

УДК 621.317.799

С.И. Мельник, Н.И. Слипченко

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ В МИКРОВОЛНОВОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ МИКРОСКОПИИ

Получена формула для оценки предельно достижимой пространственной разрешающей способности в методе микроволновой сканирующей микроскопии. Показано, что на нее мультипликативно влияют как фактор локализации сканирующего поля, ассоциируемый с кривизной максимума его распределения, так и отношение сигнал-шум. Таким образом, пространственная разрешающая способность может быть существенно улучшена не только за счет миниатюризации острия датчика, но и за счет понижения вклада шумовой составляющей и применения алгоритма реконструкции к измеренному профилю. Проверка точности оценки на реальных данных показала ее адекватность. В результате реконструкции удалось повысить разрешающую способность по сравнению с исходными данными сканирования на порядок.

Ключевые слова: микроволновая сканирующая микроскопия, разрешающая способность, реконструкция изображения.

Введение

Одним из основных критериев качества методов сканирующей микроскопии является повышение пространственной разрешающей способности (ПРС). Во многих из них измеряемый сигнал является сверткой истинного профиля объекта и передаточной функции датчика. Применение методики обратной свертки и выбор соответствующей невязки при регуляризации решения обратной некорректной задачи позволяет восстановить истинный профиль значительно более точно, чем на исходном изображении. Однако при решении задач томографии передаточная функция определяется не только параметрами датчика, но и свойствами вышележащих слоев с находящимися в них неоднородностями. Кроме того, взаимное влияние близкорасположенных дефектов не позволяет представить измеренные данные в виде свертки. Эти и другие факторы приводят к тому, что во многих методах сканирующей микроскопии и томографии (микроволновая, атомно-силовая контактная и бесконтактная, тепловая и т.д.) не удастся применить метод обратной свертки для реконструкции. Основные усилия разработчиков этих методов, таким образом, оказались сосредоточены на улучшении инструментального фактора ПРС. В результате и возникли такие ограничения на предельно достижимую ПРС, как диаметр острия зонда и его высота над объектом (в микроволновой микроскопии [1]), глубина залегания дефектов (в тепловой томографии) и т.п.

Тем не менее, применение других, специализированных алгоритмов реконструкции зачастую позволяет обойти эти трудности и существенно повысить разрешающую способность методов [2]. Однако и в этом случае существуют фундаментальные ограничения на ее предельное значение, связанные с количеством полезной информации в измеренном сигнале. Эту информацию нельзя увеличить никакой математической обработкой, но можно потерять большую ее часть, что

и происходит при игнорировании возможностей информационной обработки сигнала. Целью настоящей работы является оценка предельно достижимой пространственной разрешающей способности в методе микроволновой сканирующей микроскопии (МСМ). Также будет описан один из возможных методов реконструкции, использующий приближение малых неоднородностей, и позволяющий в рассматриваемом случае на порядок улучшить ПРС.

Модель взаимодействия датчика с объектом контроля в МСМ

В качестве измеряемых параметров в МСМ используют, как правило, сдвиг резонансной частоты или изменение добротности резонаторного датчика. Результаты сканирования значений одного из них или обоих и являются первичными измеряемыми данными. Эти результаты можно представить в виде двумерной комплексной функции $\delta\tilde{f}'/\tilde{f}'(x, y)$, где \tilde{f}' – комплексное значение резонансной частоты.

Рассмотрим одну из классических задач микроскопии – измерение профиля поверхности. Для простоты будем считать объект однородной пластиной из проводящего диэлектрика с комплексной проницаемостью $\tilde{\epsilon}$. В этом случае из общей формулы для изменения комплексного значения резонансной частоты получим:

$$\frac{\delta\tilde{f}'}{\tilde{f}'} = \frac{\int (\delta\tilde{\epsilon} \cdot \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_0) dv}{2 \int (\epsilon_0 \cdot \vec{E}_0^2) dv}, \quad (1)$$

где $\delta\tilde{f}'$ – сдвиг комплексного значения резонансной частоты по сравнению ее значением для гладкой поверхности, а отклонение комплексной диэлектрической проницаемости от $\tilde{\epsilon}$ однородного объекта с гладкой поверхностью отлично от нуля только в областях, соответствующих неровностям, \vec{E}_0 и \vec{E}_1

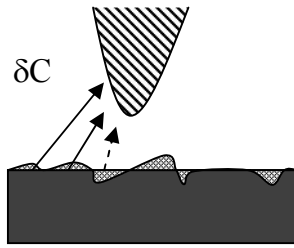


Рис. 1. Выступы и впадины на поверхности эквивалентны областям с $\delta\epsilon_1 = \pm(\epsilon_0 - 1)\epsilon_0$

напряженности поля для объектов с гладкой и с шероховатой поверхностью соответственно (рис. 1).

Нами было показано [3], что распределение комплексного сдвига резонансной частоты $\delta\tilde{f}/\tilde{f}(x, y)$ при сканировании объекта, вызванное набором локальных

неоднородностей, может быть представлено в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\delta\tilde{f}}{\tilde{f}} &= K_0 \sum_{m,j,k} [E_{0j}]_m [P_j]_m = \\ &= K_0 \sum_{m,n,j,k} [E_{0j}]_m [\beta_{jk}^*]_{nm} [E_{0k}]_n, \end{aligned} \quad (2)$$

где (j, k) – координатные индексы;

$K_0 = 4\pi / \int (\epsilon_0 \cdot \vec{E}_0^2) dv$ – нормировочный коэффициент, а компоненты невозмущенного поля $[E_{0j}]_m$

в области m-й неоднородности определяются параметрами системы датчик – однородный объект. В эту формулу входит обобщенный тензор поляризации набора неоднородностей, в котором учтены как их собственные тензоры поляризации (диагональные элементы) так и коэффициенты их взаимного влияния. Таким образом, в рамках принятого приближения малые неоднородности можно рассматривать как эквивалентные произвольно ориентированные диполи. Процедура моделирования состоит из двух независимых этапов: расчет невозмущенного поля в системе датчик – однородный объект и расчет обобщенной матрицы поляризации близко расположенных объектов.

Оценка разрешающей способности микроволновой микроскопии

На основании описанной выше модели рассмотрим задачу определения оценки разрешающей способности метода. В стандартном подходе для этого необходимо рассмотреть зависимость сигнала, полученного при сканировании двух точечных источников, от расстояния между ними. В качестве неоднородностей рассмотрим две сферические полости радиуса R в однородном слое с относительной диэлектрической проницаемостью $\tilde{\epsilon} = \epsilon\epsilon_0(1 - j\delta)$, с расстоянием $2l \geq 2R$ между их центрами. Для простоты будем полагать, что невозмущенное поле в рассматриваемой области имеет только вертикальную составляющую, которую можно аппроксимировать гауссоидой $(E_0 + E_{01})_y \approx A \exp\left(-\frac{(x - x_d)^2}{(2a^2)}\right)$, где x_d характеризует положение датчика. Такая ап-

проксимация хорошо описывает центральную область поля датчика, в которой, как правило, и удается получить максимальное разрешение.

В рамках предложенной модели каждая из неоднородностей характеризуется параметром поляризуемости $\beta_{yy} = \beta_R = 4\pi R^3 \tilde{\epsilon}$. Тогда мощности эквивалентных диполей могут быть рассчитаны как:

$$\begin{cases} P_1 = 4\pi R^3 \tilde{\epsilon} \left[A \exp\left(-\frac{(1-x_d)^2}{2a^2}\right) - P_2 \cdot (4\pi R^3 \tilde{\epsilon})^{-1} \right]; \\ P_2 = 4\pi R^3 \tilde{\epsilon} \left[A \exp\left(-\frac{(1+x_d)^2}{2a^2}\right) - P_1 \cdot (4\pi R^3 \tilde{\epsilon})^{-1} \right], \end{cases} \quad (3)$$

а результат сканирования – по формуле:

$$\frac{\delta\tilde{f}}{\tilde{f}}(x_d) = K_0 A \left[\frac{P_1 \cdot \exp\left(-\frac{(1-x_d)^2}{2a^2}\right) + P_2 \cdot \exp\left(-\frac{(1+x_d)^2}{2a^2}\right)}{P_1 + P_2} \right]. \quad (4)$$

Полученные зависимости для различных значений параметра α и $a = 20R$ показаны на рис. 2. Значение эффективной ширины невозмущенного поля выбрано значительно превышающим размеры неоднородностей, для того, чтобы обеспечить выполнение принятого приближения.

Для необработанных результатов разрешающая способность определяется шириной распределения невозмущенного поля и составляет $2l \approx 2a$ (при таком расстоянии между неоднородностями на графике уже наблюдаются два различных максимума). В свою очередь, эта ширина определяется как величиной апертуры датчика, так и расстоянием до плоскости сканирования, что согласуется с выводами различных авторов. Отметим также, что уровень шума при этом лишь незначительно влияет на разрешающую способность, так как углубление между максимумами быстро растет с увеличением расстояния между неоднородностями и практически достигает максимума при $2l \approx 4a$. Вместе с тем, очевидно, что при малом уровне шума $\delta\tilde{f}_N$ мы можем надежно обнаруживать отличие формы сигнала от гауссоиды (соответствующей сигналу от единичной неоднородности). Для приближенной оценки разрешающей способности будем полагать, что ширина гауссоиды (сигнала от единичной неоднородности задана с большой точностью). Это требование равносильно требованию высокой точности измерения расстояния до поверхности объекта. Тогда для разрешения достаточно отличия сигналов в двух точках (центр и полувысота) на величину, превышающую шум. Сам алгоритм реконструкции неоднородностей мы рассмотрим далее. Из (3), (4) получаем оценку:

$$l \geq a \sqrt{\left(\frac{\delta\tilde{f}_N}{\tilde{f}}\right) \cdot (8\pi R^3 \tilde{\epsilon} K_0 A^2)^{-1}} \quad (5)$$

Из полученной оценки следует, что разрешающую способность можно существенно повысить, снижая уровень шума и применяя алгоритм реконструкции. Множитель в круглых скобках пропор-

ционален об'єму неоднородності, квадрату напруженності невозмущенного поля і фактично характеризує рівень сигналу $\delta\tilde{f}$. Поєтому ми можемо також записати з точністю до коефіцієнта

$$l \geq \text{Const} \cdot a \sqrt{\delta\tilde{f}_N / \delta\tilde{f}}. \quad (6)$$

Отже, що в разі високої чутливості методу, коли розрешаюча здатність набагато перевищує розмір апертури, для її оцінки оказується суттєвим лише один параметр розподілення

$$(E_0 + E_{01})_y(x), \left(\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} \right)_{x=x_D} - \text{его максимальная}$$

кривизна. Поєтому можна обобщити отриману вище формулу на випадок негауссових розподілень.

$$l \geq \text{Const} \cdot \left(2 \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} \right)_{x=x_D}^{-1/2} \cdot \sqrt{\frac{\delta\tilde{f}_N}{\delta\tilde{f}}}. \quad (7)$$

Для практичного застосування зручно зв'язати просторове розрешення мікроскопа з його розрешенням по глибині. Для цього знайдемо з (1) приблизне значення частотного сдвигу, який викликаний зміною відстані до об'єкта на δ . Еквівалентною цьому зміні неоднорідності представляє собою тонкий шар діелектрика з $\delta\tilde{\epsilon}_1 = \pm(\tilde{\epsilon}_0 - 1)\epsilon_0$. Під впливом невозмущенного поля датчика в цьому шарі виникає дипольний момент з густиною розподілення по поверхності: $P_\delta(x) = \delta \cdot (E_0 + E_{01})(x) \cdot \delta\tilde{\epsilon}_1 / \tilde{\epsilon}_0$, який викликає зсув частоти

$$\left[\frac{\delta\tilde{f}}{\tilde{f}}(x_d) \right]_\delta = K_0 A^2 \delta \frac{\delta\tilde{\epsilon}_1}{\tilde{\epsilon}_0} \pi a^2. \quad (8)$$

Аналогічно для сферическої неоднорідності радіуса $R \ll a$, розташованої на поверхні об'єкта в центрі розподілення невозмущенного поля

$$\left[\frac{\delta\tilde{f}}{\tilde{f}}(x_d) \right]_R = 8\pi R^3 K_0 A^2 \frac{\delta\tilde{\epsilon}_1}{\tilde{\epsilon}_0} \quad (9)$$

(отже, що порожнина такої ж радіуса, розташована під поверхнею, дає інший результат). Полагаючи розмір неоднорідності рівним розрешаючій здатності ($2R = 2l$), з (5), (8), (9) отримимо просте співвідношення:

$$1/a \approx (\delta / (8a))^{1/5}. \quad (10)$$

В роботі [5] наведені такі дані: $a \approx 100 \mu\text{m}$; $\delta \approx 55 \text{nm}$ і $l \approx 14 \mu\text{m}$. Таким чином, можна очікувати, що застосування алгоритму реконструкції дозволить збільшити розрешаючу здатність мікроскопа в 7 разів. Перевірка результатів застосування простішого алгоритму реконструкції до наведених в роботі експериментальних даних підтвердила цей висновок. Далішнє покращення розрешаючої здатності мікроскопа може бути пов'язано з урахуванням апріорної інформації про властивості шуму і невідомого сигналу [4].

Експериментальна перевірка отриманих оцінок ПРС

Раніше нами був запропонований двохетапний алгоритм реконструкції поверхневих неоднорідностей [2] і на його основі – методика мікрохвильової томографії [3]. Предварительні дослідження показали ефективність цих методів і дозволили суттєво (в деяких випадках на порядок) підвищити ПРС МВМ. Однак їх практичне застосування потребує послідовного рішення двох некоректних завдань, одне з яких розв'язується ітеративним методом. Додатково нами розроблено більш простий алгоритм реконструкції, який, тим не менше, забезпечує необхідну точність і результативну ПРС. Він оснований на наближенні локальності вторичного поля малих неоднорідностей і застосовується в тому випадку, коли їх розміри набагато менше половини діаметра скануючого датчика. В проведенних нами дослідженнях (рис. 2, 3) вдалося розрізнити неоднорідності, розмір яких на два порядки менше половини діаметра скануючого поля (рис. 2, 3). Таким чином, прийняте наближення для таких об'єктів виконується з високою точністю і до нього може бути застосовано новий алгоритм реконструкції. Так, при діаметрі острия зонда $30 \mu\text{m}$ і його висоті над контролюваною поверхнею $25 - 35 \mu\text{m}$ вдається досягти просторового розрешення $1 \mu\text{m}$.

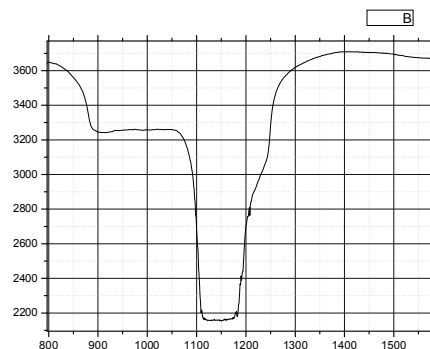


Рис. 2. Результат сканування тестового об'єкта (розногочинна металізація) датчиком, розташованим на висоті $40 \mu\text{m}$ і з діаметром острия коаксіального зонда $30 \mu\text{m}$ (по реконструкції краю ступінок металізації визначаються з точністю $30 - 40 \mu\text{m}$)

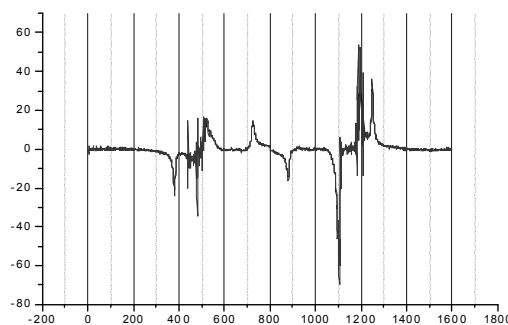


Рис. 3. Результат попередньої обробки результатів прямого і зворотного сканування підтверджує відтворюваність піків, відповідних границям шарів, з точністю до $1 \mu\text{m}$

Список литературы

1. Atif Imtiaz. Anlage Effect of tip-geometry on contrast and spatial-resolution of the Near-Field Microwave Microscope / Atif Imtiaz, M. Steven // *Journal of applied physics*. – 2006. – Vol. 100, No. 1. – P. 37-41.
2. Алгоритм реконструкции изображений в ближне-полевой сканирующей микроволновой микроскопии / Ю.Е. Гордиенко, С.И. Мельник, В.В. Петров, А.Л. Иценко // *Радиотехника*. – 2007. – № 151. – С. 259-265.
3. Реализация новых направлений повышения разрешающей способности микроволновой микроскопии полупроводников / Ю.Е. Гордиенко, С.И. Мельник, В.В. Петров, Н.И. Слипенченко // 17-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2007): материалы конференции. – Севастополь: Вебер, 2007. – С. 547-548.
4. Гордиенко Ю.Е. Информационное направление повышения разрешающей способности микроволновой микроскопии / Ю.Е. Гордиенко, С.И. Мельник, Н.И. Слипенченко // *Радиотехника*. – 2006. – № 147. – С. 157-163.
5. Near-field scanning microwave microscopy: measuring local microwave properties and electric field distributions / B.J. Feenstra, C.P. Vlahacos, Ashfaq S. Thanawalla, D.E. Steinhauer, S.K. Dutta, F.C. Wellstood and Steven M. Anlage. – arXiv:cond-mat/9802293 v2 4 Mar 1998.

Поступила в редколлегию 22.07.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Харьков.

ОЦІНКА ГРАНИЧНОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ В МІКРОХВИЛЬОВІЙ СКАНУЮЧІЙ МІКРОСКОПІЇ

С.І. Мельник, М.І. Слипенченко

Одержано формулу для оцінки гранично досяжної просторової роздільної здатності в методі мікрохвильової скануючої микроскопії. Показано, що на неї мультиплікативно впливають як фактор локалізації скануючого поля, що асоціюють із кривиною максимуму його розподілення, так і відношення сигнал-шум. Таким чином, просторова роздільна здатність може бути суттєво покращена не тільки завдяки мініатюризації вістря зонда, а й завдяки зменшенню вкладу шумової складової та застосуванню алгоритму реконструкції до виміряного профілю. Перевірка точності оцінки на реальних даних показала її адекватність. У результаті реконструкції вдалося поліпшити роздільну здатність у порівнянні із початковими даними на порядок.

Ключові слова: мікрохвильова скануюча микроскопія, роздільна здатність, реконструкція зображення.

ESTIMATE FOR THE LIMITING RESOLVING POWER IN THE MICROWAVE SCANNING MICROSCOPY

S.I. Melnik, N.I. Slipchenko

The formula for estimate of the highest level attainable of the space resolving power in the microwave scanning microscopy was received. It is demonstrated that the signal-noise ratio produce the multiplicative effect in it as well, as the localizing factor of the scanning field (it is associated with its curvature maximum). So, the space resolving power can be improved substantially by the sensor point minimization not only, but by the reduction of noise-signal component and by the algorithm of reconstruction to the measured profile. Verification of accuracy of the estimate on the real dates demonstrated its adequacy. The space resolving power was improved in comparison with the initial dates by a factor of 10.

Keywords: microwave scanning microscopy, resolving power, reconstruction of images.