

Улучшение разрешающей способности СБОМ-изображений на основе учёта передаточной функции зонда¹

К.П.Гайкович, В.Ф.Дряхлушин, А.В.Жилин

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

Достигнуто существенное увеличение разрешения в сканирующей ближнепольной оптической микроскопии (СБОМ) путём деконволюции измеряемого двумерного распределения на основе метода Тихонова с учётом формы передаточной функции зонда, которая определялась по наименьшим деталям обрабатываемого изображения.

1. Введение

Для восстановления СБОМ-изображений, искажённых влиянием передаточной функции зонда, разработан метод деконволюции, основанный на теории некорректных задач Тихонова. Задача учёта влияния аппаратной функции на измеряемые двумерные изображения актуальна во многих областях физики (в радиоастрономии, в пассивном и активном СВЧ зондировании, в различных видах микроскопии). Это влияние приводит к сглаживанию истинного распределения и даже его искажения в случаях, когда передаточная функция имеет сложную структуру. Если передаточная функция известна (даже приближённо), можно рассматривать обратную задачу восстановления изображения. Эта задача обычно заключается в решении интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода типа двумерной свёртки, которое представляет собой хорошо известную некорректную задачу. В данной работе для её решения используется метод обобщённой невязки Тихонова [1]. Аналогичный метод был с успехом использован нами в задаче восстановления двумерного распределения токов на сверхпроводящей плёнке по измерениям магнитного поля над её поверхностью [2] и при обработке данных СВЧ зондирования [3].

2. Восстановление изображения

Если измеряется двумерное распределение некоторой величины, которое формирует измеренное изображение, то в большинстве случаев связь этого измеренного изобра-

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 03-02-17321.

жения с истинным может быть представлена (по крайней мере, приблизительно) 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 $K(w, W)$ - передаточная функция, $z_m(x, y)$ - измеренный сигнал, $z(s, t)$ - иско-
мое истинное изображение. Приближённое решение (1) относительно $z(s, t)$ позволяет
восстановить изображение с лучшей разрешающей способностью. Известно, что точ-
ность восстановления для некорректных задач может быть оценена только на основе
результатов численного моделирования, которое для использованного в данной работе
метода представлено в [3].

В данной работе этот метод был использован для восстановления изображений в
СБОМ. Ключевым элементом в СБОМ является зонд [4], показанный на рис.1. Именно
размер апертуры зонда определяет разрешение микроскопа и мощность его оптически-
го излучения; при этом оказывается, что этот размер (и, следовательно, разрешающая
способность) составляет 50-100 нм, т.е. много меньше длины волны света. Размер апер-
туры определяет и эффективную полуширину передаточной функции (ядра K) в (1), ко-
торую нам необходимо знать, чтобы решить уравнение. В данной работе предлагается
метод определения передаточной функции зонда, который реализуем в случаях, когда в
пространственном спектре неоднородностей исследуемой поверхности (или соответст-
вующей тестовой структуры) имеются неоднородности, много меньшие, чем размер
апертуры. Такие неоднородности могут рассматриваться как δ -функции, т.е. $z(x, y) =$
 $\delta(x, y)$, и мы имеем из (1) $z_m(x, y) = K(x, y)$. Критерий наличия таких маленьких структур
на исследуемой поверхности весьма прост: все наименьшие детали изображения долж-
ны быть одинаковыми и повторять форму передаточной функции зонда $K(x, y)$. На рис.2
представлена два примера таких наименьших деталей в СБОМ-изображении, представ-
ленного полностью на рис.3 (слева), которое анализируется в данной работе. Анализ
показал, что соответствующая передаточная функция хорошо аппроксимируется дву-
мерным гауссовым распределением

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

с параметрами $\sigma_x = \sigma_y = \sigma \cong 20$ пикселей = 66 nm. Это значение σ можно рассматривать
как разрешающую способность, реализованную в исходном СБОМ-изображении и,

кроме того, как оценку (сверху) размера апертуры зонда $D \leq 66$ нм, что выглядит как весьма разумное значение.

3. Результаты восстановления СБОМ-изображения

На рис.3 представлены результаты восстановления СБОМ-изображения. Очевидно, что восстановленное изображение оказывается существенно более качественным и резким – можно видеть, что край образца (слева внизу) виден гораздо более отчётливо. В качестве тестовой структуры использовалась ванадиевая плёнка на кварцевой подложке, протравленная таким образом, что её толщина варьировала в пределах от 0 до 10 нм. Исходное изображение было получено с помощью сканирующего ближнепольного микроскопа «Аврора» фирмы “Topometrix”, функционирующего на рабочей длине волны оптического излучения 488 нм; коэффициент пропускания зонда составлял $4 \cdot 10^{-3}$. Уровень шума, определяющий меру погрешности (единственный параметр метода Тихонова, с которым связан параметр регуляризации) составлял 0,03 мВ.

При данном уровне точности измерений разрешение, достигнутое на восстановленном изображении, увеличилось по крайней мере в 3 раза по сравнению с разрешением на исходном изображении. Достигнутая разрешающая способность σ_r оценивалась по наименьшим деталям восстановленного изображения точно так же, как и разрешающая способность исходного изображения σ , из аппроксимации наименьших деталей формулой (2). Таким образом, мы получили оценку $\sigma_r \cong 22$ нм, что составляет около 0,045 от рабочей длины волны системы СБОМ. На рис.4 исходное и восстановленное изображения показаны для большего участка поверхности плёнки.

4. Заключение

Представленные результаты показывают, что разработанный в работе метод численной обработки СБОМ-изображений, включающий способ определения передаточной функции зонда по наименьшим деталям анализируемого изображения, позволяет существенно улучшить их резкость, т.е. разрешение структуры неоднородностей анализируемой поверхности. Аналогичный подход может успешно применяться и в других видах сканирующей микроскопии.

Литература

- [1] A.N.Tikhonov, Solution of ill-posed problems. New York, Winston, 1977.
- [2] K.P.Gaikovich, Yu.N.Nozdin, A.N.Reznik, and A.V.Zhilin, XII German–Russian–Ukrainian Seminar on High Temperature Superconductivity (25-29 October, 1999, Kiev, Ukraine), 1999, Kiev: V.N.Bakul Institut for Superhard Materials of National Academy of the Ukraine, p.86.
- [3] K.P.Gaikovich and A.V.Zhilin, Radiophysics and Quantum Electronics, 42 (1999) 825. Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- [4] V.F.Dryakhlushin, A.Yu.Klimov, V.V.Rogov, and S.A.Gusev, Instruments and experimental techniques, 41 (1998), 139.

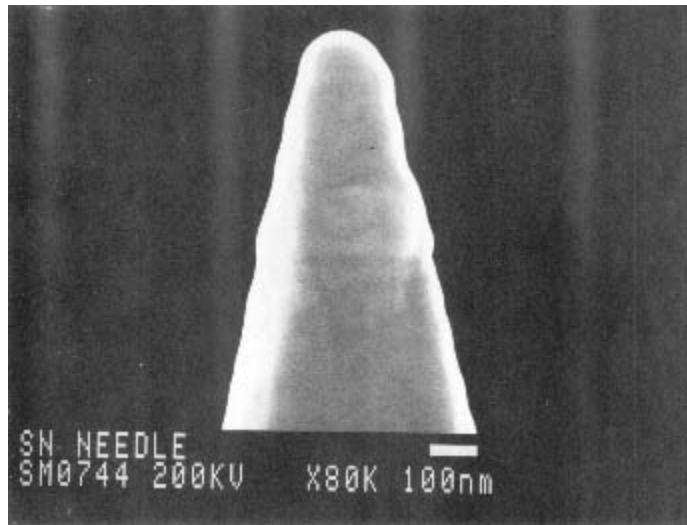


Fig.1.

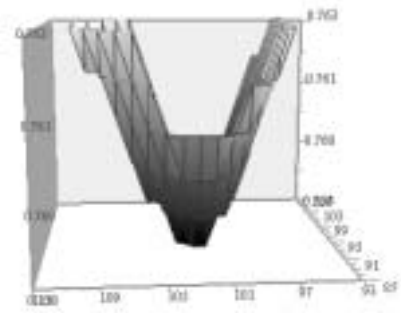
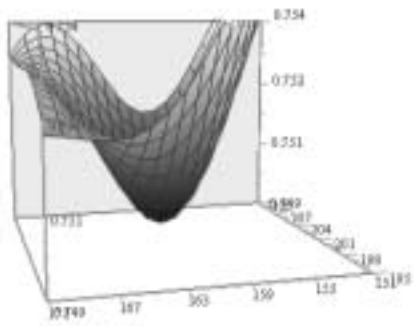


Fig.2

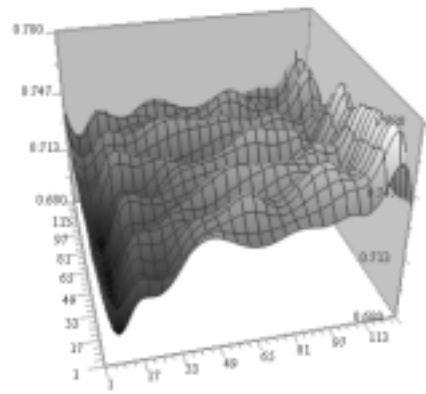
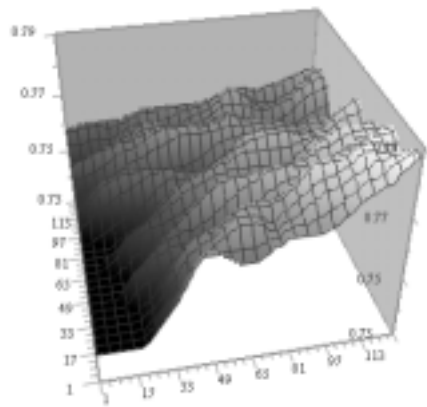


Fig.3

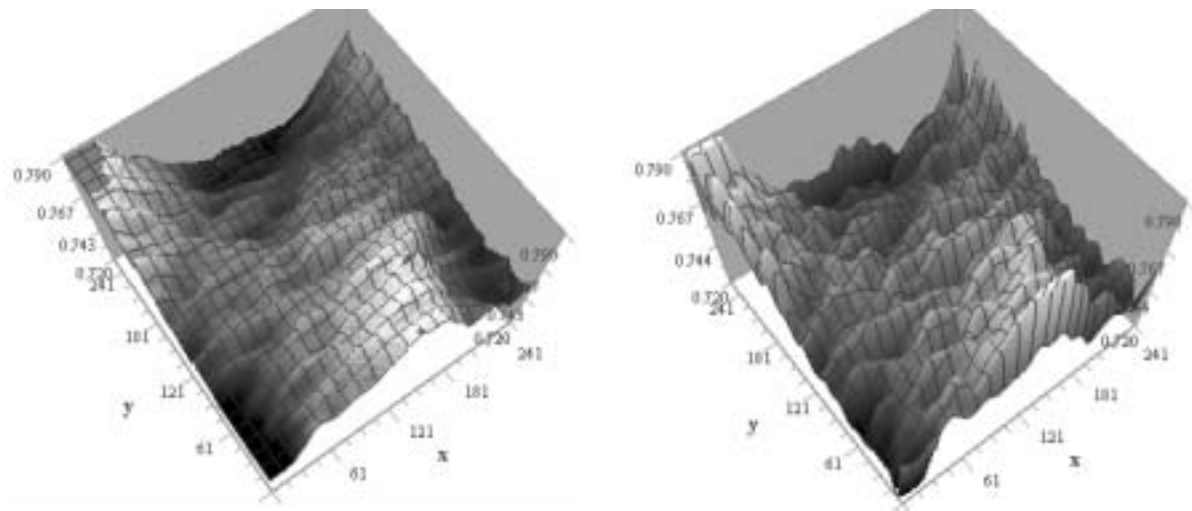


Fig.4

Подписи к рисункам

Рис.1. Зонд для системы СБОМ.

Рис.2. Два примера наименьших деталей СБОМ-изображения (в мВ), форма которых определяет передаточную функцию $K(x,y)$. Линейный размер пикселя 3.3 нм.

Рис.4. Исходное (слева) и восстановленное (справа) СБОМ-изображения (в мВ). Линейный размер пикселя 3.3 нм.

Fig.4. Исходное (слева) и восстановленное (справа) СБОМ-изображения (в мВ). Линейный размер пикселя 3.3 нм.

Улучшение разрешающей способности СБОМ-изображений на основе учёта передаточной функции зонда. К.П.Гайкович, В.Ф.Дряхлушин, А.В.Жилин. /Автореферат/

Достигнуто существенное увеличение разрешения в сканирующей ближнепольной оптической микроскопии (СБОМ) путём деконволюции измеряемого двумерного распределения на основе метода Тихонова с учётом формы передаточной функции зонда, которая определялась по наименьшим деталям обрабатываемого изображения.

The improvement of the resolution of SNOM-images taking into account the probe transfer function. K.P.Gaikovich, V.F.Dryakhlushin, A.V.Kruglov, A.V.Zhilin.

Significant enhancement of resolution in the scanning near-field optical microscopy (SNOM) is achieved by deconvolution of measured 2-D distributions using Tikhonov's method taking into account the probe transfer function that was determined by smallest details of a processed image.

Сведения об авторах:

Место работы: Институт физики микроструктур РАН, ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, факс: 8312-6755553.

1. Гайкович Константин Павлович, д.ф.-м.н., в.н.с. ИФМ РАН, т. 8312-327920, e-mail: gai@ipm.sci-nnov.ru. Паспорт Х-ТН №549639, выдан РОВД Нижегородского района г. Горького 19.02.1980 г., прописан 603093, Нижний Новгород, ул. Родионова, д.7, кв.47.
2. Дряхлушин Владимир Филиппович, к.ф.-м.н, с.н.с. ИФМ РАН, т. 8312-360852, e-mail: dvf@ipm.sci-nnov.ru. Паспорт VII –ТН №569262, выдан РОВД Автозаводского района г. Горького 9.01.1979 г., прописан 603006, г. Нижний Новгород, ул. Белинского, д.106а, кв.42.
3. Жилин Алексей Вадимович, соискатель учёной степени при ИФМ РАН, т. 8312-652413. Паспорт 22 00 №679922, выдан ОВД Приокского района г. Нижнего Новгорода 19.06.2001, прописан г. Нижний Новгород, ул. Сурикова, д.2, кв.79.

Адрес:

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