

Влияние электрических граничных условий вблизи свободной стороны пьезоэлектрического резонатора с поперечным электрическим полем на его характеристики

Б. Д. Зайцев,* А. М. Шихабудинов, А. А. Теплых, И. А. Бородина
¹Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН,
 Саратовский филиал

Россия, 410019, Саратов, ул. Зеленая, д. 38

(Статья поступила 06.07.2017; Подписана в печать 13.09.2017)

Экспериментально исследовано влияние зазора между свободной стороной пьезоэлектрического резонатора с поперечным электрическим полем на основе ниобата лития и электрически проводящей пленкой на поверхности диэлектрической пластины на частоты параллельного и последовательного резонансов. Измерения проводились в диапазоне температур от 14 до 45°C. Показано, что при изменении зазора от 0 до 3.5 мм частота параллельного резонанса монотонно увеличивается на 1.3% при постоянной температуре. В интервале 0–3.5 мм изменение частоты последовательного резонанса при фиксированной температуре не превышало 0.02–0.07%. Теоретический анализ количественно подтвердил зависимости указанных частот от ширины зазора. Было показано, что разница между рассчитанными и измеренными зависимостями частот параллельного и последовательного резонансов от ширины зазора не превышает 0.6%. Показана возможность создания измерителей перемещений с температурной компенсацией, которые могут быть использованы для непрерывного контроля деформаций и раскрытия трещин различных конструкций.

PACS: 43.20+g

УДК: 534.231.3

Ключевые слова: пьезоэлектрический резонатор с поперечным электрическим полем, резонансная частота, параллельный резонанс, последовательный резонанс, диэлектрическая пластина с проводящей пленкой, температура.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время огромный интерес исследователей вызывают резонаторы с поперечным электрическим полем [1–7]. Этот интерес связан с тем, что акустические датчики, основанные на указанных резонаторах, имеют ряд преимуществ по сравнению с резонаторами с продольным электрическим полем. Электроды таких резонаторов располагаются на одной стороне пьезоэлектрической пластины, и электрическое поле существует не только в пластине, но и в прилегающем вакууме. Поэтому изменение электрических граничных условий вблизи свободной стороны резонатора должно влиять на параметры резонатора. В настоящей статье мы провели исследование влияния диэлектрической пластины с проводящей пленкой алюминия вблизи пьезоэлектрического резонатора с поперечным электрическим полем на его характеристики при различных значениях температуры. Рассматривался резонатор на основе пластины ниобата лития X-среза.

1. ОПИСАНИЕ РЕЗОНАТОРА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для проведения экспериментов был создан резонатор на основе пластины из ниобата лития X-среза тол-

щиной 0.5 мм (рис. 1).

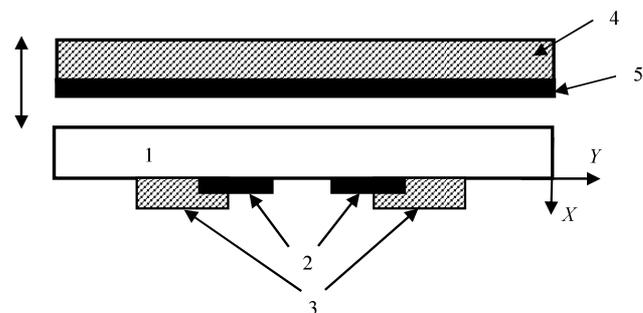


Рис. 1: Резонатор на основе пластины из ниобата лития: 1 — пластина из ниобата лития, 2 — электроды, 3 — поглощающее покрытие, 4 — стеклнная пластина, 5 — пленка алюминия

На одной стороне резонатора были нанесены два прямоугольных электрода с размерами $10 \times 5 \text{ мм}^2$ с зазором между ними 2 мм. Для подавления паразитных волн Лэмба область вокруг электродов и частично электроды были покрыты поглощающим покрытием [8–10]. Резонатор подключался к измерителю LCR параметров 4285A (Agilent), с помощью которого измерялись частотные зависимости реальной и мнимой частей электрического импеданса и адмиттанса. Указанные зависимости позволяли определять частоты параллельного и последовательного резонансов. На рис. 2 показаны частотные зависимости реальных частей электрического импеданса (а) и электрического адмиттанса (б) для резонатора без диэлектрической пластины

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

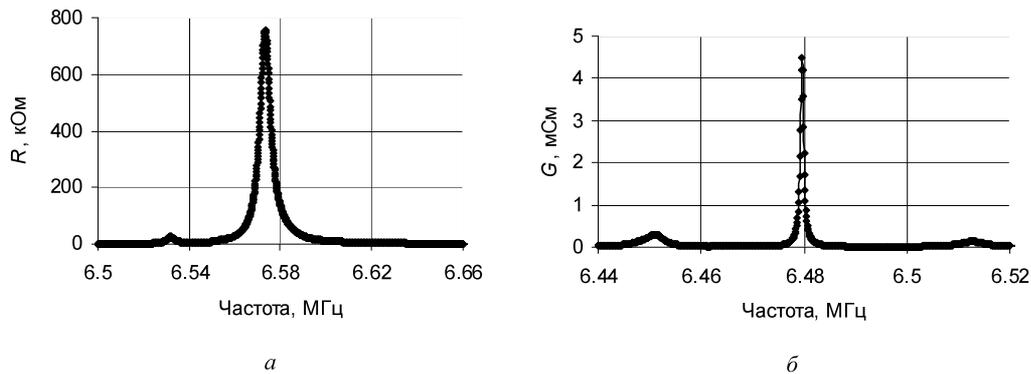


Рис. 2: Частотные зависимости реальных частей электрического импеданса (а) и электрического адмиттанса (б) для резонатора без диэлектрической пластины с проводящей пленкой

с проводящей пленкой. Видно, полное отсутствие паразитных колебаний. Для проведения экспериментов по изучению влияния зазора между свободной стороной резонатора и пластиной с проводящей пленкой алюминия на характеристики резонатора использовалось специально изготовленное микрометрическое устройство [11, 12]. Оно позволяло обеспечивать ширину зазора h с точностью порядка 10 мкм. С помощью указанного измерителя LCR параметров измерялись частотные зависимости реальной и мнимой частей электрического импеданса при различных значениях h и температуры. Для обеспечения заданной температуры указанное устройство помещалось в специальный термостат, который позволял изменять и поддерживать температуру в пределах 10–50 °С.

2. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

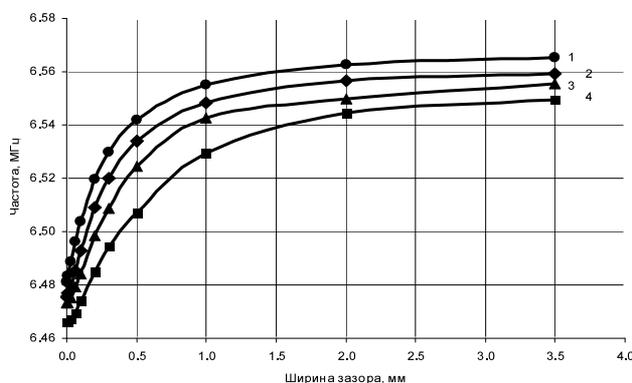


Рис. 3: Зависимости частоты параллельного резонанса от ширины зазора при различных значениях температуры: 1 — 14, 2 — 26(2), 3 — 34 и 4 — 45 °С

На рис. 3 приведены измеренные зависимости частоты параллельного резонанса от ширины зазора при

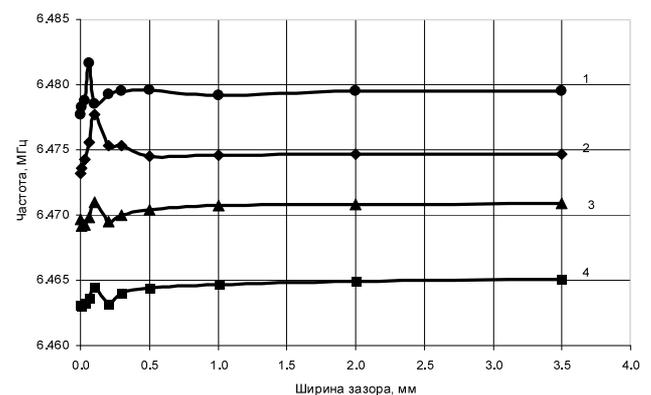


Рис. 4: Зависимости частоты последовательного резонанса от ширины зазора при указанных выше значениях температуры: 1 — 14, 2 — 26(2), 3 — 34 и 4 — 45 °С

различных значениях температуры: 14, 26, 34 и 45 °С. Видно, что при фиксированной температуре исследуемого устройства частота параллельного резонанса монотонно увеличивается с ростом h и достигает насыщения. При фиксированном значении зазора частота параллельного резонанса увеличивается с уменьшением температуры. При изменении h от 0 до 2 мм полное относительное изменение частоты параллельного резонанса при любой температуре составляет ~ 1.3%. На рис. 4 приведены измеренные зависимости частоты последовательного резонанса от ширины зазора при указанных выше значениях температуры. Видно, что при фиксированном значении температуры частота последовательного резонанса имеет незначительный всплеск при увеличении зазора от 0 до 0.2 мм и при дальнейшем увеличении ширины зазора практически не меняется. В целом, при изменении h от 0 до 3.5 мм относительное изменение частоты последовательного резонанса лежит в пределах 0.02–0.07% в исследованном диапазоне температур. На рис. 5 представлена температурная зависимость частоты последовательного ре-

зонанса при 0.2 мм.

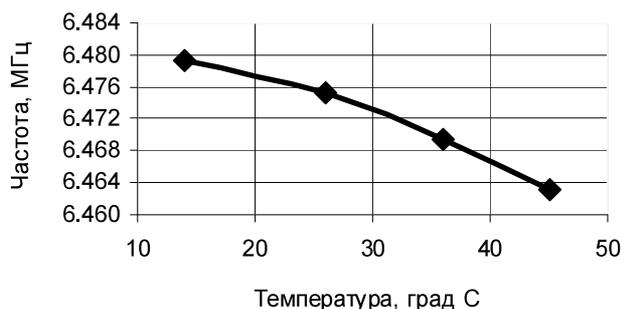


Рис. 5: Температурная зависимость частоты последовательного резонанса при 0.2 мм

3. Теоретический анализ влияния проводящего слоя на резонансные частоты резонатора

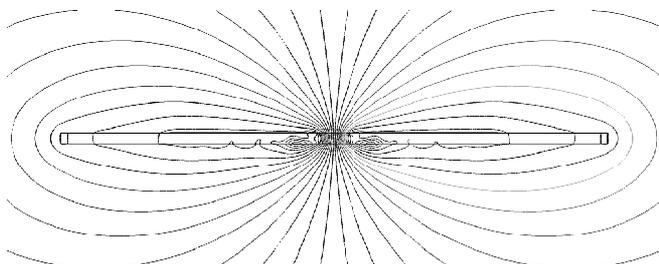


Рис. 6: Распределение электрического потенциала в рассматриваемом резонаторе

Был проведен численный анализ распределения компонент механического смещения внутри пластины ниобата лития и электрического потенциала как внутри пластины, так и в прилегающем вакууме методом конечных элементов [13, 14]. На рис. 6 представлено рас-

пределение электрического потенциала в рассматриваемом резонаторе [11–14]. Видно, что электрическое поле проникает на глубину, существенно превышающую толщину пластины, т.е. более 2 мм. Этим и объясняется чувствительность резонатора с поперечным электрическим полем к изменению электрических граничных условий вблизи свободной стороны. Было показано, что максимальная разница между рассчитанными и измеренными зависимостями частот параллельного и последовательного резонансов от ширины зазора составляет 0.6%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследовано влияние ширины зазора h между свободной стороной пьезоэлектрического резонатора с поперечным электрическим полем и диэлектрической пластиной с проводящей пленкой на характеристики резонатора при различных значениях температуры. Показано, что для заданной температуры при увеличении ширины зазора частота параллельного резонанса увеличивается и при $h > 2$ мм стремится к насыщению. Частота последовательного резонанса с увеличением h испытывает незначительную пульсацию и при $h > 0.2$ мм остается практически постоянной. В целом, результаты показывают, что на основе пьезоэлектрического резонатора с поперечным электрическим полем возможно создание измерителей перемещений с температурной компенсацией, которые могут быть использованы для непрерывного контроля деформаций и раскрытия трещин различных конструкций, элементов мостов и зданий, а также для измерения небольших перемещений двух объектов относительно друг друга. Резонатор на основе ниобата лития X-среза позволяет проводить измерения ширины зазора в пределах 0–2 мм. Температурная зависимость частоты последовательного резонанса (рис. 5) может быть использована для оценки температуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-07-00821а).

- [1] Vetelino J. F. Proc. of 2010 IEEE Ultrasonics Symposium. 2010. P. 2269.
- [2] Hu Y., French L. A., Radecky K., Pereira da Cunha M., Millard P., Vetelino J. F. IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelectr. and Freq. Cont. 2004. **51**, N 11. P. 1373.
- [3] McCann D. F., McCann J. M., Parks J. M., Frankel D. J., Pereira da Cunha M., Vetelino J. F. IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelectr. and Freq. Cont. 2009. **56**, N 4. P. 779.
- [4] Wark M., Kalanyan B., Ellis L., Fick J., Connel L., Neivandt D., Vetelino J. Proc. of 2007 IEEE Ultrasonics Symposium. 2007. P. 1217.
- [5] Zhang Z., Wang W., Ma T., Zhang C., Feng G. Proc. of 2009 IEEE Ultrasonics Symposium. 2009. P. 655.
- [6] Ma T., Zhang Z., Wang W., Zhang C., Feng G. Proc. of 2009 IEEE Ultrasonics Symposium. 2009. P. 2511.
- [7] Ma T., Wang J., Du J., Yuan L., Qian Z., Zhang Z., Zhang C. IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelectr. and Freq. Cont. 2013. **60**, N 4. P. 864.
- [8] Zaitsev B. D., Kuznetsova I. E., Shikhabudinov A. M., Vasiliev A. A. Proc. of 2010 IEEE Ultrasonics Symposium. 2010. P. 946.
- [9] Зайцев Б. Д., Кузнецова И. Е., Шихабудинов А. М., Васильев А. А. Письма в ЖТФ. 2011. **37**, № 11. С. 27.
- [10] Zaitsev B. D., Kuznetsova I. E., Shikhabudinov A. M., Teplykh A. A., Borodina I. A. IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelectr. and Freq. Cont. 2014. **60**, N 1. P. 166.
- [11] Zaitsev B. D., Shikhabudinov A. M., Teplykh A. A.,

- Borodina I. A., Kisin V. V.* Proc. of 2016 IEEE Ultrasonics Symposium. 2016. P. 946.
- [12] *Zaitsev B. D., Shikhabudinov A. M., Teplykh A. A., Borodina I. A.* Proceedings of 26th Int. Crimean Conf. "Microwave and Telecomm. Technol. 2016. P. 2097.
- [13] *Теплых А. А.* Нелинейный Мир. 2013. **11**, № 2. С. 94.
- [14] *Теплых А. А., Зайцев В. Д., Кузнецова И. Е.* Sensors & Transducers. 2015. **184**, № 1. P. 60.

The influence of the electrical boundary conditions near the free side of the piezoelectric resonator with lateral electric field on its characteristics

B. D. Zaitsev^a, A. M. Shikhabudinov, A. A. Teplykh, I. A. Borodina

Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Saratov Branch, Saratov, 410019, Russia
E-mail: ^azai-boris@yandex.ru

The influence of the gap between free side of the piezoelectric resonator with lateral electric field based on lithium niobate and conducting layer on the surface of dielectric plate on the frequencies of parallel and series resonances has been experimentally investigated. The measurements were carried out in the temperature range 14–45°C. It has been shown that the frequency of the parallel resonance monotonically increased on 1.3% at the increase of the gap width from 0 up to 3.5 mm at the fixed temperature. The change in the frequency of the series resonance in the range 0 – 3.5 mm at the constant temperature does not exceed 0.02–0.07%. Theoretical analysis numerically confirmed the measured dependencies of resonant frequencies on gap width. It has been shown that the difference between theoretical and experimental dependencies of frequencies of parallel and series resonances on gap width is less than 0.6%. It has been demonstrated the possibility of the development of the meters of displacements with the temperature compensation which may be used for monitoring the deformations and crack openings of various constructions.

PACS: 43.20+g

Keywords: piezoelectric resonator with lateral electric field, resonant frequency, parallel resonance, series resonance, dielectric plate with conducting layer, temperature.

Received 06 July 2017.

Сведения об авторах

1. Зайцев Борис Давыдович — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. лабораторией; тел.: (452) 27-24-01, e-mail: zai-boris@yandex.ru
 2. Шихабудинов Александр Магомедович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (452) 27-24-01, e-mail: alex-sheih@yandex.ru
 3. Теплых Андрей Алексеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (452) 27-24-01, e-mail: teplykhaa@mail.ru
 4. Бородина Ирина Анатольевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (452) 27-24-01, e-mail: borodinaia@yandex.ru
-