

Волинський національний університет
імені Лесі Українки

ФІЗИКА ТА ОСВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Випуск 3



Видавничий дім
«Гельветика»
2023

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Мирончук Галина Леонідівна – доктор фізико-математичних наук, професор, директор навчально-наукового фізико-технологічного інституту Волинського національного університету імені Лесі Українки (головний редактор);

Галян Володимир Володимирович – доктор фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Головацький Володимир Анатолійович – доктор фізико-математичних наук професор, професор кафедри теоретичної фізики та комп'ютерного моделювання Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича;

Голодюк Лариса Степанівна – доктор педагогічних наук, доцент, заступник директора з науково-методичної діяльності КЗ «Кіровоградський обласний інститут післядипломної педагогічної освіти імені Василя Сухомлинського»;

Заболотний Володимир Федорович – доктор педагогічних наук, професор, завідувач кафедри фізики і методики навчання фізики, астрономії Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського;

Кажукаускас Вайдотас – доктор фізико-математичних наук, професор, головний науковий співробітник групи дослідження фотоелектричних явищ Інституту фотоніки та нанотехнологій Вільнюського університету, м. Вільнюс, Литовська Республіка;

Кевшин Андрій Григорович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, заступник директора з наукової роботи навчально-наукового фізико-технологічного інституту Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Озга Катаржина – доктор наук, професор Ченстоховського політехнічного університету, м. Ченстохова, Республіка Польща;

Пясецький Міхал Войцех – доктор наук, професор Гуманітарно-природничого університету імені Яна Длугоша в Ченстохові, м. Ченстохова, Республіка Польща;

Рудиш Мирон Ярославович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, старший науковий співробітник кафедри загальної фізики Львівського національного університету імені Івана Франка;

Савош Валентин Олексійович – кандидат педагогічних наук, завідувач відділу фізико-математичних дисциплін Волинського інституту післядипломної педагогічної освіти;

Сахнюк Василь Євгенович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А.В. Свідзинського Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Сільвейстр Анатолій Миколайович – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри фізики і методики навчання фізики, астрономії Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського;

Сосницька Наталія Леонідівна – доктор педагогічних наук, професор, завідувач кафедри вищої математики і фізики Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного;

Трифорова Олена Михайлівна – доктор педагогічних наук, доцент, доцент кафедри природничих наук та методик їхнього навчання Центральноукраїнського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка;

Хижун Олег Юліанович – доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу спектроскопії поверхні новітніх матеріалів Інституту проблем матеріалознавства імені І.М. Францевича Національної академії наук України;

Шигорін Павло Павлович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А.В. Свідзинського Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Юхимчук Володимир Олександрович – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач відділу оптики і спектроскопії напівпровідникових і діелектричних матеріалів Інституту фізики напівпровідників імені В.С. Лашкарьова;

Яцюк Світлана Миколаївна – кандидат педагогічних наук, доцент, декан факультету інформаційних технологій і математики Волинського національного університету імені Лесі Українки.

Журнал ухвалено до друку Вченою радою
Волинського національного університету імені Лесі Українки
31 жовтня 2023 р., протокол № 12

Науковий журнал «Фізика та освітні технології»
zareєстровано Міністерством юстиції України
(Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
серія КВ № 24970–14910Р від 30.08.2021 року)

«Фізика та освітні технології» включено до Переліку наукових фахових видань України категорії Б у галузі освіта/ педагогіка (спеціальності 014 – Середня освіта (за предметними спеціальностями); 104 – Фізика та астрономія; 105 – Прикладна фізика та наноматеріали) відповідно до Наказу МОН України № 1290 від 30 листопада 2021 року (додаток 3); Наказу МОН України № 530 від 06 червня 2022 року (додаток 2).

Офіційний сайт видання: www.journals.vnu.volyn.ua/index.php/physics

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

ISSN 2786-5444 (print)
ISSN 2786-5452 (online)

© Волинський національний університет імені Лесі Українки, 2023

УДК 621.315.592

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2023-3-1>

Іванна ВАКАЛЮК

аспірантка кафедри фізики і хімії твердого тіла, Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, Україна, 76018

ORCID ID: 0000-0002-6188-9793

SCOPUS-AUTHOR ID: 58042285000

Ростислав ЯВОРСЬКИЙ

доктор філософії зі спеціальності «Фізика та астрономія», доцент кафедри фізики і хімії твердого тіла, Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, Україна, 76018

ORCID ID: 0000-0001-5690-7486

SCOPUS-AUTHOR ID: 57193824044

Оксана ЗАМУРУЄВА

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А. В. Свідзинського, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0003-0032-0613

SCOPUS-AUTHOR ID: 56181742100

Лілія КАТАНОВА

аспірантка кафедри фізики і хімії твердого тіла, Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, Україна, 76018

ORCID ID: 0000-0003-3593-9934

SCOPUS-AUTHOR ID: 57221619996

Микола СКІПАЛЬСЬКИЙ

аспірант кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А.В. Свідзинського, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

SCOPUS-AUTHOR ID: 57670072000

Бібліографічний опис статті: Вакалюк І., Яворський Р., Замуруєва О., Катанова Л., Скіпальський М. (2023) Фотовольтаїчні матеріали: поточні ефективності та майбутні виклики. *Фізика та освітні технології*, 3, 3–12, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-3-1>

ФОТОВОЛЬТАІЧНІ МАТЕРІАЛИ: ПОТОЧНІ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА МАЙБУТНІ ВИКЛИКИ

Кожного дня ми використовуємо електроенергію для власних потреб, одночасно вичерплюючи корисні копалини, що призводить до екологічної катастрофи. Тому вже протягом багатьох років для науковців постає завдання вироблення електроенергії з альтернативних джерел енергії. Найбільш перспективним видом відновлюваних джерел енергії є енергія Сонця. Викликом сьогодення є знайти матеріали, які будуть найоптимальніші, як у вартості, так і ефективності. У статті наведено переваги тонкоплівкових сонячних елементів через їх економічність, ефективність, меншу витрату матеріалу, гнучкість і тенденцію до зростання ККД. Оцінка продуктивності нової технології необхідна для аналізу їхнього потенціалу в майбутніх застосуваннях.

Метою кожного покоління є зниження витрат і водночас підвищення ефективності порівняно з попередніми. У зв'язку з цим економічні характеристики необхідно зробити найоптимальнішими для проектування фотоелектричної системи.

У результаті було проведено огляд матеріалів: CdTe, CIGS ($\text{Cu}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})\text{Se}_2$) та CZTS ($\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$). Представлено порівняння розглянутих тонкоплівкових сонячних елементів з точки зору фізичних властивостей і продуктивності.

Встановлено, що ефективність для одноперехідних комірок CIGS, CdTe та CZTS невеликої площі, виміряна в глобальному спектрі АМ1.5 (1000 Вт/м²) при кімнатній температурі становить 23,6%, 22,3% та 11,4% відповідно.

Отже, ФЕ на основі тонкоплівкових CdTe характеризуються своєю високою ефективністю, дешевими матеріалами, надійною та стабільною роботою елемента. Сонячні елементи CdTe мають такі переваги, як: економічно ефективні виробничі процеси виготовлення; наплення матеріалу на підкладки, як із скла, так і з полікристалічних матеріалів; висока ефективність і попит на виробництво; оптимальна пряма ширина забороненої зони (1,54 eV) з високим коефіцієнтом поглинання.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, фотоелектричні перетворювачі, тонкоплівкові сонячні елементи, гетероструктури.

Ivanna VAKALIUK

PhD student, Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, 57 Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76018

ORCID ID: 0000-0002-6188-9793

SCOPUS-AUTHOR ID: 58042285000

Rostyslav YAVORSKYI

Doctor of Philosophy in the specialty "Physics and Astronomy", Associate Professor of the Department of Physics and Chemistry of Solids, Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, 57 Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76018

ORCID ID: 0000-0001-5690-7486

SCOPUS-AUTHOR ID: 57193824044

Oksana ZAMURUIEVA

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Theoretical and Computer Physics named by A. V. Svidzynskiy, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0003-0032-0613

SCOPUS-AUTHOR ID: 56181742100

Lilia KATANOVA

PhD student, Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, 57 Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76018

ORCID ID: 0000-0003-3593-9934

SCOPUS-AUTHOR ID: 57221619996

Mukola SKIPALSKYI

PhD student of the Department of Theoretical and Computer Physics named by A.V. Svidzynskiy, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

SCOPUS-AUTHOR ID: 57670072000

To cite this article: Vakaliuk I., Yavorskyi R., Zamuruieva, O., Katanova L., Skipalskyi M. (2023). Fotovoltaichni materialy: potochni efektyvnosti ta maibutni vyklyky [Photovoltaic materials: present efficiencies and future challenges]. *Physics and Educational Technology*, 3, 3–12, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-3-1>

PHOTOVOLTAIC MATERIALS: PRESENT EFFICIENCIES AND FUTURE CHALLENGES

Every day we use electricity for our own needs, while simultaneously producing minerals, which leads to an environmental disaster. Therefore, for many years, the task of producing electricity from alternative energy sources has become a task for scientists. The most promising type of renewable energy sources is solar energy. The challenge today is to find materials that will be the most optimal, both in terms of cost and efficiency. The article presents the advantages of thin-film solar cells due to their cost-effectiveness, efficiency, lower material consumption, flexibility, and increasing efficiency. Performance evaluation of new technology is necessary to analyze their potential in future applications.

The goal of each generation is to reduce costs and at the same time increase efficiency compared to the previous ones. In this regard, it is necessary to make the economic characteristics the most optimal for the design of the photovoltaic system.

As a result, an overview of materials was conducted: CdTe, CIGS (Cu(In,Ga)_{1-x}Se₂) and CZTS (Cu₂ZnSnS₄). A comparison of the considered thin-film solar cells in terms of physical properties and performance is presented. The efficiencies for small-area CIGS, CdTe, and CZTS single-junction cells measured in the global AM1.5 spectrum (1000 W/m²) at room temperature are found to be 23.6%, 22.3%, and 11.4%, respectively.

Therefore, PEs based on thin-film CdTe are characterized by their high efficiency, cheap materials, reliable and stable operation of the element. CdTe solar cells have such advantages as: cost-effective manufacturing processes; sputtering of material on substrates, both glass and polycrystalline materials; high efficiency and demand for production; optimal direct band gap (1.54 eV) with a high absorption coefficient.

Key words: *renewable energy sources, photoelectric converters, thin film solar cells, heterostructures.*

Вступ. Світ крокує вперед у напрямку розвитку технологій для отримання енергії зі стійких ресурсів, і технологи намагаються подолати такі виклики, як дефіцит палива та енергії через швидке зростання світового населення, високі витрати на енергію, глобальне потепління та різні екологічні проблеми. Споживання енергії постійно зростає, а надмірна залежність від спалювання викопного палива призвела до збільшення концентрації вуглекислого газу (CO₂) в атмосфері та антропогенної зміни клімату з негативним впливом на суспільство. Наприклад, на кожну тонну спаленого вугілля в атмосферу відбувається викид 1 тонни вуглекислого газу, що є основною причиною глобального потепління, парникового ефекту, зміни клімату та виснаження озонового шару (Singh, 2021). Різка зміна клімату призвела до того, що у 2015 році майже кожна країна підписала Паризьку угоду, яка має на меті підтримувати глобальну температуру в межах 1,5°C (Allen, 2018). Враховуючи вище сказане, пошук нових форм відновлюваної енергії сьогодні є надзвичайно актуальною задачею.

При використанні відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) зменшуються викиди парникових газів, що робить їх чистішою та ефективнішою технологією для запобігання погіршення навколишнього середовища. Сонячна енергія є однією з найкращих екологічно чистих енергетичних технологій для масштабного виробництва електроенергії. Оскільки сонячна енергія є постійною, доступною, екологічно безпечною, не завдає шкоди навколишньому середовищу, то її можна використовувати для майбутніх поколінь. Перехід до сталої енергетичної інфраструктури, заснованої на відновлюваних джерелах енергії, вимагатиме розробки широкого спектру високоефективних пристроїв для перетворення та зберігання енергії (Muhammad, 2019). Сонячні фотоелектричні, термоелектричні та електрохімічні пристрої для генерації водню та накопичення енергії –

це деякі з технологій, які можуть зробити величезний внесок у вирішенні проблеми залежності від викопного палива. Однак важливо, щоб ці технології були розроблені з використанням розповсюджених у землі, нетоксичних, хімічно стабільних і екологічно чистих матеріалів. Вартість фотоелемента та його ефективність залежать від матеріалу, з якого він виготовлений. У цьому напрямі було проведено багато досліджень, щоб знайти матеріал для створення фотоелектричних елементів (ФЕ) (Hayat, 2019).

Понад 90% світового ринку фотоелектричних модулів наразі складають сонячні елементи (СЕ) з кристалічного кремнію (с-Si) (Liu, 2020). Si є поширеним у землі, нетоксичним, високостабільним, має відповідну ширину забороненої зони 1,12 eV для перетворення сонячної енергії в електричну. Незважаючи на успіх сонячних елементів с-Si, непряма заборонена зона та низький коефіцієнт оптичного поглинання кремнію вимагають товстого шару для досягнення теоретичної межі ефективності 33,5% при кімнатній температурі (Swanson, 2005). Крім того, для зменшення відбивання для такого типу СЕ необхідна текстурація кремнієвої пластини (Sreejith, 2022). Сучасні кремнієві сонячні батареї мають бути товщиною 160–180 мкм для досягнення ефективності перетворення понад 20%. Товстий шар Si може підвищити ефективність, але для цього необхідно більше матеріалу, що призводить до зростання вартості фотоелектричного модуля. На даний час це залишається серйозною проблемою для кремнієвих сонячних елементів (Terheiden, 2015).

Використання фотоелектричних матеріалів з оптимальною прямою забороненою зоною та високим коефіцієнтом оптичного поглинання зменшує попит на сировину для виготовлення сонячних елементів. Комерційне виготовлення тонкоплівкових СЕ зазвичай базується на основі аморфного кремнію (а-Si), телуриду кадмію (CdTe), селеніду міді-індію-галію (CIGS) і суль-

фіду міді цинку олова (CZTS). Тонкоплівкові сонячні елементи є багатообіцяючою альтернативою наявній технології сонячних елементів з кремнію через їхню пряму ширину забороненої зони, зменшене використання матеріалу, низьку вартість і високу ефективність. На сьогоднішній день ефективність для одноперехідних комірок CIGS, CdTe (рис.1) та CZTS невеликої площі, виміряна в глобальному спектрі AM1.5 (1000 Вт/м²) при 25°C становить 23,6%, 22,3% та 11,4 % відповідно (Green, 2023).

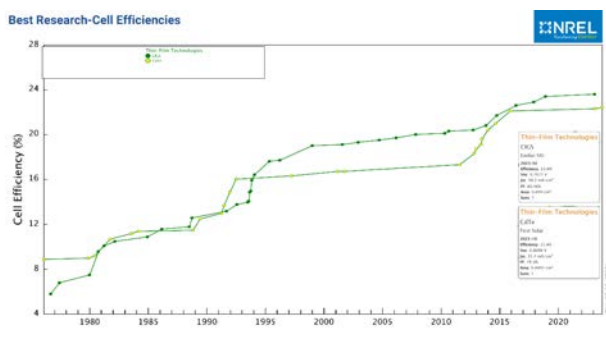


Рис. 1. Найкращі ефективності досліджуваних елементів для тонкоплівкових технологій CdTe, CIGS

Незважаючи на надзвичайно високу ефективність, перетворення потужності сонячних елементів CdTe та CIGS обмежені в тераватному масштабі через дефіцит складових елементів, таких як In і Te. Крім того, токсичність Cd також є фактором, що перешкоджає масовому виробництву сонячних елементів CdTe. Кестерит Cu₂ZnSnS₄ (CZTS) є легкодоступним, нетоксичним, широко розповсюдженим складним напівпровідниковим матеріалом p-типу з прямою та регульованою забороненою зоною (1,4–1,6 eV) і високим коефіцієнтом поглинання (>10⁴см⁻¹) (Khoshsirat, 2019). Однак CZTS має ряд недоліків, таких як велика кількість об'ємних дефектів, наявність вторинних фаз, погана стехіометрія, що значно знижує ефективність перетворення енергії. Тому існує потреба в розробці тонкоплівкових фотоелектричних матеріалів, які складаються з поширених у землі та нетоксичних елементів для виготовлення потенційно недорогих сонячних елементів.

Метою кожного покоління є зниження витрат і водночас підвищення ефективності порівняно з попередніми. У зв'язку з цим економічні характеристики необхідно зробити

найоптимальнішими для проектування фотоелектричної системи. На рис. 2 показано найкращі результати ефективності для різних типів сонячних елементів (NREL, 2023).

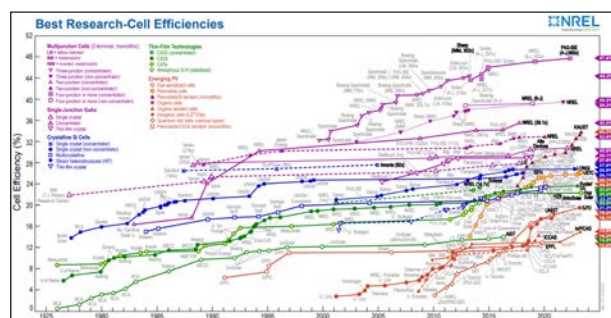


Рис. 2. Діаграма найкращих результатів ефективності сонячних елементів (NREL, 2023)

Приблизно 28 різних підкатегорій позначені різними кольоровими символами. Поточний світовий рекорд для кожної технології виділено вздовж правого краю графіка, який містить ефективність і символ технології.

Мета роботи: огляд сучасного стану фотоелектричних перетворювачів енергії, аналіз значення ефективності і будови комірки.

Методика та техніка експерименту. Огляд проводився серед наукових публікацій по даній тематиці у наукометричних базах даних Web of Science і Scopus, як українських, так і закордонних науковців.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.

Тонкоплівкові сонячні елементи на основі CdTe

Ключовим аспектом сонячних елементів, який потребував удосконалення, це зменшення кількості напівпровідникового матеріалу. Це стало рушійною силою, яка призвела до появи другого покоління фотоелектричних елементів, до яких відноситься CdTe. Тонкоплівкові фотоелектричні модулі на основі телуриду кадмію є основним продуктом на світовому ринку з піковою потужністю понад 30 ГВт. Американська компанія First Solar просунулася від виробничої лінії потужністю 25 МВт/рік у 2005 році до цільового показника 21 ГВт/рік до 2024 року. Цей прогрес відображає зростання ефективності перетворення електроенергії модуля з приблизно від 9% до трохи більше 19% за цей

період (Green, 2021). Тим часом ефективність лабораторних пристроїв прогресувала до >22% у 2015 році (Green, 2016).

Технологія тонкоплівкових ФЕ CdTe була розроблена на початку 1970-х років і в даний час є провідною технологією тонких плівок у десятці найкращих світових виробників. Це пояснюється тим, що CdTe є дуже міцним і хімічно стабільним матеріалом, який можна осаджувати за допомогою широкого спектру методів, що робить його ідеальним для виробництва на великій території (Yavorskyi, 2019; Romeo, 2021). У 1972 році Боннет і Рабенхорст створили перший сонячний елемент CdTe, з гетеропереходом CdS/CdTe ефективність якого становила 6% (Bonnet, 1972). Серія досліджень, таких як висока температура підкладки під час осадження CdTe, активаційні обробки CdCl₂, легування міддю призвели до високих коефіцієнтів перетворення 15,8% (Britt, 1993) та згодом до 16,5% (Wu, 2001).

За останнє десятиліття сонячні елементи CdTe зазнали значного вдосконалення, враховуючи нові характеристики, градацію забороненої зони, включення міді та більш прозорий n-шар (Wilson, 2020), що призвело до підвищення ефективності. Для підвищення ефективності елемента на основі телуриду кадмію зменшують шорсткість поверхні, використовуючи провідний шар TCO (ZnO) (Dhere, 2011). З цими коригуваннями First Solar розробила пристрій з ККД 21,5%, який дещо пізніше становив 22,1% (Green, 2020).

ФЕ на основі тонкоплівкових CdTe, відомі своєю високою ефективністю, дешевими матеріалами, надійною та стабільною роботою елемента. Сонячні елементи CdTe мають такі переваги, як:

- економічно ефективні виробничі процеси виготовлення (Dhere, 2011);
- наплення матеріалу на підкладки, як із скла, так і з полікристалічних матеріалів;
- висока ефективність і попит на виробництво (Bosio, 2011);
- оптимальна пряма ширина забороненої зони (1,54 eV) з високим коефіцієнтом поглинання.

Тонкоплівкові сонячні елементи характеризуються двома типовими конфігураціями: «substrate» та «superstrate» (рис. 3). Основна відмінність між цими двома поняттями полягає

в послідовності нанесення окремих тонких шарів. У конфігурації «superstrate» тонкі плівки наносяться на підкладку в напрямку від освітленої до затемненої сторони, тому можна використовувати лише прозорі підкладки. Згідно структури SE типу «substrate» шари наносяться в протилежній послідовності, тобто в напрямку від затемненої до освітленої сторони. З цієї причини зазвичай використовуються непрозорі підкладки, включаючи гнучку тонку металеву фольгу, полімери. Історично склалося так, що найкращі комірки виготовлялися в конфігурації «superstrate». Велика різниця між світовими рекордами ефективності сонячних елементів, виготовлених у конфігурації superstrate або конфігурації substrate, в основному залежить від зворотного контакту, який утворюють металеві фольги з CdTe р-типу. Вибір матеріалів підкладки обмежений відповідністю коефіцієнта розширення та роботи виходу. Крім того, під час активаційної обробки дифузія домішок, що надходять з підкладки, змінює електричні властивості контакту.

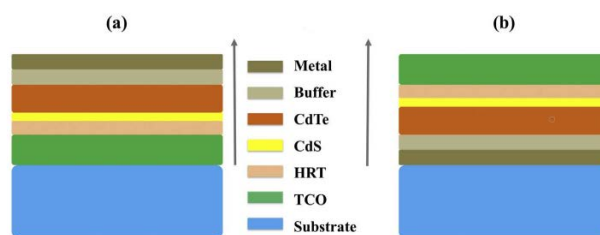


Рис. 3. Схема будови тонкоплівкового сонячного елемента CdTe з порядком осадження: (а) конфігурація «superstrate», (б) конфігурація «substrate» (Bosio, 2018)

Базова структура сонячного елемента на основі CdTe зображена на рис. 4. Структура містить скляну підкладку, шар прозорого провідного оксиду (TCO), віконний шар сульфиду кадмію n-типу (CdS), поглинач CdTe р-типу та задній контакт.

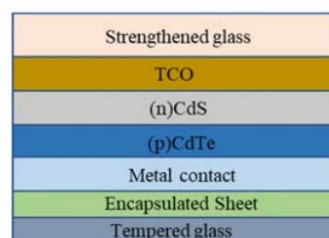


Рис. 4. Схема шарів сонячного елемента CdTe/CdS (Romeo, 2007)

TCO (Transparent Conductive Oxide) виконує функцію фронтального контакту та віконного шару. Розташування областей р-типу та n-типу створює структуру гетеропереходу. Ця побудова використовує переваги віконного шару для зменшення кількості індукованих світлом зарядів у шарі поглинача. Розпилення та вакуумне випаровування можна використовувати для осадження віконного шару CdS n-типу, який використовується, як буферний шар і має товщину близько 100 нм (Rance, 2014). Поглинаючий шар CdTe р-типу (~5 мкм завтовшки) наноситься за допомогою фізичного осадження з парової фази (PVD), спікання або трафаретного друку. Задній контакт може бути виготовлений з алюмінію (Al), золота (Au), нікелю (Ni) або платини (Pt) технологією вакуумного термічного випаровування (VTE). Гретенер та ін. (Gretener, 2016) розробили новий метод для дослідження стабільності сонячних елементів CdTe, створюючи їх у конфігурації підкладки та додавання невеликої кількості Cu до CdTe після перекристалізації. Їхні результати показали 90% початкової вихідної потужності після 1000 годин роботи на максимальній потужності при одній інтенсивності сонячного світла при температурі підкладки 80 °C, що свідчить про хорошу стабільність продуктивності.

Сучасна модульна технологія на основі CdTe базується на полікристалічному тонкоплівковому поглинаючому шарі CdTe р-типу або градуїрованому $CdSe_{1-x}Te_x$ ($CdSeTe$) з мінімальною шириною забороненої зони 1,5 eV – ~ 1,4 eV (відповідно), виготовлений у конфігурації підкладки на склі (рис. 5).

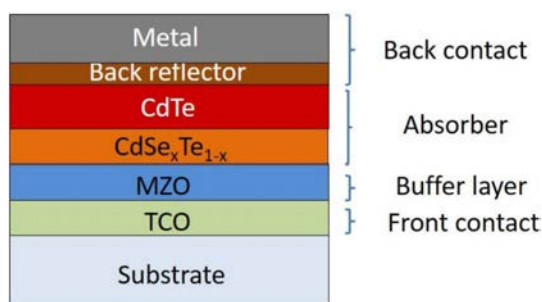


Рис. 5. Схема структури сонячного елемента на основі CdTe (Romeo, 2021)

На рис. 6 показано схематичне розміщення матеріалів для минулих, сучасних і майбутніх елементів на основі CdTe. Сучасні контрольні

показники продуктивності тонкоплівкових сонячних елементів і модулів CdTe визначені First Solar, із сертифікованою рекордною ефективністю перетворення електроенергії відповідно 22,3% і 19,5%.

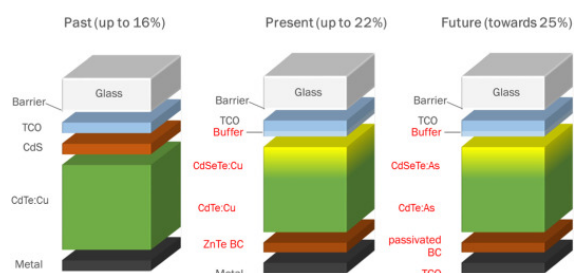


Рис. 6. Порівняння минулих, теперішніх і майбутніх сонячних елементів на основі CdTe (Scarpulla, 2023)

Сонячні елементи на основі селеніду міді-індію-галію (CIGS)

З точки зору ефективності, рекордне значення для CIGS становить 23,6%, яку можна порівняти з кремнієвими елементами. Слід зазначити, що ефективність досліджуваних елементів безпосередньо не відображає досягнуту у промисловому відношенні ефективність через великомасштабну обробку. Тим не менш, ККД модулів вище 20% вже є реальністю. В останні роки відбулося значне підвищення ефективності CIGS у результаті лужної обробки після осадження (Nakamura, 2019). Тонкоплівковий сонячний елемент селеніду міді-індію-галію (CIGS) використовується для перетворення сонячного світла в електричну енергію. CIGS – це напівпровідниковий матеріал із загальною формулою $Cu(In_xGa_{1-x})Se_2$, який змінює значення ширини забороненої зони в межах 1,0–1,7 eV залежно від частки елементів у сполуці (Niki, 2010). Для осадження CIGS можна використовувати підкладки зі скла, металевої фольги та полімерів (Mansfield, 2021). Виняткова ефективність, низька вартість і легкість інтеграції сонячних елементів на основі халькопїриту $Cu(InGa)Se_2$ (CIGS) роблять їх перспективними сонячними елементами. Це пов'язано з їх регульованою шириною забороненої зони і високим коефіцієнтом поглинання до 10^5 см^{-1} (Jeyakumar, 2017). CIGS досягли ефективності до 23,6% для невеликої площі 1 см^2 , виробленої Evolar/Upsala University, а ефективність модуля 19,2%.

Основні переваги сонячних елементів на основі CIGS:

- шари CIGS досить тонкі, що дозволяє наносити їх на гнучкі підкладки;
- багатообіцяюча та широко використовувана інтеграція;
- напilenня на різноманітних жорстких і гнучких підкладках за допомогою вакуумних і безвакуумних процесів;
- пряма ширина забороненої зони, високий коефіцієнт поглинання та дешеве виробництво;
- висока радіаційна стійкість, що робить їх придатними для використання в космосі.

Однак комерціалізація сонячних елементів на основі CIGS менш поширена, ніж сонячних елементів на основі c-Si, через складність отримання високоякісних і великомасштабних сонячних елементів на основі CIGS.

Недоліки сонячних елементів на основі CIGS:

- ефективність комерційного модуля CIGS значно нижча, ніж отриманий у лабораторному масштабі. Велика різниця в ефективності існує між елементами малої площі (> 23%) і комерційно доступними модулями (16,1%);
- ефективність є обмежена наявністю електронної неоднорідності;
- значна залежність від In, що може призвести до зростання ціни (для фотоелектричного модуля потужністю 1 ГВт потрібна 31 тонна індію);
- негативний вплив від утилізації продуктів, що містять кадмій.

Фотоелектрична комірка CIGS складається з кількох тонких шарів різних матеріалів, нанесених на підкладку. Шари складаються з тильного контакту, поглинача, буферного та віконного шару, як показано на рис. 7.

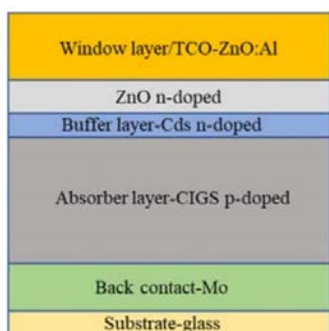


Рис. 7. Схема сонячного елемента на основі CIGS (Adeyinka, 2023)

На основі CZTS

Напівпровідниковий матеріал на основі $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) став одним із найперспективніших матеріалів для розробки нових поглиначів світла в сонячних елементах, виготовлених із екологічно чистих матеріалів, які широко розповсюджені в земній корі. Четвертинна сполука CZTS є прямозонною з шириною забороненої зони $E_g=1,5$ eV, має високий коефіцієнт поглинання ($\alpha > 10^4$ см⁻¹) у видимому та близькому інфрачервоному спектральному діапазоні та р-тип провідності. Для отримання тонких плівок CZTS використовують різні фізичні методи, такі як розпилення, спільне випаровування, імпульсне лазерне осадження, а також хімічні методи, такі як електроосадження, золь-гель (Gurav, 2013; Vanalakar, 2015).

Схема структури сонячної комірки на основі CZTS показана на рис. 8.

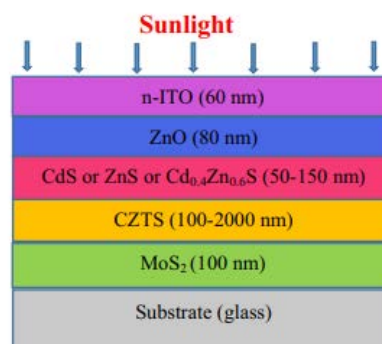


Рис. 8. Схема будови сонячного елемента на основі CZTS (Jhuma, 2019)

У структурі сонячного елемента CZTS використовується содово-вапняна скляна підкладка. У якості високорезистивного поглинаючого шару виступає шар MoS_2 товщиною до 100 нм (Yang, 2014). Абсорбуючим шаром є CZTS, в якому більшість падаючих фотонів поглинаються для отримання електронно-діркових пар. Для забезпечення вирівнювання шарів між CZTS та наступним віконним шаром використовується CdS або ZnS або $\text{Cd}_{0,4}\text{Zn}_{0,6}\text{S}$ як буферний шар. Після цього для віконного шару над буферним шаром використовувався менш витратний і доступний оксид цинку (ZnO) товщини 80 нм, який підсилює розсіювання світла, що дозволяє ефективно використовувати сонячне світло, щоб максимізувати кількість падаючих фотонів до буферних і погли-

наючих шарів (Fuhs, 2005). Нарешті, прозора провідна плівка n-типу оксиду індієвого олова (n-ITO) товщини 60 нм була використана для забезпечення високої рухливості, що призводить до збільшення видимого поглинання для отримання меншого опору шару (Coutts, 1999).

Висновки. Упродовж багаторічної історії розвитку фотовольтаїки докладено багато зусиль для розробки тонкоплівкових сонячних елементів з їх унікальними технічними характеристиками, такими як легкість, гнучкість і доступність. Представлено огляд перспективних технологій фотоелектричних перетворю-

вачів в галузі сонячної енергетики. Показано динамічну тенденцію ефективності, стабільності та механізму деградації тонкоплівкових сонячних елементів. Також було здійснено порівняння структурних, електричних властивостей матеріалу та ефективності CdTe, CIGS та CZTS. Показано тенденцію зміни ККД тонкоплівкових сонячних елементів протягом багатьох років. Показники ефективності перетворення для CdTe, CIGS та CZTS становлять 23,6%, 22,3% та 11,4% відповідно. Однак, деякі з цих технологій виявляють проблеми, які обмежують їхнє майбутнє виробництво.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Singh B.P., Goyal S.K., Kumar, P. Solar PV cell materials and technologies: Analyzing the recent developments. *Mater. Today Proc.* 2021. Vol. 43. P. 2843–2849.
2. Allen M., Dube O.P., Solecki W., et al. Special Report: Global Warming of 1.5 C. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Framing and Context.* 2018. P. 49–92.
3. Muhammad J.Y.U., Waziri A.B., Shitu A.M., et al. Recent progressive status of materials for solar photovoltaic cell: A comprehensive review. *Sci. J. Energy Eng.* 2019. Vol. 7. P. 77–89.
4. Hayat M.B., Ali D., Monyake K.C., Alagha L., Ahmed N. Solar energy—A look into power generation, challenges, and a solar-powered future. *Int. J. Energy Res.* 2019. Vol. 43. P. 1049–1067.
5. Liu Z., Sofia S.E., Laine H.S., Woodhouse M., Wieghold S., Peters I. M., Buonassisi T. Revisiting thin silicon for photovoltaics: a technoeconomic perspective. *Energy Environ. Sci.* 2020. Vol. 13, № 1. P. 12–23.
6. Swanson R.M. Approaching the 29% limit efficiency of silicon solar cells. *Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005.* 03-07 January 2005. Lake Buena Vista, FL, USA. 2005. P. 889–894.
7. Sreejith K.P., Sharma A.K., Basu P.K., Kottantharayil A. Etching methods for texturing industrial multi-crystalline silicon wafers: A comprehensive review." *Solar Energy Materials and Solar Cells.* 2022. Vol. 238. P. 111531.
8. Terheiden B., Ballmann T., Horbelt R., et al. Manufacturing 100- μ m-thick silicon solar cells with efficiencies greater than 20% in a pilot production line. *Phys. Status Solidi A.* 2015. Vol. 212. P. 13–24.
9. Green M.A., Dunlop E.D., Yoshita M., et al. Solar cell efficiency tables (version 62). *Prog Photovolt Res Appl.* 2023. Vol. 31, № 7. P. 651–663.
10. Khoshsirat N., Bradford J., Shahbazi M., Zhang S., Shafiei M., Wang H., Motta N., Efficiency enhancement of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin film solar cells by chromium doping. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2019. Vol. 201. P. 110057.
11. Best Research-Cell Efficiency Chart веб-сайт. URL:<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (дата звернення 15.10.2023).
12. Green M., Dunlop E., Hohl-Ebinger J., Yoshita M., Kopidakis N., Hao X. Solar cell efficiency tables (version 57)). *Progress in photovoltaics: research and applications.* 2021. Vol. 29, № 1. P. 3–15.
13. Green M. A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E. D. Solar cell efficiency tables (version 47). *Progress in photovoltaics: research and applications.* 2016. Vol. 24, № 1. P. 3–11.
14. Yavorskyi R., Nykyruy L., Wisz G., Potera P., Adamiak S., Górný S. Structural and optical properties of cadmium telluride obtained by physical vapor deposition technique. *Applied Nanoscience.* 2019. Vol. 9. P. 715–724.
15. Romeo A., Artagiani E. CdTe-Based Thin Film Solar Cells: Past, Present and Future. *Energies.* 2021. Vol. 14, № 6. P. 1406–1684.
16. Bonnet D., Rabenhorst H. New results on the development of a thin film p-CdTe–n-CdS heterojunction solar. In 9th Photovoltaic Specialists Conference. Silver Spring, MD USA. 1972. P. 129–132.
17. Britt J.; Ferekides C.S. Thin-film CdS/CdTe solar cell with 15.8% efficiency. *Appl. Phys. Lett.* 1993. Vol. 62. P. 2851–2852.
18. Wu X., Dhere R.G., Albin D.S., et al. High-Efficiency CTO/ZTO/CdS CdTe Polycrystalline Thin-Film Solar Cells. In *Proceedings of the NCPV Program Review Meeting.* Lakewood, CO, USA. 14–17 October 2001.
19. Wilson G.M., Al-Jassim M., Metzger W.K., et al. The 2020 photovoltaic technologies roadmap. *Journal of Physics D: Applied Physics.* 2020. Vol 53, № 49. P. 493001.
20. Dhere R.G., Bonnet-Eymard M., Charlet E., et al. CdTe solar cell with industrial Al: ZnO on soda-lime glass. *Thin Solid Films.* 2011. Vol. 519, № 21, 7142–7145.

21. Green M.A., Dunlop E.D., Hohl-Ebinger J., Yoshita M., Kopidakis N., Hao X. Solar cell efficiency tables (version 56). *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 2020. Vol. 28. P. 629–638.
22. Dhere R.G., Bonnet-Eymard M., Charlet E., et al. CdTe solar cell with industrial Al: ZnO on soda-lime glass. *Thin Solid Films*. 2011. Vol. 519, № 21. P. 7142–7145.
23. Bosio A., Menossi D., Mazzamuto S., Romeo N. Manufacturing of CdTe thin film photovoltaic modules. *Thin Solid Films*. 2011. Vol. 519, № 21. P. 7522–7525.
24. Bosio A., Rosa G., Romeo N. Past, present and future of the thin film CdTe/CdS solar cells. *Solar Energy*. 2018. Vol. 175. P. 31–43.
25. Romeo N., Bosio A., Mazzamuto S., Romeo A., Vaillant-Roca L. High efficiency CdTe/CdS thin film solar cells with a novel back contact. 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 3-7 September 2007, Milan, Italy. 2007. P. 1919–1927.
26. Rance L., Burst J. M., Barnes T. M., et al. 14%-efficient flexible CdTe solar cells on ultra-thin glass substrates. *Applied Physics letter*. 2014. Vol. 104, № 14. P. 143903.
27. Gretener C., Perrenoud J., Kranz, L. New perspective on the performance stability of CdTe solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2016. Vol. 146. P. 51–57.
28. Scarpulla M.A., McCandless B., Phillips A. B., et al. CdTe-based thin film photovoltaics: Recent advances, current challenges and future prospects. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2023. Vol. 255. P. 112289.
29. Nakamura M., Yamaguchi K., Kimoto Y., et al. Cd-free Cu(In,Ga)(Se,S)₂ thin-film solar cell with record efficiency of 23.35%. *IEEE J. Photovolt.* 2019. Vol. 9. P. 1863–1867.
30. Niki S., Contreras M., Repins I., et al. CIGS absorbers and processes. *Prog. Photovolt.* 2010. Vol. 18. P. 453–466.
31. Mansfield L. Copper Indium Gallium Diselenide Solar Cells. Photovoltaic Research. 2021.
32. Jeyakumar R., Udai P. S. Copper indium gallium selenide based Solar cells – a review. *Energy and Environmental Science*. 2017. Vol. 10, № 6. P. 1306–1319.
33. Adeyinka A. M., Mbelu O. V., Adediji Y. B., Yahya D. I. (). A review of current trends in thin film solar cell technologies. *International Journal of Energy and Power Engineering*. 2023. Vol. 17, № 1. P. 1–10.
34. Gurav K. V., Pawar S. M., Shin S. W., et al. Electrosynthesis of CZTS films by sulfurization of CZT precursor: Effect of soft annealing treatment. *Applied Surface Science*. 2013. Vol. 283. P. 74–80.
35. Vanalakar S.A., Agawane G.L., Shin S.W., et al. A review on pulsed laser deposited CZTS thin films for solar cell applications. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015. Vol. 619. T. 109–121.
36. Jhuma F. A., Shaily M. Z., Rashid M. J. Towards high-efficiency CZTS solar cell through buffer layer optimization. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*. 2019. Vol. 8. P. 1–7.
37. Yang K.J., Sim J.H., Jeon B., et al. Effects of Na and MoS₂ on Cu₂ZnSnS₄ thin-film solar cell. *Progr Photovolt. Res. Appl.* 2014. Vol. 23, № 7. P. 862–873.
38. Fuhs W., Nickel N. H., Terukov E. Zinc oxide—a material for micro- and optoelectronic applications. *NATO Sci. Ser. II Math. Phys. Chem.* 2005, Vol. 194. P. 197–209.
39. Coutts T.J., Mason T.O., Perkins J.D., Ginley D.S. Transparent conducting oxides: status and opportunities in basic research. *Electrochem. Soc. Proc.* 1999. Vol. 99, № 11. P. 274–289.

REFERENCES:

1. Singh B.P., Goyal S.K., Kumar, P. Solar (2021) PV cell materials and technologies: Analyzing the recent developments. *Mater. Today Proc.* Vol. 43. P. 2843–2849.
2. Allen M., Dube O.P., Solecki W., et al. (2018) Special Report: Global Warming of 1.5 C. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Framing and Context*. P. 49–92.
3. Muhammad J.Y.U., Waziri A.B., Shitu A.M., et al. (2019) Recent progressive status of materials for solar photovoltaic cell: A comprehensive review. *Sci. J. Energy Eng.* Vol. 7. P. 77–89.
4. Hayat M.B., Ali D., Monyake K.C., Alagha L., Ahmed N. (2019) Solar energy – A look into power generation, challenges, and a solar-powered future. *Int. J. Energy Res.* Vol. 43. P. 1049–1067.
5. Liu Z., Sofia S.E., Laine H.S., Woodhouse M., Wieghold S., Peters I. M., Buonassisi T. (2020) Revisiting thin silicon for photovoltaics: a technoeconomic perspective. *Energy Environ. Sci.* Vol. 13, № 1. P. 12–23.
6. Swanson R.M. (2005) Approaching the 29% limit efficiency of silicon solar cells. *Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 03–07 January 2005. Lake Buena Vista, FL, USA. 2005. P. 889–894.
7. Sreejith K.P., Sharma A.K., Basu P.K., Kottantharayil A. (2022) Etching methods for texturing industrial multi-crystalline silicon wafers: A comprehensive review." *Solar Energy Materials and Solar Cells*. Vol. 238. P. 111531.
8. Terheiden B., Ballmann T., Horbelt R., et al. (2015) Manufacturing 100-µm-thick silicon solar cells with efficiencies greater than 20% in a pilot production line. *Phys. Status Solidi A*. Vol. 212. P. 13–24.
9. Green M.A., Dunlop E.D., Yoshita M., et al. (2023) Solar cell efficiency tables (version 62). *Prog Photovolt Res Appl.* Vol. 31, № 7. P. 651–663.

10. Khoshsirat N., Bradford J., Shahbazi M., Zhang S., Shafiei M., Wang H., Motta N., (2019) Efficiency enhancement of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin film solar cells by chromium doping. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. Vol. 201. P. 110057.
11. Best Research-Cell Efficiency Chart веб-сайт. URL:<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (дата звернення 15.10.2023).
12. Green M., Dunlop E., Hohl-Ebinger J., Yoshita M., Kopidakis N., Hao X. (2021) Solar cell efficiency tables (version 57)). *Progress in photovoltaics: research and applications*. Vol. 29, № 1. P. 3–15.
13. Green M. A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E. D. (2016) Solar cell efficiency tables (version 47). *Progress in photovoltaics: research and applications*. Vol. 24, № 1. P. 3–11.
14. Yavorskyi R., Nykyruy L., Wisz G., Potera P., Adamiak S., Górny S. (2019) Structural and optical properties of cadmium telluride obtained by physical vapor deposition technique. *Applied Nanoscience*. Vol. 9. P. 715–724.
15. Romeo A., Artagiani E. (2021) CdTe-Based Thin Film Solar Cells: Past, Present and Future. *Energies*. Vol. 14, № 6. P. 1406–1684.
16. Bonnet D., Rabenhorst H. (1972) New results on the development of a thin film p-CdTe–n-CdS heterojunction solar. In 9th Photovoltaic Specialists Conference. Silver Spring, MD USA. P. 129–132.
17. Britt J.; Ferekides C.S. (1993) Thin-film CdS/CdTe solar cell with 15.8% efficiency. *Appl. Phys. Lett.* Vol. 62. P. 2851–2852.
18. Wu X., Dhere R.G., Albin D.S., et al. (2001) High-Efficiency CTO/ZTO/CdS CdTe Polycrystalline Thin-Film Solar Cells. In *Proceedings of the NCPV Program Review Meeting*. Lakewood, CO, USA. 14–17 October 2001.
19. Wilson G.M., Al-Jassim M., Metzger W.K., et al. (2020) The 2020 photovoltaic technologies roadmap. *Journal of Physics D: Applied Physics*. Vol 53, № 49. P. 493001.
20. Dhere R.G., Bonnet-Eymard M., Charlet E., et al. (2011) CdTe solar cell with industrial Al: ZnO on soda-lime glass. *Thin Solid Films*. 2011. Vol. 519, № 21, 7142–7145.
21. Green M.A., Dunlop E.D., Hohl-Ebinger J., Yoshita M., Kopidakis N., Hao X. (2020) Solar cell efficiency tables (version 56). *Prog. Photovolt. Res. Appl.* Vol. 28. P. 629–638.
22. Dhere R.G., Bonnet-Eymard M., Charlet E., et al. (2011) CdTe solar cell with industrial Al: ZnO on soda-lime glass. *Thin Solid Films*. Vol 519, № 21. P. 7142–7145.
23. Bosio A., Menossi D., Mazzamuto S., Romeo N. (2011) Manufacturing of CdTe thin film photovoltaic modules. *Thin Solid Films*. Vol. 519, № 21. P. 7522–7525.
24. Bosio A., Rosa G., Romeo N. (2018) Past, present and future of the thin film CdTe/CdS solar cells. *Solar Energy*. Vol. 175. P. 31–43.
25. Romeo N., Bosio A., Mazzamuto S., Romeo A., Vaillant-Roca L. (2007) High efficiency CdTe/CdS thin film solar cells with a novel back contact. 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 3–7 September 2007, Milan, Italy. P. 1919–1927.
26. Rance L., Burst J. M., Barnes T. M., et al. (2014) 14%-efficient flexible CdTe solar cells on ultra-thin glass substrates. *Applied Physics letter*. Vol. 104, № 14. P. 143903.
27. Gretener C., Perrenoud J., Kranz, L. (2016) New perspective on the performance stability of CdTe solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. Vol. 146. P. 51–57.
28. Scarpulla M.A., McCandless B., Phillips A. B., et al. (2023) CdTe-based thin film photovoltaics: Recent advances, current challenges and future prospects. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. Vol. 255. P. 112289.
29. Nakamura M., Yamaguchi K., Kimoto Y., et al. (2019) Cd-free $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{Se,S})_2$ thin-film solar cell with record efficiency of 23.35%. *IEEE J. Photovolt.* Vol. 9. P. 1863–1867.
30. Niki S., Contreras M., Repins I., et al. (2010) CIGS absorbers and processes. *Prog. Photovolt.* Vol. 18. P. 453–466.
31. Mansfield L. (2021) Copper Indium Gallium Diselenide Solar Cells. *Photovoltaic Research*.
32. Jeyakumar R., Udai P. S. (2017) Copper indium gallium selenide based Solar cells – a review. *Energy and Environmental Science*. Vol. 10, № 6. P. 1306–1319.
33. Adeyinka A. M., Mbelu O. V., Adediji Y. B., Yahya D. I. (2023) A review of current trends in thin film solar cell technologies. *International Journal of Energy and Power Engineering*. Vol.17, № 1. P. 1–10.
34. Gurav K. V., Pawar S. M., Shin S. W., et al. (2013) Electrosynthesis of CZTS films by sulfurization of CZT precursor: Effect of soft annealing treatment. *Applied Surface Science*. Vol. 283. P. 74–80.
35. Vanalakar S.A., Agawane G.L., Shin S.W., et al. (2015) A review on pulsed laser deposited CZTS thin films for solar cell applications. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 619. T. 109–121.
36. Jhuma F. A., Shaily M. Z., Rashid M. J. (2019) Towards high-efficiency CZTS solar cell through buffer layer optimization. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*. Vol. 8. P. 1–7.
37. Yang K.J., Sim J.H., Jeon B., et al. (2014) Effects of Na and MoS_2 on $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin-film solar cell. *Progr Photovolt. Res. Appl.* Vol. 23, № 7. P. 862–873.
38. Fuhs W., Nickel N. H., Terukov E. (2005) Zinc oxide a material for micro- and optoelectronic applications. *NATO Sci. Ser. II Math. Phys. Chem*. Vol. 194. P. 197–209.
39. Coutts T.J., Mason T.O., Perkins J.D., Ginley D.S. (1999) Transparent conducting oxides: status and opportunities in basic research. *Electrochem. Soc. Proc.* Vol. 99, № 11. P. 274–289.

УДК 519.7+004.8

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2023-3-2>

Олег ВІЛІГУРСЬКИЙ

старший викладач кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А. В. Свідзинського, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025. viligurskyi@gmail.com

ORCID ID: 0009-0008-3763-2577

Микола СКІПАЛЬСЬКИЙ

аспірант кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А. В. Свідзинського, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

SCOPUS-AUTHOR ID: 57670072000

Бібліографічний опис статті: Вілігурський, О., Скіпальський, М. (2023). Вплив чат-ботів зі штучним інтелектом на процес викладання курсів із програмування. *Фізика та освітні технології*, 3, 13–18, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-3-2>

ВПЛИВ ЧАТ-БОТІВ ЗІ ШТУЧНИМ ІНТЕЛЕКТОМ НА ПРОЦЕС ВИКЛАДАННЯ КУРСІВ ІЗ ПРОГРАМУВАННЯ

Приблизно з листопада 2022 року ChatGPT (Generative Pre-trained Transformer) став доступним у більшості країн світу. Так почалось стрімке поширення штучного інтелекту (ШІ) в інформаційному просторі. Відтепер багато трудомістких завдань стало можливим доручати штучному інтелекту. Це швидко опанували, наприклад, копірайтери, журналісти, автори текстів з різноманітних сфер життя. Звісно, далеко не завжди в кінцевому результаті отримується якісний продукт. Але в разі відповідального ставлення компетентних фахівців до текстів, згенерованих штучним інтелектом, все ж можна досягати гарних результатів від співпраці природного і штучного інтелекту.

Часто штучний інтелект стає корисним і в освіті. Але разом з вигодами з'явилися і нові виклики. Зокрема, у питанні захисту авторських прав і в галузі освіти. Дуже вагомий вплив штучний інтелект має на викладання курсів з інформаційних технологій. Далеко не завжди цей вплив є позитивним.

У роботі окреслюється вплив ШІ на освітню діяльність. Йдеться як про процес вивчення, так і про процес викладання. До уваги брались два найбільш розповсюджені чат-боти: ChatGPT і Google Bard. Метою роботи є аналіз шляхів послаблення негативного впливу ШІ, а саме – яким чином зменшити ризик того, що студенти волять надмірно користуватись послугами чат-ботів, замість того, щоб виконувати завдання самостійно. Результати дослідження здобуті впродовж останніх років, при викладанні курсів з програмування на Python, JavaScript і PHP. Оскільки така проблема постала тільки у 2023 році, тож системних дієвих рішень, випробуваних часом, ще не напрацьовано.

У роботі робляться висновки про те, яким чином можна якщо не усунути, то хоча б послабити негативний вплив чат-ботів на бажання студентів самостійно виконувати завдання з програмування. Наводиться також ряд порад щодо підбору завдань для лабораторних, контрольних і залікових робіт. Ці поради можуть бути корисними для учителів навчальних закладів різного рівня. Ізрештою вони можуть позитивно вплинути на рівень академічної доброчесності студентів.

Ключові слова: штучний інтелект, IT, Python.

Oleh VILIHURSKYI

Senior teacher of the Department of Theoretical and Computer Physics named after A.V. Svidzynskyi, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0009-0008-3763-2577

Mykola SKIPALSKYI

PhD student of the Department of Theoretical and Computer Physics named after A.V. Svidzynskyi, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli Avenue, Lutsk, Ukraine, 43025

SCOPUS-AUTHOR ID: 57670072000

To cite this article: Vilihurskyi, O., Skipalskyi, M. (2023). Vplyv chat-botiv zi shtuchnym intelektom na protses vykladannia kursiv iz prohramuvannia [The impact of chatbots with artificial intelligence on the process of teaching programming courses]. *Physics and Educational Technology*, 3, 13–18, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-3-2>

THE IMPACT OF CHATBOTS WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE ON THE PROCESS OF TEACHING PROGRAMMING COURSES

From about November 2022, ChatGPT (Generative Pre-trained Transformer) became available in most countries of the world. This is how the rapid spread of artificial intelligence (AI) in the information space began. From now on, it has become possible to delegate many time-consuming tasks to artificial intelligence. It was quickly mastered by, for example, copywriters, journalists, authors of texts from various spheres of life. Of course, the end result is not always a quality product. But in case of responsible attitude of competent specialists to the texts generated by artificial intelligence, it is still possible to achieve good results from the cooperation of natural and artificial intelligence.

Artificial intelligence often becomes useful in education as well. But along with the benefits came new challenges. In particular, in the issue of copyright protection and in the field of education. Artificial intelligence has a very significant impact on the teaching of information technology courses. This influence is far from always positive.

The work outlines the impact of AI on educational activity. It is about both the learning process and the teaching process. Two of the most widespread chatbots were taken into account: ChatGPT and Google Bard. The purpose of the work is to analyze ways to mitigate the negative impact of AI, namely, how to reduce the risk that students prefer to overuse the services of chatbots instead of completing the tasks themselves. The results of the research were obtained during the last years, when teaching programming courses in Python, JavaScript and PHP. Since such a problem appeared only in 2023, effective systemic solutions tested by time have not yet been worked out.

The paper draws conclusions about how it is possible, if not to eliminate, at least to weaken the negative impact of chatbots on students' desire to independently perform programming tasks. There are also a number of tips on selecting tasks for laboratory, control and assessment work. These tips can be useful for teachers of educational institutions of various levels. And ultimately, they can have a positive impact on the level of academic integrity of students.

Key words: artificial intelligence, IT, Python.

Викладання багатьох курсів з інформаційних технологій передбачає, що студенти повинні виконувати різноманітні завдання з написання програм. Без вміння самостійно писати програмні продукти опанувати відповідні курси просто неможливо. При цьому гостро постає питання контролю над тим, наскільки самостійно студенти виконують поставлені викладачем завдання. Оскільки процес навчання в університеті (та й не тільки) в першу чергу передбачає підготовку здобувачів освіти до самостійної роботи в майбутньому, а ІТ-сфера принципово тісно пов'язана з інтернетом, видається недоцільним обмежувати студентів у використанні будь-яких каналів зв'язку з відкритими джерелами інформації. Адже працюючи на роботі, вони матимуть змогу і користуватись довідковими ресурсами, і пошуковими системами, і чат-ботами зі штучним інтелектом. Вплив штучного інтелекту на освітні процеси є суттєвим викликом останніх років. При цьому не можна не враховувати також того, що за сучасних реалій навчання часто відбувається дистанційно. Отже, особистий контроль викладача над тим, наскільки самостійно студент працює над завданнями і дотримується принципів академічної доброчесності, стає практично неможливим.

Досвід викладання курсів програмування (зокрема, Python, JavaScript, PHP) показував, що ще буквально рік тому типовою була ситуація, коли сумлінно виконували завдання лише ті студенти, які мали хист до програмування і були справді мотивованими. Інші намагались схитрувати, і замість самостійної і наполегливої роботи воліли: а) відшукати готові розв'язки в інтернеті; б) скористатись сторонньою допомогою (зазвичай – інших студентів своєї групи або старшокурсників). З першим варіантом недоброчесності можна ефективно давати раду, добираючи оригінальні завдання, яких нема у мережі, або суттєво модифікуючи умови відомих задач. Це відносно досить багато часу, але воно того варте. Щодо сторонньої допомоги, то з цим боротись важче. Однак, якщо завдання вимагають значних затрат часу, студенти не дуже охоче йдуть на допомогу, або ж допомагають не надто сумлінно. Відповідно, такі роботи принаймні не отримують високих оцінок.

Ситуація суттєво змінилась у 2023 році, коли в Україні запрацював чат-бот ChatGPT (Fedorov, 2023). Дещо пізніше запрацювали й інші, наприклад, Google Bard і чат-бот Bing. Можна бути практично впевненим, що кількість подібних ресурсів буде все зростати,

і працюватимуть вони все ефективніше. Тож не враховувати їх впливу на освітній процес ніяк не можна.

І вплив цей перевищує очікування окремих аналітиків. Так, канадський письменник і культуролог Стівен Марш писав про «десять років, щоб наукові кола зіткнулися з цією новою реальністю: два роки, щоб студенти зрозуміли технологію, ще три роки, щоб професори визнали, що студенти використовують цю технологію, а потім п'ять років, щоб адміністратори університетів вирішували, що з цим робити, якщо взагалі робити» (Marche, 2022). Особистий досвід показує, що після входження ChatGPT в інформаційний простір України, студенти навіть першого курсу вже через лічені тижні почали його використовувати для розв'язування задач з програмування. Відповідно, вже у весняному семестрі викладачам доводилось шукати механізми зменшення можливого негативного впливу на освітній процес. Практика викладання у осінньому 2023 року показала, що студенти першого курсу (які тільки почали навчання в університеті) не так швидко почали використовувати чат-боти, але все ж швидко здобули відповідний досвід.

Ми окреслимо основні проблеми, які тут мають місце, і можливі механізми зменшення негативного впливу ШІ на бажання студентів вчитись виконувати завдання самостійно. Для конкретності будемо говорити про програмний код у Python і, переважно, про чат-бот ChatGPT у доступній для студентів безплатній версії, часом порівнюючи з Google Bard.

Класичні задачі. Традиційні задачі на цикли, умови, списки тощо легко вирішуються чат-ботом. Причому, при повторних запитах з такою самою постановкою задачі ШІ щоразу видає інші розв'язки і супроводжує їх цілком адекватними коментарями. Звісно, особливості неймінгу, деякі типові програмні вставки та інші не такі явні ознаки нерідко стають чіткими сигналами про те, що завдання виконав не студент, а саме ШІ. Можна навіть встановити, чи це завдання зроблене за допомогою ChatGPT чи, скажімо, Google Bard. Наприклад, ChatGPT супроводжує код вставками коротких коментарів, а Google Bard поміщає розлогий багаторядковий опис програми на початку коду. Ось приклад відповіді згаданих чат-ботів на той самий запит «*Напиши програму у Python для обчислення числа Фібоначчі*»:

ChatGPT:

```
def fibonacci(n):
    if n <= 1:
        return n
    else:
        return fibonacci(n-1) + fibonacci(n-2)
```

Введення номеру числа Фібоначчі
n = int(input("Введіть номер числа Фібоначчі: "))

Виклик функції та виведення результату
result = fibonacci(n)
print(f"Число Фібоначчі з номером {n}: {result}")

Google Bard:

```
def fibonacci(n):
```

```
    """
```

Обчислює n-те число Фібоначчі.

Аргументи:

n: Позитивне ціле число, для якого потрібно обчислити число Фібоначчі.

Повертає:

n-те число Фібоначчі.

```
    """
```

```
if n == 0 or n == 1:
```

```
    return n
```

```
else:
```

```
    return fibonacci(n - 1) + fibonacci(n - 2)
```

```
print(fibonacci(10))
```

Але переконливо доводити студентам, що їхній розв'язок є плагіатом, складно та й навряд чи доцільно.

Мовні особливості. Інколи «перехитрити» ШІ можна, якщо врахувати те, що за замовчуванням він, виконуючи завдання, «думає» по-англійськи. Наприклад, коли у задачі потрібно було виконувати певні операції з голосними буквами, студенти розуміють, що йдеться про українські букви, тоді як ШІ формує список букв англійської абетки:

```
vowels = "aeiouAEIOU" (ChatGPT)
```

```
vowels = ["a", "e", "i", "o", "u"] (Google Bard)
```

Втім, коли вказати ШІ про його «помилку», він одразу адекватно її виправляє. Тож такі

задачі можуть навчити студентів не стільки програмувати, скільки адаптувати умову завдань до сприйняття читачем, у якого рідна мова – англійська.

Задачі з математичним змістом. Трохи краща ситуація, якщо у завданнях, які по суті зводяться до програмування, у постановці задачі вимагати виконання певних математичних обчислень. Наприклад, обчислення відстаней, площ, об'ємів, кутів тощо. Однак, насправді переважно усі математичні завдання, які чітко формулюються словами, ШШ успішно виконує. Бували випадки, коли він плував, у якій розмірності простору треба виконати обчислення, але це виправляється мінімальним уточненням умови, яке можна зробити у формі живого діалогу. Тож тут студенти можуть «вкрутитись», якщо більш-менш добре володіють мовою і математикою.

Ось приклад завдання, з яким не впорався ChatGPT, ні Google Bard:

«Напишіть функцію, яка обчислює найбільше і найменше значення полінома $f(x) = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e$ на інтервалі від x_1 до x_2 , де x_1 і x_2 повинні вводитись користувачем».

ChatGPT тут шукав тільки значення функції на межах інтервалу, а Google Bard «просунувся» трохи далі: сформував цілочисельний список значень від x_1 до x_2 і шукав найбільше й найменше значення функції в цьому масиві аргументів.

Задачі з фізичним змістом. Фізика ШШ поки що «розуміє» відчутно гірше, ніж математику. Навіть доволі просту задачу на рівняння теплового балансу ШШ розв'язував погано. Приклад:

«У термосі знаходиться 1 літр води при температурі 100°C . У нього кладуть шматок льоду з температурою -10°C масою 1 г. Згенеруйте словник, ключами якого є номери шматочків льоду, а значеннями – відповідні температури після встановлення рівноваги у системі. Отримайте номер шматочка, після якого танення припиниться. Втратами тепла знехтувати. Візуалізуйте результати у вигляді графіка за допомогою якого-небудь табличного процесора (Microsoft Office Excel, LibreOffice Calc тощо)».

Звісно, про використання штучним інтелектом інших програмних продуктів не йдеться. Але і ChatGPT, і Google Bard «завалили» навіть ту частину задачі, де треба було згенерувати словник. Жоден з ботів не враховував питомої теплоти плавлення льоду, обмежуючись лише теплом, яке йде на його нагрівання. Та й там

були незрозумілі операції з зайвим перерахунком зі шкали Цельсія у шкалу Кельвіна і неправильне обчислення кількості теплоти.

А ось приклад задачі, де поведінка двох згаданих чат-ботів виявилась суттєво різною:

«Вздовж прямої розміщені N масивних точок. Відстань від першої до другої – 1 м, від другої до третьої вдвічі менша, від третьої до четвертої – ще вдвічі менша і т. д. Маса першої точки – 1 кг, маса другої – вдвічі більша, третьої – вдвічі більша ніж другої і т. д. Точки взаємодіють відповідно до закону всесвітнього тяжіння. Напиши програму для обчислення сили, яка діє на першу точку, а також номер точки, у якій сила взаємодії з першою точкою максимальна».

ChatGPT сповістив: «Ця задача включає в себе велику кількість обчислень і може бути важкою для розгляду в рамках одного повідомлення. Однак я можу надати вам загальну ідею, як розв'язати це завдання...». А Google Bard видав цілком прийнятний розв'язок, до того ж, досить компактний.

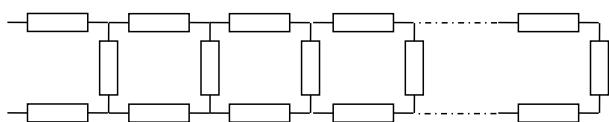
Використання зовнішніх файлів. Видається доцільним ускладнити діяльність штучного інтелекту, формуючи завдання так, щоб використовувались сторонні файли. Але прямолінійні завдання легко даються ботам. Йдеться, наприклад, про таку задачу:

«Напиши програму, яка просить у користувача ввести якусь літеру, а потім з файлу abc.txt виділяє стовпчик, що починається на цю літеру, і текст з цього стовпчика записує у файл column.txt (в режимі «а» – дописування)».

Конструктивнішим є підхід, у якому в зовнішньому файлі міститься вказівка на те, як саме має вибудовуватись алгоритм. Наприклад, у такому файлі може бути приклад роботи програми з шифрування-дешифрування, вказівка на кількість елементів у списку чи записів у словнику, якась псевдографіка тощо. Це цілком вартий зусиль спосіб формулювання задач. Але, слід визнати, трудомісткий.

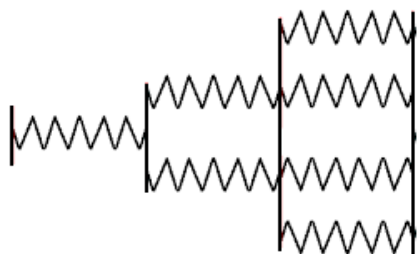
Графічна компонента завдань. Більш конструктивною видається така стратегія формулювання задач, коли суттєва частина інформації міститься у графічній формі. Приклад:

«Напишіть програму для підрахунку опору електричної схеми, де опір горизонтально розміщеного резистора – R , опір вертикально розміщеного – $2R$. Кількість резисторів N повинна бути кратною 3 і вводитись користувачем».



Адекватно «прочитати» таку умову ШІ не може. Ще один подібний приклад:

«Система пружин складається з N блоків паралельно з'єднаних пружин (див. рисунок для $N = 3$). Коефіцієнти жорсткості по горизонталі змінюються за законом (можна формулювати індивідуально для різних студентів). Напишіть програму для підрахунку коефіцієнта жорсткості системи».



Знаходження помилки у кодї. Можна використати ще такий спосіб змусити студентів самостійно розбиратись з програмним кодом, коли їм надається програмний продукт з «багами», а їм слід виправити помилки. Але тут знову-таки потрібен вельми творчий підхід з боку викладача, щоб це завдання не виявилось надто простим для ШІ.

Порівняння швидкодії різних розв'язків. Можна в якості завдання попросити проаналізувати різні варіанти розв'язку тієї самої задачі на предмет швидкодії, чистоти коду, оптимальності тощо. Варіанти розв'язків можна отримати за допомогою того ж таки ШІ. Однак, такі завдання вже перестають бути завданнями на власне програмування.

Перетворення блок-схем у код або навпаки. Цей підхід може бути цілком продуктивним, адже давати раду з зображеннями ШІ поки що адекватно не вмє. Але готувати достатньо багато задач, які супроводжуються блок-схемами – дуже трудомісткий процес. А якщо в завданні вимагається перетворювати код у блок-схему, то це вже не задача на програмування.

Перетворення псевдокоду у код чи навпаки. Цей підхід навряд чи доцільний, оскільки все, що просто формулюється словами, легко сприймається штучним інтелектом.

Обмеження перед студентами по програмному функціоналу. Практика показала, що жоден студент не зміг уникнути належних розумових зусиль, коли було поставлене завдання відтворити просту графіку, користуючись лише фіксованим набором програмних елементів.

Концептуальні завдання, завдання-проекти. Використати чат-боти «в лоб» студентам не вдасться, якщо формулювати завдання таким чином, щоб кожне наступне було пов'язане з результатами роботи з попереднім завданням. Таким чином студент має справу з цілісним блоком завдань, певного роду проектом. Звісно, окремі блоки можна давати чат-ботам, відповідно адаптуючи умову. Але це все ж передбачає вдумливе втручання студентів і даватиме певну освітню користь. Однак тут йдеться не так про кодинг, як про проектний менеджмент. Хоча слід визнати, що в реаліях вдосконалення і поширення штучного інтелекту потреба ринку у класичному програмуванні буде знижуватись, натомість зростатиме потреба у проектному менеджменті.

Висновки. Як ми бачимо, від моменту входження в інформаційний простір чат-ботів зі штучним інтелектом процес спонукання студентів до сумлінної роботи при вивченні курсів програмування суттєво ускладнився. Об'єктивно оцінити, наскільки дотримуються здобувачі освіти принципів академічної доброчесності, стало вкрай важко. Все ще лишаються способи подати задачі з програмування так, щоб простіше було їх розв'язати «по-чесному», аніж адаптовувати умови так, щоб їх адекватно сприйняв ШІ. Нам здається, що найбільш доцільним тут є активне використання вставок з фізики і математики і подання частини умови у графічній формі. Але формувати такі завдання стає дуже непростим і трудомістким завданням. Гадаємо, доречно доповнити такі способи формулювання завдань безпосереднім спілкуванням зі студентами (очним контактом на лабораторних роботах, співбесідах, заліках, іспитах) і контактом один-на-один в разі дистанційного навчання.

ЛІТЕРАТУРА

1. FEDOROV. Telegram. Прочитовано 20 лютого 2023. URL: <https://t.me/zedigital/2893> (дата звернення: 20.09.2023).
2. Marche S. The college essay is dead. Nobody is prepared for how AI will transform academia. The Atlantic. URL: <https://www.theatlantic.com/technology/archive/2022/12/chatgpt-ai-writing-college-student-essays/672371/> (дата звернення: 20.09.2023).

REFERENCES

1. FEDOROV. Telegram. Cited February 20, 2023. URL: <https://t.me/zedigital/2893> [Accessed September 20, 2023].
2. Marche S. The college essay is dead. Nobody is prepared for how AI will transform academia. The Atlantic. URL: <https://www.theatlantic.com/technology/archive/2022/12/chatgpt-ai-writing-college-student-essays/672371/> [Accessed September 20, 2023].

УДК 538.9

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2023-3-3>**Володимир ГОЛОВАЦЬКИЙ**

доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри термоелектрики та медичної фізики, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, Україна, 58012

ORCID ID: 0000-0002-5573-2562

SCOPUS-AUTHOR ID: 6507899727

Ігор ГОЛОВАЦЬКИЙ

аспірант кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної фізики, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, Україна, 58012

ORCID ID: 0000-0002-4435-4607

SCOPUS-AUTHOR ID: 57202987360

Сергій ГОНЧАРУК

студент кафедри термоелектрики та медичної фізики, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, Україна, 58012

Бібліографічний опис статті: Головацький, В., Головацький, І., Гончарук, С. (2023). Вплив магнітного поля на оптичні властивості квантових точок типу II (ефект Ааронова – Бома). *Фізика та освітні технології*, 3, 19–30, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-3-3>

ВПЛИВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КВАНТОВИХ ТОЧОК ТИПУ II (ЕФЕКТ ААРОНОВА – БОМА)

Завдяки просторовому розділенню електронів та дірок в напівпровідникових КТ ядро/оболонка з геторомежею типу II можуть проявлятися нові оптичні властивості, недоступні в інших КТ. Тому такі наносистеми інтенсивно вивчаються на предмет можливості використання в нових наноприладах.

Мета даної роботи є визначення впливу магнітного поля на енергетичну структуру та міжзонні оптичні квантові переходи в сферичних квантових точках II типу ZnTe/CdSe і CdSe/ZnTe. Задача розв'язувалась двома методами: числовим методом в системі COMSOL Multiphysics та методом діагоналізації в системі Wolfram Mathematica на основі точних розв'язків рівняння Шредингера у незбуреній магнітним полем системі. Результати отримані обома методами збігаються з великою точністю. Останній метод є більш складним, але дозволив визначити парціальний вклад базисних станів у нових квантових станах квазічастинок, що отримуються внаслідок дії магнітного поля. В роботі отримано залежності енергетичних спектрів і хвильових функцій електрона та дірки від магнітного поля для сферичних квантових точок ZnTe/CdSe і CdSe/ZnTe з різними розмірами ядра. Показано, що магнітне поле порушує сферичну симетрію системи і знімає виродження енергетичного спектру за магнітним квантовим числом. Енергія квазічастинок у станах з $m \geq 0$ монотонно зростає при посиленні магнітного поля, а в станах з $m < 0$ ці залежності є немонотонними. Енергія основного стану електрона в ZnTe/CdSe та енергія основного стану дірки в CdSe/ZnTe зі збільшенням індукції магнітного поля формуються по черзі найнижчими станами $m = 0, -1, -2, \dots$. Це є наслідком ефекту Ааронова – Бома в КТ ядро/оболонка. Показано, що магнітне поле деформує хвильові функції квазічастинок та впливає на величину їх перекриття. Це проявляється в залежності сили осцилятора міжзонних квантових переходів від індукції магнітного поля. Показано, що ефект Ааронова – Бома може проявлятися в міжзонних квантових переходах.

Ключові слова: квантові точки, гетероперехід типу II, магнітне поле, енергетичний спектр квазічастинок, сила осцилятора квантових переходів, осциляції основного стану, ефект Ааронова – Бома.

Volodymyr HOLOVATSKYI

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of thermoelectricity and medical physics, Chernivtsi National University, 2 Kotsyubynsky str., Chernivtsi, Ukraine, 58012

ORCID ID: 0000-0002-5573-2562

SCOPUS-AUTHOR ID: 6507899727

Ihor HOLOVATSKYI

Aspirant, Chernivtsi National University, 2 Kotsyubynsky str., Chernivtsi, Ukraine, 58012

ORCID ID: 0000-0002-4435-4607

SCOPUS-AUTHOR ID: 57202987360

Serhiy HONCHARUK

Master's student, Department of thermoelectricity and medical physics, Chernivtsi National University, 2, Kotsyubynsky str., Chernivtsi, Ukraine, 58012

To cite this article: Holovatskyi, V., Holovatskyi, I. and Honcharuk S. (2023). Vplyv mahnitnoho polia na optychni vlastyvoli kvantovykh tochkoh typu ii (Efekt Aaronova – Boma). [The magnetic field effect on the optical properties of type II quantum dots (Aharonov-Bohm effect)]. *Physics and Educational Technology*, 3, 19–30, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-3-3>

THE MAGNETIC FIELD EFFECT ON THE OPTICAL PROPERTIES OF TYPE II QUANTUM DOTS (AHARONOV – BOHM EFFECT)

Due to the spatial separation of electrons and holes in core/shell semiconductor QDs with a type II heterojunction, new optical properties unavailable in other QDs can be manifested. Therefore, such nanosystems are intensively studied for the possibility of use in new nanodevices.

The purpose of this work is to determine the influence of the magnetic field on the energy structure and interband optical quantum transitions in spherical quantum dots of type II ZnTe/CdSe and CdSe/ZnTe. The problem was solved by two methods: the finite element method in the COMSOL Multiphysics system and the diagonalization method in the Wolfram Mathematica system based on exact solutions of the Schrödinger equation in a system undisturbed by a magnetic field. The results obtained by both methods coincide with great accuracy. The last method is more complicated, but it made it possible to determine the partial contribution of the basic states in the new quantum states of quasiparticles obtained as a result of the action of a magnetic field. The dependence of the energy spectra and wave functions of the electron and hole on the magnetic field for spherical quantum dots ZnTe/CdSe and CdSe/ZnTe with different core sizes was obtained in the paper. It is shown that the magnetic field breaks the spherical symmetry of the system and removes the degeneracy of the energy spectrum according to the magnetic quantum number. The energy of quasiparticles in states with $m \geq 0$ increases monotonically with increasing magnetic field, and in states with $m < 0$ these dependences are non-monotonic. The energy of the ground state of the electron in ZnTe/CdSe and the energy of the ground state of the hole in CdSe/ZnTe with increasing induction of the magnetic field are alternately formed by the lowest states $= 0, -1, -2, \dots$. This is a consequence of the Aharonov – Bohm effect in core/shell CT. It is shown that the magnetic field deforms the wave functions of quasiparticles and affects the amount of their overlap. This is manifested in the dependence of the oscillator strength of interband quantum transitions on the induction of the magnetic field. It is shown that the Aharonov – Bohm effect can manifest itself in interband quantum transitions.

Key words: quantum dots, type II heterojunction, magnetic field, energy spectrum of quasiparticles, oscillator strength of quantum transitions, ground state oscillations, Aharonov – Bohm effect.

Вступ. Напівпровідникові багатошарові квантові точки представляють собою перспективний клас наноструктур, які можуть забезпечити нові методи впливу на енергетичний спектр і хвильові функції квазічастинок для отримання бажаних оптичних властивостей наносистем. У результаті різної просторової локалізації квазічастинок в багатошарових квантових точках можна індивідуально

регулювати енергетичний спектр електронів і дірок, що дозволяє досягти різнокольорового випромінювання з необхідним спектром. Тому багатошарові сферичні КТ інтенсивно досліджуються як теоретично, так і експериментально (Nizamoglu, 2008; Zhang, 2009; Tyagi, 2012; Holovatsky, 2013, 2021).

Найпростішими багатошаровими сферичними наноструктурами є сферичні колоїдні

нанокристали, що складаються з ядра та зовнішньої оболонки, яка покращує квантовий вихід та стабільність випромінювання (Корбутяк, 2012). Можливість регулювання основних оптичних властивостей нанокристалів, таких як довжина хвилі випромінювання, квантовий вихід і час життя, шляхом вирощування оболонки з іншого напівпровідника стимулювала експериментальні дослідження квантових точок типу ядро-оболонка та сприяла значному прогресу в хімічному синтезі цих наносистем (Pidluzhna, 2019; Doskaliuk, 2016).

Квантові точки типу ядро-оболонка поділяються на два типи: тип I – широкозонний напівпровідник є оболонкою, вузькозонний – ядром. Причому вся заборонена зона вузькозонного напівпровідника потрапляє в область забороненої зони широкозонного напівпровідника. В такій наноструктурі квазічастинки локалізовані в області ядра, оскільки зовнішня оболонка утворює потенційний бар'єр для квазічастинок і тим самим відокремлює оптично активне ядро від навколишнього середовища, підвищуючи ефективність випромінювання (Wang, 2018; AbouElhamd, 2019). Можливий також і обернений варіант, коли ядро – широкозонний напівпровідник, а оболонка – вузькозонний. Такі наносистеми називають антиточками (Rahimi, 2021; Holovatsky, 2013), в них квазічастинки локалізовані в оболонці. Багато теоретичних і експериментальних робіт, виконаних в останні роки, стосуються вивчення оптичних властивостей КТ типу II, в яких величини заборонених зон близькі між собою, але їх краї зміщені один відносно одного (Reiss, 2009; Klenovský, 2017; Naifar, 2017; Saravanamoorthy, 2017).

У квантових точках типу II просторове розділення квазічастинок у різних потенційних ямах призводить до меншої ефективної забороненої зони, ніж у кожного зі складових матеріалів ядра та оболонки, внаслідок чого відбувається значний червоний зсув довжини хвилі випромінювання нанокристалу.

Такі особливості КТ типу II пропонують використовувати в широкому спектрі застосувань, таких як світловипромінювальні діоди, детектори, флуоресцентні мітки та фотоелектричні пристрої (Jiao, 2015; Ma, 2013; Long, 2019; Verma, 2013; Nandan, 2019; Selopal, 2020).

Ще однією особливістю КТ типу II є швидке

розділення зарядів, утворених поглинанням фотонів на межі розділу ядро-оболонка, де хвильові функції квазічастинок перекриваються. Це можна використовувати в сонячних елементах для просторового розділення носіїв заряду та зменшення ймовірності рекомбінації електронно-діркових пар, що підвищує ефективність відведення заряду в фотоелектричних пристроях у зовнішній контур.

Багато теоретичних і експериментальних робіт, виконаних в останні роки, стосуються дослідження оптичних властивостей КТ типу II для використання в біомедичних і фотоелектричних пристроях (Кош, 2019; Tyrrell, 2011). В цих роботах показано, що енергія зв'язку електрона та дірки, перекриття хвильових функцій квазічастинок, час життя, довжина хвилі поглинання та сила осцилятора квантового переходу сильно залежать від геометричних розмірів та потенціального профілю квантових точок ядро-оболонка. Переважна більшість досліджень квантових точок типу II виконується із застосуванням наближення ефективної маси в рамках одно- та багатозонних моделей. Дослідження квантових точок CdTe/CdSe і CdSe/CdTe (Tyrrell, 2011) показало, що деякі з квантових переходів, які заборонені в однозонній моделі, стають дозволеними при врахуванні s-d змішування у валентній зоні. Подібний результат отриманий при дослідженні впливу електричного поля на електронні стани в сферичних квантових точках II типу CdSe/ZnTe та ZnTe/CdSe, які виконані варіаційним та матричним методами (Chafai, 2017, 2018; Holovatsky, 2022). Показано, що зменшення перекриття хвильових функцій квазічастинок внаслідок дії електричного поля приводить до зменшення сил осцилятора дозволених квантових переходів, але через порушення сферичної симетрії сила осцилятора заборонених для сферично симетричних систем квантових переходів зростає зі збільшенням напруженості електричного поля.

Дослідження впливу магнітного поля на енергетичний спектр квазічастинок в багатозонних квантових точках показало, що внаслідок порушення сферичної симетрії відбувається розщеплення енергетичних рівнів квазічастинок і роль основного стану квазічастинки, локалізованої в сферичній оболонці, послідовно відіграють стани з від'ємними зна-

ченнями магнітного квантового числа (Nasri, 2016; Çakır, 2016; Feddi, 2017; Holovatsky, 2016, 2017; Chubrei, 2021). Ефект послідовної заміни основного стану квазічастинки зі збільшенням магнітного поля називають ефектом Ааронова – Бома (А–Б), він вперше експериментально спостерігався за допомогою ємнісної спектроскопії далекого інфрачервоного діапазону для самоорганізованих квантових кілець (Lorke, 2000).

Очікується, що подібні спектральні осциляції можуть спостерігатися в енергії рекомбінації електрона та дірки при збільшенні індукції магнітного поля. Для цього необхідне просторове розділення електронів і дірок, інакше сумарний заряд пари електрон-дірка дорівнює нулю і ефект А–Б спостерігатися не буде.

У багатошарових квантових точках типу I, які складаються з двох потенційних ям, просторове розділення електронів і дірок може бути досягнуто за рахунок локалізації квазічастинок у різних потенціальних ямах, які розділені бар'єром. Але через мале перекриття хвильових функцій електронів і дірок важко спостерігати коливання А–Б в спектрах міжзонного поглинання.

У квантових точках типу II просторове розділення зарядів забезпечується різним положенням ям для електронів і дірок, які не розділені потенційним бар'єром, і тому перекриття хвильових функцій достатнє для експериментального спостереження ефекту А–Б більше, ніж у багатошарових квантових точках типу I.

Ефект А–Б у вертикально розташованих квантових точках типу II ZnTe/ZnSe циліндричної форми досліджувався в роботах (Kuskovsky, 2017; Sellers, 2008), а також у наноструктурах типу КТ в кільці (QD on ring) (Yao, 2017). Автори підтверджують, що екситони у таких наноструктурах демонструють А–Б осциляції інтенсивності випромінювання при збільшенні магнітного поля.

Подібних досліджень впливу магнітного поля на основний та збуджені стани квазічастинок в квантових точках типу II сферичної симетрії на даний час не виконувалося. Тому метою даної роботи є дослідження можливості спостереження ефекту Ааронова–Бома в таких наноструктурах.

У даній роботі представлено дослідження впливу магнітного поля на енергетичний спектр сферичної квантової точки типу II ZnTe/CdSe,

в якій електрон локалізований в оболонці і його енергетичний спектр відчуває А–Б осциляції, а також на енергію спектр інверсної квантової точки CdSe/ZnTe, в якій відбуваються осциляції енергії основного стану дірки.

Дослідження виконуються двома методами: матричним методом на основі базису точних розв'язків рівняння Шредінгера у відсутності магнітного поля та прямим числовим методом розв'язку диференціального рівняння в системі COMSOL Multiphysics.

1. Рівняння Шредінгера та його розв'язок матричним методом

Досліджуються сферичні напівпровідникові КТ типу II: ZnTe/CdSe та CdSe/ZnTe. Для дослідження впливу магнітного поля на енергетичний спектр і хвильові функції електронів і дірок розв'язуються відповідні одночастинкові рівняння Шредінгера

$$H_{e(h)} \Psi_{jm}^{e(h)}(\vec{r}) = E_{jm}^{e(h)} \Psi_{jm}^{e(h)}(\vec{r}), \quad (1)$$

Гамільтоніан $H_{e(h)}$ має вигляд

$$H_{e(h)} = \left(\vec{p} - \frac{e}{c} \vec{A} \right) \frac{1}{2\mu_{e(h)}(r)} \left(\vec{p} - \frac{e}{c} \vec{A} \right) + U_{e(h)}(r), \quad (2)$$

де \vec{A} – векторний потенціал, $U_{e(h)}(r)$ – потенціал розмірного квантування і залежність ефективних мас $\mu_{e(h)}(r)$ для КТ CdSe/ZnTe мають вигляд

$$U_e(r) = \begin{cases} 0, & r \leq r_0 \\ V_e, & r_0 < r \leq r_1 \\ \infty, & r > r_1 \end{cases}, \quad U_h(r) = \begin{cases} V_h, & r \leq r_0 \\ 0, & r_0 < r \leq r_1 \\ \infty, & r > r_1 \end{cases}, \quad (3)$$

$$\mu_{e(h)}(r) = \begin{cases} m_0^{e(h)}, & r \leq r_0 \\ m_1^{e(h)}, & r_0 < r \leq r_1 \end{cases}. \quad (4)$$

Для КТ ZnTe/CdSe в формулі (3) і (4) необхідно переставити індекси e і h .

Враховуючи зв'язок між векторним потенціалом \vec{A} та індукцією магнітного поля \vec{B} при симетричному калібруванні $\vec{A} = [\vec{r} \times \vec{B}] / 2$, гамільтоніан (2) матиме вигляд:

$$H_{e(h)} = -\frac{\hbar^2}{2} \vec{\nabla} \frac{1}{\mu_{e(h)}(r)} \vec{\nabla} + \frac{eB}{2c\mu_{e(h)}(r)} L_z + \frac{e^2 B^2 r^2 \sin^2 \theta}{8c^2 \mu_{e(h)}(r)} + U_{e(h)}(r), \quad (5)$$

Щоб розв'язати рівняння (5), хвильові функції розкладають по повному набору точних розв'язків рівняння Шредінгера для електрона в тій самій КТ без магнітного поля

$$\Psi_{jm}^{e(h)}(\vec{r}) = \sum_n \sum_l c_{jnml}^{e(h)} \Phi_{nlm}^{e(h)}(\vec{r}). \quad (6)$$

Завдяки сферичній симетрії задачі хвильова функція електрона у відсутності магнітного

поля має вигляд $\Phi_{nlm}^{e(h)}(\vec{r}) = R_{nl}^{e(h)}(r) Y_{lm}(\theta, \phi)$, де $Y_{lm}(\theta, \phi)$, – сферична функція, радіальна частина $R_{nl}^{e(h)}(r)$ є лінійною комбінацією функцій Бесселя першого та другого роду j_l, n_l для QD ядра та оболонки. З урахуванням великої ширини забороненої зони зовнішнього середовища отримуємо $R_{nl}^{e(h)(1)}(r_1) = 0$. Енергетичні спектри електронів і дірок $\tilde{E}_{nl}^{e(h)}$ знаходяться з граничної умови Бен-Даніель-Дюка

$$\left. \begin{aligned} R_{nl}^{e,h(0)}(r_0) &= R_{nl}^{e,h(1)}(r_0) \\ \frac{1}{m_0} \frac{dR_{nl}^{e,h(0)}(r)}{dr} \Big|_{r=r_0} &= \frac{1}{m_1} \frac{dR_{nl}^{e,h(1)}(r)}{dr} \Big|_{r=r_0} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Рівняння Шредінгера (1) після підстановки розкладу (6) зведеться до секулярного рівняння, з якого методом діагоналізації отримуються перенормований енергетичний спектр $E_{jm}^{e(h)}$ та коефіцієнти розкладу $c_{jnlm}^{e(h)}$. Нові електронні та діркові стани характеризуються двома квантовими числами j і m . Тут j позначає номер енергетичного рівня при фіксованому m .

Енергія міжзонного переходу визначається як

$$E_{e-h} = E_g^* + E_i^e + E_f^h - E_{ex}^b \quad (8)$$

де $E_g^* = E_g^{CdSe} - V_h = E_g^{ZnTe} - V_e$ – ефективна заборонена зона, тобто різниця енергій між дном зони провідності CdSe та стелею валентної зони ZnTe (рис. 1), E_{ex}^b – енергія кулонівської взаємодії електрона та дірки. Кулонівський доданок розраховано в першому порядку теорії збурень

$$E_{ex}^b = \frac{2}{\varepsilon} \iint \frac{|\Psi_{if}^{ex}(\vec{r}_e, \vec{r}_h)|^2}{|\vec{r}_e - \vec{r}_h|} d\vec{r}_e d\vec{r}_h, \quad (9)$$

де $\Psi_{if}^{ex}(\vec{r}_e, \vec{r}_h) = \Psi_i^e(\vec{r}_e) \Psi_f^h(\vec{r}_h)$, $\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_{CdSe} \varepsilon_{ZnTe}}$ – середня діелектрична проникність. За одиницю енергії та довжини прийнято Рідберг та радіус Бора відповідно.

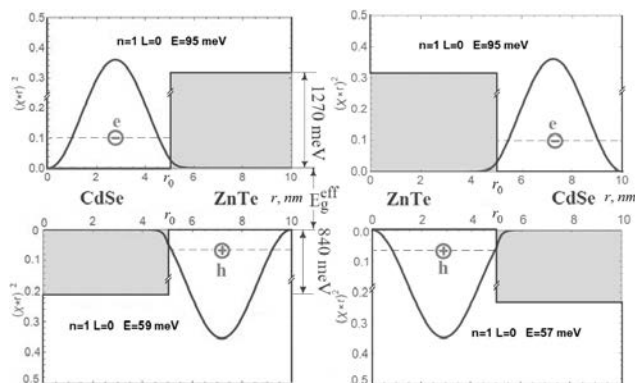


Рис. 1. Схема потенціальних енергій електрона та дірки в КТ CdSe/ZnTe та ZnTe/CdSe II типу.

На основі хвильових функцій квазічастинок (6) та енергій квантових переходів, можна розрахувати коефіцієнт оптичного поглинання КТ (Sahin, 2009)

$$\alpha(\hbar\omega) \propto \sum_i F_i \delta_i(\hbar\omega - E_{e-h}^i), \quad (10)$$

де F_i – сила осцилятора міжзонного квантового переходу (Cheche, 2013; Wu, 2018)

$$F = \frac{E_p}{2E_{e-h}} \left| \int_V \Psi_j^{e*}(\vec{r}) \Psi_{j'}^h(\vec{r}) d\vec{r} \right|^2, \quad (11)$$

$E_p = 21$ eV для CdSe (Sahin, 2009) та 19.1 eV для ZnTe (Cheche, 2013).

2. Результати розрахунків

Комп'ютерні розрахунки були виконані для наноструктури CdSe/ZnTe та ZnTe/CdSe з наступними фізичними параметрами (Chafai, 2017):

CdSe: $m_e = 0.13$, $m_h = 0.45$, $E_g = 1.75 eV$, $\varepsilon_{CdSe} = 10.6$;

ZnTe: $m_e = 0.15$, $m_h = 0.2$, $E_g = 2.2 eV$, $\varepsilon_{ZnTe} = 9.7$;

$r_0 = 10 \div 20$ nm, $r_1 - r_0 = 5$ nm, $V_e = 1270$ meV,

$V_h = 840$ meV.

Розрахунки енергій та хвильових функцій виконувались двома методами: методом розкладу (6) та в системі COMSOL. В розкладі (6) врахо-

Таблиця 1

Порівняння енергій електрона E_{10}^e та E_{20}^e , отриманих методом розкладу та в системі COMSOL при різних величинах магнітного поля

		B=0	B=5Тл	B=10Тл	B=15Тл	B=20Тл	B=25Тл	B=30Тл
Метод розкладу	$\overline{E_{10}^e}$	94.925	95.490	97.038	99.098	101.17	103.13	105.07
	$\overline{E_{20}^e}$	96.914	97.254	98.217	99.647	101.37	103.29	105.37
COMSOL	$\overline{E_{10}^e}$	94.989	95.804	97.925	100.46	102.84	105.12	107.38
	$\overline{E_{20}^e}$	96,980	97.473	98.8293	100.74	102.90	105.14	107.38

увалось близько 15 доданків, що забезпечило точність розрахунку біля 1% при магнітному полі $B < 15\text{Тл}$ та близько 2% при $B = 30\text{Тл}$. Для демонстрації збіжності результатів, отриманих різними методами в таблиці 1 наведено енергії станів електрона E_{10}^e та E_{20}^e в КТ ZnTe/CdSe ($r_0 = 15\text{nm}$, $r_1 - r_0 = 5\text{nm}$) при різних значеннях B .

На рис. 2 наведено залежності енергій електронів і дірок у КТ CdSe/ZnTe і ZnTe/CdSe від індукції магнітного поля. З рисунка видно, що магнітне поле знімає виродження за магнітним квантовим числом. Наприклад, для першого збудженого стану m може приймати три значення 1, 0, -1. Крім того, енергії квазічастинок в станах з $m > 0$ монотонно зростають зі збільшенням магнітного поля, тоді як для станів з $m < 0$ немонотонна залежність енергії від магнітного поля зумовлена конкуренцією лінійного та квадратичного доданків за магнітним полем в гамільтоніані (5). Для квазічастинки, що локалізована в оболонці (електрон у КТ ZnTe/CdSe чи дірка в КТ CdSe/ZnTe) основний стан формується зі станів з різним значенням значення $|m|$. Це відбувається внаслідок того, що енергія квазічастинок в станах з більшим

значенням $|m|$ досягає мінімального значення при вищих величинах індукції магнітного поля. Причому зміна величини магнітного квантового числа для основного стану квазічастинки відбувається при збільшенні магнітного поля на однакову величину $|\Delta B|$, яка залежить від геометричних розмірів наноструктури та наявності домішок (Holovatsky, 2018).

На рис. 3 показано еволюцію розподілу густини ймовірності знаходження електрона в КТ ZnTe/CdSe ($r_0 = 15\text{nm}$, $r_1 = 20\text{nm}$) під дією магнітного поля (магнітне поле прикладено вертикально вгору). Враховуючи те, що розподіл електронної густини в КТ симетричний, на рисунку зображено лише половину КТ.

З рисунка видно, що хвильова функція електрона в станах з $m=0, -1, -2, -3$ в області величин індукції магнітного поля, в яких енергія електрона найменша має подібний вигляд. Тобто хвильова функція основного стану електрона мало змінюється зі зміною магнітного поля. Внаслідок цього і енергія основного стану слабо зростає зі збільшенням величини індукції магнітного поля, але через зміну магнітного квантового числа здійснює незначні осциляції.

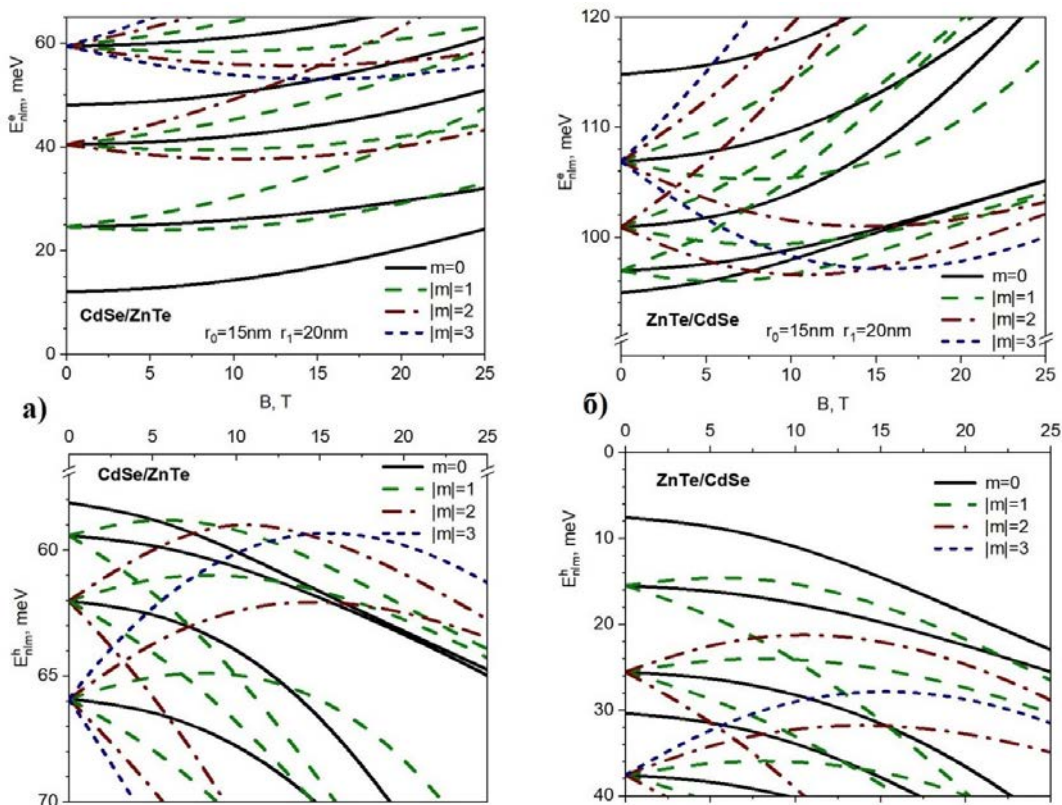


Рис. 2. Залежності енергій електронів та дірок у КТ CdSe/ZnTe (а) та ZnTe/CdSe (б) від індукції магнітного поля ($r_0 = 15\text{ нм}$, $r_1 - r_0 = 5\text{ нм}$)

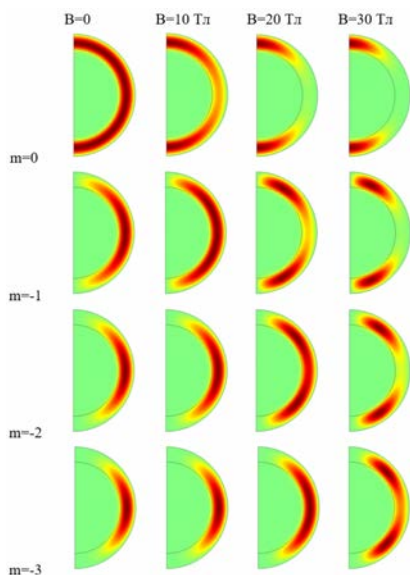


Рис. 3. Еволюція розподілу електронної густини $|\Psi_{jm}^{(e)}(\vec{r})|^2$ в станах ($j=1, m=0;-1;-2;-3$) для КТ ZnTe/CdSe під дією магнітного поля ($B=0; 10; 20; 30$ Тл)

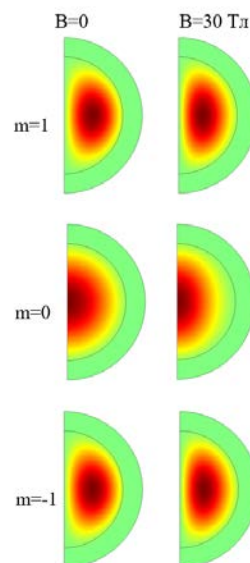


Рис. 4. Еволюція розподілу густини розподілу дірки $|\Psi_{jm}^{(h)}(\vec{r})|^2$ в станах ($j=1, m=1;0;-1$) для КТ ZnTe/CdSe під дією магнітного поля ($B=0; 30$ Тл).

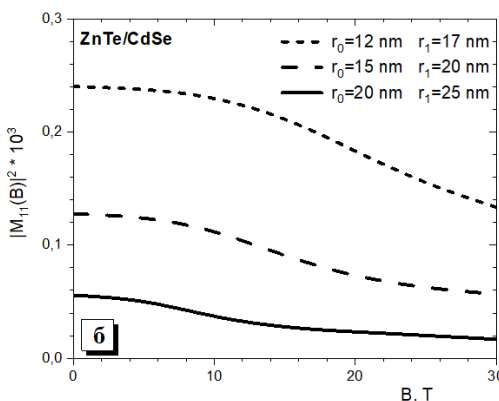
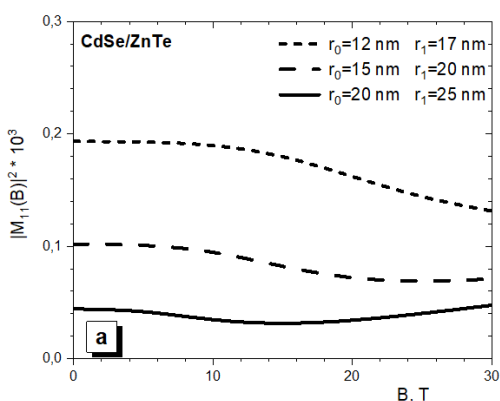


Рис. 5. Залежність $|M_{10,10}|^2$ від індукції магнітного поля для КТ CdSe/ZnTe (а) та ZnTe/CdSe (б) з різним радіусом ядра ($r_0=10, 12, 15$ нм, $r_1-r_0=5$ нм)

На рис. 4 зображено розподіл густини ймовірності знаходження дірки в КТ ZnTe/CdSe в трьох станах $m=1,0,-1$ без магнітного поля та при $B=30$ Тл.

Як видно з рисунка магнітне поле менше впливає на квазічастинку, що локалізована в ядрі квантової точки. Магнітне поле деформує розподіл густини електронів і дірок у КТ таким чином, що кутова ймовірність зростає поблизу $\theta=0$, а зменшується біля $\theta=\pi/2$. Хвильова функція $1s$ стану електрона, локалізованого в оболонці, характеризується

найбільшою деформацією і вже при магнітному полі 5 Тл енергія електрона зростає так, що цей стан перестає бути основним. Під дією магнітного поля його вигляд наближається до форми наступного збудженого стану ($j=2, m=0$), який утворений зі $1p$ стану. Тому енергії цих двох станів при збільшенні магнітного поля зближуються.

Поведінка хвильових функцій Ψ_{10}^e та Ψ_{10}^h під дією магнітного поля (рис. 3–4) відбивається на їх перекритті на гетеромезі ядро-оболонка. На рис. 5 наведено залежності $|M_{10,10}|^2$ від маг-

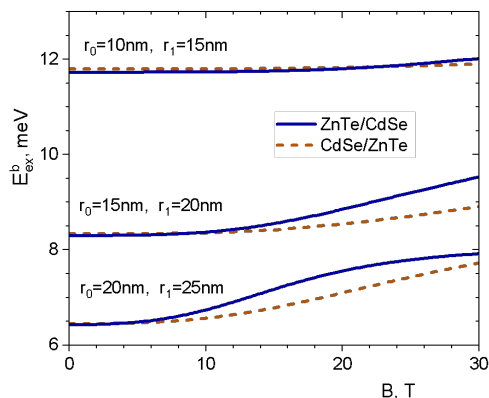


Рис. 6. Залежність $E_{ex}^b(B)$ для КТ ZnTe/CdSe (суцільні лінії) та CdSe/ZnTe (штрихові лінії) з різним радіусом ядра ($r_0=10, 12, 15$ нм, $r_1-r_0=5$ нм)

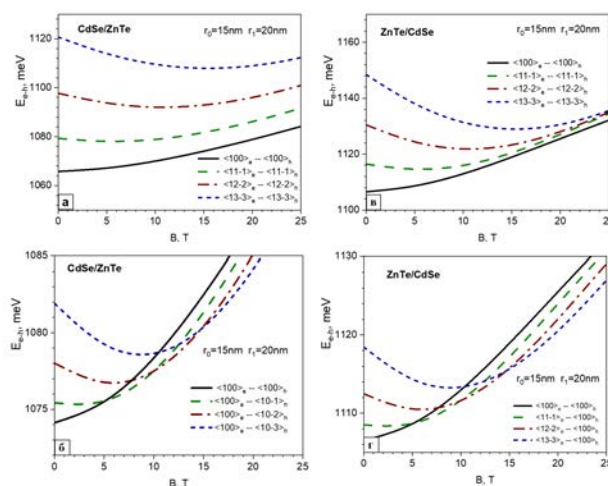


Рис. 7. Залежність енергій міжзонних переходів від індукції магнітного поля $E_{e-h}(B)$ для КТ CdSe/ZnTe (а, б) та ZnTe/CdSe (в, г).

нітного поля для КТ CdSe/ZnTe та ZnTe/CdSe з різними розмірами ядра. Залежності $|M_{10,10}|^2$ від магнітного поля мають різний характер при різних розмірах ядра КТ. Це пов'язано з конкуруючим впливом різних факторів: зменшення перекриття хвильових функцій у напрямку, перпендикулярному до індукції магнітного поля, і збільшення перекриття в напрямку, паралельному магнітному полю. Перекриття хвильових функцій найнижчих станів квазічастинок мале при великих розмірах ядра квантової точки, але під впливом магнітного поля воно зростає. На рис. 6 видно, що енергія електронно-діркової взаємодії також зростає зі збільшенням магнітного поля.

Щоб оцінити можливість спостереження А-Б осциляцій в спектрах міжзонного поглинання, розглянемо залежність енергій міжзонних квантових переходів, тобто квантових переходів між різними станами електрона і дірки, які наведені на рис. 7.

З рисунків 7а та 7б видно, що енергії квантових переходів з $\Delta m = 0$, які, дозволені правилами відбору, не мають А-Б осциляцій. Квантові переходи між основним станом квазічастинки, локалізованої в ядрі, і станами $m = 0, -1, -2, -3, \dots$ квазічастинки, локалізованої в оболонці, демонструють коливання А-Б (рис. 6в, рис. 6г). Хоча останні переходи в дипольному наближенні заборонені правилами відбору кутового моменту, але це справедливо лише для ситуації ідеальної обертальної симетрії та низьких температур

(Gambaryan, 2017). Реальні КТ завжди мають дефекти і не мають ідеальної симетрії, тому осциляції Ааронова-Бома можуть спостерігатись в реальних експериментальних умовах.

Висновки. В роботі виконано теоретичні дослідження впливу магнітного поля на енергетичні рівні в сферичних КТ ядро-оболонка типу II в рамках в наближення ефективної маси. Для знаходження енергетичних рівнів та хвильових функцій електрона і дірки використано метод розкладу хвильової функції на базисі точних розв'язків рівняння Шредінгера без магнітного поля а також числовий метод кінцевих різниць в системі COMSOL Multiphysics.

Показано, що магнітне поле знімає виродження за магнітним квантовим числом для обох квазічастинок, але для квазічастинки, що локалізована в оболонці енергія основного стану містить осциляції Ааронова – Бома. В енергіях дозволених правилами відбору в дипольному наближенні міжзонних квантових переходах осциляції А-Б відсутні. Але такі осциляції можливі у квантових переходах зі зміною магнітного квантового числа.

Отже, в реальних експериментальних умовах за відсутності ідеальної симетрії наноструктури в низькоенергетичній частині спектра виникатимуть лінії поглинання, які утворюються за участю квазічастинкових станів з різними значеннями магнітного квантового числа. Отримані результати будуть корисні для розуміння оптичних і магнітних властивостей КТ ядро-оболонка типу II.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Nizamoglu S., Demir H. V. Onion-like (CdSe)ZnS/CdSe/ZnS quantum-dot-quantum-well heteronanocrystals for investigation of multi-color emission. *Optics Express*. 2008. Vol. 16. № 6. P. 3515.
2. Nizamoglu S., Mutlugun E., Özel T., Demir H. V., Sapra, S., Gaponik N., Eychmüller A. Dual-color emitting quantum-dot-quantum-well CdSe-ZnS heteronanocrystals hybridized on InGaNGaN light emitting diodes for high-quality white light generation. *Applied Physics Letters*. 2008. Vol. 92. № 11. P. 1–3.
3. Zhang W., Chen G., Wang J., Ye B. C., Zhong X. Design and synthesis of highly luminescent near-infrared-emitting water-soluble CdTe/CdSe/ZnS Core/Shell/Shell quantum dots Type II. *Inorganic Chemistry*. 2009. Vol. 48. № 20. P. 9723–9731.
4. Tyagi P., Kambhampati P. Independent control of electron and hole localization in core/barrier/shell nanostructures. *Journal of Phys. Chemistry C*. 2012. Vol. 116. № 14. P. 8154–8160.
5. Корбутяк Д.В., Коваленко О.В., Будзуляк С.І., Калитчук С.М., Купчак І. М. Світловипромінюючі властивості квантових точок напівпровідникових сполук АІІВІ. *Український Фізичний Журнал*. 2012. Т. 7. № 1. С. 48–95.
6. Pidluzhna A., Ivaniuk K., Stakhira P., Hotra Z., Chapran M., Ulanski J., Tynkevych O., Khalavka Y., Baryshnikov G. V., Minaev B. F., Ågren H. Multi-channel electroluminescence of CdTe/CdS core-shell quantum dots implemented into a QLED device. *Dyes and Pigments*. 2019. Vol. 162. P. 647–653.
7. Doskaliuk N., Khalavka Y., Fochuk P. Influence of the Shell Thickness and Ratio Between Core Elements on Photostability of the CdTe/CdS Core/Shell Quantum Dots Embedded in a Polymer Matrix. *Nanoscale Research Letters*. 2016. Vol. 11. № 1. P. 216.
8. Wang L., Nonaka K., Okuhata T., Katayama T., Tamai N. Quasi-Type II Carrier Distribution in CdSe/CdS Core/Shell Quantum Dots with Type I Band Alignment. *Journal of Physical Chemistry C*. 2018. Vol. 122. № 22. P. 2038–2046.
9. AbouElhamd A. R., Al-Sallal K. A., Hassan A. Review of core/shell quantum dots technology integrated into building's glazing. *Energies*. 2019. Vol. 12. № 6. P. 1058.
10. Rahimi F., Ghaffary T., Naimi Y., Khajehazad H. Optical and Quantum Electronics Effect of magnetic field on energy states and optical properties of quantum dots and quantum antidots. *Optical and Quantum Electronics*. 2021. Vol. 53. № 1. P. 47.
11. Holovatsky V. A., Frankiv I. B. Oscillator strength of quantum transition in multi-shell quantum dots with impurity. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 2013. Vol. 15. № 1–2. P. 88.
12. Reiss P., Protière M., Li L. Core/shell semiconductor nanocrystals. *Small*. 2009. Vol. 5. № 2. P. 154–168.
13. Klenovský P., Steindl P., Geffroy D. Excitonic structure and pumping power dependent emission blue- shift of type-II quantum dots. *Scientific REPORTS*. 2017. Vol. 7. № 1. P. 45568.
14. Naifar A., Zeiri N., Nasrallah S. A. Ben Said, M. Optical properties of CdSe/ZnTe type II core shell nanostructures. *Optik*. 2017. Vol. 146. P. 90–97.
15. Saravanamoorthy S. N., John Peter A. Interband Optical Transition Energies in Type-II PbSe/PbS Core/Shell Quantum Dots. *Journal of Advanced Physics*. 2017. Vol. 6. № 1. P. 80–86.
16. Jiao S., Shen Q., Mora-Seró I., Wang J., Pan Z., Zhao K., Kuga Y., Zhong X., Bisquert J. Band engineering in core/shell ZnTe/CdSe for photovoltage and efficiency enhancement in exciplex quantum dot sensitized solar cells. *ACS Nano*. 2015. Vol. 9. № 1. P. 908–915.
17. Ma X., Mews A., Kipp T. Determination of electronic energy levels in type-II CdTe-core/CdSe-shell and CdSe-core/CdTe-shell nanocrystals by cyclic voltammetry and optical spectroscopy. *Journal of Physical Chemistry C*. 2013. Vol. 117. № 32. P. 16698–16708.
18. Long T., Cao J., Jiang Z. J. Predictable spectroscopic properties of type-II ZnTe/CdSe nanocrystals and electron/hole quenching. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2019. Vol. 21. № 10. P. 5824–5833.
19. Verma S., Kaniyankandy S., Ghosh H. N. Charge separation by indirect bandgap transitions in CdS/ZnSe type-II core/shell quantum dots. *Journal of Physical Chemistry C*. 2013. Vol. 117. № 21. P. 10901–10908.
20. Nandan Y., Mehata M. S. Wavefunction Engineering of Type-I/Type-II Excitons of CdSe/CdS Core-Shell Quantum Dots. *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. № 1. P. 1–11.
21. Selopal G. S., Zhao H., Wang Z. M., Rosei F. Core/Shell Quantum Dots Solar Cells. *Advanced Functional Materials*. 2020. Vol. 30. № 13. P. 1908762.
22. Koç F., Sahin M. The electronic and optical properties of an exciton, biexciton and charged excitons in CdSe/CdTe-based multi-shell type-II quantum dot nanocrystals. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. 2019. Vol. 125. № 10. P. 1–9.
23. Tyrrell E. J., Smith J. M. Effective mass modeling of excitons in type-II quantum dot heterostructures. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*. 2011. Vol. 84. № 16. P. 165328.
24. Holovatsky V. A., Chubrei M. V., Duque C. A. Core-shell type-II spherical quantum dot under externally applied electric field. *Thin Solid Films*. 2022. Vol. 747. P. 139142.

25. Chafai A., Dujardin F., Essaoudi I., Ainane A. Energy spectrum of an exciton in a CdSe/ZnTe type-II core/shell spherical quantum dot. *Superlattices and Microstructures*. 2017. Vol. 101. P. 40–48.
26. Chafai A., Essaoudi I., Ainane A., Dujardin F., Ahuja R. ZnTe/CdSe type-II core / shell spherical quantum dot under an external electric field. *Materials and Devices*. 2018. Vol. 3. № 1. P. 0504.
27. Nasri D., Bettahar N. Magneto-optical properties in inhomogeneous quantum dot: The Aharonov-Bohm oscillations effect. *Physica B: Condensed Matter*. 2016. Vol. 501. P. 68–73.
28. Çakır B., Atav Ü., Yakar Y., Özmen A. Calculation of Zeeman splitting and Zeeman transition energies of spherical quantum dot in uniform magnetic field. *Chemical Physics*. 2016. Vol. 475. P. 61–68.
29. Feddi E., Talbi A., Mora-Ramos M. E., El Haouari M., Dujardin F., Duque C. A. Linear and nonlinear magneto-optical properties of an off-center single dopant in a spherical core/shell quantum dot. *Physica B: Condensed Matter*. 2017. Vol. 524. P. 64.
30. Holovatsky V., Bernik I., Yakhnevych M. Effect of magnetic field on electron spectrum and probabilities of intraband quantum transitions in spherical quantum-dot-quantum-well. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*. 2016. Vol. 83. P. 256–262.
31. Holovatsky V. A., Bernik I. B., Yakhnevych M. Y. Effect of magnetic field on energy spectrum and localization of electron in CdS/HgS/CdS/HgS/CdS multilayered spherical nanostructure. *Physica B: Condensed Matter*. 2017. Vol. 508. P. 112–117.
32. Holovatsky V. A., Voitsekhivska O. M., Yakhnevych M. Y. The effect of magnetic field and donor impurity on electron spectrum in spherical core-shell quantum dot. *Superlattices and Microstructures*. 2018. Vol. 116. P. 9–16.
33. Chubrei M. V., Holovatsky V. A., Duque C. A. Effect of magnetic field on donor impurity-related photoionisation cross-section in multilayered quantum dot. *Philosophical Magazine*. 2021. Vol. 101. № 24. P. 2614–2633.
34. Lorke A., Johannes Luyken R., Govorov A. O., Kotthaus J. P., Garcia J. M., Petroff P. M. Spectroscopy of Nanoscopic Semiconductor Rings. *Physical Review Letters*. 2000. Vol. 84. № 10. P. 2223–2226.
35. Kuskovsky I. L., MacDonald W., Govorov A. O., Mourokh L., Wei X., Tamargo M. C., Tadic M., Peeters F. M. Optical Aharonov-Bohm effect in stacked type-II quantum dots. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*. 2007. Vol. 76. № 3. P. 1–15.
36. Kuskovsky I. L., Mourokh L. G., Roy B., Ji, H., Dhomkar S., Ludwig J., Smirnov D., Tamargo M. C. Decoherence in semiconductor nanostructures with type-II band alignment: All-optical measurements using Aharonov-Bohm excitons. *Physical Review B*. 2017. Vol. 95. № 16. P. 165445.
37. Sellers I. R., Whiteside V. R., Kuskovsky I. L., Govorov A. O., McCombe B. D. Aharonov-Bohm Excitons at Elevated Temperatures in Type-II Quantum Dots. *Physical Review Letters*. 2008. Vol. 100. № 13. P. 136405.
38. Sellers I. R., Whiteside V. R., Kuskovsky I. L., Govorov A. O., McCombe B. D. Modulation of the Aharonov – Bohm effect in type-II II – V ZnSe : Te quantum dots by a far-infrared laser. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*. 2008. Vol. 40. № 6. P. 1819–1823.
39. Yao Y., Elborg M., Kuroda T., Sakoda K. Excitonic Aharonov–Bohm effect in QD-on-ring nanostructures. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2017. Vol. 29. № 38. P. 385301.
40. Sahin M., Nizamoglu S., Kavruk A. E., Demir H. V. Self-consistent computation of electronic and optical properties of a single exciton in a spherical quantum dot via matrix diagonalization method. *Journal of Applied Physics*. 2009. Vol. 106. № 4. P. 5.
41. Cheche T. O., Barna V., Chang Y. C. Analytical approach for type-II semiconductor spherical core-shell quantum dots heterostructures with wide band gaps. *Superlattices and Microstructures*. (2013). Vol. 60. P. 475–486.
42. Wu S. Cheng L. Exciton diamagnetic shift and optical properties in CdSe nanocrystal quantum dots in magnetic fields. *Physica B: Condensed Matter*. 2018. Vol. 534. P. 98.
43. Gambaryan K. M., Aroutiounian V. M., Harutyunyan V. G. and Yeranyan L. S. Preface: International Conference on Recent Trends in Physics (ICRTP 2016). *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 829. 1.

REFERENCES

1. Nizamoglu, S., Demir, H. V. (2008). Onion-like (CdSe)ZnS/CdSe/ZnS quantum-dot-quantum-well heteronanocrystals for investigation of multi-color emission. *Optics Express*, 16(6), 3515. <https://doi.org/10.1364/oe.16.003515>
2. Nizamoglu, S., Mutlugun, E., Özel, T., Demir, H. V., Sapra, S., Gaponik, N., & Eychmüller, A. (2008). Dual-color emitting quantum-dot-quantum-well CdSe-ZnS heteronanocrystals hybridized on InGaNGaN light emitting diodes for high-quality white light generation. *Applied Physics Letters*, 92(11), 1–3. <https://doi.org/10.1063/1.2898892>
3. Zhang, W., Chen, G., Wang, J., Ye, B. C., & Zhong, X. (2009). Design and synthesis of highly luminescent near-infrared-emitting water-soluble CdTe/CdSe/ZnS Core/Shell/Shell quantum dots Type II. *Inorganic Chemistry*, 48(20), 9723–9731. <https://doi.org/10.1021/ic9010949>

4. Tyagi, P., Kambhampati, P. (2012). Independent control of electron and hole localization in core/barrier/shell nanostructures. *Journal of Physical Chemistry C*, 116(14), 8154–8160. <https://doi.org/10.1021/jp212158a>
5. Korbutyak D.V., Kovalenko O.V., Budzulyak S.I., Kalytchuk S.M., Kupchak I.M. (2012) Light-emitting properties of quantum dots of semiconductor compounds AIBVI. *Ukrainian Physical Journal*, 7(1), P.48–95.
6. Pidluzhna, A., Ivaniuk, K., Stakhira, P., Hotra, Z., Chapran, M., Ulanski, J., Tynkevych, O., Khalavka, Y., Baryshnikov, G. V., Minaev, B. F., & Ågren, H. (2019). Multi-channel electroluminescence of CdTe/CdS core-shell quantum dots implemented into a QLED device. *Dyes and Pigments*, 162(October 2018), 647–653. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2018.10.074>
7. Doskaliuk, N., Khalavka, Y., & Fochuk, P. (2016). Influence of the Shell Thickness and Ratio Between Core Elements on Photostability of the CdTe/CdS Core/Shell Quantum Dots Embedded in a Polymer Matrix. *Nanoscale Research Letters*, 11(1), 216. <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1428-3>
8. Wang, L., Nonaka, K., Okuhata, T., Katayama, T., & Tamai, N. (2018). Quasi-Type II Carrier Distribution in CdSe/CdS Core/Shell Quantum Dots with Type I Band Alignment. *Journal of Physical Chemistry C*, 122(22), 12038–12046. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b11684>
9. AbouElhamd, A. R., Al-Sallal, K. A., & Hassan, A. (2019). Review of core/shell quantum dots technology integrated into building's glazing. *Energies*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/en12061058>
10. Rahimi, F., Ghaffary, T., Naimi, Y., Khajehazad, H. (2021). Optical and Quantum Electronics Effect of magnetic field on energy states and optical properties of quantum dots and quantum antidots. *Optical and Quantum Electronics*, 53(47).
11. Holovatsky, V. A., & Frankiv, I. B. (2013). Oscillator strength of quantum transition in multi-shell quantum dots with impurity. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 15(1–2).
12. Reiss, P., Protière, M., & Li, L. (2009). Core/shell semiconductor nanocrystals. *Small*, 5(2), 154–168. <https://doi.org/10.1002/smll.200800841>
13. Klenovský, P., Steindl, P., & Geffroy, D. (2017). Excitonic structure and pumping power dependent emission blue-shift of type-II quantum dots. *Scientific REPORTS* |, 1–10. <https://doi.org/10.1038/srep45568>
14. Naifar, A., Zeiri, N., Nasrallah, S. A. Ben, & Said, M. (2017). Optical properties of CdSe/ZnTe type II core shell nanostructures. *Optik*, 146, 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.08.079>
15. Saravanamoorthy, S. N., & John Peter, A. (2017). Interband Optical Transition Energies in Type-II PbSe/PbS Core/Shell Quantum Dots. *Journal of Advanced Physics*, 6(1), 80–86. <https://doi.org/10.1166/jap.2017.1297>
16. Jiao, S., Shen, Q., Mora-Seró, I., Wang, J., Pan, Z., Zhao, K., Kuga, Y., Zhong, X., & Bisquert, J. (2015). Band engineering in core/shell ZnTe/CdSe for photovoltage and efficiency enhancement in exciplex quantum dot sensitized solar cells. *ACS Nano*, 9(1), 908–915. <https://doi.org/10.1021/nn506638n>
17. Ma, X., Mews, A., & Kipp, T. (2013). Determination of electronic energy levels in type-II CdTe-core/CdSe-shell and CdSe-core/CdTe-shell nanocrystals by cyclic voltammetry and optical spectroscopy. *Journal of Physical Chemistry C*, 117(32), 16698–16708. <https://doi.org/10.1021/jp404556b>
18. Long, T., Cao, J., & Jiang, Z. J. (2019). Predictable spectroscopic properties of type-II ZnTe/CdSe nanocrystals and electron/hole quenching. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 21(10), 5824–5833. <https://doi.org/10.1039/c9cp00026g>
19. Verma, S., Kaniyankandy, S., & Ghosh, H. N. (2013). Charge separation by indirect bandgap transitions in CdS/ZnSe type-II core/shell quantum dots. *Journal of Physical Chemistry C*, 117(21), 10901–10908. <https://doi.org/10.1021/jp400014j>
20. Nandan, Y., & Mehata, M. S. (2019). Wavefunction Engineering of Type-I/Type-II Excitons of CdSe/CdS Core-Shell Quantum Dots. *Scientific Reports*, 9(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37676-3>
21. Selopal, G. S., Zhao, H., Wang, Z. M., & Rosei, F. (2020). Core/Shell Quantum Dots Solar Cells. *Advanced Functional Materials*, 30(13), 1908762. <https://doi.org/10.1002/adfm.201908762>
22. Koç, F., Sahin, M. (2019). The electronic and optical properties of an exciton, biexciton and charged excitons in CdSe/CdTe-based multi-shell type-II quantum dot nanocrystals. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 125(10), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s00339-019-3000-3>
23. Tyrrell, E. J., & Smith, J. M. (2011). Effective mass modeling of excitons in type-II quantum dot heterostructures. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 84(16). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.84.165328>
24. Holovatsky, V. A., Chubrei, M. V, Duque, C. A. (2022). Core-shell type-II spherical quantum dot under externally applied electric field. *Thin Solid Films*, 139142. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2022.139142>
25. Chafai, A., Dujardin, F., Essaoudi, I., Ainane, A. (2017). Energy spectrum of an exciton in a CdSe/ZnTe type-II core/shell spherical quantum dot. *Superlattices and Microstructures*, 101, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2016.11.017>
26. Chafai, A., Essaoudi, I., Ainane, A., Dujardin, F., Ahuja, R. (2018). ZnTe/CdSe type-II core / shell spherical quantum dot under an external electric field. *Materials and Devices*, 3(1), 0504. <https://doi.org/10.23647/ca.md20180504>
27. Nasri, D., & Bettahar, N. (2016). Magneto-optical properties in inhomogeneous quantum dot: The Aharonov-Bohm oscillations effect. *Physica B: Condensed Matter*, 501, 68–73. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2016.08.019>

28. Çakır, B., Atav, Ü., Yakar, Y., & Özmen, A. (2016). Calculation of Zeeman splitting and Zeeman transition energies of spherical quantum dot in uniform magnetic field. *Chemical Physics*, 475, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2016.06.010>
29. Feddi, E., Talbi, A., Mora-Ramos, M. E., El Haouari, M., Dujardin, F., Duque, C. A. (2017). Linear and nonlinear magneto-optical properties of an off-center single dopant in a spherical core/shell quantum dot. *Physica B: Condensed Matter*, 524, 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2017.08.057>
30. Holovatsky, V., Bernik, I., & Yakhnevych, M. (2016). Effect of magnetic field on electron spectrum and probabilities of intraband quantum transitions in spherical quantum-dot-quantum-well. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 83, 256–262. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2016.04.035>
31. Holovatsky, V. A., Bernik, I. B., & Yakhnevych, M. Y. (2017). Effect of magnetic field on energy spectrum and localization of electron in CdS/HgS/CdS/HgS/CdS multilayered spherical nanostructure. *Physica B: Condensed Matter*, 508, 112–117. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2016.12.024>
32. Holovatsky, V. A., Voitsekhivska, O. M., & Yakhnevych, M. Y. (2018). The effect of magnetic field and donor impurity on electron spectrum in spherical core-shell quantum dot. *Superlattices and Microstructures*, 116, 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2018.02.006>
33. Chubrei, M. V., Holovatsky, V. A., Duque, C. A. (2021). Effect of magnetic field on donor impurity-related photoionisation cross-section in multilayered quantum dot. *Philosophical Magazine*, 101(24), 2614–2633. <https://doi.org/10.1080/14786435.2021.1979267>
34. Lorke, A., Johannes Luyken, R., Govorov, A. O., Kotthaus, J. P., Garcia, J. M., & Petroff, P. M. (2000). Spectroscopy of Nanoscopic Semiconductor Rings. *Physical Review Letters*, 84(10), 2223–2226. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.2223>
35. Kuskovsky, I. L., MacDonald, W., Govorov, A. O., Mourokh, L., Wei, X., Tamargo, M. C., Tadic, M., & Peeters, F. M. (2007). Optical Aharonov-Bohm effect in stacked type-II quantum dots. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 76(3), 1–15. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.76.035342>
36. Kuskovsky, I. L., Mourokh, L. G., Roy, B., Ji, H., Dhomkar, S., Ludwig, J., Smirnov, D., & Tamargo, M. C. (2017). Decoherence in semiconductor nanostructures with type-II band alignment: All-optical measurements using Aharonov-Bohm excitons. *Physical Review B*, 95(16), 165445. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.95.165445>
37. Sellers, I. R., Whiteside, V. R., Kuskovsky, I. L., Govorov, A. O., & McCombe, B. D. (2008). Aharonov-Bohm Excitons at Elevated Temperatures in Type-II ZnTe = ZnSe Quantum Dots. 136405(April), 2–5. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.136405>
38. Sellers, I. R., Whiteside, V. R., Kuskovsky, I. L., Govorov, A. O., & McCombe, B. D. (2008). Modulation of the Aharonov – Bohm effect in type-II II – V ZnSe : Te quantum dots by a far-infrared laser. 40, 1819–1823. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2007.10.049>
39. Yao, Y., Elborg, M., Kuroda, T., & Sakoda, K. (2017). Excitonic Aharonov–Bohm effect in QD-on-ring nanostructures. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 29(38), 385301. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/aa7c90>
40. Sahin, M., Nizamoglu, S., Kavruk, A. E., & Demir, H. V. (2009). Self-consistent computation of electronic and optical properties of a single exciton in a spherical quantum dot via matrix diagonalization method. *Journal of Applied Physics*, 106(4), 0–5. <https://doi.org/10.1063/1.3197034>
41. Cheche, T. O., Barna, V., & Chang, Y. C. (2013). Analytical approach for type-II semiconductor spherical core-shell quantum dots heterostructures with wide band gaps. *Superlattices and Microstructures*, 60, 475–486. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2013.05.027>
42. Wu, S., & Cheng, L. (2018). Exciton diamagnetic shift and optical properties in CdSe nanocrystal quantum dots in magnetic fields. *Physica B: Condensed Matter*, 534(December 2017), 98–104. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2018.01.034>
43. Gambaryan K. M. , Aroutiounian V. M. , Harutyunyan V. G. and Yeranyan L. S. (2017). Preface: International Conference on Recent Trends in Physics (IC RTP 2016). *Journal of Physics: Conference Series*, 829(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/829/1/012021>

УДК 621.315.592

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2023-3-4>

Оксана ЗАМУРУЄВА

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А. В. Свідзинського, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0003-0032-0613

SCOPUS-AUTHOR ID: 56181742100

Віктор НАХОД

аспірант кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А.В. Свідзинського, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

SCOPUS-AUTHOR ID: 57759051000

Бібліографічний опис статті: Замуруєва, О., Наход, В. (2023) Аналіз створення матеріальної моделі складних процесів формування гетероструктур. *Фізика та освітні технології*, 3, 31–36, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-3-4>

АНАЛІЗ СТВОРЕННЯ МАТЕРІАЛЬНОЇ МОДЕЛІ СКЛАДНИХ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Мета роботи провести аналіз досліджень, які стосуються моделювання процесів формування гетероструктур. *Визначити* особливості розвитку даної тематики у світі та пошуку шляхів ефективного розвитку в Україні.

Проведено аналіз публікацій, індексованих у наукометричній базі Scopus за ключовими словами «*modeling of heterostructures*» і «*modeling of heterostructure formation*». Для порівняльного аналізу відібрано статті з пошуку у назві статті, анотації і ключових словах у 2 039 наукових працях за останні 20 років. Проаналізовано країни і наукові організації авторів, наявність фінансової підтримки досліджень, самі публікації, а також найпопулярніші і найцитованіші видання, у яких здійснено публікацію, їх кількість та приналежність до галузі знань.

Проаналізовано публікації авторитетних світових науковців у галузі моделювання гетероструктур для розуміння закономірностей підтримки та розвитку цього напрямку у світі і в Україні, визначення перспектив нових досліджень. Розглянуто особливості міжнародної співпраці, окреслено коло провідних публікацій у науковій галузі, проаналізовано фактори впливу вчених різних країн на розвиток цієї галузі. Сформульовано пропозиції для покращення поширення результатів вітчизняних вчених у світовій науковій спільноті за цим напрямом.

Світові науковці намагаються знайти практичне застосування результатів своїх досліджень. Також, часто такі напрями визначаються наявною матеріальною базою, розробленим програмним забезпеченням, або публікаціями у співпраці вчених з різних країн, де кожна наукова група чітко виконує свою частину роботи.

Із аналізу за двома пошуковими запитамі із 2 039 і 166 наукових праць за період 2002-2023 рр. більше половини всіх робіт незмінно опубліковано вченими зі США. Установи, де проводяться передові дослідження з даної тематики, зосереджено у провідних науково-дослідних центрах: CNRS Centre National de la Recherche Scientifique, Chinese Academy of Sciences, Purdue University, Massachusetts Institute of Technology, National University of Singapore, Cornell University тощо.

Ключові слова: наукометрична база, моделювання, гетероструктури, наукові дослідження, галузі знань.

Oksana ZAMURUIEVA

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Theoretical and Computer Physics named by A. V. Svidzynskiy, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0003-0032-0613

SCOPUS-AUTHOR ID: 56181742100

Viktor NAKHOD

PhD student of the Department of Theoretical and Computer Physics named by A. V. Svidzynskiy, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

SCOPUS-AUTHOR ID: 57759051000

To cite this article: Nahod, V., Zamuruieva, O. (2023). Analiz stvorennia materialnoi modeli skladnykh protsesiv formuvannia heterostruktur [Analysis of the creation of a material model of component processes of formation of heterostructures]. *Physics and Educational Technology*, 3, 31–36, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-3-4>

ANALYSIS OF THE CREATION OF A MATERIAL MODEL OF COMPONENT PROCESSES OF FORMATION OF HETEROSTRUCTURES

The purpose of the work is to conduct an analysis of studies related to the modeling of heterostructure formation processes, to make an attempt to determine the peculiarities of the development of this topic in the world and to find ways of effective development of this direction in Ukraine.

An analysis of publications indexed in the Scopus scientometric database using the keywords "modeling of heterostructures" and "modeling of heterostructure formation" was carried out. For comparative analysis, articles were selected from a search in the article title, abstract, and keywords in 2,039 scientific papers over the past 20 years. The countries and scientific organizations of the authors, the availability of financial support for research, the publications themselves, as well as the most popular and most cited editions in which the publication was made, their number and affiliation to the field of knowledge were analyzed.

The publications of authoritative world scientists in the field of heterostructure modeling were analyzed in order to understand the patterns of support and development of this direction in the world and in Ukraine, and to determine the prospects for new research. The peculiarities of international cooperation are considered, the circle of leading publications in the scientific field is outlined, and the factors of influence of scientists of different countries on the development of this field are analyzed. Proposals for improving the dissemination of the results of domestic scientists in the world scientific community in this direction have been formulated.

World scientists are trying to find practical application of the results of their research. Also, such directions are often determined by the available material base, developed software, or publications in collaboration between scientists from different countries, where each scientific group clearly performs its part of the work.

From an analysis of two searches of 2,039 and 166 scientific papers for the period 2002-2023, more than half of all papers were consistently published by scientists from the United States. Institutions that carry out advanced research on this topic are concentrated in leading research centers: CNRS Center National de la Recherche Scientifique, Chinese Academy of Sciences, Purdue University, Massachusetts Institute of Technology, National University of Singapore, Cornell University, etc.

Key words: *scientometric base, modeling, heterostructures, scientific research, fields of knowledge.*

Актуальність дослідження. Фізика двовимірних (2D) матеріалів і гетероструктур на основі таких кристалів розвивається надзвичайно швидко. З цими новими матеріалами почала з'являтися справжня двовимірна фізика. Відповідно, з'являються нові гетероструктурні пристрої, такі як тунельні транзистори, резонансні тунельні діоди та світловипромінювальні діоди.

Штучні гетероструктури Ван-дер-Ваальса з двовимірними (2D) атомними кристалами є перспективними як активний канал або як буферний контактний шар для пристроїв нового покоління. Проте справжні двовимірні гетероструктурні пристрої залишаються обмеженими через явище перенесення за участю домішок і формування метастабільної та неоднорідної гетероструктури. Підбір окремих двовимірних матеріалів у гетероструктури Ван-дер-Ваальса дає можливість створювати шаруваті тривимірні матеріали з бажаними електронними та оптичними властивостями. Основною проблемою у виготовленні цих структур є формування чистих границь між окремими двовимірними

матеріалами, що впливає на ефективність пристроїв.

Багато науковців у всьому світі вивчають проблеми моделювання гетероструктур, як вказано у великій кількості публікацій у наукометричних базах даних, таких як Scopus. Це свідчить про високу актуальність цього напрямку досліджень. Однак, обмежена кількість наукових публікацій від українських вчених вказує на необхідність поширення та розвитку цієї області в українських наукових установах. Українські вчені мають потенціал та можуть активно внести свій внесок у дослідження гетероструктур та моделювання цих процесів. Популяризація та підтримка цього перспективного наукового напрямку в Україні може сприяти розвитку наукового співтовариства та залученню нових дослідників до цієї галузі.

Мета дослідження. Виконати аналіз досліджень, які стосуються моделювання процесів формування гетероструктур, зробити спробу визначити особливості розвитку даної тематики у світі та пошуку шляхів ефективного розвитку цього напрямку в Україні.

Таблиця 1

Провідні країни за кількістю публікацій у назві статті (Article title), анотації (Abstract) і ключових словах (Keywords) у напрямках досліджень

“microstructures for optoelectronic technology”	“nanostructures for optoelectronic technology”	“germanium microstructures and nanostructures”
China 71 United States 21 Germany 14 Taiwan 11 Japan 6 Spain 6 United Kingdom 6 India 5 Poland 5 Ukraine 3	United States 131 China 98 India 40 Germany 36 Japan 27 Italy 26 France 24 South Korea 23 United Kingdom 20 Ukraine 3	China 22 United States 12 Germany 10 India 5 France 3 Hong Kong 3 Japan 3 South Korea 3 Spain 2

Викладення основного матеріалу. Станом на січень 2023 р. у наукометричній БД Scopus за період 1987–2023 рр. опубліковано 176 наукових праць, пов’язаних з моделюванням формування гетероструктур, але значно більша їх кількість (2 427) у загальнішому запиті – моделювання гетероструктур. Це робить коректним і доцільним саме порівняльний аналіз за двома запитом (більш загального і уточненого). Високі сумарні h-індекси (h = 94 і 28) і щорічне (а з 2010 р. особливо різке) зростання кількості публікацій, лише підтверджує велику зацікавленість науковців до цих досліджень і особливо підвищений інтерес в останні роки.

Із аналізу за двома пошуковими запитом із 2 039 і 166 наукових праць за період 2002–2023 рр. більше половини всіх робіт незмінно опубліковано вченими зі США (рис. 1, табл. 1). Серед країн-лідерів також є: Китай, Німеччина, Франція тощо. Значно важливіше знати не країни-лідери, а установи, де проводяться передові дослідження, щоб переймати досвід їхньої діяльності. Такі дослідження з даної тематики зосереджено у провідних науково-дослідних центрах, серед яких: *CNRS Centre National de la Recherche Scientifique, Chinese Academy of Sciences, Purdue University, Massachusetts Institute of Technology, National University of Singapore, Cornell University* тощо. Саме ці організації займають лідируючі позиції з досліджень, присвячених моделюванню процесів формування гетероструктур, а отже, володіють високим науковим потенціалом і найкращими матеріально-технічними базами. Закономірно, що провідні центри належать саме країнам-лідерам, досвід яких українським науковцям слід вивчати і переймати, а організаціям налагоджувати тісні партнерські відносини.

Важливим аспектом для проведення досліджень є їх фінансова підтримка. Найбільшими світовими організаціями, що фінансують дослідження в даній галузі – здебільшого організації з Китаю, США і країн ЄС: *National Science Foundation, National Natural Science Foundation of China, U.S. Department of Energy, Horizon 2020 Framework Programme, Basic Energy Sciences, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Office of Science* тощо. Майже усі ці організації, як і були, так і залишаються незмінними донині основними спонсорами досліджень. Тому для успішної реалізації досліджень українським науковцям слід шукати шляхи для їх фінансової підтримки саме серед цих потужних організацій. Як один із варіантів для українських вчених – виконання своїх досліджень або в закордонних центрах, які вже мають таку підтримку, вигравши певний дослідницький грант, або плідна співпраця української організації із закордонною.

У найбільш цитованих та одночасно найновіших публікаціях (з 2002 по 2023 роки) відображені найпрогресивніші та найактуальніші результати досліджень, пов’язаних із моделюванням формування гетероструктур. Автори (Cho, 2015) використовували індуковане лазером фазове моделювання та розробку полі морфів для створення омічного гетерофазного гомопереходу між напівпровідниковим гексагональним (2H) та металевим моноклінним (1T') дителуридом молібдену (MoTe₂). Цей матеріал є стабільним до температур, досягаючи 300°C, і підвищує рухливість носіїв заряду в транзисторах MoTe₂ приблизно в 50 разів, при цьому зберігаючи високий

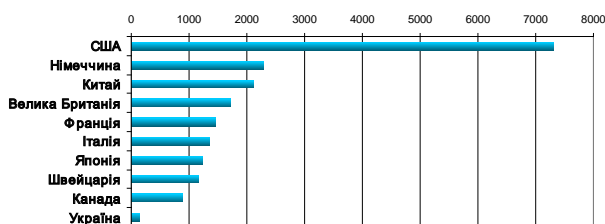


Рис. 1. Статистика країн із найбільшою кількістю публікацій

показник співвідношення струмів увімкнення/вимкнення, що складає 10^6 . Результати скануючої просвічуючої електронної мікроскопії в поєднанні з теоретичними розрахунками показали, що вакансія Te запускає локальний фазовий перехід у MoTe_2 , досягаючи справжнього 2D приладу з омичним контактом. У (Pizzocchero, 2016) представлено техніку швидкого пакетного виготовлення гетероструктур Ван-дер-Ваальса, продемонстровану контрольованим виробництвом моно-, дво- і тришарових графенових стеків, інкапсульованих у гексагональний нітрид бору, з виходом, близьким до 100 %. Для одношарових пристроїв виявлено напівкласичні середні вільні довжини до 0,9 мкм, причому найвужчі зразки демонстрували чіткі ознаки того, що на рухливість впливало граничне розсіювання. Авторами (Sahoo, 2018) був продемонстрований однобічний синтетичний підхід з використанням єдиного гетерогенного твердого джерела для безперервного виробництва бічних гетероструктур з кількома контактами, що складаються з моношарів дихалькогенідів перехідних металів. Послідовне утворення гетеропереходів досягалося виключно зміною складу реакційноздатного газового середовища в присутності водяної пари. Це дозволяло вибірково контролювати спричинене водою окислення та випаровування кожного попередника перехідного металу, а також його зародження на підкладці, що призводить до послідовної крайової епітаксії окремих дихалькогенідів перехідного металу. Даний новий підхід пропонує більшу гнучкість і контроль, ніж попередні методи, для безперервного зростання бічних гетероструктур на основі перехідних металів і дихалькогенідів.

У дослідженні (Shi, 2020) була представлена ефективна стратегія для значного уповільнення дифузії іонів у площині двовимірних галогідних перовскітів за допомогою включення жорстких π -спряжених органічних лігандів. У роботі були продемонстровані стійкі та регульовані бічні епітаксціальні гетероструктури, мультигетероструктури та надгратки. Використовуючи високороздільну просвічуючу електронну мікроскопію з корекцією аберацій низької дози, були показані практично атомно чіткі межі розділу та епітаксійний ріст.

Моделювання молекулярної динаміки підтвердило, що присутність спряжених лігандів призводить до зменшення розладу в гетероструктурі і збільшення енергії утворення вакансій у дво-

мірних перовскітах. Ці результати дають зрозуміти іммобілізацію та стабілізацію галогенідних перовскітних напівпровідників і демонструють матеріальну платформу для складних і молекулярно-тонких надграток, пристроїв та інтегральних схем. У статті (Romanov, 2011) представлено теоретичний аналіз поведінки дислокацій та релаксації напружень у семіполярній III-нітридній гетероепітаксії, наприклад, для шарів $\text{A}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ і $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$, вирощених на напівполярних площинах типу hh_2 - h - m або h_0 - h - m підкладок GaN. Показано, що напруження зсуву на унікальній похилій базальній (0001) площині не звертаються до нуля для таких геометрій росту. Це призводить до початку релаксаційних процесів у напівполярних III-нітридних гетероструктурах через ковзання дислокацій у базальних системах ковзання і до утворення дислокацій невідповідності (MD) з деякими векторами Бюргерса на напівполярному гетероінтерфейсі. Результати моделювання обговорюються у світлі останніх експериментальних спостережень МН та нахилу кристалічної ґратки в семіполярних III-нітридних гетероепітаксціальних шарах.

Зокрема у найбільш цитованій з моделювання гетероструктур роботі (Novoselov, 2016) розглянуто властивості нових двовимірних кристалів і вивчено, як їхні властивості використовуються в нових гетероструктурних пристроях. Робота (Cao, 2018) присвячена вивченню гетероструктури, що складається з двошарового графену, в якому два шари графену закручені відносно один одного на певний кут. Експериментально підтверджено, що в приблизних до «магічного» кута кутах структура електронної зони навколо нульової енергії Фермі стає плоскою завдяки сильному міжшаровому зв'язку. Властивості двошарових графенових гетероструктур з внутрішньою закруткою на «магічний» кут вказують на можливість використання цих матеріалів для дослідження інших екзотичних квантових фаз багатьох тіл у двох вимірах без впливу магнітного поля. Доступність плоских зон через електричну настроюваність і настроюваність смуги пропускання через кут закручування може прокласти шлях до більш складних корельованих систем, таких як нетрадиційні надпровідники та квантові спінові рідини. Автори (Britnell, 2013) розширюють діапазон гетероструктур на основі 2D кристалів до фотоактивних за допомогою напівпровідникових дихалькогенідів перехідних металів (TMDC)/графенових стеків. Сингулярності

Ван Хоа в електронній щільності станів TMDC гарантують посилену взаємодію між світлом і речовиною, що призводить до посиленого поглинання фотонів і створення електронних дірок (які збираються в прозорих графенових електродах). Це дозволяє розробляти надзвичайно ефективні гнучкі фотоелектричні пристрої з фоточутливістю понад 0,1 А/Вт (що відповідає зовнішньому квантовому ККД понад 30%).

У роботі (Wang, 2013) автори досліджували контактну геометрію, в якій був металізований лише одновимірний край двовимірного графенового шару. Окрім вдосконаленої продуктивності порівняно зі звичайними поверхневими контактами, така геометрія крайового контакту дозволила повністю відокремити процеси збирання шарів і металізації контактів. У графенових гетероструктурах це призвело до високої електронної продуктивності, включаючи низькотемпературний балістичний транспорт на відстані більше 15 мікрметрів, і рухливості при кімнатній температурі, що порівнюється з теоретичною межею розсіювання фононів. Геометрія крайового контакту надало нові можливості для проектування багатшарових структур із комплементарних 2D-матеріалів. У (Bhimanapati, 2015) розглянуто значні останні досягнення та важливі нові розробки у 2D-матеріалах «за межами графену». Авторами було представлено концепцію теоретичного моделювання та розуміння сил Ван-дер-Ваальса, які утримують разом двовимірні шари в об'ємних твердих тілах. Крім того, вони досліджували екситонні властивості та морфологію росту цих матеріалів. Крім того, висвітлено нещодавні прориви в синтезі та характеристиках TMD і обговорено нові сімейства 2D-матеріалів, включаючи моноелементні 2D-матеріали (наприклад, силіцен, фосфорен тощо) і MXenes на основі карбиду та нітриду вуглецю перехідного металу. Також обговорено легування та функціоналізацію двовимірних матеріалів за межами графену, які дозволяють застосовувати пристрої, а потім прогрес у електронних, оптоелектронних і магнітних пристроях і теорії. Запропоновано також перспективи майбутнього двовимірних матеріалів за межами графену.

Важливим аспектом сучасних досліджень є формування наукових колективів, із підбором і залученням фахівців з різних галузей знань, для забезпечення комплексних результатів. Тому ціка-

вими і важливими є результати аналізу за галуззю знань, з якою позиціонується певна публікація. Для світових публікацій, пов'язаних з моделюванням процесів формування гетероструктур, як за загальнішим, так і за уточненим запитом, переважаючими є галузі: «Фізика та астрономія», «Матеріалознавство», «Інженерія», «Хімія» (рис. 2, 3).

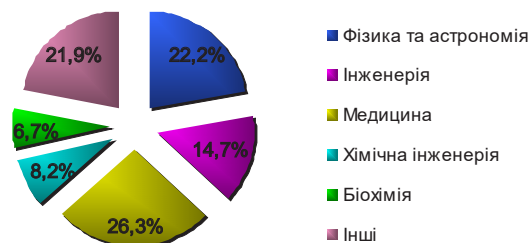


Рис. 2. Переважаючі галузі знань публікацій з моделювання процесів формування гетероструктур у світі

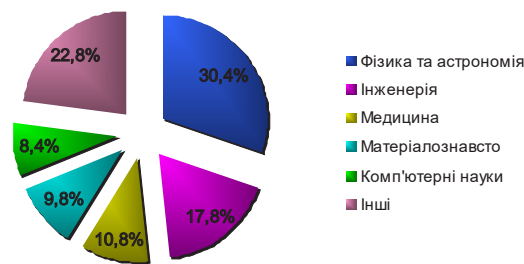


Рис. 3. Переважаючі галузі знань публікацій з моделювання процесів формування гетероструктур в Україні

Хоча загальна тенденція і зберігається незалежно від пошукового запиту – чітко виділені чотири галузі знань, однак, дещо вищі світові відсоткові значення кількості публікацій за більш загальним проти за уточненим запитом пов'язані з галуззю «Інженерія» (21,2 проти 16,2%). Тоді як для «Матеріалознавства» (24,3 проти 26,7%) і «Хімії» (7,2 проти 13,1%) ситуація протилежна та майже незмінна для галузі «Фізика та астрономія» (29,1 і 29,6%). Лідерство «Фізики та астрономії» вказує на те, що відповідні дослідження більше інтегровані саме до конкретних областей фізики і перейшли у практичне русло, яке пов'язане з матеріалознавством, інженерією чи хімією. Також є очевидними, в залежності від виду запиту, незначні зміни пріоритетів у напрямках досліджень, а саме інтерес науковців комп'ютерних наук і біохімії.

Висновки. Проведений порівняльний аналіз світових публікацій, що стосуються моделювання процесів формування гетероструктур і гетероструктурного моделювання, допомагає зрозуміти, які сучасні виклики важливі для науковців і які можливі шляхи подолання цих викликів.

Цей аналіз може виявити ключові напрямки досліджень та тенденції у галузі моделювання гетероструктур. Зрозуміння цих викликів і потенційних шляхів подолання може сприяти покращенню досліджень у цій області та сприяти розвитку нових методів та підходів.

Такий підхід до наукових досліджень і обмін інформацією є надзвичайно важливим для розвитку науки. Актуальні теми та виклики, які висвітлені у світових публікаціях, можуть стати цінним джерелом інсайтів для українських науковців, які працюють у цій області. Рациональне використання цієї інформації може сприяти розвитку наукових досліджень в Україні та співпраці зі світовими науковими спільнотами. Надіємося, що це сприятиме подальшому розвитку наукового потенціалу України та вирішенню важливих дослідницьких завдань на міжнародному рівні.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Cho S., Kim S., Kim J.H., (...), Lee Y.H., Yang H. Phase patterning for ohmic homojunction contact in MoTe_2 . *Science*. 2015. Vol. 349. № 6248. P. 625–628.
2. Pizzocchero F., Gammelgaard L., Jessen B.S., et al. The hot pick-up technique for batch assembly of van der Waals heterostructures. *Nature Communications*. 2016. Vol. 7. 11894.
3. Sahoo P.K., Memaran S., Xin Y., Balicas L., Gutiérrez H.R. One-pot growth of two-dimensional lateral heterostructures via sequential edge-epitaxy. *Nature*. 2018. Vol. 553, № 7686. P. 63–67.
4. Shi E., Yuan B., Shiring S.B., et al. Two-dimensional halide perovskite lateral epitaxial heterostructures. *Nature*. 2020. Vol. 580, № 7805. P. 614–620.
5. Romanov A.E., Young E.C., Wu F., (...), Denbaars S.P., Speck J.S. Basal plane misfit dislocations and stress relaxation in III-nitride semipolar heteroepitaxy. *Journal of Applied Physics*. 2011. Vol. 109, № 10. 103522.
6. Novoselov K.S., Mishchenko A., Carvalho A., Castro Neto A.H. 2D materials and van der Waals heterostructures. *Science*. 2016. Vol. 353, № 6298. aac9439.
7. Cao Y., Fatemi V., Demir A., (...), Ashoori R.C., Jarillo-Herrero P. Correlated insulator behaviour at half-filling in magic-angle graphene superlattices. *Nature*. 2018. Vol. 556, № 7699. P. 80–84.
8. Britnell L., Ribeiro R.M., Eckmann A., (...), Castro Neto A.H., Novoselov K.S. Strong light-matter interactions in heterostructures of atomically thin films). *Science*. 2013. Vol. 340, № 6138. P. 1311–1314.
9. Wang L., Meric I., Huang P.Y., (...), Shepard K.L., Dean C.R. One-dimensional electrical contact to a two-dimensional material. *Science*. 2013. Vol. 342, № 6158. P. 614–617.
10. Bhimanapati G.R., Lin Z., Meunier V., (...), Terrones M., Robinson J.A. Recent Advances in Two-Dimensional Materials beyond Graphene. *ACS Nano*. 2015. Vol. 9, № 12. P. 11509–11539.

REFERENCES:

1. Cho S., Kim S., Kim J.H., (...), Lee Y.H., Yang H. Phase patterning for ohmic homojunction contact in MoTe_2 . *Science*. 2015. Vol. 349. № 6248. P. 625–628.
2. Pizzocchero F., Gammelgaard L., Jessen B.S., et al. The hot pick-up technique for batch assembly of van der Waals heterostructures. *Nature Communications*. 2016. Vol. 7. 11894.
3. Sahoo P.K., Memaran S., Xin Y., Balicas L., Gutiérrez H.R. One-pot growth of two-dimensional lateral heterostructures via sequential edge-epitaxy. *Nature*. 2018. Vol. 553, № 7686. P. 63–67.
4. Shi E., Yuan B., Shiring S.B., et al. Two-dimensional halide perovskite lateral epitaxial heterostructures. *Nature*. 2020. Vol. 580, № 7805. P. 614–620.
5. Romanov A.E., Young E.C., Wu F., (...), Denbaars S.P., Speck J.S. Basal plane misfit dislocations and stress relaxation in III-nitride semipolar heteroepitaxy. *Journal of Applied Physics*. 2011. Vol. 109, № 10. 103522.
6. Novoselov K.S., Mishchenko A., Carvalho A., Castro Neto A.H. 2D materials and van der Waals heterostructures. *Science*. 2016. Vol. 353, № 6298. aac9439.
7. Cao Y., Fatemi V., Demir A., (...), Ashoori R.C., Jarillo-Herrero P. Correlated insulator behaviour at half-filling in magic-angle graphene superlattices. *Nature*. 2018. Vol. 556, № 7699. P. 80–84.
8. Britnell L., Ribeiro R.M., Eckmann A., (...), Castro Neto A.H., Novoselov K.S. Strong light-matter interactions in heterostructures of atomically thin films). *Science*. 2013. Vol. 340, № 6138. P. 1311–1314.
9. Wang L., Meric I., Huang P.Y., (...), Shepard K.L., Dean C.R. One-dimensional electrical contact to a two-dimensional material. *Science*. 2013. Vol. 342, № 6158. P. 614–617.
10. Bhimanapati G.R., Lin Z., Meunier V., (...), Terrones M., Robinson J.A. Recent Advances in Two-Dimensional Materials beyond Graphene. *ACS Nano*. 2015. Vol. 9, № 12. P. 11509–11539.

УДК 523.9-046.55:681.586-024.24

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2023-3-5>

Володимир МИСЛІНЧУК

кандидат педагогічних наук, доцент, завідувач кафедри фізики, астрономії та методики викладання, Рівненський державний гуманітарний університет, вул. Степана Бандери, 12, м. Рівне, Україна, 33017

ORCID ID: 0000-0002-7629-4215

SCOPUS-AUTHOR ID: 57745554400

Валентин СІДЛЕЦЬКИЙ

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики, астрономії та методики викладання, Рівненський державний гуманітарний університет, вул. Степана Бандери, 12, м. Рівне, Україна, 33017

ORCID ID: 0000-0003-3293-1195

SCOPUS-AUTHOR ID: 57202033265

Павло ШИГОРІН

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А. В. Свідзинського, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0003-2396-8041

SCOPUS-AUTHOR ID: 36024496600

Богдан НЕЧИПОРУК

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики, астрономії та методики викладання, Рівненський державний гуманітарний університет, вул. Степана Бандери, 12, м. Рівне, Україна, 33017

ORCID ID: 0000-0001-6206-7997

SCOPUS-AUTHOR ID: 6506540077

Бібліографічний опис статті: Мислінчук, В., Сідлецький, В., Шигорін, П., Нечипорук, Б. (2023). Реалізація теоретичної моделі визначення величини потоку сонячної радіації на основі сучасних модульних датчиків. *Фізика та освітні технології*, 3, 37–43, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-3-5>

РЕАЛІЗАЦІЯ ТЕОРЕТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ПОТОКУ СОНЯЧНОЇ РАДІАЦІЇ НА ОСНОВІ СУЧАСНИХ МОДУЛЬНИХ ДАТЧИКІВ

Дослідження енергетичних характеристик сонячного випромінювання – актуальна проблема сучасної астрономії. Їх точні та стабільні вимірювання відіграють вирішальне значення як для встановлення енергетичного балансу, який визначає клімат Землі, так і для можливостей вивчення причин його зміни. Інтенсивність сонячної радіації кількісно оцінюють сонячною сталою – сумарним потоком сонячного випромінювання, що проходить за одиницю часу через одиничну площу, орієнтовану перпендикулярно до потоку, на відстані однієї астрономічної одиниці від центру Сонця зовні земної атмосфери.

Розділ астрономії, в якому вивчається енергія, що випромінюється Сонцем, поверхнею Землі та її атмосферою називається актинометрією, а прилади для вимірювання різних видів радіації – актинометрами. На основі 12 V LED Display Thermostat Control Instrument Temperature Sensor виготовлено прилад для вимірювання величини потоку сонячної радіації – актинометр.

Показано, що вимірювання кількості теплоти, яку отримує на поверхні Землі одинична площа за одиницю часу (за фіксованих розмірів складових робочих частин актинометра) може бути визначено із співвідношення: $\sigma_0 = 1242 \cdot \Delta T / t$. За допомогою саморобного актинометра експериментально визначено кількість теплоти, яка отримується на поверхні Землі одиничною площею за одиницю часу. Дані експериментальних досліджень наступні: при висоті Сонця $\approx 30^\circ$ над горизонтом $\bar{\sigma}_0^*(1) = 664,23$ (Вт/м²); при висоті Сонця $\approx 40^\circ$ над горизонтом $\bar{\sigma}_0^*(2) = 788,51$ (Вт/м²); при висоті Сонця $\approx 50^\circ$ над горизонтом $\bar{\sigma}_0^*(3) = 860,44$ (Вт/м²).

У припущенні рівномірності розсіювання сонячного випромінювання в атмосфері Землі по всій її товщині та напрямках, визначено, що на кожний кілометр земної атмосфери зменшення величини σ_0 становить $\sigma_0 / 1 = 0,7146$ (Вт/(м²·км)). Оцінено значення сонячної сталої за межами земної атмосфери, яке становить $\bar{\sigma}_0 = 1309,87$ (Вт/м²). Отримане значення з похибкою $\varepsilon = 4,2\%$ співпадає з експериментальними вимірюваннями сонячної сталої науковими установами.

Ключові слова: модульний датчик температури, актинометр, сонячна радіація, сонячна стала.

Volodymyr MYSLINCHUK

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Head at the Department of Physics, Astronomy and Teaching Methods, Rivne State University of the Humanities, 12 Stepan Bandera Str., Rivne, Ukraine, 33017

ORCID ID: 0000-0002-7629-4215

SCOPUS-AUTHOR ID: 57745554400

Valentyn SIDLETSKYI

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Physics, Astronomy and Teaching Methods, Rivne State University of the Humanities, 12 Stepan Bandera Str., Rivne, Ukraine, 33017

ORCID ID: 0000-0003-3293-1195

SCOPUS-AUTHOR ID: 57202033265

Pavlo SHYGORIN

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Theoretical and Computer Physics named by A. V. Svidzynskyi, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13, Volya ave., Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0003-2396-8041

SCOPUS-AUTHOR ID: 36024496600

Bohdan NECHYPORUK

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Physics, Astronomy and Teaching Methods, Rivne State University of the Humanities, 12 Stepan Bandera Str., Rivne, Ukraine, 33017

ORCID ID: 0000-0001-6206-7997

SCOPUS-AUTHOR ID: 6506540077

To cite this article: Myslinchuk, V., Sidletskyi, V., Shygorin, P., Nechyporuk, B. (2023). Realizatsiia teoretychnoi modeli vyznachennia velychyny potoku soniachnoi radiatsii na osnovi suchasnykh modulnykh datchykyv [Implementation of a theoretical model for determining the solar radiation flux based on modern modular sensors]. *Physics and Educational Technologies*, 3, 37–43, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-3-5>

IMPLEMENTATION OF A THEORETICAL MODEL FOR DETERMINING THE VALUE OF SOLAR RADIATION FLUX BASED ON MODERN MODULAR SENSORS

The study of the energy characteristics of solar radiation is a relevant issue in modern astronomy. Their precise and stable measurements are crucial both for establishing the energy balance that determines the Earth's climate and for studying the causes of its change. The intensity of solar radiation is quantified by the solar constant, the total flux of solar radiation passing per unit time through a unit area oriented perpendicular to the flux at a distance of one astronomical unit from the center of the Sun outside the Earth's atmosphere.

The branch of astronomy that studies the energy emitted by the Sun, the Earth's surface, and its atmosphere is called actinometry, and devices for measuring various types of radiation are called actinometers. A device for measuring the solar radiation flux, an actinometer, was developed on the basis of the 12 V LED Display Thermostat Control Instrument Temperature Sensor.

It is shown that the amount of heat received on the Earth's surface by a unit area per unit time (with fixed dimensions of the actinometer's component parts) can be determined from the following relation $\sigma_0 = 1242 \cdot \Delta T / \tau$ (J/(m²·K)). Using a homemade actinometer, we experimentally determined the amount of heat received on the Earth's surface by a unit area per unit time. The data of the experimental studies are as follows: at the height of the Sun $\approx 30^\circ$ above the horizon $\bar{\sigma}_0^(1) = 664.23$ (W/m²); at the height of the Sun $\approx 40^\circ$ above the horizon $\bar{\sigma}_0^*(2) = 788.51$ (W/m²), at the height of the Sun $\approx 50^\circ$ above the horizon $\bar{\sigma}_0^*(3) = 860.44$ (W/m²).*

Assuming uniformity of solar radiation scattering in the Earth's atmosphere over its entire thickness and directions, it is determined that for each kilometer of the Earth's atmosphere, the decrease in σ_0 is $\sigma_0/l = 0.7146$ (W/(m²·km)). The value of the solar constant outside the Earth's atmosphere is estimated, which is $\bar{\sigma}_0 = 1309.87$ (W/m²). The obtained value with an error of $\varepsilon = 4.2\%$ coincides with experimental measurements of the solar constant by scientific institutions.

Key words: modular temperature sensor; actinometer; solar radiation, solar constant.

Актуальність проблеми. На поверхню земної кулі падає сонячне випромінювання, енергія якого становить близько $81000 \cdot 10^6$ МВт, з яких $27000 \cdot 10^6$ МВт припадає на материкову частину. Визначально, що 80% цієї енергії надходить до земної поверхні у період з квітня по вересень. Можна провести оцінку, що за годину наша планета отримує від Сонця майже стільки енергії, скільки людство використовує протягом року (Титко, 2010). Промениста енергія Сонця є основним джерелом світла і тепла на нашій планеті, обумовлює різноманітність життя на землі та відіграє вирішальну роль у протіканні біологічних процесів (Саратов, 2009). При вивченні сонячної радіації важливе значення має поверхнева густина різних її потоків – величина потоку радіації на одиницю поверхні. При цьому під прямою сонячною радіацією будемо розуміти короткохвильову сонячну радіацію, яка доходить до земної поверхні у вигляді пучку паралельних променів від Сонця, яка змінюється в залежності від висоти знаходження Сонця над горизонтом, прозорості атмосфери та хмарності (Таранова, 2013).

Інтенсивність сонячної радіації – це кількість тепла, яка надходить упродовж одиниці часу на одиницю площі абсолютно чорної поверхні, розташованої перпендикулярно до сонячних променів (Захожай, 2021). Дану величину кількісно оцінюють сонячною сталою – сумарним потоком сонячного випромінювання, що проходить за одиницю часу через одиничну площу, орієнтовану перпендикулярно до потоку, на відстані однієї астрономічної одиниці від центру Сонця зовні земної атмосфери (John, 2009). Сонячна стала змінюється на десятки частки відсотків у межах 11-річного сонячного циклу, встановлено прямопропорційний зв'язок між збільшенням числового значення сонячної сталої та ростом кількості плям і сонячних спалахів. Слід зауважити, що навіть невеликі варіації сонячного опромінення можуть призвести до природного впливу на клімат Землі з глобальними та регіональними реакціями (Douglass, 2002). Тому точні та стабільні вимірювання характеристик сонячного опромінення становлять вирішальне значення як для встановлення енергетичного балансу, який визначає клімат Землі, так і для можливостей вивчення причин його зміни.

Аналіз останніх публікацій. Оцінка числового значення сонячної сталої є актуальною

проблемою, яка пронизує усю фізику Сонця. Вперше вона була розв'язана ще у 1838 році французьким фізиком Клод Пуйє за допомогою піргеліометра власної розробки. Його оцінка становила 1228 Вт/м^2 (Dufresne, 2008), що достатньо близько до сучасного значення 1367 Вт/м^2 . У 1875 р. Жюль Віолль відновив роботу Пуйє та отримав значення у 1700 Вт/м^2 . Експериментальні вимірювання при цьому були проведені на Монблані у Франції. У 1884 році Семюел Пірпонт Ленглі зробив спробу оцінки сонячної сталої на горі Вітні в Каліфорнії. Проводячи ряд вимірювань у різний час доби, він здійснив спробу використати корекцію на атмосферне поглинання. Запропоноване ним експериментальне значення сонячної сталої становило 2903 Вт/м^2 . У першій половині ХХ ст. вимірювання на різних високогірних місцях, проведені Чарльз Грілі Ебботом та іншими науковцями дозволили отримати значення, які лежали в межах від 1322 Вт/м^2 до 14665 Вт/м^2 (Sampson, 1911).

Метою даної роботи є розробка теоретичної моделі визначення числового значення величини сонячної сталої та її експериментальна оцінка з використанням саморобного актинометру, побудованого на основі сучасного модульного датчика температури.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розділ астрономії, в якому вивчається енергія, яка випромінюється Сонцем, поверхнею Землі і атмосферою, та її перетворення називається актинометрією, а прилади для вимірювання різних видів радіації – актинометрами. В роботі пропонується використати нескладний у побудові саморобний актинометр, дія якого ґрунтується на використанні саморобного датчика температури. Процес виготовлення саморобного актинометра містив кілька послідовних етапів: 1) придбання пристрою для вимірювання температури з цифровою індексацією; 2) виготовлення зручного для користування джерела живлення приладу; 3) виготовлення детектора сонячного випромінювання; 4) виготовлення корпусу приладу та налаштування його роботи.

Модульний датчик температури – цифровий термометр із світлодіодним дисплеєм і виносним датчиком. Він дозволяє проводити вимірювання температури в діапазоні від -50°C до $+110^\circ\text{C}$. Довжина проводу зонду 1 м. Живлення

5–12 В постійного струму. Колір дисплея – червоний. Розмір 4,7x2,8x1,5 см. Живлення термометра здійснюється за допомогою раніше вживаного адаптеру типу FW6299 з наступними характеристиками (input: 230 V~/50 Hz/48 mA; output: 9 V~/800 mA/7,2 VA). Випрямлення змінного струму здійснюється за допомогою саморобного випрямляча, який приєднаний між температурним модулем і адаптером. Загальна конструкція вимірника температури у зібраному стані показано на рис. 1.

В якості приймача сонячного випромінювання ми використали алюмінієву пластинку товщиною 0,5 мм та діаметром 68 мм. Алюмінієва пластинка була припаяна до детектора пристрою для вимірювання температури, закріплена у пінопластовій основі та поміщена у пластмасовий циліндричний корпус. Приймальна частина пластинки була зачорнена.

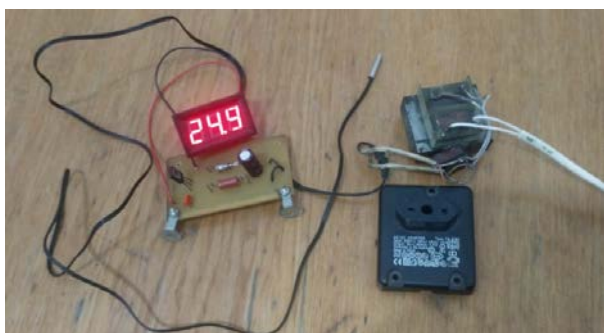


Рис. 1. Модуль для вимірювання температури

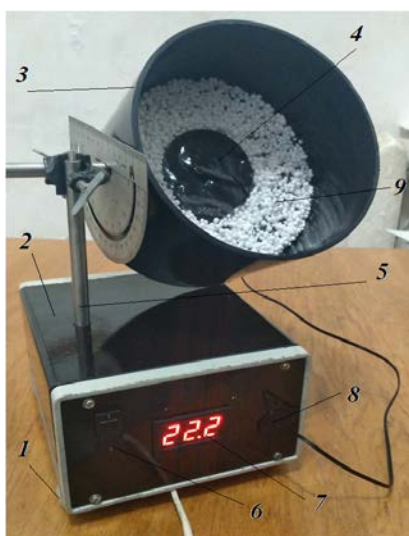


Рис. 2. Актинометр

Загальний вигляд актинометра показано на рис. 2. В якості основи слугує стандартний

корпус (2) для саморобних пристроїв, нижня частина якого містить 4 підставні ніжки (1). До основи прикріплений металевий стрижень (5) довжиною 25 см. Пристрій для вимірювання температури поміщений у металевий короб (2) розмірами 15x18x9 см і жорстко прикріплений до основи. На передню панель приладу винесено цифрова панель вимірника температури (7), вимикач (6) та виведено провід до детектору (8). До металевого стрижня жорстко прикріплений транспорт.

Згідно означення сонячної сталої формула для її визначення матиме вигляд:

$$\sigma_0 = \frac{W}{S_{\text{Площ}} \cdot \tau}, \quad (1)$$

де σ_0 – сонячна стала, $S_{\text{Площ}}$ – площа площадки, на яку потрапляє сонячна енергія W за проміжок часу τ . Кількість енергії, яка потрапляє на площадку, будемо вважати рівною кількості теплоти, яку отримує алюмінієва пластинка актинометра. Отже:

$$\sigma_0 = \frac{W}{S_{\text{Площ}} \cdot \tau}, \quad W = Q, \quad \sigma_0 = \frac{Q}{S_{\text{Площ}} \cdot \tau},$$

$$Q = C_{\text{Al}} \cdot m_{\text{Al}} \cdot \Delta T, \quad m_{\text{Al}} = \rho_{\text{Al}} \cdot V_{\text{Al}} = \rho_{\text{Al}} \cdot S_{\text{Al}} \cdot h_{\text{Al}}, \quad (2)$$

$$\sigma_0 = \frac{Q}{S_{\text{Площ}} \cdot \tau} = \frac{C_{\text{Al}} \cdot m_{\text{Al}} \cdot \Delta T}{S_{\text{Площ}} \cdot \tau} = \frac{C_{\text{Al}} \cdot \rho_{\text{Al}} \cdot S_{\text{Al}} \cdot h_{\text{Al}} \cdot \Delta T}{S_{\text{Площ}} \cdot \tau}.$$

Оскільки S_{Al} – площа алюмінієвої пластинки, $S_{\text{Площ}}$ – площа площадки, на яку потрапляє сонячне проміння рівні між собою, то:

$$\sigma_0 = \frac{C_{\text{Al}} \cdot \rho_{\text{Al}} \cdot h_{\text{Al}} \cdot \Delta T}{\tau}. \quad (3)$$

Беручи табличні величини $C_{\text{Al}} = 920 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, $\rho_{\text{Al}} = 2700 \text{ кг}/\text{м}^3$ та вважаючи товщину пластинки $h_{\text{Al}} = 0,5 \text{ мм}$ (за паспортними даними приладу), робоча формула для визначення сонячної сталої набуде вигляду:

$$\sigma_0 = \frac{1242 \cdot \Delta T}{\tau} \left(\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right). \quad (4)$$

Перед проведенням експериментальної частини дослідження, саморобний актинометр рекомендується увімкнути на 10 хв для встановлення теплового балансу між різними його елементами.

Експериментальна частина роботи виконувалася влітку. Зокрема експериментальні вимірювання проводилися 5, 6 та 7 липня 2022 р., які вирізнялися найбільшою сприятливістю погодних умов. Вимірювання проводились серіями тричі на день. Перший раз близько 9 години

за київським часом (при висоті Сонця $\approx 30^\circ$ над горизонтом), другий і третій раз послідовно через проміжки часу в півтори години при висоті Сонця $\approx 40^\circ$ і $\approx 50^\circ$. Рекомендована технологія проведення експериментальних вимірювань температури і часу нагрівання наступна:

1. Центральну трубу актинометра розмістити таким чином, щоб зачорнена поверхня алюмінієвої пластинки була перпендикулярна до падаючого сонячного проміння. Зафіксувати наближену висоту Сонця над горизонтом ($\angle Q$) за допомогою транспортиру.

2. Записуємо початкову температуру латунної пластинки Т1 відкриваємо вхідний отвір актинометра одночасно з чим запускаємо електронний секундомір.

3. Слідкуючи за датчиком температури, чекаємо поки температура алюмінієвої пластинки

не підвищиться на 10 градусів. При виконанні даної умови зупиняємо секундомір і знімаємо його покази (τ) з точністю до сотої.

4. Підставляючи отримані дані у формулу (4), обчислюємо кількість теплоти, яку отримує від Сонця кожен секунду одинична площадка на Землі, розміщена перпендикулярно до сонячного проміння для даної висоти Сонця над горизонтом.

5. Закриваємо вхідний отвір актинометра і очікуємо, поки покази його термометра стабілізуються, тобто не перестане знижуватися і максимально наблизиться до початкового. Виконуємо п. 1 – п. 4 кілька разів, після чого знаходимо середнє значення величини σ_0^* . Дані експериментальних вимірювань та обчислень подано у таблиці 1.

Зауважимо, що отримані величини σ_0^* виражаються в одиницях вимірювання сонячної сталої Вт/м^2 . Однак визначити із них сонячну сталу можна буде за умови врахування для кожного вимірювання (в залежності від висоти Сонця над горизонтом) величини екстинкції (послаблення світлового потоку) у земній атмосфері.

На час проведення експериментальних вимірювань, згідно з таблицею 20 (Відьмаченко, 2021, с. 116), геліоцентрична відстань Землі від Сонця становила: $r=1,015$ а.о. Отримані середні значення величин $\bar{\sigma}_0^*(1)=664,23 \text{ Вт/м}^2$, $\bar{\sigma}_0^*(2)=788,51 \text{ Вт/м}^2$ і $\bar{\sigma}_0^*(3)=860,44 \text{ Вт/м}^2$ засвідчують, що частина сонячної енергії, яка розсіюється (поглинається) в атмосфері (атмосферою) Землі, є значною. Спробуємо за отриманими вище експериментальними даними оцінити числове значення сонячної сталої за межами атмосфери.

Таблиця 1
Дані експериментальних вимірювань та обчислень

Дата	θ , град	ΔT , К	$\Delta \tau$, с	σ_0^* , Вт/м ²	$\bar{\sigma}_0^*$, Вт/м ²
5.07.2022 р.	30°	10	18,8	660,64	667,79
		10	18,6	667,74	
		10	18,4	675	
	40°	10	15,8	786,08	796,24
		10	15,6	796,15	
		10	15,4	806,49	
	50°	10	14,6	850,69	847,78
		10	14,4	853,45	
		10	14,8	839,19	
6.07.2022 р.	30°	10	18,4	675	682,47
		10	18,2	682,42	
		10	18,0	690	
	40°	10	16,0	776,25	783,14
		10	15,4	806,49	
		10	16,2	766,67	
	50°	10	14,4	862,5	862,94
		10	14,8	839,19	
		10	14,0	887,14	
7.07.2022 р.	30°	10	19,4	640,2	642,43
		10	19,4	640,2	
		10	19,2	646,88	
	40°	10	16,0	776,25	786,16
		10	15,8	786,08	
		10	15,6	796,15	
	50°	10	14,2	874,65	870,6
		10	14,4	862,5	
		10	14,2	874,65	

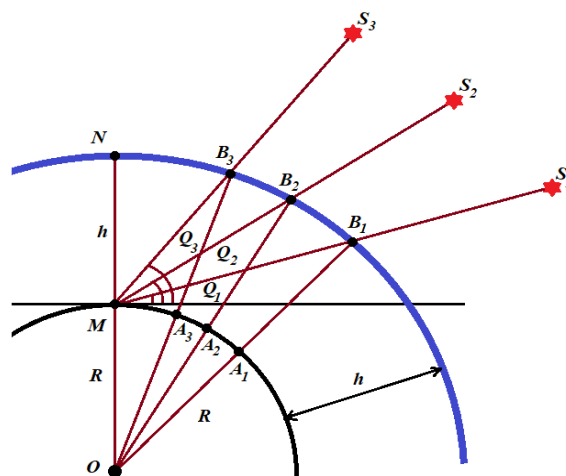


Рис. 3. До визначення сонячної сталої

На рис. 3 позначено:

S_1, S_2 і S_3 – послідовні положення Сонця, т. О – центр Землі, $OM=OA_1=OA_2=OA_3=R$ – радіус Землі ($R_{\oplus} = 6400$ км), $Q_1 = 30^\circ, Q_2 = 40^\circ, Q_3 = 50^\circ$ – висоти Сонця над горизонтом, $MN=A_1V_1=A_2V_2=A_3V_3=h$ – товщина Земної атмосфери. Будемо вважати, величину $h \approx 500$ км (товщина тропосфери, стратосфери та іоносфери разом) (Корсунь, 2003, с. 168). Розглянемо $\triangle OB_1M$, $OB_1=R+h \approx 6400+500=6900$ км, $OM=R=6400$ км, $MB_1=h=500$ км, $\angle B_1MO=30^\circ+90^\circ=120^\circ$. З трикутника $\triangle OB_1M$ за теоремою синусів:

$$\frac{OB_1}{\sin \angle OMB_1} = \frac{MB_1}{\sin \angle MOB_1} = \frac{MO}{\sin \angle MB_1O} \Rightarrow \frac{R+h}{\sin 120^\circ} = \frac{R}{\sin \angle OB_1M} \Rightarrow$$

$$\sin \angle OB_1M = \frac{R \cdot \sin 120^\circ}{R+h} = \frac{6400 \text{ км} \cdot 0,866}{6900 \text{ км}} = 0,8033 \Rightarrow$$

$$\angle OB_1M = 53,45^\circ, \angle B_1OM = 180^\circ - 120^\circ - 53,45^\circ = 6,55^\circ.$$

$$\frac{MB_1}{\sin \angle MOB_1} = \frac{OM}{\sin \angle OB_1M} \Rightarrow MB_1 = \frac{R \cdot \sin 6,55^\circ}{\sin 53,45^\circ} = \frac{6400 \text{ км} \cdot 0,1141}{0,8033} = 909 \text{ км}.$$

Проводячи аналогічні міркування для положення S_2 , розглянемо $\triangle OB_2M$, $OB_2=R+h \approx 6400+500=6900$ км, $OM=R=6400$ км, $MB_2=h=500$ км, $\angle B_2MO=40^\circ+90^\circ=130^\circ$. З трикутника $\triangle OB_2M$ за теоремою синусів:

$$\frac{OB_2}{\sin \angle OMB_2} = \frac{MB_2}{\sin \angle MOB_2} = \frac{MO}{\sin \angle MB_2O} \Rightarrow \frac{R+h}{\sin 130^\circ} = \frac{R}{\sin \angle OB_2M} \Rightarrow$$

$$\sin \angle OB_2M = \frac{R \cdot \sin 130^\circ}{R+h} = \frac{6400 \text{ км} \cdot 0,7661}{6900 \text{ км}} = 0,7106 \Rightarrow$$

$$\angle OB_2M = 45,28^\circ, \angle B_2OM = 180^\circ - 130^\circ - 45,28^\circ = 4,72^\circ.$$

$$\frac{MB_2}{\sin \angle MOB_2} = \frac{OM}{\sin \angle OB_2M} \Rightarrow MB_2 = \frac{R \cdot \sin 4,72^\circ}{\sin 45,28^\circ} = \frac{6400 \text{ км} \cdot 0,0828}{0,7106} = 746 \text{ км}.$$

Аналогічно для положення S_3 : розглянемо $\triangle OB_3M$, $OB_3=R+h \approx 6400+500=6900$ км, $OM=R=6400$ км, $MB_3=h=500$ км, $\angle B_3MO=50^\circ+90^\circ=140^\circ$. З трикутника $\triangle OB_3M$ за теоремою синусів:

$$\frac{OB_3}{\sin \angle OMB_3} = \frac{MB_3}{\sin \angle MOB_3} = \frac{MO}{\sin \angle MB_3O} \Rightarrow \frac{R+h}{\sin 140^\circ} = \frac{R}{\sin \angle OB_3M} \Rightarrow$$

$$\sin \angle OB_3M = \frac{R \cdot \sin 140^\circ}{R+h} = \frac{6400 \text{ км} \cdot 0,6428}{6900 \text{ км}} = 0,5962 \Rightarrow$$

$$\angle OB_3M = 36,59^\circ, \angle B_3OM = 180^\circ - 140^\circ - 36,6^\circ = 3,4^\circ.$$

$$\frac{MB_3}{\sin \angle MOB_3} = \frac{OM}{\sin \angle OB_3M} \Rightarrow MB_3 = \frac{R \cdot \sin 3,41^\circ}{\sin 36,59^\circ} = \frac{6400 \text{ км} \cdot 0,0593}{0,5962} = 637 \text{ км}.$$

Таким чином при проходженні сонячного випромінювання в атмосфері Землі відстані $V_1M=909$ км отримано значення $\bar{\sigma}_0^*(1)=664,23$ Вт/м², при проходженні відстані $V_2M=746$ км $\Rightarrow \bar{\sigma}_0^*(2)=788,51$ Вт/м², при

проходженні відстані $V_3M=637$ км $\Rightarrow \bar{\sigma}_0^*(3)=860,44$ Вт/м². Помічаємо, що чим довший шлях в атмосфері Землі проходить сонячне випромінювання, тим більша його частка розсіюється. Припустивши, що розсіювання сонячного випромінювання в атмосфері Землі здійснюється рівномірно по всій її товщині та напрямках, оцінимо величину зменшення σ_0 на кожний кілометр атмосфери.

$$\frac{\Delta\sigma_{01}}{l_1-l_3} = \frac{\bar{\sigma}_0^*(3) - \bar{\sigma}_0^*(1)}{MB_1 - MB_3} = \frac{860,44 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} - 664,23 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}}{909 \text{ км} - 637 \text{ км}} = 0,7214 \frac{\text{Вт}}{\text{км} \cdot \text{м}^2};$$

$$\frac{\Delta\sigma_{02}}{l_2-l_3} = \frac{\bar{\sigma}_0^*(3) - \bar{\sigma}_0^*(2)}{MB_2 - MB_3} = \frac{860,44 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} - 788,51 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}}{746 \text{ км} - 637 \text{ км}} = 0,6599 \frac{\text{Вт}}{\text{км} \cdot \text{м}^2};$$

$$\frac{\Delta\sigma_{03}}{l_1-l_2} = \frac{\bar{\sigma}_0^*(2) - \bar{\sigma}_0^*(1)}{MB_1 - MB_2} = \frac{788,51 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} - 664,23 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}}{909 \text{ км} - 746 \text{ км}} = 0,7625 \frac{\text{Вт}}{\text{км} \cdot \text{м}^2}.$$

З останніх співвідношень знаходимо середнє значення:

$$\frac{\Delta\sigma_0}{1} = \frac{\frac{\Delta\sigma_{01}}{l_1-l_3} + \frac{\Delta\sigma_{02}}{l_2-l_3} + \frac{\Delta\sigma_{03}}{l_1-l_3}}{3} = \frac{0,7214 + 0,6599 + 0,7625}{3} = 0,7146 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{км} \cdot \text{м}^2} \right).$$

Отже, можна обчислити значення сонячної сталої за межами земної атмосфери у точках V_1, V_2 та V_3 відповідно:

У точці V_1 :

$$\sigma_0(1) = 664,23 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} + 0,7146 \frac{\text{Вт}}{\text{км} \cdot \text{м}^2} \cdot 909 \text{ км} = 1313,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

У точці V_2 :

$$\sigma_0(2) = 788,51 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} + 0,7146 \frac{\text{Вт}}{\text{км} \cdot \text{м}^2} \cdot 746 \text{ км} = 1300,16 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

У точці V_3 :

$$\sigma_0(3) = 860,44 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} + 0,7146 \frac{\text{Вт}}{\text{км} \cdot \text{м}^2} \cdot 637 \text{ км} = 1315,64 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Таким чином, експериментально визначене середнє значення сонячної сталої буде рівне: $\bar{\sigma}_0 = (\sigma_0(1) + \sigma_0(2) + \sigma_0(3))/3 = 1309,87$ Вт/м². Отримане середнє значення сонячної сталої $\bar{\sigma}_0 = 1309,87$ Вт/м² наближено рівне значенню, яке фігурує в оцінці даної величини науковцями $\sigma_0 = 1367,5$ Вт/м². Похибка отриманих результатів при цьому рівна:

$$\Delta\sigma = \sigma_0 - \bar{\sigma}_0 = 1367,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} - 1309,87 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} = 57,63 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2};$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} \cdot 100\% = \frac{57,63 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}}{1367,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}} \cdot 100\% = 4,2\%.$$

Знаючи сонячну сталу, можна оцінити світимість Сонця та його ефективну температуру.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Точне вимірювання сонячної сталої необ-

хідне не лише астрономам, але і багатьом суміжним з нею наукам: геофізиці, кліматології, екології, тощо. Точні вимірювання сонячної сталої поза земною атмосферою і біля поверхні Землі, допоможуть вирішити екологічну проблему оцінки впливу діяльності людини на клімат Землі та на атмосферний шар озону (озоносферу). В роботі оцінено значення сонячної сталої за межами земної атмосфери, яке становить $\bar{\sigma}_0 = 1309,87 \text{ Вт/м}^2$, дана величина з похибкою $\varepsilon = 4,2\%$ співпадає із загальноприйнятим значенням.

Наведена в роботі методика оцінки числового значення величини сонячної сталої може бути використана на уроках природничих дисциплін, заняттях фізико-астрономічних гуртків та заняттях учнів-членів Малої академії наук України. Використання сучасних модульних датчиків (температури, вологості, руху, рівня, освітленості та присутності) дозволяє розширити комплекс загальнодоступних вимірювань фізичних величин шляхом конструювання нескладного вимірювального обладнання або модернізації існуючого.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Титко Р., Калініченко В.М. Відновлювальні джерела енергії (досвід Польщі для України): навчальний посібник. – Варшава: OWG, 2010. – 530 с.
2. Таранова Н.Б. Метеорологія і кліматологія: словник-довідник (основні терміни і поняття) / Н.Б. Таранова. – Тернопіль: Навчальна книга – Богдан, 2013. – 192 с.
3. Douglass D.H., Clader B.D. Climate sensitivity of the Earth to solar irradiance. *Geophys. Res. Lett.* 2002, 29(16). – P. 33-1–33-4. <https://doi.org/10.1029/2002GL015345>
4. John A.E. The Sun, the Earth, and near-earth space: a guide to the sun-earth system. – National Aeronautics and Space Administration, 2009. – 301 p.
5. Dufresne J.-L. The measurement of the solar constant by Claude Pouillet. *La Meteorology.* 2008, 60. – P. 36–43. <http://dx.doi.org/10.4267/2042/16943>
6. Sampson R.A. Sun. *Encyclopedia Britannica* (11-th ed.) / ed. by H. Chislom. – Cambridge: Cambridge University Press, 1911. V.26. – P. 87.
7. Захожай В.А., Захожай О.В. Основи елементарної астрономії: навчальний посібник. – Харків: ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2021. – 232 с.
8. Астрономічний календар 2022 / [ред. кол. А.П. Відьмаченко (гол. ред.) та ін.]. – Київ: Академперіодика, 2021. – 214 с.
9. Корсунь А.О. Земля : астрономічний енциклопедичний словник / [за заг. ред. І.А. Клімишина, А.О. Корсунь]. – Львів: Головна астрономічна обсерваторія НАН України: ЛНУ ім. Івана Франка, 2003. – С. 168.
10. Саратов І.Ю., Дядін Д.В. Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Метеорологія і кліматологія». – Харків: ХНАМГ, 2009. – 59 с.

REFERENCES:

1. Tytko, R., Kalinichenko, V.M. (2010) Vidnovliuvalni dzhherela enerhii (dosvid Polshchi dlia Ukrainy): navchalnyi posibnyk [Renewable energy sources (Polish experience for Ukraine): a study guide]. – Varshava: OWG. – 530 s. [in Ukrainian].
2. Taranova N.B. (2013) Meteorolohiia i klimatolohiia: slovnyk-dovidnyk (osnovni terminy i poniattia) [Meteorology and climatology: a glossary (basic terms and concepts)]. – Ternopil: Navchalna knyha – Bohdan. – 192 s. [in Ukrainian].
3. Douglass, D.H., Clader, B.D. Climate sensitivity of the Earth to solar irradiance // *Geophys. Res. Lett.* 2002, 29(16). – P. 33-1–33-4. <https://doi.org/10.1029/2002GL015345>
4. John, A.E. The Sun, the Earth, and near-earth space: a guide to the sun-earth system. – National Aeronautics and Space Administration, 2009. – 301 p.
5. Dufresne J.-L. The measurement of the solar constant by Claude Pouillet // J.-L. Dufresne. *La Meteorology.* 2008, 60. – P. 36–43. <http://dx.doi.org/10.4267/2042/16943>
6. Sampson, R.A. Sun. *Encyclopedia Britannica* (11-th ed.) / ed. by H. Chislom. – Cambridge: Cambridge University Press, 1911. V.26. Cambridge University Press. – P. 87.
7. Zakhozhai, V.A., Zakhozhai O.V. (2021) Osnovy elementarnoi astronomii: navchalnyi posibnyk [Fundamentals of elementary astronomy: a textbook]. – Kharkiv: KhNU im. V.N. Karazina. – 232 s. [in Ukrainian].
8. Astronomichniy kalendar 2022 [Astronomical calendar 2022] / [red. kol.: A.P. Vidmachenko (hol. red.) ta in.]. – Kyiv: Akadempriodyka, 2021. – 214 s. [in Ukrainian].
9. Korsun A.O. Zemlia : astronomichniy entsyklopedychnyi slovnyk [Earth. Astronomical encyclopedic dictionary] / [za zah. red. I.A. Klymyshyna, A.O. Korsun]. – Lviv: Holovna astronomichna observatoriia NAN Ukrainy: LNU im. Ivana Franka, 2003. – S. 168. [in Ukrainian].
10. Saratov, I.Yu., Diadin, D.V. (2009) Konspekt lektzii z navchalnoi dystsypliny «Meteorolohiia i klimatolohiia» [Lecture notes on the discipline «Meteorology and climatology»]. – Kharkiv: KNAMG. – 59 s. [in Ukrainian].

ЗМІСТ

Іванна ВАКАЛЮК, Ростислав ЯВОРСЬКИЙ, Оксана ЗАМУРУЄВА, Лілія КАТАНОВА, Микола СКІПАЛЬСЬКИЙ ФОТОВОЛЬТАІЧНІ МАТЕРІАЛИ: ПОТОЧНІ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА МАЙБУТНІ ВИКЛИКИ.....	3
Олег ВІЛІГУРСЬКИЙ, Микола СКІПАЛЬСЬКИЙ ВПЛИВ ЧАТ-БОТІВ ЗІ ШТУЧНИМ ІНТЕЛЕКТОМ НА ПРОЦЕС ВИКЛАДАННЯ КУРСІВ ІЗ ПРОГРАМУВАННЯ.....	13
Володимир ГОЛОВАЦЬКИЙ, Ігор ГОЛОВАЦЬКИЙ, Сергій ГОНЧАРУК ВПЛИВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КВАНТОВИХ ТОЧОК ТИПУ II (ЕФЕКТ ААРОНОВА – БОМА).....	19
Оксана ЗАМУРУЄВА, Віктор НАХОД АНАЛІЗ СТВОРЕННЯ МАТЕРІАЛЬНОЇ МОДЕЛІ СКЛАДНИХ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР.....	31
Володимир МИСЛІНЧУК, Валентин СІДЛЕЦЬКИЙ, Павло ШИГОРІН, Богдан НЕЧИПОРУК РЕАЛІЗАЦІЯ ТЕОРЕТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ПОТОКУ СОНЯЧНОЇ РАДІАЦІЇ НА ОСНОВІ СУЧАСНИХ МОДУЛЬНИХ ДАТЧИКІВ.....	37

CONTENTS

<i>Ivanna VAKALIUK, Rostyslav YAVORSKYI, Oksana ZAMURUIEVA, Lilia KATANOVA, Mukola SKIPALSKYI</i> PHOTOVOLTAIC MATERIALS: PRESENT EFFICIENCIES AND FUTURE CHALLENGES.....	3
<i>Oleh VILIHURSKYI, Mykola SKIPALSKYI</i> THE IMPACT OF CHATBOTS WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE ON THE PROCESS OF TEACHING PROGRAMMING COURSES.....	13
<i>Volodymyr HOLOVATSKYI, Ihor HOLOVATSKYI, Serhiy HONCHARUK</i> THE MAGNETIC FIELD EFFECT ON THE OPTICAL PROPERTIES OF TYPE II QUANTUM DOTS (AHARONOV – BOHM EFFECT).....	19
<i>Oksana ZAMURUIEVA, Viktor NAKHOD</i> ANALYSIS OF THE CREATION OF A MATERIAL MODEL OF COMPONENT PROCESSES OF FORMATION OF HETEROSTRUCTURES.....	31
<i>Volodymyr MYSLINCHUK, Valentyn SIDLETSKYI, Pavlo SHYGORIN, Bohdan NECHYPORUK</i> IMPLEMENTATION OF A THEORETICAL MODEL FOR DETERMINING THE VALUE OF SOLAR RADIATION FLUX BASED ON MODERN MODULAR SENSORS.....	37

ФІЗИКА ТА ОСВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Випуск 3

Коректура • Ірина Миколаївна Чудеснова

Комп'ютерна верстка • Марина Сергіївна Михальченко

Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсет. Цифровий друк. Ум. друк. арк. 5,35. Замов. № 0124/027. Наклад 300 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1

Телефон +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: mailbox@helvetica.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.