

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

УДК 621.357

DOI:10.30837/rt.2023.4.215.06

*В.М. БОРЩОВ, д-р техн. наук, О.М. ЛІСТРАТЕНКО, 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. БОРЩОВ*

НОВІ ПІДХОДИ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ КОМБІНОВАНИХ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ НА ТЕПЛОПРОВІДНИХ ОСНОВАХ З ДІЕЛЕКТРИКАМИ З ПОЛІМІДУ

Вступ

Різноманітність виконання сучасних напівпровідникових пристроїв, їх застосування для широкого спектру завдань, необхідність відведення великої кількості тепла, робота в жорстких умовах експлуатації – все це зумовлює пошук нових конструкторських та технологічних рішень при виготовленні електронних модулів та друкованих вузлів підвищеної потужності. Для їх реалізації необхідні спеціальні матеріали, що мають високу технологічність та виправдану собівартість для забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик виробів, які використовують напівпровідникові чіпи з типовими максимальними робочими температурами від +85 до +150°C. Навіть за +125...+150°C висока температура може стати однією з основних причин зниження терміну експлуатації та відмов напівпровідникових приладів та інтегральних схем [1].

У зв'язку з цим дослідниками постійно проводяться роботи з вибору та використання, а також розробки нових матеріалів з покращеними теплопровідними властивостями, та оптимізації конструкції і технології складання електронних пристроїв. При цьому застосування нових матеріалів з покращеними теплопровідними властивостями часто залишається єдиним прийнятним способом ефективного відведення тепла від напівпровідникових чіпів.

Застосування в теплопровідних платах у якості діелектриків поліімідних (ПІ) плівок дає змогу виділити такі плати за конструкцією в особливий ряд, оскільки в них використовують ПІ плівки порівняно малої товщини, близько 0,02 – 0,025 мм проти 0,1 мм у існуючих стандартних промислових платах на металевих основах [2]. Хоча поліімідні плівки мають низькі значення теплопровідності близько 0,12 – 0,14 Вт/(м·К), проте їхня мала товщина в платах забезпечує доволі малий тепловий опір тепловідної 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 композитних, зокрема теплопровідних ПІ плівок з підвищеною теплопровідністю, дає змогу ще більше зменшити сумарний тепловий опір друкованих плат на металевих основах з тонкими ПІ діелектриками [3 – 5].

Поліімідні широко застосовуються у спеціальній техніці завдяки поєднанню високих фізико-механічних показників, термостійкості, термостабільності, вогнестійкості, хімічної стійкості та здатності протистояти радіації та УФ-випромінюванню. Повністю ароматичні ПІ плівки успішно використовуються в промисловості вже понад півстоліття завдяки своїм чудовим комплексним властивостям як у звичайних, так і в екстремальних умовах.

Термозварювальні поліімід-фторопластові плівки (ПМФ) також можуть бути успішно застосовані для створення комбінованих плат на теплопровідних жорстких основах, що вимагають покращених фізико-механічних 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. Таким чином, метою цієї роботи було:

- розробка конструктивно-технологічних рішень (КТР) та способів виготовлення комбінованих друкованих плат на теплопровідних алюмінієвих основах з промисловими тонкими теплопровідними поліімідними діелектриками з теплопровідністю від 0,12 до 0,46 Вт/(м·К) із термозварювальними фторполімерними покриттями;

- розробка конструктивно-технологічних рішень та способів виготовлення комбінованих друкованих плат на теплопровідних алюмінієвих основах із застосуванням удосконалених безадгезивних мідь-поліімідних та алюміній-поліімідних лакофольгових діелектриків з теплопровідністю композитних лакових поліімідних шарів від 0,36 до 1,0 Вт/(м·К) та більше [6];

- виготовлення експериментальних зразків та дослідження основних хімічних, механічних, електричних та теплових властивостей різних типів комбінованих друкованих плат на алюмінієвих основах з тонкими теплопровідними поліімідними діелектриками.

1. Предмет та методи дослідження

1.1. Конструктивно-технологічні рішення комбінованих друкованих плат на теплопровідних основах з тонкими поліімідними діелектриками

На рис. 1 представлено структурні схеми комбінованих друкованих плат на теплопровідних алюмінієвих основах. У тому числі плата, до складу якої входить тонкий діелектрик з ПІ плівки-основи з термозварюваними термопластичними покриттями з двох сторін (рис.1, *а*), та плата, до складу якої входить тонкий діелектрик з ПІ шару з одностороннім адгезивним покриттям (рис. 1, *б*). До складу плат (рис. 1, *а*, *б*) входять також верхні шари, що комунують, і які являють собою алюмінієву або мідну фольгу.

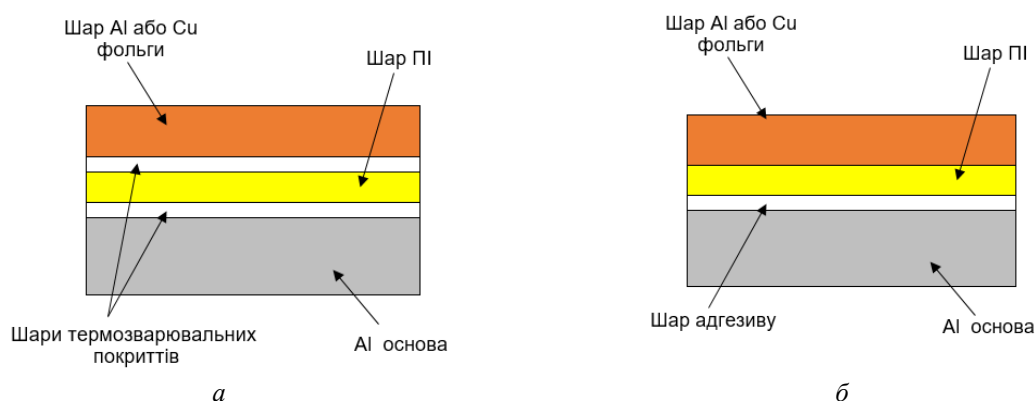


Рис. 1. Структурні схеми комбінованих плат з ПІ діелектриками: *а* – плата, до складу якої входить тонкий діелектрик з ПІ плівки-основи з термозварюваними термопластичними покриттями з двох сторін; *б* – плата, до складу якої входить тонкий діелектрик із ПІ шару з одностороннім адгезивним покриттям

Найпростішим типом комбінованих друкованих плат на теплопровідній металевій основі і, отже, найбільш економічно ефективним для поверхневого монтажу є комбіновані друковані плати з алюмінієвою основою. Така конструкція плати є одношаровою друкованою платою, яка наклеєна на алюмінієву підкладку. Тепло, що генерується, легко проходить через діелектрик, а потім швидко розсіюється через плоский алюмінієвий радіатор. Хоча мідь має кращі теплопровідні властивості, алюміній є найбільш застосовуваним матеріалом для плат з металевією основою, тому що він є значно дешевшим і, при цьому, досить легким і міцним матеріалом. Так, наприклад, для плат із металевими основами широко використовуються наступні теплопровідні алюмінієві сплави: алюміній 1100 (аналог АТ) – 222 Вт/(м·К); алюміній 5052 (аналог АМг2,5) – 138 Вт/(м·К); алюміній 6061 (аналог АД33) – 167 В/(м·К). Друковані плати на алюмінієвих основах в основному застосовуються в електронних виробках

з малими габаритними розмірами, що не потребують примусового охолодження. Такий підхід суттєво спрощує проектування електронних пристроїв, особливо з підвищеною потужністю, оскільки відведення тепла перестає суттєво залежати від взаємного розташування елементів на платі, оскільки основне тепло розсіюється через підкладку такої плати. Відпадає необхідність у застосуванні в конструкції плати додаткового відведення тепла іншими способами. В підсумку збільшується рівень інтеграції компонентів на платі і, навіть, знижуються її габаритні розміри. При ідентичності таких показників плат, як площа, товщина фольги для міжелементних з'єднань, товщина клейового або паяного з'єднання між напівпровідниковим чіпом та контактною площиною на фользі, товщина багатошарового діелектрика та теплопровідність його шарів будуть визначальними для загального теплового опору друкованих плат.

Нові підходи при розробці КТР комбінованих друкованих плат на алюмінієвих основах з ПІ діелектриками, у тому числі теплопровідними, засновані в першу чергу на застосуванні в їх конструкції різних типів тонких ПІ діелектриків, які забезпечують доволі малий загальний тепловий опір тепловідної системи плат (від $\sim 0,23$ до $\sim 0,06$ C/Вт) [1]. У тому числі термозварюваних ПМФ плівок, що промислово випускаються:

- багатошарова термозварювана ПМФ плівка Kapton®120FN 616 зі стандартною ПІ плівкою-основою DuPont™ Kapton® HN товщиною 25 мкм з мінімальною теплопровідністю 0,12 Вт/(м·К) та з фторполімерними двосторонніми покриттями Teflon® FEP товщиною 2,5 мкм кожне. Об'ємний опір $>10^{17}$ Ом·см при 25°C, електрична міцність до 4,2 кВ/мил (~ 168 кВ/мм) [3, 7];

- багатошарова термозварювальна ПМФ плівка Kapton®120FMT616 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. Об'ємний опір $>10^{17}$ Ом·см при 25°C, електрична міцність до 5,2 кВ/мил (~ 208 кВ/мм) [4, 8];

- багатошарова термозварювана ПМФ плівка KYMIDE KYPIFMT 616 компанії Suzhou Kyung Industrial Materials Co.Ltd (Китай) з теплопровідною ПІ плівкою-основою KYPI-MT товщиною 25 мкм з теплопровідністю 0,36 Вт/(м·К) та фторполімерними двосторонніми покриттями Teflon® FEP товщиною 3,0 мкм кожне. Об'ємний опір $>10^{16}$ Ом·см при 25°C, електрична міцність до 4,1 кВ/мил (~ 160 кВ/мм) [5, 9].

У свою чергу, при розробці нових підходів для створення комбінованих друкованих плат авторами також були застосовані нові теплопровідні безадгезивні лакофольгові ПІ діелектрики власного виробництва, які виготовлені на мідній або алюмінієвій фользі товщиною від 30 до 100 мкм. Розрахункова ефективна теплопровідність удосконалених композиційних ПІ шарів товщиною 25–30 мкм у лакофольгових ПІ діелектриках у різному виконанні становить від 0,38 до 1,4 Вт/(м·К) при об'ємній концентрації наповнювачів (високодисперсних AlN частинок) у ПІ матриці від 40 до 70 об. % [6].

Запропоновані технічні рішення дозволяють виготовити комбіновані друковані плати шляхом приклеювання безадгезивних мідь-поліімідних або алюміній-поліімідних лакофольгових діелектриків до алюмінієвої основи плати товщиною 1 мм. Приклеювання здійснюється за допомогою однокомпонентного вологозатверджувача полідиметилсилоксанового адгезиву SE 4485 компанії Dow Corning Corporation з теплопровідністю $\sim 2,8$ Вт/(м·К), що має хорошу адгезію до 2 МПа при зсуві внахлест до більшості матеріалів без використання праймерів. У тому числі до металів, кераміки, скла та більшості пластиків. До переваг кремній-органічних адгезивів необхідно віднести їхню високу термостійкість і вологостійкість, а також електричну міцність до 24 кВ/мм [10].

1.2. Вибір способів виготовлення комбінованих друкованих плат на алюмінієвих основах з тонкими ПІ діелектриками

При виборі способів виготовлення комбінованих плат на алюмінієвих теплопровідних підставах застосовані нові технічні рішення з використанням різних типів тонких ПІ діелектриків. За допомогою програмного комплексу COMSOL MULTIPHYSICS проведено моделю-

вання залежності максимальних очікуваних робочих температур на платах електронних модулів від розмірів плат та розроблено теплові моделі досліджуваних електронних модулів. В тому числі модель 1 електронного модуля на комбінованій платі з удосконаленим теплопровідним композиційним безадгезивним лакофольговим мідь-поліімідним діелектриком з теплопровідністю композиційного III шару до 1,0 Вт/(м·К). Модель 2 електронного модуля на комбінованій платі з багатошаровою теплопровідною термозварюваною ПМФ плівкою Kapton®120FMT616 з теплопровідністю 0,46 Вт/(м·К) та модель 3 електронного модуля на комбінованій платі з багатошаровою ПМФ плівкою DuPont™ Kapton® 120FN 616 з теплопровідністю 0,12 Вт/(м·К). У моделях електронних модулів досліджувалися теплові властивості плат на алюмінієвих основах товщиною 1 мм з розмірами від 30 × 30 мм до 50 × 50 мм, на яких методом паяння розміщувалися джерела тепла потужністю ~ 2 Вт з розмірами 3 × 3 мм. 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 плоского алюмінієвого тепловідводу $h = \sim 22\text{ Вт/м}^2\text{ К}$ та для відносно несприятливих умов експлуатації при $T_a = 45\text{ }^\circ\text{C}$ з конвекційним коефіцієнтом теплопередачі від плоского алюмінієвого тепловідводу $h = \sim 15\text{ Вт/м}^2\text{ К}$.

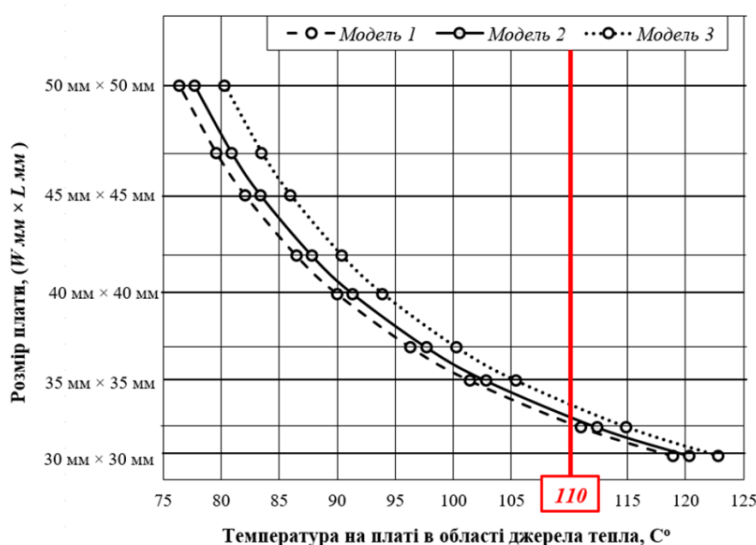


Рис. 2. Залежність максимальних робочих температур плат в області джерел тепла від розмірів плат для відносно несприятливих умов експлуатації

З графіків (рис. 2) слідує, що теплопровідні Al основи з товщиною 1 мм у плат з розмірами від 35 × 35 мм і більше забезпечують усереднені значення максимальних температур плат в області джерел тепла потужністю до 2 Вт близько 105 – 110 °С для всіх досліджених моделей електронних модулів з можливістю зменшення температури до ~ 75 – 80 °С зі збільшенням розмірів алюмінієвих основ плат до 50 × 50 мм навіть за несприятливих умов експлуатації електронних модулів.

Таким чином, для виготовлення зразків плат із тонкими III діелектриками і тестових структур якості (ТСЯ) плат та ТСЯ електронних модулів для експериментальних досліджень хімічних, механічних, електричних та теплових властивостей, а також оцінки технологічних процесів виготовлення плат було відібрано конструктивно-технологічні рішення експериментальних комбінованих плат на основі наступних типів діелектричних III шарів, а саме:

- комбінована плата на основі промислової стандартної багатошарової термозварюваної ПМФ плівки DuPont™ Kapton® 120FN 616 з теплопровідністю 0,12 Вт/(м·К);
- комбінована плата на основі промислової теплопровідної багатошарової термозварюваної ПМФ плівки Kapton®120FMT616 з теплопровідністю 0,46 Вт/(м·К);
- комбінована плата з удосконаленим теплопровідним композиційним безадгезивним лакофольговим мідь-поліімідним діелектриком з теплопровідністю композиційного III шару до 1,0 Вт/(м·К).

2. Виготовлення комбінованих друкованих плат

2.1. Спосіб виготовлення комбінованих друкованих плат на алюмінієвих основах з промисловими тонкими поліїмід-фторопластовими термозварюваними плівками

При виготовленні експериментальних зразків комбінованих плат на основі тонких поліїмід-фторопластових термозварюваних плівок збираються пакети з листа алюмінієвого сплаву 1100 (основи плати) товщиною 1000 мкм з розмірами 35 × 35 мм та листа мідної або алюмінієвої фольги товщиною 100 мкм з розмірами 35 × 35 мм, а також листа багат шарової поліїмідної плівки DuPont™ Kapton®120FMT616 або багат шарової поліїмідної плівки DuPont™ Kapton®120FN 616 з двостороннім термопластичним термозварюваним фторполімерним покриттям із загальною товщиною 30 мкм, які розташовуються між алюмінієвою основою та листом із фольги. Приклеювання до багат шарової ПМФ плівки з двох сторін фольги зверху та алюмінієвої основи плати знизу здійснюється за допомогою термообробки під тиском.

Зібраний пакет поміщають у спеціальне технологічне оснащення (приспособлення з рухомою опорою) за допомогою еластичних прокладок з фторопластової плівки, розташованих зверху та знизу пакета. Об'єм приспособлення з рухомою опорою доводять до об'єму пакета, приспособлення затягують гвинтом, щоб забезпечити тиск 50–100 кгс/см² (5 – 10 МПа) або більше і поміщають в лабораторну електропечі типу СНОл-6.6.6/350 ГЦ-00.04, яку попередньо нагрівають до 120 °С. Температуру електропечі піднімають від 120 до 270–280 °С (до температури плавлення фторполімерних покриттів Teflon® FEP) і витримують при цій температурі протягом 10 хвилин.

Після закінчення зазначеного часу електропечі відключають і пристрій охолоджують разом з електропечістю до кімнатної температури. Відпресована комбінована плата на алюмінієвій основі виймається з технологічного оснащення.

2.2. Спосіб виготовлення комбінованих друкованих плат на алюмінієвих основах з безадгезивними мідь-поліїмідними або алюміній-поліїмідними лакофольговими теплопровідними III діелектриками

При виготовленні експериментальних зразків комбінованих плат з тонкими лакофольговими теплопровідними III діелектриками на першому етапі здійснюється виготовлення безадгезивних лакофольгових III діелектриків на основі розроблених авторами експериментальних композиційних теплопровідних III шарів товщиною 25–30 мкм з теплопровідністю до 1,0 Вт/(м·К), які фольговані міддю або алюмінієм завтовшки 100 мкм. Потім виготовляються експериментальні зразки комбінованих плат. Для цього на листи з алюмінієвого сплаву 1100 (основи плати) товщиною 1000 мкм з розмірами 35 × 35 мм наносяться шари однокомпонентного вологезатверджувального полідиметилсилоксанового адгезиву SE 4485 товщиною до 30 мкм з теплопровідністю ~ 2,8 Вт/(м·К). Адгезивні шари витримуються на повітрі при кімнатній температурі і вологості 55–65 % протягом 10 хвилин. Потім на алюмінієві основи з нанесеними адгезивними шарами укладаються мідь-поліїмідні або алюміній-поліїмідні теплопровідні лакофольгові діелектрики. Приклеювання мідь-поліїмідного або алюміній-поліїмідного лакофольгового діелектрика зверху на алюмінієву основу плати здійснюється в технологічному оснащенні з притисканням до повного затвердіння протягом 24 годин.

3. Результати та їх обговорення

На рис. 3 представлені експериментальні комбіновані друковані плати на алюмінієвих основах з тонкими III діелектриками, які вкриті мідною або алюмінієвою фольгою. На рис. 4 представлено ТСЯ плат для перевірки основних хімічних, механічних та електричних властивостей розроблених комбінованих друкованих плат та ТСЯ електронного модуля для дослідження теплових властивостей плат.

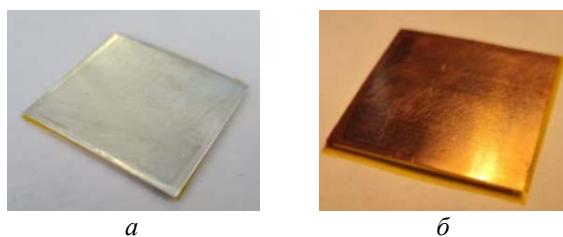


Рис. 3. Експериментальні комбіновані друковані плати на алюмінієвих основах з ПІ діелектриками, які вкриті мідною (а) або алюмінієвою фольгою (б)

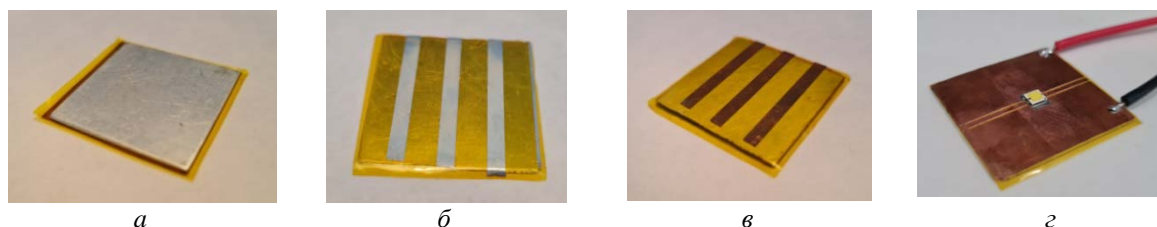


Рис. 4. Тестові структури якості для перевірки основних властивостей розроблених комбінованих друкованих плат: а – для перевірки електричної міцності; б – для перевірки міцності на відшаровування алюмінієвої фольги; в – для перевірки міцності на відшаровування мідної фольги; г – для перевірки теплових властивостей

Дослідження основних хімічних, механічних, електричних та теплових властивостей виготовлених експериментальних зразків комбінованих друкованих плат на алюмінієвих основах з тонкими ПІ діелектриками проводились у нормальних кліматичних умовах. Перевірка зовнішнього вигляду плат проводилася візуальним оглядом із застосуванням, за необхідності, оптичних приладів (лупа, мікроскоп), кратність збільшення яких не менше чотирьох.

Експериментальні комбіновані плати та тестові структури якості плат проходили перевірку на сумісність їх процесів виготовлення із основними технологічними процесами, які прийняті у виробництві друкованих плат. У тому числі на сумісність з процесами нанесення фоторезисту на алюмінієву та мідну фольгу та на композиційні теплопровідні ПІ шари в платах. Проводилася також перевірка на сумісність із процесами формування фоторезистивних масок, рідинного травлення алюмінієвої та мідної фольги та композиційних ПІ шарів, а також видалення фоторезистивних масок та фінішного очищення плат.

Перевірка механічних та електричних властивостей розроблених комбінованих плат і ТСЯ плат проводилася відповідно до стандарту IPC-TM-650 Test Methods Manual (Посібник з методів випробувань, США), який є найбільш всебічним довідником і який широко використовується за методами випробувань фольгованих діелектриків і за допомогою яких перевіряються їх основні властивості [11].

Перевірка міцності на відшаровування мідної або алюмінієвої фольги проводилася відповідно до гармонізованого стандарту IPC-TM-650, метод тестування 2.4.9. Міцність на відшаровування мідної або алюмінієвої фольги перевірялася на трьох зразках шириною 3 мм та довжиною 35 мм, підготовлених за допомогою фотолітографії, методом відшаровування під кутом 180°. Перед випробуванням один кінець кожної смужки мідної або алюмінієвої фольги відокремлювали вручну від лакового ПІ шару і закріплювали його в затиску вимірювального пристрою. На кожній смужці визначали мінімальне стійке значення навантаження, що викликає відрив смужки фольги на довжину щонайменше 20 мм. Міцність зчеплення фольги визначалася як середнє арифметичне значення величини навантаження при мініальному та максимальному відшаровуванні смужок. За позитивний результат приймалося середнє арифметичне значення навантажень трьох паралельних вимірювань фольги.

Перевірка електричної міцності ПІ діелектриків комбінованих плат на теплопровідній алюмінієвій основі проводилася відповідно до гармонізованого стандарту IPC-TM-650, метод тестування 2.5.6.3 «Напруга пробєю діелектрика та діелектрична міцність» за допомогою вимірювача напруги пробєю АІМ-90.

При проведенні випробувань зразків комбінованих плат на основі промислових стандартних багат шарових термозварюваних ПМФ плівок DuPont™ Kapton® 120FN 616, в яких застосовано плівку-основу Kapton® HN товщиною 25 мкм з теплопровідністю 0,12 Вт/(м·К), були отримані наступні результати:

- усереднені значення міцності на відшарування мідної або алюмінієвої фольги у зразків, що випробовуються, від ПІ діелектрика склали не менше 0,25 кгс/см (250 г/см або 2,5 Н/см);

- усереднені значення напруги пробою діелектричної теплопровідної ПІ плівки Kapton® 120FN 616 склали від 4,0 кВ/мил (160 В/мкм) до 5,0 кВ/мил (200 В/мкм).

При проведенні випробувань зразків комбінованих плат на основі промислових теплопровідних термозварюваних ПМФ плівок Kapton®120FMT616, в яких застосовано плівку-основу Kapton®120FMT616 товщиною 25 мкм з теплопровідністю 0,46 Вт/(м·К), було отримано наступні результати:

- усереднені значення міцності на відшарування мідної або алюмінієвої фольги від ПІ діелектрика у зразків, що випробовуються, склали не менше 0,25 кгс/см (250 г/см або 2,5 Н/см);

- усереднені значення напруги пробою діелектричної ПІ плівки Kapton® 120FN 616 становили понад 4,0 кВ/мил (160 В/мкм).

При проведенні випробувань зразків комбінованих плат на основі безадгезивних мідь-поліімідних або алюміній-поліімідних лакофольгових діелектриків з ПІ шаром товщиною 25–30 мкм з теплопровідністю до 1,0 Вт/(м·К), були отримані наступні результати:

- усереднені значення міцності на відшарування безадгезивного лакофольгового теплопровідного ПІ діелектрика фольгованого міддю або алюмінієм від силіконового адгезиву SE 4485 у зразків, що випробовуються, склали не менше 0,2 кгс/см (200 г/см або 2,0 Н/см);

- усереднені значення напруги пробою експериментального високотеплопровідного композиційного ПІ шару товщиною 25–30 мкм з теплопровідністю 1,0 Вт/(м·К) становили понад 3,0 кВ/мил (120 В/мкм).

Експериментальні дослідження теплових властивостей плат проводилися в термошафі за допомогою ТСЯ електронного модулю з комбінованою платою на алюмінієвій основі з промисловою стандартною багат шаровою термозварюваною ПМФ плівкою DuPont™ Kapton® 120FN 616 зі стандартною теплопровідністю $\sim 0,12$ Вт/(м·К) при задовільних та погіршених умовах експлуатації.

На рис. 5 представлено графіки залежності температур нагріву плати ТСЯ електронного модулю з розміром плати 35×35 мм в області паяння джерела тепла потужністю до 2 Вт, та температур зворотної сторони алюмінієвої основи плати товщиною 1 мм від часу до переходу у стійкий температурний стан.

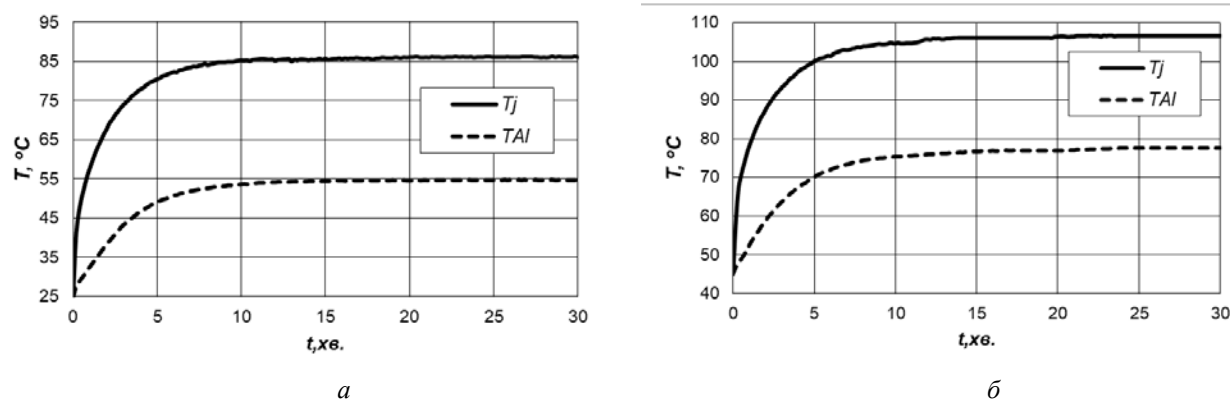


Рис. 5. Залежність зміни температури нагріву на платі електронного модулю з розміром 35×35 мм в області паяння джерела тепла T_j та температури зворотної сторони алюмінієвої основи плати T_{Al} від часу при переході у стабільний температурний стан: *a* – температура довкілля $T_a = 25^\circ\text{C}$; *б* – температура довкілля, $T_a = 45^\circ\text{C}$

З графіка на рис. 5, *a* видно, що при використанні джерела тепла площею $4,55 \text{ мм}^2$ з потужністю 2 Вт при температурі навколишнього середовища $T_a = 25^\circ\text{C}$ температура в області паяння на платі досягає $86,1^\circ\text{C}$ за 20 хвилин, переходячи у стійкий стан. Температура зворотної сторони алюмінієвої основи плати за цей проміжок часу переходить у стійкий стан при $54,8^\circ\text{C}$.

З графіка на рис. 5, *b* слідує, що за температури навколишнього середовища $T_a = 45^\circ\text{C}$ температура в області пайки на платі досягає $106,6^\circ\text{C}$ за 20 хвилин, переходячи у стійкий стан. Температура зворотної сторони алюмінієвої основи плати переходить у стійкий стан при $77,5^\circ\text{C}$.

Результати експериментальних досліджень температур на платі ТСЯ електронного модуля з комбінованою платою на основі промислової стандартної багат шарової термозварювальної ПМФ плівки DuPont™ Kapton® 120FN 616 зі стандартною теплопровідністю $\sim 0,12 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ практично збігаються з результатами моделювання теплових властивостей плати з розміром $35 \times 35 \text{ мм}$ моделі 3 електронного модуля на основі комбінованої плати з багат шаровою ПМФ плівкою DuPont™ Kapton® 120FN 616, які були проведені за допомогою програмного комплексу COMSOL MULTIPHYSICS при погіршених умовах експлуатації (рис. 2).

Таким чином, результати проведених досліджень експериментальних зразків комбінованих друкованих плат на алюмінієвих основах з тонкими ПІ діелектриками підтвердили правильність обраних конструктивно-технологічних рішень, способів виготовлення плат та застосованих у них матеріалів. Експериментальні комбіновані плати пройшли успішну перевірку на сумісність їх технологічних процесів виготовлення з основними технологічними процесами, які прийняті у виробництві друкованих плат.

Нові підходи при розробці комбінованих друкованих плат на алюмінієвих основах з ПІ діелектриками, у тому числі теплопровідними, забезпечують значно менший загальний тепловий опір розробленої тепловідвідної системи плат (від $\sim 0,23$ до $\sim 0,06^\circ\text{C}/\text{Вт}$) [1], що мають кращі показники в порівнянні з середніми значеннями ($\sim 0,43^\circ\text{C}/\text{Вт}$) повних теплових опорів діелектричних шарів на основі сучасних стандартних теплопровідних адгезивів із полімерів із добавками дрібнодисперсних порошків теплопровідних керамік і які не поступаються за тепловою ефективністю промисловим платам MC PCB таких визнаних світових виробників плат як Ruikai, Totking, (Китай) і Bergquist (США) [12].

Висновки

Авторами запропоновано нові підходи для виготовлення комбінованих плат на алюмінієвих основах з різними типами тонких ПІ діелектриків, у тому числі теплопровідних, які вкриті мідною або алюмінієвою фольгою.

Розроблено конструктивно-технологічні рішення, способи виготовлення та виготовлено експериментальні зразки комбінованих друкованих плат на алюмінієвих основах із застосуванням як діелектриків промислових тонких поліімідних плівок з теплопровідністю від $0,12$ до $0,46 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ з термозварюваними двосторонніми фторполімерними покриттями Teflon® FEP. Розроблено конструктивно-технологічні рішення, способи виготовлення і виготовлено експериментальні зразки комбінованих друкованих плат на алюмінієвих основах із застосуванням розроблених безадгезивних мідь-поліімідних та алюміній-поліімідних лакофольгових діелектриків з теплопровідністю лакових поліімідних шарів від $0,12 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ до $1,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ та більше.

Досліджено основні хімічні, механічні, електричні та теплові властивості різних типів експериментальних комбінованих друкованих плат на алюмінієвих основах з тонкими поліімідними діелектриками для застосування в електронних модулях та друкованих вузлах для світлодіодних джерел світла, приймачів концентрованого сонячного випромінювання, мікроелектронних сенсорних модулів електромагнітних випромінювань, детекторів елементарних частинок та інших електронних виробів. У тому числі із застосуванням COB та COF технологій збирання різноманітних модулів з безкорпусними напівпровідниковими чіпами з підвищеною потужністю.

Список літератури:

1. Боднар Д. Металеві та композитні теплопровідні матеріали для потужних напівпровідникових корпусів // Компоненти та технології. 2014. № 12. С. 155–160.
2. 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. 115–126.
3. Поліімідна плівка DuPont™ Kapton® HN, <https://www.dupont.com/products/kapton-hn.html> // офіційний сайт (дата звернення 05.12.2023).
4. Теплопровідна поліімідна плівка DuPont Kapton MT, <https://www.dupont.com/products/kapton-mt.html> // офіційний сайт (дата звернення 05.12.2023).
5. Теплопровідна електроізолююча поліімідна плівка типу KYPI-MT (Китай), <https://www.kying.com> // офіційний сайт (дата звернення 05.12.2023).
6. 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.
7. Поліімідно-фторопластова плівка DuPont™Kapton® 120FN616, <https://www.dupont.com/products/kapton-fmt.html> // офіційний сайт (дата звернення 05.12.2023).
8. Теплопровідна поліімідно-фторопластова плівка DuPont™ Kapton® 120FMT616, <https://www.dupont.com/products/kapton-fmt.html> // офіційний сайт (дата звернення 05.12.2023).
9. Теплопровідна поліімідно-фторопластова плівка, що термозварюється KYMIDE KYPIFMT 616 (Китай), <https://www.kying.com> // офіційний сайт (дата звернення 05.12.2023).
10. Dow Corning SE 4485 thermally conductive silicone adhesive, <https://www.dowcorning.com> // офіційний сайт (дата звернення 05.12.2023).
11. Стандарт IPC-TM-650:2002. Test Methods Manual : посібник із вибору методів контролю друкованих плат.
12. Максимов А. Порівняльне дослідження теплопровідних властивостей матеріалів // Напівпровідникова світлотехніка. 2013. №4. С. 3–15.

Надійшла до редколегії 15.12.2023

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

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