

Электроника и программное обеспечение универсальных сканирующих зондовых микроскопов НТ-МДТ

Быков В.А, Иконников А.В., Кацур С.Н., С.А. Саунин

Гос.НИИФП, Корпорация МДТ,
103460 Москва - Зеленоград, Гос.НИИФП
тел.(095) 535-03-05, факс (095) 535-64-10, e. mail: spm@ntmdt.zgrad.ru,
<http://www.ntmdt.ru>

Все варианты сканирующих зондовых микроскопов компании базируются на разработанном в последнее время мощном электронном блоке и едином программном обеспечении. По этому нам кажется важным дать общее представление об этих продуктах.

В режиме СТМ используются два типа входных усилителей : на диапазон входных токов 10пА - 10нА и 1пА - 1нА при работе в режиме Z-const. Они представляют из себя преобразователи ток - напряжение с транс импедансом 20МоНм и 200МоНм соответственно. Величина измеряемого входного тока ограничена 50 и 5 нА , полоса частот - 15 и 6 кГц соответственно.

В режиме ССМ входной усилитель представляет собой счетверенный преобразователь фототок - напряжение (по одному на каждую секцию фотоприемника) с полосой 1 МГц). На суммирующих - вычитающих усилителях собрана схема преобразующая 4 входных сигнала в напряжение пропорциональное нормальному отклонению кантилевера, латеральному повороту и полной засветке фотоприемника. Последнее используется при поддержании постоянного относительного отклонения кантилевера , что позволяет компенсировать нестабильность и шумы лазера даже при работе с ненулевым разностным сигналом.

Для работы в режиме модуляционных методик а также для уменьшения входных шумов используются несколько фильтров. В режиме СТМ это фильтр нижних частот 3-го порядка с полосой 10кГц позволяющий поддерживать постоянный средний ток при работе с измерением dI/dZ или dI/dU с модуляцией Z или U на частоте выше 18 кГц.

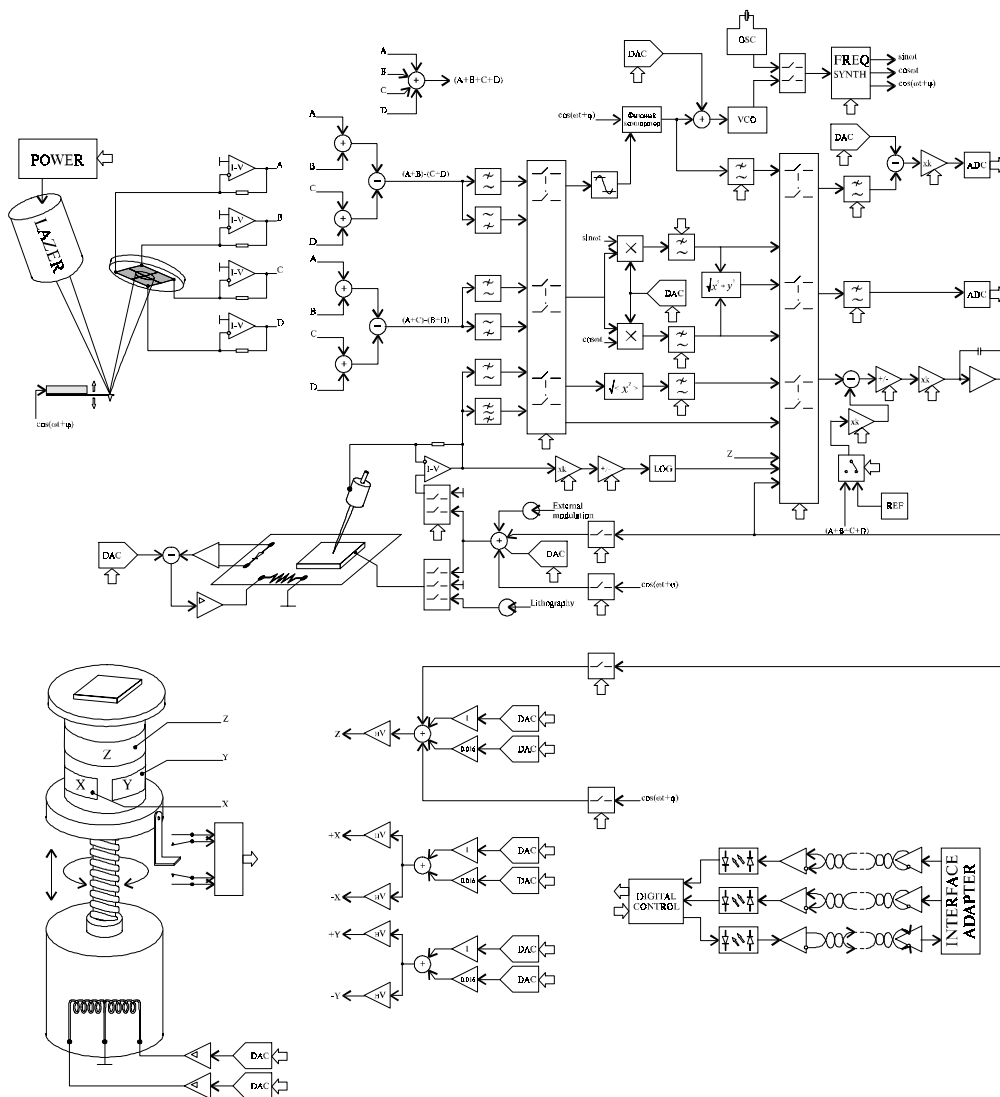


Рис.1. Блок - схема СЗМ комплекса на базе ÑĬĚĀĀÐ-Р7, адаптированного для управления мощным сверхвысоковакуумным шаговым двигателем системы подвода зонд - образцу

Для выделения промодулированного сигнала используется полосовой фильтр 5-го порядка на частоту 18 - 25 кГц. В режиме ССМ это два сопрягающихся фильтра 3-го порядка верхних и нижних частот с частотой среза 50 кГц. В качестве входного сигнала может использоваться сигнал подаваемый на входной внешний разъем прибора. Параметры его фильтров идентичны фильтрам канала ССМ.

В приборе используются три группы мультиплексоров:

Мультиплексоры - усилители входных сигналов позволяющие выбрать из входных сигналов (низкочастотный и полосовой СТМ, низкочастотный и высокочастотный ССМ и внешний) сигналы подвергаемые преобразованию. Мультиплек-

сору выбирающие два независимых сигнала для одновременного измерения двумя АЦП. Мультиплексоры выбирающие выходной сигнал для использования в цепи обратной связи при работе в режиме поддержания постоянной величины входного тока, амплитуды модуляции и т.п.

Преобразователи сигналов позволяют одновременно и независимо получать сигнал пропорциональный логарифму входного тока, а также, при работе в режиме модуляции, сигнал пропорциональный амплитуде входного (с использованием синхронного детектирования), среднеквадратичной величине входного, сдвигу фазы между входным и возбуждающим сигналами. Все сигналы проходят через управляемые фильтры нижних частот 2-го порядка с диапазоном перестройки 200Гц - 20кГц. Диапазон частот при работе с модуляционными методиками - в режиме СТМ :18-25кГц, в режиме ССМ :1кГц-1.8 МГц при изучении свойств кантилеверов и 50 кГц - 1.2 МГц при сканировании поверхности образца. Синхронное детектирование возможно использовать на частотах кратных частоте возбуждения. Возможен режим работы с поддержанием постоянного сдвига фазы между возбуждающим и входным сигналами за счет изменения частоты колебаний кантилевера цепью обратной связи. При использовании проводящих кантилеверов возможно поддержания одного из параметров его колебания (фазы, амплитуды, и т.п.) за счет изменения потенциала подаваемого на кантилевер.

Цепь обратной связи состоит из масштабирующего усилителя, управления полярностью, интегратора с управляемой постоянной времени и режимами сброса и хранения, усилителя ошибки, умножающего 16-ти разрядного ЦАПа задающего уровень поддержания сигнала обратной связью. В качестве опорного напряжения этого ЦАПа может быть использован сигнал пропорциональный полной засветке фотоприемника, что, как уже отмечалось, уменьшает чувствительность прибора к нестабильности и шумам лазера.

Два 16-ти разрядных АЦП позволяют одновременно регистрировать два различных сигнала независимо выбираемых из набора всех входных, преобразованных и внешних сигналов. Перед каждым из АЦП расположен фильтр нижних частот 2-го порядка перестраиваемый в диапазоне 100Гц-20кГц. Перед одним из АЦП находится 16-ти разрядный ЦАП смещения и разностный усилитель, позволяющий компенсировать постоянную составляющую измеряемого сигнала, а также управляемый усилитель с коэффициентом усиления 1,10,100,1000. Это позво-

ляет повысить разрешение АЦП до уровня обусловленного входными шумами в полосе измерения.

Усилители X и Y отклонения пьезосканера идентичны и представляют собой составной ЦАП и высоковольтный усилитель с парафазным выходом. Это увеличивает полный размах напряжения на пьезосканере до +320В/-320В при однополярном питании 350В. Полоса усилителей X и Y 2.5кГц. Составной ЦАП состоит из двух прецизионных 16-ти разрядных ЦАПов, прецизионного источника опорного, двух деглитчеров (для подавления выбросов при переключения ЦАПов). Использование различных коэффициентов усиления для ЦАПов позволяет достичь эффективной разрядности составного ЦАПа - 22 двоичных разряда, что на поле 100 X 100 мкм должно дать минимальный шаг 0.025 нм. Проблема точного согласования усиления двух ЦАПов устраняется тем, что сканирование всегда осуществляется только одним из них : “старшим” или “младшим” - в зависимости от выбранной величины поля сканирования.

Усилитель Z отклонения пьезосканера содержит аналогичную схему составного ЦАПа, но высоковольтный усилитель имеет один выход (0-320В), более широкую полосу - 15 кГц, и способен работать на нагрузку до 100нФ. У него есть вход внешней модуляции и возможность подачи внутреннего модулирующего сигнала. Резисторный делитель и буферный усилитель служат для измерения величины Z в режиме с включенной обратной связью по Z.

Блок синтеза частот состоит из трех 32 разрядных независимых синтезаторов сигналов $\sin(\omega t)$, $\cos(\omega t)$ - для синхронного детектирования и $\cos(\omega t + \varphi)$ - для модулирующих воздействий. Частота, амплитуда и фаза перестраиваются независимо. Шаг перестройки по частоте - 0.01 Hz, по фазе - 0.1 град. Амплитуда модулирующего воздействия может меняться в диапазоне 1mV-10V с шагом 1mV. В качестве задатчика опорной частоты может быть выбран либо кварцевый генератор (40 МГц), либо, в режиме с обратной связью по фазе и управлением частотой, ГУН (9-11МГц).

Блок управления подводом состоит из двух 12-ти разрядных ЦАПов, программно вырабатывающих два сдвинутых на 90 град. синусоидальных напряжения, подаваемых на два усилителя мощности управляющих током через обмотки шагового двигателя подвода.

Стабилизатор температуры состоит из усилителя термопары, задающего ЦАПа, управляемого интегрально-пропорционального звена и выходного источника тока. Мощность стабилизатора температуры 20 W. Точность измерения температуры 0,5°C. Аналогичный усилитель термопары используется для измерения температуры сканера.

Применение такой электроники позволяет реализовать все известные к настоящему времени моды работы сканирующих зондовых микроскопов и, кроме того, двухзондовую резонансную моду.

Сканирующие зондовые микроскопы - это высокоинтеллектуальные инструменты и их развитие коррелирует с развитием вычислительной техники. Развитое программное обеспечение значительно расширяет исследовательские возможности инструментов.

Программное обеспечение приборов линии СОЛВЕР в настоящее время обладает наиболее мощными из известных возможностями. Управление прибором и обработка изображения осуществляется из одной программы и отпадает необходимость выходить из программы управления и запускать программу обработки.

Разработаны и встроены в программу высокоэффективные, простые в настройке алгоритмы коррекции не идеальности пьезокерамики сканера микроскопа. Коррекция нелинейности сканера по X,Y осуществляется с точностью лучшей 1%.

В программе также заложены возможности для обработки изображения: измерения расстояний и углов в плоскости и в пространстве изображения, длины выбранной кривой, расчет статистических параметров шероховатости по выбранному участку изображения с представлением функции распределения.

Возможны различные типы представления изображений: 2х мерном виде с изменением масштаба, 3х мерном виде с изменением масштаба по X, Y, Z, сечение по произвольному направлению с выводом профиля в графическом виде в специальное окно двумерной графики - “осциллограф”.

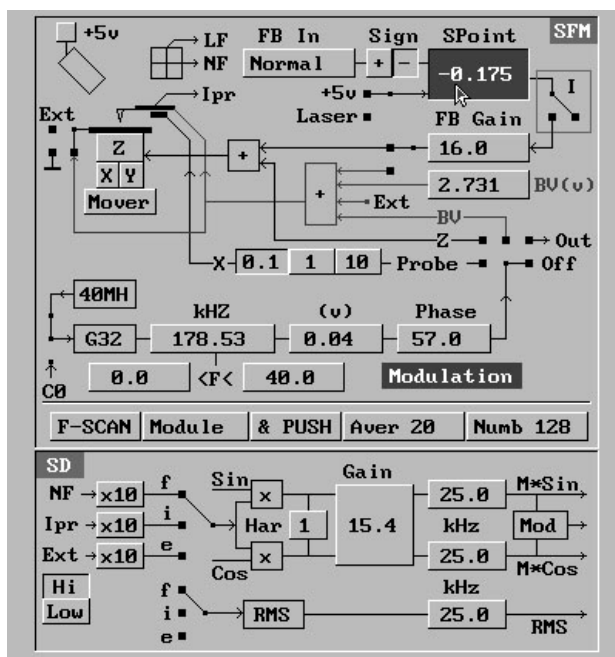


Рис.2. Графический интерфейс для программного управления СЗМ комплекса

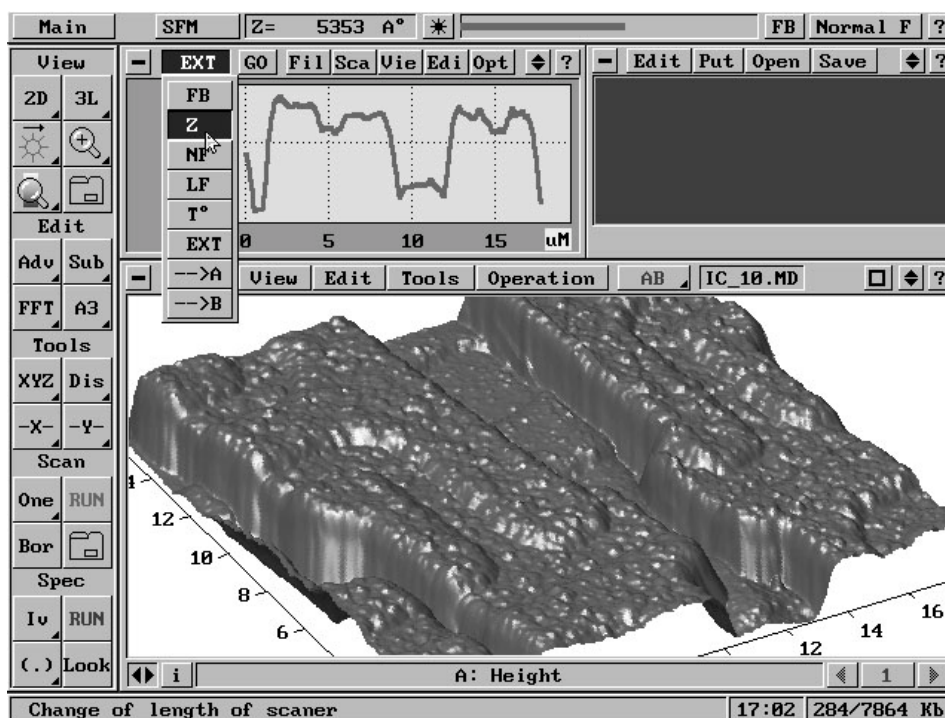


Рис.3. Графический интерфейс для представления и обработки изображений СЗМ комплекса

Для подчеркивания мелких дефектов применяется представление изображения с “подсветкой” с возможностью выбора направления подсветки в варианте с двумерной и трехмерной графикой, выбор цветовой палитры с возможностью редак-

тирования палитр, выбор масштаба действия палитры по заданному участку изображения.

В программе заложены большие возможности редактирования изображений: вырезание выбранного участка изображения, “обнуление” и “уплощение” выбранного участка изображения, быстрое Фурье прямое и обратное преобразование с возможностью редактирования в обратном пространстве, весовая фильтрация по среднему с выбором размерности матрицы преобразования нечетных рангов от 3×3 до 29×29 , весовая медианная фильтрация с выбором размерности матрицы преобразования нечетных рангов вплоть до 29×29 . Имеется возможность дифференцировать изображение, автоматически вырезать пики и провалы из изображения, вычитать из изображения поверхности низких ($1^{\text{го}}$ и $2^{\text{го}}$) с возможностью выбора базового участка изображения, что позволяет скорректировать наклоны и кривизну образца, автоматическое вычитание усредненного матрицей выбранного порядка изображения из исходного, что позволяет визуализировать мелкие детали или малые изменения на поверхностях со значительным рельефом, вычитать друг из друга изображения.

При работе с файлами данных есть возможность загружать для последующей обработки файлы данных, а также текстовые файлы, копировать файлы в любую директорию на диске, позволяет удалять файлы с диска, сортировать файлы по имени, времени создания и размеру, позволяет создавать новые директории на диске, сохранять в формате `rsx`, `bmp` произвольную часть весь экрана или его произвольную часть, например только изображение.

Программа читает файлы с возможностью последующей обработки других производителей микроскопов: DI (Nanoscope II, Nanoscope III, PSI, Omicron, RHK, Topometrix).

Имеется возможность загрузки в программу и обработки как 3 мерных изображений форматов `*.rsx`, `*.pgm`

Наряду с двумерной графикой со встроенным графическим редактором, в программе имеется текстовый редактор, позволяющий комментировать полученные результаты. Комментарий, автоматически включающий также время и условия наблюдения, входит в формат файла, что исключает возможность “потери” файла.