

## ДИАГНОСТИКА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ С ОСАЖДЕННЫМИ СТРУКТУРАМИ ДЛЯ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА МОЛИБДЕНА

**С.М. Барайшук<sup>1</sup>, М. Wiertel<sup>2</sup>, М. Budzynski<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup>Институт физики Университета Марии Складовской -Кюри. Люблин, Польша

Актуальной является разработка интегрированных, на одном чипе с остальными элементами, газовых сенсоров, построенных на принципе бездисперсионной инфракрасной спектроскопии [1]. Дисилицид молибдена является подходящим высокотемпературным материалом для использования в качестве источника инфракрасного излучения в таких приложениях, поскольку он имеет высокую температуру плавления ( $2030^{\circ}\text{C}$ ), относительно низкую плотность ( $6,24 \text{ г/см}^3$ ), высокую теплопроводность ( $52 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ), температуру перехода от хрупкого к пластичному около  $1000^{\circ}\text{C}$ , кроме того, обладает стабильностью в различных агрессивных и окислительных средах [2] и, при этом, дешевле материалов имеющих аналогичные свойства.

В нашем исследовании получение дисилицида молибдена осуществляли при осаждении, металлического покрытия которое сопровождается облучением ионами этого же металла [3]. Плазменное напыление является очень эффективным методом получения композиционных покрытий  $\text{MoSi}_2$  сформированных распылением компонентов, а ионная бомбардировка в процессе нанесения покрытий в условиях ионного ассистирования обеспечивает взаимное перемешивание на межфазной границе металл/кремний. Разрабатываемые и полученные тонкие пленки могут найти применение при создании сенсорных систем для контроля оптического излучения [4].

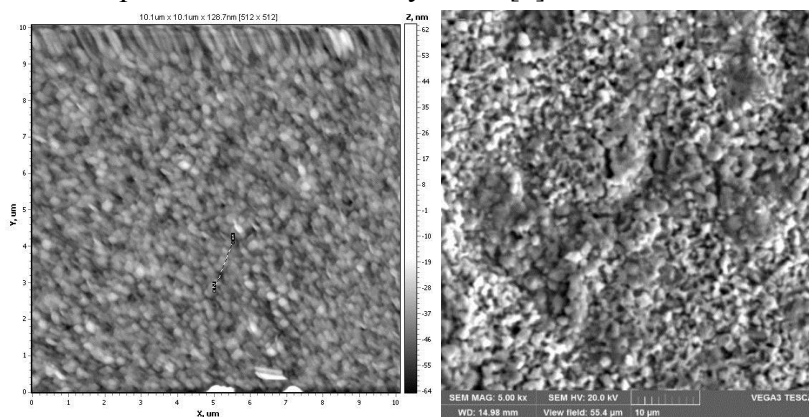


Рисунок 1. АСМ (слева) и СЭМ (справа) изображения участка поверхности покрытий

Топография поверхности покрытий изучалась методами растровой электронной электронно-зондовой микроскопии (EDX Oxford Instruments AZtecEnergy-Advanced) и атомно-силовой микроскопии (NT 206 (Microtestmachines Co., Беларусь) в контактном режиме. Примеры изображения поверхности, восстановленного по результатам атомно-силовой микроскопии и сканирующей электронной микроскопии приведены на рисунке 1. Для оценки поверхности было выбрано не менее пяти площадок размером  $10 \times 10 \text{ мкм}$  с разных участков поверхности, что позволило проводить усреднение параметров рельефа.

На рисунке 1. видно образование зеренной структуры на поверхности в процессе нанесения Mo покрытия, оценка размеров структур показывают, длину 50-70 нм шириной 30-50 нм, а анализ их распределения по поверхности показывает преимущественную ориентацию в одном направлении.

На основании анализа топографии поверхности получена зависимость средней арифметической шероховатости Ra от толщины покрытия рисунок 2 (фактически от времени нанесения) которая показывает, что на начальном этапе нанесения покрытий средняя арифметическая шероховатость поверхности значительно больше, чем у исходного кремния, что, по видимому, обусловлено неравномерностью формирования покрытия, имеющего островковый механизм роста [5]. При толщине наносимого покрытия более 50 нм средняя арифметическая шероховатость будет изменяться незначительно, что подтверждает равномерность формирования покрытия по поверхности.

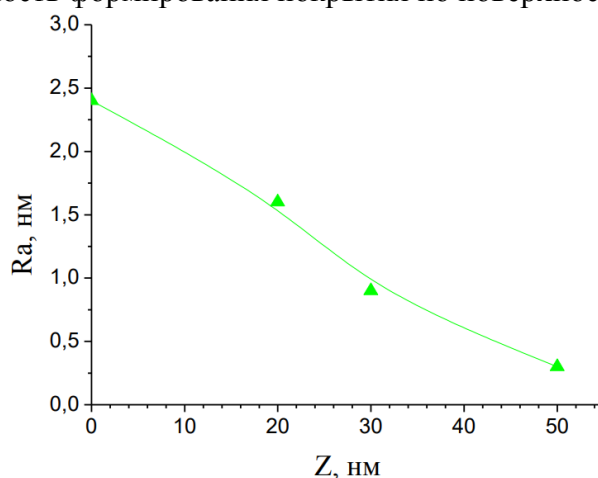


Рисунок 2. Зависимость шероховатости поверхности Mo покрытия от толщины покрытия.

Ранее нами изучалась структура поверхности полученных аналогичным образом покрытий и предварительных слоев, полученных перед формированием итогового покрытия [6] как методом сканирующей электронно-зондовой микроскопии в сочетании с анализом энергодисперсионного рассеяния электронов. Кроме того, для подобных, систем ранее проведены исследования рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии [7], которые показали наличие тонкой структуры спектра Mo и говорит о том, что молибден на тех же глубинах находится как в виде Mo, так и в виде  $MoO_x$  и  $MoSi_x$ , эти результаты хорошо согласуются с тем, что мы видим в настоящем исследовании.

Работа выполнена при поддержке МО Республики Беларусь № ГР 20211250.

### Литературы

- [1] Mao J., Ding S., Li S., Li Y., Lin F., Zeng X. [et. al] Preparation and investigation of MoSi<sub>2</sub>/SiC coating with high infrared emissivity at high temperature // Surf. & Coat/ Tech., 2019, №358, P. 873-878.
- [2] Peters M.I, Vaidya R. U., Castro R. G., Petrovic J.J., Hollis K.J., Gallegos D. E. Functionally graded MoSi<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tubes for temperature sensor application \ Mat. Res. Society Bull., XVIII35, (1993).
- [3] Ташлыков И. С., Андреев М. А. Механизмы взаимного проникновения компонентов в композиции подложка-тонкая пленка, формируемой при ионно-ассистированном

- осаждении покрытия // Физика и химия обработки материалов. – 2006. – №. 3. – С. 29-32.
- [4] Кабаций, В. Н. Оптические сенсоры газов на основе полупроводниковых источников ИК-излучения / В. Н. Кабаций // Технология и конструирование в электр. аппаратуре. - 2008. - С.1-6.
- [5] Petrov I., Barna P.V., Hultman L., Greene J. Microstructural evolution during film growth // J. Vac. Sci. Technol., 2003, A 21.5, p. 117- 128.
- [6] С.М. Барайшук, В.Ф. Гременок, В.В. Тульев, И.С. Ташлыков. Изучение поверхности структур металл/кремний, приготовленных ионно-ассистированным нанесением покрытий. ФХОМ. №1. 2011. С. 66.
- [7] С.М. Барайшук, и др. Изучение структуры излучающая пленка на основе  $\text{MoSi}_2$  на кремниевой подложке для формирования тонкопленочного ИК-излучателя // Акт. пр. ФТТ: сб. докл. X Меж. н. конф. ГО «НПЦ НАН Б по материаловедению»; Минск, 2023 Р. 274-277.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР

**Р.Б. Салихов, А.Д. Остальцова, Т.Р. Салихов**

*Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия*

Полимерные наноккомпозитные тонкопленочные структуры представляют собой важный класс материалов, обладающих уникальными физико-химическими свойствами [1-3]. Для создания многослойных структур резистивных сенсоров были использованы тонкие пленки PEC-SWCNT (рис. 1). В качестве подложки для резистивных датчиков было использовано стекло. На стеклянную поверхность были нанесены алюминиевые электроды толщиной около 400-500 нм с помощью метода термического распыления в вакуумной камере на установке УВП-250. Зазор между электродами был создан с использованием теневой маски. В некоторых образцах в область зазора в 50 мкм была нанесена пленка полимера PEC с углеродными нанотрубками SWCNT. Полученный слой был подвергнут термическому отжигу, чтобы удалить остатки растворителя, путем нагрева до  $150^\circ\text{C}$  в течение 20-25 минут. Омический характер контактов был подтвержден путем измерения их вольтамперных характеристик. СЭМ исследования подтвердили однородность поверхности полимеров в рабочей зоне резистивных датчиков, и определена шероховатость поверхности.

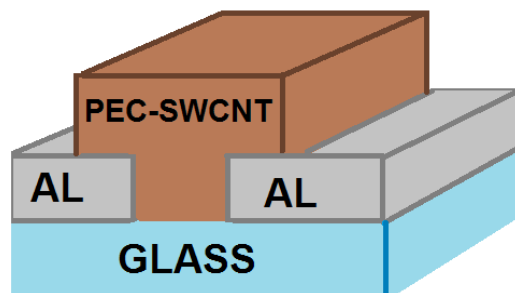


Рис.1. Структура тонкопленочного резистивного датчика