

## АНАЛИЗ СХЕМ РЕАЛИЗАЦИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ СКАНИРУЮЩИХ ЗОНДОВЫХ МИКРОСКОПОВ

А. А. Суслов, С. А. Чижик

ОДО «Микротестмашины», ул. Кирова 32А-415Б, 246050 г. Гомель

**Введение.** В 2002 году исполняется 20 лет с момента опубликования основополагающей и, пожалуй, самой цитируемой в сообществе СЗМ-исследователей работы Герхарда Биннига и Хайнриха Рёера, описывающей сканирующий туннельный микроскоп [1]. Тем не менее, как показывает история, идеи, позволившие реализовать на практике исследования поверхностей с атомарным разрешением, высказывались задолго до этого. Появление сканирующей зондовой микроскопии в ее классическом уже виде стало реальностью благодаря определенным достижениям как в технике эксперимента, так и в обеспечивающей его материально-технической базе. Например, невозможно представить сканирующий зондовый микроскоп без управляющего компьютера. И своевременные достижения в области компьютерной техники были не последней причиной бурного развития сканирующей зондовой микроскопии. Здесь также оказались востребованными и достижения в материаловедении и электронике.

Сканирующая зондовая микроскопия до сих пор развивается достаточно быстрыми темпами, и поэтому информация в ней также устаревает достаточно быстро. Косвенным доказательством этому может служить отсутствие монографий, обобщающих не только опыт экспериментальных и теоретических исследований с использованием СЗМ [2–5], но и принципов построения этих исследовательских инструментов [6–9]. Тем не менее, такие принципы уже сложились и продолжают вырабатываться как теоретически, так и эмпирически. В данной работе анализируются особенности схем конструктивной реализации механической части сканирующих зондовых микроскопов.

**Общая схема механической части сканирующего зондового микроскопа.** В общем виде (с определенными оговорками) механическая система сканирующего зондового микроскопа представлена на рис. 1. И основной принцип, который должен соблюдаться при проектировании сканирующего блока СЗМ, – это обеспечение максимальной жесткости в механическом контуре «зонд–образец». Данное требование обусловлено масштабным уровнем измеряемых величин, в лучших разработках достигающем атомарного диапазона, т.е. порядка 0,1 нм.

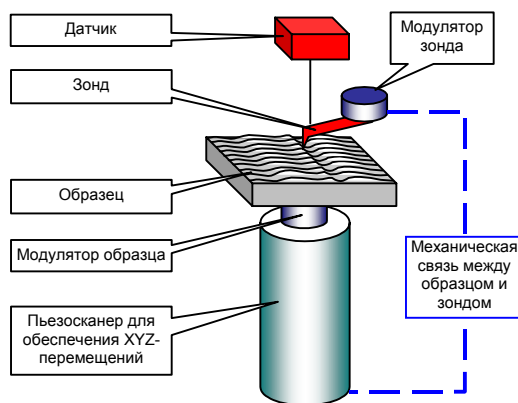


Рис. 1. Общая схема механической части сканирующего зондового микроскопа

Приведенная величина ограничивается в СЗМ не столько возможностями измерительной системы или дискретностью сканирующего органа, сколько именно механическими параметрами контура «зонд–образец». Современные компоненты электронной части СЗМ и пьезосканеры позволяют получать и более высокое разрешение, однако тепловой дрейф в механике прибора конечном счете накладывает свои ограничения. Тем не менее, для получения максимально возможного разрешения разрабатываются низкотемпературные конструкции, позволяющие минимизировать тепловой дрейф в механическом контуре.

Таким образом, исходя из принципа обеспечения максимальной жесткости в механическом контуре «зонд–образец», можно сформулировать выводы, касающиеся конструкции непосредственно блока сканирования СЗМ: длина механической цепи, соединяющей образец и зонд, должна быть минимальной. Также следует стремиться к минимальному количеству сочленений в этой цепи, иначе говоря, к использованию минимального числа компонентов в контуре «зонд–образец».

Конструктивно данные требования в современных автоматизированных приборах выполнить не всегда удается. Поэтому наилучшим разрешением обладают обычно СЗМ с минимум вспомогательных функций (например, таких как автоматическое позиционирование образца относительно зонда). Иллюстрацией могут служить две линии приборов DI: MULTIMODE, обладающий наилучшим разрешением при ограниченном наборе сервисных функций, и DIMENSION 3000, предоставляющий широкие возможности и удобства исследователю.

Следует отметить также, что немаловажным фактором в обеспечении жесткости в контуре «зонд–образец» является пространственная конфигурация последнего. Наилучшие результаты здесь достигаются при полностью замкнутом механическом контуре (без образования консоли) (рис. 2). К примеру, подобное условие полностью (рис. 2а) соблюдается в DI MULTIMODE, серии приборов «Smena» NT-MDT, в приборах линии AutoProbe фирмы Thermomicroscope. При замкнутой схеме достигается максимальное пространственное разрешение в СЗМ, что, в частности, является основным требованием в сканирующих туннельных микроскопах (СТМ). Поэтому все СТМ конструируются именно по замкнутому типу контура «зонд–образец». Однако, замкнутая схема механической части СЗМ вносит существенные ограничения на размер исследуемых образцов.

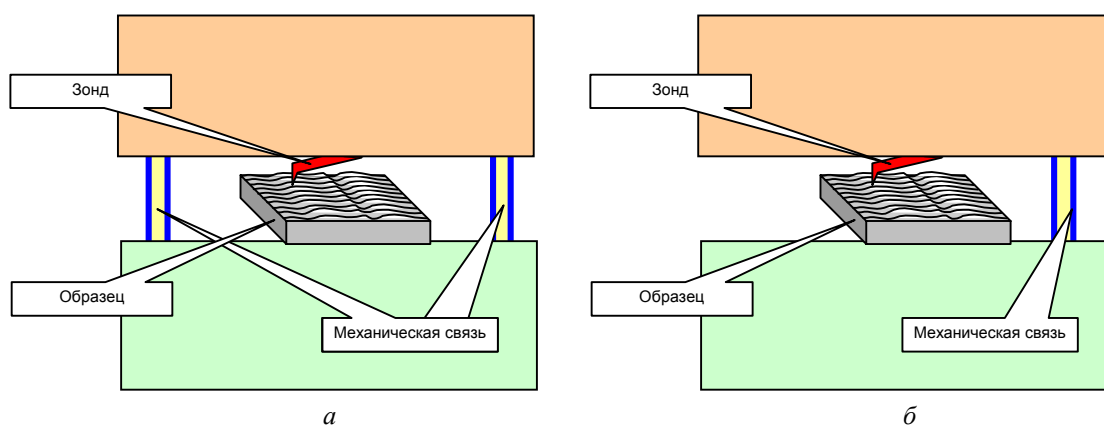


Рис. 2. Образование замкнутого (а) и консольного (б) механического контура в сканирующем зондовом микроскопе

Сканирующие зондовые микроскопы, построенные на основе консольной связи между образцом и зондом (рис. 2б), не позволяют получить разрешения, достигаемого при замкнутой схеме. Ярким примером здесь могут служить световые микроскопы, оснащенные АСМ-объективами (например, SIS), разрешение которого намного отстает от специализированных АСМ по причине чрезвычайно большой консольной связи между объектом и зондом АСМ. Тем не менее, приборы с консольным типом связи между образцом и зондом (практически все они – АСМ) обладают преимуществами в эксплуатации, обеспечивая более удобный доступ к образцу и гибкое позиционирование измерительной головки с зондом относительно образца, а в случае АСМ-объективов – существенно расширяя функциональные возможности оптических микроскопов.

**Схемы сканирования.** Все сканирующие зондовые микроскопы характеризуются необходимостью организации прецизионного механического перемещения зонда относительно образца. В этом аспекте конструкции СЗМ могут предусматривать три варианта (рис. 3):

1. сканирование образцом, т.е. организация перемещения образца относительно неподвижного зонда (рис. 3а);
2. сканирование зондом – перемещение измерительного зонда относительно поверхности зафиксированного образца (рис. 3б);
3. смешанная схема, при которой, например, ХУ-перемещение производится образцом, а Z-движение осуществляется зондом (рис. 3в).

Первая схема (рис. 3а) наиболее проста в исполнении и предусматривает использование минимального количества элементов, поэтому она «принята на вооружение» в приборах, ориентированных на достижение максимального разрешения, в т.ч. в СТМ. Ее преимущество также заключается в простоте конструкции измерительной системы – системы регистрации отклонения консоли зонда в АСМ или туннельного зонда в СТМ. Однако эта схема обладает недостатком – зависимостью поля сканирования от толщины образца, что приводит к искажению латеральных размеров элементов микрорельефа сканируемой поверхности. Данная схема, например, используется в DI Multimode – СЗМ, демонстрирующем наилучшее разрешение в своем классе.

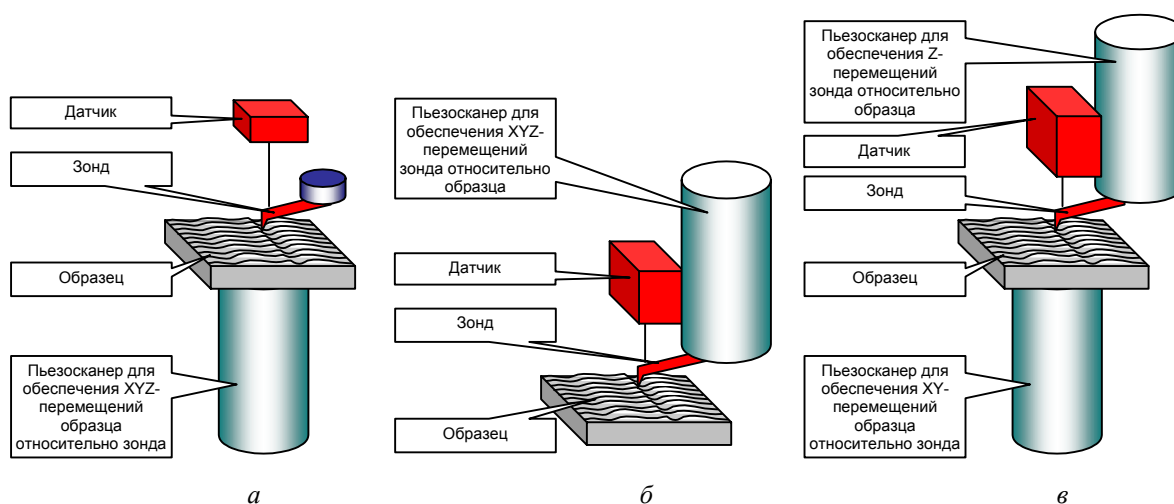


Рис. 3. Схемы организации сканирования в сканирующем зондовом микроскопе: а – сканирование образцом; б – сканирование зондом; в – смешанная схема с перемещением образца в плоскости ХУ и перемещением зонда вдоль оси Z.

Вторая схема сканирования (рис. 3б) – сканирование зондом – используется в основном в АСМ и предусматривает в большинстве случаев усложненную конструкцию измерительной части, поскольку требует организации «слежения» датчиком за перемещающимся зондом. Эта задача достаточно просто решается при использовании опто-волоконной схемы детектирования отклонения кантилевера, поскольку она конструктивно предусматривает фиксацию скола оптоволоконна относительно кантилевера. В то же время, при использовании такой широкораспространенной схемы детектирования отклонения кантилевера, как лазерно-лучевая, конструкция измерительной головки требует введения в оптическую схему элементов, обеспечивающих сопровождение лазерным лучом кантилевера, перемещающегося над поверхностью образца (рис. 4). Альтернатива этому решению – размещение всей оптической системы (лазер, система настройки луча на кантилевер, фотодатчик) непосредственно на свободном конце пьезосканера (Burleigh).

Конструкция измерительной головки АСМ при использовании схемы сканирования зондом значительно упрощается, если кантилеверы выполняются самодетектирующимися – емкостного или пьезоэлектрического типа. Однако установка на них острия иногда достаточно трудоемка, и кроме того эти острия не всегда обеспечивают малый радиус кривизны, что является критическим фактором в АСМ. Тем не менее, подобные решения используют, например, в приборах, ориентированных на наноиндентирование или наноизнашивание.

Достоинством схемы сканирования зондом является независимость латеральных размеров на СЗМ-изображении от толщины образца. Кроме того, эта схема позволяет реализовать сканирующие зондовые микроскопы т.н. класса stand-alone – полностью законченные модули сканирования, допускающие исследование образцов неограниченных размеров. Практически, stand-alone СЗМ могут устанавливаться непосредственно на поверхность образца без его разрушения (например, NanoSurf, Smena).

Смешанные схемы сканирования используют при невозможности организации движения по всем трем осям одним сканирующим узлом СЗМ. Например, в системах, использующих плоско-параллельные нанопозиционеры, не всегда предусматривается реализация движения по оси Z, поэтому данное движение организуется для зонда, который и отслеживает изменения в высоте топографии перемещающегося образца. Естественным недостатком данной схемы является усложнение конструкции, увеличение числа элементов в ее механике, однако возможность использования плоско-параллельных нанопозиционеров позволяет ликвидировать зависимость латеральных размеров на СЗМ-изображении от толщины образца, а также устранить некоторые недостатки трубчатых пьезосканеров (например, взаимовлияние сегментов сканера). В качестве примера такой конструкции можно привести СЗМ ХЕ-100 фирмы PSIA [9].

**Сканирующее устройство.** Сканер СЗМ является одним из ответственных элементов, определяя такие основные характеристики прибора, как размер поля сканирования и диапазон измерений по оси Z. От сканера, несущего либо образец, либо зонд, также в немалой степени зависит жесткость механического контура СЗМ. В первых СЗМ использовалась трехэлементная конструкция сканера (т.н. «трипод») (рис. 5а), которая позволяла достичь высокой жесткости механического контура «зонд–образец». Однако при увеличении размера поля сканирования они вносили значительные искажения в получаемые изображения ввиду несимметричности конструкции и такого явления, как взаимовлияние сегментов сканера.

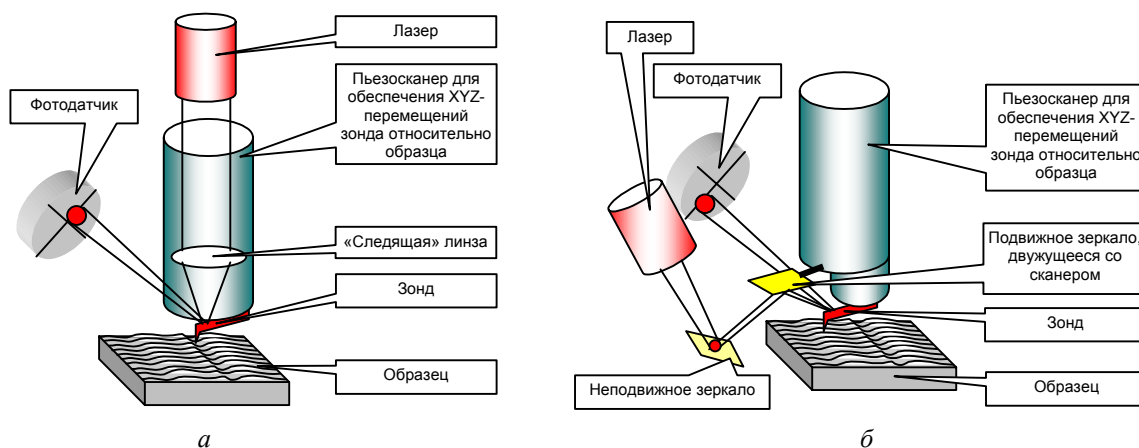


Рис. 4. Схемы слежения за положением кантилевера при сканировании зондом, используемые фирмами DI (а) и NT-MDT (б).

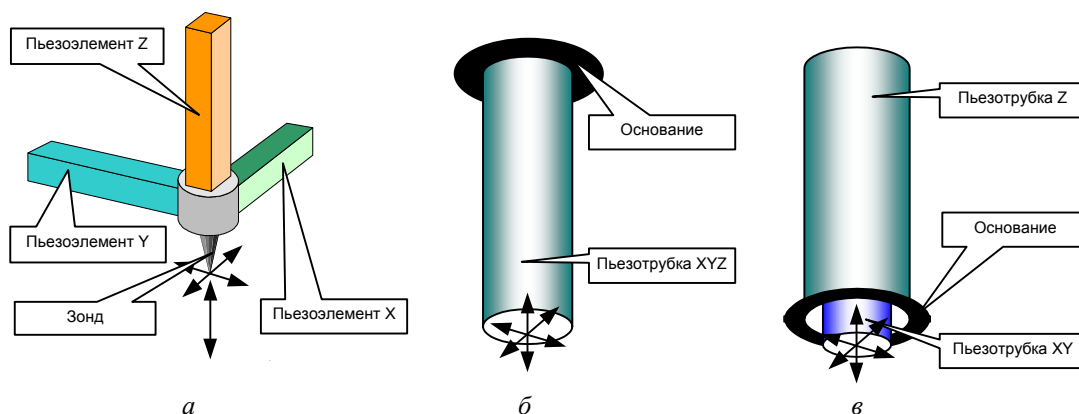


Рис. 5. Схемы конструкции пьезосканеров: а – трехэлементная схема («трипод»); б – трубчатый пьезосканер; в – коаксиальный трубчатый пьезосканер.

Появление пьезосканеров в виде трубки (рис. 5б) [10] позволило упростить конструкцию СЗМ и значительно увеличить поле сканирования. Кроме того, данный тип сканера характеризуется симметрией движения относительно центральной оси, что позволяет по сравнению с триподом снизить искажения на получаемом изображении. На сегодня трубчатые пьезосканеры – это наиболее распространенный тип сканера СЗМ как в коммерческих, так и в некоммерческих приборах.

Одним из вариантов трубчатого пьезосканера является коаксиальная конструкция (рис. 5в), в которой XY-сканер находится внутри Z-сканера. Подобное решение позволяет упростить изготовление пьезотрубок и при общей компактности узла может обеспечивать несколько увеличенный размер поля сканирования. Тем не менее, необходимо отметить, что трубчатые пьезосканеры без специальных компенсационных систем фактически обеспечивают перемещение закрепленного на них объекта по сферической поверхности, что становится особенно заметно при увеличении поля сканирования на гладких поверхностях.

В последние годы все более широкое распространение получают также плоскопараллельные нанопозиционеры (рис. 6а) [11, 12]. Их кинематическая схема на основе параллельно сочлененных изгибных элементов позволяет реализовать перемещение подвижной платформы строго в плоскости XY, что и является их

основным преимуществом. В качестве движущих элементов в нанопозиционерах используются пьезостеки (рис. 6б). Один пьезостек применяется для реализации движения по одной из осей. Пьезостеки обычно используются вместо пьезотрубок, если необходимо осуществлять движение только по одной оси. Как было отмечено выше, чаще всего нанопозиционеры используют для организации XY-перемещения образца, а Z-движение выполняется зондом. Недостатком нанопозиционеров можно назвать усложнение конструкции сканирующего устройства, увеличение числа используемых элементов, что не ведет к повышению жесткости системы.

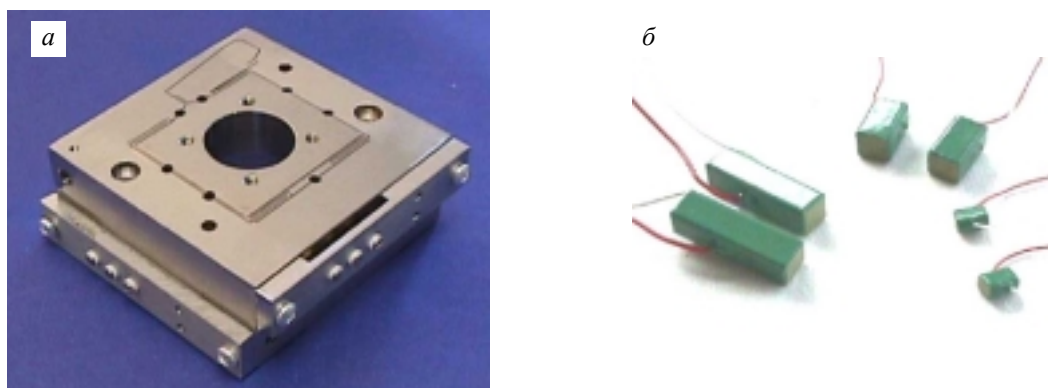


Рис. 6. Плоскопараллельный нанопозиционер (а) и его движущие элементы – пьезостеки (б).

**Виброизоляция.** Качество и разрешение получаемых изображений в СЗМ напрямую зависит от обеспечения надежной виброизоляции прибора. В некоторых случаях она может компенсировать недостаточную жесткость механического контура «зонд–образец». Поэтому системы виброизоляции, не будучи непосредственно включенными в цепь «зонд–образец», также имеют важное значение для СЗМ. Среди последних достижений здесь могут служить активные виброгасящие столы. Однако как показывает практика, удовлетворительных результатов можно добиться, используя известные пассивные методы – пружинные подвесы и массивные основания под СЗМ.

### Литература

1. Binnig G., Rohrer H. Scanning tunneling microscopy // *Helvetica Physica Acta* 55 (1982), P.726–735
2. Sarid D. Scanning force microscopy with applications to electric, magnetic and atomic forces. Oxford University Press, 1991.
3. Magonov S. N., Whangbo M.-H. Surface Analysis with STM and AFM. VCH, 1996.
4. Scherge M., Gorb S. Biological micro- and nanotribology. Springer-Verlag, 2001.
5. Procedures in scanning probe microscopy // Ed. R. J. Colton et al., John Wiley & Sons Ltd., 1998
6. Minne S. C., Manalis S. R., Quate C. F. Bringing scanning probe microscopy up to speed. Kluwer Academic Publishers, 1999.
7. [www.di.com](http://www.di.com)
8. [www.ntmdt.com](http://www.ntmdt.com)
9. [www.psia.co.kr](http://www.psia.co.kr)
10. Binnig G., Smith D. P. E. Single-tube three-dimensional scanner for scanning tunneling microscopy // *Rev. Sci. Instrum.*, 57 (8) (1986), P.1688–1689
11. [www.madcitylabs.com](http://www.madcitylabs.com)
12. [www.physikinstrumente.com](http://www.physikinstrumente.com)