

**Д.А. Усанов, С.А. Никитов,  
А.В. Скрипаль, А.П. Фролов**

*ФГБОУ ВПО Саратовский государственный университет имени Н.Г.  
Чернышевского*

## **Ближнеполевой СВЧ-микроскоп с фотонным кристаллом в качестве резонатора и регулируемым элементом связи**

*Показана возможность использования одномерного фотонного кристалла с нарушением периодичности в качестве перестраиваемого резонатора, обеспечивающего управление резонансными особенностями в спектре отражения зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе цилиндрического резонатора с рамочным элементом связи. Показана высокая чувствительность данного типа зонда к изменению параметров исследуемых диэлектрических пластин с различными значениями диэлектрической проницаемости и толщин нанометровых металлических слоев, нанесенных на диэлектрические пластины.*

**Ключевые слова:** СВЧ фотонный кристалл, ближнеполевой СВЧ-микроскоп, измерения, толщина, нанометровые металлические плёнки, диэлектрические пластины

Среди новых типов твердотельных структур, применяемых в технике СВЧ, можно выделить новый класс периодических структур, получивших название фотонных кристаллов. В спектре пропускания такой структуры имеется частотная область, запрещенная для распространения электромагнитной волны – аналог запрещенной зоны в кристаллах. При наличии нарушений в периодичности слоистой структуры в запрещенной зоне фотонного кристалла могут возникать резонансные частотные особенности – узкие «окна» прозрачности [1]. На основе СВЧ-фотонных кристаллов разрабатываются полосовые фильтры, перестраиваемые резонаторы, миниатюрные антенны [2 – 5].

Известны способы измерений параметров материалов и структур, использующие фотонные структуры СВЧ-диапазона [6, 7]. В этом случае слои исследуемых материалов включаются в качестве нарушений периодичности в структуру фотонного кристалла. Однако, обладая высокой чувствительностью к измеряемым параметрам материалов и структур, многие СВЧ-методы позволяют получить результат измерений, усредненный по размеру, сравнимому с длиной волны излучения.

Одним из наиболее успешных и перспективных методов диагностики материалов и структур, позволяющих проводить измерения с высоким пространственным разрешением, является ближнеполевая СВЧ-микроскопия [8 – 10]. Основным элементом ближнеполевого СВЧ-микроскопа, обеспечивающим в большей мере его высокую чувствительность и разрешающую способность, авторы [8] назвали связанный с зондом СВЧ-резонатор. С увеличением чувствительности резонатора к вносимому в него через зонд возмущению повышается чувствительность и разрешающая способность СВЧ-микроскопа в целом.

Для расширения области применения и возможностей ближнеполевой СВЧ-микроскопии актуален поиск новых типов зондов и резонаторов ближнеполевых СВЧ-микроскопов.

В настоящей работе нами были исследованы возможности использования одномерного фотонного кристалла с нарушением периодичности в качестве перестраиваемого резонатора, обеспечивающего управление резонансными особенностями в спектре отражения зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе цилиндрического резонатора с рамочным элементом связи, и использования данного типа зонда для контроля параметров диэлектрических пластин с различными значениями диэлектрической проницаемости и толщин нанометровых металлических слоев, нанесенных на диэлектрические пластины.

В эксперименте использовался цилиндрический резонатор 1, в котором в качестве элемента, возбуждающего электромагнитные колебания, использовался рамочный элемент связи 2 (см. рис. 1).

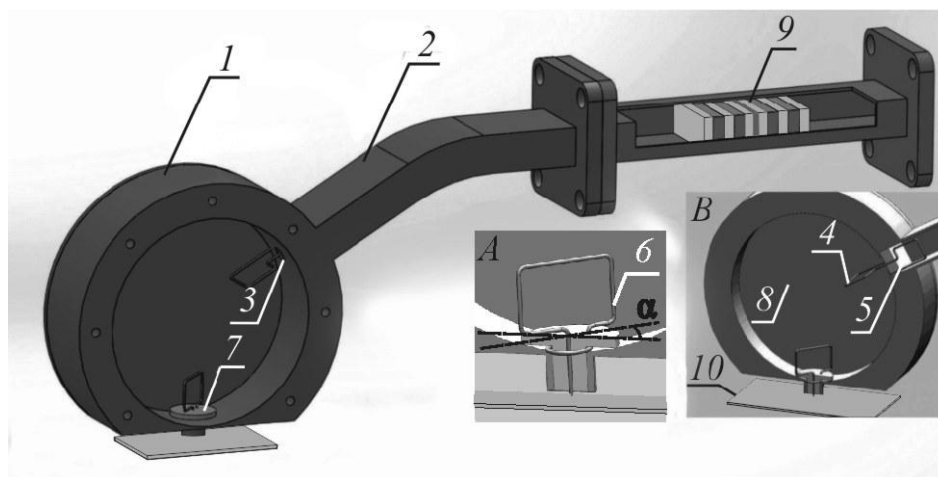


Рисунок 1

На вставке А представлен рамочный элемент связи, на вставке В – цилиндрический СВЧ-резонатор с рамочным элементом связи и измеряемым образцом 10.

В корпус цилиндрического резонатора 1 впаян отрезок волновода 2 сечением  $23 \times 10$  мм таким образом, чтобы между полостью волновода и внутренней стенкой корпуса резонатора оставалась мембрана 3 толщиной 0,5 мм. В мембране 3 изготовлено отверстие диаметром 6 мм, через которое проходит рамочный элемент 4, выполненный из медной проволоки диаметром в сечении 0,6 мм и предназначенный для связи цилиндрического резонатора и волновода. Со стороны волновода рамка закреплена в пластине пенопласта 5.

Размеры рамки выбраны для оптимальной передачи электромагнитных волн в диапазоне частот от 8 до 11 ГГц [11].

Под углом  $120^\circ$  к первому рамочному элементу 4 относительно центра окружности цилиндрического резонатора расположен второй рамочный элемент 6, который проходит сквозь отверстие в резонаторе и его конечная часть выступает в роли иглы зонда. Вторым рамочный элемент 6 также изготовлен из медной проволоки диаметром в сечении 0,6 мм. Закрепляется он в цилиндрической фторопластовой втулке 7, которая позволяет изменять положение рамочного элемента путем изменения угла  $\alpha$ , плоскости рамки вокруг оси иглы зонда. Корпус резонатора с двух сторон закрывается крышками 8.

Магнитные силовые линии поля электромагнитных колебаний в резонаторе, пересекая площадь рамочного элемента связи 6, наводят в нём переменный ток. Таким образом, осуществляется передача энергии электромагнитных колебаний из объёма резонатора в малый объём в окрестности острия зонда.

Зонд на основе цилиндрического резонатора с рамочным элементом связи 6 был соединён с отрезком волноводного фотонного кристалла 9 с нарушением периодичности (см. рис. 1). Использовался одномерный волноводный фотонный кристалл, состоящий из одиннадцати слоев, в диапазоне частот 8–12 ГГц.

Нечетные слои были выполнены из поликора ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\varepsilon = 9,6$ ), четные – из фторопласта ( $\varepsilon = 2,1$ ). Длина нечетных отрезков – 1 мм, четных отрезков варьировалась в диапазоне от 7 мм до 14 мм. Нарушение создавалось посредством изменения длины шестого, центрального, слоя, длина нарушенного шестого слоя (фторопласт) варьировалась в диапазоне от 3 мм до 4 мм.

Высокочастотные характеристики исследуемого зонда в виде резонатора с рамочным элементом связи, соединенного с отрезком волноводного фотонного кристалла с нарушением периодичности, исследовались с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA-L Network Analyzer N5230A, который подключался через отрезок волновода.

При приближении к острию зонда исследуемого образца происходит резкое изменение входного импеданса зонда и изменяется коэффициент отражения СВЧ-волны от измерительного зонда. Величина его изменения зависит от параметров, исследуемого образца, таких как электропроводность, диэлектрическая проницаемость, толщина.

На рис.4 представлены зависимости коэффициента отражения СВЧ-волны, измеренные на различных фиксированных частотах в окрестности минимума коэффициента отражения, от величины диэлектрической проницаемости образцов, размещаемых у острия зонда. Кривая 1 соответствует отсутствию измеряемого образца ( $\varepsilon = 1$ ), 2 – фторопласт ( $\varepsilon = 2,0$ ), 3 – гетинакс ( $\varepsilon = 2,5$ ), 4 – текстолит ( $\varepsilon = 3,4$ ), 5 – фотостекло ( $\varepsilon = 6,7$ ), 6 – поликор ( $\varepsilon = 9,6$ ), 7 – кремний ( $\varepsilon = 11,7$ )

При выборе частоты измерений, соответствующей минимуму коэффициента отражения в отсутствие измеряемого образца, диапазон изменений коэффициента отражения максимален и составляет ~55,0 дБ.

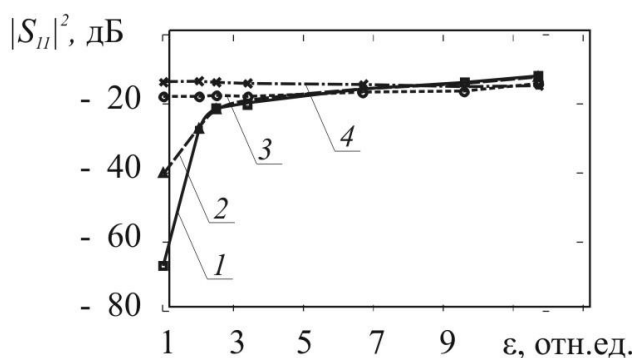


Рисунок 2

В этом случае измеренная чувствительность  $\partial S_{11}/\partial \varepsilon$  в диапазоне значений  $\varepsilon = 1 \div 2$  составляет  $\sim 39,5$  дБ/ $\varepsilon$ , а разрешающая способность  $\Delta \varepsilon/\varepsilon$  достигает значения  $\sim 10^{-5}$ .

Исследуемая резонансная система также может быть использована для измерения образцов в виде поликоровых пластин с нанесёнными нанометровыми металлическими слоями различной толщины.

Толщины нанесенных нанометровых металлических слоев были измерены на атомно-силовом микроскопе AFM5600 Agilent Technologies.

На рис. 6 представлены измеренные на различных фиксированных частотах (1–  $f = 10,511$  ГГц, 2–  $f = 10,520$  ГГц, 3–  $f = 10,521$  ГГц, 4–  $f = 10,526$  ГГц) в окрестности минимума коэффициента отражения зависимости коэффициента отражения СВЧ-волны от толщины нанометрового металлического слоя на поликоровых пластинах, размещаемых у острия зонда.

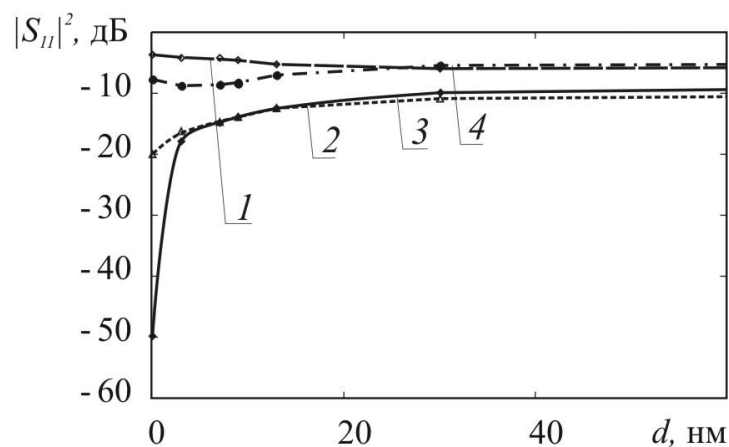


Рисунок 3

При выборе частоты измерений, соответствующей минимуму коэффициента отражения при размещении у острия зонда поликоровой пластины без металлического слоя, диапазон изменений коэффициента отражения максимален и составляет  $\sim 49,8$  дБ. Измеренная чувствительность  $\partial S_{11}/\partial d$  монотонно убывает с ростом толщины металлического слоя ( $Cr$ )  $d$  в диапазоне значений от 0 до 180 нм. При этом в диапазоне значений  $d$  от 0 до 3 нм величина  $\partial S_{11}/\partial d$  составляет  $\sim 10,6$  дБ/нм, а разрешающая способность  $\Delta d/d$  достигает значения  $\sim 10^{-3}$ . При измерении плёнок  $TaAlN$ , нанесённых на поликоровую подложку, чувствительность  $\partial S_{11}/\partial d$  составляет 1,35 дБ/нм в диапазоне значений  $d$  от 0 до 20 нм.

Таким образом, показана возможность использования одномерного фотонного кристалла с нарушением периодичности в качестве перестраиваемого резонатора, обеспечивающего управление резонансными особенностями в спектре отражения зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе цилиндрического резонатора с рамочным элементом связи.

Показана высокая чувствительность данного типа зонда к изменению параметров исследуемых диэлектрических пластин с различными значениями диэлектрической проницаемости, достигающая значения 39,5 дБ/ $\varepsilon$ , и толщин нанометровых металлических слоев, нанесенных на диэлектрические пластины, достигающая значения 10,6 дБ/нм, что

позволяет реализовать возможность контроля параметров данного типа структур, размещаемых как на фиксированном расстоянии вблизи острия зонда, так и в режиме касания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, грантом Правительства РФ для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования 11.G34.31.0030, ФЦП “Научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009-2013 годы ГК № 16.740.11.0512.

#### Библиографический список

1. Yablonovitch E., Gmitter T. J., Meade R. D., Rappé A. M., Brommer K. D., and Joannopoulos J. D. Donor and acceptor modes in photonic band structure // *Phys. Rev. Lett.*, vol. 67, no. 24, pp. 3380–3383, Dec. 1991.
2. Crystal Gerard W. Burns, Thayne I.G., Arnold J.M. Improvement of Planar Antenna Efficiency When Integrated With a Millimetre-Wave Photonic // *Proc. of European Conf. on Wireless Technology (Amsterdam, Netherlands, 11–12-th October 2004)*. 2004. P. 229–232.
3. Pattern Hsien-Shun Wu, Ching-Kuang C. Tzuang. Miniaturized High-Gain Synthetic Rectangular Waveguide Antenna of Near-Omnidirectional Radiation // *Proc. of 34-rd European Microwave Conf. (Amsterdam, Netherlands, 12–14-th October 2004)*. 2004. Vol. 2. P. 1189–1192.
4. Kuriazidou C.A., Contopanagos H.F., Alexopolos N.G. Monolithic waveguide filters using printed photonic-bandgap materials // *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*. 2001. Vol. 49, N 2. P. 297–306.
5. Klymyshyn David M., Jayatilaka Himal C., Börner Martin, and Mohr Jürgen. High Aspect-Ratio Coplanar Waveguide Wideband Bandpass Filter With Compact Unit Cells // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. Vol. 57, No. 11. November 2009. P. 2753–2760.
6. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Скворцов В.С., Мерданов М.К. Использование волноводных фотонных структур для измерения параметров нанометровых металлических слоев на изолирующих подложках // *Известия вузов. Электроника*. 2007. №6. С. 25–32.
7. Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Постельга А.Э., Пономарев Д.В. Определение параметров тонких полупроводниковых слоев с использованием одномерных СВЧ фотонных кристаллов // *Доклады Академии Наук*. Т. 443, № 5, Апрель 2012, С. 564-566.
8. Anlage S. M., Steinhauer D. E., Feenstra B. J., Vlahacos C. P. and Wellstood F. C. “Near-field microwave microscopy of materials properties” in *Microwave Superconductivity*. Eds. H. Weinstock and M. Nisenoff. Amsterdam. The Netherlands: Kluwer, 2001. P. 239–269.
9. Усанов Д.А. Ближнеполевая сканирующая СВЧ-микроскопия и области её применения. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2010. 100 с.
10. Усанов Д. А., Горбатов С. С. Эффекты ближнего поля в электродинамических системах с неоднородностями и их использование в технике СВЧ. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2011. 392 с.
11. Усанов Д.А., Орлов В.Е., Безменов А.А. Рамочные элементы связи в волноводе // *Электронная техника. Электроника СВЧ*. 1977. Вып.3. С. 37-41.