

Разработка матрицы резонаторов с поперечным электрическим полем на пьезоэлектрической пластине

И.А. Бородина^{1,*}, Б.Д. Зайцев¹, И.Е. Кузнецова², А.А. Теплых¹, А.М. Шихабудинов¹

¹Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН, Россия, 410019, Саратов, ул. Зеленая, д. 38

²Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН, Россия, 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7

(Статья поступила 14.11.2014; Подписана в печать 08.12.2014)

Пьезоэлектрические резонаторы с поперечным электрическим полем вызывают большой интерес разработчиков многоканальных акустических датчиков. Электроды такого резонатора наносятся на одну сторону пластины, что позволяет пространственно разделить резонаторы и анализируемые объекты. Серьезной проблемой при разработке матрицы резонаторов является подавление паразитных колебаний, которые ухудшают резонансные свойства и приводят к сильной акустической связи между ними. Способ решения данной проблемы предложен в настоящей работе. Экспериментально исследовалась матрица из двух резонаторов, которые располагались на пластине ниобата лития X-среза толщиной 0,5 мм. Электроды прямоугольной формы с размерами $5 \times 10 \text{ мм}^2$ и зазором 2 мм создавали поперечное электрическое поле, направленное вдоль кристаллографической оси Y. Было показано, что резонанс достигается на продольной акустической волне, распространяющейся вдоль оси X между электродами. Для подавления паразитных колебаний область вокруг резонаторов и частично электроды были покрыты демпфирующим слоем. Измерялись частотные зависимости реальной и мнимой частей электрического импеданса/адмиттанса каждого резонатора и определялись резонансная частота и добротность при последовательном и параллельном резонансах. Измерялись также частотные зависимости параметра S_{12} , который во всех случаях не превышал 50 дБ. Это означает, что рассматриваемые резонаторы были полностью акустически развязаны. Таким образом, показано, что демпфирующий слой обеспечивает хорошее качество каждого резонатора и приводит к полной их акустической развязке.

PACS: 43.20+g

УДК: 534.283.2

Ключевые слова: пьезоэлектрический резонатор с поперечным электрическим полем, матрица резонаторов, демпфирующий слой, параллельный резонанс, последовательный резонанс.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в связи с ухудшением экологической обстановки продолжают оставаться весьма актуальными задачи обнаружения опасных для жизни и здоровья газов в окружающей среде и определение их концентраций. К настоящему времени для решения указанной задачи существует большое количество методов, основанных на самых разных принципах. Наиболее информативным методом является газовая хроматография [1], к достоинствам которой следует отнести высокую селективность и точность. Недостатком является чрезвычайно сложная и дорогая конструкция прибора, работа на котором требует больших затрат рабочего времени высококвалифицированного персонала.

Для простых применений, когда можно обойтись небольшой точностью и селективностью, применяют газовые датчики, вырабатывающие специфичные для различных газов электрические сигналы. Большое распространение получили полупроводниковые датчики, которые отличаются относительной простотой конструкции, небольшой ценой и простотой в обращении с ними [2]. К недостаткам таких приборов от-

носятся их низкая чувствительность и низкая селективность. Большинство таких датчиков ориентированы на определение содержания в газе какой-либо конкретной примеси. На основе полупроводниковых газовых датчиков разработаны универсальные анализаторы газовой смеси. Фактически, такой прибор представляет собой смонтированный в одном корпусе набор полупроводниковых датчиков, каждый из которых реагирует на какой-либо определенный газ [3]. Однако недостатком такого прибора является необходимость изготовления омических контактов к таким пленкам, которые также контактируют с анализируемой газовой средой и свойства которых могут необратимо деградировать со временем.

Особый интерес представляют акустические газовые датчики. Существует большое количество вариантов, среди которых можно выделить датчики, использующие пьезоэлектрические резонаторы [4] и линии задержки на поверхностных волнах или волнах Лэмба [5,6], контактирующие с газочувствительной пленкой. В последнее десятилетие большой интерес у разработчиков акустических газовых датчиков вызывают пьезоэлектрические резонаторы с поперечным электрическим полем. Это связано с тем, что электроды такого резонатора располагаются на одной стороне пластины, а акустическая волна распространяется в пространстве между ними многократно переотражаясь от сто-

*E-mail: borodinaia@yandex.ru

рон пластины. Такая конструкция весьма удобна для разработки газового анализатора, поскольку газочувствительные пленки и электроды резонаторов для съема информационного сигнала, располагаются на разных сторонах пьезоэлектрической пластины. Кроме того, указанные резонаторы, в отличие от традиционных резонаторов с продольным электрическим полем, весьма перспективны для создания датчиков, поскольку параметры резонатора зависят не только от изменения механических свойств контактирующей среды, но и от изменения ее электрических свойств.

Основная трудность при создании таких резонаторов — это подавление нежелательных колебаний, которые ухудшают характеристики резонатора или приводят к полному отсутствию резонансов. Традиционный путь подавления таких колебаний — это выбор оптимальной формы электродов. Обычно используют электроды в форме полумесяцев. Однако размеры таких электродов зависят от формы пьезоэлектрической пластины и от их ориентации относительно кристаллографических осей [7]. Поэтому проблема размещения нескольких резонаторов на одной подложке с хорошей акустической и электрической развязкой с целью создания анализатора, состоящего из нескольких датчиков, оказывается трудноразрешимой. Это подтверждается попыткой создания такой решетки, состоящей из двух резонаторов, электроды которых имели традиционную форму в виде полумесяцев [8]. Для акустической изоляции резонаторы отделялись друг от друга канавками, вырезанными в пьезоэлектрической пластине с помощью достаточно дорогой и сложной пескоструйной техники. Однако эти канавки привели лишь к механическому ослаблению подложки, а акустическая развязка оказалась довольно низкой.

Ранее авторами данной публикации был предложен новый метод подавления паразитных колебаний, который заключается в нанесении на определенную часть резонатора поглощающего покрытия [9]. Оказалось, что при таком подходе можно сформировать четкую резонансную частотную зависимость электрического импеданса или адмиттанса для электродов простой прямоугольной формы. Было показано, что путем изменения зазора между электродами и ширины области покрытия электродов поглощающим слоем можно менять добротность резонатора в очень широких пределах [10]. При этом оказалось, что характеристики резонатора не зависят от поперечных размеров пластины и от ее формы. Это косвенно подтверждает тот факт, что резонатор с поглощающим покрытием является акустически изолированным от боковых краев пластины. Это позволяет предположить, что при расположении нескольких таких резонаторов на одной пластине они окажутся акустически изолированными. Экспериментальной проверке этой гипотезы и посвящена настоящая работа.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МАКЕТА

В настоящей работе экспериментально исследована матрица, состоящая из двух резонаторов с поперечным электрическим полем, представленная на рис. 1, где 1 — пьезоэлектрическая пластина из ниобата лития X-среза, 2 — электроды резонатора, 3 — демпфирующий слой.

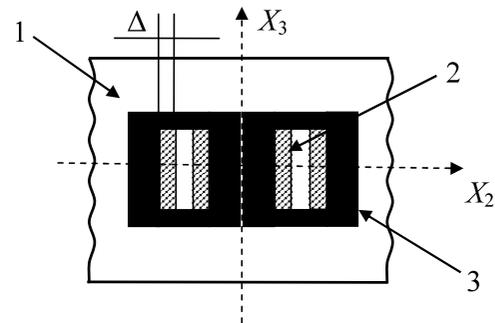


Рис. 1: Схема матрицы резонаторов с поперечным электрическим полем: 1 — пьезоэлектрическая пластина, 2 — электроды резонатора с поперечным электрическим полем, 3 — демпфирующий слой

Прямоугольная пластина ниобата лития имела поперечные размеры $60 \times 20 \text{ мм}^2$ и толщину 510 мкм, на которую наносились две пары прямоугольных электродов длиной 10 мм и шириной 5 мм и зазором 2 мм между ними. Расстояние между отдельными парами электродов составляло 6 мм. В качестве электродов использовалась пленка алюминия с толщиной $\sim 200 \text{ нм}$, напыленная в вакууме через соответствующую маску. Поперечное электрическое поле было направлено вдоль кристаллофизической оси Y. Для обеспечения электрического контакта использовался проводящий клей и золотая проволока диаметром 25 мкм. Для определения акустической связи каждый из резонаторов при помощи 50-омных кабелей подсоединялся к четырехканальному измерителю S-параметров E5071C (компания Agilent). Чтобы определить характеристики отдельных резонаторов, измерялись частотные характеристики реальной и мнимой частей электрического импеданса/адмиттанса с помощью измерителя LCR-параметров 4285A (компания Agilent). Для подавления паразитных колебаний (волн Лэмба и SH волн, а также объемных поперечных волн, бегущих под электродами) вокруг электродов резонаторов и на часть поверхности самих электродов наносился слой специального демпфирующего покрытия (рис. 1). Значение ширины непокрытой части электродов Δ менялось от 5 до 0 мм. В первом случае демпфирующим слоем было покрыто только пространство между электродами, а во втором еще и вся поверхность электродов покрывалась поглощающим слоем.

Таблица I: Значения резонансной частоты, максимального значения реальной части электрического импеданса/адмиттанса и добротности для параллельного и последовательного резонансов, а также коэффициента электромеханической связи отдельных резонаторов матрицы для различных значений ширины непокрытой части электродов Δ

Δ , мм	Резонатор	Параллельный резонанс			Последовательный резонанс			K2
		f , МГц	R, кОм	Q	f , МГц	G, мС	Q	
5	1	6,557	701,7	1749	6,4509	1,212346	1075	3,99
	2	6,5522	460,5	1202	6,4485	1,287231	1402	3,91
4,3	1	6,561	779	2083	6,4589	2,040823	1928	3,84
	2	6,5625	550,6	1427	6,4593	2,598071	2691	3,88
3,8	1	6,5676	885,8	2153	6,4624	2,574338	2638	3,95
	2	6,5672	616	1545	6,4634	3,160668	3494	3,9
3,4	1	6,5653	892,5	2320	6,465	3,605856	3966	3,77
	2	6,5662	623,7	1602	6,4658	4,154457	4974	3,77
2,8	1	6,5654	922,4	2432	6,4665	4,708535	5774	3,72
	2	6,5668	657,7	1706	6,4683	5,29123	6970	3,7
2,6	1	6,5651	918,5	2409	6,4678	5,672032	7609	3,66
	2	6,563	621,7	1683	6,4693	6,690762	9627	3,52
2,3	1	6,5684	981,5	2389	6,468	6,328653	9360	3,77
	2	6,5621	619,7	1704	6,47	7,097487	11252	3,46
1,6	1	6,5654	914	2357	6,4691	6,962861	11231	3,62
	2	6,5644	627	1683	6,471	7,296413	12589	3,51
1,3	1	6,5654	905,4	2362	6,4704	6,55816	11352	3,57
	2	6,5655	622,9	1641	6,4722	7,012128	13048	3,51
0,9	1	6,5648	882,9	2345	6,4706	6,169941	11638	3,54
	2	6,5642	627,3	1641	6,4725	5,982727	12329	3,45
0,4	1	6,5604	951,9	2523	6,4708	3,21701	6869	3,37
	2	6,5626	641,8	1774	6,4726	3,366178	7500	3,38
0	1	6,5638	1020,8	2679	6,4699	1,577579	1961	3,53
	2	6,5621	646,2	1750	6,4719	1,510791	2697	3,39

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Эксперименты показали, что устойчивые последовательный и параллельный резонансы достигаются на продольной акустической волне, распространяющейся вдоль нормали к плоскости пластины, т. е. вдоль кристаллографической оси X. В ходе эксперимента менялась ширина непокрытой части электродов Δ с шагом 0,3–0,7 мм, и для каждого значения Δ измерялись частотные зависимости действительной и мнимой частей электрического импеданса и адмиттанса каждого резонатора. Измерялся также параметр S_{12} , который характеризует акустическую связь между резонаторами. Полученные экспериментальные значения резонансной частоты f и добротности Q , а также максимальные значения реальной части импеданса R и адмиттанса G приведены в табл. 1 для различных значений непокрытой части электродов Δ для каждого резонатора. Здесь же приведены значения эффективного коэффициента электромеханической связи.

Из таблицы видно, что при изменении величины Δ частоты параллельного и последовательного резонан-

сов и коэффициент электромеханической связи меняются в небольших пределах. Что касается добротности, то при изменении Δ от 5 до 0 мм значения добротности параллельного резонанса меняются в пределах 1749–2679 и 1202–1750 для первого и второго резонаторов, соответственно. Аналогичные пределы для последовательного резонанса составляют 1075–11638 и 1402–13048 для первого и второго резонатора, соответственно. Сравнение с данными, приведенными в [10] показывает достаточно высокую акустическую развязку между резонаторами. Это также подтверждается измерением параметра S_{12} , который во всех случаях по абсолютной величине превышал 50 дБ.

На рис. 2 для иллюстрации представлены частотные зависимости действительной (a , ν) и мнимой (b , ζ) частей электрического импеданса первого (a , b) и второго (ν , ζ) резонаторов с поперечным электрическим полем на основе пластины ниобата лития для зазора между электродами 2 мм и для значения $\Delta=2,3$ мм.

На рис. 3 представлены частотные зависимости действительной (a , ν) и мнимой (b , ζ) частей электрического адмиттанса первого (a , b) и второго (ν , ζ) резонаторов.

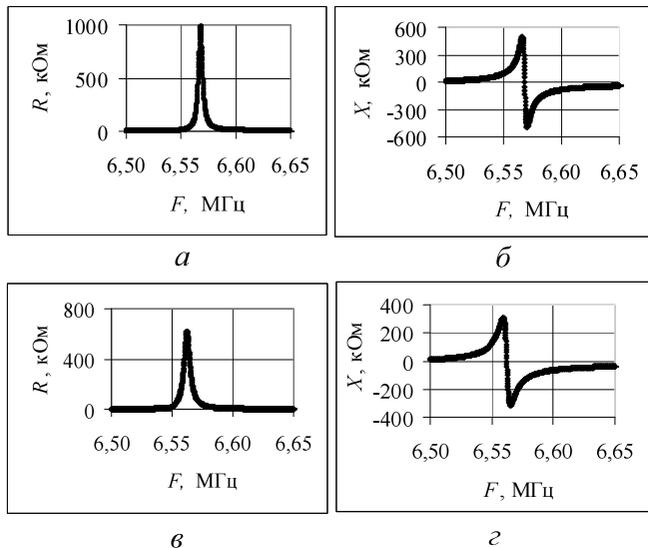


Рис. 2: Частотные зависимости действительной (а, в) и мнимой (б, г) частей электрического импеданса первого (а, б) и второго (в, г) резонаторов с поперечным полем на основе пластины ниобата лития для зазора между электродами 2 мм и значения $\Delta = 2,3$ мм

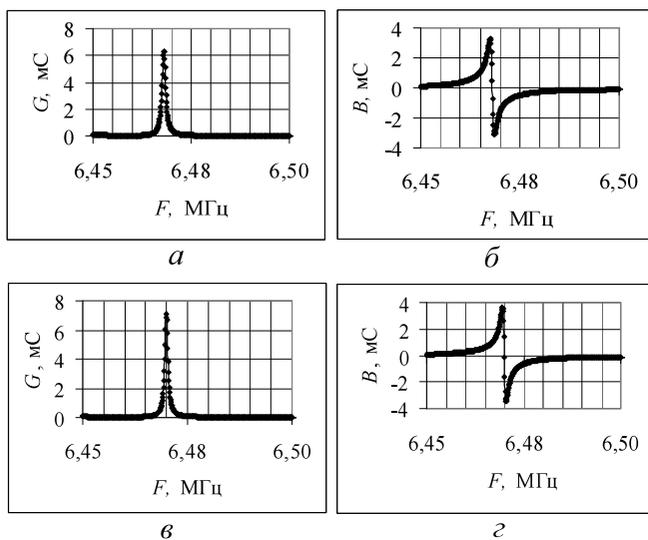


Рис. 3: Частотные зависимости действительной (а, в) и мнимой (б, г) частей электрического адмиттанса первого (а, б) и второго (в, г) резонаторов с поперечным полем на основе пластины ниобата лития для зазора между электродами 2 мм и значения $\Delta = 2,3$ мм

наторов с поперечным полем на основе пластины ниобата лития для зазора между электродами 2 мм и для значений $\Delta = 2,3$ мм.

Зависимости, приведенные на рис. 2 и 3 показывают полное отсутствие паразитных колебаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что систему из нескольких резонаторов можно использовать, например, для создания многосенсорного газового датчика. Для этого необходимо изготовить решетку резонаторов с поперечным электрическим полем на одной пьезоэлектрической пластине и на обратную сторону каждого резонатора нанести газо-чувствительное покрытие, проводимость или механический импеданс которого меняется в присутствии того или иного газа.

В этом случае наличие газа приведет к изменению резонансной частоты, которое зависит от концентрации газа. Таким образом, подключение электрического входа каждого резонатора к многоканальному анализатору импеданса/адмиттанса, позволит определить изменение резонансной частоты, и тем самым концентрацию того или иного газа в газовой смеси. Это позволит проводить мониторинг различной газовой среды, что представляет большое значение для обеспечения экологической безопасности. Кроме того, решетка из нескольких акустически развязанных резонаторов на одной пластине позволяет сделать мультисенсорный биологический анализатор, если на обратной стороне каждого резонатора поместить жидкостную ячейку [11]. Это позволит проводить одновременную детекцию бактериальных клеток в нескольких образцах исследуемой суспензии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-02-01057а и 13-08-00678а).

- [1] Юинг Г. Инструментальные методы химического анализа. (М.: Мир., 1989).
- [2] Dewa A.S. and. Ko W.H. Semiconductor Sensors. (John Wiley and Sons. New York, 1994).
- [3] Wang X., Carey W.P., and. Yee S.S. Sensors and Actuator. **B 28**. P. 63. (1995).
- [4] Hung V.N., Abe T., Minh P.N., and Esashi M. Appl. Phys.

Lett. textbf81, N 26. P. 5069. (2002).

- [5] Anisimkin V.I., CityplaceVerona E. IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelectr. and Freq. Control. **48**, N5. P.v1413. (2002).
- [6] Anisimkin V.I. IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelectr. and Freq. Control. **60**, N 10. P. 2204. (2013).
- [7] Vetelino J.F. Proceed.of 2010 IEEE Ultrason. Symp.

- P. 2269. (2010).
- [8] *Winters S., Berngardt G., and Vetelino J.* IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelectr. and Freq. Control. **60**, N3. P. 573. (2013).
- [9] *Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е., Шихабудинов А.М., Васильев А.А.* Письма в ЖТФ. **37**, № С11. С. 27. (2011).
- [10] *Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Shikhabudinov A.M., Teplykh A.A., and Borodina I.A.* IEEE Trans. on Ultrason. Ferroelectr. and Freq. Contr. **61**, N1. P. 162. (2014).
- [11] *Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Shikhabudinov A.M., Ignatov O.V., Guliy O.I.* IEEE Trans. on Ultrason., Ferroel. and Freq. Contr. **59**, N5. P. 963. (2012).

Developing a matrix of resonators with lateral electric field on piezoelectric plate

I. A. Borodina^{1,a}, B. D. Zaitsev¹, I. E. Kuznetsova², A. A. Teplykh¹, A. M. Shikhabudinov¹

¹*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Saratov Branch, Saratov, 410019, Russia*

²*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Moscow, 125009, Russia*

E-mail: ^aborodinaia@yandex.ru

Piezoelectric resonators with lateral electric field cause a great interest of designers of multi-channel acoustic sensors. The electrodes of such resonator are deposited on one side of the plate that allows to separate resonators and analyzable objects. The main problem of the design of resonators matrix is the suppression of the unwanted oscillations, which worsen resonant properties and lead to the strong acoustic coupling between them. The method of the solution of such problem is described in the present paper. The matrix including two resonators placed on the plate of lithium niobate of X cut with thickness of 0.5 mm was experimentally investigated. The electrodes of rectangular shape with dimensions of 5×10 mm and width of gap between them of 2 mm provided the lateral electric field, which 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. For suppression of unwanted oscillations the area around resonators and parts of electrodes were covered by damping layer. We measured the frequency dependencies of real and imaginary parts of electrical impedance /admittance of each resonator and determined the resonant frequency and Q-factor for series and parallel resonances. We also measured the frequency dependence of the parameter S12, which in all cases did not exceed 50 dB. It meant that resonators under study were acoustically decoupled. Thus it has been shown that damping layer provides the good quality of each resonator as well as total acoustic decoupling between them.

PACS: 43.20+g

Keywords: piezoelectric resonator with lateral electric field, a matrix of resonators, damping layer, parallel resonance, series resonance.

Received 14.11.2014.

Сведения об авторах

1. Бородина Ирина Анатольевна — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: (8452) 27-24-01, e-mail: borodinaia@yandex.ru.
2. Зайцев Борис Давыдович — докт. физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией; тел.: (8452) 27-24-01, e-mail: zai-boris@yandex.ru.
3. Кузнецова Ирен Евгеньевна — докт. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник; e-mail: kuziren@yandex.ru.
4. Теплых Андрей Алексеевич — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: (8452) 27-24-01, e-mail: teplykhaa@mail.ru.
5. Шихабудинов Александр Магомедович — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник; тел.: (8452) 27-24-01, e-mail: alexsheih@yandex.ru.