
300 лет Санкт-Петербургу
Материалы XXXII конференции СПбГИТМО(ТУ)

УДК 681.2

© А. О. Голубок, А. Е. Платунов, И. Д. Сапожников

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СКАНИРУЮЩИМ ЗОНДОВЫМ МИКРОСКОПОМ

В статье рассматривается современный вариант реализации системы управления сканирующим зондовым микроскопом. В его основе лежит высокопроизводительный программируемый приборный контроллер сканирующего зондового микроскопа (КСЗМ) на базе модулей MEC5091 и ADEPT. В качестве консоли управления, отображения и средства вторичной обработки выступает персональный компьютер. Наличие системы программирования дает возможность описывать алгоритм управления СЗМ на языке SPML.

ВВЕДЕНИЕ

Сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) является одним из базовых инструментов нанотехнологии, поскольку он обеспечивает визуализацию, диагностику и модификацию микро- и наноструктур с прецизионным уровнем пространственного разрешения вплоть до атомных масштабов [1]. Современный СЗМ оснащен разнообразными измерительными режимами (модами), среди которых: туннельная микроскопия и спектроскопия, силовая микроскопия, в том числе микроскопия магнитных и электростатических сил, электрохимическая микроскопия, акустическая микроскопия, оптическая микроскопия ближнего поля и т. п. Кроме того, в СЗМ могут быть реализованы различные методы токовой и силовой нанолитографии. Наконец, следует отметить, что в зависимости от характера решаемых задач СЗМ может функционировать на воздухе при атмосферном давлении, в газовой среде заданного состава, в жидкости, в том числе криогенной, в условиях сверхвысокого вакуума. Конструкции физических узлов СЗМ во многом определяются средой функционирования прибора и набором измерительных мод, поэтому трудно говорить в широком смысле об универсальном физическом узле СЗМ. Вместе с тем в силу единого алгоритма работы физических узлов различных конструкций управление прибором, сбор, обработка, отображение и хранение информации могут быть осуществлены с помощью универсальной системы управления (СУ СЗМ).

СТРУКТУРА И ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СЗМ

Система управления СЗМ реализуется в виде специализированного вычислительного комплекса и ряда аналоговых устройств. Основу комплекса

составляет высокопроизводительный программируемый приборный контроллер сканирующего зондового микроскопа (КСЗМ), который в качестве консоли управления, отображения и вторичной обработки использует персональный компьютер (ПК) с соответствующим инструментальным и прикладным программным обеспечением.

Структурная схема системы управления СЗМ с аналоговой петлей обратной связи представлена на рис. 1. Зонд 1, соединенный с датчиком взаимодействия 4, может работать в режимах сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) или сканирующего силового микроскопа (ССМ). Датчиком взаимодействия для ССМ может служить кантилевер (cantilever) с оптической регистрацией угла отклонения, пьезоэлемент или другой преобразователь механического перемещения в электрический сигнал. Датчиком туннельного тока для СТМ является проводящий зонд с преобразователем тока в напряжение.

В случае ССМ в полуконтактной моде генератор 7 выдает синусоидальное напряжение на пьезовибратор 3, к которому присоединен зонд 1 в виде острой иглы или стандартного кантилевера. Зонд раскачивается вибратором на частоте механического резонанса. Сигнал с датчика 4 поступает на синхронный детектор 10, где выделяется амплитуда и фаза сигнала на опорной частоте генератора 7. Сигнал, пропорциональный амплитуде колебаний зонда, характеризует величину силового взаимодействия; он поступает на дифференциальный усилитель 11 в качестве входного сигнала петли обратной связи.

В случае ССМ в контактной или бесконтактной моде генератор 7 не включается, а отклонение кантилевера регистрируется оптической системой с фотоприемником, электрический сигнал с которого после усиления поступает на дифференциальный усилитель 11 через ключ К (рис. 1).

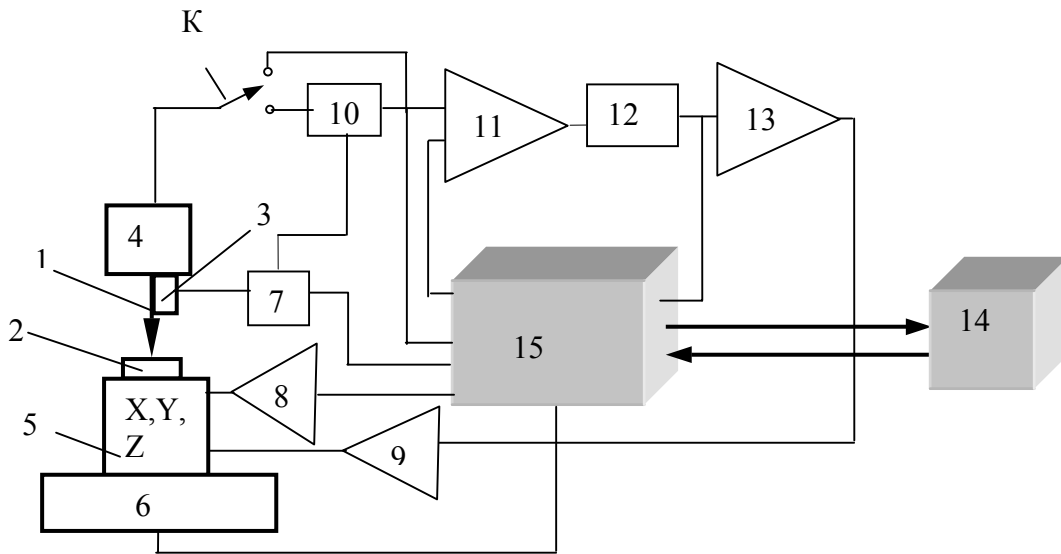


Рис. 1. Структурная схема СУ СЗМ.

1 — зонд; 2 — образец; 3 — пьезовибратор; 4 — датчик взаимодействия; 5 — сканер X, Y, Z; 6 — система сближения зонда с образцом; 7 — генератор синусоидального напряжения; 8, 9 — высоковольтные усилители; 10 — синхронный детектор; 11 — дифференциальный усилитель; 12 — интегратор; 13 — усилитель напряжения; 14 — персональный компьютер; 15 — контроллер КСЗМ

В случае СТМ напряжение, пропорциональное туннельному току, поступает на дифференциальный усилитель 11 через ключ К, показанный на рис. 1.

СУ СЗМ работает в трех основных режимах:

- настройка системы;
- сближение зонда с образцом, захват взаимодействия;
- сканирование;
- спектроскопия.

Настройка системы

В этом режиме производятся начальные установки аппаратуры, установление связи ПК с КСЗМ, снятие АЧХ системы вибратор—зонд, настройка на частоту механического резонанса, вывод изображения зонда с видеокамеры для контроля предварительного сближения с образцом и т. п.

Сближение зонда с образцом, захват взаимодействия

В этом режиме производится установка начальных параметров сближения, визуализация сигналов в процессе сближения на экране ПК, управление двух- или четырехфазным шаговым двигателем, автоматический вывод сканера в рабочее положение по оси Z при достижении задан-

ной величины взаимодействия, измерение и построение графиков зависимости амплитуды колебаний зонда от зазора — $A(Z)$ (силовая спектроскопия).

Сканирование

В этом режиме производится сканирование по выбранной площади с визуализацией и сохранением получаемых в процессе сканирования данных. Результатом сканирования являются:

- построение СЗМ изображения — $Z(X, Y)$ (топография поверхности);
- построение карты распределения туннельного тока — $I_t(X, Y)$;
- построение карты распределения амплитуды сигнала $A(X, Y)$, пропорциональной величине силового взаимодействия $F(X, Y)$;
- построение карты распределения фазового сдвига $\varphi(X, Y)$ между опорным сигналом генератора и сигналом с датчика взаимодействия;
- литографирование (силовое и электрическими импульсами) по заранее выбранному рисунку.

Спектроскопия

Этот режим может реализовываться после захвата взаимодействия без сканирования либо при сканировании в заранее выбранных на поле скани-

рования точках. В каждой точке производится развертка напряжения в ЦАП, управляющем изменением зазора между зондом и образцом. В случае силовой спектроскопии производится измерение и построение зависимости $A(Z)$ при отключенной петле обратной связи. В случае туннельной спектроскопии производится измерение и построение вольт-амперных характеристик $I_z(U)$ и их производных при отключенной петле обратной связи.

Особенностью работы СУ СЗМ является то, что параметры режимов, в том числе путь сканирования, графический файл рисунка для литографии, частотный диапазон поиска механического резонанса колебаний зонда и т. п., вводятся пользователем в КСЗМ заранее, после этого КСЗМ выполняет один из вышеописанных режимов в реальном времени. Кроме того, пользователь может изменять некоторые параметры (например, величину взаимодействия, коэффициенты усиления, величину напряжения смещения на образце, скорость сканирования), прерывая выполнение описанных выше режимов.

Описанное построение СУ СЗМ позволяет пользоваться во время сканирования компьютером (ПК), в том числе Интернетом, просматривать файлы, использовать Web-камеру. Минимальное время сканирования кадра размером 100×100 точек составляет 0.5 секунды, максимальное — более одного часа.

КОНТРОЛЛЕР СЗМ

Центральное место в СУ СЗМ занимает контроллер СЗМ, соединенный с персональным компьютером по интерфейсу USB. КСЗМ выполняет следующие функции:

- связь с управляющим компьютером;
- выдача цифровых сигналов для управления аналоговыми ключами по программе от ПК;
- выдача цифровых сигналов по независимым временным диаграммам для управления цифровыми потенциометрами усилителей, синхронного детектора, генератора синусоидального сигнала и т. п.;
- обеспечение работы двух независимых АЦП и шести ЦАП для работы СУ СЗМ в различных режимах;
- сканирование посредством двух ЦАП по осям X и Y в "реальном времени" с одновременной передачей буферизованных данных в ПК;
- выполнение алгоритмов пользователя в процессе сканирования (например, спектроскопии);
- обеспечение работы виртуального осциллографа одновременно с передачей в ПК данных — результатов сканирования.

Следует отметить, что структура КСЗМ позволяет нарастить его вычислительные ресурсы и реализовать цифровую петлю обратной связи для СЗМ, что обеспечит гибкость настройки АЧХ для разнообразных режимов и различных физических узлов, уменьшит долю аналоговых электронных компонентов, а также позволит использовать методы цифровой фильтрации.

КСЗМ — конфигурируемая модульная мультипроцессорная система, обеспечивающая оптимальную настройку системы и легко позволяющая дополнять СЗМ новыми методиками.

В состав КСЗМ входят плата основного вычислителя MEC5091 (вычислительное ядро, микросхемы программируемой логики, память, импульсные источники питания) и плата аналогового ввода—вывода ADEPT (АЦП и ЦАП, источники питания аналого-цифровых блоков) [1, 2]. Задача обеспечения интерфейсов аналого-цифрового ввода—вывода решается специальными операционными блоками на базе программируемой логики. Прикладные алгоритмы выполняются совместно специализированным RISC-процессором и стандартным коммуникационным микроконтроллером. Для передачи результатов сканирования и информации виртуальных осциллографов реализованы высокопроизводительные информационные тракты на базе программируемой логики с использованием механизма SmartDMA коммуникационного микроконтроллера Am186CC. Вычислительное ядро контроллера работает под управлением операционной среды реального времени с поддержкой файлового ввода—вывода и обмена по интерфейсу USB. Контроллер поддерживает внутрисистемное программирование, что позволяет оперативно обновлять встроенное программное обеспечение микроконтроллера и конфигурационные данные ПЛИС без участия разработчиков контроллера и не требует специальных программаторов.

В настоящее время создан ряд вариантов системы управления СЗМ на базе модулей MEC5091 и ADEPT. Исследования продолжаются по следующим направлениям: оптимизация следящей системы СЗМ, развитие инструментальных средств для прикладного программирования рабочих элементов СЗМ, развитие средств обработки результатов сканирования.

Модуль MEC5091

Модули (контроллеры) серии MEC5091 содержат коммуникационный процессор семейства x86 и периферийный RISC-процессор на базе ПЛИС [2]. Контроллер оснащен большим количеством различных интерфейсов ввода—вывода: CAN, RS232, IrDA, USB, что позволяет подключать его не только к обычному персональному компьюте-

ру, но и к самому разнообразному оборудованию. MEC5091 можно использовать в различных промышленных и приборных системах. Основное назначение MEC5091 — работа в составе встроженных систем: бортовых управляющих ЭВМ, приборов, измерительных и исследовательских комплексов. Модульность систем на базе MEC5091 обеспечивается за счет использования промышленной шины PC104 (ISA). Программируемая логика в составе MEC5091 делает возможным конфигурирование аппаратной части системы в соответствии с требованиями заказчика.

Основные характеристики контроллеров серии MEC5091:

- шина PC104;
- канал USB (12 Мбит, slave);
- порт RS232 (до 115200 бит/с, гальванически изолированный);
- IrDA (2400–115200 бит/с);
- 2 канала CAN (SJA1000, до 1 Мбит/с, независимые, гальванически изолированные);
- 30 дискретных каналов ввода—вывода общего назначения (70 дискретных каналов, если не использовать шину PC104).

Устройство состоит из следующих частей.

- Блок бортового вычислителя. Ядром является коммуникационный процессор Am186CC или Am186CU. Блок предназначен для выполнения определенных алгоритмов и обеспечения интерфейсов USB и RS232. В полной комплектации устройства данный блок играет ведущую роль и может обеспечивать дополнительный интерфейс IrDA.

- Блок системного расширения. Ядром его является устройство программируемой логики фирмы Altera ACEX EP1K30 или EP1K100. Блок обеспечивает дополнительные интерфейсы расширения (IrDA, PS/2), инструментальные (JTAG, I/O), системные (мост PC104). Выполняет вспомогательные функции при работе блока бортового вычислителя, однако в случае отсутствия последнего может работать самостоятельно (для самостоятельной работы необходимо наличие загрузочного EEPROM). Одной из важных функций данного блока является начальное внутрисхемное программирование общих ресурсов (RTC, FLASH).

- Блок общих ресурсов. Он предоставляет доступ к ресурсам памяти (SRAM и FLASH), а также RTC. Содержит в своем составе супервизор питания. Обеспечивает два гальванически изолированных интерфейса CAN.

- Система питания. Система предназначена для обеспечения питанием всего устройства. Предусмотрено два варианта питания: от внешнего источника постоянного тока напряжением 5 В (через разъем PC104 или через специальные клеммы) или напряжением 8 ... 36 В (через специальные

клеммы). Система питания обеспечивает напряжения 3.3 В для блока бортового вычислителя и 2.5 В для блока системного расширения. При отсутствии одного из блоков система питания может быть упрощена, что дополнительно понизит энергопотребление и расширит температурный диапазон работы платы.

Модуль ADEPT

Модуль ADEPT (см. таблицу) предназначен для аналогового и дискретного ввода—вывода в системах стандарта PC104. Модуль обладает развитыми возможностями предварительной обработки сигналов. Это обеспечивается использованием программируемой логики высокой степени интеграции фирмы Altera в сочетании с буферной памятью (FLASH, SDRAM). Предусмотрена возможность загрузки пользователем конфигурационных файлов ПЛИС, что позволяет формировать и гибко изменять функции устройства обработки входных и выходных сигналов в модуле. Модуль ADEPT оснащен контроллерами таких популярных интерфейсов, как PC104, USB, IDE-ATA и др.

СИСТЕМА ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Для отделения пользовательских задач от системных в модуле MEC5091 контроллера КСЗМ использована виртуальная машина с оригинальной системой команд [3, 4]. Частично виртуальная машина реализована программно, а частично аппаратно. Использование виртуальной машины позволило:

- обеспечить эффективную поддержку режима реального времени;
- скрыть от прикладного программиста взаимодействие со сложной аппаратурой;
- увеличить надежность системы;
- ускорить цикл разработки пользовательских программ.

Алгоритмы управления сканирующим зондовым микроскопом задаются пользователем (рис. 2) посредством языка высокого уровня CSPML [5]. Внешне язык CSPML похож на язык программирования C, что делает процесс его освоения программистами достаточно простым. Язык содержит средства описания констант и переменных, условные операторы, операторы циклов, функции. Можно использовать несколько типов данных, есть возможность использования препроцессора.

Алгоритм можно описывать не только на высокоуровневом языке, но и на языке ассемблера, в который преобразуется программа перед преобразованием в бинарный вид. Ассемблерные вставки начинаются с зарезервированного слова

Основные характеристики модуля ADEPT

Наименование	Значение
Дискретные входы—выходы	ТТЛ, до 32 линий
Аналоговые входы	12 бит, (200 kHz), -10...+10 В, 8 линий; 16 бит, (200 kHz), -10...+10 В, 1 линия
Аналоговые выходы	12 бит, (300 kHz), -5...+5 В, 2 линии; 16 бит, (200 kHz), -10...+10 В, 4 линии
Процессор предварительной обработки	на базе FPGA фирмы Altera EP1K30, ..., EP1K100
Контроллер USB	USBN9603
Память	Flash — 1 Мбайт, SDRAM — до 32 Мбайт
Системные устройства	WDT, Ser EEPROM, генератор 48 МГц
Питание	+ 5 В, + 15 В, -15 В

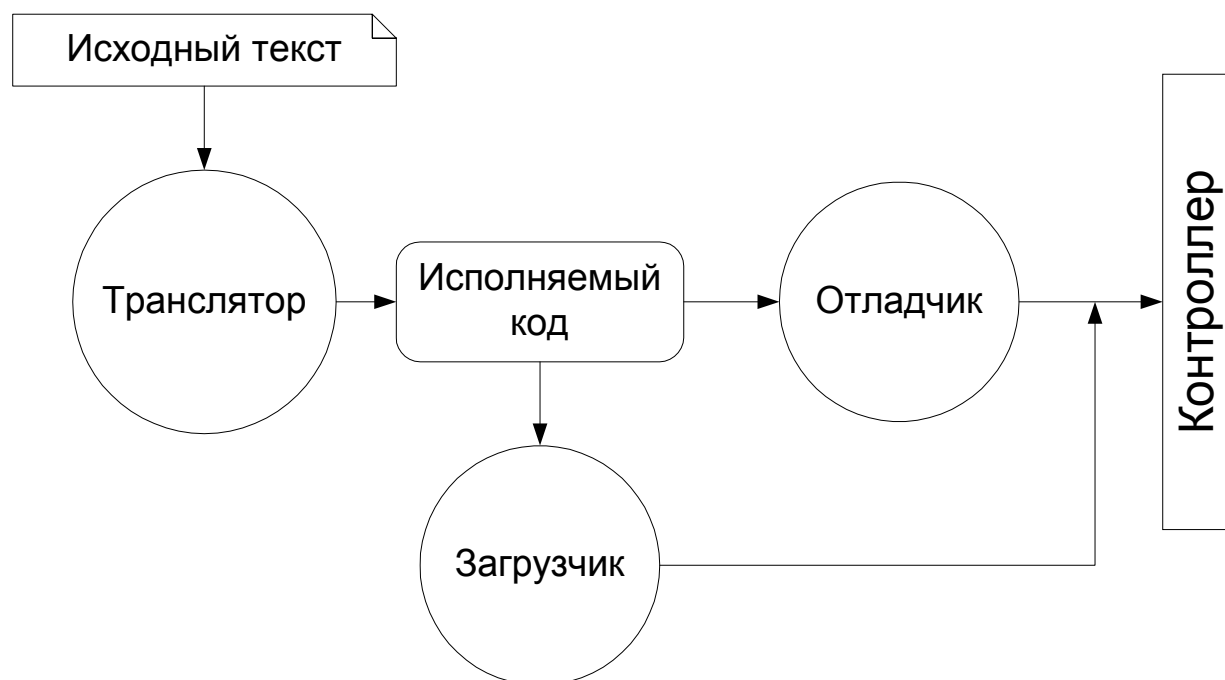


Рис. 2. Процесс создания программы управления зондовым микроскопом

'ASM-START' и заканчиваются словом 'ASM-END'. Внутри ассемблерной вставки находятся строки, содержащие не более одной команды. Также можно обращаться к глобальным и локальным переменным. Данную возможность компилятора следует использовать только подготовленным пользователям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система управления сканирующим зондовым микроскопом на основе конфигурируемых модулей MEC5091 и ADEPT, которые оснащены многоуровневой системой пользовательского программирования, является примером удачного использования концепции платформно-ориентированного проектирования в области встроенных вычислительных систем. Фактически перечисленный выше комплекс аппаратно-программных средств в сочетании с методикой его настройки на прикладную задачу представляет собой вычислительную платформу для создания ряда встроенных систем. Данная вычислительная платформа обладает многими "степенями свободы" для адаптации под задачу. Эта гибкость представлена аппаратными средствами обработки (встроенные микроконтроллеры и ПЛИС), интерфейсами (модульность установки интерфейсных адаптеров и широкая их номенклатура), настраиваемой системой электропитания, развитым набором модульных системных и инструментальных программных средств.

Развитием технологий создания подобного рода вычислительных систем для встроенных приложений активно занимается коллектив Лаборатории микропроцессорной техники кафедры ВТ СПб ГИТМО (ТУ) [6]. Поддержка в апробации результатов работы оказывается коллективами кафедры материаловедения СПб ГИТМО (ТУ) и Лаборатории зондовой микроскопии ИАиП РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. (<http://embedded.ifmo.ru>). Кафедра вычислительной техники СПбГИТМО (ТУ), сайт Лаборатории микропроцессорной техники.
2. Чистяков А.Г., Платунов А.Е. Проектирование функционального наполнения ПЛИС в составе цифровых программно-аппаратных комплексов // Тезисы докладов IX Санкт-Петербургской ассамблеи молодых ученых и специалистов. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 1999. С. 53.
3. Ковязин Р.Р., Чистяков А.Г. Использование аппаратных интерпретаторов для управления неоднородными компонентами микропроцессорной системы // Научно-технический вестник СПбГИТМО (ТУ): Информационные, вычислительные и управляющие системы / Гл. ред. В.Н. Васильев. СПб.: Изд-во СПбГИТМО (ТУ), 2002. Вып. 6. С. 71–76.
4. Ковязин Р.Р. Оптимизация исполняемого кода для виртуальной машины // Тезисы докладов VI Санкт-Петербургской ассамблеи молодых ученых и специалистов (Компьютерные технологии, коммуникация, численные методы и математическое моделирование). СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2001. С. 24.
5. Ковязин Р.Р. Проектирование проблемно-ориентированных языков для встроенных вычислительных систем // Политехнический симпозиум "Молодые ученые — промышленности Северо-Западного региона": Тезисы докладов. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. С. 66.
6. Платунов А.Е. Архитектурные абстракции в технологии проектирования встроенных вычислительных систем // Научно-технический вестник СПбГИТМО(ТУ): Информационные, вычислительные и управляющие системы. СПб.: Изд-во СПбГИТМО(ТУ), 2002. Вып. 6. с. 76–83.

Санкт-Петербургский государственный институт точной механики и оптики (Технический университет) (Голубок А.О., Платунов А.Е.)

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург (Сапожников И.Д.)

Материал поступил в редакцию 21.04.2003.

CONTROL SYSTEM FOR A SCANNING-PROBE MICROSCOPE**A. O. Golubok, A. E. Platunov, I. D. Sapozhnikov****Saint-Petersburg State Institute of Fine Mechanics and Optics (Technical University)***Institute for Analytical Instrumentation of Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg*

This paper describes a modern implementation of a control system for the scanning-probe microscope. The core of the system is a high-performance programmable embedded controller based on the modules MEC5091 and ADEPT. A personal computer is used as a console for control, display, and as a data processing unit. A programming system is available, so it is possible to define the control algorithm using the SPML language.