

## УДК 53.03

# ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОНКИХ ПЛЁНОК НА ОПАЛОВОМ ПОДСЛОЕ МЕТОДАМИ ТУННЕЛЬНОЙ И АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Елена Владимировна Вагулина

*Студентка 5 курса*

*кафедра «Электронные технологии в машиностроении»*

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Е.В. Панфилова,*

*кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»*

### **Введение**

Использование сканирующей туннельной микроскопии и атомно-силовой микроскопии позволяет изучить топологию поверхности и электрофизические свойства опаловых структур, формируемых для применения в микро- и наноэлектронике.

Интерес к эмиссионным характеристикам опаловых структур вызван особенностью строения их поверхности. Опаловая матрица представляет собой плотноупакованные глобулы диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) – кремнезема, с диаметром 100...1000 нм, образующие трехмерную решетку. Выявлено, что при нанесении на поверхность тонкой пленки, имеющей структуру опаловой матрицы, тонких пленок металла нанометровой толщины (до 100 нм) рост таких пленок происходит преимущественно на вершинах глобул, при этом на поверхности синтетического опала образуется сеть островков осаждаемого металла [1]. Функциональные характеристики тонкоплёночных структур зависят от правильного выбора метода нанесения, технологических режимов и параметров оборудования.

Если в качестве металла использовать, например, Au, являющийся катализатором для роста углеродных нанотрубок, то при последующем осаждении на сформированную структуру углерода рост углеродных нанотрубок будет происходить упорядоченно в соответствии с топологией поверхности опала. Более того, наносферы могут способствовать увеличению тока автоэмиссии вследствие увеличения отношения длины к диаметру автоэммиттера. Исследование образцов, изготовленных по описанной выше технологии обнаружило низкие пороговые значения эмиссии (3 В/мкм) и высокие токи (8 мкА/мм<sup>2</sup>) [2].

Также известно, что наличие тонких диэлектрических слоев на поверхности металла в некоторых случаях существенно снижает эффективную работу выхода такой системы и увеличивает ее эмиссионные свойства. По некоторым оценкам снижение работы выхода можно

ожидать вплоть до толщин диэлектрического слоя  $\sim 2000 \text{ \AA}$  [3]. Т.е. система металл-диэлектрик может обладать существенно отличными электронными свойствами от свойств материалов ее образующих.

Вышесказанное обуславливает интерес к изучению туннельных вольт-амперных (I-U) характеристик наноструктур, одним из слоев которых является слой диоксида кремния (кремнезема) со структурой опаловой матрицы. Наиболее информативным методом исследования в данном случае является метод сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), который позволяет исследовать как электрофизические свойства образцов, так и их топологию. Причем, анализ получаемых в режиме постоянного тока изображений может быть инструментом изучения эмиссионных процессов, возможно имеющих место на исследуемой поверхности, поскольку ее рельеф будет зависеть от туннельного напряжения, создаваемого в зазоре.

### Подготовка образцов

Для выявления принципиальной возможности исследования подобных структур на имеющемся аналитическом оборудовании были подготовлены образцы, представляющие собой трехслойную тонкопленочную структуру, сформированную на скрайбированной керамической подложке (рис.1).

Проводящий слой был сформирован из Cr (Cr-Cu) с толщиной пленки 1 мкм, на поверхность которой были нанесены пленки кремнезема со структурой опаловой матрицы различной толщины. Опаловые пленки наносились методом вертикального вытягивания из коллоидного раствора кремнезема. Нанесение пленок золота на поверхность образцов производилось методом магнетронного распыления.

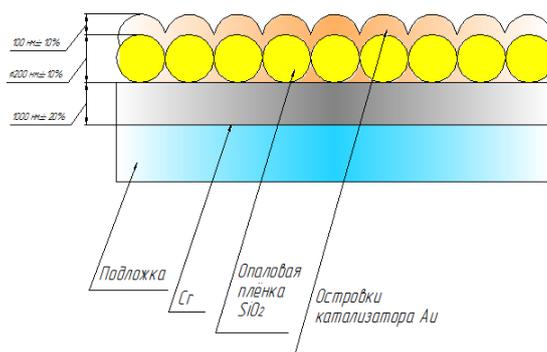


Рис. 1. Образец опаловой наноструктуры

### Исследование образцов в СЗМ Solver Next

Сканирующий зондовый микроскоп Solver Next обеспечивает возможность измерений в режиме атомно-силовой и туннельной микроскопии, имеет минимальный шаг сканирования в плоскости образца 0,3 мкм. В соответствии с технической документацией, разрешение составляет 0,3 нм.

#### Сканирование в режиме СТМ образцов пленок опала

Сканирование оказалось возможным при условии небольшой толщины пленки опала, составляющей один- три глобулярных слоя.

Исследование осуществлялось по методу постоянного тока в топографическом режиме.

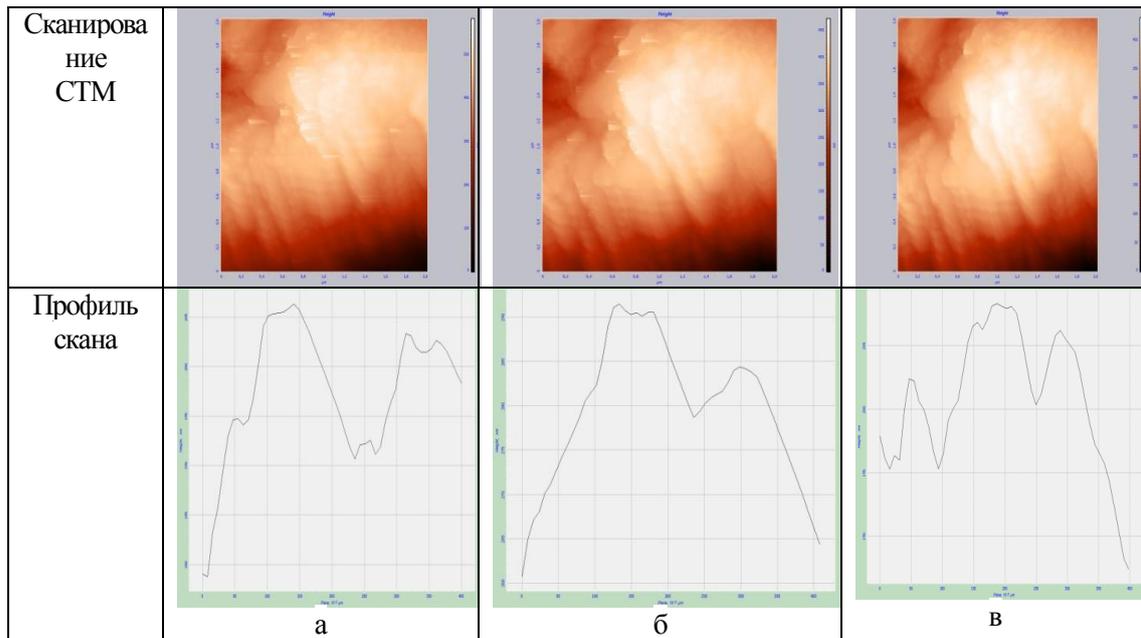


Рис. 2. STM-изображения поверхности образца, полученные при исследовании образцов на СЗМ Solver Next: а-при напряжении 0,1В;б-при напряжении 0,5 В; в-при напряжении 1В

Сканирование в режиме АСМ образцов пленок опала с золотом

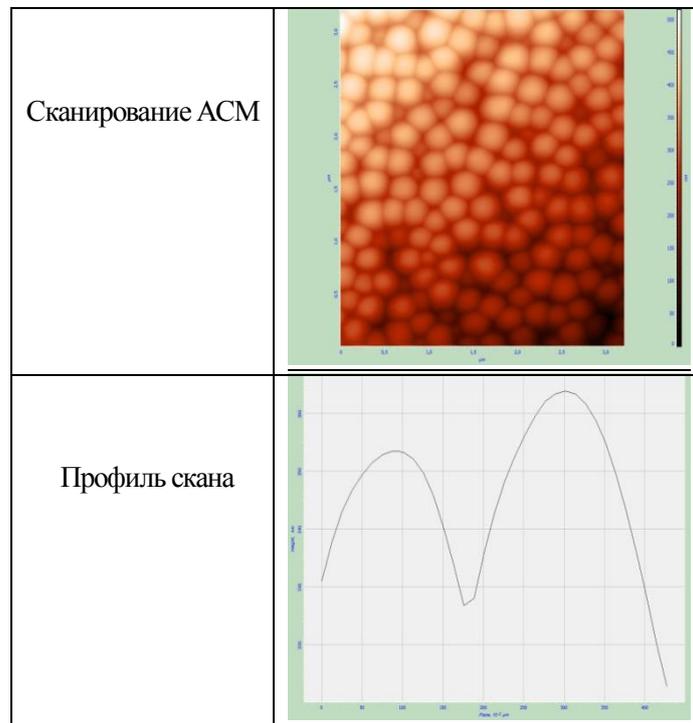


Рис. 3. АСМ- изображение поверхности образца, полученное при исследовании образцов на СЗМ Solver Next

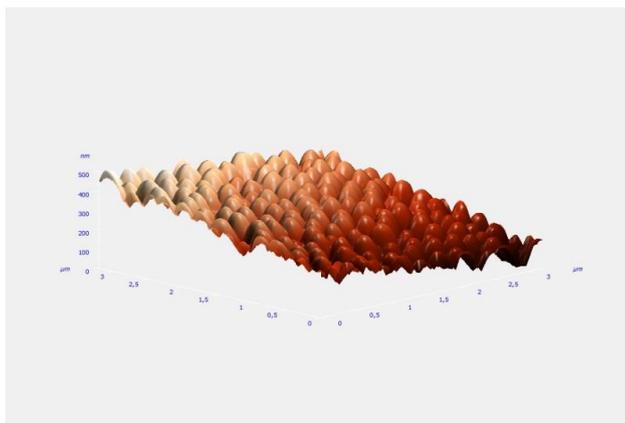


Рис. 4. 3D-изображение структуры образца на СЗМ Solver Next в АСМ-режиме

Сопоставление профилей образцов позволило определить корреляцию высоты рельефа с ростом пленки Au на поверхности опаловой матрицы (рис. 5).

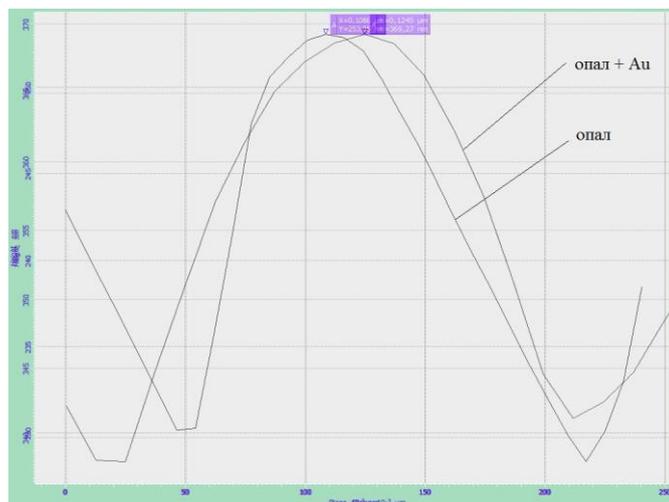


Рис. 5. Сопоставление профилей образцов, полученных в СТМ и АСМ-режимах

Сравнение шероховатости поверхностей образцов пленок опала и образцов пленок опала с золотом показало, что средняя шероховатость Ra равна 63,11 нм и 67,65 нм соответственно. Следовательно, средняя высота неровностей пленки золота составляет 4,54 нм.

## Сравнение ВАХ образцов с проводящим слоем Cr и Cu

### Формирование и исследование образцов с проводящим слоем Cu

Для сравнения вольт- амперных характеристик образцов с проводящим слоем Cu были подготовлены образцы представляющие собой трехслойную тонкопленочную структуру, сформированную на стеклянной подложке (рис. 6). В качестве буферного слоя использовался хром Cr с толщиной пленки 1 мкм, проводящий слой был сформирован из меди Cu с толщиной пленки 1 мкм, на поверхность которой были нанесены пленки кремнезема со структурой опаловой матрицы различной толщины. Опаловые пленки наносились методом вертикального вытягивания из коллоидного раствора кремнезема.

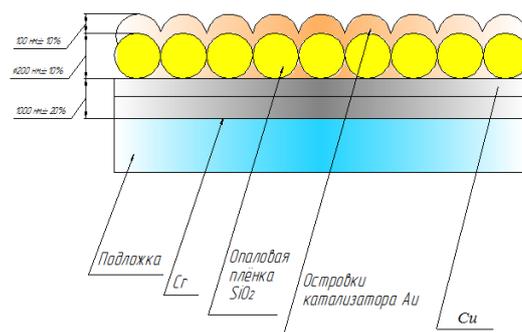


Рис. 6. Образец опаловой наноструктуры

Исследование осуществлялось в атмосферных условиях с помощью нанотехнологического комплекса УМКА-02 (изготовитель – Институт нанотехнологий, г. Москва) (рис. 7) .

Комплекс УМКА-02 имеет шаг сканирования в плоскости образца - 0,008 нм и шаг измерения по вертикали – 0,02 нм. В соответствии с технической документацией, конструкция комплекса должна обеспечивать возможность исследований биологических и слабо проводящих объектов без дополнительных технологических операций (запыление металлом и т.п.) с атомарным и молекулярным разрешением. Получение приемлемого качества изображения удалось достигнуть за счет применения дополнительных мер виброзащиты.



Рис. 7. Размещение образца в нанотехнологическом комплексе УМКА-02

Исследование рельефа осуществлялось по методу постоянного тока в топографическом режиме. На рис. 8 представлено изображение наночастиц, формирующих глобулу опаловой матрицы, а на рис.9 – туннельная вольт-амперная характеристика образца.

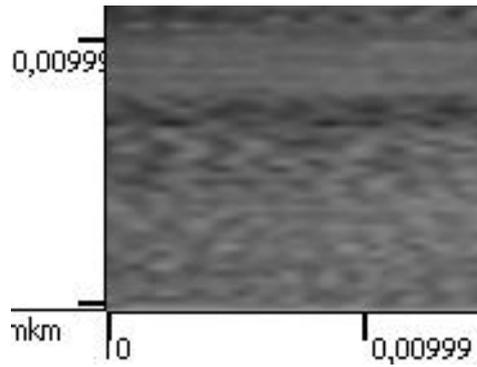


Рис. 8. СТМ- изображение образующих глобулы сферических частиц

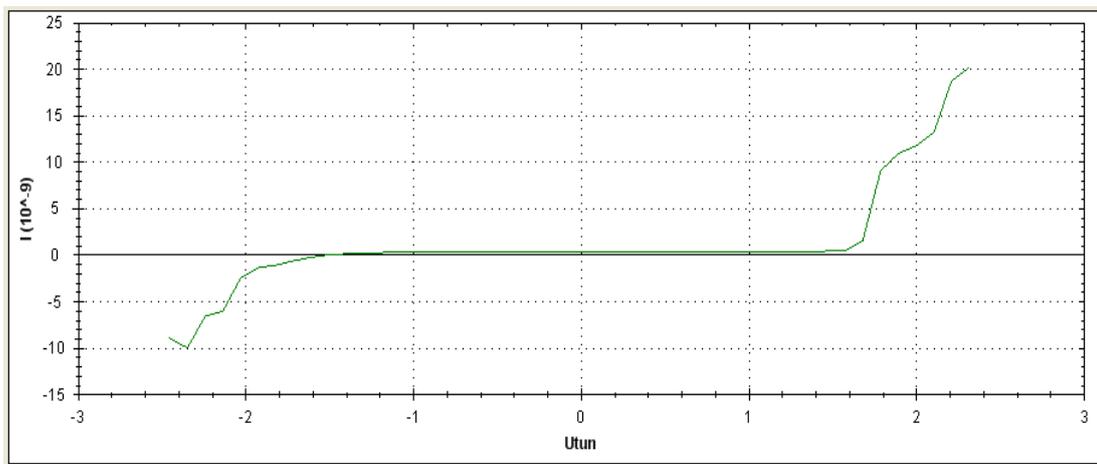
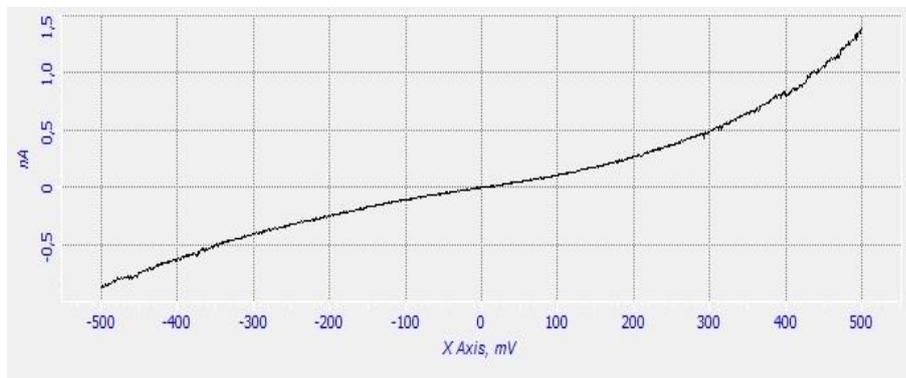


Рис. 9. Полученная с использованием комплекса УМКА вольт-амперная характеристика

### Исследование образцов с проводящим слоем Cr

Сканирование образцов, подготовленных по описанной выше технологии без нанесенных пленок золота в режиме СТМ на сканирующем зондовом микроскопе Solver Next так же позволило получить вольт- амперные характеристики исследуемой структуры .На рис.10 (а, б) представлены ВАХ различных точек исследования.



а

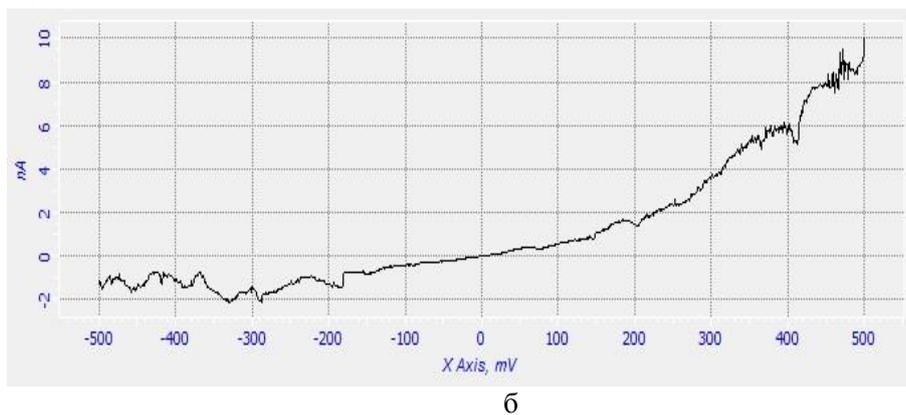


Рис. 10. ВАХ для различных точек исследования: а- зависимость, характерная для контакта металл-металл, б- нелинейность ВАХ

Для большинства точек сканирования образца ВАХ имеет в целом нелинейный симметричный вид с близким к линейному участком вблизи области нуля, характерный для контакта металл-металл (рис. 10а). Однако для нескольких точек в близкой к нулевым значениям области была обнаружена сильно выраженная нелинейность (рис. 10б). Указанные различия, по-видимому, можно отнести к неравномерности пленки опала по толщине.

Сравнение вольт- амперных характеристик образцов с проводящим слоем Cu и Cr показывает, что использование в качестве буферного слоя Cr приводит к снижению ВАХ, что является следствием роста удельного слоевого сопротивления.

### Заключение

Было выявлено, что исследование рельефа поверхности и электрофизических характеристик тонких опаловых пленок на проводящей поверхности возможно методом сканирующей туннельной микроскопии. Результативное сканирование оказалось возможным при условии небольшой толщины пленки опала, составляющей один – три глобулярных слоя.

На основании проведенных экспериментальных исследований роста тонкой металлической пленки, осажденной на поверхность тонкой плёнки синтетического опала и возможности исследования полученной наноструктуры методами туннельной и атомно-силовой микроскопии было выявлено, что использование в качестве буферного слоя Cr приводит к снижению ВАХ, следовательно, изготовление образцов, в которых адгезия проводящего слоя обеспечивается технологией нанесения без применения буферного слоя более целесообразно.

Очевидно, что в дальнейшем используемое оборудование и методики могут быть использованы для наноразмерного исследования поверхностей и изучения электрофизических характеристик формируемых образцов планарных опаловых структур.

### Литература

1. *Беседина К.Н., Вострикова А.В., Двухшерстова О.О., Панфилова Е.В.* Исследование процесса нанесения тонких пленок на наноструктурированную поверхность // Вакуумная наука и техника. Материалы XX международной научно-технической конференции, 2013 – С. 301-303.
2. *Норман Е.Д., Моисеев К.М., Панфилов Ю.В., Булыгина Е.В. и др.* Исследование автоэмиссионных свойств углеродных нанотрубок на опаловых матрицах // Высокие технологии в промышленности России. Материалы XII международной научно-технической конференции. М., 2007 – С. 491-495.
3. *Корнилов В.М., Лачинов А.М.* Исследование полимерных пленок методом сканирующей туннельной микроскопии // Письма в ЖТФ, 2000, Том 26, вып.21. - Стр. 37-43.