

МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 004.312.44

Уменьшение влияния температурного дрейфа в сканирующих зондовых микроскопах

В.А.Быков, Е.В.Кузнецов

ЗАО «Нанотехнология МДТ» (г. Москва)

Е.С.Пьянков

Московский государственный институт электронной техники
(технический университет)

Исследованы особенности термостабилизации устройств сканирующей зондовой микроскопии. Разработан универсальный термоконтроллер с внутренней термостабилизацией, обеспечивающий повышенную точность поддержания температуры в процессе измерений.

Ключевые слова: специализированный термоконтроллер, термостабилизация, сканирующая зондовая микроскопия, повышенная точность измерений, термодрейф, температура.

Одной из важнейших проблем сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) является стабилизация положения зонда относительно поверхности исследуемого образца. Неконтролируемое смещение зонда относительно образца из-за изменения температуры окружающей среды и прогрева конструкции самого микроскопа вносит серьезную погрешность в измерения. Для уменьшения негативного влияния температурного дрейфа в настоящее время существует несколько методов. Например, в первой группе способов с помощью компьютерного анализа уже полученных изображений определяют величину и направление дрейфа. После проведения математических преобразований получается исправленное изображение, в котором предельная погрешность не превышает некоторого заданного значения [1]. Ко второй группе относятся способы, связанные с введением в конструкцию микроскопа высокочувствительных x -, y -, z -датчика обратной связи. Каждый из этих датчиков управляется посредством автономной следящей системы. Задача системы – постоянно компенсировать разность, возникающую между заданным перемещением зонда и фактическим перемещением, которое измеряется датчиками [2]. Третья группа способов связана с усовершенствованием конструкции приборов (использование симметричных конструкций измерительных головок, использование специальных термостабилизированных головок, которые управляются термоконтроллером).

В настоящей работе рассматривается относящийся к третьей группе способ. При требуемой точности поддержания температуры $0,005$ °С в диапазоне температур от -200 до 300 °С задача обеспечения температурной стабильности образца, помимо

конструкции термоголовки, начинает зависеть от характеристик и температурной стабильности самого термоконтроллера. Основными характеристиками термоконтроллера являются точность поддержания температуры, количество подключаемых датчиков температуры и ассортимент подключаемых нагревательных элементов. Количество подключаемых датчиков и нагревательных элементов определяется в основном конструкцией и выбором режима работы термоконтроллера. Актуальной является задача повышения точности измерения и поддержания температуры. Решение этой задачи позволит улучшить характеристики измерительной головки и, следовательно, увеличить точность измерения. Цель работы – исследование особенностей термостабилизации устройств СЗМ и разработка универсального термоконтроллера с внутренней термостабилизацией, обеспечивающего повышенную точность поддержания температуры в процессе измерений.

Постановка задачи. В любом сканирующем зондовом микроскопе существует некоторый дрейф – неконтролируемое смещение зонда относительно образца, возникающее из-за влияний градиентов температуры. Изменение температуры окружающей среды или разогрев самой конструкции зондового микроскопа во время его работы являются основными источниками нестабильности. Неравномерное расширение или сжатие деталей устройства приводит к тому, что зонд и образец с течением времени смещаются относительно друг друга. Изменение температуры твердого тела приводит к возникновению термоупругих деформаций. Типичные значения коэффициентов расширения материалов составляют $10^{-5} - 10^{-6}$ град⁻¹. Таким образом, при нагреве тела длиной 10 см на 1 °С его размер увеличится на величину порядка 1 мкм [3]. Подобный дрейф не критичен, если исследование проводится на относительно большой площади, однако для задач с размером поля сканирования в несколько десятков нанометров термодрейф становится очень существенной характеристикой. Для уменьшения этого эффекта возможно термостабилизирование образца с помощью специального устройства – термоконтроллера. Предыдущая версия термоконтроллера, разработанная в компании «Нанотехнология МДТ», способна поддерживать температуру на образце с точностью до 0,05 °С. В рамках данной работы исследовалась возможность повышения точности поддержания температуры образца в процессе измерения, выполняемого с помощью СЗМ, путем использования современной электронной компонентной базы и термостабилизации аналоговой части устройства.

Конструкция и принцип работы термоконтроллера. В ходе решения задачи улучшения термостабилизации образца разработана новая конструкция термоконтроллера. Усовершенствованное устройство состоит из блока питания, термостабилизированного блока и управляющей печатной платы (рис.1).

Импульсный блок питания создает диапазон напряжений, необходимый для работы устройства. Термостабилизированный блок принимает информацию от датчиков. Он включает в себя печатную плату с прикрепленной к ней нагревательной пластиной и корпус, в котором они помещаются. Внутри данного блока поддерживается постоянная температура. Управляющая печатная плата осуществляет фильтрацию питающих напряжений, контроль и поддержание заданной температуры на нагревателях и в термостабилизированном блоке, рассеивание тепла от мощных транзисторов, участвующих в нагреве образцов, а также осуществляет связь с персональным компьютером. Тип измерительных датчиков, используемый в термоконтроллере, – платиновые терморезисторы.

Температура на образце поддерживается с помощью пропорционально-интегрально-дифференциального алгоритма поддержания обратной связи. Пропорцио-

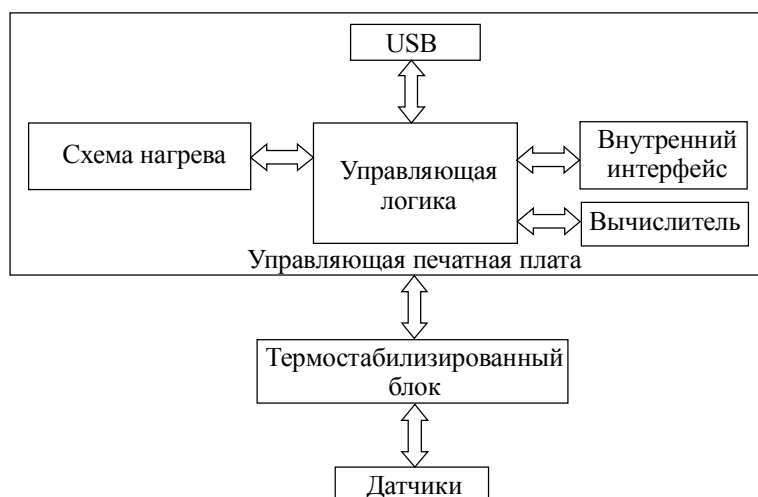


Рис. 1. Блок-схема термоконтроллера повышенной точности

нальная составляющая вырабатывает выходной сигнал, противодействующий отклонению регулируемой величины от заданного значения, наблюдаемому в данный момент времени. Он тем больше, чем больше это отклонение. Если входной сигнал равен установленному, то выходной равен нулю. Пропорциональная составляющая мощности для поддержания температуры равна:

$$NP = P(T_3 - T_{\text{тек}}),$$

где $T_3, T_{\text{тек}}$ – заданное и текущее значение температуры; P – пропорциональный коэффициент.

Однако при использовании только пропорционального регулятора значение регулируемой величины никогда не стабилизируется на заданном значении. Существует так называемая статическая ошибка, которая равна отклонению регулируемой величины, обеспечивающему выходной сигнал, стабилизирующий выходную величину именно на этом значении. На примере стабилизации температуры мощность нагревателя будет постепенно уменьшаться при приближении к заданной температуре, и система стабилизируется при мощности, равной тепловым потерям. Температура не может достичь установленной, так как в этом случае мощность нагревателя станет равной нулю, и он начнет остывать. Чем больше пропорциональный коэффициент между входным и выходным сигналом (коэффициент усиления), тем меньше статическая ошибка, однако при слишком большом коэффициенте усиления могут начаться автоколебания, а при дальнейшем увеличении коэффициента система может потерять устойчивость.

Интегральная составляющая используется для устранения статической ошибки. Она позволяет регулятору «учиться» на предыдущем опыте. Если система не испытывает внешних возмущений, то через некоторое время регулируемая величина стабилизируется на заданном значении, сигнал пропорциональной составляющей будет равен нулю, а выходной сигнал будет полностью обеспечивать интегральная составляющая:

$$NI = I(T_3 - T_{\text{тек}})n\Delta t + NI_{\text{пред}},$$

где NI – интегральная составляющая мощности для поддержания температуры; $T_3, T_{\text{тек}}$ – заданное и текущее значение температуры; I – интегральный коэффициент; $n\Delta t$ – частота оцифровки сигнала; $NI_{\text{пред}}$ – предыдущее значение мощности для поддержания температуры.

Дифференциальная составляющая противодействует предполагаемым отклонениям регулируемой величины, которые могут произойти в будущем. Эти отклонения могут быть вызваны внешними возмущениями или запаздыванием воздействия регулятора на систему. Чем быстрее регулируемая величина отклоняется от установленной, тем сильнее противодействие, создаваемое дифференциальной составляющей:

$$ND = D \frac{(T_3 - T_{\text{тек}})}{n\Delta t},$$

где ND – дифференциальная составляющая мощности для поддержания температуры; $T_3, T_{\text{тек}}$ – заданное и текущее значение температуры; D – дифференциальный коэффициент; $n\Delta t$ – частота оцифровки сигнала. Для поддержания обратной связи необходимая мощность рассчитывается по формуле

$$N = NP + NI - ND,$$

здесь N – суммарная мощность для поддержания температуры.

Из управляющей программы на персональном компьютере на термоконтроллер передается информация о типе подключенного в текущий момент нагревателя, температуре, которую необходимо поддерживать, а также необходимые для этого коэффициенты P, I, D . Для стандартных нагревателей, используемых в ЗАО «Нанотехнология МДТ», эти коэффициенты уже подобраны и выставляются в программе автоматически. Всю дальнейшую работу по поддержанию постоянной температуры выполняет управляющая печатная плата термоконтроллера. В процессе работы прибора возможно изменение температуры, которую необходимо поддерживать, без отключения обратной связи.

Результаты измерений и их обсуждение. На основе разработанной конструкции термоконтроллера проведены исследования стабильности измеряемой температуры. Выявлены факторы, вносящие ошибку в данные, получаемые от измерительных датчиков. Вычислитель термоконтроллера поддерживает температуру при частоте оцифровки данных 2 кГц на промежутке времени 10 с с точностью 0,005 °С. Для калибровки использовались высокоточные 0,01% резисторы с температурным коэффициентом сопротивления 10 ppm/°С.

При работе с промежуточным вариантом термоконтроллера замечено, что с течением времени температура, которую рассчитывает термоконтроллер, используя в качестве датчика калибровочный резистор, изменялась. За час измерений рассчитываемая температура изменялась на несколько десятых градуса, что обусловлено температурными коэффициентами электрических сопротивлений, работающих в цепях обратной связи операционных усилителей. Для устранения этого введен термостабилизированный блок, в котором поддерживается постоянная температура, не зависящая от внешних факторов. Алгоритм поддержания постоянной температуры – пропорционально-интегрально-дифференциальный. Расчет мощности для поддержания температуры идет на управляющей печатной плате. Коэффициенты для расчета подобраны экспериментально. После проведения доработок измерения с контрольными резисторами показали, что температура зафиксировалась и изменялась в пределах 0,005–0,007 °С за час.

Косвенно увеличение точности поддержания температуры можно проследить, проводя сканирование маленькой площади образца на длительном промежутке времени. Полученные СЗМ-изображения демонстрируют смещение зонда относительно образца в течение десяти часов при разных условиях контроля температуры (рис.2).

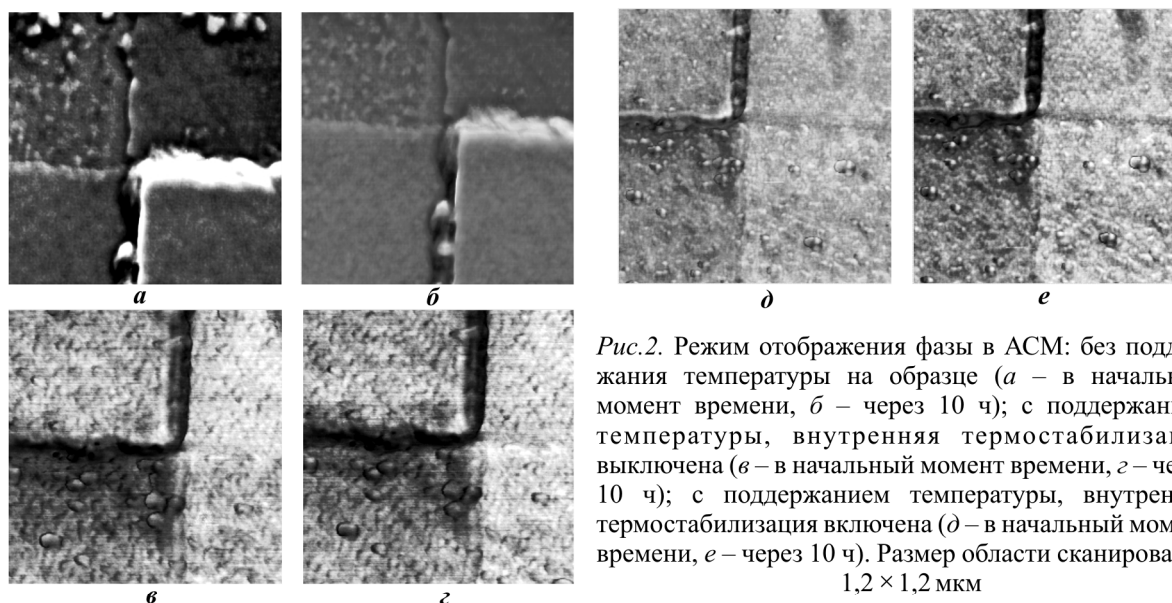


Рис.2. Режим отображения фазы в АСМ: без поддержания температуры на образце (а – в начальный момент времени, б – через 10 ч); с поддержанием температуры, внутренняя термостабилизация выключена (в – в начальный момент времени, г – через 10 ч); с поддержанием температуры, внутренняя термостабилизация включена (д – в начальный момент времени, е – через 10 ч). Размер области сканирования $1,2 \times 1,2$ мкм

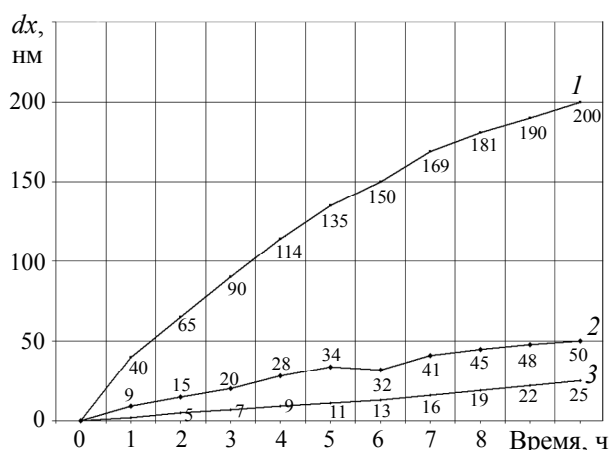


Рис.3. График дрейфа зонда относительно образца за 10 ч: 1 – без поддержания температуры на образце; 2 – с поддержанием температуры, внутренняя термостабилизация выключена; 3 – с поддержанием температуры, внутренняя термостабилизация включена

На рис.3 приведены данные о температурном дрейфе зонда относительно образца при разных режимах поддержания температуры. Как видно из графика, средний дрейф в режиме сканирования без поддержания температуры равен 21 нм/ч. Средний дрейф при температурной стабилизации образца составляет 5,4 нм/ч. При введении в конструкцию термоконтроллера термостабилизации аналоговой части температурный дрейф уменьшается в 2 раза и составляет 2,5 нм/ч.

Таким образом, в результате исследований и усовершенствования прибора точность поддержания температуры улучшена до 0,005 °С. Это стало возможно благодаря использованию со-

временной электронной базы и термостабилизации аналоговой части устройства. В настоящее время термоконтроллер повышенной точности, разработанный на оборудовании и при поддержке компании «Нанотехнология МДТ», выпускается малыми сериями.

Литература

1. *Lapshin R. V.* A method for automatic correction of drift-distorted SPM images // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2007. – Vol. 1, N 6. – P. 630–636.
2. *Ланшин Р. В.* Способ коррекции искаженных дрейфом изображений поверхности, полученных на сканирующем зондовом микроскопе // Заявка на патент РФ, № 2004135449 (2004). – URL: <http://www.scribd.com/doc/6462460/>

3. **Миронов В.Л.** Основы сканирующей зондовой микроскопии. – URL: <http://www.nano.nnov.ru/documents/lectures/Mironov/SPM.Book.pdf>

Статья поступила
16 марта 2010 г.

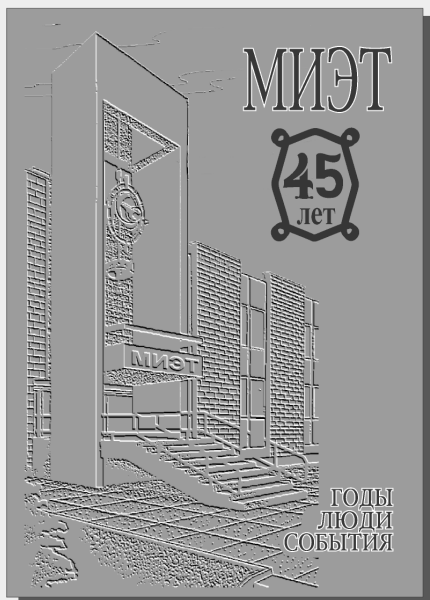
Быков Виктор Александрович – доктор технических наук, генеральный директор ЗАО «НТ-МДТ» (г. Москва). *Область научных интересов:* приборостроение, нанотехнология, микроэлектроника, сканирующая зондовая микроскопия.

Кузнецов Евгений Владимирович – инженер отдела разработок, информационных ресурсов и сервиса ЗАО «НТ-МДТ» (г. Москва.) *Область научных интересов:* сканирующая зондовая микроскопия, изучение воздействия температуры на работу прецизионных приборов.

Пьянков Евгений Сергеевич – аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем МИЭТ. *Область научных интересов:* сканирующая зондовая микроскопия, изучение воздействия температуры на работу прецизионных приборов, теория передачи и обработки цифровых сигналов. **E-mail:** zugus@mail.ru

К 45-летию МИЭТ

МИЭТ 45 лет. Годы, люди, события



Предлагаемая вниманию читателя книга - из серии «Биография вуза», приурочена к 45-летию Московского государственного института электронной техники (технического университета) - ведущего вуза Российской Федерации, готовящего высококвалифицированных специалистов в области электроники, информатики и экономики.

Книга рассчитана на широкий круг читателей: выпускников института, число которых к настоящему времени превышает 25 тыс., преподавателей, сотрудников и студентов - нынешних и будущих, которые в одном издании могут получить исчерпывающую информацию о МИЭТ.

МИЭТ 45 лет. Годы, люди, события. - М.: МИЭТ, 2010. - 352 с. (Биография вуза). ISBN 978-5-7256-0587-7 (в пер.).