

PHYSICS OF DEVICES, ELEMENTS AND SYSTEMS ФІЗИКА ПРИЛАДІВ, ЕЛЕМЕНТІВ І СИСТЕМ

УДК 621.357

DOI:10.30837/rt.2024.2.217.13

*В.М. БОРИЦЬОВ, д-р техн. наук, О.М. ЛИСТРАТЕНКО, канд. техн. наук,
М.І. СЛІПЧЕНКО, д-р фіз.-мат. наук, М.А. ПРОЦЕНКО, канд. техн. наук,
І.Т. ТИМЧУК, канд. техн. наук, О.В. КРАВЧЕНКО, І.В. БОРИЦЬОВ*

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОННИХ МОДУЛІВ НА КОМБІНОВАНИХ ПЛАТАХ З ПОЛІІМІДНИМИ ДІЕЛЕКТРИКАМИ

Вступ

Застосування в комбінованих платах на металевих жорстких основах у якості діелектриків поліімідних (ПІ) плівок дає змогу виділити такі плати за конструкцією в особливий ряд, оскільки в них використовують ПІ діелектрики порівняно малої товщини, близько 0,02 – 0,025 мм проти порядку 0,1 мм у діелектриків, які застосовують в існуючих серійних платах на металевих основах. Хоча промислові ПІ плівки мають низькі значення теплопровідності близько 0,12 – 0,14 Вт/(м·К), проте їхня невелика товщина в платах забезпечує доволі малий тепловий опір тепловідвідної системи загалом. При цьому ПІ плівки, не дивлячись на малу товщину, мають високу електричну міцність (до 160 кВ/мм та більше) порівняно з іншими типами плат на алюмінієвих основах. А використання в якості композиційних, зокрема ПІ плівок з підвищеною теплопровідністю, дає змогу ще більше зменшити сумарний тепловий опір друкованих плат на металевих основах з тонкими ПІ діелектриками [1 – 3].

Серійні тонкі термозварювальні поліімід-фторопластові плівки (ПМФ), в тому числі теплопровідні, також можуть бути успішно застосовані для створення комбінованих плат на металевих жорстких основах, що вимагають покращених фізико-механічних та теплових властивостей матеріалів, стійкості до впливу температури та високої надійності за збереженням вже досягнутих для поліімідів інших функціональних властивостей високого рівня. Такий підхід дозволяє суттєво розширити інноваційні можливості нових електронних модулів і друкованих вузлів, що розробляються, практично для всіх областей спеціального приладобудування, у тому числі із застосуванням Chip-on-board (COB) і Chip-on-flex (COF) технологій складання [4 – 7].

Метою цієї роботи було побудова та теоретичні дослідження теплових моделей електронних модулів з підвищеною теплопровідністю на основі комбінованих плат з використанням промислових термозварювальних поліімід-фторопластовими плівок, у тому числі з теплопровідністю 0,12 – 0,46 Вт/м·К, а також з удосконаленими авторами лакофольговими діелектриками з теплопровідністю ПІ шарів порядку 4,0 – 4,5 Вт/(м·К). Проведення експериментальних досліджень ефективності відводу тепла від напівпровідникових пристроїв у тестових структурах якості електронних модулів на основі різних типів комбінованих плат з поліімідними діелектриками.

1. Предмет та методи дослідження

1.1. Теоретичні дослідження теплових властивостей електронних модулів на комбінованих платах з поліімідними діелектриками

Теоретичні дослідження теплових властивостей електронних модулів на комбінованих платах з ПІ діелектриками полягають у побудові та дослідженні їх теплових моделей. Чим нижчий тепловий опір, тим більше і швидше відведення тепла. Передача тепла з одного місця (наприклад, від напівпровідникового чипу) в інше (навколишнє середовище) визначається товщиною шарів і тепловим опором матеріалів, які застосовують, а також площею їхнього дотику (чим більша площа дотику, тим більшу кількість тепла може бути передано). Оскільки

ки основною метою використання комбінованих металевих друкованих плат у радіоелектронній апаратурі є покращення теплопередачі від електронних тепло навантажених компонентів до системи забезпечення теплового режиму, в якості основного критерію при розрахунках доцільно розглядати тепловий опір у системі «напівпровідникова структура – зворотний бік друкованої плати». При ідентичності таких величин, як площа плати, товщина металевої фольги, товщина та властивості металевої основи, а також товщина шару припою або клейового з'єднання між напівпровідниковим чипом та контактною площиною на металевій фользі з друкованими провідниками, товщина ПІ діелектрика та його теплопровідність будуть визначальними для значень сумарного теплового опору комбінованих плат.

На рис. 1 зображено типова структурна схема електронного модулю підвищеної потужності на комбінованій теплопровідній платі з ПІ діелектриком. У структурній схемі електронного модулю одиничне джерело тепла встановлено за допомогою паяння на контактні площини верхнього шару плати, який виконаний з мідної фольги. У комбінованій платі застосовано плоску алюмінієву теплопровідну основу та діелектричний поліімідний шар, який з'єднаний із шаром мідної фольги та теплопровідною основою за допомогою тонких діелектричних фторполімерних термозварюваних плавких покриттів або за допомогою адгезивних шарів. При цьому прийняті умови, що все тепло, що виділяється від одиничного джерела тепла (напівпровідникового чипу) без втрат передається шару припою, який розташовано на високо теплопровідній мідній контактній площині верхнього комутаційного шару комбінованої плати.

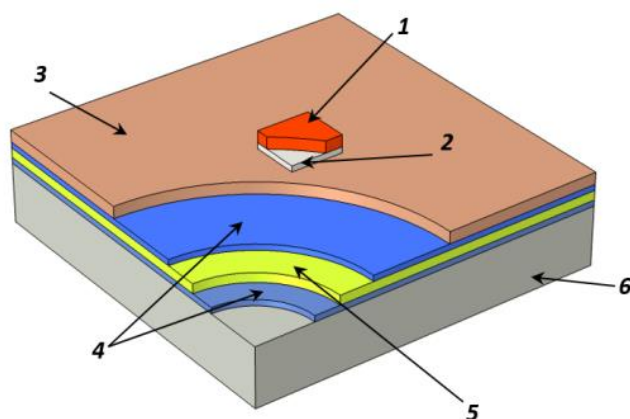


Рис. 1. Типова структурна схема електронного модулю

1 – джерело тепла; 2 – шар припою; 3 – шар фольги з міді; 4 – шари термозварювальних покриттів або адгезиву; 5 – шар поліімиду; 6 – алюмінієва основа

1.2. Теплове моделювання електронних модулів на комбінованих платах з поліімідними діелектриками

Для теоретичних досліджень теплових властивостей електронних модулів на комбінованих платах з поліімідними діелектриками було відібрано чотири типи плат. В тому числі: плата на основі термозварювальної ПМФ плівки Kapton® 120FN 616 компанії DuPont (США) зі стандартною ПІ плівкою-основою DuPont™ Kapton® HN товщиною 25 мкм з мінімальною теплопровідністю 0,12 Вт/(м·К) з фторполімерними двосторонніми покриттями Teflon® FEP товщиною 2,5 мкм кожне з теплопровідністю 0,20 Вт/(м·К) (Модель 1) [4, 2], плата на основі термозварювальної ПМФ плівки KYMIDE KYRIFER 9198 (FHF) компанії Suzhou Kyng Industrial Materials Co.Ltd (Китай) зі стандартною ПІ плівкою-основою товщиною 30 мкм з мінімальною теплопровідністю 0,12 Вт/(м·К) з фторполімерними двосторонніми покриттями FEP товщиною 10 мкм кожне з теплопроводністю 0,20 Вт/(м·К) (Модель 2) [5] та плата на основі термозварювальної ПМФ плівки DuPont Kapton®120FMT616 компанії DuPont з теплопровідною ПІ плівкою-основою Kapton® MT товщиною 25 мкм з теплопровідністю

0,46 Вт/(м·К) та фторполімерними двосторонніми покриттями Teflon® FEP товщиною 2,5 мкм кожне з теплопровідністю 0,20 Вт/(м·К) (Модель 3) [6]. А також комбінована плата на основі розробленого авторами інноваційного одностороннього лакофольгового мідь-поліімідного діелектрику з поліімідною композиційною плівкою з наповнювачем із суміші високотеплопровідних високодисперсних (8 мкм) та ультрадисперсних (0,4 мкм) порошоків білого нітриду алюмінію (AlN) товщиною 25 – 30 мкм з розрахунковою теплопровідністю порядку 4,0 – 4,5 Вт/(м·К). Приклеювання безадгезивного мідь-поліімідного лакофольгового діелектрику до алюмінієвої основи плати здійснюється за допомогою шару однокомпонентного вологозатвердженого теплопровідного полідиметилсилоксанового адгезивного матеріалу Kafuter K-5204K компанії Guangdong Hengda New Materials Technology Co., Ltd. (KAFUTER) (Китай) товщиною 25 мкм з теплопровідністю 1,6 Вт/(м·К) (Модель 4) [8, 9].

Теоретичне моделювання розподілу тепла та ефективності його передачі від джерела тепла до металевої основи комбінованих плат із вибраними типами ПІ плівок у досліджуваних моделях електронних модулів проводилося за допомогою програмного комплексу COMSOL MULTIPHYSICS. У моделях електронних модулів досліджувалися теплові властивості плат з розмірами 35 × 35 мм на алюмінієвих основах товщиною 1000 мкм з теплопровідністю ~ 238 Вт/(м·К). У типовій структурі електронних модулів під час моделювання передбачено застосування мідної фольги товщиною 100 мкм з теплопровідністю ~ 400 Вт/(м·К) у верхньому шарі комбінованих друкованих плат. Одиначне джерело тепла з площею теплового контакту його основи 4,29 мм² з потужністю 2 Вт встановлено на мідну контактну площину верхнього шару плати за допомогою паяльної пасти з теплопровідністю 85 Вт/(м·К) із товщиною шару припою 30 мкм. При цьому в моделях досліджувалися теплові властивості плат для відносно сприятливих умов експлуатації модулів при температурі навколишнього середовища $T_a = 25\text{ }^\circ\text{C}$ з конвекційним коефіцієнтом теплопередачі від плоских алюмінієвих основ $h = 22\text{ Вт/м}^2\text{ К}$ та для відносно несприятливих умов експлуатації при $T_a = 45\text{ }^\circ\text{C}$ з конвекційним коефіцієнтом теплопередачі від плоских алюмінієвих основ $h = 17\text{ Вт/м}^2\text{ К}$.

У табл. 1 наведено результати розрахунків сумарних теплових опорів комбінованих плат із шарами припоїв для теплових моделей електронних модулів. А також результати розрахунків температур T_j у шарах припоїв під джерелом тепла (в області джерела тепла) у комбінованих платах при стабільному стані теплового розподілу за сприятливих та несприятливих умов експлуатації модулів.

Таблиця 1

Результати розрахунків сумарних теплових опорів комбінованих плат і температур на платах у шарах припою під джерелами тепла при стабільному стані теплового розподілу за сприятливих і несприятливих умов експлуатації модулів

№ п/п	Варіанти теплових моделей	Сумарний тепловий опір комбінованих плат $R_k, \text{ }^\circ\text{C/Вт}$	Температура на платі в області джерела тепла, $T_j, \text{ }^\circ\text{C}$	
			При $h = 22\text{ Вт/м}^2\text{ К}$, $T_a = 25\text{ }^\circ\text{C}$	При $h = 17\text{ Вт/м}^2\text{ К}$, $T_a = 45\text{ }^\circ\text{C}$
1	Модель 1	0,276	104,1	134,4
2	Модель 2	0,372	116,1	146,3
3	Модель 3	0,151	83,2	113,4
4	Модель 4	0,109	72,1	102,2

На рис. 2 представлено залежності температур нагріву на платах в області джерела тепла від часу при переході в стабільний температурний стан за сприятливих та несприятливих умов експлуатації модулів.

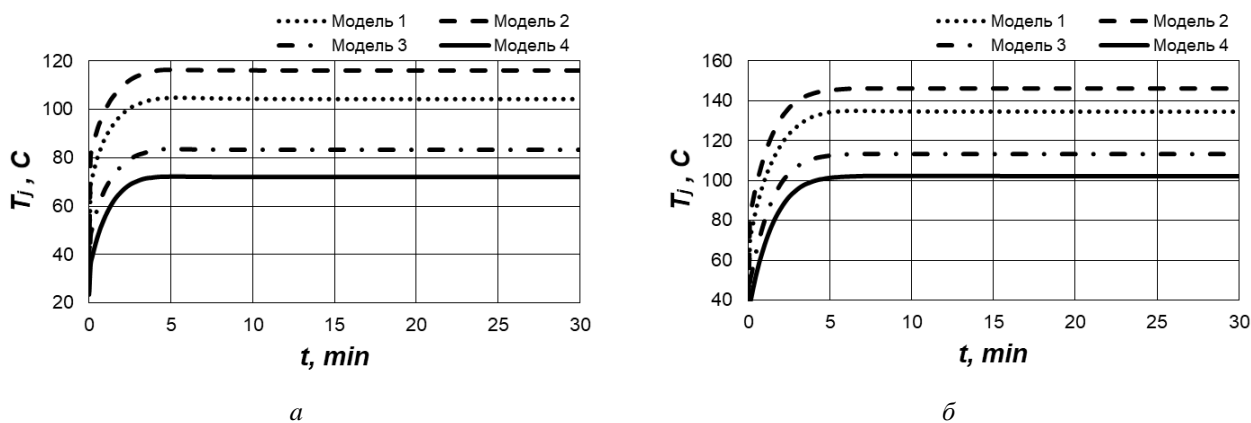


Рис. 2. Залежність температур нагріву на платах в області джерела тепла T_j від часу при переході в стабільний температурний стан за сприятливих (а) та несприятливих (б) умов експлуатації модулів

Із отриманих розрахункових результатів, які представлено у табл. 1 та на рис. 2, можна зробити висновок, що найменші значення сумарних теплових опорів комбінованих плат і температур на платах у області джерел тепла під час переходу в стабільний температурний стан було отримано для електронних модулів у Моделях 3 і 4. При цьому в типовій структурній схемі електронного модулю в Моделі 3 було досягнуто значення сумарного теплового опору комбінованої плати на основі термозварювальної ПМФ плівки Kapton®120FMT616 компанії DuPont порядку 0,15 °C/Вт. У типовій структурній схемі електронного модулю в Моделі 4 було досягнуто значення сумарного теплового опору комбінованої плати на основі розробленого авторами композиційного одностороннього лакофольгового мідь-поліімідного діелектрику порядку 0,11 °C/Вт. У Моделі 3 температура в області джерела тепла потужністю 2 Вт досягала 83,2 та 113,4 °C після 20 хвилин, переходячи в стійкий стан відповідно за сприятливих умов та за несприятливих умов експлуатації. У Моделі 4 температура в області джерела тепла потужністю 2 Вт досягала 72,1 °C та 102,2 °C після 20 хвилин, переходячи в стійкий стан відповідно за сприятливих і за несприятливих умов експлуатації.

У Моделях 1 та 2 теплові характеристики електронних модулів були істотно гірше порівняно з Моделями 3 та 4. У Моделі 1 було досягнуто значення сумарного теплового опору комбінованої плати на основі термозварювальної ПМФ плівки Kapton® 120FN 616 компанії DuPont порядку 0,28 °C/Вт, а у Моделі 2 значення сумарного теплового опору комбінованої плати на основі термозварювальної ПМФ плівки KYMIDE KYPIFER 9198 (FHF) компанії Suzhou Kyng Industrial Materials Co. Ltd склало порядку 0,37 °C/Вт через значно нижчі величини теплопровідності ПД діелектриків і більшу їхню товщину. При цьому в Моделі 1 температура в області джерела тепла потужністю 2 Вт досягала 104,1 та 134,4 °C після 20 хвилин, переходячи в стійкий стан відповідно за сприятливих умов і за несприятливих умов експлуатації. У Моделі 2 температура в області джерела тепла потужністю 2 Вт досягала 116,1 та 146,3 °C після 20 хвилин, переходячи в стійкий стан відповідно за сприятливих і за несприятливих умов експлуатації.

Таким чином, теоретичні дослідження теплових властивостей електронних модулів на комбінованих платах на алюмінієвих основах з розмірами 35 × 35 мм з поліімідними діелектриками на основі теплопровідної термозварювальної ПМФ плівки Kapton®120FMT616 компанії DuPont з теплопровідністю 0,46 Вт/(м·К) та на основі розробленого авторами композиційного одностороннього лакофольгового мідь-поліімідного діелектрику з розрахунковою теплопровідністю ПД плівки порядку 4,0 – 4,5 Вт/(м·К) показали можливість забезпечити робочі температури електронних модулів в області джерела тепла з підвищеною тепловою потужністю до 2 Вт в діапазоні порядку від 72,1 до 83,2 °C для відносно сприятливих умов експлуатації модулів за природної конвекції при $T_a = 25$ °C, та в діапазоні порядку від 102,2 до 113,4 °C для відносно несприятливих умов експлуатації при $T_a = 45$ °C (табл. 1).

2. Експериментальні дослідження теплових властивостей тестових структур якості електронних модулів на комбінованих платах з поліімідними діелектриками

Для експериментального фізичного моделювання та дослідження ефективності відводу тепла від напівпровідникових чипів з збільшеною потужністю в електронних модулях на комбінованих платах з ПІ ізоляцією, були виготовлені тестові структури якості (ТСЯ) електронних модулів на наступних відібраних типах комбінованих плат, в тому числі із застосуванням в якості діелектриків промислових тонких термозварювальних ПМФ плівок Kapton® 120FN 616 (ТСЯ 1), KUMIDE KURIFER 9198 (FHF) (ТСЯ 2) та Kapton® 120FMT 616 (ТСЯ 3), а також комбінованої плати на основі інноваційного одностороннього лакофольгового мідь-поліімідного діелектрику з високо теплопровідною ПІ композиційною плівкою з наповнювачем із суміші високодисперсних та ультрадисперсних порошків білого нітриду алюмінію (ТСЯ 4).

Комбіновані плати з ПІ ізоляцією із застосуванням промислових термозварювальних ПМФ плівок для ТСЯ 1, 2 та 3 виготовлялися шляхом приєднання до багат шарової ПМФ плівки з двох сторін мідної фольги зверху та алюмінієвої основи плати знизу за допомогою термообробки під тиском. Усереднені значення міцності на відшаровування мідної фольги від ПІ діелектрика у зразків, що виготовлялися, склали не менше ніж 2,5 Н/см.

Комбінована плата на основі одностороннього лакофольгового мідь-поліімідного діелектрику з високотеплопровідним композиційним шаром для ТСЯ 4 виготовлялася шляхом приклеювання безадгезивного мідь-поліімідного лакофольгового діелектрика до алюмінієвої основи плати за допомогою шару однокомпонентного вологезатвердженого теплопровідного полідиметилсилоксанового адгезивного матеріалу Kafuter K-5204K. Силіконовий адгезивний матеріал забезпечив хорошу адгезію до теплопровідного композиційного ПІ шару не менше 1,5 Н/см при зрушенні внахльст. В свою чергу усереднені значення міцності на відшаровування мідної фольги від теплопровідного композиційного ПІ шару у зразків, що виготовлялися, склали не менше 0,5 Н/см. Перевірка міцності на відшаровування мідної фольги від ПІ діелектриків у досліджуваних комбінованих платах проводилася відповідно до стандарту IPC-TM-650, метод тестування 2.4.9 [10].

В структурах ТСЯ для експериментальних досліджень теплових властивостей електронних модулів з відібраними типами комбінованих плат з розмірами 35 x 35 мм, в якості одиничних джерел тепла з потужністю 2 Вт, застосовувалися потужні світлодіоди серії SZ8-Y22-W0-C7-P компанії Seoul Semiconductor (Корея). Встановлення одиничних джерел тепла на мідні контактні площини верхніх шарів комбінованих плат проводили пайкою за допомогою паяльної пасти NC 293+ (Sn62/Pb36/Ag2) компанії AIM Solder (Канада) [11].

Експериментальні дослідження теплових властивостей відібраних варіантів ТСЯ електронних модулів проводилися у кімнатних умовах при природній конвекції та температурі навколишнього середовища $T_a = 25^\circ\text{C}$, а також у не дуже прийнятних умовах експлуатації при температурі навколишнього середовища $T_a = 45^\circ\text{C}$ в лабораторній електропечі СНОл-6.6.6/350 ГЦ-00.04. На рис. 3 представлено зовнішній вигляд ТСЯ для перевірки теплових властивостей електронних модулів на комбінованих платах з поліімідними діелектриками. На рис. 4 представлено графіки залежності температур нагріву комбінованих плат ТСЯ електронних модулів в області джерел тепла T_{hs} біля теплового контакту основ світлодіодів SZ8-Y22-W0-C7-P з платами та температур зворотної сторони алюмінієвої основи плат T_{Al} від часу до переходу їх у стійкий температурний стан.

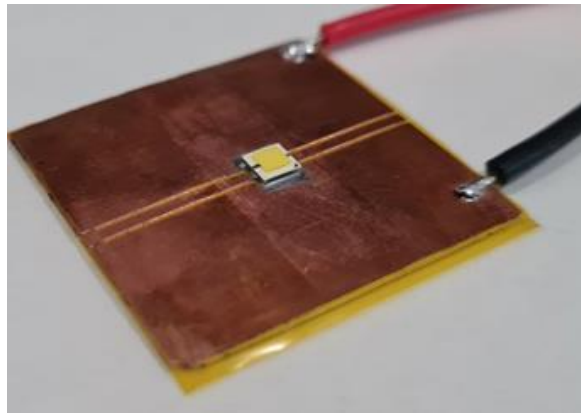


Рис. 3. ТСЯ для перевірки теплових властивостей на комбінованих платах з поліімідними діелектриками

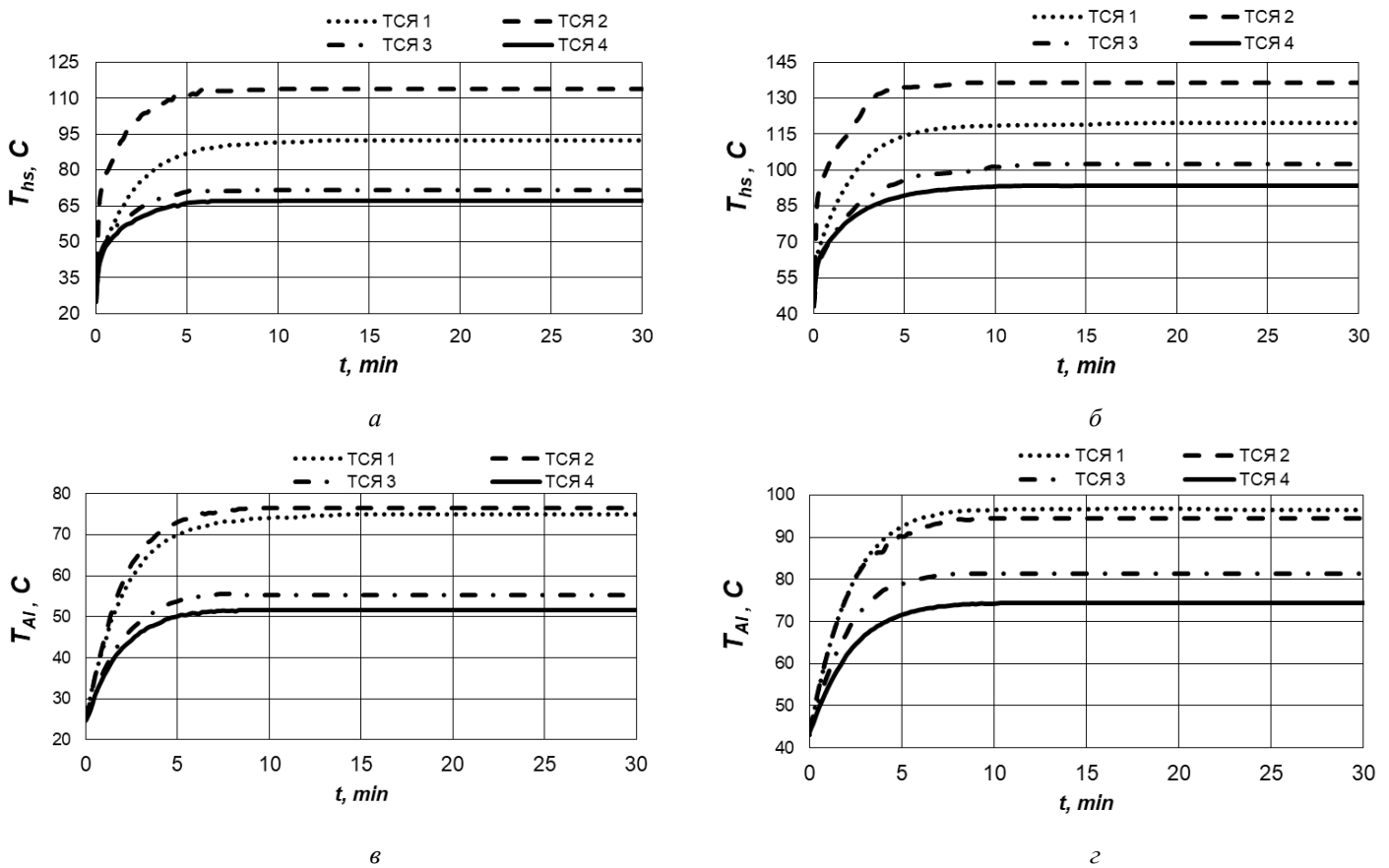


Рис. 4. Залежності температур нагріву комбінованих плат ТСЯ електронних модулів в області джерел тепла T_{hs} : а – температура довкілля $T_a = 25^\circ\text{C}$; б – температура довкілля $T_a = 45^\circ\text{C}$ та температур нагріву зворотної сторони алюмінієвої основи плат T_{Al} ; в – температура довкілля $T_a = 25^\circ\text{C}$; г – температура довкілля $T_a = 45^\circ\text{C}$ від часу при переході у стабільний температурний стан

В табл. 2 представлено результати експериментальних досліджень температур нагріву плат ТСЯ електронних модулів в області паяння світлодіодів на плату та температур нагріву зворотної сторони алюмінієвих основ плат від часу при переході у стабільний температурний стан.

Результати експериментальних досліджень температур нагріву плат ТСЯ електронних модулів в області паяння світлодіодів на плату та температур нагріву зворотної сторони алюмінієвих основ плат від часу при переході у стабільний температурний стан при температурі довкілля $T_a = 25^\circ\text{C}$ та температурі довкілля $T_a = 45^\circ\text{C}$

№ п/п	Варіанти ТСЯ	Температура на платі в області джерела тепла, $T_{hs}, ^\circ\text{C}$		Температура на тильній стороні основи плати, $T_{Al}, ^\circ\text{C}$	
		$T_a = 25^\circ\text{C}$	$T_a = 45^\circ\text{C}$	$T_a = 25^\circ\text{C}$	$T_a = 45^\circ\text{C}$
1	ТСЯ 1	92,5	119,6	74,9	96,5
2	ТСЯ 2	113,9	136,6	76,6	94,4
3	ТСЯ 3	71,8	102,7	55,2	81,3
4	ТСЯ 4	67,2	93,5	51,6	74,4

3. Результати та їх обговорення

За отриманими експериментальними даними, які представлені на рис. 4 та в табл. 2, було підтверджено основні висновки теплового моделювання властивостей досліджених електронних модулів, яке було проведено за допомогою програмного комплексу COMSOL MULTIPHYSICS. Використання у конструкції комбінованих плат багатошарових ПІ діелектриків з товщиною 30 мкм на основі термозварювальної ПМФ плівки Kapton®120FMT616 компанії DuPont з теплопровідністю 0,46 Вт/(м·К) дозволило суттєво покращити теплові властивості електронних модулів з збільшеною потужністю. На досліджених комбінованих платах з розмірами 35 x 35 мм в області джерела тепла площею $\sim 4,29 \text{ мм}^2$ з потужністю 2 Вт за сприятливих умов експлуатації при температурі навколишнього середовища $T_a = 25^\circ\text{C}$ у ТСЯ було досягнуто температуру у стійкому стані порядку $71,8^\circ\text{C}$, а за несприятливих умов експлуатації при температурі навколишнього середовища $T_a = 45^\circ\text{C}$ в області пайки джерела тепла на плату температура у стійкому стані досягла $102,7^\circ\text{C}$. Застосування у конструкції комбінованих плат інноваційних односторонніх лакофольгових мідь-поліімідних діелектриків з високотеплопровідним композиційним ПІ шаром з товщиною 60 мкм з розрахунковою теплопровідністю порядку 4,0 – 4,5 Вт/(м·К) дало можливість забезпечити на платі за сприятливих умов експлуатації при температурі навколишнього середовища $T_a = 25^\circ\text{C}$ в області джерела тепла температуру у стійкому стані порядку $67,2^\circ\text{C}$ та температуру порядку $93,5^\circ\text{C}$ у стійкому стані за несприятливих умов експлуатації при температурі навколишнього середовища $T_a = 45^\circ\text{C}$.

На досліджених комбінованих платах з використанням багатошарових ПІ діелектриків на основі термозварювальної ПМФ плівки Kapton® 120FN 616 компанії DuPont товщиною 30 мкм з теплопровідністю 0,12 Вт/(м·К) температура в області джерела тепла потужністю 2 Вт досягала $92,5$ та $119,6^\circ\text{C}$ після 20 хвилин, переходячи у стійкий стан відповідно за сприятливих умов та при несприятливих умовах експлуатації. На комбінованих платах з використанням багатошарових ПІ діелектриків на основі термозварювальної багатошарової ПМФ плівки KYMIDE KYRIFER 9198 (FHF) компанії Suzhou Kyng Industrial Materials Co.Ltd (Китай) товщиною 50 мкм з мінімальною теплопровідністю 0,12 Вт/(м·К) температура в області джерела тепла потужністю 2 Вт досягала $113,9$ та $136,6^\circ\text{C}$ після 20 хвилин, переходячи у стійкий стан відповідно за сприятливих умов та при несприятливих умовах експлуатації. Таким чином, конструктивно-технологічні рішення комбінованих плат з використанням багатошарових ПІ діелектриків на основі термозварювальної ПМФ плівки Kapton® 120FN 616м з фторполімерними двосторонніми покриттями товщиною 30 мкм з мінімальною теплопровідністю 0,12 Вт/(м·К) та плат на основі термозварювальної ПМФ плівки KYMIDE KYRIFER 9198 (FHF) з фторполімерними двосторонніми покриттями товщиною 50 мкм з мінімальною теплопровідністю 0,12 Вт/(м·К) забезпечили за сприятливих умов експлуатації

робочі температури від 90 до 115 °С, а за несприятливих умов експлуатації лише від 120 до 135 °С. Такі конструкції комбінованих плат придатні до використання в електронних модулях з напівпровідниковими чипами лише з допустимими максимальними температурами від 125 до 145 °С.

Технічні рішення комбінованих плат на основі багатошарової теплопровідної термозварювальної ПМФ плівки Kapton®120FMT616 товщиною 30 мкм з фторполімерними двосторонніми покриттями з теплопровідністю 0,46 Вт/(м·К) та комбінованих плат на основі удосконалених односторонніх лакофольгових мідь-поліімідних діелектриків з високотеплопровідним композиційним ПІ шаром з товщиною 60 мкм з розрахунковою теплопровідністю до 4,0 – 4,5 Вт/(м·К), забезпечили за сприятливих умов експлуатації найкращі теплові характеристики електронних модулів з точки зору рекомендованих робочих температур < 80 °С для підтримки їх високої надійності роботи та підвищення строків експлуатації. При цьому удосконалена комбінована плата на основі інноваційного одностороннього лакофольгового мідь-поліімідного діелектрика з високотеплопровідним композиційним ПІ шаром за сприятливих умов експлуатації забезпечила робочі температури < 70 °С. За несприятливих умов експлуатації конструкції плат забезпечили температури від 93,5 до 102,7°С. Такі комбіновані плати придатні до використання в електронних модулях з напівпровідниковими чипами з допустимими максимальними температурами 110 °С та менше (табл. 2).

Комбіновані плати з ПІ ізоляцією із застосуванням промислових термозварювальних ПМФ плівок з двох сторонніми фтор-полімерними покриттями виготовлялися шляхом приєднання до багатошарової ПМФ плівки з двох сторін мідної фольги зверху та алюмінієвої основи плати знизу за допомогою термообробки при ~ 270 – 280°С під тиском ~ 5 – 10 МПа. Виготовлення плат за методом термокомпресії є достатньо складним та енергозатратним, тому було розроблено нову конструкцію комбінованих плат та метод їх виготовлення на основі удосконалених високотеплопровідних односторонніх лакофольгових мідь-поліімідних діелектриків, які суттєво спростили та зменшили витрати на процес виготовлення комбінованих плат із забезпеченням їх високих теплових властивостей за рахунок приклеювання безадгезивних мідь-поліімідних лакофольгових діелектриків до алюмінієвих основ плат за допомогою тонкого шару однокомпонентного вологостатвердженого теплопровідного полідиметилсилоксанового адгезивного матеріалу з теплопровідністю ~1,6 Вт/(м·К).

Висновки

В роботі запропоновано конструкції та виконані теоретичні дослідження теплових моделей електронних модулів з підвищеною потужністю на основі комбінованих плат з використанням серійних термозварювальних поліімід-фторопластовими плівок, у тому числі з теплопровідністю від 0,12 до 0,46 Вт/м·К, а також на основі лакофольгових діелектриків з теплопровідністю композиційних ПІ шарів порядку 4,0 – 4,5 Вт/(м·К). Технічні рішення комбінованих плат на основі багатошарової теплопровідної термозварювальної ПМФ плівки Kapton®120FMT616 компанії DuPont товщиною 30 мкм з фторполімерними двосторонніми покриттями з теплопровідністю 0,46 Вт/(м·К) та комбінованих плат на основі удосконалених односторонніх лакофольгових мідь-поліімідних діелектриків з товщиною високотеплопровідних композиційних ПІ шарів до 60 мкм з теплопровідністю до 4,0 – 4,5 Вт/(м·К), забезпечують за сприятливих умов експлуатації при природній неутрудненій конвекції та температурі навколишнього середовища $T_a = 25^\circ\text{C}$ найкращі теплові характеристики електронних модулів з точки зору рекомендованих робочих температур < 70 – 80 °С для підтримки їх високої надійності роботи та підвищення строків експлуатації.

Список літератури:

1. Максимов А. Порівняльне дослідження теплопровідних властивостей матеріалів // Напівпровідникова світлотехніка. 2013. №4. С. 13–15.
2. Поліімідна плівка DuPont™ Kapton® HN, <https://www.dupont.com/products/kapton-hn.html> // офіційний сайт.

3. Комбіновані теплопровідні плати з діелектриками з полііміду / В.М. Борщов, О.М. Лістратенко, М.А. Проценко, І.Т. Тимчук, О.В. Кравченко, О.В. Суддя, І.В. Борщов, М.І. Сліпченко // Радіотехніка. 2023. Вип. 212. С. 11–126.
4. Поліімідно-фторопластова плівка DuPont™Kapton® 120FN616, <https://www.dupont.com/products/kapton-fmt.html> // офіційний сайт.
5. Поліімідно-фторопластова плівка, що термозварюється, KYMIDE KYRIFER 9198 (FHF) (Китай), <https://www.kying.com> // офіційний сайт.
6. Теплопровідна поліімідно-фторопластова плівка DuPont™ Kapton® 120FMT616, <https://www.dupont.com/products/kapton-fmt.html> // офіційний сайт.
7. Нові підходи для створення ефективних комбінованих друкованих плат на теплопровідних основах з діелектриками з полііміду / В.М. Борщов, О.М. Лістратенко, М.І. Сліпченко, М.А. Проценко, І.Т. Тимчук, О.В. Кравченко, І.В. Борщов // Радіотехніка. 2023. Вип. 215. С. 60–68.
8. Structural modeling and calculation of thermal conductivity of polyimide composite materials / V.M. Borshchov, O.M. Listratenko, M.A. Protsenko, I.T. Tymchuk, O.V. Kravchenko, O.V. Syddia, I.V. Borshchov, M.I. Slipchenko // Radiotekhnika. 2022. №211. P. 133–142.
9. Клей герметик силіконовий теплопровідний Kafuter K-5204 (Китай), <https://www.kafuter.cn/product-item-106.html> // офіційний сайт.
10. Стандарт IPC-TM-650:2002. Test Methods Manual. Посібник із вибору методів контролю друкованих плат.
11. Паяльна паста марки NC293+ компанії AIM Solder, www.aimsolder.com // офіційний сайт.

Надійшла до редколегії 10.05.2024

Відомості про авторів:

Борщов Вячеслав Миколайович – д-р техн. наук, професор, ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», перший заступник директора – головний конструктор; Україна; e-mail: viatcheslav.borshchov@cern.ch; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5579-8932>

Лістратенко Олександр Михайлович – канд. техн. наук, ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», провідний науковий співробітник; Україна; e-mail: sasha.listratenko.12@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7643-5295>

Сліпченко Микола Іванович – д-р фіз.-мат. наук, професор, Інститут сцинтиляційних матеріалів НАНУ, провідний науковий співробітник; Україна; e-mail: naukovets.big@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4242-4800>

Проценко Максим Анатолійович – канд. техн. наук, ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», начальник відділення – заступник головного конструктора; Україна; e-mail: max.protsenko.1978@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9313-1701>

Тимчук Ігор Трохимович – канд. техн. наук, ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», головний технолог; Україна; e-mail: ihortymchuk78@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6436-7253>

Кравченко Олександр Вікторович – ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», заступник начальника відділу; Україна; e-mail: kravcenkoaleksandr671@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7145-4304>

Борщов Ілля Вячеславович – ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», інженер; Україна; e-mail: illia.borshchov1@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6598-6988>.