

Формирование рельефа поверхности многослойной нанопериодической структуры $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}/\text{Se}$, индуцированное электронным облучением

С. А. Сергеев^а, А. Ю. Мешалкин^{а,*}, А. В. Стронский^б,
О. П. Паюк^б, Г. М. Тридох^а, И. А. Кожокару^а

^аИнститут прикладной физики, Молдавский государственный университет,
г. Кишинев, MD-2028, Молдова

^бИнститут физики полупроводников имени В.Е. Лашкарева НАН Украины,
г. Киев, 03028, Украина

*e-mail: alexei.meshalkin@ifa.usm.md

Поступила в редакцию 12.02.2025

После доработки 21.03.2025

Принята к публикации 27.03.2025

В многослойной нанопериодической структуре (МНС) $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}/\text{Se}$ осуществлена электронно-лучевая запись растровых рисунков. Поверхность МНС $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}/\text{Se}$, образованная группой пикселей, изучалась в атомном силовом микроскопе (АСМ). Установлен вклад массопереноса в формирование объемных пикселей, образующих рельеф поверхности данной МНС. Обнаружено, что быстрое перемещения пучка электронов между заданными точечными областями облучения приводит к образованию на поверхности МНС линий в виде гребней.

Ключевые слова: электронно-лучевая запись, многослойная нанопериодическая структура, пленки халькогенидов, профиль поверхностного рельефа

УДК 621.9.048.7

<https://doi.org/10.52577/eom.2025.61.2.18>

ВВЕДЕНИЕ

Аморфные пленки халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП) отличаются ярко выраженным свойством изменения физических и химических свойств под воздействием облучения. Этим, в частности, обусловлена перспектива их использования для оптической и электронно-лучевой записи оптических элементов. С конца прошлого века [1, 2] внимание исследователей привлекает индуцированное облучением явление изменения толщины аморфных халькогенидных пленок, обуславливающее формирование рельефа поверхности пленки в процессе записи. К настоящему времени в ряде обзорных статей [3–7] изложены многочисленные результаты исследований халькогенидных пленок различных составов, а также предложены механизмы изменения толщины пленки. В обзоре [7] приводится сравнение процессов формирования рельефа на поверхности аморфных пленок халькогенидов и полимерных пленок азобензола под воздействием облучения поляризованными лазерными пучками.

Формирование развитого рельефа облучаемой аморфной халькогенидной пленки под воздействием актиничного облучения связывается с индуцированными структурными изменениями, приводящими к увеличению текучести

(уменьшению вязкости) и явлению локального массопереноса [3, 4, 8–12]. Первичным актом фотоиндуцированных изменений является образование электронно-дырочных пар с последующей безызлучательной рекомбинацией, приводящей к формированию заряженных дефектов, содержащих как атомы халькогенов, так и атомы пниктогенов. Взаимодействие заряженных дефектов оказывает влияние на структуру, определяющую свойства халькогенидной пленки. В ранних работах [8, 9, 13–15] на примере $a\text{-Se}$, $a\text{-As}_2\text{Se}_3$ и $a\text{-As}_2\text{S}_3$ приводится моделирование дефектов, определяющих свойства халькогенидных стекол, а также участвующих в фотоструктурных изменениях. При этом рассматриваются образование и роль пар переменной валентности (VAP) различного типа. Роль VAP в процессе фотоиндуцированного увеличения текучести халькогенидных материалов рассмотрена в [4, 11].

Формирование рельефа поверхности под воздействием электронно-лучевого облучения наблюдалось в Se-содержащих аморфных халькогенидных пленках различного состава [16–28]. В [17, 18] исследованы особенности электронно-лучевой записи на слоях $\text{Ge}_9\text{As}_9\text{Se}_{82}$, $\text{Ge}_{16}\text{As}_{24}\text{Se}_{60}$ и As-S-Se.

Для объяснения электронно-индуцированных явлений поверхностной структуризации

аморфных пленок использовалась модель аккумуляции заряда в области взаимодействия пленки с пучком электронов. Определены времена релаксации зарядов, глубина проникновения электронного пучка в пленку, начальные и инверсные дозы. Исследованы профили поверхностных рельефов, образовавшегося после облучения электронным пучком. Для слоев системы $\text{Ge}_x\text{Se}_{100-x}$ было проведено сравнение параметров рельефа поверхности, сформированного под воздействием оптического и электронно-лучевого облучения [19]. В обоих случаях наибольшее изменение объема было выявлено для составов $\text{Ge}_{24}\text{Se}_{76}$ и $\text{Ge}_{28}\text{Se}_{72}$. Получены обширные результаты исследования формирования рельефа в пленках системы $\text{As}_x\text{Se}_{1-x}$ [20–24]. В работе [20] отмечена тождественность динамики формирования рельефа при оптической и электронно-лучевой записи в слоях As-S(Se). На основании результатов, полученных для оптической записи в пленке $\text{As}_{20}\text{Se}_{80}$ установлено, что стадии формирования развитого рельефа предшествует начальная сравнительно быстрая стадия формирования слабого рельефа. В слоях $\text{As}_{20}\text{Se}_{80}$ толщиной 2 мкм с помощью электронно-лучевого облучения сформированы объемные (конусообразные) пиксели с высотой, достигающей 1 мкм [21]. Согласно полученным экспериментальным результатам, развитый рельеф образуется в пленках ХСП с высоким содержанием Se. Это связывается с наличием цепочек атомов Se, играющих роль в изменении толщины пленки, индуцированном как оптическим [10], так и электронно-лучевым [23, 25] облучением. Отмечено, что формирование развитого рельефа обусловлено боковым массопереносом из необлученных в облученные участки, либо наоборот, в зависимости от условий электронно-лучевого облучения [19, 21–24, 26].

Наряду с монослоями ХСП исследовано формирование рельефа в многослойных нанопериодических структурах (МНС), состоящих из чередующихся наноразмерных халькогенидных слоев. Способ изготовления МНС $\text{Se}/\text{As}_2\text{S}_3$ и результаты исследования формирования рельефа поверхности при оптической записи впервые изложены в работе [29]. Последующее исследование оптической записи в МНС (в основном МНС $\text{Se}/\text{As}_2\text{S}_3$) позволило получить ряд важных результатов. Экспериментально наблюдалась фотоиндуцируемая интердиффузия в приконтактных областях МНС и рассмотрены различные аспекты теоретической модели интердиффузии, вносящей вклад в формирование рельефа МНС [30–34]. Оптимизированы основные параметры многослойной структуры,

к которым относятся период и толщина структуры, а также соотношение толщин узкозонного (активного) и более широкозонного (барьерного) слоев [32–35]. Фотоиндуцированное относительное изменение толщины МНС $\text{Se}/\text{As}_2\text{S}_3$ составило 10% [34].

Проведено сравнение результатов влияния оптического и электронно-лучевого облучения на свойства МНС $\text{Se}/\text{As}_2\text{S}_3$ [36, 37]. В обоих случаях наибольшее значение относительного изменения ее толщины составило 10% [36]. Показано, что индуцированное электронным облучением увеличение толщины МНС $\text{Se}/\text{As}_2\text{S}_3$ намного превышает суммарное увеличение толщины отдельных компонентов (Se и As_2S_3) [37]. Значительное усиление процесса индуцированного увеличения толщины МНС $\text{Se}/\text{As}_2\text{S}_3$ обуславливается интердиффузией, приводящей, в частности, к образованию твердого раствора As-S-Se. Изучалось формирование рельефа поверхности МНС $\text{Se}/\text{As}_2\text{S}_3$ [38, 39], $\text{Se}/\text{As}_2\text{S}_3:\text{Ag}$ [40], а также $\text{Se}/\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$ [41], при оптической записи дифракционных решеток поляризованными лазерными пучками. Наибольшая глубина рельефа была получена при *p-p* поляризации.

В данной работе приведены результаты изучения рельефа поверхности МНС $\text{Se}/\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$ сформированного под воздействием электронно-лучевого облучения. Проведен анализ профилей групп упорядоченных пикселей, образующих рельеф поверхности МНС.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Образцы МНС $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}/\text{Se}$ были получены методом термического осаждения в вакууме на стеклянные подложки с ИТО (Indium Tin Oxide) покрытием. Формирование структуры с периодическим чередованием слоев $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$ и Se осуществлялось с помощью методики, обеспечивающей многократное повторение технологических циклов, в каждом из которых проводилось последовательное осаждение указанных слоев с использованием отдельных испарителей. Суммарная толщина двух различных слоев, полученных в одном цикле, определяющая период многослойной структуры, равнялась примерно 15 нм. Общая толщина МНС $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}/\text{Se}$ составляла около 3 мкм.

Электронно-лучевая запись рисунков в МНС $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}/\text{Se}$ проводилась в растровом электронном микроскопе BS 300 (Tesla) с использованием компьютерного управления позиционированием электронного пучка. Для записи растровых рисунков применялись инвертированные изображения в формате bmp.

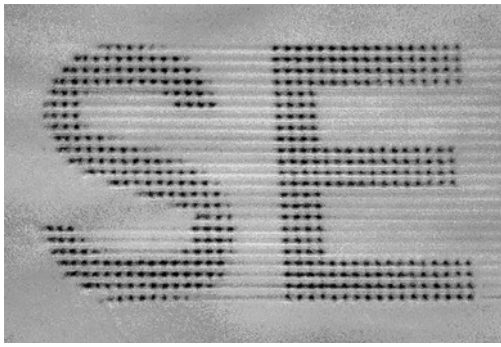


Рис. 1. Оптическое изображение букв, записанных в МНС $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}\text{-Se}$.

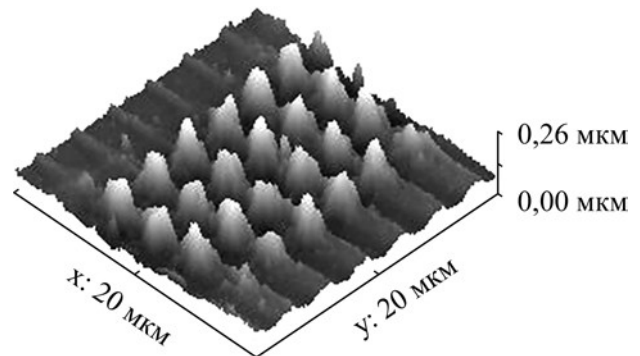


Рис. 2. ACM 3D-изображение фрагмента линии буквы.

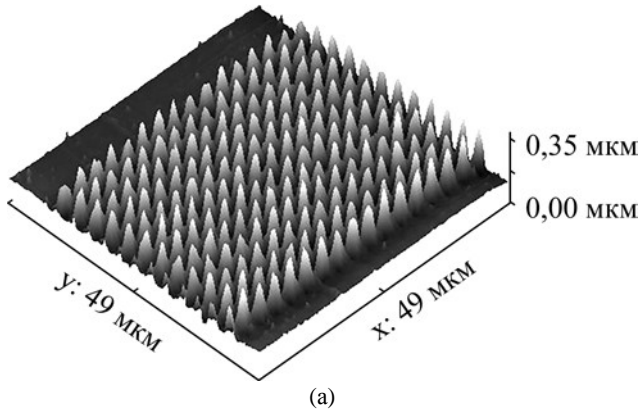


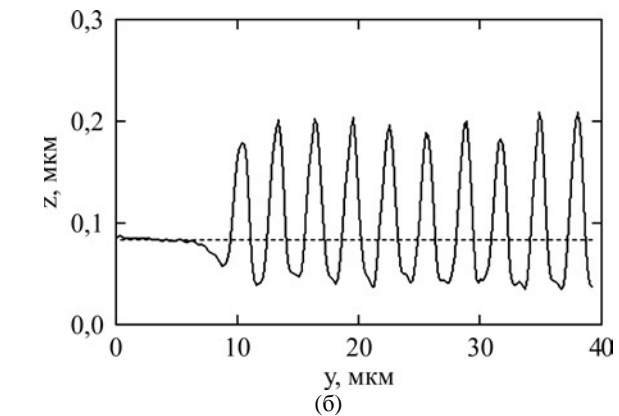
Рис. 3. ACM 3D-изображение массива пикселей (а) и профиль ряда пикселей, ориентированного ортогонально направлению перемещения пучка электронов вдоль линии раstra (б).

При этом рисунок отображался белыми линиями на черном фоне. Время облучения электронным пучком в каждой из точек, составляющих линию рисунка, задавалось равным около 25 мс. Ток пучка электронов составлял 6 нА. Ускоряющее напряжение 25 кВ обеспечивало проникновение пучка электронов сквозь всю толщину МНС. Система бланкирования во время записи не применялась. Рельеф поверхности, образованный массивом пикселей, изучался в атомном силовом микроскопе (АСМ) SIS NANOSTATION II.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При электронно-лучевой записи линии и другие фрагменты растровых рисунков формируются упорядоченным массивом периодически расположенных пикселей. Индуцированное электронным облучением изменение толщины МНС $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}/\text{Se}$ приводит к образованию трехмерных (3D) пикселей. На рис. 1 приведено изображение букв, полученное в оптическом микроскопе на отражение.

Расстояние между пикселями составляет 3 мкм. В приведенном случае ширина и высота буквы равны около 10 и 66 мкм, соответственно. На рис. 2 показано АСМ 3D-изображение фрагмента линии буквы. Здесь и на последующих АСМ-изображениях строки раstra направлены вдоль оси x . Как видно, сформированные в процессе записи 3D пиксели обладают острой вершиной и формой близкой к конической.



На рис. 3а показано 3D-изображение фрагмента образца, на котором рядом с массивом пикселей имеется необлученный участок регистрирующей структуры.

На рис. 3б показан профиль рельефа поверхности МНС $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}/\text{Se}$, построенный в плоскости, проходящей через вершины пикселей, и направленной вдоль y , то есть перпендикулярно направлению перемещения пучка электронов вдоль строки раstra. Начальный участок профиля рельефа соответствует уровню поверхности необлученного участка МНС.

Как видно из рис. 3б, уровень впадин рельефа поверхности лежит примерно на 40 нм ниже уровня необлученной поверхности МНС $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}/\text{Se}$. Образование канавок в областях, прилегающих к местам локализации пучка электронов, свидетельствует о роли массопереноса из необлученных участков в формировании рельефа поверхности МНС $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}/\text{Se}$. Значения глубины поверхностной модуляции H , измеренной относительно дна канавки, и высоты пикселя относительно необлученной поверхности пленки h равны около 150 нм и 110 нм, соответственно. Усредненное по группе пикселей значение отношения глубины канавки d к H и h составляет $k_H \approx 0,28$ и $k_h \approx 0,36$, соответственно. Эти значения согласуются с аналогичными значениями, полученными для одиночных линий, сформированных электронным пучком в халькогенидных пленках

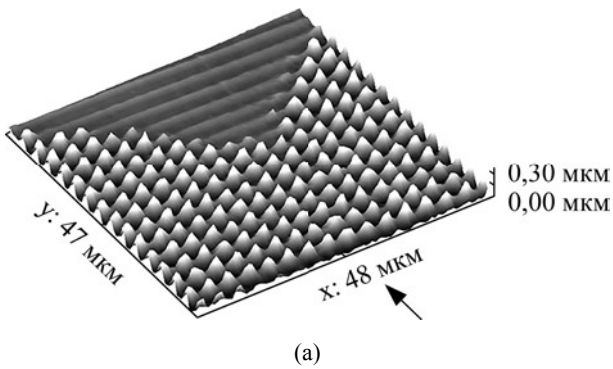


Рис. 4. АСМ 3D-изображение фрагмента рисунка (а) и профиль рельефа поверхности (б), полученный по направлению стрелки (направление y) на рис. 4а.

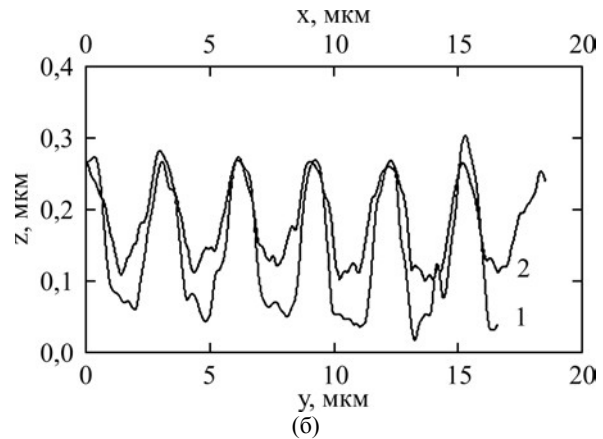
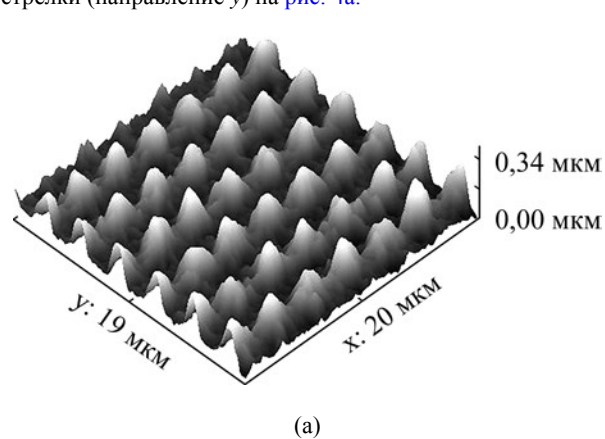
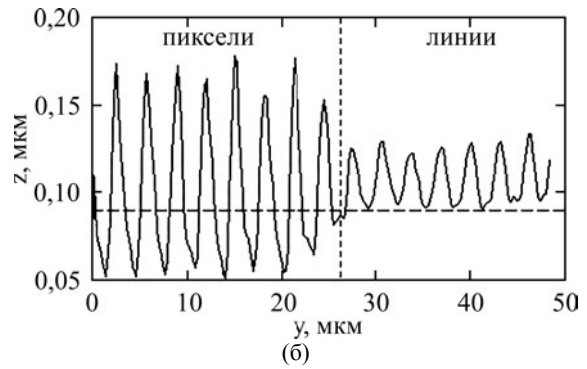


Рис. 5. АСМ 3D-изображение пикселей (а) и профили рядов пикселей (б), ориентированных вдоль направлений y (1) и x (2).

[1, 23]. Оцененное из приведенных в [23] АСМ изображений профилей, сформированных электронно-лучевым облучением в пленках $\text{As}_x\text{Se}_{1-x}$ различного состава, а также из расчетных профилей, значение $k_H \approx 0,3$. Значение k_H для одиночных линий, сформированных электронно-лучевым облучением в пленках As_2S_3 , лежит в интервале $1/3-1/2$ [1].

На рис. 4а показано АСМ 3D-изображение фрагмента микро-рисунка, включающего участок между областями формирования пикселей.

На этом рисунке хорошо видны сплошные линии, образованные быстро движущимся пучком электронов. Как видно из рис. 4б, соответствующая линиям глубина рельефа поверхности $H \approx 35 \text{ нм}$, что примерно в три раза меньше глубины рельефа поверхности $H \approx 120 \text{ нм}$, образованного пикселями на приведенном фрагменте. Несмотря на то, что на рис. 4а отсутствует необлученный участок МНС, его уровень можно оценить из сравнения с рис. 3б в предположении, что определенное выше отношение k_H является параметром, характеризующим сформированный рельеф. Учитывая близость значений высоты пикселя (150 нм и 120 нм), в данном случае с небольшой ошибкой можно также использовать значение $k_H = 0,28$. Соответственно, определенная глубина впадин рельефа

поверхности, образованного пикселями (слева на рис. 4б), составляет около 34 нм .

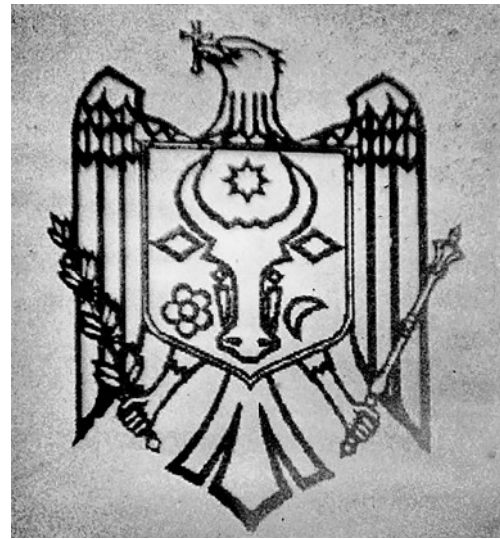
Исходя из этого, определен уровень необлученной поверхности, обозначенный на рис. 4б пунктирной линией. При таком рассмотрении для структуры, показанной на рис. 4, уровень впадин рельефных линий примерно соответствует начальному уровню поверхности. Это свидетельствует об отсутствии массопереноса при формировании линий в виде гребней.

На 3D-изображении массива пикселей, показанном на рис. 5а, видно, что пиксели, расположенные вдоль строк растра (направление x) частично перекрываются. В то же время между соседними пикселями, расположенными в разных строках, такое перекрытие не наблюдается.

На рис. 5б показаны профили рельефа поверхности МНС $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}/\text{Se}$, построенные в плоскостях, проходящих через вершины пикселей вдоль направлений y (кривая 1) и x (кривая 2). Видно, что во втором случае (вдоль строки растра) уровень впадин рельефа поверхности лежит заметно выше. Повышение уровня впадины для направления x свидетельствует о том, что заметное взаимодействие электронного пучка с указанной МНС происходит и во время быстрого скачкообразного перемещения пучка электронов между соседними точками его локализации. Это приводит к образованию



(a)



(б)

Рис. 6. Исходный рисунок герба Республики Молдова (а) и оптическое изображение микро-рисунка (б), записанного электронным пучком.

коротких отрезков линий, ослабляющих образование впадин.

В работе [25] показано, что при низкой экспозиции электронным пучком происходит увеличение объема аморфной пленки $\text{Ge}_4\text{As}_4\text{Se}_{92}$ без бокового массопереноса, вызывающего образование канавок вокруг точечной области облучения. Согласно полученным результатам оптической записи в МНС $\text{Se}/\text{As}_2\text{S}_3$ [31], максимальное изменение объема структуры достигается в результате длительного процесса интердиффузии. Приведенные в статье результаты (рис. 4) хорошо согласуются с вышеизложенным и, по-видимому, по аналогии с результатами, полученными в [20], демонстрируют два этапа формирования рельефа, обусловленных двумя механизмами. Кратковременное облучение во время перескока электронного пучка между экспонируемыми точечными областями МНС $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}/\text{Se}$ вызывает образование объемных линий в виде гребней, обусловленное индуцированным увеличением толщины структуры. Формирование объемных пикселей в местах экспозиции сопровождается боковым массопереносом.

Схожесть динамики формирования рельефа в МНС $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}/\text{Se}$ и его параметров с наблюдаемыми в монослоях халькогенидных пленок [1, 23, 25] позволяет предположить тождественность механизма массопереноса. При этом, как следует из ряда публикаций, массоперенос инициируется увеличением текучести МНС, индуцированной облучением. В соответствии с изложенным в [37] интердиффузия усиливает процесс формирования рельефа в МНС $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}/\text{Se}$ под воздействием электронного облучения как на начальной, так и на

последующей стадии, связанной с массопереносом.

Посредством формирования 3D пикселей была осуществлена прямая электронно-лучевая запись рельефных микро-рисунков. В качестве примера на рис. 6б показан микро-рисунок герба Республики Молдова, наблюдаемый в оптическом микроскопе в отражении. Размер микро-рисунка на МНС по вертикали составляет около 1,5 мм. Видно, что достигнуто хорошее воспроизведение исходного рисунка (рис. 6а), содержащего мелкие элементы. Это обеспечено возможностью формирования в МНС $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}/\text{Se}$ хорошо различимых тонких линий, образованных 3D пикселями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью прямой электронно-лучевой записи сформирован рельеф поверхности МНС $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}/\text{Se}$, образованный 3D пикселями с высотой, достигающей 150 нм. Рядом с конусообразными пикселями наблюдались впадины, что указывает на вклад массопереноса в процесс формирования рельефа поверхности данной МНС.

Сравнение полученных результатов с опубликованными в ряде статей [1, 23, 25] позволяет предположить схожесть процессов массопереноса в многослойной нанопериодической структуре $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}/\text{Se}$ и монослоях халькогенидов.

Обнаружено формирование рельефных линий в виде гребней при кратковременном облучении во время быстрого перемещения электронного пучка между заданными точечными областями облучения. Процесс формирования таких линий не сопровождался образованием прилегающих канавок и обусловлен, по-видимому, локальным

увеличением толщины исследованной МНС $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}/\text{Se}$, индуцированным облучением.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данное исследование финансировалось Министерством образования и исследований Республики Молдова (подпрограмма 011201).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Hisakuni, H. and Tanaka, K., Giant photoexpansion in As_2S_3 glass, 1994, vol. 65, no. 23, p. 2925.
<https://doi.org/10.1063/1.112533>
- Tanaka, K., Electron beam induced reliefs in chalcogenide glasses, *Appl. Phys. Lett.*, 1997, vol. 70, no. 2, p. 261.
<https://doi.org/10.1063/1.118356>
- Yannopoulos, S.N. and Trunov, M.L., Photoplastic effects in chalcogenide glasses: A review, *Phys. stat. sol. (b)*, 2009, vol. 246, no. 8, p. 1773.
<https://doi.org/10.1002/pssb.200982005>
- Sangunni, K.S., A review of photo-induced inter-diffusion in nano-layered chalcogenide films, *J. Ind. Inst. Sci.*, 2011, vol. 91, no. 2, p. 295.
- Achimova, E., Direct surface relief formation in nanomultilayers based on chalcogenide glasses: A review, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2016, vol. 52, no. 5, p. 456.
<https://doi.org/10.3103/S1068375516050021>
- Tanaka, K., Photoinduced deformations in chalcogenide glasses: What are the driving forces? *J. Non-Cryst. Sol.*, 2018, vol. 500, p. 272.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.08.008>
- Kryshenik, V.M., Trunov, M.L. and Ivanitsky, V.P., Vectorial response under photexcitation in amorphous chalcogenides and azobenzene polymer films: a comparison, *J. Optoelectr. Adv. Mater.*, 2007, vol. 9, no. 7, p. 1949.
- Fritzsche, H., Photo-induced fluidity of chalcogenide glasses, *Sol. State Commun.*, 1996, vol. 99, no. 3, p. 153.
[https://doi.org/10.1016/0038-1098\(96\)00218-9](https://doi.org/10.1016/0038-1098(96)00218-9)
- Fritzsche, H., Toward understanding the photoinduced changes in chalcogenide glasses, *Semiconductors*, 1998, vol. 32, no. 8, p. 850.
<https://doi.org/10.1134/1.1187471>
- Trunov, M.L., Lytvyn, P.M., Nagy, P.M. and Dyachyn's'ka, O.M., Real-time atomic force microscopy imaging of photoinduced surface deformation in $\text{As}_x\text{Se}_{100-x}$ chalcogenide films, *Appl. Phys. Lett.*, 2010, vol. 96, no. 11, art. ID 111908.
<https://doi.org/10.1063/1.3360229>
- Gueguen, Y., Sangleboeuf, J.-Ch., Rouxel, T. and Keryvin, V., Photoinduced fluidity and viscoelasticity in chalcogenide glasses, *Int. J. Appl. Glass Sci.*, 2012, vol. 3, no. 1, p. 53.
<https://doi.org/10.1111/j.2041-1294.2012.00081.x>
- Kaganovskii, Yu., Beke, D.L., Freilikher, V., Kökényesi, S. et al., Photo induced self-diffusion and viscosity in amorphous chalcogenide films, *Mater. Res. Expr.*, 2020, vol. 7, no. 1, art. ID 016204.
<https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab6c1b>
- Street, R.A. and Mott, N.F., States in the gap in glassy semiconductors, *Phys. Rev. Lett.*, 1975, vol. 15, no. 19, p. 1293.
- Kastner, M., Adler, D. and Fritzsche, H., Valence-alternation model for localized gap states in lone-pair semiconductors, *Phys. Rev. Lett.*, 1976, vol. 37, no. 22, p. 1504.
- Dembovsky, S.A., Zyubin, A.S. and Grigor'ev, F.V., Modeling of hypervalent configurations, valence alternation pairs, deformed structure, and properties of $a\text{-S}$ and $a\text{-As}_2\text{S}_3$, *Semiconductors*, 1998, vol. 32, no 8, p. 843.
<https://doi.org/10.1134/1.1187470>
- Romero, J.S., Fitzgerald, A.G. and Mietzsch, K., Electron irradiation induced expansion in amorphous chalcogenide films, *J. Appl. Phys.*, 2002, vol. 91, no. 12, p. 9572.
<https://doi.org/10.1063/1.1478135>
- Shylenko, O., Bilanych, V., Feher, A., Rizak, V., et al., Evaluation of sensitivity of $\text{Ge}_9\text{As}_9\text{Se}_{82}$ and $\text{Ge}_{16}\text{As}_{24}\text{Se}_{60}$ thin films to irradiation with electron beam, *J. Non-Cryst. Sol.*, 2019, vol. 505, p. 37.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.10.042>
- Revutska, L., Shylenko, O., Stronski, A., Komanicky, V., et al., Electron-beam recording of surface structures on As-S-Se chalcogenide thin films, *Phys. Chem. Sol. State*, 2020, vol. 21, no. 1, p. 391.
<https://doi.org/10.15330/pcss.21.1.146-150>
- Csarnovics, I., Cserhati, C., Kokenyesi, S., Latif, M.R., et al., Light and electron beam induced surface patterning in Ge-Se system, *J. Optoelectr. Adv. Mater.*, 2016, vol. 18, nos. 9-10, p. 793.
- Trunov, M., Lytvyn, P., Nagy, P.M., Cserhati, C., et al., Direct surface relief formation in As-S(Se) layers, *Proc. SPIE*, 2010, vol. 7598, art. ID 75981H.
<https://doi.org/10.1117/12.837604>
- Cserháti, C., Csarnovics, I., Harasztosi, L., Trunov, M.L., et al., Direct surface relief formation by e-beam in amorphous chalcogenide layers, *J. Mater.s Sci.: Mater. Electron.*, 2017, vol. 28, no. 10, p. 7024.
<https://doi.org/10.1007/s10854-016-6076-y>
- Cserhati, C., Charnovych, S., Lytvyn, P.M., Trunov, M.L., et al., E-beam induced mass transport in amorphous $\text{As}_{20}\text{Se}_{80}$ films, *Mater. Lett.*, 2012, vol. 85, p. 113.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.06.095>
- Trunov, M.L., Cserháti, C., Lytvyn, P.M., Kaganovskii, Yu., et al., Electron beam-induced mass transport in As-Se thin films: compositional dependence and glass network topological effects,

- J. Phys. D: Applied Physics*, 2013, vol. 46, no. 24, art. ID 245303.
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/24/245303>
24. Kaganovskii, Yu., Trunov, M.L., Cserhati C., Lytvyn, P.M., et al., Electron-beam induced variation of surface profile in amorphous $\text{As}_{20}\text{Se}_{80}$ films, *J. Appl. Phys.*, 2014, vol. 115, no. 18, art. ID 183512.
<https://doi.org/10.1063/1.4875838>
25. Bilanych, V., Komanicky, V., Feher, A., Kuzma V., et al., Electron-beam induced surface relief shape inversion in amorphous $\text{Ge}_4\text{As}_4\text{Se}_2$ thin films, *Thin Solid Films*, 2014, vol. 571, part 1, p. 175.
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.10.067>
26. Shiman, O., Gerbreder, V., Sledevskis, E. and Paskevics, V., Electron beam induced surface modification of amorphous Sb_2Se_3 thin film, *J. Non-Cryst. Sol.*, 2012, vol. 358, p. 1153.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2012.02.013>
27. Hoffman, G.B., Liu, W.-C., Zhou, W., Sooryakumar, R., et al., Relief and trench formation on chalcogenide thin films using electron beams, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2008, vol. 26, no. 6, p. 2478.
<https://doi.org/10.1116/1.3002564>
28. Kuzma, V., Bilanych, V., Kozeljova, M., Hlozna, D., et al., Study of dependence of electron beam induced surface relief formation on Ge-As-Se thin films on the film elemental composition, *J. Non-Cryst. Sol.*, 2017, vol. 456, p. 7.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.10.033>
29. Kikineshi, A., Palyok, V., Mishak, A., Szabo, I., et al., Surface relief formation at hologram recording in a-Se/ As_2S_3 nanolayered films, *Funct. Mater.*, 1999, vol. 6, no. 3, p. 413.
30. Kikineshi, A., Palyok, V., Szabo, I.A., Shipljak, M., et al., Surface deformations and amplitude-phase recording in chalcogenide nanolayered structures, *J. Non-Cryst. Sol.*, 2003, vols. 326-327, p. 484.
[https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(03\)00457-5](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(03)00457-5)
31. Ivan, I., Beke, D.L., Kokenyesi, S., Szabo, I.A., et al., Light and ion induced interdiffusion in amorphous chalcogenide nanomultilayers, *J. Optoelectr. Adv. Mater.*, 2005, vol. 7, no. 4, p. 1831.
32. Adarsh, K.V., Sangunni, K.S., Shripathi, T., Kokenyesi, S., et al., Photoinduced interdiffusion in nanolayered Se/ As_2S_3 films: Optical and x-ray photoelectron spectroscopic studies, *J. Appl. Phys.*, 2006, vol. 99, no. 9, art. ID 094301.
<https://doi.org/10.1063/1.2193061>
33. Kokenyesi, S., Ivan, I., Csik, A., Szabo, I., et al., Stimulated interdiffusion and optical recording in amorphous chalcogenide nanomultilayers, *Proc. SPIE*, 2006, vol. 6327, art. ID 63270W.
<https://doi.org/10.1117/12.677658>
34. Takats, V., Nemeč, P., Csik, A. and Kokenyesi, S., Photo- and thermally induced interdiffusion in Se/ As_2S_3 nanomultilayers prepared by pulsed laser deposition and thermal evaporation, *J. Phys. Chem. Sol.*, 2007, vol. 68, nos. 5–6, p. 948.
<https://doi.org/10.1016/j.jpccs.2007.01.020>
35. Kokenyesi, S., Beke, D.L., Sangunni, K.S., Takats V., et al., Photo-induced transformations in amorphous chalcogenide nano-multilayers, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2009, т. 20, no. 1 (suppl.), p. 107.
<http://doi.org/10.1007/s10854-007-9460-9>
36. Takats, V., Miller, F., Jain, H., Cserhati, C., et al., Direct surface patterning of homogeneous and nanostructured chalcogenide layers, *Phys. stat. sol. (c)*, 2009, vol. 6, no. S1, p. S83.
<https://doi.org/10.1002/pssc.200881347>
37. Takats, V., *Photon and electron induced transformations and pattern formation in amorphous chalcogenide nano-layers*. PhD Thesis. Debrecen, 2012.
38. Abaskin, V., Achimova, E., Meshalkin, A., Prisacar, A., et al., Investigation of structural features of As_2S_3 -Se multilayer nanostructure by Raman spectroscopy, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2016, vol. 52, no. 4, p. 380.
<https://doi.org/10.3103/S1068375516040025>
39. Meshalkin, A.Yu., Reversible polarization recording in As_2S_3 -Se multilayer nanostructures, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2018, vol. 54, no. 4, p. 407.
<https://doi.org/10.3103/S1068375518040129>
40. Stronski, A., Revutska, L., Meshalkin, A., Paiuk, O., et al., Structural properties of Ag-As-S chalcogenide glasses in phase separation region and their application in holographic gratings recording, *Opt. Mater.*, 2019, vol. 94, p. 393.
<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.06.016>
41. Stronski, A., Achimova, E., Paiuk, O., Meshalkin, A., et al., Optical and electron-beam recording of surface relief's using $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$ -Se nanomultilayers as registering media, *J. Nano Res.*, 2016, vol. 39, p. 96.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.39.96>

Summary

Electron beam recording of raster images was carried out on the $\text{Ge}_5\text{As}_{37}\text{S}_{58}$ /Se nanolayered structure (NLS). The topography of the patterned NLS surface was studied using an atomic force microscope. According to the obtained results, the contribution of the lateral mass transport to the surface relief formation on the NLS was established. The formation of ridge-like lines on the NLS surface under the fast jumping of an electron beam between its targeted locations was revealed.

Keywords: electron beam recording, multilayer nanoperiodic structure, chalcogenide films, surface relief profile