РЕЗОНАТОРЫ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛНАХ С ВЫСОКОЙ ДОБРОТНОСТЬЮ И УМЕНЬШЕННЫМИ РАЗМЕРАМИ

С.А. Доберштейн, И.В. Веремеев

Омский научно-исследовательский институт приборостроения, Омск, Российская Федерация

Представлены резонаторы на поверхностных поперечных волнах в диапазоне частот 500–1000 МГц на YX/36°+90° срезе кварца с добротностью 8600–9500 в корпусах под поверхностный монтаж размерами 3х3х1,2 мм и 5х5х1,8 мм. Резонаторы могут использоваться в миниатюрных малошумящих генераторах.

Ключевые слова: поверхностные поперечные волны, резонатор, добротность.

STW RESONATORS WITH THE HIGH QUALITY FACTOR AND REDUCED SIZES

S.A. Doberstein, I.V. Veremeev

Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

This paper presents the 500-1000 MHz STW resonators with quality factor of 8600–9500 on 36°YX90° cut quartz in the 3х3х1,2 mm and 5х5х1,8 mm SMD packages. Resonators can be used in the miniature low noise oscillators.

Keywords: surface transverse wave, resonator, quality factor.

Введение

Поверхностные поперечные волны (Surface Transverse Waves – STW) на кварце имеют высокую скорость распространения акустической волны $V_0 = 5000$ м/с, низкий температурный коэффициент частоты $-0,05 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}^2$, выдерживают большую мощность подводимого сигнала до нескольких Вт. Всё это позволяет успешно использовать STW для создания высокочастотных резонаторов [1–3]. Однако для обеспечения высокой добротности Q требуется большое число электродов 400 в отражательных решетках (ОР). Это приводит к увеличению размеров резонаторов, особенно на частотах <1 ГГц. В этой статье представлены STW-резонаторы с высокой добротностью и уменьшенными размерами на YX/36°+90° срезе кварца. Резонаторы выполнялись по одновходовой схеме, когда встречно-штыревой преобразователь (ВШП) располагался между двумя ОР с закороченными электродами (рис. 1). Добротность таких резонаторов определяется отражательной способностью ОР, потерями на распространение и на проводимость электродов ВШП, совпадением по частоте центра полосы задерживания и максимума коэффициента отражения ОР с максимумом проводимости ВШП. Отражательная способность ОР зависит от количества электродов ОР, толщины металлизации и коэффициента металлизации электродов. Как показано в [4], отражательная способность ОР для STW несколько выше, чем для рэлеевской ПАВ, при одинаковой толщине и коэффициенте металлизации электродов. Следовательно, можно использовать уменьшенное число электродов в ОР для сокращения размеров резонаторов. Потери на распространение STW связаны с потерями в пьезоматериале, определяются длиной резонансной полости и зависят от количества электродов в ВШП и ОР. Потери на проводимость электродов ВШП зависят от толщины металлизации, коэффициента металлизации и величины апертуры ВШП W (рис. 1). Совпадение по частоте центра полосы задерживания и максимума коэффициента отражения ОР с максимумом проводимости ВШП зависит от соотношения между периодами электродов ОР (d_{OP}) и ВШП (d) (рис. 1). В этом случае STW-резонатор становится асинхронным [3].

Рис. 1. Топология одноходового STW-резонатора и его эквивалентная схема

Расчетные и экспериментальные результаты

Конструктивно-топологическая оптимизация STW-резонаторов проводилась с помощью компьютерного моделирования с использованием модели эквивалентных схем [5]. Эквивалентная схема STW-резонатора подобна эквивалентной схеме обычного ПАВ-резонатора и показана на рис. 1. Особенности STW – потери на распространение вводятся специальными коэффициентами при расчете [2]. Здесь P – матрица смешанных параметров ВШП; Z_0 – характеристический импеданс среды между ВШП и ОР, V_0 – скорость STW; $R = Z_0(1 + \Gamma) / (1 - \Gamma)$ – эквивалентный импеданс ОР; Γ – коэффициент отражения ОР. Теоретический анализ одноходового STW-резонатора проводится с учетом того, что Γ для ОР оптимален и определяется экспериментально по максимальному отражению STW от ОР при определенном числе электродов ОР для выбранной толщины металлизации и коэффициента металлизации электродов по данным текстовых структур. Оптимизация вышеупомянутых параметров топологии резонатора (рис. 1) позволяет получить высокую добротность STW-резонаторов в диапазоне частот 500–1000 МГц. В этом случае ВШП и ОР становятся менее длинными и размеры резонаторов уменьшаются по сравнению с известными методами [1–3]. Оптимальные параметры топологии резонаторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры топологии резонаторов

Параметры	500 МГц	765 МГц	1000 МГц
Число электродов в ОР, N_{OP}	230	285	350
Число пар электродов в ВШП, N	80	100	100
Соотношение между периодами электродов в ВШП и ОР, d/d_{OP}	0,997	0,997	0,997
Расстояние между ВШП и ОР, $d_1 = d_2$	d_{OP}	d_{OP}	d_{OP}
Апертура, W	80λ	80λ	80λ
Относительная толщина электродов, h/λ	2,5%	2,5%	2,5%
Коэффициент металлизации	0,5	0,5	0,4

Здесь λ – длина STW на частоте максимума активной части проводимости резонатора. Расстояние между ВШП и ОР $d_1 = d_2$ – расстояние между центрами смежных электродов ВШП и ОР. Оптимизация проводилась методом последовательных приближений.

STW-резонаторы помещались в SMD-корпуса и измерялись по последовательной схеме в тракте с волновым сопротивлением $R_0 = 50$ Ом (рис. 2). Частотные характеристики проводимости (действительная и мнимая части) рассчитывались из измеренных действительной и мнимой части коэффициента передачи S_{21} по формуле [3]:

$$Y = \frac{S_{21}}{2R_0(1-S_{21})}. \quad (1)$$

Преобразование по формуле (1) осуществлялось в измерителе комплексных коэффициентов передачи «Обзор-304/1» и отображалась соответствующими частотными характеристиками действительной и мнимой части проводимости резонатора.

Рис. 2. Последовательная схема измерения STW-резонатора

Представленные расчетные и измеренные частотные характеристики действительной и мнимой части проводимости (рис. 3) соответственно STW-резонатора на кварце YX/36°+90° на частоту 500 МГц демонстрируют хорошее совпадение.

Рис. 3. Расчетные и измеренные частотные характеристики проводимости STW-резонатора

Рис. 4. Эквивалентная схема одноходового STW-резонатора с сосредоточенными элементами R, L, C

Для анализа STW-резонатора использовалась эквивалентная схема с сосредоточенными элементами R , L , C . Эквивалентная схема одноходового STW-резонатора (рис. 4) подобна эквивалентной схеме обычного ПАВ-резонатора и представляет собой двухполосник с динамической индуктивностью L_D , динамической емкостью C_D , статической емкостью C_0 и сопротивлением R_D , характеризующим внутренние потери в резонаторе. Для оценки эквивалентных параметров STW-резонатора в SMD-корпусе используются формулы из метода эквивалентных схем для одноходовых ПАВ-резонаторов [6]:

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f}, R_D = \frac{1}{G_M}, L_D = \frac{QR_D}{2\pi f_0}, C_D = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L_D}, \quad (2)$$

где G_M – максимальное значение действительной части проводимости на частоте f_0 ; Δf – полоса частот по уровню $G_M/2$. Статическая емкость C_0 измеряется на низкой частоте с учетом емкости SMD-корпуса.

STW-резонатор на частоту $f_0 = 500$ МГц обеспечил добротность $Q = 9500$, $G_M = 102$ мСм (рис. 3). Резонатор с размерами кристалла 3,17x1x0,5 мм помещался в SMD-корпус 5x5x1,8 мм. Статическая емкость с учетом SMD корпуса $C_0 = 3,6$ пФ, емкостное соотношение $C_0/C_D = 1058$.

Измеренные частотные характеристики действительной и мнимой частей проводимости STW-резонатора на частоту 765 МГц приведены на рис. 5. STW-резонатор показал $Q = 9000$, $G_M = 112$ мСм. Резонатор имел размеры кристалла 2,8x1x0,5 мм и помещался в SMD-корпус 5x5x1,8 мм. При этом статическая емкость $C_0 = 3,8$ пФ, емкостное соотношение $C_0/C_D = 1467$.

На рис. 6 представлены измеренные частотные характеристики действительной и мнимой части проводимости STW-резонатора на $f_0 = 999,87$ МГц. Резонатор обеспечил $Q = 8600$, $G_M = 90,5$ мСм. Резонатор имел размеры кристалла 2,2x0,85x0,5 мм, что позволило его поместить в SMD-корпус размерами 3x3x1,2 мм. В этом случае $C_0 = 1,86$ пФ, емкостное соотношение $C_0/C_D = 1120$.

Параметры эквивалентных схем одноходовых STW-резонаторов, рассчитанные по измеренным характеристикам по формулам (2), представлены в табл. 2. Эти параметры можно использовать для моделирования и разработки малошумящих генераторов.

Таблица 2

Параметры эквивалентной схемы STW-резонаторов

Параметры	500МГц	765МГц	1000 МГц
R_D , Ом	9,7	8,9	11
L_D , мкГн	29,6	16,7	15,2
C_D , пФ	0,0034	0,00259	0,00166
C_0 , пФ	3,6	3,8	1,86

Рис. 5. Измеренные частотные характеристики действительной и мнимой частей проводимости STW-резонатора на частоту 765 МГц

Рис. 6. Измеренные частотные характеристики действительной и мнимой частей проводимости STW-резонатора на частоту 999,87 МГц

Заключение

STW-резонаторы на диапазон частот 500–1000 МГц обеспечили высокую добротность 8600–9500, уменьшенное число электродов в ВШП и ОР по сравнению с известными прототипами [1–3] и помещались в SMD-корпуса размерами 3x3x1,2 мм и 5x5x1,8 мм. Разработанные STW-резонаторы с высокой добротностью и уменьшенными размерами будут широко использоваться в миниатюрных малошумящих генераторах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Design of Asynchronous STW Resonators for Filters and High Stability Source Applications / J.-M. Friedt [et al.] // Proc. IEEE Ultrason. Symp. 2005. P. 1315–1318.
2. Optimization of STW Resonator by Using FEM/BEM/ W. Wang [et al.] // Proc. IEEE Ultrason. Symp. 2006. P. 1863–1865.
3. High Q-factor STW-Resonators on AT-Cut of Quartz/ C.U. Kim [et al.] // Proc. IEEE Ultrason. Symp. 2007. P. 2582–2585.
4. GHz Range STW Resonators and Narrow Band Filters/ T. Thorwaldsson [et al.] // Proc. IEEE Ultrason. Symp. 1994. P. 99–102.
5. Веремеев И.В., Доберштейн С.А., Разгоняев В.К. Моделирование ПАВ-резонаторов и лестничных ПАВ-фильтров методом Р-матриц // Техника радиосвязи. 2018. Вып. 3. С. 61–71.
6. Soluch W. Scattering Matrix Approach to One Port SAW Resonators // Proc. IEEE IFCS-EFTF. 1999. P. 859–862.