

ВІДГУК

офіційного опонента

Костильова Віталія Петровича

на дисертаційну роботу Кравченка Олександра Вікторовича

«Дослідження і розробка високоефективних одиничних концентраторних приймачів на комбінованих теплопровідних платах для гібридних сонячних модулів»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали

Актуальність теми

Сонячна енергетика стала ключовим сектором світової електроенергетики, яка швидко зростає та зростатиме у найближчій перспективі. Актуальність дисертаційного дослідження Кравченка О.В. полягає у розробці високоефективних CPV приймачів для гібридних сонячних модулів на теплопровідних комбінованих платах з використанням сучасних поліімідних (ПІ) композиційних плівок, які за рахунок високої теплопровідності (0,5 – 2,0 Вт/м×К та більше) покращать тепловідведення та забезпечать стабільну роботу CPV приймачів.

В дисертації роботі вирішується комплекс загальних теплофізичних проблем концентраторних сонячних модулів фундаментального і прикладного характеру.

Тема дисертаційної роботи пов'язана з виконанням науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт кафедри «Мікро- та наноелектроніки» НТУ «ХПІ», ІСМА НАН України та ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ». Результати дисертаційної роботи отримано в рамках таких науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт:

1) НДР «Створення Українсько-Німецьких центрів передового досвіду в Україні»: «Advanced nanoparticles for applications in optoelectronics, scintillator detectors and electroanalytical chemistry, NanoScint» (листопад 2021 – квітень 2023) (№ 01DK21007) – замовник Федеральне міністерство освіти та наукових досліджень Німеччини (BMBF);

2) ДКР «Розробка та дослідження чутливих шарів та прототипів для проекту FoCal» (Контракт № РМ2032955 від 08.10.2020 р.), ДКР «Розробка та

дослідження багатосенсорних детекторних лінійок для проекту FoCal» (Контракт № 12202021 від 20.12.2021 р.) та ДКР «Розробка та дослідження можливості створення тонких чутливих шарів на основі підходу внутрішнього монтажу» (Контракт № 10252022 від 25.10.2022 р.) – замовник Університет Бергену (м. Берген, Норвегія);

3) ДКР «Дослідження матеріалів радіатора та постачання виготовлених демонстраторів CPV» (Угода на дослідження № TGM C79 від 18.06.2024 р.) – замовник Ricerca sul Sistema Energetico - RSE S.p.A. (м. Мілан, Італія).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.

Положення та висновки, наведені в дисертаційній роботі Кравченка О. В., в достатній мірі обґрунтовані як з наукового, так і з технічного поглядів. Обґрунтованість отриманих у роботі наукових положень, висновків і рекомендацій базується на комплексному підході до вивчення визначених об'єктів, а також на використанні новітніх експериментальних і аналітичних методів дослідження із застосуванням сучасної апаратури.

Достовірність результатів досліджень.

Достовірність результатів теоретичних досліджень не викликає сумнівів і підтверджується результатами відповідних експериментальних досліджень.

Наукові результати застосовані під час створення одиничних CPV приймачів на основі комбінованої теплопровідної плати для гібридних сонячних модулів.

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

1. На основі результатів моделювання та експериментальних досліджень вперше в Україні розроблено способи виготовлення гнучких теплопровідних лакофольгових шаруватих ПІ матеріалів з шарами тонких ($25 \square 30$ мкм) високонаповнених теплопровідних ПІ композитів ($40 \square 70$ об. %), які дозволили підвищити теплопровідність ПІ шарів з $0,12 \square 0,2$ Вт/(м×К) до $0,8 \square 2,0$ Вт/(м×К) та вище.

2. Встановлено, що поліімід-фторопластові термозварювані плівки на алюмінієвих основах забезпечують високі електричні, механічні та теплові властивості плат. На основі отриманих результатів вперше в Україні запропоновано та розроблено способи виготовлення комбінованих друкованих плат на алюмінієвих

основах з промисловими тонкими поліімід-фторопластовими термозварюваними плівками з теплопровідністю до $0,46 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$;

3. Встановлено, що комбіновані плати із використанням удосконалених односторонніх лакофольгових діелектриків суттєво спростили та зменшили витрати на процес виготовлення комбінованих плат із забезпеченням їх високих електричних, механічних та теплових властивостей порівнюючи з виготовлення плат методом термокомпресії. На основі отриманих результатів запропоновано та розроблено способи виготовлення комбінованих друкованих плат на основі удосконалених високотеплопровідних односторонніх лакофольгових діелектриків.

4. Встановлено, що комбіновані плати на основі багат шарової теплопровідної термозварюваної ПМФ плівки Kapton®120FMT 616 компанії DuPont товщиною 30 мкм з фторполімерними двосторонніми покриттями з теплопровідністю $0,46 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$ та комбінованих плат на основі удосконалених односторонніх лакофольгових мідь-III діелектриків з товщиною високотеплопровідних композиційних III шарів до 60 мкм з теплопровідністю до $4,5 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$, забезпечують за сприятливих умов експлуатації при природній конвекції та температурі навколишнього середовища $T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ найкращі теплові характеристики електронних модулів з точки зору рекомендованих робочих температур $< 70 - 80 \text{ }^\circ\text{C}$. На основі отриманих результатів вперше запропоновано нові підходи для виготовлення вдосконалених комбінованих плат на алюмінієвих основах з тонкими теплопровідними III діелектриками для CPV приймачів, які дозволили забезпечити ефективність відводу тепла від сонячних елементів для підтримки їх високої надійності роботи та підвищення строку експлуатації.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.

Отримані пошукачем результати мають також практичну значимість.

Розроблено технологічний процес виготовлення комбінованих плат на теплопровідних основах із застосуванням теплопровідних багат шарових термозварюваних плівок з теплопровідність $0,12 - 0,46 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$.

Розроблено технологічний процес виготовлення тонких теплопровідних лакофольгових шаруватих III матеріалів з шарами тонких ($25 \square 30 \text{ мкм}$)

високонаповнених теплопровідних ПІ композитів з підвищеними значеннями теплопровідності від 0,8 до 2,0 Вт/(м×К) та більше.

Розроблено технологічний процес виготовлення комбінованих плат із застосуванням тонких теплопровідних лакофольгових шаруватих ПІ матеріалів з шарами тонких (25 □ 30 мкм) високонаповнених теплопровідних ПІ композитів з підвищеними значеннями теплопровідності від 0,8 до 2,0 Вт/(м×К) та більше.

Розроблено технологічний процес виготовлення CPV приймачів для гібридних сонячних модулів на основі комбінованих плат із застосуванням теплопровідних ПІ композиційних плівок з підвищеними значеннями теплопровідності.

Науково-технічні роботи захищено заявкою на патент України на корисну модель № и 2024 01467 «Спосіб виготовлення гнучкого теплопровідного лакофольгового поліімідного матеріалу».

Результати дисертації впроваджено в технологічний процес ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ» (м. Харків), що підтверджено Актом про провадження результатів дисертаційної роботи.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Результати досліджень опубліковані у 17 наукових працях, серед яких: 6 статей у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України, 2 статті в наукових фахових виданнях України, які включені до міжнародної наукометричної бази Scopus, 1 заявка на патент України на корисну модель, 8 тез у матеріалах конференцій.

Вклад здобувача у роботах, що опубліковані у співавторстві, зазначена у дисертаційній роботі і є вагомим і доведеним.

Опубліковані матеріали повністю відображають зміст дисертації та відповідають вимогам пункту 8 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. №44.

Оцінка змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Кравченка О.В. складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, 3 додатків.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, показана її наукова і практична цінність, сформульовані мета і задачі дослідження, які необхідно вирішити для її досягнення, описано зв'язок дисертації з науковими планами та темами, приведена апробація дисертаційної роботи і публікації.

У першому розділі подано огляд сучасної літератури стосовно гібридних сонячних модулів, що поєднують концентраторну (CPV) та планарну (PV) фотовольтаїку, ефективних механізмів тепловідведення від сонячних елементів у високоефективних концентраторних приймачах, конструктивних рішень та матеріалів для комбінованих теплопровідних плат, поліімідних композиційних матеріалів та методів введення мікро- та наночастинок у поліімідну матрицю. Здійснено постановку наукового завдання.

У другому розділі подано результати дослідження теплопровідних поліімідних композиційних матеріалів на основі розчинів поліамідної кислоти Pyre ML RC 5069 і дисперсних наповнювачів з мікро- та нанорозмірними частинками AlN. Експериментально підтверджено достовірність застосування розроблених моделей для прогнозування теплопровідності композиційних матеріалів із вмістом наповнювача 30 – 50 об. % методом стаціонарного теплового потоку. А також встановлено, що ефективна теплопровідність мікронного AlN досягає 50 – 60 Вт/(м×К).

У третьому розділі подано результати дослідження комбінованих друкованих плат на алюмінієвих основах із тонкими поліімідними діелектриками, зокрема теплопровідними, покритими мідною або алюмінієвою фольгою. Наведено розроблені конструктивно-технологічні рішення для виготовлення плат із застосуванням промислових термозварюваних ПП плівок з фторполімерними покриттями (теплопровідність 0,12 – 0,46 Вт/(м×К)) та безадгезивних мідь-ПП та алюміній-ПП лакофольгових діелектриків (теплопровідність поліімідного шару — 0,12 – 2,0 Вт/(м×К) і вище).

У четвертому розділі подано теоретичні та експериментальні дослідження теплових процесів в електронних модулях підвищеної потужності на основі комбінованих плат з алюмінієвими підкладками, виготовлених із використанням теплопровідних ПП діелектриків. Наведено результати теоретичного моделювання

теплових процесів в електронних модулях підвищеної потужності на основі комбінованих плат з алюмінієвими підкладками, виготовлених із використанням серійних термозварюваних поліїмід-фторополімерних плівок (ПМФ) із теплопровідністю $0,12 - 0,46 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$, а також удосконалених лакофольгових діелектриків із теплопровідністю ПІ шарів до $4,5 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$. Встановлено, що технічні рішення на основі багат шарової ПМФ плівки Kapton® 120FMT616 (30 мкм, теплопровідність $0,46 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$) та односторонніх мідь-ПІ лакофольгових діелектриків із композиційними ПІ шарами (60 мкм, до $4,5 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$) забезпечують найкращі теплові характеристики в умовах природної конвекції при температурі навколишнього середовища 25°C , сприяючи дотриманню робочих температур у межах $70-80^\circ\text{C}$ та підвищенню надійності і довговічності модулів.

У п'ятому розділі розроблено проектний варіант одиничного концентраторного приймача на базі триперехідного СЕ 3С44 виробництва Azur Space Solar Power GmbH (Німеччина). Виготовлено експериментальний зразок приймача та перевірено його функціональність за стандартних умов АМ1 ($1000 \text{ Вт}/\text{м}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$). Проведено оптимізацію конструкції, внаслідок чого мідну фольгу (100 мкм) замінено на алюмінієву (150 мкм), що забезпечило зменшення маси, зниження вартості та підвищення корозійної стійкості без потреби в додатковій обробці.

Висновки до розділів та за результатами роботи достатньо чітко сформульовані та відповідають змісту дисертаційної роботи.

Список використаних джерел із 80-х найменувань повний, сучасний і включає переважно зарубіжні публікації світового рівня.

Анотація відображає основний зміст дисертації та достатньо повно розкриває наукові результати та практичну цінність роботи.

Академічна доброчесність

Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях, у яких висвітлені основні наукові результати дисертації, не виявлено.

Усі результати, які винесено автором на захист, отримані самостійно і містяться в опублікованих роботах. У роботах, опублікованих у співавторстві, використані тільки ті ідеї, положення та розрахунки, які є результатом особистих

наукових пошуків.

По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:

У вступі (с.7) наведено спірне твердження «Температура концентратора СЕ залежить від його площі, тому що при збільшенні площі СЕ збільшується виділення тепла».

Не точне твердження «...СЕ оптимізовані за шириною забороненої зони для розширення діапазону поглинання сонячного спектру, що призводить до менших втрат через термалізацію...» (с.17), оскільки розширення діапазону поглинання сонячного спектру є необхідною умовою, проте не достатньою.

У розділі 2 наведено результати експериментальних досліджень теплопровідності дослідних зразків композиційних силіконових матеріалів, проте відсутні дані щодо експериментальних досліджень теплопровідності високонаповнених композиційних поліімідних матеріалів.

У підрозділі 5.3.2 наведено опис процесу паяння компонентів на комбіновану плату із застосуванням двох типів паяльних паст — AIM Solder NC254 Sn62Pb36Ag2 ($T = 183^{\circ}\text{C}$) та Mechanic V8B45/n42Bi58 ($T = 138^{\circ}\text{C}$), проте відсутнє пояснення чому саме було обрано пасту з більш низькою температурою.

В розділі 5 наведено результати теоретичних досліджень відводу тепла від сонячного елемента у одиничних CPV приймачах при концентрації сонячного випромінювання 400x, але відсутні результати про експериментальні дослідження.

В дисертації зустрічаються недоліки стилістичного, синтаксичного та орфографічного характеру, зокрема «не в змозі» замість «не здатні» (с.7), «більш вищий» замість «вищий» (с.7), «піднебіння» замість «неба» (с.7), «змішання» замість «змішування» (с.34), «їх в об'єм» замість «у їхній об'єм», «продуктивність» замість «ефективність», а також інших похибок.

Проте вказані недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи. Дисертація є актуальною і має високу наукову цінність та практичну значимість.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Кравченка Олександра Вікторовича «Дослідження і розробка високоефективних одиничних концентраторних приймачів на

комбінованих теплопровідних платах для гібридних сонячних модулів» за своїм змістом відповідає спеціальності 105 – Прикладна фізика та наноматеріали. Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, що розв'язує важливу науково-практичну задачу, яка полягає в розробці одиничних CPV приймачів для гібридних сонячних модулів на інноваційних теплопровідних комбінованих платах з використанням сучасних ПІ композиційних плівок, які покращують тепловідведення та забезпечують стабільну роботу CPV приймачів за рахунок високої теплопровідності тонких ПІ діелектриків (0,5 – 2,0 Вт/м×К та більше).

Подана дисертаційна робота «Дослідження і розробка високоефективних одиничних концентраторних приймачів на комбінованих теплопровідних платах для гібридних сонячних модулів» Кравченка О. В. відповідає спеціальності 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали», відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а саме вимогам пунктів 6, 7, 8 і 9 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. №44, а здобувач Кравченко Олександр Вікторович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали.

Офіційний опонент

Провідний науковий співробітник відділу
"Центр колективного користування науковим
обладнанням" ІФН ім. В.Є.Лашкарьова
НАН України, д.ф.-м.н., проф.
30.05.2025 р.

 Віталій КОСТИЛЬОВ

Підпис В.П. Костильова засвідчую:

В.о. вченого секретаря ІФН ім. В.Є.Лашкарьова
НАН України, к.ф.-м.н., с.н.с.



 Роман РЕДЬКО