

О НЕКОТОРЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ ПОВЫШЕНИЯ ДОБРОТНОСТИ КОАКСИАЛЬНЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Введение

Коаксиальные резонаторы часто используются в различных устройствах микроволновой техники. Их особенностью является то, что они закрывают граничную область между колебательными системами с сосредоточенными параметрами (колебательными контурами – резонансными LCR системами) и системами с распределенными параметрами (объемными резонаторами – электродинамическими системами). Рабочий диапазон коаксиальных резонаторов, как правило, лежит в области от сотен МГц до единиц – десятков ГГц. Нижняя частотная граница определяется ростом геометрических размеров, верхняя – ростом потерь в коаксиальной структуре.

Несмотря на то, что все виды коаксиальных резонаторов возбуждаются волнами ТЕМ типа по характеру формирования резонансных колебаний их можно разделить на три группы: полуволновые резонаторы ($l = n \cdot \lambda/2$), четвертьволновые ($l = (2n - 1) \cdot \lambda/4$) и резонаторы с емкостным зазором [1, 2].

В последние годы в связи с развитием методов и средств микроволновой диагностики материалов и сред стало больше уделяться внимания разработке различных типов микроволновых измерительных преобразователей, в том числе и резонаторных измерительных преобразователей (РИП) [3]. В этом плане коаксиальные резонаторные структуры, которые возбуждаются волнами ТЕМ типа, представляют определенный интерес, поскольку позволяют достаточно просто сформировать заданное распределение поля (как правило, электрического) в заданной области взаимодействия с образцом или его локальным участком. Главным образом это касается четвертьволновых резонаторов и резонаторов с емкостным зазором. Поскольку информационными параметрами для РИП являются добротность и резонансная частота, очевидно, что чем выше будет начальная (исходная) добротность РИП, тем выше будет точность и чувствительность проводимых измерений.

Цель работы – анализ возможностей повышения добротности коаксиальных резонаторов, используемых в качестве РИП.

Основная часть

Собственную добротность Q_0 резонатора с воздушным или вакуумным заполнением (или окружением) и стенками (или проводниками) из хорошо проводящего материала можно найти с помощью следующего соотношения [1, 2]:

$$Q_0 = \omega_p \frac{W_{\text{зан}}}{W_{\text{рас}}} = \frac{\sqrt{\omega_p \mu_0} \int_V |\dot{H}|^2 dv}{\sqrt{\frac{\mu_0}{2\sigma}} \oint_S |\dot{H}_\tau|^2 ds} = \frac{\omega_p \mu_0 \int_V |\dot{H}|^2 dv}{R_n \oint_S |\dot{H}_\tau|^2 ds} = \frac{G}{R_n}, \quad (1)$$

где ω_p – резонансная частота; $W_{\text{зан}}$ – энергия, запасенная в резонаторе на резонансной частоте, величина которой зависит от конструкции резонатора и характера (структуры) колебаний, возбуждаемых в резонаторе; $W_{\text{рас}}$ – энергия, рассеиваемая в резонаторе, которая зависит от структуры колебания, а также от значения поверхностного сопротивления материала стенок резонатора (объемные резонаторы с проводящими стенками), поверхностного сопротивления, потерь в диэлектрике, и потерь на излучение (металлодиэлектрические, полосковые и микрополосковые резонаторы), потерь в диэлектрике и потерь на излучение (диэлектриче-

ские резонаторы) и т. д.; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; σ – проводимость материала стенок (или проводников) резонатора; R_p – поверхностное сопротивление материала стенок (или проводников) резонатора; $G = \omega_p \mu_0 \int_V |\dot{H}|^2 dv / \oint_S |\dot{H}_\tau|^2 ds$ – геометрический фактор, зависящий от геометрии и размеров резонатора, а также от структуры электромагнитных полей (вида колебаний).

Анализ выражения (1) показывает, что максимальной добротностью будут обладать такие резонансные структуры СВЧ диапазона у которых: отсутствуют потери на излучение, малые потери в диэлектриках или они отсутствуют (закрытые объемные резонаторы с проводящими стенками); малая величина поверхностного сопротивления материала стенок или проводников или они отсутствуют (диэлектрические резонаторы, например); большая величина геометрического фактора, пропорционального отношению объема резонатора к его поверхности, а также зависящего от вида колебаний на котором происходит резонанс (характера распределения электромагнитных полей в резонаторе и токов на его поверхностях).

Для расчета добротности четвертьволновых коаксиальных резонаторов, возбуждаемых волной ТЕМ, можно воспользоваться следующим соотношением [2]:

$$Q_0 = \frac{\lambda_0}{4 \cdot \delta} \frac{1}{4 + \frac{l}{2 \cdot D} \frac{1 + (D/d)}{\ln(D/d)}}, \quad (2)$$

где $\delta = \left(\frac{\sigma \mu_0 \omega_0}{2} \right)^{-1/2}$ – толщина скин-слоя; λ_0 – рабочая (резонансная) длина волны; l – длина резонансного отрезка коаксиальной линии; D – внутренний диаметр наружного проводника коаксиального резонатора; d – диаметр внутреннего проводника коаксиального резонатора.

На рис. 1 и 2 приведены графики зависимости собственной добротности четвертьволновых коаксиальных резонаторов различной длины ($1 - l = \lambda_0/4$; $2 - l = 3 \cdot \lambda_0/4$; $3 - l = 5 \cdot \lambda_0/4$; $4 - l = 7 \cdot \lambda_0/4$; $5 - l = 9 \cdot \lambda_0/4$; $6 - l = 11 \cdot \lambda_0/4$) от отношения диаметров D/d при $D = 10$ мм (рис. 1) и $D = 20$ мм (рис. 2). Оценки проводились для частоты 10 ГГц и резонаторов, изготовленных из меди.

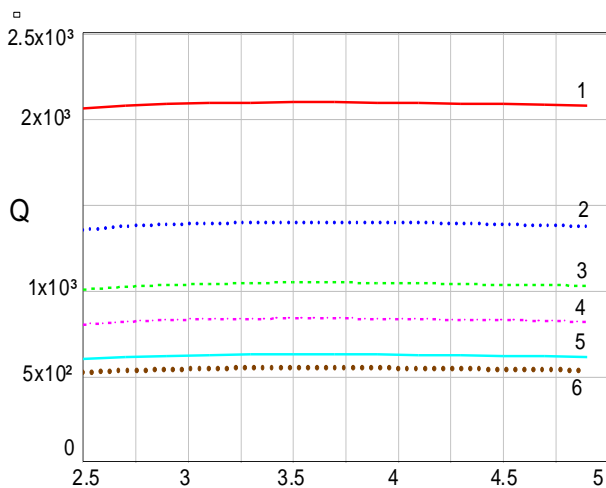


Рис. 1. Зависимость собственной добротности четвертьволновых резонаторов от отношения D/d при $D = 10$ мм

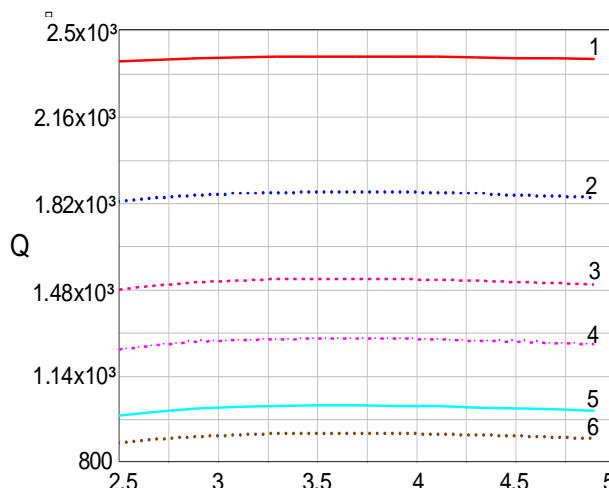


Рис. 2. Зависимость собственной добротности четвертьволновых резонаторов от отношения D/d при $D = 20$ мм

Анализ приведенных зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

- с увеличением длины резонаторов их собственная добротность падает;
- максимальное значение добротности достигается при $D/d = 3,6$;
- увеличение объема внутренней полости резонатора ведет к росту добротности.

Таким образом, основным направлением, обеспечивающим увеличение добротности четвертьволновых коаксиальных резонаторов при минимально возможном значении поверхностного сопротивления (зависит от материала, качества поверхности и условий эксплуатации), является увеличение значения геометрического фактора G (1), а в простейшем варианте при сохранении структуры и распределения электромагнитных полей – объема внутренней полости резонатора. Однако, как было отмечено, увеличение объема за счет увеличения длины резонатора неперспективно, поскольку увеличиваются площади рабочих поверхностей и при этом, соответственно растут и потери в проводниках. Увеличение объема за счет увеличения отношения D/d также не решает задачу повышения добротности поскольку при этом нарушается условие достижения Q_{0max} при $D/d = 3,6$, справедливое для всех четвертьволновых резонансных коаксиальных регулярных структур (см. рис. 1 и 2).

В то же время, как показано в работах [4, 5], возможно получение высокодобротных резонансов в нерегулярных с переменным сечением (с меняющимся отношением D/d) коаксиальных структурах. Типичная структура поля для резонанса ТЕМ волны в таком нерегулярном резонаторе показана на рис. 3, а. Размеры полости коаксиальной структуры следующие: центральный проводник – диаметры 0,6 и 3,8 мм; внутренние диаметры экранного проводника – 2 и 14 мм, соответственно; длина – 81 мм.

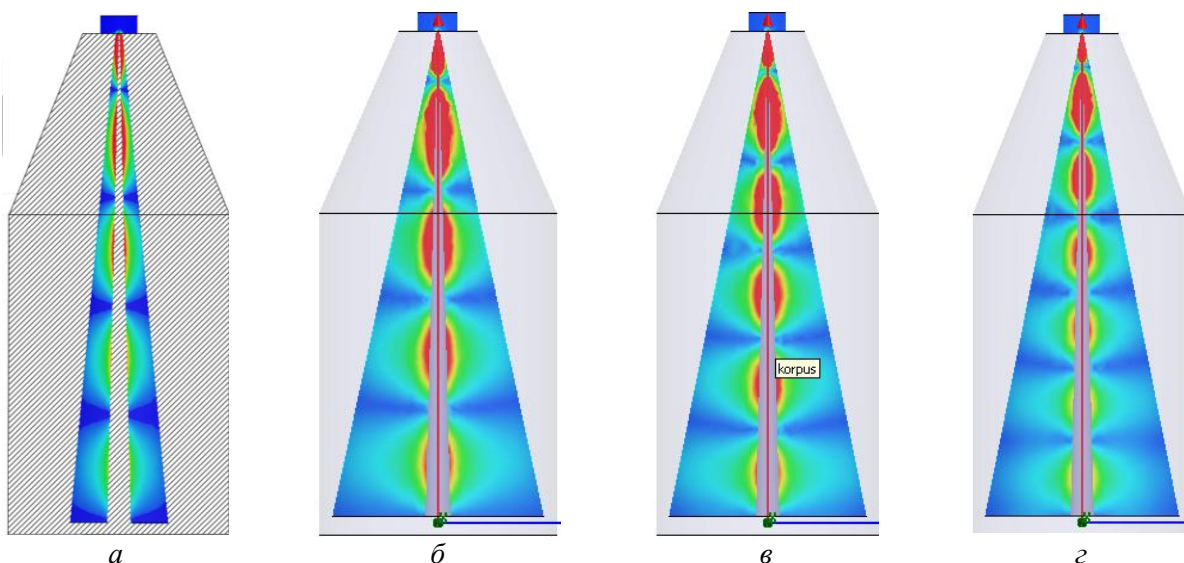


Рис. 3. Структура полей в нерегулярных четвертьволновых коаксиальных резонаторах при резонансах ТЕМ волны:

$$\begin{aligned}
 a - l = 9 \cdot \lambda_p / 4, f_p = 8,32 \text{ ГГц}, Q_0 = 1,55 \cdot 10^3; & \quad b - l = 9 \cdot \lambda_p / 4, f_p = 8,31 \text{ ГГц}, Q_0 = 1,85 \cdot 10^3; \\
 v - l = 11 \cdot \lambda_p / 4, f_p = 10,15 \text{ ГГц}, Q_0 = 1,94 \cdot 10^3; & \quad z - l = 13 \cdot \lambda_p / 4, f_p = 12,04 \text{ ГГц}, Q_0 = 2,1 \cdot 10^3
 \end{aligned}$$

При увеличении угла раскрыва конуса и увеличении большего внутреннего диаметра экранного проводника до 32 мм наблюдается рост добротности резонансов ТЕМ волны (рис. 3, б, в, з). Рост собственной добротности при росте рабочей частоты свидетельствует о том, что в подобных структурах увеличение добротности за счет увеличения рабочего объема резонатора перекрывает вклад в добротность, обусловленный частотной зависимостью поверхностного сопротивления $R_{\text{п}} \sim f^{1/2}$.

Особенностью структур, приведенных на рис. 3, б, в, з, является то, что они могут возбуждаться также и на высших типах волн, подобных тем, что возникают в коаксиальных линиях при увеличении рабочей частоты или отношения D/d [5].

На рис. 4 приведены зависимости добротности и резонансной частоты четвертьволновых коаксиальных нерегулярных структур от степени раскрыва их внутренней конической части (изменения радиуса R большего внутреннего диаметра экранного проводника). Остальные размеры конической структуры не меняются.

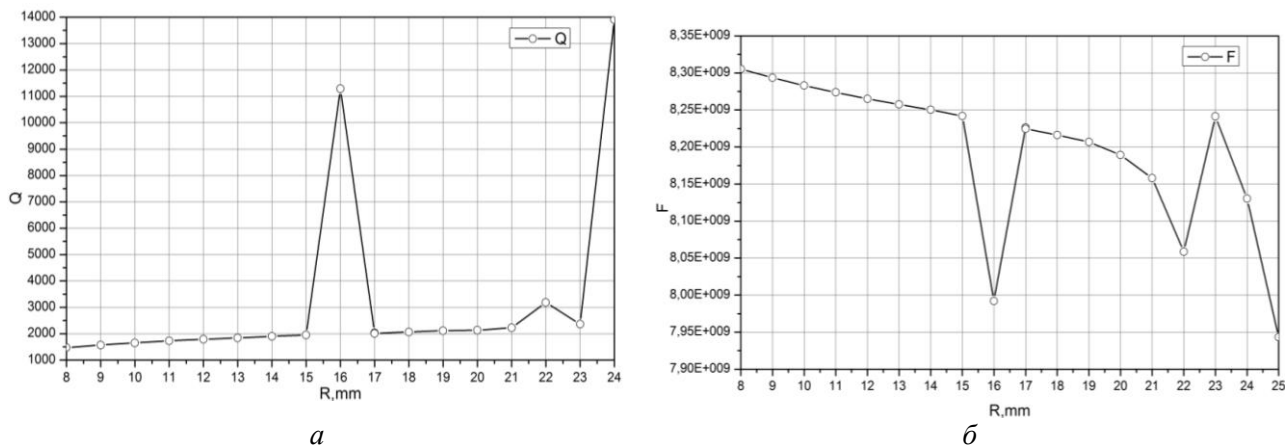


Рис. 4. Зависимость добротности – *а* и резонансной частоты – *б* четвертьволновой коаксиальной нерегулярной структуры от степени раскрыва ее внутренней конической части

Зависимость собственной добротности колебаний, создаваемых в рассматриваемой структуре ТЕМ волной, от величины R приведена на рис. 5.

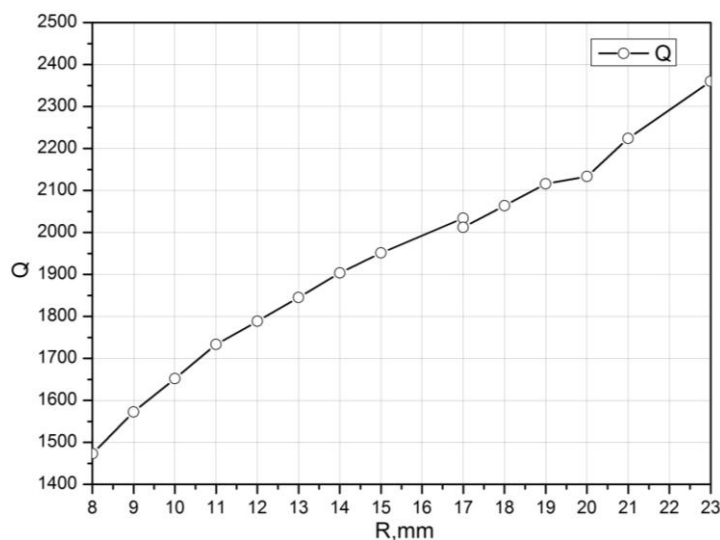


Рис. 5. Зависимость Q_0 от R

Из графиков рис. 4 видно, что при некоторых значениях радиуса R в рассматриваемых структурах возможно возникновение высокодобротных резонансов на высших видах колебаний. Как показано в работе [5] их можно идентифицировать как колебания вида квази- H_{111} , квази- H_{112} , квази- E_{011} и подобные им. Эти колебания могут существовать одновременно с колебаниями ТЕМ волны и приводить к нежелательным изменениям распределения электромагнитных полей в резонансной структуре и на ее выходе. Возможность использования высокодобротных колебаний на высших типах волн для создания РИП затрудняется тем, что при полностью коаксиальной структуре резонатора эти колебания практически не связаны с его выходом (подтверждается экспериментальными исследованиями).

Сравнивая графики, приведенные на рис. 1, 2 и 5, можно убедиться, что добротность колебаний ТЕМ волны в нерегулярной коаксиальной структуре значительно выше, чем в регулярной (рис. 1, 2, кривые 5 и 6), и имеет тенденцию к росту при увеличении R .

Выводы

Результаты, полученные при моделировании и предварительных экспериментальных исследованиях четвертьволновых резонаторов на основе нерегулярных коаксиальных структур, доказывают возможность построения РИП, возбуждаемых ТЕМ волнами, добротность которых может быть увеличена по сравнению с четвертьволновыми резонаторами на отрезках регулярных коаксиальных линий.

Использование высокодобротных колебаний на высших типах волн на данном этапе затрудняется недостаточной исследованностью способов обеспечения их связи с коаксиальным выходом разрабатываемых структур.

Список литературы: 1. *Лебедев, И.В.* Техника и приборы СВЧ. – Т.1. – М. : Высш. шк., 1970. – 440с. 2. *Chen, L.F., Ong, C.K., Neo, C.P.* et al. Microwave Electronics. Measurements and Materials Characterization. – John Wiley & Sons, Ltd., 2004. – 537p. 3. *Anlage, S.M., Talanov, V.V., Schwartz, A.R.* Principles of near-field microwave microscopy // Scanning probe microscopy: electrical and electromechanical phenomena at the nanoscale / ed. by S.V.Kalinin, A.Gruverman. – New York : Springer-Verlag, 2007. – Vol. 1. – P. 215-253. 3. *Бондаренко, И.Н.* Высокодобротный резонаторный измерительный преобразователь на основе нерегулярной коаксиальной структуры / И.Н. Бондаренко, А.В. Галич // Сб. науч. тр. 4-й Междунар. науч. конф. «Функциональная база наноэлектроники», Кацивели, 2011, 30.09.-3.10.2011. – С.245-247. 5. *Бондаренко, И.Н.* Высокодобротный коаксиальный нерегулярный резонаторный измерительный преобразователь / И.Н. Бондаренко, А.В. Галич // Радиотехника : Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2011. – Вып. 168. – С. 108-112.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 04.04.2012