

ВЫСОКОДОБРОТНЫЙ КОАКСИАЛЬНЫЙ НЕРЕГУЛЯРНЫЙ РЕЗОНАТОРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Введение

Основным устройством системы измерений в сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), определяющим чувствительность и разрешающую способность, является измерительный преобразователь или микрозонд, непосредственно взаимодействующий с исследуемым объектом [1].

В ближнеполевой сканирующей микроволновой микроскопии (СММ) таким устройством является отрезок линии передачи, заканчивающийся миниатюрным зондом или резонаторный измерительный преобразователь (РИП), соединенный или совмещенный с микрозондовой структурой. При этом предпочтительным является использование РИП, позволяющим получать более высокую чувствительность измерений [2, 3].

Поскольку в СММ наиболее эффективной конструкцией зонда является коаксиальная возникает необходимость построения такой резонаторной части РИП, которая сопрягается по структуре поля с коаксиальным микрозондом.

Целью данной работы является анализ возможностей использования нерегулярных коаксиальных резонансных структур, возбуждаемых на высших высокодобротных видах колебаний, для создания РИП СММ.

Основная часть

При использовании резонаторных измерительных преобразователей информационные сигналы представляют собой изменения добротности и сдвиги резонансной частоты, величина которых определяется изменениями величины потерь и диэлектрической проницаемости локального участка поверхности исследуемого материала. При этом, чем выше добротность РИП, тем выше чувствительность измерений. Пространственная разрешающая способность определяется конструкцией и геометрией апертурной части зонда РИП. Как правило, это коаксиальная структура с заостренным центральным проводником.

Такая конструкция получила наибольшее распространение благодаря возможности достаточно простого изменения пространственной разрешающей способности путем изменения степени заострения. На конце острия при этом формируется продольная (z) составляющая электрического поля, обеспечивающая взаимодействие с исследуемым объектом.

Функционально, а в большинстве случаев и конструктивно, РИП СММ состоит из двух частей: резонаторной и микрозондовой. Резонаторная должна иметь максимально возможную добротность, а зондовая – максимально локализованную продольную (z -ю) составляющую поля.

Технологически наиболее удобными в изготовлении являются осесимметричные резонаторы: коаксиальные или цилиндрические.

В объемных цилиндрических резонаторах можно возбудить виды колебаний H_{01n} , которые обладают аномально малыми потерями (в основном за счет наличия только поперечных кольцевых составляющих поверхностных токов) и, соответственно, высокими добротностями. Такие резонаторы также можно использовать для создания РИП СММ, но для этого микрозондовая структура должна вводиться со стороны цилиндрической стенки резонатора, что создает дополнительные технологические трудности и может привести к потере ожидаемого выигрыша по добротности.

В коаксиальной линии при определенных соотношениях диаметров внутреннего и внешнего проводников возможно возникновение высших типов волн, в том числе и волны типа H_{01} [4]. Обычно высшие типы волн в линиях считаются нежелательным фактором и от них, как правило, стараются избавляться. Однако волну H_{01} -типа можно использовать для со-

здания высокочастотного коаксиального резонатора, а наличие у такого резонатора центрального проводника позволит достаточно просто осуществить его сопряжение с коаксиальной микрозондовой структурой [5]. К недостаткам такой конструкции можно отнести необходимость принятия мер по снятию вырождения видов колебаний H_{01n} и E_{11n} , которые к тому же не являются низшими, а также сложности в обеспечении конструктивной жесткости тонкого центрального проводника, переходящего в зондовую структуру.

В тоже время в конструкции коаксиального конусного четвертьволнового резонатора достаточно просто реализуются колебания на волне ТЕМ типа и плавный переход от резонатора к зонду (см. рис.1). Недостатком такой конструкции является низкая добротность четвертьволновых резонансов коаксиальной структуры, которые, как правило, даже для теоретических оценок не превышают нескольких тысяч, а на практике с учетом связей и потерь в соединениях могут быть и менее 10^3 .

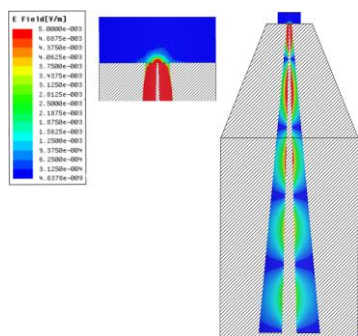


Рис.1. Коаксиальный конический четвертьволновый РИП:
 $f_p = 8,32$ ГГц, $Q = 1548,6$

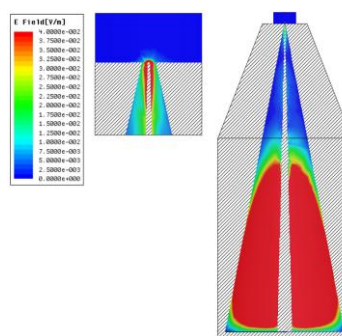


Рис.2. Коаксиальный конический РИП с видом колебаний H_{111} :
 $f_p = 7,85$ ГГц, $Q = 11232$

Как показывает модельный эксперимент, в коническом коаксиальном резонаторе также возможно возбуждение колебаний, отличных от ТЕМ, при увеличении отношения внутреннего диаметра внешнего экранного проводника к диаметру внутреннего (рис.2). Добротность резонатора получается при этом в несколько раз большей, чем для колебаний волн ТЕМ типа. Вариацией угла раскрыва конуса, его длины и отношения соответствующих диаметров проводников можно обеспечить необходимое значение резонансной частоты.

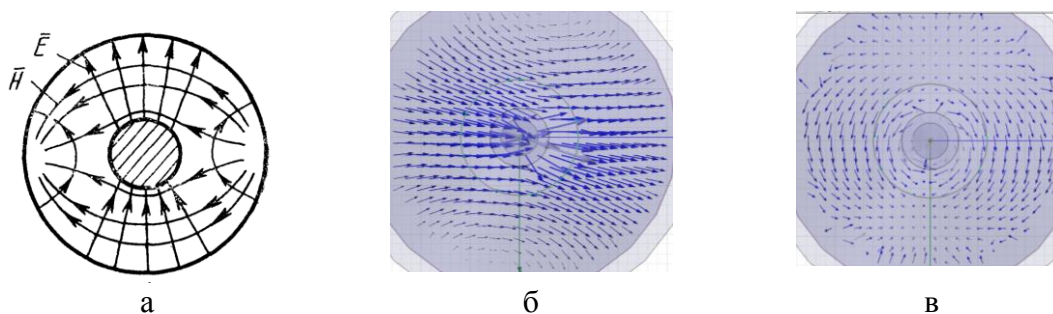


Рис. 3. Структура полей: а – волна H_{11} в коаксиальной линии; б – E в коническом коаксиальном резонаторе (рис.2); в – H в коническом коаксиальном резонаторе (рис.2)

Сравнение и анализ структуры электромагнитных полей в поперечном сечении зоны возбуждения конического РИП и одного из возможных высших типов волн в коаксиальной линии показывают (рис.3), что высокочастотный резонансный отклик в коническом коаксиальном РИП можно идентифицировать с низшим видом колебаний H_{11} в цилиндрическом резонаторе.

При рассмотрении нерегулярной коаксиальной резонансной структуры принималось, что ее центральный проводник также имеет коническую форму, но диаметры его концов постоянны: 3,8 и 0,6 мм; также не меняется внутренний диаметр апертурного отверстия (2 мм). Остальные размеры (длина L и внутренний радиус R_1 широкой части наружного проводника нерегулярной коаксиальной структуры) при моделировании изменялись с целью выяснения области существования вида колебаний квази- H_{111} . Результаты расчетов приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Значения f_p и Q для вида колебаний квази- H_{111} в нерегулярной коаксиальной структуре

L , мм	86	81	81	81	76	71	66	64	60
R_1 , мм	16	15,5	16	16,5	16	16	16	18	18
f_p , ГГц	7,8603	8,0249	7,8136	7,8296	8,113	8,261	8.42	7.8510	8.0078
Q	11223	11063	10693	11184	11109	11053	10935	11460	11385

Из данных Таблицы 1 можно сделать вывод, что на подобных видах колебаний можно обеспечить достаточно высокие значения добротности.

При дальнейшем варьировании размерами нерегулярной коаксиальной структуры выяснилось, что в ней могут возбуждаться и другие высокочастотные виды колебаний, например, вида квази- H_{112} (см. рис.4 и Таблицу 2).

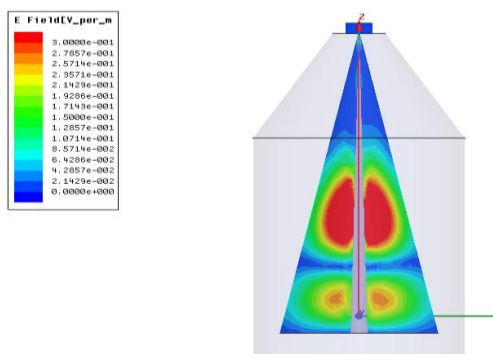


Рис. 4. Распределение E поля вида колебаний квази- H_{112} в нерегулярной коаксиальной структуре

Таблица 2. Значения f_p и Q для вида колебаний квази- H_{112} в нерегулярной коаксиальной структуре

L , мм	86	86	86	86	88	88	90	90	96
R_1 , мм	18	19	20	21	19	21	19	21	21
f_p , ГГц	9,1708	8,9087	8,638	8,5532	8,98	8,4713	8,896	8,3891	8,1895
Q	12059	12613	12882	13381	12678	13303	12578	13246	13548

L , мм	96	101	106	106	111	111
R_1 , мм	22	22	17	21	18	20
f_p , ГГц	7,9626	7,813	8,9682	7,884	8,529	7,9903
Q	13648	13911	12046	13583	12483	13303

Из Таблицы 2 видно, что в этом случае могут быть получены большие значения добротностей и большие значения резонансных частот, чем для вида колебаний квази- H_{111} .

В рассматриваемых нерегулярных коаксиальных структурах при подборе соответствующих размеров возможно также возбуждение видов колебаний квази- E_{011} (рис.5) и квази- H_{221} (рис.6). При этом для квази- E_{011} добротность изменяется в пределах от $3,8 \cdot 10^3$ до $6,5 \cdot 10^3$, резонансная частота – от 7,81 до 8,4 ГГц при $L = 86 \dots 111$ мм, $R = 21 \dots 23$ мм. Для квази- H_{221} : добротность – $1,4 \cdot 10^4 \dots 1,53 \cdot 10^4$.

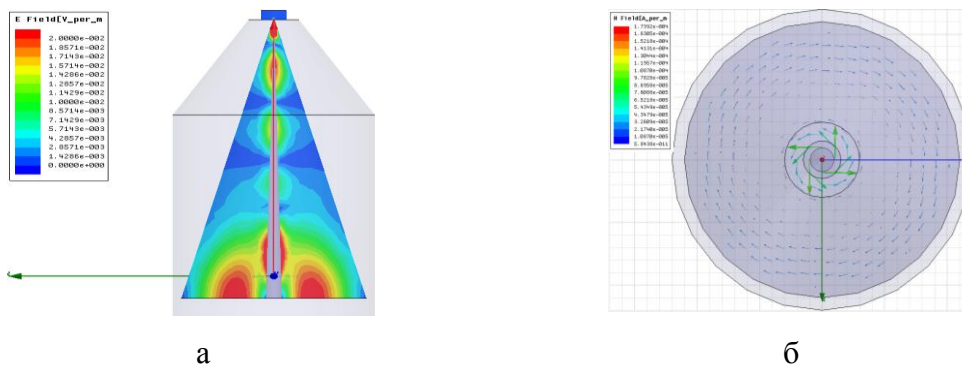


Рис. 5. Конфигурация полей вида колебаний квази- E_{011} в нерегулярной коаксиальной структуре: а – поле E , б – поле H

Резонанс на виде колебаний квази- H_{221} более высокодобротный по сравнению с предыдущими видами колебаний, но его возбуждение и выделение могут стать сложной технической задачей, поскольку он имеет сложную конфигурацию электрических и магнитных полей (см. рис.6).

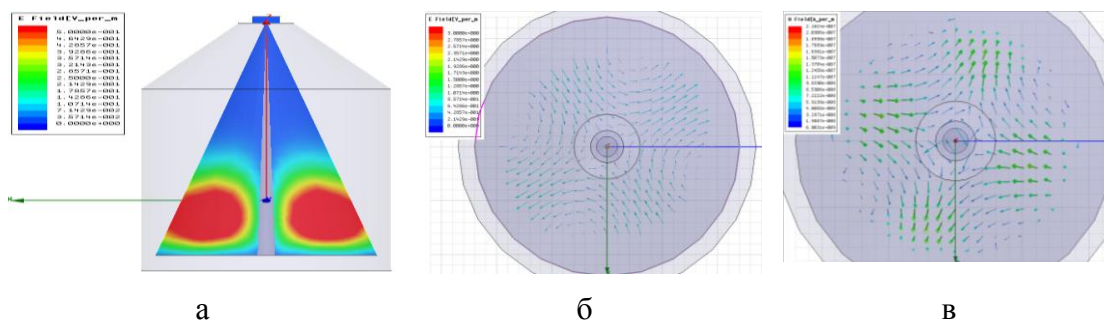


Рис.6. Конфигурация полей вида колебаний квази- H_{221} в нерегулярной коаксиальной структуре: а – поле E , б – поле E , в – поле H

Обеспечение работы рассматриваемых резонансных нерегулярных структур на избранном виде колебаний может стать также довольно сложной электродинамической и технической задачей, поскольку такая структура обладает многомодовостью и может возбуждаться на различных видах колебаний в рабочем диапазоне частот.

Так, например, для коаксиальной нерегулярной структуры с размерами $L = 81$ мм, $R_1 = 16$ мм диапазоне частот 8,01...12,23 ГГц будет возникать 8 резонансов, включая и относительно низкодобротные (до $1,5 \dots 2 \cdot 10^3$) резонансы n -четвертьволновых коаксиальных резонаторов.

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 устройств связи коаксиальных линий, подключаемых к исследуемой структуре через торцевую стенку, и ориентации петель связи с учетом конфигурации

полей необходимого вида колебаний, АЧХ такого РИП будет выглядеть так, как показано на рис.7. Видно, что в рабочем диапазоне осталось только три высокодобротных резонанса.

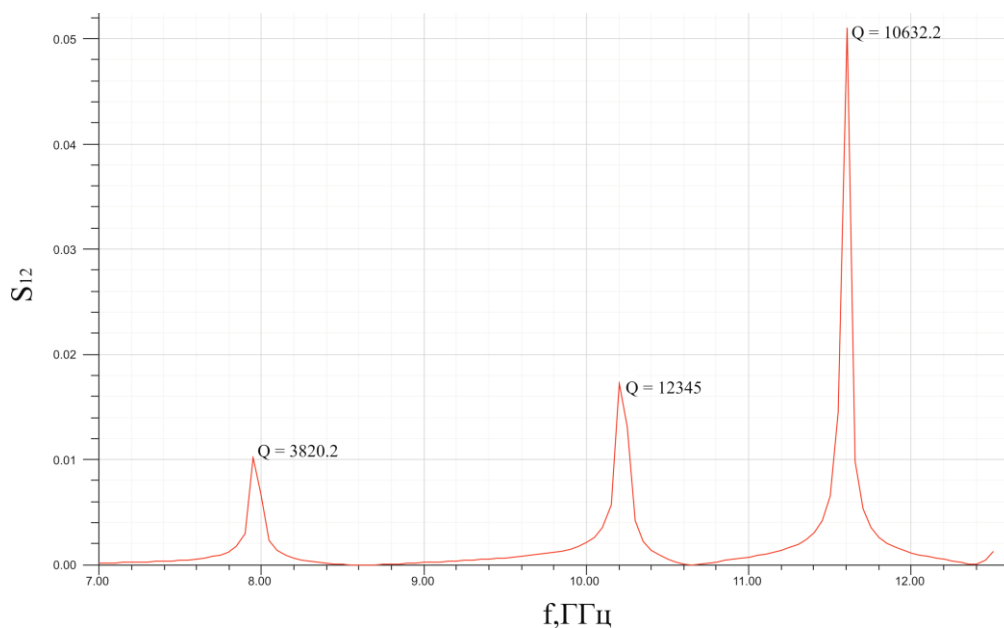


Рис.7. АЧХ РИП на основе нерегулярной коаксиальной структуры

Выводы

Таким образом, нерегулярные коаксиальные структуры, возбуждаемые на высших видах колебаний, могут быть с успехом применены для создания высокодобротных РИП с достаточно далеко разнесенными резонансами. Однако их реализация связана с преодолением ряда трудностей, а именно: аналитический расчет таких систем затруднен, следовательно, определение конкретных геометрических размеров конструкций под заданное значение частоты будет осуществляться перебором модельных систем и последующей экспериментальной подгонкой; технология получения качественных конических поверхностей и соосного высокоточного сопряжения двух конусов (внутреннего проводника и внешнего) сложна и требует разработки специальных технологических оснасток. Поэтому использование такого типа РИП обосновано только в том случае, если невозможно решение задачи другими способами или есть отлаженная технология изготовления таких устройств.

В тоже время результаты, полученные при моделировании РИП на основе нерегулярных коаксиальных структур, доказывают возможность построения высокодобротных конических коаксиальных преобразователей, возбуждаемых на высших видах колебаний, и позволяют провести разработку высокочувствительных резонаторных преобразователей рассмотренного типа для сканирующего микроволнового микроскопа, что должно привести к повышению чувствительности проводимых с его помощью исследований.

Список литературы: 1. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. – Москва: Техносфера, 2004. – 144с. 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 / edited by S.V.Kalinin, A.Gruverman. – New York: Springer-Verlag, 2007. – Vol. 1. – P. 215-253. 4. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. т.1. М.: Высш. школа. 1970. – 440с. 5. Бондаренко И.Н., Рострипа Е.Е. Коаксиальный резонаторный измерительный преобразователь на виде колебаний H_{01n} // Сб. научн. трудов 3 Международной научн. конф. «Функциональная компонентная база микро-, опто- и наноэлектроники», Харьков-Кацивели, 2010, с. 313-315.