

Конический квазиоптический диэлектрический резонатор

© А.А. Баранник, С.А. Буняев, Н.Т. Черпак

Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины,
Харьков

E-mail: bunyaev@ire.kharkov.ua

Поступило в Редакцию 18 апреля 2005 г.

Предложен новый тип диэлектрического резонатора, а именно конический квазиоптический диэлектрический резонатор. Экспериментально получены зависимости собственной частоты, добротности и распределения электрического поля от угла наклона образующей конуса, лежащего на проводящей плоскости, в 8 mm диапазоне волн.

Введение. Квазиоптические диэлектрические резонаторы или резонаторы с модами шепчущей галереи изучались и использовались в основном в форме круглых цилиндров (см., например, [1]). В последнее время было показано, что цилиндрические квазиоптические диэлектрические резонаторы с проводящими торцевыми стенками могут быть использованы для измерения поверхностного сопротивления, R_s , тонких пленок высокотемпературных сверхпроводников [2,3]. Такой подход применяется потому, что он позволяет повышать чувствительность измерений малых значений R_s в миллиметровом диапазоне волн и измерять абсолютное значение R_s , поскольку структура поля в вышеупомянутых резонаторах определяется непосредственно из решения уравнений Максвелла. Однако он имеет серьезный недостаток, который заключается в том, что измеренное значение R_s относится к двум пленкам высокотемпературных сверхпроводников. При этом измерение индивидуальных значений R_s требует процедуры „round robin“ [4]. Это непрактично. Поэтому естественно искать такую геометрию резонатора, которая имела бы только одну торцевую проводящую стенку, но позволяла аналитическое решение электродинамической задачи.

Искомый резонатор существует в форме диэлектрической полусферы на металлической плоскости [5]. Однако изготовление высокочастотных полусферических квазиоптических диэлектрических резонаторов из монокристаллического лейкосапфира является сложной и весьма трудоемкой технологической операцией.

Альтернативным вариантом является квазиоптический диэлектрический резонатор в форме конуса, расположенного на проводящей торцевой плоскости. Поскольку к настоящему моменту теоретический подход к исследованию предложенного резонатора не разработан, нами проведено его экспериментальное исследование. При этом измерялись собственные частоты, добротность и распределение поля при изменении угла наклона α образующей конуса по отношению к продольной оси резонатора.

Эксперимент. Экспериментально исследовался тефлоновый резонатор в форме усеченного конуса, угол наклона образующей которого α изменялся в интервале значений от 0 до 35°. Высота резонатора h была выбрана равной радиусу основания $R = 39$ мм. Измерения как открытых резонаторов, т.е. без торцевой проводящей плоскости, так и резонаторов с латунной торцевой проводящей плоскостью проводились в 8 мм диапазоне волн. Резонатор возбуждался при помощи диэлектрических тефлоновых волноводов прямоугольного сечения, одна сторона которых была металлизирована. Ориентация волноводов обеспечивала возбуждение Н_e-мод в исходном цилиндрическом резонаторе ($\alpha = 0$) и при изменении угла α не изменялась. Добротность измерялась по ширине резонансной линии при слабой связи. Распределение электрического поля определялось путем возмущения резонатора металлическим пробным телом.

Результаты измерений. Результаты измерений собственных частот f и добротности Q для НЕ₃₇₁₈-моды представлены на рис. 1, 2 ($n = 37$ — азимутальный индекс, 1 — число вариаций поля вдоль радиуса основания резонатора, $\delta \leq 1$ — число вариаций поля по высоте резонатора соответственно). Эволюция свойств резонатора с изменением α видна из приведенных рисунков.

Собственные частоты открытого резонатора и резонатора с торцевой проводящей стенкой возрастают с увеличением α (при $n = \text{const}$). При значениях $\alpha < 3^\circ$ частоты возрастают сильнее, чем при $\alpha > 3^\circ$, и для интервала значений $\alpha = 10\text{--}35^\circ$ этот рост становится почти линейным. Дальнейшее увеличение частоты открытого резонатора превышает

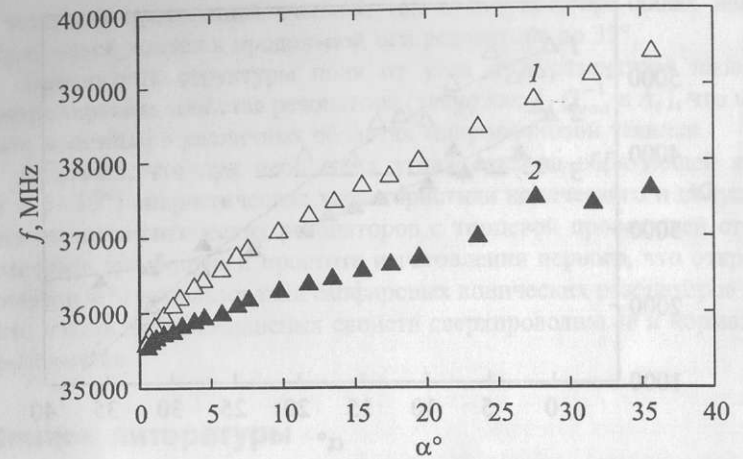


Рис. 1. Собственная частота f как функция угла наклона α образующей конуса для конического квазиоптического диэлектрического резонатора: открытого (1) и с торцевой проводящей стенкой (2).

такое для резонатора с торцевой проводящей стенкой приблизительно вдвое (рис. 1).

Измерения добротности квазиоптического диэлектрического резонатора показывают, что ее значение для обоих резонаторов уменьшается с ростом α , однако при $\alpha > 20^\circ$ добротность открытого резонатора начинает падать более резко, тогда как добротность квазиоптического диэлектрического резонатора с торцевой проводящей стенкой при $\alpha > 10^\circ$ начинает уменьшаться медленнее. Выражение для обратного значения добротности резонатора может быть записано в виде

$$Q^{-1} = k \operatorname{tg} \delta + A_s R_s + Q_{rad}^{-1}, \quad (1)$$

где k — коэффициент, близкий к 1, $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла потерь диэлектрика, A_s — коэффициент включения торцевой проводящей стенки, R_s — поверхностное сопротивление металла торцевой проводящей стенки, Q_{rad} — радиационная добротность. С увеличением α ненагруженная добротность открытого ($A_s = 0$) резонатора может изменяться только за счет увеличения радиационных потерь. С другой стороны, добротность квазиоптического диэлектрического резонатора с

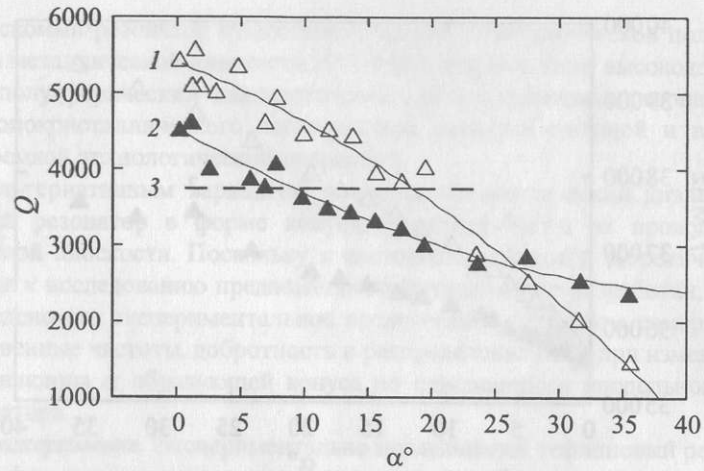


Рис. 2. Добротность Q как функция угла наклона α образующей конуса для конического квазиоптического диэлектрического резонатора: открытого (1), с торцевой проводящей стенкой (2) и для полусферического квазиоптического диэлектрического резонатора с торцевой проводящей стенкой (3).

проводящей торцевой стенкой может уменьшаться за счет роста как A_s , так и Q_{rad}^{-1} . Первый эффект полезен с точки зрения повышения чувствительности измерения R_s , тогда как последний должен быть принят во внимание для сохранения условия $Q_{rad}/Q \gg 1$, которое необходимо для сохранения точности измерений. Для сравнения на рис. 2 представлено значение добротности полусферического квазиоптического диэлектрического резонатора с торцевой проводящей плоскостью. Можно видеть, что оба резонатора имеют одинаковые значения добротности при угле $\alpha \approx 9^\circ$.

Было также изучено распределение энергии электрического поля вдоль оси Z , совпадающей с продольной осью резонатора. Установлено, что даже при малых углах ($\alpha = 5-10^\circ$) поле сильно прижимается к импедансной плоскости, улучшая взаимодействие между полем и проводником (при этом увеличивается A_s).

Заключение. Таким образом, экспериментально показана возможность возбуждения колебаний типа шепчущей галереи в диэлектрических резонаторах, выполненных в форме усеченного конуса, как

с торцевой проводящей стенкой, так и без нее, при углах наклона образующей конуса к продольной оси резонатора до 35° .

Зависимость структуры поля от угла α в резонаторе позволяет контролировать свойства резонатора (такие как f , Q_{rad}^{-1} и A_s), что может быть полезным в различных областях микроволновой техники.

Показано, что при небольших углах наклона образующей конуса ($\alpha = 5-10^\circ$) энергетические характеристики конического и полусферического квазиоптических резонаторов с торцевой проводящей стенкой сравнимы при большей простоте изготовления первого, что открывает возможности использования сапфировых конических резонаторов в технике измерений импедансных свойств сверхпроводников и нормальных проводников.

Список литературы

- [1] Jiao X.H., Guillon P., Benmudes I.A. et al. // IEEE trans. Microwave Theory Tech. 1987. V. 35. P. 1169–1175.
- [2] Cherpak N.T., Barannik A.A., Prokopenko Yu.V. et al. // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 2003. V. 13. N 2. P. 3570–3573.
- [3] Cherpak N.T., Barannik A.A., Prokopenko Yu.V. et al. // Superconductor Science and Technology. 2004. V. 17. P. 899–903.
- [4] Shen Z.-Y. High-Temperature Superconducting Microwave Circuits. Boston–London, Artech House, 1994. 272 p.
- [5] Kharkovsky S., Filipov Y., Eremenko Z. // Microwave and optical technology letters. 1999. V. 21 (4). P. 252–257.