

## Исследование электрофизических свойств ионно-легированных фоточувствительных структур на основе кремния

О. Б. Максименкова<sup>1,2</sup>, И. П. Лобанов<sup>1,2</sup>✉

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> АО «ЦНИИ „Электрон“», Санкт-Петербург, Россия

✉ [ivan.p.lobanov@gmail.com](mailto:ivan.p.lobanov@gmail.com)

**Аннотация.** Исследуется фоточувствительная структура, работающая на эффекте лавинного умножения и используемая для регистрации слабых оптических сигналов. Цель исследования: изучение электрофизических свойств фоточувствительной структуры, измерение ее шумовых параметров, разработка измерительного устройства, с помощью которого данные параметры измерялись. Измерена ВАХ лавинного фотодиода, изготовленного в АО «ЦНИИ „Электрон“», в темноте и при освещении структуры красным светом. Рассчитан коэффициент лавинного умножения в темноте и при освещении структуры красным светом. Рассчитаны и построены зависимости плотности тока от напряжения смещения, выявлена зависимость силы тока от площади фотодиода. Исследовались шумовые параметры фотодиода. Рассчитано стандартное отклонение от сигнала и динамический диапазон исследуемого прибора.

**Ключевые слова:** лавинный фотодиод, фоточувствительная структура, ионное легирование, эффект лавинного умножения

**Для цитирования:** Максименкова О. Б., Лобанов И. П. Исследование электрофизических свойств ионно-легированных фоточувствительных структур на основе кремния // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 10. С. 17–27. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-10-17-27.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

## Investigation of Electrical Properties of Silicon-Based Ion-Doped Photosensitive Structures

O. B. Maksimenkova<sup>1,2</sup>, I. P. Lobanov<sup>1,2</sup>✉

<sup>1</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> JSC «NRI „Electron“», Saint Petersburg, Russia

✉ [ivan.p.lobanov@gmail.com](mailto:ivan.p.lobanov@gmail.com)

**Abstract.** The research object was a photosensitive structure operating on the effect of avalanche multiplication, used for registration of weak optical signals. The research was aimed at investigation of electrophysical properties of a photosensitive structure and measurement of its noise parameters using a specifically-constructed measuring device. The current–voltage characteristic of an avalanche photodiode, manufactured by Electron, JSC, was measured in the dark and when illuminated with red light. The avalanche multiplication factor of the structure under these conditions was also calculated. The dependence of current density on bias voltage was calculated and plotted; the dependence of current magnitude on photodiode area was revealed. The noise parameters of the photodiode were investigated. The standard deviation from the signal and dynamic range of the investigated device were calculated.

**Keywords:** avalanche photodiode, photosensitive structure, ion doping, avalanche multiplication effect

**For citation:** Maksimenkova O. B., Lobanov I. P. Investigation of Electrical Properties of Silicon-Based Ion-Doped Photosensitive Structures // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 10. P. 17–27. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-10-17-27.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Введение.** В настоящее время существует потребность в приборах, способных регистрировать и усиливать слабые оптические сигналы. Для решения данной проблемы АО «ЦНИИ „Электрон“» был разработан лавинный фотодиод, позволяющий увеличить фотогенерированные носители заряда в несколько тысяч раз еще до процесса считывания, тем самым исключая шумы выходного усилительного устройства. За счет внутреннего усиления они могут быть использованы для регистрации света малых интенсивностей. Современным лавинным фотодиодам присуща высокая чувствительность за счет стабильности лавинных процессов и высоких значений коэффициентов умножения.

Цель данных исследований состоит в измерении электрофизических и шумовых параметров исследуемой структуры и оценке работоспособности и эффективности прибора.

**Топология и структура лавинного фотодиода.** Лавинный фотодиод (ЛФД) – это полупроводниковый прибор, в котором увеличение фототока реализуется за счет внутреннего усиления, достигаемого за счет лавинного умножения фотогенерированных носителей заряда в области сильных полей (в кремнии напряженность должна превышать  $5 \cdot 10^5$  В/см [1]).

Лавинные фотодиоды в настоящее время обладают высокой чувствительностью, которая достигается за счет стабильности лавинных процессов, а также достигнутых высоких величин коэффициентов умножения. Эти свойства достигнуты вследствие прогресса качества технологических процессов и достижения чистоты материалов.

Кремниевые приборы с лавинным усилением обычно применяются для регистрации слабых потоков света. За счет внутреннего усиления они могут быть использованы для регистрации света, имеющего малую интенсивность [2].

Условиями для реализации лавинного умножения служат:

- а) область сильного электрического поля;
- б) приобретение фотогенерированными носителями заряда при движении в сильном поле достаточной энергии для ионизации атома.

Эти условия реализуются в полупроводниковом приборе за счет конфигурации областей с разными типами проводимости и соблюдения необходимых расстояний между этими областями (пространственная конфигурация областей) [3].

На рис. 1 представлен эскиз разреза исследуемой структуры  $n^{++}-p-p^+$ , выполненной на кремниевой планарной технологии создания ФППЗ структур предприятия АО «ЦНИИ „Электрон“» с

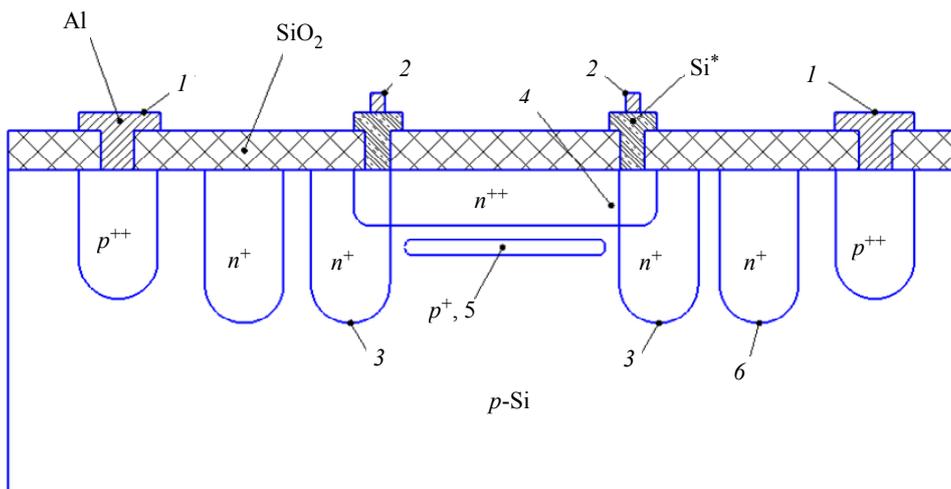


Рис. 1. Эскиз разреза кристалла  $n^{++}-p-p^+$ -структуры: 1 – анод, 2 – катод, 3 – охрannое кольцо, 4 – подлегирование поверхности фоточувствительной области, 5 – скрытый стопор, 6 – плавающее охрannое кольцо

Fig. 1. Cross section of the  $n^{++}-p-p^+$  structure: 1 – anode, 2 – cathode, 3 – guard ring, 4 – additional doping of the surface of the photosensitive area, 5 – hidden stopper, 6 – floating guard ring

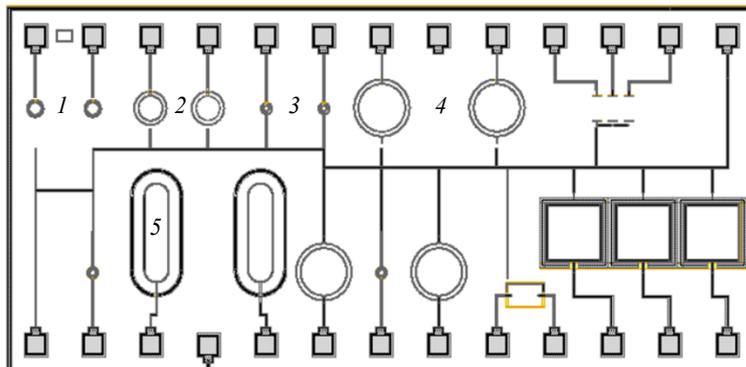


Рис. 2. Топология исследуемой структуры фотодиодов с радиусом охранного кольца: 1 –  $R = 20$  мкм; 2 –  $R = 45$  мкм; 3 –  $R = 10$  мкм; 4 –  $R = 90$  мкм; 5 –  $R = 190$  мкм

Fig. 2. Topology of the structure under study Photodiodes with radius of guard ring: 1 –  $R = 20$   $\mu\text{m}$ ; 2 –  $R = 45$   $\mu\text{m}$ ; 3 –  $R = 10$   $\mu\text{m}$ ; 4 –  $R = 90$   $\mu\text{m}$ ; 5 –  $R = 190$   $\mu\text{m}$

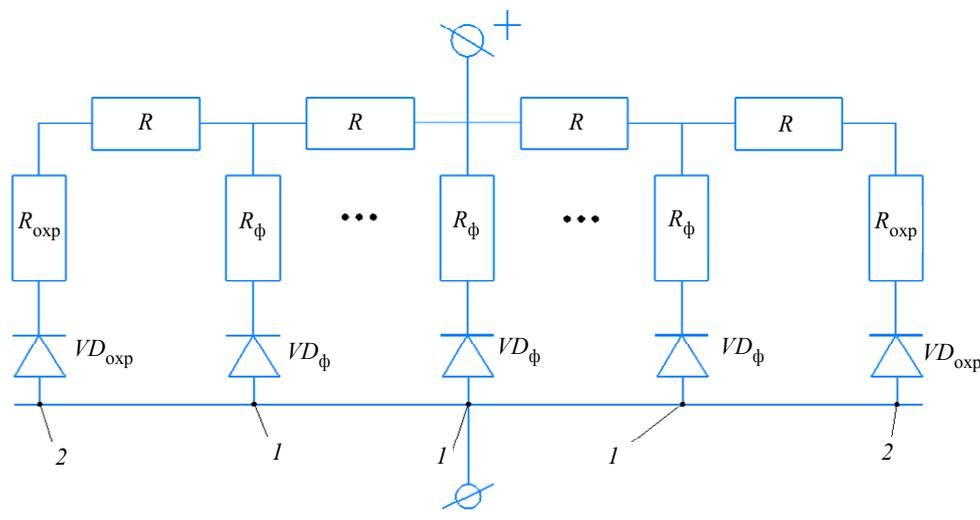


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема фотодиода: 1 – распределенный фотодиод в области, ограниченной внутренним диаметром охранного кольца; 2 – фотодиод охранного кольца;  $R_{\text{оxp}}$  – эквивалентное внутреннее сопротивление охранного кольца;  $R_{\text{ф}}$  – эквивалентное внутреннее сопротивление области распределенного фотодиода;

$R$  – сопротивление элементов  $n^{++}$ -слоя  
Fig. 3. Equivalent electrical circuit of the photodiode under study: 1 – distributed photodiode in the area limited by the inner diameter of the guard ring; 2 – photodiode of the guard ring;  $R_{\text{оxp}}$  – equivalent internal resistance of the guard ring;  $R_{\text{ф}}$  – equivalent internal resistance of the area of the distributed photodiode;  $R$  – resistance of elements of  $n^{++}$  layer

использованием операции ионной имплантации  $p^+$ -области.

Данной фоточувствительной структуре присуще отсутствие сплошного скрытого эпитаксиального слоя, применяемого для получения эффекта лавинного умножения. Его функцию выполняет ионно-легированная область  $p^+$ -типа. Исследуемые структуры выполнены на монокристаллической подложке  $p$ -типа с ориентацией (100). Область  $n^+$ -типа – охранное кольцо.

На рис. 2 показана топология исследуемой тестовой структуры. Было проведено исследование

фотодиодов пяти различных размеров с радиусами охранного кольца 10, 20, 45, 90 и 190 мкм.

На рис. 3 показана эквивалентная электрическая схема исследуемого фотодиода.

Она состоит из сопротивления сегментов  $R$   $n^{++}$ -слоя, распределенного сопротивления  $R_{\text{ф}}$  в области ограниченной внутренним диаметром охранного кольца, распределенного фотодиода  $VD_{\text{ф}}$  периферийного фотодиода  $VD_{\text{оxp}}$  охранного кольца и сопротивления охранного кольца  $R_{\text{оxp}}$ .

**Измерение вольт-амперной характеристики фотодиода.** В рамках поставленной задачи

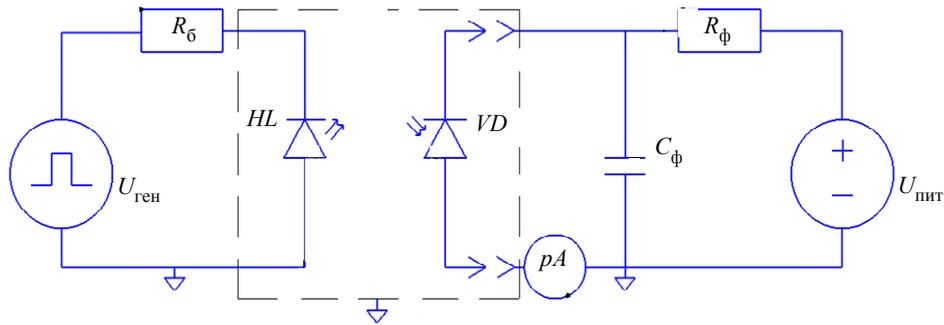


Рис. 4. Схема измерения параметров фотодиода исследуемой структуры  
Fig. 4. Circuit for measuring the parameters of the photodiode under study

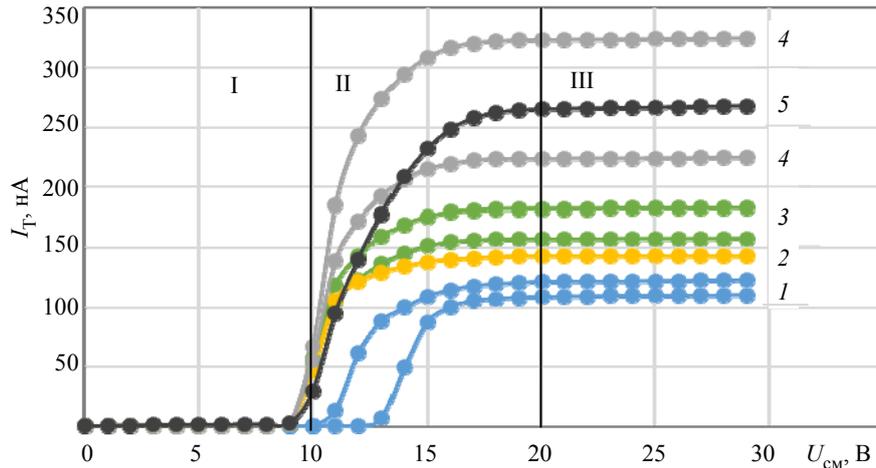


Рис. 5. Темновые вольт-амперные характеристики фотодиодов различной площади, радиус охранного кольца: 1 –  $R = 20 \mu\text{м}$ ; 2 –  $R = 45 \mu\text{м}$ ; 3 –  $R = 10 \mu\text{м}$ ; 4 –  $R = 90 \mu\text{м}$ ; 5 –  $R = 190 \mu\text{м}$ .  $U_{\text{см}}$  – смещение на фотодиоде – от 0 до 29 В.

Значение темного тока насыщения  $I_T$  – от 105 до 325 нА

Fig. 5. Dark current-voltage characteristics of the photodiodes of various areas, radius of guard ring is: 1 –  $R = 20 \mu\text{m}$ ; 2 –  $R = 45 \mu\text{m}$ ; 3 –  $R = 10 \mu\text{m}$ ; 4 –  $R = 90 \mu\text{m}$ ; 5 –  $R = 190 \mu\text{m}$ .  $U_{\text{см}}$  – bias voltage on photodiode – 0 to 29 V. The value of dark saturation current  $I_T$  – 105 to 325 nA

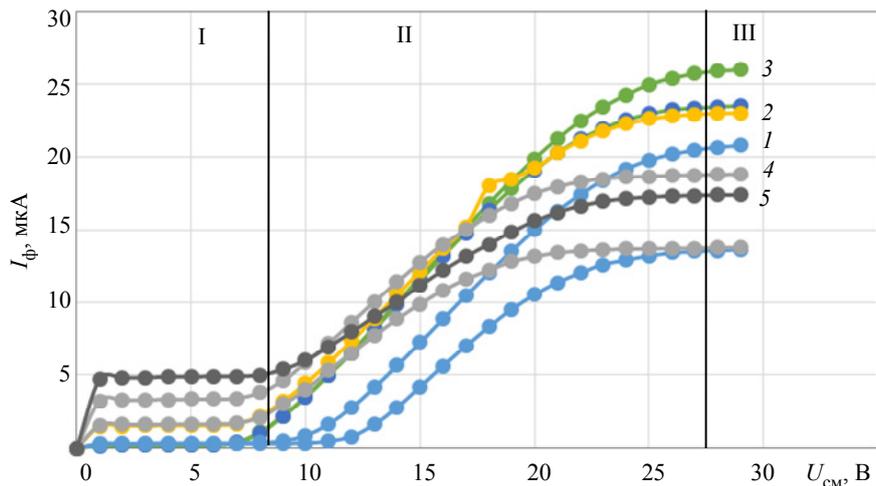


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики фотодиодов исследуемой структуры при освещении, радиус охранного кольца: 1 –  $R = 20 \mu\text{м}$ ; 2 –  $R = 45 \mu\text{м}$ ; 3 –  $R = 10 \mu\text{м}$ ; 4 –  $R = 90 \mu\text{м}$ ; 5 –  $R = 190 \mu\text{м}$ .  $U_{\text{см}}$  – смещение на фотодиоде – от 0 до 29 В. Значение темного тока насыщения  $I$  – от 14 до 26 мкА

Fig. 6. Current-voltage characteristics of the studied photodiodes under illumination, radius of guard ring is: 1 –  $R = 20 \mu\text{m}$ ; 2 –  $R = 45 \mu\text{m}$ ; 3 –  $R = 10 \mu\text{m}$ ; 4 –  $R = 90 \mu\text{m}$ ; 5 –  $R = 190 \mu\text{m}$ .  $U_{\text{см}}$  – bias voltage on photodiode – 0 to 29 V. The value of dark saturation current  $I$  – 14 to 26  $\mu\text{A}$

были исследованы электрофизические параметры тестовой и матричной структур. Для этого исследовался тестовый кристалл, который содержал фоточувствительные элементы различной площади для получения данных, необходимых для оптимизации структур.

Были измерены вольт-амперные характеристики (темновые и при освещении) различных фотодиодов, имеющих одинаковые топологические параметры зоны охрannого кольца, области контакта к подложке и зоны контакта к  $n^{++}$ -области.

На рис. 4 представлена схема измерения параметров исследуемой структуры. Схема обеспечивает освещение фотодиода, подачу смещения на фотодиод  $V_D$ , а также подключение измерительного прибора в цепь протекания тока через фотодиод.

Вся структура вместе с контактным устройством и светодиодом  $HL \lambda = 120$  кОм помещена в экранированный объем (обозначен штриховой линией), обеспечивающий защиту от внешних электромагнитных помех и света. Измерение тока  $I$  проводилось с помощью пикоамперметра  $pA$ . В цепи питания светодиода применен балластный резистор  $R_B$ . Генератор импульсов использовался как в режиме питания светодиода прямоугольными импульсами (для проверки работоспособности лавинного фотодиода), так и в режиме постоянного смещения при измерении световых характеристик. Для уменьшения воздействия помех от сети переменного тока частотой 50 Гц использовался RC-фильтр ( $R_{\phi}$ ,  $C_{\phi}$ ). Постоянная времени данной структуры составляет 56.4 мс.

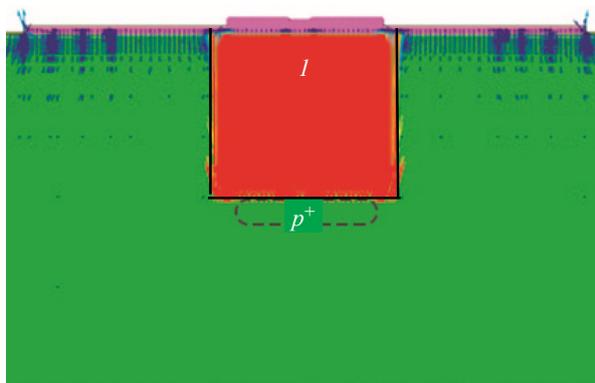


Рис. 7. Сечение кристалла ЛФД с областью электрического поля порядка 8.473 В/см (выделенная область  $I$ ). Напряжение смещения на ЛФД – 30 В

Fig. 7. Cross section of an APD crystal with an electric field region of the order of 8.473 V/cm (highlighted area  $I$ ). APD bias voltage – 30 V

Полученные вольт-амперные характеристики представлены на рис. 5 и 6.

На рис. 5 изображена темновая ВАХ. Область I – область нелавинных темновых токов (термины в соответствии с ГОСТ 17772–88) характеризуется низкими для данного диода значениями обратного тока (в районе 0.01 нА). Область II – область лавинного умножения. Лавинное умножение в исследуемых диодах начинается в области значений 9...13 В. Область III – область насыщения.

При значении напряжения на фотодиоде более 17 В изменение тока незначительно. Темновые токи насыщения имеют значения в области  $I_T = 105...325$  нА.

На рис. 6 представлены вольт-амперные характеристики, полученные при освещении фотодиодов. Длина волны излучения светодиода 630 нм (красный).

Нелавинные токи в области I составляют от 0.2 до 5 мкА. Лавинное умножение у большинства диодов начинается при смещении 8 В. Область насыщения III начинается приблизительно со смещения 28 В. Токи насыщения при освещении имеют значения от 14 до 26 мкА.

**Зависимость плотности тока от площади фотодиода.** Был проведен расчет напряженности поля в структуре (рис. 7), из которого видно, что область поля с высокой напряженностью электрического поля совпадает с площадью  $p^+$ -области, поэтому для расчета плотности тока используем значение площади  $S_{\text{обл}} p^+$ -области (рис. 8).

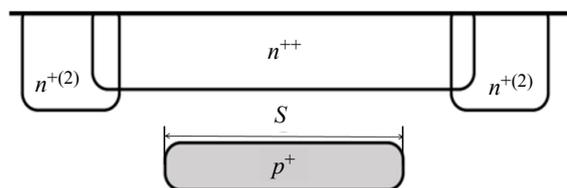


Рис. 8. Определение площади  $Sp^+$ -области фотодиода, участвующей в лавинном умножении в соответствии с распределением поля (см. рис. 7)

Fig. 8. Determination of the area  $Sp^+$  of the photodiode region involved in avalanche multiplication in accordance with the field distribution (fig. 7)

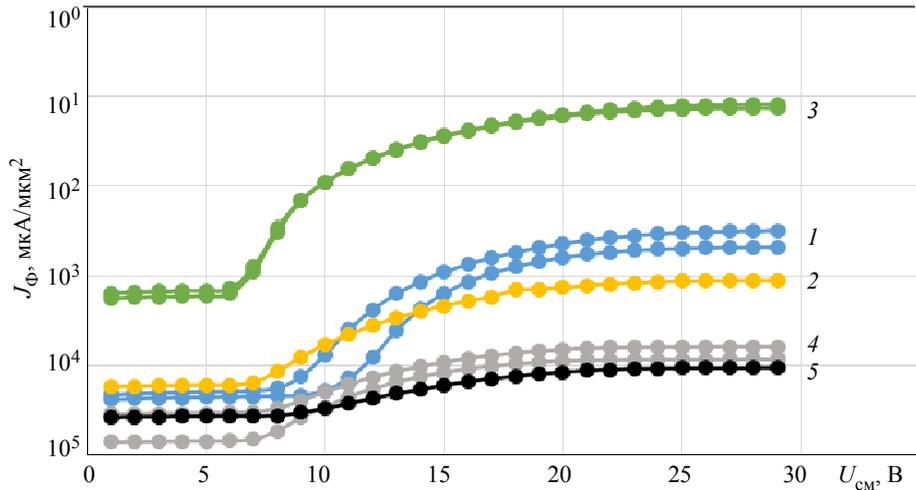


Рис. 9. График зависимостей плотности фототока от напряжения смещения для фотодиодов различной площади, радиус охранного кольца: 1 –  $R = 20$  мкм; 2 –  $R = 45$  мкм; 3 –  $R = 10$  мкм; 4 –  $R = 90$  мкм; 5 –  $R = 190$  мкм

Fig. 9. Dependence of photocurrent density on bias voltage for photodiodes of various areas, radius of guard ring is: 1 –  $R = 20$   $\mu\text{m}$ ; 2 –  $R = 45$   $\mu\text{m}$ ; 3 –  $R = 10$   $\mu\text{m}$ ; 4 –  $R = 90$   $\mu\text{m}$ ; 5 –  $R = 190$   $\mu\text{m}$

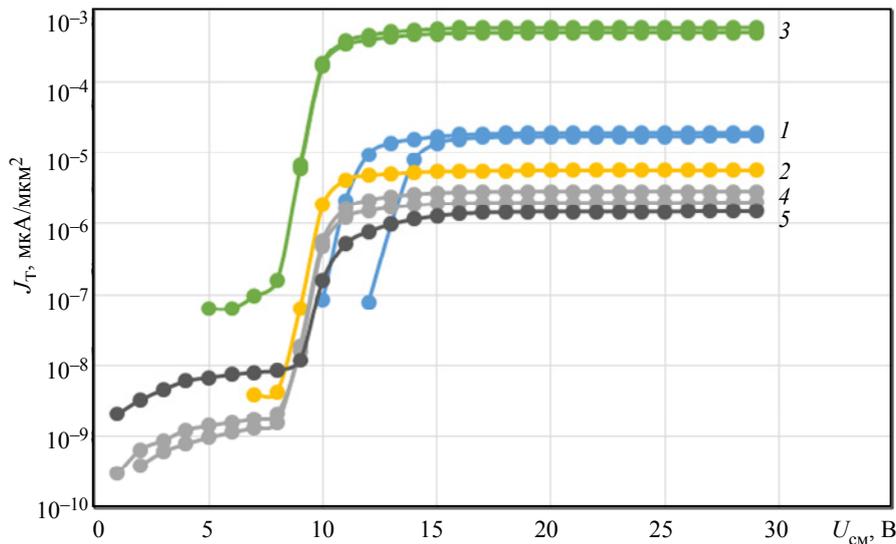


Рис. 10. График зависимостей плотности темного тока от напряжения смещения для фотодиодов различной площади: 1 –  $R = 20$  мкм; 2 –  $R = 45$  мкм; 3 –  $R = 10$  мкм; 4 –  $R = 90$  мкм; 5 –  $R = 190$  мкм

Fig. 10. Dependence of dark current density on bias voltage for photodiodes of various areas: 1 –  $R = 20$   $\mu\text{m}$ ; 2 –  $R = 45$   $\mu\text{m}$ ; 3 –  $R = 10$   $\mu\text{m}$ ; 4 –  $R = 90$   $\mu\text{m}$ ; 5 –  $R = 190$   $\mu\text{m}$

С учетом этой площади были построены зависимости плотности  $J$  фототока и темнового тока от напряжения смещения  $U_{\text{см}}$ , показанные на рис. 9 и 10, где фотодиоды различной площади представлены соответствующими значениями радиуса охранного кольца.

Из представленной зависимости видно, что большую плотность тока имеют диоды малой площади и наименьшую плотность тока имеет диод с наибольшей площадью. Данная тенденция сохраняется и для плотности темновых токов (рис. 10).

Из экспериментальных результатов было определено значение коэффициента умножения фототока и темнового тока. Значения рассчитывались по формуле, взятой из ГОСТа 17772–88. Коэффициент умножения темнового тока  $M_T$  лавинного фотодиода следует определять по формуле

$$M_T = \frac{I_{\text{T.л.}}}{I_{\text{T.н.}}},$$

где  $I_{\text{T.л}}$  – темновой ток в лавинном режиме, А;  $I_{\text{T.н}}$  – темновой ток в нелавинном режиме, А.

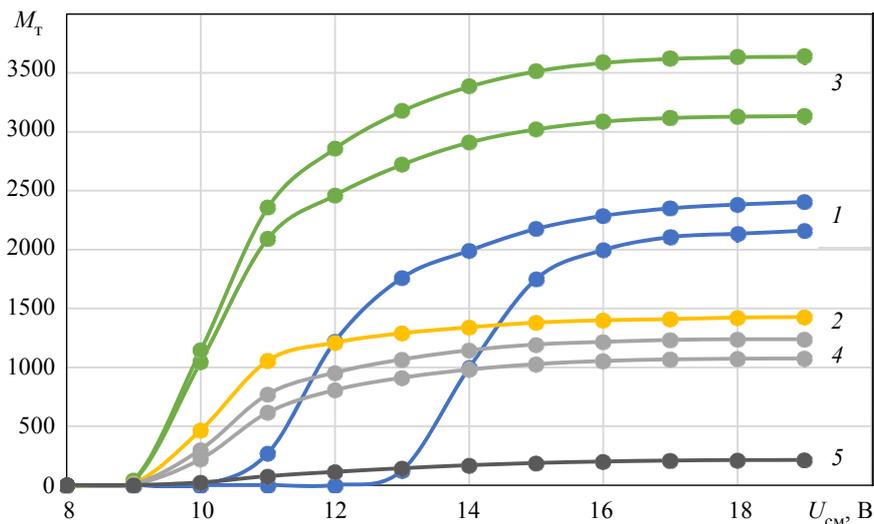


Рис. 11. График зависимостей коэффициента умножения темного тока от напряжения для диодов различной площади: 1 –  $R = 20$  мкм; 2 –  $R = 45$  мкм; 3 –  $R = 10$  мкм; 4 –  $R = 90$  мкм; 5 –  $R = 190$  мкм  
 Fig. 11. Dependence of dark gain on applied bias for photodiodes of various areas: 1 –  $R = 20$   $\mu\text{m}$ ; 2 –  $R = 45$   $\mu\text{m}$ ; 3 –  $R = 10$   $\mu\text{m}$ ; 4 –  $R = 90$   $\mu\text{m}$ ; 5 –  $R = 190$   $\mu\text{m}$

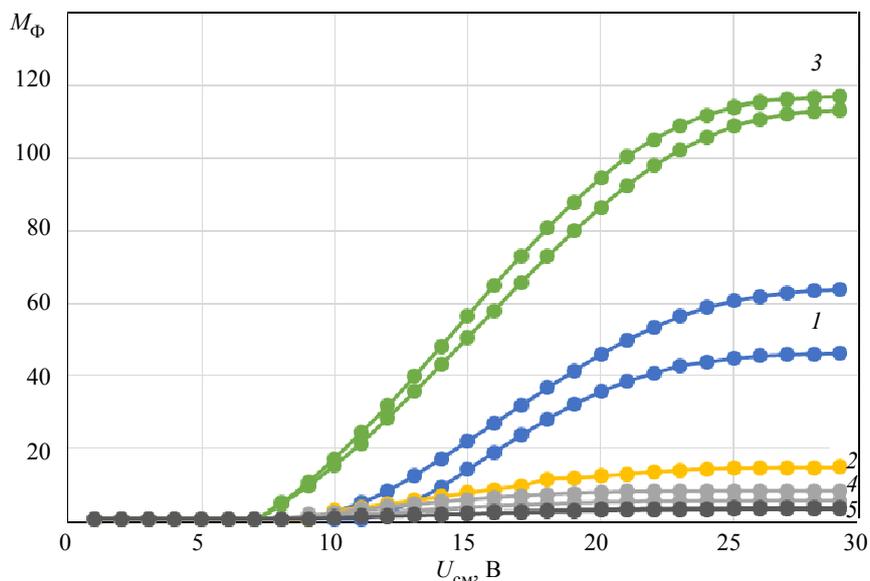


Рис. 12. График зависимостей коэффициента умножения фототока от напряжения для диодов различной площади: 1 –  $R = 20$  мкм; 2 –  $R = 45$  мкм; 3 –  $R = 10$  мкм; 4 –  $R = 90$  мкм; 5 –  $R = 190$  мкм  
 Fig. 12. Dependence of photo-gain on applied bias for photodiodes of various areas: 1 –  $R = 20$   $\mu\text{m}$ ; 2 –  $R = 45$   $\mu\text{m}$ ; 3 –  $R = 10$   $\mu\text{m}$ ; 4 –  $R = 90$   $\mu\text{m}$ ; 5 –  $R = 190$   $\mu\text{m}$

Рис. 11 иллюстрирует зависимость коэффициента умножения темного тока от напряжения смещения.

Коэффициент умножения фототока  $M_{\Phi}$  лавинного фотодиода следует определять по формуле

$$M_{\Phi} = I_{\Phi, л} / I_{\Phi, н},$$

где  $I_{\Phi, л}$ ,  $I_{\Phi, н}$  – фототоки в лавинном и нелавинном режимах, А.

На рис. 12 представлена зависимость коэффициента умножения фототока от напряжения смещения.

По рассчитанным значениям можно сказать, что коэффициент умножения темного тока больше, чем фототока. Также видно, что существует зависимость коэффициента умножения темного и фототока от площади фотодиода. Чем площадь диода меньше, тем больше коэффициент умножения.

**Определение шумовых параметров.** Определение шумовых свойств – это одна из основных задач при оценке использования ЛФД в фотоэлектронных устройствах. Здесь оценивались шумовые свойства ЛФД кристалла с матричным расположением ЛФД.

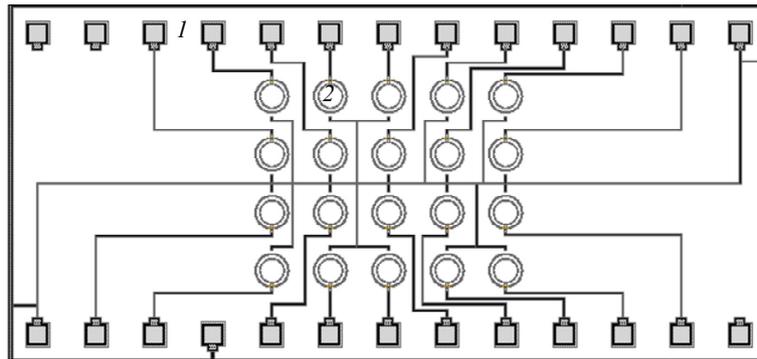


Рис. 13. Топология фотодиодной матрицы: 1 – фотодиоды с радиусом охранного кольца  $R = 45 \text{ мкм}$ ; 2 – контактная площадка  
Fig. 13. Photodiode array topology: 1 – photodiodes with radius of guard ring is  $45 \text{ }\mu\text{m}$ ; 2 – contact pad

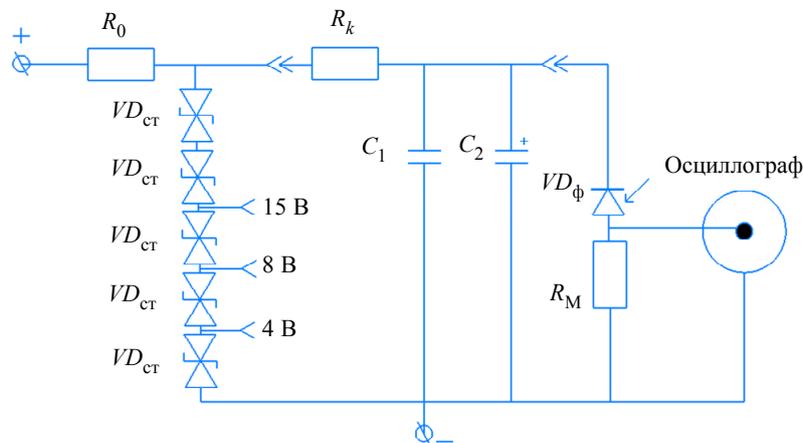


Рис. 14. Схема измерения шумовых параметров фотодиода:  
 $C_1$  – керамический конденсатор;  $C_2$  – электролитический конденсатор;  
 $R_M = 1.1 \text{ МОм}$  – нагрузочный резистор;  $R_k$  – резистор  $100 \text{ кОм}$ , который образует с  $C_1$  и  $C_2$  фильтрующую схему;  $R_0$  – балластный резистор;  $VD_{ст}$  – двусторонние стабилитроны, образующие схему формирования стабильных уровней напряжения  
Fig. 14. Measurement circuit for the photodiode noise parameter:  
 $C_1$  – ceramic capacitor;  $C_2$  – electrolytic capacitor;  $R_M = 1.1 \text{ MOhm}$  – load resistor;  $R_k$  –  $100 \text{ kOhm}$  resistor, which forms a filter circuit with  $C_1$  and  $C_2$ ;  $R_0$  – ballast resistor;  $VD_{ст}$  – double-sided zener diodes, forming a circuit for generating stable voltage levels

На рис. 13 изображена топология исследуемой матричной структуры – матрицы лавинных фотодиодов, состоящей из 20 одинаковых фоточувствительных элементов с радиусом охранного кольца  $45 \text{ мкм}$ .

Для формирования потенциалов смещения ЛФД была разработана схема формирования стабильных уровней напряжения, на основе которой, в свою очередь, создана схема измерения шумовых параметров фотодиода (рис. 14).

Вся структура вместе с контактным устройством и светодиодом помещена в экранированный объем, обеспечивающий защиту от внешних электромагнитных помех и света. Для уменьше-

ния воздействия помех от сети переменного тока частотой  $50 \text{ Гц}$  использовалась фильтрующая схема, состоящая из резистора номиналом  $100 \text{ кОм}$ , керамического и электролитического конденсаторов. Сигнал с фотодиода снимается с помощью осциллографа.

С помощью осциллографа были сняты значения амплитуды напряжения сигнала в темноте и при постоянном освещении красным и ультрафиолетовым светодиодами при различных смещениях на фотодиоде. Из этих значений было посчитано среднее значение и среднеквадратическое отклонение. Расчет проводился по 2000 точек.

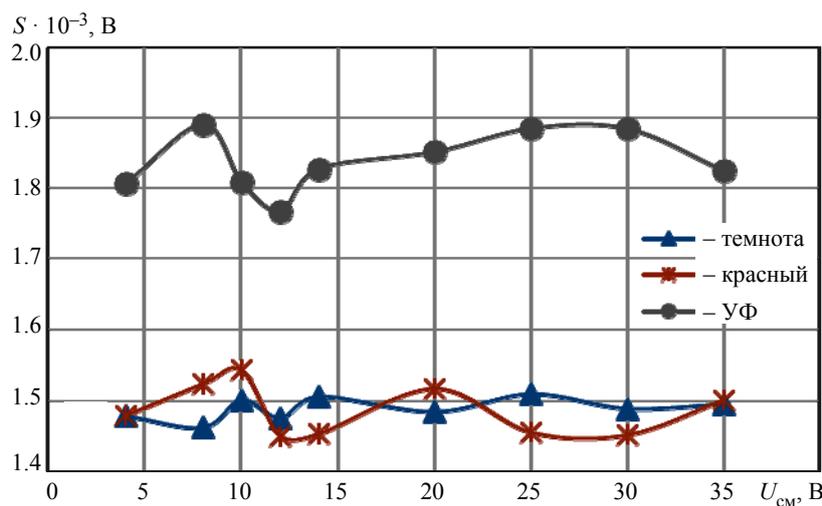


Рис. 15. Зависимость стандартного отклонения от напряжения смещения

Fig. 15. Dependence of standard deviation of voltage on applied bias

Здесь оценивалась ширина шумовой дорожки. С помощью осциллографа в режиме АС получили выборку из значений напряжения в режиме запоминания осциллографа. Было проведено запоминание «шумовой дорожки».

Запомненные данные обрабатывались следующим образом:

1) при выбранном значении напряжения смещения для расчета использовались запомненные данные 2000 точек значения напряжения сигнала. Временной интервал между выборками составил 8 мкс;

2) на основе запомненных 2000 данных были вычислены средние значения  $\bar{x}$  амплитуды напряжения сигнала  $U_{\text{сиг}}$ , а затем стандартные  $S$  отклонений по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}},$$

где  $x_i$  – значение амплитуды напряжения сигнала;  $\bar{x}$  – среднее значение сигнала;  $n$  – количество измерений;

3) вычисленные значения представлены в таблице и на графиках зависимости стандартного отклонения сигнала от среднего от напряжения смещения (рис. 15).

Из этих значений было посчитано среднее значение и среднеквадратическое отклонение. Расчет проводился по 2000 точек.

Вычисленные значения представлены на рис. 15.

На представленном графике видны значительные флуктуации значений стандартного отклонения. При вычислении флуктуаций наблюдались воспроизводимые участки значений в области смещения на фотодиоде в районе 10...12 В – зоны образования лавинного процесса.

Значения стандартных отклонений от напряжения смещения при различном освещении фотодиода  
Values of standard deviations from bias voltage of the photodiode under different illumination

$L_{\text{зар}},$ мм	$S, \text{ В}$		
	$U_{\text{сиг}} = 7$ (красный)	$U_{\text{сиг}} = 0.06$ (темнота)	$U_{\text{сиг}} = 6$ (ультрафиолетовый, УФ)
4	$1.4782 \cdot 10^{-3}$	$1.478 \cdot 10^{-3}$	$1.806 \cdot 10^{-3}$
8	$1.5233 \cdot 10^{-3}$	$1.461 \cdot 10^{-3}$	$1.891 \cdot 10^{-3}$
10	$1.5428 \cdot 10^{-3}$	$1.15 \cdot 10^{-3}$	$1.808 \cdot 10^{-3}$
12	$1.4499 \cdot 10^{-3}$	$1.1474 \cdot 10^{-3}$	$1.767 \cdot 10^{-3}$
14	$1.4521 \cdot 10^{-3}$	$1.151 \cdot 10^{-3}$	$1.8275 \cdot 10^{-3}$
20	$1.5166 \cdot 10^{-3}$	$1.484 \cdot 10^{-3}$	$1.851 \cdot 10^{-3}$
25	$1.4545 \cdot 10^{-3}$	$1.151 \cdot 10^{-3}$	$1.885 \cdot 10^{-3}$
30	$1.451 \cdot 10^{-3}$	$1.488 \cdot 10^{-3}$	$1.884 \cdot 10^{-3}$
35	$1.15 \cdot 10^{-3}$	$1.495 \cdot 10^{-3}$	$1.824 \cdot 10^{-3}$

Также, как и в случае темного сигнала, под УФ-освещением значения шума растут до лавины и резко снижаются с началом лавины.

При освещении структуры красным светом видно, что сначала зависимость повторяет по форме зависимости в темноте и при освещении УФ-светом, есть повышение к 10 В и резкое падение значений примерно к 12 В. При больших смещениях на графике видна сильная флуктуация значения отклонения. Это может быть связано как с особенностями распределения поля в структуре (с действием плавающего охранного кольца), так и с началом более «жесткого» состояния лавинного умножения.

**Расчет динамического диапазона.** Динамический диапазон исследуемого фотодиода как части матричного фотоприемника определяем в соответствии с ГОСТ 25532–89, где динамический диапазон определяется как отношение сигнала насыщения фотоприемника за вычетом тем-

нового тока к среднему квадратическому напряжению темнового шумового сигнала.

Исходя из полученных данных при измерении фототока с помощью пикоамперметра, приведенных в рис. 6, для диода с радиусом охранного кольца 45 мкм, ток насыщения составляет 23.1 мкА. Из приведенных данных в таблице значение темнового шума составляет 0.001495 В.

Согласно определению пункта 39 ГОСТ 25532–89 динамический диапазон фотодетекторов матричного фотоприемника рассчитывается следующим образом:

$$D = \frac{I_C - I_T}{I_T}.$$

Исходя из полученных значений (рис. 9, 10), динамический диапазон составляет

$$D = \frac{23.1 \text{ мкА} \dots 142.7 \text{ нА}}{0.001495 \text{ В}} = 16\,891.66.$$

1.1МОм

Динамический диапазон при УФ-освещении будем считать по определению из ГОСТ 17772–88 как значение уровня напряжения сигнала с фотодиода  $U_{\text{сиг}}$ , деленное на уровень шума (значение стандартного отклонения) в темноте  $S_T$  (см. таблицу):

$$D = \frac{U_{\text{сиг}}}{S_T}.$$

При УФ-освещении

$$D = \frac{U_{\text{сиг}}}{S_T} = \frac{6 \text{ В}}{0.001495} = 4013.38.$$

Значения динамического диапазона при освещении красным светом длиной волны 650 нм составляет 16 734.94, а значение при освещении УФ-светом с длиной волны 210 нм равняется 3173.26.

Различные значения динамического диапазона можно объяснить различием длин волн, которые формируют разные области поглощения и усиления в структуре. На длине волны 210 нм глубина поглощения в кремнии составляет 0.1 мкм, где происходит поглощение излучения, а также генерации и рекомбинации носителей за-

ряда [3]. Область высокой напряженности поля – порядка 1...2 мкм (область 1 на рис. 7), участвует в образовании усиления сигнала. На длине волны 650 нм излучение проникает в кремний на глубину 2.5 мкм [3]. При этом область генерации и рекомбинации совпадает с зоной умножения. Этим можно объяснить разницу в динамических диапазонах в данной конкретной структуре. Тем не менее, значения динамических диапазонов получились достаточно высокими для приборов данного типа.

**Выводы.** Статья отражает исследование изготовленных по планарной технологии образцов ионно-легированных фоточувствительных структур с различной площадью и определение их основных параметров.

Проведенное исследование подтверждает факт образования лавинного умножения в структуре. Были рассчитаны коэффициенты умножения темнового тока и фототока. Коэффициент умножения темнового тока по значению оказался больше, чем коэффициент умножения фототока, что может быть объяснено отсутствием экранирующего влияния фотогенерированных носителей заряда на поле. Выявлен факт различия значений плотности тока и коэффициента умножения для фотодиодов различной площади.

Была проведена оценка шумовых параметров лавинного фотодиода и определен динамический диапазон на двух длинах волн – 210 и 650 нм.

Динамический диапазон на 210 нм составил 4013.38 о. е., а на 650 нм – 16 891.66 о. е. Были определены пороговые значения регистрируемых фотонных потоков, и на длине волны 210 нм это было  $102.9 \cdot 10^6$  фотонов, а на 650 нм –  $164.64 \cdot 10^6$ . Значения получились достаточно высокими для приборов данного типа.

Полученные значения показывают перспективность использования ионно-легированных фоточувствительных структур на основе кремния в приборах квантовой электроники.

Полученные выводы послужат основой для проектирования перспективных быстродействующих матричных фотоприемников.

#### Список литературы

1. Садыгов З. Я. Физика твердотельных фотоэлектронных умножителей / ОИЯИ. Дубна, 2023. 153 с.  
2. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов: в 2 кн. Кн. 2 / пер. с англ. В. А. Гергеля; под ред. Р. А. Суриса. М.: Мир, 1984. 456 с.

3. Йесперс П., Ван де Виле Ф., Уайт М. Полупроводниковые формирователи сигналов изображения / пер. с англ. под ред. Р. А. Суриса. М.: Мир, 1979. 573 с.

### Информация об авторах

**Максименкова Ольга Борисовна** – студентка магистратуры гр. 0252, СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; инженер, АО «ЦНИИ „Электрон“», пр. М. Тореца, д. 68, лит. Р, Санкт-Петербург, 194223, Россия.  
E-mail: Souloflight50@gmail.com

**Лобанов Иван Павлович** – студент магистратуры гр. 0283, СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; инженер, АО «ЦНИИ „Электрон“», пр. М. Тореца, д. 68, лит. Р, Санкт-Петербург, 194223, Россия.  
E-mail: ivan.p.lobanov@gmail.com

### References

1. Sadygov Z. Ja. Fizika tverdotel'nyh fotoelektronnyh umnozhitel'ej. Dubna: OIJaI, 2023. 153 s. (In Russ.).
2. Zi S. M. Fizika poluprovodnikovyh priborov: v 2 kn. Kn. 2 / per. s angl. V. A. Gergelja; pod red. R. A. Surisa. M.: Mir, 1984. 456 s. (In Russ.).
3. Jespers P., Van de Vile F., Uajt M. Poluprovodnikovye formirovateli signalov izobrazhenija / per. s angl. pod red. R. A. Surisa. M.: Mir, 1979. 573 s. (In Russ.).

### Information about the authors

**Olga M. Maksimenkova** – master's degree student, gr. 0252, Saint Petersburg Electrotechnical University; engineer of JSC «NRI „Electron“», av. M. Toreza, 68, St. Petersburg, 194223, Russia.  
E-mail: Souloflight50@gmail.com

**Ivan P. Lobanov** – master's degree student, gr. 0283, Saint Petersburg Electrotechnical University; engineer of JSC «NRI „Electron“», av. M. Toreza, 68, St. Petersburg, 194223, Russia.  
E-mail: ivan.p.lobanov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 08.07.2024; принята к публикации после рецензирования 24.10.2024; опубликована онлайн 25.12.2024.

Submitted 08.07.2024; accepted 24.10.2024; published online 25.12.2024.

---