

УДК 621.396

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-140-144

Исследование дополнительной моды резонатора на основе профилированного сапфирового диска

Д.А. Фролов, Д.П. Царапкин

Сапфировые диэлектрические резонаторы, используемые в малошумящих автогенераторах СВЧ для повышения добротности колебательной системы, имеют вид гладкого цилиндра или диска внутри соосного металлического экрана. Поскольку высокой добротностью обладают только высшие азимутальные моды резонатора, в окрестности выбранной моды существует множество дополнительных резонансов, способных нарушить нормальную работу генератора.

Для разрежения спектра мешающих колебаний резонатора вблизи предписанной частоты было предложено заменить гладкую цилиндрическую стенку резонатора некой периодически профилированной поверхностью. В процессе исследования была обнаружена неизвестная ранее мода, имеющая сопоставимую с плановыми модами добротность. Ее пучности находятся не в «лепестках» сапфирового элемента, как можно было бы ожидать, а примыкают изнутри к вырезанным окружностям.

Показано, что новая структура диска позволяет повысить добротность резонатора на модах с более низким азимутальным номером, причем с увеличением азимутального номера наблюдается снижение прироста добротности при переходе от непрофилированного диска к профилированному.

Выяснено, что введение профилирования сапфирового элемента позволяет существенно снизить объем резонатора, благодаря уменьшению требуемого экрана радиуса. Можно полагать, что одновременно будет наблюдаться разрежение спектра резонансных частот.

Ключевые слова: профилирование, дисковый диэлектрический резонатор, сапфир, СВЧ-автогенератор.

Для цитирования: Фролов Д.А., Царапкин Д.П. Исследование дополнительной моды резонатора на основе профилированного сапфирового диска // Вестник МЭИ. 2018. № 2. С. 140—144. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-140-144.

Studying the Additional Mode of a Profiled Sapphire Disk Resonator

D.A. Frolov, D.P. Tsarapkin

Sapphire dielectric resonators used in low-noise microwave self-oscillators for improving the oscillatory system Q-factor usually have the form of a smooth cylinder or disk inside a coaxial metal screen. Since only high azimuthal modes of the resonator possess a high Q-factor, a multitude of additional resonances able to upset normal operation of the generator exist in the vicinity of the chosen mode.

To rarefy the spectrum of the resonator's interfering oscillations near the prescribed frequency, it was proposed to replace the resonator's smooth cylindrical wall by a certain periodically profiled surface. During the investigation, a previously unknown mode was revealed, which had a Q-factor commensurable with that of the planned modes. Its antinodes were found to be adjacent (from the inside) to the cut out circles and not in the sapphire element "petals" as might be expected.

It is shown that by using the new disk structure it becomes possible to improve the resonator's Q-factor in modes with a lower azimuthal number, and it should be noted that the Q-factor gain decreases with increasing the azimuth number when a shift is made from the plain disk to a profiled one. It has been found that with using a profiled sapphire element it becomes possible to substantially reduce the resonator volume owing to a smaller required screen radius. It can be expected that a more rarefied spectrum of resonant frequencies will simultaneously be obtained.

Key words: profiling, disk dielectric resonator, sapphire, microwave self-oscillator

For citation: Frolov D.A., Tsarapkin D.P. Studying the Additional Mode of a Profiled Sapphire Disk Resonator. MPEI Vestnik. 2018;2: 140—144. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-140-144.

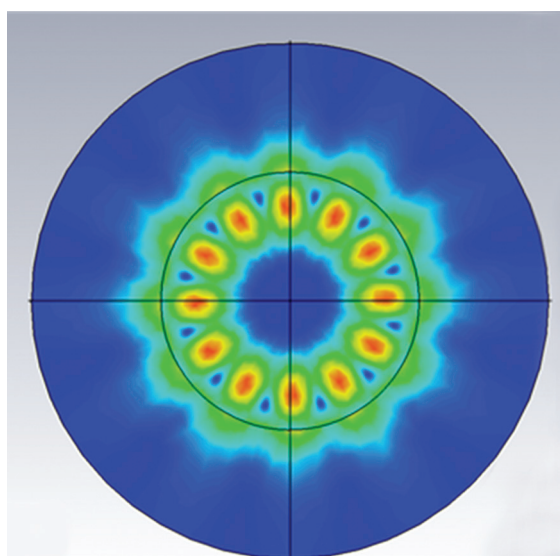
Введение

Современные малошумящие автогенераторы СВЧ используют сапфировые диэлектрические резонаторы (СДР) для повышения добротности колебательной системы [1 — 5]. Чаще всего резонаторы имеют вид гладкого цилиндра или диска внутри соосного металлического экрана [1 — 3], однако имеются и другие формы СДР. В ранних исследованиях они выглядят как кольцо [4], в одном из вариантов механической термокомпенсации приобретают вид чаши [5] и т. д.

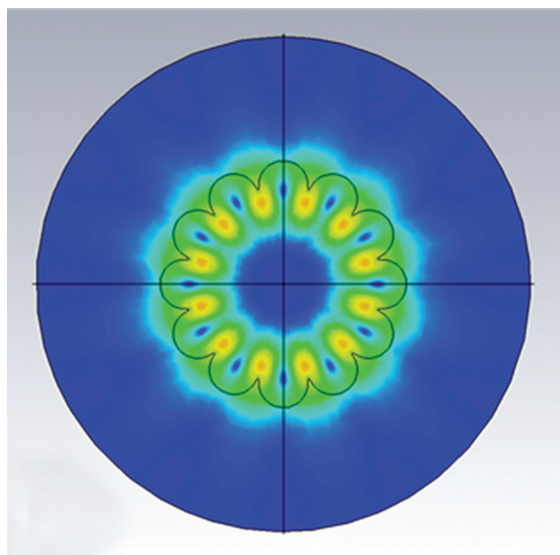
Использование известных форм СДР осложнено наличием у резонатора густого спектра побочных колебаний, снижающих добротность рабочей моды, затрудняющих перестройку частоты, усложняющих работу в диапазоне температур. Проведенные исследования показали, что одним из вариантов разрешения перечисленных трудностей является специфическое профилирование цилиндрической поверхности дискового СДР [6, 7]. Попутно был обнаружен новый тип колебаний, позволяющий уменьшить диаметр экрана, а соответственно, и общие габариты резонаторного блока.

Новая мода

При расчете полей профилированных сапфировых дисков была обнаружена неизвестная ранее мода, имеющая сопоставимую с плановыми модами добротность [6]. Распределение электромагнитного поля этой моды в поперечном сечении диска подобно распределению поля НЕ6 (рис. 1, *a*), но ее пучности, изображенные на рис. 1, *б* желто-красным цветом, находятся не в «лепестках» сапфирового элемента, как можно было бы ожидать, а примыкают изнутри к вырезанным окружностям (рис. 2). Эта мода названа «новой» [7] и идентифицируется индексом n , добавляемым к стандартному обозначению типа моды.



a



б

Рис. 1. Распределение электромагнитных полей моды НЕ6 для непрофилированного (*a*) и профилированного (*б*) дисков

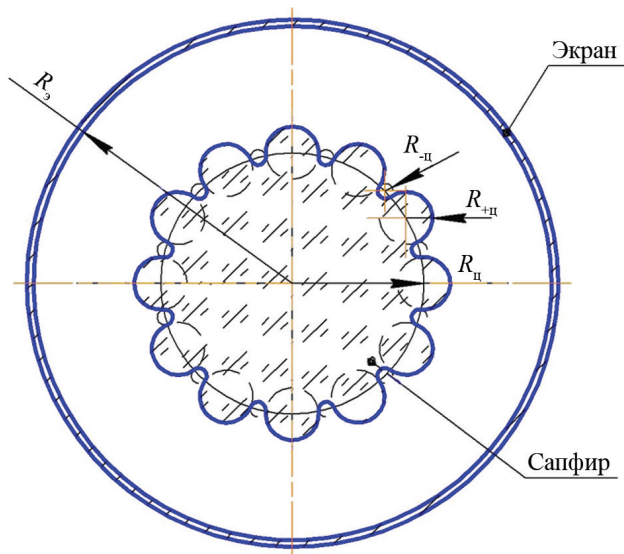


Рис. 2. Расчетная модель (вид сверху)

Модель резонатора

Моделирование проводилось с помощью программы CST Microwave Studio [8, 9]. На рис. 2 показан диск с радиусом центрального диска сапфирового ядра $R_{\text{ц}}$, равным радиусу анализируемого резонатора без профилирования, с добавленными к нему окружностями радиусами $R_{+\text{ц}}$ и вырезанными окружностями радиусами $R_{-\text{ц}}$. Количество упомянутых окружностей соответствует удвоенному азимутальному номеру анализируемой моды.

Введем формат профилирования $\Phi_n = R_{+\text{ц}}/R_{\text{ц}}$, как отношение радиуса базового гладкого диска к радиусу выступа. При исследовании влияния этого параметра на распределение поля скорректируем соотношение радиусов $R_{-\text{ц}}$ и $R_{+\text{ц}}$ так, чтобы получаемый профиль диска всегда оставался гладкой кривой.

Для максимизации добротностей выбранных мод изучим влияние расстояния от медного экрана радиуса $R_{\text{э}}$ до цилиндрической поверхности непрофилированного резонатора. С этой целью введем относительный радиус экрана $k_{\text{э}} = R_{\text{э}}/R_{\text{ц}}$.

При моделировании добротность сапфира уменьшается на порядок по сравнению с реальной добротностью в целях ускорения расчетов и полагается равной 10^4 .

Результаты моделирования

Шестая азимутальная мода

Проведен анализ моды НЕ6 (см. рис. 1) для резонаторов с профилированным и непрофилированным дисками. В процессе варьировался параметр $k_{\text{э}}$ и рассчитывались добротности мод Q .

Рассчитанные значения добротностей представлены на рис. 3, откуда следует, что профилирование диска приводит к увеличению добротности, причем максимум Q достигается при меньших значениях $R_{\text{э}}$.

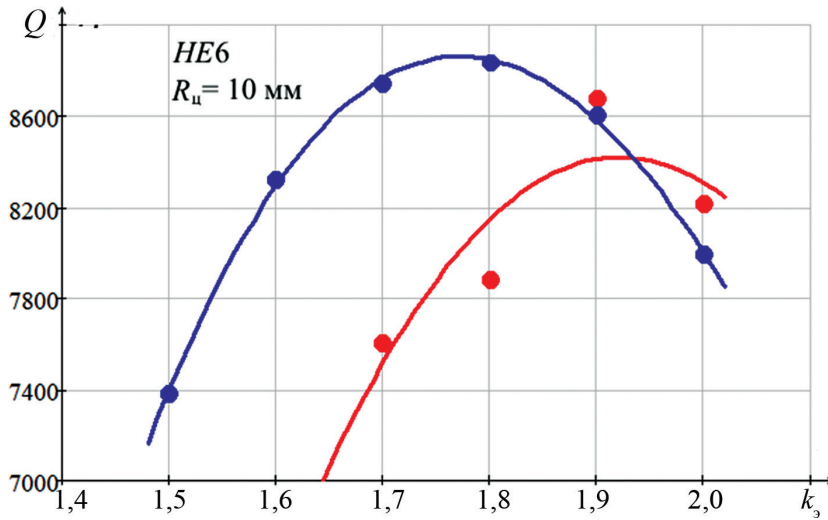


Рис. 3. Зависимость добротности профилированного и непрофилированного дисков для моды HE6

Изучено влияние формата профилирования на добротности и частотные характеристики мод с более низким азимутальным номером.

Пятая азимутальная мода

Анализировались моды HE5 и HE5_n, для которых получены те же типы характеристик, что и для четвертой моды. Результаты представлены на рис. 4, 5.

Из рис. 4 видно, что максимум добротности колебания HE5_n, по-прежнему, имеет место при $k_3 \approx 2$, но менее резко выражен по сравнению с четвертой модой. При этом добротность моды HE5_n в 4 раза больше добротности моды HE5. Добротность моды HE5_n убывает (см. рис. 5) при увеличении формата профилирования сверх пяти.

Четвертая азимутальная мода

Для четвертой азимутальной моды анализировались моды HE4 и HE4_n, рассчитывались зависимости добротности обеих мод от параметра k_3 (рис. 6) и для

найденных значений, обеспечивающих максимум добротности моды HE4_n, вычислялась зависимость добротности от формата профилирования Φ_n (рис. 7).

Из данных рис. 6, 7 следует, что при увеличении расстояния между экраном и диэлектрическим керном добротность растет до тех пор, пока R_3 не превышает радиус $R_ц$ исходного гладкого сапфирового ядра примерно вдвое (см. рис. 6), при этом добротность моды HE4_n в 7 раз превышает добротность моды HE4.

При увеличении формата профилирования (см. рис. 7) добротность моды HE4_n убывает и стремится к добротности HE4 моды.

Заключение

Из полученных результатов следует, что новая структура диска позволяет повысить добротность резонатора на модах с более низким азимутальным номером.

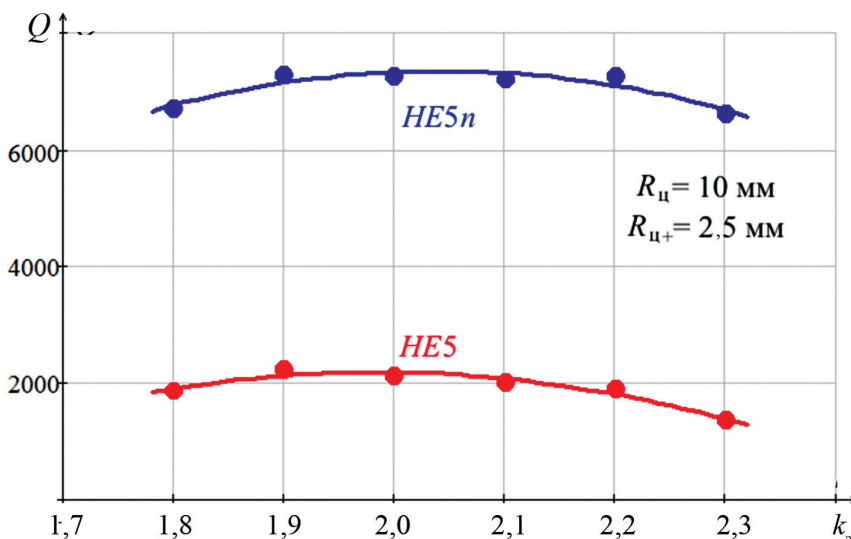


Рис. 4. Зависимость добротности от относительного радиуса экрана

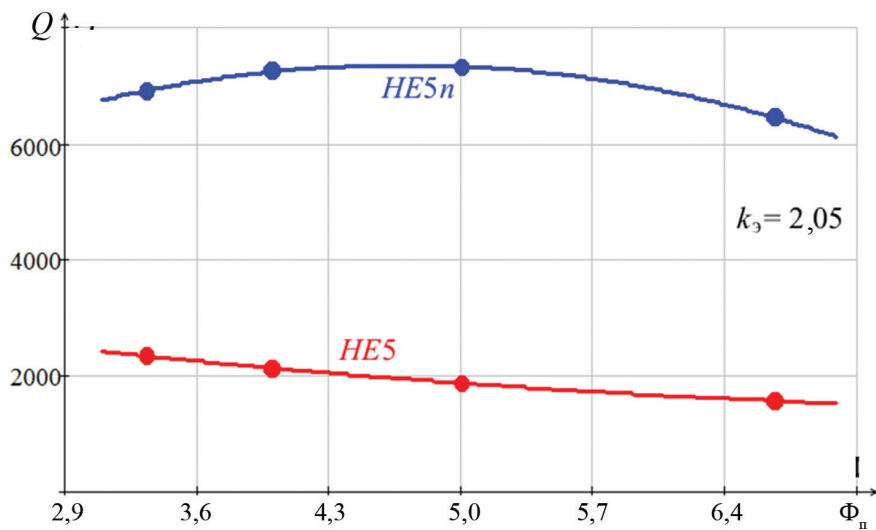


Рис. 5. Зависимость добротностей от формата профилирования

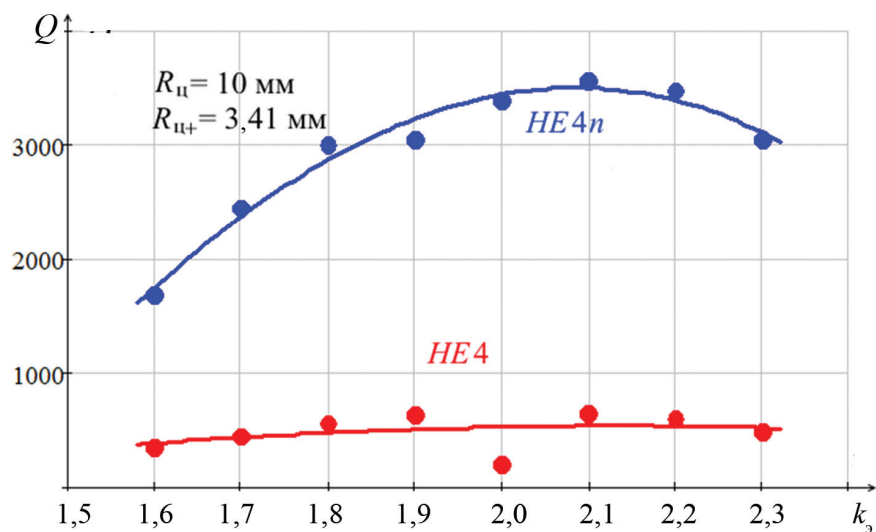


Рис. 6. Зависимость добротности резонатора от относительного радиуса экрана

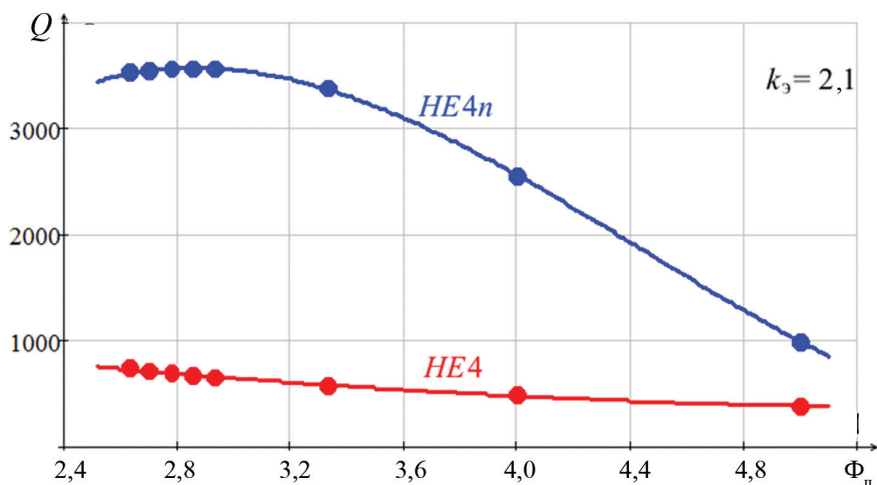


Рис. 7. Зависимость добротностей от формата профилирования

Приведенные на рис. 3 — 7 графики демонстрируют, что при увеличении формата профилирования добротности мод HE4n и HE5n стремятся к добротностям мод HE4 и HE5, поскольку при этом происходит плавное подавление степени профилирования диска.

С увеличением азимутального номера наблюдается снижение прироста добротности при переходе от непрофилированного диска к профилированному.

Доказано, что введение профилирования сапфирового элемента существенно снижает объем резонатора благодаря уменьшению требуемого экрана радиуса. Можно полагать, что одновременно будет наблюдаться разрежение спектра резонансных частот.

Литература

1. А.с. № 995675 СССР. Генератор сверхвысоких частот / Д.П. Царапкин, Е.Н. Иванов.

2. Tobar M.E. e. a. Analysis of the Rutile-ring Method of Frequency Temperature Compensating a High-Q Whispering Gallery Sapphire Resonator // Proc. IEEE/EIA Int. Freq. Contr. Symp. and Exhibition. Kansas City (USA), 2000. Pp. 485—492.

3. Tobar M.E. e. a. High-Q Sapphire-rutile Frequency Temperature Compensated Microwave Dielectric Resonators // IEEE Trans. UFFC. 1998. V. 45. No. 3. Pp. 830—836.

4. Dick G. J., Saunders J. Measurement and Analysis of a Microwave Oscillator Stabilized by a Sapphire Dielectric Ring Resonator // IEEE Trans. 1990. V. UFFC-37. No. 5. Pp. 339—346.

5. Wang R.T., Dick G.J. Cryo-cooled Sapphire Oscillator with Mechanical Compensation // Proc. IEEE Int. Freq. Contr. Symp. & PDA Exh. New Orleans (USA), 2002. Pp. 543—547.

6. Фролов Д.А., Царапкин Д.П. Моделирование резонатора на основе профилированного сапфирового диска // Вестник МЭИ. 2016. № 3. С. 91—96.

7. Царапкин Д.П., Фролов Д.А. Сапфировый резонатор для малощумящих автогенераторов СВЧ с профилированной цилиндрической поверхностью // Электроника и микроэлектроника СВЧ: Сборник статей IV Всерос. конф. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2015. Т. 1. С. 237—239.

8. Getting Started: An Eigenmode Problem. Pittsburgh: Ansoft Corp., 2001.

9. Курушин А.А., Пластиков А.Н. Проектирование СВЧ-устройств в среде CST Microwave Studio. М.: Изд. дом МЭИ, 2012.

References

1. A.s. № 995675 SSSR. Generator Sverkhvysokikh Chastot / D.P. Tsarapkin, E.N. Ivanov. (in Russian).

2. Tobar M.E. e. a. Analysis of the Rutile-ring Method of Frequency Temperature Compensating a High-Q Whispering Gallery Sapphire Resonator. Proc. IEEE/EIA Int. Freq. Contr. Symp. and Exhibition. Kansas City (USA), 2000:485—492.

3. Tobar M.E. e. a. High-Q sapphire-rutile Frequency Temperature Compensated Microwave Dielectric Resonators. IEEE Trans. UFFC. 1998;45;3:830—836.

4. Dick G. J., Saunders J. Measurement and Analysis of a Microwave Oscillator Stabilized by a Sapphire Dielectric Ring Resonator. IEEE Trans. 1990;UFFC-37;5: 339—346.

5. Wang R.T., Dick G.J. Cryo-cooled Sapphire Oscillator with Mechanical Compensation. Proc. IEEE Int. Freq. Contr. Symp. & PDA Exh. New Orleans (USA), 2002:543—547.

6. Frolov D.A., Tsarapkin D.P. Modelirovanie Rezonatora na Osnove Profilirovannogo Sapfirovogo Diska. Vestnik MPEI. 2016;3:91—96. (in Russian).

7. Tsarapkin D.P., Frolov D.A. Sapfirovyy Rezonator dlya Maloshumyashchikh Avtogenetorov SVCH s Profilirovannoy Tsilindricheskoy Poverkhnost'yu. Elektronika i Mikroelektronika SVCH: Sbornik Statey IV Vseros. Konf. SPb.: Izd-vo SPbGETU LETI, 2015;1:237—239. (in Russian).

8. Getting Started: An Eigenmode Problem. Pittsburgh: Ansoft Corp., 2001.

9. Kurushin A.A., Plastikov A.N. Proektirovanie SVCH-ustroystv v Srede CST Microwave Studio. M.: Izd. dom MPEI, 2012.

Сведения об авторах

Фролов Даниил Андреевич — аспирант кафедры формирования и обработки радиосигналов НИУ «МЭИ», e-mail: frolovdan12@gmail.com

Царапкин Дмитрий Петрович — доктор технических наук, профессор кафедры формирования и обработки радиосигналов НИУ «МЭИ», e-mail: TsarapkinDP@mpei.ru

Information about authors

Frolov Daniil A. — Ph.D.-student of Formation and Processing of Radio Signals Dept., NRU MPEI, e-mail: frolovdan12@gmail.com

Tsarapkin Dmitriy P. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Formation and Processing of Radio Signals Dept., NRU MPEI, e-mail: TsarapkinDP@mpei.ru

Статья поступила в редакцию 22.05.2017