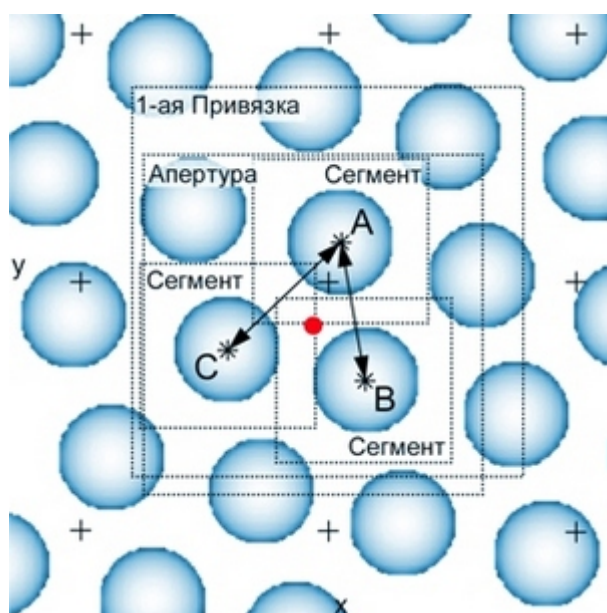


## ПОСТОЯННАЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЁТКИ КАК ЭТАЛОН ДЛИНЫ

Учёными из НИИ Физических проблем имени Ф. В. Лукина (г. Зеленоград) разработан способ калибровки сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) по постоянной кристаллической решётки. Использование постоянной кристаллической решётки в качестве эталона длины позволяет перейти в нанометровом диапазоне к природным эталонам, отказавшись от использования искусственно изготовленных мер длины.

Рассказывает научный сотрудник института к. т. н. **Ростислав Владимирович Лапшин**. Недостатками существующих мер, создаваемых на основе различных дифракционных решёток и периодических микроструктур, являются: большой шаг и большая погрешность этого шага. Оба фактора не позволяют использовать данные меры для точной калибровки сканирующих зондовых микроскопов и других приборов в нанометровом диапазоне.

Поскольку калибровочные меры имеют искусственное происхождение, то их погрешность определяется погрешностью технологии изготовления. Другой путь заключается в использовании природных объектов, калибровочный размер в которых возникает естественным путём. К таким



Локальная калибровочная структура ABC на поверхности кристалла

объектам можно отнести кристаллы. Для получения высококачественных кристаллов необходимо обеспечить чистоту исходного сырья и соответствующие условия роста, остальное природа сделает сама. Технические проблемы, связанные с чистотой используемых веществ, созданием и поддержанием необходимых условий роста, в настоящий момент в основном решены.

Идея применения в сканирующей зондовой микроскопии постоянной решётки кристалла в качестве эталона длины не нова. Однако практическое использование такой меры тормозилось тем, что расстояние между соседними атомами во время измерения сильно искажалось тепловым дрейфом головки микроскопа и ползучестью пьезосканера. Вообще, чем меньше измеряемый объект, тем сильнее влияние теплового дрейфа, ползучести и шума. Решить проблему теплового дрейфа можно путём термостабилизации микроскопа. Однако термостабилизация требует времени для выравнивания температур различных

частей прибора, дополнительного оборудования и специальных помещений. Помимо термостабилизации для повышения механической стабильности зонда, желательно охлаждать микроскоп до низких температур 2-20 К. Низкотемпературные микроскопы это очень дорогие, сложные, работающие в высоком вакууме, специализированные приборы, имеющие ряд функциональных ограничений.

В нашем институте для достижения высокой точности измерения рельефа поверхности предложен новый подход, который базируется на более сложном управлении зондовым микроскопом. Разработанный подход называется особенность-ориентированным сканированием (ООС). Основная идея ООС состоит в том, чтобы использовать особенности рельефа поверхности в качестве опорных точек при измерении поверхности и перемещении по ней. С этой целью в алгоритм сканирования встроена функция распознавания рельефа поверхности, работающая в реальном масштабе времени. В ходе ООС измерение поверхности производится по частям небольшими фрагментами – сегментами.

Кроме этого в алгоритме ООС:

- все перемещения осуществляются на короткие расстояния от одной особенности к другой, расположенной по соседству;
- измеряются относительные расстояния между особенностями;
- все измерения предельно локализованы;
- измерения многократно повторяются с целью усреднения;
- для удержания текущего участка рельефа в поле зрения прибора постоянно выполняются привязки зонда к особенностям поверхности;
- осуществляется непрерывный мониторинг шума и скорости дрейфа;
- искажения, вызываемые дрейфами, нейтрализуются посредством системы иерархически организованных встречных перемещений.

Особенность-ориентированное сканирование является адаптивным, поскольку способно автономно изменять свои действия в зависимости от характера текущего рельефа и фактических условий, в которых проводится измерение.

Наблюдая за работой ООС, на ум приходит аналогия с известной историей барона Мюнхгаузена, в которой он сам себя вытащил из болота за волосы (вместе с лошадью). Не располагая никакими датчиками положения, ООС сама “вытаскивает” в процессе измерения правильное изображение рельефа поверхности из “болота” шумов и нелинейных искажений. Помимо того, что ООС позволяет получить свободное от искажений изображение поверхности, оно ещё и немного улучшает предельное разрешение микроскопа.

В отличие от ранее применяемых процедур калибровки, в которых весь сканер зондового микроскопа характеризовался только тремя глобальными калибровочными коэффициентами по осям X, Y и Z, предложенный нами способ позволяет находить три локальных калибровочных коэффициента для каждой точки пространства перемещения сканера. Такой подход, называемый распределённой калибровкой, даёт возможность устранить все статические погрешности сканера, связанные с нелинейностью его рабочей характеристики, с неортогональностью осей, а также с паразитными взаимными влияниями осей друг на друга.

Поскольку в ходе распределённой калибровки по методу ООС влияние дрейфа устраняется, то появляется возможность проведения множества повторных измерений, число которых неограничено. Повторные измерения позволяют “доставать” из шумов точные значения постоянных кристаллической решётки и, соответственно, точно определять искомые локальные калибровочные коэффициенты. В результате точные измерения можно выполнять без охлаждения микроскопа до низких температур.

Таким образом, предложенный способ распределённой калибровки позволяет точно калибровать сканеры зондовых микроскопов общего назначения, используя постоянные кристаллических решёток в качестве мер длины. Микроскопы общего назначения составляют на сегодняшний день основной парк недорогих зондовых приборов. Точная калибровка теперь может проводиться при комнатной температуре, в обычных помещениях, с использованием обычных средств акустической, вибрационной и тепловой изоляции.

Первая часть исследования, в которой изложен общий подход к распределённой калибровке по кристаллической решётке методом ООС, опубликована в авторитетном европейском журнале “Прикладная наука о поверхности” (R. V. Lapshin, “Drift-insensitive distributed calibration of probe microscope scanner in nanometer range: Approach description”, *Applied Surface Science*, volume 359, pages 629-636, 2015, [бесплатный доступ к статье открыт до 12 января 2016 г.](#)).

Экспериментальные результаты, полученные в режимах виртуальной и реальной распределённых калибровок, планируется опубликовать в следующих номерах этого журнала.