_____ ФИЗИЧЕСКАЯ _ АКУСТИКА =

УДК 534.63,534.86

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ СО СТРУКТУРОЙ "Al/(Al,Sc)N/Mo/AЛMA3" С ВЫСОКОЙ ДОБРОТНОСТЬЮ НА СВЧ

© 2019 г. Б. П. Сорокин^{*a*, *b*, *, А. С. Новоселов^{*a*, *b*, **, Г. М. Квашнин^{*a*}, Н. В. Лупарев^{*a*}, H. O. Асафьев^{*a*, *b*}, А. Б. Шипилов^{*a*, *b*}, В. В. Аксёненков^{*a*}}}

^аФГБНУ "Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов", ул. Центральная, д. 7а, Москва, г.о. Троицк, 108840, Россия

^b Московский физико-технический институт (государственный университет), Институтский пер., д. 9, г. Долгопрудный, Московская обл., 141701, Россия

*e-mail: bpsorokin1953@yandex.ru **e-mail: diver841@gmail.com

Впервые продемонстрирована возможность применения нитрида алюминия—скандия в качестве эффективного пьезоэлектрического материала в композитных акустических резонаторах на подложках из синтетического алмаза. Композитные резонаторы на основе пьезоэлектрической слоистой структуры "Al/(Al,Sc)N/Mo/(100) алмаз" с тремя концентрациями Sc были исследованы в диапазоне частот 0–20 ГГц. Показано, что такие резонаторы могут возбуждаться в широком диапазоне частот от 0.2 до 20 ГГц, при этом не уступая существенно по значениям добротности аналогичным устройствам с использованием чистого нитрида алюминия. Параметр качества $Qf \approx 3 \times 10^{14}$ Гц в образце резонатора на основе структуры "Al/Al_{0.7}Sc_{0.3}N/Mo/(100) алмаз" сопоставим с аналогичным рекордным значением для композитных резонаторов на алмазных подложках и тонкопленочных пьезоэлектрических преобразователей из AlN. Максимальные значения квадрата эффективного коэффициента электромеханической связи композитных OAB-резонаторов увеличились почти на порядок при переходе от пленки AlN к ASN.

Ключевые слова: композитный акустический резонатор, синтетический алмаз, нитрид алюминия, нитрид алюминия—скандия, объемная акустическая волна, пьезоэлектрическая слоистая структура, добротность

DOI: 10.1134/S0320791919030080

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных компонентов современной электроники являются резонаторы и фильтры на акустических волнах различных типов – объемных (ОАВ), поверхностных рэлеевского и SH-типов, Лэмба и др. [1–6]. На сегодняшний день наиболее широкое применение нашли резонаторы на поверхностных акустических волнах (ПАВ, в англоязычной литературе SAW), обладающие хорошей воспроизводимостью и совместимые с массовыми технологиями, применяемыми в микроэлектронике. Во второй половине 20 в. подложки обычно изготавливали из материалов с хорошими акустическими свойствами, обладавших собственным пьезоэлектрическим эффектом, в числе которых наибольший интерес вызывали пьезокварц, лангасит и лангатат, ниобат и танталат лития, германо- и силикосиллениты. Продвижение в область от сотен мегагерц до десятков гигагерц потребовало пересмотра как технологических подходов, так и критериев выбора материалов. В

частности, известны кварцевые резонаторы с обратной меза-структурой, обеспечившие продвижение в область частот до 400 МГц [7]. Однако дальнейшее повышение операционных частот акустоэлектронных устройств, реализуемых на кварце, ограничивалось уже относительно высоким акустическим затуханием в данном материале на частотах 1-2 ГГц. Поэтому на рубеже 20-21 вв. обозначился интерес к тонкопленочным (Film Bulk Acoustic resonator, FBAR), композитным (High overtone Bulk Acoustic Resonator, HBAR) peзонаторам и резонаторам с брэгговской отражательной структурой (Solidly Mounted Resonator -SMR) [8]. Во всех типах резонаторов используются объемные акустические волны. В тонкопленочных и SMR-резонаторах в качестве резонансного элемента использовали пьезоэлектрическую пленку из оксида цинка ZnO или нитрида алюминия AlN, возбуждаемую на основном резонансе, в композитных эксплуатируется сочетание хороших акустических свойств высокодобротной подложки с

эффективными пьезоэлектрическими свойствами ZnO или AlN в качестве тонкопленочного пьезоэлектрического преобразователя (ТПП), при этом удается обеспечить возбуждение таких резонаторов на высших обертонах и получить наиболее высокие операционные частоты [1, 8, 9]. Поскольку объемные акустические волны локализованы внутри подложки, у таких устройств имеется качественное преимущество по сравнению с ПАВ-устройствами, где воздушная нагрузка становится существенным фактором акустических потерь, в особенности на СВЧ. Актуальным направлением современных исследований является применение акустических резонаторов в качестве биологических и физико-химических сенсоров [11-14]. Для всех названных типов устройств имеет важное значение технология тонких пленок AlN. Нитрид алюминия отличается высокой скоростью звука (~10000 м/с), твердостью, электрической прочностью (>2 × 10⁷ В/см), электрическим сопротивлением (10¹³ Ом см), хорошей теплопроводностью (~200 Вт/см), а также стабильностью при высоких температурах (до 600°С) [15-18]. Однако его пьезоэлектрические характеристики несколько уступают наблюдаемым в пленках ZnO. Одним из перспективных материалов, изоструктурных нитриду алюминия, является нитрид алюминия—скандия ($Al_{1-x}Sc_xN$, ASN), пьезомодуль которого может достигать 23-24 пКл/Н, что в три раза больше, чем у AlN [19, 20]. Известно применение пленки Al_{0.65}Sc_{0.35}N в качестве резонансного элемента FBAR с частотой возбуждения ~2 ГГц, где было показано, что коэффициент электромеханической связи (КЭМС) превышает соответствующее значение для AlN в 2.6 раза [21]. Однако применение пленок ASN в качестве ТПП в составе композитных ОАВ-резонаторов на СВЧ до сих пор исследовано не было. Отметим также, что существенное влияние на пьезоэлектрические, диэлектрические и упругие свойства оказывает концентрация скандия в твердом растворе $Al_{1-x}Sc_xN$, вплоть до исчезновения пьезоэлектричества в чистом ScN.

Целью данной работы была разработка композитных акустических резонаторов на основе пьезоэлектрической слоистой структуры (ПСС) "Al/ASN/Mo/(100) алмаз" и исследование их характеристик на СВЧ, в том числе для пленок с различным содержанием скандия, в сравнении с аналогичными данными, полученными для ПСС "Al/AIN/Mo/(100) алмаз" на тех же подложках.

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ОАВ-РЕЗОНАТОРОВ И МЕТОДЫ СВЧ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для получения ПСС на основе ASN было выполнено развитие технологий, ранее успешно примененных для изготовления композитных ОАВ-резонаторов со структурой "Al/AlN/Mo/(100) алмаз" [22, 23]. С помощью установки магнетронного распыления AJA Orion 8 на подложке из синтетического алмаза Па типа с ориентацией (100) предварительно формировались металлические электроды из молибдена заданной конфигурации и толщины. Пленки ASN наносились на подслой Мо посредством магнетронного распыления с двух мишеней алюминия и скандия в атмосфере азота и аргона через фотолитографические микромаски. Для получения различной концентрации Sc в пленке варьировали мощность магнетрона для распыления Sc. Полученные пленки ASN анализировали с помощью методов рентгеновской дифракции (установка Empyrean Panalytic) и растровой электронной микроскопии (JSM-7600F). Например, на рис. 1 показана дифрактограмма образца-спутника Al₇₀Sc₃₀N/Mo/Si с параметрами решетки структуры типа вюрцита *a* = 3.2288 и c = 4.9842 ангстрем (c/a = 1.543). Используя структурные данные и результаты работы [20], определяли полученную в составе пленки ASN концентрацию скандия, которая для данного образца составила 30%. Полная ширина на половине высоты искомого рефлекса (002) составила достаточно малое значение 0.23°, что свидетельствует о преимущественной ориентации кристаллитов вдоль оси Z. Данное обстоятельство обеспечивает эффективное возбуждение продольной акустической волны. Толщину и шероховатость металлических пленок измеряли с помощью сканирующего зондового микроскопа (Нано Лаборатория Ntegra Prima). Так, на образце А № 29.2 "Al/ASN/Mo/алмаз" шероховатость пленок составила $S_a(Al)$ – 10 нм, $S_a(ASN) - 4$ нм и $S_a(Mo) - 3$ нм соответственно. Для других ПСС получены аналогичные значения. Данные по соответствующим толщинам пленок приведены в табл. 1.

На последнем этапе на пленку ASN наносили Al электроды заданной конфигурации. Область пересечения Al и Mo электродов задавала апертуру ТПП с площадью для разных резонаторов от 10000 до 46000 мкм². Меньшая эффективная площадь позволяла уменьшить статическую емкость C_0 и возбуждать резонатор на более высокой операционной частоте. Фотография одной из ПСС с двумя независимыми OAB-резонаторами и схема устройства показаны на рис. 2.

Композитные OAB-резонаторы исследовались в диапазоне частот до 20 ГГц с использованием установки, включающей векторный анализатор цепей E5071C (Agilent) и зондовую станцию M150 [22]. Первичные данные включали в себя измерение частотных характеристик коэффициента стоячей волны в режиме "на отражение" и импеданса Z_{11} . Затем данные обрабатывались для получения импеданса $Z_{1104ип}$, "очищенного" от



Рис. 1. Дифрактограмма образца-спутника $Al_{0.7}Sc_{0.3}N/Mo/(100)$ Si. Толщина пленки 1.494 мкм.

влияния подключенной измерительной системы, с использованием модели Мансфельда [24]. Более подробно данная процедура описана в работе [22]. По полученным амплитудно-частотным характеристикам определялись величины добротности и эффективного КЭМС. Нагруженная добротность *n*-го обертона вычислялась по ширине пика "очищенного" импеданса на уровне –3дБ:

$$Q_n = \frac{f_n}{\Delta f(-3 \ \mathrm{\pi B})}.$$
 (1)

Значение эффективного КЭМС определяли исходя из эквивалентных электрических параметров, согласно [24]:

$$k_{\rm sphp}^{2} = \frac{2\pi f_{n}C_{0}R_{n}}{Q_{n}} = \frac{\text{Re}\,Z_{11041411}}{Q_{n}\,\text{Im}\,Z_{11}},$$
(2)

где R_n — сопротивление потерь для *n*-го обертона.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3 приведены результаты измерения акустических характеристик композитных ОАВрезонаторов на алмазных подложках различной толщины с ТПП на основе пленок ASN с различным содержанием скандия 30, 34 и 36% в сравнении с пленкой AlN. Параметры резонаторов указаны в табл. 1. Чередование максимумов и минимумов на зависимостях добротности от частоты обусловлено особенностями возбуждения ТПП на подложке: максимумы соответствуют возбуждению ТПП на частотах, где его толщина близка к значению $p\lambda/2$ (λ – длина акустической волны, p = 1, 2, 3, ...), и, напротив, на частотах, где толщина ТПП близка к значению $(2p-1)\lambda/4$, наблюдаются минимумы добротности. Следует также отметить, что при условии, когда толщина ТПП близка к $p\lambda$, преобразователь не будет возбуждаться вследствие "выключения" пьезоэлектрического эффекта [22]. Как следует из рис. За, добротность ОАВ-резонатора с пленкой ASN (концентрация Sc 36%) в области низких частот (~250 МГц) достигает величины ~57000 с уменьшением в области высоких частот. Такое поведение, как и в резонаторах со структурой "Al/AlN/Mo/(100) алмаз", обусловлено изменением характера фонон-фононного взаимодействия в алмазе, связанным с переходом от механизма акустического затухания Ахиезера к механизму Ландау-Румера [23]. Для последнего имеет место зависимость параметра качества $Of \sim f$, прямо пропорциональная частоте [25], что непосредственно следует из рис. 36, если принимать во внимание максимальные значения Qf. Некоторые отклонения от данной тенденции в высокочастотной области можно объяснить особенностями применения резонансной методики, поскольку результаты в некоторой степени зависят от выбора площади апертуры ТПП и, соответственно, величины С₀. Поскольку композитный ОАВрезонатор как инструмент измерения акустических

Образец	Пьезоэлектрическая слоистая структура	Содер- жание Sc, %	Толщина слоя, нм			Толщина	Площадь
			Al	ASN/AIN	Мо	МКМ	тпп, мкм ²
A № 25.3	Al/AlN/Mo/алмаз	0	180 ± 30	425 ± 27	148 ± 11	1075 ± 1	(б) – 20000
A № 25.4	Al/ASN/Mo/алмаз	30	156 ± 10	1496 ± 35	152 ± 10	1075 ± 1	(б) – 20000
A № 29.2	Al/ASN/Mo/алмаз	34	158 ± 20	993 ± 31	140 ± 12	392 ± 1	(a) – 46000
A № 24.5	Al/ASN/Mo/алмаз	36	90 ± 12	980 ± 54	262 ± 15	1107 ± 1	(а) — 46000 (в) — 10000

Таблица 1. Параметры композитных ОАВ-резонаторов на алмазных подложках

(а), (б) и (в) – обозначения композитных ОАВ-резонаторов на алмазной подложке.



Рис. 2. (а) Фотография ПСС "Al/Al_{0.7}Sc_{0.3}N/Mo/(100) алмаз" с двумя независимыми композитными OAB-резонаторами разной площади, (б) схема OAB-резонатора.

параметров пленок и подложек обладает уникально широкой областью операционных частот, его электрическое согласование с измерительной системой при данной конфигурации ТПП невозможно осуществить во всем диапазоне, в результате чего измеряется нагруженная добротность, которая, как правило, меньше истинного значения. Рисунок Зв представляет зависимость нагруженной добротности для ряда ОАВ-резонаторов с ТПП из ASN и AlN в области 13-20 ГГц. Отсюда ясно, что возбуждение композитных ОАВ-резонаторов с алмазными подложками и ТПП из ASN реализуется вплоть до частоты 20 ГГц с уровнем добротности ~15000, т.е. значение параметра качества $Qf \approx 3 \times$ × 10¹⁴ Гц вполне сопоставимо с аналогичным для композитных ОАВ-резонаторов с алмазными подложками и ТПП из AlN [1].

Анализируя рис. 4, можно видеть, что от пьезоэлектрических свойств пленки зависит в первую очередь величина эффективного КЭМС ОАВ-резонатора, возрастающая при увеличении концентрации скандия. Практически важным следстви-

Таблица 2. Квадрат эффективного КЭМС $k_{э\phi\phi}^2$ (10⁻⁶) для композитных ОАВ-резонаторов на алмазных подложках

Алмазная	Тип пленки					
подложка	AlN	$Al_{0.7}Sc_{0.3}N$	Al _{0.64} Sc _{0.36} N			
A № 24	17	_	120			
A № 25	2.4	25	_			

ем является увеличение амплитуды и отношения сигнал/шум в сравнении с OAB-резонаторами со структурой "Al/AlN/Mo/(100) алмаз" при одном и том же уровне мощности входного сигнала. Получено, что для ПСС на основе ASN максимальная величина эффективного КЭМС больше чем на порядок превышает соответствующее значение в чистом нитриде алюминия. К настоящему времени известно, что пьезоэлектрический модуль d_{33} в ASN возрастает более чем в четыре раза по сравнению с AlN при увеличении концентрации скандия от нуля до предельного значения ~43%, при котором пленка нитрида алюминия скандия еще сохраняет пьезоэлектрические свойства [20].

Примем во внимание, что для материального КЭМС пьезоэлектрической пленки со структурой вюрцита имеет место соотношение

$$k^2 \approx \frac{d_{33}^2 C_{33}}{\epsilon_{33}},$$
 (3)

где C_{33} — упругий модуль и ε_{33} — относительная диэлектрическая проницаемость. Поскольку при увеличении концентрации скандия упругий модуль ASN плавно уменьшается, а диэлектрическая проницаемость возрастает [20, 21, 26], можно полагать, что квадрат КЭМС нитрида алюминия—скандия будет пропорционален квадрату пьезомодуля d_{33} , который резко растет с увеличением концентрации скандия. Сравнивая экспериментальные данные ОАВ-резонаторов, можно заключить, что максимальные значения квадрата эффективного КЭМС для одной и той же под-



Рис. 3. Сравнение частотных зависимостей акустических параметров композитных OAB-резонаторов на алмазных подложках с применением ТПП на основе ASN и AlN: (а) нагруженная добротность в диапазоне 0–10 ГГц, (б) параметр качества, (в) нагруженная добротность в диапазоне 13–20 ГГц.

ложки увеличиваются почти на порядок при переходе от пленки AlN к ASN (табл. 2).

выводы и заключение

Синтезирован набор композитных ОАВ-резонаторов на алмазных подложках с тонкопленочными пьезоэлектрическими преобразователями на основе нитрида алюминия—скандия с тремя концентрациями Sc. Исследованы СВЧ акустические параметры ОАВ-резонаторов и свойства пьезоэлектрических пленок нитрида алюминия скандия в их составе в сравнении с чистым нитридом алюминия. Впервые показано, что ОАВрезонаторы с применением пленок ASN могут возбуждаться в широком диапазоне частот от 0.2 до 20 ГГц, при этом не уступая существенно по значениям добротности аналогичным устройствам с использованием чистого нитрида алюминия. Так, параметр качества $Qf \approx 3 \times 10^{14}$ Гц в об-ОАВ-резонатора основе разне на ПСС "Al/Al_{0.7}Sc_{0.3}N/Mo/(100) алмаз" вполне сопоставим с аналогичным рекордным значением для композитных ОАВ-резонаторов с алмазными подложками и ТПП из AlN [1]. Частотное поведение добротности и параметра качества ПСС "Al/ASN/Mo/(100) алмаз" соответствует ранее наблюдавшемуся в ПСС "Al/AlN/Mo/(100) алмаз" и может быть объяснено в рамках теорий акустического затухания Ахиезера и Ландау-Ру-На образце А № 24.5 (а) (ПСС мера. "Al/Al_{0.64}Sc_{0.36}N/Mo/(100) алмаз") достигнуто высокое значение добротности ~57000 на частоте ~250 МГц ($Of \approx 1.4 \times 10^{13}$ Гц). Тем самым открывается возможность применения пленок нитрида алюминия-скандия и на сравнительно низких частотах, например, в качестве ТПП для акустической микроскопии. Максимальные значения



Рис. 4. Частотные зависимости эффективного КЭМС композитных ОАВ-резонаторов на алмазных подложках с применением ТПП на основе нитрида алюминия—скандия для различных концентраций скандия в сравнении с ТПП из AlN.

квадрата эффективного КЭМС композитных ОАВ-резонаторов увеличились почти на порядок при переходе от пленки AlN к ASN.

Можно заключить, что пьезоэлектрические пленки нитрида алюминия—скандия будут перспективны для применений в области пьезотехники и акустоэлектроники, включая функциональные приборы и устройства СВЧ-диапазона. Направление дальнейшей работы, по мнению авторов, будет лежать на пути совершенствования технологии эффективных пьезоэлектрических пленок нитрида алюминия—скандия в сторону получения соединений ASN с максимально допустимой концентрацией Sc, детального изучения электромеханических свойств данного материала и расширения сфер его применения.

Работа поддержана грантом Российского научного фонда (проект № 16-12-10293).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Sorokin B.P., Kvashnin G.M., Novoselov A.S., Bormashov V.S., Golovanov A.V., Burkov S.I., Blank V.D. Excitation of hypersonic acoustic waves in diamond-based piezoelectric layered structure on the microwave frequencies up to 20 GHz // Ultrasonics. 2017. V. 78. P. 162–165.
- Länge K., Rapp B.E., Rapp M. Surface acoustic wave biosensors: a review // Anal. Bioanal. Chem. 2008. V. 391. № 5. P. 1509–1519.
- Yantchev V., Katardjiev I. Thin film Lamb wave resonators in frequency control and sensing applications: A review // J. Micromech. Microengineering. 2013. V. 23. № 4. P. 043001.

- Zhao C., Montaseri M.H., Wood G.S., Pu S.H., Seshia A.A., Kraft M. A review on coupled MEMS resonators for sensing applications utilizing mode localization // Sensors and Actuators A. Phys. 2016. V. 249. P. 93–111.
- Lozano M.S., Chen Z., Williams O.A., and Iriarte G.F. Temperature characteristics of SAW resonators on Sc_{0.26}Al_{0.74}N/polycrystalline diamond heterostructures // Smart Mater. Struct. 2018. V. 27. P. 0–8.
- 6. Двоешерстов М.Ю., Чередник В.И. Полосовые СВЧ-фильтры на основе тонкопленочных акустических резонаторов. Теория и эксперимент // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 6. С. 692–700.
- 7. Мостяев В.А., Дюжиков В.И. Технология пьезо- и акустоэлектронных устройств. М.: Ягуар, 1993. 280 с.
- Lakin K.M. Thin film resonator technology // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2005. V. 52. № 5. P. 707–716.
- Zhang H., Pang W., Yu H., Kim E.S. High-tone bulk acoustic resonators on sapphire, crystal quartz, fused silica, and silicon substrates // J. Appl. Phys. 2006. V. 99. P. 124911.
- Алексеев С.Г., Мансфельд Г.Д., Ползикова Н.И., Котелянский И.М. Особенности затухания и захват энергии колебаний в составных акустических СВЧ резонаторах на основе монокристаллов ИАГ // Акуст. журн. 2007. Т. 53. № 4. С. 533–539.
- 11. Wingqvist G. AlN-based sputter-deposited shear mode thin film bulk acoustic resonator (FBAR) for biosensor applications – A review // Surf. Coatings Technol. 2010. V. 205. № 5. P. 1279–1286.
- Zhang Y., Luo J., Flewitt A.J., Cai Z., Zhao X. Film bulk acoustic resonators (FBARs) as biosensors: A review // Biosens. Bioelectron. 2018. V. 116. P. 1–15.
- Daugey T., Friedt J.M., Martin G., Boudot R. A highovertone bulk acoustic wave resonator-oscillatorbased 4.596 GHz frequency source: Application to a coherent population trapping Cs vapor cell atomic clock // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. P. 114703.
- Rabus D., Friedt J.M., Ballandras S., Baron T., Lebrasseur E., Carry E. High-overtone bulk-acoustic resonator gravimetric sensitivity: Towards wideband acoustic spectroscopy // J. Appl. Phys. 2015. V. 118. P. 114505.
- Zhang Y., Wang Z., Cheeke J.D.N. Resonant spectrum method to characterize piezoelectric films in composite resonators // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2003. V. 50. P. 321–333.
- Caliendo C., Imperatori P. High-frequency, high-sensitivity acoustic sensor implemented on AlN/Si substrate // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. № 8. P. 1641–1643.
- 17. Oliveira I.C., Grigorov K.G., Maciel H.S., Massi M., Otani C. High textured AlN thin films grown by RF magnetron sputtering; Composition, structure, morphology and hardness // Vacuum. 2004. V. 75. № 4. P. 331–338.
- Patel N.D., Nicholson P.S. High frequency, high temperature ultrasonic transducers // NDT Int. 1990. V. 23. № 5. P. 262–266.
- Zywitzki O., Modes T., Barth S., Bartzsch H., Frach P. Effect of scandium content on structure and piezoelectric properties of AlScN films deposited by reactive pulse magnetron sputtering // Surf. Coatings Technol. 2017. V. 309. P. 417–422.

330

АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 65 № 3 2019

- Teshigahara A., Hashimoto K.Y., Akiyama M. Scandium aluminum nitride: Highly piezoelectric thin film for RF SAW devices in multi GHz range // Proc. of 2012 IEEE Int. Ultrason. Symp. Dresden, Germany, October 7–10, 2012. P. 1–5.
- Umeda K., Kawai H., Honda A., Akiyama M., Kato T., Fukura T. Piezoelectric properties of ScAlN thin films for piezo-MEMS devices // Proc. MEMS. Taipei, Taiwan, January 20–24, 2013. P. 733–736.
- Сорокин Б.П., Квашнин Г.М., Теличко А.В., Гордеев Г.И., Бурков С.И., Бланк В.Д. Исследования многочастотных СВЧ акустических резонаторов на основе слоистой пьезоэлектрической структуры "Me1/ AlN/Me2/(100) алмаз" // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 4. С. 464–476.
- 23. Сорокин Б.П., Теличко А.В., Квашнин Г.М., Бормашов В.С., Бланк В.Д. Исследования СВЧ акустического затухания в многочастотном резонаторе на

объемных акустических волнах на основе синтетического монокристалла алмаза // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 6. С. 705–717.

- 24. Мансфельд Г.Д., Алексеев С.Г., Ползикова Н.И. Эквивалентная электрическая схема составного акустического резонатора для радиотехнических устройств СВЧ диапазона // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 4. С. 552–558.
- 25. *Tabrizian R., Rais-Zadeh M., Ayazi F.* Effect of phonon interactions on limiting the *fQ* product of micromechanical resonators // Proc. 15 Int. Conf. on Solid-State Structures, Actuators and Microsyst. Denver, USA. 2009. P. 2131–2134.
- Moreira M., Bjurström J., Katardjev I., Yantchev V. Aluminum scandium nitride thin-film bulk acoustic resonators for wide band applications // Vacuum. 2011. V. 86. P. 23–26.