

ВІДГУК

офіційного опонента

Накашидзе Лілії Валентинівни

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 енергія є однією з найбільш перспективних джерел енергії, оскільки вона є дешевою, екологічно чистою та відновлюваною. Актуальність дисертаційного дослідження Кравченка О.В. полягає у розробці високоефективних CPV приймачів для гібридних сонячних модулів на інноваційних теплопровідних комбінованих платах з використанням сучасних поліімідних (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 \times К та більше).

В дисертаційних дослідженнях вирішуються комплекс загальних проблем фундаментального і прикладного характеру. Розроблено способи виготовлення тонких теплопровідних мікро- і наноструктурованих композиційних ПІ покриттів і шарів, а також односторонніх мікро- і наноструктурованих композиційних лакофольгових алюміній-ПІ діелектриків з теплопровідністю ПІ шарів від $0.8 - 2.0$ Вт/(м \times К) та більше. Досліджено основні механічні та електричні властивості експериментальних зразків односторонніх теплопровідних алюміній-ПІ лакофольгових діелектриків. Проведено структурне моделювання та розрахунки ефективної теплопровідності ПІ-композитів із наповнювачами частинок AlN та підтверджено достатню практичну точність застосування розроблених структурних моделей та способу розрахунку ефективних теплопровідностей при проектуванні різних типів теплопровідних середньонаповнених (30 – 50 об. %) композиційних полімерних матеріалів. Розроблено та виготовлено комбіновані друковані плати на

алюмінієвих основах із використанням промислових тонких III-плівок з термозварюваними фторполімерними покриттями Teflon® FEP, а також безадгезивних лакофольгових мідь-III та алюміній-III діелектриків із теплопровідністю III-шарів до $2,0 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$ та більше. Досліджено механічні, електричні та теплові характеристики розроблених комбінованих плат, що підтвердило їхню відповідність вимогам електронних модулів високої потужності. Досліджено теплові моделі CPV приймача на основі комбінованої плати з використанням термозварювальної плівки з теплопровідністю $0,46 \text{ Вт}/\text{м}\times\text{К}$, а також на основі комбінованої плати з використанням лакофольгового мідь-III діелектрику з теплопровідністю композиційного III шару порядку $2,0 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$. Розроблено та виготовлено одиничні CPV приймачі на удосконалених комбінованих платах з III діелектриками. Обробовано технологічний процес складання CPV приймачів на комбінованих платах з використанням термозварювальної плівки, а також на основі комбінованої плати з використанням лакофольгового мідь-III діелектрику з теплопровідним композиційним III шаром.

Проведені дослідження тісно пов'язані з виконанням науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт кафедри «Мікро- та наноелектроніки» ІНТУ «ХІП», ІСМА НАН України та ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ІНУ». Основні результати дисертаційної роботи отримано в рамках наступних науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт:

1) ПДР «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);

2) 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);

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 сучасних технологій та вимірювальних комплексів.

Достовірність результатів досліджень.

Достовірність результатів теоретичних досліджень підтверджується результатами відповідних експериментальних досліджень.

Наукові результати впроваджені в процесі створення одиничних CPV приймачів на основі комбінованої теплопровідної плати для гібридних сонячних модулів.

До основних нових наукових результатів дисертації можна віднести наступне:

1. Досліджено вплив об'ємного вмісту мікрочастинок AlN на ефективну теплопровідність поліімідних композиційних шарів із використанням чисельного моделювання в середовищі Comsol Multiphysics. Встановлено, що збільшення вмісту нановишочача до 50 об.% дозволяє досягти теплопровідності майже до $-2.0 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$. На основі результатів моделювання та експериментальних досліджень вперше в Україні розроблено способи виготовлення гнучких теплопровідних лакофольгових шаруватих III матеріалів з шарами тонких (25 – 30 мкм) високонановишених теплопровідних III композитів (40 – 70 об. %), які дозволили підвищити теплопровідність III шарів з $0.12 - 0.2 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$ до $0.8 - 2.0 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$ та вище.

2. Досліджено механічні, теплофізичні та електрофізичні властивості промієлових поліімід-фторопластових термозварюваних плівок у складі

багатошарових структур на алюмінієвих основах для застосування в комбінованих друкованих платах. Встановлено, що термозварювальні плівки 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 $0,46 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$:

3. Досліджено конструктивні особливості та технологічні підходи до створення комбінованих друкованих плат із використанням удосконалених односторонніх лакофольгових діелектриків з підвищеною теплопровідністю III шарів $0,8 - 2,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ та вище. Встановлено, що комбіновані плати із використанням удосконалених односторонніх лакофольгових діелектриків суттєво спростили та зменшили витрати на процес виготовлення комбінованих плат із забезпеченням їх високим електричним, механічним та тепловим властивостям порівнюючи з виготовлення плат методом термокомпресії. На основі отриманих результатів вперше в Україні запропоновано та розроблено способи виготовлення комбінованих друкованих плат на основі удосконалених високотеплопровідних односторонніх лакофольгових діелектриків.

4. Досліджено процес відводу тепла від напівпровідникових елементів в електронних модулях з підвищеною потужністю на основі комбінованих плат з використанням серійних термозварювальних III-фторопластовими плівок, а також на основі лакофольгових діелектриків. Встановлено, що комбіновані плати на основі багатошарової теплопровідної термозварювальної ПМФ плівки Kaption®120FMT 616 компанії DuPont товщиною 30 мкм з фторполімерними двосторонніми покриттями з теплопровідністю $0,46 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ та комбінованих плат на основі удосконалених односторонніх лакофольгових мідь-III діелектриків з товщиною високотеплопровідних композиційних III шарів до 60 мкм з теплопровідністю до $4,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, 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 результати мають практичне значення. Так в дисертації розроблено технологічний процес виготовлення комбінованих плат на теплопровідних основах із застосуванням теплопровідних багатшарових термозварювальних плівок з теплопровідністю $0,12 - 0,46 \text{ Вт}/(\text{м}\times\text{К})$. Розроблено технологічний процес виготовлення тонких теплопровідних лакофольгових шаруватих III матеріалів з шарами тонких ($25 - 30 \text{ мкм}$) 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 ($25 - 30 \text{ мкм}$) 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.

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

Результати дисертації впроваджено в технологічний процес ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ» (м. Харків). Це 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 тезисів у матеріалах конференцій.

Участь здобувача у роботах, що опубліковані у співавторстві зазначена у дисертаційній роботі.

Опубліковані матеріали в повній мірі відображають зміст дисертації та відповідають вимогам пункту 8 Порядку приєудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про приєудження 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, конструктивних рішень та матеріалів для комбінованих теплопровідних плат, ефективних механізмів тепловідведення від сонячних елементів у високоефективних концентраторних приймачах, полімідних композиційних матеріалів та методів введення мікро- та наночастинок у полімідну матрицю. Здійєнено постановку наукового завдання.

У другому розділі подано результати проектування та дослідження теплопровідних полімідних композиційних матеріалів на основі розчинно-поліамідної клеючої Euge MI 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 III шарів і односторонніх алюміній-полімідних 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 запропоновано нові підходи до виготовлення вдосконалених комбінованих друкованих плат на алюмінієвих основах із тонкими поліімідними 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-ПІ лакофольгових діелектриків (теплопровідність поліімідного шару — 0,12 – 2,0 Вт/(м·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.

У четвертому розділі проведено теоретичне моделювання теплових процесів в електронних модулях підвищеної потужності на основі комбінованих плат з алюмінієвими підкладками, виготовлених із використанням серійних термозварюваних поліімід-фторполімерних плівок (ПІМФ) із теплопровідністю 0,12 – 0,46 Вт/(м·К), а також удосконалених лакофольгових діелектриків із теплопровідністю ПІ шарів до 4,5 Вт/(м·К). Розроблено конструкції та виготовлено тестові структури якості електронних модулів. Виконано експериментальні дослідження ефективності відводу тепла від напівпровідникових пристроїв у тестових структурах якості на основі різних типів комбінованих плат з ПІ діелектриками. Встановлено, що технічні рішення на основі багатощарової ПІМФ плівки Karton® 120FMT616 (30 мкм, теплопровідність 0,46 Вт/(м·К)) та односторонніх мідь-ПІ лакофольгових діелектриків із композиційними ПІ шарами (60 мкм, до 4,5 Вт/(м·К)) забезпечують найкращі теплові характеристики в умовах природної конвекції при температурі навколишнього середовища 25 °С, сприяючи дотриманню робочих температур у межах 70–80 °С та підвищенню надійності і довговічності модулів.

У п'ятому розділі розроблено проектний варіант одиничного концентраторного приймача на базі тринерехідного 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 $0,46 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$) та удосконалених лакофольгових діелектриків (теплопровідність III шарів — до $2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$). 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/м^2 , $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$). 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 сформульовані чітко 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:

В роботі наведено результати вимірювання світлових параметрів CPV приймача за умов AM1 (1000 Вт/м^2) проте відсутні дані щодо вимірювання

світлових параметрів CPV приймача за умов освітленості AM 1,5 (1000 Вт/м^2) при концентрації 400x для яких він розроблювався.

В підрозділі 2.2.5 наведено результати експериментальних досліджень теплопровідності дослідних зразків композиційних силіконових матеріалів, проте відсутні дані щодо експериментальних досліджень теплопровідності композиційних поліімідних матеріалів.

В роботі були розроблені комбіновані плати на одиничні CPV-приймачі розміром $30\text{мм} \times 35\text{мм}$, проте відсутнє пояснення чому саме було обрано такі розміри плати.

Текст дисертації містить певну кількість друкарських і стилістичних помилок.

Разом з тим, вказані недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи. Дисертаційні дослідження є актуальними та завершеними і мають високу наукову цінність та практичну значущість.

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 III композиційних шлівок, які покращують тепловідведення та забезпечують стабільну роботу CPV приймачів за рахунок високої теплопровідності тонких III діелектриків ($0,5 - 2,0 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ 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 дисертації 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 НДІ
енергоєфективних технологій і
матеріалознавства, д.т.н., с.н.с.



Лілія НАКАШИДЗЕ

Підпис старшого наукового співробітника

Накашидзе Л. В. засвідчую:

Учений секретар Дніпровського
національного університету
ім. Олеся Гончара,

кандидатка фізико-математичних
доцентка



Тетяна ХОДАНЕН