

СВОЙСТВА ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВОГО КОАКСИАЛЬНОГО СВЧ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ

Введение

В СВЧ диагностике материалов резонаторные измерительные преобразователи (РИП) имеют широкое применение [1 – 3]. Благодаря возможности внешнего расположения объекта исследования на открытом торце наибольшее распространение получили коаксиальные четвертьволновые резонаторные преобразователи (КРИП). На их основе создан ряд приборов для безэлектродной СВЧ диагностики полупроводниковых материалов по критериям соответствия технологическим требованиям к основным электрофизическим параметрам [5, 6] и новейших систем ближнеполевой СВЧ микроскопии [7]. Однако КРИП получили меньшее распространение в СВЧ влагометрии, СВЧ дефектоскопии и диэлькометрии [5]. Одной из причин последнего обстоятельства является отсутствие в период становления этих областей диагностики материалов строгой и удобной теории таких РИП. В 1980 – 2000 гг. появилось много работ по численно-аналитическим моделям КРИП [8, 14]. Вместе с тем, практическое использование этих разработок ограничено сложностью и специализированностью математической подготовки численных исследований. С развитием прямых конечно-разностных и конечно-элементных методов решения электродинамических задач возможности численных исследований существенно расширились.

В связи с этим стало более доступным проанализировать следующие перспективные для СВЧ диагностики материалов свойства КРИП:

- а) возможность построения РИП для исследования диэлектриков, полупроводников, сверхпроводников и биообъектов в широком частотном диапазоне;
- б) реализуемость изменения локальности взаимодействия с объектом от микроразмеров до аналога антенных методов;
- в) широкий диапазон изменения степени включения объекта в СВЧ поле РИП, обеспечивающий возможности диагностирования различных материалов.

Цель работы – количественные исследования этих свойств и оценка направлений оптимизации КРИП по метрологическим критериям в различных областях СВЧ диагностики материалов.

Физические предпосылки моделирования КРИП

Схематично наиболее распространенные структуры КРИП можно представить двумя разновидностями (рис. 1, а, б).

Первая разновидность (рис. 1, а) используется при локальном исследовании и диагностике тонкослойных объектов или приповерхностных областей объемных сред и объектов. При других соотношениях размеров такая структура может быть положена в основу КРИП антенного типа для интегрального контроля объемных свойств сред, в том числе и на потоке (например, СВЧ влагометрия сыпучих материалов и жидкостей).

Вторая разновидность (рис. 1, б) характерна для контроля сыпучих материалов с забором пробы или погружных измерений.

Для оценки общих свойств структура рис. 1, б менее сложна. Поэтому дальнейшее рассмотрение будет базироваться на ней.

В теории и моделировании РИП различных типов стало принятым исходить из оценки фундаментальных сигналов измерительной информации (ФСИИ), представляемых относительными изменениями резонансной частоты $\Delta f/f$ и добротности $\Delta Q/Q$ [1, 3, 5]. Через эти параметры могут быть выражены другие разновидности сигналов измерительной информации, так как это определено физическими принципами функционирования РИП в СВЧ диагностике материалов.

В образовании обеих ФСИИ важное значение имеет исходная добротность РИП Q_0 . Из общих физических соображений, легко подкрепляемых несложными математическими выкладками [10 – 13], величина Q_0 должна быть как можно более высокой. Поэтому накопительный по СВЧ энергии колебаний объем РИП должен быть как можно большим, а омические потери СВЧ мощности на поверхности стенок как можно меньшими.

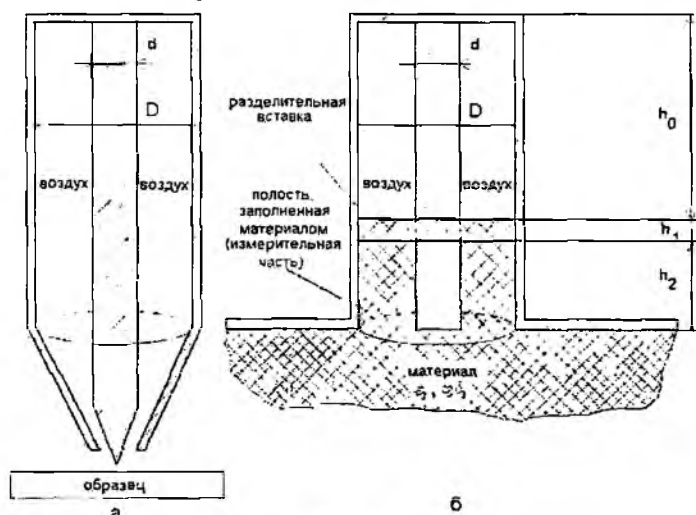


Рис. 1

Для количественной ориентации на рис. 2 приведена зависимость добротности Q_0 КРИП от числа четвертой рабочей длины волны n , укладываемых по длине резонатора. Данный график содержит несколько кривых: 1 – зависимость, учитывающая только СВЧ потери в стенках резонатора (идеализированного); 2 – зависимость добротности четвертьволнового резонатора с учетом СВЧ потерь в стенках резонатора и излучения из открытого торца с бесконечным фланцем; 3 – зависимость с учетом СВЧ потерь в стенках резонатора и излучения из открытого торца с фланцем шириной, равной толщине стенок резонатора. [13, 14]. Зависимости построены для значений высот резонаторов от 377 до 1241 мм (при частоте резонатора 1,4 ГГц это соответствует изменению числа четвертой длины волны от 7 до 23).

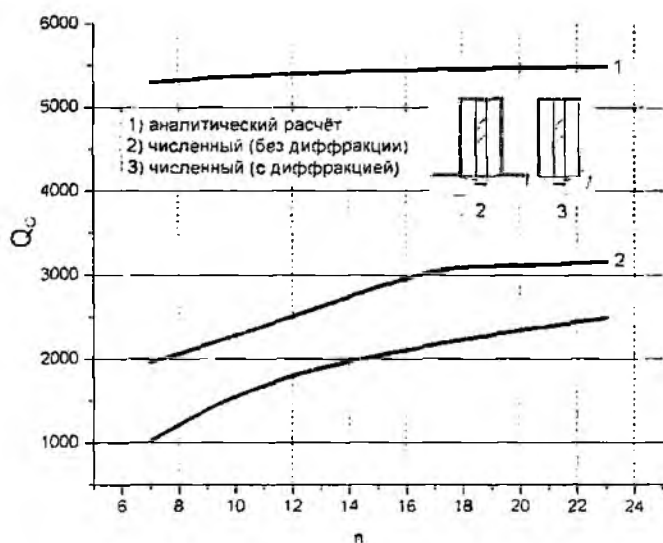


Рис. 2

Расчет ФСИИ резонаторного датчика выполнен методом конечных элементов системы уравнений Максвелла в осесимметричной электродинамической системе «резонатор – зазор – образец». Рассчитанная комплексная собственная частота такой системы далее использовалась для определения ее добротности. На «открытой» границе для моделирования бесконеч-

и о пространства использовано приближение слоистой импедансной среды с параметрами, соответствующими параметрам зазора и образца.

На рис. 3 приведены линии равного уровня распределения модуля электрического поля вблизи центрального проводника РИП при различных значениях диэлектрической проницаемости исследуемого материала и фиксированных потерях в нем.

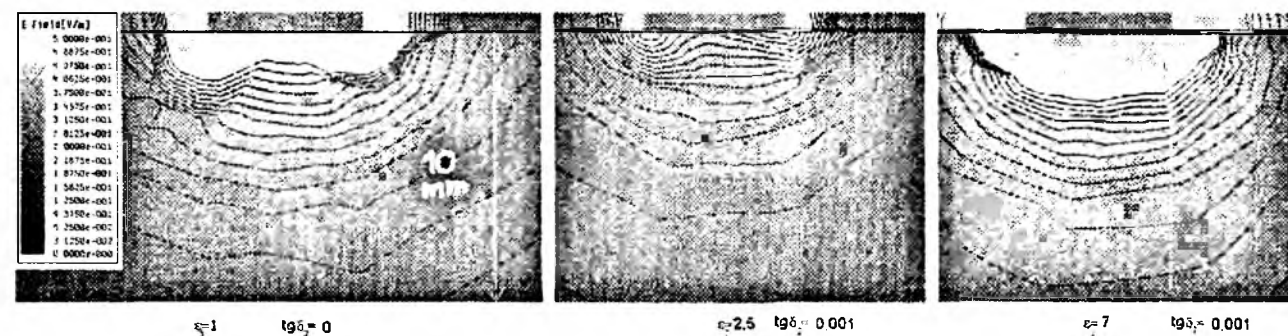


Рис. 3

Эти зависимости дают количественное представление о вкладе потерь на излучение в свободное пространство и возможностях повышения Q_0 .

Вместе с тем, увеличение числа четвертей длин волн в резонаторе, уменьшает интервал между соседними модами колебаний в КРИП, как показано на рис. 4.

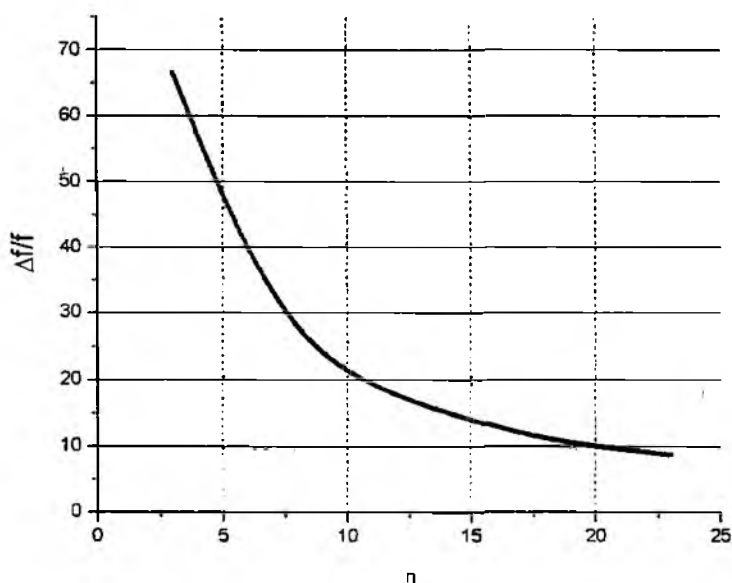


Рис. 4

Введение в структуру разделительной вставки h_1 на расстоянии h_2 от открытого торца отразится на зависимости резонансной частоты f от относительной диэлектрической проницаемости образца ϵ_2 . Определенные количественные представления об изменении частоты резонатора $\Delta f/f$ относительно частоты незаполненного резонатора дают зависимости, представленные на рис. 5.

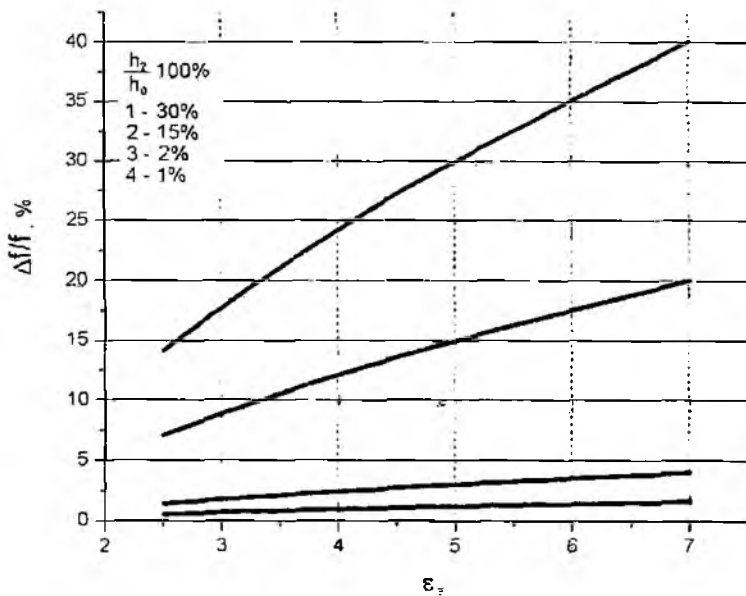


Рис. 5

Особенности характеристик преобразования КРИП по фундаментальным сигналам

Семейство характеристик преобразования первичных измерительных преобразователей, каковыми являются КРИП, дает наиболее полную информацию об их метрологических свойствах. Располагая такими характеристиками, можно количественно оценивать чувствительность преобразователей, диапазон и погрешность измерения требуемой физической величины, строить градуировочные характеристики. В зависимости от полноты семейства можно также планировать многопараметровые измерения с помощью преобразователя данного типа, анализировать влияние мешающих факторов и возможные способы их подавления и исключения.

Однако адекватно промоделировать достаточно полное семейство характеристик преобразования в общем виде даже для одного типа преобразователей, например КРИП, невозможно. Необходимо учитывать область применения и специфику использования. В связи с сказанным далее представлены характеристики преобразования КРИП для СВЧ влагометрических сыпучих материалов.

Учитывая широкий диапазон изменения $\text{tg } \delta$ влагосодержащих материалов, в первую очередь следует оценить на одной из возможных рабочих частот зависимость добротности КРИП от электрических параметров материала ϵ_2 и $\text{tg } \delta_2$ для конструктивно приемлемой геометрии преобразователя.

На рис. 6 – 8 приведены соответствующие зависимости для конструкции КРИП вида рис. 1, б, полученные в результате численного моделирования, при $h_1 = h_2 = 0$ (резонатор нагружен на измеряемый материал) с учетом потерь в стенках резонатора, потерь на излучение потерь в материале, при изменении ϵ_2 от 2,5 до 7 и тангенса угла диэлектрических потерь σ от 0,001 до 0,1. Рис. 6 дает представление об изменении резонансной частоты при изменении ϵ_2 от 2,5 до 7, при $\text{tg } \delta = 0,001$. График на рис. 6 содержит несколько кривых: 1 – для резонатора нагруженного на бесконечное пространство (присутствует дифракция); 2 – для резонатора нагруженного на полубесконечное пространство (без дифракции) с воздушным зазором, высотой h_3 между материалом и торцом резонатора; 3 – для резонатора, нагруженного без зазора на полубесконечное пространство (без дифракции).

Смещение зависимостей по частоте, по-видимому, физически обусловлено увеличением включения образца в СВЧ поле резонатора при его плотном прилегании к бесконечному торцу.

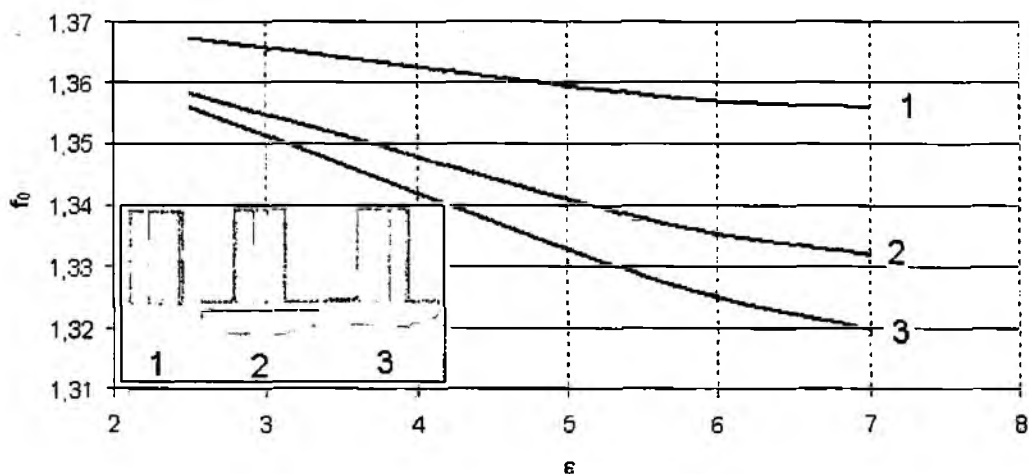


Рис. 6

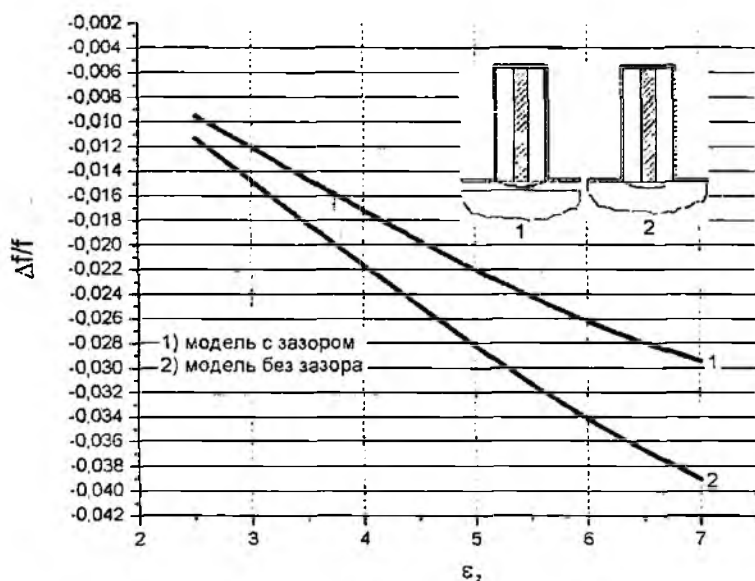


Рис. 7

Графики на рис. 8 содержат следующие семейства кривых: 1 – для резонатора, нагруженного на полубесконечное пространство с воздушным зазором, высотой h_2 между материалом и торцом резонатора; 2 – для резонатора, нагруженного на полубесконечное пространство без зазора.

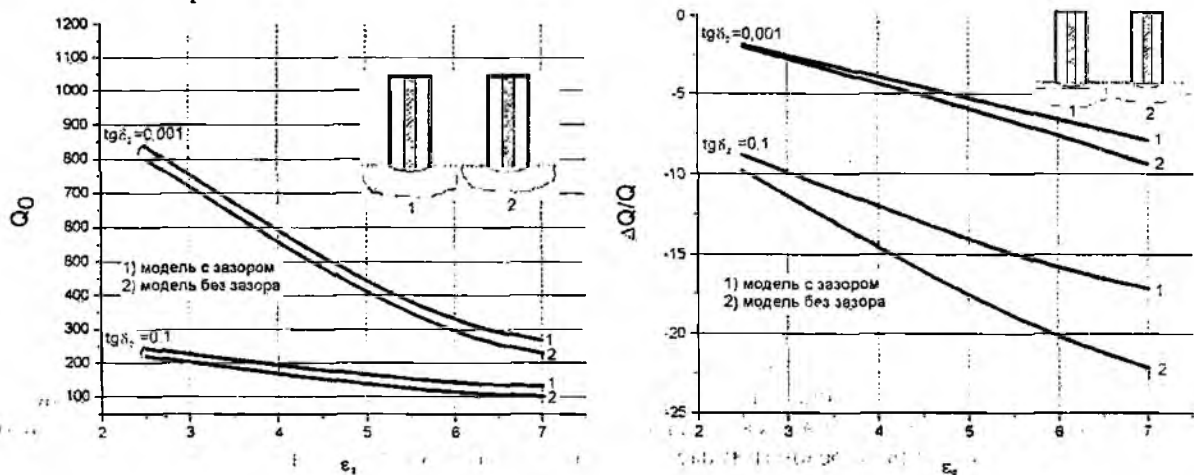


Рис. 8

В ходе численных экспериментов была оценена мощность излучения в пространство зазора между материалом и торцом резонатора. В нормированном виде к полной мощности потери через нижний торец в виде эта зависимость представлена на рис. 9.

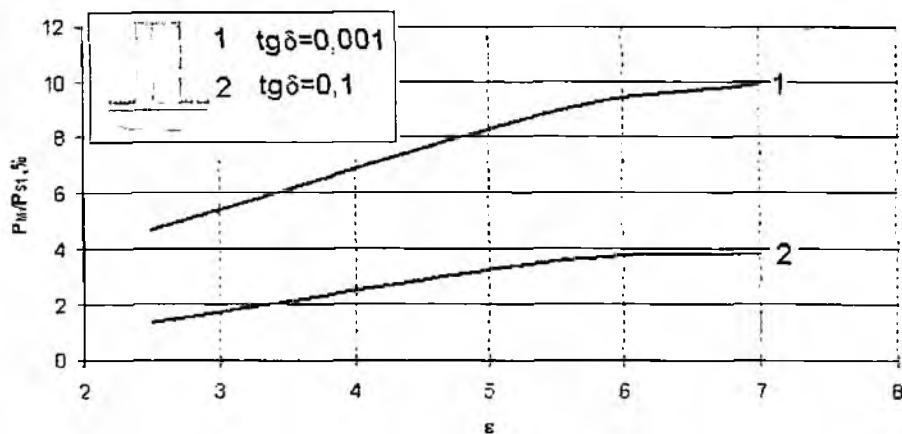


Рис. 9

Отметим, что такая конструкция удобна для широкого класса сыпучих материалов, отличающихся степенью дисперсности и соответственно оптимальным объемом формируемой пробы для интегральной оценки влагосодержания.

Для расчета характеристик преобразования выбрана рабочая частота 1,3...1,4 ГГц, как относящаяся к наиболее рекомендуемому диапазону при СВЧ влагометрии сыпучих материалов с различными формами вхождения свободной воды в материал [1, 2, 4].

Размеры D и d_0/D выбраны из соображения их применимости для среднedisперсного материала.

Отдельными исследованиями можно определить область применения формируемых ниже качественных выводов по частотному диапазону и диапазону величин D и d_0/D .

Выводы

Получены следующие новые результаты: 1) наличие потерь СВЧ мощности на излучение в зазор между апертурой и образцом (в том числе дифракционных) ослабляет влияние диэлектрической проницаемости образца на резонансную частоту РИП; 2) введение в резонатор диэлектрической вставки приводит к усилению зависимости $\Delta f/f(\epsilon)$. Таким образом, диэлектрическая вставка позволяет частично ослабить влияние излучательных потерь на ФСИИ датчика.

Список литературы: 1. Nelson S. O., Kraszewski A. W., Trabelsi S., Lawrence K. C. Using cereal permittivity for sensing moisture content // IEEE transactions on instrumentation and measurement. 2000. № 3. P. 470 – 474. 2. Завьялов А. С., Дунаевский Г. Е. Измерение параметров материалов на сверхвысоких частотах. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1985. 3. Лабутин С. А., Лопаткин А. В., Цугин М. В., Тарасов Е. М. Экспериментальные исследования характеристик емкостных измерителей влажности зерна // Тез. докл. НПК "Современные информационные технологии в управлении АПК". Нижний Новгород, 1999. С. 58 – 59. 4. Nelson S. O. Advances in sensing grain moisture content by microwave measurements. // Trans. ASAE. 1998. № 2. P. 483 – 487. 5. Лисовский В. В. Теория и практика сверхвысокочастотного контроля влажности сельскохозяйственных материалов. Мн.: УОБГАТУ, 2005. 292 с. 6. Steinhauer D. E., Vlahacos C. P., Dutta S. K., Feenstra B. J., Wellstood F. C., Anlage S. M. Quantitative imaging of sheet resistance with a scanning near-field microwave microscope // Appl. Phys. Lett. 1998. № 72. P. 861 – 863. 7. Vlahacos C. P., Black R. C., Anlage S. M., Wellstood F. C. Near-field scanning microwave microscope with 100 μm resolution. // Appl. Phys. Lett. 1996. № 69. P. 3272 – 3274. 8. Потанов Ю. В. СВЧ-моделирование с помощью программы CST Microwave Studio // Electronic Design Automation. 2000. №2. С. 12 – 14. 9. Ефимов И. Е., Остапкович Г. А. Радиочастотные линии передачи. М.: Связь, 1977. 408 с. 10. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. М.: Высш. шк., 1970. 440 с. 11. Федоров Н. Н. Основы электродинамики. М.: Высш. шк., 1980. 400 с. 12. Орлов С. И. Расчет и конструирование коаксиальных резонаторов. М.: Радио, 1970. 256 с. 13. Никольский В. В. Теория электромагнитного поля. М.: Высш. шк., 1961. 372 с. 14. Григорьев А. Д., Янкевич В. Б. Резонаторы и резонаторные замедляющие системы СВЧ. М.: Радио и связь, 1984. 248 с.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 01.07.2008