



ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НА ОСНОВЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА НА ВИДЕ КОЛЕБАНИЙ H_{011}

*БОНДАРЕНКО И.Н., ВАСИЛЬЕВ Ю.С.,
КАМЫШАН А.А., ТРОИЦКИЙ С.И.*

Приводятся результаты исследований свойств резонаторного измерительного преобразователя на основе цилиндрического резонатора на виде колебаний H_{011} , предназначенного для использования в зондовой сканирующей микроволновой микроскопии. Показывается возможность реализации преобразовательных резонаторных устройств с коаксиальными зондами, исходная рабочая добротность которых достигает величин 10^4 .

1. Введение

Принцип действия зондового сканирующего микроволнового микроскопа (СММ) с резонаторным измерительным преобразователем (РИП) основывается на формировании информационных сигналов в виде изменений резонансной частоты и добротности РИП, обусловленных характером взаимодействия поля микронзондовой структуры с исследуемым объектом [1-3]. Чувствительность измерений при этом будет определяться величиной добротности РИП.

Несмотря на большое разнообразие резонансных элементов, используемых в РИП СММ, максимальное значение добротности может быть достигнуто в цилиндрических резонаторах, возбуждаемых на видах колебаний H_{01n} [4]. Оценочное значение собственной добротности для таких резонаторов достигает величины 10^4 и более. Даже при подсоединении элементов связи и зондовой структуры величина добротности РИП на основе такого резонатора должна быть достаточно большой.

В этой связи представляется целесообразным проведение анализа элементов и структуры РИП на основе цилиндрического резонатора на виде колебаний H_{011} .

2. Основная часть

Функционально РИП для СММ можно представить в виде следующих элементов: резонатора, элементов связи резонатора с измерительной схемой, отрезка коаксиальной линии, имеющего с одной стороны элемент связи с резонатором, а с другой – зондовую структуру для формирования требуемого распределения поля, взаимодействующего с локальным участком исследуемого объекта (рис.1). Соответственно характеристики РИП в целом будут определяться па-

раметрами и конструкцией его элементов, а также методами сопряжения и согласования их друг с другом.

Рабочая добротность РИП главным образом будет зависеть от добротности резонатора.

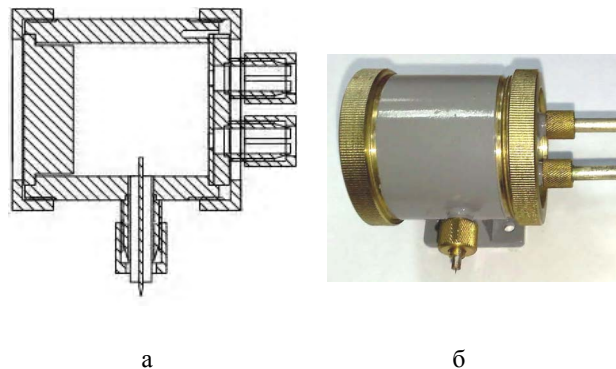


Рис.1. РИП на основе цилиндрического резонатора, возбуждаемого на виде колебаний H_{011} :
а – конструкция; б – внешний вид

Результаты расчетов для цилиндрических медных резонаторов, возбужденных на виде колебаний H_{011} , приведены в табл. 1.

Таблица 1

Заполнение	Размеры, мм	f_p , ГГц	Q
Вакуум (воздух)	$d = h = 39,5$	10,0	29557
Вакуум (воздух)	$d = h = 11,0$	36,0	15800
Фторопласт	$d = h = 26,5$	10,662	4013

Расчет для резонатора, заполненного диэлектриком, производился в целях выяснения возможности уменьшения габаритных размеров РИП при сохранении высокой добротности. Полученные результаты показывают, что даже в случае применения в качестве заполнителя фторопласта с $\text{tg} \delta \sim 10^{-3}$ добротность существенно уменьшается из-за потерь в диэлектрике. Добротность такого резонатора становится сравнимой с добротностью резонаторов на основе отрезков волноводов, которые в конструктивном и технологическом плане значительно проще.

Таким образом, на данном этапе следует сосредоточиться на изучении возможностей создания РИП для СММ на основе резонатора без заполнения.

Одним из наиболее технологически простых вариантов связей с резонатором такого типа является использование коаксиальных линий, подводимых со стороны торцевой крышки резонатора (см. рис.1). Коаксиальные линии со стороны резонатора заканчиваются петлями связи, плоскость которых перпендикулярна к магнитным силовым линиям вида колебаний H_{011} . Подача и съем сигнала при использовании таких линий может осуществляться с помощью как коаксиально-волноводных переходов, так и коаксиальных разъемов.

Численное моделирование проводилось при использовании коаксиальных линий с внутренним диаметром внешнего проводника – 4,6 мм, диаметром внутреннего проводника – 2 мм, диаметром четвертьволновой вставки – 1 мм, длиной – 7,5 мм, диаметром проводника петли связи – 0,5 мм.

Исследовались как характер колебаний, возбуждаемых в резонаторе с помощью выбранных устройств связи, так и влияние связей на параметры резонатора (табл. 2).

Таблица 2

Расстояние от элемента связи до полости резонатора, мм	f_p , ГГц	Q
0,1	10.1125	13133
1,0	10.1042	21139

Из табл. 2 видно, что рабочая добротность резонатора даже по расчетным оценкам за счет элементов связи снижается и требует оптимизированного подбора величины связи с учетом требований измерительной системы и сохранения в то же время достаточно высокого значения добротности для обеспечения высокой чувствительности РИП в целом.

Последующее рассмотрение проводилось для конструкции РИП с зондовой структурой, подключаемой к резонатору через цилиндрическую стенку. Схематическое изображение этой конструкции приведено на рис.2. Длина коаксиальной части зондовой структуры для РИП на частоту ~ 10 ГГц составляла (3/4)· λ_k .

В процессе анализа РИП с элементами связи (петлями), расположенными на расстоянии 1 мм от полости резонатора со стороны торцевой крышки, при длине изогнутой части элемента связи резонатора с зондом – 3 мм, глубине погружения изогнутой части в полость резонатора в середине его боковой цилиндрической поверхности – 2 мм, наружного конца зонда в виде открытой коаксиальной линии с размерами $D/d = 3 \text{ мм}/0,8 \text{ мм}$ получено значение добротности – 19916 на частоте 10,0976 ГГц без образца.

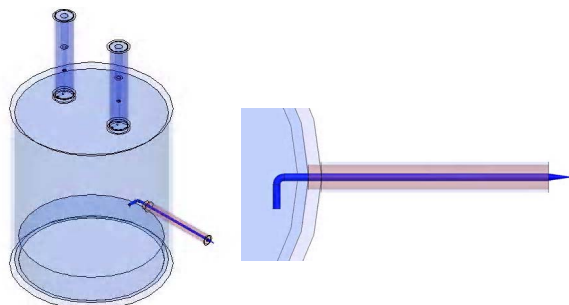


Рис. 2. Схематическое изображение РИП и зондовой структуры

Распределение поля в апертурной части зондовой структуры также существенно зависит от геометрии

выступающего центрального проводника. Заострение ведет к большей степени локализации поля в апертуре зондовой структуры РИП.

На рис. 3 приведены распределения полей в апертурной части зондовой структуры РИП при наличии образца ($\text{tg}\delta = 0,01$; $\epsilon = 12$) и наличии зазора между коническим зондом и образцом.

В табл. 3 приведены значения параметров РИП при различных величинах $\text{tg}\delta$ образца при отсутствии и наличии зазора между плоскостью апертурной части зонда и образцом с его коническим выступом, которые свидетельствуют о достаточно высокой чувствительности параметров (в частности, добротности) РИП к изменениям потерь в образце.

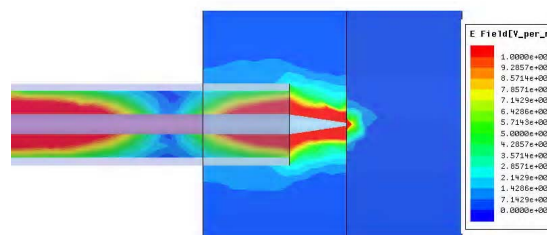


Рис.3. Распределение поля в области взаимодействия заостренного зонда с образцом (зазор – 1 мкм, $\text{tg}\delta = 0,01$; $\epsilon = 12$)

Таблица 3

Зазор, мкм	$\text{tg}\delta$ ($\epsilon = 12$)	f_p , ГГц	Q
0	0,01	10,0957	15169
	0,1	10,0958	15018
	1,0	10,0958	13822
1	0,01	10,0956	17249
	1,0	10,0956	15560

Из табл. 3 видно, что чувствительность при приближении модельной конструкции к реальным условиям эксплуатации преобразователя (наличие зазора) будет падать. Следовательно, необходимо увеличивать связь зондовой структуры с резонатором РИП.

Для увеличения связи вводим элемент связи зонда с резонатором РИП на глубину 3 мм.

Добротность РИП без образца в этом случае составляет 16224 на частоте 10,0925 ГГц. Зависимость f_p и Q от величины $\text{tg}\delta$ образца при зазоре, равном 1 мкм, приведена в табл. 4.

Таблица 4

Зазор, мкм	$\text{tg}\delta$ ($\epsilon = 12$)	f_p , ГГц	Q
1	0,01	10,0922	10682
	1,0	10,0923	7927

Сравнение данных табл. 3 и 4 показывает, что, несмотря на значительное уменьшение добротности РИП

(почти на 40%), чувствительность измерений может быть повышена примерно в 2,5 раза.

Следующим фактором, влияющим на добротность РИП, является величина выноса заостренной части зонда.

В табл. 5 приведены данные об изменении параметров РИП в зависимости от выноса острия зонда и изменения характеристик образца при зазоре 1 мкм.

Таблица 5

$\text{tg}\delta$ ($\epsilon = 12$)	Величина выноса заостренной части зонда, мм	f_p , ГГц	Q
0,01	0	10,0931	18748
	0,5	10,0928	16343
	1,0	10,0924	14341
	2,0	10,0922	10682
0,1	0,5	10,0928	15429
	1,0	10,0920	13706
1,0	0,5	10,0928	9854
	1,0	10,0924	9671

Анализ данных, приведенных в табл. 5, показывает, что величина выноса заостренной части зонда порядка 0,5 мм является оптимальной с точки зрения обеспечения как высокой исходной добротности РИП, так и чувствительности измерений.

Для определения требований к точности ориентации элемента связи зондовой структуры в полости резонатора было проведено моделирование РИП при элементе связи, повернутом на 45° . Было получено значение добротности 13495 на частоте 10,0946 ГГц для острия зонда, выдвинутого на 3 мм, при образце с $\epsilon = 12$; $\text{tg}\delta = 0,01$ и зазоре между острием и образцом 1 мкм. Даже при таком значительном (до 45°) смещении плоскости элемента связи добротность РИП остается достаточно высокой и, следовательно, при практической реализации такого РИП допустимо некоторое отклонение в ориентации элемента связи.

При экспериментальном исследовании РИП, изготовленного из латуни, конструкция и внешний вид которого показаны на рис.1, на частоте 9,9955 ГГц была получена добротность ~ 9520 .

3. Выводы

Проведенные исследования доказывают эффективность предварительного модельного исследования характеристик РИП, отличающихся сложным конструктивным исполнением, что позволяет сократить затраты материальных и временных ресурсов при их разработке. Полученные результаты показывают, что возможно создание РИП на основе цилиндрического резонатора, возбуждаемого на виде колебаний H_{011} , что обеспечивает высокую исходную добротность РИП в целом и, соответственно, ведет к повышению чувствительности проводимых измерений.

Литература: 1. *Chen L.F., Ong C.K., Neo C.P. et al.* Microwave Electronics. Measurements and Materials Characterization. John Wiley & Sons, Ltd., 2004. 537p. 2. *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. 3. *Kim J., Lee K., Fridman B., Cha D.* Near-field scanning microwave microscope using a dielectric resonator. Appl. Phys. Lett., 2003, Vol. 83, No. 5. P. 1032-1034. 4. *Лебедев И.В.* Техника и приборы СВЧ. Т.1. М.: Высш. школа, 1970. 440с.

Поступила в редколлегию 23.04.2011

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, с.н.с. Фисун А.И.

Бондаренко Игорь Николаевич, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: криогенная радиофизика, техника СВЧ, бесконтактные методы диагностики. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057)702-13-62.

Васильев Юрий Сергеевич, аспирант кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: техника СВЧ, бесконтактные методы диагностики. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057)702-13-62.

Камышан Артем Алексеевич, стажер-исследователь кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: методы моделирования СВЧ структур, бесконтактные методы диагностики. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057)702-13-62.

Троицкий Сергей Илларионович, научный сотрудник кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: технология и методы исследования микроэлектронных и СВЧ структур. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (057)702-13-62.