



Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

Sh. B. Utamuradova, R. A. Muminov, V. G. Dyskin, O. F. Tukfatullin, A program for calculating the projective range and straggling of ions in a solidusing the approximation of V.V. Yudin,  
*Comp. nanotechnol.*, 2022, Volume 9, Issue 4, 11–16

<https://www.mathnet.ru/eng/cn389>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use

<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.9.175

May 24, 2025, 20:08:48



Программа для расчета проективного пробега  
и страгглинга ионов в твердом теле  
с использованием аппроксимации В.В. Юдина

Ш.Б. Утамурадова<sup>1, a</sup> ©, Р.А. Муминов<sup>2, b</sup> ©,  
В.Г. Дыскин<sup>3, c</sup> ©, О.Ф. Тукфатуллин<sup>1, d</sup> ©

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт физики полупроводников и микроэлектроники  
при Национальном университете Узбекистана имени Мирзо Улугбека,  
г. Ташкент, Республика Узбекистан

<sup>2</sup> Физико-технический институт Научно-производственного объединения «Физика-Солнце»  
Академии наук Республики Узбекистан,  
г. Ташкент, Республика Узбекистан

<sup>3</sup> Институт материаловедения Научно-производственного объединения «Физика-Солнце»  
Академии наук Республики Узбекистан,  
г. Ташкент, Республика Узбекистан

<sup>a</sup> E-mail: director@ispm.uz

<sup>b</sup> E-mail: detector@uzsci.net

<sup>c</sup> E-mail: dyskin@uzsci.net

<sup>d</sup> E-mail: oskar.tukfatullin@gmail.com

**Аннотация.** Ионная имплантация является основой многих технологических процессов электроники и микроэлектроники. Основными величинами, характеризующими внедрение ионов в твердое тело, являются: длина пробега иона до полной его остановки, среднее значение проекции полного пробега на направление движения  $\bar{R}_p$  и среднее нормальное отклонение проекции пробега  $\Delta\bar{R}_p$ . Для расчета этих величин созданы компьютерные программы SRIM, TRIM, DYNE, которые требуют установки на персональный компьютер и занимают большой объем жесткого диска, что не всегда оправдано в инженерной практике. В данной работе описан алгоритм простой, не требующей установки, программы для вычисления  $\bar{R}_p$  и  $\Delta\bar{R}_p$ . Основой алгоритма программы является теория Линхарда–Шарфа–Шиота.

**Ключевые слова:** ион, мишень, проективный пробег, страгглинг, упругие потери энергии, неупругие потери энергии

ССЫЛКА НА СТАТЬЮ: Утамурадова Ш.Б., Муминов Р.А., Дыскин В.Г., Тукфатуллин О.Ф. Программа для расчета проективного пробега и страгглинга ионов в твердом теле с использованием аппроксимации В.В. Юдина // Computational Nanotechnology. 2022. Т. 9. № 4. С. 11–16. DOI: 10.33693/2313-223X-2022-9-4-11-16

# A Program for Calculating the Projective Range and Straggling of Ions in a Solid using the Approximation of V.V. Yudin

Sh.B. Utamuradova<sup>1, a</sup> ©, R.A. Muminov<sup>2, b</sup> ©,  
V.G. Dyskin<sup>3, c</sup> ©, O.F. Tukfatullin<sup>1, d</sup> ©

<sup>1</sup> Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics  
at the National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek,  
Tashkent, Republic of Uzbekistan

<sup>2</sup> Physical-Technical Institute of the Scientific-Production Association “Physics-Sun”  
of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,  
Tashkent, Republic of Uzbekistan

<sup>3</sup> Institute of Material Science of the Scientific-Production Association “Physics-Sun”  
of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,  
Tashkent, Republic of Uzbekistan

<sup>a</sup> E-mail: director@ispm.uz

<sup>b</sup> E-mail: detector@uzsci.net

<sup>c</sup> E-mail: dyskin@uzsci.net

<sup>d</sup> E-mail: oskar.tukfatullin@gmail.com

**Abstract.** Ion implantation is the basis of many technological processes in electronics and microelectronics. The main quantities characterizing the penetration of ions into a solid are as follows; the length of the path of the ion until it stops completely, the average value of the projection of the total path on the direction of motion  $\bar{R}_p$ , and the average normal deviation of the projection of the path  $\Delta\bar{R}_p$ . To calculate these values, computer programs SRIM, TRIM, and DYNE have been created, which require installation on a personal computer and occupy a large amount of hard disk space, which is not always justified in engineering practice. This paper describes an algorithm for a simple, installation-free program for calculating  $\bar{R}_p$  and  $\Delta\bar{R}_p$ . The program algorithm is based on the Lindhard–Scharff–Schott theory.

**Key words:** ion, target, projective range, straggling, elastic energy loss, inelastic energy loss

FOR CITATION: Utamuradova Sh.B., Muminov R.A., Dyskin V.G., Tukfatullin O.F. A Program for Calculating the Projective Range and Straggling of Ions in a Solid using the Approximation of V.V. Yudin. *Computational Nanotechnology*. 2022. Vol. 9. No. 4. Pp. 11–16. (In Rus.) DOI: 10.33693/2313-223X-2022-9-4-11-16

## ВВЕДЕНИЕ

«Использование ионной имплантации для модификации и контроля оптических свойств широкого спектра материалов произвело революцию в изготовлении многих оптических систем и используется во все большем числе применений» [1].

Ионная имплантация является эффективным методом изменения свойств поверхности полупроводников и металлов, основой многих технологических процессов электроники, микроэлектроники и фотовольтаики [2–4]. В последние годы одним из эффективных методов модификации свойств полупроводниковых материалов и приборов на их основе является радиационная обработка различными видами излучения, например,

гамма-квантами, электронами, протонами и др. Этот метод открывает новые возможности управления свойствами полупроводниковых материалов и создания приборов опто-, микро- и нанoeлектроники, солнечных элементов с уникальными функциональными возможностями [5].

Имплантация ионов низких энергий в аморфные вещества: диэлектрики, полупроводники и полимеры – становится важным технологическим процессом, применяемым для создания новых материалов – нанокомпозитов. Нанокompозитные материалы представляют собой диэлектрические, полупроводниковые и полимерные среды, в которые имплантированы металлические частицы [6; 7]. Ионная имплантация – управляемый процесс, который дает возможность

синтезировать металлические наночастицы практически любой концентрации на заданном расстоянии от поверхности твердого тела.

Основными «управляемыми» величинами, характеризующими внедрение ионов в твердое тело, являются: длина пробега иона до полной его остановки  $R$ , среднее значение проекции полного пробега на направление движения  $\bar{R}_p$  и страгглинг (среднее нормальное отклонение проекции)  $\Delta\bar{R}_p$ . Методам расчета этих величин посвящено большое количество статей и книг, созданы компьютерные программы SRIM, TRIM, DYNE [8; 9]. Программы требуют инсталляции на персональный компьютер и занимают большой объем жесткого диска, что не всегда оправдано в инженерной практике.

В связи с этим цель данной работы – создание простой, не требующей инсталляции, программы (калькулятора) для вычисления  $\bar{R}_p$  и  $\Delta\bar{R}_p$ . Основой алгоритма программы является теория Линхарда–Шарфа–Шиота (ЛШШ), широкое применение которой обусловлено тем, что результаты расчета дают хорошее совпадение с экспериментом [2; 3; 9–11].

### АЛГОРИТМ ПРОГРАММЫ

При движении в твердом теле различают два механизма потерь энергии или два механизма взаимодействия (торможения) ионов с атомами твердого тела (мишени): неупругое взаимодействие с электронами и упругое столкновение с атомами решетки твердого тела. Полная потеря энергии записывается в виде суммы [2; 3; 9; 10]:

$$-\frac{dE}{dx} = N(S_e(E) + S_n(E)), \quad (1)$$

где  $E$  – энергия иона;  $S_e(E)$  – тормозная способность электронов;  $S_n(E)$  – тормозная способность атомов мишени;  $N$  – плотность атомов мишени. Если функции  $S_e(E)$  и  $S_n(E)$  известны, то полный пробег вычисляется по формуле:

$$R = \frac{1}{N} \int_0^E \frac{dE}{S_e(E) + S_n(E)}. \quad (2)$$

Для скоростей ионов меньших, чем  $Z_1^{(1/3)}e^2/\hbar$  ( $\hbar$  – постоянная Планка), выражение электронной тормозной способности имеет вид:

$$S_e = k\sqrt{E}, \quad (3)$$

где

$$k = 0,0793 \frac{Z_1^{(2/3)}Z_2^{(1/2)}(1+\mu)^{(3/2)}}{(Z_1^{(2/3)} + Z_2^{(2/3)})^{(3/4)}M_2^{(1/2)}}, \quad (4)$$

в котором

$$\mu = \frac{M_2}{M_1}; \quad (5)$$

$M_1, Z_1$  – масса и заряд иона;  $M_2, Z_2$  – масса и заряд атома мишени. Имеется несколько приближений для расчета тормозной способности атомов мишени, критический анализ которых приведен в [2; 3; 9; 10]. Из всех известных приближений выбрана формула В.В. Юдина

поскольку для широкого спектра энергий имплантируемых ионов результаты расчета отличаются от результатов эксперимента на 5–8% [11]. Формула тормозной способности атомов мишени В.В. Юдина имеет вид:

$$S_n = \frac{a\sqrt{\epsilon}}{b + \epsilon}, \quad (6)$$

постоянные  $a$  и  $b$  зависят от  $\epsilon$ :

$$\begin{aligned} a = 0,23, b = 0,1 & \text{ для } 0,01 \leq \epsilon \leq 0,1; \\ a = 0,45, b = 0,3 & \text{ для } 0,1 < \epsilon \leq 9; \\ a = 0,31, b = -2,45 & \text{ для } 9 < \epsilon \leq 40. \end{aligned} \quad (7)$$

В (6) и далее используются безразмерные величины энергии  $\epsilon$  и длины  $\rho$ :

$$\epsilon = E \frac{\mu a_{TF}}{Z_1 Z_2 e^2 (1 + \mu)}; \quad (8)$$

$$\rho = RN \frac{4\pi\mu a_{TF}^2}{(1 + \mu)^2}, \quad (9)$$

где

$$a_{TF} = 0,8853 \frac{a_0}{(Z_1^{(2/3)} + Z_2^{(2/3)})^{(1/2)}}, \quad (10)$$

$e$  – заряд электрона;  $a_0$  и  $a_{TF}$  – радиус Бора и постоянная экранирования Томаса–Ферми. После подстановки (3) и (6) в (2), величину полного пробега  $\rho$  получим интегрированием (2):

$$\rho = \frac{2\sqrt{\epsilon}}{k} - \frac{2a}{k^2 \sqrt{\frac{a}{k} + b}} \arctg \frac{\sqrt{\epsilon}}{\sqrt{\frac{a}{k} + b}}. \quad (11)$$

Энергия  $\epsilon_c$ , при которой  $S_n(\epsilon) = S_e(\epsilon)$ , определяется по формуле  $\epsilon_c = a/k - b$ . Для энергий иона  $\epsilon \gg \epsilon_c$  упругими потерями энергии можно пренебречь. Для энергий иона  $\epsilon \ll \epsilon_c$  можно пренебречь неупругими потерями энергии.

Приведем формулы для вычисления  $\bar{R}_p$  и  $\Delta\bar{R}_p$  в теории ЛШШ [9; 10]:

$$\bar{R}_p = \int_0^E \frac{dy}{\beta_1(y)} \exp\left(\int_E^y \frac{\alpha_1(x) dx}{\beta_1(x)}\right); \quad (12)$$

$$(\Delta\bar{R}_p)^2 = \frac{2\bar{R}_r^2 + \bar{R}_c^2}{3} - (\bar{R}_p)^2; \quad (13)$$

$$\bar{R}_r^2 = 2 \int_0^E \frac{\bar{R}_p(y) dy}{\beta_2(y)} \exp\left(3 \int_E^y \frac{\alpha_2(x) dx}{\beta_2(x)}\right); \quad (14)$$

$$\bar{R}_c^2 = \frac{2}{N} \int_0^E \frac{\bar{R}_p(x) dx}{S_n(x) + S_e(x)}; \quad (15)$$

$$\alpha_1 = \frac{\mu S_n(E)}{2E}; \quad \beta_1 = S_n(E) + S_e(E) - \frac{\mu \Omega_n^2}{2E}; \quad (16)$$

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_1}{2}; \quad \beta_2 = \beta_1 - \frac{\mu \Omega_n^2}{E}; \quad (17)$$

$$\Omega_n^2 = \frac{4\mu}{3(1+\mu)^2} S_n(E) E.$$

После подстановки (8), (9) в (3) и преобразований выражений (12)–(15) получим формулы, удобные для разработки алгоритма:

$$\bar{\rho}_p = \frac{1}{k} \left(1 + \frac{\gamma}{\varepsilon}\right)^\omega \int_0^\varepsilon \frac{y^{\omega-(1/2)}(b+y)dy}{(\gamma+y)^{\omega+1}}; \quad (18)$$

$$\bar{\rho}_r^2 = \frac{2}{k} \left(1 + \frac{\gamma_1}{\varepsilon}\right)^{\omega_1} \int_0^\varepsilon \frac{y^{\omega_1-(1/2)}(b+y)\bar{\rho}_p(y)dy}{(\gamma_1+y)^{\omega_1+1}}; \quad (19)$$

$$\bar{\rho}_c^2 = \frac{2}{k} \int_0^\varepsilon \frac{(x+b)\bar{\rho}_p(x)dx}{\sqrt{x}(\gamma_2+x)}; \quad (20)$$

$$\omega = \frac{\mu a}{2k\gamma}; \quad \omega_1 = \frac{3\mu a}{4k\gamma_1}; \quad (21)$$

$$\gamma = b + \frac{a}{k} \left[1 - \frac{2}{3} \left(\frac{\mu}{1+\mu}\right)^2\right]; \quad (22)$$

$$\gamma_1 = b + \frac{a}{k} \left[1 - 2 \left(\frac{\mu}{1+\mu}\right)^2\right]; \quad \gamma_2 = b + \frac{a}{k}.$$

Если  $S_e \gg S_n$ , то  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$  и  $\beta_1 = \beta_2$ , тогда выражения (12)–(14) запишутся в виде:

$$\bar{\rho}_p = \frac{2}{k} \sqrt{\varepsilon}; \quad \bar{\rho}_r^2 = \bar{\rho}_c^2 = \frac{4}{k^2} \varepsilon; \quad (\Delta \bar{\rho}_p)^2 = 0. \quad (23)$$

Заметим, что с помощью апплета [12] интеграл (18) можно выразить через гипергеометрическую функцию  ${}_2F_1(a, b; c; z)$ .

Расчет  $R$ ,  $\bar{R}_p$  и  $\Delta \bar{R}_p$  по формулам (3)–(10), (18)–(24) сводится к линейному алгоритму, реализация которого возможна на любом языке программирования высокого уровня.

Был разработан алгоритм, написана и отлажена программа LSSU. Интеграл (18) рассчитывался методом сплайна [13]. Для вычисления интегралов (19) и (20) был разработан оригинальный алгоритм двойного численного интегрирования. Программа LSSU была реализована на двух языках программирования: Compaq Visual Fortran и Visual Basic 6. В первом случае предполагается работа с консоли, во втором случае реализован оконный интерфейс. На рис. 1 представлено окно интерфейса программы LSSU. Базой данных программы служат элементы таблицы Менделеева: от водорода до висмута. Дополнительно в программу включена опция, позволяющая после расчета  $\bar{R}_p$  и  $\Delta \bar{R}_p$ , найти распределение ионов по гл-

бине  $N(x)$  и максимальную концентрацию примеси на глубине  $N_{\max}$ :

$$N(x) = \frac{\Phi_0}{\sqrt{2\pi\Delta R_p}} \exp\left[-\frac{(x-\bar{R}_p)^2}{2\Delta \bar{R}_p^2}\right]; \quad (24)$$

$$N_{\max} = \frac{\Phi_0}{\sqrt{2\pi\Delta R_p}}. \quad (25)$$

где  $\Phi_0$  – полная доза облучения образца.

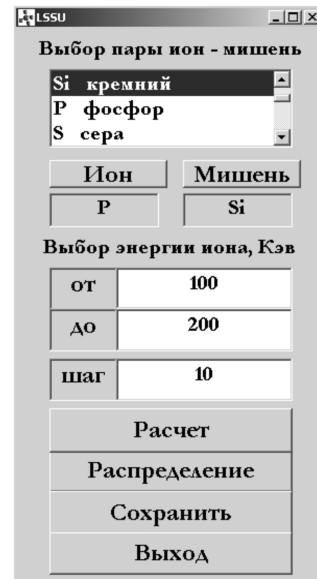


Рис. 1. Окно программы LSSU

Fig. 1. LSSU program window

Учитывая приближенный характер вычислений на компьютере и численного интегрирования, была выполнена верификация программы LSSU путем сравнения результатов расчета с результатами работ [2; 9; 11; 14; 15]. Установлено, что отличие результатов расчета составляет 10–20%.

### ВЫВОДЫ

- На основании теории Линхарда–Шарфа–Шиота и аппроксимации В.В. Юдина, получены формулы для расчета  $\bar{R}_p$  и  $\Delta \bar{R}_p$ .
- Разработан алгоритм и написана программа LSSU для расчета этих величин.
- Базой данных LSSU служат элементы таблицы Менделеева от водорода до висмута.
- Программу LSSU можно рекомендовать студентам и инженерам, соответствующих специальностей.

Литература

1. Townsend P.D., Chandler P.J., Zhang L. Optical effects of ion implantation. Cambridge University Press, 1994. 293 p.
2. Мейер Дж., Эрикссон Л., Дэвис Дж. Ионное легирование полупроводников. М.: Мир, 1973. 296 с.
3. Рыссел Х., Руге И. Ионная имплантация. М.: Наука, 1983. 380 с.
4. Ивановский Г.Ф., Петров В.И. Ионно-плазменная обработка материалов. М.: Радио и связь. 1986. 231 с.
5. Козлов В.А., Козловский В.В. Легирование полупроводников радиационными дефектами при облучении протонами и  $\alpha$ -частицами // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. Вып. 7. С. 769–795.
6. Степанов А.Л. Оптические свойства металлических наночастиц, синтезированных в полимере методом ионной имплантации (Обзор) // Журнал технической физики. 2004. Т. 74. Вып. 2. С. 1–12.
7. Степанов А.Л., Трифонов А.А., Осин Ю.Н. и др. Новая технология формирования пористого кремния имплантацией ионами металла // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 11. С. 119–123.
8. Interactions of ions with matter. SRIM (The Stopping and Range of Ions in Matter) [Software]: Download SRIM-2013/Resource author and software developer J.F. Ziegler. [Electronic resource]. URL: <http://www.srim.org/SRIM/SRIM-LEGL.htm> (data of accesses: 30.03.2022).
9. Гиббонс Дж. Ионное внедрение в полупроводниках. Ч. I. Теория и экспериментальные исследования распределения пробегов // ТИИЭР. 1968. Т. 56. № 3. С. 60–85.
10. Lindhard J., Scharff M., Schiott H.E. Range concepts and heavy ion ranges // Matematisk-fysiske Meddelelser udgivet af Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab. 1963. Vol. 33. No. 14. Pp. 1–43. (In English)
11. Юдин В.В. Аналитический расчет пробегов с использованием аппроксимированной энергетической зависимости ядерного торможения // Доклады Академии наук СССР. 1972. Т. 207. № 2. С. 325–326.
12. Examples for calculus & analysis. Knowledge base and set of computational algorithms [Electronic resource]. URL: <http://www.wolframalpha.com/examples/mathematics/calculus-and-analysis> (data of accesses: 30.03.2022).
13. Форсайт Д., Мальком М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений / пер. с англ. М.: Мир, 1980. 279 с.
14. Шейкин Е.Г. Пробеги тяжелых ионов низких энергий в бериллии, боре, углероде и кремнии // Журнал технической физики. 1998. Т. 68. Вып. 9. С. 33–36.
15. Kuzmin V. Range parameters of slow gold ions implanted into light targets // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2009. Vol. 267. No. 16. Pp. 2657–2661.

References

1. Townsend P.D., Chandler P.J., Zhang L. Optical effects of ion implantation. Cambridge University Press, 1994. 293 p.
2. Mayer J.W., Eriksson L., Davies J.A. Ion Implantation of Semiconductors. New York: Academic Press, 1970. 290 p.
3. Ryssel H., Ruge I. Ion implantation. Chichester: Wiley, 1986. 478 p.
4. Ivanovsky G.F., Petrov V.I. Ion-plasma processing of materials. Moscow: Radio i Svyaz. 1986. 231 p.
5. Kozlov V.A., Kozlovski V.V. Doping of semiconductors using radiation defects produced by irradiation with protons and alpha particles. *Semiconductors*. 2001. Vol. 35. No. 7. Pp. 735–761. (In Rus.)
6. Stepanov A.L. Optical properties of metal nanoparticles synthesized in a polymer by ion implantation: A review. *Technical Physics*. 2004. Vol. 49. No. 2. P. 143. (In Rus.)
7. Stepanov A.L., Trifonov A.A., Osin Y.N. et al. New technology of porous silicon formation by metal ion implantation. *Modern High Technologies*. 2013. No. 11. Pp. 119–123. (In Rus.)
8. Interactions of ions with matter. SRIM (The Stopping and Range of Ions in Matter) [Software]: Download SRIM-2013/Resource author and software developer J.F. Ziegler. [Electronic resource]. URL: <http://www.srim.org/SRIM/SRIMLEGL.htm> (data of accesses: 30.03.2022).
9. Gibbons J.F. Ion implantation in semiconductors. Part I: Range distribution theory and experiments. *Proceedings of the IEEE*. 1968. Vol. 56. No. 3. Pp. 295–319. (In Rus.)
10. Lindhard J., Scharff M., Schiott H.E. Range concepts and heavy ion ranges. *Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk*. 1963. Vol. 33. No. 14. Pp. 1–43. (In English)
11. Yudin V.V. Analytical calculation of ranges using the approximate energy dependence of nuclear braking. *Reports of the Academy of Sciences of the USSR*. 1972. Vol. 207. No. 2. Pp. 325–326. (In Rus.)
12. Examples for calculus & analysis. Knowledge base and set of computational algorithms [Electronic resource]. URL: <http://www.wolframalpha.com/examples/mathematics/calculus-and-analysis> (data of accesses: 30.03.2022).
13. Forsythe G.E., Malcolm M.A., Moler C.B. Computer methods for mathematical computations. Englewood Cliffs, 1977. 259 p.
14. Sheikin E.G. Ranges of low-energy heavy ions in beryllium, boron, carbon and silicon. *Technical Physics*. 1998. Vol. 68. No. 9. Pp. 33–36. (In Rus.)
15. Kuzmin V. Range parameters of slow gold ions implanted into light targets. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2009. Vol. 267. No. 16. Pp. 2657–2661.

Статья проверена программой Антиплагиат. Оригинальность – 94,16%

Р е ц е н з и я: Рахимов Р.Х., доктор технических наук; зав. лабораторией № 1 Института материаловедения Научно-производственного объединения «Физика-Солнце» Академии наук Республики Узбекистан

Статья поступила в редакцию 23.06.2022, принята к публикации 30.07.2022

The article was received on 23.06.2022, accepted for publication 30.07.2022

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Утамуродова Шарифа Бекмуродовна**, доктор физико-математических наук, профессор; директор Научно-исследовательского института физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана имени Мирзо Улугбека. Ташкент, Республика Узбекистан. ORCID ID: 0000-0002-1718-1122; Scopus Author ID: 57219239706; E-mail: director@ispm.uz

**Муминов Рамизулла Абдуллаевич**, доктор физико-математических наук, академик Академии наук Республики Узбекистан; заведующий лабораторией Физико-технический института Научно-производственного объединения «Физика-Солнце» Академии наук Республики Узбекистан. Ташкент, Республика Узбекистан. ORCID ID: 0000-0001-7443-4766; Scopus Author ID: 7004054534; E-mail: detector@uzsci.net

**Дыскин Валерий Григорьевич**, доктор философских наук; старший научный сотрудник Института материаловедения Научно-производственного объединения «Физика – Солнце» Академии наук Республики Узбекистан. Ташкент, Республика Узбекистан. ORCID ID: 0000-0002-4795-0586; Scopus Author ID: 6701727497. E-mail: dyskin@uzsci.net

**Тукфатуллин Оскар Фаритович**, доктор философских наук; заведующий лабораторией Научно-исследовательского института физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана имени Мирзо Улугбека. Ташкент, Республика Узбекистан. ORCID ID: 0000-0001-6197-7884; Scopus Author ID: 16231980900; E-mail: oskar.tukfatullin@gmail.com

## ABOUT THE AUTHORS

**Sharifa B. Utamuradova**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor; Director of the Research Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics of the National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek. Tashkent, Republic of Uzbekistan. ORCID ID: 0000-0002-1718-1122; Scopus Author ID: 57219239706; E-mail: director@ispm.uz

**Ramizulla A. Muminov**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Academician of the Academy Sciences of the Republic of Uzbekistan; Head of laboratory at the Physical-Technical Institute of the Scientific-Production Association “Physics-Sun” of the Academy of Sciences of Uzbekistan. Tashkent, Republic of Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7243-595X>. E-mail: detector@uzsci.net

**Valery G. Dyskin**, Dr. Sci. (Philos.); senior researcher at the Institute of Material Science of the Scientific-Production Association “Physics-Sun” of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan. Tashkent, Republic of Uzbekistan. ORCID ID: 0000-0002-4795-0586; Scopus Author ID: 6701727497; E-mail: dyskin@uzsci.net

**Oskar F. Tukfatullin**, Dr. Sci. (Philos.); Head of laboratory at the Research Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics of the National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek, Tashkent, Republic of Uzbekistan. ORCID ID: 0000-0001-6197-7884; Scopus Author ID: 16231980900; E-mail: oskar.tukfatullin@gmail.com