

Научная статья

УДК 544.227

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17309>

## ВЛИЯНИЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ БОМБАРДИРОВКИ НА СОСТАВ И СТРУКТУРУ ПОВЕРХНОСТИ ФОСФИДА ГАЛЛИЯ

С. Б. Донаев<sup>1,2</sup> ✉, Г. М. Ширинов<sup>1</sup>, Б. Е. Умирзаков<sup>1</sup>, В. В. Лобода<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ташкентский государственный технический университет им. Ислама Каримова,  
г. Ташкент, Узбекистан;

<sup>2</sup>Каршинский государственный университет, г. Карши, Узбекистан;

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

✉ [sardor.donaev@gmail.com](mailto:sardor.donaev@gmail.com)

**Аннотация.** В работе изучены закономерности изменения состава и структуры поверхностных слоев GaP (111) при бомбардировке электронами с энергиями  $E_e = 3 - 10$  кэВ и дозами  $D = 10^{17} - 10^{20}$  см<sup>-2</sup>. Для этого использован метод оже-электронной спектроскопии и регистрация угловой зависимости коэффициента неупругого отражения электронов. Установлено, что при  $E_e = 3$  кэВ поверхностные слои GaP обогащаются атомами P, а случае  $E_0 = 10$  кэВ – атомами Ga. В обоих случаях профили распределения атомов Ga по глубине образца имеют немонотонный характер. Оценено значение энергии электронов, при котором происходит инверсия состава поверхности. Дан анализ полученных результатов.

**Ключевые слова:** оже-электронная спектроскопия, наноразмерная фаза, электронная бомбардировка, поверхностная концентрация атомов

**Для цитирования:** Донаев С. Б., Ширинов Г. М., Умирзаков Б. Е., Лобода В. В. Влияние низкоэнергетической электронной бомбардировки на состав и структуру поверхности фосфида галлия // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2024. Т. 17. № 3. С. 97–104. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17309>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17309>

## INFLUENCE OF LOW-ENERGY ELECTRON BOMBARDMENT ON THE COMPOSITION AND STRUCTURE OF THE GALLIUM PHOSPHIDE SURFACE

S. B. Donaev<sup>1,2</sup> ✉, G. M. ugli Shirinov<sup>1</sup>, B. Y. Umirzakov<sup>1</sup>, V. V. Loboda<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Tashkent State Technical University Named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan;

<sup>2</sup>Karshi State University, Karshi, Uzbekistan;

<sup>3</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ [sardor.donaev@gmail.com](mailto:sardor.donaev@gmail.com)

**Abstract.** In the paper, the patterns of changes in the composition and structure of the surface layers of GaP(111) in bombardment by electrons with energies from 3 to 10 keV and doses in the range  $10^{17} - 10^{20}$  cm<sup>-2</sup> have been studied using the method of Auger electron spectroscopy and recording the angular dependence of the electron inelastic reflection coefficient. It was established that the surface layers of GaP were enriched with P atoms at  $E = 3$  keV, and with

Ga atoms at  $E = 10$  keV. In both cases, the Ga atoms distribution profiles over the depth the sample were non-monotonic. The electron energy value at which an inversion of the surface composition took place was estimated. An analysis of the results obtained was given.

**Keywords:** Auger electron spectroscopy, nanosized phase, electron bombardment, surface concentration of atoms

**For citation:** Donaev S. B., Shirinov G. M. ugli, Umirzakov B. Y., Loboda V. V., Influence of low-energy electron bombardment on the composition and structure of the gallium phosphide surface, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 17 (3) (2024) 97–104. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17309>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

### Введение

Наноразмерные гетероструктуры на основе бинарных полупроводников, в том числе фосфида галлия GaP, широко используются и имеют перспективы создания монолитных оптоэлектронных интегральных схем, фотопреобразователей (солнечных элементов), лазеров оптической и электронной накачки, а также приборов СВЧ-электроники [1 – 6]. Поэтому в настоящее время актуальным является получение информации об электронных, оптических, эмиссионных и электрофизических свойствах указанных выше структур и анализ влияния различных воздействий на эти свойства [7 – 10].

Для модификации физических свойств бинарных соединений используются различные методы. Это термический прогрев, травление, лазерное облучение, а также ионные бомбардировка и имплантация. При этом для создания монолитных интегральных схем на поверхности подложки (как правило, используют кремний Si) будет необходимо выращивать эпитаксиальную пленку с прямозонным переходом [1, 11].

В работах [12 – 14] имплантацией ионов  $Al^{3+}$  в фосфид и арсенид галлия (GaP (111) и GaAs (111)) получены нанофазы и нанопленки GaAlP и GaAlAs. Установлено, что в случае нанофаз GaAlP с поверхностными размерами менее 35 – 40 нм и толщиной 3,5 – 4,0 нм проявляются квантоворазмерные эффекты. Вследствие большой ширины запрещенной зоны GaAsP (2,26 эВ) и благоприятных смещений валентной зоны и зоны проводимости [15, 16], КПД солнечных элементов на основе GaAsP/Si может теоретически достигать значения 41,9 % [17].

В последние годы проводились экспериментальные исследования и компьютерное моделирование влияния бомбардировки ионами инертных газов на состав и структуру поверхности пленок GaP, InGaP [18, 19].

В работе [19] изучено, например, влияние поверхностных дефектов на траекторию деканализированных ионов и ее зависимость от энергии и угла рассеяния этих ионов. Экспериментально установлено, что при бомбардировке поверхностей  $CoSi_2$  и GaP ионами аргона  $Ar^+$  происходит металлизация этих поверхностей [18].

Таким образом, в настоящее время хорошо изучено влияние ионной бомбардировки, прогрева и лазерного облучения на состав и физические свойства монокристаллов  $A^3B^5$ . Однако до настоящего времени практически не исследовано влияние электронной бомбардировки на состав и структуру монокристаллических образцов фосфида галлия.

Цель данной работы – проанализировать влияние электронной бомбардировки на состав и структуру поверхностного слоя монокристаллического фосфида галлия GaP (111).

### Методика эксперимента

В качестве объекта исследования выбраны монокристаллические образцы GaP (111) диаметром около 10 мм и толщиной 1 мм. Исследования образцов проводились с использованием методов оже-электронной спектроскопии (ЭОС) и регистрации угловой зависимости коэффициента неупругого отражения электронов (НУОЭ). Для определения профиля распределения внедренных атомов по глубине проводился послойный

оже-анализ путем распыления ионов аргона  $\text{Ar}^+$  с энергией 1 кэВ по поверхности образца; угол падения ионов составлял примерно  $80 - 85^\circ$  относительно нормали, скорость травления поверхности была около  $5 \pm 1 \text{ \AA}/\text{мин}$ .

### Результаты и обсуждение

Бомбардировка поверхности фосфида галлия проводилась электронами с энергиями  $E_e$  в интервале 3 – 10 кэВ с дозой  $D$  в интервале от  $10^{17}$  до  $10^{20} \text{ см}^{-2}$  и плотностью тока  $j$  порядка  $5 \cdot 10^{16} \text{ эл}/\text{см}^2$ . При повышении дозы до уровня  $D \approx 10^{18} \text{ см}^{-2}$  каких-либо заметных изменений состава и структуры поверхности фосфида галлия не наблюдалось. На рис. 1 приведены зависимости поверхностной концентрации атомов галлия  $C_{\text{Ga}}$  от дозы облучения  $D$  для фосфида галлия, бомбардированного электронами с энергиями 3 и 10 кэВ. Видно, что в случае значения энергии  $E_e = 3 \text{ кэВ}$  поверхностная концентрация галлия  $C_{\text{Ga}}$  в интервале доз  $D = 10^{17} - 10^{19} \text{ см}^{-2}$  монотонно снижается на 8 – 10 ат.%, т. е. поверхность обогащается атомами фосфора. В случае  $E_e = 10 \text{ кэВ}$ , с ростом дозы от  $10^{17}$  до  $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ ,  $C_{\text{Ga}}$  увеличивается на 12 – 15 ат.%. В обоих случаях дальнейшее увеличение дозы не приводит к изменению величины  $C_{\text{Ga}}$ , т. е. соответствующая кривая зависимости выходит на насыщение.

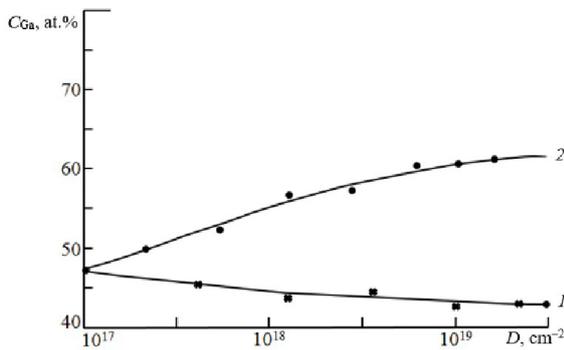


Рис. 1. Зависимости поверхностной концентрации атомов Ga от дозы электронной бомбардировки поверхности GaP с энергиями  $E_e = 3 \text{ кэВ}$  (1) и  $10 \text{ кэВ}$  (2)

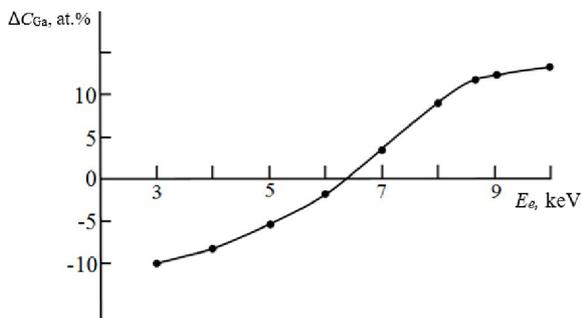


Рис. 2. Зависимость относительной поверхностной концентрации атомов Ga от энергии электронной бомбардировки  $E_e = 3 - 10 \text{ кэВ}$  при значении  $D = D_s$

рис. 3 этот коэффициент обозначен как  $\eta_{800}$ . Глубина выхода НУОЭ составляла порядка  $100 - 120 \text{ \AA}$ . На рис. 3 видно, что на кривой  $\eta(\varphi)$  необлученного GaP(111) обнаруживаются четко выраженные максимумы, обусловленные неупругим отражением электронов от различных кристаллографических плоскостей. После облучения электронами с  $E_e = 3 \text{ кэВ}$  происходит существенное снижение интенсивности поглощения и изменение его основных максимумов. По-видимому, полного разупорядочения слоев не происходит. В случае  $E_e = 10 \text{ кэВ}$  на кривых  $\eta(\varphi)$  полностью сглаживаются максимумы, что характерно для аморфизированных пленок.

Чтобы оценить изменение состава GaP в его приповерхностном слое в процессе электронной бомбардировки, при  $D = D_s$  регистрировались профили распределения атомов

При  $E_e = 3 \text{ кэВ}$  доза насыщения  $D_s$  составляет  $10^{19} \text{ см}^{-2}$ , а при  $E_e = 10 \text{ кэВ}$   $D_s \approx 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ . Таким образом, при дозе  $D_s = D_s$  поверхностная концентрация  $C_{\text{Ga}}$  может снижаться или возрастать в зависимости от энергии  $E_e$ .

На рис. 2 приведена зависимость относительной поверхностной концентрации  $\Delta C_{\text{Ga}}$  от энергии  $E_e$  в интервале значений  $E_e = 3 - 10 \text{ кэВ}$  при  $D = D_s$ . Видно, что в диапазоне  $E_e = 6 - 7 \text{ кэВ}$  кривая указанной зависимости проходит через нулевое значение. Начиная с  $E_e \approx 9 \text{ кэВ}$  скорость изменения величины  $\Delta C_{\text{Ga}}$  снижается. В процессе электронной бомбардировки происходит разложение фосфида галлия на составляющие атомы и имеет место разупорядочение поверхности в приповерхностной области GaP.

Степень разупорядочения поверхности оценивалась на основе угловых зависимостей коэффициента неупругого отражения электронов  $\eta$  при  $E_{dis} = 800 \text{ эВ}$ ; на

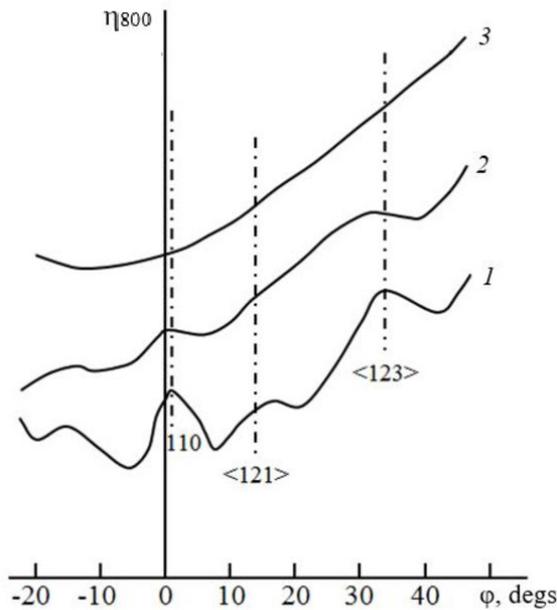


Рис. 3. Угловые зависимости коэффициента неупругого отражения электронов поверхностью GaP до бомбардировки (кривая 1); GaP, бомбардированного электронами с энергией 3 кэВ (кривая 2) и 10 кэВ (кривая 3).

Вертикальными штрихпунктирными линиями показаны позиции максимумов на кривых, связанных с неупругим отражением электронов от различных кристаллографических плоскостей GaP.  $E_{dis} = 800$  эВ

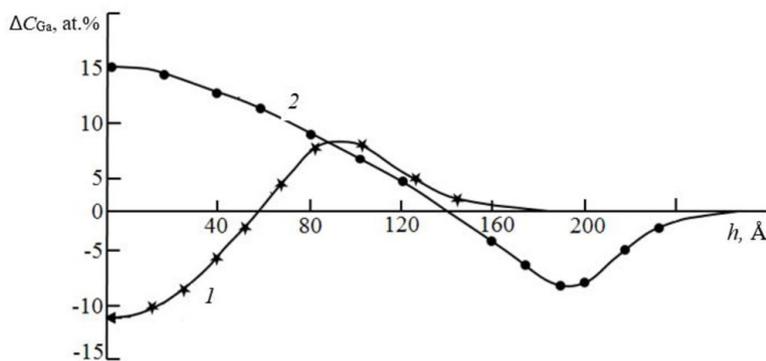


Рис. 4. Профили распределения атомов Ga по глубине  $h$  образца GaP, бомбардированного электронами с энергиями  $E_e = 3$  кэВ (1) и 10 кэВ (2), при  $D = D_s$

Таким образом, поверхностные слои при значениях глубины не более 50 Å обогащаются атомами фосфора и обедняются атомами галлия. Уход атомов фосфора из приповерхностного слоя при значениях  $h \approx 50 - 90$  Å приводит к росту в этом слое концентрации атомов галлия (см. кривую 1 на рис. 4). Это следует из того, что площади под кривыми  $-\Delta C_{Ga}(h)$  и  $+\Delta C_{Ga}(h)$  практически не различаются. В случае же энергии электронов  $E_e = 10$  кэВ основное изменение состава происходит до глубин  $h \approx 250 - 300$  Å. При этом испаряется большая часть атомов фосфора, диффундирующая к поверхности; это

галлия по глубине  $h$  образца (рис. 4). Видно, что при  $E_e = 3$  кэВ относительная концентрация галлия  $\Delta C_{Ga}$  до глубины 15 – 20 Å заметно не меняется (см. кривую 1 на рис. 4), тогда как в интервале значений глубины  $h \approx 20 - 110$  Å она монотонно растет от приблизительно –10 до +9 ат.%, затем, по мере роста глубины, она примерно экспоненциально снижается и при  $h \approx 160 - 165$  Å приближается к нулю. В случае, когда энергия  $E_e = 10$  кэВ, кривая  $\Delta C_{Ga}(h)$ , снижаясь, проходит через нуль, затем через минимум при  $h \approx 200$  Å, экспоненциально растет и наконец приближается к нулю, начиная с  $h \approx 250$  Å.

**Анализ полученных результатов.** При бомбардировке электронами основные изменения состава и структуры поверхностных и приповерхностных слоев происходят при дозах  $D$  не менее  $10^{17}$  см<sup>-2</sup>. Заметное разложение фосфида галлия на составляющие атомы и разупорядочение приповерхностных слоев происходит при энергии  $E_e \approx 3$  кэВ, начиная с дозы  $D \approx 4 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup>, а при  $E_e \approx 10$  кэВ – начиная с дозы  $D \approx 10^{17}$  см<sup>-2</sup>. С повышением дозы электронного облучения степень разупорядочения поверхностных слоев GaP увеличивается как в случае  $E_e = 3$  кэВ, так и при  $E_e = 10$  кэВ.

В процессе электронной бомбардировки атомы фосфора диффундируют в сторону поверхности вследствие разницы в атомных массах фосфора и галлия (атомная масса P меньше, чем атомная масса Ga). По-видимому, при энергии электронов  $E_e = 3$  кэВ, только малая часть молекул фосфида галлия разлагается и заметного испарения атомов с поверхности не происходит.



означает обогащение атомами Ga поверхностных слоев до значений глубины 120 – 150 Å. Небольшая часть атомов фосфора оказывается неспособной диффундировать вплоть до поверхности, и эти атомы увеличивают концентрацию фосфора на глубинах 160 – 240 Å (см. кривую 2 на рис. 4).

### Заключение

Впервые изучено влияние электронной бомбардировки на состав и кристаллическую структуру поверхности GaP (111), служащей в качестве мишени, в интервале энергий электронов  $E_e = 3 - 10$  кэВ. Определены изменения концентрации атомов галлия и фосфора на поверхности и их профили распределения по глубине в зависимости от энергии и дозы электронов. Показано, что при  $E_e \leq 6$  кэВ поверхностная область GaP обогащается атомами фосфора, а при  $E_e \geq 6$  кэВ – атомами галлия. Согласно полученным оценкам, значение энергии электронов, при котором происходит инверсия состава поверхностного слоя, составило примерно 6,4 кэВ.

Полученные в работе результаты могут быть полезны при разработке и создании монокристаллических интегральных схем на основе соединений  $A^{III}B^V$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лазаренко А. А., Никитина Е. В., Пирогов Е. В., Соболев М. С., Егоров А. Ю. Молекулярно-пучковая эпитаксия азотсодержащих твердых растворов GaPN, GaPAsN и InGaPN // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48. № 3. С. 407–411.
2. Yonezu H., Furukawa Y., Wakahara A. III–V epitaxy on Si for photonics applications // Journal of Crystal Growth. 2008. Vol. 310. No. 23. Pp. 4757–4762.
3. Егоров А. Ю., Крыжановская Н. В., Соболев М. С. Оптические свойства квантово-размерных гетероструктур на основе твердых растворов  $GaP_xN_yAs_{1-x-y}$  // Физика и техника полупроводников. 2011. № 9. С. 1209–1213.
4. Yonezu H. Control of structural defects in-group III–V–N alloys grown on Si // Semiconductor Science and Technology. 2002. Vol. 17. No. 8. Pp. 762–768.
5. Ладугин М. А., Андреев А. Ю., Яроцкая И. В., Рябоштан Ю. Л., Багаев Т. А., Падалица А. А., Мармалюк А. А., Васильев М. Г. Сравнительный анализ квантовых ям GaAs/GaInP и GaAs/AlGaAs, полученных в условиях МОС-гидридной эпитаксии // Неорганические материалы. 2019. Т. 55. № 4. С. 345–349.
6. Razeghi M. Technology of quantum devices. New York: Springer, 2016. 560 p.
7. Планкина С. М., Вихрова О. В., Звонков Б. Н., Зубков С. Ю., Крюков Р. Н., Нежданов А. В., Павлов Д. А., Пашенькин И. Ю., Сушков А. А. Комплексное применение спектроскопии комбинационного рассеяния света и фотолюминесценции для диагностики многослойных гетероструктур // Физика и техника полупроводников. 2019. Т. 53. № 9. С. 1233–1236.
8. Limmer W., Glunk M., Mascheck S., Koeder A., Klarer D., Schoch W., Thonke K., Sauer R., Waag A. Coupled plasmon-LO-phonon modes in  $Ga_{1-x}Mn_xAs$  // Physical Review B. 2002. Vol. 66. No. 20. P. 205209.
9. Bonera E., Fanciulli M., Batchelder D. N. Raman spectroscopy for a micrometric and tensorial analysis of stress in silicon // Applied Physics Letters. 2002. Vol. 81. No. 18. Pp. 3377–3379.
10. Соболев М. С., Лазаренко А. А., Никитина Е. В., Пирогов Е. В., Гудовских А. С., Егоров А. Ю. Молекулярно-пучковая эпитаксия GaP на подложке Si // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. № 4. С. 569–572.
11. Furykawa Y., Yoneza H., Wakahara A. Monolithic integration of light-emitting devices and silicon transistors // SPIE Newsroom. 2007. 19 November. [https://spie.org/news/0914-monolithic-integration-of-light-emitting-devices-and-silicon-transistors#\\_=\\_](https://spie.org/news/0914-monolithic-integration-of-light-emitting-devices-and-silicon-transistors#_=_).
12. Данаев С. Б., Умирзаков Б. Е., Ташмухамедова Д. А. Электронная структура наноразмерных структур  $Ga_{1-x}Al_xAs$ , созданных на поверхности GaAs методом ионной имплантации // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 10. С. 148–151.
13. Умирзаков Б. Е., Ташмухамедова Д. А., Мурадкабилов Д. М., Болтаев Х. Х. Электронная спектроскопия наноструктур, созданных в поверхностных слоях Si, GaAs и  $CaF_2$  методом низкоэнергетической ионной имплантации // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. № 6. С. 66–70.

14. Shirinov G. M., Donaev S. B., Umirzakov B. Y., Loboda V. V. Emission, optical and electrical properties of GaInP/GaP nanofilms // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2023. Vol. 16. No. 2. Pp. 89–93.
15. Feifel M., Ohlmann J., Benick J., et al. MOVPE grown gallium phosphide-silicon heterojunction solar cells // IEEE Journal of Photovoltaics. 2017. Vol. 7. No. 2. Pp. 502–507.
16. Garcia-Tabares E., Martin D., Garcia I., Lelievre J. F., Rey-Stolle I. Optimization of the silicon subcell for III-V on silicon multijunction solar cells: Key differences with conventional silicon technology // AIP Conference. Proceedings. 2012. Vol. 1477. Pp. 5–9.
17. Connolly J. P., Mencaraglia D., Renard C., Bouchier D. Designing III-V multijunction solar cells on silicon // Progress in Photovoltaics: Research and Application. 2014. Vol. 22. No. 7. Pp. 810–820.
18. Boltaev X. X., Tashmuhamedova D. A., Donaev S. B., Umirzakov B. E. Influence of bombardment of ions Ar<sup>+</sup> on property and structure of surface nanofilms CoSi<sub>2</sub>/Si(111) // Proceedings of the Conference on Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS-2014). Munster, Germany, September 7–9, 2014. P. 125.
19. Kutliev U. O., Otabaev M. U., Karimov M. K., Masharipov F. K., Woiciechowski I. Scattering of low-energy Ne<sup>+</sup> ions from the stepped surface of InGaP(001) <110> at the small angles of incidence // Physics and Chemistry of Solid State. 2023. Vol. 24. No. 3. Pp. 542–548.

## REFERENCES

1. Lazarenko A. A., Nikitina E. V., Pirogov E. V., et al., Molecular beam epitaxy of GaPN, GaPAsN, and InGaPN nitride solid solutions, *Semicond.* 48 (3) (2014) 392–396.
2. Yonezu H., Furukawa Y., Wakahara A., III–V epitaxy on Si for photonics applications, *J. Cryst. Growth.* 310 (23) (2008) 4757–4762.
3. Egorov A. Yu., Kryzhanovskaya N. V., Sobolev M. S., Optical properties of quantum-confined heterostructures based on GaP<sub>x</sub>N<sub>y</sub>As<sub>1-x-y</sub> alloys, *Semicond.* 45 (9) (2011) 1164–1168.
4. Yonezu H., Control of structural defects in-group III–V–N alloys grown on Si, *Semicond. Sci. Technol.* 17 (8) (2002) 762–768.
5. Ladugin M. A., Andreev A. Yu., Yarotskaya I. V., et al., Comparative study of GaAs/GaInP and GaAs/AlGaAs quantum wells grown by metalorganic vapor phase epitaxy, *Inorg. Mater.* 55 (4) (2019) 315–319.
6. Razeghi M., *Technology of quantum devices*, Springer, New York, 2016.
7. Plankina S. M., Vikhrova O. V., Zvonkov B. N., et al., On the combined application of Raman spectroscopy and photoluminescence spectroscopy for the diagnostics of multilayer heterostructures, *Semicond.* 53 (9) (2019) 1207–1210.
8. Limmer W., Glunk M., Mascheck S., et al., Coupled plasmon-LO-phonon modes in Ga<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>As, *Phys. Rev. B.* 66 (20) (2002) 205209.
9. Bonera E., Fanciulli M., Batchelder D. N., Raman spectroscopy for a micrometric and tensorial analysis of stress in silicon, *Appl. Phys. Lett.* 81 (18) (2002) 3377–3379.
10. Sobolev M. S., Lazarenko A. A., Nikitina E. V., et al., MBE growth of GaP on a Si substrate, *Semicond.* 49 (4) (2015) 559–562.
11. Furykawa Y., Yoneza H., Wakahara A., Monolithic integration of light-emitting devices and silicon transistors, *SPIE Newsroom*. 19 Nov. 2007. [https://spie.org/news/0914-monolithic-integration-of-light-emitting-devices-and-silicon-transistors#\\_=\\_](https://spie.org/news/0914-monolithic-integration-of-light-emitting-devices-and-silicon-transistors#_=_).
12. Donaev S. B., Umirzakov B. E., Tashmukhamedova D. A., Electronic structure of Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As nanostructures grown on the GaAs surface by ion implantation, *Tech. Phys.* 60 (10) (2015) 1563–1566.
13. Umirzakov B. E., Tashmukhamedova D. A., Muradkabilov D. M., Boltaev Kh. Kh., Electron spectroscopy of the nanostructures created in Si, GaAs, and CaF<sub>2</sub> surface layers using low-energy ion implantation, *Tech. Phys.* 58 (6) (2013) 841–844.
14. Shirinov G. M., Donaev S. B., Umirzakov B. Y., Loboda V. V., Emission, optical and electrical properties of GaInP/GaP nanofilms, *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics.* 16 (2) (2023) 89–93.
15. Feifel M., Ohlmann J., Benick J., et al., MOVPE grown gallium phosphide-silicon heterojunction solar cells, *IEEE J. Photovolt.* 7 (2) (2017) 502–507.



16. **Garcia-Tabares E., Martin D., Garcia I., et al.**, Optimization of the silicon subcell for III-V on silicon multijunction solar cells: Key differences with conventional silicon technology, AIP Conf. Proc. 1477 (2012) 5–9.
17. **Connolly J. P., Mencaraglia D., Renard C., Bouchier D.**, Designing III-V multijunction solar cells on silicon, Prog. Photovolt. Res. Appl. 22 (7) (2014) 810–820.
18. **Boltaev X. X., Tashmuhamedova D. A., Donaev S. B., Umirzakov B. E.**, Influence of bombardment of ions Ar<sup>+</sup> on property and structure of surface nanofilms CoSi<sub>2</sub>/Si(111), Proc. of SIMS-2014, Munster, Germany; Sept. 7–9 (2014) 125.
19. **Kutliev U. O., Otabaev M. U., Karimov M. K., et al.**, Scattering of low-energy Ne<sup>+</sup> ions from the stepped surface of InGaP(001) <110> at the small angles of incidence, Phys. Chem. Solid State. 24 (3) (2023) 542–548.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ДОНАЕВ Сардор Бурханович** – доктор физико-математических наук, проректор по науке и инновациям Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Узбекистан.

100095, Узбекистан, г. Ташкент, Университетская ул., 2  
sardor.donaev@gmail.com  
ORCID: 0000-0001-5656-126X

**ШИРИНОВ Ганжимурад Мамир угли** – докторант кафедры общей физики Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Узбекистан.

100095, Узбекистан, г. Ташкент, Университетская ул., 2  
ganjimurod777@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-7188-2560

**УМИРЗАКОВ Балтоходжа Ерматович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Узбекистан.

100095, Узбекистан, г. Ташкент, Университетская ул., 2  
be.umirzakov@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-9815-2111

**ЛОБОДА Вера Владимировна** – кандидат физико-математических наук, директор Высшей школы электроники и микросистемной техники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
vera\_loboda@mail.ru  
ORCID: 0000-0003-3103-7060

### THE AUTHORS

#### **DONAEV Sardor B.**

Tashkent State Technical University Named after Islam Karimov,  
Karshi State University  
2, Universitetskaya St., Tashkent, 100095, Uzbekistan  
sardor.donaev@gmail.com  
ORCID: 0000-0001-5656-126X

#### **SHIRINOV Ganjimurod M. ugli**

Tashkent State Technical University Named after Islam Karimov  
2, Universitetskaya St., Tashkent, 100095, Uzbekistan  
ganjimurod777@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-7188-2560

**UMIRZAKOV Baltokhodja Y.**

*Tashkent State Technical University Named after Islam Karimov*

2, Universitetskaya St., Tashkent, 100095, Uzbekistan

be.umirzakov@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9815-2111

**LOBODA Vera V.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

vera\_loboda@mail.ru

ORCID: 0000-0003-3103-7060

*Статья поступила в редакцию 19.02.2024. Одобрена после рецензирования 09.04.2024.  
Принята 09.04.2024.*

*Received 19.02.2024. Approved after reviewing 09.04.2024. Accepted 09.04.2024.*