

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗОНАТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ МИКРОПОЛОСКОВЫХ СТРУКТУР

Введение

Резонансные измерительные преобразователи (РИП) являются основными элементами измерительных систем, в которых используются резонансные методы измерения различных параметров и величин [1]. Характеристики РИПов во многом определяют возможности измерительной системы в целом.

В ближнеполевой сканирующей микроволновой микроскопии (СММ) основным устройством системы измерений, определяющим чувствительность и разрешающую способность, является измерительный преобразователь или микрозонд, непосредственно взаимодействующий с исследуемым объектом и представляющий собой отрезок линии передачи, заканчивающийся миниатюрным зондом, или резонаторный измерительный преобразователь (РИП), соединенный или совмещенный с микрозондовой структурой [1 – 3]. Использование резонаторных преобразователей позволяет обеспечить более высокую чувствительность

измерений, которая в значительной степени зависит от величины добротности резонатора измерительного преобразователя. Пространственная разрешающая способность зависит от конструкции и геометрии апертурной части зонда. Как правило, это коаксиальная структура с заостренным центральным проводником. Степень заострения проводника и геометрия острия в значительной мере определяют разрешающую пространственную способность.

Перспективной представляется реализация РИП на основе полосковых и микрополосковых структур, создаваемых с помощью планарных технологий, которые достаточно хорошо отработаны при изготовлении микро- и наноразмерных элементов современной микроэлектроники.

При позитивном решении задачи создания таких РИП 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 такого конструктива микрозонда, который можно использовать одновременно и для атомно-силовой, и туннельной микроскопии.

Однако для продвижения в решении указанных задач необходимо провести значительный объем предварительных исследований, связанных с анализом свойств полосковых и микрополосковых резонансных структур применительно к созданию РИП на их основе.

Задачей данной работы является анализ и учет факторов, определяющих возможности обеспечения резонансных свойств измерительных преобразователей на основе микрополосковых структур, а также чувствительности их параметров к изменению характеристик объектов контроля и диагностики.

Основная часть

Наиболее простым по конструкции и технологии резонансным элементом на основе микрополосковой линии является полуволновый резонатор. Набор формул для расчета параметров такого резонатора приведен ниже [4]:

$$L = \frac{\lambda_v}{2} = \frac{c}{2 \cdot f \cdot \sqrt{\epsilon_{ef}}}, \quad \epsilon_{ef} = \frac{\epsilon_d + 1}{2} + \frac{\epsilon_d - 1}{2 \cdot \sqrt{1 + 10 \cdot h/W}},$$

$$\frac{W}{h} = 8 / (e^d - e^{-d}), \quad d = \frac{Z_v}{60} \sqrt{\frac{\varepsilon_d + 1}{2}} + \frac{\varepsilon_d - 1}{\varepsilon_d + 1} \left(0,226 + \frac{0,12}{\varepsilon_d} \right),$$

$$Q_0 = \frac{Q_R \cdot Q_d}{Q_R + Q_d}, \quad Q_R = \frac{8,68 \pi \cdot \sqrt{\varepsilon_{ef}}}{\lambda_0 \alpha_R}, \quad Q_d = \frac{1}{(\operatorname{tg} \delta)_{ef}},$$

$$\alpha_R = \frac{4,34 \cdot R_s}{Z_v \cdot W}, \quad R_s = \sqrt{\pi \cdot \mu_0 \cdot f \cdot \rho},$$

$$(\operatorname{tg} \delta)_{ef} = \operatorname{tg} \delta \cdot \left\{ 1 + (A - 1) / [\varepsilon_d \cdot (A + 1)] \right\}^{-1}, \quad A = \sqrt{1 + 10 \cdot h / W},$$

где L – длина полуволнового микрополоскового резонатора; λ_v – длина волны в микрополосковой линии; c – скорость света; f – рабочая частота; ε_d – диэлектрическая проницаемость диэлектрика подложки микрополосковой линии; h – толщина диэлектрической подложки;

W – ширина сигнального проводника микрополосковой линии (резонатора); Z_v – волновое сопротивление микрополосковой линии; Q_0 – собственная (ненагруженная) добротность микрополоскового резонатора; Q_R – добротность, обусловленная потерями в проводниках; Q_d – добротность, обусловленная потерями в диэлектрике; λ_0 – длина волны в свободном пространстве; α_R – коэффициент затухания волны в линии, обусловленный потерями в проводниках; R_s – поверхностное сопротивление проводника линии (резонатора); μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; ρ – удельное сопротивление проводника (медь).

Расчет, проведенный при $f = 10 \text{ ГГц}$, $h = 1 \text{ мм}$, $Z_v = 50 \text{ Ом}$, $\varepsilon_d \approx 9,6$ (поликор), $\operatorname{tg} \delta \approx 10^{-4}$, $\rho = 0,0172 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, показывает, что при $L = 5,84 \text{ мм}$, $W = 1 \text{ мм}$, собственная (ненагруженная) добротность микрополоскового полуволнового резонатора $Q_0 \sim 5 \cdot 10^2$.

Полученное расчетное значение добротности является максимально возможным для рассматриваемой структуры.

На практике, при конфигурировании полуволнового резонансного отрезка микроволновой линии в виде полуволнового отрезка с зондовой структурой, а также необходимости обеспечения связи такого РИП с внешними цепями измерительной системы, реальное рабочее значение добротности будет в полтора-два раза меньше.

В связи с этим были проведены численные модельные исследования характера распределения полей и зависимости АЧХ микрополосковых резонансных структур с зондами различной конфигурации от схемы включения, величины связи и параметров образцов возможной диагностики [5, 6].

Топологии исследовавшихся полуволновых резонансных структур с оконечным емкостным подключением приведены на рис. 1. Анализ проводился для резонансного полуволнового отрезка микрополосковой линии (рис. 1, а), полуволнового отрезка линии с заострением 45° (рис. 1, б), полуволнового отрезка линии в виде треугольной нерегулярной структуры с размерами сторон: $a = b = 5,84 \text{ мм}$, $c = 0,981 \text{ мм}$ (рис. 1, в) и полуволнового отрезка линии с заострением 45° и наконечником длиной $\sim 0,1 \text{ мм}$ и радиусом 30 мкм (рис. 1, г).

Во всех случаях на открытом конце резонансного отрезка обеспечивается превышение значения напряженности электрической составляющей поля в полтора-два порядка по сравнению с его напряженностью в линии передачи, а степень его локализации определяется геометрией заостренного конца.

Поскольку резонансные свойства в значительной степени зависят и от величины связи были проведены исследования влияния величины емкостного зазора элемента связи на АЧХ рассматриваемых резонансных структур (рис. 2, 3).

Из графиков, приведенных на рис. 2 и 3, видно, что максимально резонансные свойства исследовавшихся структур проявляются при минимальных зазорах между резонансными

элементами и линиями. Добротности резонаторов при этом невысоки (порядка нескольких десятков), для нерегулярного отрезка (рис. 3) наблюдается довольно сильная зависимость резонансной частоты от величины связи, обусловленная, возможно, особенностями формирования резонансного отклика в такой структуре.

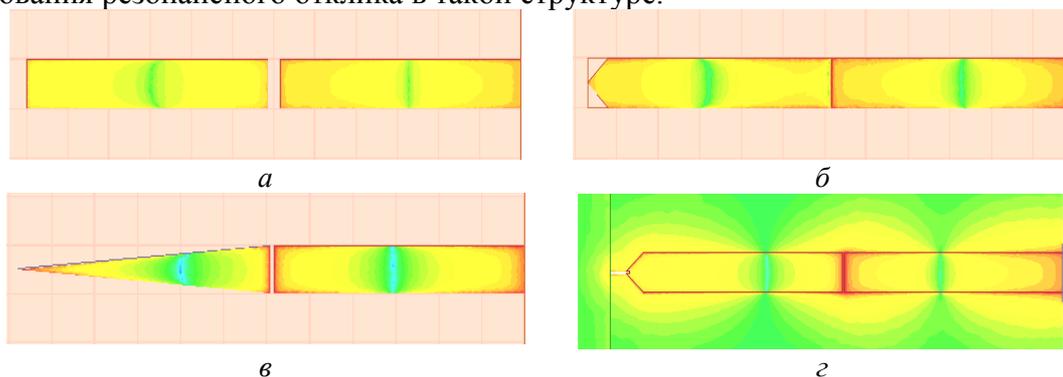


Рис. 1. Топологии полуволновых резонансных структур

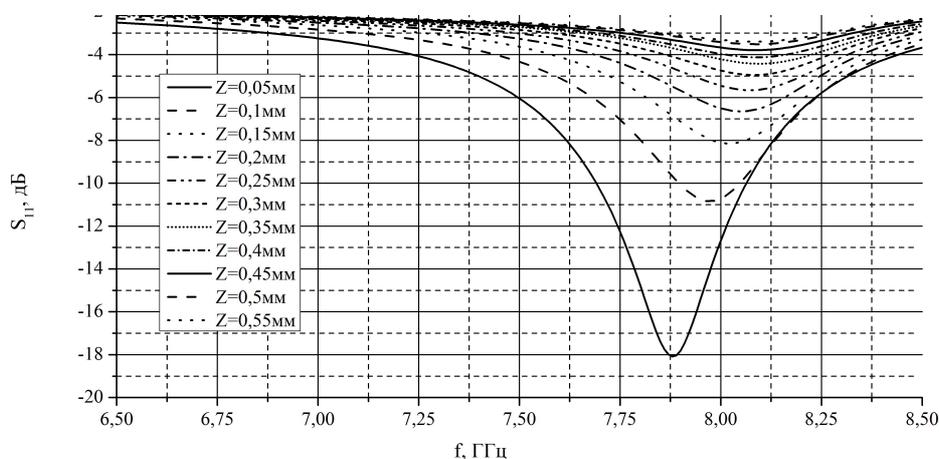


Рис. 2. Зависимость АЧХ полуволнового отрезка линии с заострением 45° (рис. 1, б) от величины емкостного зазора элемента связи

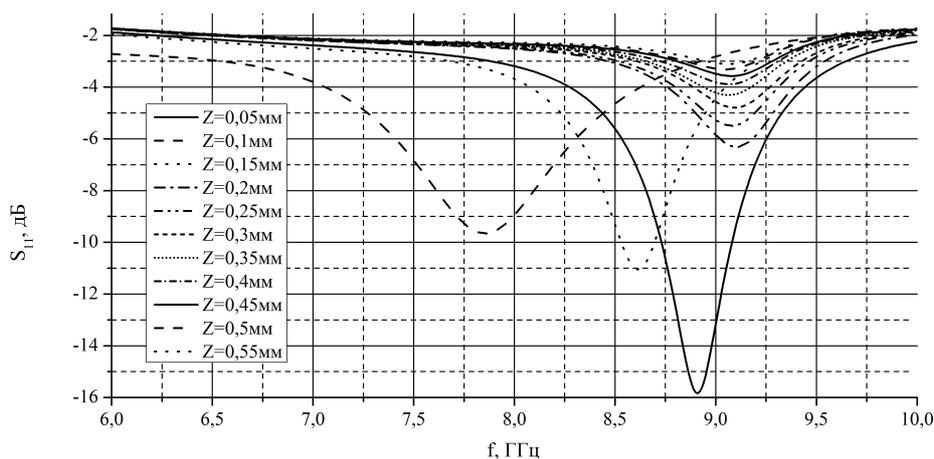


Рис. 3. Зависимость АЧХ полуволнового отрезка линии в виде треугольной нерегулярной структуры (рис. 1, в) от величины емкостного зазора элемента связи

Результаты численных оценок влияния изменения диэлектрической проницаемости материала, расположенного вблизи заостренной зондовой части микрополосковой резонансной структуры, на изменения АЧХ приведены на рис. 4.

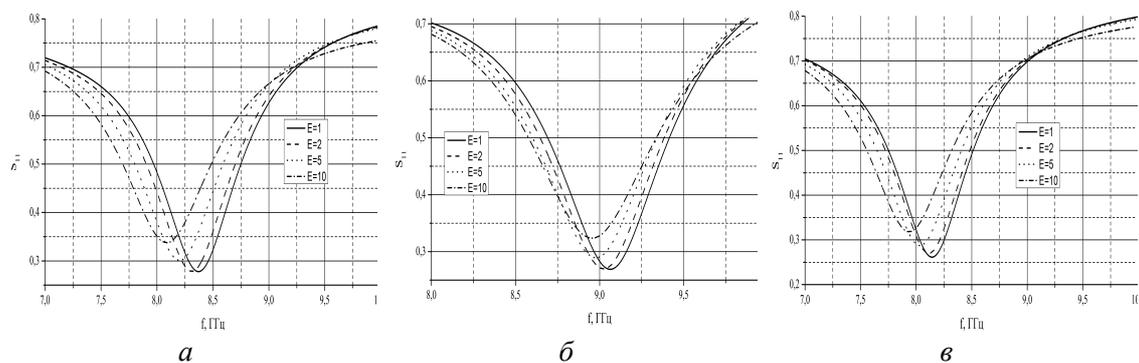
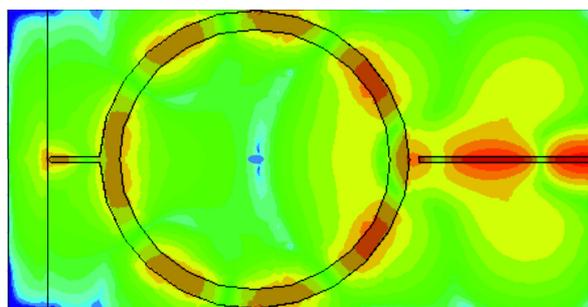


Рис. 4. Зависимости АЧХ резонансных структур от величины диэлектрической проницаемости объекта диагностики: *а* – полуволновый отрезок линии с заострением (рис.1, *б*), *б* – полуволновый отрезок линии в виде нерегулярной структуры (рис.1, *в*), *в* – полуволновый отрезок линии с заострением и наконечником (рис.1, *з*)

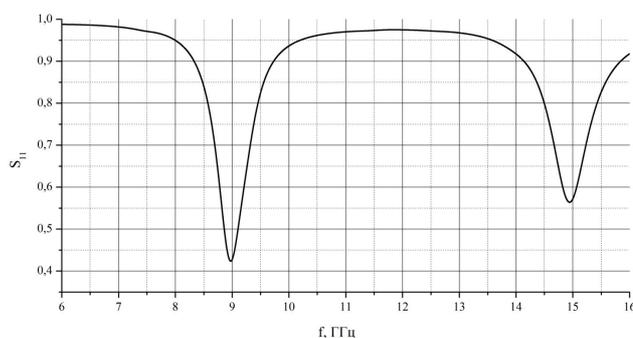
Для всех вариантов топологии полуволновых резонансных структур с зондами при увеличении диэлектрической проницаемости объекта диагностики наблюдается сдвиг центральной частоты резонансов в сторону понижения частоты, что закономерно, поскольку при этом увеличивается и величина ϵ_{ef} (см. формулы). С другой стороны, наличие такого сдвига свидетельствует о чувствительности характеристик рассмотренных структур к изменению параметров объектов, располагаемых вблизи областей локализованных с их помощью электромагнитных полей.

Также были проведены исследования возможности создания РИП на основе оконечно включенного кольцевого резонатора стоячей волны с подключенной к нему микрозондовой структурой. Топология, распределение полей и амплитудно-частотная характеристика приведены на рис. 5.

При анализе влияния параметров образца, размещаемого в области острия микрозонда, было выявлено изменение частоты первого резонансного отклика при изменении ϵ_d от 1 до 5 – на 35 МГц, от 5 до 10 – на 15 МГц.



а



б

Рис. 5. Топология, распределение полей (*а*) и амплитудно-частотная характеристика (*б*) кольцевого резонатора с микрозондом

Однако, как видно из рис. 5, *б*, добротности резонансов для рассмотренной структуры невысоки и составляют всего несколько десятков. В связи с этим был проведен модельный анализ РИП на основе подобных резонансных структур. В итоге была выбрана структура, топология которой и распределение поля для одного из резонансов на частоте $\sim 10,11$ ГГц показаны на рис. 6, *а*.

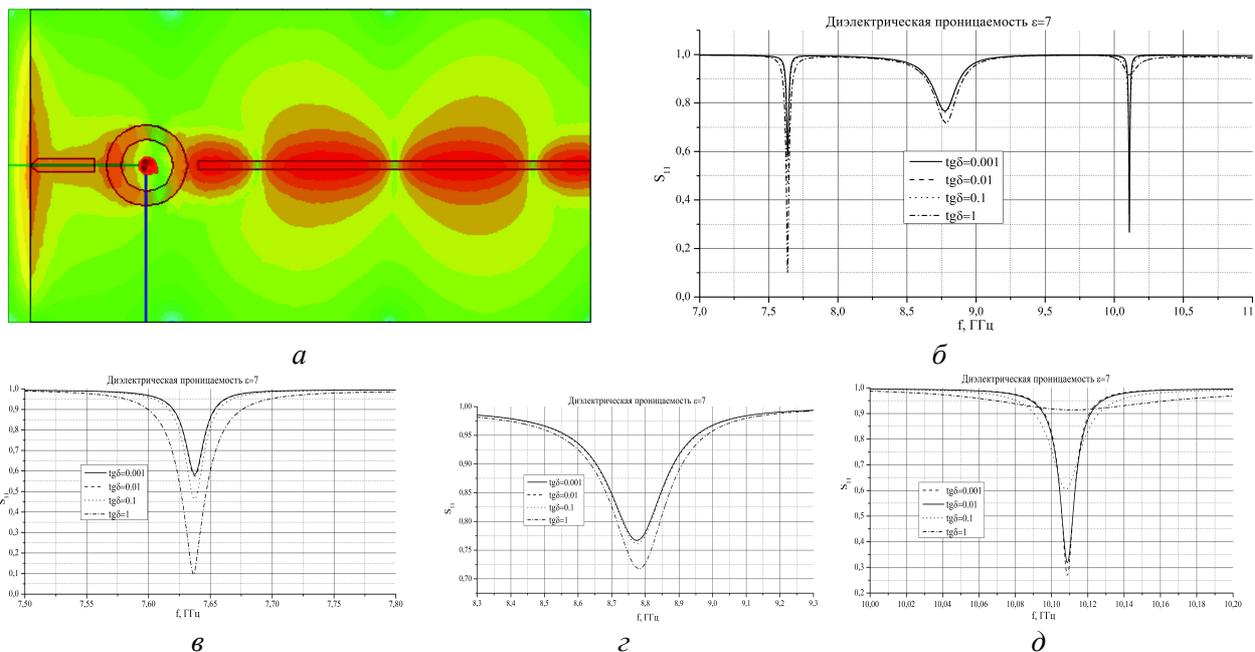


Рис. 6. Структура распределения электрических полей в РИП на основе кольцевого резонатора стоячей волны при резонансе на частоте 10,11 ГГц (а), АЧХ коэффициента отражения в полосе частот 7 – 11 ГГц (б), зависимости резонансных откликов от величины потерь в образце на частотах: 7,64 ГГц (в), 8,78 ГГц (г) и 10,11 ГГц (д)

Из приведенных на рис. 6, б – д графиков амплитудно-частотных характеристик коэффициентов отражения при различных значениях величин $\text{tg}\delta$ образцов с диэлектрической проницаемостью $\epsilon \sim 7$, помещаемых в области острия зонда, видно, что диапазоне частот 7 – 11 ГГц наблюдается три резонансных отклика рассматриваемого РИП. Резонансные отклики существенно отличаются по добротности: добротность резонанса на частоте 7,64 ГГц составляет порядка 350, на частоте 8,78 ГГц ~ 40 и на частоте 10,11 ГГц $\sim 10^3$. При этом для всех резонансных откликов наблюдается сильная зависимость величины добротности от значения $\text{tg}\delta$ 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 более высокочастотном резонансе на частоте 10,11 ГГц (рис. 6, д).

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

При моделировании кольцевого РИП также была обнаружена зависимость его резонансных характеристик от соотношения волновых сопротивлений возбуждающей полосковой линии, кольцевого резонатора и микрозондовой структуры.

Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- изменение топологии полуволновых резонансных отрезков микрополосковой линии не приводит к существенному изменению их резонансных свойств;
- на заостренных участках (прототипах зондов) достигаются повышенные значения напряженностей локализованных полей;
- РИП на основе кольцевых резонаторов стоячих волн позволяют повысить добротность более чем на порядок по сравнению с полуволновыми резонаторами;
- АЧХ рассмотренных структур обладают чувствительностью к изменениям параметров объектов, располагаемых вблизи зондов, что может быть использовано для диагностики.

В то же время до практической экспериментальной реализации микрополосковых резонансных структур с зондами необходимо проведение дополнительных исследований по анализу возможностей максимального использования их резонансных свойств, оптимизации топологии структур РИП с учетом используемых материалов и доступных технологий изготовления.

Список литературы: 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. *Миронов В.Л.* Основы сканирующей зондовой микроскопии. – М. : Техносфера, 2004. – 144с. 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. *Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств ; под ред. В.И. Вольмана.* – М. : Радио и связь, 1982. – 328 с. 5. *Бондаренко И.Н., Галич А.В.* Микрополосковые резонаторные измерительные преобразователи для сканирующей микроволновой микроскопии // Сб. науч. тр. 6-й Междунар. науч. конф. «Функциональная база наноэлектроники», Харьков-Крым, 2013, 30.09.- 4.10.2013. – С.86-89. 6. *Bondarenko I.N., Galich A.V.* Microstrip resonant sensors for scanning microwave microscopy // 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.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 02.04.2014