

10;13

Селективное возбуждение собственных мод в многослойном тонкопленочном резонаторе на объемных акустических волнах

© А.К. Михайлов^{1,2}, С.В. Пташник^{1,3}, А.Б. Козырев¹

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

³ Дагестанский государственный университет, Махачкала, Республика Дагестан

E-mail: mlpeltech@gmail.com

Поступило в Редакцию 23 октября 2015 г.

Рассматривается способ управления рабочей частотой резонатора на объемных акустических волнах, основанный на селективном возбуждении собственных мод. Переключение частоты достигается при использовании в составе резонатора нескольких слоев сегнетоэлектрика в параэлектрическом состоянии, с подачей на каждый слой управляющих напряжений соответствующей величины и полярности. Сформулирован „принцип селективности“ и представлена функция-критерий, определяющие способ наиболее эффективного возбуждения выбранной собственной моды с возможностью подавления паразитных мод. Приведен пример использования данной функции для резонатора, переключаемого между четырьмя собственными модами.

Резонаторы на объемных акустических волнах (ОАВ) и фильтры на их основе широко используются в современных СВЧ-устройствах систем связи и навигации. Ключевыми достоинствами ОАВ-резонаторов являются малые размеры и высокий уровень добротности на СВЧ, что позволяет использовать их для обработки сигналов с частотой до десятков гигагерц. Современные ОАВ-резонаторы представляют собой структуры, содержащие один слой пьезоэлектрика (как правило, AlN или ZnO) [1,2]. Слабая зависимость акустических параметров традиционно используемых пьезоэлектриков от электрического поля

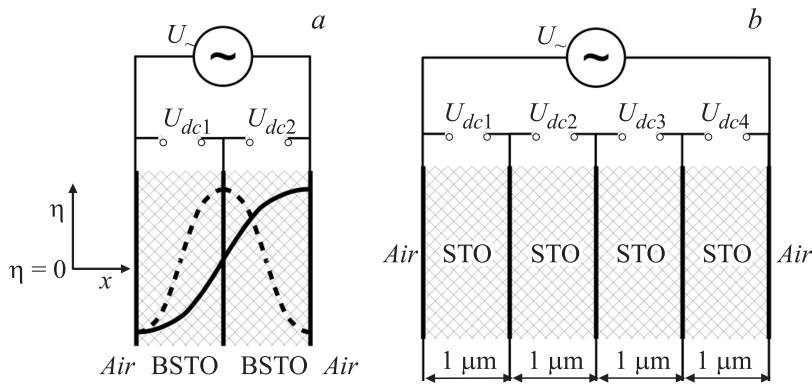


Рис. 1. Схематичное изображение ОАВ-резонатора с двумя (а) и четырьмя (b) слоями сегнетоэлектрика в пьезоэлектрическом состоянии. На фрагменте (а) схематично показаны первая (сплошная линия) и вторая (пунктирная линия) собственные моды двухслойной структуры ($\eta^{(i)}(x)$ — координатные зависимости механических смещений точек резонатора в фиксированный момент времени).

не позволяет добиться практически значимой перестройки рабочей частоты резонатора. Разработка ОАВ-резонаторов с возможностью электрического управления рабочей частотой является актуальной задачей, решение которой позволит значительно расширить функциональные возможности современных СВЧ фильтровых систем.

Одним из наиболее перспективных подходов к решению данной задачи является замена классического пьезоэлектрика на сегнетоэлектрик в параэлектрическом состоянии, пьезоэлектрические параметры которого зависят от величины приложенного управляющего напряжения (поля смещения). В качестве такого материала обычно выступает титанат бария-стронция ($\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ (BSTO)) либо титанат стронция (SrTiO_3 (STO)). Однако как экспериментальные, так и теоретические исследования в данной области демонстрируют максимальную перестройку рабочей частоты в пределах нескольких процентов [3,4].

В работе [5] было теоретически показано, а в [6] экспериментально подтверждено, что использование в составе структуры ОАВ-резонатора двух пленок (слоев) сегнетоэлектрика в параэлектрическом состоянии

(рис. 1, *a*), при варьировании полярности приложенным к пленкам напряжений смещением позволяет добиться переключения резонатора с первой собственной акустической моды на вторую, что соответствует скачкообразному изменению рабочей частоты примерно в 2 раза. Как показывают результаты модельного анализа и экспериментальные данные [5,6], при приложении к обоим сегнетоэлектрическим слоям резонатора одинакового по знаку электрического смещения он ведет себя как однослойный, в котором возбуждаются только моды с нечетными номерами: первая (рис. 1, *a*, сплошная линия), третья, пятая и т.д. При приложении к слоям противоположных по знаку полей смещения структура превращается в систему из двух механически связанных резонаторов, каждый из которых осциллирует в противофазе относительно соседнего, при этом возбуждение нечетных мод запрещено и возбуждаются только вторая (рис. 1, *a*, пунктирная линия), шестая, десятая моды и т.д., соответствующие для каждого отдельного слоя первой, третьей, пятой мод и т.д.

Настоящая работа посвящена теоретическому исследованию электрически управляемой селекции собственных акустических мод в ОАВ-резонаторе, содержащем произвольное число слоев сегнетоэлектрика, что обеспечивает возможность переключения резонансных частот в более широком диапазоне.

Анализ электроакустического отклика многослойных структур при различных полях смещения на пьезоактивных слоях основан на решении классических электромеханических уравнений, аналогично тому, как это было сделано в работе [1] для структур с одним пьезоактивным слоем. Особенностью используемой математической модели является зависимость как абсолютного значения, так и знака пьезокоэффициента сегнетоэлектрика от величины и направления приложенного электрического поля соответственно [5]. Введенное в рамках данной модели понятие „знака“ пьезоэлектрического коэффициента позволяет учесть влияние полярности поля смещения на фазу акустических колебаний, возбуждаемых СВЧ-сигналом в каждом пьезоактивном слое.

В структуре из n одинаковых сегнетоэлектрических слоев, осциллирующих в противофазе относительно друг друга, на n -й моде на каждый из слоев приходится по одной полуволне, т.е. каждый из резонаторов работает на своей первой моде. При указанных условиях нельзя возбудить моду с порядковым номером менее n , однако возможно возбуждение более высоких мод, если они будут соответствовать

для каждого отдельного слоя третьей, пятой модам и т.д. Нетрудно убедиться, что номера таких мод описываются выражением $n(2m + 1)$, где m — натуральное число.

В качестве примера рассмотрим принцип управления четырех-слойной структурой ($n = 4$). Общий вид структуры, а также схема приложения к ней смещающих напряжений и СВЧ-сигнала приведены на рис. 1, *b*. При приложении ко всем слоям одинаковых по знаку полей смещения она будет работать как единый резонатор (возбуждаются моды № 1 (рис. 2, *a*), 3 (рис. 2, *b*), 5. . .). При приложении к первым двум слоям полей смещения одного знака, а к другим двум — противоположного, структура будет работать как система из двух механически связанных резонаторов (возбуждаются моды № 2 (рис. 2, *c* — сплошная линия), 6, 10. . .). Наконец, при приложении ко всем слоям полей смещения чередующихся знаков, структура будет работать как система из четырех резонаторов (возбуждаются моды № 4 (рис. 2, *c* — пунктир), 12, 20. . .).

Таким образом, можно отметить следующий принцип селективности: наиболее эффективное возбуждение n -й моды достигается в резонаторе, состоящем из n пьезоактивных слоев, одинаковых по фазовому набегу акустической волны и механическим импедансам, при условии чередования полярности управляющих напряжений на слоях. При этом также возможно возбуждение и высших мод с шагом в $2n$. Под эффективностью возбуждения моды подразумеваются сравнительная оценка максимальной амплитуды стоячей акустической волны, а также пиковые абсолютные значения электрических импеданса и адмиттанса резонатора — чем выше эти значения, тем эффективнее возбуждается мода.

С точки зрения практического применения интерес представляет создание резонатора, переключаемого между несколькими режимами (в рамках выбранного частотного диапазона), в каждом из которых возбуждается только одна мода. Для резонатора с четырьмя сегнето-электрическими слоями эта задача успешно решается для 2-й и 4-й мод за счет подбора соответствующих полярностей полей смещения в соответствии с принципом селективности. Однако „разделение“ первой и третьей мод (рис. 2, *a, b*), т.е. создание таких условий, при которых либо возбуждается первая мода и подавляется третья, либо наоборот, возбуждается третья и подавляется первая, не укладывается в рамки сформулированного выше принципа селективности.

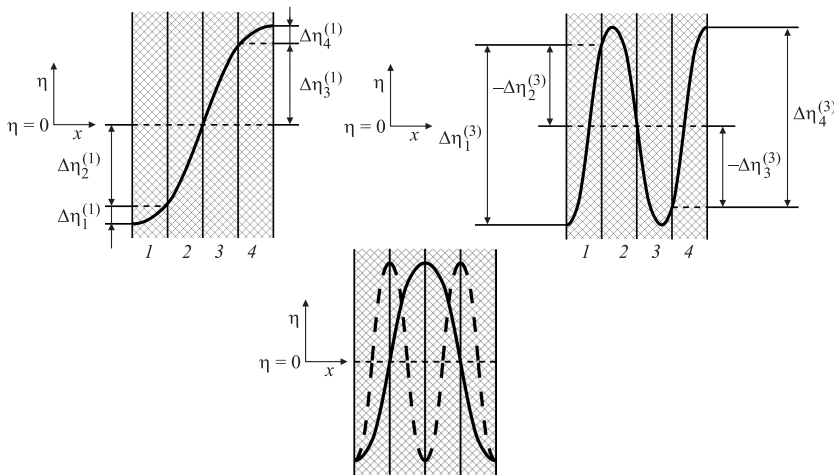


Рис. 2. Примеры определения $\Delta\eta_j^{(i)}$ по эмпоре $\Delta\eta_j^{(i)}(x)$ для первой (а) и третьей (б) собственной акустической моды. Вид второй и четвертой (с) собственных мод в четырехслойной структуре.

Указанная задача „разделения“ первой и третьей мод является частным случаем более общей проблемы возбуждения выбранной моды в структуре с произвольным числом слоев, при условии подавления нескольких „соседних“ (близких по частоте) мод. Для решения данной задачи предлагается подход, основанный на поиске экстремумов функционала вида

$$f^{(i)}(c(x)) = \left| \int_0^h \frac{\partial \eta^{(i)}}{\partial x}(x) c(x) dx \right|,$$

где $c(x)$ определяет воздействие электрического поля на среду (нормированное значение пьезоэлектрического коэффициента) в точке x , а $\frac{\partial \eta^{(i)}}{\partial x}(x)$ соответствует отклику, т.е. пространственному распределению амплитуды механических деформаций на i -й моде (производной по координате от распределения механических смещений на i -й моде $\eta^{(i)}(x)$). Пределы интегрирования 0 и h соответствуют координатам границ структуры по оси x .

Если $\frac{\partial \eta^{(i)}}{\partial x}(x)$ определяется выбором моды, которую необходимо возбудить или подавить, то $c(x)$ является инструментом, позволяющим обеспечивать возбуждение ($f^{(i)}(c(x)) \rightarrow \max$) или подавление ($f^{(i)}(c(x)) \rightarrow \min$) выбранной моды.

Так как зависимость $c(x)$ ограничена видом ступенчато-постоянной функции (постоянные участки соответствуют слоям структуры, на границах слоев функция может иметь разрывы), функцию $f^{(i)}(c(x))$, можно упростить до вида

$$f^i(\mathbf{c}) = \left| \sum_{j=1}^n \Delta \eta_j^{(i)} c_j \right|, \quad (1)$$

где $\Delta \eta_j^{(i)}$ — амплитуда взаимных колебаний границ j -го слоя на i -й моде (рис. 2, a, b), со знаком, учитывающим взаимные фазы колебаний слоев ($\Delta \eta_j^{(i)} \Delta \eta_{j+1}^{(i)} > 0$, если j -й и $j+1$ -й слои колеблются относительно друг друга в одной фазе, и $\Delta \eta_j^{(i)} \Delta \eta_{j+1}^{(i)} < 0$, если в противофазе),

$$c_j = \pm \frac{e_j(E_{dcj})}{e_{\max}}, \quad (2)$$

— нормированные значения пьезоэлектрического коэффициента в слоях (E_{dcj} — электрическое поле смещения, приложенное к слою, e_{\max} — максимально возможное для данной структуры значение пьезокоэффициента). Выбор знака этой величины зависит от полярности приложенного поля смещения.

Рассчитав пространственные распределения механических смещений, соответствующие собственным акустическим модам структуры $\eta^{(i)}(x)$, и получив значения $\Delta \eta_j^{(i)}$ для пьезоактивных слоев, можно, варьируя величины c_j , найти такие их значения, при которых для выбранной моды данная функция максимальна, что соответствует наиболее эффективному возбуждению этой моды.

Таким образом, выражение (1) можно рассматривать как функцию-критерий для выбора оптимальных значений c_j (а значит, и E_{dcj}), соответствующих возбуждению одних мод и/или подавлению других (в зависимости от поставленной оптимизационной задачи).

Для четырехслойного резонатора необходимо решить две оптимизационные задачи, заключающиеся в максимизации функции-критерия для

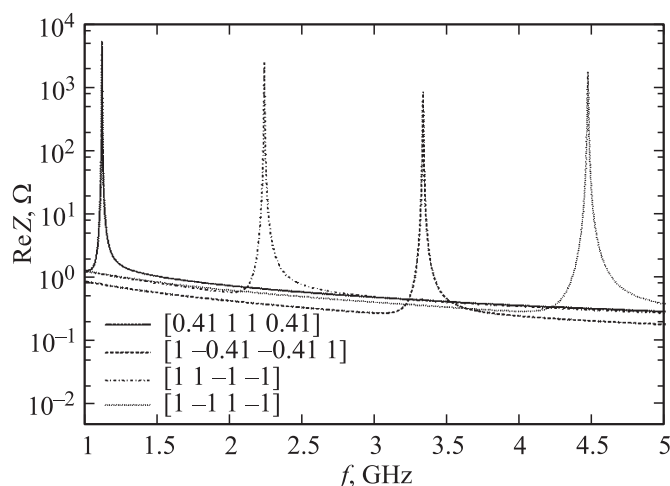


Рис. 3. Частотные зависимости действительной части импеданса четырехслойного SgTiO_3 резонатора при различных величинах полей смещения на слоях (приведенные значения напряженностей полей смещения на слоях нормированы на величину $40 \text{ V}/\mu\text{m}$).

выбранной (первой или третьей) моды, при условии ее минимизации для конкурирующей с ней (соответственно третьей или первой) моды (задача минимакса). В результате решения этих двух задач могут быть получены искомые величины управляющих напряжений на слоях.

В рамках рассматриваемого в настоящей работе примера были решены две оптимизационные задачи:

$$\begin{cases} f^1(\mathbf{c}) \rightarrow \max \\ f^3(\mathbf{c}) = 0 \\ -1 \leq c_j \leq 1 \end{cases} \quad \begin{cases} f^3(\mathbf{c}) \rightarrow \max \\ f^1(\mathbf{c}) = 0 \\ -1 \leq c_j \leq 1, \end{cases} \quad (3)$$

$$j = 1 \dots 4,$$

описывающие соответственно наиболее эффективное возбуждение первой моды при полном подавлении третьей, и наиболее эффективное возбуждение третьей моды при полном подавлении первой. Решениями этих задач являются векторы $\mathbf{c} \approx [0.41 \ 1 \ 1 \ 0.41]^T$ и $\mathbf{c} \approx [1 \ -0.41 \ -0.41 \ 1]^T$ соответственно.

Результаты моделирования частотных зависимостей действительной части электрического импеданса резонатора при четырех сочетаниях полярностей и абсолютных значений полей смещения, оптимизированных по критерию (1) для возбуждения четырех низших мод резонатора, приведены на рис. 3.

Как видно из рис. 3, существует возможность электрически управляемого переключения структуры, состоящей из четырех слоев SrTiO_3 , между четырьмя режимами, в каждом из которых возбуждается только одна мода из наблюдаемого диапазона. Этот эффект может быть использован при создании электрически управляемых СВЧ-фильтров с возможностью скачкообразной перестройки рабочей частоты в несколько раз.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 15-19-10049).

Список литературы

- [1] *Lakin K., Kline G., McCarron K.* // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1993. V. 41. N 12. P. 2139–2146.
- [2] *Hashimoto K.-Y.* RF bulk acoustic wave filters for communications. Norwood: Artech House, 2009.
- [3] *Noeth A., Yamada T., Tagantsev A.K.* // J. Appl. Phys. 2008. V. 104. P. 094 102.
- [4] *Vendik I.V., Turalchuk P.A., Vendik O.G.* // J. Appl. Phys. 2008. V. 103. P. 014107.
- [5] *Kozyrev A.B., Mikhaylov A.K., Petrov P.K.* // Elect. Lett. 2011. V. 47. N 24. P. 1326–1327.
- [6] *Gevorgian S., Vorobiev A.* // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 104. N 22. P. 222 905.