

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 53.08, 534.29

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛЕНКИ ZnO МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ РЕЗОНАТОРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

© 2020 г. С. Г. Алексеев^{a, *}, В. А. Лузанов^b, Н. И. Ползикова^a

^aИнститут радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125009 Российская Федерация

^bФрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
пл. Введенского, 1, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация

*E-mail: alekseev@cplire.ru

Поступила в редакцию 12.06.2020 г.

После доработки 12.06.2020 г.

Принята к публикации 20.06.2020 г.

С помощью метода широкополосной акустической резонаторной спектроскопии обнаружено, что изменение расстояния от подложки до оси магнетрона при нанесении пленки ZnO методом магнетронного распыления приводит к почти двукратному увеличению частоты оптимального возбуждения составного СВЧ-резонатора сдвиговых объемных акустических волн. Проведено моделирование частотных характеристик резонаторной структуры и предложено объяснение изменения частоты оптимального возбуждения неоднородностью наклона оси текстуры пленки ZnO по толщине.

DOI: 10.31857/S0033849420110017

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря малому размеру, низкому энергопотреблению, высокой добротности в гигагерцовом диапазоне частот, резонаторы объемных акустических волн (ОАВ) с пьезоэлектрическими (ПЭ) пленками в качестве преобразователей, а также фильтровые структуры на их основе находят применение в телекоммуникационных, радарных, сенсорных и других системах [1–4]. В последнее время тонкопленочные ПЭ-преобразователи СВЧ объемных ОАВ также весьма востребованы как источник когерентных фононов для фундаментальных и прикладных исследований в областях квантовой акустодинамики, микроволновой магнитной стрейнтроники, фооники и др. [5–7].

Тонкопленочный преобразователь представляет собой ПЭ-слой (ZnO, AlN, PZT и др.) толщиной от долей до нескольких микрон, помещенный между тонкопленочными металлическими электродами, к которым прикладывается СВЧ-напряжение. В зависимости от направления пьезоактивных осей преобразователь может возбуждать ОАВ с определенной поляризацией упругого смещения. Для применений в микроволновых фильтрах нужны пьезоэлектрики с полярной осью, направленной по нормали пленки, с помощью которых возбуждаются продольные ОАВ (с упругой поляризацией, направленной также по нормали). Однако для решения некоторых задач требуется ис-

пользование сдвиговых волн, для возбуждения которых необходимо нанесение ПЭ-пленок с наклонной под определенным углом к нормали осям текстуры [8]. Среди таких задач – разработка высокочувствительных гравиметрических сенсоров для работы в жидкой среде [4], в которой продольные волны испытывают значительное затухание, поэтому их применение затруднено. Возможность ПЭ-возбуждения сдвиговых ОАВ представляет интерес для разработки магнитных сенсоров, управляемых или переключаемых электрическими и (или) магнитными полями магнитоэлектрических гибридных СВЧ-структур (фильтров, фазовращателей и др.), а также для исследования свойств новых материалов и структур, в том числе взаимодействия поперечных фононов с квантовыми объектами. Непосредственной мотивацией наших исследований являлось то, что взаимодействие преимущественно со сдвиговыми волнами характерно для спиновых волн в магнитоупорядоченных средах [9–12]. Таким образом, получение ПЭ-пленок с наклонной текстурой для применения их в преобразователях сдвиговых ОАВ является актуальной задачей для применения высокодобротных резонаторов в микроволновой магнито-стрейнтронике.

Одним из наиболее широко применяемых методов получения ПЭ-пленок является метод магнетронного напыления. Для достижения наклона

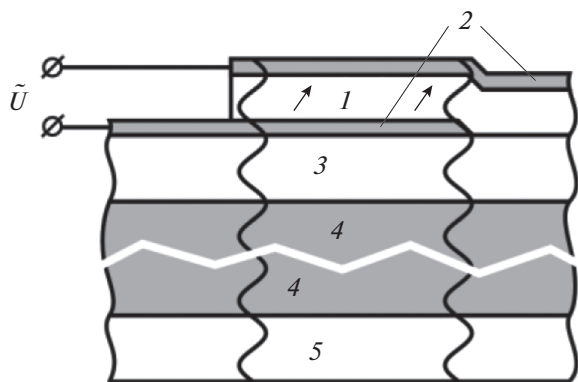


Рис. 1. Схема резонаторной структуры в поперечном сечении: 1 — пленка ZnO, 2 — электроды из Al, 3 — ЖИГ, 4 — ГГГ, 5 — ЖИГ. Стрелками показано направление оси текстуры $\vec{c}$.

оси ПЭ-текстуры используются разные модификации этого метода [13, 14]. В наших работах традиционно используется боковой сдвиг подложки относительно оси распылительной системы [15, 16]. В работе [17] методом рентгенографии были определены оптимальные смещения положения подложек и расстояния между плоскостями мишени и подложки. Были получены пленки ZnO с оптимальным наклоном оси текстуры $\vec{c}$ равным 35° .

С использованием этой технологии были изготовлены композитные резонаторы ОАВ, которые с помощью ПЭ-преобразователей на основе пленок ZnO, нанесенных на монокристаллические подложки, могли эффективно возбуждать сдвиговые волны на резонансных частотах f_n в гигагерцовом диапазоне. Эти частоты являются гармониками с высокими номерами (~ 800) всей резонаторной структуры; резонатор такого типа называется НВАР (High Overtone Bulk Acoustic Resonator). Поскольку резонаторы изготавливались для изучения магнитоупругих явлений в композитном НВАР, преобразователь наносили на монокристаллическую структуру, состоящую из подложки из галлий-гадолиниевого граната (ГГГ) с двумя эпитаксиальными пленками железо-иттриевого граната (ЖИГ), выращенными на обеих сторонах подложки. Для исследования явлений, связанных с акустическим возбуждением спиновых волн в пленках ЖИГ и создаваемой ими спиновой накачки на границе с немагнитным металлом, резонатор возбуждался на частотах сдвиговых волн в области максимальной эффективности пьезопреобразователя.

В данной работе исследован частотный спектр НВАР в широком диапазоне частот, от 0.5 и до 3 ГГц, который несет информацию о всех слоях, входящих в структуру. На основе спектроскопии нескольких почти идентичных резонаторных структур, расположенных на одной подложке и изготов-

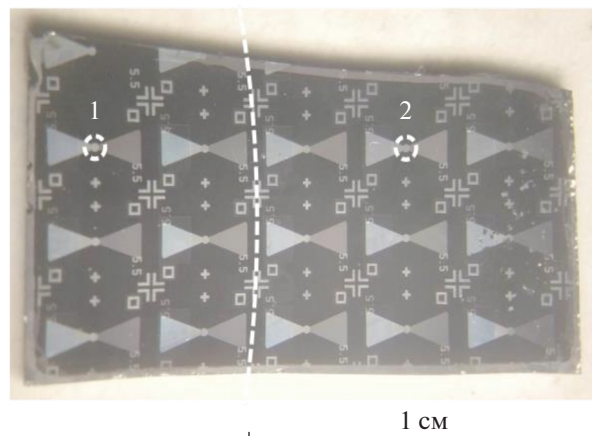


Рис. 2. Расположение резонаторных структур на подложке (вид сверху): треугольники — контактные площадки верхнего и нижнего электродов; область перекрытия электродов в виде кружка диаметром 200 мкм — активная область возбуждения ОАВ; штриховая линия разделяет области с разной частотой эффективного возбуждения, 1.2 ГГц (слева) и 2.4 ГГц (справа).

ленных в одном технологическом цикле, получены данные о пространственном распределении пьезоэлектрических свойств пленки ZnO. Эти результаты дополняют данные по пленкам ZnO с наклонной осью текстуры, полученные в работе [17] с помощью рентгенографических исследований.

1. СТРУКТУРА РЕЗОНАТОРОВ И МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Экспериментальный образец состоял из серии резонаторов, изготовленных на основе монокристаллической плоскопараллельной пластины из ГГГ с ориентацией (111) и толщиной 500 мкм. На обеих сторонах пластины методом жидкофазной эпитаксии были выращены пленки ЖИГ толщиной 30 мкм (рис. 1). На одну из поверхностей структуры ЖИГ (3)—ГГГ (4)—ЖИГ (5) была нанесена тонкая ($\sim 100\ldots 150$ нм) пленка поликристаллического алюминия (2). Из нее методом фотолитографии формировались нижние электроды структуры резонаторов. Далее была нанесена пленка ZnO (1) толщиной ~ 1.2 мкм, а затем снова пленка алюминия, из которой формировались верхние электроды преобразователей НВАР. Таким образом, был сформирован массив 3×5 преобразователей, показанный на рис. 2. Каждый преобразователь мог возбуждать ОАВ, распространяющиеся по толщине структуры и локализованные под перекрытием верхнего и нижнего электродов. В нашем случае область перекрытия — апертура резонатора — представляла собой круг диаметром ~ 200 мкм для всех преобразователей. Для двух преобразователей 1 и 2 из массива эти области отмечены окружностями.

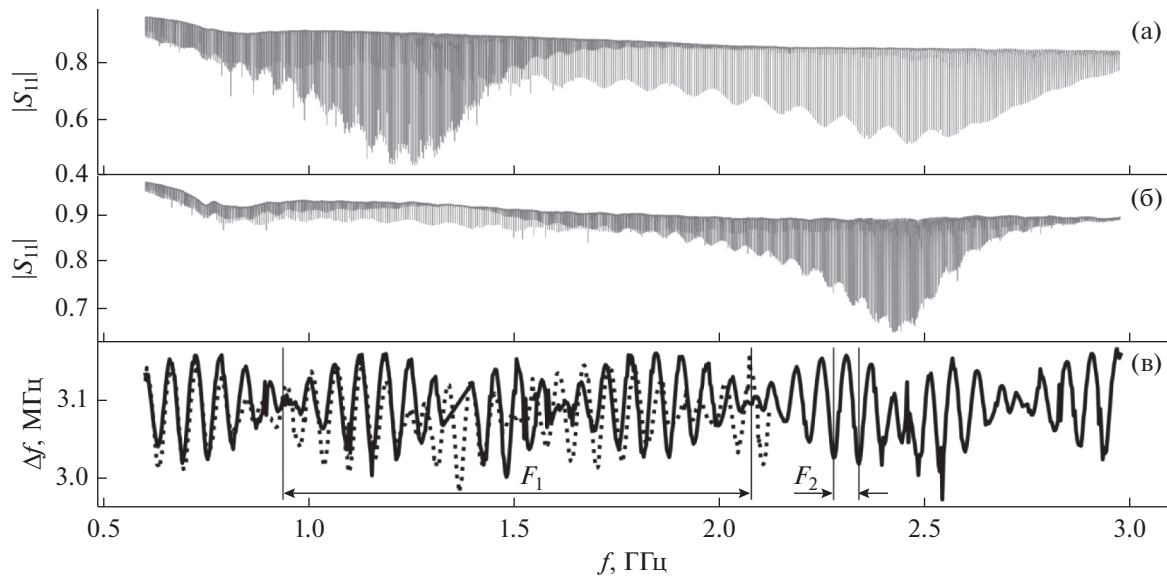


Рис. 3. Частотные зависимости модуля коэффициента отражения S_{11} для структур 1 (а) и 2 (б), а также расстояния между соседними резонансными пиками (в) для структур 1 (пунктирная кривая) и 2 (сплошная кривая).

Пленки ZnO осаждались методом магнетронного реактивного распыления цинковой мишени в кислородосодержащей атмосфере и имели наклон оси текстуры, который достигался смещением подложки от центра мишени и значительным усилением бомбардировки растущего слоя ионами и атомами кислорода, как описано в работе [17]. Подложка была ориентирована длинной стороной вдоль радиуса магнетронной распылительной системы. Поскольку пьезоэлектрическую пленку наносили на металлические нижние электроды, то ориентирующее влияние подложки на ПЭ-свойства ZnO можно исключить, по крайней мере, в области апертур преобразователей.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И РЕЗУЛЬТАТЫ

С помощью векторного анализатора цепей для каждой из резонаторных структур был измерен спектр комплексного коэффициента отражения (по напряжению) от преобразователя $S_{11}(f)$. Измерения проводили в диапазоне частот $f = 500$ МГц...3 ГГц с помощью согласованного СВЧ-зонда в составе предварительно откалиброванного СВЧ-тракта.

На рис. 3а и 3б представлены частотные зависимости $|S_{11}(f)|$ для структур с преобразователями 1 и 2 соответственно (обозначения на рис. 2). Видно, что в структуре 1 хорошо возбуждаются как продольные ОАВ (редко расположенные резонансные пики, более светлая область), так и сдвиговые ОАВ (частые резонансы, более темная область). В структуре 2 продольные волны возбуждаются слабо. Максимум возбуждения сдвиговых волн в структуре 1 находится на частоте 1.2 ГГц, в то время как в структуре 2 частота максимума 2.4 ГГц.

По результатам исследования спектров всего массива резонаторных структур можно сделать вывод, что примерно в 3 см от оси магнетрона (см. рис. 2 штриховая линия) проходит граница, резонаторы с одной стороны от которой возбуждаются на частоте около 1.2 ГГц, а с другой — на частоте, вдвое большей.

3. МЕТОД АКУСТИЧЕСКОЙ РЕЗОНАТОРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Дальнейший анализ экспериментальных спектров резонаторов проводили с помощью методов широкополосной акустической резонаторной спектроскопии, описанных в работе [18]. Прежде всего в полуавтоматическом режиме определяется частота каждого резонансного пика f_n ($n = n(f)$ — номер резонанса в области частоты f), затем строится частотная зависимость расстояния между соседними пиками $\Delta f(f) = f_{n-1} - f_n$. Далее мы будем использовать для этой величины аббревиатуру SPRF (Spacing of Parallel Resonance Frequency), введенную в работе [19]. На рис. 3в приведены частотные зависимости SPRF для сдвиговых мод структур 1 и 2. Детальное рассмотрение характеристик SPRF и их зависимость от свойств различных слоев в структуре НВАР приведены в работе [18]. Здесь же заметим, что различные по величине периоды осцилляций SPRF относительно среднего значения $\Delta f_{01,02} = 3.10$ МГц (одинакового для обеих структур) отражают наличие в образце двух типов пленок (ZnO и ЖИГ) с толщинами, отличающимися по величине более чем на порядок. Осцилляции с большим периодом $F_1 \approx 1.12$ ГГц обусловлены наличием тонкой пленки ZnO, а с меньшим периодом $F_2 \approx 60$ МГц — наличием пленок ЖИГ. Не-

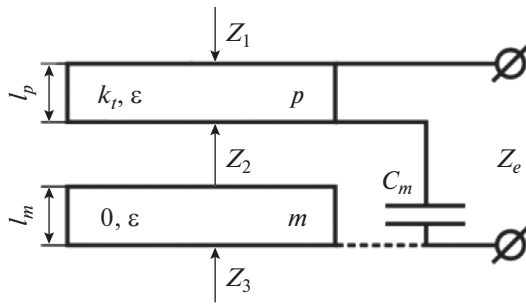


Рис. 4. Модифицированная модель Мезона для расчета электрического импеданса Z_e неоднородной пьезопленки: p — пьезоактивный слой толщиной l_p ; m — непьезоактивный слой, рассматриваемый как механическая и электрическая нагрузки на слой p ; l_m и C_m — толщина и емкость слоя m ; Z_1, Z_2, Z_3 — акустические импедансы.

большое отличие в периоде F_1 для структур 1 и 2 дает оценку для отношения толщин пленок ZnO $l_2 \approx 0.91l_1$. Численное моделирование, к которому мы перейдем позже, показывает, что форма фрагмента, повторяющегося с периодом F_1 (наличие перетяжек и биений внутри него), зависит от разницы в толщинах пленок верхнего и нижнего слоев ЖИГ, однако его размер по частоте F_1 от этой разницы не зависит и определяется толщиной пленки ZnO. Таким образом, наблюдаемое изменение частоты оптимального возбуждения почти в два раза в структурах 1 и 2 нельзя объяснить отличием толщины пленки ZnO под электродами 1 и 2.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для объяснения значительного изменения частоты оптимального возбуждения ОАВ мы предполагаем, что наклон текстуры пленки ZnO, который обеспечивает связь поперечного переменного электрического поля со сдвиговой ОАВ, не является однородным по толщине.

В силу особенностей метода магнетронного напыления рост пленки чаще всего начинается с поликристаллического тонкого слоя. Затем происходит образование прямой или наклонной текстуры в зависимости от наклона падения адатомов на подложку в присутствии бомбардировки подложки отрицательными ионами кислорода. Поскольку интенсивность бомбардировки имеет

радиальную неоднородность, то начало роста наклонной текстуры зависит от удаления от центра. Поэтому вполне естественно предположить, что в некотором слое около поверхности нижнего электрода (Al) у пленки ZnO нет наклона оси $\vec{c}$ или вообще отсутствует текстура, а соотношение толщин слоев с наклонной осью и прямой (или без ориентации) будет меняться с расстоянием до оси магнетрона.

Для иллюстрации такой причины изменения частоты оптимального возбуждения была построена одномерная модель резонаторной структуры, в которой пьезоэлектрическая пленка состояла из двух слоев. Считалось, что дальний слой по отношению к подложке имеет безразмерный коэффициент электромеханической связи для сдвиговой ОАВ k_t , который определяется наклоном оси $\vec{c}$ пленки ZnO. Величина k_t для сдвиговой ОАВ близка к своему максимуму 0.38 при наклоне оси порядка 43° [8, 17]. Для ближнего к подложке слоя принималось, что $k_t = 0$, это означает отсутствие наклона оси или даже разориентацию осей. Возбуждение продольных ОАВ рассматривать не будем. Все остальные материальные параметры слоев были одинаковыми. Будем обозначать параметры пьезоактивной части слоя ZnO индексом p , а непьезоактивной — m (рис. 4). Поскольку при $k_t = 0$ передаточная матрица слоя m распадается на электрическую и механическую [20], то пьезоэлектрический слой в этом случае можно заменить на дополнительный акустический слой и последовательную электрическую емкость. Таким образом, для расчета электрического импеданса Z_e в данной модели можно использовать известные методы расчета для НВАР, например, одномерные модели Мэсона [21] или Новотного–Бенеса [20].

Для расчета электрического импеданса многослойной структуры с одной ПЭ-пленкой удобно пользоваться моделью Мезона. В этой модели рассчитывается последовательная трансформация акустического импеданса со свободной границы структуры на границу пьезопленки. Для расчета электрического импеданса структуры с неоднородной ПЭ-пленкой метод модифицируется следующим образом. Из-за того, что в m -слое электрическая и механическая части независимы, в общий электрический импеданс структуры $Z_e = Z_m + Z_p$ от слоя m войдет емкостная составляющая $Z_m = 1/(i\omega C_m)$, а вклад от слоя p можно описать формулой [21]

$$Z_p = \frac{1}{i\omega C_p} \left[1 + k_t^2 \frac{i(Z_1 + Z_2)z_p \sin \theta_p - 2z_p^2(1 - \cos \theta_p)}{[(z_p^2 + Z_1 Z_2) \sin \theta_p - i(Z_1 + Z_2)z_p \cos \theta_p] \theta_p} \right]. \quad (1)$$

Здесь $C_m = \epsilon S/l_m$ и $C_p = \epsilon S/l_p$ — емкости соответствующих слоев с толщинами l_m и l_p , $l_m + l_p = l$;

S — площадь электродов; ϵ — диэлектрическая проницаемость пьезоэлектрика; $\theta_p = \omega l_p/V_p$, $z_p =$

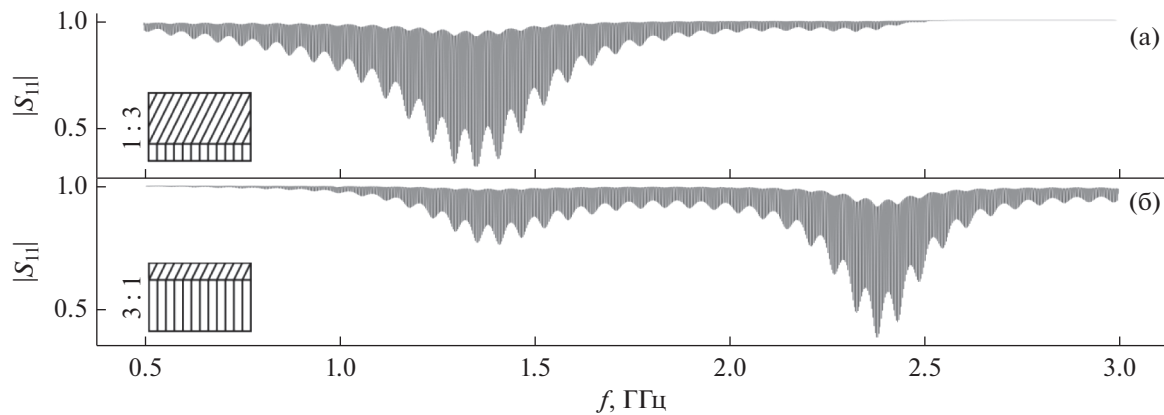


Рис. 5. Частотные зависимости модуля коэффициента отражения S_{11} для структур 1 (а) и 2 (б). На вставках показано схематическое распределение соотношения толщин пьезоактивного (косая штриховка) и непьезоактивного (прямая штриховка) слоев пленки ZnO.

$= \rho V_p$ и V_p — набег фазы, акустический импеданс и скорость сдвиговой ОАВ в активном пьезоэлектрическом слое, ρ и l — плотность и полная толщина ПЭ-слоя, $\omega = 2\pi f$. В формуле (1) импеданс Z_1 является акустической нагрузкой слоя p со стороны верхнего электрода, а Z_2 — со стороны слоя m и всех остальных слоев структуры. При численных расчетах использовались материальные параметры слоев, приведенные в табл. 1.

В расчетах учитывалось, что собственное поглощение в каждом слое растет с частотой как f^2 . Также в области низких частот (< 1 ГГц) учитывались дифракционные потери, которые дают вклад в поглощение, пропорциональный $1/f$ [22]. Потери за счет ухода энергии ОАВ из-под области электродов в виде пластинчатых мод Лэмба [23], а также из-за рассеяния на шероховатостях поверхностей в настоящем расчете не учитывались.

На рис. 5 представлены результаты расчета модуля коэффициента отражения S_{11} для НВАР с различными конфигурациями неоднородности по толщине. Для структуры, соответствующей рис. 5а, $l_p = 0.9$ мкм, $l_m = 0.3$ мкм, т.е. соотношение толщин пьезоактивного и непьезоактивного

слоев составляет 3 : 1, в то время как для структуры на рис. 5б при той же самой общей толщине это соотношение составляет 1 : 3. Можно видеть, что максимум возбуждения на рис. 5а находится на частоте около 1.3 ГГц, а на рис. 5б — на 2.4 ГГц, изменение составляет 1.85 раз, что соответствует наблюдаемому в эксперименте. Таким образом, существенное изменение частоты максимального возбуждения может быть объяснено неоднородностью наклона оси текстуры по толщине ПЭ-пленки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для контроля за пространственным распределением наклона оси текстуры ПЭ-пленки ZnO были измерены частотные спектры электрического коэффициента отражения S_{11} по напряжению для матрицы 3×5 резонаторных структур сдвиговых ОАВ. Показано, что свойства пленки меняются в направлении от оси магнетронной распылительной системы: частота максимального возбуждения увеличивается почти в два раза для двух идентичных резонаторных структур, разделенных в плоскости менее чем на 1 см. Это изменение объясняется неоднородностью по толщине пленки угла наклона пьезоактивной оси, которая возникает в процессе магнетронного напыления и зависит от положения резонаторной структуры относительно оси распылительной системы. Существенное увеличение частоты оптимального возбуждения при сохранении той же самой эффективности представляется очень интересным с точки зрения применения составных резонаторов сдвиговых ОАВ в гигагерцовой области частот.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания и при частичной финансовой поддержке Россий-

Таблица 1. Материальные параметры слоев композитного НВАР

Материал	V , 10^3 м/с	ρ , 10^3 кг/м ³	k_t	ϵ
ZnO (текстура)	2.88	5.68	0.282...0.38	8.84
GGG (111)	3.57	7.08	—	—
YIG (111)	3.85	5.18	—	—
Al (аморфный)	3.04	2.69	—	—

Примечание: V — скорость сдвиговой волны, ρ — плотность, k_t — коэффициент электромеханической связи, ϵ — диэлектрическая проницаемость.

ского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-07-01075).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ruby R.* // Proc. 2017 IEEE 30th Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Las Vegas. 22–26 Nov. N.Y.: IEEE, 2017. P. 308.
2. *Ruppel C.C.W.* // IEEE Trans. 2017. V. UFFC-64. № 9. P. 1390.
3. *Rabus D., Friedt J.M., Ballandras S. et al.* // J. Appl. Phys. 2015. V. 118. № 9. P. 114505.
4. *Arya S.K., Saha S., Ramirez-Vick J.E. et al.* // Analytica Chimica Acta. 2012. V. 737. P. 1.
5. *Gokhale V.J., Downey B.P., Katzer D.S. et al.* // Nature Commun. 2020. V. 11. P. 2314.
6. *Delsing P., Cleland A.N., Schuetz M.J.A. et al.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2019. V. 52. № 35. P. 353001.
7. *Сорокин Б.П., Новоселов А.С., Квашин Г.М. и др.* // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 3. С. 315.
8. *Foster N.F., Coquin G.A., Rozgonyi G.A., Vanatta F.A.* // IEEE Trans. 1968. V. SU-15. № 1. P. 28.
9. *Polzikova N.I., Alekseev S.G., Pyataikin I.I. et al.* // AIP Advances. 2018. V. 8. № 5. P. 056128.
10. *Ползикова Н.И., Алексеев С.Г., Лузанов В.А., Раевский А.О.* // ФТТ. 2018. Т. 62. № 11. С. 2170.
11. *Alekseev S.G., Polzikova N.I., Raevskiy A.O.* // J. Commun. Technol. Electron. 2019. V. 64. № 11. P. 1318.
12. *Polzikova N.I., Alekseev S.G., Luzanov V.A., Raevskiy A.O.* // J. Magn. Magn. Mater. 2019. V. 479. P. 38.
13. *Rughoobur G., De Miguel-Ramos M., Mirea T. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 108. № 3. P. 034103.
14. *Веселов А.Г., Елманов В.И., Кирясова О.А., Никулин Ю.В.* // ЖТФ. 2019. Т. 89. № 5. С. 781.
15. *Котелянский И.М., Крикунов А.И., Лузанов В.А. и др.* Способ нанесения пьезоэлектрических пленок окиси цинка в вакууме. А.с. СССР № 1394742 А 1. Оpubл. 07.12.1992. Б.И. № 45.
16. *Лузанов В.А.* // РЭ. 2017. Т. 62. № 10. С. 1018.
17. *Лузанов В.А., Алексеев С.Г., Ползикова Н.И.* // РЭ. 2018. Т. 63. № 9. С. 1015.
18. *Алексеев С.Г., Ползикова Н.И., Котелянский И.М., Мансфельд Г.Д.* // РЭ. 2015. Т. 60. № 3. С. 317.
19. *Cheeke J.D.N., Zhang Y., Wang Z. et al.* // Proc. 1998 IEEE Ultrasonics Symp. Sendai. 5–8 Oct. N.Y.: IEEE, 1998. V. 2. P. 1125.
20. *Nowotny H., Benes E.* // J. Acoust. Soc. Amer. 1987. V. 82. № 2. P. 513.
21. *Кайно Г.* Акустические волны. Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов. М.: Мир, 1990.
22. *Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б.* Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972.
23. *Алексеев С.Г., Мансфельд Г.Д., Ползикова Н.И.* // РЭ. 2006. Т. 51. № 8. С. 984.