

## **Перестраиваемый СВЧ фильтр на объемных акустических волнах**

*В статье рассмотрены электрические характеристики многослойной емкостной структуры, содержащей две пленки сегнетоэлектрика, находящегося в параэлектрическом состоянии. Такая структура является тонкопленочным резонатором на объемных акустических волнах. Изменение полярности смещающего напряжения на слоях сегнетоэлектрика позволяет добиться значительной (порядка 100%) перестройки собственного спектра частот резонатора, что может быть использовано для создания электрически перестраиваемого СВЧ фильтра.*

**Ключевые слова:** объемные акустические волны, перестраиваемый фильтр, сегнетоэлектрические пленки

В настоящее время СВЧ фильтры, созданные на основе резонаторов на объемных акустических волнах (ОАВ) активно используются в различных телекоммуникационных системах [1-3]. Устройства на ОАВ могут работать в диапазоне частот до 10 ГГц и обеспечивают низкие СВЧ потери и высокую надежность при сверхминиатюрных размерах [2]. Однако одним из недостатков существующих резонаторов на ОАВ, использующих традиционные пьезоэлектрические материалы (AlN, ZnO), является отсутствие эффективного управления резонансной частотой. На сегодняшний день выделяют несколько способов электронной перестройки частоты подобных резонаторов – это использование дополнительного управляющего полупроводникового диода либо собственная нелинейность второго порядка у пьезоэлектрического материала. Оба этих способа не позволяют обеспечить диапазон перестройки более 2% [3, 4].

Альтернативным способом перестройки является использование сегнетоэлектрика в параэлектрическом состоянии. В сегнетоэлектрических материалах с centrosymmetric кубической структурой в параэлектрической фазе пьезоэлектрический эффект не должен наблюдаться, однако при приложении постоянного электрического поля, возникает наведенный пьезоэффект, являющийся следствием электрострикции. Наведенный пьезоэффект количественно характеризуется электромеханическим коэффициентом связи, зависящим от величины смещающего поля. Это свойство может быть использовано для электрической перестройки резонансных частот резонатора на ОАВ.

В ряде публикаций [5-7] результаты теоретического и экспериментального исследования тонкопленочной структуры металл/сегнетоэлектрик/металл демонстрируют наличие пьезоэлектрических резонансов и их перестройку под действием электрического поля. Однако перестройка частоты, наблюдаемая экспериментально в структурах металл/сегнетоэлектрик/металл, составляет не более чем 1%, а теоретический предел приблизительно равен 5%.

Ранее авторами было показано, что за счет электрического управления эффективностью возбуждения СВЧ полем собственных акустических мод в емкостной

структуре, содержащей две сегнетоэлектрические пленки возможна более существенная перестройка частоты пропускания электроакустического резонатора [8]. При одной комбинации управляющих полей в СЭ пленках (рисунок 1а) обеспечиваются условия для селективного возбуждения собственной акустической моды с частотой  $f_{p1}$ . Другая комбинация управляющих напряжений (рисунок 1б) обеспечивает условие для селективного возбуждения собственной моды с другой ( $f_{p2} > f_{p1}$ ) частотой и резко снижает эффективность возбуждения моды  $f_{p1}$ .

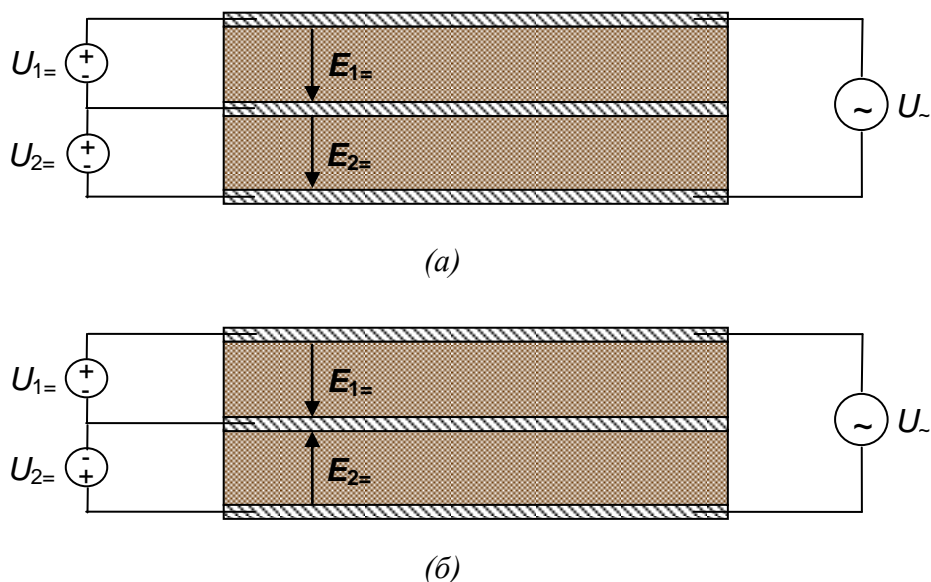


Рис. 1. Варианты распределения управляющего поля для селективного возбуждения собственной моды заданной частоты

В качестве сегнетоэлектрика для перестраиваемого резонатора на ОАВ обычно используют  $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$  (BSTO), который за счет своей высокой диэлектрической нелинейности обеспечивает управление электромеханическим коэффициентом связи. Однако для обеспечения условий селективного возбуждения собственных акустических мод многослойной структуры с двумя сегнетоэлектрическими пленками высокая диэлектрическая нелинейность не требуется, достаточно существования наведенного пьезоэффекта. Поэтому для подобных структур предпочтительнее использование  $SrTiO_3$  (STO), который имеет более чем на порядок лучшие акустическую и электрическую добротности. Кроме того, технологически проще получение менее дефектных пленок STO нежели BSTO, что в свою очередь также повысит качество резонатора на ОАВ.

Феноменологическая теория сегнетоэлектриков с фазовым переходом второго рода устанавливает следующую взаимосвязь между управляющим полем и искомым пьезоэлектрическим модулем:

$$e = 2G \cdot E_{\pm},$$

где  $E_{\pm}$  – напряженность электрического поля в сегнетоэлектрическом слое, созданная управляющим полем;  $G$  – коэффициент электрострикции сегнетоэлектрика. Т.е. в

зависимости от направления вектора напряженности постоянного электрического поля пьезоэлектрический модуль может менять знак.

Таким образом, способ перестройки частоты акустического резонатора заключается в создании в сегнетоэлектрических слоях пьезомодулей либо одного знака, тогда происходит возбуждение нечетных мод резонатора на соответствующих частотах, либо разных знаков, тогда происходит возбуждение четных мод резонатора с соответствующим изменением частоты. Как уже отмечалось ранее, смена знака пьезомодуля осуществляется путем изменения направления вектора напряженности постоянного электрического поля.

Электрический отклик акустического резонатора с сегнетоэлектрической пленкой на СВЧ сигнал проявляется в виде аномальной зависимости электрического импеданса ( $Z$ ) от частоты в области собственного акустического резонанса (рисунок 2). Для примера, на рисунке 3 представлены результаты моделирования перестройки полосы пропускания трехпольного полосно-пропускающего фильтра на основе рассмотренных сегнетоэлектрических акустических резонаторов.

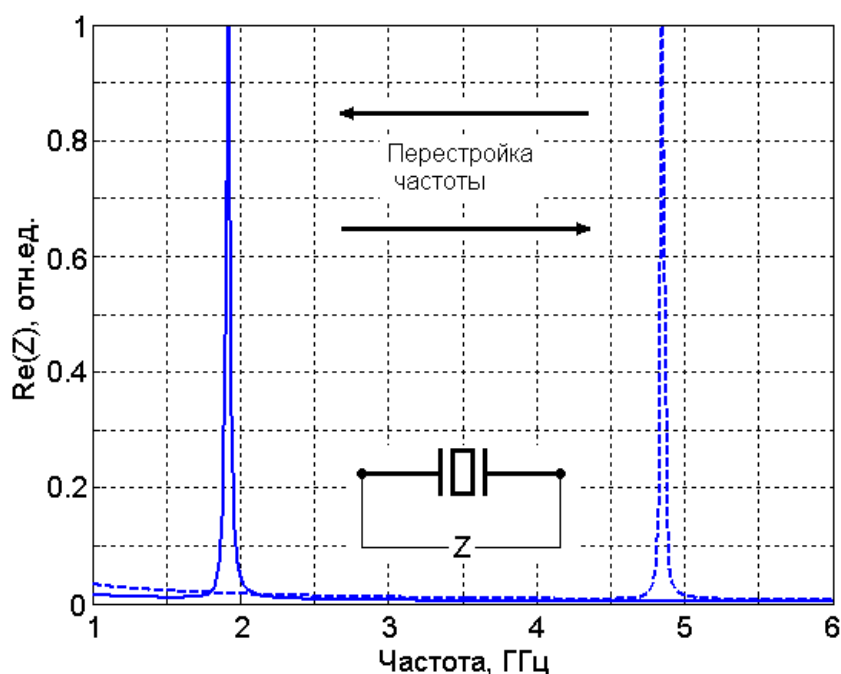


Рис. 2. Частотная зависимость вещественной части электрического импеданса и возможная перестройка частоты для структуры на основе двух слоев титаната стронция

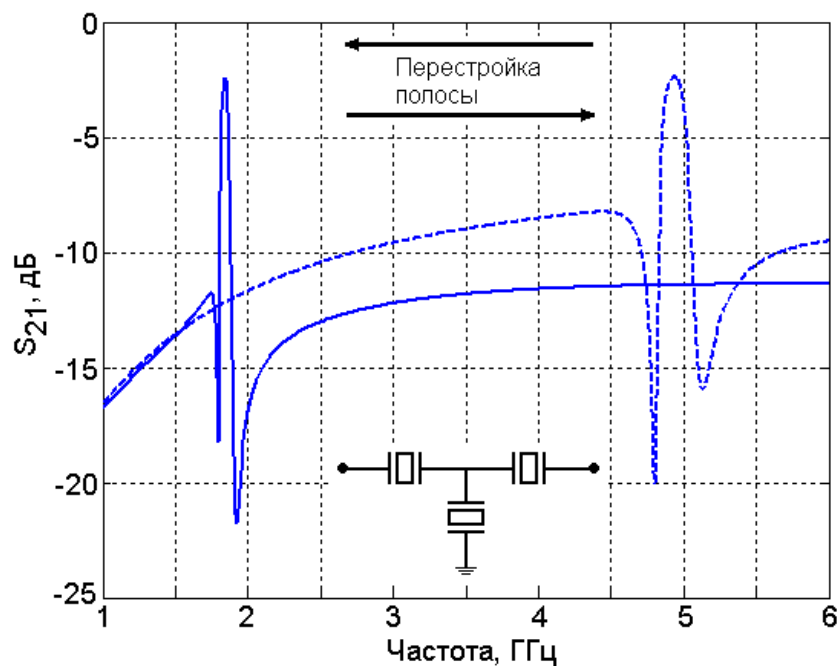


Рис. 3. Перестройка полосы пропускания трехпольного полоснопропускающего фильтра

Работа выполнена при частичной поддержке федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, а также гранта президента РФ МК-89.2012.8.

#### Библиографический список

1. G. Fattinger, R. Aigner, and W. Nessler. Coupled bulk acoustic wave resonator filter: key technology for single-to-balanced RF filters. Proceedings IEEE 2004 MTS Symp. Digest, 2004.
2. M. Ueda, M. Hara, S. Taniguchi et al. Development of an X-Band filter using air-gap-type film bulk acoustic resonators. Japanese J. of Applied Physics. – V. 47, N 5, 2008, pp. 4007–4010.
3. Ken-ya Hashimoto. RF bulk acoustic wave filters for communications. Norwood, MA: Artech House, 2009.
4. R. Aigner et al. Behavior of BAW devices at high power levels. Proceedings of IEEE IMS-MTT-S 2005, Long Beach, CA, 2005.
5. M. Capanu, T. Bernacki, M. Zelner et al. DC-Switchable and tunable piezoelectricity in rf thin-film BST capacitors. Proceedings of the 38th European Microwave Conference. – P.123–126. October 2008.
6. A. Noeth, T. Yamada, A.K. Tagantsev et al. Electrical tuning of dc bias induced acoustic resonances in paraelectric thin films. J. Appl. Phys. – 104, 094102, 2008.
7. A. Volatier, E. Defay, M. Aid et al. Switchable and tunable strontium titanate electrostrictive bulk acoustic wave resonator integrated with a Bragg mirror. Appl. Phys. Lett. – 92, 032906, 2008.
8. A.B. Kozyrev, A.K. Mikhaylov, S.V. Ptashnik, et al. / Electronically switchable bulk acoustic wave resonator based on paraelectric state ferroelectric films // Electronical Letters 2011. V. 47, No 24.