

# МИКРОПОЛОСКОВЫЕ РЕЗОНАТОРНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ СКАНИРУЮЩЕЙ МИКРОВОЛНОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Бондаренко И.Н., Галич А.В.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Харьков, пр. Ленина, 14, 61166, Украина

тел.: (057) 702-13-62, e-mail: mepu@kture.kharkov.ua

The researches of properties of resonant transducers based on segments of microstrip lines, topology of which contains the probe tip structure are carried out. Carried out numerical model studies of the distribution of the fields and the dependence of amplitude-frequency responses of resonant microstrip structures with probes of various configurations from switching circuits and value of communication and parameters of samples possible diagnosis.

**Введение.** 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.

Перспективным представляется создание РИП на основе полосковых и микрополосковых структур, изготовленных 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 создания интегральных устройств формирования информационных сигналов СММ, включающих в себя как первичный преобразователь (сенсор), так и систему формирования и предварительной обработки сигналов, а также создания 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 непосредственно с полосковыми и микрополосковыми резонансными структурами.

Задачей данной работы является анализ и учет факторов, определяющих возможности обеспечения резонансных свойств измерительных преобразователей на основе отрезков микрополосковых линий при топологиях зондовых структур, представляющих собой неотъемлемую часть резонаторного измерителя.

## 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]:

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

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

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

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

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

где  $L$  – длина полуволнового микрополоскового резонатора;  $\lambda_v$  – длина волны в микрополосковой линии;  $c$  – скорость света;  $f$  – рабочая частота;  $\epsilon_d$  – 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;  $\lambda_0$  – длина волны в свободном пространстве;  $\alpha_R$  – коэффициент затухания волны в линии, обусловленный потерями в проводниках;  $R_s$  – поверхностное сопротивление проводника линии (резонатора);  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;  $\rho$  – удельное сопротивление проводника (медь).

Расчет, проведенный при  $f = 10$  ГГц,  $h = 1$  мм,  $Z_v = 50$  Ом,  $\epsilon_d \approx 9,6$  (поликор),  $\text{tg}\delta \approx 10^{-4}$ ,  $\rho = 0,0172 \cdot 10^{-6}$  Ом·м, показывает, что при  $L = 5,84$  мм,  $W = 1$  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.

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

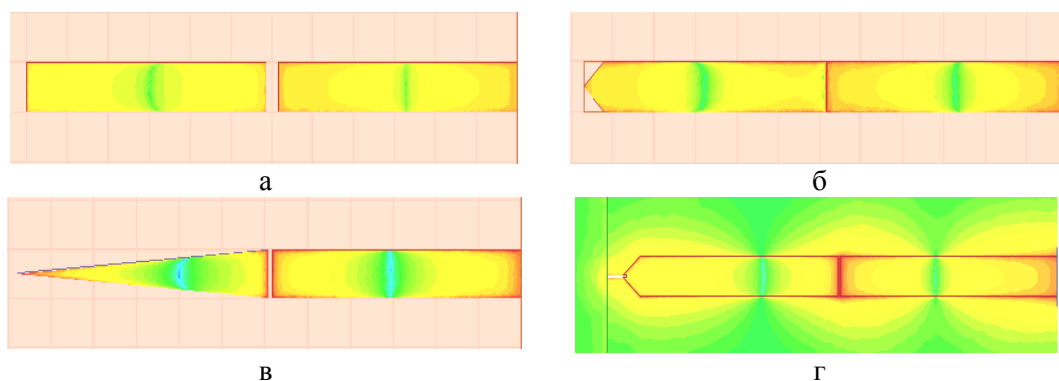


Рис. 1. Топологии полуволновых резонансных структур

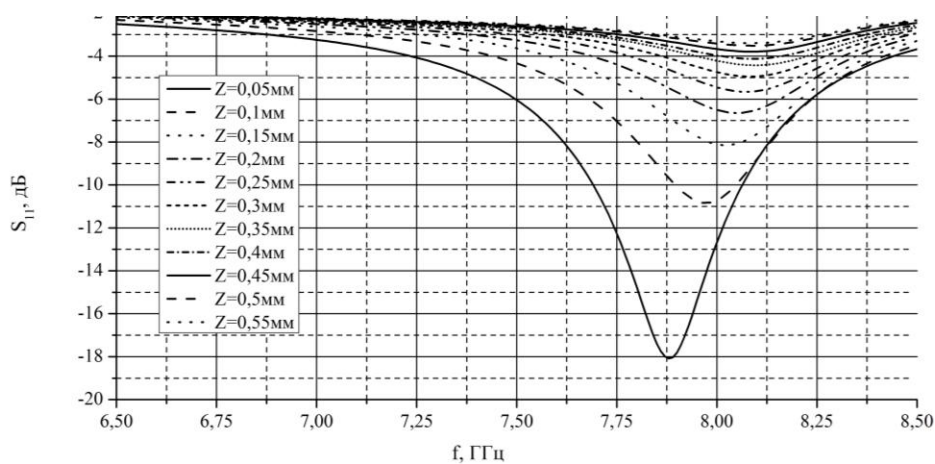


Рис. 2. Зависимость АЧХ полуволнового отрезка линии с заострением  $45^\circ$  (рис. 1,б) от величины емкостного зазора элемента связи

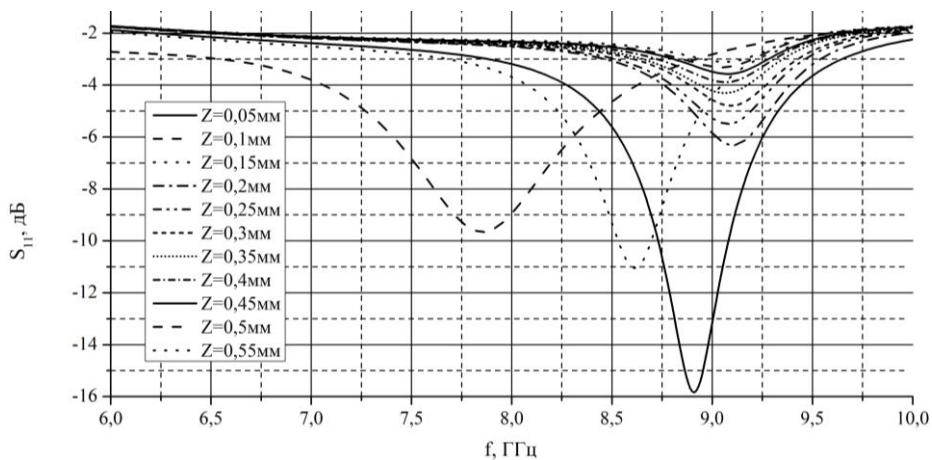


Рис. 3. Зависимость АЧХ полуволнового отрезка линии в виде треугольной нерегулярной структуры (рис. 1,в) от величины емкостного зазора элемента связи

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

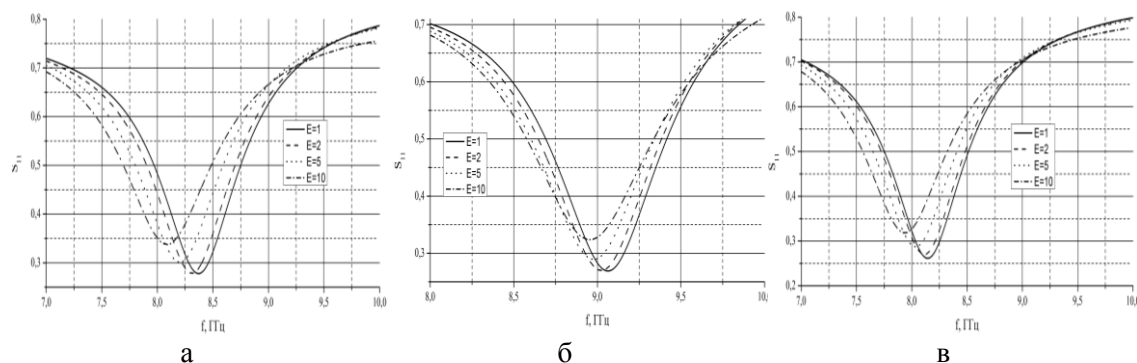


Рис. 4. Зависимости АЧХ резонансных структур от величины диэлектрической проницаемости объекта диагностики: а – полуволновый отрезок линии с заострением (рис.1,б), б – полуволновый отрезок линии в виде нерегулярной структуры (рис.1,в), в – полуволновый отрезок линии с заострением и наконечником (рис.1,г)

Для всех вариантов топологии резонансных структур с зондами при увеличении диэлектрической проницаемости объекта диагностики наблюдается сдвиг центральной частоты резонансов в сторону понижения частоты, что, в общем, закономерно, поскольку при этом увеличивается и величина  $\epsilon_{ef}$  (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.

**Выводы.** Таким образом, 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 на полтора-два порядка значения напряженностей локализованных полей;
- АЧХ рассмотренных структур обладают чувствительность к изменениям параметров объектов, располагаемых вблизи зондов, что может быть использовано для диагностики.

В тоже время, до практической экспериментальной реализации полуволновых полосковых резонансных структур с зондами необходимо проведение дополнительных исследований по анализу проходного типа их включения, а также возможностей максимального использования их резонансных свойств.

### 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. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / Под ред. В.И. Вольмана – М.: Радио и связь, 1982. – 328 с.