

ВЫСОКОДОБРОТНЫЕ ТИПЫ КОЛЕБАНИЙ В НЕРЕГУЛЯРНЫХ ГИБРИДНЫХ СТРУКТУРАХ

И.Н.Бондаренко, А.В. Галич, С.И. Троицкий

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники
14, пр. Ленина, Харьков, 61166, Украина
e-mail: mepu@kture.kharkov.ua*

Объемные резонаторные структуры широко применяются в различных приложениях микроволновой техники благодаря высоким добротностям возбуждаемых в них колебаний. Как правило, эти резонаторы представляют собой отрезки регулярных волноводных линий передачи (коаксиальные, призматические, цилиндрические). Однако в ряде случаев, например при необходимости обеспечения эффективного взаимодействия составляющих электромагнитного поля, формируемого резонатором, с различными объектами (заряженными частицами, материалами, средами и т. п.), вид резонаторной структуры может существенно меняться, что влечет за собой изменения распределения полей (виды колебаний) и параметров возбуждаемых колебаний (резонансная частота и добротность).

В бесконтактной микроволновой диагностике материалов и сред, в частности в сканирующей микроволновой микроскопии, активно применяются резонаторные измерительные преобразователи (РИП) с микрозондами [1-3]. При этом необходимо обеспечить максимальную добротность РИП (определяющую чувствительность измерений) и эффективное сопряжение его резонаторной части с зондовой.

В работах [4-6] для создания РИП предлагается использовать резонаторные преобразователи, в которых переход от высокодобротной резонаторной части к коаксиальной зондовой происходит плавно за счет его конической формы. Возбуждение измерительного преобразователя происходит как на коаксиальных типах колебаний (волна TEM), так и высших для такой структуры типах волн (H и E). Показано, что в зависимости от геометрии и размеров такие преобразователи могут возбуждаться на квази- H_{11n} , квази- E_{011} , квази- H_{221} типах колебаний и других [5, 6]. Добротности возбуждаемых колебаний достигают при этом величин $\sim 10^3 \dots 10^4$.

Поскольку предложенные резонаторные структуры представляются достаточно перспективными для создания измерительных преобразователей, а возможно, и других типов микроволновых устройств, целью данной работы является проведение анализа условий возбуждения и поддержания в таких нерегулярных гибридных структурах высокодобротных видов колебаний.

В качестве базовой для рассмотрения и анализа была выбрана коаксиальная коническая структура с изменяющимся по длине отношением внутреннего диаметра внешнего проводника к диаметру внутреннего проводника. Так как аналитическое описание такой структуры представляется сложным, для проведения анализа выбран метод численного математического моделирования. Достоверность получаемых при моделировании результатов проверялась измерениями на экспериментальных макетах.

Как выяснилось, рассматриваемые структуры обладают многомодовостью и могут возбуждаться на различных типах колебаний в рабочем диапазоне частот.

Так, например, для коаксиальной нерегулярной структуры с размерами $L = 81$ мм, $D = 16$ мм, $d = 1$ мм (L – длина структуры, D – максимальный внутренний диаметр внешнего проводника, d – диаметр внутреннего проводника) в диапазоне частот 8.02...12.38 ГГц будет возникать 8 резонансов, включая и относительно низкодобротные (до $1.8 \dots 2.1 \cdot 10^3$) резонансы n -четвертьволновых коаксиальных резонаторов (рис. 1, б, в, е). Приведенные на рис. 1 распределения электрических полей для различных типов колебаний подтверждают возбуждение высокодобротных типов колебаний в рассматриваемой структуре, отличных от TEM , т. е. высшими для коаксиальной структуры, и проявляются они на участках, где отношение диаметров максимально.

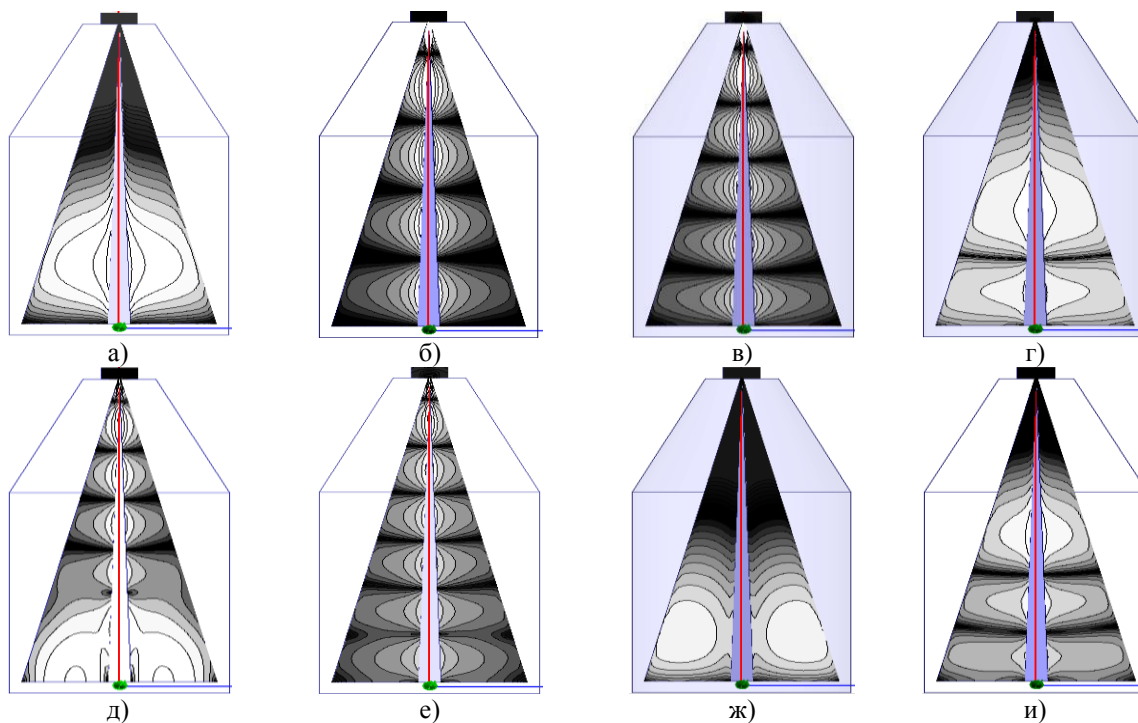


Рис.1. Виды собственных колебаний нерегулярной коаксиальной структуры с геометрическими размерами $L = 81$ мм, $D = 16$ мм, $d = 1$ мм:
 а) $Q = 11310.7$, $f = 8.02$ ГГц; б) $Q = 1888.45$, $f = 8.32$ ГГц; в) $Q = 1988.42$, $f = 10.16$ ГГц;
 г) $Q = 11634.7$, $f = 10.3$ ГГц; д) $Q = 5671.67$, $f = 11.49$ ГГц; е) $Q = 2137.88$, $f = 12.05$ ГГц;
 ж) $Q = 12276$, $f = 12.23$ ГГц; и) $Q = 11782.8$, $f = 12.38$ ГГц

Количество возможных резонансов в такой структуре может быть сокращено за счет выбора конструкции и места подключения элементов связи, предназначенных для возбуждения выбранного вида колебаний с определенной ориентацией магнитных и электрических составляющих поля.

При выборе в качестве устройства связи коаксиальных линий, подключаемых к исследуемой структуре через торцевую стенку, и ориентации петель связи с учетом конфигурации полей необходимого типа колебаний амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) такой структуры будет выглядеть так, как показано на рис. 2. Видно, что в рабочем диапазоне остается только три высокодобротных резонанса: I – $f = 7.95$ ГГц, $Q = 3820$; II – $f = 10.2$ ГГц, $Q = 12345$; III – $f = 11.6$ ГГц, $Q = 10632$.

На рис. 3 показаны конфигурации электрических полей, соответствующие резонансам графика, приведенного на рис. 2.

При дальнейших численных и экспериментальных исследованиях выяснилось:

- добротности колебаний на высших для коаксиальной линии типах волн действительно в несколько раз превышают добротности n -четвертьволновых видов колебаний волн TEM типа;

- высокодобротные виды колебаний в нерегулярной коаксиальной структуре не связаны с выходной коаксиальной апертурой ее зондовой части, в то время как четвертьволновые резонансы волны TEM сильно зависят от характеристик среды и положения объектов вблизи ее;

- высокодобротные резонансы сохраняются в рассматриваемых структурах и при отсутствии центрального проводника в зоне их возбуждения;

- высокодобротные резонансы существуют в конической объемной структуре вообще без центрального проводника и размещаются в ее не запердельной для соответствующего вида колебаний части.

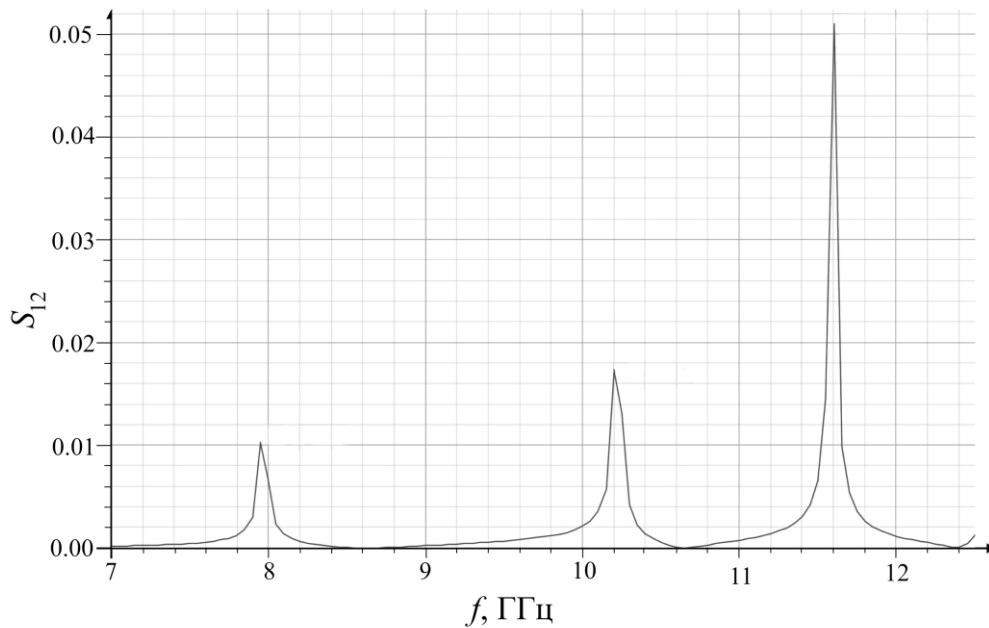


Рис. 2. АЧХ нерегулярной коаксиальной структуры

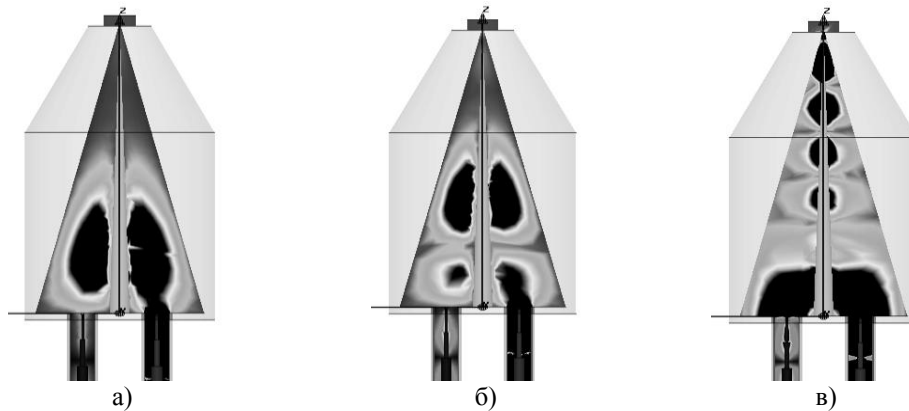


Рис. 3 Конфигурации электрических полей: а) резонанс I; б) резонанс II; в) резонанс III

Для выявления возможностей и условий обеспечения связи высокодобротных видов колебаний с зондовой частью были проведены исследования нерегулярных гибридных структур, представляющих собой нерегулярный конический объемный резонатор, соединенный с нерегулярным коническим коаксиальным отрезком.

Для повышения добротности возбуждаемых видов колебаний в рассматриваемой структуре к широкой части конуса подсоединялась дополнительная объемная цилиндрическая часть, что приводило к возбуждению колебаний вида квази- H_{112} (рис. 4).

Возбуждение структуры, приведенной на рис. 4, производилось с помощью штыревых

элементов связи, расположенных в месте оединения конической и цилиндрической объемных частей (рис. 4, в). Для структуры, приведенной на рис.4, а, связи возбуждаемых колебаний с открытым узким концом конуса не наблюдалось. Это обусловлено тем, что для возбуждаемого типа колебаний суженный участок конуса является запертым. Конфигурация электрических силовых линий, приведенная на рис. 4, б, доказывает, что в рассматриваемой структуре возбуждаются виды колебаний, похожие на H_{11n} колебания в цилиндрических резонаторах, в нашем случае – квази- H_{112} .

Для нерегулярной гибридной структуры (рис. 4, в) проведены исследования влияния

глубины погружения центрального проводника с Г-образным элементом связи на ее параметры.

Результаты приведены на рис. 5 и 6.

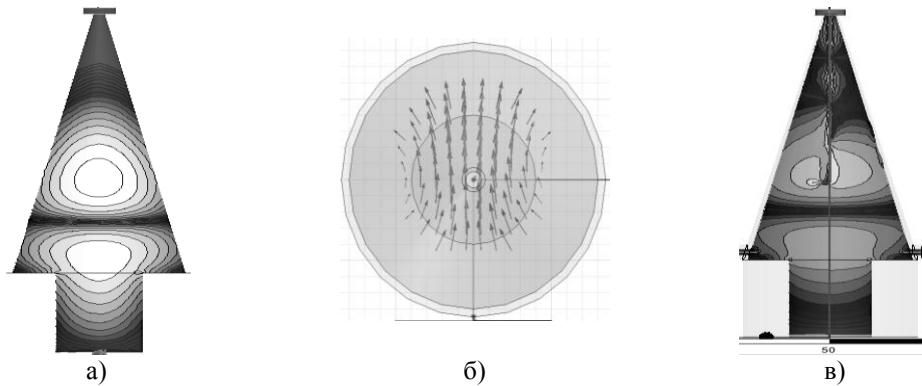


Рис. 4. Распределение электрических полей в нерегулярных гибридных структурах при возбуждении вида колебаний квази- H_{112} : а) – без центрального проводника; б) – в сечении максимума электрического поля; в) – с центральным проводником в коаксиально-зондовой части структуры

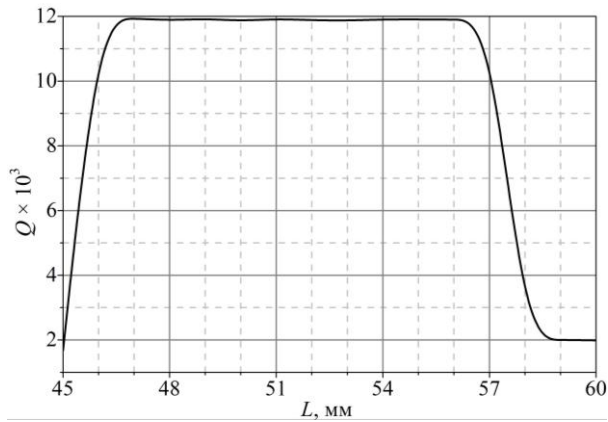


Рис. 5. Изменение добротности в зависимости от погружения проводника

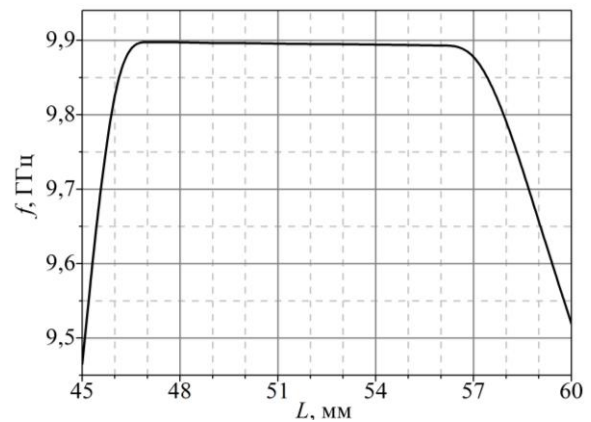


Рис. 6. Сдвиг резонансной частоты в зависимости от погружения проводника

Анализ графиков, приведенных на рис. 5 и 6, показывает наличие области (глубина погружения центрального проводника 46,5...56,5 мм), где сохраняется постоянное значение высокой добротности ($\sim 1,2 \cdot 10^4$) и резонансной частоты ($\sim 9,9$ ГГц). При погружении проводника на глубину, большую 57 мм, в рассматриваемой структуре возбуждаются низкодобротные n -четвертьволновые колебания волны TEM типа.

Немаловажным является также то, что практически во всей выявленной области существования высокодобротных колебаний существует их связь с коаксиальной зондовой структурой, которая проявляется в изменениях добротности резонансной частоты при изменении

параметров среды и объектов в области апертуры зондовой структуры.

Таким образом, можно утверждать:

– нерегулярные гибридные структуры в конфигурациях, рассмотренных в работе, могут быть эффективно использованы для создания высокодобротных резонаторных измерительных преобразователей для бесконтактной диагностики материалов и сред;

– предложенные и подобные структуры требуют дальнейшего изучения для достижения максимальной добротности при максимальной чувствительности к изменениям измеряемых параметров.

Библиографический список

1. *Chen L.F., Ong C.K., Neo C.P. et al.* Microwave Electronics. Measurements and Materials Characterization – England: John Wiley & Sons, Ltd., 2004. – 537p.
2. *Гордиенко Ю.Е., Петров В.В., Хаммуд Ф.М.* Оценка численно-аналитических моделей СВЧ резонаторных датчиков с коаксиальной измерительной апертурой / Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2005. Вып. 140. С. 156-162.
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 / edited by *S.V.Kalinin, A.Gruverman.* – New York: Springer-Verlag, 2007. – P. 215-253.
4. *Гордиенко Ю.Е., Ларкин С.Ю., Яцкив А.М.* Ближнеполевой СВЧ датчик на основе конусного коаксиального резонатора / Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2009. Вып. 159. С. 309-314.
5. *Бондаренко И.Н., Галич А.В.* Высокодобротный резонаторный измерительный преобразователь на основе нерегулярной коаксиальной структуры / Сб. научн. трудов 4 Международной научн. конф. «Функциональная база нанозлектроники», Кацевели, 2011, с. 245-247.
6. *Бондаренко И.Н., Галич А.В.* Высокодобротный коаксиальный нерегулярный резонаторный измерительный преобразователь / Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2012. Вып. 168. С. 108-112.