

08;12

Новый способ подавления паразитных мод в пьезоэлектрическом резонаторе с поперечным электрическим полем

© Б.Д. Зайцев, И.Е. Кузнецова, А.М. Шихабудинов, А.А. Васильев

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники РАН
E-mail: zai-boris@yandex.ru

Поступило в Редакцию 16 ноября 2010 г.

Описан новый способ подавления паразитных колебаний в пьезоэлектрическом резонаторе с поперечным электрическим полем путем покрытия части электродов демпфирующим слоем. Возможности способа продемонстрированы на примере пластины ниобата лития X -среза. Экспериментально подтверждено, что акустическая волна с поперечной электрической поляризацией ужестчается, причем степень ужестчения зависит не только от коэффициента электромеханической связи, но и от апертуры волны.

В последние годы в связи с разработкой и совершенствованием акустоэлектрических датчиков для исследования свойств различных жидкостей, включая и биологические, исследователи стали обращать особое внимание на пьезоэлектрические резонаторы с поперечным электрическим полем [1–18]. Было показано, что традиционные широко используемые датчики, основанные на резонаторах с продольным электрическим полем, обладают рядом недостатков, а именно: 1) при контакте с жидкостью параметры резонатора реагируют только на изменение механических свойств жидкости и практически не реагируют на изменение ее электрических свойств; 2) контакт резонатора с исследуемой жидкостью осуществляется через электрод, свойства материала которого могут меняться в присутствии жидкости, и 3) при обработке результатов измерений необходимо учитывать массовую нагрузку электродов. Последний фактор часто вызывает затруднения, поскольку электрод — это обычно многослойная структура, в которой свойства слоев и их толщины могут меняться в широких пределах. Пьезорезонаторы с поперечным полем свободны от указанных недостатков, поскольку электроды находятся на одной стороне пластины, а

акустическая волна распространяется в основном в пространстве между электродами.

Обзор литературы показал, что основная трудность при конструировании резонаторов с поперечным электрическим полем — это подавление нежелательных колебаний с целью обеспечения достаточно высокой добротности для выделенной резонансной частоты. В этом плане существует несколько путей, к которым относятся выбор оптимальной формы электродов, строгая их ориентация относительно кристаллографических осей и краев кристалла, формирование мезоструктур химическим травлением части поверхности пьезокристалла и использование выпуклой формы поверхности. В данной работе предложен новый способ подавления нежелательных колебаний в резонаторе с поперечным полем путем частичного покрытия электродов демпфирующим слоем. Реализация этого метода продемонстрирована на примере пластины ниобата лития X -среза.

Как уже отмечалось, резонатор с поперечным полем представляет собой пьезоэлектрическую пластину с двумя электродами на ее поверхности, которые разделены зазором. При подаче переменного электрического напряжения на эти электроды в пьезоэлектрике возникает неоднородное электрическое поле. Очевидно, что в пространстве между электродами наибольшее значение имеет поперечная компонента поля, а нормальная компонента максимальна под электродами. Указанные компоненты поля возбуждают целый набор акустических волн, имеющих разную поляризацию, в соответствии с набором пьезоэлектрических постоянных. Основная мода, на которую рассчитан резонатор, это волна, распространяющаяся в пространстве между электродами и возбуждаемая поперечным электрическим полем. Очевидно, что эта волна будет поперечно пьезоактивной, т. е. будет сопровождаться поперечной электрической поляризацией [19]. Известно, что для бесконечной апертуры такая волна, несмотря на конечную электрическую поляризацию, не сопровождается поперечным электрическим полем и не является жесткой [19]. Однако если волна имеет конечную апертуру, то наличие конечной электрической поляризации, очевидно, приведет к появлению напряженности электрического поля и соответствующему жестчению волны. При этом степень жестчения будет зависеть не только от коэффициента электромеханической связи, но и от апертуры волны. Этому вопросу в литературе не уделено достаточного внимания, и в данной работе он будет анализироваться.

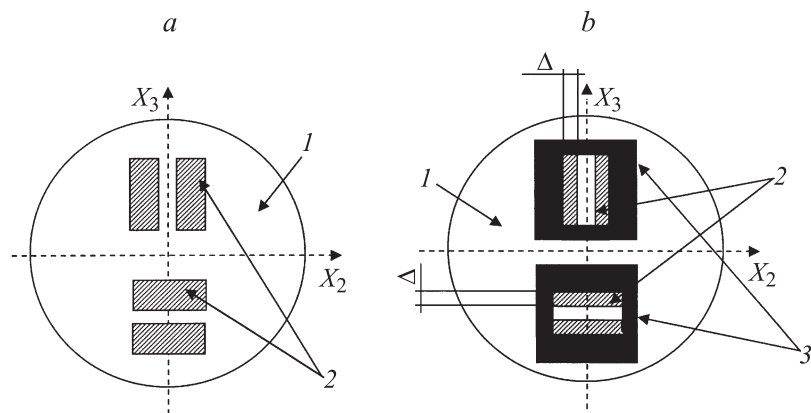


Рис. 1. Конфигурация электродов на пластине ниобата лития относительно кристаллофизических осей без демпфирующего покрытия (*a*) и с покрытием (*b*): 1 — пластина ниобата лития, 2 — электроды, 3 — демпфирующее покрытие.

Экспериментальное исследование особенностей работы резонатора с поперечным электрическим полем проводилось на примере пьезоэлектрической пластины ниобата лития X -среза (кристаллофизическая ось X_1 перпендикулярна плоскости пластины). На пластину диаметром 75 мм и толщиной 510 μm наносились две пары прямоугольных электродов длиной 10 мм и шириной 5.5 мм, как показано на рис. 1, *a*. В качестве электродов использовались двухслойные пленки хром–серебро с толщинами ~ 300 и ~ 2000 Å, напыленные в вакууме через соответствующую маску. Зазор между электродами определялся конфигурацией маски и менялся от 2.5 до 1 мм с шагом 0.5 мм при каждом последующем напылении. Очевидно, что для верхней и нижней пары электродов поперечное электрическое поле направлено вдоль кристаллофизических осей X_2 и X_3 соответственно. В работе исследовались кристаллофизические ориентации. Для обеспечения электрического контакта использовались проводящий клей и золотая проволока диаметром 25 μm . С помощью измерителя LCR параметров Agilent 428A проводились измерения частотных зависимостей реальной и мнимой частей электрического импеданса резонатора. Эксперименты показали, что для всех вышеуказанных значений зазора между элек-

тромами эти зависимости оказались чрезвычайно сильно изрезанными и ярко выраженные резонансы отсутствовали. Это свидетельствовало о том, что помимо полезной продольной волны в пластине присутствовали различные паразитные акустические несфазированные колебания, которые „смазывали“ ожидаемые резонансы.

Для подавления паразитных колебаний вокруг каждого резонатора наносился слой специального быстросохнущего лака, как показано на рис. 1, *b*. При этом ширина непокрытой части каждого электрода Δ менялась от ~ 5 мм до 0 с шагом 0.5 мм. На каждом шаге измерялись указанные частотные зависимости электрического импеданса. Эти зависимости для зазора 1.5 мм представлены на рис. 2 для значений $\Delta = 5.75, 4, 1$ и 0.5 мм для поперечного электрического поля $E \parallel X_2$. Видно, что существует оптимум при $\Delta = 4$ мм, который соответствует наибольшему значению максимума реальной части импеданса. Ниже приводится краткая физическая интерпретация полученного результата.

Очевидно, что при данной ориентации пластины и электродов в пространстве между электродами наибольшее значение имеет поперечная компонента поля E_2 , а нормальная компонента E_1 максимальна под электродами. Эти компоненты поля возбуждают акустические волны в соответствии с набором не равных нулю пьезоэлектрических постоянных $e_{21}, e_{22}, e_{16}, e_{24}$ и e_{15} [20]. Если записать уравнение движения, уравнение Лапласа и материальные уравнения для механического напряжения и электрической индукции [20,21], то можно сразу увидеть, что благодаря компоненте напряженности электрического поля E_1 будут возбуждаться две объемные поперечные волны с разной поляризацией, бегущие вдоль оси X_1 в пространстве под электродами. За счет компоненты E_2 в пространстве между электродами будет возбуждаться объемная продольная волна, бегущая вдоль оси X_1 . Очевидно, что эти волны будут резонировать по толщине пластины. Кроме того, указанные компоненты электрического поля будут возбуждать волны Лэмба и волны с поперечной горизонтальной поляризацией (*SH*-волны), бегущие вдоль оси X_2 . Эти волны будут переотражаться и интерферировать между боковыми краями пластины. Интерференция такого количества волн с различными фазовыми скоростями должна привести к отсутствию четко выраженного резонанса, что и наблюдается в эксперименте. Если же нанести демпфирующий слой, частично покрывающий электроды, то это приведет к существенному

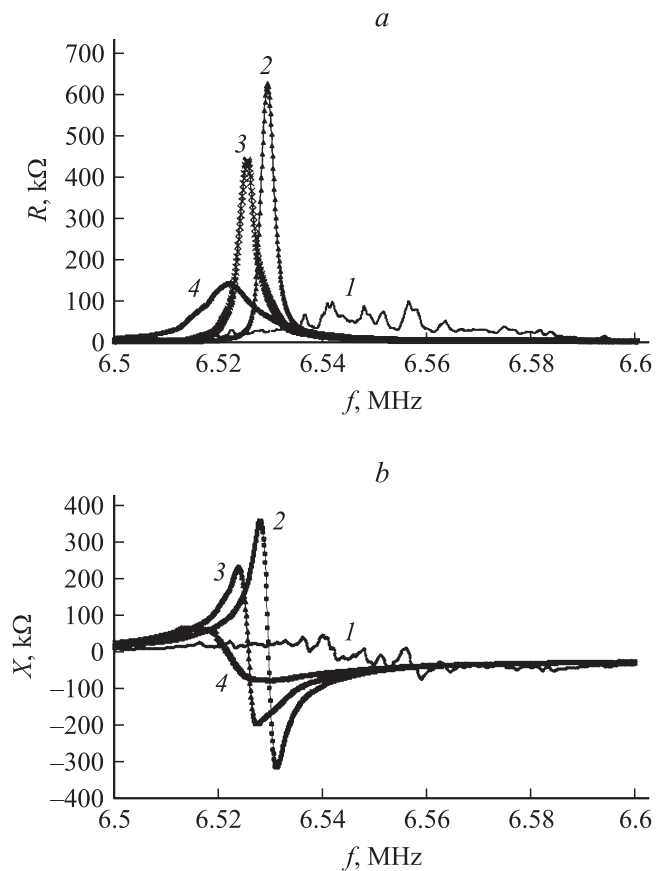


Рис. 2. Частотные зависимости действительной (*a*) и мнимой (*b*) частей электрического импеданса резонатора с поперечным полем с ориентацией $E \parallel X_2$ для зазора между электродами 1.5 mm и для значений $\Delta = 5.75$ mm (*1*), 4 mm (*2*), 1 mm (*3*) и 0 (*4*).

ослаблению волн Лэмба и SH -волн, а также объемных волн, бегущих под электродами. Таким образом, демпфирующее покрытие никак не отразится только на основной чисто продольной волне в пространстве между электродами, которая в отсутствие других волн дает четкий резонанс.

Аналогичные результаты были получены для электрического поля, параллельного оси X_3 . В результате было установлено следующее.

Устойчивый резонанс получается на продольной акустической волне, распространяющейся вдоль оси $x(X_1)$ и возбуждаемой поперечными компонентами поля, параллельными либо оси X_2 , либо оси X_3 . Эта волна возбуждается благодаря пьезоконстанте $e_{21} = -2.42 \text{ К/м}^2$ при $E \parallel X_2$ или $e_{31} = 0.3 \text{ К/м}^2$ при $E \parallel X_3$ [7,20]. Очевидно, что в соответствии с формализмом Кристоффеля–Бечмана [7] при любой ориентации возбуждающего поля эта волна будет поперечно-пьезоактивной, т.е. будет сопровождаться поперечной электрической поляризацией [19]. Эксперименты показали, что при одинаковых значениях зазора между электродами резонансная частота, а следовательно, и скорость волны для ориентации поля $E \parallel X_3$ всегда меньше, чем для ориентации $E \parallel X_2$. Эти значения скорости для продольной волны оказались равными $V_2 = 6661 \text{ м/с}$ ($E \parallel X_2$) и $V_3 = 6605 \text{ м/с}$ ($E \parallel X_3$) для зазора 2.5 мм и $\Delta = 4 \text{ мм}$. Эта разница может быть объяснена различной ориентацией электрической поляризации среды, сопровождающей волну, и разницей значений коэффициента электромеханической связи $K^2(x_2) = 0.073$ и $K^2(x_3) = 0.00195$ для ориентаций поля $E \parallel X_2$ и $E \parallel X_3$ соответственно. Было сделано предположение, что с учетом конечной апертуры волны ее скорость для двух ориентаций поперечной электрической поляризации может быть выражена

$$V_2 = \sqrt{c_{11}/\rho} [1 + K^2(X_2)A_2/2], \quad (1)$$

$$V_3 = \sqrt{c_{11}/\rho} [1 + K^2(X_3)A_3/2]. \quad (2)$$

Здесь c_{11} — компонента тензора модулей упругости, ρ — плотность, A_i ($i = 1, 2$) — эмпирический коэффициент, связанный с величиной апертуры волны, которая определяется зазором между электродами. При бесконечной апертуре $A_i = 0$, т.е. при наличии поперечной электрической поляризации плоская акустическая волна не ужестчается [19]. Поскольку для указанных выше значений скорости зазоры между электродами одинаковы, то $A_1 = A_2 = A$ и из (1) и (2) следует

$$\frac{V_2 - V_3}{V_2} \approx \frac{A[K^2(X_2) - K^2(X_3)]}{2}. \quad (3)$$

Расчет показал, что для зазора 2.5 мм (~ 2.5 длин волн) $A = 0.24$. Для других значений зазора, меняющегося в пределах $1\text{--}25 \text{ мм}$, коэффициент A незначительно меняется в диапазоне $\sim 0.24\text{--}0.27$.

Кроме того, эксперименты показали, что при прочих равных условиях максимальное значение реальной части импеданса (которое определяет добротность резонатора) значительно больше для ориентации поля $E \parallel X_2$ по сравнению с ориентацией $E \parallel X_3$. Эта разница также объясняется различием значений коэффициента электромеханической связи. В целом было показано, что путем демпфирования части электродов добротность резонатора с поперечным полем $E \parallel X_2$ или $E \parallel X_3$ на основе пластины ниобата лития X -среза может меняться в широком диапазоне от 500 до 8000.

Работа поддержана грантами РФФИ 09-02-12442-офи-м, 10-02-01313а, ГК 02.740.11.0014, а также фондом „Династия“ и грантом президента РФ МК-64600.2010.9.

Список литературы

- [1] *Ballato A., Hatch E.R., Mizan M., Lukaszek T.J.* // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectrics, Freq. Contr. 1986. V. 33. N 4. P. 385–393.
- [2] *Ballato A.* US patent N 4,625,138, issued 25 Nov. 1986.
- [3] *Smyth R.C., Tiersten H.F.* // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectrics, Freq. Contr. 1988. V. 35. N 3. P. 435–436.
- [4] *Weinert R.W., McAvoy B.R., Driscoll M.M., Moore R.A., Tiersten H.F.* // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1989. P. 477–480.
- [5] *Lau W.W., Song Y., Kim E.S.* // Proc. IEEE International Frequency Control Symposium. 1996. P. 558–562.
- [6] *Kosinski J.A., Lu Y., Ballato A.* // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1996. P. 987–990.
- [7] *Ballato A.* // Proc. IEEE/EIA International Frequency Control Symposium Exhibition. 2000. P. 340–344.
- [8] *Khan A., Ballato A.* // Proc. IEEE/EIA International Frequency Control Symposium Exhibition. 2000. P. 180–185.
- [9] *Hu Y., French L.A., jr., Radecsky K., Rereira da Cunha M., Millard P., Vetelino J.F.* // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectrics Freq., Contr. 2004. V. 51. N 11. P. 1373–1379.
- [10] *York C., French L.A., Millard P., Vetelino J.F.* // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 2005. P. 44–49.
- [11] *Pinkham W., Wark M., Winters S., French L., Frankel D.J., Vetelino J.F.* // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 2005. P. 2279–2283.
- [12] *Wark M., Kalanyan B., Ellis L., Fick J., Connel L., Neicandt D., Vetelino J.* // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 2007. P. 1217–1220.

- [13] *McCann J.M., Sgambato K., McCann D.F., Vetelino J.* // Proc. IEEE International Ultrasonics Symposium. 2009. P. 645–648.
- [14] *Leblois T.G., Tellier C.R.* // Proc. IEEE International Ultrasonics Symposium. 2009. P. 2672–2675.
- [15] *Andle J.C., Haskell R., Chap M., Stevens D.* // Proc. IEEE International Ultrasonics Symposium. 2009. P. 649–654.
- [16] *McCann D.F., McCann J.M., Frankel D.J., Rereira da Cunha M., Vetelino J.F.* // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectrics, Freq. Contr. 2009. V. 56. N 4. P. 779–787.
- [17] *Zhang Z., Wang W., Ma T., Zhang C., Feng G.* // Proc. IEEE International Ultrasonics Symposium. 2009. P. 655–658.
- [18] *Zuo C., Van der Spiegel J., Piazza G.* // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectrics, Freq. Contr. 2010. V. 57. N 1. P. 82–87.
- [19] *Лямов В.Е.* Поляризационные эффекты и анизотропия взаимодействия акустических волн в кристаллах. М.: Изд-во МГУ, 1983. 223 с.
- [20] *Александров К.С., Сорокин Б.П., Бурков С.И.* Эффективные пьезоэлектрические кристаллы для акустоэлектроники, пьезотехники и сенсоров. Т. 1. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 500 с.
- [21] *Royer D., Dieulesaint E.* Elastic waves in solids I. Free and guided propagation. Berlin: Springer, 2000. 374 p.