

УДК 534.8  
DOI: 10.23885/2500-0640-2017-3-4-15-22

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ТИТАНАТА БАРИЯ

© 2017 г. А.В. Панькин<sup>1,2</sup>, П.Е. Тимошенко<sup>1,2</sup>, В.Б. Широков<sup>1,2</sup>

**Аннотация.** Предложен один из возможных подходов к анализу эффективности акустоэлектронных устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ) выполненных с использованием тонкопленочных технологий. В качестве материала устройства используется пленка титаната бария  $\text{BaTiO}_3$  на подложке оксида магния  $\text{MgO}$ . Пленка титаната бария исследована в  $c$ -,  $r$ - и  $aa$ -фазе. На сегнетоэлектрическую пленку нанесен встречно-штыревой преобразователь (ВШП), представляющий собой систему из параллельно расположенных электродов (штырей), попеременно соединенных друг с другом через общие шины. Для анализа эффективности использован пакет конечно-элементного моделирования COMSOL MULTIPHYSICS. Для моделирования процессов возбуждения и распространения ПАВ рассмотрена двумерная периодическая модель. На базе данной модели проведен расчет резонанс-антирезонансных частот и коэффициента электромеханической связи (КЭМС) на их основе при различных толщинах пленки и значениях вынужденной деформации. Выявлено существенное влияние толщины пленки и вынужденной деформации вблизи фазовых переходов и в  $r$ -фазе на значения резонансных и антирезонансных частот, а также КЭМС. Была рассмотрена модель реального устройства, состоящая из 40 излучающих и принимающих ВШП. Для данного случая была рассчитана первая гармоника. Выявлена зависимость коэффициентов отражения и пропускания, найдены экстремальные значения  $S$ -параметров от величины вынужденной деформации пленки титаната бария, а также проведено сравнение с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** сегнетоэлектрики, гетероструктуры, конечно-элементное моделирование, коэффициент электромеханической связи, резонанс, антирезонанс.

## SOME FEATURES OF THE BEHAVIOUR OF SURFACE ACOUSTIC WAVES IN THIN FILMS OF BARIUM TITANATE

A.V. Pan'kin<sup>1,2</sup>, P.E. Timoshenko<sup>1,2</sup>, V.B. Shirokov<sup>1,2</sup>

**Abstract.** One of the possible approaches to the analysis of the efficiency of acoustoelectronic devices on surface acoustic waves (SAWs) made using thin-film technologies is proposed. The material of the device is a barium titanate  $\text{BaTiO}_3$  film on a magnesium oxide support  $\text{MgO}$ . A barium titanate film is investigated in the  $c$ -,  $r$ -, and  $aa$ -phases. An interdigital transducer (IDT), which is a system of parallel electrodes (pins) alternately connected to each other via common busbars, is applied to the ferroelectric film. For the analysis of the effectiveness, the package of finite element modeling COMSOL MULTIPHYSICS package is used. To simulate the processes of excitation and propagation of surface acoustic waves, a two-dimensional periodic model is considered. On the basis of this model, resonance-antiresonance frequencies, and electromechanical coupling coefficient based on them, are calculated for different film thicknesses and values of misfit strain. A significant influence of the film thickness and forced deformation near the phase transitions and in the  $r$ -phase on the resonance and antiresonance frequencies, as well as the electromechanical coupling coefficient

<sup>1</sup> Южный научный центр Российской академии наук (Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: panartyom@fastmail.com

<sup>2</sup> Южный федеральный университет (Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1

was revealed. In addition, a model of a real device consisting of 40 emitting and receiving IDT was considered. For this case, the first harmonic was calculated. Dependence of the reflection and transmission coefficients was found, extreme values of the S-parameters from the magnitude of the misfit strain of the barium titanate film were found, and a comparison with the experimental data was made.

**Keywords:** ferroelectrics, heterostructure, finite element method, coupling coefficient, resonance, antiresonance.

## ВВЕДЕНИЕ

Прогресс в получении пленок высокого совершенства [1; 2] обуславливает широкий спектр их применения в различных отраслях науки и техники. На основе тонких сегнетоэлектрических пленок получены высокоэффективные датчики динамической деформации генераторного типа [3; 4], позволившие с новых позиций взглянуть на проблему мониторинга динамического поведения сложных систем [4–6]. Другим перспективным направлением использования тонкопленочных технологий являются СВЧ-устройства и акустоэлектронные радиокомпоненты на поверхностных акустических волнах (ПАВ) для аналоговой обработки сигналов в реальном масштабе времени в широком диапазоне частот от 1 МГц до 15 ГГц. В традиционных элементах, использующих ПАВ, повышение центральной частоты рабочей полосы частот достигается двумя способами – использованием звукопроводящей подложки с более высоким значением скорости звука и уменьшением геометрических размеров (ширины зазора и электрода) излучающего и приемного встречно-штыревого преобразователя (ВШП) [7]. Оба эти способа имеют свои естественные ограничения: фиксированная скорость звука в подложке и значительные технологические трудности получения литографическим методом зазоров шириной менее 0,5 мкм. Альтернативным путем является усовершенствование конструкции акустоэлектронных устройств за счет использования тонких пленок различных пьезоэлектрических материалов [8–12]. Как показывает опыт, свойства акустоэлектронных устройств существенным образом зависят от качества пленки. Использование пленок высокого совершенства позволило наделять акустоэлектронные устройства принципиально новыми возможностями, например повышением рабочих частот или регулируемой чувствительностью [13; 14]. Миниатюризация и применение тонких сегнетоэлектрических пленок, с одной стороны, наличие внешних электрических полей и начальных напряжений, с другой стороны, требуют использования строгих математических методов, позволяющих осуществлять учет всех внешних воз-

действий и возникающих внутренних напряжений, выявлять новые закономерности и создавать принципиально новые типы устройств, основанных на использовании выявленных физических эффектов. Особую роль при разработке конструкции акустоэлектронного устройства могут сыграть свойства тонких пленок за счет наличия внутренних напряжений, возникающих при нанесении пленки на подложку, кристаллические решетки которых имеют разные размеры [15; 16]. При этом свойства пленок могут зависеть от геометрических параметров пленки (толщина) и технологических условий (температура осаждения) [17–25].

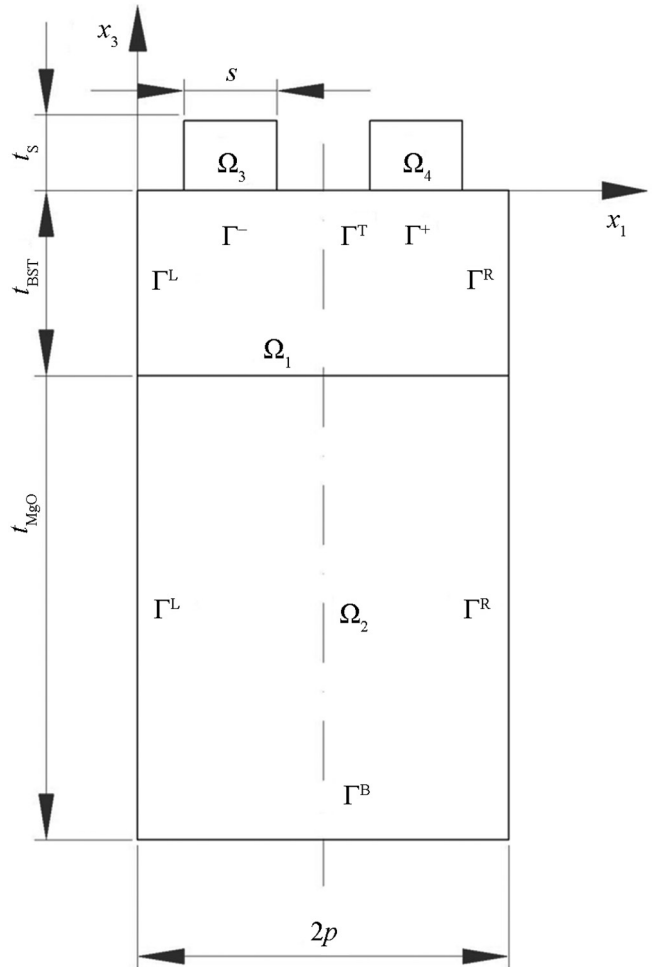


Рис. 1. Расчетная область, содержащая одиночный каскад ВШП.  
Fig. 1. The computational domain contains a single stage IDT.

### НАХОЖДЕНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ И АНТИРЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ

Задача нахождения резонансной и антирезонансной частот при различных значениях вынужденной деформации пленки титаната бария ничем не отличается от задачи нахождения собственных частот, а следовательно, мы можем рассматривать двумерную периодическую задачу.

Модель для решения двумерной задачи представляет из себя пленку титаната бария (ВТ) толщиной  $t_{\text{BT}}$  (область  $\Omega_1$  на рисунке 1) на подложке из оксида магния ( $\Omega_2$ ) толщиной  $t_{\text{MgO}}$ , на которой находится ВШП, состоящий из плоских параллельных алюминиевых электродов  $\Omega_3, \Omega_4$ , расположенных на поверхности пьезоэлектрического материала и попеременно соединенных друг с другом через общие шины. Ширина электродов, составляющих ВШП, равна  $s$ , их период –  $p$ , толщина –  $t_s$ .

Задача рассматривается в декартовых координатах  $x_1, x_3$ . Поверхностные волны распространяются в обоих направлениях вдоль координаты  $x_1$ , а  $x_3$  – направление их затухания. Параметры волн не зависят от координаты  $x_2$ . В общем случае, в силу анизотропии свойств сегнетоэлектрического материала, существуют все три компоненты механических смещений, которые обозначим как  $u_1, u_2, u_3$  (соответственно, в направлении оси  $x_1, x_2, x_3$ ). Также для описания электрического поля введем электрический потенциал  $V$ . Расширенный вектор  $u = (u_1, u_2, u_3, V)^T$  полностью характеризует такую пьезоэлектрическую систему. Используя эти переменные, можно определить все механические и электрические параметры в квазистатическом приближении.

Уравнения пьезоакустики во временной области задаются в тензорном виде [26] (производится суммирование по повторяющимся индексам):

$$\begin{cases} C_{ijkl}^E \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_k} + e_{kij} \frac{\partial^2 V}{\partial x_j \partial x_k} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \\ e_{jkl} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_k} + \varepsilon_{kij}^S \frac{\partial^2 V}{\partial x_j \partial x_k} = 0 \\ T_{ij} = C_{ijkl}^E S_{kl} - e_{kij} E_k \\ D_i = e_{ikl} S_{kl} + \varepsilon_{kij}^S E_k \end{cases} \quad i, j, k, l = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где  $u_i$  – компоненты вектора механического смещения,  $V$  – электрический потенциал,  $C^E$  – тензор модулей упругости,  $e$  – тензор пьезомодулей,  $T_{ij}, S_{ij}$  – тензоры напряжений и деформаций,  $\varepsilon^S$  – тензор

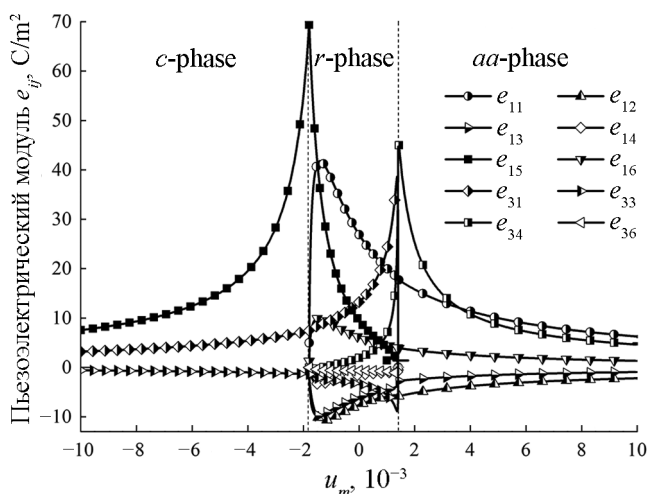


Рис. 2. Пьезоэлектрический модуль.

Fig. 2. Piezoelectric module.

диэлектрической проницаемости,  $\rho$  – плотность среды,  $E$  – вектор электрического поля ( $E_i = -\partial^2 V / \partial x_i$ ),  $D$  – вектор электрического смещения.

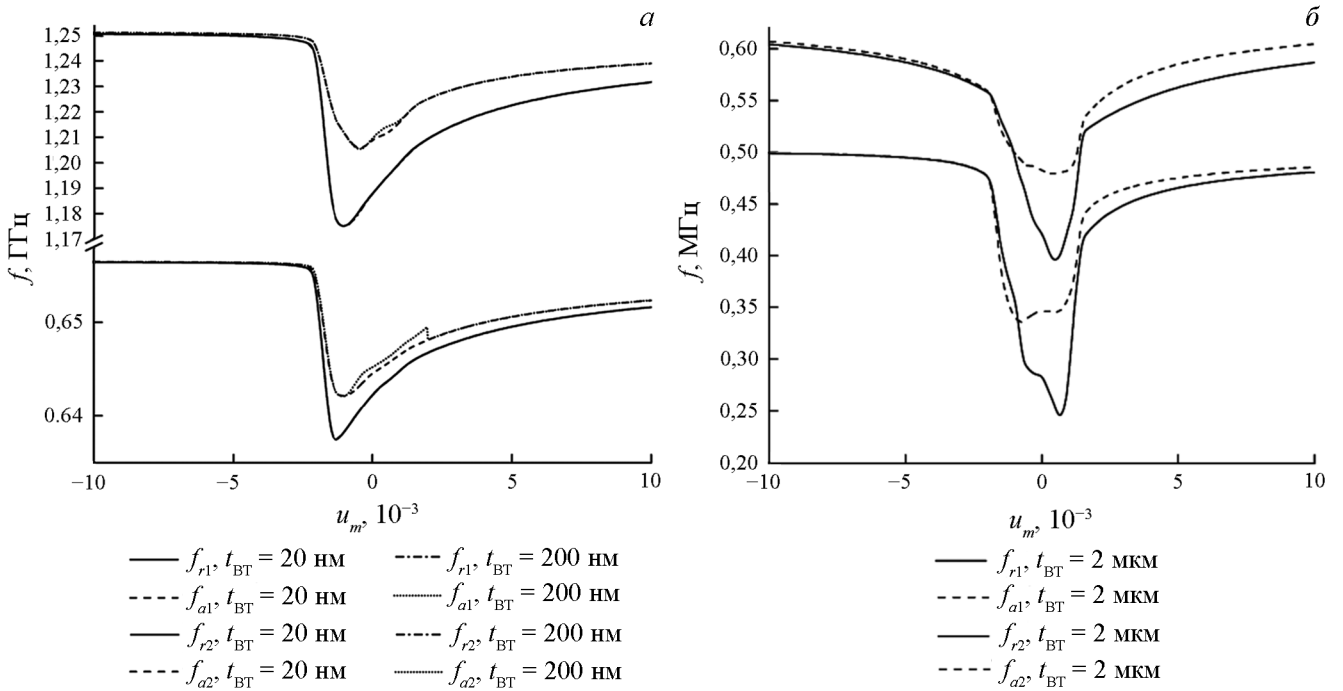
Система дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка (1) может быть трансформирована для решения задачи нахождения собственных частот в COMSOL к следующему виду:

$$ea \cdot \omega^2 \cdot u - \nabla \cdot (c \nabla u) = 0,$$

где  $u = (u_1, u_2, u_3, V)^T$ , а  $ea, c$  – матрицы, зависящие от материальных констант. Такой подход к решению позволяет учесть все три пространственные компоненты вектора механических смещений, а также эффект механической нагрузки электродов. Граничные условия на двух боковых границах задаются периодическим образом. Для нахождения резонансной и антирезонансной частот необходимо зафиксировать волновое число, чтобы можно было варьировать значение вынужденной деформации пленки титаната бария и толщину пленки.

### ЗАВИСИМОСТЬ РЕЗОНАНСНОЙ И АНТИРЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ВЫНУЖДЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТОЛЩИНАХ ПЛЕНКИ ТИТАНАТА БАРИЯ

Свойства сегнетоэлектрических пленок сильно отличаются от свойств объемных образцов. При нанесении пленок на подложку могут возникать большие механические напряжения на границе пленка – подложка. Эти напряжения возникают из-за несоответствия параметров решеток пленки и



**Рис. 3.** Влияние параметра  $u_m$  на значения резонансных и антирезонансных частот ВШП: а – при толщине пленки 20 нм и 200 нм; б – при толщине пленки 2 мкм.

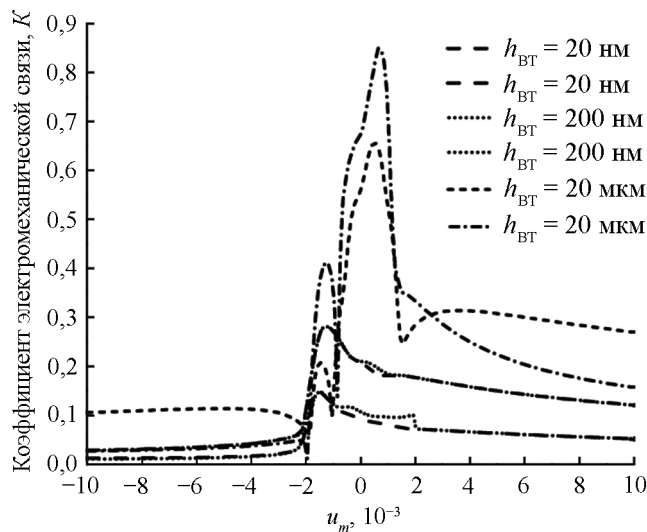
**Fig. 3.** The effect of the parameter  $u_m$  on the resonance and antiresonance frequencies of the IDT: а – at film thickness of 20 nm and 200 nm; б – at film thickness of 2 μm.

подложки, различий тепловых коэффициентов расширения и из-за образования спонтанных деформаций при фазовых переходах [17].

Большие деформации пленок могут приводить к образованию специфической доменной структуры и значительному увеличению спонтанной поляризации. Вынужденная деформация пленки обеспе-

чивает сопряжение ее кристаллической решетки с решеткой подложки. Отклонение от собственной кристаллографической симметрии с изменением периода решетки снижает межфазную энергию границы пленка – подложка, но увеличивает энергию механических напряжений за счет упругой деформации пленки [24; 25]. Несоответствие кристаллических решеток пьезоэлектрического слоя и подложки приводит к изменению диэлектрической проницаемости и пьезоэлектрического коэффициента. Характеристикой, определяющей особенность взаимодействия пленки с подложкой, является параметр несоответствия  $u_m$  [24; 25], который зависит как от рассогласования размеров кристаллических решеток пленки и подложки и различия коэффициентов их теплового расширения, так и от режима осаждения пленки.

На рисунке 2 представлены графики, иллюстрирующие влияние параметра  $u_m$  на пьезоэлектрические константы пленки титаната бария. Как следует из графиков, имеют место три фазы. В *c*- и *aa*-фазе постоянные изменяются слабо, в *r*-фазе изменение постоянных происходит резко. Нетрудно заметить, что изменение материальных констант особенно велико вблизи фазовых переходов.



**Рис. 4.** Влияние параметра  $u_m$  и толщины пленки на значения коэффициента электромеханической связи.

**Fig. 4.** The effect of the  $u_m$  parameter and the film thickness on the electromechanical coupling coefficient.

На рисунках 3а, б представлены графики резонансных частот  $f_r$  и антирезонансных частот  $f_a$  показанной на рисунке 1 структуры. Расчеты проводились для двух первых мод при значении  $u_m = -10^{-2} \dots 10^{-2}$ , а также толщин пленки 20 нм, 200 нм, 2 мкм. Как следует из графика, вблизи фазового перехода ( $u_m = -1,85 \cdot 10^{-3}$  и  $u_m = 1,85 \cdot 10^{-3}$ ) при толщине пленки 20 нм и 200 нм имеет место наибольшее изменение частоты и резкий ее скачок. Также для пленок толщиной 20 нм и 200 нм характерно наложение резонансной и антирезонансной частот (рис. 3а) в *c*- и *aa*-фазе, в *r*-фазе есть небольшое расхождение между ними. При толщине пленки в 2 мкм начиная с *r*-фазы наблюдается резкий разрыв между резонансной и антирезонансной частотами (рис. 3б). Он имеет место и в *aa*-фазе. К тому же пленки толщиной 20 нм и 200 нм имеют более высокую частоту – от 635 до 660 МГц и от 1175 до 1250 МГц, – чем пленка толщиной 2 мкм – от 250 до 500 МГц и от 400 до 602 МГц.

ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ВЫНУЖДЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ

В предыдущем разделе мы нашли зависимость резонансной и антирезонансной частот от вынужденной деформации. На основе этого можно рассчитать коэффициент электромеханической связи (КЭМС) – параметр эффективности преобразования энергии электромагнитной волны в энергию поверхностной акустической волны акустоэлектронного изделия – по следующей формуле:

$$K^2 = \frac{\pi f_r}{2 f_a} \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{2} \frac{f_a - f_r}{f_a} \right),$$

где  $f_r$  – частота резонанса, а  $f_a$  – частота антирезонанса.

Из рисунка 4 следует, что резкое изменение значения КЭМС происходит вблизи фазового перехода из *c*-фазы в *r*-фазу при значении  $u_m = -1,85 \cdot 10^{-3}$ . Второй пик наблюдается при значении  $u_m = 0,75 \cdot 10^{-3}$ , но он появляется только при толщине пленки 2 мкм, что связано с тем, что длина волны сопоставима с толщиной пленки. При переходе из *r*-фазы в *aa*-фазу резкого скачка не наблюдается, за исключением случая 200 нм и 2 мкм.

При значениях вынужденной деформации от  $u_m = -2 \cdot 10^{-3}$  до  $u_m = -10^{-2}$  и от  $u_m = 2 \cdot 10^{-3}$  до  $u_m = 10^{-2}$  КЭМС меняется незначительно.

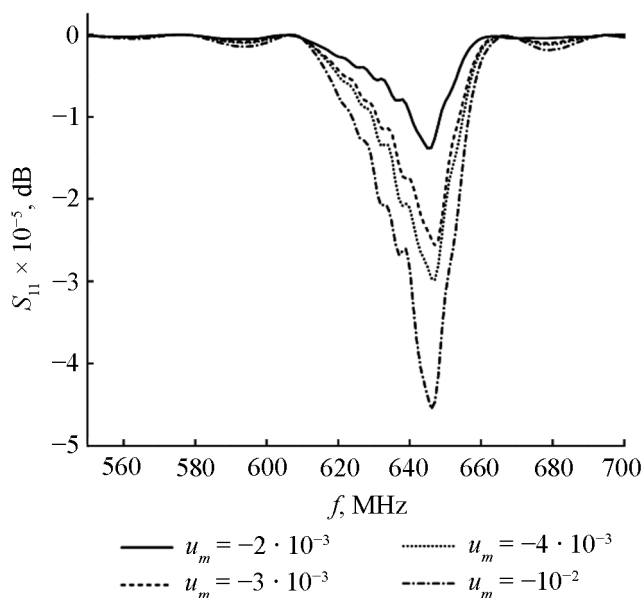


Рис. 5. Влияние параметра  $u_m$  на  $S_{11}$ -параметр.  
Fig. 5. The effect of the  $u_m$  parameter on the  $S_{11}$ -parameter.

РАСЧЕТ S-ПАРАМЕТРОВ В С-ФАЗЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ВЕЛИЧИНЫ ВЫНУЖДЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Для расчета *S*-параметров рассмотрим модель, отличную от той, которую использовали для расчета резонансных и антирезонансных частот. Модель представляет из себя пленку ВТ толщиной 300 нм, расположенную на подложке MgO толщиной 0,25 мкм, на которую нанесены алюминиевые контакты толщиной 100 нм и шириной 2 мкм. Расстояние между контактами 2 мкм. Излучающее и

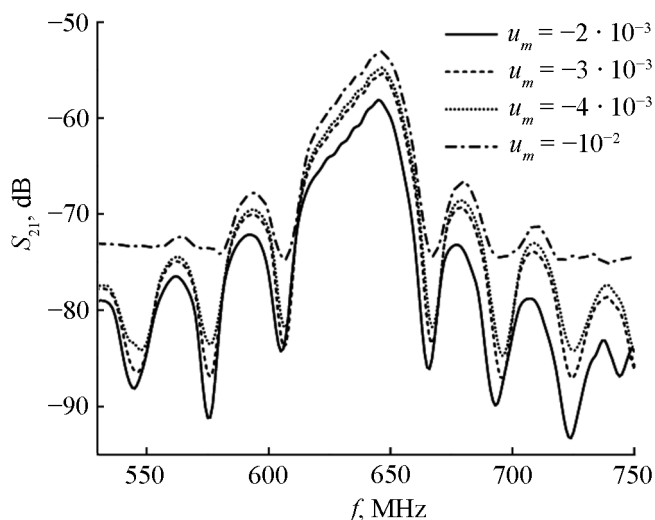


Рис. 6. Влияние параметра  $u_m$  на  $S_{21}$ -параметр.  
Fig. 6. The effect of the  $u_m$  parameter on the  $S_{21}$ -parameter.

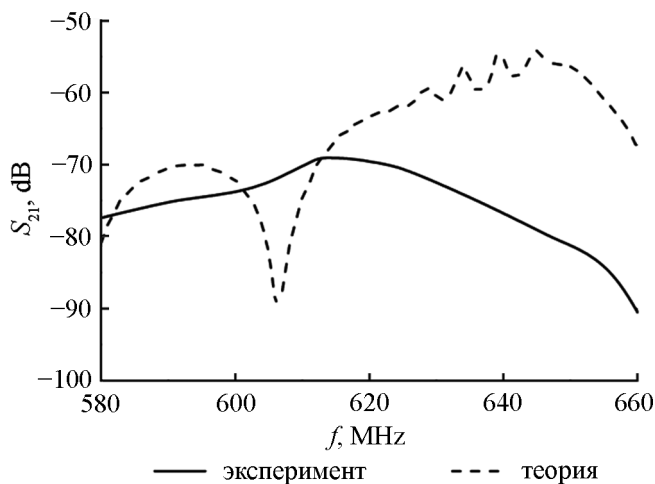


Рис. 7. Сравнение результатов расчета и эксперимента.  
Fig. 7. Comparison of results of calculation and experiment.

поглощающее ВШП насчитывает 40 контактов. Геометрический период ВШП составляет 8 мкм. Расстояние между ВШП равно 1,81 мм. Со всех сторон модель окружает область поглощения толщиной 100 мкм. Общий размер модели – 2,33 мм. На контакты подается напряжение, равное 30 В.

Расчеты проводились для значений  $u_m = -2 \cdot 10^{-3}$ ,  $-3 \cdot 10^{-3}$ ,  $-4 \cdot 10^{-3}$ ,  $10^{-2}$ . Рассматривается первая гармоника – в районе 640 МГц.

На рисунках 5, 6 представлены графики коэффициента отражения ( $S_{11}$ -параметр) и коэффициента пропускания ( $S_{21}$ -параметр). Как следует из графиков, зависимость коэффициентов отражения и пропускания от параметра  $u_m$  носит линейный характер. Этого стоило ожидать, так как расчет проводился в с-фазе и значительных изменений констант нет.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мухортов В.М., Юзюк Ю.И. 2008. *Гетероструктуры на основе наноразмерных сегнетоэлектрических пленок*. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 224 с.
2. Сигов А.С., Мишина Е.Д., Мухортов В.М. 2010. Тонкие сегнетоэлектрические пленки: получение и перспективы интеграции. *Физика твердого тела*. 52(4): 709–717.
3. Бирюков С.В., Мухортов В.М., Мухортов В.М. 2007. Новый датчик динамической деформации на основе тонких пьезоэлектрических пленок, полученных ионно-плазменным напылением. *Мир измерений*. 7: 45–52.
4. Есипов Ю.В., Мухортов В.М. 2009. Интегральные датчики динамической деформации на основе тонких сегнетоэлектрических пленок для мониторинга сложных механических систем. *Журнал технической физики*. 79(1): 82–85.

Из графиков также можно сделать вывод, что экстремальные значения коэффициентов пропускания и отражения достигаются при  $u_m = -10^{-2}$ .

Кроме того, было проведено сравнение результатов теоретического расчета и экспериментальных данных [13]. На рисунке 7 видно, что теория и эксперимент хорошо согласуются, центральные частоты фактически совпадают.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты расчетов двух математических моделей. Первая модель «периодическая» и позволяет рассчитать значения резонансных и антирезонансных частот, на основе которых вычисляется КЭМС. Эта модель позволила определить особенности поведения КЭМС, резонансных и антирезонансных частот в зависимости от толщины пленки и значения параметра  $u_m$ .

Вторая модель представляет собой реальное устройство с реальными параметрами и позволяет узнать, как ведут себя коэффициенты пропускания и отражения при различных значениях  $u_m$ , а также сделать вывод, что наилучшие характеристики можно получить при значении  $u_m = -10^{-2}$ .

Также было проведено сравнение результатов расчетов с результатами эксперимента. Центральные частоты фактически совпадают.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-19-01676).

5. Есипов Ю.В., Мухортов В.М., Калинин В.В. 2008. Испытательная установка для анализа деформации моделей трехмерных конструкций. *Измерительная техника*. 51(10): 39–42.
6. Есипов Ю.В., Мухортов В.М., Калинин В.В., Анджинович И.Е. 2010. О возможности раннего диагноза состояния стержневых конструкций с применением сегнетоэлектрических датчиков динамической деформации. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. 4: 29–35.
7. *Фильтры на поверхностных акустических волнах. Расчет, технология и применение*. 1981. М., Радио и связь: 472 с.
8. Emanetoglu N.W., Gorla C., Liu Y., Liang S., Lu Y. 1999. Epitaxial ZnO piezoelectric thin films for SAW filters. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2(3): 247–252. doi: 10.1016/S1369-8001(99)00022-0
9. Omori T., Hashimoto K., Yamaguchi M. 2001. PZT thin films for SAW and BAW devices. In: *International*

- Symposium on Acoustic Wave Devices for Future Mobile Communication Systems (5th March – 7th March, 2001)*. Chiba, Chiba University: 245–250.
10. Kirby P., Komuro E., Imura M., Zhang Q., Su Q.-X., Whatmore R. 2001. High frequency thin film ferroelectric acoustic resonators and filters. *Integrated Ferroelectrics: An International Journal*. 41(1–4): 91–100. doi: 10.1080/10584580108012811
  11. Salut R., Daniau W., Ballandras S., Gariglio S., Triscone G., Triscone J.M. 2007. P1N-3 Epitaxial Pb(Zr<sub>0.2</sub>Ti<sub>0.8</sub>)O<sub>3</sub> Thin Layers for the Fabrication of Radio-Frequency Elastic Wave Transducers. In: *2007 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings (New York City, NY, USA, 28–31 October 2007)*. Piscataway, Institute of Electrical and Electronics Engineers: 1421–1424. doi: 10.1109/ULTSYM.2007.357
  12. Khassaf H., Khakpash N., Sun F., Sbrockey N.M., Tompa G.S., Kalkur T.S., Alpay S.P. 2014. Strain engineered barium strontium titanate for tunable thin film resonators. *Appl. Phys. Lett.* 104(20): 202902. doi: 10.1063/1.4879281
  13. Мухортов Вл.М., Бирюков С.В., Головки Ю.И., Карапетьян Г.Я., Масычев С.И., Мухортов Вас.М. 2011. Поверхностные акустические волны в тонких пленках титаната бария-стронция на подложках из оксида магния. *Письма в журнал технической физики*. 37(5): 31–37.
  14. Бирюков С.В., Головки Ю.И., Масычев С.И., Мухортов В.М. 2016. Преобразователи поверхностных акустических волн с электрически регулируемой чувствительностью. *Наука Юга России*. 12(1): 11–15.
  15. Най Дж. 1967. *Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц*. М., Мир: 386 с.
  16. *Акустические кристаллы*. 1982. М., Наука: 632 с.
  17. Широков В.Б., Головки Ю.И., Мухортов В.М., Юзюк Ю.И., Janolin P.E., Dkhil V. 2015. Зависимость свойств эпитаксиальных тонких пленок титаната бария-стронция при изменении толщины. *Физика твердого тела*. 57(8): 1503–1508.
  18. Li Y.L., Cross L.E., Chen L.Q. 2005. A phenomenological thermodynamic potential for BaTiO<sub>3</sub> single crystals. *J. Appl. Phys.* 98(6): 064101. doi: 10.1063/1.2042528
  19. Pertsev N.A., Zembilgotov A.G., Tagantsev A.K. 1998. Effect of Mechanical Boundary Conditions on Phase Diagrams of Epitaxial Ferroelectric Thin Films. *Phys. Rev. Lett.* 80(9): 1988–1991. doi: 10.1103/PhysRevLett.80.1988
  20. Berlincourt D., Jaffe H. 1958. Elastic and Piezoelectric Coefficients of Single-Crystal Barium Titanate. *Phys. Rev.* 111(1): 143–148. doi: 10.1103/PhysRev.111.143
  21. Широков В.Б., Юзюк Ю.И., Калинин В.В., Леманов В.В. 2013. Материальные константы твердых растворов (Ba,Sr)TiO<sub>3</sub>. *Физика твердого тела*. 55(4): 709–714.
  22. Широков В.Б., Калинин В.В., Юзюк Ю.И., Леманов В.В., Белянкова Т.И. 2010. К построению феноменологической теории тонких сегнетоэлектрических пленок. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. 4: 68–74.
  23. Широков В.Б., Юзюк Ю.И., Dkhil V., Леманов В.В. 2008. Феноменологическое описание фазовых переходов в тонких пленках BaTiO<sub>3</sub>. *Физика твердого тела*. 50(4): 889–896.
  24. Широков В.Б., Калинин В.В., Шаховой Р.А., Юзюк Ю.И. 2015. Материальные константы тонких пленок титаната бария. *Физика твердого тела*. 57(8): 1509–1514.
  25. Широков В.Б., Калинин В.В., Шаховой Р.А., Юзюк Ю.И. 2015. К проблеме определения упругих констант. *Доклады Академии наук*. 463(6): 655–660. doi: 10.7868/80869565215240093
  26. *Физическая акустика. Том 1. Методы и приборы ультразвуковых исследований. Часть А*. 1966. М., Мир: 592 с.

## REFERENCES

1. Mukhortov V.M., Yuzyuk Yu.I. 2008. *Geterostruktury na osnove nanorazmernykh segnetoelektricheskikh plenok*. [Heterostructures based on nanoscale ferroelectric films]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 224 p. (In Russian).
2. Sigov A.S., Mishina E.D., Mukhortov V.M. 2010. Thin ferroelectric films: preparation and prospects of integration. *Physics of the Solid State*. 52(4): 762–770. doi: 10.1134/S1063783410040153
3. Biryukov S.V., Mukhortov V.M., Mukhortov V.M. 2007. [A new sensor for dynamic strain based on thin piezoelectric films obtained with ion plasma deposition]. *Mir izmereniy*. 7: 45–52. (In Russian).
4. Esipov Y.V., Mukhortov V.M. 2009. Thin-film ferroelectric integral sensors of dynamic deformation for monitoring sophisticated mechanical systems. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*. 54(1): 78–81. doi: 10.1134/S1063784209010113
5. Esipov Yu.V., Mukhortov V.M., Kalinchuk V.V. 2008. Test equipment for analyzing the deformation of models of three-dimensional structures. *Measurement Techniques*. 51(10): 1104–1109. doi: 10.1007/s11018-009-9169-7
6. Esipov Y.V., Mukhortov V.M., Kalinchuk V.V., Andjiovich I.E.. 2010. [Early diagnosis technology of rod constructions diagnosis with use of deformation ferroelectric sensors]. *Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation*. 4: 29–35. (In Russian).
7. *Surface Wave Filters. Design, Construction, and Use*. 1977. New York, John Wiley & Sons: 521 p.
8. Emanetoglu N.W., Gorla C., Liu Y., Liang S., Lu Y. 1999. Epitaxial ZnO piezoelectric thin films for SAW filters. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2(3): 247–252. doi: 10.1016/S1369-8001(99)00022-0

9. Omori T., Hashimoto K., Yamaguchi M. 2001. PZT thin films for SAW and BAW devices. In: *International Symposium on Acoustic Wave Devices for Future Mobile Communication Systems (5<sup>th</sup> March – 7<sup>th</sup> March, 2001)*. Chiba, Chiba University: 245–250.
10. Kirby P., Komuro E., Imura M., Zhang Q., Su Q.-X., Whatmore R. 2001. High frequency thin film ferroelectric acoustic resonators and filters. *Integrated Ferroelectrics: An International Journal*. 41(1–4): 91–100. doi: 10.1080/10584580108012811
11. Salut R., Daniau W., Ballandras S., Gariglio S., Triscone G., Triscone J.M. 2007. P1H-3 Epitaxial  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8})\text{O}_3$  Thin Layers for the Fabrication of Radio-Frequency Elastic Wave Transducers. In: *2007 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings (New York City, NY, USA, 28–31 October 2007)*. Piscataway, Institute of Electrical and Electronics Engineers: 1421–1424. doi: 10.1109/ULTSYM.2007.357
12. Khassaf H., Khakpash N., Sun F., Sbrockey N.M., Tompa G.S., Kalkur T.S., Alpay S.P. 2014. Strain engineered barium strontium titanate for tunable thin film resonators. *Appl. Phys. Lett.* 104(20): 202902. doi: 10.1063/1.4879281
13. Mukhortov V.I., Biryukov S.V., Golovko Yu.I., Karapet'yan G.Ya., Masychev S.I., Mukhortov V.M. 2011. Surface acoustic waves in thin films of barium strontium titanate on magnesium oxide substrates. *Technical Physics Letters*. 37(5): 207–213. doi: 10.1134/S1063785011030084
14. Biryukov S.V., Golovko Yu.I., Masychev S.I., Mukhortov V.M. 2016. [Surface acoustic wave converters with electrically adjustable sensitivity]. *Nauka Yuga Rossii*. 12(1): 11–15. (In Russian).
15. Nye J.F. 1954. *Physical properties of crystals. Their representation by tensors and matrices*. Oxford, Clarendon press: 329 p.
16. *Akusticheskie kristally. [Acoustic crystals]*. 1982. Moscow, Nauka: 632 p. (In Russian).
17. Shirokov V.B., Golovko Yu.I., Mukhortov V.M., Yuzyuk Yu.I., Janolin P.E., Dkhil B. 2015. Thickness dependence of the properties of epitaxial barium strontium titanate thin films. *Physics of the Solid State*. 57(8): 1529–1534. doi: 10.1134/S1063783415080314
18. Li Y.L., Cross L.E., Chen L.Q. 2005. Phenomenological thermodynamic potential for  $\text{BaTiO}_3$  single crystals. *J. Appl. Phys.* 98(6): 064101. doi: 10.1063/1.2042528
19. Pertsev N.A., Zembilgotov A.G., Tagantsev A.K. 1998. Effect of Mechanical Boundary Conditions on Phase Diagrams of Epitaxial Ferroelectric Thin Films. *Phys. Rev. Lett.* 80(9): 1988–1991. doi: 10.1103/PhysRevLett.80.1988
20. Berlincourt D., Jaffe H. 1958. Elastic and Piezoelectric Coefficients of Single-Crystal Barium Titanate. *Phys. Rev.* 111(1): 143–148. doi: 10.1103/PhysRev.111.143
21. Shirokov V.B., Yuzyuk Yu.I., Kalinchuk V.V., Lemanov V.V. 2013. Material constants of  $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$  solid solutions. *Physics of the Solid State*. 55(4): 773–779. doi: 10.1134/S1063783413040276
22. Shirokov V.B., Kalinchuk V.V., Yuzyuk Yu.I., Lemanov V.V., Belyankova T.I. 2010. [Formulation of the phenomenological theory of thin ferroelectric films]. *Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation*. 4: 68–74. (In Russian).
23. Shirokov V.B., Yuzyuk Yu.I., Dkhil B., Lemanov V.V. 2008. Phenomenological description of phase transitions in thin  $\text{BaTiO}_3$  films. *Physics of the Solid State*. 2008. 50(45): 928–936. doi: 10.1134/S106378340
24. Shirokov V.B., Kalinchuk V.V., Shakhovoi R.A., Yuzyuk Yu.I. 2015. Material constants of barium titanate thin films. *Physics of the Solid State*. 57(8): 1535–1540. doi: 10.1134/S1063783415080302
25. Shirokov V.B., Kalinchuk V.V., Shakhovoy R.A., Yuzyuk Yu.I. 2015. The problem of determining elastic constants of thin ferroelectric films. *Doklady Physics*. 60 (8): 349–354. doi: 10.1134/S1028335815080108
26. *Physical acoustics. Principles and methods. Vol. 1. Methods and devices. Part A*. 1964. New York, London, Academic Press: 515 p.

Поступила 30.08.2017