

## НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ MATERIAL SCIENCE AND NANOTECHNOLOGIES

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-191-197

УДК 539.23

### Численное моделирование функциональных характеристик солнечных элементов на основе гетероструктур InGaAsN/Si

Олег Васильевич Девицкий<sup>1</sup>✉, Сохибжон Ориф угли Санакулов<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, 344006, Российская Федерация

<sup>2</sup> Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017, Российская Федерация

<sup>1</sup> [v2517@rambler.ru](mailto:v2517@rambler.ru)✉, <https://orcid.org/0000-0003-3153-696X>

<sup>2</sup> [sohibsanakuqulov@gmail.com](mailto:sohibsanakuqulov@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-3620-9792>

#### Аннотация

**Предмет исследования.** Впервые выполнено численное моделирование и оптимизация вольтамперных характеристик принципиально нового однопереходного солнечного элемента на основе гетероструктуры  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y/\text{Si}$ . Интеграция многокомпонентных слоев  $\text{A}^3\text{B}^5$  и разбавленных нитридов  $\text{A}^3\text{B}^5\text{N}$  с кремниевыми подложками на данный момент является технологически сложным процессом. Несмотря на всю сложность данной интеграции существуют определенные предпосылки, которые возможно позволят получить слои  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  с относительно низкой плотностью дефектов. Твердый раствор  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  является перспективным для применения в оптоэлектронике, но в то же время малоизученным. **Метод.** Численное моделирование проводилось с помощью программного продукта AFORS HET v2.5. При расчете параметров солнечного элемента  $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}_{1-y}\text{N}_y/\text{Si}$  изменялась концентрация азота  $y$  в диапазоне 0–5 %; толщина слоя  $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  варьировалась в пределах 0,3–0,8 мкм; степени легирования базы и эмиттера солнечного элемента менялись в интервале  $10^{16}$ – $8 \cdot 10^{19}$   $\text{см}^{-3}$ . Исследованы зависимости вольтамперной и спектральной характеристик от толщины и состава эмиттера, степени легирования слоев. **Основные результаты.** Показано, что солнечные элементы, состоящие из гетероперехода  $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}_{0,98}\text{N}_{0,02}/\text{Si}$ , могут достигать эффективности 22,2 % при освещении AM1.5. Результаты моделирования влияния концентрации азота на величину эффективности солнечных элементов показали, что изменение концентрации азота от 0 до 5 % в слое  $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  приводит к снижению эффективности от 21,9 до 21,82 % соответственно. Этот факт прежде всего обусловлен снижением значения ширины запрещенной зоны эмиттера и, как следствие, уменьшением величины напряжения холостого хода солнечного элемента. Установлено, что увеличение концентрации примеси в эмиттере  $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}_{0,98}\text{N}_{0,02}$  в диапазоне  $10^{16}$ – $8 \cdot 10^{19}$   $\text{см}^{-3}$  приводит к росту эффективности солнечного элемента с 17,11 до 21,89 %. При увеличении концентрации примеси в базе  $p$ -Si в интервале  $10^{16}$ – $5 \cdot 10^{17}$   $\text{см}^{-3}$  наблюдается устойчивый рост эффективности вплоть до 22,2 %, а после — монотонное снижение до 10,87 % при концентрации примеси  $5 \cdot 10^{17}$   $\text{см}^{-3}$ . При снижении толщины эмиттера квантовая эффективность солнечного элемента увеличивается вследствие снижения числа фотогенерированных носителей заряда. **Практическая значимость.** В результате численного моделирования в программном продукте AFORS HET v2.5 определено, что напряжение холостого хода солнечных элементов на основе гетероструктуры  $n$ - $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}_{0,98}\text{N}_{0,02}/p$ -Si составляет 716,8 мВ, при плотности тока короткого замыкания 36,52 мА/см<sup>2</sup>, факторе заполнения — 84,81 % и эффективности 22,2 %.

#### Ключевые слова

гетероструктуры, InGaAsN, AFORS HET, солнечные элементы, многокомпонентные твердые растворы,  $\text{A}^3\text{B}^5\text{N}/\text{Si}$

#### Благодарности

Публикация подготовлена в рамках реализации государственного задания «Разработка и создание полупроводниковых гетероинтерфейсов на основе многокомпонентных материалов для устройств СВЧ-электроники и фотоники» на 2021 г. (номер государственной регистрации АААА-А19-119040390081-2).

**Ссылка для цитирования:** Девицкий О.В., Санакулов С.О. Численное моделирование функциональных характеристик солнечных элементов на основе гетероструктур InGaAsN/Si // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 2. С. 191–197. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-191-197

© Девицкий О.В., Санакулов С.О., 2021

**Numerical simulation of functional characteristics of solar elements InGaAsN/Si****Oleg V. Devitsky<sup>1</sup>, Sohibjon O. Sanakulov<sup>2</sup>**<sup>1,2</sup> Federal Research Center the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation<sup>2</sup> North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355017, Russian Federation<sup>1</sup> v2517@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3153-696X><sup>2</sup> sohibsanaqulov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3620-9792>**Abstract**

For the first time, numerical simulation and optimization of the current-voltage characteristics of a fundamentally new single-junction solar cell based on the  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y/\text{Si}$  heterostructure were carried out. The integration of multicomponent layers  $\text{A}^3\text{B}^5$  and dilute nitrides  $\text{A}^3\text{B}^5\text{N}$  with silicon substrates is currently a technologically complex process. Despite the complexity of this integration, there are certain prerequisites that may make it possible to obtain  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  layers with a relatively low defect density. The  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  solid solution is quite promising for use in optoelectronics, but at the same time it is poorly studied. Numerical modeling was carried out using the AFORS HET v2.5 software product. When numerically calculating the parameters of the solar cell  $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{As}_{1-y}\text{N}_y/\text{Si}$ , we obtained the following data: the nitrogen concentration  $y$  varied in the range from 0 to 5 %; the thickness of the  $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  layer varied within 0.3–0.8  $\mu\text{m}$ ; the degree of doping of the base and the emitter of the SC varied in the range  $10^{16}$ – $8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . The dependences of the current-voltage and spectral characteristics on the thickness and composition of the emitter, as well as the degree of doping of the layers were investigated. It is shown that solar cells consisting of the  $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{As}_{0.98}\text{N}_{0.02}/\text{Si}$  heterojunction can achieve an efficiency of 22.2 % under illumination AM1.5. Modeling the effect of nitrogen concentration on the efficiency of solar cells showed that a change in nitrogen concentration from 0 to 5 % in the  $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  layer leads to a decrease in the efficiency of 21.9 % to 21.82 %, respectively. This fact is primarily due to a decrease in the value of the energy gap of the emitter and, as a consequence, to a decrease in the value of the open circuit voltage of the solar cell. It was found that an increase in the impurity concentration in the  $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{As}_{0.98}\text{N}_{0.02}$  emitter in the range  $10^{16}$ – $8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  leads to an increase in the solar cell efficiency from 17.11 % to 21.89 %, respectively. With an increase in the impurity concentration in the  $p$ -Si base in the range from  $10^{16}$ – $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , a steady increase in efficiency is observed up to 22.2 %, and then a monotonic decrease to 10.87 % at an impurity concentration of  $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . With a decrease in the emitter thickness, the quantum efficiency of a solar cell increases due to a decrease in the number of photogenerated charge carriers. As a result of numerical simulation in the AFORS HET v2.5 software product, it was determined that the open-circuit voltage of solar cells based on the  $n$ - $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{As}_{0.98}\text{N}_{0.02}/p$ -Si heterostructure is 716.8 mV, at a short-circuit current density of 36.52 mA/cm<sup>2</sup>, fill factor equal to 84.81 % and efficiency equal to 22.2 %.

**Keywords**heterostructures, InGaAsN, AFORS HET, solar cells, multicomponent solid solutions,  $\text{A}^3\text{B}^5$  nitrides**Acknowledgments**

The publication was prepared as a part of the state assignment “Development and creation of semiconductor heterointerfaces based on multicomponent materials for microwave electronics and photonics devices” for 2021 (state registration number AAAA-A19-119040390081-2).

**For citation:** Devitsky O.V., Sanakulov S.O. Numerical simulation of functional characteristics of solar elements InGaAsN/Si. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 191–197 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-191-197

**Введение**

На данный момент не существует работ, которые сообщали бы о достижении однокаскадными солнечными элементами (СЭ) с непрямым переходом предела Шокли–Квайссера [1], который ограничивает эффективность СЭ на уровне 30 %. Однако современные подходы к исследованию СЭ на основе гетероструктур многокомпонентных соединений дают надежду на то, что эффективность СЭ приблизится к теоретически возможным 30 % уже в ближайшее десятилетие. Например, в работе [2] показана перспективная идея создания СЭ на основе наногетероструктур многокомпонентных нитридов  $\text{A}^3\text{B}^5$ , в частности,  $\text{GaAs}_{1-x-y}\text{N}_x\text{Sb}_y/\text{GaAs}$  ( $\text{N} = 6 \%$ ,  $\text{Sb} = 2,9 \%$ ) с максимальной эффективностью 27,52 %. В работе [3] исследуется возможность применения наногетероструктуры  $n$ - $\text{AlInN}/p$ -Si в качестве высокоэффективного СЭ. Авторами работы было установлено, что гетероструктуры  $\text{AlInN}/\text{Si}$  (толщина эмиттера — 10 нм, ширина

запрещенной зоны  $E_g(\text{AlInN}) = 2,63 \text{ эВ}$ , степень легирования  $n$ -типа  $10^{19} \text{ см}^{-3}$  и поверхностной рекомбинацией 10 см/с) показывает эффективность преобразования солнечной энергии 18 % при освещении AM1.5 в случае применения низкокачественных кремниевых подложек, и эффективность до 23,6 % в случае применения высококачественных кремниевых подложек. Также было определено, что по сравнению со стандартными кремниевыми СЭ внешняя квантовая эффективность СЭ  $\text{AlInN}/\text{Si}$  увеличивается при длинах волн 300–500 нм, что делает их перспективными для применения в космическом пространстве. Численное моделирование двухпереходного СЭ на основе гетероструктуры  $\text{GaInP}/\text{Si}$  [4] показало, что добавление верхнего перехода с шириной запрещенной зоны 1,6–1,9 эВ к стандартному кремниевому СЭ обеспечивает эффективность более 38 %. Наиболее перспективными, по мнению автора, являются однопереходные СЭ  $\text{GaInP}/\text{Si}$  с  $E_g(\text{GaInP}) = 1,8 \text{ эВ}$ , поскольку они могут достигать эффективности 20,8 % при AM1.5. Более высокая эф-

фektivность таких СЭ может быть достигнута за счет оптимизации конструкции и расширения спектрального диапазона чувствительности СЭ в длинноволновую область.

На данный момент в литературе нет результатов, которые описывали характеристики или получение СЭ на основе гетероструктуры  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y/\text{Si}$ . В работе [5] рассмотрено получение СЭ на основе слоев  $\text{In}_{0,07}\text{Ga}_{0,93}\text{As}_{0,98}\text{N}_{0,02}$  с шириной запрещенной зоны 1,0 эВ решеточно-согласованных с подложкой GaAs. Такие СЭ достигали значения внутренней квантовой эффективности более 70 %. Кроме того, исследователями было установлено, что на характеристики СЭ большое влияние оказывают концентрация азота и дефекты в слое  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$ , а также степень его легирования.

Заметим, что подобные, а возможно даже более лучшие, результаты могут быть получены и для СЭ на основе гетероструктур  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y/\text{Si}$ , так как включение азота будет способствовать увеличению значения запрещенной зоны в  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$ . На начальных стадиях исследования таких СЭ стадию непосредственного измерения световой вольтамперной характеристики и спектральной характеристики в целях экономии времени и ресурсов можно заменить процессом их компьютерного моделирования. Теоретические аспекты работы подобных СЭ были описаны в [6–9]. В работах [10–12] приведен пример использования моделирования математического пакета AFORS HET. Перспективы получения подобных СЭ рассмотрены в [13].

Цель настоящей работы — моделирование и оптимизация вольтамперных характеристик СЭ на основе гетероструктур  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y/\text{Si}$ .

### Детали моделирования

Численное моделирование выполнено с помощью программного продукта AFORS HET [14]. Данную программу разработал коллектив исследователей из Берлинского центра материалов и энергии имени Гельмгольца. С помощью AFORS HET возможно построение одномерной модели СЭ на основе гомо- и гетеропереходов тонких пленок. Моделирование СЭ состоит из моделирования электрофизических и оптических характеристик. В основе процесса моделирования лежит численное решение уравнений непрерывности и уравнения Пуассона для каждого активного  $p$ - $n$  перехода СЭ. Результатом моделирования является построение зонной диаграммы, вольтамперной и спектральной характеристик и ряда других электрофизических характеристик.

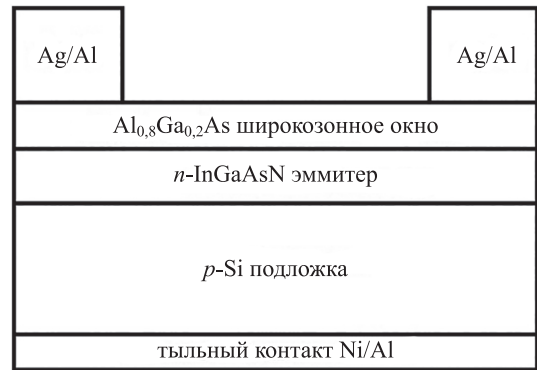


Рис. 1. Конструкция моделируемого солнечного элемента на основе гетероструктуры  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y/\text{Si}$

Fig. 1. Design of a simulated solar cell based on the  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y/\text{Si}$  heterostructure

Объект моделирования —  $n^+$ - $p$  структура на основе гетероструктуры  $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  на кремниевой подложке, конструкция СЭ представлена на рис. 1. СЭ состоит из базы в виде кремниевой подложки  $p$ -типа толщиной 380 мкм и тонкого слоя  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  — эмиттера. В качестве широкозонного окна использован слой  $\text{Al}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{As}$  толщиной 0,8 мкм. В разработанной модели верхний (Ag/Al) и нижний (Ni/Al) контакты рассматривались как омические. Скорость поверхностной рекомбинации электронов и дырок на границе контактов принималась равной  $10^7$  см/с. Численный расчет параметров СЭ проводился при спектре солнечного излучения AM1.5 в спектральном диапазоне от 300 до 1200 нм, освещение осуществлялось с фронтальной части.

Параметры  $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}_{0,98}\text{N}_{0,02}/\text{Si}$ , используемые в процессе численного моделирования СЭ, представлены в таблице. При расчете параметров СЭ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y/\text{Si}$  концентрация азота  $y$  изменялась в диапазоне 0–5 %; толщина слоя  $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  варьировалась в пределах 0,3–0,8 мкм; степень легирования базы и эмиттера СЭ менялись в интервале  $10^{16}$ – $8 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>.

При моделировании СЭ в AFORS HET необходимо определить основные параметры полупроводниковых слоев: ширину запрещенной зоны  $E_g$ , сродство к электрону, диэлектрическую постоянную, эффективную плотность состояний в валентной зоне  $N_V$  и зоне проводимости  $N_C$ , подвижность электронов и дырок, тепловую скорость электронов и дырок, плотность.

Особенность численного моделирования СЭ на основе твердых растворов  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  состоит в том, что подобные разбавленные нитриды имеют достаточно сложную и малоизученную зонную структуру.

Таблица. Параметры  $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}_{0,98}\text{N}_{0,02}/\text{Si}$

Table.  $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}_{0,98}\text{N}_{0,02}/\text{Si}$  parameters

| Материал  | Толщина слоя, мкм | Концентрация легирующей примеси, см <sup>-3</sup> | Ширина запрещенной зоны, эВ | Тип дефекта | Плотность дефектов, см <sup>-3</sup> |
|---|-------------------|---|-----------------------------|-------------|--------------------------------------|
| $n\text{-In}_{0,02}\text{Ga}_{0,93}\text{As}_{0,98}\text{N}_{0,02}$ | 0,3–0,8           | $10^{16}$ – $8 \cdot 10^{19}$                     | 1,11                        | Одиночный   | $10^{15}$                            |
| $p\text{-Si}$   | 380               |   | 1,12                        | Одиночный   | $10^{10}$                            |

Установлено, что внедрение малых долей атомов азота в систему  $\text{InGa(As)}$  приводит к расщеплению зоны проводимости на две подзоны:  $E_-$  и  $E_+$  [15], поэтому при расчете значения  $E_g$  при различных концентрациях азота ( $y$ ) использовались зависимости, представленные в работе [16]. Остальные параметры эмиттера  $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  рассчитаны с использованием правила Вегарда [17] и постоянных величин для бинарных соединений  $\text{InAs}$ ,  $\text{InN}$ ,  $\text{GaAs}$ ,  $\text{GaN}$  [18–21].

**Результаты моделирования и обсуждение**

В работе определены зависимости ширины запрещенной зоны  $E_g$  от концентрации индия ( $x$ ) и азота ( $y$ ) в  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  (рис. 2). Поскольку на данный момент времени нет достоверных данных о получении твердых растворов  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  с  $y$  более чем 4 %, то целесообразно ограничить при моделировании изменение  $y$  в диапазоне 0–5 % [22]. Из рис. 2 видно, что с внедрением 1 % азота в твердый раствор  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  величина  $E_g$  снижается скачком, например, разница между  $E_g(\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}_{0,99}\text{N}_{0,01})$  и  $E_g(\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As})$  составляет 0,276 эВ. Увеличение концентрации азота от 1 до 5 % снижает значение  $E_g(\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}_{1-y}\text{N}_y)$  более плавно, причем при  $y$  более 1,3 %  $E_g(\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}_{1-y}\text{N}_y)$  достигает значения меньше, чем у кремния, и составляет 1,084 эВ.

Результаты моделирования влияния концентрации азота на величину эффективности СЭ показали, что изменение концентрации азота от 0 до 5 % в слое  $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  приводит к снижению эффективности СЭ с 21,9 % до 21,82 % соответственно. Этот факт прежде всего обусловлен снижением значения  $E_g$  эмиттера и, как следствие, уменьшением величины напряжения холостого хода  $U_{OC}$  СЭ. Также следует отметить, что с ростом  $y$  в  $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}_{1-y}\text{N}_y/\text{Si}$  снижается

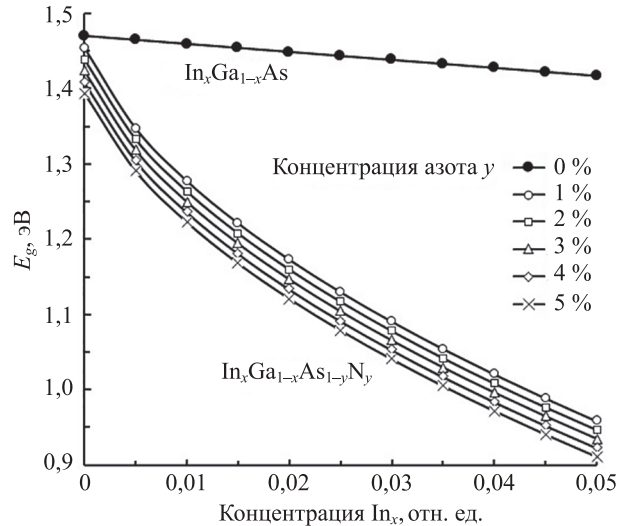


Рис. 2. Зависимости ширины запрещенной зоны  $E_g$  от концентрации индия  $x$  при концентрации азота  $y$  от 0 до 5 % в  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$

Fig. 2. Dependences of the band gap  $E_g$  on the indium concentration  $x$  at a nitrogen concentration  $y$  from 0 to 5 % in  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$

величина рассогласования параметров кристаллической решетки  $\Delta a$  слоя эмиттера и базы. В модели были учтены одиночные дефекты как в слое  $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$ , так и в кремниевой подложке.

Из полученных результатов видно, что оптимальный состав эмиттера для данного СЭ —  $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}_{0,98}\text{N}_{0,02}$ , такой состав эмиттера будет обеспечивать согласование  $E_g$  и не увеличивать дефектность слоя  $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}_{0,98}\text{N}_{0,02}$ .

Увеличение концентрации примеси в эмиттере  $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}_{0,98}\text{N}_{0,02}$  в диапазоне  $10^{16}$ – $8 \cdot 10^{19}$   $\text{cm}^{-3}$

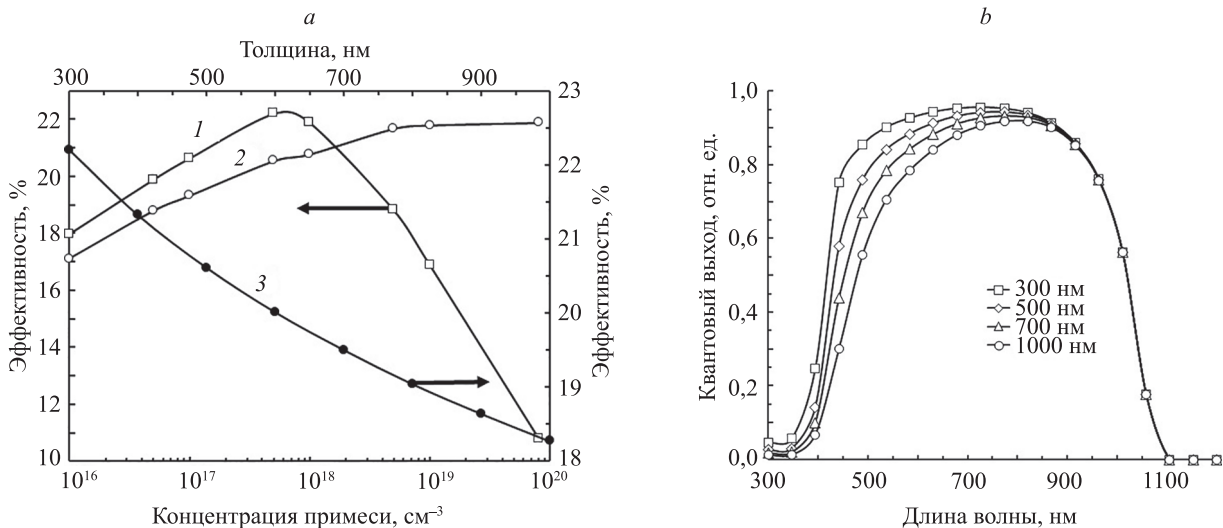


Рис. 3. Зависимость эффективности солнечного элемента от концентрации примеси базы (кривая 1, левая шкала), эмиттера (кривая 2, левая шкала) и от толщины эмиттера (кривая 3, правая шкала) (a) и спектральные зависимости внешнего квантового выхода при различной толщине эмиттера (b)

Fig. 3. Dependence of the solar cell efficiency on the impurity concentration of the base (curve 1, left scale), emitter (curve 2, left scale) and on the emitter thickness (curve 3, right scale) (a) and spectral dependences of the external quantum efficiency at different emitter thicknesses (b)

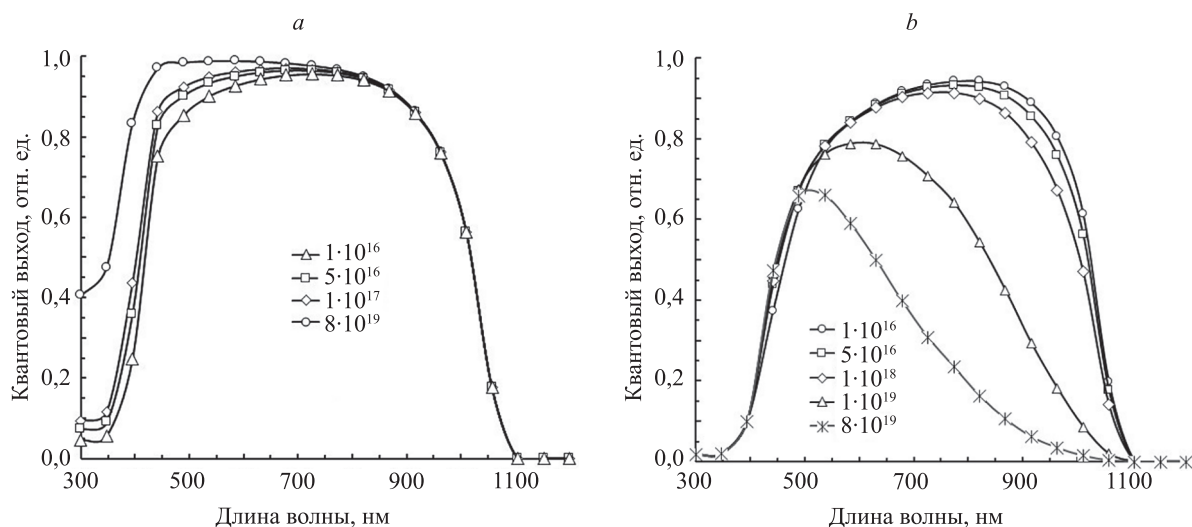


Рис. 4. Спектральные зависимости внешнего квантового выхода при разной концентрации примеси в эмиттере (а) и базе (b)  
 Fig. 4. Spectral dependences of the external quantum efficiency at different impurity concentrations in the emitter (a) and base (b)

приводит к росту эффективности СЭ от 17,11 % до 21,89 % соответственно (рис. 3, а). Это происходит за счет повышения поглощения в коротковолновом диапазоне длин волн 300–650 нм, и наглядно иллюстрируется графиком спектральной зависимости внешнего квантового выхода при разной концентрации примеси в эмиттере, изображенного на рис. 4, а. При увеличении концентрации примеси в базе *p*-Si в интервале от  $10^{16}$ – $5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup> наблюдается устойчивый рост эффективности до 22,2 %, а далее монотонное снижение до 10,87 % при концентрации примеси  $5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>.

На рис. 3, б представлен график (также на рис. 3, а (кривая 3)) спектральной зависимости внешнего квантового выхода при различной толщине эмиттера, из которого очевидно, что при снижении толщины эмиттера квантовая эффективность СЭ увеличивается вследствие снижения числа фотогенерированных носителей заряда.

При достижении толщины, превышающей величину диффузионной длины слоя, повышается вероятность того, что некоторая часть носителей заряда сможет рекомбинировать уже в эмиттере и, в свою очередь, повлечет за собой снижение квантовой и общей эффективности СЭ. Оптимальной толщиной эмиттера для данного СЭ можно считать 300 нм, так как слои с меньшей толщиной изготавливать технологически сложно.

Представленные результаты показывают, что параметры СЭ разбавленных нитридов А<sup>3</sup>В<sup>5</sup>Н/Si достигают заметно более высоких значений, чем А<sup>3</sup>В<sup>5</sup>Н/GaAs [7]. Однако показанные в данной работе высокие расчетные значения эффективности СЭ *n*-In<sub>0,02</sub>Ga<sub>0,98</sub>As<sub>0,98</sub>N<sub>0,02</sub>/*p*-Si компенсируются сложностью их изготовления на практике. Возможными способами решения проблемы получения высококачественных тонких пленок раз-

бавленных нитридов А<sup>3</sup>В<sup>5</sup>Н на кремниевой подложке могут быть применения метода импульсного лазерного напыления для их получения, а также использование буферных слоев, компенсирующих возникновение механических напряжений.

### Заключение

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что максимальной эффективностью обладают солнечные элементы на основе гетероструктуры *n*-In<sub>0,02</sub>Ga<sub>0,98</sub>As<sub>0,98</sub>N<sub>0,02</sub>/*p*-Si со следующими параметрами слоев: эмиттер *n*-In<sub>0,02</sub>Ga<sub>0,98</sub>As<sub>0,98</sub>N<sub>0,02</sub> толщиной 300 нм с концентрацией примеси  $8 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>; база *p*-Si толщиной 380 мкм с концентрацией примеси  $5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>.

Установлено, что при увеличении концентрации азота в слое In<sub>0,02</sub>Ga<sub>0,98</sub>As<sub>1-y</sub>N<sub>y</sub> до 5 % приводит к снижению эффективности солнечных элементов от 21,9 до 21,82 % соответственно. Это объясняется снижением значения ширины запрещенной зоны эмиттера и, как следствие, уменьшением величины напряжения холостого хода солнечного элемента.

Увеличение концентрации примеси в эмиттере In<sub>0,02</sub>Ga<sub>0,98</sub>As<sub>0,98</sub>N<sub>0,02</sub> в диапазоне  $10^{16}$ – $8 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup> приводит к росту эффективности солнечного элемента с 17,11 до 21,89 %. Повышение концентрации примеси в базе *p*-Si в интервале  $10^{16}$ – $5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup> приводит к возрастанию эффективности вплоть до 22,2 %, а после — к снижению до 10,87 % при концентрации примеси  $5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Численное моделирование показало, что напряжение холостого хода данных солнечных элементов составляет 716,8 мВ, при плотности тока короткого замыкания 36,52 мА/см<sup>2</sup>, факторе заполнения — 84,81 % и эффективности 22,2 %.


## Литература

## References

- Shockley W., Queisser H.J. Detailed balance limit of efficiency of  $p$ - $n$  junction solar cells // *Journal of Applied Physics*. 1961. V. 32. N 3. P. 510–519. doi: 10.1063/1.1736034
- Bellil W., Aissat A., Vilcot J.P. Optimization and comparison between the efficiency of GaNAsSb and GaInNAs single solar cells deposited on GaAs // *Procedia Computer Science*. 2019. V. 151. P. 1028–1033. doi: 10.1016/j.procs.2019.04.145
- Blasco R., Naranjo F.B., Valdueza-Felip S. Design of AllnN on silicon heterojunctions grown by sputtering for solar devices // *Current Applied Physics*. 2020. V. 20. N 11. P. 1244–1252. doi: 10.1016/j.cap.2020.07.018
- Essig S., Ward S., Steiner M.A., Friedman D.J., Geisz J.F., Stradins P., Young D.L. Progress towards a 30% efficient GaInP/Si tandem solar cell // *Energy Procedia*. 2015. V. 77. P. 464–469. doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.066
- Kurtz S.R., Allerman A.A., Jones E.D., Gee J.M., Banas J.J., Hammons B.E. InGaAsN solar cells with 1.0 eV band gap, lattice matched to GaAs // *Applied Physics Letters*. 1999. V. 74. N 5. P. 729–731. doi: 10.1063/1.123105
- Prete P., Lovergine N. Dilute nitride III-V nanowires for high-efficiency intermediate-band photovoltaic cells: Materials requirements, self-assembly methods and properties // *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*. 2020. V. 66. N 4. P. 100510. doi: 10.1016/j.pcrysgrow.2020.100510
- Kim T.W., Mawst L.J., Kim Y., Kim K., Lee J., Kuech T.F. 13.2% efficiency double-hetero structure single-junction InGaAsN solar cells grown by MOVPE // *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 2015. V. 33. N 2. P. 021205. doi: 10.1116/1.4906511
- Arbez G., Wheelodon J., Walker A., Hinzer K., Schriemer H. Modeling and simulation of triple junction solar cells // *Proceedings of SPIE*. 2010. V. 7750. P. 775032. doi: 10.1117/12.876131
- Cariou R., Benick J., Feldmann F., Höhn O., Hauser H., Beutel P., Razek N., Wimplinger M., Bläsi B., Lackner D., Hermle M., Siefert G., Glunz S.W., Bett A.W., Dimroth F. III-V-on-silicon solar cells reaching 33% photoconversion efficiency in two-terminal configuration // *Nature Energy*. 2018. V. 3. N 4. P. 326–333. doi: 10.1038/s41560-018-0125-0
- Ganji J. Numerical simulation of thermal behavior and optimization of a-Si/a-Si/C-Si/a-Si/A-Si hit solar cell at high temperatures // *Электротехника і Електромеханіка*. 2017. № 6. С. 47–52. doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.07
- Gudovskikh A.S., Kaluzhnyi N.A., Lantratov V.M., Mintairov S.A., Shvarts M.Z., Andreev V.M. Numerical modelling of GaInP solar cells with AllnP and AlGaAs windows // *Thin Solid Films*. 2008. V. 516. N 20. P. 6739–6743. doi: 10.1016/j.tsf.2007.12.016
- Aydin K., Leite M.S., Atwater H.A. Increased cell efficiency in InGaAs thin film solar cells with dielectric and metal back reflectors // *Proc. 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. 2009. P. 001713–001717. doi: 10.1109/PVSC.2009.5411432
- 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. doi: 10.1134/S1063782617030174
- Varache R., Leendertz C., Gueunier-Farret M.E., Haschke J., Muñoz D., Korte L. Investigation of selective junctions using a newly developed tunnel current model for solar cell applications // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2015. V. 141. P. 14–23. doi: 10.1016/j.solmat.2015.05.014
- Dilute III-V nitride semiconductors and material systems: Physics and Technology / ed. by A. Erol. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 590 p. (Springer Materials Science, V. 105). doi: 10.1007/978-3-540-74529-7
- Kudrawiec R. Alloying of  $\text{GaN}_x\text{As}_{1-x}$  with  $\text{InN}_x\text{As}_{1-x}$ : A simple formula for the band gap parametrization of  $\text{Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{N}_x\text{As}_{1-x}$  alloys // *Journal of Applied Physics*. 2007. V. 101. N 2. P. 023522. doi: 10.1063/1.2424528
- Vurgaftman I., Meyer J.R., Ram-Mohan L.R. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys // *Journal of Applied Physics*. 2001. V. 89. N 11. P. 5815–5875. doi: 10.1063/1.1368156
- Vurgaftman I., Meyer J.R. Band parameters for nitrogen-containing semiconductors // *Journal of Applied Physics*. 2003. V. 94. N 6. P. 3675–3696. doi: 10.1063/1.1600519
- Ajnef N., Jemmali W.Q., Habchi M.M., Rebey A. Biaxial strain effects on the band structure and absorption coefficient of  $\text{GaAs}_{1-x-y}\text{N}_x\text{Bi}_y/\text{GaAs}$  MQWs calculated using k.p method // *Optik*. 2020. V. 223. P. 165484. doi: 10.1016/j.ijleo.2020.165484
- Shockley W., Queisser H.J. Detailed balance limit of efficiency of  $p$ - $n$  junction solar cells. *Journal of Applied Physics*, 1961, vol. 32, no. 3, pp. 510–519. doi: 10.1063/1.1736034
- Bellil W., Aissat A., Vilcot J.P. Optimization and comparison between the efficiency of GaNAsSb and GaInNAs single solar cells deposited on GaAs. *Procedia Computer Science*, 2019, vol. 151, pp. 1028–1033. doi: 10.1016/j.procs.2019.04.145
- Blasco R., Naranjo F.B., Valdueza-Felip S. Design of AllnN on silicon heterojunctions grown by sputtering for solar devices. *Current Applied Physics*, 2020, vol. 20, no. 11, pp. 1244–1252. doi: 10.1016/j.cap.2020.07.018
- Essig S., Ward S., Steiner M.A., Friedman D.J., Geisz J.F., Stradins P., Young D.L. Progress towards a 30% efficient GaInP/Si tandem solar cell. *Energy Procedia*, 2015, vol. 77, pp. 464–469. doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.066
- Kurtz S.R., Allerman A.A., Jones E.D., Gee J.M., Banas J.J., Hammons B.E. InGaAsN solar cells with 1.0 eV band gap, lattice matched to GaAs. *Applied Physics Letters*, 1999, vol. 74, no. 5, pp. 729–731. doi: 10.1063/1.123105
- Prete P., Lovergine N. Dilute nitride III-V nanowires for high-efficiency intermediate-band photovoltaic cells: Materials requirements, self-assembly methods and properties. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 2020, vol. 66, no. 4, pp. 100510. doi: 10.1016/j.pcrysgrow.2020.100510
- Kim T.W., Mawst L.J., Kim Y., Kim K., Lee J., Kuech T.F. 13.2% efficiency double-hetero structure single-junction InGaAsN solar cells grown by MOVPE. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2015, vol. 33, no. 2, pp. 021205. doi: 10.1116/1.4906511
- Arbez G., Wheelodon J., Walker A., Hinzer K., Schriemer H. Modeling and simulation of triple junction solar cells. *Proceedings of SPIE*, 2010, vol. 7750, pp. 775032. doi: 10.1117/12.876131
- Cariou R., Benick J., Feldmann F., Höhn O., Hauser H., Beutel P., Razek N., Wimplinger M., Bläsi B., Lackner D., Hermle M., Siefert G., Glunz S.W., Bett A.W., Dimroth F. III-V-on-silicon solar cells reaching 33% photoconversion efficiency in two-terminal configuration. *Nature Energy*, 2018, vol. 3, no. 4, pp. 326–333. doi: 10.1038/s41560-018-0125-0
- Ganji J. Numerical simulation of thermal behavior and optimization of a-Si/a-Si/C-Si/a-Si/A-Si hit solar cell at high temperatures. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2017, no. 6, pp. 47–52. doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.07
- Gudovskikh A.S., Kaluzhnyi N.A., Lantratov V.M., Mintairov S.A., Shvarts M.Z., Andreev V.M. Numerical modelling of GaInP solar cells with AllnP and AlGaAs windows. *Thin Solid Films*, 2008, vol. 516, no. 20, pp. 6739–6743. doi: 10.1016/j.tsf.2007.12.016
- Aydin K., Leite M.S., Atwater H.A. Increased cell efficiency in InGaAs thin film solar cells with dielectric and metal back reflectors. *Proc. 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2009, pp. 001713–001717. doi: 10.1109/PVSC.2009.5411432
- 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. doi: 10.1134/S1063782617030174
- Varache R., Leendertz C., Gueunier-Farret M.E., Haschke J., Muñoz D., Korte L. Investigation of selective junctions using a newly developed tunnel current model for solar cell applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015, vol. 141, pp. 14–23. doi: 10.1016/j.solmat.2015.05.014
- Dilute III-V nitride semiconductors and material systems: Physics and Technology. Ed. by A. Erol. Berlin, Springer-Verlag, 2008, 590 p., Springer Materials Science, vol. 105. doi: 10.1007/978-3-540-74529-7
- Kudrawiec R. Alloying of  $\text{GaN}_x\text{As}_{1-x}$  with  $\text{InN}_x\text{As}_{1-x}$ : A simple formula for the band gap parametrization of  $\text{Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{N}_x\text{As}_{1-x}$  alloys. *Journal of Applied Physics*, 2007, vol. 101, no. 2, pp. 023522. doi: 10.1063/1.2424528
- Vurgaftman I., Meyer J.R., Ram-Mohan L.R. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys. *Journal of Applied Physics*, 2001, vol. 89, no. 11, pp. 5815–5875. doi: 10.1063/1.1368156
- Vurgaftman I., Meyer J.R. Band parameters for nitrogen-containing semiconductors. *Journal of Applied Physics*, 2003, vol. 94, no. 6, pp. 3675–3696. doi: 10.1063/1.1600519
- Ajnef N., Jemmali W.Q., Habchi M.M., Rebey A. Biaxial strain effects on the band structure and absorption coefficient of  $\text{GaAs}_{1-x-y}\text{N}_x\text{Bi}_y/\text{GaAs}$  MQWs calculated using k.p method. *Optik*, 2020, vol. 223, pp. 165484. doi: 10.1016/j.ijleo.2020.165484

20. Song J., Luo Z., Liu X., Li E., Jiang C., Huang Z., Li J., Guo X., Ding Z., Wang J. The study on structural and photoelectric properties of zincblende InGaN via first principles calculation // *Crystals*. 2020. V. 10. N 12. P. 1159. doi: 10.3390/cryst10121159
21. Kawamura T., Fujita Y., Hamaji Y., Akiyama T., Kangawa Y., Gorczyca I., Suski T., Wierzbowska M., Krukowski S. First-principles calculation of band gaps of  $Al_{1-x}In_xN$  alloys and short period  $Al_{1-x}In_xN/Al_{1-y}In_yN$  superlattices // *Physica Status Solidi B*. 2020. V. 257. N 4. P. 1900530. doi: 10.1002/pssb.201900530
22. Geppert T., Wagner J., Köhler K., Ganser P., Maier M. Preferential formation of Al–N bonds in low N-content AlGaAsN // *Applied Physics Letters*. 2002. V. 80. N 12. P. 2081–2083. doi: 10.1063/1.1464660
20. Song J., Luo Z., Liu X., Li E., Jiang C., Huang Z., Li J., Guo X., Ding Z., Wang J. The study on structural and photoelectric properties of zincblende InGaN via first principles calculation. *Crystals*, 2020, vol. 10, no. 12, pp. 1159. doi: 10.3390/cryst10121159
21. Kawamura T., Fujita Y., Hamaji Y., Akiyama T., Kangawa Y., Gorczyca I., Suski T., Wierzbowska M., Krukowski S. First-principles calculation of band gaps of  $Al_{1-x}In_xN$  alloys and short period  $Al_{1-x}In_xN/Al_{1-y}In_yN$  superlattices. *Physica Status Solidi B*, 2020, vol. 257, no. 4, pp. 1900530. doi: 10.1002/pssb.201900530
22. Geppert T., Wagner J., Köhler K., Ganser P., Maier M. Preferential formation of Al–N bonds in low N-content AlGaAsN. *Applied Physics Letters*, 2002, vol. 80, no. 12, pp. 2081–2083. doi: 10.1063/1.1464660


#### Авторы

**Девицкий Олег Васильевич** — кандидат технических наук, старший 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,  57193670678, <https://orcid.org/0000-0003-3153-696X>, [v2517@rambler.ru](mailto:v2517@rambler.ru)

**Санакулов Сохибжон Ориф угли** — студент, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-3620-9792>, [sohibsanaqulov@gmail.com](mailto:sohibsanaqulov@gmail.com)

Статья поступила в редакцию 28.01.2021  
Одобрена после рецензирования 22.02.2021  
Принята к печати 21.03.2021

#### Authors

**Oleg V. Devitsky** — PhD, Senior 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,  57193670678, <https://orcid.org/0000-0003-3153-696X>, [v2517@rambler.ru](mailto:v2517@rambler.ru)

**Sohibjon O. Sanakulov** — Student, North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355017, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-3620-9792>, [sohibsanaqulov@gmail.com](mailto:sohibsanaqulov@gmail.com)

Received 28.01.2021  
Approved after reviewing 22.02.2021  
Accepted 21.03.2021



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»