

Разработка макета высокодобротного СВЧ резонатора на модах шепчущей галереи

А.А. Ершов, А.А. Никитин, А.В. Дроздовский, А.Б. Устинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: в данной работе разработан макет СВЧ резонатора с модами шепчущей галереи на основе сапфира. Приводятся результаты исследований передаточных характеристик. Показано, что добротность достигает значений порядка 74000 на частоте 7,92 ГГц. Измерено угловое распределение электромагнитного поля на различном расстоянии от резонатора.

Ключевые слова: сапфир, высокодобротные резонаторы, моды шепчущей галереи

1. Введение

Одними из перспективных резонаторов, которые могут быть использованы в технике СВЧ, являются резонаторы, работающие на модах шепчущей галереи (МШГ). Для возбуждения МШГ используются резонаторы различной конфигурации: сферические, цилиндрические, дисковые, кольцевые. Эффект шепчущей галереи заключается в полном внутреннем отражении распространяющихся волн от цилиндрической поверхности. Радиус резонатора определяет длину рабочей волны [1]. Такой резонатор можно представить в виде диэлектрического волновода, изогнутого в форме кольца. В резонаторе возбуждаются квазипоперечные магнитные и электрические волны, которые вблизи торцов цилиндрического резонатора близки по характеру к ТЕ и ТМ волнам [1].

В настоящее время резонаторы на основе сапфира характеризуются малыми диэлектрическими потерями и являются основой для создания сверхстабильных и малошумящих генераторов СВЧ сигнала [2]. Малая плотность дефектов и примесей, которая зависит от метода выращивания, обеспечивает высокую добротность. Однако небольшое количество примесных ионов обеспечивает улучшение частотной стабильности кристалла [3].

Характеристики резонатора на основе сапфира существенно улучшаются при уменьшении температуры внешней среды до единиц Кельвина. Так, добротность ненагруженного охлажденного до 5-6 К резонатора достигает 700 млн, а нагруженного – 400 млн [4]. Добротность ненагруженного резонатора при комнатной температуре составляет 200000 [3]. В работе [5] приведены характеристики нагруженного резонатора, охлажденного до 4 К в криостате, с добротностью порядка 1 млрд. Помимо жидкого гелия для охлаждения используется холодильная машина Стирлинга [6]. В то время как жидкий гелий требует замены каждые несколько недель [7], охладитель на цикле Стирлинга работает автономно в течение двух лет [2], [8]. Такое преимущество дает возможность использовать криорезонаторы в различных автономных и удаленных системах. Примером является использование сапфировых резонаторов с МШГ в качестве эталона точного времени для позиционирования, определении скорости и навигации в антеннах космической связи [9].

Сапфировые резонаторы являются основным структурным элементом малошумящих СВЧ генераторов, которые необходимы для создания устройств стандартов частоты и времени. Такие устройства являются ключевыми для систем геолокации, измерения времени, синхронизации сигналов, обнаружения

гравитационных волн [10]. Значения времени или частоты используются в качестве эталонных при проведении различных лабораторных или экспериментальных метрологических измерений. Криорезонаторы на основе сапфира в настоящее время активно используются в различных системах, так, например, в проекте атомных часов PHARAO Международной Космической Станции [11]. Таким образом, разработка макета высокочастотного СВЧ резонатора с модами шепчущей галереи с использованием отечественной компонентной представляет практический интерес. Целью данной работы является исследование СВЧ резонатора с модами шепчущей галереи на основе сапфира.

2. Макет для исследований

В данной работе исследуется резонатор с МШГ на основе сапфирового диска диаметром 100 мм и толщиной 8 мм. Одной из задач работы было создание макета, обеспечивающего возможность изменения расстояния между антеннами и диском, а также регулировку угла поворота одной из антенн в плоскости резонатора. Для проведения эксперимента был разработан макет (рисунок 1).

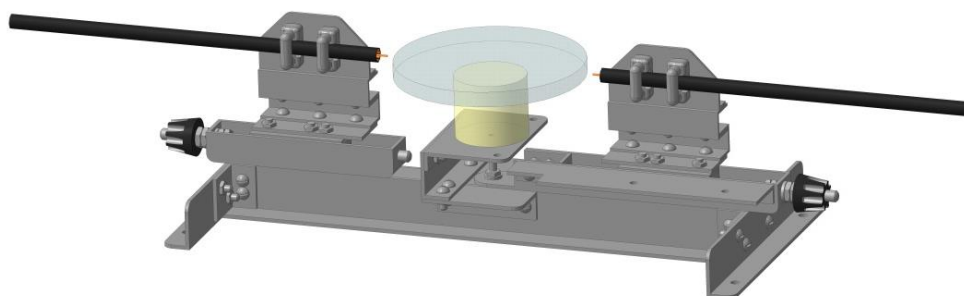


Рисунок 1. Макет для исследований СВЧ резонатора

На рисунке 2 приведена принципиальная схема разработанного макета. На основную платформу (1) устанавливается цилиндрическая подставка из кварца, на которую закрепляется сапфировый диск (2). Линейный транслятор (3) позволяет регулировать расстояние между возбуждающей антенной (4) и торцом диска. Второй линейный транслятор (6) регулирует расстояние между диском и приемной антенной (5), значение которого можно фиксировать по линейке (8). Также линейный транслятор (6) установлен на поворотной платформе, обеспечивающей диапазон поворота антенны 180 градусов с сохранением расстояния от центра диска. Контроль отклонения поворотной платформы осуществляется по шкале (7).

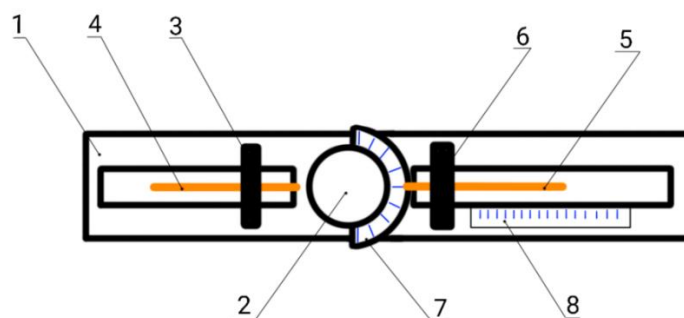


Рисунок 2. Условная схема макета

Линейные трансляторы антенн приводятся в движении с помощью зубчато-винтовой передачи. Такая передача позволяет плавно изменять расстояние антенн с необходимой точностью, определяемой шагом резьбы винта подачи. В разработанном макете шаг резьбы составлял 1 мм. Поворотная платформа закрепляется на шарнир, снабженный пружиной, которая прижимает транслятор к основной платформе и держит ее в горизонтальном положении. Для ввода и вывода излучения используются короткозамкнутые антенны на основе коаксиальных линий передачи. Конструкция макета позволяет ориентировать антенны параллельно и перпендикулярно оси резонатора, что обеспечивает возможность возбуждения ТЕ- и ТМ-мод.

3. Результаты измерений

Измерения передаточной характеристики разработанного макета проводились при помощи векторного анализатора цепей «ОБЗОР TR804/1. Диапазон измерения составлял от 1 ГГц до 8 ГГц. Резонатор эффективно возбуждался в диапазоне от 4 до 8 ГГц. Однако резонансы были зафиксированы только в интервале 4-8 ГГц. На рисунке 3 приведен типичный участок передаточной характеристики вблизи резонансной частоты 7,92 ГГц. Добротность резонансного пика на этой частоте составляет 74000.

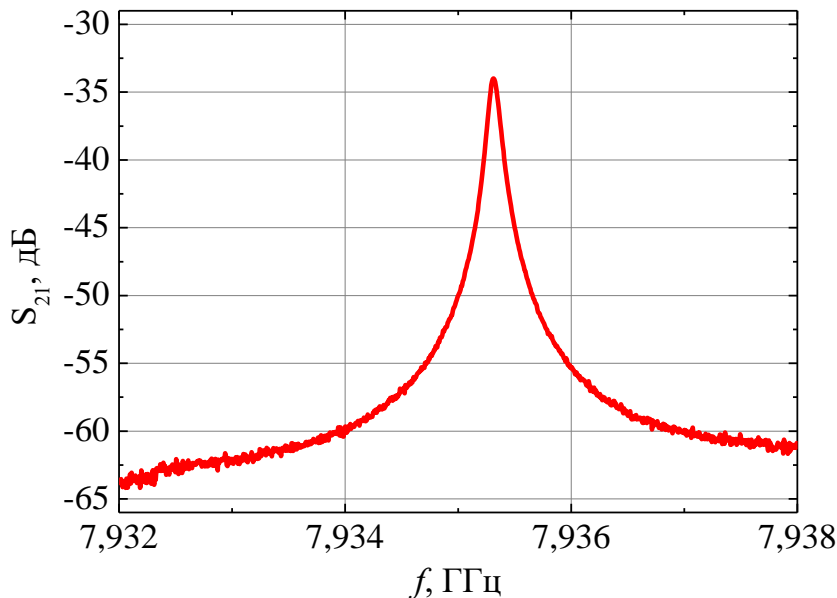


Рисунок 3. Передаточная характеристика резонатора с МШГ

В ходе исследования было обнаружено, что расстояние между двумя соседними резонансными частотами уменьшается с ростом частоты (см. рисунок 4). Так, на частоте 4,8 ГГц это расстояние составляет 0,336 ГГц, и уменьшается до 0,297 ГГц на частоте 7,8 ГГц. Такое поведение соответствует нормальной дисперсии электромагнитных волн, распространяющихся вдоль боковой поверхности дискового резонатора из сапфира.

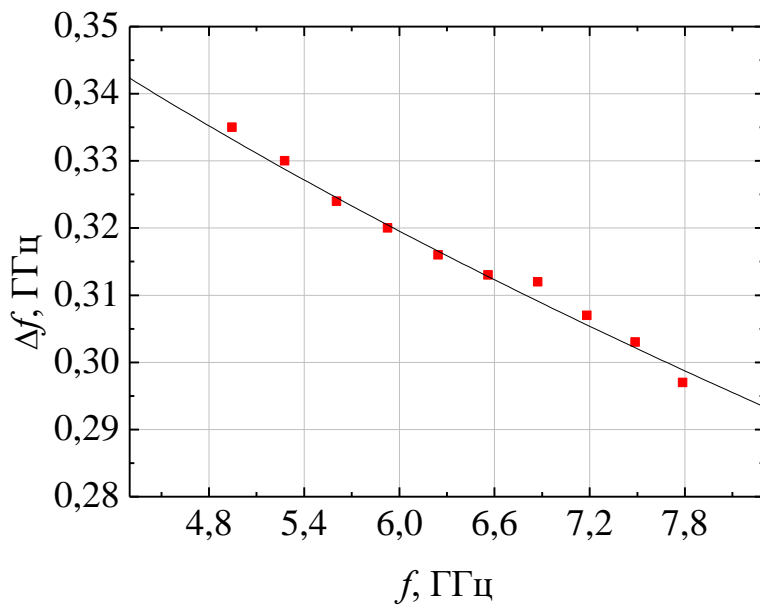


Рисунок 4. Зависимость расстояния между резонансными пиками от частоты

Также на частоте 5,44 ГГц были измерены угловые распределения мощности электромагнитного поля при различном расстоянии до резонатора (рисунок 5). С увеличением расстояния мощность уменьшается. Положение максимумов не зависит от расстояния и определяется углом, при котором происходит синфазное сложение электромагнитных волн, циркулирующих в приповерхностном слое резонатора.

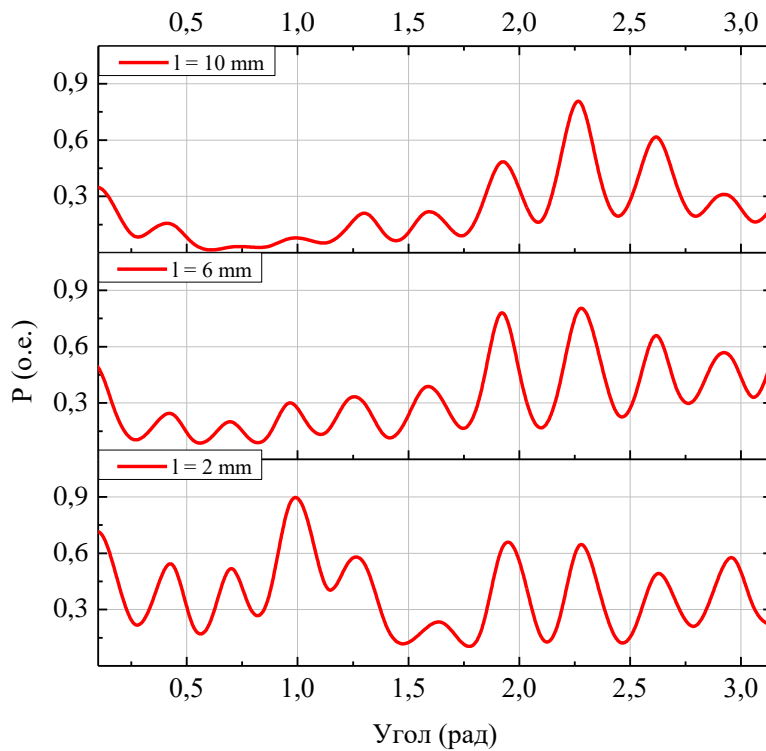


Рисунок 5. Зависимости мощности от угла антенны на частоте 5,44 ГГц

4. Заключение

В рамках работы был разработан макет (рисунок 1) для проведения исследований резонаторов с МШГ на основе сапфира. Макет позволяет измерять угловые и радиальные распределения мощности, излучаемой поверхностью резонатора. Максимальная добротность, полученная для сапфирового резонатора диаметром 100 мм, составляла 74000 на частоте 7,92 ГГц. Большую добротность можно получить, если уменьшить шероховатость боковой поверхности. Предложенная конструкция может быть использована в качестве макета для проведения научных исследований и лабораторных работ.

Список литературы

1. Городецкий, М.Л. Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью. – М.: ФИЗМАЛИТ, 2011. – 416 с.
2. ULISS Data sheet [Электронный ресурс]. 2018. http://www.uliss-st.com/fileadmin/user_upload/documents_PDF/ULISS-data-sheet_v1.0.pdf (дата обращения: 14.05.2019).
3. V. Giordano, C. Fluhr, S. Grop and B. Dubois, Tests of Sapphire Crystals Produced with Different Growth Processes for Ultra-stable Microwave Oscillators, arXiv:1504.02711 [physics.ins-det], April, 2015.
4. C. Fluhr, S. Grop, T. Accadia, A. Bakir, Y. Kersale, E. Rubiola, V. Giordano and B. Dubois, Characterization of a set of cryocooled sapphire oscillators at the 10-16 level with the three-cornered hat method, Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium & European Frequency and Time Forum, June, 2015.
5. S. Grop, B. Dubois, G. Haye, Jean-Louis Masson, Christophe Fluhr, Yannick Gruson, Yann Kersalé, Enrico Rubiola, Gregory Haye, Vincent Giordano, Latest improvements in the performances of a Cryogenic Sapphire Oscillator, Proc. European Frequency and Time Forum, Neuchâtel, Switzerland, 23-26 June 2014.
6. C. Fluhr, B. Dubois, S. Grop, J. Paris, G. Le Tetu and V. Giordano, A Low Power Cryocooled Autonomous Ultra-Stable Oscillator, Cryogenics 80, December 2016.
7. Michel Abgrall, Jocelyne Guena, Michel Lours, Giorgio Santarelli, Michael E. Tobar, Sebastien Bize, Serge Grop, Benoit Dubois, Christophe Fluhr and Vincent Giordano, High-Stability Comparison of Atomic Fountains Using Two Different Cryogenic Oscillators, IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control 63(8):1-1, August 2016.
8. S. Grop, P.-Y. Bourgeois, N. Bazin, Y. Kersale, E. Rubiola, C. Langham, M. Oxborrow, W. Schafer, J. De Vicente, V. Giordano, High stability cryocooled 10 GHz oscillator for the European Space Agency (PDF, 546 kB), Proc. IEEE International Frequency Control Symposium p.665-669, Newport Beach, California, USA, 1-4 June 2010.
9. Ainhoa Solana, Wolfgang Schäfer, Theo Schwall, Sylvère Froidevaux, Maria Antonia Ramos, Javier de Vicente, Vincent Giordano, Serge Grop, Benoit Dubois, Design of the F&T Subsystem for ESA's Deep Space Antenna 3, 2013 Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium, Prague (Czech Republic), July, 2013.
10. Vladimir Dolgovskiy, Stephane, Schilt, Nikola Bucalovic, Gianni Di Domenico, Serge Grop, Benoit Dubois, Vincent Giordano and Thomas Sudmeyer, Ultra-stable microwave generation with a diode-pumped solid-state laser in the 1.5- μm range, Applied Physics B Laser and Optics, Vol.116, Issue 3 (September 2014).
11. S. Grop, B. Dubois, G. Haye, P.-Y. Bourgeois, Y. Kersalé, E. Rubiola, V. Giordano, ULISS Project: First comparison of two cryocooled sapphire oscillators at the 10-15 level (PDF, 335 kB), Proc. International Frequency Control Symposium (IFCS) p.638-642, Baltimore, MD, USA, 21-25 May 2012.