

РЕЦЕНЗІЯ

рецензента, к.т.н., доцента Кіріченко Михайла Валерійовича

на дисертаційну роботу Кравченка Олександра Вікторовича

«Дослідження і розробка високоефективних одиничних концентраторних приймачів на комбінованих теплопровідних платах для гібридних сонячних модулів»

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали

Детальний аналіз дисертаційної роботи Кравченка Олександра Вікторовича на тему «Дослідження і розробка високоефективних одиничних концентраторних приймачів на комбінованих теплопровідних платах для гібридних сонячних модулів», що представлена для захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут», дає змогу зробити комплексний висновок щодо її актуальності, ступеня обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, достовірності та значущості отриманих результатів, наукової новизни, теоретичної та практичної цінності, надати загальну оцінку дисертації.

1. Актуальність теми та зв'язок з науковими планами і програмами

Гібридні сонячні модулі (CPV/PV), які поєднують у собі фотоелектричну та концентраторну фотоелектричну технології, є інноваційними пристроями, що інтегрують дві технології для максимізації ефективності перетворення сонячної енергії. Кожна з цих технологій має свої переваги, і їхнє комбінування дозволяє ефективно використовувати як пряме сонячне випромінювання, так і розсіяне світло. Концентраторний фотоелектричний (CPV) приймач є ключовим елементом CPV/PV, оскільки він забезпечує збільшення інтенсивності сонячної енергії, що падає на сонячний елемент (СЕ), тим самим збільшуючи ефективність використання сонячної енергії.

Однак однією з основних проблем у CPV приймачів є розсіювання надлишкового тепла, яке утворюється через обмежене електричне перетворення сонячної енергії. Збільшення коефіцієнтів концентрації дає змогу вилучати більш високу потужність при використанні меншого розміру SE, але при цьому одночасно підвищується їхня робоча температура. Температура концентратора SE залежить від його площі, тому що при збільшенні площі SE збільшується виділення тепла. Тому при широкому застосованих в даний час в CPV модулях сучасних багатоперехідних SE з розмірами $3 \times 3 \text{ мм}^2$, $5,5 \times 5,5 \text{ мм}^2$ і $10 \times 10 \text{ мм}^2$ з максимальною ефективністю порядку 42,5 %, 41,6 % і 40,9 % відповідно, вкрай бажано підтримувати температури SE в модулях CPV в межах $50 - 80^\circ\text{C}$ для забезпечення їх високої продуктивності. Застосування радіаторів, зазвичай більшої площі, дає змогу додатково розсіювати тепло від CPV приймачів у навколишнє середовище. Так, традиційні пасивні системи охолодження із застосуванням мідних плоских тепловідводів мають гарний потенціал для підтримання робочих температур SE в CPV приймачах нижче за їхні експлуатаційні межі при високих концентраціях до 500 крат навіть за несприятливих умов їхньої експлуатації.

У зв'язку з цим, актуальною науковою задачею є розробка високоефективних CPV приймачів для гібридних сонячних модулів на інноваційних теплопровідних комбінованих платах з використанням сучасних поліімідних (ПІ) композиційних плівок, які можуть покращити тепловідведення та забезпечити стабільну роботу CPV приймачів за рахунок високої теплопровідності тонких ПІ діелектриків ($0,5 - 2,0 \text{ Вт/м}\cdot\text{K}$ та більше).

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертація виконувалась відповідно до наукової програми 105 «Прикладна фізика та наноматеріали», яка була впроваджена на кафедрі мікро- та наноелектроніки НТУ «ХП».

Проведені дослідження тісно пов'язані з науково-дослідними роботами ІСМА НАН України та дослідно-конструкторськими роботами ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ» а саме:

- 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 (BMBWF);

- ДКР «Розробка та дослідження чутливих шарів та прототипів для проекту FoCal» (Контракт № PM2032955 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);

- 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).

3. Наукова новизна одержаних результатів

Дисертація містить наукову новизну, яка полягає у наступних положеннях, що виносяться до захисту:

– Вперше в Україні розроблено способи виготовлення гнучких теплопровідних лакофольгових шаруватих ПІ матеріалів з шарами тонких (25 – 30 мкм) високонаповнених теплопровідних ПІ композитів (40 – 70 об. %), які дозволили підвищити теплопровідність ПІ шарів з 0,12 – 0,2 Вт/(м×К) до 0,8 – 2,0 Вт/(м×К) та більше;

– 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 Вт/(м×К), які дозволяють забезпечити високі електричні, механічні та теплові властивості;

– Вперше розроблено нову конструкцію комбінованих плат та метод їх виготовлення на основі удосконалених високотеплопровідних односторонніх лакофольгових діелектриків, які суттєво спростили та зменшили витрати на процес виготовлення комбінованих плат із забезпеченням їх високих електричних, механічних та теплових властивостей порівнюючи з виготовлення плат за методом термокомпресії;

– 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.

4. Практична цінність одержаних результатів та рекомендації щодо їх подальшого використання

Розроблено технологічний процес виготовлення комбінованих плат на теплопровідних основах із застосуванням теплопровідних багат шарових термозварювальних 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 – 30 мкм) високонаповнених теплопровідних III композитів з підвищеними значеннями теплопровідності від 0,8 до $2,0 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$ та більше;

Розроблено технологічний процес виготовлення комбінованих плат із застосуванням тонких теплопровідних лакофольгових шаруватих III матеріалів з шарами тонких (25 – 30 мкм) високонаповнених теплопровідних III композитів з підвищеними значеннями теплопровідності від 0,8 до $2,0 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$ та більше;

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

Запропоновані конструктивно-технологічні рішення та експериментально підтверджені результати можуть бути використані у

виробництві концентраторних фотоелектричних приймачів і електронних модулів високої потужності та для інших застосувань, що потребують ефективного тепловідведення.

5. Повнота викладення матеріалів дисертації в наукових працях, які опубліковані автором. Основні матеріали дисертації опубліковано у 6 статтях у наукових періодичних виданнях України, в 2 статтях у наукових періодичних фахових виданнях баз SCOPUS та в 8 матеріалах міжнародних наукових конференцій.

6. Аналіз змісту дисертації. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації

Робота Кравченка О.В. є завершеною науковою роботою, містить анотацію – українською та англійською мовами, вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел і додатки.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної задачі, пов'язаної з дослідженням та розробкою високоефективних одиничних концентраторних приймачів для гібридних сонячних модулів на теплопровідних комбінованих платах з використанням сучасних поліімідних (ПІ) композиційних плівок з підвищеними значеннями теплопровідності.

Об'єкт дослідження – процес відводу тепла від сонячних елементів у одиничних концентраторних приймачах на комбінованих теплопровідних платах.

Метою даної роботи було розробка високоефективних одиничних концентраторних приймачів для гібридних сонячних модулів на основі комбінованих плат з використанням теплопровідних ПІ композиційних плівок.

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.

Перший розділ «Огляд інформаційних джерел за темою дисертаційної роботи» присвячений огляду сучасної літератури стосовно гібридних сонячних модулів, що поєднують концентраторну (CPV) та планарну (PV) фотовольтаїку, розглянуто механізми тепловідведення від сонячних елементів у високоефективних концентраторних приймачах. Розглянуто конструктивні рішення та матеріаліали для комбінованих теплопровідних плат. Розглянуто методи тримання поліїмідних композиційних матеріалів та методи введення мікро- та наночастинок у поліїмідну матрицю.

Другий розділ «Теплопровідні композиційні лакофольгові поліїмідні діелектрики» присвячено дослідженню теплопровідних поліїмідних композиційних матеріалів на основі розчинів поліамідної кислоти Pyre ML RC 5069 і дисперсних наповнювачів з мікро- та нанорозмірними частинками AlN. Обґрунтовано вибір технологічних схем виготовлення, проведено структурне моделювання та розрахунок ефективної теплопровідності композитів у середовищі Comsol Multiphysics. Розроблено способи виготовлення тонких мікро- і наноструктурованих теплопровідних ПІ шарів і односторонніх алюміній-поліїмідних лакофольгових діелектриків з теплопровідністю 0,8 – 2,0 Вт/(м×К). Досліджено механічні, електричні та теплові властивості експериментальних зразків. Підтверджено достовірність застосування розроблених моделей для прогнозування теплопровідності композиційних матеріалів із вмістом наповнювача 30 – 50 об. %, а також встановлено, що ефективна теплопровідність мікронного AlN досягає 50 – 60 Вт/(м×К).

У третьому розділі «Комбіновані друковані плати з теплопровідними поліїмідними діелектриками» запропоновано нові підходи до виготовлення вдосконалених комбінованих друкованих плат на алюмінієвих основах із тонкими поліїмідними діелектриками, зокрема теплопровідними, покритими мідною або алюмінієвою фольгою. Розроблено конструктивно-технологічні рішення для виготовлення плат із застосуванням промислових термозварюваних ПІ плівок з фторполімерними покриттями (теплопровідність 0,12 – 0,46 Вт/(м×К)) та безадгезивних мідь-ПІ та

алюміній-III лакофольгових діелектриків (теплопровідність поліімідного шару — $0,12 - 2,0 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$) і вище). Досліджено механічні та електричні характеристики експериментальних зразків комбінованих плат для використання в електронних модулях і друкованих вузлах, зокрема у складі Chip-on-board та Chip-on-flex технологій.

Четвертий розділ «Дослідження теплових властивостей електронних модулів на комбінованих платах з поліімідними діелектриками» присвячено теоретичному та експериментальному дослідженню теплових процесів в електронних модулях підвищеної потужності на основі комбінованих плат з алюмінієвими підкладками, виготовлених із використанням серійних термозварюваних поліімід-фторополімерних плівок (ПМФ) із теплопровідністю $0,12 - 0,46 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$, а також удосконалених лакофольгових діелектриків із теплопровідністю III шарів до $4,5 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$. Розроблено конструкції та виготовлено експериментальні зразки електронних модулів. Виконано експериментальні дослідження ефективності відводу тепла від напівпровідникових пристроїв у експериментальних зразках на основі різних типів комбінованих плат з III діелектриками.

П'ятий розділ «Виготовлення та дослідження одиничних CPV приймачів на основі комбінованої теплопровідної плати для гібридних сонячних модулів» присвячений розробці та дослідженню одиничного концентраторного приймача на базі триперехідного сонячного елемента 3С44 виробництва Azur Space Solar Power GmbH (Німеччина). Проведено теоретичні дослідження теплових моделей CPV-приймачів із комбінованими платами на алюмінієвих основах, виготовлених із використанням термозварюваних ПМФ плівок (теплопровідність $0,46 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$) та удосконалених лакофольгових діелектриків (теплопровідність III шарів — до $2 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$). Відпрацьовано процеси паяння сонячних елементів, захисних діодів і роз'ємів, а також зварювання та контроль якості з'єднань між плоскими алюмінієвими виводами гнучких плат з Ag/Au контактами та контактними площинками друкованих плат. Виготовлено експериментальний зразок приймача та перевірено його функціональність за стандартних умов

AM1 (1000 Вт/м², T = 25 °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, сформульовані у роботі, висвітлюють результати дослідження як вирішення висунутих в дисертації завдань. В цілому висновки відповідають вимогам, які висуваються до результатів дисертаційного дослідження на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Список літератури досить широко охоплює предметне поле дослідження, певною мірою відображає опрацювання автором значної кількості наукових джерел.

Додаток містить інформацію про практичне впровадження результатів дисертації.

7. Достовірність отриманих результатів та висновків

Висока достовірність результатів була гарантованою завдяки застосуванню сучасного експериментального обладнання, використанню оригінальних методів та методик, які показали свою ефективність та були апробовані під час попередніх досліджень, визнаних науковою спільнотою, а також високим фаховим рівнем співавторів наукових публікацій.

8. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладення наукових положень та результатів в опублікованих працях

Дисертація виконана з дотримання вимог академічної доброчесності, отримані результати дають підстави говорити про оригінальність роботи. У тексті містяться авторські ідеї, і не виявлено використання ідей інших науковців без посилання на їх роботи.

Основні ідеї автора та результати дослідження викладено у шести фахових наукових статтях, двох наукових статтях, що індексуються базою SCOPUS, здобувач активно приймав участь в міжнародних наукових та

науково-практичних конференціях з результатами, що викладені у дисертаційному дослідженні.

9. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

1. У дисертації наведено результати досліджень механічних та електричних властивостей експериментальних зразків комбінованих друкованих плат, однак ці дані подано у вигляді опису в тексті. Для зручності сприйняття та можливості порівняння даних доцільно було б представити ці результати в таблиці.

2. У роботі для дослідження теплових властивостей було використано плату розміром 35×35 мм², проте не розглянуто, як змінюються теплові характеристики при зміні розмірів плат. Було б доцільно доповнити роботу графіком залежності максимальної робочої температури в області джерела тепла від розміру плати. Такий аналіз дозволив би краще оцінити вплив розмірів комбінованої плати на її теплові характеристики.

3. У роботі вказано, що теплова потужність, яка розсіюється в сонячному елементі, становить 2,6 Вт, однак не пояснюється, як саме було визначено це значення. Доцільно було б навести розрахунок теплової потужності, яка розсіюється в сонячному елементі.

4. Робота містить нечисленні стилістичні та граматичні помилки, які не заважають розумінню її змісту.

10. Висновки

Дисертаційна робота Кравченка Олександра Вікторовича є завершеною науково-дослідною роботою, яка містить науково-обґрунтовані результати, має наукову новизну та дає перспективи подальших досліджень. Тема дослідження відповідає галузі знань 10 – «Природничі науки» та спеціальності 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали».

Отже, враховуючи актуальність теми, отримані результати та практичну значущість вважаю, що дисертаційна робота Кравченка Олександра Вікторовича «Дослідження і розробка високоефективних одиничних концентраторних приймачів на комбінованих теплопровідних платах для гібридних сонячних модулів» відповідає вимогам 6, 7, 8, 9

«Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціальної вченої ради Закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» від 12.01.2022 р. № 44 та вимогам до оформлення дисертації МОН України від 12.01.2017 № 40, а сам автор, Кравченко Олександр Вікторович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

Рецензент – кандидат технічних наук,
доцент кафедри мікро- та наноелектроніки
Національного Технічного Університету
«Харківський Політехнічний Інститут»

