

УДК 53.082.74
EDN: PPRLZS

PACS: 06.30. Вр



Исследование применения ближнепольного СВЧ-зондирования для регистрации малых поперечных смещений неоднородной диэлектрической пластины

А. А. Аджибеков, О. А. Алексеев, А. А. Жуков

Проведено численное моделирование малых поперечных смещений неоднородной диэлектрической пластины относительно ближнепольного многомодового СВЧ-зонда на основе линии передачи в виде квадратного волновода, заполненного фторопластом, с размещенным внутри соосным коаксиальным волноводом. Размеры волноводов и рабочий диапазон частот выбраны таким образом, чтобы в пространстве между стенками квадратного волновода и экраном коаксиального могли распространяться моды типа TEM, H₁₀ и H₀₁. На одном из торцов квадратного волновода предусмотрен металлический экран с субволновым отверстием. Численными методами проведено исследование взаимодействия зонда с диэлектрической пластиной с расположенным на ней модельным металлическим квадратом. Получены коэффициенты преобразования основной моды TEM в моды H₁₀ и H₀₁ в зависимости от смещения пластины с неоднородностью относительно зонда в плоскости квадрата. Полученные при расчете величины коэффициентов преобразования мод составляют до -30 дБ и достаточны для обнаружения их средствами измерений. Предложенная конструкция может быть использована для измерения малых поперечных смещений с точностью около 1–2 % длины волны (0,3 мм для частоты 20 ГГц (длина волны 1,5 см)).

Ключевые слова: ближнепольное СВЧ-зондирование, квадратный коаксиальный волновод.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-2-91-95

Введение

В настоящее время в ряде высокотехнологичных устройств, например, в устройствах

электроники, микроэлектроники, интегральной оптики и других, требуется построение различных слоистых металлодиэлектрических структур с высокими требованиями по точности позиционирования слоев относительно друг друга [1–3]. При этом, в качестве методов контроля точности совмещения при изготовлении таких структур применяются, как правило, специальные оптические или рентгеновские установки [1]. Первые не могут обеспечить контроля точности совмещения оптически непрозрачных структур без специальных меток совмещения, вторые, как правило, не обеспечивают возможности работы в реальном времени. В этой связи, представляет интерес использование для измерения смещения электромагнитных полей ВЧ и СВЧ-диапазона. Эти поля проникают сквозь большинство применяемых диэлектрических материалов, существующая аппаратура их генера-

Аджибеков Артур Александрович¹, вед. инженер-исследователь.

E-mail: contact@spacesorp.ru

Алексеев Олег Александрович¹, гл.н.с., д.т.н.

E-mail: Centr31@spacesorp.ru

Жуков Андрей Александрович^{1,2}, гл.н.с., д.т.н., и. о. зав. кафедрой.

E-mail: zhukov.aa@spacesorp.ru

¹ АО «Российские космические системы».

Россия, 111250, Москва, ул. Авиамоторная, 53.

² Московский авиационный институт

(национальный исследовательский университет).

Россия, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4.

Статья поступила в редакцию 4.12.2023

После доработки 20.02.2024

Принята к публикации 6.03.2024

Шифр научной специальности: 1.3.4

ции и детектирования освоена в производстве и обладает высокой стабильностью характеристик и чувствительностью. Известны многочисленные результаты применения ближнепольного зондирования, в том числе, СВЧ-диапазона, в системах неразрушающего контроля и диагностики [3–10]. В публикациях, посвященных этой тематике, достигнута разрешающая способность, обеспечивающая возможность наблюдения контрастных объектов с размером, на несколько порядков меньше, чем длина волны зондирующего сигнала. Большинство подобных систем являются сканирующими и не могут обеспечить оперативности измерения сдвигов. В [8–10] основным элементом установок, применяемых для получения изображений исследуемых объектов, является зонд, как правило, представляющий собой отрезок коаксиального волновода с острым штырем, либо заостренный отрезок ленточной линии. Для повышения чувствительности зонд нагружается на высокочастотный резонатор. Линии передачи, используемые для построения зондов, как правило являются одномодовыми с основной модой типа ТЕМ. В [11] представлен зонд на основе компланарного волновода, в котором возможно существование двух мод, при этом информативным параметром наряду с коэффициентом отражения основной моды является также коэффициент преобразования мод.

В настоящей работе представлена конструкция зонда, представляющая развитие идеи, предложенной в [11], позволяющая измерять малые поперечные смещения в двух ортогональных направлениях параллельно пластине. Целью работы является исследование обмена энергией между модами в зонде предложенной конструкции при зондировании диэлектрической пластины с модельной неоднородностью. Для этого требуется определить зависимости коэффициентов преобразования мод зонда от его положения относительно диэлектрической пластины.

Конструкция ближнепольного многомодового зонда и численное моделирование

В качестве объекта исследований используется система «зонд-диэлектрическая

пластина» (рис. 1). Зонд представляет собой многомодовую линию передачи в виде квадратного волновода, заполненного фторопластом 1, с размещенным внутри соосным коаксиальным волноводом 2. Основные размеры (ширина квадратного волновода и диаметр экрана коаксиального волновода), а также рабочий диапазон частот выбраны таким образом, чтобы в пространстве между стенками квадратного волновода и экраном коаксиального могли распространяться волны типа ТЕМ, Н₁₀ и Н₀₁. Со стороны торца волновод закрыт металлическим экраном 3 с малым по сравнению с длиной волны отверстием (размеры отверстия составляют около одной тридцатой длины волны). На расстоянии от экрана в квадратном волноводе расположена металлическая диафрагма 4, так что пространство между экраном и диафрагмой образует резонатор. Диэлектрическая проницаемость пластины 5, взятая для расчета, составляет 2,1. В центре пластины на расстоянии 0,05 мм от экрана расположена модельная неоднородность в виде металлического квадрата 6 размером 0,5×0,5 мм.

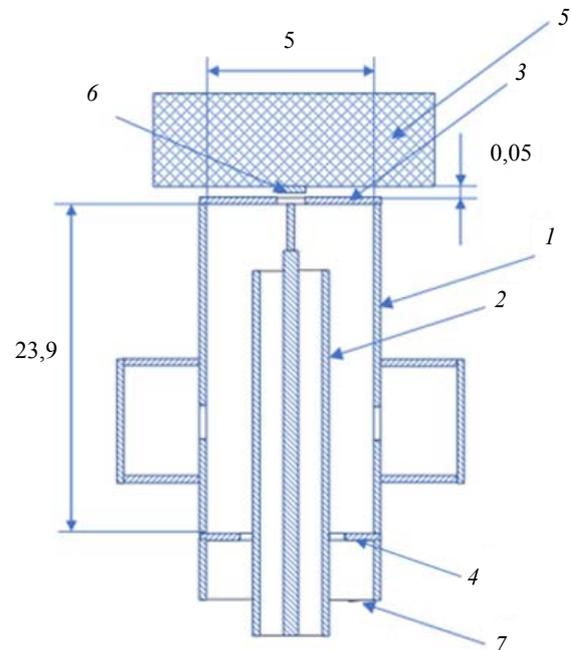


Рис. 1. Конструкция ближнепольного многомодового зонда (размеры приведены в миллиметрах): 1 – квадратный волновод; 2 – коаксиальный волновод; 3 – металлический экран; 4 – диафрагма; 5 – диэлектрическая пластина; 6 – металлический квадрат; 7 – плоскость регистрации поля

При вводе в зонд нижней моды ТЕМ из коаксиального волновода в отверстии экрана 3

формируется переменное электромагнитное поле. Ввиду того, что размеры отверстия малы по сравнению с длиной волны, волна ТЕМ практически полностью отражается от экрана и попадает в квадратный волновод. В отсутствие неоднородностей в ближней зоне отверстия, мода ТЕМ не может обмениваться энергией с другими модами, и коэффициенты преобразования моды ТЕМ из коаксиального волновода в моду Н10 или Н01 квадратного волновода равны нулю. Подобная картина должна наблюдаться в случае, если рядом с отверстием отсутствует какой-либо объект с электродинамическими характеристиками, отличными от характеристик свободного пространства, либо если объект присутствует, но однороден, и симметричен, причем ось симметрии совпадает с осью волновода. Смещение объекта в поперечном направлении нарушает симметрию системы, делая обмен энергией между модами возможным. Для определения зависимостей коэффициентов преобразования моды ТЕМ в моды Н10 и Н01 квадратного волновода от поперечных смещений диэлектрической пластины проводилось решение системы уравнений Максвелла [12] для структуры, представленной на рисунке 1. Решение уравнений выполнялось численно, методом конечных разностей в частотной области [12, 13]. В процессе расчета определя-

лись коэффициенты преобразования моды ТЕМ в моды Н10 и Н01 в диапазоне частот 19–21 ГГц ($\lambda = 1,5$ см) в зависимости от положения зонда относительно модельного металлического квадрата диэлектрической пластины.

Результаты моделирования

На рисунке 2 представлены полученные при расчете величины коэффициентов преобразования при плоском перемещении пластины вдоль осей X и Y . Как видно из рисунка, наличие неоднородности в виде металлического модельного квадрата над отверстием экрана на расстоянии 0,05 мм может приводить к частичному преобразованию моды ТЕМ в моды Н01 и Н10. При отсутствии смещения квадрата преобразование отсутствует. При смещении вдоль оси Y растет коэффициент преобразования моды ТЕМ в моду Н01, а коэффициент преобразования моды ТЕМ в моду Н10 меняется мало (рис. 2а). Смещение вдоль оси X ведет к увеличению коэффициента преобразования моды ТЕМ в моду Н10, в то время как коэффициент преобразования моды ТЕМ в моду Н01 практически не изменяется (рис. 2б). Максимальное значение коэффициентов преобразования достигает -30 дБ (максимально светлые пиксели) для каждой из мод.

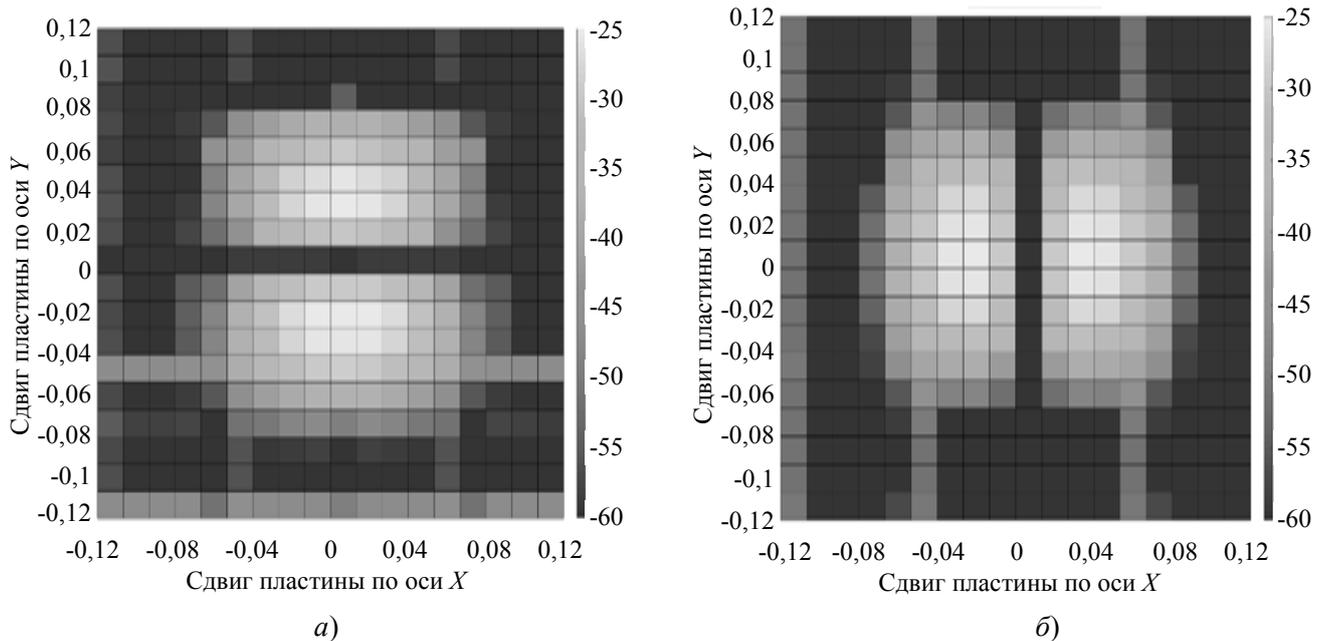


Рис. 2. Изменение коэффициента преобразования моды ТЕМ в моду Н01 (а) и в моду Н10 (б) при сдвиге (на осях смещение измеряется в длинах волн) диэлектрической пластины относительно зонда по осям x и y

Заключение

Проведено исследование взаимодействия многомодового зонда с диэлектрической пластиной с модельной неоднородностью в виде металлического квадрата. Численными методами получены коэффициенты преобразования моды зонда ТЕМ в моды Н10 и Н01 в зависимости от взаимного расположения отверстия экрана зонда и металлической неоднородности диэлектрической пластины. В непосредственной близости от неоднородности величины коэффициентов преобразования мод составляют до -30 дБ, что является достаточным уровнем для их непосредственного измерения с помощью современной измерительной аппаратуры. Такая возможность регистрации наведенных мод решает заявленную задачу регистрации малых поперечных смещений в двух ортогональных направлениях параллельно плоскости пластины. Предложенная конструкция может быть использована для измерения малых (порядка 1–2 % длины волны, т. е. 0,3 мм для частоты 20 ГГц и длины волны 1,5 см) поперечных смещений. Результаты работы могут быть использованы в системах позиционирования при сборке металлодиэлектрических многослойных структур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фарахи Э., Горшков А. / Технологии в электронной промышленности. 2013. № 5. С. 76–80.
2. Palto S. P., Barnik M. I., Geivandov A. R., Kasyanova I. V., Palto V. S. / J. Display Tech. 2016. Vol. 12. Iss. 10. P. 992.
3. Гейвандов А. Р., Барник М. И., Палто В. С., Симдянкин И. В., Палто С. П. / Кристаллография. 2018. Т. 63. Вып. 6. С. 928.
4. Synge E. H. / Phil. Magazine. 1928. Vol. 12. P. 356.
5. Soohoo R. F. / Appl. Phys. 1962. Vol. 33. Iss. 3. P. 1276.
6. Rosner B. T. / Rev Sci. Instrum. 2002. Vol. 73. Iss. 7. P. 2505.
7. Angale S. M., Talanov V., Scwartz A. R. / Journal of scanning probe microscopy. 2006. Vol. 1 (17). P. 207.
8. Королев С. А. Микроволновая микроскопия полупроводниковых структур: Автореф. дисс. канд. физ.-мат. наук. – Нижний Новгород, институт физики микроструктур РАН, 2018.
9. Галин М. А. Ближнепольное СВЧ зондирование плоскостойких сред и трёхмерных объектов: Автореф. дисс. канд. физ.-мат. наук. – Нижний Новгород, институт физики микроструктур РАН, 2015.
10. Гайкович К. П., Смирнов А. И., Максимович Е. С., Бадеев В. А. / Журнал радиоэлектроники. 2020. Т. 8.
11. Шитов С. В. Бесконтактный датчик микро-рельефа. Патент на изобретение № 2688902 С1 (РФ). 2019.
12. Никольский В. В., Никольская Т. И. Электродинамика и распространение радиоволн: учеб. пособие для вузов. – М.: «Наука», 1989.
13. Гринев А. Ю. Численные методы решения прикладных задач электродинамики: учеб. пособие для вузов. – М.: «Радиотехника», 2012.

PACS: 06.30. Bp

Numerical simulation of small transverse displacements of an inhomogeneous dielectric plate

A. A. Adzhibekov¹, O. A. Alekseev¹ and A. A. Zhukov^{1,2}

¹ Russian space systems

Bd. 1, 53 Aviamotornaya st., Moscow, 111250, Russia

E-mail: contact@spacecorp.ru, Centr31@spacecorp.ru, zhukov.aa@spacecorp.ru

² Moscow Aviation Institute (National Research University)
4 Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russia

Received 4.12.2023; revised 20.02.2024; accepted 6.03.2024

Numerical simulation is carried out of small transverse displacements of an inhomogeneous dielectric plate relative to a near-field multiple mode microwave probe based on a square

waveguide filled with Teflon with a coaxial waveguide placed inside. The probe dimensions and the operating frequency range are selected so that TEM, TE₁₀ and TE₀₁ modes can propagate in the space between the walls of the square waveguide and the screen of the coaxial one. A metal screen with a subwavelength hole is provided at one of the ends of the square waveguide. Numerical methods have been used to study the interaction of a probe with a dielectric plate with a model metal square located on it. The conversion coefficients of the main TEM mode into TE₁₀ and TE₀₁ modes are obtained depending on the displacement of the plate with inhomogeneity relative to the probe in the plane of the square. The values of the mode conversion coefficients obtained during the calculation are up to -30 dB and are sufficient to detect them by measuring instruments. The proposed design can be used to measure small transverse displacements with an accuracy of about 1–2 % of the wavelength (0.3 mm for a frequency of 20 GHz (wavelength of 15 cm)).

Keywords: near-field microwave sensing, square coaxial waveguide.

REFERENCES

1. Farachi E. and Gorshkov A., Technologies in electronic industry, № 5, 76–80 (2013).
2. Palto S. P., Barnik M. I., Geivandov A. R., Kasyanova I. V. and Palto V. S., J. Display Tech. **12** (10), 992 (2016).
3. Geyvandov A. R., Barnik M. I., Palto V. S., Simdyankin I. V. and Palto S. P., Crystallography **63** (6), 928 (2018).
4. Synge E. H., Phil. Magazine **12**, 356 (1928).
5. Soohoo R. F., Appl. Phys. **33** (3), 1276 (1962).
6. Rosner B. T., Rev Sci. Instrum. **73** (7), 2505 (2002).
7. Angale S. M., Talanov V. and Swartz A. R., Journal of scanning probe microscopy **1** (17), 207 (2006).
8. Korolev S. A., Microwave microscopy of semiconductor structures, abstract of the cand. dis. (Institute of Microstructure Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, 2018.).
9. Galin M.A., Near-field microwave sounding of plane-layered media and three-dimensional objects: Abstract of the cand. dis., Nizhny Novgorod, Institute of Physics of Microstructures of the Russian Academy of Sciences, 2015.
10. Gaikovich K. P., Smirnov A. I., Maksimovich E. S. and Badeev V. A., Journal of Radioelectronics **8** (2020).
11. Shitov S. V. Contactless micro relief sensor. Patent of the Russian Federation. RU 2688902 C1 22.05.2019.
12. Nikolsky V. V. and Nikolskaya T. I., Electrodynamics and radio wave propagation: textbook for universities, Moscow, "Science", 1989.
13. Grinev A. Y., Numerical methods for solving applied problems of electrodynamics: textbook for universities, Moscow, "Radio engineering", 2012.