

УДК 621.385.833.2

© А. О. Голубок, О. М. Горбенко, А. В. Дворецких,
В. В. Котов, И. Д. Сапожников, М. Л. Фельштын

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЭНКОДЕРОВ В МИКРОСКАНЕРАХ СЗМ С БОЛЬШИМ ДИАПАЗОНОМ СКАНИРОВАНИЯ

В работе представлена конструкция и результаты исследований пьезосканера с оптическими датчиками линейных перемещений (оптическими энкодерами) для сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) с большим диапазоном сканирования. Обсуждаются алгоритмы и приводятся результаты калибровки и линеаризации пьезосканера. Демонстрируется уменьшение влияния термодрейфа на СЗМ-изображение.

Кл. сл.: сканирующая зондовая микроскопия, оптические датчики линейных перемещений, микросканер, пьезокерамический элемент, линейность перемещения

ВВЕДЕНИЕ

Сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) является одним из базовых инструментов нанотехнологии, обеспечивая как локальную характеристику геометрических, механических и электрофизических свойств поверхности материалов различной природы, так и их локальную модификацию [1, 2, 3]. В его основе лежит идея детектирования локального взаимодействия между твердотельным нанозондом и образцом в процессе прецизионного механического сканирования. Следует отметить, что качество СЗМ во многом определяется качеством системы механического перемещения зонда относительно образца или образца относительно зонда на микро- и нанометровом уровне пространственного разрешения. В подавляющем большинстве СЗМ системы механических микроперемещений (микросканеры) представляют собой конструкции, использующие механические смещения, возникающие в результате деформации пьезоматериалов вследствие обратного пьезоэффекта [4]. Первые микросканеры имели небольшой диапазон движения. Механическое перемещение сканера L не измерялось напрямую, а вычислялось через управляющее напряжение V и чувствительность сканера α из линейной зависимости $L = \alpha V$. Для этого на этапе изготовления проводилась калибровка микросканеров (определение значения α) с помощью датчиков линейных перемещений, например оптических интерферометров. Кроме того, при малой площади сканирования и визуализации поверхности образца с атомным пространственным разрешением точная калибровка сканера осуществлялась с помощью природного стандарта линейной меры, которым по существу является гладкая поверхность твердого тела с известными заранее, например, из рентгено-

новских измерений, параметрами элементарной ячейки. Обычно таким стандартом выступала поверхность свежего скола высокоориентированного пиролитического графита, на котором достигается атомное пространственное разрешение даже при атмосферном давлении [5, 6]. В конструкциях большинства пьезосканеров в качестве пьезоматериала используется пьезокерамика. В отличие от пьезокристаллов пьезокерамика имеет более высокий пьезомодуль, что обеспечивает необходимый диапазон механических перемещений микросканеров при не слишком высоком управляющем электрическом напряжении. Как известно, пьезокерамические материалы обладают рядом специфических свойств [4, 7]. Например, после прекращения изменения управляющего электрического напряжения материал достаточно долгое время продолжает изменять свои размеры (крип), что приводит к гистерезису на кривых зависимости изменения размера от приложенного электрического напряжения. Кроме того, в процессе изменения размеров пьезокерамики могут возникать случайные скачки, также имеет место уменьшение пьезомодуля со временем (старение). В результате отклик на изменяющееся линейно управляющее электрическое напряжение $L(V)$ носит нелинейный характер. Искажают движение сканера также остаточные механические напряжения в элементах его конструкции. При малых площадях сканирования нелинейные эффекты проявляются слабо. Однако при больших диапазонах сканирования нелинейные эффекты становятся существенными. Для устранения нелинейных эффектов предварительно для каждого сканера измеряют зависимость $L(V)$, которую затем используют в алгоритме сканирования. Обычно для измерения зависимости $L(V)$ применяют оптические или емкостные датчики или эталоны линейной меры в виде тестовых

образцов с известной одномерной или двумерной периодической структурой [8]. Однако вид кривой $L(V)$ может зависеть от скорости сканирования, искажаться при многократном сканировании или изменяться с течением времени. Кроме того, устранение нелинейности сканеров с помощью учета зависимости $L(V)$ вовсе не устраняет тепловые дрейфы. Поэтому для улучшения метрологических характеристик СЗМ-микросканеров используют датчики, измеряющие механические смещения непосредственно в процессе сканирования. Обычно в СЗМ-сканерах используются оптические интерферометрические или емкостные датчики линейных перемещений [10].

В данной работе представлена конструкция и приведены результаты исследований СЗМ-сканера с оптическими датчиками, обеспечивающими измерение линейных перемещений в плоскости образца (X,Y). Диапазон перемещений сканера составлял $\sim 100 \times 100$ мкм в плоскости (X,Y) и ~ 40 мкм в направлении Z.

УСТРОЙСТВО ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Мы использовали стандартные оптические датчики линейных перемещений (линейные энкодеры модели RGH-34 [9]). Линейные энкодеры вырабатывают электрические сигналы, пропорциональные перемещению датчика относительно масштабной шкалы, и широко применяются для измерения больших перемещений с высокой точностью в металлообрабатывающих и других станках.

Принцип действия оптического датчика перемещений поясняется на рис. 1. Излучение инфракрасного светодиода 1 отражается от наклонных штрихов масштабной шкалы в виде ленты 2, 5 с поперечными штрихами с периодом в 40 мкм и, проходя сквозь прозрачную фазовую дифракционную решетку 3, возвращается обратно в считывающую головку. Это приводит к тому, что в плоскости детектора 4 образуются интерференционные полосы. Оптическая схема устроена таким образом, что она усредняет вклад в интерференционную картину от 80 масштабных штрихов и игнорирует сигналы, не соответствующие расстоянию между масштабными штрихами. Этим обеспечивается стабильность выходного сигнала даже в том случае, если масштабная лента немного повреждена или на ней присутствует загрязнение.

Линейность масштабной шкалы на длине 60 мм равна ± 1 мкм и составляет менее ± 3 мкм на длине 1 м. Конструктивно датчик (рис. 1) состоит из считывающей головки и электронной платы — интерполятора, преобразующего сигнал головки в аналоговый или цифровой сигнал и масштабной ленты, расположенной в непосредственной

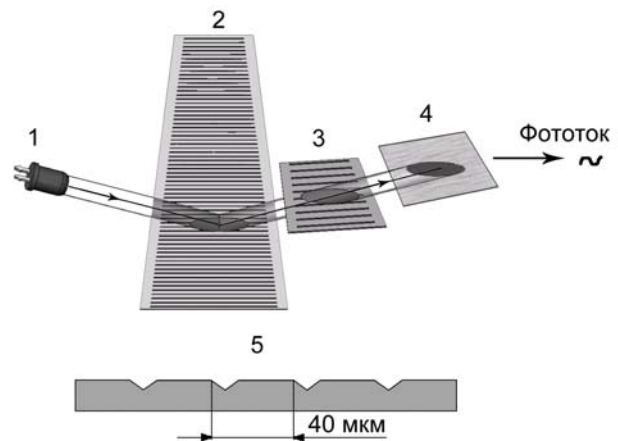


Рис. 1. Принцип действия оптического датчика линейных перемещений [10].

1 — излучающий светодиод; 2 — масштабная лента; 3 — прозрачная дифракционная решетка; 4 — фотоприемник; 5 — профиль масштабной ленты

близости к головке. При движении ленты относительно головки на выходе интерполятора выделяется цифровой сигнал в виде меандра с периодом, соответствующим смещению ленты на 100 нм. Вообще говоря, описанные выше энкодеры предназначены для измерения на порядки больших перемещений, чем перемещения СЗМ-сканера. Поэтому одной из целей данной работы было выяснение их метрологических возможностей в несвойственных для них условиях (малая скорость и величина смещения).

КОНСТРУКЦИЯ СКАНЕРА С ОПТИЧЕСКИМИ ЭНКОДЕРАМИ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

На рис. 2 представлена конструкция СЗМ-сканера с оптическими линейными энкодерами. Подобные сканеры, но без энкодеров, применяются в СЗМ "NanoEducator" [10, 11]. Корпус 1 представляет собой металлический куб с отверстиями в каждой грани. На гранях корпуса в указанных отверстиях закреплены три дисковых металло-пьезокерамических элемента 2 (далее — пьезоэлементы), каждый из которых представляет из себя круглую металлическую мембрану, к которой приклеен тонкий диск из пьезокерамики с нанесенными на него проводящими электродами. Элемент 2 зажат по периметру в отверстиях куба и имеет возможность прогибаться под действием управляющего напряжения. При прогибе пьезоэлемента 2 перемещается металлическая ось 3, приклеенная к центру пьезоэлемента через втулку 4. Аналогичная ось (на рис. 2 не показана) перемещается в перпендикулярном направлении.

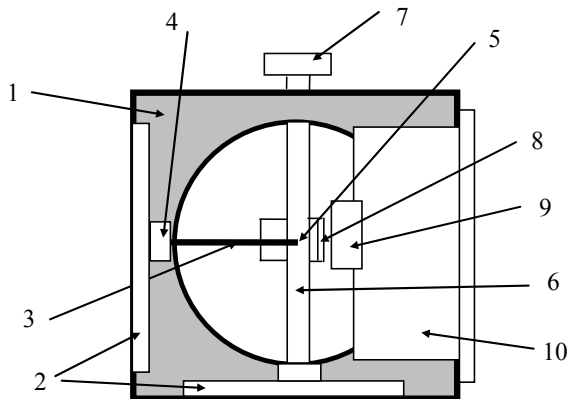


Рис. 2. Конструкция сканера с оптическими датчиками линейных перемещений.
 1 — корпус; 2 — пьезоэлемент; 3 — толкатель;
 4 — втулка; 5 — точка соединения осей; 6 — ось Z; 7 — столик с образцом; 8 — держатель масштабной ленты; 9 — головка датчика; 10 — держатель головки датчика

Две эти оси соединены в одной точке 5 в геометрическом центре корпуса 1. Они перемещают точку 5 в горизонтальной плоскости (X,Y). Третья металлическая ось 6 перемещает точку 5 по вертикали Z. Она представляет собой более толстый металлический стержень, на конце которого закреплен столик с образцом 7. Из рис. 2 нетрудно заметить, что при условии абсолютной жесткости элементов конструкции перемещение точки соединения трех осей (точка 5) невозможно. Однако реально имеет место изгиб осей 3, перемещающихся в плоскости (X,Y), и изгиб металлических мембран пьезоэлементов 2 в месте приклеивания втулок 4. Жесткость элементов сканера подобрана таким образом, чтобы места приклеивания втулок 4 играли роль шарниров, а оси практически не изгибались и не растягивались. В этом случае при перемещении втулки 4 и оси 3 вправо относительно корпуса 1 втулка 4 будет двигаться горизонтально. При этом точка 5 будет двигаться по дуге окружности и смещаться немного вниз, подобно кривошипно-шатунному механизму. Столик 7, закрепленный на конце свободной консоли, будет при этом перемещаться вправо и вниз. Геометрический расчет показывает, что при перемещении столика вправо на 100 мкм центральная точка образца, через которую проходит ось Z, смещается вниз приблизительно на 0.25 мкм, т. к. радиус дуги поворота оси Z составляет 40 мм. Таким образом, столик с образцом совершает квазиортогональное перемещение в декартовой системе координат, связанной с корпусом сканера. Практически имеет место некоторое взаимовлияние движения осей,

которое учитывается в случае прямого измерения смещений по осям X, Y при использовании датчиков перемещения. Отметим, что в силу "эффекта рычага" смещение образца в плоскости (X,Y) больше, чем соответствующее смещение масштабной ленты. Для исследуемого нами пьезосканера коэффициент редукиции имел значение 2.4. Ось 6 имеет большую толщину (следовательно, и жесткость), чем две другие оси 3. В результате при массе столика с образцом около 2 г заметные резонансные колебания сканера возникают в диапазоне 600–1000 Гц, что достаточно для устойчивой работы петли обратной связи СЗМ. Преимущество описанного сканера перед трубчатыми сканерами, обычно применяемыми в СЗМ, заключается в большом диапазоне перемещений по всем трем осям и удобстве установки оптических датчиков.

Масштабная лента оптического датчика наклеена на металлический держатель 8 в виде уголка, закрепленного на вертикальной оси 6. Уголок приклеивается с зазором 0.8 мм между головками датчика и масштабной лентой. Головки датчиков 9 укреплены на держателях 10, которые вставляются в свободные отверстия корпуса 1 и имеют возможность поворачиваться вокруг своих осей для регулировки угла установки относительно масштабной ленты. При перемещении осей 3 в горизонтальной плоскости (X,Y) имеется возможность регистрировать перемещение по двум пространственным координатам X и Y отрезков масштабной ленты относительно головок датчиков. При работе сканера зазор между неподвижной головкой каждого датчика и движущейся масштабной лентой непрерывно изменяется вследствие одновременного перемещения осей 3 вдоль координат X и Y. Точность установки зазора между головкой датчика и масштабной лентой без ухудшения качества измерения перемещений ленты вдоль головки составляет ± 0.1 мм, что не превышает диапазона перемещения сканера, поэтому каждый датчик измеряет перемещение только вдоль одной координаты независимо от другой.

При прохождении каждых 100 нм масштабной ленты относительно головки на выходе интерполятора появляется или пропадает постоянное напряжение, что соответствует переходу датчика из состояния "0" в состояние "1", а на экране осциллографа отмечается появлением переднего или заднего фронта импульса. Следует отметить, что в момент перехода из одного состояния в другое наблюдается нестабильность в состоянии датчика, проявляющаяся на экране осциллографа в виде случайных коротких импульсов (рис. 3). По-видимому, эта нестабильность возникает вследствие малой скорости перемещения ленты СЗМ-сканера (5–10 мкм/с) и не возникает при больших скоростях перемещения (более 200 мкм/с), для работы на которых предназначены используемые нами энкодеры.

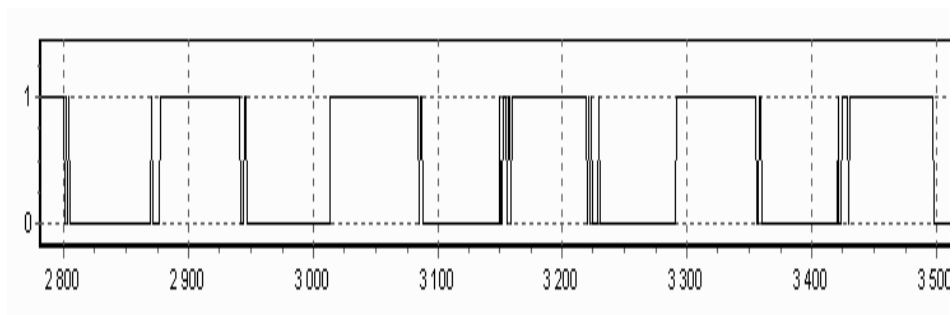


Рис. 3. Осциллограмма импульсов на выходе интерполятора

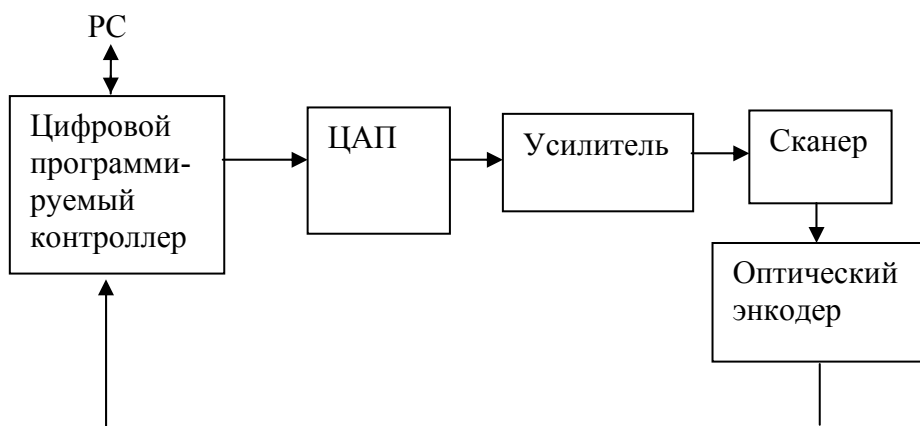


Рис. 4. Схема управления сканером с оптическими энкодерами

Очевидно, что возникающая нестабильность должна привести к ошибке в измерении перемещений, особенно при малых смещениях. Тем не менее установлено, что при характерных для СЗМ скоростях сканирования, интервал времени, в течение которого существует нестабильность, всегда составляет не более 20–30 % от времени длительности одного импульса и мало зависит от скорости сканирования (частоты следования импульсов).

Таким образом, всегда есть возможность зафиксировать факт надежного переключения датчика из состояния "0" в состояние "1" и обратно, т. е. измерить перемещение с ошибкой, соответствующей отношению длительности времени нестабильного состояния к времени длительности стабильного состояния датчика.

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА ОПТИЧЕСКОГО ЭНКОДЕРА

Перемещение сканера (процесс сканирования) по каждой из осей осуществляется под управлени-

ем инкрементного дискретного цифрового сигнала напряжения (рис. 4). Развертка напряжения производится с помощью ЦАП от сигналов цифрового контроллера под управлением персонального компьютера. Считывание сигнала датчика во время сканирования выполняется после каждого изменения управляющего напряжения на дискретную единицу. Задачей алгоритма является на основании входной последовательности данных, измеряемой в реальном времени, зарегистрировать все факты перехода сигнала с одного уровня на другой, игнорируя шумы на фронтах импульсов, вызванные нестабильностью датчика при переходе из одного состояния в другое, т. е. распознать "значимые" импульсы и произвести необходимые измерения в моменты, когда эти события были зарегистрированы. Таким образом, составляется цифровая последовательность значений сигнала, состоящая из "0" и "1", которая подвергается анализу.

Назовем интервал времени, в течение которого существует нестабильность в состоянии датчика вблизи фронтов "значимых" импульсов временем

нестабильности. Работа алгоритма основана на следующем предположении: длительность стабильного состояния больше, чем длительность нестабильности. Для получения наибольшего про-

странственного разрешения прибора измерения проводятся при поступлении как положительного, так и отрицательного фронтов входного меандра.

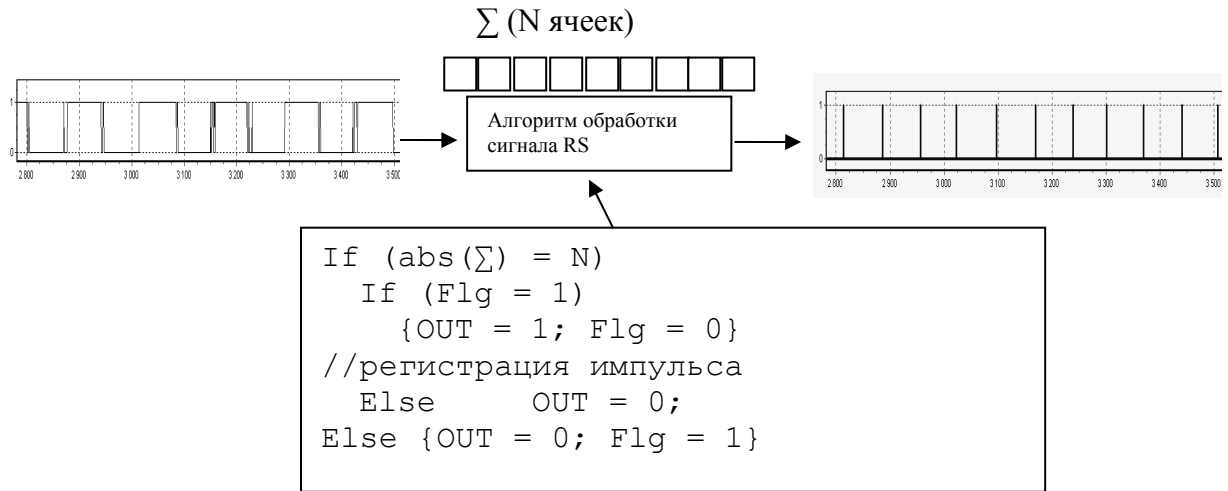


Рис. 5. Схема алгоритма обработки сигнала оптического энкодера

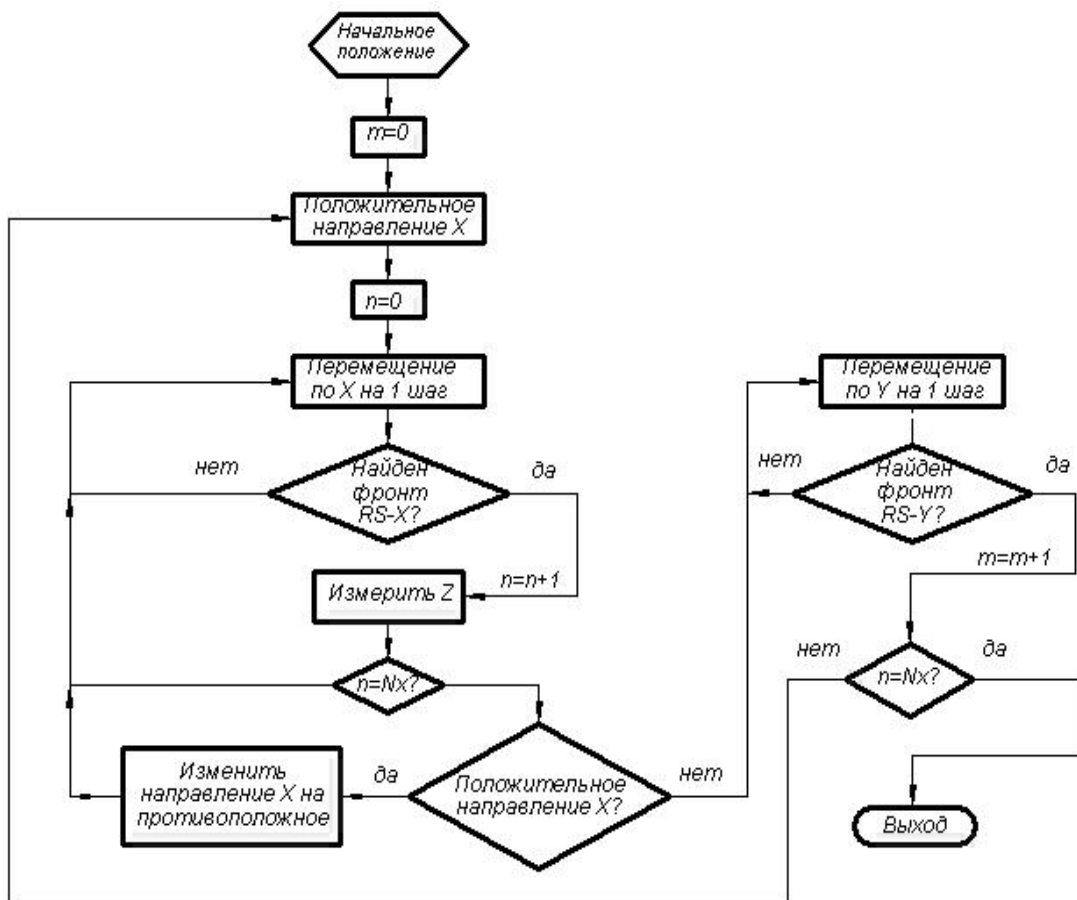


Рис. 6. Алгоритм сканирования с использованием оптических энкодеров линейных перемещения

На рис. 5 представлена схема алгоритма обработки сигнала оптического энкодера. Для анализа входного сигнала алгоритм использует программный буфер, созданный по методу "первым вошел—первым вышел" ("скользящее окно"). Длина буфера устанавливается так, чтобы она была больше состояния нестабильности и одновременно меньше ширины значимого импульса. Перед записью в буфер элементам входной последовательности данных, имеющим значение "0", присваивается значение "-1". При увеличении напряжения на сканере на дискретную единицу алгоритм анализирует сумму элементов буфера задержки. Если при поднятом флаге готовности эта сумма по абсолютной величине становится равной длине буфера, алгоритм регистрирует событие поступления нового фронта импульса и выполняет необходимые измерения. Для уменьшения количества ошибок регистрации импульсов алгоритм осуществляет контроль чередования положительных и отрицательных перепадов. При переходе к следующему шагу значение переменной Flg сохраняется.

АЛГОРИТМ СКАНИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ ЭНКОДЕРОВ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Общая схема сканирования, при которой измерения проводятся синхронно с регистрацией сигнала от оптических датчиков, представлена на рис. 6.

Схема приведена для сканирования кадра, состоящего из N_y строк, в каждой из которых N_x точек. Схема составлена для случая, когда измере-

ния выполняются во время движения вдоль оси X , т. е. ось X является "быстрой осью" сканирования. Для того чтобы начать новую строку, выполняется перемещение вдоль оси Y до тех пор, пока не будет зарегистрировано переключение сигнала оптического датчика (сигнал RS-Y), т. е. пока не будет зарегистрирован очередной фронт импульса на его выходе. После этого начинается движение вдоль оси X . Каждый раз при наращивании напряжения на ЦАП, управляющем движением вдоль оси X , осуществляется считывание сигнала с выхода оптического датчика (сигнал RS-X) и, если регистрируется очередное переключение состояния датчика, выполняются измерения рельефа поверхности образца (Z). После выполнения N_x измерений осуществляется перемещение в обратном направлении с подсчетом числа переключений датчика. Обратное движение происходит до тех пор, пока не будет зарегистрировано N_x переключений.

При таком алгоритме сканирования расстояние, пройденное сканером при прямом и обратном движении, будет одинаковым.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Описанный выше сканер был установлен в СЗМ NanoEducator.

На рис. 7, а, приведено СЗМ-изображение двумерной тестовой решетки, полученное при сканировании в полуконтактной силовой моде с выключенными оптическими энкодерами.

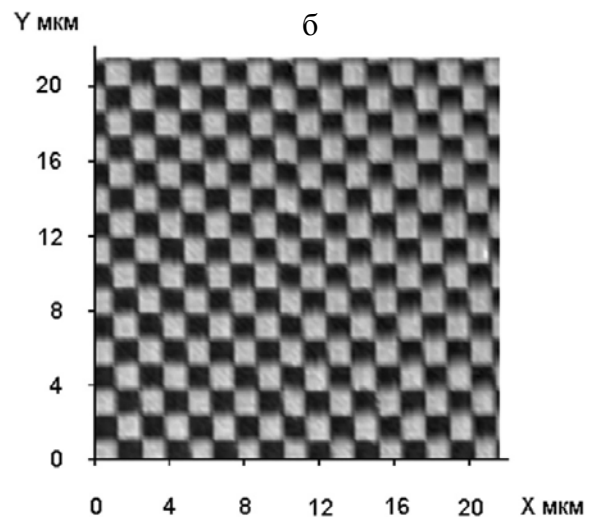
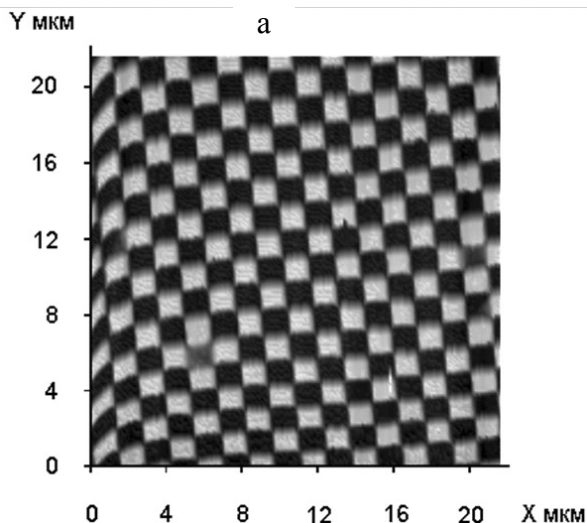


Рис. 7. СЗМ-изображение двумерной тестовой решетки с периодом $d = 3000$ нм, полученное в полуконтактной силовой моде на приборе NanoEducator. Шаг сканирования — 240 нм.
а — оптические энкодеры выключены, б — оптические энкодеры включены

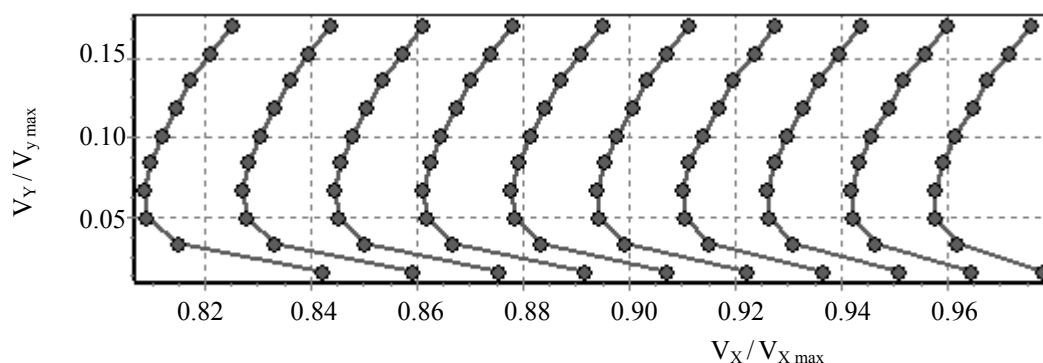


Рис. 8. Номограмма сканера, демонстрирующая явление крипа пьезокерамики

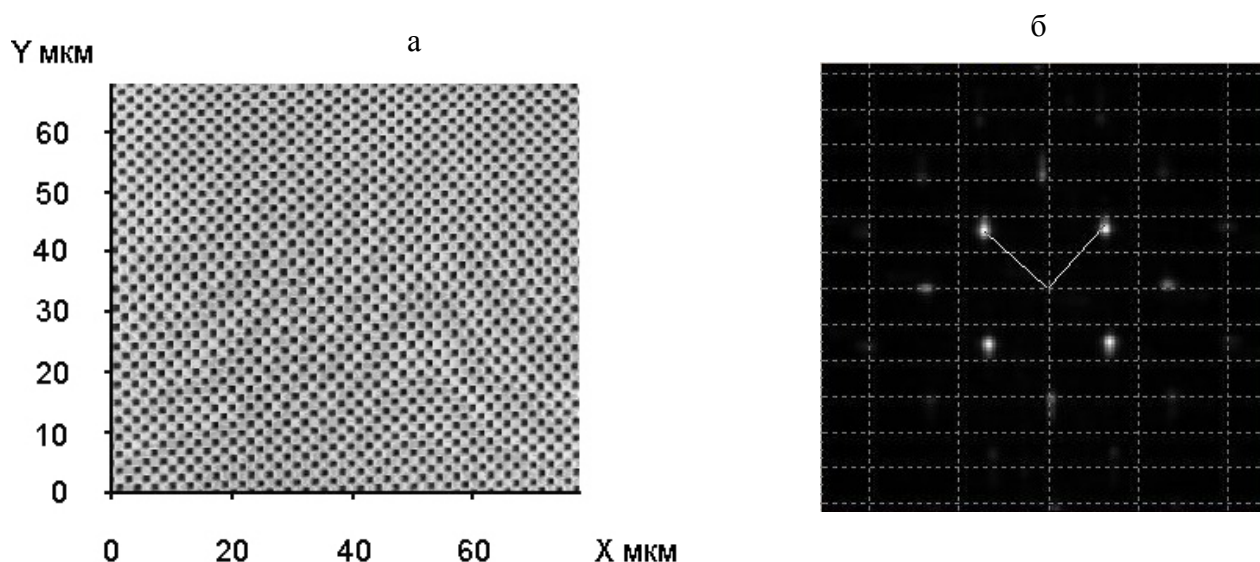


Рис. 9. Участок тестовой решетки большой площади.
а — изображение, б — фурье-спектр пространственных частот этого изображения

Изображения рис. 7, а, б, получены при линейной развертке напряжения, как описано выше. При получении изображения, представленного на рис. 7, а, измерения топографии производились после подачи на сканер равных количеств дискрет напряжения при выключенных энкодерах. При этом существование нелинейности в зависимости $L(V)$ приводит к заметным искажениям на СЗМ-изображении поверхности тест-объекта. На рис. 7, б, демонстрируется изображение того же тестового объекта, полученное с включенными энкодерами. Видно, что использование описанного выше алгоритма, обеспечивающего измерение топографии объекта в точках, соответствующих эквидистантным расстояниям, позволяет получать изображение без видимых искажений.

Для иллюстрации характера изменения управ-

ляющих электрических напряжений на сканере, обеспечивающих его "эквидистантное" перемещение в плоскости XY, построена номограмма (рис. 8). По осям номограммы отложены нормированные значения управляющих напряжений. Регистрация управляющих напряжений, прикладываемых к сканеру, производилась в моменты фиксации очередного переключения оптического датчика при построчном сканировании вдоль оси X, что отмечено точкам на номограмме.

Каждая линия номограммы на рис. 8 представляет собой эквидистантную кривую, т. к. соответствует одинаковому фактическому смещению сканера относительно начальной точки. Для простоты интерпретации данных при построении номограммы была использована каждая шестая точка из двумерного массива координат точек измере-

ний, выраженных в единицах нормированного напряжения, т. е. на рис. 8 представлена каждая шестая из измеренных эквидистантных кривых, на которых в свою очередь показана каждая шестая точка измерения. Видно, что прохождению одного и того же расстояния вдоль оси X соответствуют разные по величине управляющие напряжения на разных строках сканирования. По мере увеличения числа строк это различие видоизменяется. В данном случае номограмма иллюстрирует эффект крипа пьезокерамики, проявляющийся на нескольких первых строках сканирования при резком переводе сканера в новую начальную точку, и гистерезиса, возникающего при движении сканера вперед и назад. В идеальном случае (одинаковая чувствительность сканера по осям X и Y , отсутствие крипа, нелинейностей и тепловых дрейфов) точки отсчета энкодеров располагались бы в узлах квадратной решетки, ориентированной вдоль осей координат, а эквидистантные кривые представляли бы собой вертикальные линии. Наблюдаемые на номограмме искажения характеризуют реальное поведение сканера. В частности, угол отклонения касательной к линии номограммы от вертикали, наблюдаемый в верхней половине номограммы, обусловлен гистерезисом на зависимости смещения сканера от управляющего напряжения и взаимовлиянием осей. Для определения параметров линейности сканирования с использованием оптических энкодеров были проведены измерения по большой площади. На основании обработки сече-

ний изображения тестового объекта (рис. 9, а) были получены следующие результаты. Пространственный период, измеренный путем анализа поперечных сечений полученного СЗМ-изображения имеет величину (2970 ± 100) нм, что хорошо согласуется с тестовыми данными (3000 ± 20 нм для тестовой решетки TGX1). На рис. 9, б, представлен модуль двумерного фурье-спектра пространственных частот, соответствующий изображению, представленному на рис. 9, а. Измерения периодов решетки, проведенные по фурье-спектру, согласуются с приведенными выше результатами. Угол между направлениями на основные рефлексы спектра равен 90° , и неортогональность, оцененная по ширине рефлексов спектра, составляет приблизительно 3 %.

Таким образом, экспериментально установлено, что использование оптических энкодеров в сканере СЗМ NanoEducator приводит к линейности алгоритма сканирования не хуже 4 % и ортогональности — не хуже 3° во всем диапазоне сканирования.

Для иллюстрации преимуществ использования оптических датчиков перемещения при сканировании в условиях температурного дрейфа образца была смоделирована ситуация сильного температурного дрейфа. Во время сканирования на 15 с включалась лампа накаливания мощностью 100 Вт. Расстояние от лампы до корпуса прибора составляло ~ 20 см. Датчик температуры показывал нагрев корпуса на $\sim 1^\circ\text{C}$.

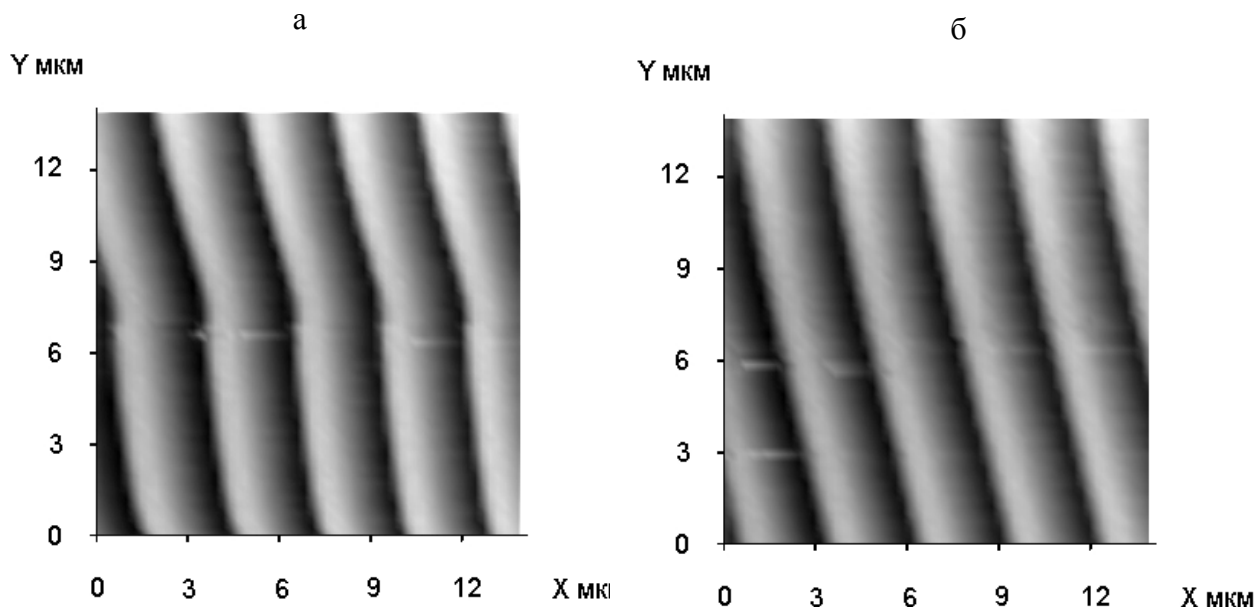


Рис. 10. СЗМ-изображения одномерной тестовой решетки с периодом $d = 3$ мкм, полученные в условиях сильного теплового дрейфа. а — оптические энкодеры выключены, б — оптические энкодеры включены

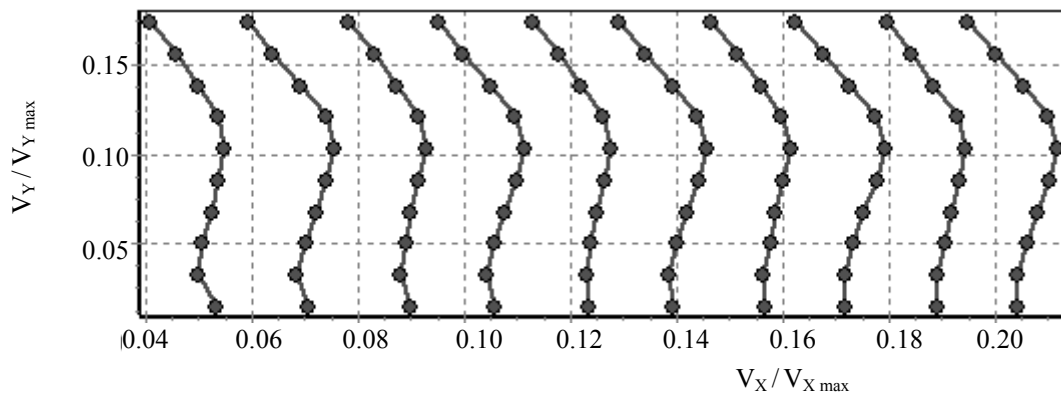


Рис. 11. Номограмма сканера, измеренная в условиях сильного теплового дрейфа

Характеристики СЗМ-сканера с оптическими энкодерами

Характеристика	Значение
Управляющее напряжение (В)	0–250
Максимальный размах сканирования по X, Y не менее (мкм)	100
Максимальный размах сканирования по Z не менее (мкм)	40
Резонансная частота (Гц)	~ 500
Минимальный измеряемый шаг сканирования по X, Y (мкм)	0.24
Нелинейность по X, Y во всем диапазоне сканирования менее (%)	4
Неортогональность осей менее (градус)	3
Допустимый температурный дрейф в помещении до (°C/c)	0.1

На рис. 10 представлены СЗМ-изображения одномерной тестовой решетки TGG с периодом 3 мкм, полученные в условиях сильного температурного дрейфа. Рис. 10, а, соответствует выключенным оптическим энкодерам, а рис. 10, б, — включенным.

На рис. 10, а, видны существенные искажения, связанные с тепловым дрейфом при нагреве образца, в то время как на рис. 10, б, искажения практически полностью отсутствуют. По номограмме, представленной на рис. 11, можно судить о характере и величине теплового дрейфа.

Наконец, отметим, что мы также использовали оптические энкодеры в стенде, предназначенном для измерения зависимости $L(V)$ с целью калибровки и линейризации сканеров, не оснащенных оптическими энкодерами. Полученные кривые оказались полностью аналогичны тем, которые до этого измерялись с помощью тестовых решеток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально измерены характеристики

СЗМ-сканера, изготовленного на основе тонких металлокерамических пьезоэлементов, обеспечивающих движение рабочего столика по координатам X, Y, Z, и оптических энкодеров, обеспечивающих измерения смещений вдоль координат X, Y. Полученные характеристики приведены в таблице.

Показано, что оптические энкодеры могут применяться вместо тестовых образцов при калибровке и линейризации СЗМ-сканеров с большим полем сканирования.

Отметим также, что существуют более точные оптические энкодеры RGH-25 с шагом ~ 10 нм, с помощью которых можно значительно уменьшить минимальный измеряемый шаг СЗМ-сканеров. Однако применение более чувствительных энкодеров, безусловно, приведет к повышенным требованиям к конструкции сканера и прибора в целом в связи с необходимостью улучшения защиты от вибраций и тепловых дрейфов. Наконец, обратим внимание на то, что в данной работе исследовался сканер с оптическими энкодерами, обеспечивающими измерение смещений по двум осям сканирования. В принципе возможна модифика-

ция предложенной выше конструкции с целью установки оптических энкодеров по всем трем осям. Такие сканеры могут найти применение не только в СЗМ, но и в других устройствах для нанотехнологий в качестве управляемых 3-D манипуляторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wiesendanger R.* Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy: Methods and Applications. Cambridge Univ. Press, 1994. 659 p.
2. *Миронов В.Л.* Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2004. 143 с.
3. *Голубок А.О.* Сканирующая зондовая микроскопия, спектроскопия и литография // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2006. Вып. 30. С. 9–18.
4. *Голубок А.О., Тарасов Н.А., Тупицев С.Я. и др.* Отчет о научно-исследовательской работе "Исследование методических и инструментальных принципов построения вакуумного туннельного электронного микроскопа" 150-НИР-И, гос. рег. № 01860134855. 1988.
5. *Голубок А.О., Давыдов Д.Н., Масалов С.А., Нахабцев Д.В., Тимофеев В.А.* Наблюдение поверхности графита при атмосферном давлении // Поверхность. 1989. № 3. С. 146–149.
6. *Голубок А.О.* Сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия // Научное приборостроение. 1999. Т. 9, № 3. С. 33–47.
7. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления: Справочник / Р.Г. Джагупов, А.А. Ерофеев. СПб.: Политехника, 1994. 607 с.
8. *Быков В.А., Волк Ч.П., Горнев Е.С. и др.* Метрологическое обеспечение измерений длины в микрометровом и нанометровом диапазонах и их внедрение в микроэлектронику и нанотехнологию // В кн. "Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам". М.: Техносфера, 2005. С. 254–297.
9. URL: (<http://www.Renishaw.com>).
10. URL: (<http://www.ntmdt.com>).
11. *Голубок А.О., Быков В.А., Сапожников И.Д., Котов В.В.* Позиционер 3-х координатный. Патент № 2297078, 2007.

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург (Голубок А.О., Горбенко О.М., Дворецких А.В., Сапожников И.Д., Фельштын М.Л.)

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики (Голубок А.О.)

ЗАО "Нанотехнологии-МДТ", Москва (Котов В.В.)

Материал поступил в редакцию 23.03.2009.

USE THE OPTICAL ENCODERS IN SPM MICROSCANNERS WITH A LARGE RANGE OF SCANNING

**A. O. Golubok^{1,2}, O. M. Gorbenko¹, A. V. Dvoretzki¹,
V. V. Kotov³, I. D. Sapozhnikov¹, M. L. Felshtyn¹**

¹*Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg*

²*Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics*

³*Joint-Stock Company "Nanotechnology-MDT", Moscow*

The work introduces the construction of piezoceramic-scanner with optical linear encoders and the results of researches in the field of this scanner implementation for the scanning probe microscope with large scanning range. Algorithms are discussed and the results of piezoceramic-scanner calibration and linearization are given. Decrease of thermodrift influence on the SPM-image is demonstrated.

Keywords: scanning probe microscopy, optical linear encoders, microscanner, piezoceramic element, linear displacement