

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ MATERIAL SCIENCE AND NANOTECHNOLOGIES

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-4-703-710

УДК 539.23

Особенности выращивания твердых растворов $Ga_{1-x}In_xAs$ на подложках GaAs в поле температурного градиента через тонкую газовую зону

Олег Васильевич Девицкий^{1✉}, Леонид Сергеевич Луний²,
Даниил Вячеславович Митрофанов³, Игорь Александрович Сысоев⁴,
Дмитрий Александрович Никулин⁵, Олег Михайлович Чапура⁶

^{1,2,5} Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, 344006, Российская Федерация

^{1,2,3,4,5,6} Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017, Российская Федерация

^{2,3,5} Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. Платова, Новочеркасск, 346428, Российская Федерация

¹ v2517@rambler.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0003-3153-696X>

² lunin_ls@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5534-9694>

³ danik-20@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0009-2137-4312>

⁴ elianpisia@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5415-0782>

⁵ dmitnikul@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0755-4068>

⁶ chapurol-7@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6691-0010>

Аннотация

Введение. Твердый раствор $Ga_{1-x}In_xAs$ имеет широкое применение в современной оптоэлектронике в качестве материала для *p-i-n* фотодетекторов и лазеров, излучающих в спектральном диапазоне 1,3–1,55 мкм. Исследованы особенности получения пленок $Ga_{1-x}In_xAs$ методом зонной перекристаллизации градиентом температур. Смысл метода заключается в последовательной перекристаллизации частей расплава источника, движущегося под действием температурного градиента. **Метод.** В поле температурного градиента 30 К/см через тонкую газовую зону в специально разработанной графитовой cassette получены пленки $Ga_{1-x}In_xAs$ на подложках GaAs при температуре 1123 К. В качестве газа носителя использована смесь азота и водорода в соотношении 1:1. Толщина газовой зоны между источником и подложкой составила 1 мм, время осаждения для всех пленок — 10 мин. **Основные результаты.** Исследована кинетика роста, морфология и структура химических связей полученных пленок. По результатам теоретического расчета установлено, что увеличение концентрации индия приводит к понижению скорости роста пленок до 0,3137 мкм/мин. Выполнено сравнение теоретического расчета и экспериментальных данных, которое показало расхождение значений скорости роста для пленок с концентрацией индия в ростовом источнике более 20 %, что связано с сегрегацией индия на поверхность пленки. Среднеквадратическая шероховатость пленок составила от 9,1 до 24,2 нм. Подтверждено, что содержание индия в ростовом источнике существенно влияет на свойства выращенных пленок и приводит к уменьшению скорости роста, увеличению упругих напряжений в слое и нестехиометрическому составу пленки. Установлено, что с увеличением концентрации индия в пленке наблюдается существенное смещение частоты LO- и TO-фононных мод GaAs влево на 13 и 16 см⁻¹ соответственно из-за влияния упругих механических напряжений. **Обсуждение.** Представленные результаты продемонстрировали, что методом зонной перекристаллизации в градиенте температур получены пленки твердого раствора $Ga_{1-x}In_xAs$, которые имеют ближний порядок химических связей.

Ключевые слова

поле температурного градиента, тонкая газовая зона, соединения III–V, $Ga_{1-x}In_xAs$, рамановская спектроскопия, атомно-силовая микроскопия

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ЮНЦ РАН № 122020100254-3 (исследования морфологии поверхности пленок) и № 122020100326-7 (рамановские исследования и определение химического состава), а также с использованием ресурсов центра коллективного пользования Северо-Кавказского федерального университета и при финансовой поддержке Минобрнауки России, уникальный идентификатор

© Девицкий О.В., Луний Л.С., Митрофанов Д.В., Сысоев И.А., Никулин Д.А., Чапура О.М., 2023

проекта RF-2296.61321X0029 (соглашение № 075-15-2021-687) (получение экспериментальных образцов пленок). Авторы выражают благодарность Северо-Кавказскому федеральному университету за помощь в рамках конкурса поддержки проектов научных групп и отдельных ученых университета.

Ссылка для цитирования: Девицкий О.В., Лунин Л.С., Митрофанов Д.В., Сысоев И.А., Никулин Д.А., Чапура О.М. Особенности выращивания твердых растворов $Ga_{1-x}In_xAs$ на подложках GaAs в поле температурного градиента через тонкую газовую зону // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 4. С. 703–710. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-4-703-710

Peculiarities of growing $Ga_{1-x}In_xAs$ solid solutions on GaAs substrates in the field of a temperature gradient through a thin gas zone

Oleg V. Devitsky¹, Leonid S. Lunin², Daniil V. Mitrofanov³, Igor A. Sysoev⁴,
Dmitry A. Nikulin⁵, Oleg M. Chapura⁶

^{1,2,5} Federal Research Center the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation

^{1,2,3,4,5,6} North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355017, Russian Federation

^{2,3,5} Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, 346428, Russian Federation

¹ v2517@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3153-696X>

² lunin_ls@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5534-9694>

³ danik-20@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0009-2137-4312>

⁴ eianpisia@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5415-0782>

⁵ dmitnikul@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0755-4068>

⁶ chapurol-7@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6691-0010>

Abstract

Solid solution $Ga_{1-x}In_xAs$ is widely used in modern optoelectronics as a material for $p-i-n$ photodetectors, lasers emitting in the spectral range 1.3–1.55 μm . In this paper, the features of obtaining $Ga_{1-x}In_xAs$ films by the method of zone recrystallization with a temperature gradient, the essence of which is the sequential recrystallization of parts of the source melt moving under the action of a temperature gradient, are studied. $Ga_{1-x}In_xAs$ films on GaAs substrates were obtained in a temperature gradient field through a thin gas zone in a specially designed graphite cassette. The films were prepared at a temperature of 1123 K with a temperature gradient of 30 K/cm. A 1:1 mixture of nitrogen and hydrogen was used as the carrier gas. The thickness of the gas zone between the source and the substrate was 1 mm. The deposition time for all films was 10 min. The growth kinetics, morphology, and structure of the chemical bonds of the obtained films have been studied. Based on the results of theoretical calculations, it was found that an increase in the concentration of indium leads to a decrease in the film growth rate to 0.3137 $\mu m/min$. A comparison of the results of theoretical calculations with experimental results showed a discrepancy between the growth rates for films with an indium concentration in the growth source of more than 20 %, which is primarily due to the segregation of indium on the film surface. The films have an RMS roughness from 9.1 to 24.2 nm. It is shown that the content of indium in the growth source significantly affects the properties of the grown films and leads to a decrease in the growth rate, an increase in the elastic stresses in the layer, and a nonstoichiometric composition of the film. It has been established that with an increase in the indium concentration in the film, a significant shift in the frequency of the LO and TO phonon modes of GaAs to the left by 13 and 16 cm^{-1} , respectively, is observed due to the influence of elastic mechanical stresses. The presented results show that $Ga_{1-x}In_xAs$ solid solution films with short-range order of chemical bonds were obtained by the method of zone recrystallization in a temperature gradient.

Keywords

temperature gradient field, thin gas band, III–V compounds, $Ga_{1-x}In_xAs$, Raman spectroscopy, atomic force microscopy

Acknowledgments

The work was carried out within the framework of the State Assignment no. 122020100254-3 (study of the surface morphology of films) and no. 122020100326-7 (Raman studies and determination of the chemical composition) of the SSC RAS as well as using the resources of the Center for Collective Use of the North Caucasus Federal University and with financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, unique identifier of the project RF-2296.61321X0029 (agreement no. 075-15-2021-687) (obtaining experimental film samples). The authors express their gratitude to the North Caucasus Federal University for their help in the framework of the competition to support projects of scientific groups and individual scientists.

For citation: Devitsky O.V., Lunin L.S., Mitrofanov D.V., Sysoev I.A., Nikulin D.A., Chapura O.M. Peculiarities of growing $Ga_{1-x}In_xAs$ solid solutions on GaAs substrates in the field of a temperature gradient through a thin gas zone. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 4, pp. 703–710 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-4-703-710

Введение

Гетероструктуры $Ga_{1-x}In_xAs/GaAs$ представляют большой интерес в оптоэлектронике для оптоволоконной техники [1–5]. В настоящее время для получения

данных гетероструктур используются методы: молекулярно-лучевой эпитаксии [6], химическое осаждение из паровой фазы металлоорганических соединений [7, 8], магнетронного напыления [9], импульсного лазерного напыления [10]. Для выращивания твердого раство-

ра $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ на подложках GaAs применяется метод жидкофазной эпитаксии [11, 12]. Известно об использовании одной из модификаций метода жидкофазной эпитаксии — зонной перекристаллизации градиентом температур (ЗПГТ) [13], суть которого заключается в последовательной перекристаллизации частей полупроводника жидкой зоной, движущейся под действием температурного градиента. В настоящей работе использован метод близкого переноса через тонкую газовую зону в поле температурного градиента — модификация метода ЗПГТ [14]. Особенность данного метода — наличие твердого источника заданного состава, с помощью которого осуществляется постоянная подпитка жидкой фазы в процессе роста эпитаксиального слоя. Управление процессом роста и составом пленок выполнен: градиентом температуры, температурой подложки, толщиной газового зазора и составом источника ростовых компонентов. Квазиравновесные условия роста и изотермичность метода ЗПГТ позволяют получать совершенные полупроводниковые кристаллы, твердые растворы, и как следствие, материалы с высокими оптическими и электрофизическими свойствами.

При получении многокомпонентных твердых растворов III-V соединений применяются только те компоненты, которые при взаимодействии с парами водорода и воды не дают устойчивых оксидов — для $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ (GaAs и InAs) [15]. Процесс градиентной эпитаксии предполагает протекание реакции в обоих направлениях при незначительных изменениях температуры. В зоне подложки при температуре ниже температуры источника происходит процесс синтеза соединений, сопровождающийся освобождением воды транспортера. Возникающий градиент концентраций стимулирует диффузионный перенос газообразных продуктов реакций InAs и GaAs к подложке. Скорость осаждения трехкомпонентного соединения $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ может быть рассчитана по эмпирической формуле [16]:

$$v_{\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}} = [(C_{\text{Ga}} + C_{\text{As}})v_{\text{GaAs}} + (C_{\text{In}} + C_{\text{As}})v_{\text{InAs}}]lG \cdot 10^{-5}, \quad (1)$$

где l — толщина газовой зоны, мкм; G — температурный градиент; C_{Ga} , C_{As} , C_{In} — концентрации компонент в источнике; v_{GaAs} , v_{InAs} — скорости роста бинарных компонентов $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$.

Скорости роста бинарных соединений GaAs и InAs рассчитаны по эмпирическим формулам:

$$v_{\text{GaAs}} = \frac{A_{\text{GaAs}}T^3 + B_{\text{GaAs}}T^2 + C_{\text{GaAs}}T + D_{\text{GaAs}}}{60}, \quad (2)$$

$$v_{\text{InAs}} = \frac{A_{\text{InAs}}T^3 + B_{\text{InAs}}T^2 + C_{\text{InAs}}T + D_{\text{InAs}}}{60}, \quad (3)$$

где T — температура подложки; коэффициенты имеют значения: $A_{\text{GaAs}} = 1,333 \cdot 10^{-6}$, $B_{\text{GaAs}} = -4,5714 \cdot 10^{-3}$, $C_{\text{GaAs}} = 4,928$, $D_{\text{GaAs}} = -1679$, $A_{\text{InAs}} = 5,705 \cdot 10^{-6}$, $B_{\text{InAs}} = -14,835 \cdot 10^{-3}$, $C_{\text{InAs}} = 12,75$, $D_{\text{InAs}} = -3608$.

Расчеты по формулам (1)–(3) показали, что при температуре подложки 1123 К, толщине газовой зоны 1000 мкм, температурном градиенте 30 К/см и значениях концентраций индия x_{In} в источнике 10 %, 20 % и

30 %, значения скоростей осаждения пленок $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ составили 0,3245, 0,3191 и 0,3137 мкм/мин. Результаты расчетов показали, что повышение концентрации индия приводит к понижению скорости роста, а увеличение температурного градиента — к его повышению.

Цель работы — изучение влияния состава источника при заданной величине температурного градиента на кинетические особенности роста пленок твердого раствора $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ на подложке GaAs в поле температурного градиента через тонкую газовую зону.

Материалы и методы

Для проведения процесса массопереноса использована специально разработанная графитовая кассета (рис. 1), состоящая из двух графитовых дисков. В углубление нижнего диска помещался прессованный порошок с необходимым составом $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$. Подложка GaAs размещалась на держатель, установленный в отверстии верхнего диска. Далее оба диска скреплялись с помощью зажима. Затем кассета помещалась в вакуумную камеру в подготовленный тепловой узел. Откачка воздуха производилась с помощью форвакуумного насоса до $5 \cdot 10^{-2}$ Па. После чего в камеру напускалась смесь газов — азота (N_2) и водорода (H_2) в пропорции 1:1. Пары воды, которые всегда имеются в водороде в малых количествах, являются переносчиком атомов $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ из источника на подложку [15].

Выращивание слоев выполнено на подложке GaAs при температуре 1123 К и температурном градиенте $G = 30$ К/см. Контроль значения температурного градиента проводился при помощи высокоточного регулятора температуры с цифро-аналоговым преобразователем с точностью поддержания температуры до $\pm 0,1$ °С. Термопары марки ТХА-0196-01 располагались между верхней и нижней частями графитовой кассеты и в определенном месте эквивалентном температурным условиям, что и подложка с источником в графитовой кассете. Между верхней и нижней термопарами расстояние составило 10 мм. В качестве подложек использованы пластины GaAs АГЧО (111), толщина газовой зоны между источником и подложкой — 1 мм. Источником

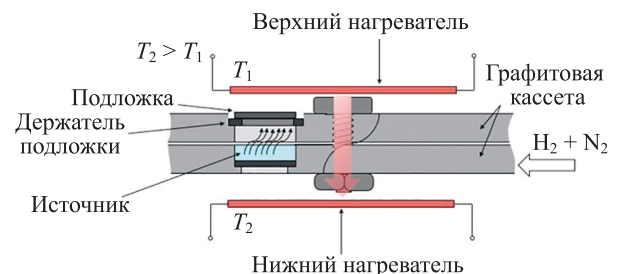


Рис. 1. Схематическое изображение процесса массопереноса в методе близкого переноса через тонкую газовую зону в поле температурного градиента:

где T_1 и T_2 — температура верхнего и нижнего нагревателя

Fig. 1. Schematic representation of the mass transfer process in the method of close transfer through a thin gas zone in the temperature gradient field: where T_1 and T_2 are the temperatures of the upper and lower heaters

ростовых компонентов являлась прессованная гомогенизированная шихта, состоящая из порошков GaAs и InAs с чистотой 99,99 % с различной концентрацией индия: x_{In} — 10 %, 20 % и 30 %. Время осаждения слоев составило 10 мин и являлось одинаковым для всех образцов.

Изучение распределения компонент твердого раствора в слое проведено системой энергодисперсионного рентгеноструктурного анализа (EDX) JEOL. Профиль концентрации по глубине вдоль скола пленок $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ с различной концентрацией x_{In} в источнике получен при помощи сканирующего электронного микроскопа MIRA 3 LMH с системой определения элементного состава AZtecEnergy Standard/Xmax 20 (Tescan).

Исследование морфологии поверхностей пленок $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ выполнено с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) на сканах 5×5 мкм и растровой микроскопии. Измерение толщины пленок на сколах гетероструктур проведено на растровом микроскопе Jeol JSM-6010 LA. Изучение структуры химических связей в твердом растворе $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ произведено методом рамановской спектроскопии. Рамановские спектры получены с помощью спектрометра inVia Raman Microscope (Renishaw) гелий-неоновым лазером с длиной волны 514 нм при комнатной температуре.

Результаты и обсуждение

Изучение кинетики роста проведено путем определения толщины пленок $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ на подложке GaAs по микрофотографиям сколов, полученных в режиме вторичных электронов (SEI) (рис. 2) и анализа профиля концентрации по глубине вдоль скола пленок (рис. 3).

По микрофотографиям сколов получены следующие значения толщин пленок: 2,98 мкм, 2,61 мкм и 1,31 мкм для концентраций индия x_{In} 10 %, 20 % и 30 % соответственно. Анализ профилей распределения Ga, As и In по глубине вдоль скола пленок продемонстрировал, что все выращенные пленки имеют неоднородный состав по глубине. По интервалу глубины от поверхности до значения концентрации индия менее 1 ат.% можно косвенно сделать вывод о толщине пленки. Исходя

из этого, толщины пленок при x_{In} 10 %, 20 % и 30 %, определенные по профилям концентраций, составили: 3,07 мкм, 2,66 мкм и 1,29 мкм. Полученные результаты соответствуют результатам микрофотографии сколов пленок. Метод EDX-анализа носит полуколичественный характер, однако в настоящей работе важно показать, как меняется локальная концентрация индия по толщине пленки.

Концентрация индия для пленок с x_{In} — 10 % и 20 % относительно равномерна по всей толщине, а для x_{In} равной 30 %, она монотонно убывает с увеличением глубины скола, что свидетельствует о сегрегации высокоподвижных атомов индия в приповерхностную область пленки. Можно предположить, что сегрегация идет по кинетической модели, потому что равновесный предел достигается только при низких скоростях роста пленок и высоких температурах подложки [17]. Индий выходит на поверхность только при обмене с атомами галлия, и в этом случае наблюдается флуктуация галлия и мышьяка по толщине растущей пленки.

Сравнение результатов измерения толщин пленок с результатами расчета их скорости роста показало значительное расхождение экспериментальных значений скорости. Данный результат связан с влиянием концентрации паров воды, содержащейся в водороде, которая достигала до 7 ppm и не была технологически устранена.

Проведено исследования морфологии поверхности. На рис. 4 приведены результаты АСМ-сканирования.

Повышение концентрации индия в составе твердого раствора $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ приводит к существенному изменению морфологии поверхности. Чем выше концентрация индия, тем выше перепад высот поверхности и более явно проявляется зернистая структура пленок. Выполнен анализ среднеквадратической шероховатости (R_q) для выращенных пленок. В качестве сравнения была измерена R_q подложки GaAs, которая составила 10,11 нм. Для пленок $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ получены следующие результаты: для концентрации индия: x_{In} 10 %, 20 %, 30 %: $R_q = 9,1; 17,9; 24,2$ нм. Таким образом, наиболее однородные пленки получены в условиях низкой концентрации индия. Сопоставление результатов анализа профиля концентрации по глубине вдоль скола пленок

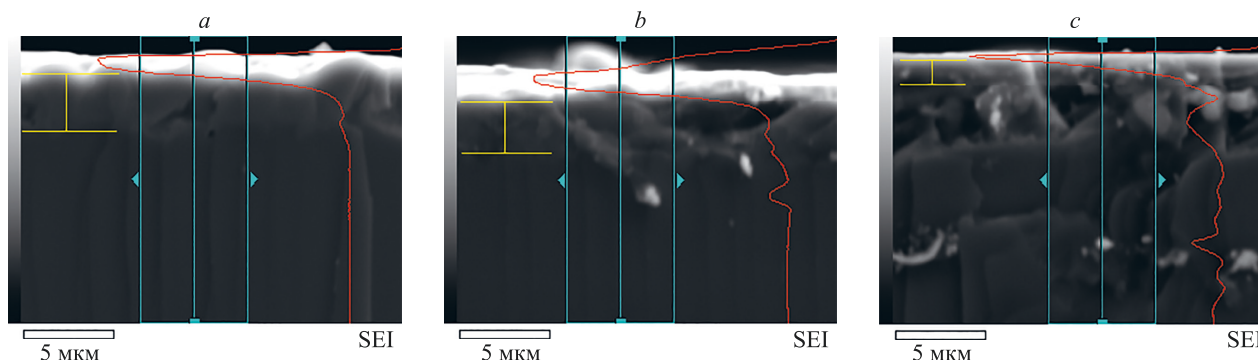


Рис. 2. Микрофотографии сколов пленок $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$, выращенных при $T = 1123$ К и $G = 30$ К/см для концентраций индия x_{In} : 10 % (a), 20 % (b) и 30 % (c) (толщина пленок ограничена желтыми линиями)

Fig. 2. Micrographs of the cleavage of $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ films grown at $T = 1123$ K and $G = 30$ K/cm for indium concentrations x_{In} : 10 % (a), 20 % (b) и 30 % (c) (film thickness is limited by yellow lines)

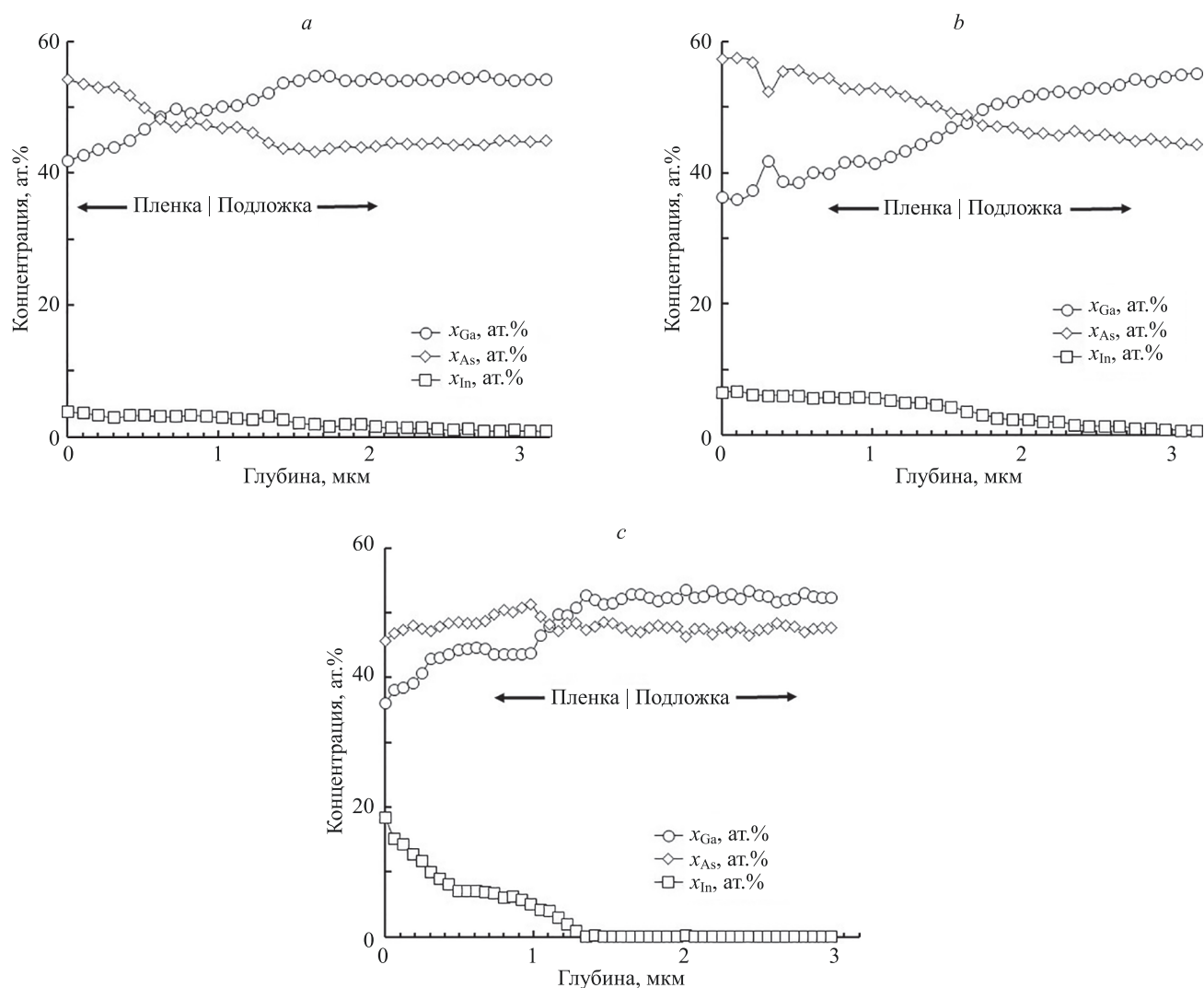


Рис. 3. Профиль концентрации по глубине вдоль скола пленок $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$, выращенных при $T = 1123$ К и $G = 30$ К/см для концентраций индия x_{In} : 10 % (a), 20 % (b) и 30 % (c)

Fig. 3. Concentration depth profile along the film cleavage of $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ films grown at $T = 1123$ K and $G = 30$ K/cm: for indium concentrations x_{In} : 10 % (a), 20 % (b), 30 % (c)

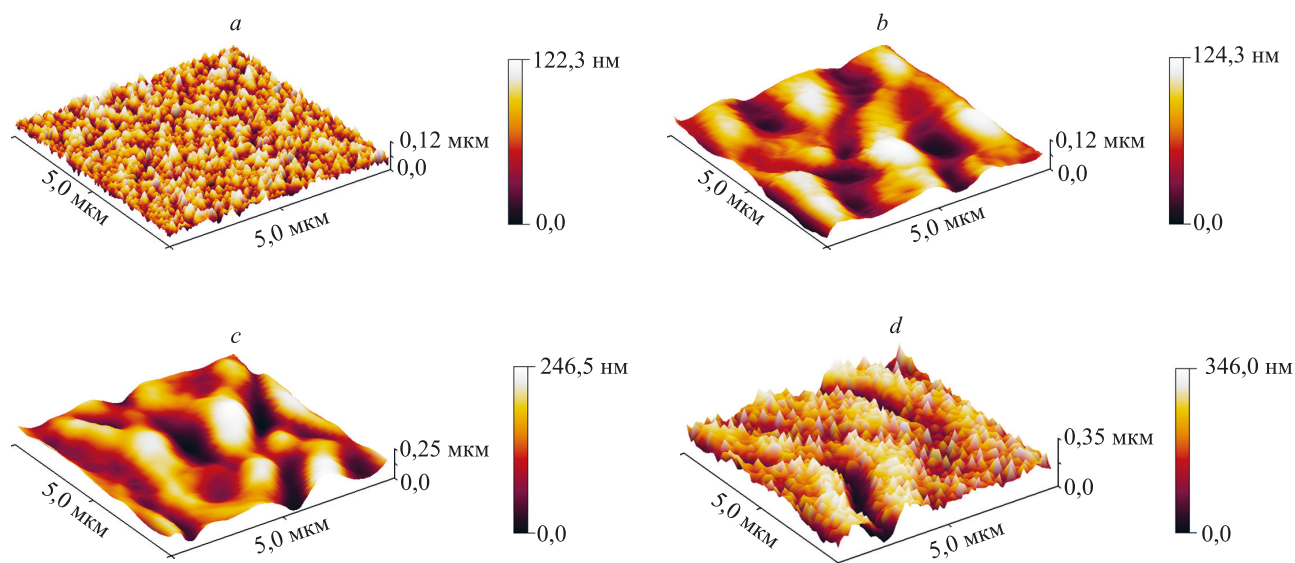


Рис. 4. АСМ-изображения морфологии поверхности $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$: $x_{\text{In}} = 0$ % (a), $x_{\text{In}} = 10$ % (b), $x_{\text{In}} = 20$ % (c), $x_{\text{In}} = 30$ % (d)

Fig. 4. AFM images of $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ surface morphology: $x_{\text{In}} = 0$ % (a), $x_{\text{In}} = 10$ % (b), $x_{\text{In}} = 20$ % (c), $x_{\text{In}} = 30$ % (d)

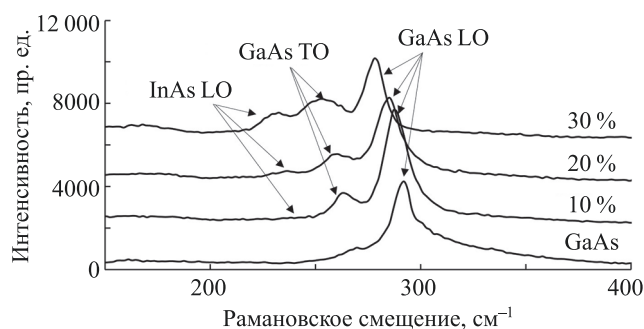


Рис. 5. Рамановские спектры пленок $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ при x_{In} : 10 %, 20 %, 30 % и подложки GaAs

Fig. 5. Raman spectra of $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ films at x_{In} : 10 %, 20 %, 30 % and GaAs substrates

и атомно-силовой спектроскопии свидетельствует о сильном влиянии индия в составе источника на их скорость роста при $G = 30$ К/см и $T = 1123$ К.

Результаты исследования пленок методом комбинационного рассеяния света представлены на рис. 5. В соответствии с правилом отбора для кристаллической решетки цинковой обманки можно индифицировать продольные (LO) и поперечные (TO) фононные моды GaAs и LO-моду InAs. Из спектров видно, что с увеличением концентрации In в пленке наблюдается существенное смещение частоты LO- и TO-фононных мод GaAs влево на 13 и 16 cm^{-1} . Это свидетельствует прежде всего о сильном влиянии упругих механических напряжений,

вызванных рассогласованием постоянных решеток пленки $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ и подложки GaAs [18].

Сегрегация индия (рис. 2) приводит к значительному смещению мод GaAs и InAs в выращенных пленках. Тем не менее, из рамановских исследований можно сделать вывод, что твердый раствор $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ синтезировался, но имеет ближний порядок химических связей. Результаты рамановской спектроскопии хорошо согласуются с результатами EDX-картирования и АСМ.

Заключение

Изучены особенности выращивания твердых растворов $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ на подложке GaAs в поле температурного градиента через тонкую газовую зону. Выращены пленки с толщинами от 2 до 3,2 мкм и исследована их кинетика роста, морфология поверхности и структура химических связей. Показано существенное влияние индия в составе ростового источника на свойства пленок $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$. Обнаружено, что при концентрации индия x_{In} более 20 % проявляется существенная сегрегация индия в слое $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ в направлении роста. Этот фактор также оказывает влияние на кинетику, снижая скорость роста, и приводит к увеличению шероховатости с 9,1 до 24,2 нм для x_{In} в диапазоне от 10 % до 30 % соответственно. Выращенные пленки обладают нестехиометрическим составом и ближним порядком химических связей элементов твердого раствора $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$.

Литература

1. Zimmer M., Trachtmann A., Jetter M., Michler P. MOVPE grown InGaAs quantum dots with emission near 1.3 μm for electrically driven single-photon sources // *Journal of Crystal Growth*. 2023. V. 605. P. 127081. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2023.127081>
2. Ozturk O., Ozturk E., Elagoz S. Linear and nonlinear optical absorption coefficient and electronic features of triple GaAlAs/GaAs and GaInAs/GaAs quantum wells depending on barrier widths // *Optik*. 2019. V. 180. P. 394–405. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.11.091>
3. Paulauskas T., Pačebutas V., Geizutis A., Kamarauskas M., Drazdys M., Rudzikas M., Kondrotas R., Naujokaitis A., Nevinskas I., Šebeka B., Strazdienė V., Krotkus A. Performance analysis of GaAsBi/InGaAs heterostructure for III-V multi-junction solar cells // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2022. V. 248. P. 112013. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.112013>
4. Nishiyama S., Takenaka C., Kusunoki T., Fujii T., Nakajima K. LPE growth of InP and InGaAs on MQW layers below 500°C // *Journal of Crystal Growth*. 1990. V. 104. N 4. P. 809–814. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(90\)90106-U](https://doi.org/10.1016/0022-0248(90)90106-U)
5. Bahari A., Salieneh M.G., Biranvand N. Structural nonlinear effects in $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ /GaAs heterostructure bipolar transistor lasers // *Optik*. 2015. V. 126. N 24. P. 5249–5252. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.08.269>
6. Li Y., Yan X., Zhang X., Wu Ch., Zheng J., Zha Ch., Fu T., Gong L., Ren X. Low-threshold miniaturized core-shell GaAs/InGaAs nanowire/quantum-dot hybrid structure nanolasers // *Optics and Laser Technology*. 2022. V. 152. P. 108150. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108150>
7. Chen X., Xiao Y., Cheng Y., Zhang Z., Gou Y., Wang J. MOCVD growth and thermal stability analysis of 1.2 μm InGaAs/GaAs multi quantum well structure // *Journal of Alloys and Compounds*. 2022. V. 922. P. 166173 <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166173>
8. Mintairov S.A., Emelyanov V.M., Rybalchenko D.V., Salii R.A., Timoshina N.K., Shvarts M.Z., Kalyuzhnyy N.A. Heterostructures of

References

1. Zimmer M., Trachtmann A., Jetter M., Michler P. MOVPE grown InGaAs quantum dots with emission near 1.3 μm for electrically driven single-photon sources. *Journal of Crystal Growth*, 2023, vol. 605, pp. 127081. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2023.127081>
2. Ozturk O., Ozturk E., Elagoz S. Linear and nonlinear optical absorption coefficient and electronic features of triple GaAlAs/GaAs and GaInAs/GaAs quantum wells depending on barrier widths. *Optik*, 2019, vol. 180, pp. 394–405. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.11.091>
3. Paulauskas T., Pačebutas V., Geizutis A., Kamarauskas M., Drazdys M., Rudzikas M., Kondrotas R., Naujokaitis A., Nevinskas I., Šebeka B., Strazdienė V., Krotkus A. Performance analysis of GaAsBi/InGaAs heterostructure for III-V multi-junction solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022, vol. 248, pp. 112013. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.112013>
4. Nishiyama S., Takenaka C., Kusunoki T., Fujii T., Nakajima K. LPE growth of InP and InGaAs on MQW layers below 500°C. *Journal of Crystal Growth*, 1990, vol. 104, no. 4, pp. 809–814. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(90\)90106-U](https://doi.org/10.1016/0022-0248(90)90106-U)
5. Bahari A., Salieneh M.G., Biranvand N. Structural nonlinear effects in $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ /GaAs heterostructure bipolar transistor lasers. *Optik*, 2015, vol. 126, no. 24, pp. 5249–5252. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.08.269>
6. Li Y., Yan X., Zhang X., Wu Ch., Zheng J., Zha Ch., Fu T., Gong L., Ren X. Low-threshold miniaturized core-shell GaAs/InGaAs nanowire/quantum-dot hybrid structure nanolasers. *Optics and Laser Technology*, 2022, vol. 152, pp. 108150. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108150>
7. Chen X., Xiao Y., Cheng Y., Zhang Z., Gou Y., Wang J. MOCVD growth and thermal stability analysis of 1.2 μm InGaAs/GaAs multi quantum well structure. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, vol. 922, pp. 166173 <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166173>
8. Mintairov S.A., Emelyanov V.M., Rybalchenko D.V., Salii R.A., Timoshina N.K., Shvarts M.Z., Kalyuzhnyy N.A. Heterostructures of

- metamorphic GaInAs photovoltaic converters fabricated by MOCVD on GaAs substrates // *Semiconductors*. 2016. V. 50. N 4. P. 517–522. <https://doi.org/10.1134/S1063782616040163>
9. Devitsky O.V., Zakharov A.A., Lunin L.S., Sysoev I.A., Pashchenko A.S., Vakalov D.S., Chapura O.M. Influence of magnetron sputtering conditions on the structure and surface morphology of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ thin films on a GaAs (100) substrate // *Condensed Matter and Interphases*. 2022. V. 24. N 3. P. 300–305. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9851>
 10. Lunin L.S., Lunina M.L., Devitsky O.V., Sysoev I.A. Pulsed laser deposition of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ and GaP thin films onto Si substrates for photoelectric converters // *Semiconductors*. 2017. V. 51. N 3. P. 387–391. <https://doi.org/10.1134/S1063782617030174>
 11. Сысоев И.А. Эпитаксия твердых растворов соединений АІІІВІ с микро- и наноструктурой в поле температурного градиента: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Ставрополь, 2010.
 12. Gorbachev A., De Anda Salazar F., Galván Montalvo J.A., Michourmyi V. Peculiarities of the thermodynamic conditions to grow InGaAs epitaxial layers by LPE on GaAs substrate at low temperatures // *MRS Advances*. 2021. V. 6. N 46. P. 1005–1009. <https://doi.org/10.1557/s43580-021-00198-8>
 13. Лозовский В.Н., Лунин Л.С., Попов В.П. Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов. М.: Металлургия, 1987. 232 с.
 14. Сысоев И.А., Лунин Л.С. Градиентная эпитаксия для получения микро- и наноструктур твердых растворов АІІІВІ через тонкую газовую фазу. Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2015. 94 с.
 15. Куликов И.С. Термодинамика оксидов. М.: Металлургия, 1986. 344 с.
 16. Dehaese O., Wallart X., Mollet F. Kinetic model of element III segregation during molecular beam epitaxy of III-III'-V semiconductor compounds // *Applied Physics Letters*. 1995. V. 66. N 1. P. 52–54. <https://doi.org/10.1063/1.114180>
 17. Zheng Y.-J., Lam A.M., Engstrom J.R. Modeling of Ge surface segregation in vapor-phase deposited $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ thin films // *Applied Physics Letters*. 1999. V. 75. N 6. P. 817–819. <https://doi.org/10.1063/1.124523>
 18. Pashchenko A.S., Devitsky O.V., Lunin L.S., Kasyanov I.V., Nikulin D.A., Pashchenko O.S. Structure and morphology of GaInAsP solid solutions on GaAs substrates grown by pulsed laser deposition // *Thin Solid Films*. 2022. V. 743. P. 139064. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.139064>
 - metamorphic GaInAs photovoltaic converters fabricated by MOCVD on GaAs substrates. *Semiconductors*, 2016, vol. 50, no. 4, pp. 517–522. <https://doi.org/10.1134/S1063782616040163>
 9. Devitsky O.V., Zakharov A.A., Lunin L.S., Sysoev I.A., Pashchenko A.S., Vakalov D.S., Chapura O.M. Influence of magnetron sputtering conditions on the structure and surface morphology of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ thin films on a GaAs (100) substrate. *Condensed Matter and Interphases*, 2022, vol. 24, no. 3, pp. 300–305. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9851>
 10. Lunin L.S., Lunina M.L., Devitsky O.V., Sysoev I.A. Pulsed laser deposition of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ and GaP thin films onto Si substrates for photoelectric converters. *Semiconductors*, 2017, vol. 51, no. 3, pp. 387–391. <https://doi.org/10.1134/S1063782617030174>
 11. Sysoev I.A. *Epitaxy of Solid Solutions of A3B5 Compounds with Micro and Nanostructures in the Field of a Temperature Gradient*. Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences. Stavropol, 2010. (in Russian)
 12. Gorbachev A., De Anda Salazar F., Galván Montalvo J.A., Michourmyi V. Peculiarities of the thermodynamic conditions to grow InGaAs epitaxial layers by LPE on GaAs substrate at low temperatures. *MRS Advances*, 2021, vol. 6, no. 46, pp. 1005–1009. <https://doi.org/10.1557/s43580-021-00198-8>
 13. Lozovsky V.N., Lunin L.S., Popov V.P. *Zone Recrystallization of Semiconductor Materials with a Temperature Gradient*. Moscow, Metallurgy Publ., 1987, 232 p. (in Russian)
 14. Sysoev I.A., Lunin L.S. *Gradient Epitaxy for Obtaining Micro- and Nanostructures of III-V Solid Solutions Through a thin Gas Phase*. Stavropol, NCFU Publ., 2015, 94 p. (in Russian)
 15. Kulikov I.S. *Thermodynamics of Oxides*. Moscow, Metallurgy Publ., 1986, 344 p. (in Russian)
 16. Dehaese O., Wallart X., Mollet F. Kinetic model of element III segregation during molecular beam epitaxy of III-III'-V semiconductor compounds. *Applied Physics Letters*, 1995, vol. 66, no. 1, pp. 52–54. <https://doi.org/10.1063/1.114180>
 17. Zheng Y.-J., Lam A.M., Engstrom J.R. Modeling of Ge surface segregation in vapor-phase deposited $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ thin films. *Applied Physics Letters*, 1999, vol. 75, no. 6, pp. 817–819. <https://doi.org/10.1063/1.124523>
 18. Pashchenko A.S., Devitsky O.V., Lunin L.S., Kasyanov I.V., Nikulin D.A., Pashchenko O.S. Structure and morphology of GaInAsP solid solutions on GaAs substrates grown by pulsed laser deposition. *Thin Solid Films*, 2022, vol. 743, pp. 139064. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.139064>

Авторы

Девицкий Олег Васильевич — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, 344006, Российская Федерация; старший научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017, Российская Федерация; [sc 57193670678](https://orcid.org/0000-0003-3153-696X), <https://orcid.org/0000-0003-3153-696X>, v2517@rambler.ru

Лу닌 Леонид Сергеевич — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, 344006, Российская Федерация; главный научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017, Российская Федерация; профессор, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. Платова, Новочеркасск, 346428, Российская Федерация, [sc 7004378221](https://orcid.org/0000-0002-5534-9694), <https://orcid.org/0000-0002-5534-9694>, lunin_ls@mail.ru

Митрофанов Даниил Вячеславович — младший научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017, Российская Федерация; аспирант, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. Платова, Новочеркасск, 346428, Российская Федерация, [sc 57226807601](https://orcid.org/0009-0009-2137-4312), <https://orcid.org/0009-0009-2137-4312>, danik-20@yandex.ru

Сысоев Игорь Александрович — доктор технических наук, доцент, директор научно-образовательного центра фотовольтаики и нанотехнологии, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017, Российская Федерация; [sc 32467535800](https://orcid.org/0000-0001-5415-0782), <https://orcid.org/0000-0001-5415-0782>, elianpisia@yandex.ru

Authors

Oleg V. Devitsky — PhD, Leading Researcher, Federal Research Center the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation; Senior Researcher, North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355017, Russian Federation, [sc 57193670678](https://orcid.org/0000-0003-3153-696X), <https://orcid.org/0000-0003-3153-696X>, v2517@rambler.ru

Leonid S. Lunin — D.Sc. (Physics & Mathematics), Chief Researcher, Federal Research Center the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation; Chief Researcher, North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355017, Russian Federation; Professor, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, 346428, Russian Federation, [sc 7004378221](https://orcid.org/0000-0002-5534-9694), <https://orcid.org/0000-0002-5534-9694>, lunin_ls@mail.ru

Daniil V. Mitrofanov — Junior Researcher, North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355017, Russian Federation; PhD Student, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, 346428, Russian Federation, [sc 57226807601](https://orcid.org/0009-0009-2137-4312), <https://orcid.org/0009-0009-2137-4312>, danik-20@yandex.ru

Igor A. Sysoev — D.Sc., Associate Professor, Director of the Scientific and Educational Center for Photovoltaics and Nanotechnology, North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355017, Russian Federation, [sc 32467535800](https://orcid.org/0000-0001-5415-0782), <https://orcid.org/0000-0001-5415-0782>, elianpisia@yandex.ru

Никулин Дмитрий Александрович — младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, 344006, Российская Федерация; младший научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017, Российская Федерация; аспирант, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. Платова, Новочеркасск, 346428, Российская Федерация, [sc 57213150940](https://orcid.org/0000-0003-0755-4068), <https://orcid.org/0000-0003-0755-4068>, dmitnikul@gmail.com

Чапуря Олег Михайлович — инженер-исследователь, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017, Российская Федерация; [sc 57209565002](https://orcid.org/0000-0002-6691-0010), <https://orcid.org/0000-0002-6691-0010>, chapuro1-7@mail.ru

Dmitry A. Nikulin — Junior Researcher, Federal Research Center the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation; Junior Researcher, North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355017, Russian Federation; PhD Student, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, 346428, Russian Federation, [sc 57213150940](https://orcid.org/0000-0003-0755-4068), <https://orcid.org/0000-0003-0755-4068>, dmitnikul@gmail.com

Oleg M. Chapura — Research Engineer, North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355017, Russian Federation, [sc 57209565002](https://orcid.org/0000-0002-6691-0010), <https://orcid.org/0000-0002-6691-0010>, chapuro1-7@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.02.2023

Одобрена после рецензирования 11.05.2023

Принята к печати 16.07.2023

Received 15.02.2023

Approved after reviewing 11.05.2023

Accepted 16.07.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»