СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ В ОСАЖДЕННЫХ ТОНКИХ ПЛЕНКАХ

SCANNING PROBE MICROSCOPY OF LOCAL CHEMICAL REACTIONS IN DEPOSITED THIN FILMS

УДК 621.385.833, ВАК 05.11.13, DOI: 10.22184/1993-8578.2017.75.4.64.67

И.Яминский^{1,2}, А.Ахметова^{1,2}, М.Смирнова¹ / yaminsky@nanoscopy.ru
I.Yaminsky^{1,2}, A.Akhmetova^{1,2}, M.Smirnova¹

Интеграция режима сканирующей капиллярной микроскопии в сканирующие зондовые микроскопы открывает новые возможности в области управления локальными химическими реакциями.

Implementation of the scanning capillary microscopy mode in the scanning probe microscopes opens new features in the control of local chemical reactions.

Для многих практических приложений особый интерес представляет контролируемая модификация поверхности в естественных условиях – на воздухе и в жидких средах, в том числе проведение химических реакций с вовлечением минимального количества атомов и молекул. Изменение свойств поверхности и проведение химических реакций в областях нанометрового масштаба открывает новые пути создания химических и биологических сенсоров с предельной чувствительностью на уровне единичных атомов и молекул.

Именно определение основных закономерностей локальной модификации поверхности в условиях естественного окружения является ключевой задачей совместного проекта ученых МГУ им. М.В.Ломоносова и Шарифского университета (Тегеран, Иран) [1]. Иранские коллеги во главе с научным руководителем проекта Фаршадом Салехи обладают большим опытом фундаментальных исследований тонких пленок, имеют богатую экспериментальную технологическую базу для создания проводящих и диэлектрических пленок с требуемыми параметрами. Благодаря совместной реализации проекта разработаны новые методы модификации поверхности в естественных средах с изменчивыми параметрами: температурой, составом, скоростью потока и пр.

В сканирующем зондовом микроскопе "ФемтоСкан", который активно используется в научных исследованиях и технологических работах как российской, так и иранской сторонами, реализована уникальная возможность управления всеми режимами измерений в многопользовательском режиме через Интернет. Благодаря этому эксперименты по сканирующей зондовой микроскопии проводятся совместно удаленным образом, причем как российские, так и иранские ученые получают все данные в режиме реального времени. Это особенно важно для сложных и длительных экспериментов, к которым относятся опыты по модификации поверхности материалов, экспериментальные работы по определению влияния параметров окружающей среды на характер протекания поверхностных локальных реакций.

В данный момент наша группа осуществляет интеграцию режима сканирующей капиллярной микроскопии в сканирующие зондовые микроскопы "ФемтоСкан" и "ФемтоСкан X" [2]. С помощью сканирующего туннельного микроскопа исследуется возможность удаления отдельных атомов и локальных областей с графитовых подложек в воздушной среде при контролируемой влажности в диапазоне 10–95%. Также перед нами стоит задача апробации технологии создания многоканальных

¹ Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова / Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics.

² Центр перспективных технологий / Advanced Technologies Center.

Рис.1. АСМ-изображения эритроцитов
Fig.1. AFM image of erythrocytes

Рис.2. ПО "ФемтоСкан Онлайн" позволяет строить 3D-изображения эритроцитов
Fig.2. FemtoScan Online software allows to obtain 3D images of erythrocytes

Controlled surface modification in natural conditions – in air and in liquid environments – including conducting of the chemical reactions involving a minimum number of atoms and molecules is of great interest for many practical applications. The change of the surface properties and implementation of chemical reactions in the nanometer scale area opens up new ways of creation of chemical and biological sensors with ultimate sensitivity at the level of single atoms and molecules..

Exactly the determination of the basic regularities of local surface modification in the natural environment is a key task of the joint project of scientists of Lomonosov Moscow State University and Sharif University of Technology (Tehran, Iran) [1]. Iranian colleagues led by Farshad Salehi, the supervisor of the project, have extensive experience in basic research of thin films, have a rich experimental technological base

for creation of conductive and dielectric films with the required parameters. Thanks to a joint implementation of the project, a new methods of surface modification in natural environments with changing parameters – temperature, composition, flow rate, etc. – were developed.

FemtoScan scanning probe microscope that is widely used in scientific research and technological works by both Russian and Iranian sides, comes with the unique feature to manage all measurement modes in multiuser mode via the Internet. Due to this, experiments on scanning probe microscopy are held together remotely, and both Russian and Iranian scientists get all the data in real-time. This is especially important for long and complex experiments, which include tests in the field of surface modification of materials and experimental works on determination of the impact of environmental parameters on the nature of the flow of local surface reactions.

At the moment, our group carries out the integration of the scanning capillary microscopy mode into FemtoScan and FemtoScan X scanning probe microscopes [2]. Using a scanning tunneling microscope we investigate the possibility of removing individual atoms and local areas from the graphite substrate in air at a controlled humidity in the range of 10–95%. We are also faced with the task of testing technologies for the creation of multi-channel capillaries with the diameter of outlet holes from 5 to 100 nm.

Other objectives of the project:

- creation of a lithographic pattern using a scanning probe microscope with a characteristic size of about 50 nm on the surface of carbon materials, metal films (aluminum, titanium) and semiconductors (doped silicon);
- development of methods of lithography with atomic resolution in air and under controlled gas environment;

Рис.3. Сечение поверхности эритроцитов, представленных на рис.1

Fig.3. Section of surface of erythrocytes that are shown in Fig.1

капилляров с диаметром выходных отверстий от 5 до 100 нм.

Другие задачи проекта:

- создание литографического рисунка с помощью сканирующего зондового микроскопа с характерным размером на уровне 50 нм на поверхности углеродных материалов, металлических пленок (алюминий, титан) и полупроводников (легированный кремний);
- отработка методов литографии с атомным разрешением на воздухе и в условиях контролируемой газовой среды;

- оценка локального энергетического воздействия электрического импульса на поверхность материалов.

В перспективе рассматриваются задачи доставки химических реагентов и буферов в область нанометрового масштаба с помощью многоканальных капиллярных систем. Для этих задач используется сканирующий ион-проводящий микроскоп, в котором капиллярный зонд может выступать в качестве средства доставки веществ, электрохимического сенсора, измерителя pH, тест-системы для обнаружения ионов металлов и др. Такое решение

- evaluation of local energy impact of electric pulse on the surface of the materials.

In the perspective the challenges of delivery of chemical reagents and buffers into the area of nanometer-scale using a multichannel capillary systems are considered. For these tasks we use a scanning ion-conductance microscope, in which the capillary probe can be used for delivery of substances, as an electrochemical sensor, pH meter, test system for the detection of metal ions, etc. This solution allows to implement new approaches in nanolithography in the natural environment – in the air and water. Multi-channel capillary

probe gives the ability to create in the local area the conditions for the defined local chemical reactions. The capabilities of scanning ion-conductance microscopy are much broader than just the observation of the surface topography of rough objects with a low mechanical rigidity. The use of a multichannel capillaries as a probe is promising for multiparameter analysis of cells [3, 4].

Currently, multi-channel capillaries are used in the Nanotechnologies youth innovation creativity centre in the study of blood cells in the field of biomedicine of the Healthnet platform of National technology initiative (Fig.1-3). Using a multichannel

capillaries the possibility to determine the antibiotic resistance of bacteria *E. coli* is studied. With the use of scanning ion-conductance microscope we work on visualization of red blood cells, in particular, on the delicate attachment of erythrocytes to the cover glass using polylysine. ■

The study was performed with financial support of RFBR in the framework of research project 17-52-560001. The authors express their sincere gratitude to the Government of Moscow, Department of science, industrial policy and entrepreneurship of Moscow, the Ministry of economic development (contract No. 8/3-63и-16 from 22.08.16) for financial support of projects of the Nanotechnologies YICC.

позволяет реализовать новые подходы в нанолитографии в условиях естественного окружения – воздушной и водной среды. Многоканальный капиллярный зонд дает возможность создавать в локальной области условия для протекания заданных локальных химических реакций. Возможности сканирующей ион-проводящей микроскопии значительно шире, чем просто наблюдение рельефа поверхности шероховатых объектов с низкой механической жесткостью. Использование многоканальных капилляров в качестве зонда перспективно для мультипараметрического анализа клеток [3, 4].

В настоящее время многоканальные капилляры используются в центре молодежного инновационного творчества "Нанотехнологии" при изучении клеток крови в рамках направления "Биомедицина" платформы Healthnet Национальной технологической инициативы (рис.1–3). С помощью многоканальных капилляров изучается возможность определения антибиотикорезистентности бактерий *E.coli*. С применением сканирующего ион-проводящего микроскопа ведется работа по визуализации эритроцитов, в частности, осваивается техника деликатного прикрепления эритроцитов к покровному стеклу с использованием полилизина.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 17-52-560001. Авторы выражают искреннюю благодарность Правительству Москвы, Департаменту науки, промышленной политики и предпринимательства г. Москвы, Минэкономразвития России (Договор № 8/3-63ин-16 от 22 августа 2016 года) за финансовую поддержку проектов ЦМИТ "Нанотехнологии".

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ахметова А., Мешков Г., Яминский И., Салехи Ф.** "ФемтоСкан" и международное сотрудничество // НАНОИНДУСТРИЯ. 2016. № 67(5). С. 90–92.
2. **Синицына О.В., Яминский И.В.** Сканирующая капиллярная микроскопия // Медицина и высокие технологии. 2016. № 4. С. 20–21.
3. **Макарова Е., Багров Д., Горелкин П., Ерофеев А., Яминский И.** Наблюдение эритроцитов с помощью атомно-силовой и сканирующей ион-проводящей микроскопии // НАНОИНДУСТРИЯ. 2015. № 56(2). С. 42–47.
4. **Макарова Е.С., Багров Д.В., Горелкин П.В., Ерофеев А.С., Яминский И.В.** Визуализация эритроцитов методами атомно-силовой и сканирующей ион-проводящей микроскопии // Медицина и высокие технологии. 2015. № 2. С. 42–45.