

# Численное моделирование кварцевого резонатора SC-среза на основе плоско-выпуклой линзы

М.С. Терещенкова<sup>1,2</sup>, П.А. Карасёв<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Морион»

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

**Аннотация:** в среде COMSOL Multiphysics методом конечных элементов исследован кварцевый резонатор на 10 МГц. Вибратор резонатора вырезан из монокристаллического кварца SC-среза в форме плоско-выпуклой линзы с двухсторонними фасками. Проведён анализ сходимости модели и исследовано влияние технологических несовершенств геометрии кристаллического элемента на характеристики кварцевого резонатора.

**Ключевые слова:** пьезоэлектричество, численное моделирование, кварцевый резонатор, монокристаллический кварц

## 1. Введение

Кварцевые резонаторы на основе SC-среза (stress-compensated) получили широкое распространение в системах с повышенными требованиями к стабильности частоты. По сравнению с традиционным АТ-срезом, двухповоротный SC-срез обеспечивает лучшую температурную стабильность и меньшую чувствительность к механическим напряжениям [1]. Эти свойства обуславливают применение резонаторов SC-среза в высокостабильных генераторах для средств телекоммуникации, навигации и измерительного оборудования.

Несмотря на широкое применение данных резонаторов, их конструкция и эксплуатационные характеристики зависят от множества факторов, включая геометрию вибратора и электродов, свойства креплений и т.д.

В работе проводится численное моделирование кварцевого резонатора с вибратором из кварца SC-среза, покрытого золотыми электродами и закрепленного в стандартном двухточечном держателе.

## 2. Описание модели

Для конечно-элементного моделирования в среде COMSOL Multiphysics необходимо задать геометрию, материалы, уравнения, описывающие поведение системы, и расчетную сетку.

### Геометрия

В качестве вибратора для модели резонатора выбрана классическая плоско-выпуклая линза диаметром 8,5 мм и радиусом кривизны поверхности 26 см с двумя круглыми электродами одинакового диаметра. С обеих сторон пластины нанесены фаски.

### Материалы

В качестве материала кристаллического элемента выбран левый альфа-кварц, заданный по стандарту IEEE 1978, с эйлеровыми углами ( $\theta = 35.25^\circ$ ;  $\varphi \approx 22^\circ$ ) [2]. Дополнительно введено частотно-зависимое демпфирование через потери в тензоре упругости [3].

Кварцевая пластина закреплена с двух сторон упругими никелевыми держателями. Тонким слоем на пластину нанесены золотые электроды, учтенные как добавочная масса.

### Система уравнений

Для анализа частотных характеристик кварцевого резонатора решается классическая пьезоэлектрическая задача, связывающая механическое напряжение  $\sigma$  и деформацию  $S$  с электрической индукцией  $D$  и напряженностью электрического поля  $E$  [2]:

$$\begin{cases} \sigma = c^E S - e^T E \\ D = e S - \varepsilon^S E \end{cases}$$

### 3. Результаты

Проведена оценка влияния расчетной сетки на стабильность поиска рабочей частоты колебаний резонатора по 3-ей гармонике. При возрастании количества поперечных слоев модели (от 4 до 10) резонансная частота резонатора снижается, стремясь к асимптотическому значению. При переходе от 4-х слоев к 6-8 слоям относительное изменение частоты составляет 0,21%. При дальнейшем переходе к 10-ти слоям относительное изменение частоты резко уменьшается до 0,03%, что свидетельствует о достижении сходимости модели. Таким образом, для дальнейших расчетов выбрана конфигурация с 8 поперечными слоями, что согласуется с результатами предыдущих работ [3].

Далее проводились модификации кривизны сферы (переход от сферы к эллипсу) и смещение центра сферы относительно центра элемента. По результатам моделирования вычислены эквивалентное сопротивление, емкость и индуктивность [4], а также оценка изменения добротности резонатора при модификации геометрии. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации конструкции высокостабильных кварцевых генераторов.

#### Список литературы

1. Wu, R., Wang, W., Chen, G. et al. Frequency–Temperature Analysis of Thickness-Shear Vibrations of SC-Cut Quartz Crystal Plates with the First-Order Mindlin Plate Equations. *Acta Mech. Solida Sin.* 34, 516–526 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10338-021-00224-0>
2. J. Wang, W. -j. Wang, G. -j. Chen, J. -k. Du, T. -f. Ma and D. -j. Huang, "Vibration analysis of SC-cut quartz crystal plates with the Mindlin and Lee plate theories," 2011 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications (SPAWDA), Shenzhen, China, 2011, pp. 445-448, doi: 10.1109/SPAWDA.2011.6167284.
3. L. B. M. Silva and E. J. P. Santos, "Modeling quality factor in AT-cut quartz-crystal resonators," 28th Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro 2013), Curitiba, Brazil, 2013, pp. 1-4, doi: 10.1109/SBMicro.2013.6676121.
4. Y. -k. Yong, M. S. Patel and M. Tanaka, "Theory and experimental verifications of the resonator Q and equivalent electrical parameters due to viscoelastic and mounting supports losses," in *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 57, no. 8, pp. 1831-1839, August 2010, doi: 10.1109/TUFFC.2010.1622.