

УДК: 621.352.3; 621.35.044

Рагимов<sup>1</sup> Р.Н., д.ф.-м.н., Халилова<sup>1</sup> А.А., к.ф.-м.н.,  
Барайшук<sup>2</sup> С.М., к.ф.-м.н., Ткаченко<sup>2</sup> Т.М., к.ф.-м.н.

<sup>1</sup> *Институт физики НАН Азербайджана, Баку*

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

## **ТОПОГРАФИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТОНКИХ ПЛЕНОК ЭВТЕКТИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ InSb-MnSb И GaSb-CrSb**

Эвтектические композиты на основе соединений  $A^3B^5$  и включений 3d-переходных металлов, такие как InSb-MnSb и GaSb-CrSb, представляют значительный интерес для современной микро- и наноэлектроники. Эти материалы сочетают в себе полупроводниковую матрицу и ферромагнитные металлические включения, наличие которых делает такие композиты перспективными для создания инжекторов спино-поляризованных электронов – ключевых элементов спинтронных устройств.

Качество функциональных слоев в таких устройствах критически зависит от морфологии поверхности тонких пленок. В связи с этим, комплексное исследование топографии поверхности, количественная оценка шероховатости и фрактальных характеристик являются актуальной задачей. Методология исследований, включая обработку данных АСМ, была успешно применена в работах по исследованию поверхности модифицированных материалов [1, 2].

Тонкие пленки эвтектических композитов InSb-MnSb и GaSb-CrSb были получены методом «мгновенного испарения» (flash evaporation). Толщина пленок составляла 0.4–1.0 мкм.

Исследование микроструктуры и элементного состава проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа. Для пленок GaSb-CrSb использовался микроскоп FEI Quanta FEG в сочетании с энергодисперсионным спектрометром Oxford Inca X-act.

Исследование топографии поверхности проводилось на атомно-силовом микроскопе NT-206 (Microtestmachines) в контактном режиме. Для анализа выбирали не менее 5 площадок размером  $20 \times 20$  мкм<sup>2</sup> и  $5 \times 5$  мкм<sup>2</sup> из разных участков поверхности, что позволило усреднить параметры рельефа. Обработка проводилась с помощью программного обеспечения «SurfaceXplorer» по методике, описанной в

работе [2]. Для количественной оценки сложности поверхности рассчитывалась мультифрактальная размерность [3].

Поверхность тонких пленок InSb-MnSb имеет сложный микро-рельеф. На сканах размером  $20 \times 20$  мкм<sup>2</sup> наблюдаются равномерно распределенные структурные образования округлой формы диаметром 0.5–2.0 мкм и средней высотой 0.8–0.9 мкм. Между ними расположены объекты значительно меньших размеров.

Средняя арифметическая шероховатость (Ra) для таких участков составила 78.3 нм, среднеквадратичная (Rq) – 103.3 нм. Отношение полной площади поверхности к проективной равно 1.14, что указывает на умеренную развитость рельефа. Анализ ориентации структур не выявил выраженной текстуры.

При сканировании участков  $5 \times 5$  мкм<sup>2</sup> в областях между крупными структурами четко видна мелкозернистая структура. Также наблюдались упорядоченные продолговатые структуры длиной 1.2–1.4 мкм, шириной ~0.1 мкм и высотой 0.15–0.2 мкм, появление которых может быть связано как с особенностями процесса осаждения, так и с дефектами предварительной обработки подложки.

На этих участках шероховатость существенно снижается: Ra = 9.4 нм, Rq = 12.2 нм. Зерна неправильной формы размером 40–80 нм не имеют выраженной ориентации. Среднее значение фрактальной размерности для пленок InSb-MnSb составило 2.79, а для более гладких участков с мелкозернистой структурой оно возросло до 2.82, что указывает на более развитую «объемную» поверхность.

Поверхность пленок GaSb-CrSb также обладает развитым рельефом. АСМ-изображения показывают равномерно распределенные округлые структурные образования диаметром 0.3–0.5 мкм в основании и высотой 50–100 нм, что согласуется с СЭМ-данными. Концентрация поверхностных элементов достигает 50 мкм<sup>2</sup>.

Для участков сканирования  $5 \times 5$  мкм<sup>2</sup> средняя арифметическая шероховатость составила Ra = 5.4 нм, среднеквадратичная Rq = 9.8 нм. Отношение полной площади к проективной равно 1.16. Фрактальная размерность поверхности составила 2.78.

На больших площадях сканирования ( $20 \times 20$  мкм<sup>2</sup>) периодические структуры отсутствуют, но наблюдаются отдельные вкрапления размером 0.3–1.5 мкм и высотой до 150 нм. Шероховатость для таких участков увеличивается: Ra = 17.3 нм, Rq = 22.2 нм. Фрактальная размерность также возрастает до 2.92, что свидетельствует

о более сложной, «объемной» морфологии на макромасштабе, при этом сохраняется высокая равномерность покрытия. Оценка толщины покрытия методом АСМ для пленок GaSb-CrSb дала значение 0.8–0.9 мкм, что согласуется с ожидаемыми параметрами.

Оба материала имеют близкие значения фрактальной размерности (~2.8), что свидетельствует о схожей сложности поверхности. Специфические структуры (продолговатые в InSb-MnSb и отдельные вкрапления в GaSb-CrSb) указывают на влияние на морфологию переходного металла и особенностей фазообразования.

**Закключение.**

В результате исследования методами АСМ и СЭМ установлены особенности топографии поверхности тонких пленок эвтектических композитов InSb-MnSb и GaSb-CrSb. Показано, что поверхности обеих пленок характеризуются развитым микрорельефом с равномерно распределенными структурными образованиями, но отличаются размером и типом доминирующих структур. Полученные данные о морфологии и однородности пленок подтверждают перспективность использования этих эвтектических композитов в спинтронных устройствах, в частности, в качестве инжекторов спин-поляризованных электронов. Работа частично выполнена при поддержке гранта министерства образования 20211250.

#### **Список использованных источников**

1. Барайшук С.М., и др. Топография поверхности тонких пленок эвтектического композита InSb-MnSb // Труды международной научно-технической конференции. – 2018. – С. 99–100.
2. Ташлыков И.С., и др. Элементный состав, топография и смачиваемость поверхности графита, модифицированного ионно-лучевым осаждением хромовых покрытий // Российский журнал неорганических материалов. – 2008. – Т. 49, № 4. – С. 303–307.
3. Zahn W., Zösch A. // Fresenius Journal of Analytical Chemistry. – 1999. – V. 365. – P. 168.
4. Rahimov R.N., Kazimov M.V. et al. Features of Thermal and Electrical Properties of GaSb-CrSb eutectic composite // Journal of Ovonic Research. – 2017. – Vol.13, No. 3. – P. 113–118.
5. I.Kh. Mamedov, D.G. Arasly, A.A. Khalilova, R.N. Rahimov // Inorganic Materials. – 2016. – V. 52. – P. 423.
6. M.I. Aliyev, A.A. Khalilova, et all. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2003. – V. 36. – P. 2627.
7. Almqvist N. Fractal analysis of scanning probe microscopy images // Surface Science. – 1996. – V. 355. – P. 221–228.