ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 621.315.592
https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-5-415-423

Поступило в редакцию 08.09.2026
Received 08.09.2026

Т. Д. Шипица, А. В. Мазаник, К. Г. Афанасьев, В. Г. Баев, А. А. Бринь, И. А. Свито, А. А. Волков, Т. Д. Войтеховский

Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
ул. Академическая, 15/2, 220072, Минск, Республика Беларусь

ОПТИМИЗАЦИЯ *p–i–n* СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ GaN ДЛЯ БЕТАВОЛЬТАИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

(Представлено академиком С. А. Чижиком)

Аннотация. Определены оптимальные значения толщины бета-источника ^{63}Ni для бетавольтаического преобразователя энергии с помощью программного пакета Geant4, предназначенного для математического моделирования прохождения частиц через вещество методом Монте-Карло, с учетом эффекта самопоглощения. Так, при толщине 2 мкм поверхностная активность достигает 90 % от насыщения и составляет $4{,}6 \cdot 10^8$ Бк·см$^{-2}$. Рассчитаны энергетические спектры электронов на поверхности источника в зависимости от его толщины, на их основании оптимизированы параметры барьерной *p–i–n* структуры на основе нитрида галлия GaN, в которой происходит поглощение бета-частиц, генерация электронно-дырочных пар и их разделение встроенным электрическим полем. Как показали расчеты, максимальная электрическая мощность, генерируемая бетавольтаическим преобразователем, составляет 0,12 мкВт·см$^{-2}$, что соответствует КПД бетавольтаического преобразования 6,7 %. Полученные результаты в дальнейшем будут использованы для создания прототипа бетавольтаического преобразователя энергии на основе нитрида галлия GaN.

Ключевые слова: *p–i–n* структура, нитрид галлия, бетавольтаическое преобразование энергии, источник ^{63}Ni, моделирование, оптимизация

Для цитирования. Оптимизация *p–i–n* структуры на основе GaN для бетавольтаического преобразования энергии / Т. Д. Шипица, А. В. Мазаник, К. Г. Афанасьев [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2026. – Т. 70, № 5. – С. 415–423. https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-5-415-423

Timophey D. Shipitsa, Alexander V. Mazanik, Konstantin G. Afanaciev, Vadim G. Bayev, Anton A. Brin, Ivan A. Svito, Alexander A. Volkov, Timophey D. Voytehovsky

Institute of Power Engineering of the National Academy of Science of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
15/2, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus

OPTIMIZATION OF GaN-BASED *p–i–n* STRUCTURE FOR BETAVOLTAIC ENERGY CONVERSION

(Communicated by Academician Sergey A. Chizhik)

Abstract. Using mathematical modeling in the Geant4 software package designed for simulating particle transport through matter via the Monte Carlo method and taking into account the self-absorption effect, the optimal thickness of the ^{63}Ni beta source for a betavoltaic energy converter was determined. The surface activity reaches 90 % relative to the saturation value at a source thickness of 2 μm and is equal to $4.6 \cdot 10^8$ Bq/cm^2. The electron energy spectra on the source surface were calculated as a function of its thickness. These spectra were used for optimization of the parameters of a *p-i-n* barrier structure, in which beta-particles are absorbed, electron-hole pairs are generated and separated by a built-in electric field. According to the calculations, the maximum electric power generated by a GaN-based betavoltaic converter is equal to 0.12 μW·cm^{-2}, which corresponds to a betavoltaic conversion efficiency of 6.7 %. The results will be used in the design of a prototype of a gallium nitride betavoltaic energy converter.

Keywords: *p–i–n* structure, gallium nitride, betavoltaic energy conversion, ^{63}Ni source, modelling, optimization

For citation. Shipitsa T. D., Mazanik A. V., Afanaciev K. G., Bayev V. G., Brin A. A., Svito I. A., Volkov A. A., Voytehovsky T. D. Optimization of GaN-based *p–i–n* structure for betavoltaic energy conversion. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2026, vol. 70, no. 5, pp. 415–423 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-5-415-423

Введение. Бетавольтаические преобразователи энергии представляют собой барьерные структуры на основе широкозонных полупроводников, которые генерируют электрический ток за счет поглощения бета-частиц, испускаемых бета-активным источником, размещенным на поверх-

ности [1–3]. Такие устройства используются в качестве надежных и долговечных (срок службы до 100 лет) источников электропитания малой мощности, работающих в экстремальных и недоступных для частого обслуживания условиях: при экстремально низких и высоких температурах; в ситуациях, когда замена батареи неудобна или невозможна (например, в системах дистанционного космического или подводного зондирования, для питания электрокардиостимуляторов).

Одним из наиболее часто применяемых источников бета-частиц является изотоп ^{63}Ni, в результате распада которого образуется стабильное ядро ^{63}Cu. Изотоп ^{63}Ni является источником бета-частиц низкой энергии и идеально подходит в качестве источника энергии для бетавольтаических преобразователей [4]. Максимальная энергия испускаемого при бета-распаде ^{63}Ni электрона составляет 66,9 кэВ, средняя энергия – 17,5 кэВ, период полураспада – 101,2 года, удельная активность – $2{,}1 \cdot 10^{12}$ Бк/г [5].

Согласно данным NIST ESTAR [6], пробег в приближении непрерывного замедления (CSDA Stopping range) для электрона с энергией 66,9 кэВ в никеле составляет около 11 мкм без учета множественного рассеяния. Полуэмпирическая формула Канайи–Окаямы [7] для максимальной длины пробега электрона с энергией 67 кэВ в никеле дает близкое значение 10 мкм. Таким образом, можно утверждать, что увеличение толщины источника электронов ^{63}Ni свыше 10 мкм не приведет к увеличению выхода электронов с поверхности источника и увеличению плотности энергии, доступной для бетавольтаического преобразования. Вместе с тем поскольку стоимость и масса источника пропорциональны его толщине, целесообразно установить минимальную толщину, при которой поверхностная активность будет близка к максимально возможной.

Оптимизация дизайна барьерной структуры (в первую очередь, толщин слоев), в которой происходит поглощение бета-частиц, генерация электронно-дырочных пар и их разделение электрическим полем, требуют знания энергетического спектра бета-частиц на поверхности источника. Поскольку самопоглощение бета-частиц с низкими энергиями в материале источника, очевидно, будет заметно влиять на интенсивность и спектр бета-излучения, попадающего в барьерную *p–i–n* структуру бетавольтаического преобразователя, были рассчитаны интенсивность потока бета-частиц и его спектральный состав в зависимости от толщины источника ^{63}Ni.

С учетом энергетического спектра бета-частиц на поверхности источника была получена зависимость электрофизических параметров барьерной *p–i–n* структуры на примере GaN (максимальная электрическая мощность, ток короткого замыкания и напряжение холостого хода) от толщины поглощающего слоя. Было установлено, что для источника бета-излучения ^{63}Ni оптимальной является толщина 2 мкм, в то время как оптимальная толщина *i*-слоя составляет 1000 нм.

Материалы и методы исследования. Для моделирования процесса самопоглощения в материале источника ^{63}Ni использовался программный пакет Geant4 (Geometry and Tracking), представляющий собой объектно-ориентированную библиотеку на языке C++, предназначенную для моделирования прохождения частиц через вещество методом Монте-Карло [8]. Модель источника представляла прямоугольный параллелепипед размерами $60 \times 60 \times d$ мкм (где d – толщина источника), полностью состоящий из ^{63}Ni. Для моделирования инициировалось 10^7 актов распада в случайных точках источника, равномерно распределенных по его объему. Энергия испущенных в этих актах распада бета-частиц распределялась в соответствии с энергетическим спектром бета-распада ^{63}Ni. Вектор начального импульса бета-частиц равномерно распределялся в диапазоне углов от 0 до 4π. Для каждой испущенной при бета-распаде частицы проводилось моделирование траектории в объеме источника с учетом взаимодействия с веществом источника (изменение энергии и импульса при рассеянии на атомах вещества). Для частиц, которые вылетали на поверхность источника, обращенную к *p–i–n* структуре, фиксировалась остаточная кинетическая энергия. Полученные результаты моделирования использовались для определения энергетического спектра бета-источника конечной толщины.

Для моделирования взаимодействия *p–i–n* структуры GaN с бета-излучением использовался комплексный подход, в ходе которого осуществлялось моделирование облучения структуры бета-частицами с определением профиля генерации образующихся электронно-дырочных пар

с помощью пакета Geant4. На основе полученного профиля генерации проводилось вычисление вольт-амперных характеристик и определяемых из нее рабочих параметров с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics [9]. В расчетах использовалась одномерная модель, в которой варьировалась толщина *i*- и *p*-слоев *p–i–n* структуры. Моделирование генерации электрического тока в *p–i–n* структуре на основе GaN осуществлялось с использованием модуля Semiconductor пакета мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics, где решалась следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \nabla \cdot (-\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla \varphi) = \rho \\ \rho = q_e (p - n + N_D^+ - N_A^-) \\ n = N_C F_{1/2}(E_{F0}) \\ p = N_V \exp\left(\dfrac{q_e (E_V - E_{F0})}{kT} \right) \\ J_n = n\mu \quad \nabla E \quad + q_e D_n \nabla n \\ J_p = p\mu_p \nabla E \quad - q_e D_p \nabla p \\ \dfrac{\delta n}{\delta t} = \dfrac{1}{q_e} (\nabla \cdot J_n) + G_n - \sum\limits_{i=1}^{2} R_{n,i} \\ \dfrac{\delta p}{\delta t} = -\dfrac{1}{q_e} (\nabla \cdot J_p) + G_p - \sum\limits_{i=1}^{2} R_{p,i} \end{cases}, \tag{1}$$

где ε_0 – электрическая постоянная; ε_r – диэлектрическая проницаемость полупроводника; φ – электростатический потенциал; ρ – объемная плотность заряда; n и p – концентрации электронов и дырок соответственно; N_D^+ и N_A^- – концентрации ионизованных примесей; q_e – элементарный заряд; $F_{1/2}(E_{F0})$ – интеграл Ферми–Дирака; E_V и E_C – энергии, соответствующие потолку валентной зоны и дну зоны проводимости соответственно; N_V и N_C – эффективные плотности состояний в валентной зоне и зоне проводимости соответственно; J_n и J_p – плотности токов электронов и дырок соответственно; D_n и D_p – коэффициенты диффузии электронов и дырок соответственно; $G_n = G_p = G$ – скорость генерации носителей заряда при падении на полупроводник пучка электронов; $R_n = R_p = R$ – скорость рекомбинации носителей заряда, которая определялась как сумма двух составляющих, одна из которых соответствует Оже-процессам ($i = 1$), а другая – безызлучательной рекомбинации через уровни в запрещенной зоне ($i = 2$).

Поскольку при использовании бета-источника генерация электронно-дырочных пар является стационарной, в используемой модели в уравнении (1) $\dfrac{\delta n}{\delta t} = \dfrac{\delta p}{\delta t} = 0$; при этом скорости генерации электронов и дырок определяются соотношением

$$G = \frac{J_{\text{beta}}}{q_e E_{e-h}} \frac{dE}{dx}, \tag{2}$$

где J_{beta} – плотность тока пучка электронов; E_{e-h} – энергия образования электронно-дырочной пары; dE/dx – энергоотложение электрона при его прохождении через полупроводник.

В качестве исходных параметров физико-математической модели использовались следующие величины:

концентрации примесей (N_D^+ и N_A^-);

физические характеристики полупроводника: подвижности носителей заряда (μ_n и μ_p); время жизни носителей заряда ($\tau_n = \tau_p = \tau$); ширина запрещенной зоны (E_g); энергия сродства к электрону (χ_0); эффективные плотности электронных состояний в валентной зоне (N_V) и зоне проводимости (N_C);

геометрические размеры (ширина и площадь поперечного сечения).

Ширина запрещенной зоны нитрида галлия принималась равной E_g = 3,42 эВ [10; 11]. Расчеты проводились методом конечных элементов, где в каждом узле расчетной сетки решалось уравнение Пуассона на основе предварительно рассчитанного профиля распределения примеси в полупроводниковом материале.

В модуле Semiconductor задавались следующие концентрации ионизованных примесей, экспериментально установленные производителем *p–i–n* структур на основе GaN: в контактном *p*-слое GaN с варьируемой толщиной от 50 до 2000 нм $N_A^- = 3{,}0\cdot10^{17}$ см$^{-3}$, в *i*-слое с толщиной, варьируемой в пределах от 300 до 1000 нм, $N_D^+ = 1{,}0\cdot10^{15}$ см$^{-3}$ и в *n*-слое толщиной 200 нм $N_D^+ = 1{,}0\cdot10^{19}$ см$^{-3}$. Контакты к *p–i–n* структуре считались идеальными омическими (с нулевым сопротивлением). На контакте к *n*-слою задавался потенциал 0 В, на контакте к *p*-слою – ненулевой потенциал, который варьировался для получения вольт-амперной характеристики.

Профиль распределения донорных и акцепторных примесей состоял из областей с однородным легированием и переходных участков на границе слоев. В переходных участках профиль задавался функцией Гаусса с характерной длиной затухания 20 нм до уровня фоновой концентрации (10^{15} см$^{-3}$).

Для описания динамики неравновесных носителей заряда рассматривались процессы рекомбинации Шокли–Рида–Холла через ловушки и Оже-рекомбинации. С этой целью для материала были заданы значения времени жизни носителей τ и коэффициента Оже-рекомбинации $8\cdot10^{-31}$ см$^6\cdot$с$^{-1}$ [12]. Необходимо отметить, что в различных источниках значения τ заметно различаются. Например, оно может варьироваться с 0,7 [13] до 120 нс [14]. В нашей модели для *i*-слоя *p–i–n* структуры мы использовали значение времени жизни τ = 1,0 нс, а для *p*-слоя, с учетом равновесной концентрации носителей заряда в нем – 0,003 нс.

Одним из важных параметров, необходимых для моделирования транспорта носителей заряда в полупроводниковых материалах, является их подвижность. В случае GaN для расчетов была использована формула Кауги–Томаса [15]

$$\mu_{n,p} = \mu_{\min n,p} + \frac{\mu_{\max n,p} - \mu_{\min n,p}}{1 + \left(\frac{N_D + N_A}{N_{gn,p}} \right)^{\gamma}}, \tag{3}$$

где $\mu_{\max n,p}$ – подвижности носителей заряда в нелегированном полупроводнике; $\mu_{\min n,p}$ – подвижности в сильнолегированном (концентрация легирующей примеси 10^{19} –10^{21} см$^{-3}$) полупроводнике [15]; $N_{gn,p}$ и γ – константы конкретного полупроводникового материала.

Используя данные работы [16], уравнение (3) по отдельности для электронов и дырок можно записать как

$$\mu_n \left(\frac{\text{см}^2}{Bc} \right) = 100 + \frac{1600 - 100}{1 + \left(\frac{N_D(\text{см}^{-3}) + N_A(\text{см}^{-3})}{3\cdot10^{17}} \right)^{0,7}}, \tag{4}$$

$$\mu_p \left(\frac{\text{см}^2}{Bc} \right) = 10 + \frac{175 - 10}{1 + \left(\frac{N_D(\text{см}^{-3}) + N_A(\text{см}^{-3})}{2{,}5\cdot10^{17}} \right)^{1,5}}.$$

В Geant4 создавалась модель *p–i–n* структуры в виде параллелепипеда, состоящего из GaN. С использованием встроенных в Geant4 методов Монте-Карло моделировались траектории 10^6 электронов. Полученные в результате моделирования траектории электронов использовались для построения гистограммы энергоотложения. Профиль генерации электронно-дырочных пар рассчитывался в соответствии с уравнением (2) исходя из средней энергии образования электронно-дырочной пары в GaN E_{e-h} = 8,9 эВ [17] и плотности тока электронов, которая была выбрана как $2{,}6\cdot10^{-5}$ А·см$^{-2}$ на основании параметров реальной электронной пушки для слу-

чая моноэнергетического пучка электронов и $7{,}3 \cdot 10^{-11}$ А·см$^{-2}$ для полиэнергетического спектра с учетом эффекта самопоглощения (см. ниже). Профиль генерации использовался в дальнейшем в качестве входных данных для COMSOL модели.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1, *a* приведены энергетические спектры бета-частиц на поверхности источника ^{63}Ni в зависимости от его толщины d_{Ni}. Можно видеть, что с увеличением толщины источника пик распределения смещается в область бóльших энергий, при этом средняя энергия вышедших на поверхность электронов увеличивается по сравнению со спектром одиночного распада ^{63}Ni примерно на 7 кэВ. При толщине источника $d_{Ni} > 2$ мкм средняя энергия увеличивается менее чем на 1 %. При этом отношение числа вышедших на поверхность электронов к общему числу промоделированных актов распада (Y_β) уменьшается с толщиной (рис. 1, *b*).

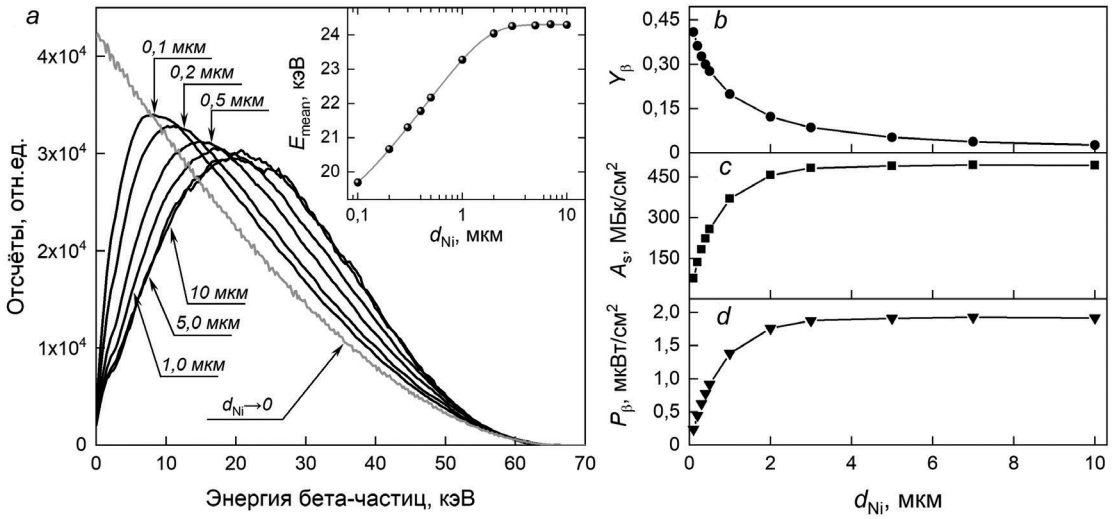


Рис. 1. Энергетические спектры бета-частиц и их средняя энергия на поверхности источника ^{63}Ni (на вставке) (*a*), отношение числа вышедших на поверхность бета-частиц к общему числу промоделированных актов распада Y_β (*b*), поверхностная активность A_s (*c*), поверхностная плотность мощности бета-излучения P_β (*d*) в зависимости от толщины источника ^{63}Ni d_{Ni}

Fig. 1. Energy spectra of beta particles and their average energy on the surface of a ^{63}Ni source (inset) depending on its thickness d_{Ni} (*a*), the ratio of the number of beta particles emerging on the surface to the total number of simulated decay events Y_β (*b*), surface activity A_s (*c*), surface beta power density P_β (*d*) depending on the ^{63}Ni source thickness d_{Ni}

Для оценки плотности излучаемой источником ^{63}Ni энергии необходимо умножить среднюю энергию электронов, приведенную на рис. 1, *a*, на соответствующее значение поверхностной активности источника (рис. 1, *c*). Полученная зависимость плотности мощности от толщины источника приведена на рис. 1, *d*.

Сравнение профилей энергоотложения для моноэнергетического пучка электронов с энергией 17 кэВ (средняя энергия электронов с спектре источника ^{63}Ni) и пучка с распределением электронов по энергии, имитирующим спектр от бета источника с учетом эффекта самопоглощения при его толщине 2 мкм, приведено на рис. 2. Видно, что при рассмотрении полиэнергетического спектра бета-источника профиль энергоотложения сильнее растянут по глубине по сравнению со случаем моноэнергетического электронного пучка с энергией 17 кэВ. Такая форма профиля обусловлена тем, что в спектре источника ^{63}Ni образующиеся бета-частицы имеют разные энергии и, соответственно, различные пробеги в материале.

Используя рассчитанный профиль энергоотложения, были рассчитаны вольт-амперные характеристики для различных толщин *i*-слоя (H_i) для случая полиэнергетического пучка электронов с учетом эффекта самопоглощения и моноэнергетического пучка электронов с энергией 17 кэВ (рис. 3). Соответствующие зависимости напряжения холостого хода, тока короткого замыкания и максимальной электрической мощности при изменении толщины *p*-слоя для различных значений H_i в случае полиэнергетического пучка электронов приведены на рис. 4.

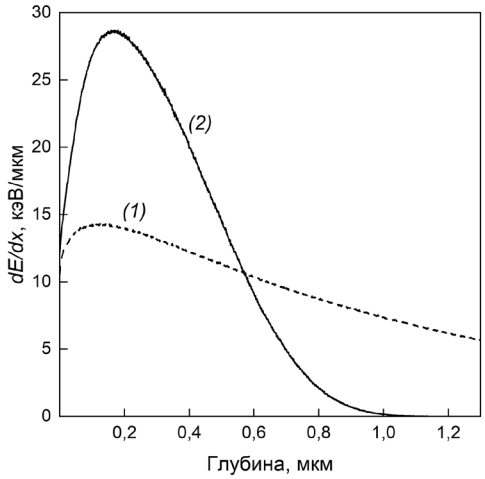


Рис. 2. Профили среднего энергоотложения для одного электрона при облучении исследуемой *p–i–n* структуры электронами с имитацией излучения бета-источника ^{63}Ni с учетом эффекта самопоглощения в слое толщиной 2 мкм (*1*) и моноэнергетическим пучком электронов 17 кэВ (*2*)

Fig. 2. Profiles of the average energy deposition for one electron during irradiation of the studied *p–i–n* structure by electrons with simulated radiation from a ^{63}Ni beta source taking into account the self-absorption effect in 2 μm thick layer (*1*) and monoenergetic electron beam with an energy of 17 keV (*2*)

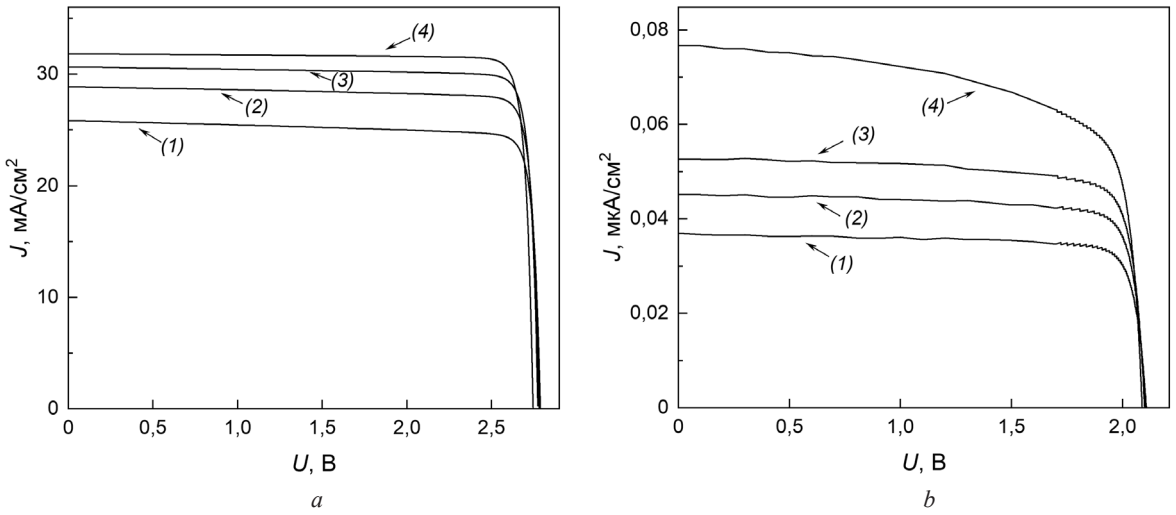


Рис. 3. Результаты моделирования вольт-амперных характеристик *p–i–n* структуры для моноэнергетического пучка электронов с энергией 17 кэВ (*a*) и полиэнергетического пучка электронов (*b*) при толщине *p*-слоя 200 нм и различной толщине *i*-слоя. Толщина *i*-слоя – 300 нм (*1*), 400 нм (*2*), 500 нм (*3*), 900 нм (*4*)

Fig. 3. Simulated current-voltage characteristics of a *p–i–n* structure with a 200 nm *p*-layer and different *i*-layer thicknesses under a 17 keV monoenergetic electron beam (*a*) and a polyenergetic electron beam (*b*). *i*-layer thickness: 300 nm (*1*), 400 nm (*2*), 500 nm (*3*), 900 nm (*4*)

Так, согласно полученным данным (рис. 4), увеличение толщины *i*-слоя ведет к монотонному росту плотности тока короткого замыкания (J_{sc}) и поверхностной плотности максимальной генерируемой электрической мощности (P_{max}), в то время как напряжение холостого хода (U_{oc}) незначительно уменьшается. Видно, что начиная с толщины *i*-слоя в 1000 нм мощность практически перестает расти, в то время как J_{sc} и U_{oc} продолжают изменяться. При увеличении H_i с 1500 нм практически перестает изменяться ток короткого замыкания и напряжение холостого хода. Таким образом, оптимальной является структура с H_p = 100 нм и H_i = 1000 нм, для которой P_{max} = = 0,118 мкВт·см$^{-2}$, J_{sc} = 0,099 мкА·см$^{-2}$, U_{oc} = 2,08 В. С учетом рассчитанной плотности мощности бета источника ^{63}Ni толщиной 2 мкм, которая составляет 1,76 мкВт/см^2, КПД преобразования

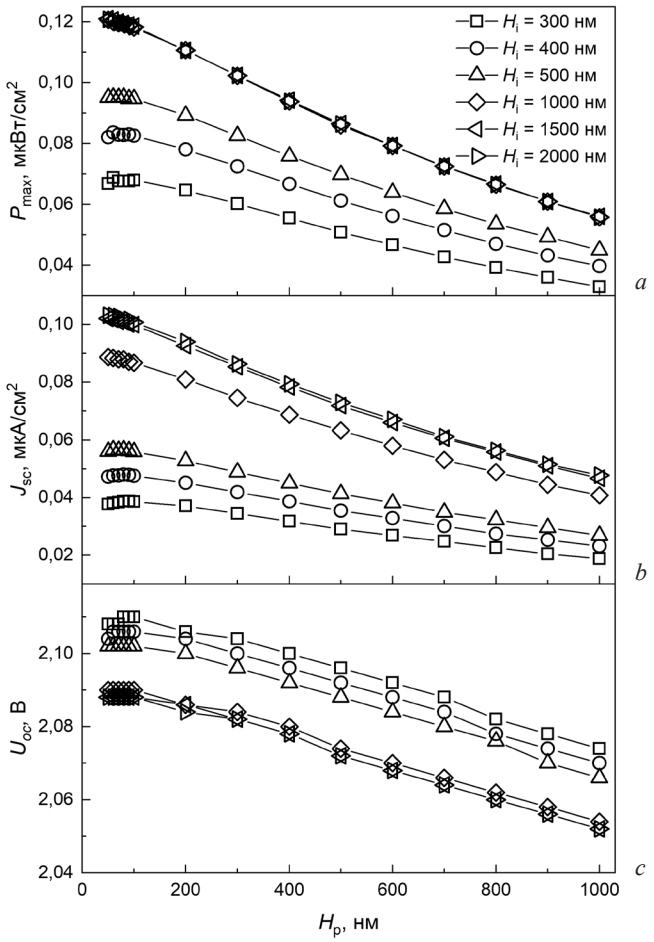


Рис. 4. Зависимость плотности максимальной электрической мощности (*a*), тока короткого замыкания (*b*) и напряжения холостого хода (*c*) от толщины *p*-слоя при различных толщинах *i*-слоя для полиэнергетического пучка электронов

Fig. 4. Dependence of maximum electric power density (*a*), short-circuit current (*b*), and open-circuit voltage (*c*) on the thickness of the *p*-layer with various *i*-layer thicknesses for a polyenergetic electron beam

энергии равен 6,7 %, что превышает известные экспериментальные значения при облучении нитрида галлия бета частицами ^{63}Ni (от 0,98 [18] до 2,7 % [19]).

Заключение. Разработана методика физико-математического моделирования основных электрофизических характеристик полупроводниковых *p–i–n* структур для оптимизации толщины слоев с точки зрения повышения эффективности бетавольтаического преобразования энергии. Данная методика включает в себя расчет энергоотложения и профиля генерации электронно-дырочных пар с помощью пакета моделирования Geant4 и последующее моделирование вольт-амперных характеристик с использованием пакета моделирования COMSOL Multiphysics.

Проведенные расчеты показали, что поверхностная активность источника ^{63}Ni (при условии 100 % чистого изотопного состава) достигает 90 % от максимально возможного значения при его толщине 2 мкм. Поскольку масса и стоимость используемого изотопа линейно растут с толщиной, дальнейшее увеличение толщины бета-активного слоя нецелесообразно. При использовании источника такой толщины средняя энергия электронов на его поверхности увеличивается приблизительно на 7 кэВ по сравнению со средней энергией электронов в спектре излучения ^{63}Ni (без самопоглощения). С учетом спектра бета-частиц, модифицированного вследствие самопоглощения, рассчитаны вольт-амперные характеристики для различных толщин *i*-слоя. Как показали расчеты, максимальная электрическая мощность, генерируемая бетавольтаическим преобразователем, составляет 0,12 мкВт·см$^{-2}$, что соответствует КПД бетавольтаического преобразования 6,7 %.

Благодарности. Исследования проводились в рамках отдельного проекта Национальной академии наук Беларуси «Бетавольтаические преобразователи энергии на основе широкозонных полупроводников». Авторы статьи выражают благодарность Лаборатории информационных технологий Объединенного института ядерных исследований за предоставленную возможность использовать ресурсы платформы HybriLIT для моделирования с помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics.

Acknowledgments. The work was supported by the particular project of the National Academy of Science of Belarus "Betavoltaic energy converters based on wide-band-gap semiconductors" for financial support. The authors of the paper are grateful to JINR Laboratory of Information Technologies for the opportunity to use resources of the HybriLIT platform for simulations with the COMSOL Multiphysics software.

Список использованных источников

1. Review – Betavoltaic cell: the past, present, and future / C. Zhou, J. Zhang, X. Wang [et al.] // ECS Journal of Solid State Science and Technology. – 2021. – Vol. 10. – Art 027005. https://doi.org/10.1149/2162-8777/abe423

2. Betavoltaic nuclear battery: a review of recent progress and challenges as an alternative energy source / M. B. Naseem, H. S. Kim, J. Lee [et al.] // Journal of Physical Chemistry C. – 2023. – Vol. 127, N 16. – P. 7565–7579. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.3c00684

3. Agyekum, E. B. Beta-voltaic nuclear batteries – review of recent developments, challenges and future research directions / E. B. Agyekum // Journal of Energy Storage. – 2025. – Vol. 122. – Art. 116701. https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116701

4. Ji, W. Measurement of low energy beta radiation from Ni-63 by using peeled-off Gafchromic EBT3 film / W. Ji, J.-B. Kim, J.-J. Kim // Nuclear Engineering and Technology. – 2022. – Vol. 54, N 10. – P. 3811–3815. https://doi.org/10.1016/j.net.2022.05.009

5. Properties and data of the isotope 63Ni // ChemLin. – URL: https://www.chemlin.org/isotope/nickel-63 (date of access: 28 July 2026).

6. ESTAR: Stopping Powers and Ranges for Electrons // NIST. – URL: https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html (date of access: 28 July 2026).

7. Kanaya, K. Penetration and energy-loss theory of electrons in solid targets / K. Kanaya, S. Okayama // Journal of Physics D: Applied Physics. – 1972. – Vol. 5. – Art. 43. https://doi.org/10.1088/0022-3727/5/1/308

8. Geant4 – a simulation toolkit / S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2003. – Vol. 506, N 3. – P. 250–303. https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8

9. Semiconductor Module // COMSOL. – URL: https://www.comsol.com/semiconductor-module (date of access: 22 July 2026).

10. Defect-related optical transitions in GaN / W. Rieger, R. Dimitrov, D. Brunner [et al.] // Physical Review B. – 1996. – Vol. 54. – Art. 17596. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.54.17596

11. Optical band gap dependence on composition and thickness of $In_xGa_{1-x}N$ ($0 < x < 0.25$) grown on GaN / C. A. Parker, J. C. Roberts, S. M. Bedair [et al.] // Applied Physics Letters. – 1999. – Vol. 75, N 17. – P. 2566–2568. https://doi.org/10.1063/1.125079

12. First-principles calculations of indirect Auger recombination in nitride semiconductors / E. Kioupakis, D. Steiauf, P. Rinke [et al.] // Physical Review B. – 2015. – Vol. 92. – Art. 035207. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.92.035207

13. Modeling and simulation of bulk gallium nitride power semiconductor devices / G. Sabui, P. J. Parbrook, M. Arredondo-Arechavala, Z. J. Shen // AIP Advances. – 2016. – Vol. 6, N 5. – Art. 055006. https://doi.org/10.1063/1.4948794

14. Carrier dynamics in bulk GaN / P. Ščajev, K. Jarašiūnas, S. Okur [et al.] // Journal of Applied Physics. – 2012. – Vol. 111, N 2. – Art. 023702. https://doi.org/10.1063/1.3673851

15. Caughey, D. M. Carrier mobilities in silicon empirically related to doping and field / D. M. Caughey, R. E. Thomas // Proceedings of the IEEE. – 1967. – Vol. 55, N 12. – P. 2192–2193. https://doi.org/10.1109/PROC.1967.6123

16. Vitanov, S. Simulation of high electron mobility transistors: Ph. D. thesis / S. Vitanov. – Wien, 2010.

17. Sellin, P. J. New materials for radiation hard semiconductor detectors / P. J. Sellin, J. Vaitkus // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2006. – Vol. 557, N 2. – P. 479–489. https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.10.128

18. A high open-circuit voltage gallium nitride betavoltaic microbattery / Z. Cheng, X. Chen, H. San [et al.] // Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2012. – Vol. 22, N 7. – Art. 074011. https://doi.org/10.1088/0960-1317/22/7/074011

19. High open-circuit voltage betavoltaic cell based on GaN pin homojunction / Z. J. Cheng, H. S. San, Z. H. Feng [et al.] // Electronics Letters. – 2011. – Vol. 47, N 12. https://doi.org/10.1049/el.2011.1143

References

1. Zhou C., Zhang J., Wang X., Yang Y., Xu P., Li P., Zhang L., Chen Z., Feng H., Wu W. Review – Betavoltaic cell: the past, present, and future. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2021, vol. 10, art. 027005. https://doi.org/10.1149/2162-8777/abe423

2. Naseem M. B., Kim H. S., Lee J., Kim C. H., In S. Betavoltaic nuclear battery: a review of recent progress and challenges as an alternative energy source. *Journal of Physical Chemistry C*, 2023, vol. 127, no. 16, pp. 7565–7579. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.3c00684

3. Agyekum E. B. Beta-voltaic nuclear batteries – review of recent developments, challenges and future research directions. *Journal of Energy Storage*, 2025, vol. 122, art. 116701. https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116701

4. Ji W., Kim J.-B., Kim J.-J. Measurement of low energy beta radiation from Ni-63 by using peeled-off Gafchromic EBT3 film. *Nuclear Engineering and Technology*, 2022, vol. 54, no. 10, pp. 3811–3815. https://doi.org/10.1016/j.net.2022.05.009

5. Properties and data of the isotope 63Ni. *ChemLin*. Available at: https://www.chemlin.org/isotope/nickel-63 (accessed 28 July 2026).

6. ESTAR: Stopping Powers and Ranges for Electrons. *NIST*. Available at: https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html (accessed 28 July 2026).

7. Kanaya K., Okayama S. Penetration and energy-loss theory of electrons in solid targets. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1972, vol. 5, art. 43. https://doi.org/10.1088/0022-3727/5/1/308

8. Agostinelli S., Allison J., Amako K., Apostolakis J., Araujo H., Arce P., Asai M. [et al.]. Geant4 – a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2003, vol. 506, no. 3, pp. 250–303. https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8

9. Semiconductor Module. *COMSOL*. Available at: https://www.comsol.com/semiconductor-module (accessed 22 July 2026).

10. Rieger W., Dimitrov R., Brunner D., Rohrer E., Ambacher O., Stutzmann M. Defect-related optical transitions in GaN. *Physical Review B*, 1996, vol. 54, art. 17596. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.54.17596

11. Parker C. A., Roberts J. C., Bedair S. M., Reed M. J., Liu S. X., El-Masry N. A., Robins L. H. Optical band gap dependence on composition and thickness of $In_xGa_{1-x}N$ ($0 < x < 0.25$) grown on GaN. *Applied Physics Letters*, 1999, vol. 75, no. 17, pp. 2566–2568. https://doi.org/10.1063/1.125079

12. Kioupakis E., Steiauf D., Rinke P., Delaney K. T., Van de Walle C. G. First-principles calculations of indirect Auger recombination in nitride semiconductors. *Physical Review B*, 2015, vol. 92, art. 035207. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.92.035207

13. Sabui G., Parbrook P. J., Arredondo-Arechavala M., Shen Z. J. Modeling and simulation of bulk gallium nitride power semiconductor devices. *AIP Advances*, 2016, vol. 6, no. 5, art. 055006. https://doi.org/10.1063/1.4948794

14. Ščajev P., Jarašiūnas K., Okur S., Özgür Ü., Morkoç H. Carrier dynamics in bulk GaN. *Journal of Applied Physics*, 2012, vol. 111, no. 2, art. 023702. https://doi.org/10.1063/1.3673851

15. Caughey D., Thomas R. Carrier mobilities in silicon empirically related to doping and field. *Proceedings of the IEEE*, 1967, vol. 55, no. 12, pp. 2192–2193. https://doi.org/10.1109/PROC.1967.6123

16. Vitanov S. *Simulation of high electron mobility transistors, Ph. D. thesis*. Wien, 2010.

17. Sellin P. J., Vaitkus J. New materials for radiation hard semiconductor detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2006, vol. 557, no. 2, pp. 479–489. https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.10.128

18. Cheng Z., Chen X., San H., Feng Z., Liu B. A high open-circuit voltage gallium nitride betavoltaic microbattery. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2012, vol. 22, no. 7, art. 074011. https://doi.org/10.1088/0960-1317/22/7/074011

19. Cheng Z. J., San H. S., Feng Z. H., Liu B., Chen X. Y. High open-circuit voltage betavoltaic cell based on GaN pin homojunction. *Electronics Letters*, 2011, vol. 47, no. 12. https://doi.org/10.1049/el.2011.1143

Информация об авторах

Шипица Тимофей Дмитриевич – мл. науч. сотрудник. E-mail: timopheyshipitsa@gmail.com.

Мазаник Александр Васильевич – д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник. E-mail: mazanikalexander@gmail.com. ORCID: 0000-0002-4725-0969.

Афанасьев Константин Геннадьевич – ст. науч. сотрудник. E-mail: K.afanaciev@gmail.com.

Баев Вадим Геннадьевич – канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией. E-mail: vadim.gh.bayev@gmail.com.

Бринь Антон Анатольевич – канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник. E-mail: brin2026@yandex.by.

Свито Иван Антонович – канд. физ.-мат. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. E-mail: ivansvito184@gmail.com. ORCID: 0000-0002-4510-0190.

Волков Александр Александрович – мл. науч. сотрудник. E-mail: alksndr.volkov@gmail.com.

Войтеховский Тимофей Дмитриевич – мл. науч. сотрудник. E-mail: voytehovsky_t@outlook.com.

Information about the authors

Shipitsa Timophey D. – Junior Researcher. E-mail: timopheyshipitsa@gmail.com.

Mazanik Alexander V. – D. Sc. (Physics and Mathematics), Leading Researcher. E-mail: mazanikalexander@gmail.com. ORCID: 0000-0002-4725-0969.

Afanaciev Konstantin G. – Senior Research. E-mail: K.afanaciev@gmail.com.

Bayev Vadim G. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory. E-mail: vadim.gh.bayev@gmail.com.

Brin Anton A. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher. E-mail: brin2026@yandex.by.

Svito Ivan A. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher. E-mail: ivansvito184@gmail.com. ORCID: 0000-0002-4510-0190.

Volkov Alexander A. – Junior Researcher. E-mail: alksndr.volkov@gmail.com.

Voytehovsky Timophey D. – Junior Researcher. E-mail: voytehovsky_t@outlook.com.