

УДК 53.082.74

А.С. Запасной, В.П. Беличенко, А.С. Мироньчев

## Исследование возможностей применения макета ближнепольного интерференционного микроволнового микроскопа для задач гигроскопии и дефектоскопии

Обсуждается схемное решение ближнепольного интерференционного микроволнового микроскопа – прибора нового типа. Это схемное решение реализовано в виде максимально упрощенного по структуре действующего макета. Результаты тестовых испытаний по выявлению возможностей микроскопа показали, что его целесообразно использовать при решении задач гигроскопии и дефектоскопии, исследовании предметов культурного наследия, а также в медицине.

**Ключевые слова:** ближнепольная диагностика, интерференционный поток энергии, эванесцентные поля, микроволновый микроскоп, гигроскопия, дефектоскопия.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2017-20-4-17-19

Сфера применений ближнепольной микроволновой микроскопии все больше расширяется [1–7]. В настоящее время в ее рамках решаются также проблемы, встречающиеся в медицине [8], и при исследовании предметов культурного наследия [9]. Однако в современных микроскопах реализуется режим зондирования с использованием одного зонда. Это замечание в равной мере относится как к приборам, оснащенным резонансными зондами, так и к приборам, в которых применяются нерезонансные зонды (как правило, в виде открытых концов коаксиальных линий различного сечения) [10]. В то же время исследования, проведенные в [11–13], демонстрируют целесообразность осуществления зондирования перекрывающимися ближними (эванесцентными) полями систем излучателей. Потенциальные возможности такого метода зондирования обсуждаются в данной работе.

### 1. Методика и техника эксперимента

Макет предлагаемого микроволнового интерференционного микроскопа содержит следующие основные элементы: анализатор цепей PNA-L Network Analyzer (N5230C) компании Agilent Technologies, полоса рабочих частот которого составляет 10 МГц – 40 ГГц; коаксиальные линии переменного сечения, выполненные в виде коаксиальных конических рупоров; делитель мощности; дополнительные отрезки линии передачи (рис. 1). Анализатор цепей позволяет производить измерения с высокой скоростью и большой точностью, а правильная калибровка обеспечивает корректировку двенадцати составляющих погрешности.

Макет работает следующим образом. Сигнал от анализатора цепей по коаксиальному кабелю поступает на делитель мощности, работающий на частотах 10 МГц – 7 ГГц и при мощности до 0,5 Вт. После делителя мощности сигналы поступают на входы коаксиальных конических рупоров. Апертуры рупоров обращены навстречу друг другу, в зазор между ними помещается исследуемый образец и измеряется коэффициент отражения от входа делителя мощности. Создание требуемого фазового

сдвига между сигналами, поступающими на рупоры, достигается за счет включения в тракт передачи дополнительных отрезков линии передачи, тем самым обеспечивается управление интерференционными потоками энергии, образующимися в перекрывающихся эванесцентных полях коаксиальных конических рупоров. У рупоров диаметр центрального проводника в плоскости апертуры составляет 30 мм, а внутренний диаметр внешнего проводника – 70 мм. Это позволяет при использовании микроволнового излучения с частотами от 10 МГц до 7 ГГц в достаточно широких пределах регулировать размер зоны перекрытия эванесцентных полей таких рупоров в условиях зондирования среды или объекта встречными эванесцентными полями рупоров. Внешний вид макета микроволнового интерференционного микроскопа представлен на рис. 1.



Рис. 1. Макет микроволнового интерференционного микроскопа

Для выявления возможностей предлагаемого макета микроволнового интерференционного микроскопа и оценки качества получаемых с его помо-

щью результатов они сравнивались с результатами измерений, полученными с помощью установки, имеющей только один рупор. При этом все измерения проводились в ближних полях. Таким образом, сопоставлялись результаты измерений, полученные с использованием перекрывающихся (два рупора) и неперекрывающихся (один рупор) эванесцентных полей.

В качестве данных, регистрируемых с анализатора цепей, в обоих случаях выбран комплексный коэффициент отражения. Полоса частот при измерениях составила 500 МГц – 4 ГГц. Шаг дискретизации равен 250 кГц, так как в выбранном диапазоне частот измерения осуществлялись на 14000 точек. Для удобства восприятия во время каждого измерения регистрируемые сигналы нормировались на коэффициент отражения в отсутствие исследуемых образцов. В дальнейшем этот параметр будем обозначать как нормированный коэффициент отражения (НКО, NS11).

## 2. Интерпретация и анализ экспериментальных результатов

Для более детального анализа чувствительности предлагаемого макета выполнена серия экспериментов, касающихся гигроскопических свойств материалов. В одном из экспериментов в качестве исследуемого образца была выбрана пластина эластичного пенополиуретана (поролон) толщиной 25 мм в связи с его пористой структурой и способностью хорошо вбирать в себя воду.

Эксперимент был поставлен следующим образом. После настройки и калибровки установки были получены данные измерений сухой пластины поролон (рис. 2, кривая 1), далее пластина обильно смачивалась до полного намочания, помещалась между рупорами (рис. 2, кривая 2). Кривая 3 на рис. 2 соответствует данным снятым через 5 мин. За это время пластина потеряла достаточное количество воды. Последняя зависимость (рис. 2, кривая 4) была получена из данных, записанных спустя 10 мин после первого измерения пропитанной водой пластины поролон.

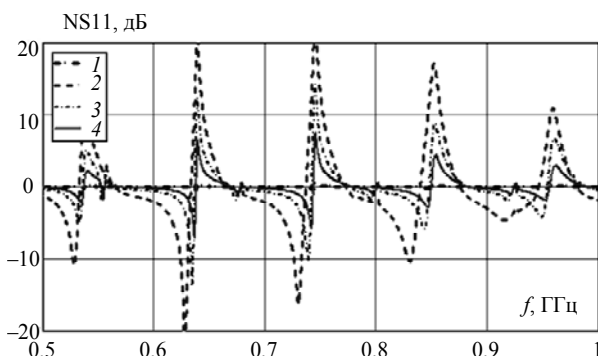


Рис. 2. Зависимость от частоты НКО для увлажненной пластины поролон толщиной 25 мм: 1 – сухая пластина, 2 – увлажненная, 3 – через 5 мин и 4 – через 10 мин после увлажнения

Представленные зависимости наглядно показывают, что предлагаемый в данной работе макет мик-

роволнового интерференционного микроскопа позволяет регистрировать даже незначительные изменения содержания влаги в материалах. Это свойство микроскопа может найти применение при решении задач гигроскопии.

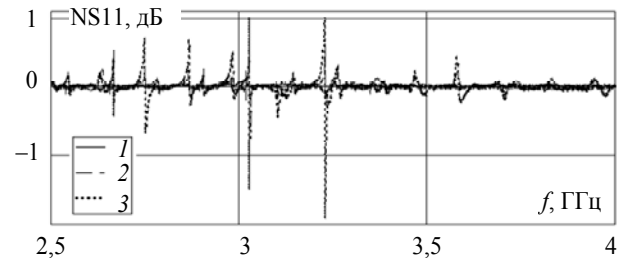


Рис. 3. Зависимость от частоты коэффициента отражения от доски ламината толщиной 5 мм: 1 – сплошной ламинат, 2 – с отверстием диаметром 3 мм, 3 – с отверстием диаметром 4 мм

Другая серия экспериментов относилась к выяснению возможностей макета при диагностике качества материалов. Объектами исследований были выбраны изделия из дерева, имеющие те или иные дефекты, в том числе и скрытые. В качестве примера на рис. 3 представлены результаты диагностики доски ламината, имеющей дефекты в виде сквозных отверстий диаметром 3 и 4 мм.

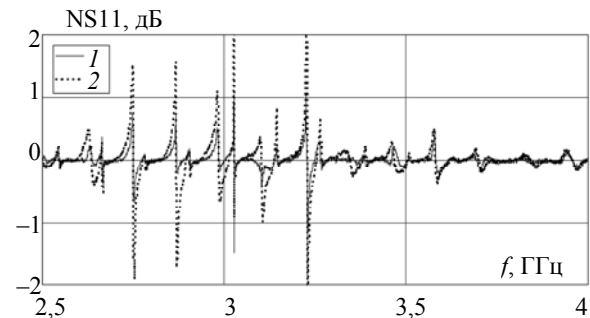


Рис. 4. Зависимость от частоты НКО для доски ламината толщиной 5 мм: 1 – с отверстием диаметром 4 мм, 2 – с отверстием диаметром 10 мм

Как видно, макет позволил надежно обнаруживать подобные дефекты. На рис. 4 показано, как с увеличением диаметра отверстия до 10 мм увеличивается и амплитуда принимаемого сигнала. Существенно подчеркнуть, что дефект диаметром 3–4 мм фиксируется (см. рис. 3 и 4) даже на частоте  $f \approx 2,6$  ГГц используемого электромагнитного излучения (при этом длина волны составляет 11,5 см). Это обстоятельство наглядно показывает весьма существенное преодоление известного фундаментального предела на разрешение «в дальних полях».

Для демонстрации отличий традиционной технологии зондирования от вышеописанной нами проведен эксперимент по диагностике дефекта доски ламината с использованием эванесцентных полей только одного зонда. При этом было обнаружено, что наличие дефекта (даже диаметром 10 мм) крайне слабо влияет на измеренный НКО. Это подтверждает высказанное выше предположение об увели-

чении чувствительности предлагаемой технологии зондирования по сравнению с традиционными.

#### Выводы

По результатам проведенных экспериментов можно сделать выводы о преимуществах использования при ближнепольной диагностике перекрывающихся эванесцентных полей систем излучателей. Прежде всего, можно отметить весьма значительное отличие чувствительности микроволнового интерференционного микроскопа от чувствительности прибора, использующего традиционное конструктивное исполнение. В особенности явственно этот эффект проявился в экспериментах, касающихся гироскопических свойств материалов, а также при обнаружении дефектов изделий из дерева.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации Томской области в рамках научного проекта № 16-42-700942 регионального конкурса (р\_сибирь\_a).

#### Литература

1. Gaikovich K.P. Inverse problem of near-field scattering in multilayer media / K.P. Gaikovich, P.K. Gaikovich // *Inverse Problems*. – 2010. – Vol. 26, No. 12. – P. 125013-20.
2. Reznik A.N. Quasistatics and electrodynamics of near-field microwave microscope // *Journal Applied Physics*. – 2014. – Vol. 115, No. 8. – P. 084501-8.
3. Pseudopulse near-field subsurface tomography / K.P. Gaikovich, P.K. Gaikovich, Ye.S. Maksimovitch, V.A. Badeev // *Physical Review Letters*. – 2012. – Vol. 108, No. 16. – P. 163902.
4. Резонансная ближнепольная СВЧ-диагностика неоднородных сред / А.В. Костров, А.И. Смирнов, Д.В. Янин и др. // *Известия РАН. Сер. Физическая*. – 2005. – Т. 69, № 12. – С. 1716–1720.
5. Диагностика параметров плазмы атмосферного давления методом ближнепольного СВЧ-зондирования / Д.В. Янин, А.В. Костров, А.И. Смирнов и др. // *Журнал технической физики*. – 2012. – Т. 82, № 4. – С. 42–51.
6. Подповерхностная диагностика квазиодномерных неоднородностей методом резонансного ближнепольного СВЧ-зондирования / Д.В. Янин, А.Г. Галка, А.В. Костров и др. // *Изв. вузов. Радиофизика*. – 2014. – Т. 57, № 1. – С. 35–47.
7. Резонансная ближнепольная СВЧ-диагностика неоднородных сред / Д.В. Янин, А.Г. Галка, А.И. Смирнов и др. // *Успехи прикладной физики*. – 2014. – Т. 2, № 6. – С. 555–570.
8. Резник А.Н. Обнаружение контрастных образований внутри биологических сред при помощи ближнепольной СВЧ-диагностики / А.Н. Резник, Н.В. Юрасова // *Журнал технической физики*. – 2006. – Т. 76, № 1. – С. 90–104.
9. Diagnostics and monitoring of frescoes using evanescent-field dielectrometry / R. Olmi, M. Bini, A. Ignesti et al. // *Measurement Science and Technology*. – 2006. – Vol. 17, No 8. – P. 2281–2288.

10. Anlage S.M. Scanning Probe Microscopy: Electrical and Electromechanical Phenomena at the Nanoscale, V. 1 / S.M. Anlage, V.V. Talanov, A.R. Schwartz / Eds. S.V. Kalinin and A. Gruverman. – New York: Springer-Verlag, 2007. – P. 15–253.

11. Беличенко В.П. Управление величиной и пространственным распределением интерференционных потоков энергии в ближних полях систем идентичных излучателей / В.П. Беличенко, А.С. Запасной, П.В. Шестаков // *Оптика и спектроскопия*. – 2015. – Т. 118, № 4. – С. 633–636.

12. Беличенко В.П. Роль эванесцентных полей в процессе формирования излучения комбинированных излучающих систем / В.П. Беличенко, А.С. Запасной, П.В. Шестаков // *Оптика и спектроскопия*. – 2015. – Т. 118, № 4. – С. 630–632.

13. The technology of near-field interference microwave sensing / V.P. Belichenko, A.S. Zapasnoy, A.S. Miron'chev, P.V. Shestakov // *Material Science Forum*. – 2016. – Vol. 870. – P. 730–734.

#### Запасной Андрей Сергеевич

Кандидат физ.-мат. наук, доцент каф. радиофизики (РФ) Национального исследовательского Томского государственного университета (НИ ТГУ)  
Тел.: +7-961-095-96-97  
Эл. почта: zas\_rff@live.com

#### Беличенко Виктор Петрович

Доктор физ.-мат. наук, профессор каф. РФ НИ ТГУ  
Тел.: +7 (382-2) 41-34-63  
Эл. почта: bvp@mail.tsu.ru

#### Мирончев Александр Сергеевич

Аспирант каф. РФ НИ ТГУ  
Тел.: +7 (382-2) 41-34-63  
Эл. почта: mironchev42@mail.ru

Zapasnoy A.S., Belichenko V.P., Mironchev A.S.

#### Research of application possibilities for model of near-field microwave interference microscope to solve the problems in hygrosopy and defectoscopy

The authors discuss the schematic of a near-field microwave interference microscope - a new type of instrument. This circuit design is implemented in the most simplified structure of the current layout. The testing to identify the scope of this microscope is provided. It was shown that the microscope should be used to solve a number of hygroscope and flaw detection problems, investigation of cultural heritage items, and also in medicine.

**Keywords:** near-field diagnostics, interferential spatial scale, interference energy flux, evanescent field, microwave microscope, hygrosopy, defectoscopy.