

## **Термокомпенсированный СВЧ тонкопленочный акустоэлектронный SMR-BAW резонатор**

*В статье приводятся результаты численного расчета конструкций и характеристик термокомпенсированных СВЧ тонкопленочных резонаторов Брэгговского типа (solidly mounted resonator – bulk acoustic wave, SMR-BAW), работающих в диапазоне частот 2-10 ГГц.*

**Ключевые слова:** акустоэлектроника, СВЧ резонатор, объемные акустические волны

Принципиально новые возможности существенного повышения рабочей частоты одночастотных акустоэлектронных резонаторов открываются при реализации многослойных тонкопленочных резонаторов на нитриде алюминия (AlN), работающих на объемных акустических волнах (английская аббревиатура solidly mounted resonator – bulk acoustic wave, SMR – BAW) [1]. На рис. 1 показана типичная конструкция такого резонатора.

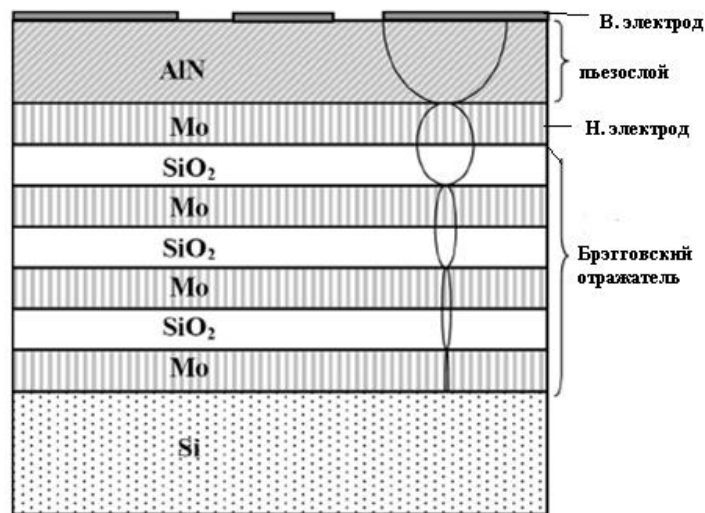


Рис. 1.

В первом приближении центральная рабочая частота SMR-BAW резонатора оценивается из простейшего соотношения  $f = V/(2h)$ , где  $V$  – скорость продольной объемной акустической волны (ОАВ) вдоль направления, перпендикулярного поверхности пьезоактивного слоя из (0001) AlN ( $V \sim 11$  км/с),  $h$  – толщина слоя. В диапазоне частот 2 – 10 ГГц При толщинах слоя из (0001) AlN порядка 0.3 – 2 мкм рабочий диапазон частот такого резонатора составляет 2 – 10 ГГц [1]. Брэгговский отражатель обеспечивает эффективную локализацию одной моды колебаний в материале пьезослоя и представляет из себя многослойную периодическую структуру, состоящую из  $n$  пар слоев, имеющих существенно различную величину акустического импеданса  $Z_{сл} = \rho_{сл} * V_{сл}$ , где  $\rho_{сл}$  – плотность,  $V_{сл}$  – скорость продольной ОАВ в слое и толщину каждого слоя  $\lambda/4$ , где  $\lambda$  – длина акустической волны в материале слоя. На рис. 2 показаны акустические импедансы  $Z$  различных материалов.

В строгом случае центральная частота резонатора  $F_r$  определяется не только толщиной пленки AlN, но и толщиной и типом материала верхнего и нижнего электрода (Al, Ti, Mo, Ni, W, Au и т.д.). Температурный коэффициент частоты резонатора равен относительному изменению резонансной частоты при изменении температуры  $t$  на один градус Цельсия -  $TKЧ = \frac{1}{F_r} \frac{dF_r}{dt}$  и зависит от температурных свойств материалов пленки AlN, верхнего и нижнего электродов (Al, Ti, Mo, Ni и т.д.), а также Брэгговского отражателя.

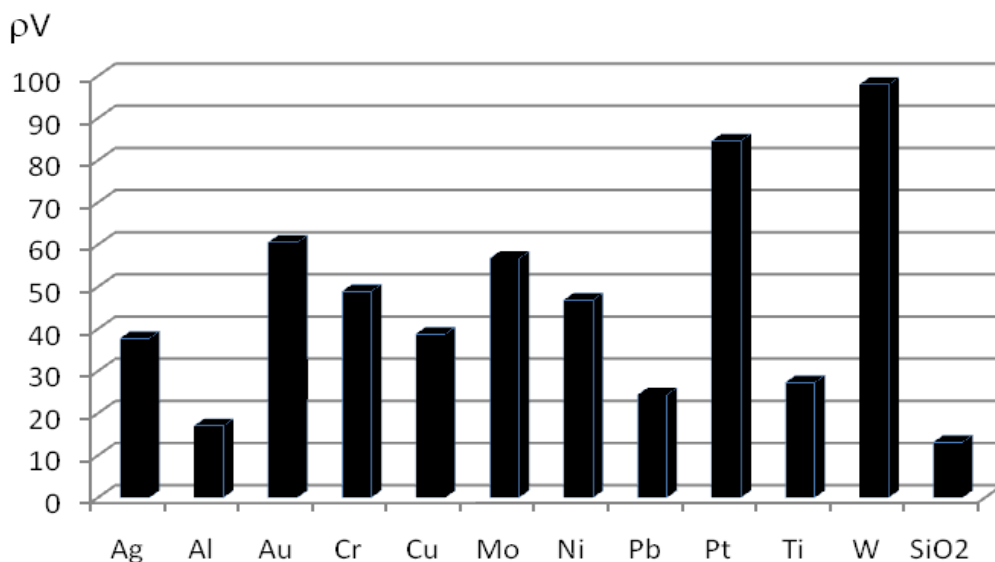


Рис. 2.

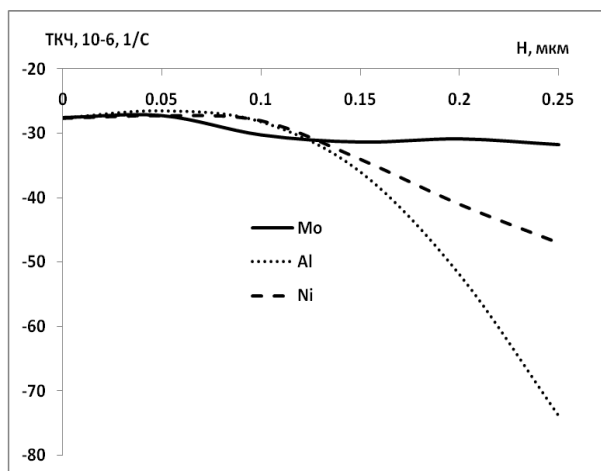


Рис. 3.

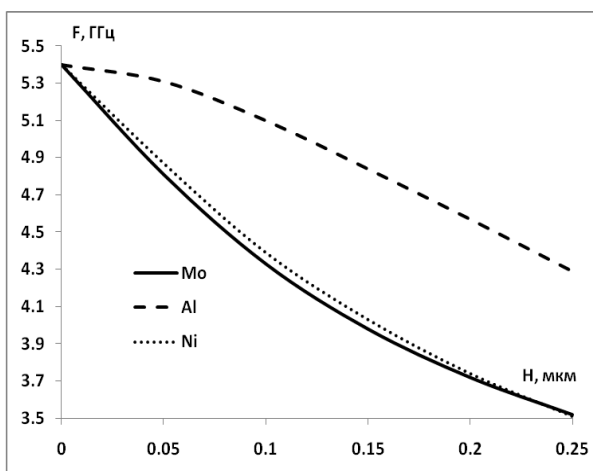


Рис. 4.

На рис. 3 показаны вычисленные по строгой теории Новотного и Бенеша [2, 3] зависимости ТКЧ резонатора без Брэгговского отражателя от толщины  $H$  электродов, состоящих из Mo, Ni, Al при толщине пьезослоя из AlN – 1 мкм. Для нулевой толщины электродов ТКЧ резонатора характеризуется свойствами только слоя AlN и имеет значение около  $-27 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ . Для Mo, Ni, Al и AlN температурные коэффициенты констант упругости имеют одинаковый знак минус [4], поэтому наличие электродов конечной толщины усиливает температурную нестабильность резонатора тем сильнее,

чем больше толщина электродов по отношению к толщине слоя AlN. Из рис. 3 видно, что Mo электрод незначительно ухудшает ТКЧ в структуре, а при толщинах электродов больше 0.15 мкм наблюдается значительное ухудшение ТКЧ. На рис. 4 показана рассчитанная зависимость сдвига резонансной частоты  $F_r$  от толщины электродов из Mo, Ni, Al. Для компенсации температурного сдвига резонансной частоты может быть помещен дополнительный слой между электродами из материала с другим (положительным) знаком температурных коэффициентов упругих постоянных. Таким материалом может быть, например, SiO<sub>2</sub> [4].

На рис. 5 показана рассчитанная зависимость ТКЧ от толщины  $h$  термокомпенсирующего слоя SiO<sub>2</sub> для резонатора с толщиной слоя AlN – 0.5 мкм и толщиной молибденовых электродов – 0.1 мкм. Как видно из рис. 5, термокомпенсация (ТКЧ = 0) в данном случае имеет место при толщине слоя SiO<sub>2</sub> около 0.25 мкм. При этом следует иметь в виду, что при увеличении толщины термокомпенсирующего слоя увеличивается общая толщина резонатора и поэтому уменьшается его резонансная частота, как это видно из рис. 5, на котором показана также и зависимость резонансной частоты резонатора от толщины слоя SiO<sub>2</sub>.

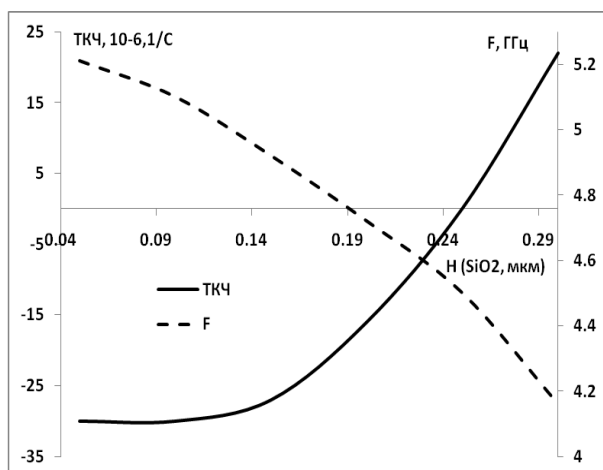


Рис. 5.

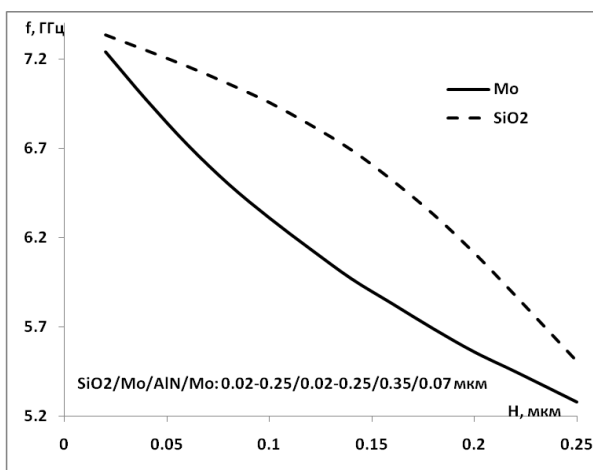


Рис. 6.

В случае реализации SMR – BAW резонатора присутствие Брэгговского отражателя также вносит поправки в значение ТКЧ резонатора. В работе рассматривается Брэгговский отражатель, состоящий из пары материалов Mo/SiO<sub>2</sub>, рассчитанный на резонансную частоту 6.61 ГГц. При этом толщины слоев Брэгговского отражателя из Mo и SiO<sub>2</sub> рассчитываются по формуле  $h=V/4 F_r$  и соответственно равны 0.24 мкм и 0.23 мкм. Толщина AlN – 0.35 мкм, толщина нижнего электрода из Mo – 0.07 мкм. На рис. 6 показан сдвиг резонансной частоты в зависимости от толщины электрода из Mo (кривая Mo) при фиксированной толщине пленки из SiO<sub>2</sub>, равной 0.15 мкм, а также от толщины пленки из SiO<sub>2</sub> (кривая SiO<sub>2</sub>) при фиксированной толщине верхнего электрода, равной 0.07 мкм.

На рис. 7, 8 показаны рассчитанные зависимости ТКЧ (кривая ТКЧ) и коэффициента электромеханической связи  $K^2$  (кривая K2) от толщины верхнего электрода из Mo (рис. 7) и от толщины пленки из SiO<sub>2</sub>, находящейся над верхним

электродом (рис. 8) для SMR – BAW резонатора, имеющего структуру  $\text{SiO}_2/\text{Mo}/\text{AlN}/\text{Mo}/(\text{SiO}_2/\text{Mo} - 5 \text{ пар слоев})$  с указанными выше размерами.

На рис. 9 показаны соотношения толщин AlN и верхнего слоя  $\text{SiO}_2$  для реализации резонатора на рабочую частоту 6.61 ГГц (кривая AlN/SiO<sub>2</sub>), а также величина ТКЧ (кривая ТКЧ), из которого видно, что нулевой ТКЧ реализуется при толщине AlN – 0.31 мкм и SiO<sub>2</sub> – 0.18 мкм при толщине верхнего электрода из Mo – 0.07 мкм. С другой стороны при фиксированной тощине пленки из SiO<sub>2</sub> – 0.15 мкм, можно варьировать толщину AlN и верхнего электрода Mo для достижения нулевого ТКЧ.

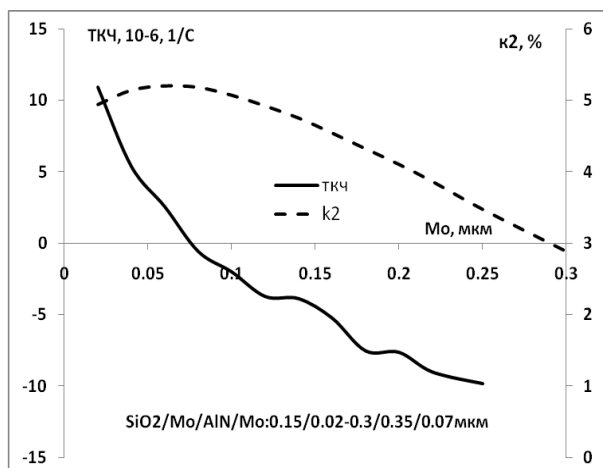


Рис. 7.

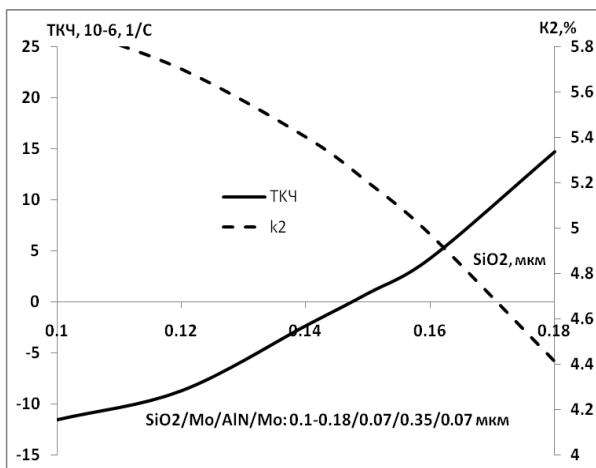


Рис. 8.

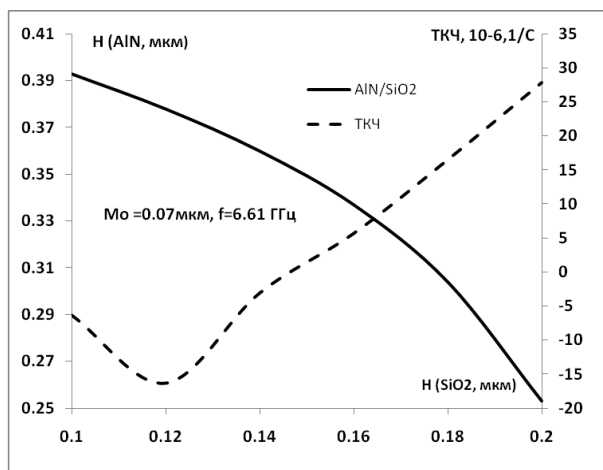


Рис. 9.

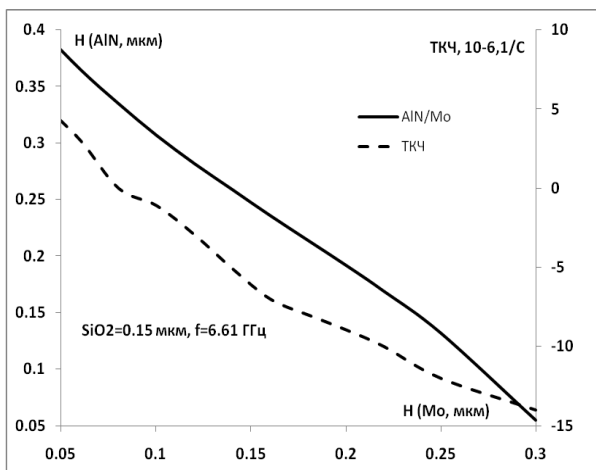


Рис. 10.

На рис. 10 показаны соотношения толщин AlN и верхнего электрода Mo для реализации резонатора на ту же рабочую частоту 6.61 ГГц (кривая AlN/Mo), а также величина ТКЧ (кривая ТКЧ), из которого видно, что нулевой ТКЧ реализуется при толщине AlN – 0.27 мкм и Mo – 0.07 мкм.

Таким образом в работе приведены результаты теоретических исследований технических характеристик СВЧ акустоэлектронных SMR–BAW резонаторов и предложены способы его термостабилизации. Показано, что наличие металлических

электродов ухудшает ТКЧ резонатора. Дополнительная пленки из  $\text{SiO}_2$  определенной толщины, нанесенная поверх верхнего электрода, термостабилизирует резонатор. При увеличении толщины пленки из  $\text{SiO}_2$ , а также толщины электрода из Мо снижается эффективный коэффициент электромеханической связи  $K^2$ , а также резонансная частота. Наличие Брэгговского отражателя, состоящего из 5 пар слоев  $\text{SiO}_2/\text{Mo}$  также несколько улучшает термостабильность SMR – BAW резонатора.

#### Библиографический список

1. Review and Comparison of Bulk Acoustic Wave FBAR, SMR Technology Rich Ruby (SM) / Jose San // IEEE Ultrasonics Symposium. 2007. Pp.1029- 1040
2. General one-dimensional treatment of the layered piezoelectric resonator with two electrodes / Nowotny, H. & Benes, E. // Journal of Acoustic. Society of America. 1987. Vol. 82 (2). Pp. 513-521
3. Surface and Bulk Acoustic Waves in Multilayer Structures / V. I. Cherednick and M. Y. Dvoesherstov // Book WAVES IN FLUIDS AND SOLIDS. Edited by Rubén Picó Vila. September. 2011. Croatia. Chapter 3. Pp.69-102
4. Modeling for temperature compensation and temperature characterizations of BAW resonators at GHz frequencies / Ivira b., Benech P. // IEEE Transactions on Ultrasonics. 2008. Vol.55 (2).Pp. 421-430