agilent Technologies Inc).

На этих же рисунках сплошными линиями представлены теоретические зависимости значений импеданса и адмиттанса от частоты, которые были получены путем решения задачи о возбуждении акустических колебаний в резонаторе поперечным электрическим полем

с помощью метода конечных элементов. Этот метод позволяет находить распределение компонент механического смещения в пьезопластине и электрического потенциала в пьезопластине и окружающем ее вакууме при заданной частоте колебаний возбуждающего поля. Данный метод позволяет учитывать различные электрические и механические граничные условия на различных областях поверхности пластины, в том числе условие механического демпфирования колебаний с помощью поглощающего покрытия. Видно удовлетворительное соответствие теоретических и экспериментальных частотных зависимостей, приведенных на рис. 6 и 7. Следует еще отметить, что наличие паразитных колебаний определялось качественно по виду резонансной кривой. Классическая четкая форма резонансных зависимостей, приведенных на рис. 6 и 7, сви-

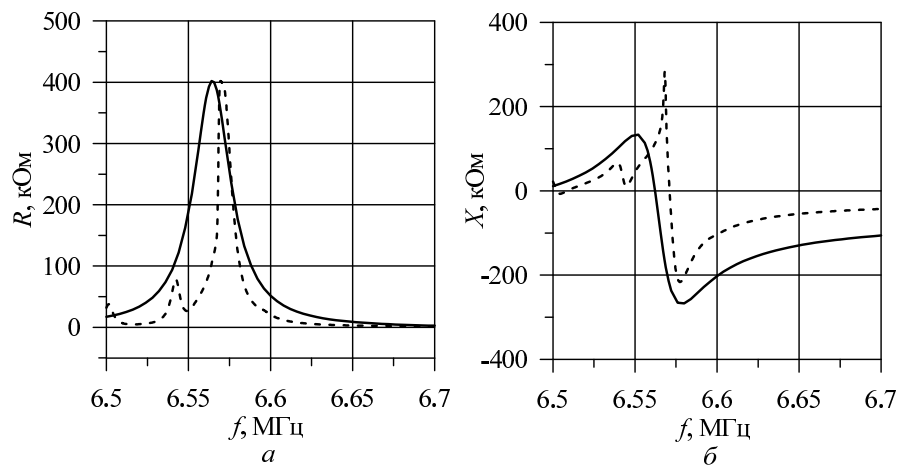


Рис. 8: Частотные зависимости реальной (а) и мнимой (б) частей электрического импеданса в присутствии паразитных колебаний:  $L = 4$  мм и  $\Delta = 2,9$  мм. Сплошная линия — теория, пунктир — эксперимент

детельствует о присутствии только одного типа колебаний. При наличии паразитных типов колебаний форма частотной зависимости импеданса/адмиттанса вблизи резонанса искажается. Это демонстрируется рис. 8, который показывает наличие двух типов колебаний на экспериментальных частотных зависимостях реальной и мнимой частей электрического импеданса. Теоретические зависимости, приведенные здесь же показали, что в этом случае ширина пика реальной части существенно расширилась, а на зависимости мнимой части острые углы значительно сгладились.

Следовательно, подбирая ширину зазора между электродами и ширину области покрытия можно выбрать приемлемые характеристики резонатора в указанных выше пределах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе исследовался пьезоэлектрический резонатор с поперечным возбуждающим полем на основе пластины ниобата лития  $X$ -среза толщиной 0,5 мм. На одной стороне пластины были нанесены два прямоугольных электрода с размерами  $5 \times 10$  мм<sup>2</sup>. При такой кристаллографической ориентации пласти-

ны поперечные компоненты электрического поля, параллельные кристаллографической оси  $Y$ , возбуждали продольную волну в зазоре между электродами. Для подавления паразитных колебаний область вокруг электродов и сами электроды частично покрывались специальным поглощающим лаком. Детально исследовалось влияние ширины поглощающего покрытия на резонансную частоту и добротность резонатора с поперечным возбуждающим полем при последовательном и параллельном резонансах для различной ширины зазора между электродами. В результате экспериментально удалось определить области существования чистых резонансов и границы изменения значений резонансной частоты, добротности и эффективного коэффициента электромеханической связи.

## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 12-02-01057а) и гранта Президента Российской Федерации МК-5551.2014.9.

- 
- [1] Hu Y., French L.A., Radecsky K., Pereira da Cunha M., Millard P., and Vetelino J.F. IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelectrics, and Freq. Contr. **51**, N 11. P. 1373. (2004).  
 [2] Wark M., Kalanyan B., Ellis L., Fick J., Connel L., Neivandt D., and Vetelino J. Proc. of 2007 IEEE Ultrasonics Symposium. P.1217. (2007).  
 [3] McCann D.F., McCann J.M., Parks J.M., Frankel D.J., Pereira da Cunha M., and Vetelino J.F. IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelectrics, and Freq. Contr. **56**, N 4. P. 779. (2009).  
 [4] Zhang Z., Wang W., Ma T., Zhang C., and Feng G. Proc. of 2009 IEEE Ultrasonics Symposium. P. 655. (2009).  
 [5] Vetelino J.F. Proc. of 2010 IEEE Ultrasonics Symposium. P. 2269. (2010).  
 [6] Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Shikhabudinov A.M., Vasiliev A.A. Proc. of 2010 IEEE Ultrasonics Symposium. P. 946. (2010).

- [7] Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е., Шихабудинов А.М., Васильев А.А. Письма в ЖТФ. **37**, № 11. С. 27. (2011).
- [8] Ma T., Wang J., Du J., Yuan L., Qian Z., Zhang Z., and Zhang C. IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelectrics, and Freq. Contr. **60**, N4. P. 864. (2013).
- [9] Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Shikhabudinov A.M., Teplykh A.A., and Borodina I.A. IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelectrics, and Freq. Control. **60**, N12. P.166. (2014).
- [10] Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Shikhabudinov A.M., Ignatov O.V. and Guliy O.I. IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelectrics, and Freq. Contr. **59**, N5. P. 963. (2012).
- [11] Гулий О.И., Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е., Шихабудинов А.М., Дыкман Л.А., Староверов С.А., Игнатов О.В. Биофизика. **57**, № 3. С. 460. (2012).
- [12] Гулий О.И., Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е., Шихабудинов А.М., Матора Л.Ю., Макарихина С.С., Игнатов О.В. Микробиология. **82**, № 2. С. 218. (2013).
- [13] Дьелесан Э., Руайе Д. Упругие волны в твердых телах: пер. с фран. (М: Наука, 1982). 424 с.

### Investigation of Piezoelectric Resonators Excited By Lateral Electric Field

**B. D. Zaitsev<sup>1,a</sup>, A. M. Shikhabudinov<sup>1</sup>, I. A. Borodina<sup>1</sup>, A. A. Teplykh<sup>1</sup>, I. E. Kuznetsova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Saratov Branch of Institute of Radio Engineering and Electronics nm.V.A.Kotelnikov RAS, Saratov, Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Radio Engineering and Electronics nm.V.A.Kotelnikov RAS, Moscow, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>zai-boris@yandex.ru*

During last years the designers of acoustic liquid sensors concentrate special attention on piezoelectric resonators with lateral electric field. The main problem of their development is the suppression of unwanted oscillations. For achievement of this aim there exist at least two variants. Firstly, the choice of optimal shape of electrodes and exact their orientation respectively to crystallographic axes of plate. However the shape and dimensions of electrodes depend on shape of plate and its sizes. Secondly, the deposition of the damping layer around the electrodes including the certain part of electrodes. The paper is devoted to the experimental study of the influence of width of gap between electrodes and width of area of electrodes covered by damping layer on the frequency and  $Q$ -factor of series and parallel resonances and electromechanical coupling coefficient. Electrodes of rectangular shape with dimensions 5x10 mm were deposited on the plate of lithium niobate of  $X$ -cut with thickness of 0.5 mm. The width of the gap between electrodes and width of their coating area were changed from 1 to 5 mm. The lateral electric field was oriented along axis  $Y$ . It has been shown that the resonance was achieved on the longitudinal acoustic wave propagating along axis  $X$  between electrodes. It has been found that changes in width of gap between electrodes and width of coating area vary frequencies of series and parallel resonances in the range of  $\sim 1\%$ . At that the values of  $Q$ -factor of series and parallel resonances change in ranges 500–13000 and 500–1800, respectively. The change in electromechanical coupling coefficient lies in range 1–4%.

PACS: 43.20.+g

Keywords: lateral electric field excited resonator, lithium niobate, parallel resonance, series resonance, electromechanical coupling coefficient.

Received 13.11.2014.

#### Сведения об авторах

1. Зайцев Борис Давыдович — докт. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, профессор; (8452) 27-73-23, e-mail: zai-boris@yandex.ru.
2. Шихабудинов Александр Магомедович — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник; (8452) 27-73-23, e-mail: alex-sheih@yandex.ru.
3. Бородина Ирина Анатольевна — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; (8452) 27-73-23, e-mail: borodinaia@yandex.ru.
4. Теплых Андрей Алексеевич — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; (8452) 27-73-23, e-mail: teplykhaa@mail.ru.
5. Кузнецова Ирен Евгеньевна — докт. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, доцент; (495) 629-36-78, e-mail: kuziren@yandex.ru.