

Ф И З И К А

УДК 538.9, 534.16

DOI: 10.31429/vestnik-17-4-48-56

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПАВ-ФИЛЬТРОВ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК ТИТАНАТА БАРИЯ СТРОНЦИЯ

Тимошенко П. Е., Широков В. Б., Калинин В. В.

FINITE-ELEMENT MODELING OF SAW-FILTERS BASED ON THIN FILMS
OF BARIUM STRONTIUM TITANATE

P. E. Timoshenko¹, V. B. Shirokov^{1,2}, V. V. Kalinchuk²

¹ Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344006, Russia

² Southern Scientific Centre of RAS, Rostov-on-Don, 344002, Russia

e-mail: petimoshenko@sfnu.ru

Abstract. Finite element modeling in COMSOL Multiphysics™ is carried out and the properties of surface acoustic waves frequency filters based on thin films are studied. The substrate is magnesium oxide MgO. A thin film of barium strontium titanate $Ba_xTi_{1-x}O_3$ (BST) is applied to the substrate. Two aluminum interdigital transducers are placed on the film. The nonlinear properties of the film lead to a change in the material constants of the linear equations of the piezoelectric effect. Therefore, the behavior of the material constants of BST single crystal thin films, depending on the magnitude of the forced deformation, is described on the basis of the Landau potential of the phenomenological theory. In this manuscript, the numerical results in the room temperature for barium titanate films in *c*-, *r*-, and *aa*-phases and BST80 in *c*-, and *aa*-phases are presented. Dependence of the reflection and transmission coefficients of the scattering matrix on the misfit strain of the film are determined. The material constants of the film under the misfit strain have extreme values at the phase boundaries and within the *r*-phase some elastic and electroelastic constants reach a maximum. The abnormal effect of the film on the characteristics of SAW-filters is obtained in these regions.

Keywords: surface acoustic waves, filters, ferroelectrics, material constants, finite-element modeling

Введение

Прогресс в получении высококачественных тонких сегнетоэлектрических пленок [1] обуславливает широкий спектр их применения в различных отраслях науки и техники. На основе тонких сегнетоэлектрических пленок получены высокоэффективные датчики динамической деформации генераторного типа [2], позволившие с новых позиций взглянуть на проблему мониторинга динамического поведения сложных систем [3]. 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) [4]. Оба эти способа имеют свои естественные ограничения: фиксированная скорость звука в подложке и значительные технологические трудности полу-

Тимошенко Павел Евгеньевич, канд. физ.-мат. наук, доцент физического факультета Южного федерального университета; e-mail: petimoshenko@sfnu.ru.

Широков Владимир Борисович, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Южного научного центра РАН, профессор физического факультета Южного федерального университета; e-mail: shirokov-vb@rambler.ru.

Калинчук Валерий Владимирович, д-р физ.-мат. наук, чл.-кор. РАН, главный научный сотрудник, заведующий отделом Южного научного центра РАН; e-mail: kalin@ssc-ras.ru.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (19-08-01051, 19-01-00719).

чения литографическим методом зазоров шириной менее 0,5 мкм.

Альтернативным путем является усовершенствование конструкции акустоэлектронных устройств за счет использования тонких пленок различных пьезоэлектрических материалов [5]. 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 [6]. 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 [7]. При этом свойства пленок [8] могут зависеть от геометрических параметров пленки (толщина) и технологических условий (температура осаждения).

Одним из ключевых моментов проектирования тонкопленочных устройств является подбор материалов, обладающих необходимыми свойствами. Материальные постоянные многих сегнетоэлектриков определены из экспериментов на объемных образцах. В тонких пленках из-за разной величины теплового расширения пленки и подложки возникают большие деформации. Для нелинейных материалов, какими являются сегнетоэлектрики, большие деформации приводят к значительному изменению свойств вплоть до появления новых фазовых состояний. Моделирование электромеханических свойств сегнетоэлектрических тонких пленок на основе нелинейных термодинамических моделей [8–10, 12] позволяет исследовать изменения материальных постоянных.

Оптимизация рабочих параметров тонких пленок в большинстве случаев основана на численных расчетах в рамках линейных уравнениях пьезоэффекта [4, 7]. Уравнения пьезоэффекта описывают линейную связь между переменными состоянием и внешними параметрами. Фиксирование внешних параметров определяет состояние, вблизи которого можно переписать уравнения пьезоэффекта. Материальные постоянные, в силу линейности уравнений, при этом не изменяются. Для нелинейной системы переходят к линеаризованным уравнениям. Количественно линейные

уравнения будут иметь ограниченную область описания по величине внешнего воздействия, определяемую степенью нелинейности системы.

Миниатюризация и применение тонких сегнетоэлектрических пленок с одной стороны, наличие внешних электрических полей и начальных напряжений с другой стороны требуют использования математических методов, позволяющих осуществлять строгий учет всех внешних воздействий и возникающих внутренних напряжений, выявлять новые закономерности и создавать принципиально новые типы устройств, основанных на использовании выявленных физических эффектов. Этим вызвана актуальность численного моделирования устройств на поверхностных акустических волнах, осуществляющих аналоговую обработку информации.

В настоящей работе представлено решение задач возбуждения, распространения и приема поверхностной акустической волны в тонкой пьезоэлектрической пленке титаната бария стронция BST80 ($\text{Ba}_{0.8}\text{Ti}_{0.2}\text{O}_3$) в c - и aa -фазе и титаната бария (BT) в c -, r - и aa -фазе на подложке из оксида магния посредством двух алюминиевых ВШП, выполняющих преобразование электромагнитных волн в поверхностные акустические волны и обратно. Задача сводится к решению обобщенной системы дифференциальных уравнений [11], где в качестве независимых переменных выбираются три компонента вектора механического смещения и электрический потенциал. Численные расчеты проводились в пакете конечноэлементного моделирования COMSOL Multiphysics™. В работе приведены результаты расчета параметров матрицы рассеяния S_{11} и S_{12} фильтров на ПАВ при комнатной температуре для пленок, имеющих различную величину вынужденной деформации, которая вследствие несоответствия кристаллических решеток пьезоэлектрического слоя и подложки приводит к изменению материальных постоянных. В зависимости от величины вынужденной деформации происходит изменение материальных констант. Оно особенно велико вблизи фазовых переходов, где вынужденная деформация пленки близка к критическому значению. Внутри r -фазы некоторые упругие и электроупругие постоянные достигают экстремума. В этих областях было выявлено существенное влияние пленки на характеристики фильтров на ПАВ.

1. Определение материальных постоянных пленок титаната бария стронция

Нанесенная на кубическую подложку (001) среза оксида магния сегнетоэлектрическая пленка испытывает деформацию (u_m , misfit strain), одинаковую вдоль x и y направлений, лежащих в плоскости пленки. Эта деформация определяется температурной деформацией подложки. Обратным действием, пленки на подложку, считая пленку достаточно тонкой, пренебрегаем. Термодинамический потенциал сегнетоэлектрической пленки получается из потенциала для объемного образца после решения граничных условий для упругой задачи [8].

Описание нелинейных свойств сегнетоэлектриков основано на термодинамическом потенциале феноменологической теории фазовых переходов

$$\begin{aligned} \Phi = & G - Q_{11} (t_1 p_1^2 + t_2 p_2^2 + t_3 p_3^2) - \\ & - Q_{44} (t_4 p_2 p_3 + t_5 p_1 p_3 + t_6 p_1 p_2) - \\ & - Q_{12} [t_1 (p_2^2 + p_3^2) + t_2 (p_1^2 + p_3^2) + \\ & + t_3 (p_1^2 + p_2^2)] - \\ & - \frac{1}{2} s_{11} (t_1^2 + t_2^2 + t_3^2) - \frac{1}{2} s_{44} (t_4^2 + t_5^2 + t_6^2) - \\ & - s_{12} (t_1 t_2 + t_1 t_3 + t_2 t_3), \end{aligned} \quad (1.1)$$

где $G = G(p_1, p_2, p_3)$ — потенциал Ландау, p_i — компоненты вектора поляризации, t_k — тензоры напряжений в обозначениях Фойгта, Q_{ij} — электроупругие коэффициенты, s_{ij} — коэффициенты податливости.

Все возможные равновесные (основные) состояния можно получить решением уравнений состояния для потенциала (1.1):

$$\begin{cases} E_i = \frac{\partial \Phi}{\partial p_i}, \\ u_k = -\frac{\partial \Phi}{\partial t_k}, \end{cases} \quad (1.2)$$

где E_i — напряженность электрического поля, u_k — механическая деформация.

Для объемного материала при отсутствии внешних сил задача сводится к решению первого уравнения (1.2). Второе уравнение в этом случае является определением спонтанных деформаций. Материальные постоянные

находятся линеаризацией уравнений состояния (1.2) при фиксированных внешних условиях.

В случае тонких пленок задача решается в два этапа. Сначала решается механическая задача при условиях зажатия для пленки на (001) срезе кубической подложки: $u_1 = u_m$, $u_2 = u_m$, $t_3 = 0$, $t_4 = 0$, $t_5 = 0$. Далее исследуются возможные основные состояния — строится фазовая диаграмма «вынужденная деформация (u_m) — температура (T)» [8, 10, 12].

Вычисление материальных постоянных выполняется вблизи основного состояния пленки, которое зависит от величины вынужденной деформации u_m . Для пленок титаната бария при комнатной температуре, как это следует из фазовой диаграммы [9], имеется три разные фазы — три различные основные состояния: c -фаза при $u_m < -1,8 \cdot 10^{-3}$, r -фаза при $-1,8 \cdot 10^{-3} < u_m < 1,45 \cdot 10^{-3}$ и aa -фаза при $u_m > 1,45 \cdot 10^{-3}$. Пленки BST80 при комнатной температуре имеют два основных состояния [12]: c -фаза при $u_m < 2,5 \cdot 10^{-4}$ и aa -фаза при $u_m > 2,5 \cdot 10^{-4}$.

2. Конечно-элементная модель фильтра на ПАВ

На рис. 1 представлена модель для решения двумерной задачи, состоящая из пленки титаната бария стронция (области Ω_f , Ω_{fa}) толщиной $h_f = 300$ нм. на подложке из оксида магния (Ω_s , Ω_{sa}) толщиной $h_s = 60$ мкм, плотностью $\rho = 3649$ кг/м³ и диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 9,8$. На поверхности пьезоэлектрической пленки находится два ВШП, состоящие из плоских 40 пар параллельных алюминиевых электродов (области Ω_d) и попеременно соединенные друг с другом через общие шины. Ширина электродов, составляющих ВШП, равна $L_d = 2$ мкм, расстояние между электродами — $L_b = 2$ мкм, толщина — $h_d = 180$ нм, плотность — $\rho = 2700$ кг/м³, модуль Юнга — $E = 7 \cdot 10^{10}$ Па, коэффициент Пуассона — $\nu = 0,33$. Расстояние между ВШП равно $L_g = 1,81$ мм. Края пленки и подложки толщиной $a = 20$ мкм содержат области «идеально согласованных слоев» (Perfectly matched layer, PML) (Ω_{fa} , Ω_{sa}) с граничными условиями рассеяния для моделирования поглощения электромеханических волн на краях гетероструктуры.

Задача рассматривается в декартовых координатах x_1 , x_3 . Поверхностные волны рас-

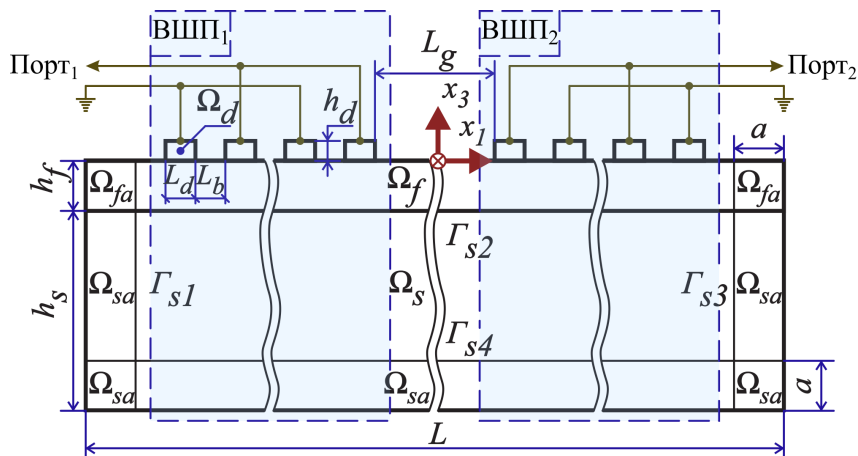


Рис. 1. Расчетная область фильтра на ПАВ, состоящая из 2 ВШП, расположенных на сегнетоэлектрической пленке, нанесенной на диэлектрическую подложку

пространяются 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). Электрическое поле описывается через электрический потенциал ϕ . Используя эти переменные можно определить все механические и электрические параметры в квазистатическом приближении.

В COMSOL Multiphysics™ задачу расчета частотных характеристик фильтров на ПАВ можно решать двумя способами: явно описывая дифференциальные уравнения или с помощью модуля «Piezoelectricity». В настоящей работе представим второй способ решения.

В ходе моделирования все вышеперечисленные геометрические параметры, включая деформацию u_m , были внесены в таблицу глобальных параметров, а параметры материалов определены в глобальной библиотеке материалов проекта. Для удобства моделирования была создана параметризованная геометрическая часть ВШП, два экземпляра которой были подключены к геометрии модели. Каждому геометрическому элементу было установлено название и опция «Resulting objects selection» для связи именованных объектов с материалами и применения в физике.

При добавлении модуля «Piezoelectricity» в компоненте модели будут определены два узла физики — механика «Solid Mechanics

(solid)» и электростатика «Electrostatics (es)», а также связующий узел «Piezoelectric Effect (pze)», описывающий уравнения связи механики и электростатики.

В модуле «Solid Mechanics» дополнительно определяются узлы «Piezoelectric material» для области пленки и «Linear elastic material» для подложки и электродов с системой координат «Material XZ-plane System». По нижнему краю подложки и боковым краям ее и пленки устанавливаются граничные условия «Low-Reflecting Boundary».

В модуле «Electrostatics» дополнительно определяются узлы «Charge conservation, Piezoelectric» для области пленки. Для заземленных электродов устанавливается граничное условие «Ground». Граничное условие для электродов, входящих в состав портов ВШП, выбирается порт «Terminal». В проекте будет по одному порту для каждого ВШП, с названиями 1 и 2, соответственно. Тип порта — «Terminated». Для расчета параметров матрицы рассеяния необходимо в список глобальных параметров добавить «PortName=1», а в настройки модуля электростатики установить «Use manual terminal sweep» и задать параметр «Sweep parameter name» равным «PortName».

В качестве исследования («Study») выбирается «Frequency Domain» и устанавливаются следующие параметры: «Frequency unit» = «MHz», «Frequencies» = «range(100,1,200)» (начальная частота, шаг, конечная частота), «Include geometric nonlinearity», «Auxiliary sweep» «PortName» = «1,2». Для ускорения

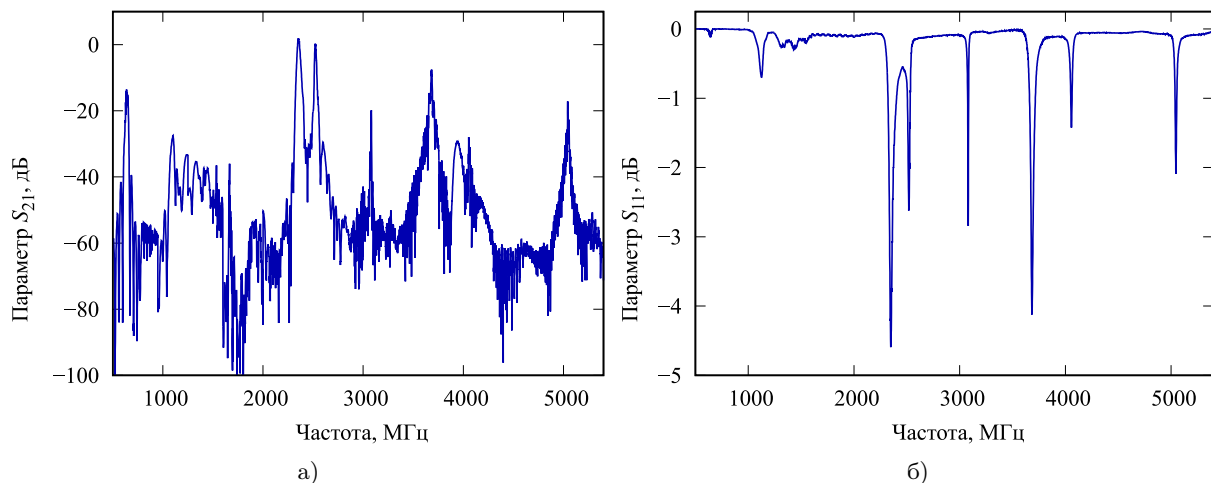


Рис. 2. Коэффициенты прохождения S_{21} (а) и отражения S_{11} (б) матрицы рассеяния фильтра на ПАВ для пленки титаната бария при $u_m = -4 \cdot 10^{-3}$

расчетов рекомендуется выбрать прямой решатель «PARDISO».

3. Результаты расчета частотных характеристик фильтров на ПАВ

Анализ коэффициентов отражения S_{11} и пропускания S_{21} матрицы рассеяния фильтра ПАВ при изменении величины вынужденной деформации u_m был проведен в пакете COMSOL Multiphysics™. Геометрия 2D модели приведена на рис. 1. Модель представляет собой пленку ВТ или BST80 толщиной $h_f = 300$ нм, расположенную на монокристаллической подложке оксида магния толщиной $h_s = 60$ мкм. Более подробная информация о геометрических параметрах, методах моделирования и материальных константах пленки представлена в предыдущих разделах.

Данная модель приближена к реальному устройству фильтра на ПАВ. С ее помощью были определены частотные характеристики матрицы рассеяния, выполненные на основе тонких пленок титаната бария стронция, и обсуждены особенности их поведения, в зависимости от вынужденной деформации кристаллической решетки пленки.

На рис. 2 представлены частотные зависимости коэффициентов прохождения S_{21} и отражения S_{11} матрицы рассеяния фильтра на ПАВ для пленки титаната бария, имеющей вынужденную деформацию $u_m = -4 \cdot 10^{-3}$. Расчеты были выполнены в диапазоне частот 500 МГц – 5,5 ГГц. На графиках видно, что полосовые фильтры могут быть созда-

ны на частотах: 640 МГц, 1,1 ГГц, 1,67 ГГц, 2,35 ГГц, 3,08 ГГц, 3,7 ГГц, 4,05 ГГц, 5,05 ГГц.

На рис. 3 представлены частотные зависимости коэффициентов прохождения S_{21} матрицы рассеяния фильтра на ПАВ для пленки титаната бария в c - и aa -фазе для различных частотных диапазонов, включающих резонансные частоты, и значений вынужденной деформации u_m . В области низких частот мощность акустических волн сосредоточена преимущественно в подложке. Поэтому рис. 3а и 3б демонстрируют незначительные изменения частотных характеристик при различных значениях вынужденной деформации. Нелинейные эффекты пленки начинают проявляться в области более высоких частот. Для пленки в c -фазе уменьшением величины вынужденной деформации в области первой резонансной частоты меняется преимущественно уровень затухания, незначительно сужается полоса частот, а центральная частота смещается в низкочастотную область. Более значительные изменения можно наблюдать для случая, когда пленка будет в aa -фазе (рис. 3е и 3д). С увеличением вынужденной деформации увеличивается уровень затухания, центральная частота смещается в высокочастотную область. Необходимо отметить интересный факт, что для области частот второго резонанса при изменении величины вынужденной деформации для пленки в c - (рис. 3в) и aa -фазе (рис. 3г) центральная частота, амплитуда затухания и ширина полосы изменяются незначительно.

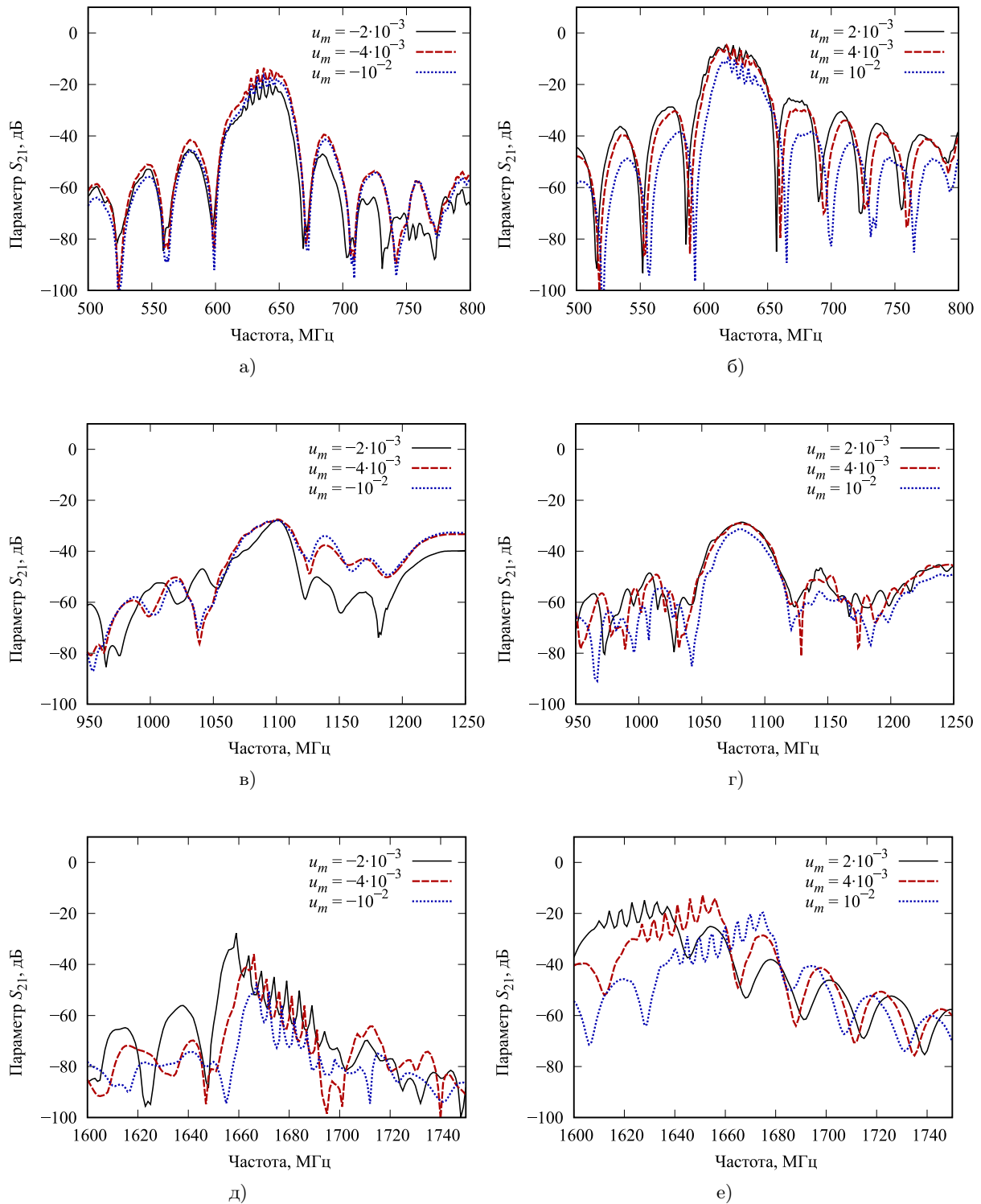


Рис. 3. Коэффициенты прохождения S_{21} матрицы рассеяния фильтра на ПАВ для пленки титаната бария в c - (а, в, д) и aa -фазе (б, г, е) для различных резонансных частот и значений вынужденной деформации u_m

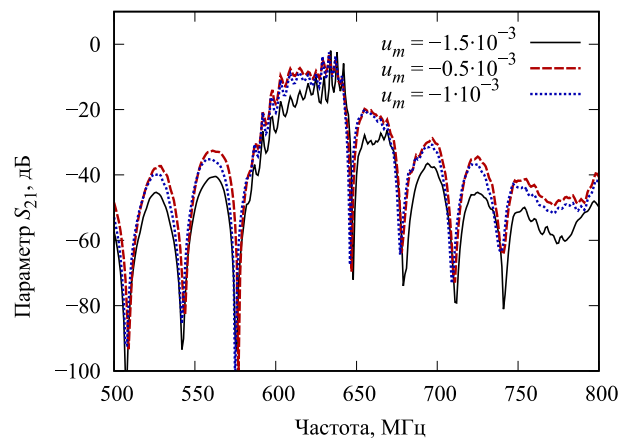


Рис. 4. Коэффициенты прохождения S_{21} матрицы рассеяния фильтра на ПАВ для пленки титаната бария в r -фазе при различных значениях вынужденной деформации u_m

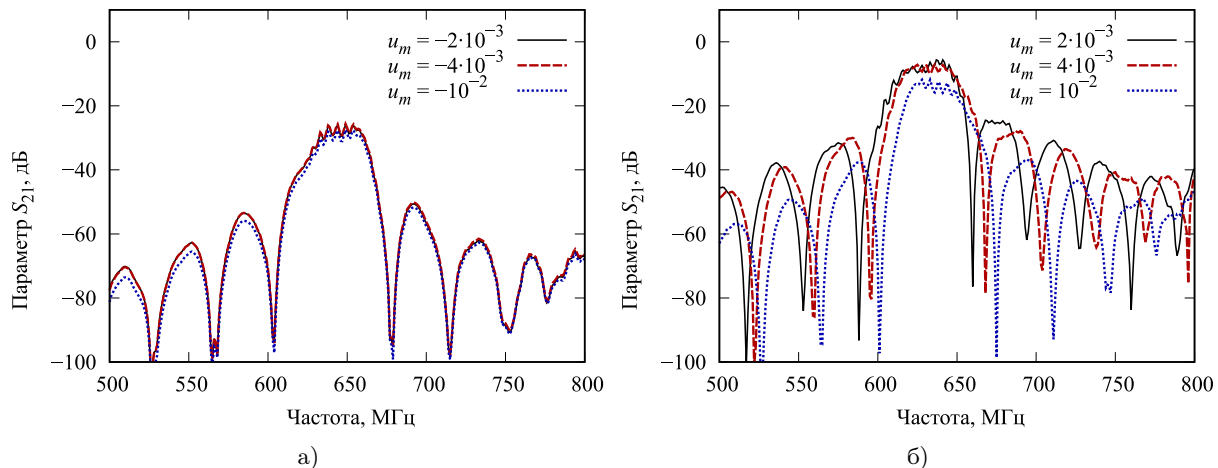


Рис. 5. Коэффициенты прохождения S_{21} матрицы рассеяния фильтра на ПАВ для пленки титаната бария стронция BST80 в c - (а) и aa -фазе (б) при различных значениях вынужденной деформации u_m

Очень интересно поведение характеристик фильтров на ПАВ для пленки титаната бария в области r -фазы (рис. 4). Внутри r -фазы фактически все компоненты тензоров материальных постоянных ненулевые. Некоторые упругие и электроупругие постоянные достигают экстремума. В рассматриваемом случае вынужденная деформация не влияет на центральную частоту и полосу частот для первого резонанса. Изменяется сложным образом только уровень затухания в пределах, показанных на рис. 4.

В случае применения пленок BST80 исчезает r -фаза. Если пленка находится в c -фазе (рис. 5а), влияние вынужденной деформации минимально в области первой резонансной частоты. В случае aa -фазы (рис. 5б), центральные частоты смещаются в высокочастотную

область. Связанное с интерференцией ПАВ от электродов искажение полосы частот имеет значительно меньшую амплитуду.

Заключение

Представлено решение задач возбуждения, распространения и приема ПАВ в тонкой пьезоэлектрической пленке титаната бария стронция BST80 в c - и aa -фазе и титаната бария в c -, r - и aa -фазе на подложке из оксида магния посредством двух алюминиевых ВШП. В работе приведены результаты расчета коэффициентов отражения S_{11} и пропускания S_{12} матрицы рассеяния фильтров на ПАВ при комнатной температуре для пленок, имеющих различную величину вынужденной деформации u_m . В зависимости от величины вынужденной деформации про-

исходит изменение материальных констант. Оно особенно велико вблизи фазовых переходов, где вынужденная деформация пленки близка к критическому значению. Внутри r -фазы некоторые упругие и электроупругие постоянные достигают экстремума. В этих областях было выявлено аномальное влияние пленки на характеристики фильтров на ПАВ.

Литература

1. Мухортов В. М., Юзюк Ю. И. Гетероструктуры на основе наноразмерных сегнетоэлектрических пленок. Ростов-на-Дону. Изд-во ЮНЦ РАН, 2008. 224 с.
2. Бирюков С. В., Мухортов В. М., Мухортов В. М. Новый датчик динамической деформации на основе тонких пьезоэлектрических пленок, полученных ионно-плазменным напылением // Мир измерений. 2007. № 7. С. 45–52.
3. Есипов Ю. В., Мухортов В. М., Калинин В. В. Испытательная установка для анализа деформации моделей трехмерных конструкций // Измерительная техника. 2008. № 10. С. 39–42. 2008. № 10. С. 39–42.
4. Метьюз Г. Фильтры на поверхностных акустических волнах. Расчет, технология, применение. М.: Радио и связь, 1981. 521 с.
5. Khassaf H., Khakpash N., Sun F., Sbrockey N. M., Tompa G. S., Kalkur T. S., Alpay S. P. Strain engineered barium strontium titanate for tunable thin film resonators // Applied Physics Letters. 2014. Vol. 104. No. 20. P. 202902(5). DOI: 10.1063/1.4879281
6. Мухортов В. М., Бирюков С. В., Головки Ю. И., Карпетян Г. Я., Масычев С. И., Мухортов В. М. Поверхностные акустические волны в тонких пленках титаната бария-стронция на подложках из оксида магния // Письма в Журнал технической физики. 2011. Т. 37. № 5. С. 31–37.
7. Най Дж. Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц. М.: Мир, 1967. 386 с.
8. Широков В. Б., Калинин В. В., Шаховой Р. А., Юзюк Ю. И. К проблеме определения упругих констант // ДАН. 2015. Т. 463. № 6. С. 655–660.
9. Shirokov V. B., Kalinchuk V. V., Shakhovoy R. A., Yuzyuk Yu. I. Anomalies of piezoelectric coefficients in barium titanate thin films // EPL (Europhysics Letters). 2014. Vol. 108. No. 4. P. 47008(4). DOI: 10.1209/0295-5075/108/47008
10. Shirokov V. B., Kalinchuk V. V., Shakhovoy R. A., Yuzyuk Yu. I. Control of acoustic properties of a BaTiO₃ thin film by a planar electric field // EPL (Europhysics Letters). 2015. Vol. 111. No. 1. P. 16002(4). DOI: 10.1209/0295-

5075/111/16002

11. Timoshenko P. E., Kalinchuk V. V., Shirokov V. B. Finite-element analysis of scattering parameters of surface acoustic wave bandpass filter formed on barium titanate thin film. // International Journal of Smart and Nano Materials. 2018. Vol. 9. No. 2. P. 88–98. DOI: 10.1080/19475411.2018.1447045
12. Широков В. Б., Калинин В. В., Тимошенко П. Е. Свойства тонких пленок твердых растворов титаната бария стронция при вынужденном пьезоэффекте // ДАН. 2018. Т. 479. № 6. С. 620–625.

References

1. Mukhortov V. M., Yuzyuk Yu. I. *Geterostruktury na osnove nanorazmernih segnetoelektricheskikh plenok* [Heterostructures based on nanoscale ferroelectric films]. Southern Scientific Centre of RAS, Rostov-on-Don, 2008. (In Russian)
2. Mukhortov V. M., Mukhortov V. M., Biryukov S. V. Novyj datchik dinamicheskoy deformacii na osnove tonkih p'ezoelektricheskikh plenok, poluchennykh ionno-plazmennym napyleniem [New dynamic deformation sensor based on thin piezoelectric films obtained by ion-plasma sputtering]. *Mir izmerenij* [The world of measurements], 2007, no. 7, pp. 45–52. (In Russian)
3. Esipov Yu. V., Mukhortov V. M., Kalinchuk V. V., Andzhikovich I. E. O vozmozhnosti rannego diagnoza sostoyaniya sterzhnevyykh konstrukcij s primeneniem segnetoelektricheskikh datchikov dinamicheskoy deformacii [The possibility of early diagnosis of the state of rod structures by ferroelectric dynamic deformation sensors]. *Ekologicheskij vestnik nauchnykh centrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2010, vol. 7, no. 4, pp. 29–35. (In Russian)
4. Matthews H. *Surface wave filters: design, construction, and use*. John Wiley & Sons, New York, 1977. DOI: 10.1016/B978-0-12-372537-0.X5000-6
5. Khassaf H., Khakpash N., Sun F., Sbrockey N. M., Tompa G. S., Kalkur T. S., Alpay S. P. Strain engineered barium strontium titanate for tunable thin film resonators. *Applied Physics Letters*, 2014, vol. 104, no. 20, pp. 202902(5). DOI: 10.1063/1.4879281
6. Mukhortov V. M., Biryukov S. V., Golovko Yu. I., Karapetyan G. Y., Masychev S. I., Mukhortov V. M. Poverhnostnye akusticheskie volny v tonkih plenках titanata bariya-stronciya na podlozhkah iz oksida magniya [Surface acoustic waves in thin films of barium-strontium titanate on magnesium oxide substrates]. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Letters to the

- journal of technical physics], 2011, vol. 37, no. 5, pp. 31–37. (In Russian)
7. Nye J.F. *Physical properties of crystals*. Oxford: Clarendon Press, 1957.
 8. Shirokov V.B., Kalinchuk V.V., Shakhovoy R.A., Yuzyuk Yu.I. The problem of determining elastic constants of thin ferroelectric films. *Doklady Physics*, 2015, vol. 60, no. 8, pp. 349–354. DOI: 10.1134/S1028335815080108
 9. Shirokov V.B., Kalinchuk V.V., Shakhovoy R.A., Yuzyuk Yu.I. Anomalies of piezoelectric coefficients in barium titanate thin films. *EPL (Europhysics Letters)*, 2014, vol. 108, no. 4, pp. 47008(4). DOI: 10.1209/0295-5075/108/47008
 10. Shirokov V.B., Kalinchuk V.V., Shakhovoy R.A., Yuzyuk Yu.I. Control of acoustic properties of a BaTiO₃ thin film by a planar electric field. *EPL (Europhysics Letters)*, 2015, vol. 111, no. 1, pp. 16002(4). DOI: 10.1209/0295-5075/111/16002
 11. Timoshenko P.E., Kalinchuk V.V., Shirokov V.B. Finite-element analysis of scattering parameters of surface acoustic wave bandpass filter formed on barium titanate thin film. *International Journal of Smart and Nano Materials*, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 88–98. DOI: 10.1080/19475411.2018.1447045
 12. Shirokov V.B., Kalinchuk V.V., Timoshenko P.E. Properties of thin films of barium–strontium titanate solid solutions under a stimulated piezoelectric effect. *Doklady Physics*, 2018, vol. 63, no. 4, pp. 142–147. DOI: 10.1134/S1028335818040092

© Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества, 2020

© Тимошенко П. Е., Широков В. Б., Калинин В. В., 2020

Статья поступила 30 декабря 2020 г.