

Общее описание сверхвысоковакуумного сканирующего туннельного микроскопа GPI 300

1. Введение

GPI-300 представляет собой сверхвысоковакуумный сканирующий туннельный микроскоп, позволяющий получать атомно-разрешенные изображения проводящей поверхности при комнатной температуре образца. Прибор может быть использован для изучения любых поверхностных процессов в режиме *in vivo*. Данный прибор имеет целый ряд отличительных черт, позволяющих легко использовать его в комбинации с другими методами анализа или технологии в контролируемых условиях сверхвысокого вакуума.

В частности,

- Применение пьезоинерциальной системы сближения иглы и образца позволило создать сканер с "открытой архитектурой". Это, в свою очередь, дает принципиальную возможность осуществлять воздействие на поверхность молекулярным, лазерным, электронным или ионным пучками и анализировать соответствующие характеристики поверхности одновременно с записью СТМ изображений.
- Применение единого стандарта держателей игл (зондов) и образцов позволяет использовать единый путь для их транспортировки внутри вакуумной установки. Система транспортировки выполнена с использованием стандартных, серийно выпускаемых XYZ- и линейных манипуляторов, что позволяет легко встраивать СТМ в имеющиеся технологические и аналитические сверхвысоковакуумные установки. Небольшая СТМ камера также может быть присоединена к любым серийным установкам, в которых транспорт образцов осуществляется, как правило, с помощью линейных манипуляторов.
- Апробированная технология очистки и заточки СТМ зондов путем ионной бомбардировки в вакуумной установке с СТМ, позволяет гарантированно доставлять в СТМ острые, атомно-чистые зонды. Восстановление зонда, загрязненного в процессе сканирования, производится *in situ*.
- Помимо аналитических возможностей, таких как собственно микроскопия и спектроскопия, прибор обладает функцией локальной модификации поверхности с помощью СТМ-зонда.

Области применения:

- химические и фотохимические реакции,
- катализ
- напыление
- полупроводниковые технологии
- адсорбция
- модификация поверхности ионами, электронами и другими частицами
- нанолитография, атомные манипуляции

Данный прибор разработан в **Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН** в 1994 году, прошел апробацию и интенсивно эксплуатируется в Отделе технологий и измерений атомного масштаба. Основными объектами исследований являются поверхностные химические реакции, углеродные нанотрубки, радиационные дефекты на поверхности графита, поверхностные сплавы.

2. Состав СТМ

1. Вакуумный модуль
2. Блок электроники для управления СТМ с усилителем туннельного тока (УТТ) и фильтрами сигналов, управляющих пьезоэлементами
3. Плата сопряжения электроники с управляющим компьютером через ISA-шину
4. Соединительные кабели
5. Программное обеспечение
6. Комплект документации

Управление СТМ осуществляется IBM-совместимым компьютером.

3. Спецификация

Рабочая температура	Комнатная
Максимальная область сканирования с использованием высоковольтных усилителей (ВВУ) без использования ВВУ	$(X^{(1)}, Y^{(1)}, Z^{(1)})$ 1.8x1.8x2.0 мкм ³ 180x180x200 нм ³
Область позиционирования (X,Z) без учета толщины образца	5x10 мм ²
Разрешение	Атомарное разрешение на металлах
Максимальная скорость сканирования, обеспечивающая атомное разрешение в режиме постоянного тока	1000 Å/с
Механизм подвода и позиционирования	Пьезо-инерционный
Скорость подвода в режиме контроля туннельного тока	0.2 мкм/с
Диапазон туннельного тока	0,01÷10.0 нА
Диапазон туннельного напряжения	±10 В
Стационарный дрейф в случае отсутствия в камере нестационарных тепловых полей и излучений	0.2 нм/мин
Резонансная частота сканера	2.0 кГц
Тип обратной связи	Цифровая
Размер образца (X,Y,Z)	10x8x4 мм ³
Резонансная частота пружинного подвеса	1.2 Гц
Размер вакуумного модуля	200x200x630 мм ³
Размер (тип) фланца вакуумного модуля	200 мм (DN160-CF)
Максимальная температура прогрева сканера при отжиге вакуумной камеры	150° С
Базовое давление в вакуумной камере	1x10 ⁻¹⁰ Торр
Совместимость с другими методами воздействия и анализа поверхности при сканировании	Ионы, лазер, электроны, молекулы, оптическая спектроскопия

- 1) С 24-битным разрешением.

Общая нелинейность (включая нелинейности сканера, электроники и пр.) менее 1%.

3. Вакуумный модуль

Вакуумный модуль STM представляет собой вертикальный вакуумный стакан с проходным отверстием 150 мм (DN160CF) и восемью фланцами DN40CF на боковой поверхности, в котором изнутри закреплены каркас с системой подвеса сканера, сам сканер STM, система арретирования и подводящие провода для управления сканированием и сбора данных. Модуль устанавливается сверху в вакуумную камеру. На верхний фланец вакуумного стакана устанавливается универсальный манипулятор с пятью степенями свободы, который обеспечивает x-, y-, и z-движения, вращение вокруг вертикальной оси и захват держателя с образцом или иглой. Универсальный манипулятор используется для перезарядки образцов и игл.

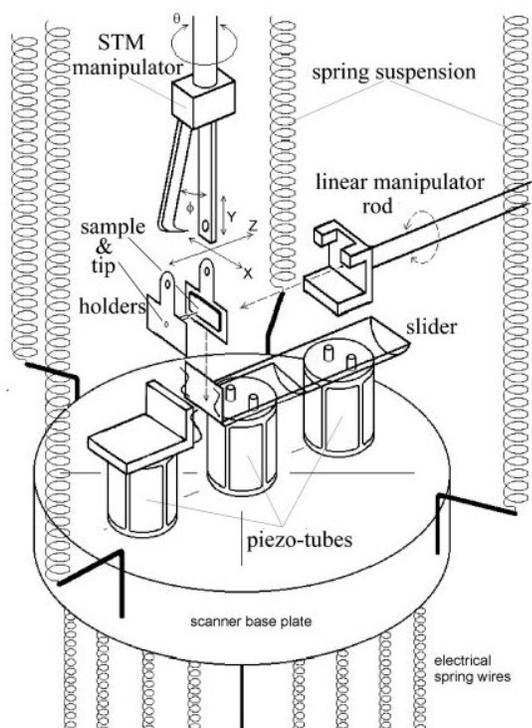


Рис. 1. Схема сканера STM

Сканер STM представляет собой три вертикальных трубчатых пьезоэлемента, закрепленных сверху на медной платформе, которая имеет форму цилиндра. Каждый пьезоэлемент сканера имеет четыре внешних электрода и один внутренний (рис.1). Это дает возможность верхним концам каждого пьезоэлемента двигаться по трем взаимно ортогональным направлениям при подаче соответствующих напряжений на их электроды. Держатель с иглой устанавливается в пружинный зажим на одном из крайних пьезоэлементов. Два других пьезоэлемента несут на себе по два полированных сапфировых шарика. На этих четырех шариках лежит ползун. Ползун сделан из нержавеющей стали, снизу к нему приклеены сапфировые пластинки, по которым скользят упомянутые выше шарики. На торце ползуна, обращенного к игле, смонтирован пружинный зажим для держателя образца. Выбранная пара скольжения сапфир – сапфир и возможность подбора силы прижима обеспечивают устойчивое движение ползуна при любом вакууме, что необходимо для реализации пьезоинерционного привода, используемого в сканере для подвода образца к игле и позиционирования иглы по горизонтали. Реализованное в конструкции динамическое инерционное скольжение образца относительно иглы позволяет отказаться от любых механических вводов в вакуум. При подаче на соответствующие электроды обоих пьезоэлементов напряжения, нарастающего по параболическому закону, происходит изгиб пьезоэлементов и движение их верхних частей и, тем самым, ползуна с образцом с постоянным ускорением. Это обеспечивает максимально

быстрое смещение ползуна на заданное расстояние. При этом ускорение выбрано так, что не происходит проскальзывание ползуна относительно сапфировых шариков. Затем напряжение на одной из керамик резко сбрасывается, что приводит к выпрямлению пьезоэлемента и проскальзыванию сапфировых шариков под ползуном. В следующий момент аналогичный сброс напряжения вызывает проскальзывание шариков второго пьезоэлемента под ползуном. Таким образом ползун остается практически на месте. В результате цикла, состоящего из плавного изгиба пьезоэлементов и резкого их выпрямления, пьезоэлементы возвращаются в исходное состояние, а ползун оказывается смещенным. Такой цикл повторяется с частотой 10-50 гц, в результате чего ползун перемещается со скоростью до 1 мм/с. Аналогичным образом, но при использовании других электродов только одного пьезоэлемента происходит перемещение ползуна с образцом горизонтально вдоль оси X, параллельно поверхности образца, что позволяет выбирать область сканирования на образце.

Данный сканер сконструирован так, чтобы поверхность образца при сканировании была максимально открыта для воздействия пучка молекул, электронов или фотонов. Это позволяет получать последовательные СТМ-изображения непосредственно в процессе воздействия на поверхность. Эта же особенность сканера позволяет эффективно собирать оптическое излучение из области сканирования. Для ввода/вывода оптического излучения, ввода газа, установки электронной или ионной пушек в камере СТМ могут быть предусмотрены дополнительные фланцы, оси которых сориентированы на сканируемую поверхность образца.

4. Электронная система управления

Цифровая система управления разработана с целью получения максимального облегчения управления СТМ в режимах сканирования, СТМ-литографии, получения спектральных характеристик и пр., обеспечивая при этом высокие показатели по шумовым характеристикам и скорости работы. Описываемая система может быть также использована для управления другими объектами, где требуется управление с обратной связью (сервоприводы, системы виброизоляции и т.д.).

Центральная часть системы представляет собой микрокомпьютер на основе цифрового процессора обработки сигналов (Digital Signal Processor - DSP) ADSP-2181, выполняющий программу, загруженную в его память программ. Основная программа — PID-регулятор с различными дополнительными функциями, доступными в одно и то же время (накопление данных с канала АЦП, генерация сигналов на выходе ЦАПов и т.д.). При включении питания память процессора может загружаться из флэш-ПЗУ или непосредственно из файла на диске. Программу, записанную во флэш-ПЗУ, можно при необходимости периодически обновлять.

Усиленный сигнал положения регулируемого объекта подается на 16-битный АЦП, который формирует входное 32-битное слово для PID-регулятора. На выходе цифровой системы формируется регулирующий сигнал с 24-битной точностью, при необходимости усиленный до ± 140 В. Процессор производит 64-битные вычисления для получения корректного 32-битного выходного значения. При правильной настройке пользователем общего усиления (32-битных PID-коэффициентов), можно получить линейное регулирование с 32-битной точностью для любого входного сигнала в 16-битном диапазоне.

Система позволяет накапливать и хранить до 131072 16-битных значений, снятых с АЦП или записанных пользователем.

4.1. Структура системы управления

Структурная блок-схема системы управления представлена на Рис. 2.

Основным ядром системы управления является аналого-цифровая электронная система. В состав аналого-цифровой электронной системы входят:

- Цифровой сигнальный процессор (DSP);
- 16-битный АЦП туннельного тока;
- 10-битный быстродействующий АЦП для измерения быстропротекающих процессов;
- 8-канальный 12-битный АЦП;
- 24-битный ЦАП петли обратной связи СТМ;
- 3 отдельных 24-битных ЦАПа сканирования;
- 10 отдельных 16-битных ЦАПов;
- 16-битный регистр выходных логических сигналов TTL уровня;
- один логический вход TTL уровня.

Связь DSP с управляющим компьютером осуществляется с помощью параллельной шины через плату интерфейса, которая устанавливается в ISA шину управляющего компьютера.

Высоковольтные усилители VBYZscan, VBYXscan, VBYUscan, VBYZadd предназначены

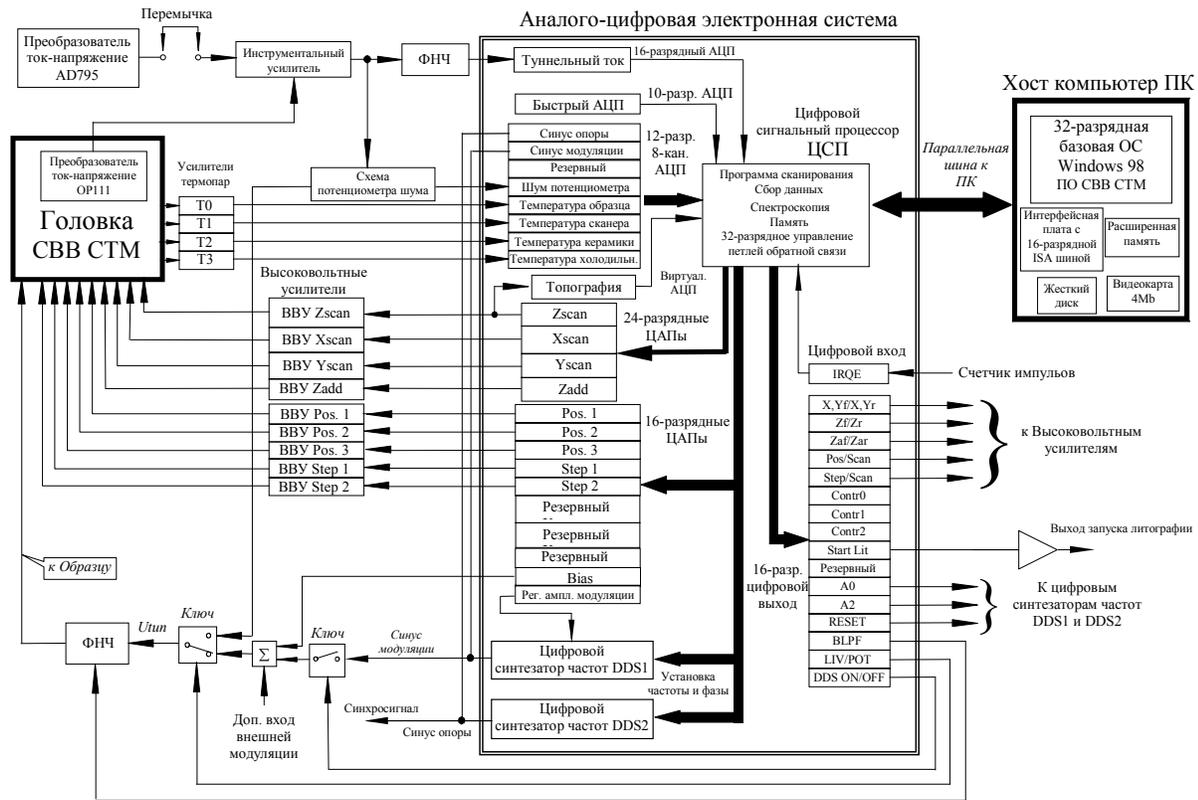


Рис. 2. Структурная блок-схема системы управления

для управления пьезодвигателями сканера микроскопа. Для изменения диапазона выходного напряжения используются логические биты регистра Zf/Zr, Xf/Xr и Zaf/Zar.

Высоковольтные усилители VBYPos.1, VBYPos.2, VBYPos.3, VBYStep1, VBYStep2 предназначены для управления пьезодвигателями позиционера микроскопа. При значениях битов Pos/Scan и Step/Scan равном 0 выходы VBYPos и VBYStep отключаются, а пьезодвигатели позиционера микроскопа замыкаются на высоковольтную землю.

Контур петли обратной связи включает в себя преобразователь туннельный ток/напряжение, усилитель сигнала туннельного тока, НЧ фильтр, АЦП тока, PID-регулятор,

ЦАП выходного сигнала PID-регулятора (24-bit ЦАП Zscan) и пьезодвигатель сканера СТМ, управляющий расстоянием игла-образец.

Напряжение туннельного промежутка Utun формируется 16-битным ЦАП Bias и далее поступает через сумматор, ключ, фильтр нижних частот, на образец (иглу) микроскопа.

В описываемой системе реализованы два варианта включения преобразователя туннельного тока в напряжение в контур обратной связи. В первом варианте преобразователь ток/напряжение (ОРА111) находится внутри головки СТМ. При этом «Перемычка» разорвана. Во втором варианте преобразователь ток/напряжение (ОРА111) внутри головки СТМ отсутствует, а в контур обратной связи включен преобразователь ток/напряжение (AD795), реализованный в составе выносного блока аналогового интерфейса. «Перемычка» при этом замкнута. Использование второго варианта позволяет произвести проверку технических характеристик системы без головки СТМ, а также работу системы в составе СТМ, головка которого не имеет встроенного преобразователя туннельный ток/напряжение.

Система управления имеет четыре канала измерения температуры и позволяет по двум из них формировать независимые петли регулирования. Для этого используются усилители терморпар T0, T1, T2, T3 с преобразователями уровня для согласования с входным диапазоном соответствующих АЦП, а также ЦАПы Temperature Control L1 и L2. Это находит применение в моделях СТМ с изменяемой температурой образца для измерения температур образца, сканера, пьезоэлементов и охладителя.

Для получения зависимостей $dI/dU(U)$ в режиме спектроскопии методом синхронного детектирования система управления имеет два прямых цифровых синтезатора частот DDS1 и DDS2. Оба синтезатора частот реализованы на базе м/с DDS (Direct Digital Synthesizer) AD9830. Частота и сдвиг фаз синуса модуляции и синуса опоры устанавливается программно от ЦСП. Выбор регистров частоты или фазы в момент записи осуществляется логическими битами «A0» и «A2». Сброс регистров осуществляется логическим битом «RESET». Амплитуда синуса модуляции на выходе синтезатора частот DDS1 регулируется 16-разрядным ЦАПом «Рег. ампл. модуляции». Контроль сигналов синусов модуляции и опоры осуществляется с помощью 2-х каналов 8-канального 12-разрядного АЦП. Сигнал синуса модуляции подключается к Utun ключом, который управляется логическим битом «DDS ON/OFF».

Для измерения амплитуды модуляции туннельного тока можно использовать внешний синхронный детектор, выходной сигнал которого подается на 10-ти разрядный быстродействующий АЦП «Быстрый АЦП». Для синхронизации внешнего синхронного детектора используется сигнал синхронизации «Синхросигнал», формируемый синтезатором частот DDS2. Настройка синхронизации обеспечивается программным изменением фазы между синхросигналом и синусом модуляции.

Для подключения внешних сигналов модуляции Utun, а также сигналов импульсов литографии предусмотрен дополнительный вход внешней модуляции. Также имеется возможность программного запуска внешнего генератора литографии логическим битом «Start Lit» через мощный выход запуска литографии.

В описываемой системе управления реализована возможность работы микроскопа в режиме сканирующего шумового потенциометра. В этом режиме измеряется локальное распределение электрических потенциалов поверхности образца. Блок «Noise Potentiometry Unit» выполнен по схеме аналогового интегратора. Выходной сигнал интегратора делится в 1000 раз и поступает через ключ «Switch» на образец. Сигнал Utun при этом отключается. Таким образом образуется вторая петля обратной связи, где туннельный ток поддерживается равным нулю. Выходной сигнал интегратора пропорционален электрическому потенциалу поверхности. Выходной сигнал интегратора через согласующую схему поступает на вход 12-битного АЦП «Noise Potentiometry».

5. Программное обеспечение

Программное обеспечение системы управления состоит из двух основных частей.

- Программы верхнего уровня (управляющей программы), работающей на управляющем компьютере, которая обеспечивает управление СТМ в интерактивном режиме на уровне команд, посылаемых сигнальному процессору, а также отображает характеристики режимов работы СТМ, результаты сканирования и измерения на экране монитора, производит математическую обработку данных;
- Программы нижнего уровня, загружаемой в оперативную память сигнального процессора системы управления, для непосредственного управления функциональными узлами системы, а также для передачи данных в управляющий компьютер.

А также дополнительной программы, позволяющей восстанавливать истинное изображение записанной поверхности путем компенсации искажений, вносимых дрейфом, наклоном, а также неправильной калибровкой сканера.

5.1 Управляющая программа

Вся работа СТМ контролируется IBM-совместимым компьютером, сопряженным с блоком электроники СТМ. Графический многооконный пользовательский интерфейс управляющей программы (УП) позволяет оператору контролировать все режимы работы СТМ, выводить на экран сканируемое изображение и просматривать ранее записанные кадры.

Управляющая программа обеспечивает быстрый подвод (отвод) образца к игле (от иглы) со скоростью до 1 мм/с и выбор точки сканирования вдоль оси X в диапазоне нескольких миллиметров с помощью только вибрационного пьезодвигателя, аккуратный, без повреждения иглы, автоматический подвод образца к игле с расстояния $10\div 100$ мкм до получения туннельного тока ($5\div 10$ Å) за время не более 15 мин. В конце подвода все пьезоэлементы сканера автоматически оказываются в минимально изогнутом состоянии и под малыми управляющими напряжениями. Эта особенность, с одной стороны, существенно снижает крипп керамики в момент завершения подвода образца и, тем самым, обеспечивает небольшой дрейф, что позволяет сразу же начать сканирование. С другой стороны, малые управляющие напряжения позволяют выключить из работы (в этот момент) высоковольтные усилители и снизить уровень электрических шумов, что может быть полезным для получения высококачественных изображений.

Управляющая программа реализует различные варианты сканирования СТМ: режим постоянного туннельного тока, режим постоянной высоты и смешанный режим - в зависимости от устанавливаемых коэффициентов управления обратной связью. Существует специальный режим записи двойных кадров для измерения и компенсации дрейфа и наклона образца (используется также для начальной калибровки пьезокерамики). Кроме того, имеются режимы записи вольтамперных характеристик $I(V)$, кривых подвода $I(Z)$ в любых точках кадра и подачи электрических импульсов на образец (СТМ литография).

Записанные СТМ кадры отображаются на экране компьютера в разных видах: построчный вывод в квази-изометрии, вид сверху в разных цветовых гаммах, изометрия поверхности с изменяемым по азимуту и наклону углом зрения на поверхность, изометрия с изменяемым углом зрения и положением источника освещения. Программа обеспечивает следующие виды математической обработки СТМ изображений: вычитание среднего наклона по всему кадру или по выбранному участку кадра; усреднение изображения с помощью различных матриц; вырезание произвольных участков кадра и их масштабирование; измерение высот и расстояний на поверхности, изменение контраста изображения и др.

Многооконный интерфейс программы позволяет использовать часть окон на экране монитора для контроля электроники и для сканирования в реальном времени. В других окнах (в интервале между сканированиями без нарушения режима стабилизации туннельного тока) можно выводить полученные изображения, в том числе и записанные ранее. При этом на экране можно получить одновременно до 20 различных изображений и произвольно перемещать их по экрану.

5.2 Программа восстановления изображения поверхности с учетом дрейфа и наклона образца. Калибровка сканера.

Среди обширного программного обеспечения, используемого в рамках управляющей программы, мы выделили специальную программу восстановления истинного СТМ изображения.

Опыт работы с адсорбционными слоями показывает, что при несовпадении атомного размера адсорбата с соответствующими межатомными расстояниями подложки адсорбированный слой может уплотняться, причем уплотнение слоя зачастую происходит в виде одноосного сжатия, что автоматически приводит к изменению симметрии слоя по сравнению с симметрией подложки. Это означает, что стандартные приемы восстановления искаженного СТМ-изображения, основанные на сохранении в поверхностном слое симметрии подложки, не работают. В литературе имеется достаточно много примеров подобных ошибок. Помимо этого существует достаточно много низкосимметричных поверхностных систем, в которых достаточно сложно использовать априорные знания о симметрии объекта, что также сильно затрудняет задачу восстановления истинного изображения поверхности.

В этой связи нами разработан специальный алгоритм сканирования и обработки изображений, который позволяет устранить искажения, вносимые дрейфом и установочным наклоном образца, и перейти к другой координатной системе, в которой атомная гофрировка поверхности представляется без искажений. Для определения трех проекций скорости дрейфа и установочного наклона образца СТМ-изображение одной и той же области поверхности записывается в виде двух кадров, причем кадровое сканирование меняет знак: один кадр вперед, другой - сразу назад, чтобы первая строка второго кадра совпадала с последней строкой первого кадра. Скорость кадровой развертки во втором кадре меняет направление на противоположное, а скорость строчной развертки остается постоянной в обоих кадрах. В этом случае искажения, вызванные дрейфом, будут различными для записанных кадров. Показано, что если правильно сопоставить атомную структуру поверхности в первом и втором кадрах, то можно рассчитать все три компонента скорости дрейфа и установочный наклон образца.

В рамках указанного подхода создана процедура калибровки сканера СТМ по известной атомной структуре, позволяющая определить все три коэффициента преобразования пьезоэлементов сканера и угол между осями сканирования. Тот же подход, реализованный для СТМ с калиброванным сканером, позволяет на неизвестных атомно-разрешенных структурах получать изображения без существенных искажений. Экспериментально показано, что даже при наличии дрейфа до $0.4 \text{ \AA}/\text{с}$ и наклонной установки образца до 10° точность определения расстояний для любых направлений вдоль поверхности не хуже 5%. Программное обеспечение позволяет использовать предложенный алгоритм в полуавтоматическом режиме.