

## Твердотельная электроника

УДК 621.372.41

**Д.Д. Татарчук**, канд. техн. наук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
ул. Политехническая, 16, г. Киев, 03056, Украина.

### Частотно-селективные структуры на основе тонких диэлектрических резонаторов

*В статье показана возможность использования тонких диэлектрических резонаторов для создания частотно-селективных структур сверхвысокочастотного диапазона. Приведены результаты численного моделирования таких структур. Полученные численные результаты подтверждены экспериментально. Библ. 5, рис. 5.*

**Ключевые слова:** тонкий диэлектрический резонатор; частотно-селективные структуры; резонансные частоты; СВЧ-диапазон; сдвиг фазы.

#### Введение

Постоянное совершенствование информационных технологий требует создания новых, более эффективных средств передачи данных. В настоящее время особенно быстро развиваются беспроводные технологии и, как следствие, частотный ресурс в уже освоенных диапазонах исчерпывается. Решить данную проблему можно путем сдвига несущих частот радиоканалов в миллиметровую область сверхвысокочастотного диапазона.

Таким образом, создание приемников и передатчиков миллиметрового диапазона длин волн становится важной задачей современной электроники, и ее важность со временем будет только расти в соответствии с имеющимися тенденциями развития информационных технологий.

Диэлектрические резонаторы (ДР) уже много лет успешно используются для построения частотно-селективных устройств дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн, что позволило добиться значительных успехов в миниатюризации устройств СВЧ [1-2].

Однако использование в миллиметровом диапазоне традиционных ДР, имеющих отношение высоты к поперечным размерам ( $L/D$ ) более чем 0,3, затруднено. Здесь  $L$  – высота резонатора, а  $D$  – приведенный поперечный размер. Для цилиндрического резонатора  $D$  –

это диаметр, а для прямоугольного он может быть вычислен по формуле:

$$D = \frac{4,81ab}{\pi\sqrt{a^2 + b^2}}, \quad (1)$$

где  $a, b$  – поперечные размеры прямоугольного резонатора. Этот пересчет для квадрата дает ошибку расчета частоты ~1%, для прямоугольника точность расчета несколько хуже.

Одна из основных проблем использования диэлектрических резонаторов в сверхвысокочастотных устройствах выше 15 ГГц – очень малые размеры ДР и связанные с этим значительные трудности их изготовления и 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.

Исследования показали, что решить эту проблему можно путем использования тонких диэлектрических резонаторов, у которых отношение высоты к поперечным размерам лежит в пределах от 0,04 до 0,4. Такие резонаторы, из-за их 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. Поэтому данная статья посвящена изучению частотно-селективных структур СВЧ-диапазона на основе тонких резонаторов.

#### Свойства тонких диэлектрических резонаторов

Математическое описание электродинамической системы сводится к решению уравнений Гельмгольца (2) для данной системы при соответствующих граничных условиях (3) на границах раздела сред с различными свойствами [2,3,4].

$$\begin{aligned} \nabla^2 \Gamma_i^e + \varepsilon_i \mu_i k^2 \Gamma_i^e &= 0 \\ \nabla^2 \Gamma_i^m + \varepsilon_i \mu_i k^2 \Gamma_i^m &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} n \times (E_i - E_j) &= 0; \\ n \bullet (E_i \varepsilon_i - E_j \varepsilon_j) &= \rho_{cs} \\ n \times (H_i - H_j) &= j_s; \\ n \bullet (H_i \mu_i - H_j \mu_j) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\vec{\Gamma}^e, \vec{\Gamma}^m$  – электрический и магнитный вектора Герца соответственно,  $\varepsilon_i$  – диэлектрическая проницаемость  $i$ -ой области резонансной системы,  $\mu_i$  – магнитная проницаемость  $i$ -ой области резонатора,  $j_s$  – нормальная к границе раздела компонента плотности тока,  $\rho_{cs}$  – поверхностная плотность заряда на границе раздела областей.

Полученная система уравнений может быть решена численно с погрешностью 1–2% [3,5].

Численное моделирование различных СВЧ структур на основе тонких диэлектрических резонаторов показало, что тонкие диэлектрические резонаторы обладают рядом особенностей [5]. 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 ( $L/D$ ) более 0,3 при строго симметричной ориентации ДР относительно стенок экрана низшей модой является ТЕ мода, за ней следует HE 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 увеличивается значительно быстрее, чем для гибридных HE и EH мод, то отношение высоты к поперечным размерам и ориентация ДР относительно возбуждающих полей становятся определяющими факторами. Таким образом, путем выбора ориентации резонатора и отношения высоты к поперечным размерам можно формировать АЧХ и ФЧХ тонких диэлектрических резонаторов и структур на их основе.

Подтвержденное экспериментом моделирование с учетом внешних элементов (экрана,

опоры и элементов связи) показало, что зависимость соотношения высоты к поперечным размерам, определяющее, какая мода будет иметь минимальную частоту, от проницаемости имеет нелинейный характер (рис. 1). В данном случае тонкий диэлектрический резонатор сечением  $10 \times 10 \times L$  мм был помещен в цилиндрический экран  $25 \times 12$  мм; на опоре из плавленного кварца. Аналогичная зависимость наблюдается и в волноводе.

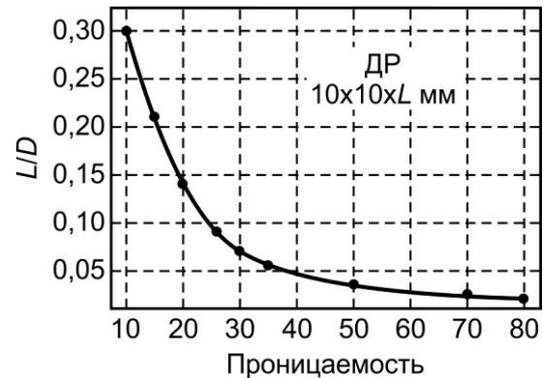


Рис. 1. График зависимости соотношения высоты к поперечным размерам, при которых HE мода в ячейке  $25 \times 12$  мм становится низшей для различных проницаемостей материала ДР

На рис. 2 показаны расчетная и экспериментальная зависимости резонансной частоты от соотношения  $L/D$  диэлектрического резонатора  $10 \times 10 \times L$  мм, изготовленного из промышленной керамики на основе  $Al_2O_3$  с  $\varepsilon = 9.6$  и помещенного в цилиндрический экран.

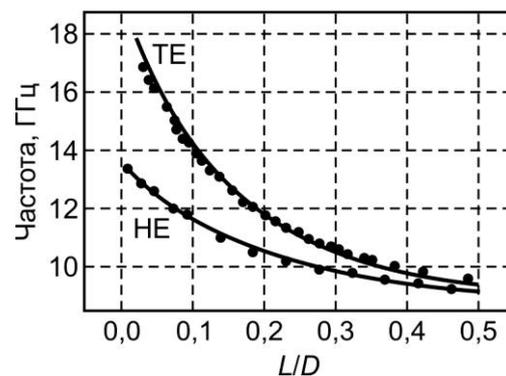


Рис. 2. Графическое изображение расчетной (сплошная) и экспериментальной (точки) зависимостей  $F_r(L, D)$  диэлектрического резонатора из промышленной керамики на основе  $Al_2O_3$

Как видно из рис. 2 HE- и TE-моды сближаются при увеличении отношения  $L/D$ .

Также в работе была исследована зависимость резонансных пиков HE- и TE-мод от углов поворота резонатора относительно стенок вол-

новода. При этом рассматривались два случая: поворот резонатора относительно широкой стенки волновода в плоскости  $XY$  (угол  $\beta$  рис. 3,

а) и поворот относительно широкой стенки волновода в плоскости  $XZ$  (угол  $\alpha$ , рис. 3, б).

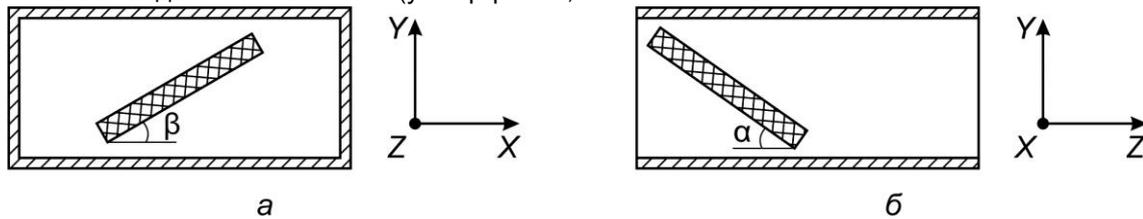


Рис. 3. Расположение исследуемого резонатора в волноводе. Направление оси  $Z$  совпадает с направлением распространения электромагнитной волны в волноводе

Полученные численные и экспериментальные результаты приведены на рис. 4 и 5.

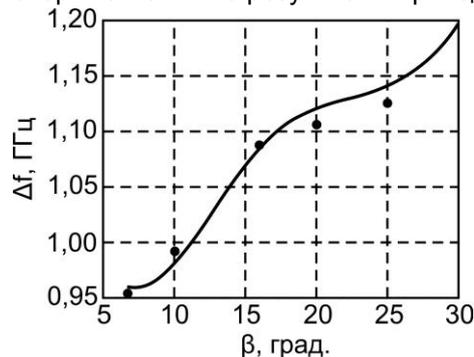


Рис. 4. График зависимости разницы между резонансными частотами низших HE- и TE-мод от угла поворота цилиндрического резонатора в плоскости  $XY$  ( $\varepsilon = 35$ ,  $D = 12,8$  мм,  $L = 0,63$  мм)

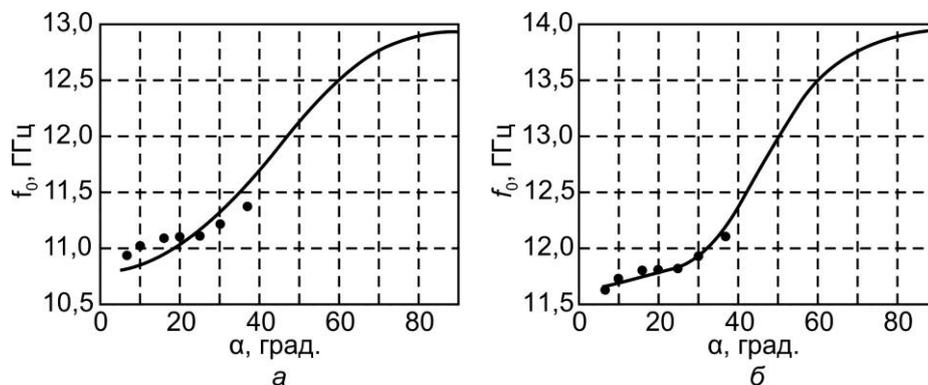


Рис. 5. Графики зависимости резонансной частоты нижней HE-моды от угла поворота резонатора в плоскости  $XZ$ : а – квадратный резонатор ( $\varepsilon = 35$ ,  $a = 9,9$  мм,  $b = 9,9$  мм,  $L = 2,48$  мм); б – цилиндрический резонатор ( $\varepsilon = 35$ ,  $D = 12,8$  мм,  $L = 0,63$  мм)

## Выводы

Проведенные исследования показали, что взаимное расположение мод частотно-селективных структур на основе тонких диэлектрических резонаторов зависит от многих факторов, а именно: от отношения высоты к поперечным размерам, пространственной ориентации резонатора в волноводе и т.д. Наличие таких зависимостей позволяет формировать амплитудночастотную и фазочастотную характе-

ристики частотно-селективных структур на основе тонких диэлектрических резонаторов путем подбора этих факторов. Это, в свою очередь, делает данные структуры перспективными для создания на их основе фильтров и фазовращателей с заданными характеристиками. Однако для практической реализации указанных возможностей требуется проведение дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

**Список использованных источников**

1. *Masse D.J.* A new low loss high- $k$  temperature compensated dielectric for microwave applications / D.J. Masse et al. // Proc. IEEE. – 1971. – Vol. 59. – Pp. 1628–1629.
2. *Безбородов Ю.М.* Фильтры СВЧ на диэлектрических резонаторах / Ю.М. Безбородов, Т.Н. Нарытник, В.Б. Федоров. – К.: Техника, 1989. – 184 с.
3. *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.
4. *Молчанов В.И.* Неоднородности в диэлектрических структурах СВЧ / В.И. Молчанов, Д.Д. Татарчук // Электроника и связь. – 2008. – №6(47). – С. 10–14.
5. *Татарчук Д.Д.* Тонкие диэлектрические резонаторы миллиметрового диапазона длин волн / Д.Д. Татарчук, В.И. Молчанов, Ю.В. Диденко, А.С. Франчук // Electronics and Communications. – 2015. – Т. 20. – №6(89). – С. 6–10.

Поступила в редакцию 27 апреля 2016 г.

УДК 621.372.41

**Д.Д. Татарчук**, канд. техн. наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,  
вул. Політехнічна, 16, м Київ, 03056, Україна.

## Частотно-селективні структури на основі тонких діелектричних резонаторів

У статті показана можливість використання тонких діелектричних резонаторів для створення частотно-селективних структур надвисокочастотного діапазону. Наведено результати чисельного моделювання таких структур. Отримані чисельні результати підтверджені експериментально. Бібл. 5, рис. 5.

**Ключові слова:** тонкий діелектричний резонатор; частотно-селективні структури; резонансні частоти; НВЧ-діапазон; зсув фази.

UDC 621.372.41

**D. Tatarchuk**, Ph.D.

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

## Thin Dielectric Resonators of the Millimeter Waves Range

The possibility of using thin dielectric resonators to build microwave range frequency selective structures is shown. The results of numerical modeling of such structures are presented. The numerical results are confirmed experimentally. Bibl. 5, Fig. 5.

**Keywords:** thin dielectric resonator; frequency-selective structure; resonant frequency; microwave range; phase shift.

### References

1. *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.
2. *Bezborodov, Y. M., Narytnik, T. N., Fedorov, V. B.* (1989). Microwave filters on dielectric resonators. Kyiv, Tehnika. P. 184. (Rus)
3. *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)
4. *Molchanov, V. I., Tatarchuk, D. D.* (2008). Inhomogeneities in the microwave dielectric structures. Electronics and Communications. No. 6(47), Pp. 10 – 14. (Rus)
5. *Tatarchuk, D. D., Molchanov, V. I., Franchuk, A. S.* (2015). Thin millimeter-wave dielectric resonators. Electronics and Communications. Vol. 20, No. 6(89), Pp. 6 – 10. (Rus)