

Восстановление подповерхностной диэлектрической структуры по СВЧ ближнепольным измерениям¹

В.Л.Вакс, К.П.Гайкович, Ю.Н.Ноздрин, А.Н.Резник

Институт физики микроструктур РАН, ГСП-105, Нижний Новгород, 603950

Разработана система подповерхностного обзора неоднородных диэлектрических сред, основанная на принципе СВЧ микроскопии. Система состоит из электрически малой антенны в качестве зонда, СВЧ рефлектометра, механической системы сканирования и приёмника. Разработан метод обработки изображений, позволяющий реализовать субапертурную разрешающую способность.

1. Введение

Ближнепольная микроскопия поверхности в СВЧ диапазоне впервые была продемонстрирована в работе [1], а потом развита в [2-7]. Соответствующие приборы имели разрешающую способность $\sigma \ll \lambda$, которая была близка к размеру апертуры антенны $D \approx \sigma = \lambda/n$, где λ – рабочая длина волны; $n \gg 1$. Главной целью этих работ было достижение как можно лучшей разрешающей способности путём уменьшения размера апертуры антенны. Для СВЧ ближнепольных микроскопов типичное значение n составляло $10^2 - 10^3$, а максимальное значение $n \approx 10^5$ получено в [5]. Следует отметить, что возрастание n приводит к уменьшению глубины зондирования h , для которой также справедливо условие $h \sim D$. Таким образом, большая глубина зондирования, которая является важным преимуществом СВЧ диапазона, теряется, когда стремятся довести до предела разрешающую способность измерений. В данной работе мы разработали СВЧ ближнепольную систему с относительно небольшой разрешающей способностью ($n \sim 10^2$) именно с целью подповерхностного зондирования, а для частичной компенсации потерь в разрешении использовался специально разработанный метод математической обработки, позволяющий реализовать субапертурное разрешение.

2. Эксперимент

На рис.1 представлена схема СВЧ ближнепольной сканирующей (в горизонтальной плоскости) системы с антенной малой апертуры в качестве зонда, использованной в

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 01-02-16432.

экспериментах. Чувствительный элемент антенны в форме меандра имел размеры $5 \times 6 \text{ мм}^2$ и находился в контакте с микрополосковым резонатором (резонансная частота $f_0 \approx 640 \text{ МГц}$, ширина полосы $\Delta f \approx 15 \text{ МГц}$). Тестовые образцы представляли собой подложки из Al_2O_3 , покрытые плёнкой Cu (толщиной $\sim 100 \text{ нм}$), поверх которых накладывался слой оптически непрозрачного диэлектрика, толщина которого варьировалась. Различные металло-диэлектрические структуры создавались путём удаления медной плёнки с тех или иных участков подложки. Перемещение зонда относительно неоднородностей образца приводило к вариациям эквивалентного импеданса чувствительного элемента и, соответственно, к вариациям резонансной частоты f_0 . Inhomogeneities of the sample dielectric constant lead to variances of f_0 . СВЧ сигнал подавался на частоте, несколько сдвинутой от резонансной. В этом случае можно было измерять вариации коэффициента отражения, связанные со неоднородной структурой образца. Для повышения чувствительности использовалась прямоугольная модуляция СВЧ сигнала на входе антенны на частоте 1 кГц и селективное усиление отраженного сигнала на частоте модуляции. Двумерное сканирование антенны осуществлялось шаговыми двигателями с шагом в x и y -направлениях 125 мкм при максимальном поле обзора $4 \times 4 \text{ см}^2$. Координаты каждого пикселя и результаты измерений считывались в компьютер.

3. Восстановление подповерхностных структур по измеренному изображению

Измеренное изображение образца представляет собой двумерное распределение коэффициента отражения от антенны R_m , которое для рассматриваемых плоско-неоднородных структур может быть выражено (по крайней мере, приблизительно) уравнением двумерной свёртки:

$$R_m(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} K(x - x', y - y') R(x', y') dx' dy' , \quad (1)$$

где $R(x, y)$ - истинное изображение неоднородной структуры образца, $K(x, y)$ – передаточная функция антенны. Влияние передаточной функции антенны приводит к сглаживанию контрастов изображения. Для использованной системы $K(x, y)$ определялась путём сканирования простого одномерного перехода металл-диэлектрик. При этом оказалось, что передаточная функция хорошо аппроксимируется двумерным гауссовым распределением:

$$K(x, y) = \frac{4}{\pi \sigma_x \sigma_y} \exp\left[-4\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\right] \quad (2)$$

где параметры $\sigma_x = 2,3$ мм, $\sigma_y = 3,6$ мм получены из эксперимента при толщине слоя оптически непрозрачного диэлектрика 1 мм. Эти параметры могут рассматриваться как разрешающая способность в x и y -направлениях соответственно. В качестве примера измерений, на основе которых определялся параметр разрешения в y - направлении σ_y , на рис.2 представлено измеренное изображение подповерхностного перехода металл-диэлектрик (отклик на скачок в (1)).

Восстановление изображения подповерхностных структур осуществлялось путём деконволюции (1) с передаточной функцией (2), где в качестве левой части использовалось измеренное распределение коэффициента отражения. Известно, что решение этого интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода является некорректной обратной задачей. Для её решения применялся метод, основанный на принципе обобщённой невязки Тихонова [8].

4. Результаты

Исследования начались с наиболее простых металл-диэлектрических структур, выполненных в форме двух параллельных диэлектрических полос, вытравленных на подложке с металлической плёнкой, под слоем оптически непрозрачного диэлектрика. Ширина полос w была равна расстоянию между ними d ($w = d$).

На рис.3 представлено исходное (слева) и восстановленное из решения (1) изображение структуры. Можно видеть, что резкость восстановленного изображения существенно улучшается. Анализ восстановленного изображения перехода металл-диэлектрик показал, что разрешающая способность при использовании деконволюции возрастает примерно в 3 раза по сравнению с $\sigma_{x,y}$ в исходных измерениях.

5. Заключение

Выполнены первые СВЧ ближнепольные измерения сред с подповерхностными неоднородностями диэлектрической структуры. Результаты показывают принципиальную возможность развития такого неинвазивного метода диагностики, который может оказаться эффективным в различных приложениях, включая и поиск дефектов слоистых структур, и медицинскую диагностику. Показана возможность улучшения разрешающей способности метода на основе учёта формы передаточной функции зонда.

Благодарность

Авторы признательны С.А.Басову и С.В.Пономарёву за техническую помощь.

Литература

- [1] E.A.Ash, and G.Nicholls, Nature, 237 (1972) 510.
- [2] M.Golosovsky and D.Davidov, Appl. Phys. Lett., 68 (1996) 1579.
- [3] C.P.Vlahacos, R.C.Black, S.M.Anlage, A.Amar, F.C.Wellstood, Appl. Phys. Lett., 69 (1996) 3272.
- [4] S.M.Anlage, C.P.Vlahacos, S.Dutta, F.C.Wellstood, IEEE Trans. Appl. Supercond., 7 (1997) 3686.
- [5] I.Takeuchi et al., Appl. Phys. Lett., 71 (1997) 2026.
- [6] C.Gao, and I.Wolf, IEEE Trans. MTT, 46 (1998) 907.
- [7] T.Nozoekido, J.Bae, and K.Mizuno, IEEE Trans. MTT, 49 (2001) 491.
- [8] A.N.Tikhonov, Solution of ill-posed problems. New York, Winston, 1977.

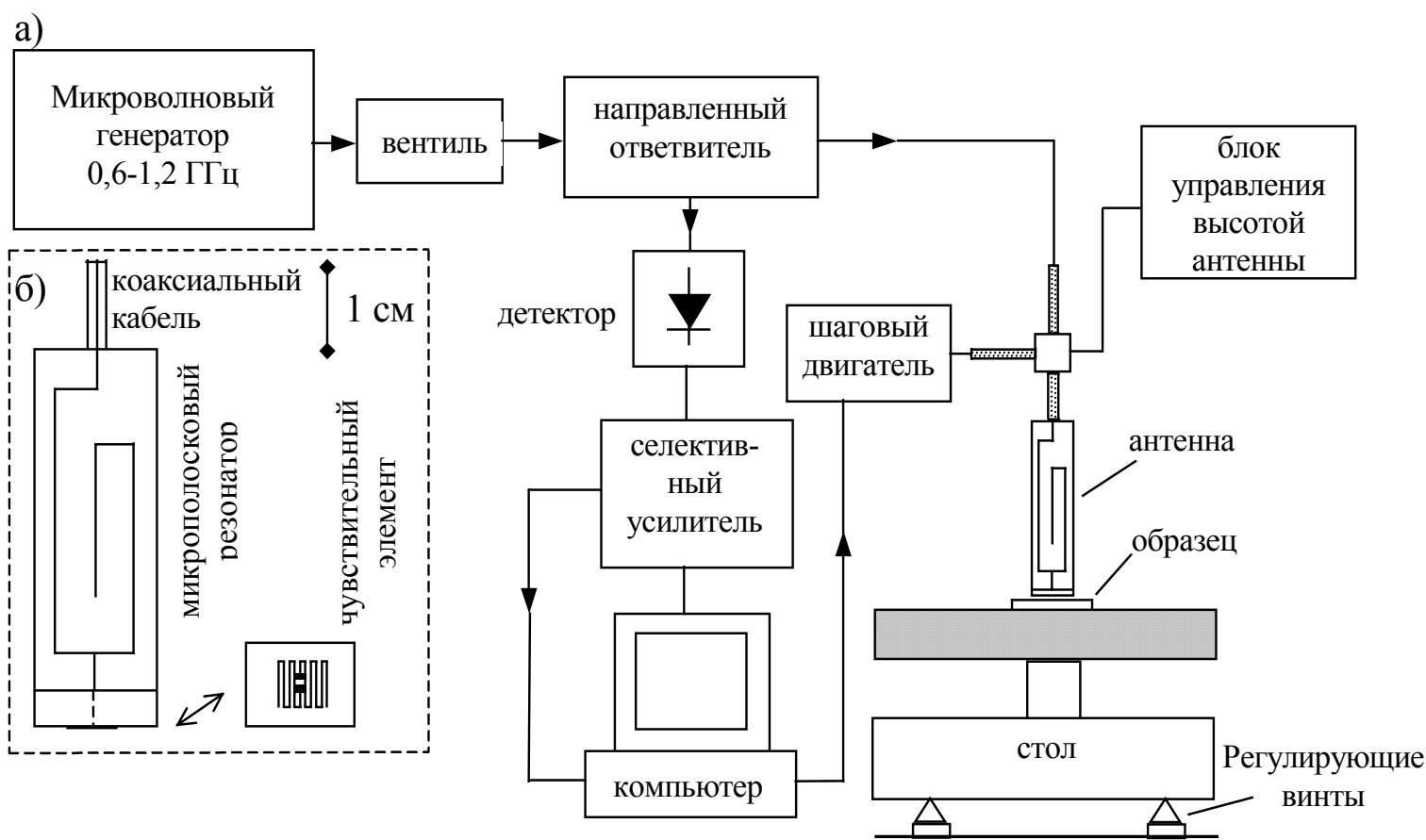


Рис.1

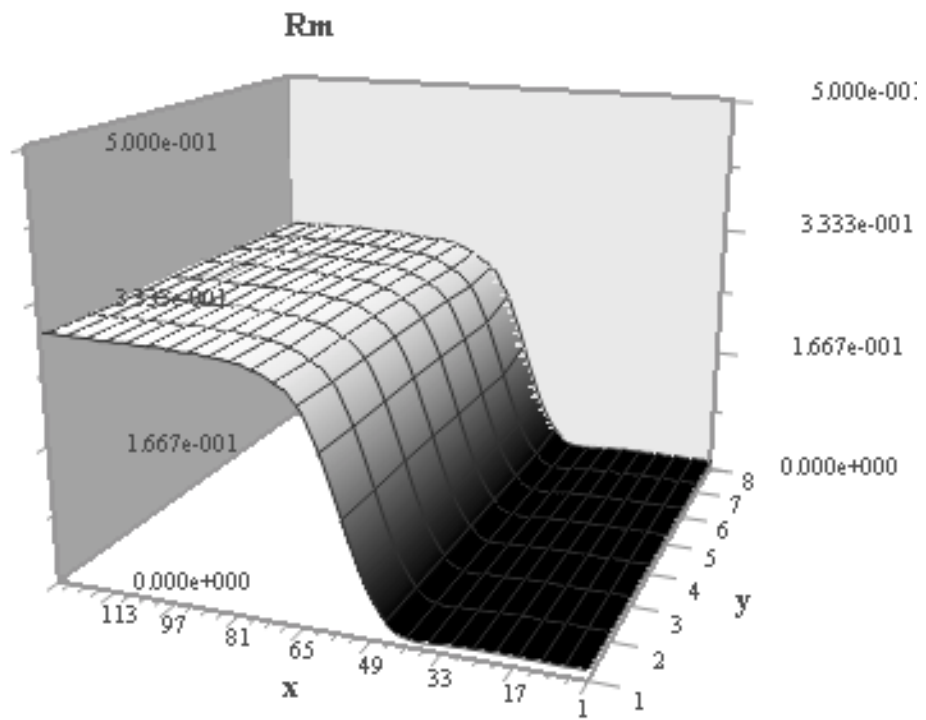


Рис.2

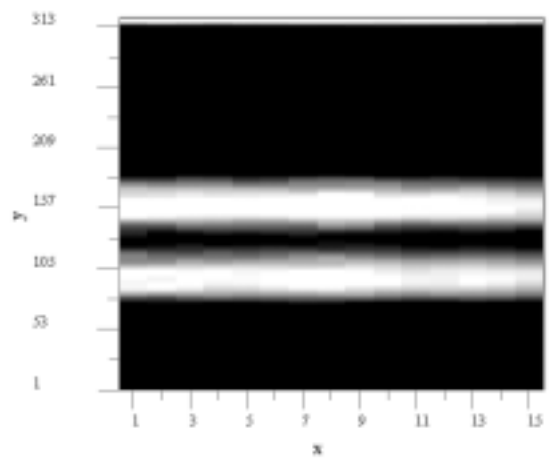
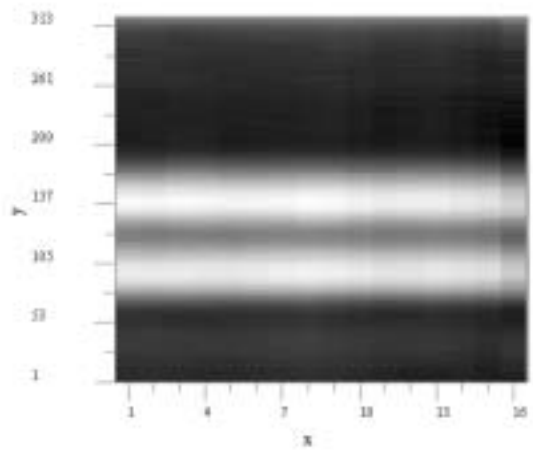


Рис.3

Подписи к рисункам

Рис.1. Сканирующая ближнепольная СВЧ система: а) функциональная схема; б) антенна.

Рис.2. Измеренное изображение перехода металл-диэлектрик под слоем оптически непрозрачного диэлектрика толщиной $h = 1,0$ мм. Линейный размер пикселя 0,125 мм.

Рис.3. Измеренное (слева) и восстановленное (справа) изображения диэлектрических полос под слоем непрозрачного диэлектрика толщиной 1,3 мм. Ширина полос и расстояние между ними $w = d = 4$ мм. Линейный размер пикселя 0,125 мм.

Восстановление подповерхностной диэлектрической структуры по СВЧ ближнеполюсным измерениям. В.Л.Вакс, К.П.Гайкович, Ю.Н.Ноздрин, А.Н.Резник
/Автореферат/

Выполнены первые СВЧ ближнеполюсные измерения сред с подповерхностными неоднородностями диэлектрической структуры. Результаты показывают принципиальную возможность развития такого неинвазивного метода диагностики, который может оказаться эффективным в различных приложениях, включая и поиск дефектов слоистых структур, и медицинскую диагностику. Показана возможность улучшения разрешающей способности метода на основе учёта формы передаточной функции зонда.

Retrieval of a subsurface dielectric structure by microwave near-field measurements.
V.L.Vaks, K.P.Gaikovich, Yu.N.Nozdin, A.N.Reznik

First microwave near-field measurements of media with subsurface inhomogeneities of dielectric structure have been carried out. The results show the possibility of development of this noninvasive method of diagnostics which can be effective in various applications including, for example, defect finding and medical diagnostics. The possibility of the resolution improvement by taking into account the probe transfer function is shown.

Сведения об авторах:

Место работы: Институт физики микроструктур РАН, ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, факс: 8312-675553.

1. Вакс Владимир Лейбович, зав. отд. ИФМ РАН, т. 8312-607648, e-mail: vax@ipm.sci-nnov.ru. Паспорт V-ТН № 620646, выдан РОВД Нижегородского района г. Горького 27.04.1978 г., прописан 603006, Нижний Новгород, ул. Горького, д.152-а, кв.130.
2. Гайкович Константин Павлович, д.ф.-м.н., в.н.с. ИФМ РАН, т. 8312-327920, e-mail: gai@ipm.sci-nnov.ru. Паспорт X-ТН №549639, выдан РОВД Нижегородского района г. Горького 19.02.1980 г., прописан 603093, Нижний Новгород, ул. Родионова, д.7, кв.47.
3. Ноздрин Юрий Николаевич, к.ф.-м.н, с.н.с, т. 8312-368505, Паспорт X-ТН №702114, выдан 11.03.1980 г. Советским РОВД г. Горького, прописан Н.Новгород, ул. Ванеева, д.116, кв.56.
4. Резник Александр Николаевич Резник Александр Николаевич, д.ф.-м.н., в.н.с. ИФМ РАН, т. 8312-675037, e-mail: reznik@ipm.sci-nnov.ru. Паспорт X-ТН №598599, выдан УВД Дзержинского горисполкома Горьковской обл., 15.08.1980 г., прописан 606000, Нижегородская обл., г. Дзержинск, пр. Ленина, д.80, кв.9.

Адрес:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4,издательство "Машиностроение",
редакция журнала "Микросмтемная техника".