

Барайшук С.М.<sup>1</sup>, к.ф.-м.н., доцент, Голосов Д.А.<sup>2</sup>, к.т.н., доцент,  
Михалкович О.М.<sup>3</sup>, к.ф.-м.н., Хуан Х.Л.<sup>4</sup>, магистр физики

<sup>1</sup>Белорусский государственный аграрный технический  
университет, Минск

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики  
и радиоэлектроники, Минск

<sup>3</sup>Белорусский государственный педагогический университет  
имени Максима Танка, Минск

<sup>4</sup>Чжоньданский педагогический университет, Чжоньдан, КНР

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПРОВОДЯЩИХ И ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СЛОЕВ СЕНСОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОБАЛОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ TI В V

**Введение.** Исследования в области сенсорики активно развиваются и имеют широкое практическое применение. Актуальны разработки и исследование материалов, позволяющих выполнять интеграцию сенсорных структур с микроэлектронными и микромеханическими системами на физическом уровне, позволяющем реализовать такое решение с применением существующих или перспективных промышленных технологий. Разработка сенсорных структур одно из ведущих направлений в создании новейших технологий мониторинга и диагностики биологических, природных, медицинских объектов и глобальных систем [1-3].

### **Объекты исследования и эксперимент.**

Пленки оксида ванадия наносились методом импульсного реактивного магнетронного распыления V мишени (чистота 99,96 %) в среде Ar/O<sub>2</sub> рабочих газов. Схема установки магнетронного нанесения и методика проведения экспериментов по нанесению пленок описана в работе [2]. Пленки наносились на структуры Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si, Ti/Si и Ti/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si при следующих условиях: ток разряда It = 1,5 А, потоки аргона и кислорода Q<sub>Ar</sub> = 50 мл/мин, Q<sub>O<sub>2</sub></sub> = 10 мл/мин. Напряжение разряда составляло 525 В. Толщина пленок порядка 150 нм. Исследовалась поверхность пленок, которые подвергались отжигу в атмосфере кислорода на установке инфракрасного нагрева при температуре от 100 до 450 °С. Время отжига от 10 до 120 мин. Атомно-силовые изображения поверхности и данные по 8 па-

раметрам топографии получены методом атомно-силовой микроскопии (NT 206 Microtestsmachines Co.) в контактном режиме.

Изображения поверхности структур VO/Ti/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si полученные методом атомно-силовой микроскопии представлены на рисунке 1. Для данных образцов перед получением сенсорного слоя оксида ванадия на поверхность структуры Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si, предварительно, методом магнетронного распыления, наносился тыльный проводящий контакт Ti. После чего, формировалось покрытие VO<sub>x</sub> из ванадиевой мишени (чистота 99,96 %).

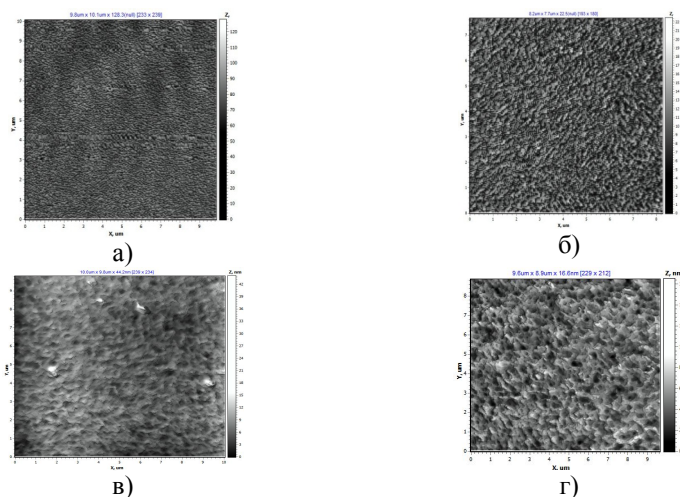


Рисунок 1 – АСМ изображения поверхности структур V/Ti/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si без отжига – (а), с отжигом при температуре 200 °С – (б), 300 °С – (в), 400 °С – (г).

Атомно-силовые изображения поверхности пленок оксида ванадия, отожженных при различной температуре (время отжига  $t = 10$  мин) хорошо согласуются с представленными в работе [5] оптическим изображением пленок. Пленки оксида ванадия без отжига имеют низкую шероховатостью (0,6 нм по площадке  $10 \times 10 \text{ мкм}^2$ ) поверхности (рисунок 1 а). После отжига при температуре 200 °С поверхность становилась более однородной, происходит снижение шероховатости (таблица 1), однако такой отжиг не приводит к формированию на поверхности зеренной структуры. Процессы рекристаллизации и формирования зеренной структуры на поверхности наблюдаются при температурах более 300 °С (рисунок 1 в, г).

При этом явно определяется зеренная структура в виде ячеек кристаллитов размером до 60–90 нм, что так же хорошо согласуется с данными приведенными в работах [5].

Таблица 1 – Шероховатость поверхности получаемых структур (в нм)

Температура отжига, °С	Поверхность структуры			
	Ti/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Si	V/Ti/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Si	V/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Si	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Si
200	0,5	0,4	0,5	0,8
300	0,4	0,2	0,2	0,8
400	0,3	0,2	0,2	0,9
Без отжига	0,6	0,6	0,5	1,2

При увеличении температуры отжига размеры зерен увеличивались, что приводило к формированию на поверхности сплошной зеренной структуры. Размеры зерен по ширине составляли 50–90 нм и длиной достигали 140–180 нм (рисунок 1 в, г), однако шероховатость такой поверхности остается низкой, что связано с «деградацией» поверхностных структур. При этом начинает идентифицироваться упорядоченное ориентирование таких зерен в масштабные кристаллиты, что, соответствует СЭМ приведенной в работе [4].

Для подтверждения гомогенности поверхности сформированных покрытий также проводилось определение гидрофильности методом “сидячей капли”. Смачиваемость дистиллированной водой оценивалась равновесным краевым углом смачивания (РКУС) по математически смоделированным изображениям контура сидячей капли, которые получены на ранее описанной установке [7]. Значение РКУС водой (при 20-ти секундной стабилизации) поверхности систем V/Ti/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si с температурами отжига более 200 °С варьировалось в диапазоне 40–42°. Значение РКУС водой (при 20-ти секундной стабилизации) поверхности систем V/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si с температурами отжига более 200 °С при 20-ти секундной стабилизации определялось в диапазоне 22–24°. Стабильность гидрофильности для различных температур отжига соответствующих образцов, подтверждает идентичность морфологии покрытий, получаемых описанным способом.

Таким образом структура поверхности VO<sub>x</sub> осажденных на Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si с предварительным осаждением Ti тыльного электрода и без него оказались схожи, шероховатость таких покрытий при температуре отжи-

га более 300 °С, низкая и составляет 0,2 нм по площадке 100 мкм<sup>2</sup>, что позволяет говорить о их идентичных свойствах и указывает на возможность, аналогичную показанной в работе [8] использовать Ti покрытия для формирования тыльных контактов сенсорных элементов, а всю структуру VO/Ti/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si в качестве термочувствительного элемента интегрированных сенсорных элементов.

Проведение исследования состава подложки и влияния температуры отжига в атмосфере кислорода на структуру и характеристики топографии пленок оксида ванадия, показали, что процессы формирования зеренной структуры наблюдаются при температурах более 300 °С. В результате отжига пленок в атмосфере кислорода при температурах 400 °С формируются покрытия по структуре и шероховатости идентичные и не зависящие от состава подложки, что показывает принципиальную возможность получения пленок с управляемыми сенсорными свойствами и представляет направление использования данных пленок в качестве термочувствительных слоев микроболметров. Разработанные при этом системы могут найти применение при создании сенсорных микро-наносистем. Работа выполнена при поддержке Министерства образования Республики Беларусь № ГР 20211250 и № ГР 20211394.

#### Список использованных источников

1. Бальшева, О.Л. Разработка информационно-справочной системы компонентов на ПАВ /О.Л. Бальшева, Ю.Г. Смирнов, Л.П. Коновалова //Микросистемная техника, №10, 2003. – С. 6–9.
2. Злотопольский, В.М. Сорбционно-частотные датчики и биосенсоры для контроля состава газов и жидких сред / В.М. Злотопольский, А.А. Родникова // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2002. – Т. 36. – № 1. – С. 5–11.
3. Особенности развития и внедрения медицинских биосенсоров в Российской Федерации / А.А. Балякин, А.С. Малышев, М.В. Мамонов, С. Б. Тараненко // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9–7. – С. 1558–1562.
4. Tashlykov I. et al. Surface Properties of Me/Si Structures Prepared by Means of Self-Ion Assisted Deposition //Acta Physica Polonica, A. – 2014. – Т. 125. – № 6.
5. Нгуен Т.Д., Занько А.И., Голосов Д.А., Завадский С.М., Мельников С.Н., Колос В.В. Электрофизические свойства пленок оксида ва-

надия, нанесенных методом реактивного магнетронного распыления. Доклады БГУИР. 2020; 18(6): 94–102.

6. Нгуен Т.Д., Занько А.И., Голосов Д.А., Завадский С.М., Мельников С.Н., Колос В.В., То Т.К. Влияние отжига на структурно-фазовые и электрофизические свойства пленок оксида ванадия. Доклады БГУИР. 2021; 19(3): 22–29.

7. Автоматизированный комплекс для измерения равновесного краевого угла смачивания на плоских поверхностях /Патент РБ 7074 по заявке 20100661, от 12.10.2010 //Е.П. Макаревич, И.С. Ташлыков, С.М. Барайшук, М.А. Андреев.

8. Барайшук С.М., Гременок В.Ф., Тульев В.В., Ташлыков И.С. "Изучение поверхности структур металл/кремний, приготовленных ионно-ассистированным нанесением покрытий". ФХОМ 1 (2011): 66.

**Вертель М.<sup>1</sup>, к.ф.-м.н., Барайшук С.<sup>2</sup>, к.ф.-м.н., доцент,  
Туровец А.<sup>1</sup>, Щербак В.<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>Институт физики, университета М. Кюри-Склодовской,  
Люблин, Польша,**

**<sup>2</sup>Белорусский государственный аграрный технический  
университет, Минск**

## **ФОРМИРОВАНИЕ САМООЧИЩАЮЩЕГОСЯ СВЕТОПРОЗРАЧНОГО ПОКРЫТИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ**

**Введение.** Осаждение светопрозрачных коррозионно-стойких самоочищающихся защитных покрытий является перспективным направлением формирования поверхности солнечных элементов. Такие покрытия позволяют создать верхний слой, сочетающий защитные и проводящие свойства, оставаясь при этом светопрозрачным, что является актуальной задачей для солнечной энергетики позволяя уменьшить затраты на очистку солнечных панелей и формируя на их поверхности слой препятствующий появлению биологических загрязнений [1]. В нашей работе исследовались закономерности влияния нанесения покрытия на шероховатость и смешиваемость поверхности образцов перспективных халькогенидных фотопреобразователей [2]. Образцы фотопреобразователей модифицировались нанесением Mo содержащего покрытия при ускоряющем потенциале