

10;15

## Составной пьезоэлектрический резонатор 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>2,3</sup>

<sup>1</sup> Саратовский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН

<sup>2</sup> Институт радиотехники и электроники им В.А. Котельникова РАН,  
Москва

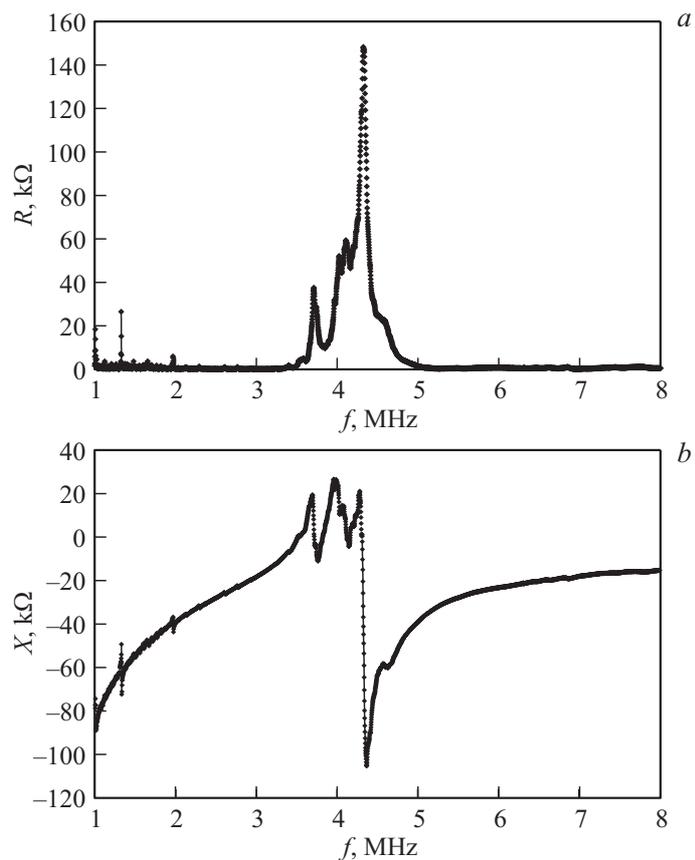
<sup>3</sup> Московский государственный технический университет радиотехники,  
электроники и автоматики  
E-mail: zai-boris@yandex.ru

Поступило в Редакцию 9 июля 2015 г.

Предложен новый способ подавления паразитных колебаний в пьезоэлектрическом резонаторе с поперечным возбуждающим электрическим полем, который основан на пространственном разделении источника ВЧ электрического поля и резонирующей пьезоэлектрической пластины с помощью воздушного зазора. В этом случае тангенциальные компоненты поля в пьезопластине практически не ослабляются, а нормальные компоненты в пластине существенно уменьшаются. Способ реализован на составном резонаторе, имеющем структуру „стеклянная пластина с прямоугольными электродами–воздушный зазор–пластина из ниобата лития 128 Y–X-среза„. Показано, что существует оптимальная ширина воздушного зазора, которая обеспечивает хорошее качество последовательного и параллельного резонансов в диапазоне частот 3–4 МГц с рекордным значением добротности  $\sim 15\,000$  в обоих случаях.

В последнее время большой интерес исследователей вызывают пьезоэлектрические резонаторы с поперечным электрическим полем [1–10]. Этот интерес связан с тем, что акустоэлектронные датчики, основанные на вышеуказанных резонаторах, обладают рядом преимуществ по сравнению с резонаторами с продольным электрическим полем. К этим преимуществам относится то, что при контакте с жидкостью параметры резонатора реагируют на изменение механических и электрических свойств жидкости и отсутствует контакт электродов резонатора с исследуемой жидкостью. Подобные свойства данных резонаторов являются

весьма полезными для разработки различных биологических и химических датчиков, способных проводить экспресс-анализ жидкостей малого объема. Традиционно такой резонатор представляет собой пьезоэлектрическую пластину, на одной стороне которой расположены два электрода. Ориентация пластины выбирается таким образом, чтобы тангенциальные компоненты электрического поля возбуждали объемную волну с заданной поляризацией, бегущую по нормали к пластине. Однако при этом нормальные компоненты поля возбуждают паразитные волны Лэмба и объемные волны другой поляризации, которые сильно ухудшают резонансные свойства устройства. В связи с этим, несмотря на большое количество публикаций, проблема подавления паразитных колебаний и повышения добротности этих резонаторов является по-прежнему актуальной. Традиционные методы подавления таких колебаний заключаются в правильном выборе формы электродов. Обычно электроды используются в форме полумесяцев [1–8], однако их размеры зависят от кристаллографической ориентации пластины и от ее поперечных размеров. Ранее был предложен еще один способ подавления нежелательных колебаний в пьезоэлектрическом резонаторе с поперечным возбуждающим электрическим полем с электродами прямоугольной формы [9]. Суть его заключается в том, что область вокруг электродов и частично электроды покрывались демпфирующим покрытием. Этот способ был успешно реализован на пластине ниобата лития  $X$ -среза, в которой при ориентации поля вдоль оси  $Y$  возбуждалась продольная волна, резонирующая между сторонами пластины. Было показано, что путем изменения ширины области покрытия и ширины зазора между электродами можно менять добротность резонатора в широких пределах для параллельного и последовательного резонансов [10]. Однако в ряде случаев, особенно при разработке жидкостных датчиков, более предпочтительной является поперечная акустическая волна, для которой отсутствуют радиационные потери. Теоретическая оценка коэффициента электромеханической связи в соответствии с формализмом Кристоффеля–Бечмана [11] показала, что для пластины  $128 Y-X$  ниобата лития при ориентации возбуждающего поля вдоль оси  $X$  коэффициент электромеханической связи равен 85% для поперечной волны, распространяющейся вдоль нормали к пластине и поляризованной вдоль оси  $X$ . Коэффициент электромеханической связи для остальных типов объемных волн, распространяющихся вдоль того же направления, равен нулю.

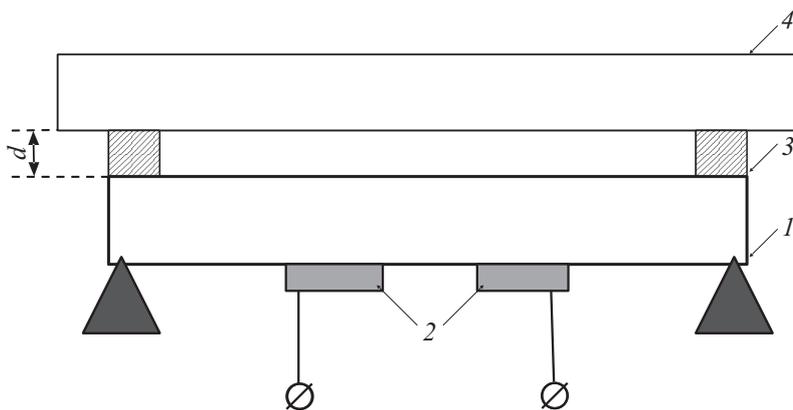


**Рис. 1.** Частотные зависимости действительной (*a*) и мнимой (*b*) частей электрического импеданса резонатора на основе пластины 128YX ниобата лития толщиной 0.5 mm с двумя прямоугольными электродами с размерами  $5 \times 10$  mm и зазором между ними 2 mm с шириной области покрытия каждого электрода поглощающим слоем 3 mm.

В соответствии с вышеизложенным был проведен эксперимент по созданию резонатора с поперечным электрическим полем на пластине 128 Y–X ниобата лития. На поверхность пластины толщиной 0.5 mm были нанесены два алюминиевых электрода прямоугольной формы

с размерами  $5 \times 10$  мм и зазором между ними 2 мм. Электроды располагались так, чтобы поперечное электрическое поле было ориентировано вдоль кристаллографической оси  $X$ . Затем в полном соответствии с процедурой, описанной в [9,10], область вокруг электродов была покрыта слоем поглощающего покрытия и были измерены частотные зависимости реальной и мнимой частей электрического импеданса резонатора. Далее электроды постепенно покрывались полосками поглощающего покрытия шириной 1–0.5 мм, пока вся поверхность электродов не оказалась полностью покрытой, и измерения повторялись на каждом шаге. Однако во всех случаях основной резонанс сопровождался паразитными колебаниями, которые не позволяли даже оценить его добротность. На рис. 1 для иллюстрации приведены частотные зависимости действительной и мнимой частей электрического импеданса для ширины области покрытия электродов 3 мм. Теоретические оценки показали, что источником паразитных колебаний являются волны Лэмба и объемная поперечная волна другой поляризации, которые возбуждаются нормальными к поверхности пластины компонентами электрического поля под электродами.

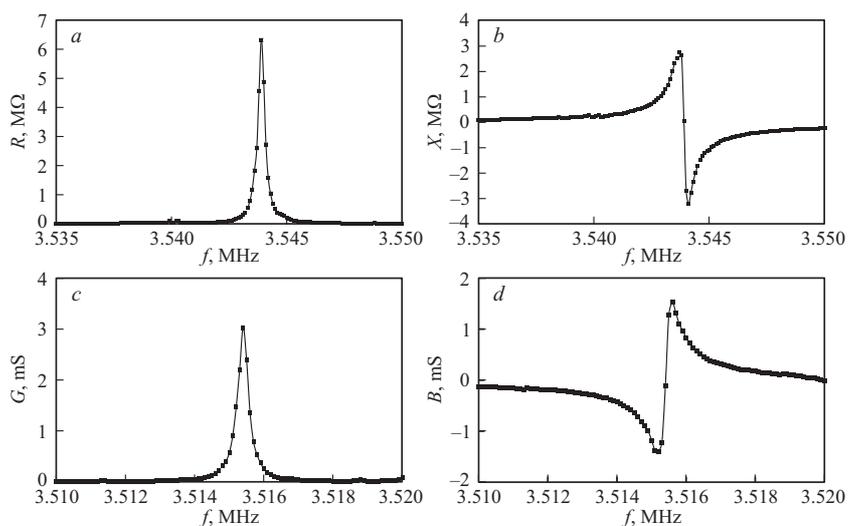
Для того чтобы уменьшить влияние указанных выше нормальных компонент, была рассмотрена структура, представленная на рис. 2, которая состояла из двух пластин. Нижняя пластина  $1$  являлась держателем прямоугольных электродов с размерами  $5 \times 10$  мм, с зазором между ними 2 мм, которые при подключении к источнику ВЧ-напряжения создавали возбуждающее электрическое поле. Верхняя пластина  $2$  из ниобата лития  $128 Y-X$ -среза, свободная от каких-либо электродов, располагалась в непосредственной близости от пластины  $1$  с зазором  $d$ . Вначале в качестве нижней пластины  $1$  был использован резонатор на продольной волне на основе пластины ниобата лития  $X$ -среза толщиной 0.5 мм, в котором поперечное электрическое поле ориентировалось вдоль кристаллографической оси  $Y$  [9,10]. Вторая пластина располагалась над свободной стороной резонатора таким образом, что поперечное электрическое поле было направлено вдоль оси  $X$ . Очевидно, что в данном случае в верхней пластине наибольшую амплитуду имели поперечные компоненты поля, которые непрерывны на границе диэлектриков [12]. Но при этом нормальные компоненты претерпевали разрыв, и их напряженность в верхней пластине существенно ослаблялась. Были измерены частотные зависимости реальной и мнимой частей электрического импеданса при изменении зазора



**Рис. 2.** Схема составного резонатора с поперечным электрическим полем: 1 — нижняя пластина, 2 — верхняя пластина, 3 — опоры для обеспечения заданной ширины зазора, 4 — электроды.

между пластинами от 0 до  $500\ \mu\text{m}$ . В результате было обнаружено, что основной резонанс на продольной акустической волне в пластине X-среза проявлялся во всех случаях на частоте  $\sim 6.5\ \text{MHz}$  и его добротность незначительно увеличивалась с ростом ширины зазора. Кроме того, на фоне изрезанных зависимостей был обнаружен слабо выраженный параллельный резонанс на поперечной волне в верхней пластине на частоте  $\sim 3.5\ \text{MHz}$ . Однако во всех случаях он существовал на фоне большого числа паразитных колебаний. Был сделан вывод о том, что эти колебания существуют в основном в нижней пластине, где нормальные компоненты поля весьма существенны.

Для того чтобы избавиться от паразитных колебаний в нижней пластине, она была изготовлена из непьезоэлектрического материала (стекла) толщиной  $0.5\ \text{mm}$  с точно такими же электродами. Сверху, также как и раньше, с заданным зазором располагалась пластина ниобата лития 128 Y-X-среза толщиной  $0.5\ \text{mm}$ , так что поперечное поле было ориентировано вдоль оси X. Были измерены частотные зависимости реальной и мнимой частей электрического импеданса при различных значениях ширины зазора между ними. Оказалось, что при значениях ширины зазора  $100, 200, 300$  и  $500\ \mu\text{m}$  частотные зависимости реальной



**Рис. 3.** Частотные зависимости действительной (*a, c*) и мнимой (*b, d*) частей электрического импеданса (*a, b*) и адмиттанса (*c, d*) составного резонатора. Нижняя пластина толщиной 0.5 mm с двумя прямоугольными электродами с размерами 5 × 10 mm и зазором между ними 2 mm выполнена из стекла. Верхняя пластина толщиной 0.5 mm выполнена из 128YX ниобата лития. Ширина зазора между пластинами 100 μm.

и мнимой частей электрического импеданса показывают существование ярко выраженного параллельного резонанса без паразитных колебаний. Что касается последовательного резонанса, резонансные частотные зависимости реальной и мнимой частей электрического адмиттанса во всех случаях, кроме ширины зазора 100 μm, оказались раздвоенными. Но при оптимальной ширине зазора 100 μm эти зависимости продемонстрировали ярко выраженный последовательный резонанс классической формы. Эти выводы подтверждаются рис. 3, где приведены частотные зависимости реальной и мнимой частей электрического импеданса и адмиттанса составного резонатора при ширине зазора 100 μm. При этом значения добротности для параллельного и последовательного резонансов оказались равными 14828 и 15062 соответственно при эффективном коэффициенте электромеханической связи [10] ~ 2%. Следует

отметить, что максимальные значения добротности при параллельном и последовательном резонансах, полученные ранее [10] на продольной волне в пластине ниобата лития X-среза, составляли 1826 и 12830 соответственно. Таким образом, предложенная конструкция составного пьезоэлектрического резонатора с поперечным электрическим полем позволила достичь рекордных значений добротности параллельного и последовательного резонансов.

Что касается значений ширины зазора менее  $100\ \mu\text{m}$ , то в этих случаях все частотные зависимости электрического импеданса и адмиттанса имели несколько резонансных пиков, что свидетельствовало о сильном влиянии нормальных компонент электрического поля.

Таким образом, представленный составной пьезоэлектрический резонатор с поперечным электрическим полем может быть использован при разработке различных жидкостных и биологических датчиков, работающих на поперечной акустической волне, которая не сопровождается радиационными потерями при контакте с жидкостью. Кроме того, резонатор может быть использован в различных приборах для обработки сигналов, где используются высокодобротные резонансные устройства.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-19-20046.

## Список литературы

- [1] *McCann J.M., Sgambato K., McCann D.F., Vetelino J.* // Proc. 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium. 2009. P. 645–648.
- [2] *Leblois T.G., Tellier C.R.* // Proc. 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium. 2009. P. 2672–2675.
- [3] *Ardle J.C., Haskell R., Chap M., Stevens D.* // Proc. 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium. 2009. P. 649–654.
- [4] *McCann D.F., McCann J.M., Parks J.M., Frankel D.J., Rereira M. da Cunha, Vetelino J.F.* // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectrics, Freq. Contr. 2009. V. 56. N 4. P. 779–787.
- [5] *Zhang Z., Wang W., Ma T., Zhang C., and Feng G.* // Proc. 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium. 2009. P. 655–658.
- [6] *Zuo C., Van der Spiegel J., and Piazza G.* // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectrics, Freq. Contr. 2010. V. 57. N 1. P. 82–87.

- [7] *Hempel U., Lucklum R., Hauptmann P.R., EerNisse E.P., Puccio D., Fernandez Diaz R.* // Meas. Sci. Tech. 2008. V. 19. P. 1–11.
- [8] *Vetelino J.F.* // Proc. 2010 IEEE International Ultrasonics Symposium. 2010.
- [9] *Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Shikhabudinov A.M., Vasiliev A. A.* // Tech. Phys. Lett. 2011. V. 37. N 6. P. 473–476.
- [10] *Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Shikhabudinov A.M., Teplykh A.A., Borodina I.A.* // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectrics, Freq. Contr. 2014. V. 61. N 1. P. 166–172.
- [11] *Ballato A.* // Proc. 2000 IEEE/EIA International Frequency Control Symposium and Exhibition. 2000. P. 340–344.
- [12] *Тамм И.Е.* Основы теории электричества. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1976. 616 с.