

4. Вторичная оптика должна разрабатываться отдельно для каждого применения. Основой для ее разработки должна быть типовая первичная оптика и заданное распределение силы света изделия. Она должна по возможности работать на принципе полного внутреннего отражения, иметь минимальную толщину и быть способной за счет минимального отклонения лучей светодиода сформировать заданное распределение силы света.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Design of compact freeform lens for application specific light-emitting diode packaging / Kai Wang [et al.] // OPTICS EXPRESS. – 2010. – V.18, №2. – P. 413–425.
2. Catadioptric freeform optical system design for LED off-axis road illumination applications / Zhengbo Zhu [et al.] // OPTICS EXPRESS. – 2018. – V.26, №2. – P. 54–65.
3. Roll-to-Roll UV Nanoimprint Lithography for Large-Area Nano- and Micro-Structuring of Flexible Substrates / C. Leiner [et al.] // LED Professional [Electronic resource].-2018. – Mode of access: <https://www.led-professional.com/resources-1/articles/roll-to-roll-uv-nanoimprint-lithography-for-large-area-nano-and-micro-structuring-of-flexible-substrates>. – Date of access: 14.08.2020.
4. Сернов, С.П. Метод расчета вторичной оптики несменных источников света адаптивных оптических систем транспортных средств / С.П. Сернов, Д.В. Балохонов, Т.В. Колонтаева, А.А. Журавок // Приборы и методы измерений. – 2014. – №1(8). – С.86–93.
5. de Visser, M. Additive Optics Design and Fabrication for Smart Lighting Systems and Tailored Project Solutions / M. de Visser, R. van der Hilst // LED Professional [Electronic resource]. – 2019. – Mode of access: <https://www.led-professional.com/resources-1/articles/additive-optics-design-and-fabrication-for-smart-lighting-systems-and-tailored-project-solutions>. – Date of access: 14.08.2020.
6. Scully, T. LED Optics Explained / T. Scully // LEDSupply [Electronic resource]. – 2019. –Mode of access: <https://www.ledsupply.com/blog/led-optics-explained/>. – Date of access: 09.09.2020.

#### СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ТОНКИХ ПЛЕНОК ЭВТЕКТИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА InSb-FeSb

С. М. Барайшук<sup>1</sup>, А. И. Туравец<sup>2</sup>, О. М. Михалкович<sup>2</sup>  
Р. Н. Рагимов<sup>3</sup>, В. К. Долгий<sup>1</sup>, Д. Г. Араслы<sup>3</sup>, А. А. Халилова<sup>3</sup>

<sup>1)</sup> Белорусский государственный аграрный технический университет, пр. Независимости, 99, 220023 Минск, Беларусь, e-mail: [baraishuksm@gmail.com](mailto:baraishuksm@gmail.com)

<sup>2)</sup> Белорусский государственный педагогический университет им. М.Танка ул. Советская, 18, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: [physbober@tut.by](mailto:physbober@tut.by)

<sup>3)</sup> Институт Физики им. Г. М. Абдуллаева, НАН Азербайджана, пр. Г. Джавида, 131, AZ1143, г. Баку, e-mail: [rashadrahim@gmail.com](mailto:rashadrahim@gmail.com)

Методом «мгновенного испарения» получены тонкие пленки полупроводниково-эвтектического композита InSb-FeSb. Изучены микроструктура, рельеф поверхности, определен элементный состав. Распределение атомов In, Sb и Fe равномерное и соответствует стехиометрическому составу. Подтверждена равномерность нанесения покрытий, оценена толщина наносимого покрытия методом атомно-силовой микроскопии.

**Ключевые слова:** эвтектика; тонкая пленка; топология поверхности; фрактальная размерность; толщина покрытия; атомно-силовая микроскопия; сканирующая электронная микроскопия.

## SURFACE PROPERTIES OF THIN FILMS EUTECTIC COMPOSITE InSb-FeSb

S. M. Baraishuk<sup>1</sup>, A. I. Turavets<sup>2</sup>, O. M. Mikhalkovich<sup>2</sup>  
R. N. Rahimov<sup>3</sup>, V. K. Dolgiy<sup>1</sup>, D. G. Arasly<sup>3</sup>, A. A. Khalilova<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Belarusian State Agrarian Technical University, Nezavisimosti av. 99, 220023 Minsk, Belarus*

<sup>2</sup> *Belarusian State Pedagogical University named after M. Tanka, st. Sovetskaya, 18, 220030 Minsk, Belarus*

<sup>3</sup> *Institute of Physics named after G. M. Abdullayev, National Academy of Sciences of Azerbaijan, G. Javid Av., 131, AZ1143, Baku, Azerbaijan*

*Corresponding author: S. M. Baraishuk (baraishuksm@gmail.com)*

Thin films of the InSb-FeSb semiconductor eutectic composite were obtained by the "flash evaporation" method. The microstructure and surface relief have been studied, and the elemental composition has been determined. The distribution of In, Sb and Fe atoms is uniform and corresponds to the stoichiometric composition. The uniformity of coating was confirmed, the thickness of the applied coating was estimated by atomic force microscopy.

**Key words:** eutectic; thin film; surface topology; fractal dimension; coating thickness; atomic force microscopy; scanning electron microscopy.

### ВВЕДЕНИЕ

Эвтектические композиты на основе соединений III-V групп с 3d-переходными металлами, состоящие из полупроводниковой матрицы с введенными металлическими включениями, представляют интерес из-за стабильности характеристик и сохранения микроструктуры до температуры плавления. Такие композиты ведут себя как неоднородные и вырожденные полупроводники и их физические свойства существенно зависят от электронной конфигурации 3d-элементов, геометрии включений и особенностей формирования межфазных зон. Из-за наличия ферромагнитных металлических включений эти композиты являются перспективными материалами для создания инжекторов спин-поляризованных электронов.

Ранее были исследованы микроструктура и физические свойства эвтектических композитов на основе InSb и GaSb [1–3], а также микроструктура поверхности, рельеф поверхности, и элементный состав InSb-MnSb, GaSb-CrSb [4–6]. Подтверждена равномерность нанесения покрытий, оценена толщина. В данной работе приведены результаты микроструктурного анализа и топологии поверхности полученных нами тонких пленок эвтектического композита InSb-FeSb.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Тонкие пленки эвтектического композита InSb-FeSb получены методом «мгновенного испарения» с толщиной в пределах от 0,6 до 1,2  $\mu\text{m}$ . Поверхность пленок исследовали с использованием атомно-силового микроскопа NT 206 (Microtestmachines Co) в контактном режиме. Обработка полученных данных произведена в программном пакете «SurfaceXplorer» по методике, описанной в [7]. Для оценки поверхности было выбрано не менее пяти площадок сканирования размером  $10 \times 10$   $\mu\text{m}$  с разных участков поверхности, что позволило проводить усреднение параметров рельефа. Методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии с использованием электронно-зондового микроскопа типа EDX Oxford Instruments

AZtecEnergy-Advanced с кремний-дрейфовым детектором X-act (активная площадь кристалла 10 мм<sup>2</sup>), работающим при комнатной температуре определяли состав пленок композита и распределение элементов в приповерхностной области по площади сканирования.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительные дифракционные спектры образцов субмикронных пленок эвтектики InSb-FeSb, как и в случае с ранее исследованными композитами [1–2], указывают на двухфазную структуру, а интенсивность линий на дифракционном спектре пленок указывает на их кристаллизацию.

Идентичность рентгенограмм массивного и пленочного образцов обусловлена идентичностью их состава. На это указывают и представленные микроструктура (рис. 1, *a*) и распределение элементов вдоль направления сканирования (рис. 1, *б*) тонких пленок InSb-FeSb. Распределение атомов In, Sb и Fe соответствует стехиометрическому составу.

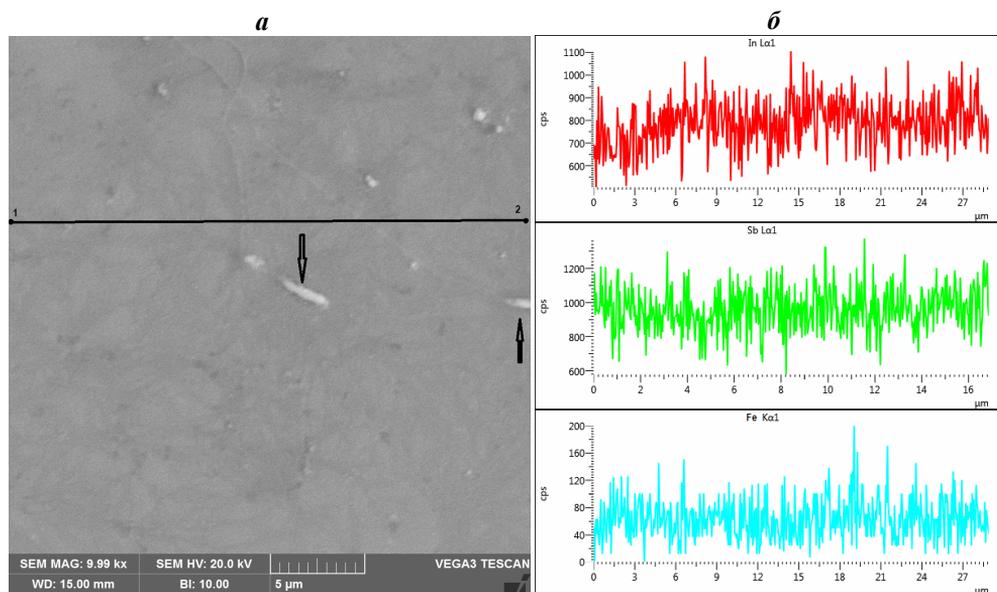
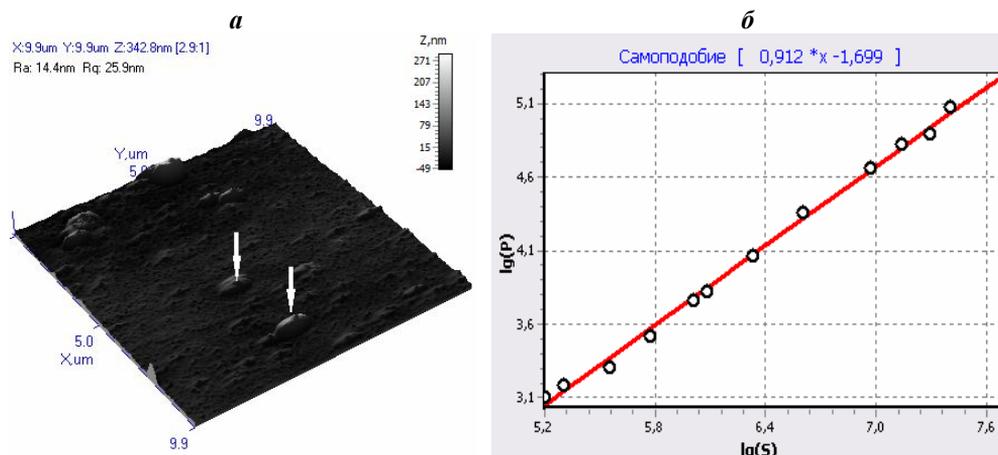


Рисунок 1. – Микроструктура тонкой пленки InSb-FeSb (*a*), полученная методом СЭМ и элементный состав пленки (*б*) вдоль отрезка 1–2

АСМ-исследования показали, что типичная поверхность тонких пленок эвтектического композита InSb-FeSb имеет сложный микрорельеф. При размере площадок сканирования 10×10 мкм<sup>2</sup> (рис. 2, *a*) на поверхности наблюдаются равномерно распределенные структурные образования эллипсоидной формы размером 1,5–2,5 мкм в длину, 0,7–1,1 мкм в поперечнике со средней высотой 0,9–1,1 мкм. Средняя арифметическая шероховатость поверхности, усредненная по 5 различным площадкам, при указанном выборе площадки составляет Ra = 93,1 нм, среднеквадратичная Rq = 137,4 нм. Отношение полной площади поверхности к проективной составляет 1,09. Анализ распределение высот для указанных площадок показывает, что средняя высота элементов на поверхности 0,9 мкм. Анализ ориентированности поверхно-

ных структур позволяет утверждать, что у структур на поверхности имеется достаточно выраженная ориентация вдоль одного направления, что может быть связано с процессами кристаллизации при формировании покрытия.



**Рисунок 2. – Топография поверхности InSb-FeSb при сканировании по площадке  $10 \times 10 \text{ мкм}^2$  с разрешением 10 нм (а) и результаты расчета мультифрактальной размерности (б) для указанной площадки**

По АСМ-изображениям вычислялась мультифрактальная размерность поверхности методом горизонтальных сечений (площадь–периметр). При вычислении фрактальной размерности учитывалось систематическое отклонение, характерное для метода горизонтальных сечений [8, 9]. Анализ фрактальности исследованных площадок по 500 подслоям (рис. 2, б) дает среднее значение фрактальной размерности 1,69. В целом АСМ изображения хорошо согласуются с данными СЭМ, приведенными на рис. 1.

Кроме того, дополнительно было проведено изучение поверхности между образованиями при большем разрешении сканирования и в областях, не содержащих аномальных топографических структур для данных поверхностей с размером площадки сканирования  $5 \times 5 \text{ мкм}^2$ . Для этих областей характерно отсутствие сколь либо значительных по размеру структур, однако наблюдается мелкозеренная структура с преобладающей высотой  $\sim 150 \text{ нм}$ . Зерна неправильной формы размером 40–80 нм в поперечнике также имеют ярко выраженную ориентацию. Это приводит к уменьшению значений средней арифметической и среднеквадратичной шероховатости до  $Ra = 19,4 \text{ нм}$  и  $Rq = 22,6 \text{ нм}$ , соответственно. При этом среднее значение фрактальной размерности исследованных площадок несколько возрастает в сравнении с основным рельефом и достигает 1,82, что говорит о развитой «объемной» поверхности [9]. Это подтверждает высокое качество поверхности и достаточно высокую равномерность нанесения покрытий.

Кроме указанных особенностей топографии на поверхности в нескольких местах, масочным методом, были сформированы области без покрытия, позволяющие по переходной ступени оценить толщину наносимого покрытия. Полученные значения в диапазоне 790–920 нм, в различных местах покрытия, хорошо согласуются с рас-

четными значениями толщин и ранее полученными данными для аналогичных структур.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При помощи СЭМ изучены микроструктура и элементный состав поверхности тонких пленок полупроводникового эвтектического композита InSb-FeSb. При помощи АСМ проведен анализ топографии и оценка толщины нанесенного покрытия, которая составила 0,8–0,9 мкм, что согласуется с ранее полученными данными. Низкая средняя шероховатость поверхности и равномерное распределение элементов по поверхности позволяет говорить о высоком качестве и равномерности наносимого покрытия.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Anisotropic Electrical Properties of a Eutectic InSb - MnSb Composite / Mamedov I. Kh. [et al.] // *Inorganic Materials*, 2016. – Vol. 52. № – 4, P. 423–428.
2. Features of Thermal and Electrical Properties of GaSb-Crsb eutectic composite / Rahimov R.N. [et al.] // *Journal Ovonic Research*, 2017. – Vol. 13. №. – 3, P. 113 – 118.
3. Features of electron and phonon processes in GaSb-FeGa / Aliyev M.I. [et al.] // *J.Phys.D: Applied Phys.*, 2003. – V. 36, P. 2627–2633.
4. Топография поверхности субмикронных пленок эвтектического композита GaSb-CrSb / А.И. Туровец, С.М. Барайшук, Т.М. Ткаченко, Р.Н. Рагимов, И.Х. Мамедов, Д.Г. Араслы, А.А. Халилова // *Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии; матер. 13 Международ. конф., Минск, Беларусь, 16 – 29 октября 2018 г. / редкол.: С.А. Чижик (отв.ред.) [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2018. – С. 44–48.*
5. Surface topography of the InSb-MnSb thin films / S.M. Baraishuk, A.I. Turovets, T.M. Tkachenko, R.N. Rahimov, I.Kh. Mamedov, D.G. Arrasly, A.A. Khalilova // *Book of Abstracts of International Conference Scanning Probe Microscopy, Ekaterinburg, August 26-29, 2018/ Ural Federal University. – Ekaterinburg, 2018. – P. 99–100.*
6. Топография поверхности тонких пленок эвтектического композита GaSb-CrSb / С.М. Барайшук, Р.Н. Рагимов, Д.Г. Араслы, А.А. Халилова // *Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК : материалы Международной научно-технической конференции, Минск, 19–20 декабря 2019 г. / редкол.: И.В. Протосовицкий (отв.ред.) [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2019. – С. 284–286.*
7. Tashlykov, I.S., Elemental composition, topography, and wettability of the surface of graphite modified by ion-assisted deposition of chromium coatings / Tashlykov I.S., Baraishuk S.M. // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2008. – V. 49. № 4. – P. 303–307.
8. Almqvist N. Fractal analysis of scanning probe microscopy images. / Almqvist N. // *Surface Science*. 1996. – V. 355. – P. 221–228.
9. Zahn, W., The dependence of fractal dimension on measuring conditions of scanning probe microscopy / Zahn W., Zösch A. // *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*. 1999. – V. 365. – P. 168–172.