

## 2. Сканеры зондовых микроскопов

Одной из главных задач в СЗМ является точное перемещение образца относительно зонда для сбора информации в разных точках поверхности. Практически во всех сканирующих зондовых микроскопах используется пьезоэлектрический сканер, представляющий собой чрезвычайно точную платформу позиционирования. Очень часто получаемые на СЗМ изображения имеют особенности, которые обусловлены спецификой работы сканера. Именно поэтому необходимо знать, как работает сканер, и правильно трактовать получаемые результаты. **Целью** данной главы является ознакомление с основами работы сканеров и вызываемыми ними искажениями результатов.

### Устройство и работа сканера

Электронные системы СЗМ управляют движением сканера, как это показано на рисунке 2-1.

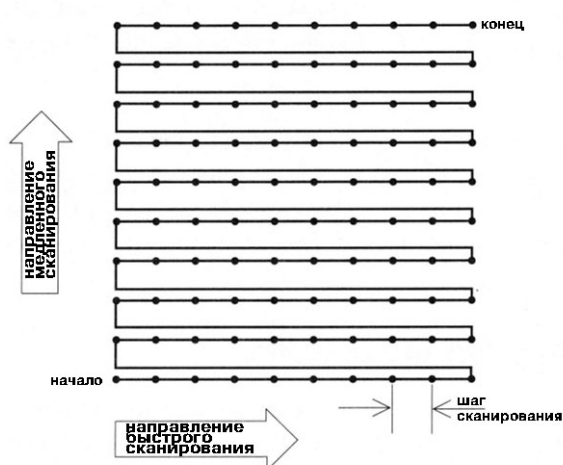


Рисунок 2-1 Траектория движение сканера в процессе получения данных.

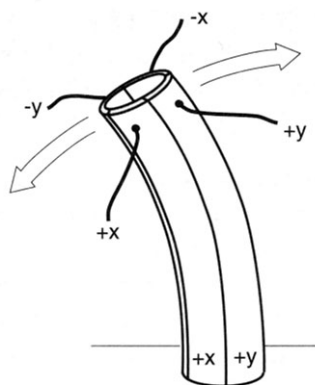
Следует обратить внимание, что чередующиеся строки данных не снимаются в противоположных направлениях. Данные СЗМ собираются только в одном направлении, которое обычно называется **направлением быстрого сканирования**. Это позволяет свести до минимума ошибки построчного совмещения, вызываемые запаздыванием сканера. Перпендикулярное направление, в котором сканер совершает шаговое движение от линии к линии, называется **направлением медленного сканирования**.

В то время, пока сканер перемещается через строку скана, данные изображения отбираются цифровым способом через равные интервалы. Собираемые данные могут быть различны; тип собираемых данных зависит от метода СЗМ, который реализуется в конкретном случае.

Расстояние между точками данных называется **размером шага**. Размер шага определяется размером полного скана и количеством точек данных в строке. В типичном СЗМ размеры скана находятся в пределах от десятка ангстрем до более чем 100 микрон, и от 64 до 512 точек данных в строке (в некоторых системах предлагается 1024 точки данных в строке). Количество строк в наборе данных обычно равно количеству точек в строке.

Пьезоэлектрические сканеры для СЗМ обычно изготавливаются из керамики титаната-цирконата свинца с добавлением различных легирующих добавок. После спекания керамики активный элемент сканера подвергается поляризации. Поляризованный сканер может реагировать на подаваемые на него напряжения выдвигаясь и сжимаясь.

Регулярное использование сканера помогает сохранить поляризацию сканера. Напряжение, подаваемое для приведения сканера в движение, вновь вызывает ориентацию диполей, которые переходят разориентируются со временем. Если сканер не используется регулярно, значительная часть диполей начнет вновь разупорядочиваться (деполяризовываться). Деполяризация становится заметна через несколько недель простоя сканера и значительно усиливается, если сканер подвергается температурам выше 150°C. На многих СЗМ в качестве сканера используются пьезотрубки, конструкция которых показана на рисунке 2-2.



**Рисунок 2-2 Сканер в виде пьезотрубки.**

Четыре электрода напыляются на внешнюю часть трубки, деля ее на вертикально расположенные четверти. На внутреннюю поверхность трубки напыляется еще один электрод. При подаче напряжения на различные электроды вызванное этим механическое напряжение трубки ведет к ее изгибу по определенным осям или к удлинению/сжатию в вертикальном направлении.

Максимальный размер скана, который может быть получен при помощи данного пьезоэлектрического сканера, зависит от длины трубки сканера, диаметра трубки, толщины ее стенок и относительного удлинения керамического материала, из которого она была изготовлена. Обычно в СЗМ используются сканеры, которые могут

осуществлять горизонтальное сканирование в пределах от нескольких десятков ангстрем до более 100 микрон. В вертикальном направлении сканеры СЗМ могут различать изменения высоты от величины ниже ангстрема до 10 микрон (а иногда и больше).

Весьма упрощенно можно сказать, что степень удлинения пьезоэлектрического сканера изменяется линейно вместе с подаваемым напряжением (удлинением называется изменение относительное изменение длины  $\Delta l/l_0$ ). На практике поведение пьезоэлектрических сканеров не такое простое – соотношение между удлинением и электрическим полем отличается от идеальной линейной характеристики.

## Неидеальность сканера

### Собственная нелинейность

Предположим, что подаваемое напряжение начинается с нулевого значения и постепенно повышается до определенной конечной величины. В этом случае зависимость удлинения от напряжения будет нелинейна. Реальная кривая показана на рисунке 2-3.

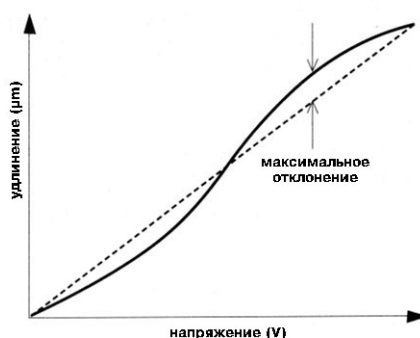


Рисунок 2-3 Собственная нелинейность сканера.

Математически собственная нелинейность пьезоэлектрического материала определяется соотношением между максимальным отклонением от линейной характеристики  $\Delta u$  и идеальным линейным удлинением  $u$  при этом же напряжении. Собственная нелинейность пьезоэлектрических материалов, используемых в системах СЗМ, обычно находится в пределах от 2% до 25%.

При проведении измерений собственная нелинейность сканера выражается в искажении измерительной сетки, показанной на рисунке 2-1. В связи с тем, что сканер не перемещается немедленно при подаче напряжения, точки измерения не располагаются на одинаковом расстоянии. Вследствие этого полученное на СЗМ изображение периодической структуры будет содержать неоднородные расстояния и изгибы прямых линий. На нерегулярных поверхностях искажения могут быть менее заметны; тем не менее не стоит забывать о том, что получаемая картина может не совсем соответствовать действительности.

Перпендикулярно плоскости поверхности образца (в направлении **z**) собственная нелинейность сканера вызывает ошибки при измерении высоты. Калибровка по высоте для СЗМ обычно производится путем сканирования образца, имеющего известную высоту ступенек на поверхности. На основе значения напряжения, подаваемого на **z**-секцию сканера при пересечении ступеньки в линейном приближении возможен расчет коэффициента перевода напряжения, поданного на сканер, в удлинение. Собственная нелинейность сканера будет неизбежно вести к возникновению ошибок, т.к. калибровка проводится в линейном приближении.

## Гистерезис сканера

Картина становится еще сложнее из-за того, что пьезоэлектрическая керамика имеет гистерезис. Предположим, что мы начинаем с нулевого напряжения, постепенно повышая его до некоторого значения, а затем вновь снижаем напряжение до нуля. Кривая зависимости удлинения от напряжения показана на рисунке 2-4. Следует иметь в виду, что в этом разделе принято допущение о том, что значения напряжения меняются медленно. Нелинейности, вызванные зависящими от временного фактора свойствами пьезоэлектрической керамики, рассматриваются ниже.

Гистерезис пьезоэлектрического сканера представляет собой отношение максимального расхождения между двумя кривыми к максимальному удлинению сканера. В некоторых пьезоэлектрических материалах гистерезис может достигать 20%.

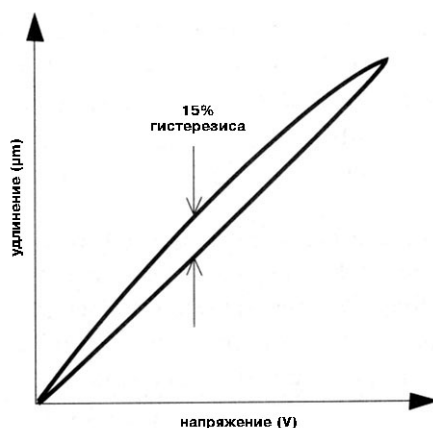


Рисунок 2-4 Гистерезис сканера.

Как уже упоминалось выше, сбор данных СЗМ обычно производится в одном направлении для сведения к минимуму числа ошибок совмещения, которые вызваны гистерезисом сканера. Поскольку большинство современных микроскопов позволяют снятие сканов в любом направлении быстрого сканирования, то можно наблюдать

гистерезис, сравнив изображения, полученные в противоположных направлениях быстрого сканирования.



Рисунок 2-5 Влияние гистерезиса на измеренный профиль ступеньки.

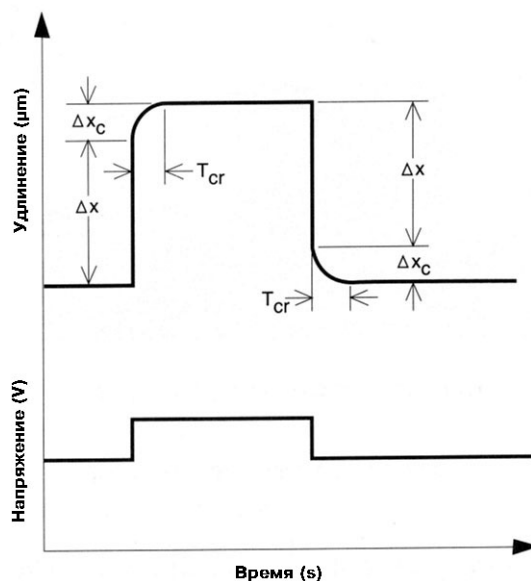
Гистерезис в направлении, перпендикулярном плоскости образца, ведет к появлению ошибочных профилей ступенек и других особенностей на поверхности, как показано на рисунке 2-5 пунктирной линией (рисунок 2-5 сделан с допущением о том, что коэффициент удлинения по оси  $z$  был откалиброван для сокращающегося сканера).

### Ползучесть сканера

При скачкообразном изменении подаваемого напряжения пьезоэлектрический материал не меняет размеры мгновенно. На самом деле, изменения размеров происходят в два этапа: первый этап протекает менее чем за миллисекунду, второй этап существенно более медленный. На рисунке 2-6 приведена временная зависимость линейного размера сканера при подачи напряжения. Возникновение закругленных участков на кривой вызвано явлением **крипа** (или ползучести).

Количественно крип сканера принято характеризовать соотношением  $\Delta x_c / \Delta x$ . Крип выражается в процентах; также обычно указывается характерный временной интервал  $T_{cr}$  (см. рисунок 2-6). Обычно значения крипа сканеров находятся в пределах от 1% до 20%, а характерное время – от 10 до 100 секунд.

В результате проявления крипа два изображения, снятые при различных скоростях сканирования, имеют несколько различный масштаб. Можно быть уверенными в правильности только тех измерений, которые были сделаны при скорости сканирования, использовавшейся при калибровке СЗМ.



**Рисунок 2-6** Графики, иллюстрирующие крив сканера.

Искажения в плоскости сканирования, вызываемые крипом, влекут за собой еще одно неприятное следствие. Предположим, что вы хотите характеризовать какой-либо дефект на поверхности образца. Вы сначала выполняете сканирование большого участка для нахождения дефекта. Предположим, что вы увидели дефект очень малого размера в углу крупного скана. Вы, очевидно, захотите выполнить скан намного меньшей площади с высоким разрешением и с центром в районе дефекта. СЗМ подает напряжение смещения для перевода сканера к новому центру для получения второго скана. Но крив приведет к тому, что вы пройдете мимо цели. И только через несколько минут дефект действительно окажется в центре нового скана.

Для понимания влияния крива в направлении  $z$  следует рассмотреть профиль ступеньки, показанной на рисунке 2-7. При проходе ступеньки снизу вверх сканер сокращается немедленно под напряжением, соответствующим полной высоте ступеньки. Однако в течение нескольких следующих секунд сканер продолжает медленно сокращаться в связи с проявлением крива. Аналогичный процесс имеет место при прохождении иглой ступеньки сверху вниз. Сканер удлиняется для выполнения шага, а затем продолжает “ползти”.

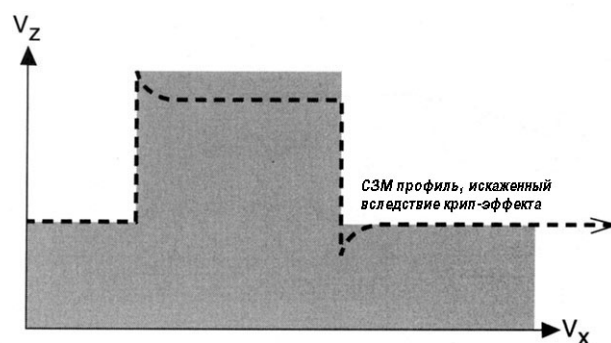


Рисунок 2-7 Влияние крива на измеренный профиль ступеньки.

Отделить искажения, вызванные кривом, от реальных складок и впадин можно за счет изменения направления сканирования и получения изображения того же участка поверхности.

## Старение сканера

Коэффициент удлинения пьезоэлектрических материалов изменяется экспоненциально в зависимости от времени хранения и частоты использования. На рисунке 2-8 показан график старения для частого использующегося пьезоэлектрического сканера и для сканера, которым практически не пользуются. В тех случаях, когда сканер не используется, степень отклонения, достигаемая при определенном напряжении, постепенно снижается. Старение сканеров в СЗМ может привести к понижению коэффициентов удлинения с течением времени. При регулярном использовании сканера степень отклонения, достигаемая при определенном напряжении, снижается медленно.

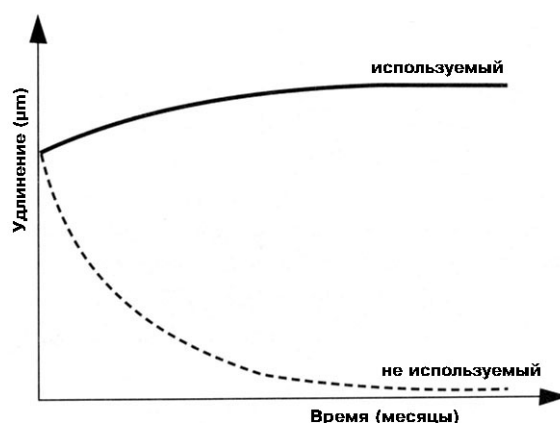


Рисунок 2-8 Старение сканера по мере использования или без эксплуатации  
(приведено максимальное удлинение).

Таким образом, при измерении на СЗМ следует иметь в виду, что значения горизонтальных и вертикальных размеров могут быть ошибочными, если калибровка проводилась давно.

## Перекрестные помехи

Термином “перекрестные помехи” обозначается тенденция к возникновению паразитной составляющей движения по оси  $z$  при одновременном движении сканера по оси  $x$  или  $y$  (рисунок 2-9). Она возникает по разным причинам и весьма сложна. Например, электрическое поле, пересекающее сканер, неоднородно. Поля деформаций не являются простыми скалярами, а представляют собой тензорные величины. Некоторые перекрестные взаимодействия возникают вследствие утечек между электродами  $x$ ,  $y$  и  $z$ . Но наиболее значительный эффект геометрический. Геометрическая паразитная составляющая определяется самой конструкцией пьезоэлектрических сканеров, которые, обычно, имеют вид трубок или триподов.

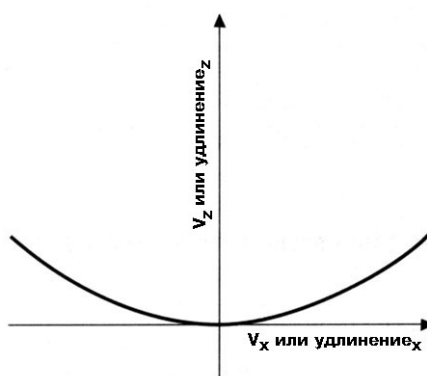


Рисунок 2-9 Перекрестные помехи при движении сканера.

Движение сканера по оси  $x$  или  $y$  происходит в том случае, когда одна сторона трубки сжимается, а другая сторона расширяется. В результате этого, пьезоэлектрическая трубка сканирует, принимая при этом дугообразную форму (см. рисунок 2-2). Перемещение пьезоэлектрической трубки по оси  $x$  или  $y$ , делает необходимым сокращение или увеличение сканера по оси  $z$  для сохранения контакта иглы с образцом.

Сканер, имеющий форму трипода, сконструирован из трех взаимно перпендикулярных стержней или трубок, склеенных на одном конце. Такая конструкция также подвержена возникновению перекрестных помех, так как три стержня из пьезоэлектрического материала соединены друг с другом. Удлинение или сокращение стержня  $x$  вызывает вращение стержней  $y$  и  $z$ .

Перекрестные помехи могут привести к тому, что на изображении, полученном на СЗМ, плоский образец будет выглядеть выгнутым. Профиль такого изображения показан на рисунке 2-10 пунктирной линией.



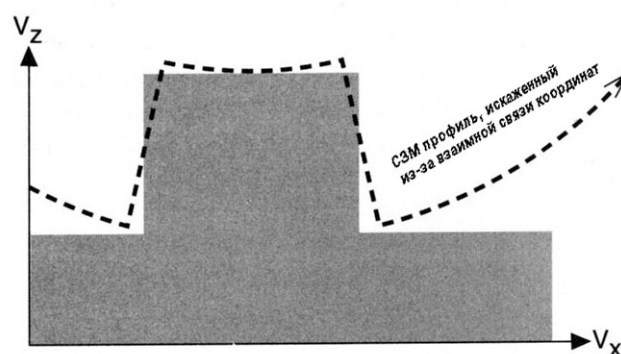


Рисунок 2-10 Влияние перекрестных помех на измеренный профиль ступеньки.

## Искажение изображения сканером

Для иллюстрации гистерезиса, крива и перекрестных помех в вертикальном направлении выше использовался пример одиночной ступеньки. В лаборатории практически невозможно получить одно изображение, на котором все эти эффекты отображались бы отдельно. На рисунке 2-11 показано совместное влияние гистерезиса, крива и перекрестных помех на изображение одиночной ступеньки.

Обычно нелинейное поведение пьезоэлектрических сканеров пытаются не совсем успешно устранить за счет внесения коррекций на уровне программного обеспечения. В некоторых имеющихся на рынке системах используются аппаратные средства, устраняющие большинство нелинейностей, вместо того, чтобы корректировать их. Аппаратные средства подразделяются на оптические, емкостные и тензометрические. В лучших системах аппаратные и программные средства коррекции сочетаются с использованием сильных сторон каждого из них.

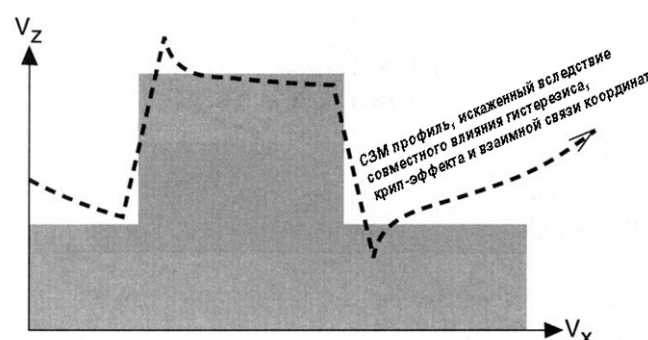


Рисунок 2-11 Влияние гистерезиса, крива и перекрестных помех на измеренный профиль ступеньки.

## Самое важное в этой главе

- Сканеры для СЗМ представляют собой точную платформу позиционирования и осуществляют перемещение образца относительно зонда по определенной траектории сканирования.

- СЗМ-сканеры изготавливаются из пьезокерамики и поэтому проявляют ряд особенностей, которые могут сказаться на изображении (собственная нелинейность, гистерезис, крип, перекрестные помехи).
- Искажения, вызываемые сканером, могут быть скорректированы своевременной калибровкой, специальными программными и аппаратными средствами (применением тензометрических, оптических или емкостных датчиков перемещения).

## **Источники для самостоятельного изучения**

- Полезным будет изучение материалов, предлагаемых PI – одним из крупнейших производителей систем нанопозиционирования ([www.physikinstrumente.com](http://www.physikinstrumente.com)).
- Рекомендуется произвести сравнительный анализ сканеров, используемых различными производителями микроскопов – Veeco, Asylum Research, NT-MDT, Park AFM, Omicron и др.

## **Контрольные вопросы**

- Почему необходимо собирать данные в одном направлении на каждой строке сканирования?
- Как часто следует перекалибровывать сканер микроскопа?
- Почему калибровка сканера не может полностью устранить искажения, вызванные работой сканера?

## **Дополнительные вопросы**

- Какие конструкции сканеров применяются в СЗМ кроме трубчатых сканеров? Каковы их преимущества и недостатки?
- Как производится поляризация сканера? В чем причина старения сканера?
- Какова общая схема работы аппаратных методов компенсации искажений, вызываемых сканером? Какие аппаратные методы вам известны, в чем их преимущества и недостатки?