

УДК 548:53+534.22

ЧИСЛЕННЫЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ АКУСТОЭЛЕКТРОННОГО ТОНКОПЛЕНОЧНОГО СВЧ-РЕЗОНАТОРА

© 2013 г. М. Ю. Двошерстов, В. И. Чередник, С. И. Босов, И. Я. Орлов, О. В. Руденко

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23

E-mail: Dvoesh1@mail.ru

Поступила в редакцию 25.03.2013 г.

Представлены результаты численного и экспериментального анализа параметров одночастотного сверхвысокочастотного (СВЧ) тонкопленочного акустоэлектронного резонатора на основе пьезопленки (0001)AlN с акустическим отражателем, работающего на частоте 10 ГГц. Рассмотрено влияние конструкции отражателя на характеристики резонатора. Применяя модифицированную модель Баттерворта–Ван Дейка, показано, что омическое сопротивление электродов и подводящих дорожек существенно снижает добротность на частоте последовательного резонанса, а акустические потери в резонаторе снижают добротность на частоте параллельного резонанса.

Ключевые слова: моделирование волновых процессов, акустоэлектронный тонкопленочный резонатор, сенсор.

DOI: 10.7868/S0320791913050079

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдается растущий интерес к тонкопленочным акустоэлектронным СВЧ-резонаторам на объемных акустических волнах (ОАВ) и радиотехническим устройствам (фильтры, дуплексоры) на их основе. Он обусловлен тем, что по сравнению с аналогичными устройствами на акустических волнах иного типа [1–8] тонкопленочные резонаторы на ОАВ имеют на порядок меньшие массо-габаритные размеры и могут работать на более высоких частотах в диапазоне 2–12 ГГц. В то же время, резонаторы такого типа – это основа для разработки сенсоров физических и механических величин, а также биосенсоров в “чип-исполнении”. Принцип действия таких сенсоров основывается на сверхвысокой чувствительности активной области резонатора к параметрам внешней среды [9, 10]. Такие сенсоры прежде всего востребованы в различных областях медицины, где чрезвычайную роль играет своевременное и точное определение общего состояния человека для постановки диагноза и назначения правильного лечения. Ключевыми параметрами таких сенсоров являются точность, размер и возможность беспроводного снятия показаний. Это позволяет делать на основе чип-сенсоров имплантаты, позволяющие проводить мониторинг состояния человека в течение длительного времени.

Как известно [11, 12], одночастотный тонкопленочный акустоэлектронный СВЧ-резонатор, работающий на продольных ОАВ, состоит из тонкой пьезопленки (например (0001)AlN), на верхней и нижней поверхностях которой расположе-

ны металлические электроды. Акустическая изоляция резонатора от подложки может быть выполнена двумя различными способами. В первом из них используется микрообработка для создания воздушного слоя между нижним электродом резонатора и подложкой. Это так называемый FBAR-резонатор (film bulk acoustic resonator). Другой способ заключается в использовании структуры, смонтированной на подложке, в которой между резонатором и подложкой помещается акустический отражатель, служащий для предотвращения акустического взаимодействия активной зоны резонатора с подложкой. Конструкция такого резонатора, именуемого SMR-BAW (solidly mounted resonator-bulk acoustic wave), показана на рис. 1. Основные параметры SMR-BAW резонатора, характеризующие его качество, существенно зависят от конструкции акустического отражателя.

РЕЗОНАТОР С ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВЫМ БРЭГГОВСКИМ ОТРАЖАТЕЛЕМ

Обычно при конструировании SMR-BAW резонатора используется акустический отражатель брэгговского типа [12]. Брэгговский отражатель обеспечивает эффективную локализацию продольной моды колебаний в материале пьезоактивного слоя. Он представляет собой многослойную периодическую структуру, состоящую из n пар слоев материалов, имеющих существенно различную величину акустического импеданса $Z_a = \rho V$ (на единицу поверхности), где ρ – плотность материала слоя, V – скорость продольной

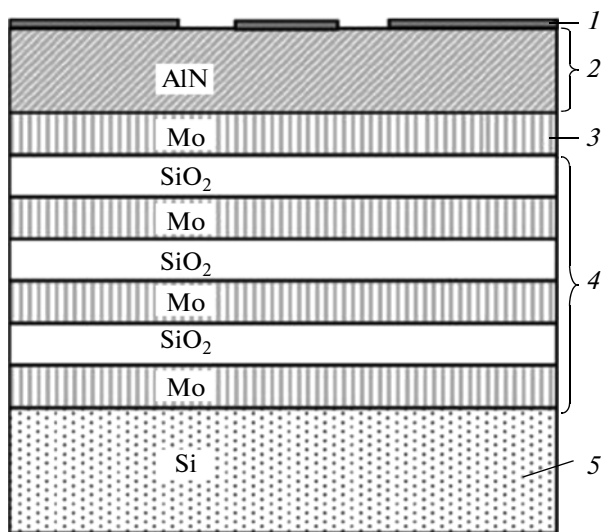


Рис. 1. SMR-BAW резонатор. 1 – в. электрод, 2 – пьезопластина, 3 – н. электрод, 4 – акустический отражатель, 5 – подложка.

объемной акустической волны; толщина каждого слоя $\lambda/4$, где λ – длина продольной ОАВ в материале слоя.

Если толщина слоя составляет четверть длины волны, фаза отраженной волны отличается от фазы падающей волны на 180° после отражения от нижней поверхности первого слоя брэгговского отражателя. Интерференция падающей и отраженной волн делает первый брэгговский слой, а затем и каждый последующий слой, зеркалом, отражающим акустическую энергию обратно в резонатор.

Стек брэгговского отражателя работает, отражая некоторую часть акустической энергии продольных колебаний обратно в резонатор на каждой границе раздела слоев. Чем сильнее отличаются акустические свойства слоев пары, тем

эффективнее происходит отражение на границах слоев и тем меньшее количество пар может быть в отражателе. На рис. 2 показаны значения акустических импедансов Z_a некоторых материалов, которые могут быть использованы при формировании брэгговского отражателя.

Как видно из рис. 2, по соотношению импедансов Z_a оптимальными для брэгговского акустического отражателя являются следующие пары материалов: SiO_2/W , SiO_2/Pt , SiO_2/Mo , SiO_2/Ni .

Центральная рабочая частота SMR-BAW резонатора оценивается из простейшего соотношения $f = V/(2h)$, где V – скорость продольной ОАВ вдоль направления, перпендикулярного поверхности пьезоактивного слоя из (0001) AlN (для AlN $V \sim 11$ км/с), h – толщина слоя. При толщинах слоя из (0001) AlN порядка 0.2–2 мкм рабочий диапазон частот такого резонатора составляет 2–12 ГГц. В общем случае центральная частота резонатора f определяется не только толщиной слоя AlN, но и толщиной и типом материала верхнего и нижнего электрода (Al, Ti, Mo, Ni, W, Au) и может быть определена с помощью модифицированной теории Новотного и Бенеша [13]. Эта теория основана на строгом решении уравнений, описывающих волновые процессы в многослойной структуре, составляющей резонатор, с использованием корректных граничных условий на границах всех слоев. Она позволяет рассчитывать резонатор, образованный любым количеством произвольно расположенных произвольных слоев.

На рис. 3 показан рассчитанный по методике [14] модуль $|Z|$ и фаза φ электрического импеданса SMR-BAW резонатора, предназначенного для работы на частоте 10 ГГц, с классическим брэгговским отражателем, образованным четырьмя парами слоев SiO_2/Mo . Необходимые для расчетов материальные константы для AlN, Mo, SiO_2 были взяты из литературы [15, 16].

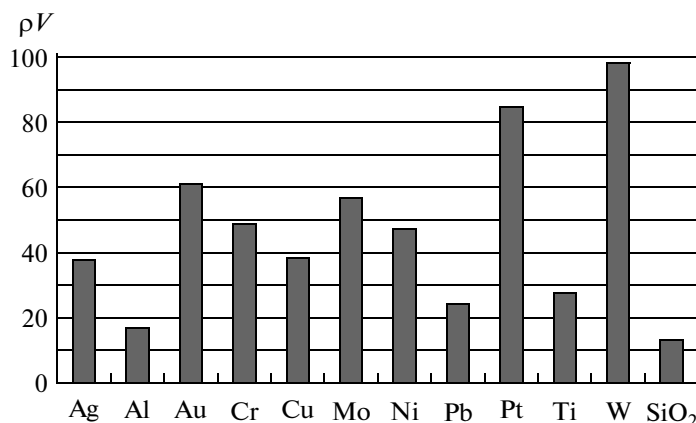


Рис. 2. Акустический импеданс $Z_a = \rho V$ некоторых материалов.

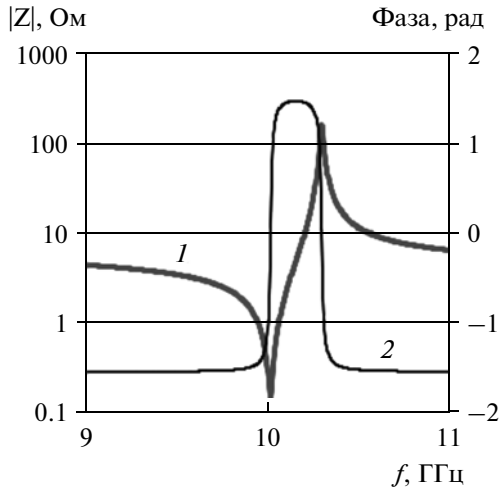


Рис. 3. Зависимости модуля $|Z|$ (кривая 1) и фазы φ (кривая 2) электрического импеданса резонатора от частоты f .

Минимум импеданса $|Z|$ соответствует резонансной частоте (частоте последовательного резонанса) $f_s = 10$ ГГц, для чего толщины активной зоны резонатора были подобраны следующими: толщина верхнего Мо электрода равнялась 0.05 мкм, толщина слоя (0001)AlN – 0.26 мкм и толщина нижнего Мо электрода – 0.06 мкм. Толщины пар слоев брэгговского отражателя были такими: слой SiO_2 – 0.15 мкм (скорость продольной ОАВ – 5.969 км/с), слой Мо – 0.17 мкм (скорость продольной ОАВ – 6.66 км/с), что составляет четверть длины волны на частоте 10 ГГц. Максимум импеданса соответствует антирезонансной частоте f_p (частоте параллельного резонанса).

Резонансная и антирезонансная частоты определяют эффективный коэффициент электромеханической связи резонатора K_{eff}^2 [1]:

$$K_{eff}^2 = \frac{\pi f_s}{2 f_p} \left[\text{tg} \left(\frac{\pi f_s}{2 f_p} \right) \right]^{-1} \approx \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \frac{f_s f_p - f_s}{f_p f_p}$$

В данном случае $K_{eff}^2 = 6.6\%$.

Используемая здесь строгая теория Новотного и Бенеша позволяет рассчитывать не только электрические свойства резонатора, но и пространственное распределение всех величин (это три компоненты механических смещений, три нормальные компоненты тензора напряжений, нормальная компонента вектора электрической индукции и электрический потенциал). В частности, на рис. 4 показаны рассчитанные зависимости модуля компоненты продольного $|u_1|$ и поперечного $|u_2|$ смещения по глубине для рассматриваемого здесь SMR–BAW резонатора.

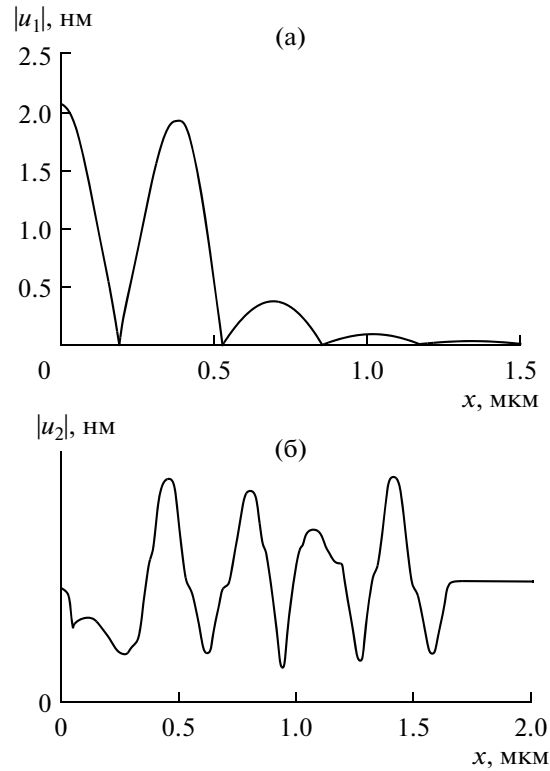


Рис. 4. Зависимости модуля продольной (а) и поперечной (б) компонент смещения от координаты x , перпендикулярной поверхностям слоев, для SMR–BAW резонатора на частоте 10 ГГц с Брэгговским отражателем из четырех чередующихся пар слоев SiO_2 и Мо.

Кривые на рис. 4 показывают, что Брэгговский отражатель из четырех пар слоев SiO_2/Mo обеспечивает приемлемое подавление акустического взаимодействия резонатора с подложкой для продольного смещения волны, но не препятствует прохождению в подложку волны с поперечной (сдвиговой) компонентой смещения.

Одним из наиболее важных параметров SMR–BAW резонаторов является показатель качества FOM (Figure of Merit), определяемый как [10]:

$$\text{FOM} = K_{eff}^2 Q.$$

Здесь K_{eff}^2 – эффективный коэффициент электромеханической связи, Q – добротность резонатора. Чем выше величина FOM, тем качественнее считается резонатор.

При создании полосовых фильтров на основе SMR–BAW резонаторов с оптимальными параметрами желательно обеспечить три вещи: эффективный коэффициент электромеханической связи K_{eff}^2 , высокую добротность Q и отсутствие паразитных резонансов [10]. Коэффициент связи K_{eff}^2 имеет прямое отношение к достижимой ширине полосы фильтра, а также к вносимым поте-

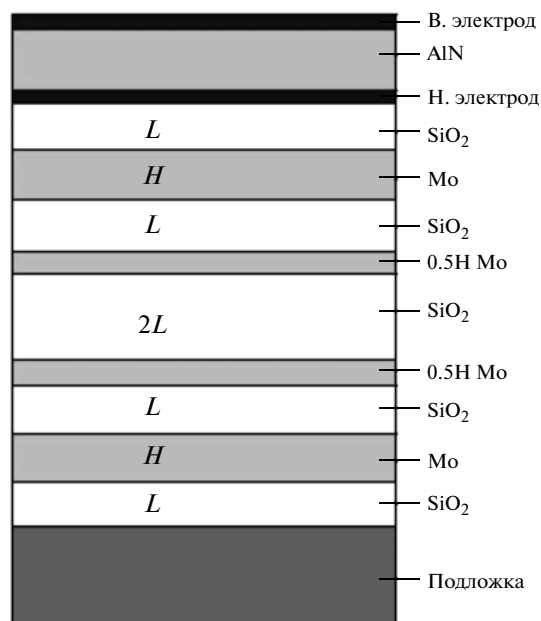


Рис. 5. SMR-BAW резонатор с асимметричным отражателем.

рям фильтра. Добротность Q влияет в основном на вносимые потери и крутизну краев полосы фильтра. Паразитные резонансы вблизи основного резонанса устройства приводят к увеличению вносимых потерь в полосе пропускания фильтра.

Величина эффективного коэффициента электромеханической связи K_{eff}^2 зависит от качества активного слоя (0001)AlN в смысле его пьезосвойств, а также от соотношения толщин электродов и толщины пьезослоя. Традиционные объяснения механизмов ограничения добротности связываются либо с вязкими потерями в материалах и боковой утечкой акустической энергии, либо с рассеянием на шероховатостях поверхностей. Все эти механизмы потерь, безусловно, существуют. В работе [17] исследовался также механизм ограничения добротности в SMR-BAW резонаторе, связанный с потерями, возникающими из-за сдвиговых ОАВ. Для применяемой ориентации пленки AlN сдвиговые компоненты механических смещений в объемной акустической волне теоретически должны отсутствовать. Но в реальной конструкции они могут возникать благодаря краевым эффектам вблизи граничных зон резонатора, микрошероховатостей на поверхностях и их неидеальной параллельности. В результате часть энергии переходит в эти сдвиговые волны, что может приводить существенному снижению общей добротности резонатора.

В работе [17] показано, что затухание продольной ОАВ из-за брэгговского отражателя на рабочей частоте 1850 МГц составляет 40 дБ. Затухание

сдвиговой волны для Брэгговского отражателя составляет всего 5 дБ. Если в энергию сдвиговой волны переходит примерно 1% полной энергии, то полная добротность резонатора может снизиться на порядок.

Величина добротности резонатора может быть рассчитана, исходя из общего определения [17]:

$$Q = E_{tot} / \Delta E_{tot},$$

где общая энергия E_{tot} предполагается состоящей из энергий, связанных с продольной и сдвиговой волнами $E_{tot} = E_{long} + E_{shear}$. Аналогичным образом суммарные потери в системе предполагаются состоящим из энергий потерь продольных и сдвиговых, проходящих через отражатель $\Delta E_{tot} = \Delta E_{long} + \Delta E_{shear}$. Тогда отсюда следует, что

$$\frac{1}{Q} = \left(\frac{E_{long}}{E_{tot}} \right) \frac{1}{Q_{long}} + \left(\frac{E_{shear}}{E_{tot}} \right) \frac{1}{Q_{shear}},$$

где Q_{long} и Q_{shear} — добротности, зависящие от энергетических потерь продольных и сдвиговых колебаний.

При этом конструкция акустического отражателя существенно влияет на захват энергии как продольной, так и сдвиговой волны. Брэгговский четвертьволновый отражатель эффективно отражает продольную ОАВ и не отражает сдвиговую ОАВ (см. рис. 4). Причина состоит в том, что скорость сдвиговой волны для большинства материалов, как правило, составляет около половины скорости продольной волны. Поэтому для сдвиговой волны зеркало фактически представляет собой слои по $\lambda/2$ и, следовательно, через такие слои большая часть энергии сдвиговой волны проходит беспрепятственно.

РЕЗОНАТОР С АСИММЕТРИЧНЫМ ОТРАЖАТЕЛЕМ

Для акустической изоляции сдвиговой волны в работе [18] был предложен акустический отражатель, толщины слоев которого подбирались по более сложному, чем четверть волны, закону. Закон распределения толщин слоев отражателя устанавливался, исходя из требования, чтобы этот отражатель обеспечивал одинаково эффективное затухание как продольной, так и сдвиговой волны. На рис. 5 показана конструкция резонатора с асимметричным акустическим отражателем, имеющим структуру: (LHL) $(0.5H 2L 0.5H)$ (LHL) , где L (Low) и H (High) — слои с низким и высоким акустическим импедансом Z_a .

Если обозначить толщины слоев L и H , соответственно, как t_L и t_H , то в соответствии с [18]:

$$t_L = \frac{\lambda_L}{2(1+c)}, t_H = \frac{\lambda_H}{1+c},$$

где

$$c = 0.5 \left(\frac{v_{Llong}}{v_{Lshear}} + \frac{v_{Hlong}}{v_{Hshear}} \right).$$

В этих выражениях λ_L и λ_H — длина продольной ОАВ в слое L и H соответственно, v_{Llong} и v_{Hlong} — скорости продольной ОАВ в слоях L и H , v_{Lshear} и v_{Hshear} — скорости сдвиговой ОАВ в слоях L и H .

В нашем случае в качестве материала с низким акустическим импедансом (слой L) был взят SiO_2 , а в качестве материала с высоким акустическим импедансом (слой H) — Mo . Был использован вариант материальных констант, обеспечивающий скорости $v_{Llong} = 5969$ м/с, $v_{Lshear} = 3763$ м/с (для SiO_2) и $v_{Hlong} = 6660$ м/с, $v_{Hshear} = 3501$ м/с (для Mo).

В соответствии с приведенными выше формулами был рассчитан SMR-BAW резонатор на резонансную частоту 10 ГГц по методике [14]. В одномерной теории [13] для применяемой ориентации AlN сдвиговая волна отсутствует, поэтому амплитудно-частотная характеристика резонатора с асимметричным отражателем получается практически такая же, как и для резонатора с четвертьволновым отражателем (см. рис. 3). Необходимо только иметь в виду, что четвертьволновый отражатель не смещает резонансную частоту резонатора, образованного только лишь тремя слоями — слоем AlN и двумя электродами (мембранный резонатор). Поэтому резонатор и отражатель могут быть легко рассчитаны отдельно друг от друга. Асимметричный отражатель немного смещает резонансную частоту резонатора (в данном случае вверх), поэтому вся конструкция должна рассчитываться совместно. Сначала рассчитывается отражатель по приведенным здесь формулам работы [18], затем “подгоняется” резонансная частота всей конструкции путем подбора толщин слоя AlN и/или электродов. В результате применения этой процедуры были получены следующие значения толщин слоев резонатора и отражателя, обеспечивающих амплитудно-частотную характеристику, практически совпадающую с приведенной на рис. 3. Толщина пленки (0001) AlN равнялась 0.22 мкм, толщина верхнего Mo электрода — 0.0686 мкм (тонкая подгонка частоты), толщина нижнего Mo электрода — 0.07 мкм; толщины слоев L и H акустического отражателя: $t_L = 0.11$ мкм, $t_H = 0.24$ мкм.

Акустические свойства асимметричного отражателя иллюстрируются кривыми, представленными на рис. 6, на котором показаны рассчитанные зависимости модуля продольного и сдвигового смещения $|u_1|$ и $|u_2|$ от координаты x вглубь структуры.

Эти зависимости показывают, что асимметричный акустический отражатель обеспечивает прием-

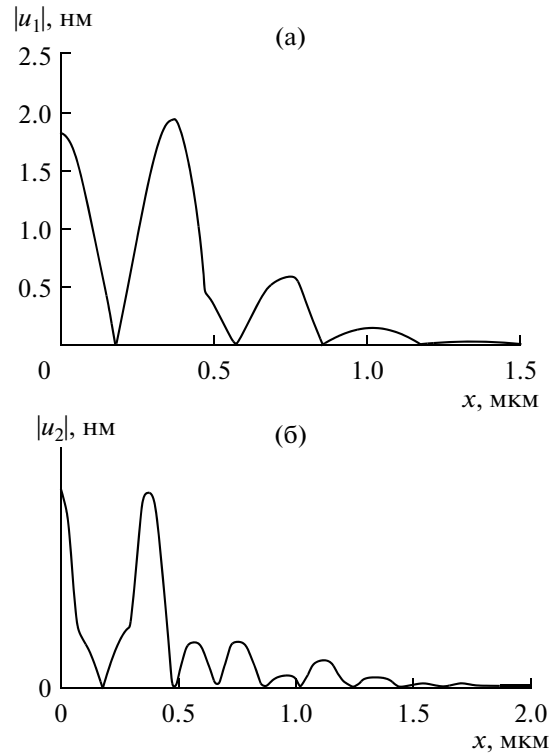


Рис. 6. Зависимости модуля продольной (а) и поперечной (б) компонент смещения от координаты x , перпендикулярной поверхностям слоев, для SMR-BAW резонатора на частоте 10 ГГц с асимметричным отражателем.

лемое подавление акустического взаимодействия резонатора с подложкой, как для продольных, так и для сдвиговых колебаний (ср. с рис. 4).

ЭКСПЕРИМЕНТ

По расчетным данным был изготовлен экспериментальный образец SMR-BAW резонатора с асимметричным отражателем. Площадь электродов резонатора составляла 0.01 мм². Микрофотография поперечного среза слоев резонатора показана на рис. 7. При изготовлении резонатора использовалась технология, описанная в работе [19].

На рис. 8 показаны экспериментально измеренные зависимости модуля $|Z|$ и фазы ϕ электрического импеданса от частоты для изготовленного образца SMR-BAW резонатора.

Сравнение этих зависимостей с расчетными (см. рис. 3) показывает, что соответствие не вполне удовлетворительное. Во-первых, виден сдвиг по частоте. Во-вторых, имеют место количественные и качественные расхождения. Сдвиг по частоте обусловлен неизбежной технологической погрешностью формирования толщин всех слоев. В пределах этой погрешности можно при расчетах установить следующие значения толщин: верхний

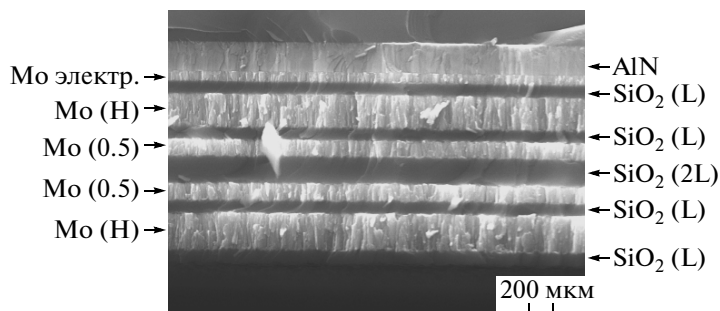


Рис. 7. Микрофотография поперечного среза многослойной структуры SMR–BAW резонатора.

Mo электрод — 0.073 мкм, AlN — 0.23 мкм, нижний Mo электрод — 0.07 мкм, $t_L = 0.1$ мкм, $t_H = 0.28$ мкм. Для этих значений толщин антирезонансная (и резонансная) частота сместится вниз и станет равной примерно 9.92 ГГц, что практически совпадает с соответствующим экспериментальным значением 9.9 ГГц (см. рис. 8а). Но количественные и качественные отличия экспериментальных и расчетных кривых при этом останутся. Просто кривые на рис. 3 сдвинутся вниз по частоте, оставаясь неизменными по форме.

Эти отличия обусловлены наличием паразитных активных и реактивных элементов, всегда присутствующих в любой реальной конструкции, а также возможным возбуждением паразитных волн, распространяющихся параллельно поверхностям слоев (волны Лэмба). Все эти факторы не могут быть учтены в рамках теории, описывающей волновые процессы в слоях резонатора. Эта теория учитывает только свойства самих слоев — упругие, пьезоэлектрические, диэлектрические и диссипативные. Последние учитываются путем добавления небольшой мнимой части в материальные константы, что моделирует наличие акустических потерь в материалах слоев. Удобнее всего добавлять мнимую часть в плотность материала, поскольку отличная от нуля изотропная плотность имеется у любого материала (пьезоэлектрик, диэлектрик, металл), чего нельзя сказать о других (в общем случае тензорных) материальных константах. Отношение мнимой части плотности к ее действительной части можно устанавливать равным $1/Q_{mech}$, где Q_{mech} — механическая добротность материала. В данной работе при расчетах использовались следующие значения: $Q_{mech} = 1500$ для AlN, $Q_{mech} = 500$ для Mo и $Q_{mech} = 1000$ для SiO₂. Эти величины определяют и добротность всего резонатора. Например, расчетная добротность мембранного резонатора с электродами нулевой толщины составляет 1500. Наличие Mo электродов конечной толщины снижает эту добротность, но не может сделать ее меньше, чем 500 (слои SiO₂, соответственно, 1000). Экспериментальная добротность резонатора получается

значительно меньшей, и это не может быть учтено в рамках волновой теории, описывающей процессы только в слоях резонатора. Паразитные элементы конструкции невозможно вставить в волновые уравнения, но их можно легко учесть с помощью модифицированной модели Баттерворта-Ван Дейка (BvD) [20]. Базовая модель BvD представляет собой эквивалентную электрическую схему, включающую последовательный LCR контур, параллельно которому подключена емкость C_0 . Последовательный LCR контур включает в себя эквивалентную динамическую емкость C_m , эквивалентную динамическую индуктивность L_m и эквивалентное динамическое сопротивление R_m . Величины C_m и L_m определяют резонансную частоту резонатора, величина R_m определяет акустические потери в слоях резонатора. Все эти три величины являются эквивалентными и не могут быть определены в рамках самой модели BvD. Их можно извлечь только путем сопоставления амплитудно-частотной характеристики этой модели с аналогичной характеристикой, полученной из эксперимента или с помощью более строгой теории. Величина C_0 представляет собой статическую емкость конденсатора, образованного электродами и слоем (слоями) между ними. Это реальная величина, которая может быть рассчитана и измерена экспериментально. Величина C_0 определяет антирезонансную частоту резонатора. Базовая модель BvD также описывает процессы только в слоях резонатора. Достоинство этой модели заключается в том, что к эквивалентной схеме базовой модели легко подключаются любые паразитные элементы: активные, реактивные, параллельные, последовательные, причем в любой комбинации. В литературе можно встретить различные варианты таких схем. Базовая модель с подключенными паразитными элементами называется в литературе модифицированной моделью BvD. Эквивалентная схема модифицированной модели BvD, используемая в нашей работе, показана на рис. 9.

Здесь C_p — емкость монтажа, шунтирующая рабочий зазор резонатора, R_s — омическое сопро-

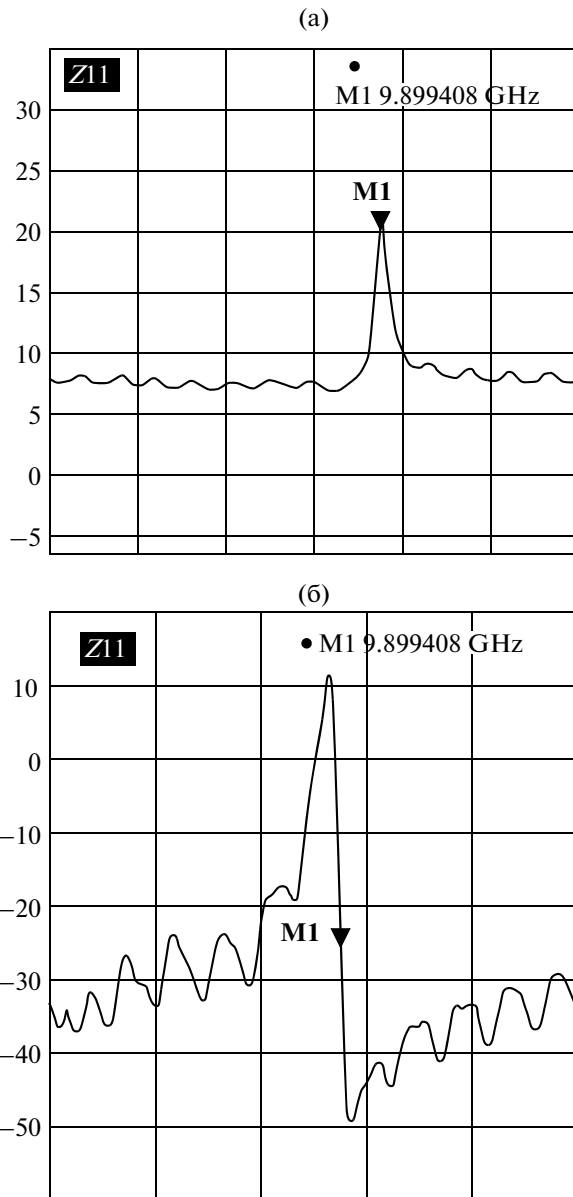


Рис. 8. Экспериментальные зависимости модуля (а) и фазы (б) электрического импеданса от частоты.

тивление электродов и подводящих дорожек. Сопротивление R может моделировать как реальные омические шунтирующие потери, обусловленные несовершенством монтажа, так и акустические потери, обусловленные возбуждением и распространением паразитных волн вдоль поверхности резонатора (волн Лэмба). Емкость C включать в себя емкость элементов монтажа конструкции и/или измерительной схемы, а также реактивные свойства паразитных волн.

Элементы C_m , L_m и R_m эквивалентной схемы базовой модели VvD могут быть однозначно извлечены путем сопоставления амплитудно-частотной характеристики этой схемы с характери-

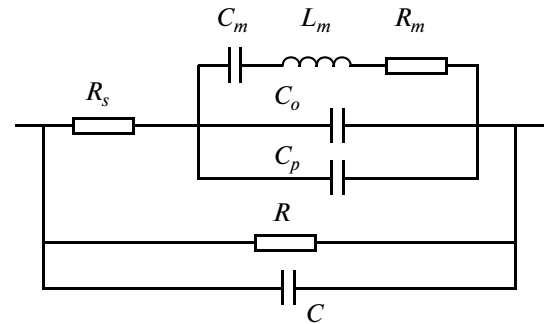


Рис. 9. Эквивалентная схема модифицированной модели VvD, используемая в данной работе.

кой, рассчитанной с помощью строгой теории [13]. Величина статической емкости C_0 рассчитывается, исходя из геометрических размеров и диэлектрических свойств активной зоны резонатора. Для рассматриваемого здесь резонатора были таким способом получены следующие значения:

$$C_m = 0.191 \text{ пФ}, L_m = 0.00141 \text{ мкГн}, \\ R_m = 0.159 \text{ Ом}, C_0 = 3.657 \text{ пФ}.$$

Паразитные элементы эквивалентной схемы невозможно каким-либо способом рассчитать. Не удастся их также измерить, так как нет возможности экспериментально отделить их друг от друга. Их можно только подобрать, исходя из условия максимальной близости расчетных и экспериментальных результатов. Для моделирования дополнительных акустических потерь в слоях резонатора, обусловленных несовершенством технологии, можно одновременно варьировать (увеличивать) и величину R_m . В данном случае в итоге были подобраны следующие величины:

$$R_m = 0.24 \text{ Ом}, R_s = 8.8 \text{ Ом}, \\ C_p = 0.5 \text{ пФ}, R = 35 \text{ Ом}, C = 0.43 \text{ пФ}.$$

Расчетная зависимость импеданса резонатора от частоты, полученная для эквивалентной схемы модифицированной модели VvD для этих значений, показана на рис. 10.

Эти зависимости практически идентичны зависимостям, полученным экспериментально (см. рис. 8). Частота параллельного резонанса составляет 9.9 ГГц.

Из крутизны фазовой кривой $\varphi(f)$ можно рассчитать добротность резонатора на частоте параллельного f_p резонанса [12]:

$$Q_p = \frac{1}{2} f_p \left. \frac{d\varphi}{df} \right|_{f_p},$$

где φ — фаза импеданса Z в радианах.

Найденная таким способом из экспериментальных данных добротность резонатора составила величину $Q_p = 150$. Расчетные зависимости дают величину такого же порядка.

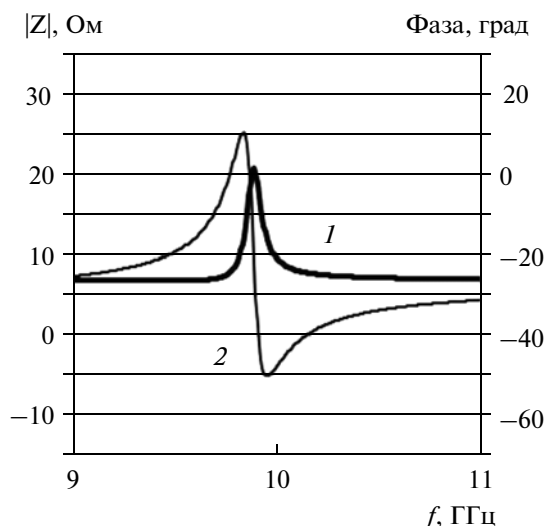


Рис. 10. Расчетные зависимости модуля (кривая 1) и фазы (кривая 2) импеданса резонатора от частоты, полученные с помощью совместного применения строгой теории и модифицированной модели BvD.

Полученная экспериментальная величина эффективного коэффициента электромеханической связи составила $K_{eff}^2 = 5.2\%$ (расчет с помощью модифицированной модели BvD дает $K_{eff}^2 = 5.37\%$).

Таким образом, совместное применение строгой теории Новотного и Бенеша и модифицированной модели BvD дает возможность получить результаты теоретического расчета, практически совпадающие с результатами, полученными экспериментально для образца резонатора, изготовленного на основании расчетных данных. Кроме того, модель BvD позволяет исследовать конкретные причины, изменяющие параметры реального резонатора по сравнению с расчетными параметрами, получаемыми с помощью строгой теории. Сразу же видно, в частности, что большое омическое сопротивление электродов и подводящих дорожек R_s резко уменьшает добротность на частоте последовательного резонанса, но не затрагивает параллельный резонанс. Добротность на частоте параллельного резонанса уменьшается в основном из-за дополнительных акустических потерь, появляющихся в слоях из-за несовершенства технологии (шероховатости поверхностей и их неидеальной параллельности), а также обусловленных утечками энергии в поперечном направлении из-за возбуждения и распространения паразитных волн Лэмба. Дополнительные потери внутри слоев моделируются увеличением эквивалентного динамического сопротивления R_m , потери, обусловленные паразитными волнами, моделируются сопротивлением R .

Шунтирующая паразитная емкость C_p приводит к снижению антирезонансной частоты f_p и к снижению тем самым эффективного коэффициента электромеханической связи K_{eff}^2 . На частоту последовательного резонанса емкость C_p не влияет.

Наконец, шунтирующая всю схему емкость C приводит главным образом к общему сдвигу кривой фазы импеданса вниз, в сторону отрицательных значений. Без этой емкости кривая фазы за пределами резонансов должна располагаться вблизи нуля. Наличие этой емкости может быть обусловлено особенностями монтажа конструкции, элементами измерительной установки, а также реактивными свойствами паразитных поперечных волн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вся история развития акустоэлектроники как важной научной и прикладной междисциплинарной области [21, 22] указывает на следующие основные тенденции: использование новых типов волн и физических явлений для создания и совершенствования акустоэлектронных устройств; улучшение их характеристик за счет использования новых материалов и технологий. В частности, огромное значение сегодня имеет тенденция продвижения вверх по частотам и связанная с ней миниатюризация элементов акусто- и радиоэлектроники. Создание миниатюрных и высокочастотных элементов открывает новые области приложений и повышает плотность обрабатываемых потоков информации.

Настоящая работа посвящена проблемам, связанным с продвижением в области частот от единиц до десятков ГГц. При этом возникают принципиально новые физические и технологические проблемы, часть из которых обсуждена выше. В работе приведен численный анализ основных параметров SMR-BAW резонатора на основе пьезоэлектрической тонкой пленки (0001)AlN с различным типом акустического отражателя, предназначенного для работы на частоте 10 ГГц. Разработан опытный образец SMR-BAW резонатора с асимметричным акустическим отражателем и приведены результаты экспериментального исследования параметров этого резонатора. Используя теорию Новотного и Бенеша и модифицированную модель Баттерворта-Ван Дейка, проведен сравнительный анализ теоретических расчетов параметров резонатора с экспериментальными полученными данными. По результатам анализа выявлены причины, влияющие на величину добротности резонатора.

Работа выполнена частично в рамках гранта Правительства РФ для поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования

(Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского), договор № 11.G34.31.0066).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ашбель И.Я., Двоешерстов М.Ю., Петров С.Г.* Поверхностные акустические волны в двухслойных напряженных средах с искусственной анизотропией // Акуст. журн. Т. 36. 1990. С. 360–361.
2. *Двоешерстов М.Ю., Петров С.Г., Чередник В.И., Чириманов А.П.* Термостабилизация устройств на поверхностных акустических волнах с помощью металлической пленки // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 4. С. 485–488.
3. *Двоешерстов М.Ю., Савин В.А., Чередник В.И.* Сравнительный анализ процедур поиска решений для поверхностных акустических волн в пьезокристаллах // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 6. С. 775–780.
4. *Двоешерстов М.Ю., Чередник В.И., Чириманов А.П., Петров С.Г.* Свойства акустических граничных волн, распространяющихся вдоль границы раздела двух пьезоэлектрических сред // Акуст. журн. 2002. Т. 48. № 6. С. 766–769.
5. *Двоешерстов М.Ю., Чередник В.И., Чириманов А.П.* Электроакустические волны Лэмба в пьезокристаллических пластинах // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 5. С. 603–608.
6. *Двоешерстов М.Ю., Чередник В.И., Петров С.Г., Чириманов А.П.* Численным анализ свойств щелевых электроакустических волн // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 6. С. 776–782.
7. *Чередник В.И., Двоешерстов М.Ю.* Дифракционные искажения поверхностных акустических волн в кристаллах // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 4. С. 550–557.
8. *Чередник В.И., Двоешерстов М.Ю.* Распространение поверхностных акустических волн в пьезоэлектрической среде при наличии периодической структуры типа “канавка” // Акуст. журн. 2010. Т. 56. С. 41–50.
9. *Wingqvist G., Bjurström J., Katardjiev I.* Shear mode AlN thin film electroacoustic resonator for biosensor applications // IEEE Ultrasonics Symposium. 2005. P. 50–53.
10. *Rich R., Jose S.* Review and Comparison of Bulk Acoustic Wave FBAR, SMR Technology // IEEE Ultrasonics Symposium. 2007. P. 1029.
11. *Lakin K.M.* A review of thin-film resonator technology // IEEE microwave magazine. Dec. 2003.
12. *Allah M., Thalhammer R., Kaitila J., Herzog T., Weber W.* Solidly mounted BAW resonators with layer-transferred AlN using sacrificial Si surfaces // A Solid-State Electronics. 2010. V. 54. P. 1041.
13. *Nowotny H., Benes E.* General one-dimensional treatment of the layered piezoelectric resonator with two electrodes // J. Acoust. Soc. Am. August. 1987. V. 82. № 2. P. 513.
14. *Cherednick V.I., Dvoesherstov M.Y.* Surface and Bulk Acoustic Waves in Multilayer Structures // Waves in fluids and solids. Edited by Rubén Picó Vila. September. 2011. Croatia. Chapter 3. P. 69.
15. *Carlotti G., Hickernell F., Liaw M., Palmiergi L.* The Elastic Constants of Sputtered Aluminum Nitride Films // IEEE Ultrasonics Symposium. 1995. P. 53.
16. *Ballandras S., Gavignet E., Bigler E., Henry E.* Temperature Derivatives of the Fundamental Elastic Constants of Isotropic Materials // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71. № 12. P. 1625.
17. *Marksteiner S., Kaitila J., Fattinger G., Aigner R.* Optimization of Acoustic Mirrors for Solidly Mounted BAW Resonators // IEEE Ultrasonics Symposium. 2005. P. 329.
18. *Jose S., Jansman A., Hueting R.* A design procedure for an acoustic mirror providing dual reflection of longitudinal and shear waves in Solidly Mounted BAW Resonators (SMRs) // International Ultrasonics Symposium Proceedings. 2009. P. 2111.
19. *Сидорин А.П., Беляев А.В., Двоешерстов М.Ю., Коршунов С.Е.* // Сборник трудов Научной конференции Сессия Научного Совета РАН по акустике и XXV сессия РАО, г. Таганрог. 2012. Т. 1. С. 288.
20. *Bradley P.D., Wartenberg S., Ruby R.C.* Modified Butterworth-Van Dyke Circuit for FBAR Resonators and Automated Measurement System // IEEE Ultrasonics Symposium. 2000. P. 53.
21. *Гуляев Ю.В., Хикернелл Ф.С.* Акустоэлектроника: история, современное состояние и новые идеи для новой эры // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 1. С. 101–110.
22. *Кайно Г.* Акустические волны. Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов / Пер. с англ под ред. О.В. Руденко. М.: Мир, 1990.
23. *Kino G.* Acoustic Waves: Devices, Imaging, and Analog Signal Processing. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 1987.