

УДК 534.63+534.86

## ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОЧАСТОТНЫХ СВЧ АКУСТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ НА ОСНОВЕ СЛОИСТОЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ “Me1/AlN/Me2/(100) АЛМАЗ”

© 2015 г. Б. П. Сорокин<sup>\*,\*\*</sup>, Г. М. Квашнин<sup>\*</sup>, А. В. Теличко<sup>\*,\*\*</sup>, Г. И. Гордеев<sup>\*,\*\*</sup>,  
С. И. Бурков<sup>\*\*\*</sup>, В. Д. Бланк<sup>\*,\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов (ТИСНУМ), Москва, Троицк

<sup>\*\*</sup>Московский физико-технический институт, Московская область, Долгопрудный

<sup>\*\*\*</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск

E-mail: bpsorokin2@rambler.ru, arseny.telichko@phystech.edu

Поступила в редакцию 08.10.2014 г.

Выполнен теоретический анализ структуры “Me1/AlN/Me1/(100) алмаз”, экспериментальные исследования проводились в области 0.5–10 ГГц на многочастотных акустических резонаторах с различной топологией электродов, изготовленных на основе структуры “Al/AlN/Mo/(100) алмаз”. Получено максимальное значение параметра качества  $Q \times f \approx 10^{14}$  Гц при  $f = 9.5$  ГГц. Для анализа слоистой структуры была разработана программа “HVAR, ver. 2.3”. Показано, что особенности в частотных зависимостях параметров таких резонаторов связаны с поведением нагруженного тонкопленочного преобразователя. Результаты расчета находятся в близком согласии с экспериментально наблюдаемыми. Рассчитаны частотные зависимости эквивалентных параметров резонаторов. Показано, что синтетический монокристалл алмаза Па типа в сочетании с нитридом алюминия является перспективным для реализации высокодобротных акустоэлектронных СВЧ-устройств.

**Ключевые слова:** сверхвысокие частоты, многочастотный акустический резонатор, синтетический алмаз, нитрид алюминия, объемная акустическая волна, пьезоэлектрическая слоистая структура, форм-фактор, добротность, СВЧ-затухание.

DOI: 10.7868/S0320791915030168

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие имеется тенденция к миниатюризации акустоэлектронных приборов и устройств на сверхвысоких частотах (СВЧ), предназначенных как для специальных, так и гражданских приложений. К настоящему времени разработаны и используются такие типы акустических резонаторов на объемных акустических волнах (ОАВ), как классические толщинные и толщинно-сдвиговые пьезорезонаторы, резонаторы с обратной меза-структурой, мембранные резонаторы (в англоязычной литературе *Thin Film Bulk Acoustic Resonator (FBAR)*) [1], резонаторы с брэгговской отражательной решеткой (*Solidly Mounted Resonator (SMR)*) [1, 2] и многочастотные (составные) резонаторы на объемных акустических волнах (далее — ОАВ-Р; в англоязычной литературе *High-overtone Bulk Acoustic Resonator (HBAR)*). Составные резонаторы на основе кварца были использованы авторами [3] для управления рентгеновскими пучками. ОАВ-Р, функционирующие на СВЧ, относятся к классу композитных акустоэлектронных устройств, которые отличаются от классических пьезорезонаторов миниатюр-

ными размерами и высокой добротностью [1]. Учитывая эти особенности, на основе ОАВ-Р могут быть созданы, например, генераторы с низким уровнем фазовых шумов [4]. Обычно многочастотный ОАВ-Р изготавливают на основе слоистой структуры, состоящей из тонкопленочного пьезоэлектрического преобразователя, нанесенного на подложку (рис. 1). Значительная часть акустической энергии концентрируется в подложке. Таким образом, для создания эффективных ОАВ-Р требуются высокодобротные монокристаллические подложки, выполненные из кристаллов с низким акустическим затуханием и высокими скоростями объемных акустических волн (ОАВ). Нанесение металлических электродов и пьезоэлектрической пленки (обычно AlN или ZnO) незначительно изменяет добротность  $Q$  нагруженной системы. В качестве подложки для ОАВ-Р известно использование монокристаллического и плавленого кварца, кремния [5], сапфира [5, 6], иттрий-алюминиевого граната (ИАГ) [7], алмаза [8]. С теоретической стороны распространение ультразвука в ОАВ-Р было изучено в работах [7, 9–12].

Описание ОАВ-Р в одномерном приближении, базирующееся на решении волновых уравнений с корректными граничными условиями, можно найти в работах [13, 14]. Результатами расчетов являются величины, непосредственно измеряемые экспериментально – импеданс  $Z$ , проводимость  $Y$ , коэффициенты отражения  $S_{11}$ , коэффициент электромеханической связи  $k^2$ , добротность  $Q$  и др. Учитываются акустические потери, все толщины и площадь электродов. В литературе также часто встречается одномерное теоретическое описание с помощью более простой модели Мэсона [15, 16], в которой слои моделируются отрезками линий передачи. В работе [17] реализован матричный аналитический подход к исследованиям слоистых пьезоэлектрических структур в одномерном приближении с учетом акустического затухания в слоях и подложках. Моделирование влияния электродов на частотные характеристики и коэффициент электромеханической связи ОАВ-Р было выполнено в работе [18]. Необходимо заметить, что структуры на основе ОАВ-Р могут быть использованы для определения материальных параметров подложек и тонких пленок [19]. Особенности работы ОАВ-Р в режиме захвата энергии исследованы авторами [20].

Известно, что в монокристаллической алмазной подложке распространяются объемные и поверхностные акустические волны с наивысшими известными скоростями. Алмаз является самым твердым кристаллическим материалом с рядом уникальных свойств, интересных с точки зрения акустоэлектроники: высокие теплопроводность, радиационная и химическая стойкости, низкое акустическое затухание и т.п. Однако на данный момент практически отсутствуют данные по исследованию акустических СВЧ-свойств данного кристалла, а также по применению его в качестве подложки в акустоэлектронных устройствах.

$$m = \frac{\cos \varphi_p \cos \varphi_M - \frac{Z_p}{Z_M} \sin \varphi_p \sin \varphi_M + i \left( \frac{Z_M}{Z} \cos \varphi_p \sin \varphi_M + \frac{Z_p}{Z} \sin \varphi_p \cos \varphi_M \right)}{\sin^2 \frac{\varphi_p}{2}}, \quad (1)$$

где  $Z_p$ ,  $Z_M$  и  $Z$  – акустические импедансы пьезоэлектрической пленки, внутреннего металлического электрода и подложки соответственно;  $\varphi_M = k_M d_M$  и  $\varphi_p = k_p d_p$  – набег фаз в слоях металлической пленки и пьезоэлектрика,  $k_M$  и  $k_p$  – волновые векторы в этих слоях,  $d_M$  и  $d_p$  – толщины слоев.

Однако в соотношении (1) не было учтено влияние внешнего металлического электрода. Для получения полной картины нами были записаны граничные условия для слоистой пьезоэлектриче-



Рис. 1. Схематичное изображение многочастотного резонатора на объемных акустических волнах.

Целью данной работы является моделирование и экспериментальное исследование акустоэлектронных СВЧ-свойств многочастотных ОАВ-резонаторов на основе пьезоэлектрических слоистых структур “Me1/AlN/Me2/(100) алмаз”.

#### РАСЧЕТ ЧАСТОТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ МНОГОЧАСТОТНОГО ОАВ-РЕЗОНАТОРА

В данном разделе рассмотрены некоторые аспекты особенностей АЧХ ОАВ-резонатора, связанные с влиянием нагруженной подложкой тонкопленочного пьезоэлектрического преобразователя (ТПП). Согласно [21], частотную зависимость акустической мощности  $W$ , излучаемой ТПП в подложку, можно свести к функции от форм-фактора  $m$ :  $W \sim |m|^{-2}$ . Форм-фактор имеет неявную зависимость от частоты:

ской структуры (рис. 1), в которой распространяется чистая продольная волна:

- 1) отсутствие механических напряжений на границе “внешний электрод–вакуум”;
- 2) непрерывность нормальных компонент тензора напряжений  $\sigma_3$  и векторов смещения  $U_3$  на границе “внешний электрод–пьезоэлектрический слой”;
- 3) непрерывность нормальных компонент тензора напряжений и векторов смещения на грани-

це “пьезоэлектрический слой—внутренний электрод”;

4) непрерывность нормальных компонент тензора напряжений и векторов смещения на границе “внутренний электрод—подложка”;

5) отсутствие механических напряжений на границе “подложка—вакуум”.

Следуя [21], можно в результате получить общую для данной слоистой структуры систему уравнений:

$$\begin{bmatrix} -e^{ik_0h_3} & e^{-ik_0h_3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{Z_0}{Z_p}e^{ik_0h_2} & \frac{Z_0}{Z_p}e^{-ik_0h_2} & iP & -iP^* & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e^{ik_0h_2} & e^{-ik_0h_2} & -e^{ik_ph_2} & -e^{-ik_ph_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & \frac{Z_M}{Z_p} & -\frac{Z_M}{Z_p} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -e^{-ik_Mh_1} & e^{ik_Mh_1} & \frac{Z}{Z_M}e^{-ik_Sh_1} & \frac{Z}{Z_M}e^{ik_Sh_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-ik_Mh_1} & e^{ik_Mh_1} & -e^{-ik_Sh_1} & -e^{ik_Sh_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e^{-ik_Sh_4} & e^{ik_Sh_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \\ a_p \\ b_p \\ a_M \\ b_M \\ a_S \\ b_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{i\tilde{\epsilon}_{33}V_0}{\omega Z_p h_2} \\ 0 \\ \frac{i\tilde{\epsilon}_{33}V_0}{\omega Z_p h_2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где введены обозначения  $P = \exp(-ik_p x_3) + \frac{i\tilde{\epsilon}_{33}^2}{\tilde{\epsilon}_{33}^{\eta} \tilde{\epsilon}_{33}^D} [\exp(ik_p x_3) - 1]$  и  $P^*$  – комплексно сопряженная величина;  $\tilde{\epsilon}_{33}^D = \tilde{\epsilon}_{33}^E + \frac{\tilde{\epsilon}_{33}^2}{\tilde{\epsilon}_{33}^{\eta}}$  – упругий модуль в продольно пьезоактивном направлении пьезоэлектрика;  $\tilde{\epsilon}_{33}^{\eta}$  – диэлектрическая проницаемость механически зажатого кристалла;  $\tilde{\epsilon}_{33}^E$  – пьезоэлектрическая константа в данном направлении;  $k_0$  и  $k_S$  – волновые векторы в верхнем

электроде и подложке соответственно;  $V_0$  – разность потенциалов, приложенная к ТПП;  $a_0$  и  $b_0$  – амплитуды смещений падающих и отраженных волн во внешнем электроде;  $a_p$  и  $b_p$  – те же величины в пьезоэлектрической пленке;  $a_M$  и  $b_M$  – те же величины во внутреннем электроде;  $a_S$  и  $b_S$  – те же величины в подложке. Однако для упрощения расчета форм-фактора достаточно принять, что волна в подложке является бегущей без отражения от границы ( $h_4 \rightarrow \infty$ ), поэтому была использована система уравнений (7 × 7):

$$\begin{bmatrix} -e^{ik_0h_3} & e^{-ik_0h_3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{Z_0}{Z_p}e^{ik_0h_2} & \frac{Z_0}{Z_p}e^{-ik_0h_2} & iP & -iP^* & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e^{ik_0h_2} & e^{-ik_0h_2} & -e^{ik_ph_2} & -e^{-ik_ph_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & \frac{Z_M}{Z_p} & -\frac{Z_M}{Z_p} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -e^{-ik_Mh_1} & e^{ik_Mh_1} & \frac{Z}{Z_M}e^{-ik_Sh_1} & \frac{Z}{Z_M}e^{ik_Sh_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-ik_Mh_1} & e^{ik_Mh_1} & -e^{-ik_Sh_1} & -e^{ik_Sh_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \\ a_p \\ b_p \\ a_M \\ b_M \\ a_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{i\tilde{\epsilon}_{33}V_0}{\omega Z_p h_2} \\ 0 \\ \frac{i\tilde{\epsilon}_{33}V_0}{\omega Z_p h_2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Решение системы (3) можно выполнить численно методом Крамера, однако, к сожалению, нельзя получить компактное аналитическое выражение, аналогичное (1). Поэтому для численного анализа частотных зависимостей параметров форм-фактора  $|m|^2$ ,  $\text{Re}(m)$  и  $\text{Im}(m)$  в слоистых пьезоэлектрических структурах нами была разра-

ботана программа “НВАР, ver. 2.3” [22], при работе с которой необходимы данные по физическим свойствам (плотность  $\rho$ , модули упругости, пьезоэлектрические и диэлектрические константы) и скоростям продольных акустических волн  $V_L$  материалов электродов, пьезоэлектрика и подложки. В расчете не учитывались значения аку-

Плотности и скорости ОАВ в металлах, используемых для моделирования ОАВ-Р

Металл	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Скорость ОАВ, м/с	Акустическое сопротивление, 10 <sup>7</sup> кг/м <sup>2</sup> с	Источник
Al	2689	6300	1.7	[25]
W	19350	5230	10.1	[26, 27]
Cu	8960	4360	3.9	[28, 29]
Ag	10500	3600	3.8	[30, 31]
Mo	9800	6400	6.3	[27]
Pt	21450	2823	6.1	[23]
Cr	7190	6000	4.3	[31]

стического затухания в слоях. В случаях анизотропных материалов использовали константы для выбранного кристаллографического направления. В качестве звукопровода здесь и в дальнейшем будем подразумевать (100) алмаз:  $\rho = 3516$  кг/м<sup>3</sup>,  $V_L = 17542$  м/с [8]; пьезоэлектрическая пленка – нитрид алюминия AlN:  $\rho = 3300$  кг/м<sup>3</sup>,  $V_L = 11428$  м/с [23, 24]. Характерные значения плотностей и скоростей ОАВ в металлических пленках приведены в таблице.

Отметим, что известные из литературы численные значения параметров металлических пленок заметно различаются в зависимости как от состояния (моно- или поликристаллические пленки), так и от толщины пленки, а также отличаются от значений в объемных материалах. Это обстоятельство служит источником неопределенности в расчетах и некоторого рассогласования с экспериментальными данными.

На рис. 2 изображен пример зависимости форм-фактора от частоты для пьезоэлектрической слоистой структуры “Al/AlN/Mo/(100) алмаз” с толщи-

нами слоев 0.107/0.88/0.13/1025 мкм, соответствующими реальному образцу.

Следует отметить, что в рассматриваемой слоистой структуре имеются особенности в поведении частотных характеристик ряда параметров, обусловленные акустической нагрузкой на ТПП со стороны подложки и металлических электродов. В конечном счете это приводит к влиянию на свойства ОАВ-Р в целом. Так, АЧХ ТПП существенно изменяется по сравнению со свободным пьезоэлектрическим резонатором: если пьезорезонатор возбуждается на частотах в областях  $(\lambda/2)n$  ( $\lambda$  – длина волны;  $n = 1, 3, \dots$ ), то ТПП будет резонировать в областях частот, близких, но не равных величинам  $(\lambda/4)n$ . Отметим, что такое резонансное поведение можно установить, исследуя частотные зависимости реальной части форм-фактора  $\text{Re}(m)$  (рис. 2). Однако указанные резонансные явления в ТПП приводят к возбуждению паразитных мод, в конечном счете снижающих добротность системы в целом, а также к изменению частоты обертонов ОАВ-Р. Оценить эффективность ТПП в заданной полосе частот можно, исследуя частотную зависимость величины  $|m|^2$ .

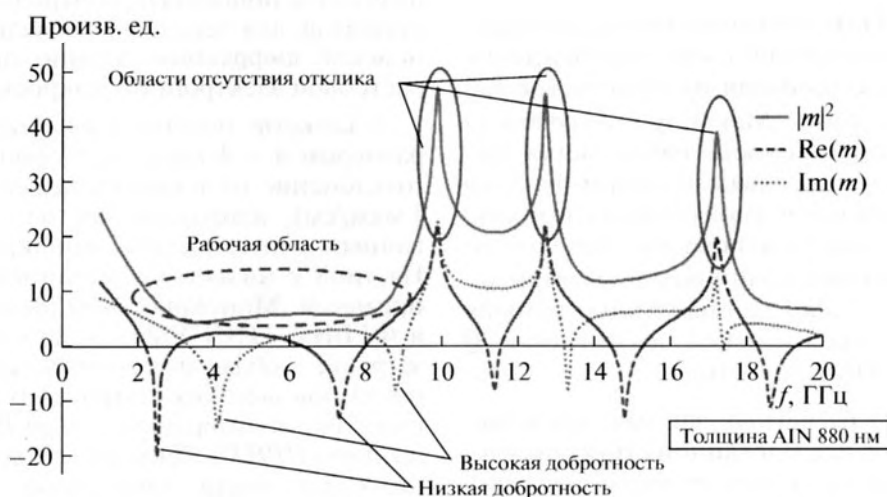


Рис. 2. Частотная зависимость форм-фактора для слоистой структуры “Al/AlN/Mo/(100) алмаз”.

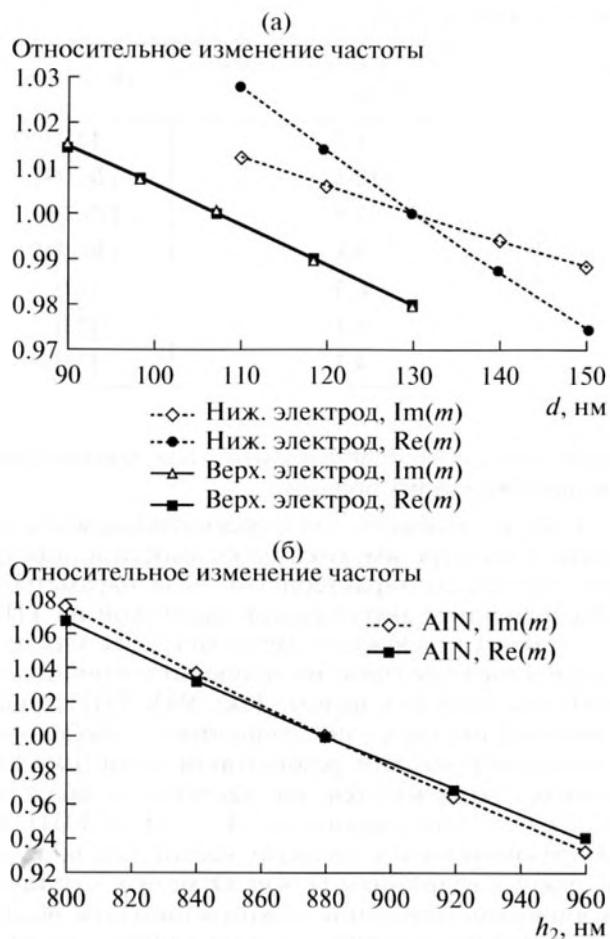


Рис. 3. Сдвиг частоты для минимумов  $Re(m)$  и  $Im(m)$  в зависимости от (а) толщины  $d$  внешнего (Al) или внутреннего (Mo) электродов и (б) толщины пленки нитрида алюминия в структуре "Al/AlN/Mo/(100) алмаз" с начальными толщинами 107/880/130 нм. Начальные положения минимумов функций  $Re(m)$  и  $Im(m)$  были определены частотами 2.588 и 4.516 ГГц соответственно.

К особенностям ОАВ-Р следует отнести возможность достижения широкой полосы возбуждения обертонов, для чего необходимы области, где выполняется  $|m|^2 \sim \text{const}$ . Максимум излучаемой ТПП акустической мощности наблюдается при минимальных значениях квадрата форм-фактора и наоборот. В рассматриваемой слоистой структуре экспериментально было показано, что сочетание условий  $|m|^2 \sim \text{const}$  и минимумов мнимой части форм-фактора  $Im(m)$  дает наилучшие условия для реализации максимальной добротности  $Q$  многочастотного ОАВ-резонатора.

Так, исходя из расчетных данных, представленных на рис. 2, в исследованной структуре следует ожидать значительного падения акустической мощности в областях частот ниже 2 ГГц, вблизи 10, 13 ГГц и т.п., что обусловлено увеличе-

нием модуля форм-фактора  $|m|^2$ . В соответствии с кривой  $Re(m)$  области с низкой добротностью, снижение которой связано с неэффективностью излучения ультразвука пьезоэлектрической пленкой AlN, должны наблюдаться в окрестности частот 2.5, 7.1, 11.5 ГГц и т.п. Напротив, вблизи частоты 4 ГГц следует ожидать достаточно высоких значений добротности.

Для достижения хорошего акустического согласования в слоистой среде необходимо использовать материалы с акустическим сопротивлением  $Z = \rho V_L$  как можно ближе к значению для алмаза  $6.2 \times 10^7$  кг/м<sup>2</sup>с. Из всех металлов, представленных в таблице, наиболее подходящим для алмаза является акустическое сопротивление молибдена.

Рисунок 3 иллюстрирует поведение минимумов действительной  $Re(m)$  (2.588 ГГц, см. рис. 2) и мнимой  $Im(m)$  (4.516 ГГц) частей форм-фактора для структуры "Al/AlN/Mo/(100) алмаз" в зависимости от толщины внешнего и внутреннего электродов, а также от изменения толщины пленки нитрида алюминия. Отметим, что увеличение толщины как внешнего, так и внутреннего электродов сдвигает минимумы и максимумы в область более низких частот (рис. 3а). Увеличение толщины слоя пьезоэлектрика AlN также влечет за собой сдвиг характерных максимумов и минимумов в сторону более низких частот (рис. 3б). Тем самым, надлежащим выбором толщин пленок в составе ТПП можно получить сочетание его оптимальных характеристик в заданном диапазоне частот.

## ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ

Технология изготовления ОАВ-резонаторов со структурой "Al/AlN/Mo/(100) алмаз" включала в себя многостадийный комплекс физико-химических процессов, поэтому было необходимо осуществлять пошаговый контроль получаемых результатов, для чего использовали методы рентгеновской дифракции, атомно-силовой (АСМ) и растровой электронной микроскопии (РЭМ).

В качестве подложек использовали пластины размером  $4 \times 4$  мм с двусторонней полировкой (отклонение от плоскопараллельности не более 1 мкм/см), изготовленные из (100) ориентированных синтетических монокристаллов алмаза Па типа с низким содержанием азота и других примесей. Монокристаллы были синтезированы в ФГБНУ ТИСНУМ методом выращивания на затравке в области термодинамической стабильности при высоких статических давлениях (в англоязычной литературе — *High Pressure High Temperature (HPHT)*). Данный метод относится к технологиям роста кристаллов из раствора в расплаве. Контроль кристаллографической ориентации осуществляли с помощью рентгеново-

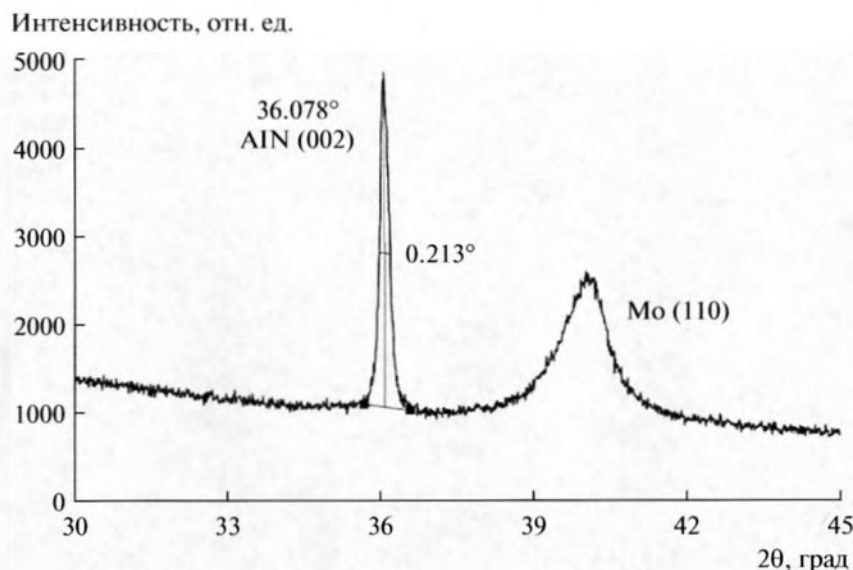


Рис. 4. Рентгеновская дифрактограмма образца-спутника “AlN/Mo/стекло”. Измерения выполнены на установке Empyrean (Panalytic).

го дифрактометра с точностью  $\pm 10'$ . Шероховатость полированных поверхностей проверялась с помощью метода атомно-силовой микроскопии на установке Ntegra Prima и находилась в пределах  $R_a = 0.7 \dots 1.7$  нм ( $100 \times 100$  мкм). С помощью метода дифракции упруго отраженных электронов и наблюдения структуры хорошо разрешенных линий Кикучи было показано, что глубина нарушенного приповерхностного слоя составляет менее 20–30 нм. Нанесение металлических электродов и пьезоэлектрической пленки AlN производилось методом магнетронного напыления на установке AJA ORION 8. На рис. 4 показана рентгеновская дифрактограмма образца-спутника “AlN/Mo/стекло”, из которой следует, что имеется преимущественная ориентация пленки AlN (002), а полная ширина данного рефлекса на половине высоты составляет  $0.213^\circ$ . На рис. 5 приведены РЭМ-изображения поверхности и поперечного скола образца-спутника “AlN/Mo/Si”. Наблюдается характерная морфология пленки AlN с размерами кристаллитов 30–50 нм. Более подробно описание использованных технологических процессов приведено в [32]. Помимо масок, в случае необходимости нанесения электродных структур с заданной топологией и/или микронных размеров применялся метод фотолитографии, как стандартной, так и взрывной, на установке лазерной литографии Heidelberg  $\mu$ PG 101. В обязательном порядке взрывную фотолитографию использовали для формирования заданного рельефа пленок AlN.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

СВЧ-исследования ОАВ-резонаторов производились с помощью экспериментальной установки, показанной на рис. 6а. В ее состав входит векторный анализатор цепей E5071C (300 кГц–20 ГГц) и зондовая станция M-150. Исследования проводили в режиме “на отражение”, подключая тестовое устройство с помощью зонда ACP40-A-SG-500 (расстояние между наконечниками 500 мкм). Пример экспериментального образца показан на рис. 6б, где на алмазной подложке размещены девять индивидуальных ОАВ-резонаторов различной конфигурации. Исследована слоистая структура “Al/AlN/Mo/(100) алмаз” с толщинами слоев 0.164/0.624/0.169/392 мкм соответственно. Маркировка резонаторов показана на рис. 6в.

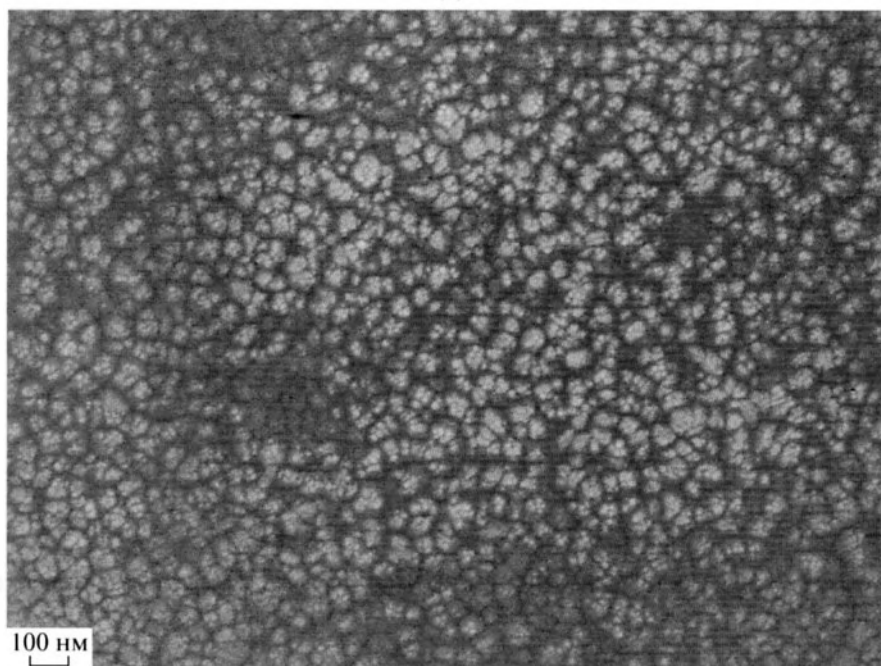
Частотные зависимости коэффициента отражения  $S_{11}$  и импеданса  $Z_{11}$  были исследованы в интервале частот 0.5–10 ГГц. Были проанализированы АЧХ и ФЧХ, диаграммы Смита. В силу особенностей измерений резонансных свойств ОАВ-Р на отражение наблюдались резонансные пики, соответствующие только параллельному резонансу. Поэтому в качестве экспериментальных параметров измеряли частоты параллельных резонансов  $f_{p,n}$  для  $n$ -х обертонов, а также частотные промежутки между обертонами:

$$\Delta f = f_{p,n+1} - f_{p,n} \approx V_L/2h_4 \quad (4)$$

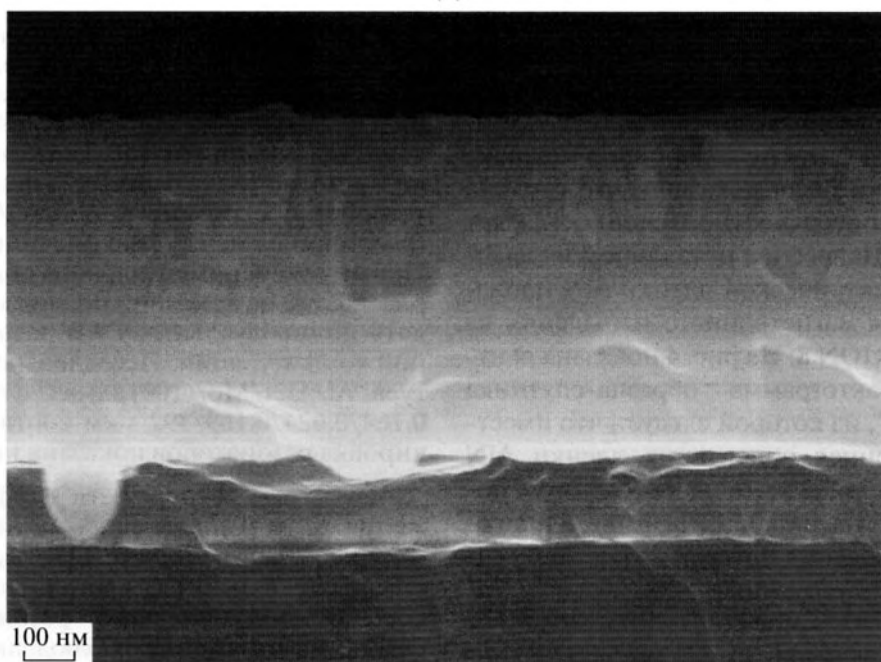
и их добротности

$$Q_{n(-3dB)} = \frac{f_{p,n}}{\delta f} \quad (5)$$

(a)



(б)

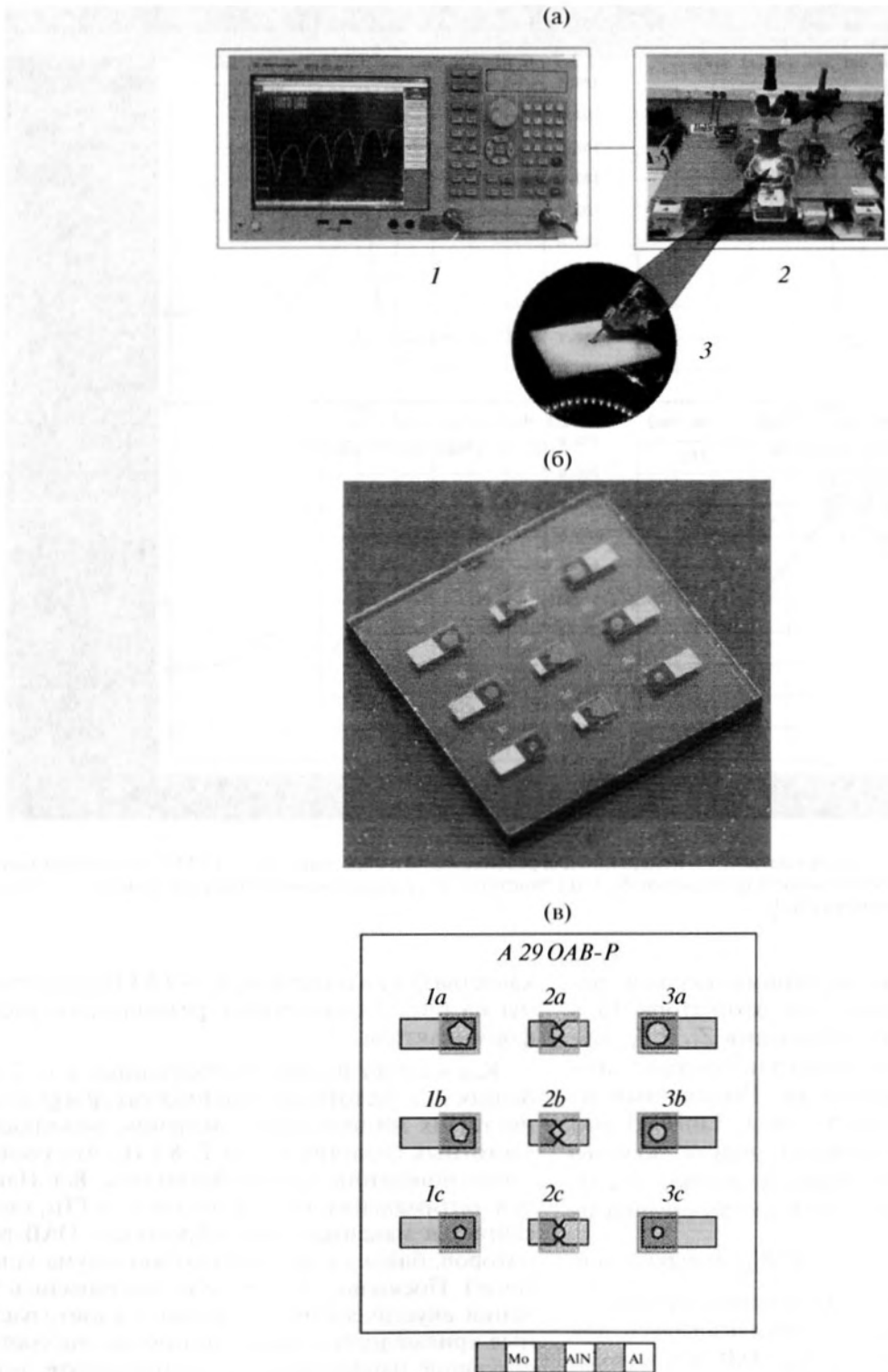


**Рис. 5.** (а) РЭМ изображения поверхности (увеличение 50000×) и (б) поперечного скола (увеличение 70000×) образца-спутника "AlN/Mo/Si". Исследования выполнены с помощью растрового электронного микроскопа высокого разрешения JSM-7600F (JEOL).

Полоса пропускания  $\delta f$  измерялась на уровне  $-3$  дБ. Отметим также, что выполняется соотношение  $\Delta f = f_1$  (частота возбуждения первого (основного) обертона). Второй метод определения добротности базировался на соотношении

$$Q_{n,\tau_d} = \frac{1}{2} \omega_n \left| \frac{d\varphi_n}{d\omega_n} \right| = \pi \tau_d f_{p,n}, \quad (6)$$

где  $\omega_n = 2\pi f_n$ ,  $\varphi_n$  — угол сдвига фаз,  $\tau_d$  — время групповой задержки.



**Рис. 6.** (а) Экспериментальная установка для СВЧ-исследований QAW-резонаторов: 1 – векторный анализатор цепей E5071C; 2 – зондовая станция M-150; 3 – тестируемое устройство; (б) QAW-резонаторы с различной конфигурацией внешнего электрода (структура Al/AlN/Mo/(100) алмаз); (в) маркировка QAW-резонаторов с различными конфигурациями и площадями внешнего электрода, равными: 1а и 3а – 39973 мкм<sup>2</sup>; 1б и 3б – 22484 мкм<sup>2</sup>; 2а, 2б, 1с, 2с и 3с – 10000 мкм<sup>2</sup>.

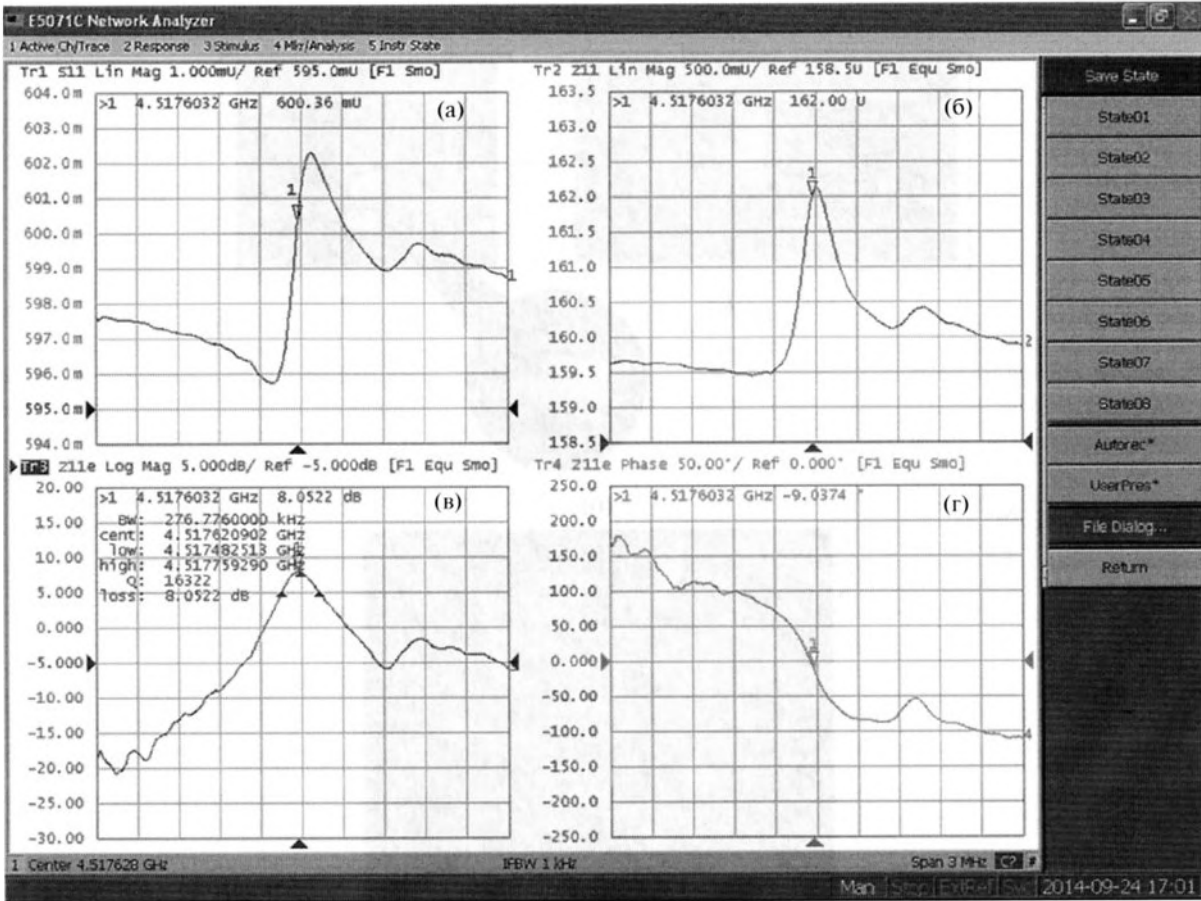


Рис. 7. Экспериментальные результаты СВЧ-измерений для резонатора 1b в окрестности  $f_p \approx 4.5$  ГГц: (а) коэффициент отражения  $S_{11}$  (мода LinMag); модули (б) полного  $Z_{11}$  и (в) “чистого”  $|Z_{11e}|$  импедансов тестового устройства; (г) изменение фазы сигнала в окрестности  $f_p$ .

На рис. 7 показаны экспериментальные результаты СВЧ-измерений для резонатора 1b в окрестности  $f_p \approx 4.5$  ГГц. Символами  $Z_{11}$  и  $Z_{11e}$  будем обозначать модули полного и “чистого” импедансов тестового устройства. Показанный на рис. 7а модуль величины  $S_{11}$  (мода LinMag) был обработан с целью получения модуля полного импеданса  $Z_{11}$  (рис. 7б). Далее величина “чистого” импеданса  $|Z_{11e}|$  (рис. 7в) была вычислена из разности  $|Z_{11e}| = |Z_{11}| - |Z'_{11}|$ , где  $|Z'_{11}|$  измеряли вне акустического резонанса. Полученная в итоге зависимость  $|Z_{11e}|$  от частоты использовалась для определения добротности  $Q_{-3\text{дБ}}$  ОАВ-резонатора. Вся последовательность обработки данных осуществлялась с помощью анализатора E5071C. Наконец, на рис. 7г показано изменение фазы сигнала. Ее нулевое значение соответствовало частоте параллельного резонанса.

Для резонаторов 1a, 1b и 1c полученные из эксперимента частотные зависимости промежутков между обертонами  $\Delta f$ , добротности  $Q$  и параметра

качества  $Q \times f$  в интервале 0.5–9.5 ГГц представлены на рис. 8 совместно с результатами расчета форм-фактора.

Как следует из рис. 8, отмеченные в п. 2 особенности в частотных зависимостях  $\Delta f$  и  $Q$ , в частности, их минимальные значения, возникают в частотных областях 2–3 и 7–8 ГГц, что соответствует поведению кривой  $\text{Re}(m)$  (рис. 8г). Напротив, оптимальная область частот 4–6 ГГц, где достигается максимальная добротность ОАВ-резонаторов, близка к положению минимума кривой  $\text{Im}(m)$ . Поскольку в расчете не учитывались значения акустического затухания в слоях, расчетные кривые имеют узкие минимумы, не соответствующие наблюдаемым в эксперименте, но являющиеся сравнительно точными индикаторами, которые помогают заранее предсказать примерную АЧХ реальных резонаторов.

Используя соотношение (4) и оценивая скорость продольной акустической волны  $V_L$  в алмазе в направлении (100), с помощью максимальных значений  $\Delta f$  (рис. 8а) можно получить значение  $V_L = 17522$  м с<sup>-1</sup>, близкое к данным акустических

измерений ( $17542 \text{ м с}^{-1}$  [8]). Различие можно объяснить наличием акустической нагрузки алмазной подложки слоистым ТПП.

Рисунок 8б показывает, что нагруженная добротность резонаторов немонотонно уменьшается с ростом частоты, при этом наблюдаются локальные минимумы и максимумы. Так, на частотах 0.76, 4.5 и 9.5 ГГц добротность резонатора 1b достигает значений 35200, 18500 и 10500 соответственно. Следует отметить, что серия ОАВ-резонаторов 1a–1c, отличающаяся формой электродов в виде неправильных пятиугольников, показала наилучшие результаты по добротности в сравнении с серией 3a–3c, имеющих круглые электроды с площадями, соответствующими серии 1a–1c. Сравнительно более высокие значения добротности получены на резонаторе 1b.

Важной характеристикой материала подложки резонатора служит параметр качества  $Q \times f$  (рис. 8в). Известно, что для фундаментального фонов-фоннонного вклада в затухание акустических волн должна выполняться зависимость  $\alpha \sim \omega^2$  (в приближении Ахиезера [33]). Как следствие, в этом случае для параметра качества имеет место соотношение  $Q \times f = \text{const}$ , где значение константы зависит от свойств материала (см., например [34]). Однако наблюдаемая нами частотная зависимость  $Q \times f$  не соответствует данной формуле, что может быть связано как с влиянием неучтенных механизмов поглощения, так и с особенностями работы многочастотного ОАВ-резонатора. Поскольку с ростом частоты наблюдается немонотонное возрастание параметра качества, данное обстоятельство может быть перспективным с точки зрения реализации ОАВ-резонаторов и на более высокие частоты. Следует отметить, что максимальное значение параметра качества для ОАВ-резонатора на основе синтетического алмаза, полученное в данном эксперименте, составляет  $Q \times f \approx 10^{14} \text{ Гц}$  при  $f = 9.5 \text{ ГГц}$ , что либо превосходит, либо соответствует достигнутому в мировой практике результатам на других материалах подложки.

### ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

С практической точки зрения большое значение имеют эквивалентные параметры ОАВ-резонатора, позволяющие рассчитывать АЧХ, ФЧХ и другие характеристики и обеспечивать оптимальные схемотехнические решения. Известен ряд эквивалентных схем для композитных акустических резонаторов. Так, авторы [6] в приложении к ОАВ-резонатору использовали последовательно-параллельный контур – модифицированную схему Баттерурта–Ван Дайка (БВД). Г. Кайно [35] рассмотрел эквивалентную схему для нагруженного электродами конечной толщины пьезообразователя на гармониках в виде последовательно соединенных параллельных контуров.

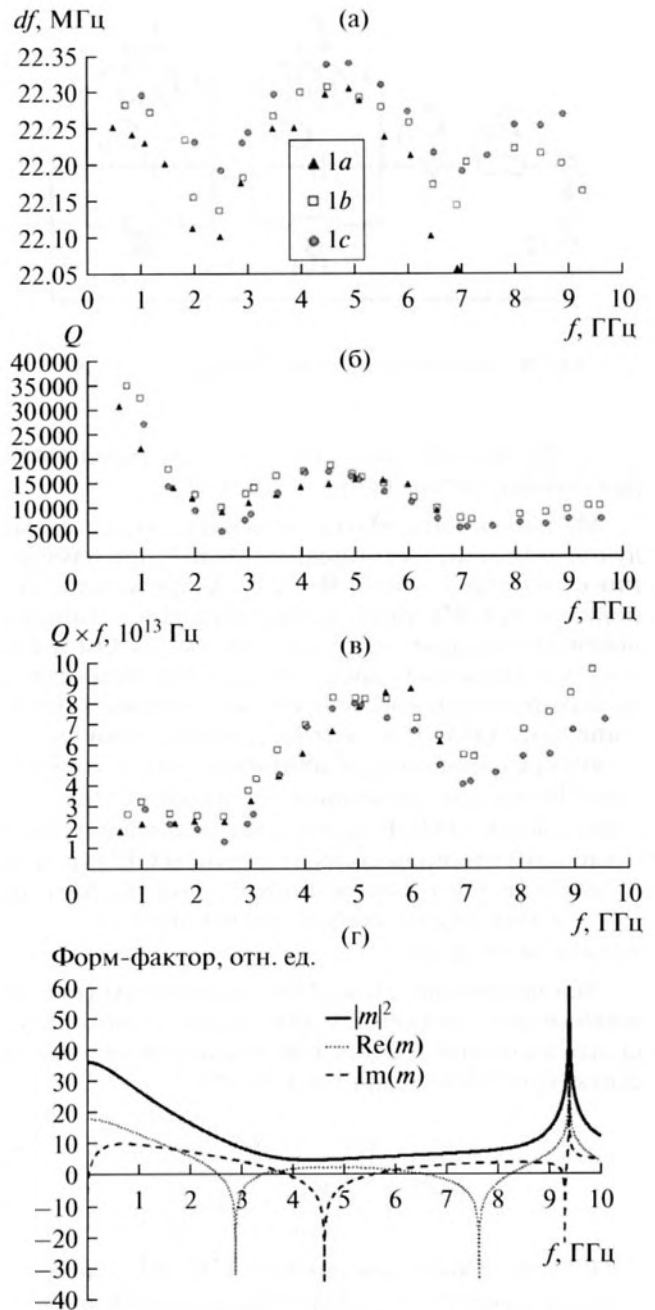


Рис. 8. (а) Частотные зависимости промежутков между обертонами  $\Delta f$ , (б) добротности  $Q$ , (в) параметра качества  $Q \times f$  и (г) форм-фактора для ОАВ-резонаторов 1a, 1b и 1c.

Г. Кайно также показал, что при определенной перенормировке эквивалентных параметров такой преобразователь можно описать и схемой БВД, которая удобна, когда преобразователь работает вблизи частоты последовательного резонанса и вещественная часть его входного импеданса мала по сравнению с таковой при параллельном резонансе. В развитие результатов [35] авторами

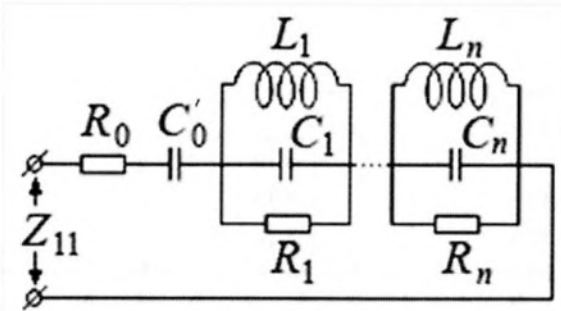


Рис. 9. Эквивалентная схема ОАВ-резонатора [9].

[7, 9, 10] предложена эквивалентная схема ОАВ-резонатора, изображенная на рис. 9.

Можно указать, что такая эквивалентная схема лучше подходит для описания ОАВ-Р при измерениях “на отражение”. В этом случае можно использовать СВЧ-тракт микроволновой станции с высоким входным сопротивлением (50 Ом и более), что позволяет достаточно точно определить на антирезонансной частоте экстремумы модуля импеданса ОАВ-Р и, соответственно, сами частоты антирезонанса  $\omega_{p,n}$  и добротности  $Q_n$   $n$ -го обертона. На частоте резонанса  $\omega_{s,n}$  малое входное сопротивление ОАВ-Р включается последовательно с высоким входным сопротивлением СВЧ тракта, вследствие чего точное определение минимума  $|Z_{11}|$  (максимума модуля проводимости  $|Y_{11}|$ ) крайне затруднено.

Эквивалентная схема ОАВ-резонатора (рис. 9) обоснована выражением для входного электрического импеданса слоистой пьезоэлектрической структуры ОАВ-резонатора [9, 35]

$$Z_e = \frac{1}{i\omega C_0'} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1/i\omega C_n}{\left(\frac{\omega_{p,n}}{\omega}\right)^2 - 1 + \frac{i}{Q_n}}, \quad (7)$$

где  $C_n$  – динамическая емкость ТПП,  $Q_n$  – добротность  $n$ -го обертона. Подробный анализ, выполненный авторами [9], показал, что величина  $C_0'$  состоит из трех последовательно включенных емкостей

$$C_0' = \frac{C_0 C_0^+(n) C_0^s(n)}{C_0 C_0^+(n) + C_0 C_0^s(n) + C_0^+(n) C_0^s(n)}, \quad (8)$$

где  $C_0$  – статическая емкость ТПП, а  $C_0^+(n)$  и  $C_0^s(n)$  зависят от номера возбуждаемой гармоники. Однако оценки показывают, что при больших  $n$  выполняются неравенства  $C_0^+(n) \gg C_0$  и  $C_0^s(n) \gg C_0$ , что в соответствии с (8) дает  $C_0' \approx C_0$ .

Процедура определения эквивалентных параметров ОАВ-Р состояла в следующих этапах:

1. Экспериментальное измерение частот  $\omega_{p,n}$  по максимуму  $|Z_{11}|$ .
2. Измерение значений  $\text{Re } Z_{11}(\omega')$  и  $\text{Im } Z_{11}(\omega')$  на частотах  $\omega'$  вне характеристической частоты  $\omega_{p,n}$ , например в промежутке между  $\omega_{p,n-1}$  и  $\omega_{p,n}$ .
3. Вычисление  $Z_{11e}(\omega)$  путем вычитания  $\text{Re } Z_{11}(\omega')$  и  $\text{Im } Z_{11}(\omega')$  из  $\text{Re } Z_{11}(\omega_{p,n})$  и  $\text{Im } Z_{11}(\omega_{p,n})$  соответственно.
4. Экспериментальное определение  $Q_n$  на уровне  $-3$  дБ из частотной зависимости  $|Z_{11e}|$  вблизи  $\omega_{p,n}$ .
5. Расчет статической емкости ТПП согласно соотношению

$$C_0 = -\frac{1}{\omega_{p,n} \text{Im } Z_{11}(\omega')}. \quad (9)$$

6. Определение экспериментального значения активного сопротивления ОАВ-Р с помощью выражения

$$R_n(\omega_{p,n}) = \max(\text{Re } Z_{11e}). \quad (10)$$

7. Расчет эффективного коэффициента электромеханической связи (КЭМС), используя соотношение

$$k_{\text{эфф},n}^2 = \frac{\omega_{p,n} C_0 R_n}{Q_n}. \quad (11)$$

8. Определение динамической емкости ОАВ-Р согласно формуле

$$C_n = \frac{Q_n}{\omega_{p,n} R_n}. \quad (12)$$

9. Наконец, вычисление динамической индуктивности ОАВ-Р в соответствии с

$$L_n = \frac{R_n}{\omega_{p,n} Q_n}. \quad (13)$$

Рисунок 10 представляет результаты расчета частотных зависимостей эквивалентных параметров ОАВ-резонаторов серии 1a, 1b и 1c, имеющих электроды пятиугольной формы и различающихся площадью. Немонотонные особенности в поведении  $L_n$ ,  $R_n$  и КЭМС в областях 2–3 и 6–7 ГГц обусловлены резонансным характером возбуждения ТПП (ср. рис. 8г). Резкое увеличение  $C_n$  в области низких частот связано с уменьшением  $k_{\text{эфф},n}$  вследствие ослабления эффективности ТПП. Как следует из рис. 10в, заметное уменьшение активного сопротивления  $R_n$  можно связать с увеличением площади (емкости  $C_0$ ) ОАВ-резонаторов в ряду от 1c к 1a.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основе слоистой пьезоэлектрической структуры “Al/AlN/Mo/(100) алмаз” были изготовлены и исследованы на СВЧ многочастотные ОАВ-резонаторы с различной площадью и топологией электродов. Показано, что такие резона-

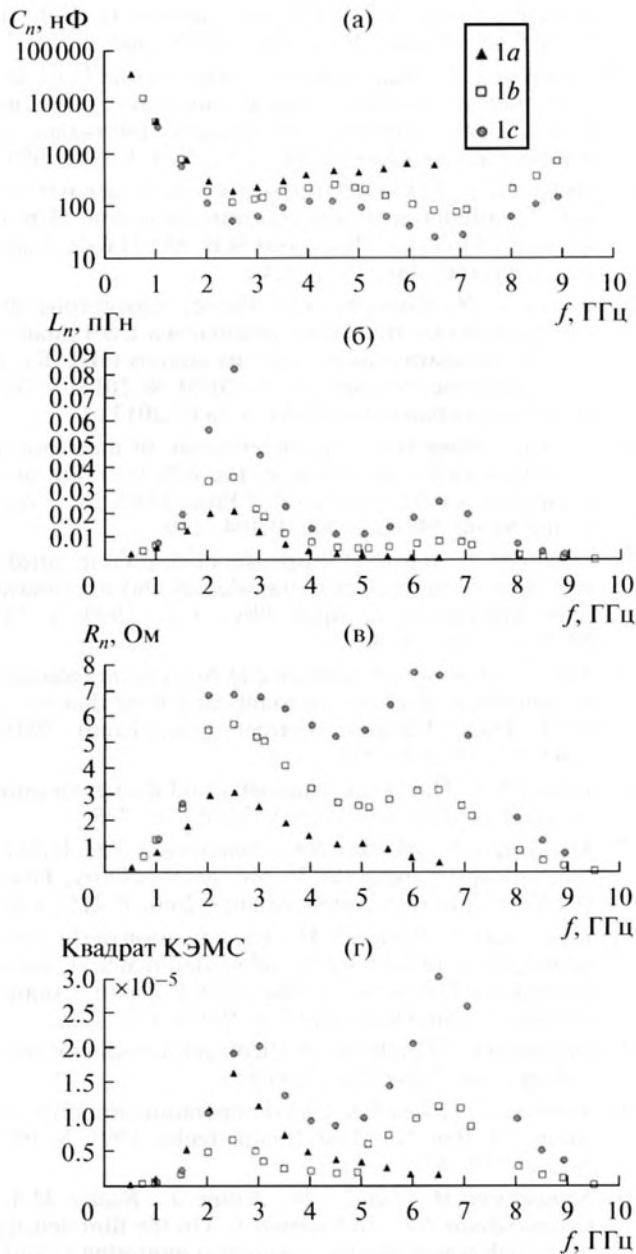


Рис. 10. Частотные зависимости эквивалентных параметров ОАВ-резонаторов 1а, 1b и 1с: (а) динамическая емкость; (б) динамическая индуктивность; (в) активное сопротивление; (г) квадрат коэффициента электромеханической связи.

торы имеют высокие значения добротности на СВЧ, причем максимальное значение параметра качества  $Q \times f \approx 10^{14}$  Гц при  $f = 9.5$  ГГц соответствует лучшим достигнутым в мировой практике результатам. Дальнейшая оптимизация конструкции и технологии изготовления позволит продвигаться и в область более высоких частот, поскольку с ростом частоты наблюдается немонотонное возрастание параметра качества.

Для анализа слоистой пьезоэлектрической структуры была разработана программа "НВАР, ver. 2.3". Было показано, что немонотонный характер частотных зависимостей параметров ОАВ-резонатора связан, прежде всего, с особенностями возбуждения нагруженного тонкопленочного преобразователя в окрестности частот, близких, но не равных величинам  $(\lambda/4)n$ . Наилучшие результаты с точки зрения добротности и параметра качества ОАВ-резонатор демонстрирует в окрестности минимума мнимой части форм-фактора  $\text{Im}(m)$ . Результаты расчета находятся в близком согласии с экспериментально наблюдаемыми зависимостями. Отметим также, что эффект смещения характеристических частот ОАВ-резонатора в зависимости от толщины электродов может быть положен в основу высокочувствительной методики определения толщин сверхтонких пленок.

На основе модели ОАВ-резонатора и его эквивалентной схемы, предложенной авторами [9], были рассчитаны эквивалентные параметры, имеющие практическое значение. Как и в экспериментальных АЧХ, немонотонные особенности в поведении  $L_n$ ,  $R_n$  и КЭМС в областях 2–3 и 6–7 ГГц обусловлены резонансным характером возбуждения ТПП.

Можно утверждать, что применение синтетического монокристалла алмаза Па типа в качестве материала подложки ОАВ-резонатора в сочетании с ТПП из нитрида алюминия является перспективным для реализации акустоэлектронных устройств в широкой области СВЧ.

Работа выполнена в рамках соглашения № 14.574.21.0074 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57414X0074) при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ с использованием оборудования ЦКП "Исследование наноструктурных, углеродных и сверхтвердых материалов" (ФГБНУ ТИСНУМ).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lakin K.M. Thin film resonator technology // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2005. V. 52. № 5. P. 707–716.
2. Двоешерстов М.Ю., Чередник В.И., Босов С.И., Орлов И.Я., Руденко О.В. Численный и экспериментальный анализ параметров акустоэлектронного тонкопленочного СВЧ-резонатора // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 5. С. 569–577.
3. Благов А.Е., Даринский А.Н., Ковальчук М.В., Писаревский Ю.В., Просеков П.А., Таргонский А.В. Рентгеноакустические резонаторы для управления пространственными характеристиками рентгеновского излучения // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 5. С. 561–568.
4. Driscoll M.M., Jelen R.A., Matthews N. Extremely low phase noise UHF oscillators utilizing high-overtone, bulk-acoustic resonators // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 1992. V. 39. № 6. P. 774–779.

5. 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.
6. Baumgartel L., Kim E.S. Experimental optimization of electrodes for high  $Q$ , high frequency HBAR / *Proc. IEEE Int. Ultrason. Symp. Rome, 2009.* P. 2107–2110.
7. Mansfeld G.D., Alekseev S.G., Polzikova N.I. Unique properties of HBAR characteristics // *Proc. IEEE Int. Ultrason. Symp. Beijing, 2008.* P. 439–442.
8. Sorokin B.P., Kvashnin G.M., Volkov A.P., Bormashov V.S., Aksenenkov V.V., Kuznetsov M.S., Gordeev G.I., Telichko A.V. AlN/single crystalline diamond piezoelectric structure as a high overtone bulk acoustic resonator // *Appl. Phys. Lett.* 2013. V. 102. P. 113507.
9. 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.
10. Алексеев С.Г., Мансфельд Г.Д. Простой способ измерения добротности и затухания в акустических резонаторах // *Радиотехн. Электрон.* 2008. Т. 53. № 1. С. 122–126.
11. Алексеев С.Г., Мансфельд Г.Д., Ползикова Н.И., Котельянский 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.
12. Pao S.Y., Chao M.C., Wang Z., Chiu C.H., Lan K.C., Huang Z.N., Shih L.R., Wang C.L. Analysis and experiment of HBAR frequency spectra and applications to characterize the piezoelectric thin film and to HBAR design / *Proc. IEEE Int. Ultrason. Symp. New Orleans, 2002.* P. 27–35.
13. Nowotny H., Benes E. General one-dimensional treatment of the layered piezoelectric resonator with two electrodes // *J. Acoust. Soc. Am.* 1987. V. 82. № 2. P. 513–521.
14. Cherednick V.I., Dvoesherstov M.Y. Surface and bulk acoustic waves in multilayer structures / *Waves in Fluids and Solids, Chapter 3.* Ed. Ruben Pico Vila. Croatia, 2011. P. 69–102.
15. Rosenbaum J.F. *Bulk Acoustic Wave Theory and Devices.* Boston: Artech House, 1988.
16. Zhang Y., Wang Z., Cheeke J., David N. Resonant spectrum method to characterize piezoelectric films in composite resonators // *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.* 2003. V. 50. № 3. P. 321–333.
17. Sveshnikov B., Nikitov S., Suchkov S. On universal modeling of the bulk acoustic wave devices / *Modeling and Measurement Methods for Acoustic Waves and for Acoustic Materials, Chapter 10.* Ed. Beghi M.G. In-Tech, 2013. P. 213–240.
18. Zhang H., Wang Z., Zhang S.Y. Electrode effects on frequency spectra and electromechanical coupling factors of HBAR // *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.* 2005. V. 52. № 6. P. 1020–1025.
19. Zhou C., Pang W., Li Q., Yu H., Hu X., Zhang H. Extracting the electromechanical coupling constant of piezoelectric thin film by the high-tone bulk acoustic resonator technique // *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.* 2012. V. 59. № 5. P. 958–962.
20. Алексеев С.Г., Мансфельд Г.Д., Ползикова Н.И. Захват энергии колебаний в составных акустических резонаторах на основе кубических кристаллов // *Радиотехн. Электрон.* 2006. Т. 51. № 8. С. 984–990.
21. Дьелесан Э., Руаиё Д. Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов. Пер. с франц. / Под ред. Леманова В.В. М.: Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1982. 424 с.
22. Бурков С.И., Сорокин Б.П. Расчет характеристик составного акустического резонатора СВЧ диапазона на объемных акустических волнах (HBAR) // Свид-во о гос. рег. прогр. для ЭВМ № 2013616768 (Реестр программ для ЭВМ от 18.07.2013 г.).
23. Chen Q., Wang Q.M. Characterization of mechanical and piezoelectric properties of the AlN thin film in a composite resonator structure / *Proc. IEEE Int. Freq. Contr. Symp. Miami, 2006.* P. 104–110.
24. Dubois M.A., Murali P. Properties of aluminum nitride thin film for piezoelectric transducers and microwave filter applications // *Appl. Phys. Lett.* 1999. V. 74. № 20. P. 3032–3034.
25. Lee Y.C., Kim J.O., Achenbach J.D. Acoustic microscopy measurement of elastic constants and mass density // *IEEE Trans. Ultrason. Ferroel. Freq. Contr.* 1995. V. 42. № 2. P. 253–264.
26. Davey W.P. The lattice parameter and density of pure tungsten // *Phys. Rev.* 1925. V. 26. P. 736–738.
27. Mansfeld G.D., Alekseev S.G., Kotelyansky I.M. HBAR spectroscopy of metal (W, Ti, Mo, Al) thin films / *Proc. IEEE Int. Ultrason. Symp. Atlanta, 2001.* P. 415–418.
28. Kielczynski P., Szalewski M. Determination of the elastic properties of thin layers and graded materials using generalized Love waves / *Proc. IEICE Techn. Comm. Ultrason. Conf. Osaka, 2010.* V. 109. P. 117–122.
29. Diebold A.C. *Handbook of silicon semiconductor metrology.* CRC Press, 2001. 896 p.
30. Smith D.R., Fickett F.R. Low-temperature properties of silver // *J. Res. Nat. Inst. Stand. Techn.* 1995. V. 100. № 2. P. 119–171.
31. Samuelsson M., Lundin D., Jensen J., Raadu M.A., Gudmundsson J.T., Helmersson U. On the film density using high power impulse magnetron sputtering // *Surf. Coat. Techn.* 2010. V. 205. № 2. P. 591–596.
32. Бормашов В.С., Волков А.П., Голованов А.В., Гордеев Г.И., Квашиин Г.М., Сорокин Б.П., Теличко А.В. Технология изготовления СВЧ пьезоэлектрических преобразователей на основе пленки AlN, нанесенной на подложку из синтетического монокристалла алмаза // *Изв. вузов. Химия и хим. техн.* 2014. Т. 57. № 5. С. 17–21.
33. Ахиезер А. О поглощении звука в твердых телах // *ЖЭТФ.* 1938. Т. 8. № 12. С. 1318–1329.
34. Tabrizian R., Rais-Zadeh M., Ayazi F. Effect of phonon interactions on limiting the  $f \cdot Q$  product of micromechanical resonators / *Proc. 15 Int. Conf on Solid-State Structures, Actuators and Microsyst. Denver, 2009.* P. 2131–2134.
35. Кайно Г. Акустические волны. Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов. Пер. с англ. / Под ред. Руденко О.В. М.: Мир, 1990. 656 с.