

МИКРОВОЛНОВЫЕ ПОТЕРИ В КВАЗИОПТИЧЕСКОМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТОЛЩИНЫ УЛЬТРАТОНКИХ ПРОВОДЯЩИХ ТОРЦЕВЫХ СТЕНОК

А. А. Баранник, Н. Т. Черпак, А. Н. Стеценко*

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: @ire.kharkov.ua

*Национальный технический университет – Харьковский политехнический институт МОН Украины
21, ул. Фрунзе, Харьков, 61001, Украина

Сообщается о большом резком изменении ($\sim 10^3$ раз) значения добротности квазиоптического диэлектрического резонатора с торцевыми стенками в виде ультратонких медных пленок при изменении их толщины всего лишь на $\sim 0,9$ нм. Измерения выполнены в 8-мм диапазоне волн при комнатной температуре. Представлено объяснение эффекта, основанное как на микроволновых свойствах резонатора с пленкой, так и на зависимости сплошности ультратонких пленок меди от толщины. Ил. 2. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: квазиоптический диэлектрический резонатор, микроволновые потери, ультратонкие пленки.

В последнее время выполнен ряд работ по исследованию электродинамических особенностей квазиоптических диэлектрических резонаторов с торцевыми проводящими стенками (рис. 1) [1]. По сути, эти резонаторы являются квазиоптическими резонаторами Хакки-Колемана (Hakki-Coleman) [2], в которых в отличие от их классических аналогов возбуждаются волны шепчущей галереи. Квазиоптические диэлектрические резонаторы представляют интерес, прежде всего, из-за возможности их применения для проведения измерений микроволновых характеристик конденсированных сред в миллиметровом диапазоне волн [1, 3].

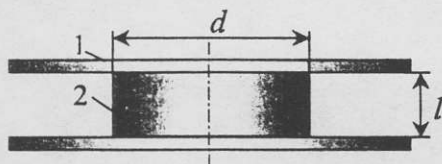


Рис. 1. Квазиоптический диэлектрический резонатор с торцевыми проводящими стенками: 1- торцевые проводящие стенки; 2- диэлектрический диск

Одна из основных характеристик квазиоптического диэлектрического резонатора с торцевыми проводящими стенками, а именно добротность, определяемая потерями микроволновой энергии, зависит от тангенса потерь $\operatorname{tg} \delta$ в диэлектрике и поверхностного сопротивления R_s , материала торцевых стенок. С одной стороны, добротность открытых сапфировых резонаторов (т. е. без торцевых стенок) в миллиметровом диапазоне может достигать значений 10^4 - 10^5 даже при комнатной температуре. С другой стороны, добротность резонатора с торцевыми проводящими стенками значительно ниже значения добротности открытого резонатора. Как функция толщины d_F торцевых проводящих стенок, добротность

падает, когда d_F становится меньше 2δ , где δ является глубиной скин-слоя в проводнике. Отсюда следует, что при некоторой толщине $d_F = d_{Fmin} < \delta$ значение добротности должно достигать минимального значения. Другими словами, при толщинах пленки $d_F < d_{Fmin}$ и $d_F > d_{Fmin}$ добротность должна возрастать. Это ожидание согласуется с результатами рассмотрения плоскопараллельной металлической пленки, помещенной в электромагнитное поле (см., например, [4]). Ранее было найдено, что кривая поглощения высокочастотной (ВЧ) энергии в зависимости от d_F имеет максимум, когда d_F становится намного меньше δ ($d_F \ll \delta$). Несмотря на этот вывод, который часто используется в ВЧ технике (например, при создании болометров [4]), определение характерной зависимости добротности от d_F представляет интерес для квазиоптических диэлектрических резонаторов. Это связано с тем, что резонатор указанного типа имеет высокое значение добротности и, следовательно, потенциально большую возможность изменения добротности при изменении толщины d_F торцевых стенок. Измерения добротности в функции d_F представляют особый интерес с точки зрения изучения свойств ультратонких пленок с $d_F \ll \delta$, которые могут использоваться в качестве торцевых стенок резонатора. При этом важно, что их внутренние свойства могут изменяться в зависимости от внешних условий [5, 6].

В данной работе сообщается о большом изменении (более, чем в 10^3 раз) добротности квазиоптического диэлектрического резонатора в зависимости от толщины пленки меди, когда d_F изменяется в узком интервале значений (с 3,5 до 4,4 нм). По-видимому, эффект вызывается нарушением сплошности ультратонкой медной плен-

ки и сильной зависимостью структуры поля резонатора от толщины ультратонкой пленки.

Измерения проводились с использованием сапфирового диска диаметром $D = 14,4$ мм и высотой $l = 2,5$ мм. Медные пленки толщиной от 1 до 2000 нм напылялись непосредственно на торцевые плоскости диска. Толщина d_F контролировалась по длительности времени напыления с точностью до 0,1 нм. Напыление производилось методом магнетронного распыления на постоянном токе медной мишени в вакуумной камере при температуре $\sim 100^\circ\text{C}$ и давлении Ar $1,5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. (~ 2 Па) со скоростью 0,2 нм/с.

Измерения добротности проводились в 8-мм диапазоне волн при 300 К спустя 1-2 ч после извлечения пленок из вакуумной камеры. Исключением являются измерения, которые проводились в течение двух дней с одними и теми же пленками толщиной 5,3 нм. Применялся метод измерения добротности по ширине резонансной линии на уровне -3 дБ при предельно слабой возможной связи с резонатором. В области толщин $d_F \leq \delta$ и $d_F > \delta$ измерения добротности проведены с применением дополнительных массивных медных пластинок диаметром ~ 20 мм. Сапфировый диск с напыленными медными пленками зажимался между массивными медными дисками для исключения краевых эффектов. В области чрезвычайно тонких пленок $d_F \ll \delta$ медные диски не применялись.

Экспериментальная зависимость добротности резонатора от толщины медных пленок, напыленных на торцевые стенки диэлектрического диска, представлена на рис. 2.

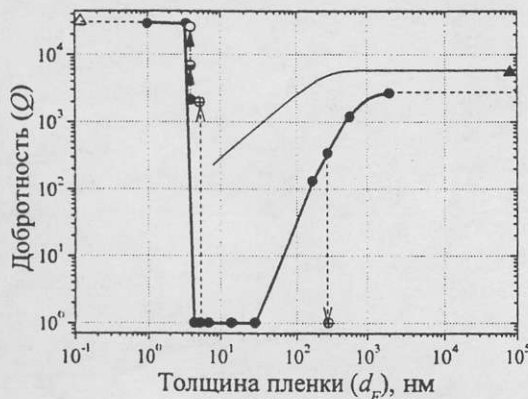


Рис. 2. Зависимость добротности квазиоптического диэлектрического резонатора от толщины медных торцевых стенок: ● - медная пленка; △ - резонатор без пленок; ▲ - объемная медь; ○ - пленки спустя 1 ч после напыления; ⊙ - пленки спустя 24 ч после напыления; ⊕ - пленка в виде матричной структуры; — - расчет

Расчетные значения добротности на рис. 2 получены из выражения:

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

которое следует из правила суммы обратных добротностей, где коэффициенты k и A_s показывают вклад диэлектрических и проводящих потерь в общую энергию потерь; $\operatorname{tg} \delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь; R_s - реальная часть поверхностного импеданса Z_s медной пленки; d_F - толщина медной пленки. Поверхностное сопротивление $R_s(d_F)$ определялось на основании известного выражения для поверхностного импеданса [7]

$$Z_s(d_F) = Z_s^\infty \left(\frac{Z_s^\infty \operatorname{th}(kd_F) + Z_d}{Z_s^\infty + Z_d \operatorname{th}(kd_F)} \right), \quad (2)$$

где Z_s - поверхностный импеданс пленки произвольной толщины d_F ; $Z_s^\infty = (1+i)(\omega \mu_0 \delta) / \sqrt{2}$ - поверхностный импеданс объемного образца; $\delta = (1/(\omega \mu_0 \sigma))^{1/2}$ - глубина скин-слоя; σ - проводимость на постоянном токе; $Z_d = [\mu_0 / \{\epsilon_0 \epsilon_0 (1 - i \operatorname{tg} \delta)\}]^{1/2}$ - импеданс диэлектрической подложки; $k = 1/\delta$ - волновое число (медная пленка напылялась непосредственно на диэлектрический диск, поэтому в расчете использовался импеданс вакуума $Z_d = Z_0 = 120\pi$).

На рис. 2 приведены также значения $Q = 31250$ для открытого резонатора ($d_F = 0$, волна (колебание) HE_{1211}) и $Q = 5890$ для резонатора с (толстыми) объемными медными торцевыми проводящими стенками ($d_F \sim 5000$ мкм $\gg \delta \sim 300$ нм, HE_{1410} -колебание). При уменьшении толщины медного покрытия, когда d_F приближается к толщине δ скин-слоя и становится меньше δ , величина добротности снижается. Резонансная линия становится ненаблюдаемой при $d_F < 50$ нм, хотя можно оценить минимальное измеряемое значение $Q_{\min} \leq 20$. Резонансная линия не наблюдается при уменьшении d_F до 4,4 нм. При $d_F = 3,5$ нм резонанс возникает со значением $Q = 29120$, т. е. при изменении толщины пленки всего лишь на 0,9 нм добротность изменится более чем 10^3 раз! Тестовые измерения проводимости на постоянном токе показывают чрезвычайно малое значение ее при $d_F = 3,5$ нм и резкое возрастание при $d_F > 4$ нм.

При напылении пленки с промежуточным значением толщины $d_F = 4$ нм значение добротности оказывается также промежуточным, равным $Q = 1970$. После прогрева до 100°C добротность Q поднимается до 6850 и на следующий день она возрастает до 25710. Следующие два измерения выполнены с пленками толщиной 5,3 и 280 нм, напыленными через сетку с прямоугольными ячейками размером 40×40 мкм, так что

пленка имела структуру матрицы с расстоянием 10 мкм между проводящими областями. В первом случае ($5,3 \text{ нм} \ll \delta$) резонанс наблюдался (резонанс с такой толщиной d_F сплошной пленки не наблюдался вовсе), а во втором случае ($280 \text{ нм} \approx \delta$), наоборот, резонанс исчезал.

Приведенные данные показывают, что обнаруженный огромный пороговый эффект в квазиоптическом диэлектрическом резонаторе с ультратонкими пленками вызывается нарушением сплошности проводящей пленки Cu при изменении ее толщины всего лишь на $\sim 0,9 \text{ нм}$. Противоположный знак изменения добротности для двух значений толщины, $d_F \ll \delta$ и $d_F \sim \delta$ пленок при переходе к матричной структуре подтверждает этот вывод.

Аналогичный эффект был получен при наблюдении прозрачности ультратонкой пленки Au[±] в терагерцовом диапазоне, когда толщина пленки достигала значения, при котором имела место проводимость перколяции [8]. Стоит заметить, однако, что коэффициент передачи при этом изменяется только в несколько раз.

Квазиоптические диэлектрические резонаторы применяются в широком спектральном диапазоне электромагнитных волн вплоть до оптического диапазона. Поэтому не исключено, что отмеченная особенность квазиоптических диэлектрических резонаторов может быть полезной для изучения новых материалов и новых электродинамических эффектов в них, таких как необычное прохождение оптического излучения через решетку отверстий в металлическом покрытии [9] или нелинейная зависимость сдвига длины волны от плотности Ми-частиц на поверхности резонатора [10].

Представляется привлекательной возможность создания переключающих устройств на основе обнаруженной особенности при наличии ультратонких проводящих пленок, свойствами которых можно было бы управлять с помощью внешнего фактора (электрическое или магнитное поле, микроволновое или оптическое излучение). Одно из таких подходящих веществ, а именно VO₂ известно, однако оно весьма токсично [11]. Поэтому в дальнейшем необходимы как количественное описание свойств резонатора с ультратонкими пленками, так и поиск веществ с соответствующими свойствами.

1. Cherpak N. T., Barannik A. A., Filipov Yu. F., et al. Accurate Microwave Technique of Surface Resistance Measurement of Large-area HTS Films using Sapphire Quasioptical Resonator // IEEE Trans. on Appl. Supercond. - 2003. - 13, N 2. - P.3570-3573.
2. Hakki W. and Coleman P. D. A dielectric resonator method of measuring inductive capacities in the millimeter range // IEEE Trans. on Microwave Theory. 1960. - 8, N 6. - P.402-410.

3. Cherpak N. T., Barannik A. A., Prokopenko Yu. V. et al. A New Technique of Dielectric Characterization of Liquids // Nonlinear Dielectric Phenomena in Complex Liquids / Ed. by S. Rzoska and V. Zhelezny, NATO Science Series. - Kluwer Academic Publishers, 2004. - 157. - P.63-76.
4. Слуцкая В. В. Тонкие пленки в технике сверхвысоких частот. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. - 400 с.
5. Kroll J., Danmo J., Unterrainer K. Ultra thin metallic layers studied by broad band Terahertz time-domain spectroscopy / IRMMW 2004/THz. - 2004. - P.465-466.
6. Reich S., Leitus G., Popowitz-Biro R., et al. Magnetization of small lead particles // Phys. Rev. Lett. - 2004. - 91. - P.(147001-1)-(147001-4).
7. Hein M. High-Temperature Superconductor Thin Films at Microwave Frequencies // Tracts in Modern Physics. - Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag. - 1999. - 155. - 394 p.
8. Garet F., Duvillaret L. and Coutaz J.-L. THz time-domain spectroscopy on nanometric-thick gold layers / IRMMW 2004/THz. - 2004. - P.467-468.
9. Ebbesen T. W., Lezec H. J., Ghaemi H. F. et al. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays // Nature. - 1998. - 391, N 12. - P.667-669.
10. Vollmer F., Ren H.-C., Arnold S. et al. Optical coupling of microparticles adsorbed on a whispering gallery resonator // arXiv.org/abs/physics/0407020.
11. Byung-Gyu Chae, Hyun-Tak Kim, Doo-Hyeob Youn. et al. Abrupt metal-insulator transition observed in VO₂ thin films induced by a switching voltage pulse // arXiv.org/abs/physics/0502375.

MICROWAVE LOSSES IN THE QUASIOPTICAL DIELECTRIC RESONATOR AS A FUNCTION OF ULTRA-THIN CONDUCTING ENDPLATE THICKNESS

A. A. Barannik, N. T. Cherpak, and A. N. Stetsenko

We report on a large steep variation ($\sim 10^3$ times) of the quality-factor of quasioptical dielectric resonator with conducting endplates in the form of ultra-thin copper films as a function of their thickness only at $\sim 0.9 \text{ nm}$ variation of the thickness. Measurements were carried out in the Ka-waveband at room temperature. An explanation of the effect based on both microwave and continuity property of the ultra-thin copper films is presented.

Key words: quasioptical dielectric resonator, microwave losses, ultra-thin films.

МІКРОХВИЛЬОВІ ВТРАТИ В КВАЗІОПТИЧНОМУ ДІЕЛЕКТРИЧНОМУ РЕЗОНАТОРІ ЗАЛЕЖНО ВІД ТОВЩИНИ УЛЬТРАТОНКИХ ПРОВІДНИХ ТОРЦЕВИХ СТІНОК

О. А. Баранник, М. Т. Черпак, О. М. Стеценко

Повідомляється про велику різку зміну ($\sim 10^3$ раз) значення добротності квазиоптичного діелектричного резонатора з торцевими стінками у вигляді ультратонких мідних плівок при змінюванні їх товщини всього лише на $\sim 0,9 \text{ нм}$. Вимірювання виконано у 8-мм діапазоні хвиль при кімнатній температурі. Подано пояснення ефекту, що ґрунтується на мікрохвильових властивостях резонатора з плівкою, так і на залежності суцільності ультратонких плівок міді від товщини.

Ключові слова: квазиоптичний діелектричний резонатор, мікрохвильові витрати, ультратонкі плівки.

Рукопись поступила 28 октября 2005 г.