

РЕЗОНАТОРНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ЛОКАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ И СТРУКТУР

И. Н. БОНДАРЕНКО

Проведен обзор и анализ особенностей построения, конструкций и характеристик различных типов резонаторных измерительных преобразователей, предназначенных для локальной микроволновой диагностики материалов и малоразмерных планарных микроэлектронных структур. На основе модельных и реальных экспериментальных исследований оценены возможности и перспективы практического использования микроволновых резонаторных измерительных преобразователей с зондовыми структурами.

Ключевые слова: микроволновый, резонаторный, измерительный, преобразователь, диагностика, локальный, зонд.

ВВЕДЕНИЕ

Современные достижения физики и техники СВЧ позволяют создавать высокоэффективные методы и технические средства для бесконтактного неразрушающего исследования и контроля физико-технических и физико-химических свойств полупроводниковых и диэлектрических материалов и структур [1-7]. Методы СВЧ диагностики отличаются разнообразием подходов к решению теоретических задач, методик измерений и конструкций измерительных преобразователей (ИП) СВЧ.

По типу используемых в первичных измерительных преобразователях физических явлений СВЧ датчики можно разделить на волноводные и резонаторные [1-6, 8, 9]. Резонаторные измерительные преобразователи (РИП) позволяют повысить чувствительность измерений по сравнению с волноводными ИП. Это возможно благодаря тому, что резонаторы накапливают энергию СВЧ колебаний и, соответственно, накапливают результат влияния возмущения электромагнитного поля (ЭМП) исследуемым образцом. Вводя понятие метрологического взаимодействия, резонаторные преобразователи можно классифицировать на РИП с объемным, апертурным, поверхностным и микронзондовым ближнеполевым взаимодействием.

По способу связи ЭМП в РИП и образце можно выделить резонаторные ИП объемного и апертурного взаимодействия. В первом случае образец вносится в полость СВЧ резонатора, внося возмущение в структуру его электромагнитного поля. В этом случае судить об электрофизических параметрах исследуемого образца можно по степени возмущения СВЧ поля, с усреднением по его объему. Во втором случае образец связан с полем резонатора через апертуру, вследствие чего появляется возможность локализации области, в которой производят измерения параметров. Кроме того, в этом случае взаимодействие является ближнеполевым, вследствие чего преодолевается барьер Аббе и разрешающая способность определяется геометрическими параметрами апертуры, а не рабочей длиной волны [1, 5, 7].

Для РИП апертурного типа величина коэффициента преобразования определяется главным образом характером и степенью взаимодействия полей резонатора с объектом через апертуру.

В последние годы с развитием методов сканирующей зондовой микроскопии и необходимостью изучения параметров различных объектов на микро- и наноразмерном уровне формируется направление диагностики, связанное со сканирующей микроволновой микроскопией (СММ) [1-3, 5-7, 10]. Основой СММ является ближнеполевое взаимодействие микроволновых электромагнитных полей, создаваемых микронзондовыми структурами, с локализованными (степень локализации определяется размерами и конструкцией микронзонда) поверхностными и приповерхностными слоями исследуемых материалов.

Функциональная схема сканирующего микроволнового микроскопа (СММ) представляет собой сочетание как минимум трех систем: систему позиционирования по осям X , Y и Z ; систему формирования сигналов измерительной информации и систему обработки данных измерений. Все системы должны функционировать совместно и синхронно как в режиме реального времени по выделенному ряду задач, так и с запоминанием и последующей обработкой предварительных результатов измерений.

Несмотря на важность и необходимость указанных систем и их элементов, тем не менее, можно выделить те из них, которые в максимальной степени влияют на параметры СММ.

В первую очередь, это микроволновые измерительные преобразователи (включая РИП), особенности конструкций и схемных решений которых, главным образом, определяют чувствительность и разрешающую способность проводимых измерений.

Немаловажной частью СММ также является система формирования и обработки информационных сигналов, которая используется для выделения и измерения изменений параметров ИП (или РИП).

Особенностью РИП, применяемых в СММ, является наличие микронзондовых структур, гео-

метрические размеры и форма которых во многом определяют функциональные и метрологические возможности СММ в целом.

Как правило, такая микрозондовая структура представляет собой малоразмерный волноводный или коаксиальный излучатель (микроантенну), который непосредственно входит в резонатор или подсоединяется к нему посредством элемента связи.

При создании и конструировании РИП с микрозондовыми структурами должен быть выполнен ряд требований.

При исследовании электрофизических характеристик материалов, сред и объектов для зондирования используется электрическая составляющая электромагнитного поля, создаваемого зондом в области исследуемого образца. Соответственно, зонд представляет собой структуру, формирующую соответствующую конфигурацию электрического поля. Для эффективного формирования требуемой конфигурации электрического поля необходимо учитывать характер взаимодействия зондовой структуры с составляющими электромагнитного поля резонатора. При этом конструкция и технология изготовления резонатора должны обеспечивать его максимальную собственную добротность при возбуждении на виде колебаний, подходящем для сопряжения с микрозондовой структурой.

Аналогичные требования должны выполняться при использовании зондов, формирующих требуемую конфигурацию магнитной составляющей электромагнитного поля при необходимости исследования магнитных характеристик.

Датчики, использующие в качестве первичного преобразователя резонансный измерительный преобразователь, позволяют связать изменение их резонансной частоты и добротности с изменениями, соответственно, неровности поверхности, диэлектрической проницаемости и тангенса диэлектрических потерь исследуемого объекта. Формирование информационных сигналов в такой системе производится на основе анализа измеренных значений изменений резонансной частоты и добротности РИП. При этом чем выше добротность РИП, тем точнее измеряются изменения резонансной частоты и выше чувствительность к вносимым потерям.

Максимальные значения собственной добротности обычно достигаются с помощью объемных СВЧ резонаторов ($\sim 10^3 \dots 10^4$ в зависимости от вида колебаний и используемого материала).

Необходимо учитывать, что приведенные значения величин добротностей не учитывают особенности реальных конструкций и технологии изготовления резонаторов, которые приводят к росту потерь и, соответственно, к снижению добротности по сравнению с идеальным случаем за счет неизбежного присутствия стыковых соединений, шероховатости (неидеальной гладкости) рабочих поверхностей, наличия микродефек-

тов в реальных рабочих поверхностях. Реальные практические значения добротностей могут отличаться от оценочных в два-три раза даже при высоком качестве изготовления резонаторов.

Поскольку в СММ наиболее эффективной конструкцией зонда, непосредственно взаимодействующей с исследуемым объектом, является коаксиальная, то возникает необходимость анализа и построения такой резонаторной части РИП, которая сопрягается по структуре поля с коаксиальным микрозондом.

РЕЗОНАТОРНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С МИКРОЗОНДАМИ

Функционально РИП для СММ можно представить в виде следующих элементов: резонатора, элементов связи резонатора с измерительной схемой, отрезка линии, имеющей с одной стороны элемент связи с резонатором, а с другой — зондовую структуру для формирования требуемого распределения поля, взаимодействующего с локальным участком исследуемого объекта. Соответственно характеристики РИП в целом будут определяться параметрами и конструкцией его элементов, а также методами сопряжения и согласования их друг с другом.

Рабочая добротность РИП, главным образом, будет зависеть от добротности резонатора.

В резонаторе, который используется в качестве измерительного преобразователя в СММ, должны быть предусмотрены элементы связи для включения в измерительную схему, а также устройство или элемент связи с микрозондовой структурой. За счет этого потери в резонаторе возрастают и добротность его будет уменьшаться:

$$Q_n = \frac{Q_0}{1 + \sum_i \beta_i}, \quad (1)$$

где Q_n — нагруженная добротность резонатора;

$\beta_i = \frac{\overline{P_{\text{вн}i}}}{P_p}$ — величина коэффициента связи;

$\overline{P_{\text{вн}i}}$ — средняя мощность потерь в соответствующем элементе связи или мощность, излучаемая из резонатора через соответствующий элемент связи при выключенном источнике сигнала; P_p — средняя мощность потерь собственно в резонаторе.

Поскольку величина добротности РИП в СММ определяет чувствительность измерений электрофизических параметров, необходимо обеспечивать ее максимальное значение, т. е. коэффициенты связи должны быть минимальными. С другой стороны, для работы измерительной схемы и эффективного взаимодействия поля микрозондовой структуры с исследуемым объектом величина связи должна быть достаточной для надежного функционирования всей измерительной системы СММ. Кроме того, конструкция элементов связи должна быть технологичной

и достаточно просто сопрягаться с устройствами СВЧ части измерительной схемы.

Таким образом, требования к элементам связи разделяются на две группы.

Первый набор требований определяется условиями работы зондирующей структуры, второй – условиями работы системы формирования измерительного СВЧ сигнала.

Зондовая структура, как правило, представляет собой отрезок коаксиальной линии, с одной стороны которой расположен выступающий заостренный внутренний проводник линии, используемый как зонд, а с другой – элемент связи с резонатором в виде штыря или петли. В ряде случаев в зонд за счет плавного перехода трансформируется собственная структура резонаторного преобразователя (например, в коаксиальных резонаторных преобразователях [1-3, 5-7]). Это устройство должно обеспечивать эффективное взаимодействие поля, излучаемого из резонатора, с исследуемым объектом и прием отраженных и (или) переизлученных объектом волн. Микрозондовая структура при этом должна быть взаимным устройством с достаточно большим (~ 1) значением коэффициента связи с резонатором. Величина коэффициента связи обычно механически регулируется степенью погружения петлевого или штыревого элемента связи в резонаторный объем. Соответственно, при таких значениях коэффициента связи нагруженная добротность РИП будет уменьшаться почти в два раза по сравнению с собственным значением (1) только за счет микрозондового устройства.

Основным условием работы системы формирования измерительного СВЧ сигнала является получение на СВЧ детекторе значения сигнала, достаточного для последующей обработки.

Влияние РИП на величину сигнала на детекторе будет определяться коэффициентом передачи.

С уменьшением коэффициентов связи при проходном включении растет переходное затухание РИП, а при отражательном включении оптимальным является режим работы с $\beta = 1$, когда амплитуда сигнала, отраженного от резонатора, будет минимальной.

Уменьшение сигнала при увеличении переходного затухания за счет уменьшения коэффициентов связи при проходном включении можно скомпенсировать дополнительным его усилением после детектора, однако это будет вести к уменьшению отношения сигнал/шум или необходимости применения дополнительных схем модуляционной обработки сигналов.

Таким образом, выбор приемлемых для работы системы формирования измерительных СВЧ сигналов значений коэффициентов связи приводит к дополнительному уменьшению значения нагруженной добротности РИП. Общее уменьшение добротности РИП по сравнению с собственным значением добротности резонатора будет примерно в три раза (1).

Следующая группа требований к конструкции коэффициентов связи определяется предполагаемыми к разработке техническими характеристиками измерительной системы и РИП. При использовании широкодиапазонной по частоте измерительной системы и РИП, работающих на различных резонансных частотах, расположенных в широком диапазоне частот, преимущественным является использование коаксиальных элементов связи с измерительной системой, которые обладают лучшими диапазонными свойствами. При работе с однорезонансными РИП лучше использовать волноводные элементы связи, которые обладают меньшими потерями, проще конструктивно и более технологичны.

Таким образом, анализ и исследования необходимо проводить для составных конструкций РИП, включающих резонаторную часть, зондовую структуру, элементы связи с измерительной схемой.

Задачами анализа являются:

- определение условий обеспечения максимальной добротности РИП;
- оценка влияния конструктивных параметров элементов связи на передаточную функцию и добротность РИП;
- оценка влияния параметров объекта исследования на характеристики составных РИП;
- изменения характеристик составных РИП в зависимости от конструкции и геометрии микрозондовой структуры.

Результаты анализа позволят определиться с набором возможных вариантов построения РИП и их составных частей.

С учетом использования коаксиальной микрозондовой структуры для анализа были выбраны следующие типы РИП:

- на основе резонаторов на типах колебаний E_{01n} ;
- на основе конического четвертьволнового резонатора;
- на основе призматических прямоугольных резонаторов на видах колебаний H_{10n} ;
- на основе цилиндрического резонатора на виде колебаний H_{011} ;
- на основе нерегулярных структур.

РИП, в котором наиболее просто осуществляется сопряжение резонаторной части с коаксиальной структурой микрозонда, представляет собой конструкцию на основе цилиндрического резонатора, возбуждаемого на осесимметричных типах колебаний E_{01n} [11].

Типовая конструкция и внешний вид такого РИП приведены на рис. 1.

Колебания в резонаторе возбуждались с помощью проводящего штыря, проходящего через прямоугольный волновод сечением $7,2 \times 3,4$ мм и через отверстие в общей стенке волновода и цилиндрического резонатора. Перемещением штыря можно было менять величину связи с резонатором. В резонаторе возбуждались колебания типа E_{01n} . С помощью сменных корпусов

можно было обеспечивать возбуждение в резонаторе колебаний типа E_{011} , E_{012} и E_{013} .

Проведенные исследования показывают, что характеристики РИП данного вида сильно зависят от положения настроечного элемента, искажающего передаточную функцию, а при изменении рабочей частоты в результате взаимодействия с исследуемым объектом могут происходить принципиальные изменения ее вида. К тому же реализация высокооборотных колебаний вида E_{01n} на практике довольно затруднительна ввиду наличия продольных поверхностных токов, пересекающих стыковые соединения.

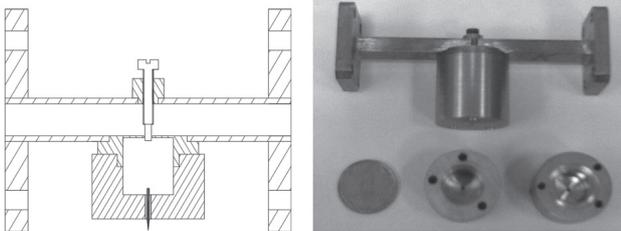


Рис. 1. Типовая конструкция и внешний вид РИП на основе цилиндрического резонатора, возбуждаемого на типе колебаний E_{01n}

При экспериментальных исследованиях образцов были получены следующие результаты:

- при смене корпусов резонаторов и возбуждении их на типах колебаний E_{011} , E_{012} и E_{013} изменение резонансной частоты не превышает нескольких десятков МГц при среднем значении ~ 36 ГГц;
- добротность резонаторов растет с ростом количества полувольт по высоте резонатора (E_{01n} , $n = 1, 2, 3$) от 300 до 1000;
- коэффициенты связи резонатора по входу и выходу составляют величины порядка 0,6...0,8;
- добротность РИП сильно зависит от степени включения зондовой структуры.

Нагруженная добротность подобного РИП 3-сантиметрового диапазона даже без зондовой структуры оказалась невысокой ($Q_n \sim 134$) по сравнению с теоретическими оценками даже с учетом влияния элементов связи ($Q_{нт} \sim Q_{0т}/3 \approx 3,47 \cdot 10^3$). Факторами, повлиявшими на уменьшение значения добротности, можно считать более высокое значение удельного сопротивления материала резонатора (латунь) и недостаточно качественную полировку рабочих поверхностей, а также наличие потерь в месте контакта корпуса резонатора с крышкой-диафрагмой.

Для отработки возможности создания универсального РИП с зондовой структурой, возбуждаемого на большом количестве резонансных частот, лежащих в широком частотном диапазоне, исследовался РИП на основе конического четвертьволнового резонатора [3, 6], конструкция и внешний вид которого приведены на рис. 2.

Особенностью конструкции РИП в данном случае является использование коаксиального резонатора, возбуждаемого волной ТЕМ

типа. Переход к зонду осуществляется плавной трансформацией коаксиальной структуры резонатора в коаксиальную зондовую структуру. Достоинством такого РИП является возможность получения резонансов на различных частотах в широком диапазоне рабочих частот (при электрических длинах коаксиальной структуры, кратных нечетному числу четвертей длин волн). Например, при длине резонатора ~ 83 мм резонансы будут наблюдаться на частотах: $\sim 0,904$ ($L = \lambda/4$); $\sim 2,71$ ($L = 3 \cdot \lambda/4$); $\sim 4,52$ ($L = 5 \cdot \lambda/4$); $\sim 6,325$ ($L = 7 \cdot \lambda/4$); $\sim 8,132$ ($L = 9 \cdot \lambda/4$); $\sim 9,94$ ($L = 11 \cdot \lambda/4$); $\sim 11,75$ ($L = 13 \cdot \lambda/4$); $\sim 13,55$ ($L = 15 \cdot \lambda/4$); $\sim 15,36$ ($L = 17 \cdot \lambda/4$) ГГц и т. д.

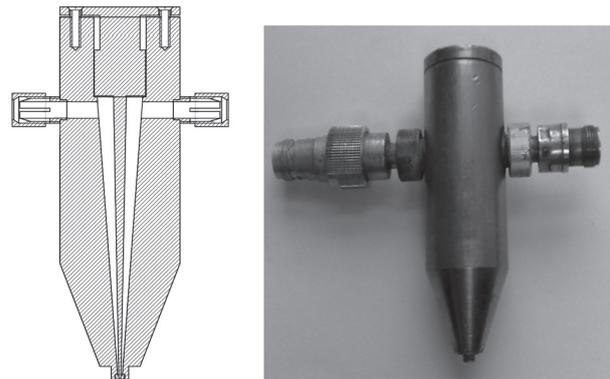


Рис. 2. РИП на основе конического четвертьволнового резонатора

К недостаткам такого резонатора можно отнести невысокие значения добротности по сравнению с объемными цилиндрическими и даже призматическими резонаторами, а также необходимость учета частотной дисперсии характеристик элементов связи при большом разбросе значений рабочих резонансных частот.

АЧХ экспериментального макета РИП на основе конического четвертьволнового резонатора приведена на рис. 3.

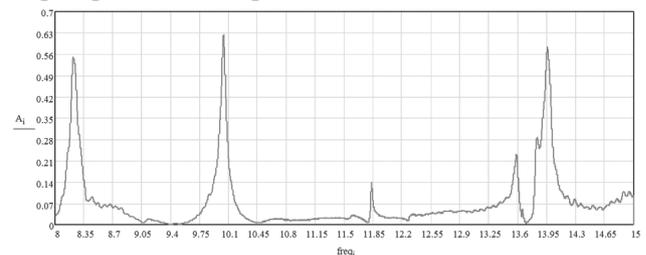


Рис. 3. АЧХ РИП на основе конического четвертьволнового резонатора в диапазоне частот 8...15 ГГц

В табл. 1 приведены теоретические оценки значений добротности для медных призматических прямоугольных резонаторов, возбуждаемых на типах колебаний H_{10n} .

Данные таблицы показывают, что максимальные значения добротности имеют кубические резонаторы, но резонаторы на основе отрезков стандартных прямоугольных волноводов также позволяют обеспечить их высокие значения. Достоинством таких резонаторов является

простота изготовления и сопряжения с волноводными линиями передачи. Использование прямоугольных волноводов и работа на низшем основном типе волны позволяют, к тому же, обеспечить одномодовый режим в рабочем диапазоне частот.

Таблица 1

Параметры объемных призматических резонаторов

F_0 , ГГц	Тип колебаний	Размеры, мм	Q_0
10	H_{101}	$a = b = L = 21$	$\sim 1,61 \cdot 10^4$
	H_{101}	$a = 23, b = 10, L = 20$	$\sim 5,41 \cdot 10^3$
	H_{103}	$a = 23, b = 10, L = 60$	$\sim 6,027 \cdot 10^3$
36	H_{101}	$a = b = L = 16,4$	$\sim 8,485 \cdot 10^3$
	H_{101}	$a = 7,2, b = 3,4, L = 5$	$\sim 3,605 \cdot 10^3$
	H_{105}	$a = 7,2, b = 3,4, L = 25$	$\sim 4,138 \cdot 10^3$

Типовое распределение электрического поля и внешний вид РИП на основе прямоугольных волноводов показаны на рис. 4 [12, 13].

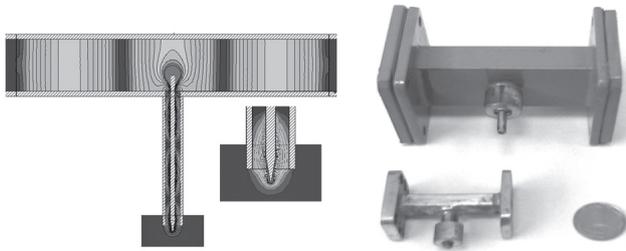


Рис. 4. Распределение полей и внешний вид РИП на основе отрезков прямоугольных волноводов

На экспериментальных образцах РИП на основе регулярных волноводных структур (рис. 4) были получены добротности $\sim 1,7 \cdot 10^3$ на частоте 9,89 ГГц и типе колебаний H_{103} , $\sim 2,7 \cdot 10^3$ на частоте 35,88 ГГц на типе колебаний H_{107} . Полученные значения добротности естественно ниже, чем даваемые теоретическими оценками и модельными экспериментами, но они значительно выше получаемых для РИП на E_{01n} видах колебаний и РИП на основе четвертьволнового коаксиального резонатора.

Результаты анализа влияния электрофизических параметров исследуемого объекта на f_p и Q РИП показаны на рис. 5.

Из графиков (рис. 5) следует, что РИП на основе резонатора на отрезке прямоугольного волновода при оптимальном выполнении его элементов позволяет эффективно фиксировать значения электрофизических параметров исследуемых объектов в широком диапазоне их изменения.

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} . Оценочное значение добротности для таких резонаторов достигает значений 10^4 и более. Даже при подключении к такому резонатору элементов связи

и зондовой структуры величина добротности такого РИП должна быть достаточно большой.

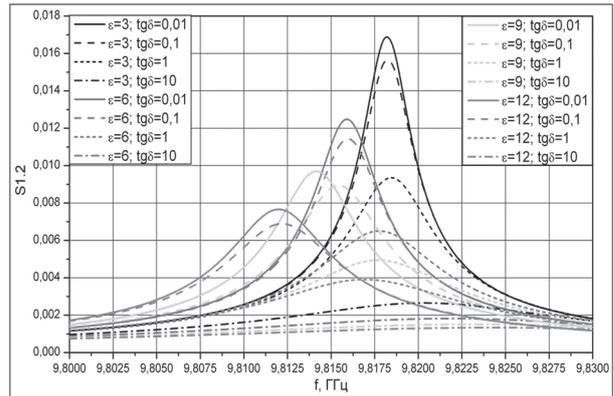


Рис. 5. Влияние электрофизических параметров объекта на Q и f_p РИП

В этой связи представляется целесообразным проведение анализа элементов и структуры РИП на основе цилиндрического резонатора на типе колебаний H_{011} [14]. Конструкция и внешний вид такого РИП представлены на рис. 6.

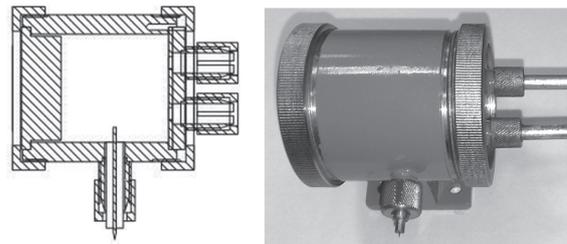


Рис. 6. РИП на основе цилиндрического резонатора, возбуждаемого на типе колебаний H_{011}

Результаты расчетов, проведенных для цилиндрических медных резонаторов, возбужденных на виде колебаний H_{011} , приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения f_p и Q (тип колебаний H_{011})

Заполнение	Размеры, мм	f_p , ГГц	Q_0
Вакуум (воздух)	$d = h = 39,55$	10,10	$\sim 3 \cdot 10^4$
Фторопласт	$d = h = 26,5$	10,66	$\sim 4 \cdot 10^3$

Расчет для резонатора, заполненного диэлектриком, производился с целью выяснения возможности уменьшения габаритов РИП при сохранении высокой добротности. Полученные результаты показывают, что даже в случае применения в качестве заполнителя фторопласта с $tg \delta \sim 10^{-3}$ добротность существенно уменьшается за счет потерь в диэлектрике. Добротность такого резонатора становится сравнимой с добротностью резонаторов на основе отрезков волноводов, которые в конструктивном и технологическом плане значительно проще. При использовании диэлектрика с меньшими потерями добротность удастся увеличить, но такие диэлектрики менее технологичны.

Рабочая добротность резонатора за счет элементов связи снижается (1) 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.

Распределение поля в апертурной части зондовой структуры также существенно зависит от геометрии выступающего центрального проводника. Заострение приводит к большей степени локализации поля в апертуре зондовой структуры РИП. Изменение величины потерь в образце ведет к заметному изменению добротности РИП, а наличие зазора – к локализации поля и ослаблению взаимодействия с образцом.

На рис. 7 приведены распределения полей в апертурной части зондовой структуры РИП при наличии образца ($\text{tg } \delta = 0,01$; $\epsilon = 12$) и наличии и отсутствии зазора между коническим зондом и образцом.

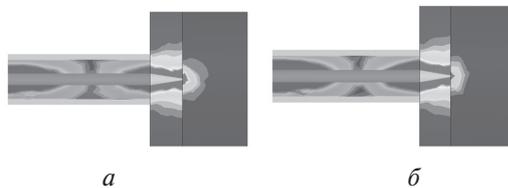


Рис. 7. Распределение поля в апертурной части зондовой структуры РИП при наличии образца ($\text{tg } \delta = 0,01$; $\epsilon = 12$): *a* – без зазора, *б* – зазор 1 мкм

При экспериментальном исследовании РИП, изготовленного из латуни, конструкция и внешний вид которого показаны на рис. 6, на частоте 9,9955 ГГц была получена добротность $\sim 9,52 \cdot 10^3$.

Таким образом, исследования показывают, что РИП на основе цилиндрического резонатора, возбуждаемого на типе колебаний H_{011} , позволяет обеспечить высокую исходную добротность РИП в целом и, соответственно, повысить чувствительность измерений.

В коаксиальной линии при определенных соотношениях диаметров внутреннего и внешнего проводников возможно возникновение высших типов волн, в том числе и волны типа H_{01} . Обычно высшие типы волн в линиях считаются нежелательным фактором, и от них, как правило, стараются избавляться. Однако волну H_{01} -типа можно использовать для создания высокодобротного коаксиального резонатора, а наличие у такого резонатора центрального проводника позволит достаточно просто осуществить его сопряжение с коаксиальной микрозондовой структурой [15]. К недостаткам такой конструкции можно отнести необходимость принятия мер по снятию вырождения типов 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 то же время в конструкции коаксиального конического четвертьволнового резонатора достаточно просто реализуются колебания на

волне ТЕМ типа и плавный переход от резонатора к зонду (см. рис. 8,а). 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 .

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. 8, б). Добротность резонатора получается при этом в несколько раз большей, чем для колебаний волн ТЕМ типа. Вариацией угла раскрытия конуса, его длины и отношения соответствующих диаметров проводников можно обеспечить необходимое значение резонансной частоты [16-19].

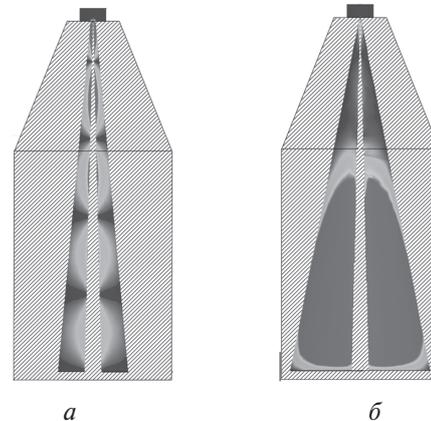


Рис. 8. Структуры полей при резонансах в конических коаксиальных резонаторах: *a* – четвертьволновый резонанс (ТЕМ, $L = 9\lambda/4$, $f_p = 8,32$ ГГц, $Q = 1,55 \cdot 10^3$); *б* – колебания H_{111} ($f_p = 7,85$ ГГц, $Q = 1,15 \cdot 10^4$)

Сравнение и анализ структуры электромагнитных полей в поперечном сечении зоны возбуждения конического РИП и одного из возможных высших типов волн в коаксиальной линии показывают, что высокодобротный резонансный отклик в коническом коаксиальном РИП можно идентифицировать с низшим типом колебаний H_{111} в цилиндрическом резонаторе.

Изменением размеров и геометрии можно добиться возбуждения и других типов высокодобротных колебаний. В этом случае могут быть получены значения добротностей и резонансных частот выше, чем для типа колебаний квази- H_{111} .

Обеспечение работы рассматриваемых резонансных нерегулярных структур на избранном типе колебаний довольно сложная электродинамическая и техническая задача, поскольку такая структура обладает многомодовостью и может возбуждаться на различных типах колебаний в рабочем диапазоне частот. При этом могут возбуждаться как резонансы n -четвертьволнового коаксиального резонатора, так и резонансы на высших типах колебаний.

Количество возможных резонансов в рассматриваемой структуре может быть сокращено за счет выбора конструкции и места подключения элементов связи, предназначенных для возбуждения выбранного резонанса.

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. 9. Видно, что в рабочем диапазоне осталось только три высокочастотных резонанса.

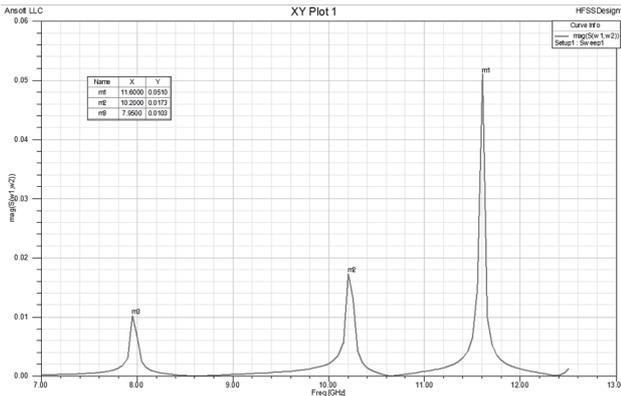


Рис. 9. АЧХ РИП на основе нерегулярной коаксиальной структуры

Экспериментальная проверка результатов численного моделирования проводилась с помощью макета РИП, внешний вид которого приведен на рис. 10.

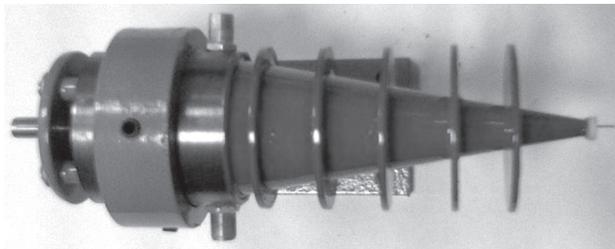


Рис. 10. Внешний вид экспериментального макета РИП на основе нерегулярной коаксиальной структуры

Для РИП с центральным коаксиальным проводником был зафиксирован резонанс на частоте 9,98 ГГц с добротностью $\sim 1,3 \cdot 10^3$, для РИП без коаксиального проводника был получен резонанс на частоте 9,5 ГГц с добротностью $\sim 4 \cdot 10^3$. Поскольку изменение параметров внешней среды в первом случае приводит к изменению частоты и добротности, а во втором – нет, можно утверждать, что в первом случае мы имеем резонанс волны ТЕМ четвертьволнового коаксиального резонатора, а во втором – резонанс волны высшего типа. Связь высокочастотного типа резонанса с зондовой частью обеспечивается путем размещения аксиального проводника в запрещенном участке конуса.

Таким образом, нерегулярные коаксиальные структуры, возбуждаемые на высших типах

колебаний, могут быть с успехом применены для создания высокочастотных 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.

Еще одним вариантом реализации РИП для локальной диагностики является использование планарных (полосковых и микрополосковых) структур [20, 21]. В этом случае резонансные свойства обеспечиваются либо полуволновыми, либо кольцевыми резонансными элементами, а локализация поля – заострением одного из концов полуволнового полоскового резонатора либо подсоединением отдельных отрезков полосковых линий с зондовым заострением (рис. 11).



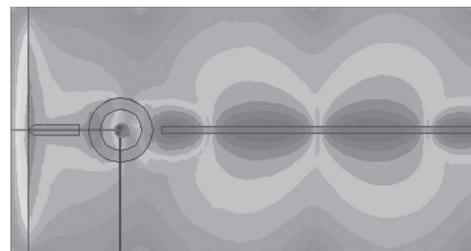
а



б



в



г

Рис. 11. Топологии и распределение электрических полей в РИП на основе полосковых структур: а – полуволновый отрезок линии с заострением, б – полуволновый отрезок линии в виде нерегулярной структуры, в – полуволновый отрезок линии с заострением и наконечником, г – кольцевой резонатор с подсоединенным отрезком линии с заострением

Модельный эксперимент показал, что РИП на полуволновых отрезках линий сохраняют свои резонансные свойства, несмотря на введение в их топологию заостренных элементов. При этом на заострении наблюдается повышенная напряженность поля, особенно в случае нерегулярной структуры (рис. 11, в). В то же время добротность таких РИП невысока (всего несколько десятков).

Для РИП на основе кольцевого резонатора (рис. 11, з) выявлена возможность получения более высоких значений добротности (рис. 12). Из приведенных графиков амплитудно-частотных характеристик коэффициентов отражения при различных значениях величин $\text{tg}\delta$ образцов с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon \sim 7$, помещаемых в области острия зонда, видно, что в диапазоне частот 7...11 ГГц наблюдается три резонансных отклика рассматриваемого РИП. При этом для всех резонансных откликов наблюдается сильная зависимость их формы от $\text{tg}\delta$ образцов вблизи острия, что свидетельствует о возможности использования преобразователей такого типа для диагностики различных материалов и объектов. Наиболее высокая чувствительность к изменению величины потерь в образце проявляется на частотах 7,64 ГГц и 10,11 ГГц.

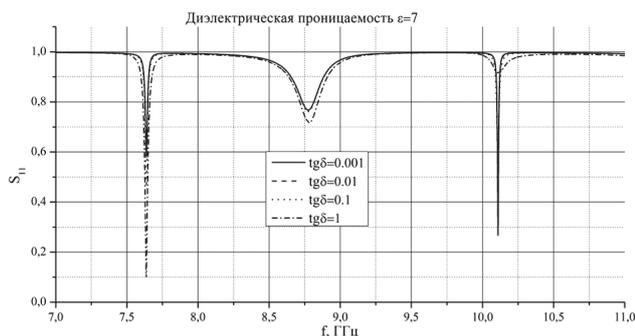


Рис. 12. АЧХ коэффициента отражения РИП на основе кольцевого резонатора стоячей волны в полосе частот 7...11 ГГц

Варьирование величины диэлектрической проницаемости образца в пределах 1...12 показывает рост чувствительности рассматриваемого РИП к величине потерь в образце с увеличением ε .

При успешной реализации РИП на основе полосковых и микрополосковых структур, создаваемых с помощью планарных технологий, которые достаточно хорошо отработаны при изготовлении микро- и наноразмерных элементов современной микроэлектроники, открываются возможности построения интегральных устройств формирования информационных сигналов СММ, включающих в себя как первичный преобразователь (сенсор), так и систему формирования и предварительной обработки сигналов, а также разработки такой конструкции микронзонда, которую можно использовать одновременно и для атомно-силовой и туннельной микроскопии.

ВЫВОДЫ

На основании анализа результатов проведенных численно-аналитических и экспериментальных исследований образцов РИП можно сделать следующие выводы:

- наиболее практичными конструкциями РИП с точки зрения их технологичности и достаточно высокой добротности (до $(1...3) \cdot 10^3$) представляются конструкции измерительных преобразователей на основе призматических резонаторов (отрезков прямоугольных волноводов), возбуждаемых на типах колебаний H_{10n} ;

- при необходимости создания РИП с исходными добротностями порядка 10^4 представляется целесообразным использование в качестве основы РИП цилиндрических резонаторов, возбуждаемых на типах колебаний H_{01n} , несмотря на более сложную их конструкцию по сравнению с РИП на призматических резонаторах;

- представляется перспективным продолжение исследований возможностей реализации РИП на основе нерегулярных коаксиальных структур, возбуждаемых на высших типах колебаний, которые, по предварительным оценкам, также могут обеспечить величины исходных добротностей РИП до 10^4 ;

- изменение топологии полуволновых резонансных отрезков микрополосковой линии не приводит к существенному изменению их резонансных свойств;

- РИП на основе кольцевых полосковых резонаторов стоячих волн позволяют повысить добротность более чем на порядок по сравнению с полуволновыми резонаторами;

- АЧХ РИП на основе полосковых резонансных структур обладают чувствительностью к изменениям параметров объектов, располагаемых вблизи зондов, что может быть использовано для диагностики.

Литература

- [1] Wei T. Scanning tip microwave near-field microscope / T. Wei, X.D. Xiang, W.G. Wallace-Freedman, P.G. Schultz // Applied Physics Letters. – 1996. – Vol. 68, N 24, pp. 3506-3508.
- [2] Gao C. High spatial resolution quantitative microwave impedance microscopy by scanning tip microwave near-field microscope / C. Gao, T. Wei, F. Duewer, Y. Lu, X.D. Xiang // Applied Physics Letters. – 1997. – Vol. 71, N 13, pp. 1872-1874.
- [3] Інтелектуальні вимірювальні системи на основі мікроелектронних датчиків нового покоління / Я. І. Лепіх, Ю. О. Гордієнко, С. В. Дзядевич та ін.; за ред. Я. І. Лепіха. – Одеса: Астропринт, 2011. – 352 с.
- [4] Лисовский, В.В. Теория и практика высокочастотного контроля влажности сельскохозяйственных материалов / В.В. Лисовский. – Минск: УОБГАТУ, 2005. – 292 с.
- [5] Chen, L.F. Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization / L.F. Chen, C.K. Ong, C.P. Neo, V.V. Varadan, V.k. Varadan – John Willy & Sons, Ltd, 2004. – 537 p.

- [6] Створення мікроелектронних датчиків нового покоління для інтелектуальних систем: монографія / Я. І. Лепіх, Ю. О. Гордієнко, С. В. Дзядевич та ін.; за ред. Я. І. Лепіха. — Одеса : Астропринт, 2010. — 296 с.
- [7] Scanning Probe Microscopy: Electronic and Electromechanical Phenomena at the Nanoscale / Edited by S. Kalinin, A. Gruverman. — Springer Science Business Media, LLC, 2007. — 980 p.
- [8] Nyfors E. G. Cylindrical microwave resonator sensors for measuring materials under flow / E.G. Nyfors — Dissertation for degree of Doctor of Science in Technology. Helsinki University of Technology, 2000. — 181 p.
- [9] Федюнин П.А. Микроволновая термовлагодетрия / П.А. Федюнин, Д.А. Дмитриев, А.А. Воробьев, В.Н. Чернышов; под ред. П.А. Федюнина — М.: «Издательство Машиностроение-1», 2004. — 208 с.
- [10] Слипченко Н.И. Физические основы ближнеполевой СВЧ диагностики материалов и сред: дис. ... доктора физ.-мат. наук: 01.04.01 / Н.И. Слипченко; [Сумской государственный университет] — Сумы: 2008. — 351 с.
- [11] Бондаренко И.Н. Анализ характеристик резонаторного измерительного преобразователя для сканирующего микроволнового микроскопа / И.Н. Бондаренко, Ю.С. Васильев, А.М. Проказа // Материалы 21 Международной Крымской конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». — Севастополь, Украина, 2011. — С. 665-666.
- [12] Бондаренко И.Н. Резонаторные измерительные преобразователи на основе регулярных волноводов / И.Н. Бондаренко, Ю.С. Васильев, А.М. Проказа // Сб. научн. трудов 4 Международной научн. конф. «Функциональная база наноэлектроники». — Казивели, 2011, 30.09. — 3.10.2011. — С. 241-244.
- [13] Бондаренко И.Н. Измерительные преобразователи на основе резонансных волноводных регулярных структур / И.Н. Бондаренко, Ю.С. Васильев, А.М. Проказа, С.И. Троицкий // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. — 2011. — Вып. 167. — С. 129-134.
- [14] Бондаренко И.Н. Измерительный преобразователь на основе цилиндрического резонатора на виде колебаний H_{011} / И.Н. Бондаренко, Ю.С. Васильев, А.А. Камышан, С.И. Троицкий // Радиотехника и информатика, Харьков, 2011. — № 2. — С. 3-5.
- [15] Бондаренко И.Н. Коаксиальный резонаторный измерительный преобразователь на виде колебаний H_{01n} / И.Н. Бондаренко, Е.Е. Рострипа // Сб. научн. трудов 3 Международной научн. конф. «Функциональная компонентная база микро-, опто- и наноэлектроники». — Харьков-Казивели, 2010, 28.09.-2.10.2010. — С. 313-315.
- [16] Бондаренко И.Н. Высокодобротный резонаторный измерительный преобразователь на основе нерегулярной коаксиальной структуры / И.Н. Бондаренко, А.В. Галич // Сб. научн. трудов 4 Международной научн. конф. «Функциональная база наноэлектроники». — Казивели, 2011, 30.09.-3.10.2011. — С. 245-247.
- [17] Бондаренко И.Н. Высокодобротный коаксиальный нерегулярный резонаторный измерительный преобразователь / И.Н. Бондаренко, А.В. Галич // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. — 2012. — Вып. 168. — С. 108-112.
- [18] Бондаренко И.Н. Высокодобротные типы колебаний в нерегулярных гибридных структурах / И.Н. Бондаренко, А.В. Галич, С.И. Троицкий // Радиотехника и электроника, 2013. — Т. 4 (18), № 1. — С. 91-94.
- [19] Bondarenko I.N. High-Q modes in irregular hybrid structures / I.N. Bondarenko, A.V. Galich, S.I. Troitski // Telecommunications and Radio Engineering, vol. 72, 2013, N 19. — Pp. 1747-1753.
- [20] Бондаренко И.Н. Микрополосковые резонаторные измерительные преобразователи для сканирующей микроволновой микроскопии / И.Н. Бондаренко, А.В. Галич // Сб. научн. трудов 6 Международной научн. конф. «Функциональная база наноэлектроники». — Харьков-Крым, 2013, 30.09.-4.10.2013. — С. 86-89.
- [21] Bondarenko I.N. Microstrip resonant sensors for scanning microwave microscopy / I.N. Bondarenko, A.V. Galich // Proc. of the 12-th International Conference "Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science" (TCSET 2014), Ukraine. Lviv-Slavske, Feb. 25-March 1, 2014. — Pp. 145-147.



Поступила в редколлегию 28.05.2014

Бондаренко Игорь Николаевич, доктор физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: криогенная радиофизика, техника СВЧ, бесконтактные методы диагностики.

УДК 621.385.6

Резонаторні вимірювальні перетворювачі для локальної діагностики матеріалів і структур / І.М. Бондаренко // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. — 2014. — Том 13. — № 2. — С. 150–158.

Проведено огляд і аналіз особливостей побудови, конструкцій і характеристик різних типів резонаторних вимірювальних перетворювачів, які призначені для локальної мікрохвильової діагностики матеріалів і малорозмірних планарних мікроелектронних структур. На основі модельних і реальних експериментальних досліджень оцінено можливості та перспективи практичного використання мікрохвильових резонаторних вимірювальних перетворювачів з зондовими структурами.

Ключові слова: мікрохвильовий, резонаторний, вимірювальний, перетворювач, діагностика, локальна, зонд.

Табл. 2. Іл. 12. Бібліогр.: 21 найм.

UDC 621.385.6

Cavity measuring converters for local diagnostics of materials and structures / I.N. Bondarenko // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. — 2014. — Vol. 13. — № 2. — P. 150–158.

A review and analysis of peculiarities of building, structures and characteristics of different types of cavity measuring converters intended for local microwave diagnostics of materials and small planar microelectronic structures are carried out. On the basis of model and real experimental studies possibilities and prospects of practical use of microwave cavity measuring converters with probe structures are assessed.

Keywords: microwave, resonator, measuring, converter, diagnostics, local, probe.

Tab. 2. Fig. 12. Ref.: 21 items.