

Алиджанов Э.К., Домахин О.А., Летута С.Н. Беспалов В.А.*, Логинов Б.А.*

Оренбургский государственный университет, Оренбург

* Московский институт электронной техники, Зеленоград

ВАКУУМНЫЙ СКАНИРУЮЩИЙ ТУННЕЛЬНЫЙ МИКРОСКОП ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОВОДЯЩИХ ОБРАЗЦОВ

Описываются конструкционные особенности и технические характеристики оригинального вакуумного сканирующего туннельного микроскопа UnderSEM-377, совмещенного с коммерческим растровым электронным микроскопом (JSM-T20). Для созданного комбайна, на примере тестовых образцов представляющих собой пленки фуллерита и органического полупроводника – 1,4,5,8 = нафталинтетракарбоксилдиангидрид, показана возможность исследования топографии поверхности и структуры плотности электронных состояний с латеральным разрешением ~1 нм.

Анализ состояния научных исследований в области нанотехнологий и среднесрочные прогнозы их развития [1] указывают на то, что nanoиндустрия находится на таком этапе, когда получение результатов определяется новыми идеями, а необходимое оборудование только разрабатывается. Нанoeлектроника, молекулярные сенсоры и двигатели, фотонные кристаллы – далеко не полный перечень областей науки и техники, базирующихся на манипуляции отдельными атомами и молекулами и остро нуждающихся в прецизионных контрольно-измерительных инструментах. В настоящее время имеются разнообразные коммерческие предложения по поставке микроскопов и манипуляторов для работы с нанообъектами [2]. Однако объективно существующие экономические ограничения не позволяют широко использовать такое оборудование в лабораторной практике. В данной работе представлен вариант малобюджетного технического решения по созданию вакуумного микроскопа с атомарно-молекулярным разрешением. Для его реализации нами была проведена модернизация растрового электронного микроскопа (РЭМ) JSM-T-20 (рис. 1).

Модернизация РЭМ проводилась в два этапа. Сначала была существенно доработана электронная схема развертки электронного пучка растрового микроскопа и системы визуализации исследуемого объекта. Разработана и изготовлена специальная плата управления разверткой РЭМ и оцифровки видеосигнала (сигнала, формирующего изображение) на основе 12-разрядного ЦАП – АЦП, которая сопрягалась с компьютером. Цифровой генератор развертки (X-Y) с помощью специального реле-коммутатора

подключался к усилителям развертки электронного пучка РЭМ, при этом видеосигнал (Z) подавался на вход АЦП платы. Трехмерный массив точек (XYZ), получаемый в процессе сканирования, заносился в память компьютера. По окончании сканирования, на основе полученных данных, с помощью графического редактора компьютер воспроизводит изображение исследуемой поверхности. В стандартном режиме изображение исследуемой поверхности проецируется на экран монохромного телемонитора.

На втором этапе было осуществлено сопряжение РЭМ с миниатюрным сканирующим туннельным микроскопом (СТМ) UnderSEM-377 (МИЭТ, Зеленоград), позволяющим достигать атомарного разрешения при исследовании проводящих образцов. Цель такого сопряжения – расширение верхней границы диапазона увеличения сканирующего электронного микроскопа JSM-T20 вплоть до атомарного разрешения. СТМ был смонтирован на гониометре JSM-T20. Тех-

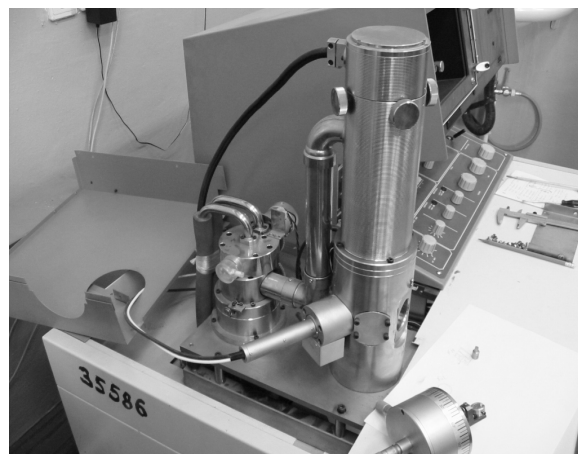


Рисунок 1. Растровый электронный микроскоп JSM-T20

нические характеристики микроскопа UnderSEM-377 представлены в таблице 1.

Тестирование прибора проводилось на образце из пиролитического графита, на который напылялась пленка фуллерита (C_{60}). На рисунке 3 показано изображение поверхности графита, размерами 200х200 мкм, которое было получено с помощью электронного микроскопа. К исследуемой поверхности подведена платиновая игла – зонд туннельного микроскопа. Пленка фуллерита C_{60} толщиной 100-200 нм формировалась на поверхности образца методом вакуумного термического напыления. В туннельной моде нами было получено изображение сформированного фуллеритового покрытия с различным латеральным разрешением (рис. 4). На скане (а) представлен фрагмент поверхности пленочного покрытия размером 2х2

мкм, на котором прослеживаются ступени, образованные атомными слоями пиролитического графита. Увеличенный фрагмент пленочного покрытия C_{60} размером 250х250 нм, приведен на скане (б). А на скане (с) показан фрагмент фуллеритового покрытия, размером 31х31 нм, на котором отчетливо видна регулярная кристаллическая структура. Период наблюдаемой структуры соответствует размерам молекулы C_{60} и составляет 1,4 нм.

Еще одно важное качество модернизированного микроскопа – возможность исследования спектра плотности электронных состояний материала образца в выбранной на кадре точке с латеральным разрешением до 1–2 нм методом туннельной спектроскопии [3]. Это дополнительная возможность получения данных о структуре электронных со-

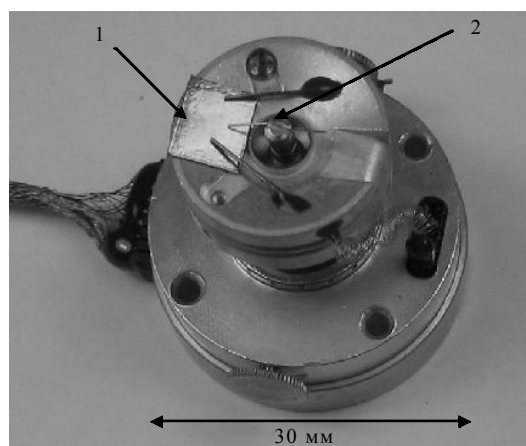


Рисунок 2. Сканирующий туннельный микроскоп
1 – исследуемый образец;
2 – платиновая игла (зонд)



Рисунок 3. Кадр 200х200 мкм, получен с помощью растрового электронного микроскопа. Зонд туннельного микроскопа подведен к исследуемой поверхности.

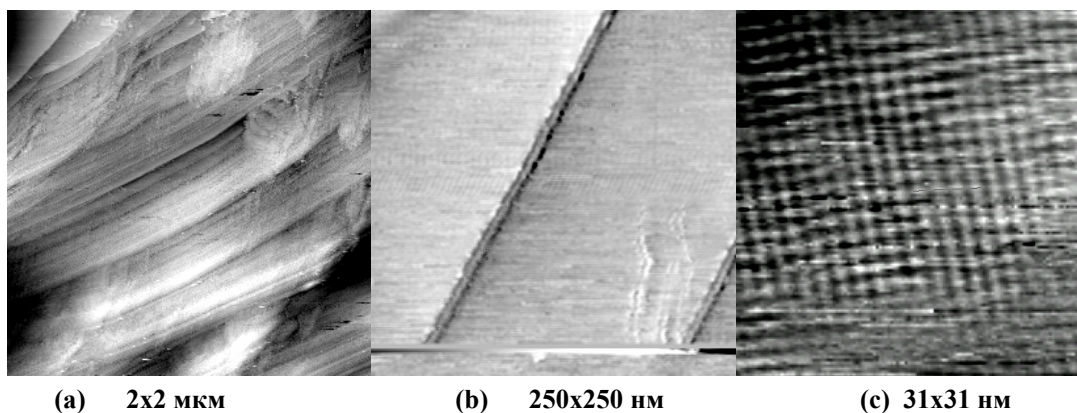


Рисунок 4. СТМ – изображения пленки C_{60} напыленной на поверхности графита: (а) кадр размером 4х4 мкм, (б) кадр размером 250х250 нм с фрагментом атомной ступени, (с) кадр высокого разрешения 31х31 нм

Таблица 1. Технические характеристики микроскопа UnderSEM-377

1	Поле кадра	от 5x5 Ангстрем до 2 x 2 мкм
2	Глубина кадра	до 0,5 мкм
3	Размер наблюдаемых объектов	от атомов до частиц 0,3 x 0,3 мкм
4	Латеральное разрешение	до 0,1 Ангстрема
5	Разрешение по высоте	до 0,02 Ангстрема
6	Диапазон туннельного тока	от 10 пА до 10 нА, точность 5пА
7	Полоса предусилителя тока	0 – 50 кГц
8	Флуктуация тока при подводе	до 1 %
9	Туннельное напряжение	-5В...+5В, точность 1 мВ
10	Радиус острия зонда (эмиттера)	до 10 Ангстрем
11	Время работы зонда	до 100 часов
12	Рециклирование зонда	до 50 обновлений
13	Частота кадров	от 1 кадра/час до 1 кадра/с
14	Ёмкость кадра	от 10 x 10 до 30 000 x 30 000 точек
15	Размер образца	от 5x2 мм до 10x12 мм
16	Толщина образца	от 0,4 мм до 1,5 мм
17	Z-двигатель зонда	диапазон 2,6 мм, шаг 0,1 мкм
18	XУ-двигатель зонда	диапазон 2,6 мм, шаг 0,3 мкм
19	Виброгашение	не требуется
20	Частота механ. резонанса	не менее 32 кГц
21	Экран	одинарный
22	Рабочее давление	от 10^3 до 10^{-9} Торр
23	Рабочие температуры	-50С ... +80С
24	Тип фланца подсоединения	от ДУ-40

стояний, работе выхода электрона и распределении примесных уровней по исследуемой поверхности образца.

Пример реализации метода приведен на рисунке 5. На пиролитический графит напылялась тонкая (~10 нм) пленка органического полупроводника – 1,4,5,8-нафталинтетракарбоксилдиангидрид (NTCDA). Структура пленки исследовалась в СТМ режиме. Энергетическая локализация заполненных и свободных молекулярных орбиталей NTCDA и, соответственно, транспортная ширина запрещенной зоны определялась методом туннельной спектроскопии. Для этого по изображению на скане на поверхности образца выбиралось поликристаллическое зерно и снималась вольтамперная характеристика туннельного промежутка между зондом и образцом $I(U)$. Большой информативностью обладает производная вольтамперной характеристики dI/dU . В структуре производной dI/dU присутствуют два максимума, расположенные при потенциалах $-2,7$ В и $+0,56$ В. Расстояние между максимумами определяет транспортную ширину запрещенной зоны NTCDA. Полученное нами значение хорошо коррелирует с известными литературными данными [4].

Таким образом, в результате модернизации микроскопа JSM-T-20 и его сопряжения со сканирующим туннельным микроскопом UnderSEM-377 увеличено предельное разрешение прибора до молекулярно-атомарного уровня, реализована функция передачи оцифрованного изображения исследуемой поверхности в память персонального компьютера, получена возможность исследования электронной структуры образца на наноуровне методом туннельной спектроскопии.

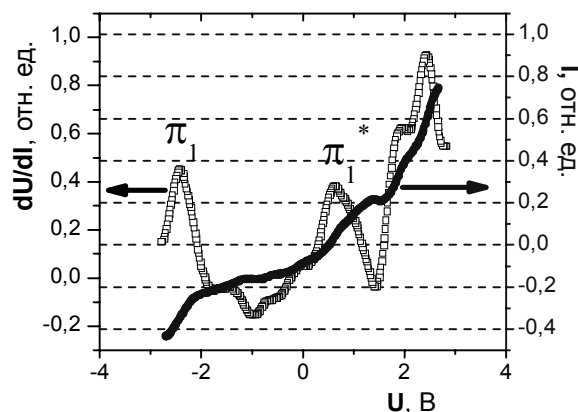


Рисунок 5. Вольтамперная (I/U) характеристика туннельного промежутка игла - пленка NTCDA и ее производная (dI/dU)

Список использованной литературы:

1. Ю.Д. Третьяк. Проблемы развития нанотехнологий в России и за рубежом// Вестник РАН – 2007 -Т.77, №1 – с. 3-10.
2. С.Б. Нестеров, Б.А. Логинов, О.С. Зилова, Н.Р. Сабирзянов. Сканирующие зондовые микроскопы// Издательский дом МЭИ, 2007 – 200 с.
3. А.В. Офицеров, В.С. Эдельман. Исследование спектра поверхностных состояний в Висмуте методом сканирующей туннельной спектроскопии// ЖЭТФ.– 2001.– Т. 120.– вып. 3 (9),– с. 731-739.
4. Hill I.G., Kahn A., Soos Z.G., Pascal R.A. Charge-separation energy in films of p-conjugated organic molecules// Chemical Physics Letters – 2000 – V.327. – p.181–188.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы», лот 1, шифр 2007-7-5.2-00-01, мероприятие 5.2 «Развитие сети центров коллективного пользования научным оборудованием»