Вестник Физико-технического института Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского Том 1 (67–69). \mathbb{N} 2. 2017. С. 66–71 Journal of Physics and Technology Institute of V. I. Vernadsky Crimean Federal University Volume 1 (67–69). No. 2. 2017. Р. 66–71

УДК 537.87

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАТОРНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ КОНЦЕНТРАТОРОМ

Полетаев Д. А.*, Соколенко Б. В.

Физико-технический институт, Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского, Симферополь 295007, Россия *E-mail: poletaevda@cfuv.ru

В работе рассматривается предложенная конструкция апертуры измерительного преобразователя с концентратором электрического поля. Проведен теоретический расчет и анализ данной структуры. Осуществлено численное моделирование распределения модуля напряженности электрического поля вблизи апертуры при различных параметрах измерительной апертуры. Численная модель базируется на прямом численном методе конечных элементов. В результате численного моделирования выявлено повышение локализации модуля напряженности электрического поля вблизи апертуры.

Ключевые слова: СВЧ, измерительный преобразователь, апертура, коаксиальный волновод, численное моделирование.

PACS: 98.80. $\pm k$

введение

Весьма перспективным методом СВЧ диагностики является метод микроволновой микроскопии. Это обусловлено высокой чувствительностью, неразрушаемостью объекта исследования при проведении исследований, экспрессностью, бесконтактностью, возможностью исследования не только поверхности образца, но и объемной приповерхностной области [1]. Метод микроволновой микроскопии широко применяется для исследования высокотемпературных сверхпроводников, диэлектриков, полупроводников, малоразмерных биообъектов [1]. Основным элементом микроволнового микроскопа является измерительный преобразователь (ИП) [2]. Наиболее чувствительными являются резонансные ИП [2]. Апертура измерительного преобразователя предназначена для осуществления взаимодействия поля ИП с образцом, а также для согласования выходного сопротивления ИП с сопротивлением образца. На сегодняшний день широко применяется коаксиальная апертура [2]. Это обусловлено ее простотой и возможностью регулировки связи с образцом в широких пределах.

Электрофизические параметры образца (относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь) взаимодействуя с резонансным измерительным преобразователем посредством апертуры изменяет его информационные параметры: добротность и резонансную частоту [1, 2].

Пространственное разрешение современных микроволновых микроскопов уступает аналогичному параметру оптических и атомно-силовых [1]. Это связано с невозможностью одновременно увеличить локализацию зондирующего электрического поля в подапертурной области и обеспечить высокую

чувствительность [2]. Ранние схемы микроволновых микроскопов применяли в качестве измерительного преобразователя чисто четвертьволновый коаксиальный резонатор [1]. Пространственное разрешение таких приборов составляло около 10 мкм [1]. Для коаксиальной апертуры с заостренной центральной жилой наблюдается эффект «громоотвода» [1]. Данный эффект состоит в высокой концентрации электрического поля на острие. Это позволяет увеличить всего микроволнового микроскопа. Явление пространственное разрешение обусловливается обратно пропорциональной зависимостью напряжённости электрического поля радиуса проводника, аналогично от острия электростатическому случаю [3]. Недостаток данной конструкции состоит в значительных излучательных потерях, а, следовательно, малой разрешающей способности и низкой добротности всего измерительного преобразователя. Для усиления локализации электрического поле и уменьшения излучения из открытого торца разработана апертура в виде сужающегося коаксиала [1]. Такая конструкция позволяет получить пространственное разрешение для диэлектрических материалов около 1 мкм.

В оптике широко используются оптический линзы [4]. Эти объекты осуществляют фокусировку электромагнитной волны в подапертурной области. возможность целесообразным Представляется исследовать увеличения пространственного разрешения измерительного преобразователя для микроволнового микроскопа за счет повышения степени локализации зондирующего электрического поля в подапертурной области при использовании диэлектрического концентратора.

Целью работы является численное исследование конструкции измерительного преобразователя с диэлектрическим концентратором для микроволнового микроскопа.

1. ИССЛЕДУЕМАЯ МОДЕЛЬ

Общий вид коаксиальной апертуры с диэлектрической линзой для измерительного преобразователя приведен на рис. 1. Она включает отрезок коаксиального волновода, длиной L, состоящий из центральной жилы, с радиусом R_1 и внутренним радиусом R_2 . На торце апертуры помещена полусфера, радиусом R из диэлектрика с относительной диэлектрической проницаемостью \mathcal{E} . Торец апертуры нагружен на свободное пространство. Одномодовый режим Т-волны коаксиальной линии обеспечивается на частотах [5]:

$$f < c/\pi (R_1 + R_2)$$
, (1)

где с – скорость света в вакууме.

Параметры коаксиальной апертуры (по рис. 1) выбраны, согласно (1), данных литературных источников [1–3] следующими: $R_2/\lambda = 0.05$; $R_1/R_2 = 0.01$; $L/\lambda = 0.4$; $R = R_1$, при $\lambda = 8$ мм. Материал стенок коаксиального волновода и центральной жилы – идеальный проводник.



Рис. 1. Коаксиальная апертура измерительного преобразователя

Распределение электромагнитных полей вблизи апертуры рассчитывалось прямым численным методом конечных элементов [6]. При этом пространство модели разбивалось на ряд тетраэдров, в каждом из которых решались следующие волновые уравнения методом конечных элементов [6]:

$$\nabla \times \left(\mu^{-1} \nabla \times \mathbf{E} \right) - k^2 \varepsilon \mathbf{E} = 0 , \qquad (2)$$

$$\nabla \times \left(\mu^{-1} \nabla \times \mathbf{H} \right) - k^2 \varepsilon \mathbf{H} = 0, \qquad (3)$$

где Е – вектор напряженности электрического поля; k – комплексное волновое число; \mathcal{E} – комплексная диэлектрическая проницаемость; μ – относительная магнитная проницаемость; **H** – вектор напряженности магнитного поля.

Граничные условия имели вид [6]:

$$\mathbf{E}_{T} = Z_{s}(\mathbf{n} \times \mathbf{H}_{T}), \qquad (4)$$

где \mathbf{E}_{T} , \mathbf{H}_{T} – тангенциальная компоненты вектора напряженности электрического и магнитного полей, соответственно; Z_{s} – поверхностное сопротивление; \mathbf{n} – единичный вектор нормали к поверхности.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 представлена рассчитанная численным методом зависимость нормированных на максимальное значение модуля напряженности электрического поля модулей напряженности электрического поля от расстояния у до точки о (на рис. 1) при изменении относительной диэлектрической проницаемости \mathcal{E} полусферы. На графиках (по рис. 2) явно заметен скачок модуля напряженности электрического поля на границе раздела сред с различными относительными диэлектрического поля достигает своего максимума для полусферы с $\mathcal{E} = 12$ на расстоянии равном радиусу центральной жилы.

На рис. 3 представлена рассчитанная численным методом зависимость нормированных на максимальное значение модуля напряженности электрического поля модулей напряженности электрического поля от расстояния х до точки о (на рис. 1) при изменении относительной диэлектрической проницаемости \mathcal{E} полусферы на расстоянии $y = R_1$. Наилучшая фокусировка наблюдается для полусферы с $\mathcal{E} = 12$.



Рис. 2. Распределение напряженности электрического вблизи апертуры поля по вертикали



Рис. 3. Распределение напряженности электрического поля вблизи апертуры по горизонтали

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена конструкция апертуры для измерительного преобразователя микроволнового микроскопа с диэлектрическим концентратором. Построена ее численная модель, получены результаты. На их основании сделан вывод об увеличении степени локализации электрического поля в подапертурной области.

Результаты работы могут быть применены для проектирования апертур для измерительных преобразователей современных микроволновых микроскопов. В дальнейшем планируется исследовать зависимость степени локализации электрического поля от геометрических размеров полусферы.

Список литературы

- 1. Chen L., Ong C., Neo C. Microwave electronics measurement and materials characterization. Southern Gate, John Wiley & Sons Ltd, 2004. 537 p.
- 2. Gordiyenko Yu. Ye., Gud Yu. I., Poletaev D. A. Influence of oscillatory and radiation losses on the characteristics of microwave converters with coaxial measurement aperture // Telecommunications and radio engineering. 2011. No. 2, P. 149–157.
- Gordienko Yu. E., Gud Y. I., Larkin S. Y., Slipchenko N. I. Resolution of cavity probes of scanning microwave microscopy // Conference proceedings of 22nd International Crimean conference microwave and telecommunication technology. 2012. Vol. 1. P. 619–620.
- 4. Sokolenko B., Poletaev D., Rubass A., Volyar A. The conversion of phase structure of singular beams spreading in uniaxial crystal // Journal of Physics. 2016. Vol. 735, No. 1. P. 1–5.
- Кураев А. А., Попкова Т. Л., Синицын А. К. Электродинамика и распространение радиоволн. Минск, бестпринт, 2013. – 500 с.
- 6. Григорьев А. Д. Электродинамика и техника СВЧ. Москва, высшая школа, 1990. 335 с.

MODELING PARAMETERS OF RESONATOR MEASURING CONVERTER

WITH DIELECTRIC CONCENTRATOR

Poletaev D. A.^{*}, Sokolenko B. V.

Physics and Technology Institute, V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol 295007, Russia

*E-mail: poletaevda@cfuv.ru

In the article construction of a resonator measuring converter with an electric field concentrator is considered. The method of microwave microscopy is a very promising method because of it high sensitivity and expressness. This method does not destroy the sample. The method of microwave microscopy is widely used to study high-temperature superconductors, dielectrics, semiconductors, small-sized bioobjects. The main element of the microwave microscope is a measuring converter. The most sensitive are the resonant measuring converters. The aperture of the measuring converter is construted for the interaction of the field with the sample, and also for matching the output resistance with the sample resistance. Today, a coaxial aperture is widely used because of of it simplicity. Electrophysical parameters of the sample (relative dielectric constant and loss angle tangent) affect to converters information parameters (q-factor and resonant frequency). The spatial resolution of modern microwave microscopes is less than in optical and atomic-force microscopes. There are impossible to increase the localization of the probing electric field and provide high sensitivity simultaneously. The early models of microwave microscopes used a quarter-wave coaxial resonator as a measuring converter. The spatial resolution of such devices was about 10 µm. For a coaxial aperture with a pointed central core, the effect of a "lightning rod" is observed. This effect consists in a high concentration of electric field on the tip. This allows to increase the spatial resolution of the whole microwave microscope. The disadvantage of this construction is big radiative losses, and low quality factor of the entire measuring converter. Optical lenses are widely used in optics. It seems useful to investigate the possibility of increasing the spatial resolution of the measuring converter for a microwave microscope by increasing the localization of the probe electric by using a dielectric concentrator. The aim of the work is modelling the parameters of measuring converter with a dielectric concentrator. Keywords: microwave, measuring converter, aperture, coaxial waveguide, modelling.

References

- 1. L. Chen, C. Ong, C. Neo, *Microwave electronics measurement and materials characterization* (Southern Gate, John Wiley & Sons Ltd, 2004) 537 p.
- 2. Yu. Ye. Gordiyenko, Yu. I. Gud, D. A. Poletaev, *Telecommunications and radio engineering*, No. 2 149–157 (2011).
- 3. Yu. E. Gordienko, Y. I. Gud, S. Y. Larkin, N. I. Slipchenko, "Resolution of cavity probes of scanning microwave microscopy" in *Conference proceedings of 22nd International Crimean conference microwave and telecommunication technology* (Vol. 1; 2012) Pp. 619–620.
- 4. B. Sokolenko, D. Poletaev, A. Rubass, A. Volyar, *Journal of Physics* 735, No. 1, 1–5 (2016).
- 5. A. A. Kuraev, T. L. Popkova, A. K. Sinicyn, *Ehlektrodinamika i rasprostranenie radiovoln* [*Electrodynamics and propagation of radio waves*] (Minsk : Bestprint, 2013) 500 p. [in Russian].
- 6. A. D. Grigorev, *Ehlektrodinamika i tekhnika SVCH* [*Electrodynamics and microwave technique*]. (Moskva : Vysshaja Shkola, 1990) 335 p. [in Russian].

Поступила в редакцию 24.06.2017 г. Принята к публикации 26.11.2017 г. Received June 24, 2017. Accepted for publication November 26, 2017

