

РАЗДЕЛ IV. ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

Для проведения быстрой сверки показаний исследуемого магнитометра с эталонным, датчик эталонного магнитометра был установлен на постамент №2 и с интервалом 10 секунд сделано 4 замера со средним значением $60319,26 \pm 0,01$ нТл. Через минуту на этот постамент, был установлен протонный датчик ММП203, и в результате аналогичных измерений было получено значение среднего $60319,1 \pm 0,8$ нТл. Таким образом, систематическая разность также не превышает 1 нТл, и погрешность разработанного прибора можно оценить как 1 нТл.

Выводы

В результате выполненных работ, был создан протонный магнитометр с точностью ± 1 нТл и шумом $\pm 0,5$ нТл, работающий в диапазоне магнитного поля от 20000 до 100000 нТл в градиенте не более 400 нТл/м.

УДК 621.385.833

ДИАГНОСТИКА НЕПРОВОДЯЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СКАНИРУЮЩИМ ТУННЕЛЬНЫМ МИКРОСКОПОМ

Е.Ю. Шелковников, А.В. Тюриков, П.В. Гуляев, Н.И. Осипов, С.И. Липанов

В работе рассмотрен метод исследования поверхности сканирующим туннельным микроскопом с использованием ее реплики. Приведено решение задачи координатной привязки прямого и обратного СТМ-изображений реплики. Предложена методика автоматического вычисления параметров взаимного сдвига кадров с учетом их искажений.

Ключевые слова: сканирующий туннельный микроскоп, реплика поверхности, зондирующее острие, нанорельеф, восстановление СТМ-изображений

Введение

Одним из основных факторов, сдерживающих применение сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) для изучения наночастиц, является ухудшение пространственного разрешения и искажения СТМ-изображений, возникающие при сканировании неровностей нанорельефа, сравнимых с размерами рабочей части зондирующего острия (ЗО) иглы (минимальный радиус закругления кончика ЗО составляет ~ 10 нм). Это приводит к тому, что изображение поверхности нанобъектов представляет собой сложную функцию, содержащую информацию как о рельефе поверхности, так и о структуре рабочей части ЗО.

В основе большинства используемых методов реконструкции поверхности по ее СТМ-изображению лежит поиск координат точки туннельного контакта ЗО и исследуемой поверхности, при этом для реализации алгоритмов реконструкции поверхности необ-

Разработанный магнитометр будет установлен в абсолютном павильоне обсерватории «Байгазан» летом 2012 года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нечаев, С.А. Руководство для стационарных геомагнитных наблюдений. - Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2006. - 140 с.
2. Гвоздарев, А.Ю. Организация непрерывной регистрации магнитных вариаций на станции Байгазан (Телецкое озеро) А.Ю. Гвоздарев, А.И. Бакиянов, А.А. Бетёв, Е.О. Учайкин, П.Б. Бородин, С.Ю. Хомутов // Научный вестник Республики Алтай – Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, 2010. - №4. – С.31-42;

к.т.н., доцент Гвоздарев А.Ю., e-mail: gvozдарев@ngs.ru, аспирант Кудин Д.В., e-mail: dvkudin@gmail.com, аспирант Учайкин Е.О., e-mail: evgeniy_uch@mail.ru, – Горно-Алтайский государственный университет.

ходимо знать форму и размеры кончика ЗО. Однако прямое решение такой задачи требует сложных математических вычислений [1,2].

Метод СТМ-исследования поверхности с использованием ее реплики

В данной работе рассмотрен метод исследования поверхности твердого тела туннельным микроскопом с использованием ее реплики [3,4], включающий сканирование поверхности ЗО при постоянном туннельном токе, реконструкцию реальной поверхности по ее СТМ-изображению. Метод заключается в том, что формируют проводящую реплику исследуемой поверхности, проводят сканирование этой реплики с одной стороны, а затем с обратной – этой же иглой, но зеркально развернутой в плоскости сканирования, прямое и инвертированное обратное СТМ-изображения совмещают и по соответствующим СТМ-профилограммам этих изображений производят восстановление реальной поверхности путем сравнения углов наклона

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 3/2, 2012

касательных в соответствующих парах точек обеих СТМ-профилограмм. Формирование проводящей реплики исследуемой поверхности образца позволяет расширить функциональные возможности метода сканирующей туннельной микроскопии, так как позволяет изучать с применением СТМ как проводящие, так и непроводящие поверхности. Повышение точности реконструкции реальной поверхности связано с возможностью (при сканировании реплики с обратной стороны) восстановления на СТМ-изображениях глубоких и узких «провалов» на исследуемой поверхности с размерами, меньшими радиуса закругления острия.

Следует отметить, что точность реконструкции исследуемой поверхности определяется, в первую очередь, точностью совмещения ее прямого и инвертированного обратного СТМ-изображений. Поэтому была разработана методика автоматического определения совпадения СТМ-изображений, которая заключается в следующем. Производится фильтрация СТМ-изображений и вычитание их постоянной составляющей и постоянного наклона. Далее для каждого двух сравниваемых СТМ-изображений определяют параметры взаимного сдвига СТМ-изображений с учетом их искажений.

Определение параметров сдвига СТМ-изображений

Сущность предложенной методики заключается в следующем. СТМ-изображение размером $m \times m$ задается матрицей $B = B(x, y)$, где $m = 256$ и $0 \leq x \leq m-1, 0 \leq y \leq m-1$. Значения элементов матрицы $B(x, y)$ изменяются в пределах от 0 до 256-1.

Пусть два изображения B_1 и B_2 одного и того же объекта отличаются взаимным сдвигом $\vec{\Delta}_0$ и элементами фона. Будем рассматривать точки t_i изображений вместе с их некоторыми окрестностями радиуса g и обозначать t_i^r . Обозначим через G матрицу, значения элементов которой первоначально равны нулю. Для точки $t_i^r \in B_1$ на изображении B_2 выделим множество $\{T_l^i | l = 1, 2, \dots, q\}$ точек, сходных по некоторому критерию R с точкой t_i^r . Между точками $\{T_l^i\}$ и точкой t_i^r вычислим взаимные сдвиги и получим множество сдвигов $\{\vec{\Delta}_l^i | l = 1, 2, \dots, q\}$. Установим однозначное

соответствие между величиной сдвига и элементом g матрицы G . Теперь увеличим на "1" те элементы матрицы G , которые определяются множеством $\{\vec{\Delta}_l^i\}$.

Далее, описанную процедуру повторим для следующей точки $t_{i+1}^r \in B_1$. Можно показать, что после повторения такой процедуры для достаточно большого числа или всех точек B_1 элемент матрицы G , соответствующий искомой величине сдвига $\vec{\Delta}_0$, примет наибольшее значение среди остальных. Действительно, в каждом описанном выше цикле появление в множестве $\{\vec{\Delta}_l^i | l = 1, 2, \dots, q\}$ элемента, равного истинной величине взаимного сдвига $\vec{\Delta}_0$ изображений B_1 и B_2 , носит регулярный характер, так как для одноименных точек этих изображений параметр сдвига обладает интегральным свойством. Поэтому значение соответствующего $\vec{\Delta}_0$ элемента матрицы G будет стремиться к величине n , где n - число точек, выбранных на изображении B_1 . Значения же остальных $(q - 1)$ элементов множества $\{\vec{\Delta}_l^i\}$ представляют случайную величину, а сами они соответствуют точкам фона или разноименным точкам изображений. Следовательно, в каждом из n циклов будет корректироваться случайный набор из $(q - 1)$ элементов матрицы, то есть значения всех (кроме $g(\vec{\Delta}_0)$) элементов G будут меньше n .

Таким образом, величину сдвига можно определить как

$$\vec{\Delta}_0 = \operatorname{argmax}(G(\vec{\Delta})). \quad (1)$$

Поскольку СТМ-изображения обрабатываются путем их локального анализа, появляется возможность эффективным образом устранить яркие искажения частей изображения. В большинстве случаев для небольшой окрестности точки изображения такие искажения достаточно хорошо аппроксимируются линейной функцией. Поэтому, в качестве меры близости R можно использовать, например, взаимную корреляцию

$$R(\tau_1, \tau_2) = \frac{\sum_x \sum_y t_1(x, y) t_2(x - \tau_1, y - \tau_2)}{\sqrt{\sum_x \sum_y t_2^2(x - \tau_1, y - \tau_2)}} \quad (2)$$

или коэффициент корреляции. Указанная функция рассчитывается для всех возможных значений взаимного сдвига изображений τ_1 ,

РАЗДЕЛ IV. ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

τ_2 и имеет пик в том месте, где изображения совпадают.

Таким образом, помехоустойчивость определения сдвига достигается за счет следующих факторов:

- внесения большой избыточности в искомые параметры сдвига на основе его интегрального свойства;
- нейтрализации яркостных искажений путем локального анализа изображений.

На рисунках 1, 2 на примере двух модельных СТМ-изображений показан общий вид матрицы G с характерным пиком, соответствующим величине взаимного сдвига этих изображений.

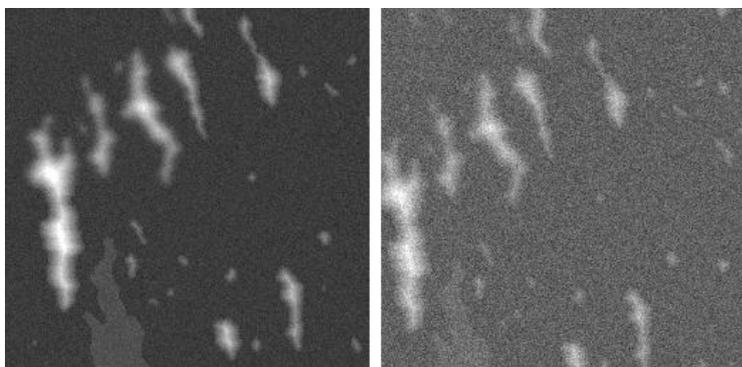


Рисунок 1 – Модельные изображения отличающиеся уровнем помех и взаимным сдвигом $\Delta_x = -20$, $\Delta_y = 15$

Если значение $R(\tau_1, \tau_2)$ находится в допуске, то считается, что сравниваемые два СТМ-изображения соответствуют одному и тому же участку исследуемой поверхности. Если неинвертированное СТМ-изображение «обратной» стороны реплики 2 не совпадает с контрольным точным инвертированным СТМ-изображением «прямой» стороны реплики, то производятся точный сдвиг иглы 5 с помощью пьезосканера СТМ и повторное сканирование реплики 2, пока эти точные СТМ-изображения нанорельефа поверхности не будут совпадать с заранее заданной погрешностью.

Результаты и их обсуждение

Задача реконструкции реальной профилограммы поверхности по прямой 1 и обратной 2 неинвертированным СТМ - профилограммам реплики 3 после их совмещения решается следующим образом. Сначала определяют, к какому из двух типов относятся данный участок поверхности и его СТМ-профилограммы. Участки первого типа - это участки плавного изменения микрорельефа,

когда на поверхности нет «черных дыр» и острие иглы 5 может приблизиться на расстояние туннельного зазора \sim в 1 нм ко всем участкам поверхности (т.е. это участки микрорельефа с кривизной, меньшей кривизны рабочего кончика острия). Этим участкам поверхности соответствует случай пересечения горизонталью в двух точках a, b одновременно прямой и обратной СТМ-профилограмм (рисунок 3). Участки второго типа – это участки более сложного рельефа, когда на поверхности имеются «черные дыры» и не ко всем участкам поверхности игла может приблизиться на расстояние туннельного зазора в \sim 1 нм (т.е. это участки микрорельефа с кри-

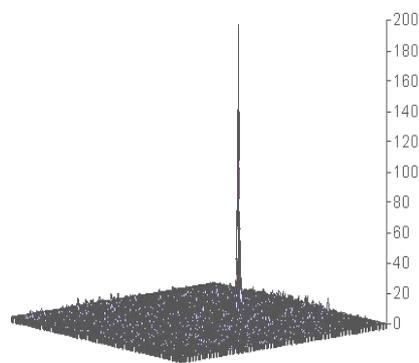


Рисунок 2 – Гистограмма G_{Δ} , вычисленная для изображений из рисунка 1

визной, большей кривизны рабочего кончика острия). Этим участкам поверхности соответствует случай пересечения горизонталью в двух точках c, d только одной – или прямой, или обратной СТМ-профилограмм. Для плавных участков микрорельефа поверхности первого типа при формировании прямой 1 и обратной 2 СТМ-профилограмм горизонтальные рабочие размеры острия иглы 5 в плоскости X, Y исследуемой поверхности «добавляются» с противоположными знаками к соответствующим координатам X, Y рассматриваемой точки поверхности. При этом, при сканировании инвертированной иглой, зеркально развернутой в плоскости, перпендикулярной плоскости сканирования, острие должно приблизиться на расстояние туннельного зазора \sim в 1 нм произвольной, но одной и той же своей точкой к прямой и обратной стороне поверхности реплики также в одной и той же точке. Из-за конечных горизонтальных «рабочих» размеров острия это сближение на прямой и обратной стороне реплики осуществляется боковой точкой f (одновременно принадлежащей и острию иг-

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 3/2, 2012

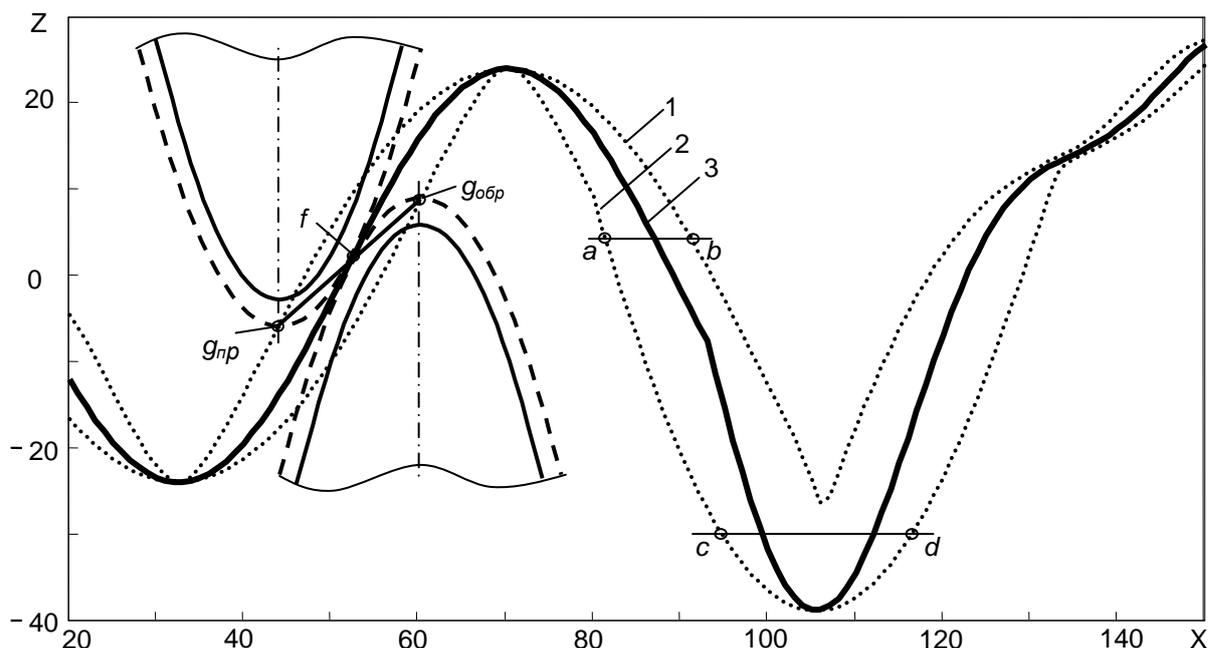


Рисунок 3 – Восстановление реального (3) микрорельефа поверхности по прямой (1) и обратной (2) СТМ-профилограммам

лы, и профилограмме поверхности реплики) изолинии электронной плотности поверхности острия при двух симметричных местоположениях оси острия, одинаковосдвинутых в противоположные стороны относительно абсциссы точки сближения f .

Следует отметить, что при сканировании поверхности и параллельных перемещениях в пространстве иглы 5 ее острие «скользит» на расстоянии туннельного зазора \sim в 1 нм вдоль поверхности реплики 3, при этом все точки острия движутся по одинаковым траекториям (которые являются СТМ-профилограммой), но сдвинутым относительно друг друга по осям X , Y , Z . В момент измерения «прямой» (или «обратной») Z -координаты реплики, происходит геометрическое и временное совпадение одинаковых участков: профилограммы 4 поверхности реплики в окрестности точки f и СТМ-траектории самой точки f острия в ее окрестности, а также СТМ-профилограммы 1 (или 2) точки $g_{пр}$ (или $g_{обр}$) кончика острия в ее окрестности. Следовательно, в момент измерения равны между собой тангенсы углов наклона трех касательных: в точке сближения острия и профилограммы поверхности, а также в соответствующих точках сближения кончика острия с прямой и обратной СТМ-профилограммами. Поэтому реконструируемая профилограмма 3 является геометрическим местом точек середин отрезков, соединяющих между собой соответствующие пары

одноименных точек прямой и обратной СТМ-профилограмм с одинаковыми углами наклона касательных. Для участков поверхности второго типа с кривизной, большей кривизны рабочего кончика острия, в реконструируемую точку помещают высоту той СТМ-профилограммы (прямой или обратной), у которой в этой точке угол наклона касательной меньше. Величина искажений в СТМ-изображениях зависит от высоты микрорельефа, его периодичности, радиуса закругления конкретного ЗО и его формы. В предложенном методе нет необходимости (как в методе численной деконволюции) знать форму поверхности ЗО, так как в СТМ сканирование реплики с обратной стороны проводят тем же ЗО, но зеркально развернутым в плоскости сканирования. Это обеспечивает сканирование любой общей точки прямой и обратной поверхности реплики одной и той же текущей точкой поверхности ЗО с последующим восстановлением реальной поверхности. Следует также отметить, что при восстановлении нанорельефа поверхности однородного материала реплики не возникает погрешности, связанной с различной локальной работой выхода электронов участков исходной поверхности из различного материала.

Вывод

Таким образом, применение предложенного метода обеспечивает возможность простой и одновременно точной реконструкции как проводящих, так и непроводящих иссле-

РАЗДЕЛ IV. ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

двух поверхностей твердого тела туннельным микроскопом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии [Текст] / В.Л. Миронов/ – М.: Техносфера, 2004.– 144с.
2. Бухараев А.А. Диагностика поверхности с помощью сканирующей туннельной микроскопии [Текст] // Заводская лаборатория.– 1994, № 10. – С. 15-25.
3. Патент 2358352 Российская федерация, МПК H01J37/285. Способ исследования поверхности твердого тела туннельным микроскопом [Текст] / Е.Ю. Шелковников. – № 2007144043/28, заявл. 27.11.2007; опубл. 10.06.2009. Бюл. №16.
4. Шелковников Е.Ю. Метод исследования поверхности твердого тела туннельным микроскопом с использованием ее реплики // Химическая физика и мезоскопия. – 2009.– Т.11.– №2.– С.263-270.
5. Шелковников Ю.К. Построение изображений поверхности при многокадровом режиме сканирующего туннельного микроскопа [Текст] / Ю.К. Шелковников, М.Р. Гафаров, П.В. Гуляев, А.В. Тюриков, С.Р. Кизнерцев // Химическая физика и мезоскопия.- 2008.- Т.10.- №4.- С.514-520.

Д.т.н., зав. лаб. **Шелковников Е.Ю.**, к.ф.-м.н., с.н.с. **Тюриков А.В.**, к.т.н., с.н.с. **Гуляев П.В.**, к.т.н., с.н.с. **Осипов Н.И.**, студент **Липанов С.И.** – (3412) 21-89-55, iit@udman.ru - Институт прикладной механики УрО РАН