

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 621.383.51-047.37

О. Б. ГНИЛЕНКО^{1*}, С. В. ПЛАКСІН²

^{1*}Каф. електронних обчислювальних машин, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Науки, 72, Дніпро, Україна, 49045, тел. +380 (056) 373 12 63, ел. пошта gnilenko@ua.fm, ORCID 0000-0002-1380-1195

²Відділ систем керування транспортними засобами, Інститут транспортних систем та технологій Національної академії наук України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 370 21 82, ел. пошта svp@westa-inter.com, ORCID 0000-0001-8302-0186

Дослідження впливу графенових контактів на ефективність фотоелектричного перетворення в багатоперехідному сонячному елементі з вертикальними р–п переходами

Мета. Це дослідження спрямовано на вдосконалення конструкції багатоперехідного сонячного елемента з вертикально розташованими р–п переходами для підвищення ефективності фотоелектричного перетворення в разі похилого падіння сонячних променів. **Методика.** Для досягнення мети запропоновано як контакти між послідовно з'єднаними елементарними р–і–п комірками багатоперехідного сонячного елемента використовувати прозорі графенові шари замість металізації бічних поверхонь комірок алюмінієм. Побудовано модель досліджуваного сонячного елемента за допомогою програмного пакета Silvaco TCAD і проведено серію комп'ютерних експериментів для отримання основних електричних характеристик та аналізу їх залежності від параметрів сонячного елемента. Математична модель, використана в Silvaco TCAD для моделювання напівпровідникових пристроїв, передбачає розв'язання фундаментальних рівнянь Пуассона, неперервності та транспортних рівнянь на основі дифузійно-дрейфової моделі переносу. **Результати.** У ході проведеного комп'ютерного моделювання автори довели, що використання графенових контактів між елементарними р–і–п комірками багатоперехідного сонячного елемента замість традиційної металізації алюмінієм дозволяє суттєво збільшити коефіцієнт корисної дії в разі похилого падіння сонячних променів. Так, заміна металевих контактів графеновими дозволяє збільшити коефіцієнт корисної дії сонячного елемента на 15 % у випадку падіння сонячного випромінювання під кутом 45°. **Наукова новизна.** Автори вперше запропонували конструкцію та провели комп'ютерне моделювання багатоперехідного сонячного елемента з вертикально розташованими р–п переходами, у якому звичайні металеві контакти між послідовно з'єднаними елементарними сонячними комірками замінено прозорими шарами графену. **Практична значимість.** Результати моделювання підтверджують можливість використання запропонованої конструкції сонячного елемента в умовах похилого падіння сонячних променів. Такі властивості сонячного елемента дозволяють його застосовувати на вертикальних, похилих або рухомих поверхнях, у тому числі на об'єктах рухомого складу та транспортної інфраструктури, де практично неможливо забезпечити оптимальний кут падіння сонячного випромінювання.

Ключові слова: багатоперехідний сонячний елемент; графеновий контакт; вертикальний р–п перехід; дифузійно-дрейфова модель; вольт-амперна характеристика; коефіцієнт корисної дії

Вступ

Одним із перспективних, але недостатньо розвинених напрямів сучасної фотовольтаїки є розробка сонячних елементів, у яких р–п переходи розташовані не горизонтально, за стан-

дартною планарною конструкцією, а вертикально. У таких фотоелектричних перетворювачах сонячне випромінювання розповсюджується вздовж переходів, а не спрямоване по нормалі до переходів, як у стандартних планарних

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

сонячних елементах [2]. Поперечний розмір таких сонячних елементів обумовлений довжиною пробігу носіїв заряду, тому елементарні сонячні комірки, які є напівпровідниковими $p-i-n$ структурами з одним вертикальним $p-n$ переходом, з'єднують послідовно. Таким чином отримують багатоперехідні сонячні елементи з вертикальними $p-n$ переходами в елементарних сонячних комірках [1].

Необхідно відзначити, що очевидною перевагою вертикального розташування $p-n$ переходів є те, що носії заряду та фотони рухаються не вздовж одного напрямку, а у взаємно ортогональних напрямках. Таке розділення напрямків руху для носіїв заряду і фотонів надає можливість поліпшити умови збирання носіїв заряду і водночас забезпечити оптимальні умови для поглинання сонячного випромінювання. Таким чином, з'являється додатковий ступінь варіативності для оптимізації структури сонячного елемента та підвищення в результаті його коефіцієнта корисної дії. Іншою важливою перевагою багатоперехідних сонячних елементів з вертикальними $p-n$ переходами є те, що на фронтальній поверхні сонячного елемента відсутня контактна сітка, яка затінює сонячні промені. Такі сонячні елементи демонструють кращу термальну стійкість та спектральну чутливість. Оскільки в багато-перехідному сонячному елементі елементарні комірки з'єднані послідовно, з'являється можливість досягати високих рівнів напруги. Крім того, велика площа контакту між елементарними сонячними комірками дозволяє суттєво знизити послідовний опір. Найвищу ефективність такі сонячні елементи демонструють у випадку використання разом із концентраторами сонячного випромінювання [7].

Завдяки можливості використання під час створення фотоелектричних перетворювачів із вертикальним розташуванням $p-n$ переходів простих і добре відпрацьованих технологічних методів та операцій існують конкретні технічні рішення щодо таких багатоперехідних фотоелектричних перетворювачів. Так, наприклад, у [8, 9] було запропоновано для кількох десятків кремнієвих пластин стандартного розміру, діаметр яких складає чотири дюйми, а товщина 250 мікрон, методом дифузії або імплантування створити p^+-n-p^+ структури та металізувати їх з

обох сторін. Далі такі p^+-n-p^+ структури складають одна до одної і сплавляють під тиском та високою температурою до отримання єдиної монолітної багат шарової структури з висотою 1 см. Цю багат шарову структуру розрізають у напрямку, ортогональному до $p-n$ переходів, завдяки чому отримують пластини розміром 1×1 см, товщина яких дорівнює 0,05 см. Такі пластини є набором послідовно з'єднаних елементарних сонячних комірок, кожна з яких являє собою напівпровідникову p^+-n-p^+ структуру. Фронтальну і тильну сторони відшліфовують для усунення дефектів, що з'являються після різання, та покривають пасивувальними шарами. На фронтальній стороні створюють невіддільне покриття, а на торцевих поверхнях p^+-n-p^+ структури утворюють зовнішні металеві контакти. У такому фотоелектричному перетворювачі сонячне випромінювання поширюється вздовж $p-n$ переходів, причому інтенсивність випромінювання може бути збільшена концентраторними системами.

Недоліком стандартної конструкції багатоперехідного сонячного елемента з вертикальним розташуванням $p-n$ переходів є те, що для формування внутрішніх контактів між елементарними сонячними комірками використовують металізацію бічних поверхонь p^+-n-p^+ структур алюмінієм. У результаті між елементарними сонячними комірками формується вертикальна непрозора для сонячних променів решітка з алюмінієвих шарів. Таким чином, ефективність фотоелектричного перетворення значно залежить від того, під яким кутом сонячні промені падають на фронтальну поверхню сонячного елемента. Максимального значення коефіцієнта корисної дії можливо досягти тільки в разі падіння сонячних променів на освітлювану поверхню під прямим кутом. У випадку відхилення кута падіння сонячних променів від прямого ефективність фотоелектричного перетворення швидко зменшується через затінення p^+-n-p^+ структур вертикальною решіткою з металевих контактів між елементарними сонячними комірками. Такий недолік можна частково усунути використанням механічних трекерних або спрямовувальних оптичних систем для забезпечення оптимального кута падіння сонячних променів на фотоелектричний перетворювач. Але слід зауважити, що використання подібних

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

пристроїв значно звужує сферу застосування багато-перехідних сонячних елементів із вертикальними р–п переходами. Особливо це відчутно в транспортній галузі, де в разі покриття сонячними модулями елементів рухомого складу або транспортної інфраструктури неможливо забезпечити належні умови освітлення [4].

Мета

У дослідженні, результати якого представлені в цій статті, поставлено задачу поліпшити характеристики багатоперехідного сонячного елемента з вертикальними р–п переходами для умов похилого падіння сонячного випромінювання.

Для розв’язання вказаної задачі запропоновано замінити традиційну для багатоперехідних сонячних елементів із вертикальними р–п переходами металізацію алюмінієм бічних поверхонь послідовно з’єднаних р⁺–п–п⁺ структур прозорими надтонкими шарами графену – матеріалу, який завдяки своїм унікальним характеристикам електропровідності, прозорості, міцності, гнучкості тощо є найкращим засобом для створення прозорих електричних контактів сонячних елементів у фотовольтаїці.

Методика

Досліджуваний сонячний елемент, зображений на рис. 1 [6], сформований кількома десятками послідовно з’єднаних елементарних сонячних комірок, розташованих у горизонтальній площині, кожна з яких являє собою дифузійну р⁺–р–п⁺ кремнієву структуру з вертикальним р–п переходом. Сусідні р⁺–р–п⁺ структури розділені тонкими графеновими шарами, завдяки яким забезпечується послідовне електричне з’єднання всіх елементарних сонячних комірок у суцільний модуль. На бічних поверхнях крайніх р⁺–р–п⁺ структур утворені прозорі електричні контакти з оксиду індію-олова для подальшого з’єднання сонячних модулів у більший сонячний елемент. Кількість р⁺–р–п⁺ структур у сонячному модулі обирають залежно від необхідного користувачу рівня напруги. Сонячні модулі надалі з’єднують паралельно звичайними електричними контактами для досягнення потрібних користувачу значень електричного струму. За результатами проведеного

комп’ютерного моделювання засобами Silvaco TCAD визначено, що оптимальна товщина шару кремнію елементарної р⁺–р–п⁺ структури за умови часу життя неосновних носіїв заряду 1 нс становить 200 мкм, а товщини дифузійних високолегованих шарів р⁺- та п⁺-типу дорівнюють 1,5 мкм [6]. Оптимальна висота такої р⁺–р–п⁺ структури дорівнює 500 мкм, що забезпечує достатній рівень поглинання фотонів. Концентрація легувальних домішок у дифузійних шарах р– та п–типу становить 10^{20} см^{-3} , а в поглинальному базовому шарі кремнію р–типу – 10^{16} см^{-3} . Товщина графенових контактів дорівнює 10 нм. Сонячний модуль, сформований із 50 р⁺–р–п⁺ структур, має загальний розмір 1х1 см. На фронтальну і тильну сторони сонячного модуля нанесене пасивувальне покриття з SiO₂, товщина якого дорівнює 100 нм. Тильна сторона сонячного модуля додатково металізована алюмінієм для створення відбивного покриття, а на фронтальній стороні сформовано невідбивне покриття.

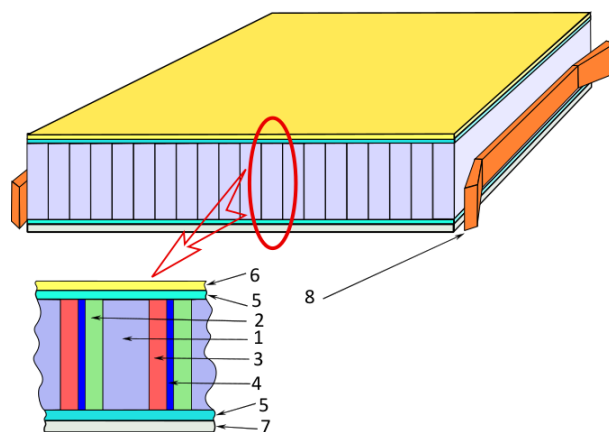


Рис. 1. Конструкція сонячного елемента:

- 1 – базовий слаболегований кремнієвий шар р–типу провідності;
- 2 – дифузійний сильнолегований шар кремнію р–типу;
- 3 – дифузійний сильнолегований шар кремнію п–типу;
- 4 – графеновий шар внутрішнього контакту;
- 5 – пасивувальний шар; 6 – невідбивне покриття;
- 7 – відбивне покриття з алюмінію; 8 – зовнішній контакт з оксиду індію-олова [6]

Fig. 1. Construction of a solar cell:

- 1 – basic low-alloyed silicon layer of p-type conductivity;
- 2 – diffusion high-alloyed silicon layer of p-type;
- 3 – diffusion high-alloyed silicon layer of n-type;
- 4 – graphene layer of the internal contact;
- 5 – passivation layer; 6 – non-reflective coating;
- 7 – reflective coating of aluminum; 8 – external contact of indium-tin oxide [6].

Результати

Для перевірки особливостей функціонування запропонованого багато-перехідного сонячного елемента та одержання його електричних характеристик було проведено моделювання вищевказаного сонячного модуля в програмному пакеті Silvaco TCAD. Комп'ютерний розрахунок виконано за дифузійно-дрейфовою моделю переносу, яка передбачає сумісне розв'язання рівняння Пуассона та рівнянь неперервності для електронів та дірок із врахуванням відповідних механізмів рекомбінації, моделей рухливості носіїв заряду, оптичних властивостей матеріалів тощо. Розрахунок сонячного модуля проведено за умов послідовного з'єднання до п'яти p^+-p-n^+ структур, які є елементарними сонячними комітками. Рис. 2 демонструє вольт-амперну характеристику сонячного модуля з різною кількістю елементарних сонячних коміток за умов нормального падіння сонячних променів інтенсивністю в 1 сонце в разі AM1,5. Для сонячного модуля, що складається з 50 послідовно з'єднаних сонячних коміток розміром 1x1 см, отримано напругу холостого ходу 38 В та коефіцієнт корисної дії 19,5 % за нормального падіння сонячних променів [6].

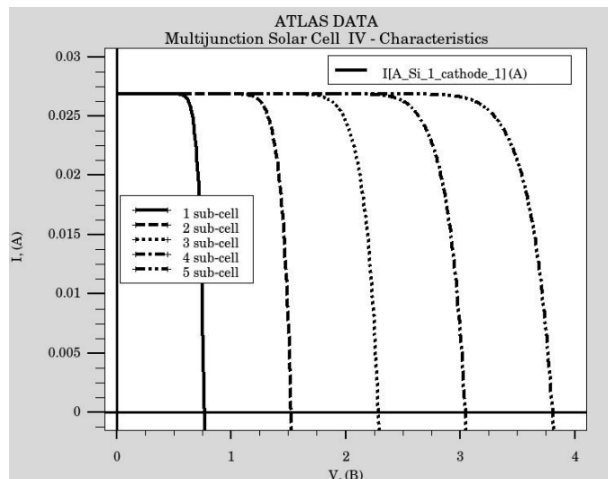


Рис. 2. Вольт-амперна характеристика багатоперехідного сонячного елемента з різною кількістю послідовно з'єднаних p^+-p-n^+ структур

Fig. 2. Current-voltage characteristic of a multi-junction solar cell with a different number of series-connected p^+-p-n^+ structures connected in series

На рис. 3 зображена залежність коефіцієнта корисної дії сонячного модуля, який складається з п'яти послідовно з'єднаних елементарних сонячних коміток, від кута падіння сонячних променів на фронтальну поверхню для прозорих графенових та відбивних алюмінієвих контактів. Слід зауважити, що товщина алюмінієвих контактів обрана в розрахунках такою, що дорівнює 10 нм, щоб зменшити різницю в умовах освітлення за умови порівняння з надтонкими графеновими контактами. Реальна ж товщина алюмінієвих контактів на практиці не менша ніж 1 мкм, що підсилює втрати від затінення фотоактивних шарів.

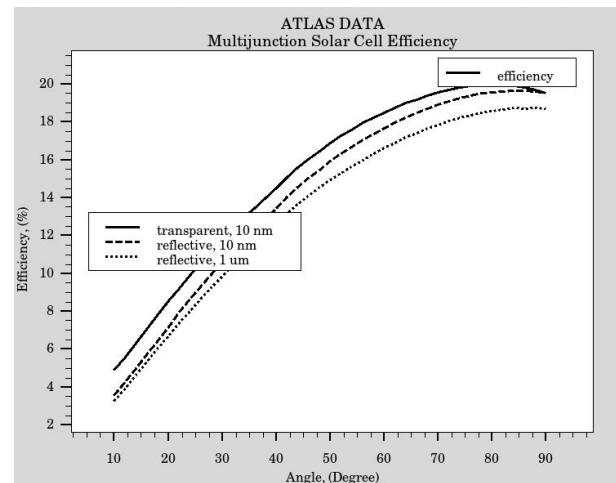


Рис. 3. Залежність ККД сонячного елемента від кута падіння сонячного випромінювання

Fig. 3. Dependence of solar cell efficiency on the angle of incidence of solar radiation

Можна побачити, що використання прозорих графенових контактів між елементарними p^+-p-n^+ структурами багатоперехідного сонячного елемента з вертикальними $p-n$ переходами дозволяє збільшити коефіцієнт корисної дії на 15 % в разі падіння сонячного випромінювання під кутом 45°.

Наукова новизна та практична значимість

Автори роботи на основі побудови комп'ютерної моделі та проведення серії комп'ютерних експериментів уперше дослідили можливість підвищення коефіцієнта корисної дії багатоперехідного сонячного елемента з вертикальними $p-n$ переходами за рахунок

використання як контактів між елементарними p^+-n-n^+ комірками прозорих шарів графену. Показано, що заміна традиційних алюмінієвих контактів прозорими графеновими дозволяє суттєво збільшити коефіцієнт корисної дії сонячного елемента в разі похилого падіння сонячного випромінювання. Ця властивість дає можливість використовувати сонячний елемент на вертикальних або похилих поверхнях, де важко забезпечити оптимальний кут падіння сонячного випромінювання без застосування механічних трекерних або оптичних спрямовувальних систем. Особливо це стосується рухомих об'єктів, де застосування подібних систем неможливе. Тому сферою використання запропонованого фотоелектричного перетворювача може бути транспортна галузь, де розглянута конструкція сонячного елемента виявиться корисною для енергозабезпечення рухомого складу та транспортної інфраструктури [3, 5].

Висновки

У статті представлено результати комп'ютерного моделювання багато-перехідного сонячного елемента з вертикальним розташуванням $p-n$ переходів, у якому традиційні металеві контакти між елементарними сонячними комірками замінено контактами з прозорих шарів графену.

Продемонстровано переваги досліджуваного фотоелектричного перетворювача, який забезпечує більші значення коефіцієнта корисної дії в разі похилого падіння сонячного випромінювання порівняно з подібною структурою з алюмінієвими контактами між сонячними комірками. Так, наприклад, за падіння сонячних променів на сонячний елемент під кутом 45° коефіцієнт корисної дії збільшується на 15 %, що дозволяє використати розглянутий сонячний елемент на вертикальних, похилих або рухомих поверхнях, на яких неможливо забезпечити випромінювання під оптимальним кутом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гниленко А. Б., Дзензерский В. А., Пласин С. В., Погорелая Л. М. Влияние толщины кремниевых пластин на характеристики многопереходных солнечных элементов с вертикальными $p-n$ переходами. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2012. № 1. С. 27–29.
2. Гниленко А. Б., Пласин С. В., Погорелая Л. М., Дзензерский В. А. Моделирование кремниевого солнечного элемента с вертикальным $p-n$ переходом. *Відновлювана енергетика*. 2013. № 2. С. 37–44.
3. Голота О. О., Муха А. М., Устименко Д. В., Пласин С. В. Дослідження процесів у колі тягового конденсатора моделі високошвидкісного магнітолевітаційного транспорту. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 1 (105). С. 30–41. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/301521>
4. Дзензерский В. А., Гниленко А. Б., Пласин С. В., Погорелая Л. М., Шкиль Ю. В. Перспективная транспортно-энергетическая система на основе интеграции магнитолевитационной технологии и распределенной фотоэлектрической электростанции. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 1 (73). С. 77–86. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123116>
5. Муха А. М., Пласин С. В., Погоріла Л. М., Устименко Д. В., Шкиль Ю. В. Комбінована система синхронізованого керування рухом і підвісом магнітоплана. *Наука та прогрес транспорту*. 2022. № 1 (97). С. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/265332>
6. Пласин С. В., Гниленко О. Б., Скосар В. Ю. *Багатоперехідний сонячний елемент з вертикальними $p-n$ переходами та графеновими контактами* : патент на корисну модель UA 116998 U. 29.12.2016; опубл. 12.06.2017, Бюл. № 11. 6 с.
7. Abushattal A. A., Loureiro A. G., Boukortt N. E. I. Ultra-high concentration vertical homo-multijunction solar cells for CubeSats and terrestrial applications. *Micromachines*. 2024. No. 15 (2). P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi15020204>
8. Sater B. L. *High intensity solar cell* : pat. USA № 4,409,422. 1983. 11 p.
9. WO2014134159. *Vertical multi-junction photovoltaic cell with reverse current limiting element*. IPC H01L 31/0725. Published 04.09.2014. 20 p.

A. B. GNILENKO^{1*}, S. V. PLAKSIN²

^{1*}Dep. of Electronic Computing Machinery, Oles Honchar Dnipro National University, Nauky Ave., 72, Dnipro, Ukraine, 49045, tel. +380 (056) 373 12 63, e-mail gnilenko@ua.fm, ORCID 0000-0002-1380-1195

²Dep. of Vehicle Control Systems, Institute of Transport Systems and Technology National Academy of Science of Ukraine, Pisarzhevskogo St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 370 21 82, e-mail svp@westa-inter.com, ORCID 0000-0001-8302-0186

Study of the Influence of Graphene Contacts on the Efficiency of Photovoltaic Conversion in a Multi-junction Solar Cell with Vertical p–n Junctions

Purpose. The research is aimed at improving the design of a multi-junction solar cell with vertically arranged p–n junctions. The purpose of the study is to increase the efficiency of photovoltaic conversion under oblique incidence of sunlight. **Methodology.** To achieve the goal of the research, it is proposed to use transparent graphene layers as contacts between the series-connected elementary p–i–n cells of a multi-junction solar cell instead of metallizing the side surfaces of the cells with aluminum. A model of the studied solar cell was built using the Silvaco TCAD software package, and a series of computer experiments were conducted to obtain the main electrical characteristics and analyze their dependence on the parameters of the solar cell. The mathematical model used in Silvaco TCAD for modeling semiconductor devices involves solving the fundamental Poisson equations, continuity, and transport equations based on the diffusion-drift transport model. **Findings.** Based on the computer modeling, the authors proved that the use of graphene contacts between the elementary p–i–n cells of a multi-junction solar cell instead of traditional aluminum metallization allows to significantly increase the solar cell efficiency under oblique incidence of sunlight. Thus, replacing metal contacts with graphene ones allows to increase the efficiency coefficient of the solar cell by 15% at an angle of 45° of solar radiation incidence. **Originality.** The authors first proposed the design and conducted computer simulation of a multi-junction solar cell with vertically arranged p–n junctions in which the usual metal contacts between the series-connected elementary solar cells are replaced by transparent layers of graphene. **Practical value.** The simulation results confirm the possibility of using the proposed solar cell design in conditions of oblique incidence of sunlight. Such properties of the solar cell allow its use on vertical, inclined or moving surfaces, including vehicles and transport infrastructure, where it is practically impossible to ensure the optimal angle of incidence of solar radiation.

Keywords: multi-junction solar cell; graphene contact; vertical p–n junction; diffusion-drift model; volt-ampere characteristic; efficiency; volt-ampere characteristic

REFERENCES

1. Gnilenko, A. B., Dzenzersky, V. A., Plaksin, S. V., & Pogorelaya, L. M. (2012). The influence of silicon wafer thickness on characteristics of multijunction solar cells with vertical p–n-junctions. *Tehnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 1, 27-29. (in Russian)
2. Gnilenko, A. B., Plaksin, S. V., Pogorelaya, L. M., & Dzenzerskiy, V. A. (2013). Modelirovaniye kremnievogo solnechnogo elementa s vertikalnym p–n perekhodom. *Vidnovluyana energetika*, 2, 37-44. (in Russian)
3. Holota, O. O., Mukha, A. M., Ustymenko, D. V., & Plaksin, S. V. (2024). Investigation of Processes in the Traction Capacitor Circuit of the Model of High-Speed Magnetolevitation Transport. *Science and Transport Progress*, 1(105), 30-41. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/301521> (in Ukrainian)
4. Dzenzerskiy V. O., Gnilenko A. B., Plaksin S. V., Pogorelaya L. M., & Shkil Y. V. (2018). Perspective transport-power system based on the integration of maglev-technology and distributed photo-electric station. *Science and Transport Progress*, 1(73), 77-86. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123116> (in Ukrainian)
5. Mukha, A. M., Plaksin, S. V., Pohorila, L. M., Ustymenko, D. V., & Shkil, Y. V. (2022). Combined System of Synchronized Simultaneous Control of Magnetic Plane Movement and Suspension. *Science and Transport Progress*, 1(97), 23-31. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/265332> (in Ukrainian)
6. Plaksin, S. V., Hnylenko, O. B., & Skosar, V. Yu. (2017). *Multijunction solar cell with vertical p–n junctions and graphene contacts* (Utility model patent No. UA 116998 U). Ukrainian Intellectual Property Institute. (in Ukrainian)

7. Abushattal, A. A., Loureiro, A. G., & Boukortt, N. E. I. (2024). Ultra-High Concentration Vertical Homo-Multijunction Solar Cells for CubeSats and Terrestrial Applications. *Micromachines*, 15(2), 1-18. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi15020204> (in English)
8. Sater, B. L. (1983). *High intensity solar cell* (U.S. Patent No. 4,409,422). U.S. Patent and Trademark Office.
9. WO2014134159. *Vertical multi-junction photovoltaic cell with reverse current limiting element (PCT Patent No. WO2014134159)*. (2014). World Intellectual Property Organization. (in English)

Надійшла до редколегії: 29.11.2024

Прийнята до друку: 28.03.2025