



ОТ СКАНА ДО ФемтоСкана: ИТОГИ 25 ЛЕТ

С.Савинов, к.ф.-м.н., И.Яминский*, д.ф.-м.н.

Появление сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) совпало с началом эпохи персональных компьютеров. История СЗМ – это эра развития высоких технологий за последние 25 лет, во многом связанных с научно-технической революцией в компьютерных и информационных технологиях. В статье обсуждается создание первого российского СЗМ Сканы и его последующих принципиально новых модификаций.

Первые зондовые микроскопы были созданы с использованием комбинации цифровой и аналоговой электроники. Управление ими и обработка данных проводились в операционной системе MS DOS, позволявшей выводить управляющие данные и принимать потоки цифровых массивов обратно в программное обеспечение (ПО). Когда появилась среда Windows с многочисленными версиями, вывод данных на внешние устройства, написание драйверов, их модификация под новые версии стали постоянными задачами программистов.

Первый СЗМ – сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) – появился в компании IBM в Швейцарии, а первые коммерческие микроскопы стала выпускать американская компания Digital Instruments в 1987 году. Первый коммерческий туннельный микроскоп – Nanoscope-1 – был полностью аналоговым с выводом данных на запоминающем осциллографе. Размер кадра в 1 мкм позволял надежно показывать атомы на графите.

В том же году в России появилась коммерческая версия СТМ – Сканы-7. Предыдущих моделей не было, а номер заимствован у Я.Флеминга, герой которого – агент 007 – умел быстро решать сложные задачи. Сканы-7 был создан в рекордно короткий срок – за два месяца. Этому предшествовала случайная встреча двух ученых в магазине на улице Герцена (ныне носит прежнее название – Большая Никитская). Одним из них был д.ф.-м.н. В.Панов, ведущий научный сотрудник физфака МГУ имени М.В.Ломоносова, к этому времени уже построивший первый в СССР туннельный микроскоп. Вторым

человеком был к.ф.-м.н. И.Яминский, с.н.с. кафедры МАТИ им. К.Э.Циолковского. Он заинтересовался, что надо сделать, чтобы построить коммерческий СТМ. Ответ был лаконичным и заключался в том, что необходимо найти 10 тыс. руб. (в то время это была цена автомобиля "Жигули").

В сентябре 1987 года удалось собрать уникальную команду. В нее вошли В.Панов, С.Васильев, Ю.Мосеев, С.Савинов, И.Яминский, который нашел необходимые для финансирования работы средства. В начале ноября уже были созданы механика, электроника и программа управления, а в декабре Сканы-7 давал изображение атомов на поверхности меди (111).

В отличие от американского микроскопа Наноскоп-1 СЗМ Сканы-7 был комбинацией аналоговой и цифровой электроники. Для перемещения зонда использовались 12-разрядные цифроаналоговые преобразователи, для увеличения разрядности проводилось суммирование сигналов от двух таких преобразователей с эффективным увеличением разрядности до 18 бит. Операция суммирования – не вполне корректна, но в туннельной микроскопии срабатывала. Это позволяло рассматривать обзорные кадры микронного размера и высококачественное изображение атомной решетки графита площадью 2×2 нм². Особое внимание уделялось поиску общей точки заземления. Уровень собственных электронных шумов изделия был предельно низким. При выходном сигнале в 600 В шум высоковольтных усилителей был меньше нескольких милливольт, что соответствует динамическому диапазону в 17-18 бит.

Особенностью СТМ Сканы-7 было наличие двух цепей обратной связи. Напряжение по Z-каналу в диапазоне 0–600 В можно было обеспечить

* Центр перспективных технологий.



цифровым образом с выхода комбинированного цифроаналогового преобразователя через фильтр и высоковольтный усилитель на отдельный электрод пьезоманипулятора. На другой электрод сигнал поступал от аналоговой цепи обратной связи. Небольшой диапазон выходных напряжений цепи обратной связи и аналоговый характер сигнала, использование малошумящих операционных усилителей обеспечили превосходное изображение атомов.

Уже тогда стало понятно, что Скан-7 следует совершенствовать. В вышедшей через полгода версии Скан-8 появились, например, дополнительные возможности плавного регулирования управляющих высоковольтных напряжений. Пример полученного на СЗМ Скан-8 изображения атомной структуры поверхности слюды представлен на рис.1.

Совершенствование СЗМ шло параллельно с развитием электронной схмотехники и появлением новой элементной базы. В результате возникла возможность полностью перейти на цифровое управление такими микроскопами.

Существует простой рецепт, как создавать совершенную электронику для научных приборов, который разработчики использовали на протяжении всех лет. Он стал своеобразным ноу-хау разработчиков и состоял в следующем: для создания совершенной электроники важно использовать самые лучшие электронные компоненты, не думая об их цене. Ведь в конечной стоимости разработки научного прибора вклад их цены несущественен, а основная ее стоимость состоит из оплаты труда разработчиков.

От моделей Скан-7 и Скан-8 пора было переходить к новой концепции микроскопа с полностью цифровой электроникой. Этому способствовало появление цифровых сигнальных процессоров. Эти изделия должны были работать с сигналами в режиме реального времени. На вход поступает сигнал – сигнал на выход должен прийти с минимальной задержкой. Это предъявляет особые требования к архитектуре процессора. Он, как и в мобильном телефоне, не может работать с задержкой, поскольку неизвестно, когда придет ответ от собеседника, и разговор может расклеиться.

В новом СЗМ была выбрана последняя версия сигнального процессора ADSP2171 с предельно высокой для того времени тактовой частотой в 130 МГц. Подобные процессоры использовались в крылатых ракетах, которые при полном внешнем различии с СЗМ имели много сходного с ним: крылатая ракета летит над поверхностью на малой высоте, отслеживая рельеф местности, а игла СЗМ движется над поверхностью образца, также отслеживая рельеф, но уже на уровне атомных масштабов.

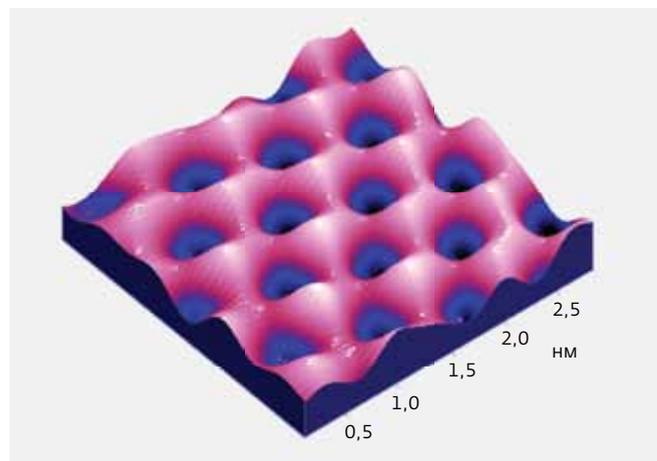


Рис.1. Изображение без дополнительной фильтрации и математической обработки атомной решетки на поверхности слюды (СЗМ Скан-8)

Скорости крылатой ракеты и зонда СЗМ отличаются на 9 порядков, но микроконтроллер работает не со скоростями объектов, а с амплитудами и частотами входящих сигналов. Они одинаковы для крылатой ракеты и СЗМ. Алгоритмы обработки сигналов также одинаковы.

Для нового микроскопа были выбраны лучшие в то время операционные усилители, самые точные цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи. В результате родился СЗМ ФемтоСкан. Приставка Фемто была выбрана не случайно. Ее применение означало, что правильно построенный микроскоп должен измерять:

- электрические токи на уровне фемтоАмпера;
- силы взаимодействия зонд-образец на уровне фемтоНьютона;
- электрическую емкость зонд-образец в единицу фемтофарады;
- перепады по высоте на уровне фемтометра.

Рождением СЗМ ФемтоСкан можно считать 29 апреля 1996 года. Именно в этот день на нем удалось получить первые изображения поверхности графита с атомным разрешением.

ФемтоСкан стал удачным решением для сложных научных исследований и реализации эффективных образовательных программ. Он постоянно развивается, добавляются новые моды и режимы. Для изделия удалось создать надежную и простую механическую систему.

Для управления микроскопом и обработки данных было создано ПО ФемтоСкан Онлайн. Оно состоит из двух взаимосвязанных частей. Базовая часть ПО позволяет управлять СЗМ и принимать экспериментальные данные в компьютер, вторая



часть – надстройка – проводить обработку и анализ данных. Уникальность этого ПО – возможность удаленного управления. В результате получился первый в мире СЗМ, режимами измерений которого можно управлять через Интернет. Удобство такой системы очевидно во многих случаях:

- при совместных исследованиях образцов;
- при длительных измерениях, например, при изучении роста кристаллов;
- в обучении и в образовательных программах;
- для технической поддержки и сопровождения.

В 2011 году была начата разработка принципиально новой модели микроскопа, поскольку для новых идей авторов возможности сигнального процессора СЗМ ФемтоСкан были иногда недостаточными. Кроме того, в электронной схемотехнике появились новые удачные и оригинальные идеи. В частности, было создано поле для реализации смелых идей – микроконтроллеры нового поколения на программируемой логике. Разумеется, существовали они давно, но в последнее время микроконтроллеры сделали качественный скачок и превратились в могучий инструмент для реализации амбициозных целей, которые ставят перед собой разработчики нового оборудования. В их числе:

- электронное ядро микроскопа должно работать на предельно высокой частоте;
- существенная часть алгоритмов управления должна быть выполнена аппаратным, а не программным способом;
- ПО для управления микроскопом должно работать не только в Windows, но и под Linux, и в среде Apple.

В этой связи авторы впервые знакомят читателей с архитектурой нового СЗМ – ФемтоСкан X. По мере развития микроскопа буква X будет заменена на слово, наиболее полно отражающее назначение нового изделия.

При проектировании блока управления СЗМ учитываются несколько основных факторов:

- аппаратная и алгоритмическая расширяемость;
- удобство и надежность канала передачи данных между управляющим компьютером и блоком СЗМ;
- быстродействие.

Предельные технические параметры практически полностью определяются

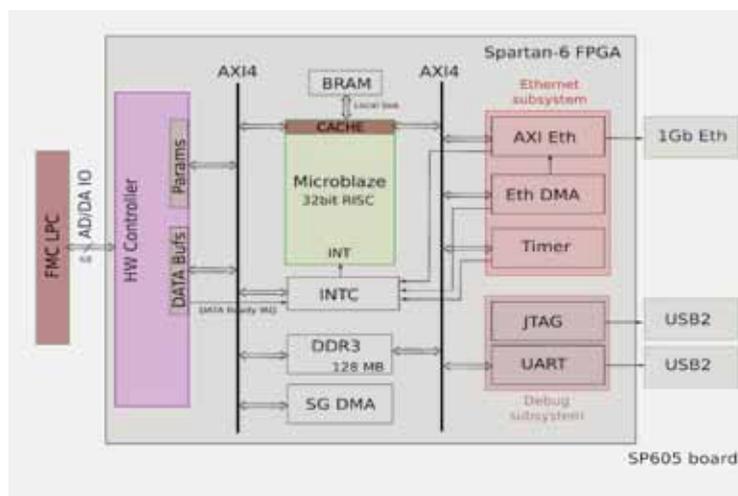


Рис.2. Упрощенная структурная схема цифровой части блока управления СЗМ ФемтоСкан

существующей аналого-цифровой элементной базой, что заставляет по мере появления новых электронных компонентов совершенствовать основные составляющие электронного блока. Настоящая разработка основана на элементной базе продукции фирмы Analog Devices, предлагающей лучшие решения для построения прецизионной электроники.

Сложность алгоритмов управления СЗМ и передачи данных фактически диктует использование

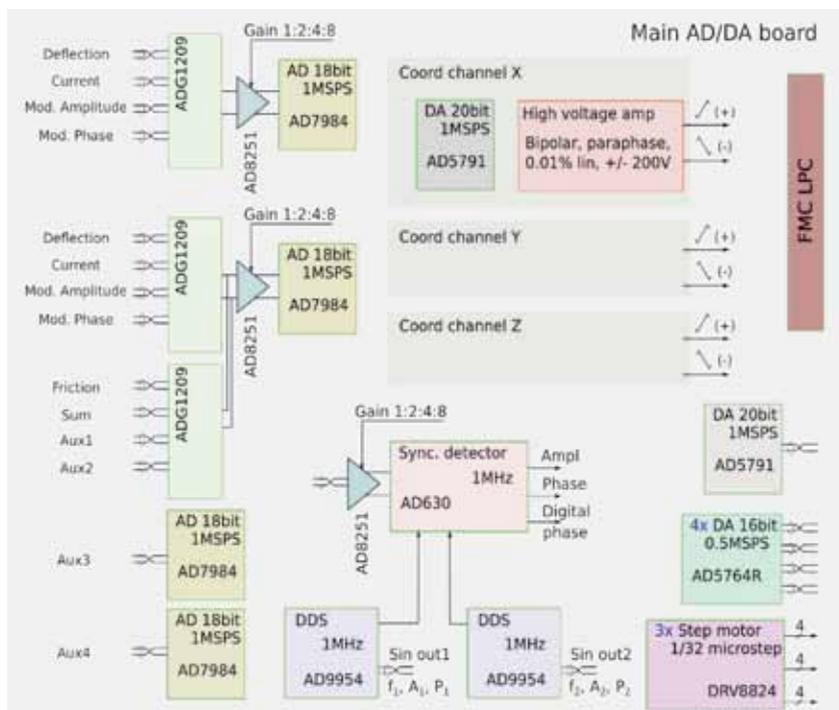


Рис.3. Компоненты основной платы блока управления СЗМ ФемтоСкан



процессора, как центрального компонента блока управления. Современное развитие микросхем программируемой логики (FPGA или ПЛИС) позволяет сформировать высокопроизводительный процессор на самом кристалле ПЛИС. При этом аппаратная логика для управления ЦАП, АЦП и иными формирователями сигнала может также быть размещена в пределах ПЛИС.

Если канал передачи данных реализуется на основе интерфейсов USB или Ethernet, то центральный процессор используется для программного формирования их сигналов. Часть нагрузки может быть

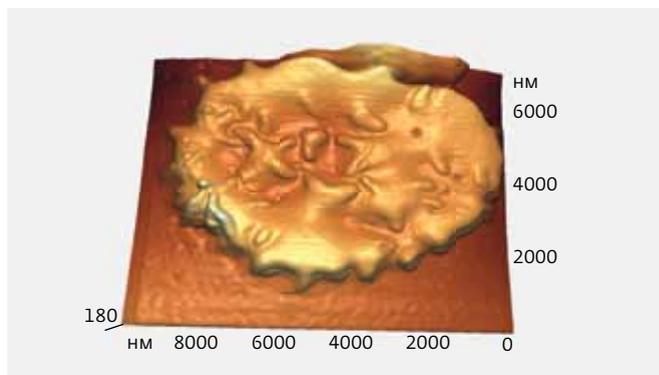


Рис. 4. Эхиноцит (разновидность эритроцита), подвергнутый электропорации, в результате которой на его поверхности образовались поры нанометрового диаметра – удачный образец для изучения с помощью СИМ*

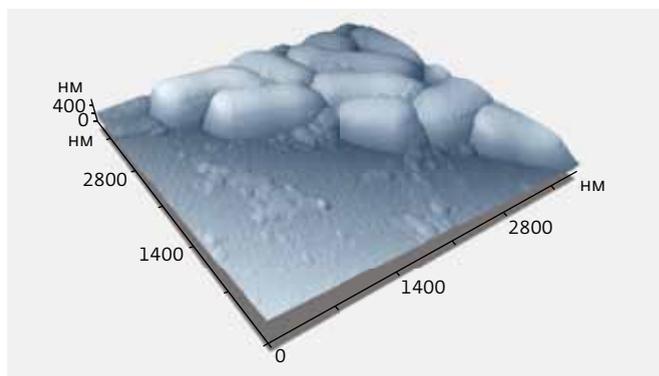


Рис. 5. Резистентность бактерий к современным антибиотикам – серьезная проблема современной медицины и важная задача для СИМ ФемтоСкан Ион (АСМ-изображение бактерий *Helicobacter pylori*)

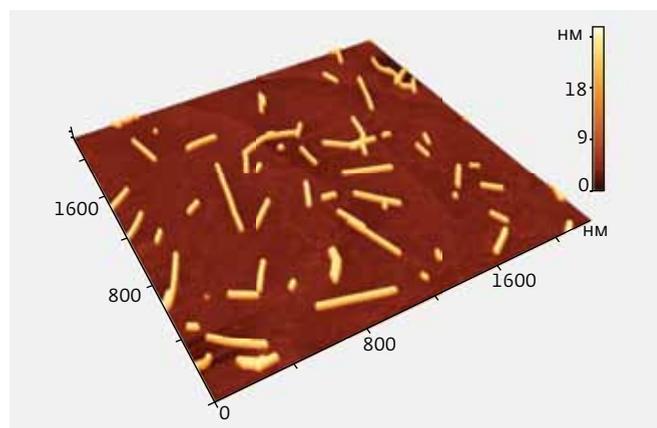


Рис. 6. Вирус табачной мозаики (ВТМ) – полезный строительный кирпичик в наномире или средство доставки ДНК в клетку. Для решения задач молекулярной медицины по созданию биометок ВТМ может, например, способствовать эффективному синтезу металлических наночастиц в биологических жидкостях

перенесена на аппаратные ускорители, но доступная чисто аппаратная реализация стеков USB и Ethernet на текущий момент отсутствует.

На рис.2 приведена упрощенная структурная схема цифровой части блока управления СЗМ.

При проектировании системы особое внимание уделялось качеству сигнальных цепей, поэтому везде, где это было возможно, сигналы передаются по дифференциальным линиям, как показано на рис.3

Пока писали эту статью, СЗМ ФемтоСкан X получил дальнейшее развитие. Схемотехника и ПО оказались удобными для создания новых типов микроскопов, в частности, сканирующего ионного микроскопа (СИМ), который особо интересен для клеточной и молекулярной биологии. Таким образом, появилась новая модель микроскопа – ФемтоСкан Ион. С его помощью можно изучать структуру ионных каналов в клеточной мембране, определять величину ионного тока в синтетических пористых полимерах. Микроскоп в высшей степени полезен при создании топливных элементов. Очень важно, что исследование поверхности можно проводить в жидкости, в частности, в растворах электролитов. СИМ, безусловно, найдет применение в современных биологических исследованиях и экспериментах (рис.4–6).

Авторы благодарны Министерству образования и науки РФ (ФЦП, мероприятие 1.5, проект 14.U02.21.1235) и РОСНАНО (проект 1260).

* Мороз В.В., Черныш А.М., Яминский И.В., Козлова Е.К., Киселёв Г.А., Филонов А.С., Богушевич М.С., Гудкова О.Е. Перспективы применения методов атомной силовой микроскопии в реаниматологии. – Общая реаниматология, 2008, т.IV, №4, с.51–54.



FROM SCAN TO FEMTOSCAN: RESULTS OF 25 YEARS OF SCIENTIFIC ACTIVITIES

S.Savinov, PhD, I.Yaminsky*, DSc.

The emergence of scanning probe microscopy (SPM) coincided with the beginning of the era of personal computers. For the past twenty five years the SPM history has become an era of high technology development which are largely related to the scientific and technological revolution in computer and information technologies. This paper discusses the creation of the first Russian SPM Scan instrument and its subsequent brand new modifications.

The first probe microscopes were created using a combination of digital and analog electronics. Their management and data processing were carried out in the MS DOS operating system which allowed to output the control data and to receive streams of digital arrays back to the software. With emergence of the Windows environment with many versions, the data output to external devices, writing drivers, their modification under the new versions have become a permanent tasks of programmers.

The first SPM - Scanning Tunneling Microscope (STM) - appeared in IBM in Switzerland, and the first commercial microscopes were produced for the first time by Digital Instruments (USA) in 1987. The first commercial tunneling microscope - Nanoscope - 1 - was fully analog with data output on the storage oscilloscope. Frame size in one micron allowed for reliable demonstration of atoms on graphite.

The same year in Russia got a commercial version of the SPM - Scan-7. There were no previous models, the number was borrowed from Y.Fleming's hero 007 who was able to quickly solve complex problems. Scan-7 was created in a record short period of time - two months. This was preceded by a chance meeting of two scientists at a shop in Herzen Street (now Bolshaya Nikitskaya). One of them was V.Panov, DSc, a leading scientific worker of the Physics Department of Moscow State University who had already built the first Soviet tunneling microscope. The second person was I.Yaminsky, PhD, a senior scientific worker of Department of Tsiolkovsky-MATI. He wondered what should be done to build a commercial SPM instrument. The answer was short: it was necessary to find 10,000 rubles. (At that time it was the price of "Lada" car)

In September 1987 it became possible to collect a unique team. It included V.Panov, S.Vasilev, Yu.Moseev, S.Savinov and I.Yaminsky who found the needed funds to finance the work. By early November the mechanics, electronics and control program had been created, in December Scan-7 gave an image of atoms on the copper surface (111).

As opposed to the American microscope Nanoscope-1, Scan-7 was a combination of analog and digital electronics. To move the probe 12-bit digital-to-analog converters were used, to increase the bit summation of signals from two such transmitters with an effective increase in the bit to 18 bit was done. Operation of summation is not quite correct, but in tunneling microscopy it worked. It made it possible to consider the overview pictures of micron-size and high-quality image of the atomic lattice of graphite of $2 \times 2 \text{ nm}^2$ in area. Special attention was given to finding a common grounding point. Electronic noise level of the product was extremely low. For output signal of 600 V the noise of high-voltage amplifiers was

less than a few mV, which corresponds to a dynamic range of 17-18 bits.

The specific feature of STM- Scan-7 was the presence of two feedback loops. The voltage over the Z-channel in the range 0-600 V could be provided digitally with a combined output of digital-to-analog converter through a filter and a high voltage amplifier to the separate electrode of a piezo manipulator. To the other electrode the signal was sent from the analog feedback loop. The small range of output voltages of the feedback circuit and the analog nature of the signal, the use of low-noise operational amplifiers provided a perfect image of atoms.

It was as early as then that it became clear that the Scan-7 should be further improved. The Scan-8 version produced in six months, for example, got additional features of stepless control of high control voltages. An example of the images of the atomic structure of mica surface prepared fusing the SPM Scan- 8 is shown in Fig.1.

Improvement of SPM went along with development of the electronic circuit technique and a new element structure. As a result it became possible to switch completely to digital control of the microscopes.

There is a simple recipe to create perfect electronics for scientific instruments, which they used throughout the years. It became a kind of the designers' know-how and consisted in the following: to create perfect electronics it was important to use the best electronic components irrespective of the price. After all, the price is a negligible of the final cost of developing a scientific instrument, the main part of its cost is the wages of developers' salary.

Fig.1. Image without additional filtering and mathematical treatment of the atomic lattice on the mica surface (SPMS can-8).

It was time to move on from Scan 7 and 8 to a new concept of a microscope with fully digital electronics. It became possible with the appearance of digital signal processors. These products were to work with signals in real time. There is an input signal - a signal to the output should come with a minimum delay. This places special demands on the architecture of the processor itself. It is like a mobile phone, it cannot work with a delay. For in this case it is not known when the answer from someone you are talking can come, and the conversation cannot be conducted.

The new SPM need the latest version of the ADSP2171 signal processor with extremely high for the time clock speed of 130 MHz. Similar processors were used in cruise missiles, which though looking totally different from SPM had much in common with it: a cruise missile flies over the surface at a low altitude with terrain tracking, the SPM tip moves over the surface of the sample, also with relief tracking, but already

*Centre of promising technologies.



at the level of atomic scales. Speeds of a cruise missile and of the probe SPM differ by 9 orders, but the microcontroller does not work with velocities of objects, only with amplitudes and frequencies of the incoming signals. They are the same for cruise missile and SPM. Signal processing algorithms are also identical.

The best at that time operational amplifiers were chosen for the new microscope – the most accurate digital-to-analog and analog-to-digital converters. As a result, SPM FemtoScan appeared. Femto prefix was chosen not by accident. Its application meant that a properly constructed microscope should measure:

- electrical currents at femtoAmper level,
- interaction forces of tip-sample interaction at femtoNewton,
- capacitance of the tip-sample per unit of femtoFarad,
- differences in height at the femtometer level.

April 29, 1996 can be considered the day SPM FemtoScan appeared. The same day it became possible to get the first images of the graphite surface with atomic resolution.

FemtoScan was a good solution for complex scientific investigations and implementation of effective educational programs. It is constantly developing, new modes and conditions are added. It became possible to create a reliable and simple mechanical system for the product.

For microscope control and data processing there have been produced Softwear FemtoScan Online . It consists of two interrelated parts. The basic part of the software allows to manage SPM and to introduce experimental data into the computer. The second part is topside for processing and analyzing data. The uniqueness of this software is a possibility of remote management. The result was the world's first SPM, these functions can be controlled by the Internet. Convenience of such a system is obvious in many cases:

- for joint investigation of samples,
- at long-term measurements, for example, in the study of crystal growth,
- in training and in education programs,
- for technical support and maintenance.

2011 was the start of development of a fundamentally new model of the microscope as the capabilities of the signal processor SPM FemtoScan were sometimes inadequate for the authors' new ideas. In addition, the electronic circuit design had new successful and original ideas. In particular, a field was created to implement bold ideas – a new generation of microcontrollers on programmable logic. Of course, they have existed for long time, but in recent years these microcontrollers have made a huge leap and become a flexible and powerful tool for implementation of the ambitious goals set for the developers. Among them are:

- the electronic microscope core must operate at an extremely high frequency,
- an essential part of the control algorithms must be implemented as hardware and not software method,
- software for microscope control should work not only in Windows, but also under Linux and with Apple.

In this connection, the authors first introduce readers to the architecture of the new SPM – FemtoScan H. As the microscope advances letter X will be replaced by the word that will best reflect the nature of the new product.

The SPM control unit is designed taking into account several key factors:

- hardware and algorithmic expandability;
- convenience and reliability of data transfer between the host computer and SPM block;
- processing speed.

Limit specifications are almost entirely determined solely by the existing analog-digital element base, which with the appearance of new electronic components causes to improve the basic components of the electronic unit. This present development is based on cell-based production of Analog Devices which offers the best solutions to build high-precision electronics.

The complexity of the control algorithms of SPM and data passing actually dictates the use of the CPU as a central component of the control unit. Modern development of programmable logic microchips (FPGA or FPGA) allows to create a high-performance processor on the FPGA chip. In this case, the hardware control logic for the DAC, ADC, and other signal conditioners can also be placed within the FPGA.

If the data channel is implemented through USB or Ethernet the CPU is used if needed for software to form their signals. A part of the load can be moved to hardware accelerators, but pure hardware implementation of USB stacks and Ethernet is currently not available.

Fig.2 shows a simplified block diagram of the SPM digital control unit.

Fig.2. Simplified block diagram of the digital part of the control unit SPM FemtoScan.

Fig.3. Components of the main board of the control unit SPM FemtoScan

In the course of the system designing the authors specially focused on the quality of the signal chains, so wherever possible, the signals are transmitted through the differential lines which is explicitly shown in Fig.3

While writing this article, the SPM FemtoScan X was further developed. Circuitry engineering and software turned out to be convenient for creating new types of microscopes, in particular, the scanning ion microscope (SIM), which is particularly interesting for cell and molecular biology. Thus, at present there is a new model of the microscope – FemtoScan Ion. It can be used to study the structure of ion channels in the cell membrane, to determine the ion current quantity in synthetic porous polymers. The microscope is highly useful for creating fuel cells. It is important that the study of the surface can be carried out in a liquid, in particular, in electrolyte solutions. The SIM will definitely find use in modern biological research and experiments (Fig.4-6).

Fig.4. Echinocyte (a type of red blood cell) subjected before observation to nanotropation, which resulted in formation of pores on its surface with a nanometer diameter – a good sample for study by SIM.*

Fig.5. Bacterial resistivity to modern antibiotics is a serious problem in modern medicine and an important task for SIM FemtoScan Ion. (AFM image of the bacteria *Helicobacter pylori*)

Fig.6. Tobacco mosaic virus (TMV) is a useful building block in the nanoworld or a means of DNA delivery into a cell. To solve the problems of molecular medicine in creation of biomarks TMV can, for example, facilitate efficient synthesis of metal nanoparticles in biological fluids. ■

The authors are grateful to the Ministry of Education and Science of RF (FTP, event 1.5, project 14.U02.21.1235) and ROSNANO (project 1260).

*V. Moroz, A. Chernysh, I. Yaminsky, E. Kozlova, G. Kiselev, A. Filonov, M. Bogushevich, O. Gudkova. Prospects of application of atomic force microscopy methods in critical care medicine. – General emergency medicine, 2008, v.IV, №4, p.51-54.