

Твердотельная электроника

УДК 621.372.41

Д.Д. Татарчук, канд. техн. наук, **В.И. Молчанов**, канд. техн. наук, **Ю.В. Диденко**, **А.С. Франчук**
 Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
 ул. Политехническая, 16, г. Киев, 03056, Украина.

Тонкие диэлектрические резонаторы миллиметрового диапазона длин волн

В статье исследовано влияние на электродинамические свойства тонкого диэлектрического резонатора отношения его высоты к поперечным размерам. Приведены аналитические выражения для расчета резонансной частоты тонких диэлектрических резонаторов прямоугольной и цилиндрической формы. Полученные теоретические результаты подтверждены экспериментально. Показана возможность использования тонкого диэлектрического резонатора для измерения СВЧ параметров диэлектрических материалов. Библ. 7, рис. 5.

Ключевые слова: диэлектрический резонатор; диэлектрические материалы; резонансные частоты; диэлектрическая проницаемость; СВЧ параметры.

I. Введение

Диэлектрические резонаторы (ДР) уже много лет успешно используются для построения частотно-селективных устройств дециметрового и сантиметрового диапазона длин волн, что позволило добиться значительных успехов в миниатюризации устройств СВЧ [1-5]. Но в настоящее время частотный ресурс в хорошо освоенных сантиметровом и дециметровом диапазонах исчерпывается, поэтому наблюдаются тенденции к сдвигу несущих частот радиоканалов в миллиметровую область СВЧ-диапазона. Это приводит к необходимости разработки новых эффективных коммуникационных устройств, способных работать в миллиметровом диапазоне. При этом естественным является стремление использовать хорошо отработанные технологии. Однако использование в миллиметровом диапазоне традиционных ДР, имеющих отношение высоты к поперечным размерам (L/D) более чем 0,3, затруднено. Одна из основных проблем использования диэлектрических резонаторов в сверхвысокочастотных устройствах выше 15 ГГц – слишком малые размеры ДР и

связанные с этим значительные трудности их подстройки на требуемую частоту. Например, на частоте 30 ГГц, диэлектрический резонатор имеет диаметр немногим более полутора миллиметров, а размер подстроечного элемента, металлического или диэлектрического, может оказаться в два-три раза больше.

Наши исследования показали, что решить эту проблему можно путем использования тонких диэлектрических резонаторов, у которых отношение высоты к поперечным размерам лежит в пределах от 0,1 до 0,04. Такие резонаторы, в силу малой высоты, имеют большие поперечные размеры по сравнению с традиционными ДР, рассчитанными на ту же резонансную частоту, что делает их перспективными для использования в миллиметровом диапазоне длин волн. Следует также отметить, что, во-первых, такие резонаторы могут быть изготовлены на основе толстопленочной технологии, а во-вторых, как показали наши исследования, такие резонаторы могут эффективно использоваться для измерения диэлектрических параметров тонких пленок в СВЧ диапазоне. Поэтому данная статья посвящена исследованию электродинамических свойств тонких диэлектрических резонаторов и перспективам их использования в устройствах миллиметрового диапазона.

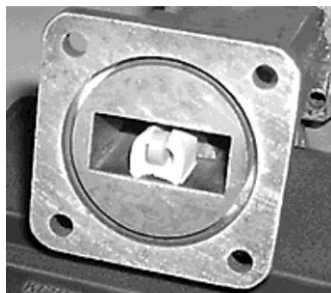
II. Особенности тонких диэлектрических резонаторов

Математическое описание электродинамической системы сводится к решению уравнений Гельмгольца (1) для данной системы при соответствующих граничных условиях (2) на границах сред с различными свойствами [4,6,7].

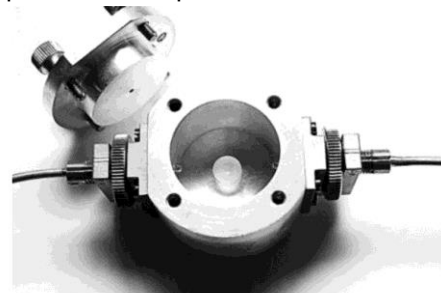
$$\nabla^2 \Gamma_i^e + \varepsilon_i \mu_i k^2 \Gamma_i^e = 0; \nabla^2 \Gamma_i^m + \varepsilon_i \mu_i k^2 \Gamma_i^m = 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} n \times (E_i - E_j) = 0; \quad n \cdot (E_i \varepsilon_i - E_j \varepsilon_j) = \rho_{cs} \\ n \times (H_i - H_j) = j_s; \quad n \cdot (H_i \mu_i - H_j \mu_j) = 0' \end{aligned} \quad (2)$$

де $\vec{\Gamma}^e, \vec{\Gamma}^m$ – электрический и магнитный вектора Герца соответственно, ε_i – диэлектрическая проницаемость i -ой области резонансной системы, μ_i – магнитная проницаемость i -ой области резонатора, k – волновой вектор, n – вектор нормали к границе раздела областей, E – вектор электрического поля, H – вектор магнитного поля, j_s – нормальная к границе раздела компонента плотности тока, ρ_{cs} – поверхностная плотность заряда на границе раздела областей.



(a)



(б)

Рис. 1. Расположение ДР в волноводе (а) и измерительной ячейке (б)

Для измерений использовалось оборудование: AGILENT PNA 8364B Vector Network Analyzer, а так же измерители KCBH и ослабления P2-57, P2-61, P2-66, P2-67.

Как показали проведенные исследования тонкие и сверхтонкие диэлектрические резонаторы можно выделить в отдельную группу по признаку взаимного расположения мод ДР на частотной шкале.

Для диэлектрических резонаторов с соотношением высоты к поперечным размерам более 0,3 при строго симметричной ориентации ДР относительно стенок экрана, низшей модой является ТЕ мода, за ней следует ЕН мода.

В тонких диэлектрических резонаторах ввиду различия фазовых скоростей различных мод, определяемых свойствами материала, геометрией диэлектрического резонатора, ориентацией его относительно возбуждающих полей и углами падения электромагнитной волны на границу раздела, взаимное расположение мод меняется в зависимости от указанных факторов. Поскольку резонансная частота ТЕ моды с уменьшением высоты нарастает значительно быстрее, чем для гибридных НЕ и ЕН мод, то отношение высоты к поперечным размерам и ориентация ДР относительно возбуждающих полей становятся определяющими. Сгущение спектра нежелательно как для устройств на диэлектрических резонаторах, так и при измерениях. Тем не менее, оптимальным выбором ориентации резонатора и отношения высоты к

Полученная система уравнений может быть решена численно с использованием вычислительной техники. При использовании численных методов погрешность, как правило, не превышает 1–2% [6].

Изучение свойств диэлектрических резонаторов может выполняться как в волноводах, так и в специальных измерительных ячейках. Нами изучение свойств тонких диэлектрических резонаторов проводилось как в волноводе (рис. 1, а), так и в специализированной ячейке (рис. 1, б) с одновременным использованием компьютерного моделирования.

поперечным размерам можно существенно компенсировать нежелательные влияния близко расположенных мод.

Подтвержденное экспериментом моделирование с учетом внешних элементов (экрана, опоры и элементов связи) показало, что соотношение высоты к поперечным размерам, определяющее какая мода будет иметь низшую частоту, в зависимости от проницаемости, имеет нелинейный характер (рис. 2). В данном случае тонкий диэлектрический резонатор сечением $10 \times 10 \times L$ мм был помещен в цилиндрический экран 25×12 мм, на опоре из плавленного кварца. Аналогичная зависимость наблюдается и в волноводе.

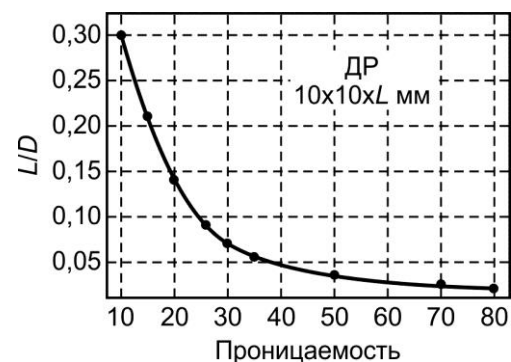


Рис. 2. График зависимости соотношения высоты к поперечным размерам, при которых НЕ мода в ячейке 25×12 мм становится низшей по частоте, от проницаемости материала диэлектрического резонатора

Как уже отмечалось при использовании численных методов погрешность расчета, как правило, не превышает 1–2%. Однако численный расчет требует серьезных затрат времени и вычислительных ресурсов. Поэтому представляет интерес приближенный расчет резонансной частоты тонкого диэлектрического резонатора.

Если для диэлектрических резонаторов с $L/D > 0,3$ простая приближенная формула получается достаточно легко, так как зависимости резонансных частот от отношения высоты ДР к его поперечным размерам, при различной проницаемости, практически параллельны, то для тонких ДР простое выражение не получается. Это обусловлено тем, что в области малых L/D , зависимости резонансной частоты от отношения высоты к поперечным размерам имеют различный наклон, увеличивающийся с ростом проницаемости, как показано на рис. 3.

Тем не менее, учитывая то, что номенклатура проницаемостей весьма ограничена, можно предложить не совсем короткие выражения для расчета $F_r(L, D)$. Например, кривые на рис. 3 с достаточной точностью аппроксимируются выражением вида:

$$F_r = \frac{0,96C}{4\sqrt{\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{3,83}{\sqrt{D^3}}\right)^L + \left(\frac{3,83}{\sqrt{D^3}L}\right)^{0,5}}, \quad (3)$$

что позволяет, без значительных затрат времени, оценить возможное расположение собственного резонанса на частотной шкале для тонкого ДР. Такие, несложные выражения разработаны для $\epsilon = 9,6, 20, 35$ и др. Здесь C – константа зависящая от диэлектрической проницаемости, формы резонатора и типа колебаний, L – высота резонатора, D – обобщенный поперечный размер. Для цилиндрического резонатора D – это диаметр, а для прямоугольного его можно вычислить из следующего выражения:

$$D = \frac{4,81ab}{\pi\sqrt{a^2 + b^2}}, \quad (4)$$

где a, b – поперечные размеры прямоугольного резонатора. Этот пересчет приемлемо работает для квадрата (ошибка частоты $\sim 1\%$), но несколько хуже для прямоугольника.

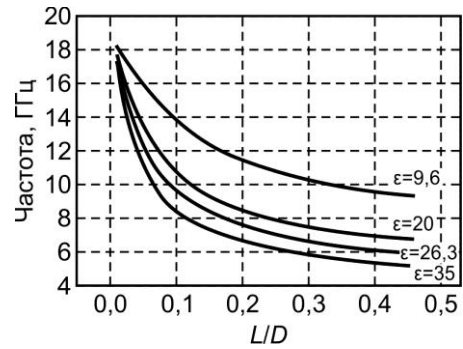


Рис. 3. График зависимости резонансной частоты от отношения высоты диэлектрического резонатора к его поперечным размерам для различных диэлектрических проницаемостей

На рис. 4 показаны расчетная и экспериментальная зависимости резонансной частоты от L/D диэлектрического резонатора из промышленной керамики на основе Al_2O_3 , в ячейке ДР $10 \times 10 \times L$ мм, $\epsilon = 9,6$. Как видим, расчет и эксперимент хорошо согласуются, что свидетельствует об адекватности представленных выражений.

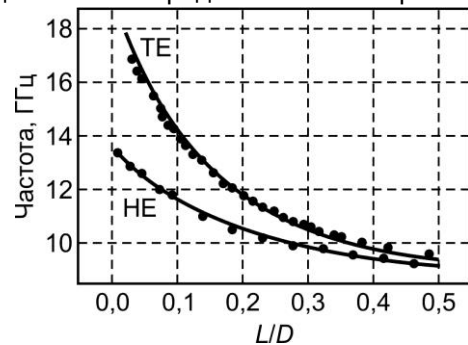


Рис. 4. Расчетная (сплошная) и экспериментальная (точки) $F_r(L, D)$ диэлектрического резонатора из промышленной керамики на основе Al_2O_3

На рис. 5 приведена аналогичная зависимость резонансной частоты низшей TE моды для диэлектрического резонатора из керамики ТЦ35 ($BaTi_4O_9 + ZnO$) $\epsilon = 35$.

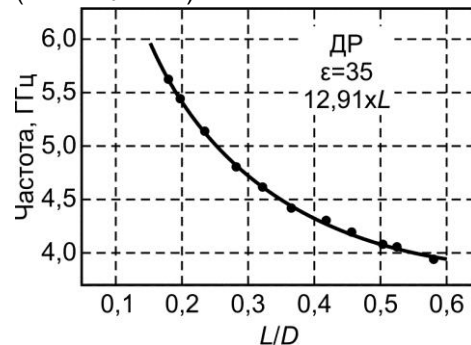


Рис. 5. Расчетная (сплошная) и экспериментальная (точки) $F_r(L, D)$ диэлектрического резонатора из керамики ТЦ35 ($BaTi_4O_9 + ZnO$) $\epsilon = 35$

Как видно из рисунка и в этом случае наблюдается приемлемое совпадение теоретических и экспериментальных результатов. Таким образом, в перспективе на основе выведенных соотношений может быть разработан метод измерения СВЧ параметров диэлектрических материалов.

Выводы

1. На основе результатов проведенных исследований влияния геометрических и электрофизических параметров диэлектрических резонансных структур на их характеристики, показано, что тонкие диэлектрические резонаторы прекрасно работают как в волноводе, так и в специальном экране.

2. Показано, что исследования диэлектрических характеристик материалов с использованием тонкого диэлектрического резонатора можно выполнять как в волноводе, так и в специальной измерительной ячейке. Оба варианта имеют свои преимущества, могут прекрасно дополнять друг друга и практически компенсируют имеющиеся недостатки.

3. Разработаны простые эмпирические формулы для расчета резонансной частоты по известному значению диэлектрической проницаемости и размерам ДР, расчета размеров ДР на заданную частоту по известной проницаемости и заданному соотношению L/D , а также для расчета проницаемости по резонансной частоте и размерам ДР. Полученные соотношения могут стать основой для создания метода измерений СВЧ параметров диэлектрических материалов на основе тонких диэлектрических резонаторов.

4. Полученные результаты подтверждают перспективность использования тонких диэлектрических резонаторов в технике СВЧ, что, в свою очередь, указывает на необходимость дальнейших исследований.

Список использованных источников

1. *Tatarchuk D.D.* Microwave Dielectric Measurement Methods on the Base of the Composite Dielectric Resonator / D. D. Tatarchuk, V. I. Molchanov, V. M. Pashkov, A. S. Franchuk // *Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2015): Proc. of 35th Int. Sci. Conf. (April 21 – 24, 2015, Kyiv, Ukraine).* – Kyiv, 2015. – PP. 231 – 234.
2. *Masse D.J.* A new low loss high-k temperature compensated dielectric for microwave applications / D. J. Masse, R. A. Pucel, D. W. Readey, C. P. Hartwig // *Proc. IEEE.* – 1971. – Vol. 59. – PP. 1628 – 1629.
3. *Konishi Y.* Microwave electronic Circuit Technology / Y. Konishi. – New York: Marcel Dekker, Inc, 1998. – 427 p.
4. *Безбородов Ю.М.* Фильтры СВЧ на диэлектрических резонаторах / Ю. М. Безбородов, Т. Н.Нарытник, В. Б.Федоров. – К.: Техника, 1989. – 184 с.
5. *Белов Л.* Генераторы с диэлектрическими резонаторами для стабилизации частоты / Л.Белов, В.Хилькевич // *Электроника: НТБ.* – 2006. – №7. – С. 54 – 59.
6. *Григорьев А.Д.* Резонаторы и резонаторные замедляющие системы СВЧ: Численные методы расчёта и проектирования / А. Д. Григорьев, В. Б. Янкевич. – М.: Радио и связь, 1984. – 248 с.
7. *Молчанов В.И.* Неоднородности в диэлектрических структурах СВЧ / В. И. Молчанов, Д. Д. Татарчук // *Электроника и связь.* – 2008. – №6(47). – С. 10 – 14.

Поступила в редакцию 24 декабря 2015 г.

УДК 621.372.41

Д.Д. Татарчук, канд. техн. наук, **В.І. Молчанов**, канд. техн. наук, **Ю.В. Діденко**, **А.С. Франчук**
Національний технічний університет України «КПІ»,
вул. Політехнічна, 16, м Київ, 03056, Україна.

Тонкі діелектричні резонатори міліметрового діапазону довжин хвиль

У статті досліджено вплив на електродинамічні властивості тонкого діелектричного резонатора відношення його висоти до поперечних розмірів. Наведено аналітичні вирази для розрахунку резонансної частоти тонких діелектричних резонаторів прямокутної і циліндричної форми. Отримані теоретичні результати підтверджені експериментально. Показано мож-

лівість використання тонкого діелектричного резонатора для вимірювання НВЧ параметрів діелектричних матеріалів. Бібл. 7, рис. 5.

Ключові слова: діелектричний резонатор; діелектричні матеріали; резонансні частоти; діелектрична проникність; НВЧ параметри.

UDC 621.372.41

D. Tatarchuk, Ph.D, V. Molchanov, Ph.D, Y. Didenko, A. Franchuk

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»,
st. Polytechnique, 16, Kyiv, 03056, Ukraine.

Thin Dielectric Resonators of the Millimeter Waves Range

The effect of the height to transverse dimensions ratio of a thin dielectric resonator on its electrodynamic properties is investigated. The analytical expressions for the calculation of the resonant frequency of the thin dielectric resonators rectangular and cylindrical form are shown. The theoretical results are confirmed experimentally. The possibility of using a thin dielectric resonator for measuring parameters of the microwave dielectric materials is shown. References 7, figures 5.

Keywords: dielectric resonator; dielectric materials; resonance frequency; dielectric constant; microwave parameters.

References

1. Tatarchuk, D. D., Molchanov, V. I., Pashkov, V. M., Franchuk, A. S. (2015), Microwave Dielectric Measurement Methods on the Base of the Composite Dielectric Resonator. Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2015): Proc. of 35th Int. Sci. Conf. (April 21 – 24, 2015, Kyiv, Ukraine). PP. 231 – 234.
2. Masse, D. J., Pucel, R. A., Readey, D. W., Hartwig, C. P. (1971). A new low loss high-k temperature compensated dielectric for microwave applications. Proc. IEEE. Vol. 59, pp. 1628 – 1629.
3. Konishi, Y. (1998). Microwave electronic Circuit Technology. New York, Marcel Dekker, Inc. P. 427.
4. Bezborodov, Y. M., Narytnik, T. N., Fedorov, V. B. (1989). Microwave filters on dielectric resonators. Kyiv, Tehnika. P. 184. (Rus)
5. Belov, L., Khilkevich, V. (2006). Generators with dielectric resonators for frequency stabilization. Electronics: STB. No.7, pp. 54 – 59.
6. Grigorev, A. D., Yankevich, V. B. (1984). Resonators and UHF resonator slowing systems: Numerical methods of calculation and design. Moscow, Radio i svyaz. P. 248. (Rus)
7. Molchanov, V. I., Tatarchuk, D. D. (2008). Inhomogeneities in the microwave dielectric structures. Electronics and Communications. No. 6(47), pp. 10 – 14. (Rus)