

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В БЛИЖНЕПОЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ И СВЧ МИКРОСКОПИИ

Вакс В.Л., Гайкович К.П., Дряхлушин В.Ф., Жилин А.В., Ноздрин Ю.Н., Резник А.Н.,
Институт физики микроструктур РАН, ГСП-105, Н. Новгород - 603950, Россия
Тел.: (8312)675037; факс: (8312)675553; e-mail: gai@ipm.sci-nnov.ru

Аннотация – Путём деконволюции изображений на основе метода Тихонова удалось существенно увеличить разрешающую способность в сканирующей ближнеполевой оптической микроскопии (СБОМ) и сканирующей подповерхностной СВЧ микроскопии (СПСМ).

I. Введение

Метод деконволюции, основанный на теории некорректных задач Тихонова, разработан и применён для восстановления изображений в ближнеполевой сканирующей микроскопии, искажённых (сглаженных) аппаратной функцией. Если эта аппаратная функция известна (даже приближённо), можно рассматривать обратную задачу восстановления истинного изображения. Задача сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода типа двумерной свёртки, которая относится к классу некорректных обратных задач. Аналогичный подход уже использовался нами в [2] для восстановления токов на замагниченной сверхпроводящей плёнке. В данной работе этот метод применяется для восстановления изображений в сканирующей ближнеполевой оптической и СВЧ микроскопии.

II. Основная часть

Восстановление СБОМ-изображений

Если измерено двумерное распределение некоторой величины, то соотношение между этим изображением, искажённым влиянием аппаратной функции, и истинным распределением в большинстве случаев может быть (по крайней мере, приблизительно) выражено уравнением двумерной свёртки:

$$z_m(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} K(x-s, y-t) z(s, t) ds dt \quad (1)$$

где ядро $K(w, W)$ - аппаратная функция, $z_m(x, y)$ - измеренный сигнал, $z(s, t)$ - искомое истинное распределение. Решение (1) относительно $z(s, t)$ позволяет восстановить изображение или существенно улучшить его резкость. Точность восстановления в некорректных задачах может быть исследована только в численном эксперименте и соответствующие результаты для рассматриваемого метода обобщённой невязки Тихонова представлены в [3].

В СБОМ-микроскопии разрешающую способность определяет размер апертуры зонда [4]. Размер апертуры (~50 нм) много меньше длины волны излучаемого света, и именно этот размер определяет эффективную ширину аппаратной функции K в (1). Существует возможность определения этой функции по отклику системы на мелкие (много меньше размера апертуры) неоднородности в самой исследуемой структуре $z(s, t)$. Такие неоднородности можно рассматривать как δ -функцию, то есть мы имеем из (1)

$z_m(x, y) = K(x, y)$. Таким образом, все отклики на самые мелкие детали структуры должны быть практически одинаковы и должны повторять форму аппаратной функции, что и может быть использовано в анализе. Эксперимент подтвердил это предположение, и в представленном ниже примере аппаратная функция весьма точно соответствовала двумерному гауссову распределению

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

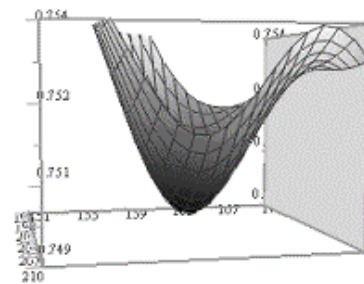
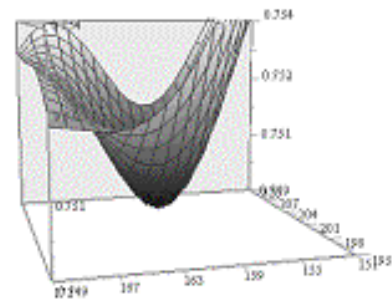


Рис. 1. Два примера наименьших деталей на СБОМ-изображении, которые определяют аппаратную функцию $K(x, y)$. Размер пикселя 3,3 нм.

Fig. 1. Two examples of smallest SNOM image details (in mV), which determine the transfer function $K(x, y)$. The pixel size is 3.3 nm.

На рис.1 показаны примеры двух таких наименьших деталей в измеренном изображении, и легко видеть, что эти изображения практически одинаковы. Параметры которого $\sigma_x = \sigma_y = \sigma \cong 20$ пикселей = 66 нм. Это значение можно рассматривать как разрешающую способность системы СНОБ, а также как оценку сверху размера апертуры зонда $D \leq 66$ нм, что выглядит как весьма разумное значение.

На рис.2 показаны результаты восстановления СБОМ-изображения. Можно видеть, что разрешающая способность восстановленного изображения стала существенно больше, в частности, намного отчётливее и резче виден край тестового образца, который представлял собой частично протравленную тонкую (<10 нм) ванадиевую плёнку на кварцевой подложке. Измерения проводились с помощью сканирующего ближнеполюсного микроскопа «Аврора» фирмы «Торометрих» на длине волны 488 нм. Уровень шума (параметр метода Тихонова, который определяет значение параметра регуляризации) составлял 0,03 мВ.

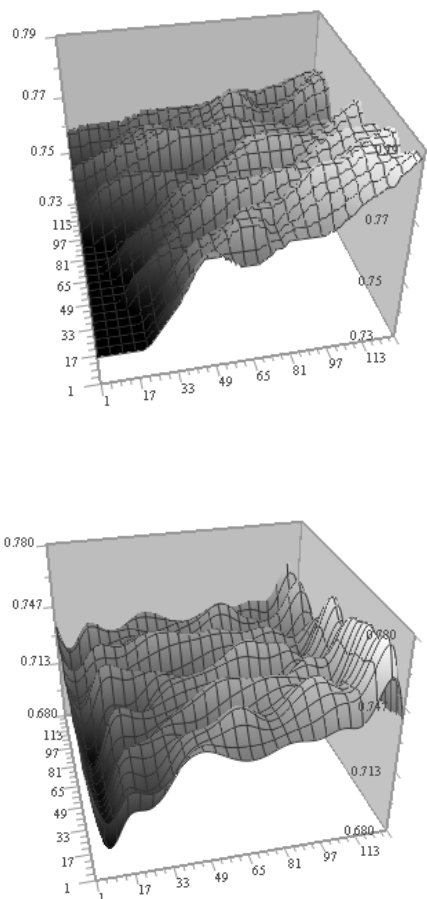


Рис.2. Исходное (вверху) и восстановленное (внизу) СБОМ - изображения (в мВ). Размер пикселя 3,3 нм.
Fig.2. Initial (upper) and retrieved (lower) SNOM-images (in mV). The pixel size is 3.3 nm.

При данном уровне точности достигнутый уровень разрешающей способности восстановленного изображения σ_r оказался примерно в 3 раза лучше, чем в исходном изображении. Величина σ_r определялась по наименьшим восстановленным деталям восстановленного изображения точно так же, как определялась разрешающая способность исходного изображения σ в (2). Таким образом, $\sigma_r \cong 22$ нм, или примерно 0,045 от длины волны системы СБОМ.

СВЧ подповерхностная сканирующая микроскопия

Поверхностная ближнеполюсная СВЧ микроскопия в настоящее время уже имеет существенные достижения. Соответствующие системы достигли разрешающей способности $\sigma \ll \lambda$, близкой к размеру апер-

туры $D \approx \sigma = \lambda/n$, где λ - длина волны, где значение n обычно составляет $10^2 - 10^3$ (достигнуто значение $n \approx 10^5$). Следует отметить, что при увеличении n уменьшается глубина зондирования h , поскольку справедливо условие $h \sim \sigma$. То есть важное преимущество волн СВЧ диапазона, заключающееся в их высокой проникающей способности, при этом теряется.

В отличие от описанного подхода, мы разработали ближнеполюсную систему с относительно низким пространственным разрешением ($n \sim 10^2$), но более высокой глубиной проникновения ($h \sim 1$ см) специально для подповерхностного зондирования. При этом, для частичной компенсации потери пространственной разрешающей способности использован описанный выше подход восстановления изображений, позволивший получить супер-апертурную разрешающую способность.

Мы использовали антенну малой апертуры, сканирующую в плоскости. Размер чувствительного элемента (в форме меандра) составлял 5×6 мм². Этот элемент находился в контакте с микрополосковым резонатором (резонансная частота $f_0 \approx 640$ МГц, ширина полосы $\Delta f \approx 15$ МГц). Тестовые образцы изготавливались протравливанием полос на тонкой (~100 нм) плёнке Си, напылённой на диэлектрическую подложку из Al₂O₃. Образцы покрывались оптически непрозрачными диэлектрическими пластинами различной толщины. При движении зонда менялся эквивалентный импеданс чувствительного элемента, что приводило к сдвигу его резонансной частоты f_0 . СВЧ сигнал подавался на частоте, несколько сдвинутой от резонансной, и измерялись вариации коэффициента отражения, связанные с неоднородностями структуры образца. Для увеличения чувствительности на антенну подавался сигнал, модулированный с частотой 1 КГц, и использовалось селективное усиление сигнала на частоте модуляции. Пошаговое сканирование с интервалом 0.125 мм покрывало область с максимальным размером 4×4 см².

Предполагалось, что наблюдаемое двумерное изображение (распределение коэффициента отражения R_m) может быть представлено (приближённо) в виде:

$$R_m(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} K(x-x', y-y') R(x', y') dx' dy', \quad (3)$$

где $R(x, y)$ – истинное изображение подповерхностной структуры, $K(x, y)$ – аппаратная функция антенны.

Влияние аппаратной функции проявляется в сглаживании контрастов в наблюдаемом изображении. В нашей системе $K(x, y)$ определялась путём сканирования перехода металл-диэлектрик. При этом установлено, что формула (2) очень хорошо аппроксимирует аппаратную функцию при значениях параметров $\sigma_x = 2,3$ мм, $\sigma_y = 3,6$ мм, которые можно рассматривать как разрешающую способность в двух направлениях. На рис.3 показаны результаты измерений перехода металл-диэлектрик в y -направлении.

В данной работе представлены первые результаты исследования образцов, выполненных в форме двух параллельных диэлектрических полос, вытравленных на металлической плёнке, под слоем оптически непрозрачного диэлектрика. Ширина полос w и расстояние между ними d были равны между собой

($w = d$). На рис.4 представлен пример исходного и восстановленного изображений. Можно видеть, что резкость восстановленного изображения существенно выше, чем исходного.

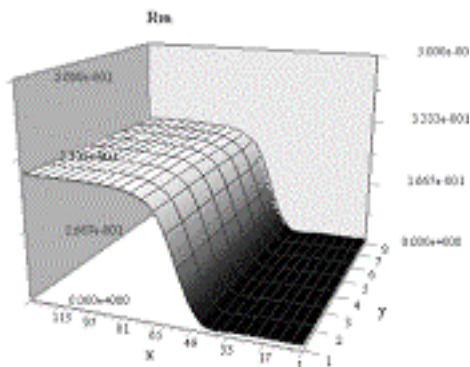


Рис.3. Изображение перехода металл-диэлектрик под слоем оптически непрозрачного диэлектрика толщиной $h=1$ мм. Размер пикселя 0,125 мм.

Fig.2. Image of metal-dielectric interface under the dielectric optically non-transparent layer with the depth $h = 1.0$ mm. Pixel size is 0.125 mm.

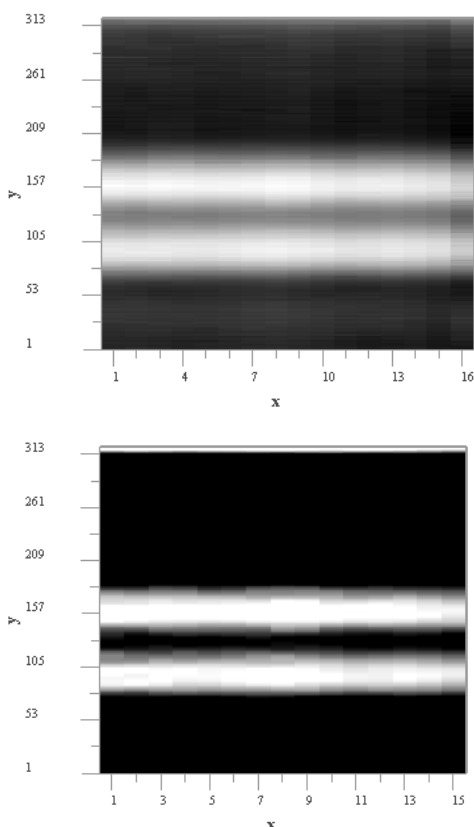


Рис.4. Измеренное (вверху) и восстановленное (внизу) изображения диэлектрических полос под слоем оптически непрозрачного диэлектрика толщиной $h = 1.3$ мм. Ширина полос и расстояние между ними $w = d = 4$ мм. Размер пикселя 0,125 мм.

Fig.4. Measured (upper) and reconstructed (lower) image of dielectric strips under optically non-transparent layer with the depth $h = 1.3$ mm. Strips' width and the distance between them are: $w = d = 4$ mm. Pixel size is 0.125 mm.

Анализ показал, что решение уравнения (3) методом Тихонова позволило существенно улучшить (более чем в 3 раза) разрешающую способность.

Исследования показали также, что отклик на неоднородность образца очень сильно зависит от толщины слоя диэлектрика над исследуемой структурой. По мере её удаления из ближней зоны, которая имеет характерный размер апертуры зонда, отклик резко уменьшается. Такая зависимость от глубины позволяет надеяться на возможность развития методов восстановления глубинных диэлектрических неоднородностей, что позволило бы перейти к задачам томографии диэлектрических структур.

III. Заключение

Представленные результаты показывают, что развитый метод восстановления изображений, искажённых влиянием аппаратной функции, позволяет существенно улучшить их резкость путём численной обработки данных измерений. Достигнутая супер-апертурная разрешающая способность в ближне-полевой оптической и СВЧ микроскопии оказалась примерно в 3 раза лучше исходной.

Работа выполнена при поддержке РФФИ гранты № 01-02-16432, 01-02-16444, 00-02-16487.

IV. Список литературы

- [1] Tikhonov A.N. Solution of ill-posed problems. New York, Winston, 1977.
- [2] Gaikovich K.P., Nozdrin Ju.N., Zhilin A.V. Conference Proceedings of 2000 2nd Intern. Conf. on Transparent Optical Networks (ICTON 2000, Gdansk, Poland, June 5-13, 2000), 2000, Gdansk: IEEE, pp.173-175.
- [3] Gaikovich K.P., Zhilin A.V. Radiophysics and Quantum Electronics, 1999, vol.42, No.10, pp.825-833. Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- [4] Dryakhlushin V.F., Klimov A.Yu., Rogov V.V., Gusev S.A. Instruments and experimental techniques, vol.41, No.2, pp.139-139, 1998.

IMAGES RETRIEVAL IN NEAR-FIELD OPTICAL AND MICROWAVE MICROSCOPY

N.V. K.P.Gaikovich, V.F.Dryakhlushin, Yu.N.Nozdrin, A.N.Reznik, V.L.Vaks, A.V.Zhilin

Institute for Physics of Microstructures RAS, GSP-105
Nizhny Novgorod – 603950, Russia
phone: (8312)675037, fax: (8312)675553
e-mail: gai@ipm.sci-nnov.ru

Abstract - Significant enhancement of resolution in the scanning near-field optical microscopy (SNOM) and in the microwave subsurface imaging (MSI) is achieved by deconvolution of measured 2-D images using Tikhonov's method. This method makes it possible to obtain much better sharpness of images.

I. Introduction

Image deconvolution method based on the Tikhonov's theory of ill-posed problems is applied to retrieval of images distorted by the instrument transfer function influence. Under this influence the smoothing of the real picture takes place, and even its distortion in cases when the transfer function has a complicated structure. If the transfer function is known (even approximately), it is possible to consider the inverse problem of the image rectification. This problem consists of the solution of

integral Fredholm equation of the 1-st kind of 2-D convolution type, which is known as ill-posed problem. In this paper the possibility of Tikhonov's method of generalized discrepancy [1] is considered. The same approach has been used successfully in the problem of 2-D currents distribution on the superconductor film by measurements of magnetic field above its surface [2]. In the present paper this method is applied to rectification of the scanning near-field optical microscopy (SNOM) images and of the microwave 2-D imaging of the subsurface dielectric structures.

II. Main part

RECTIFICATION OF SNOM IMAGES

If a 2-D distribution of some physical quantity is measured, which is related to image, then the relation between the measured and the true distribution in most cases could be (at least, approximately) expressed as 2-D convolution (1), where the kernel $K(w, W)$ is the transfer function, $z_m(x, y)$ is the measured signal, $z(s, t)$ is the true distribution to be found. The solution of (1) relative to $z(s, t)$ make it possible to retrieve the surface image with a higher resolution. It is known that the accuracy of retrieval for ill-posed equations can be determined on the basis of numerical simulation only, and these results for Tikhonov's method are presented in [3].

In the present paper this method is applied to the retrieval of scanning near-field optical microscopy (SNOM) images. The key element of a SNOM is its probe [4]. The size of the probe aperture determines the microscope resolution and the optical radiation power emerging from the probe and this size (~50 nm) is much smaller than the wavelength of light. It determines the effective width of the transfer function (kernel K) in (1), which we have to know to solve this equation. It is possible to determine this function by measurements of a small (much less than the size of aperture) test structure $z(s, t)$. This structure can be considered as the δ -function, so one has from (1) $z_m(x, y) = K(x, y)$. In real measurements one has almost always suitable small structures, which can be considered as δ -functions. In such cases the smallest image inhomogeneities are similar and they repeat actually the form of $K(x, y)$. In Fig.1 one can see examples of such smallest details of the SNOM image shown in Fig.2 (upper), and the corresponding kernel can be well approximated by the 2-D Gauss distribution (2) where parameters $\sigma_x = \sigma_y = \sigma \cong 20$ pixels = 66 nm were evaluated from measurements given in Fig.1 (upper). This value can be considered as the resolution of the measured image and, also, as the upper limit of the size of the probe aperture $D \leq 66$ nm that seems as a reasonable value.

In Fig. 2 the results of retrieval of SNOM-images are shown. It is obvious that the resolution of retrieved image is much better and the edge of the test sample is more clearly seen. The test sample was a very thin vanadium film (<10 nm) on the quartz partially etched to the substrate. The initial image was obtained with the help of the scanning near-field optical microscope "Aurora" by "Topometrix" firm, operating at wavelength of optical radiation of 488 nm; the transmission coefficient of the probe was $4 \cdot 10^{-3}$. The noise level (parameter of Tikhonov's method that determines the value of regularization parameter) was 0.03 mV.

At this level of measurements accuracy the achieved resolution σ_r in retrieved images is more than 3 times better than the resolution in initially measured images. The achieved resolution σ_r can be determined by the smallest details of the retrieved image in the same way as the resolution of the initial image σ in (2). So, we obtain $\sigma_r \cong 22$ nm, or about 0.045 of the SNOM wavelength.

MICROWAVE SUBSURFACE IMAGING

Surfaces imaging by near-field microscopy at microwave (MW) frequencies is enough developed by now. Corresponding devices have the resolution scale $\sigma \ll \lambda$ approximately equal to aperture size $D \approx \sigma = \lambda/n$, where λ is the operating wavelength, $n \gg 1$. Only the obvious property of near-field measurements to make resolution higher by decreasing D has been considered

earlier. For MW near-field microscopes the value of n is typically of about $10^2 - 10^3$; with the maximum reported value of $n \approx 10^5$. It is necessary to note that increasing of n leads to decreasing of the sounding depth h because the condition $h \sim \sigma$. Thus, a large penetration depth as an important advantage of MW can be lost. In this work we have built a MW near-field system with a low enough space resolution ($n \sim 10^2$) especially for the subsurface sounding of samples. But for all that, a special mathematical procedure of super-aperture resolution has been developed to compensate for losses of resolution.

We used a 2-D scanning near-field system, and a small-aperture antenna was used as a probe. Sensitive element of antenna with the size of 5×6 mm² have the meander form and is made in contact with a microstrip resonator (resonant frequency $f_0 \approx 640$ MHz, bandwidth $\Delta f \approx 15$ MHz). The test samples were Al₂O₃ substrates with the deposited Cu films (~100 nm) from which the metal-dielectric structures have been formed. Optically opaque dielectric plates with various depths covered the samples. As the probe approaches the sample, the equivalent impedance of sensitive element changes and the resonant frequency f_0 shifts. Inhomogeneities of the sample dielectric constant lead to variances of f_0 . In normal operation, we apply the microwave power at a frequency that is somewhat off the resonant frequency. So, we measure changes of antenna reflection coefficient induced by the sample structure inhomogeneities. To make the sensitivity higher we used the 1 KHz meander modulation of MW radiation on the antenna input and the selective amplification of the reflected signal at the modulation frequency. The 2-D scanning of antenna with the step in x and y -directions of 0.125 mm makes images with the maximal size of observed area 4×4 cm².

The sample image is 2-D distribution of the measured antenna reflection coefficient R_m , and it can be expressed (at least, approximately) as a function of probe coordinates (3) where $R(x, y)$ is the true image of a sample, $K(x, y)$ is the transfer function of antenna. Thus, the initial measured image is the 2-D convolution of the real image with the transfer function of antenna. The influence of the antenna transfer function leads to the smoothing of observed image contrasts. For our system, $K(x, y)$ have been determined by scanning of one-dimensional metal - dielectric interface. It was obtained that a good approximation for $K(x, y)$ is the expression (2) with the parameters $\sigma_x = 2.3$ mm, $\sigma_y = 3.6$ mm were determined from measurements. These parameters can be considered as the resolution in x and y -direction. The measured dependence of the metal-dielectric interface (step-function response) in y -direction is shown in Fig.3.

The reconstruction of images has been done by the same Tikhonov's deconvolution of (3) using the measured image as the left part of (3) and the obtained transfer function (2). An efficiency of developed technique have been examined by the retrieval of images of samples produced as two parallel dielectric strips carried through metal cover under the dielectric layer. The width of strips w and metal covered distance between them d were equal ($w = d$). In Fig.4 it is clearly seen that the sharpness of the reconstructed image is much better than of the initial one. It is because the space resolution after deconvolution became higher than the initial resolution of antenna. Our calculations gives that new resolution became 3 times better than the measured resolution $\sigma_{x,y}$ in (2).

Our research shows that the response on the sample depends drastically on the depth of dielectric above the measured structure. It reduces at the sample removing from the near-field zone. It makes possible to develop methods of the depth dielectric profiles retrieval and of dielectric structures tomography.

III. Conclusion

Thus, we can conclude that the developed method of image rectification permits one to obtain much better image sharpness on the basis of numerical processing of measured SNOM and MSI images. The super-aperture resolution has also been achieved. In both cases the resolution of retrieved images appears about 3 times better than for initially measured images.

The work reported in this paper was supported by the RFBR, Grants No. 01-02-16432, 00-02-16487, 01-02-16444.