

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

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники*

*14, пр. Ленина, Харьков, 61166, Украина*

E-mail: [mequ@kture.kharkov.ua](mailto:mequ@kture.kharkov.ua)

## ВЫСОКОДОБРОТНЫЕ ТИПЫ КОЛЕБАНИЙ В НЕРЕГУЛЯРНЫХ ГИБРИДНЫХ СТРУКТУРАХ

Для бесконтактной микроволновой диагностики материалов и сред в сканирующей микроволновой микроскопии активно применяются резонаторные измерительные преобразователи с коаксиальными микрозондами. Чувствительность измерений при этом определяется добротностью резонаторной части измерителя и эффективностью ее сопряжения с зондом. Целью нашего исследования является проведение анализа условий возбуждения и поддержания высокودобротных колебаний в нерегулярных гибридных структурах типа коаксиального конуса, объемного усеченного конуса, соединенного с коаксиальным конусом, объемного цилиндра, соединенного с усеченным объемным конусом и коаксиальным конусом. С помощью численного моделирования и экспериментальных исследований макетов устройств определены условия возбуждения и типы высокودобротных колебаний в таких нерегулярных гибридных структурах, а также условия обеспечения связи высокودобротных колебаний с апертурой коаксиальной зондовой части. Нерегулярные гибридные структуры в конфигурациях, рассмотренных в работе, могут быть использованы для создания высокودобротных резонаторных измерительных преобразователей для бесконтактной микроволновой диагностики различных объектов. Ил. 6. Библиогр.: 6 назв.

**Ключевые слова:** высокودобротный, резонаторный, нерегулярный, гибридный, конус, колебания.

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 изменение 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 высокودобротной резонаторной части к коаксиальной зондовой происходит плавно за счет его конической формы. Возбуждение измерительного преобразователя происходит как на коаксиальных типах колебаний (волна *ТЕМ*), так и высших для такой структуры типах волн (*H* и *E*). Показано, что в зависимости от геометрии и размеров такие преобразова-

тели 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 высокودобротных типов 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 будут возникать 8 резонансов, включая и относительно низкودобротные (до  $1,8 \dots 2,1 \cdot 10^3$ ) резонансы  $n$ -четверть-волновых коаксиальных резонаторов (рис. 1, б, в, е).

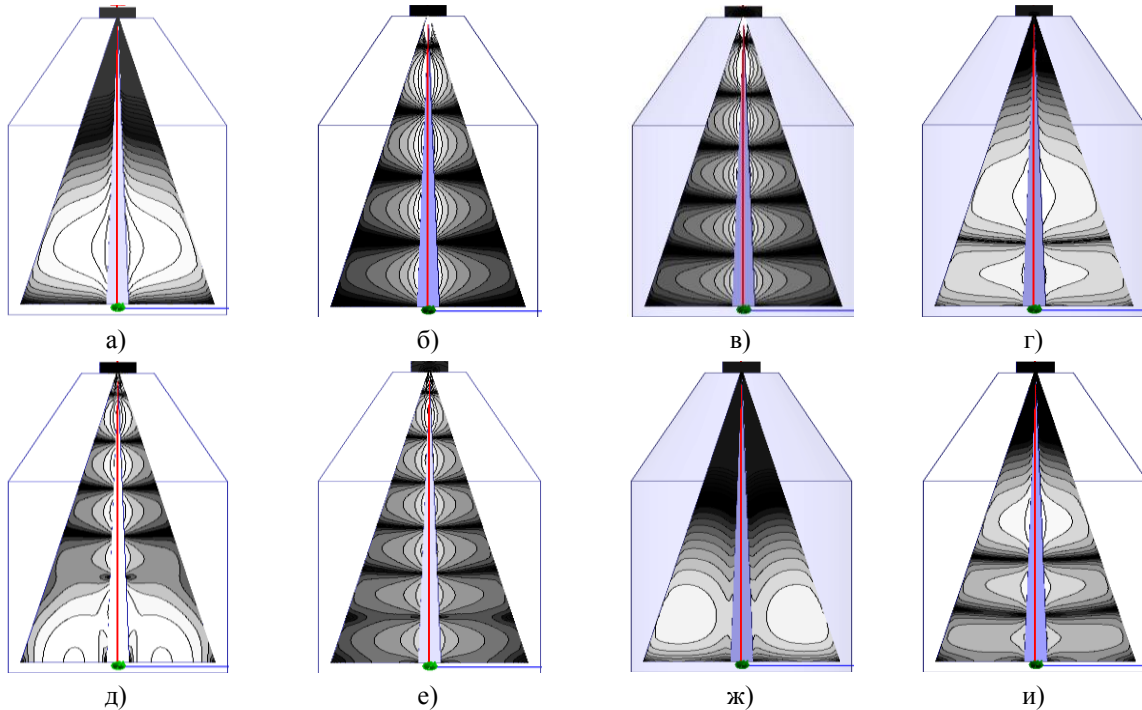


Рис. 1. Виды собственных колебаний нерегулярной коаксиальной структуры с геометрическими размерами  $L = 81$  мм,  $D = 16$  мм,  $d = 1$  мм: а) –  $Q = 11310,7$ ;  $f = 8,02$  ГГц; б) –  $Q = 1888,45$ ;  $f = 8,32$  ГГц; в) –  $Q = 1988,42$ ;  $f = 10,16$  ГГц; г) –  $Q = 11634,7$ ;  $f = 10,3$  ГГц; 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

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.

Количество возможных резонансов в такой структуре может быть сокращено за счет выбора конструкции и места подключения элементов связи, предназначенных для возбуждения выбранного типа 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,  $Q = 3\,820$ ; II –  $f = 10,2$  ГГц,  $Q = 12\,345$ ; III –  $f = 11,6$  ГГц,  $Q = 10\,632$ .

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 типов колебаний волн *TEM*-типа;

– высокодобротные типы колебаний в нерегулярной коаксиальной структуре не связаны с выходной коаксиальной апертурой ее зондовой части, в то время как четвертьволновые резонансы *TEM*-волны 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 незапрещенной для соответствующего типа колебаний части.

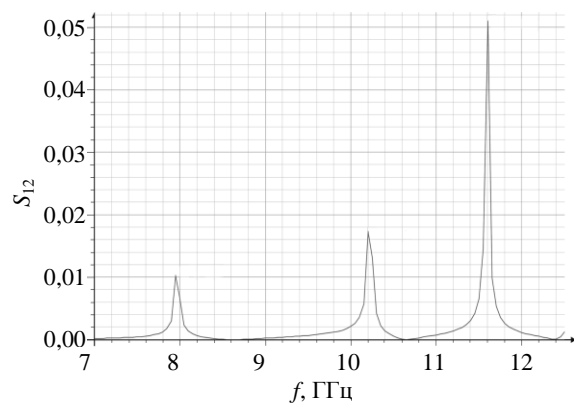


Рис. 2. АЧХ нерегулярной коаксиальной структуры

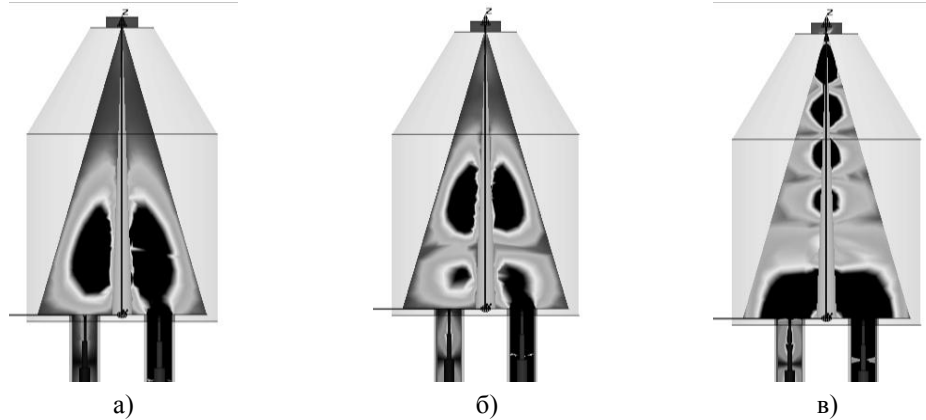


Рис. 3 Конфигурации электрических полей: а) – резонанс I; б) – резонанс II; в) – резонанс III

Для выявления возможностей и условий обеспечения связи высокодобротных типов 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 типов колебаний в рассматриваемой струк-

туре к широкой части конуса подсоединялась дополнительная объемная цилиндрическая часть, что приводило к возбуждению колебаний типа квази- $H_{112}$  (рис. 4).

Возбуждение структуры, приведенной на рис. 4, производилось с помощью штыревых элементов связи, расположенных в месте соединения конической и цилиндрической объемных частей (рис. 4, в).

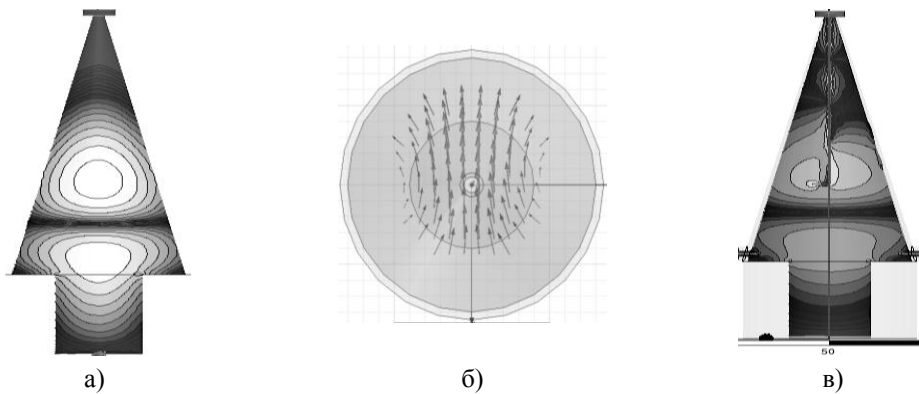


Рис. 4. Распределение электрических полей в нерегулярных гибридных структурах при возбуждении вида колебаний квази- $H_{112}$ : а) – без центрального проводника; б) – в сечении максимума электрического поля; в) – с центральным проводником в коаксиально-зондовой части структуры

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 су- женный участок конуса является запертым. Конфигурация электрических силовых линий, приведенная на рис. 4, б, доказывает, что в рассматриваемой структуре возбуждаются типы 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.

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  $n$ -четверть-волновые 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.

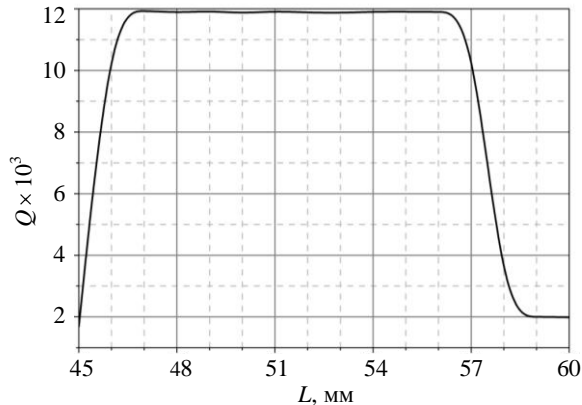


Рис. 5. Изменение добротности в зависимости от погружения проводника

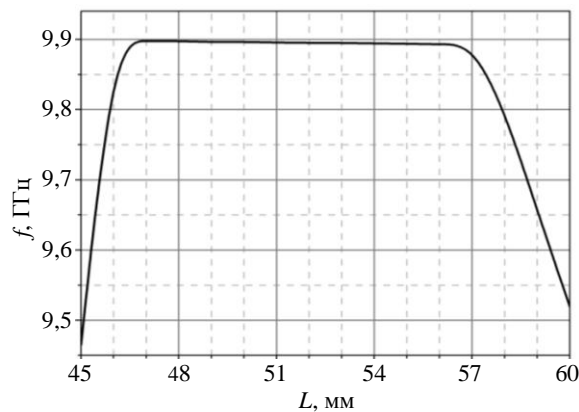


Рис. 6. Сдвиг резонансной частоты в зависимости от погружения проводника

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. *Microwave Electronics. Measurements and Materials Characterization* / L. F. Chen, C. K. Ong, C. P. Neo et al. – L.: John Wiley & Sons, Ltd., 2004. – 537 p.
2. Гордиенко Ю. Е. Оценка численно-аналитических моделей СВЧ резонаторных датчиков с коаксиальной измерительной апертурой / Ю. Е. Гордиенко, В. В. Петров, Ф. М. Хаммуд // Радиотехника: науч.-техн. сб. / Харьков. гос. ун-т. – X., 2005. – Вып. 140. – С. 156–162.
3. *Anlage S. M. Principles of near-field microwave microscopy* / S. M. Anlage, V. V. Talanov, A. R. Schwartz; eds. S. V. Kalinin, A. Gruverman // *Scanning probe microscopy: electrical*

and electromechanical phenomena at the nanoscale. – N. Y.: Springer-Verlag, 2007. – P. 215–253.

4. Гордиенко Ю. Е. Ближнеполевой СВЧ-датчик на основе конусного коаксиального резонатора / Ю. Е. Гордиенко, С. Ю. Ларкин, А. М. Яцкив // Радиотехника: науч.-техн. сб. / Харьков. гос. ун-т. – X., 2009. – Вып. 159. – С. 309–314.
5. Бондаренко И. Н. Высокодобротный резонаторный измерительный преобразователь на основе нерегулярной коаксиальной структуры / И. Н. Бондаренко, А. В. Галич // 4 Междунар. науч. конф. Функциональная база нанозлектроники: сб. науч. тр. – Кацивели, 2011. – С. 245–247.
6. Бондаренко И. Н. Высокодобротный коаксиальный нерегулярный резонаторный измерительный преобразователь / И. Н. Бондаренко, А. В. Галич // Радиотехника: науч.-техн. сб. / Харьков. гос. ун-т. – X., 2012. – Вып. 168. – С. 108–112.

Рукопись поступила 25.07.2012 г.

I. N. Bondarenko, A. V. Galich, S. I. Troitski

#### HIGH-Q MODES IN IRREGULAR HYBRID STRUCTURES

For non-contact microwave diagnostics of materials and media at scanning microwave microscopy cavity transmitters with coaxial microprobe are widely used. Measurement sensitivity is then determined by quality factor of the cavity of the meter and the efficiency of its coupling with the probe. The aim of our investigation is to analyze the conditions of excitation and maintenance of high-Q oscillations in irregular hybrid structures as coaxial cone, a truncated cone, connected to a coaxial cone, cylinder volume, coupled with a truncated cone and coaxial cone. Numerical model simulation and experimental device examination define the conditions of excitation and types of high-Q oscillations in such irregular hybrid structures and the conditions for communication of high-Q oscillations with an aperture of a coaxial probe parts are also identified. Irregular hybrid structures in configurations discussed in the paper can be effectively used to create high-Q resonator transducers for contactless microwave diagnostics of different objects.

**Key words:** high-Q, resonator, irregular, hybrid, cone, oscillations.

I. M. Бондаренко, О. В. Галич, С. І. Троїцький

#### ВИСОКОДОБРОТНІ ТИПИ КОЛИВАНЬ В НЕРЕГУЛЯРНИХ ГІБРИДНИХ СТРУКТУРАХ

Для безконтактної мікрохвильової діагностики матеріалів і середовищ в скануючій мікрохвильовій мікроскопії активно застосовуються резонаторні вимірювальні перетворювачі з коаксіальними мікрозондами. Чутливість вимірювань при цьому визначається добротністю резонаторної частини вимірювача та ефективністю її узгодження з зондом. Метою нашого дослідження є проведення аналізу умов збудження і підтримання високодобротних коливань в нерегулярних гібридних структурах типу коаксиального конуса, урізаного об'ємного конуса, з'єданого з коаксіальним конусом, об'ємного циліндра, з'єданого з урізаним об'ємним конусом і коаксіальним конусом. За допомогою числового моделювання і експериментальних досліджень макетів пристроїв визначено умови збудження та типи високодобротних коливань в таких нерегулярних гібридних структурах, а також умови забезпечення зв'язку високодобротних коливань з апертурою коаксіальної зондової частини. Нерегулярні гібридні структури в конфігураціях, які розглянуто в роботі, можуть бути ефективно використані для створення високодобротних резонаторних вимірювальних перетворювачів для безконтактної мікрохвильової діагностики різних об'єктів.

**Ключові слова:** високодобротний, резонаторний, нерегулярний, гібридний, конус, коливання.