

Экспериментальные измерения параметров SMR-BAW резонаторов

В работе представлены методики и результаты измерений и расчетов основных параметров опытных образцов одночастотных SMR BAW-резонаторов на нитриде алюминия с Брэгговским отражателем в диапазоне рабочих частот 2-8 ГГц, разработанных в ОАО «КБ «Икар». Приведены результаты измерения проводимости, S-параметров, расчета коэффициента электромеханической связи и добротности. Показано представление FBAR резонаторов в виде эквивалентной схемы, расчет ее элементов исходя из измеренных S-параметров.

Ключевые слова: акустоэлектроника, СВЧ-измерения, акустические волны

В настоящее время акустоэлектронные устройства используются практически во всех областях радиоэлектроники. Одним из перспективных акустоэлектронных устройств является SMR BAW-резонатор [1]. Принцип его работы основан на возбуждения продольной объемной акустической волны (ОАВ) в тонкой пьезокристаллической пленке, например AlN. SMR-BAW резонаторы могут работать в диапазоне частот от 2 до 20 ГГц, в отличие от традиционных акустоэлектронных устройств, работающих на поверхностных акустических волнах (ПАВ), где рабочая частота определяется периодом встречно-штыревой системы и не превышает 2 ГГц из-за ограничения предельной точности фотолитографии.

В настоящее время в ОАО «КБ «Икар» проводится опытно-конструкторская работа по разработке и оптимизации конструкций SMR-BAW резонаторов, имеющих рабочие частоты в диапазоне от 2 до 10 ГГц. Одной из важных задач является измерение параметров СВЧ резонатора, к которым относятся добротность Q , эффективный коэффициент электромеханической связи k^2 , вносимые потери, температурный коэффициент частоты и т.д. [1].

Под хорошими электрическими характеристиками будем понимать:

- высокую добротность резонатора ($Q > 1000$),
- высокий эффективный коэффициент электромеханической связи ($k^2 \geq 0,05$),
- низкие вносимые потери ($\sim 0.5 \div 2$ дБ),
- низкий уровень «паразитных» резонансов.

При конструировании резонатора одним из наиболее важных параметров, необходимых для того, чтобы отвечать самым строгим требованиям, предъявляемым к нему, является показатель качества (Figure of Merit, FOM), определяемый как [1]:

$$FOM(f) = k_{\text{эфф}}^2 * Q(f) \quad (1)$$

Ненагруженная добротность Q есть отношение энергии, запасенной в цепи, к энергии, рассеиваемая в этой цепи за период. Уравнение (1) подчеркивает тот факт, что Q является функцией частоты и, следовательно, таковым является и FOM ($k_{\text{эфф}}^2$ не зависит от частоты).

Как известно, эффективный коэффициент электромеханической связи k^2 может быть рассчитан экспериментально, исходя из значений частот последовательного f_s и параллельного f_p резонансов с помощью уравнения [1]:

$$k^2_{\text{эфф}} = \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{f_p - f_s}{f_p} \quad (2)$$

Здесь f_s и f_p – частоты последовательного и параллельного резонансов. Первая соответствует максимуму величины проводимости Y или минимуму величины импеданса Z , вторая – наоборот, минимуму проводимости или максимуму импеданса.

Добротность SMR-BAW резонаторов может быть рассчитана несколькими способами [2]:

Способ 1 - по ширине экспериментальных зависимостей проводимости Y или импеданса Z резонатора на половинной высоте на частоте резонанса f_r [2]:

$$Q = \frac{f_r}{\Delta f_{-3dB}} \quad (3)$$

Способ 2 - по наклону фазовой характеристики импеданса Z_{11} [2]:

$$Q_x = \frac{f_x}{2} \left| \frac{d\phi_z}{df} \right|_{f=f_x} \quad (4)$$

где ϕ_z – угол наклона фазовой характеристики импеданса Z_{11} в радианах, f_x – резонансная частота на последовательном f_s и параллельном f_p резонансе.

Как известно, классическая эквивалентная схема резонатора (модель Баттерворта Ван-Дейка [1]) может быть представлена в виде, показанном на рис. 1.

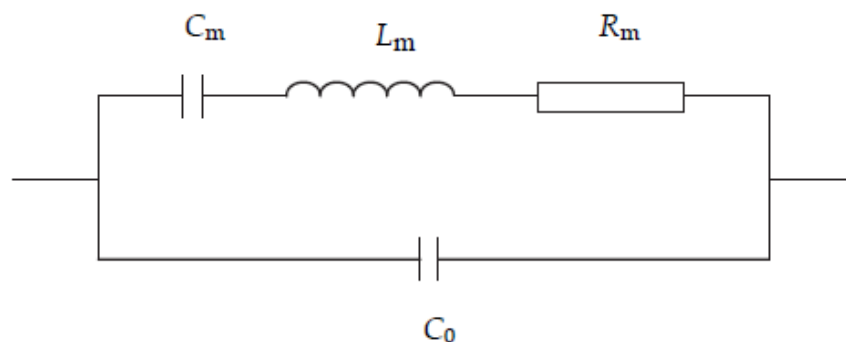


Рис. 1.

Проводимость Y резонатора [1]:

$$Y_c = \left(j\omega L_m + \frac{1}{j\omega C_m} + R_m \right)^{-1} + j\omega C_0 = Y_{R_m} + Y_{L_m} + j\omega C_0,$$

где
$$Y_{R_m} = \frac{R_m}{\left(\frac{1}{\omega C_m} - \omega L_m\right)^2 + R_m^2} \quad Y_{L_m} = \frac{\frac{1}{\omega C_m} - \omega L_m}{\left(\frac{1}{\omega C_m} - \omega L_m\right)^2 + R_m^2}$$

Статическая емкость C_0 рассчитывается через геометрию и диэлектрические свойства межэлектродного пространства:

$$C_0 = \left(\frac{\varepsilon \varepsilon_0}{h} A \right)$$

где ε , h – относительная диэлектрическая проницаемость слоя AlN и его толщина, $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m – диэлектрическая константа, A – площадь электродов резонатора.

Параметры эквивалентной схемы модели C_0 , R_m , L_m и C_m определяются однозначно, имея экспериментально измеренную проводимость Y_{Rm} , F_r , ΔF :

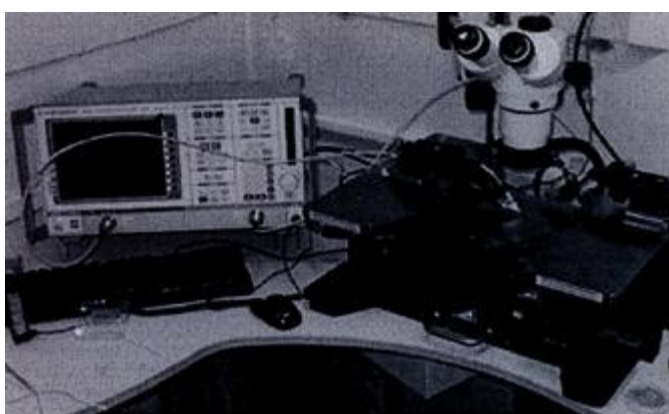
$$\omega_r = 2\pi F_r = \frac{1}{\sqrt{L_m C_m}}, \quad Q = \frac{F_r}{\Delta F}$$

$$R_m = \frac{1}{(Y_{Rm})_{max}}, \quad L_m = \frac{Q R_m}{2\pi F_r}, \quad C_m = \frac{1}{L_m (2\pi F_r)^2}$$

Зная параметры эквивалентной схемы можно определить частоту последовательного f_s и параллельного f_p резонанса [1]:

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_m C_m}} \quad f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_m C_m} \left(1 + \frac{C_m}{C_0}\right)}$$

В качестве примера были разработаны 2 конструкции SMR BAW- резонаторов с разными толщинами пьезоактивной пленки (0001) AlN, толщиной 1.5 мкм и 0.5 мкм, рассчитанные на частоту 2.6 ГГц и 6.5 ГГц.



а)



б)

Рис. 2.

Конструкция №1: Ni (0.2мкм)/AlN (1.5мкм)/Al (0.2мкм)/(Ti(0.61мкм)/Mo(0.63мкм)-7 пар слоев). Конструкция №2: (Ni (0.07мкм)/ AlN (0.5мкм)/ Mo (0.06 мкм) /(SiO₂(0.23мкм)/Mo (0.24 мкм)-7 пар слоев).

Для измерения параметров SMR-BAW резонаторов использовался векторный анализатор цепей ROLDE&SCHWARTZ ZVB-20 (рис. 2, а), который позволяет измерять СВЧ параметры (таблица 1) резонатора в диапазоне от 10 МГц до 20 ГГц. Соединение SMR BAW-резонатора с векторным анализатором осуществлялось при помощи зондовой станции EP6 RF с СВЧ микрозондами Z Probes Cascade Microtech типа ACP40-GSG-100, которые устанавливаются на компланарные выводы резонатора (рис. 2, б). Для калибровки векторного анализатора, учета переотражений в кабелях и зондах использовалась специальная калибровочная подложка с набором эталонных значений, обеспечивающих режимы короткозамкнутого, холостого хода и согласованной нагрузки. Калибровка производилась в программе SussCal Professional Calibration, которая при постановке зонда на эталонную нагрузку высчитывает матрицу ошибок, которая учитывается при последующих измерениях.

Таблица 1

Измеряемая величина	Примеры
S-параметры, дБ	$S_{11}, S_{21}, S_{12}, S_{22}$
КСВН	$U_{\text{отпр}}/U_{\text{пад}}$
Z-параметры, Ом	$Z_{11}, Z_{21}, Z_{12}, Z_{22}$
Y-параметры, 1/Ом	$Y_{11}, Y_{21}, Y_{12}, Y_{22}$
Фазовые характеристики S, Z, Y – параметров, град (рад.)	Фаза S, Z, Y

На рис. 3 а, в показаны измеренные S_{11} , дБ параметры SMR BAW- резонаторов, работающих на частоте 2,7 ГГц и 6,3 ГГц.

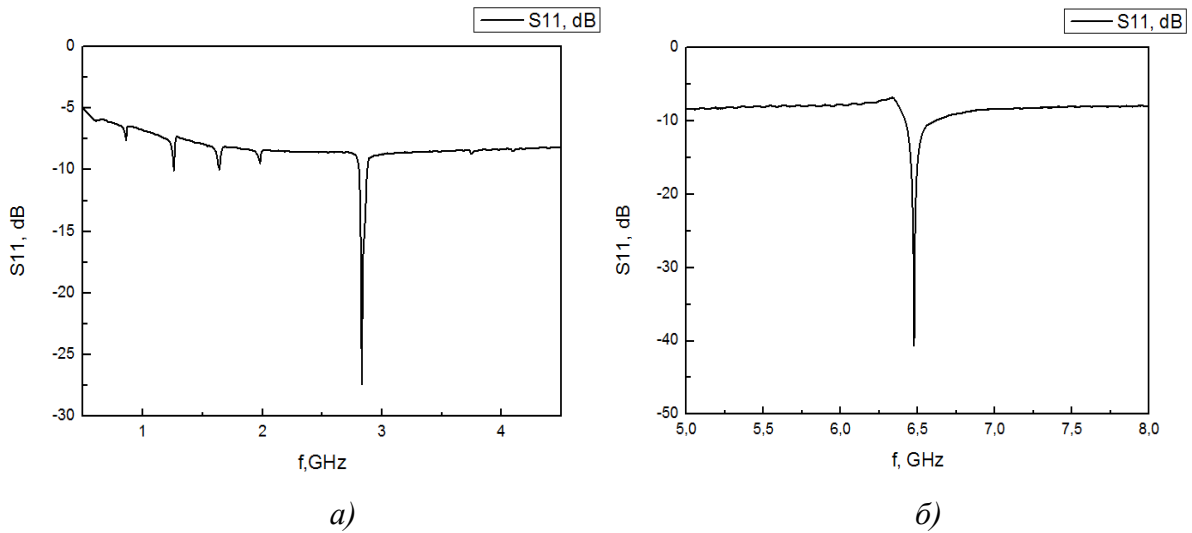


Рис. 3.

Как видно из рис. 3. а, б, резонаторы имеют довольно большие вносимые потери (5-10 дБ), что связано с высоким сопротивлением металлических электродов (~2-20 Ом). Для расчета добротности Q и k^2 проведены измерения фазовой характеристики импеданса Фаза Z_{11} (рис. 4. а, б).

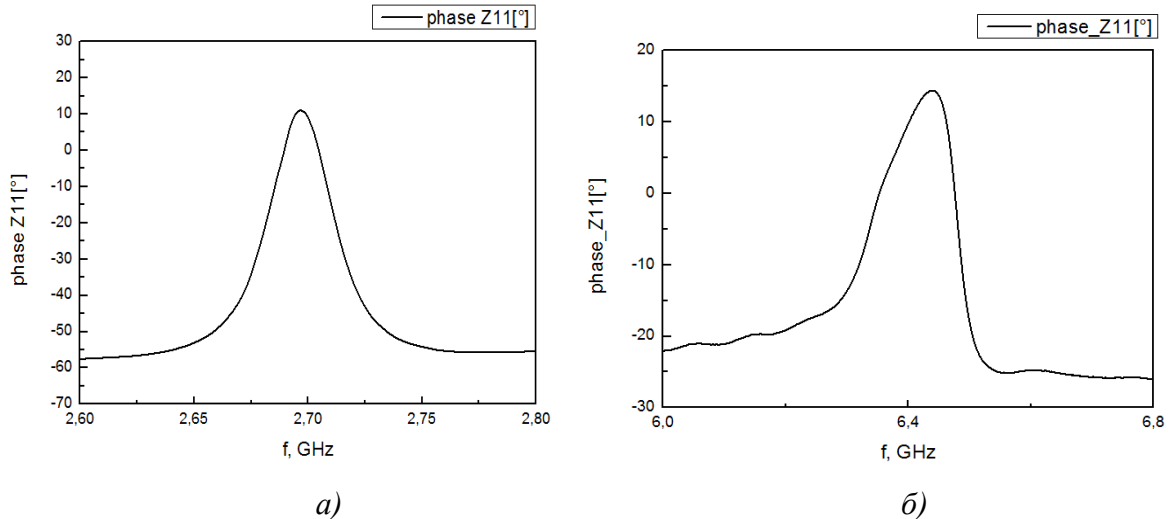


Рис. 4.

Результаты расчетов и измерений основных параметров SMR-BAW резонаторов приведены в таблице 2.

Таблица 2

№	Резонансная частота, ГГц	Вносимые потери, дБ	f_s , ГГц	f_p , ГГц	$k_{эфф}$, %	Q_s	Q_p
1	2,7	7	2.64	2.7	5,4	94	114
2	6,41	7	6.27	6.41	5,1	66	91

Как видно из полученных результатов, изготавливаемые в ОАО «КБ «Икар» опытные образцы SMR BAW-резонаторов имеют высокий коэффициент электромеханической связи и низкий уровень паразитных резонансов, однако из-за использования в качестве верхнего электрода тонкого слоя Ni высокие потери и малую добротность, что может быть исправлено использованием Al в качестве материала верхнего электрода.

Библиографический список

1. B. Ivira, P. Benech, R. Fillit, F. Ndagijimana, P. Ancy, G. Parat «Modeling for Temperature Compensation and Temperature Characterizations of BAW Resonators at GHz Frequencies», IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 55, No. 2, February 2008, pp. 421-430.
2. R. Ruby, «Review and Comparison of Bulk Acoustic Wave FBAR, SMR Technology», 2007 IEEE Ultrasonics Symposium, pp 1029-1040.