

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

КОМБІНОВАНІ ТЕПЛОПРОВІДНІ ПЛАТИ З ДІЕЛЕКТРИКАМИ З ПОЛІМІДУ

Вступ

Різноманітність виконань сучасних напівпровідникових приладів, їхнє застосування для широкого спектра завдань, необхідність відведення великої кількості тепла, робота в жорстких умовах експлуатації – все це зумовлює пошук унікальних конструкторських і технологічних рішень для виготовлення електронних пристроїв. Необхідні спеціальні матеріали, що володіють високою технологічністю і виправданою собівартістю при забезпеченні необхідних експлуатаційних характеристик виробів.

Також необхідна оптимізація конструкції і технології їх складання, використання нових матеріалів з поліпшеними теплопровідними властивостями. При цьому застосування нових матеріалів з поліпшеними теплопровідними властивостями часто залишається єдиним прийнятним способом відведення тепла від поверхні напівпровідникових чипів.

Очевидно, що в міру збільшення потужності та робочої температури напівпровідникових приладів роль і використання нових матеріалів з високою теплопровідністю зростатиме. Це є основним стимулом до створення нових перспективних матеріалів з поліпшеними параметрами, зокрема композитних теплопровідних матеріалів [1].

Особливе значення мають теплові та електрофізичні параметри металевих і діелектричних теплопровідних матеріалів різних друкованих плат, зокрема плат на металевих основах. У сучасних потужних напівпровідникових пристроях для виготовлення таких друкованих плат використовуються композитні структури DBC (Direct Bonded Copper) і DPC (Direct Plated Copper), а також комбіновані структури MC PCB (Metal Core PCB).

Застосування плат з DBC і DPC керамікою є одним із найефективніших способів відводу тепла, однак їхнє використання часто призводить до необґрунтованого збільшення вартості електронних модулів і друкованих вузлів на їхній основі через високу ціну такого типу друкованих плат.

Стандартна комбінована структура MC PCB – це структура, що складається з тепловідвідної металевої основи, наприклад, з алюмінію, міді або їхніх сплавів завтовшки 0,5 – 3,2 мм, на якій розміщено тепловідвідний діелектричний шар з високою електричною міцністю завтовшки 100 – 150 мкм, ламінований, наприклад, мідною або алюмінієвою фольгою завтовшки 35 – 350 мкм.

Наразі багатьма компаніями у світі проводяться роботи з підвищення характеристик теплопровідних склеювальних діелектриків і друкованих плат MC PCB на їхній основі. Такі виробники як Ruikai, Totking, (Китай) і Bergquist (США) на основі теплопровідних адгезивів із полімерів із добавками дрібнодисперсних порошків теплопровідних керамік випускають плати MC PCB зі значеннями теплових опорів від 0,45 до 1,42 °C / Вт. Однак подібні друковані плати на металевих основах мають, як і раніше, істотно високі ціни. Проводилися також дослідження зі створення плат MC PCB на алюмінієвих основах, у яких було застосовано як діелектрик стандартні поліімідні плівки компанії DuPont серій LX і LA порівняно малої товщини близько 20 мкм [2]. Такі комбіновані плати давали змогу забезпечити нижчий тепловий опір усієї системи «*p-n*-перехід – навколишнє середовище», а їхній процес виготовлення доволі простий і економічний.

Тому в даній роботі компанією ТОВ "НВП "ЛТУ" (Україна) запропоновано нові конструктивно-технологічні підходи щодо створення власних плат типу MC PCB з різними варіантами поліімідних (ПІ) діелектриків. Зокрема, тонких теплопровідних ПІ діелектриків, які дають змогу ще більше знизити витрати на матеріали, які використовуються в платах,

і витрати на їх виготовлення. Застосування в комбінованих платах як діелектриків поліімідних плівок дає змогу виділити такі плати за конструкцією в особливу низку, оскільки в них використовують ПП плівки порівняно малої товщини, близько 0,02 – 0,025 мм проти 0,1 мм у стандартних платах МС РСВ. Хоча поліімідні плівки мають низькі значення теплопровідності близько 0,12 – 0,14 Вт/(м·К), проте їхня мала товщина в платах забезпечує доволі малі теплові опори тепловідної системи загалом. При цьому ПП плівки, не дивлячись на малу товщину, мають високу електричну міцність (до 110 кВ/мм і більше) порівняно з іншими типами плат МС РСВ. А використання інноваційних композитних, зокрема теплопровідних ПП плівок з підвищеною теплопровідністю в інтервалі від 0,36 до 0,75 Вт/(м·К), дають змогу ще більше зменшити сумарний тепловий опір друкованих плат на металевих основах з тонкими ПП діелектриками [3 – 6].

Таким чином, метою роботи є розробка нових підходів для створення вдосконалених конструктивно-технологічних рішень комбінованих плат на теплопровідних основах для електронних модулів і друкованих вузлів з використанням як діелектриків у платах тонких поліімідних плівок. Зокрема теплопровідних композитних поліімідних плівок, що випускаються промислово, з теплопровідністю від 0,36 до 0,75 Вт/(м·К).

1. Предмет та методи дослідження

1.1. Теплопровідні властивості поліімідних діелектриків для комбінованих теплопровідних друкованих плат

Оскільки основною метою використання металевих друкованих плат у радіоелектронній апаратурі є поліпшення теплопередачі від електронних теплонавантажених компонентів до системи забезпечення теплового режиму, основним критерієм під час розрахунків доцільно розглядати тепловий опір у системі «напівпровідникова структура – зворотний бік друкованої плати».

Відведення тепла від електронних компонентів здійснюється шляхом початкового розведення теплового потоку тепловідводом і подальшого скидання в навколишнє середовище за рахунок конвекції та випромінювання. Отже, для забезпечення максимального відведення тепла потрібен обґрунтований і ретельний підбір матеріалів з необхідними фізичними параметрами, оптимізація об'ємних і геометричних характеристик друкованої плати.

Теоретичні дослідження теплопровідних властивостей металевих друкованих плат полягають у розробленні теплових моделей пристрою. В основі будь-якої теплової моделі лежить поняття теплового опору. Що нижчий тепловий опір, то більше і швидше відведення тепла. Передача тепла з одного місця (наприклад, напівпровідникового кристала) в інше (навколишнє повітря) визначається товщиною шарів і тепловим опором матеріалів, а також площею їхнього дотику (що більша площа дотику, то більшу кількість тепла може бути передано). Усе це означає, що якщо переходи кристал – теплопровідна основа електронного компонента і теплопровідна основа – тепловідвід плати мають невинувато високі значення теплового опору, то не буде забезпечено необхідне охолодження кристала.

Величина теплового опору металевих друкованих плат в основному визначається теплопровідністю діелектричного шару між фольгою друкованих провідників і металевією основою плати. За ідентичності таких величин, як площа плати, товщина фольги, товщина і властивості металевієї основи, товщина шару припою або клейового з'єднання між теплопровідною основою електронного компонента і контактною площадкою на фользі друкованих провідників, товщина діелектрика і теплопровідність діелектрика будуть визначальними для теплового опору плати.

Для теоретичного дослідження різних варіантів тестових зразків діелектричних ПП плівок було обрано такі типи поліімідних плівок, які виробляють у промислових масштабах:

- поліімідна плівка DuPont™ Kapton® HN завтовшки 25 мкм з мінімальною теплопровідністю 0,12 Вт/(м·К) [3];

- теплопровідна композитна поліімідна плівка KYPI – МТ китайської компанії Suzhou (Сучжоу) Kyng industrial materials Co. ltd завтовшки 25 мкм із теплопровідністю 0,36 Вт/(м·К) [4];
- теплопровідна композитна поліімідна плівка DuPont™ Kapton® МТ завтовшки 25 мкм із теплопровідністю 0,46 Вт/(м·К) [5];
- теплопровідна композитна поліімідна плівка DuPont™ Kapton® МТ + завтовшки 25 мкм із теплопровідністю 0,75 Вт/(м·К) [6].

1.2. Оцінка теплових опорів різних варіантів поліімідних діелектриків для комбінованих друкованих плат

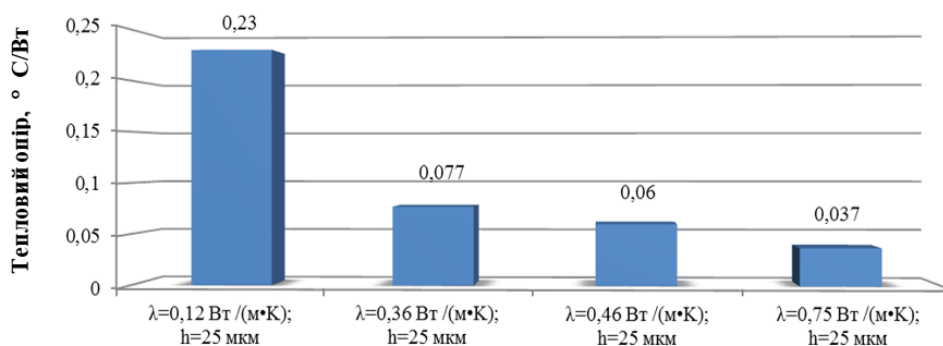
У табл. 1 наведено оціночні розрахункові значення теплових опорів різних варіантів зразків ПП плівок. Для розрахунку теплових опорів необхідне визначення їхньої залежності від фізичних і геометричних параметрів досліджуваних зразків поліімідних плівок. Вираз для теплових опорів з урахуванням геометричних і фізичних параметрів ділянки поширення тепла має такий вигляд для плоскої стінки [7, 8]:

$$R_{\theta} = \frac{h}{\lambda_T \times S}, \quad (1)$$

де h , мкм – товщина ділянки поширення тепла; λ_T , Вт/(м·К) – коефіцієнт теплопровідності; S , мм² – площа плоскої стінки; R_{θ} , С/Вт – тепловий опір ділянок теплових ланцюгів ПП плівок.

Таблиця 1
Значення теплових опорів ділянок теплових ланцюгів зразків ПП плівок

Ділянка розповсюдження тепла	Значення теплового опору, °С/Вт
Діелектричний поліімідний шар з геометричними розмірами 30х30 мм, товщиною 25 мкм з теплопровідністю $\lambda = 0,12$ Вт/(м·К)	0,23
Діелектричний поліімідний шар з геометричними розмірами 30х30 мм, товщиною 25 мкм з теплопровідністю $\lambda = 0,36$ Вт/(м·К)	0,077
Діелектричний поліімідний шар з геометричними розмірами 30х30 мм, товщиною 25 мкм з теплопровідністю $\lambda = 0,46$ Вт/(м·К)	0,06
Діелектричний поліімідний шар з геометричними розмірами 30х30 мм, товщиною 25 мкм з теплопровідністю $\lambda = 0,75$ Вт/(м·К)	0,037



Параметри діелектричних поліімідних плівок

Рис. 1. Значення теплових опорів ділянок теплових ланцюгів ПП плівок

Як випливає з табл. 1, для різних ділянок досліджених варіантів поліімідних плівок найменші значення теплових опорів можна отримати для зразків плівок завтовшки 25 мкм

із теплопровідністю $\lambda = 0,75$ Вт/(м·К). На рис. 1 наведено результати порівняння значень теплових опорів досліджуваних варіантів поліімідних плівок. Як випливає з рис. 1, обрані конструктивні параметри зразків поліімідних плівок мають хороші потенційні можливості для створення комбінованих друкованих плат на теплопровідній основі зі стандартними типорозмірами з істотно низькими значеннями теплових опорів поліімідних діелектриків (від $\sim 0,23$ до $\sim 0,037$ °С/Вт), особливо з теплопровідних поліімідних плівок.

2. Результати та їх обговорення

2.1. Комбіновані теплопровідні плати для приймачів концентрованого сонячного випромінювання

Для відпрацювання технології виготовлення приймачів було розроблено та виготовлено різні типи тестових структур якості (ТСЯ) і один експериментальний зразок приймача концентрованого сонячного випромінювання на основі комбінованих плат на теплопровідних основах з діелектриками з поліімиду. ТСЯ складалися з одного сонячного елемента (СЕ), комутаційної плати з комутаційним шаром з алюмінієвої фольги завтовшки 30 мкм, шаром ПІ діелектрика завтовшки 20 мкм і плоскої теплопровідної основи з алюмінію або міді. ТСЯ виготовляли шляхом приклеювання тильного контакту СЕ теплопровідним і електропровідним клеєм до плоского нікельованого мідного або алюмінієвого тепловідводу з розмірами 40х40 мм, приєднання комутаційної плати до фронтальних контактів СЕ методом УЗ-зварювання і герметизації СЕ оптично прозорою композицією Elastosil S690, Waker Silicones, Німеччина. Комутаційна плата на основі гнучкого безадгезивного алюміній-поліімідного носія приклеювалася до тепловідводу з боку поліімиду діелектричним клеєм УП-10-14-2, Україна.

У ТСЯ і експериментальному зразку приймача було застосовано вискоефективні триперехідні арсенід-галієві СЕ виробництва компаній ENE, Бельгія та Azur Space Solar Power GmbH, Німеччина, з ККД від 35 до 36 % відповідно. Для забезпечення електричного і теплового контакту між СЕ і тепловідводом використовували електропровідний теплопровідний клей Еро-Тек Е4110, Німеччина, з товщиною клейового шару 10 – 20 мкм з теплопровідністю 1,5 Вт/(м·К). Комутаційна плата виготовлялася з безадгезивної алюміній-поліімідної плівки ФДІ-А-50. ТСЯ та експериментальний зразок приймача концентрованого сонячного випромінювання виготовлявся за допомогою Chip on flex (COF) – технології складання..

На рис. 2, а, б, в наведено зразки ТСЯ із розмірами 40х40 мм і різною конфігурацією комутаційних плат.

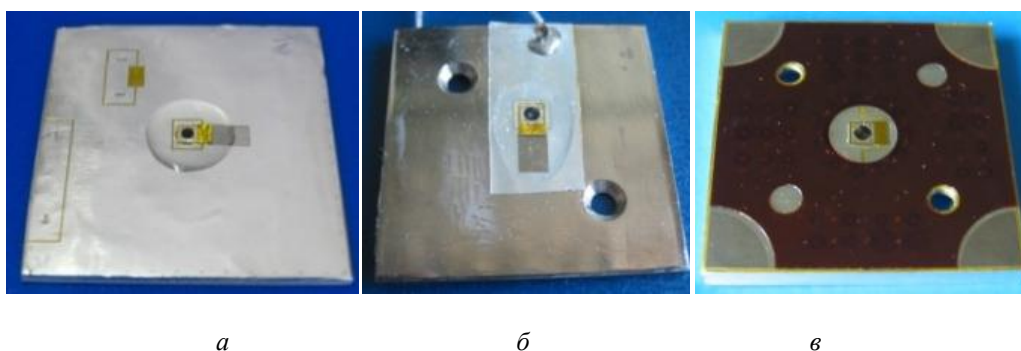


Рис. 2. Зразки ТСЯ: а – з комутаційною платою 40х40 мм; б – з комутаційною платою 30х10 мм; в – з комутаційною платою 40х40 мм покритою поліімідною плівкою для додаткового відведення тепла за допомогою випромінювання

На рис. 3 представлено експериментальний зразок багатоелементного приймача концентрованого сонячного випромінювання.

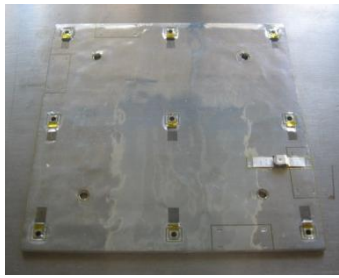


Рис. 3. Зразок приймача, виготовленого за COF-технологією складання на плоскому алюмінієвому тепловідводі

До складу приймача концентрованого сонячного випромінювання входили:

- триперехідні GaInP / GaAs / Ge сонячні елементи, шт. – 9;
- алюміній-поліімідна комутаційна плата, шт. – 1;
- захисний діод, шт. – 1;
- алюмінієвий плоский тепловідвід, шт. – 1.

У табл. 2 наведено середні значення теплових опорів ділянок теплових ланцюгів клейових з'єднань і ПІ шарів у комбінованих платах на теплопровідних основах.

Таблиця 2

Середні значення теплових опорів ділянок теплових ланцюгів клейових шарів і ПІ шарів у комбінованих платах приймачів

Ділянка поширення тепла	Значення теплового опору, °C/Вт
Поліімідний шар	не більше 0,18
Шар діелектричного клею УП-10-14-2	не більше 0,25

Досліджені конструктивні параметри і теплові властивості розроблених комбінованих плат із застосуванням тонких поліімідних діелектриків і діелектричних адгезивів для приймачів концентрованого сонячного випромінювання підтвердили можливість забезпечення середніх значень повних теплових опорів ділянок теплових ланцюгів «ПІ шар – шар діелектричного адгезиву», що не перевищують 0,43 °C/Вт, і не поступаються за тепловою ефективністю комерційно прийнятним стандартним комбінованим структурам плат МС РСВ [8, 9]:

2.2. Комбіновані теплопровідні плати для тривимірних конструкцій світлодіодних освітлювачів

Матеріали, що використовуються в корпусі світлодіодів, особливо підкладки з високою теплопровідністю, мають ключове значення для розробників у поліпшенні характеристик світлодіодів (СД), спрощенні процесу проектування і зниженні загальних витрат. Поліімідні матеріали та їхні унікальні властивості, включно з надійністю, тонкістю, міцністю і гнучкістю ПІ плівок, широко використовуються розробниками в комбінованих платах у світлодіодному освітленні. Нові матеріали дають змогу створювати тривимірні конструкції СД модулів.

На рис. 4 показано зразок теплопровідної підкладки DuPont™ Coolam™ 3D, використаної в концепції заміни лампи А19.

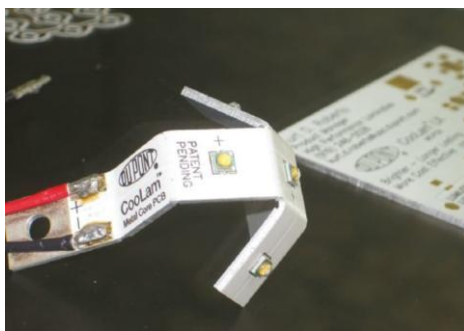


Рис. 4. Зразок теплопровідної підкладки DuPont™ CoolLam™ 3D

Теплопровідні підкладки DuPont™ CoolLam™ були розроблені для використання в друкованих платах з металевою основою. Ці термопластичні ламінати являють собою композит з металевої фольги і запатентованого теплопровідного поліімідного діелектрика, з'єднаного з металевою основою. Такі теплопровідні підкладки призначені для світлодіодних освітлювачів високої яскравості. Теплопровідні підкладки DuPont™ CoolLam®, виготовлені із запатентованого поліімідного діелектрика, спеціально розробленого для забезпечення високої теплопровідності, розсіюють тепло швидше і надійніше, ніж звичайні плати на основі епоксидної смоли. Завдяки дуже низькому тепловому опору та максимальній робочій температурі 180 °C теплопровідні підкладки DuPont™ CoolLam™ 3D забезпечують стабільну роботу в широкому діапазоні умов навколишнього середовища. Розроблена технологія дає змогу також виконувати одноразовий вигин комбінованої підкладки під кутом 90° або більше спільно з безперервною алюмінієвою основою завтовшки від 0,2 до 2 мм, що в ній є, ПІ діелектриком завтовшки приблизно 12 мкм та мідною комутуючою фольгою завтовшки приблизно 35 мкм. (рис. 4).

На рис. 5 представлено конструктивні варіанти об'ємних світлодіодних модулів на теплопровідних підкладках, що згинаються DuPont™ CoolLam™ 3D.



Рис. 5. Приклади об'ємних світлодіодних модулів на теплопровідних підкладках, що згинаються DuPont™ CoolLam™ 3D

Згинальні підкладки з ПІ діелектриками дають змогу спростити конструкції об'ємних СД модулів, які коштують менше у виробництві та під час монтажу в освітлювачах, а також служать довше з плином часу. Теплопровідна плата, що згинається, дає змогу керувати світловіддачею світлодіодів, направляючи світло туди, куди потрібно [10, 11].

Авторами статті також були розроблені принципово нові дзеркалізовані об'ємні світлоелементні модулі (LEM Light Effective Module), що виготовляються на основі SMD, міні-COB і COB світлодіодів для інноваційних LED LEM LAMP світлодіодних світлоелементних ламп ретрофітів. Комбінована теплопровідна плата об'ємного світлодіодного модуля (СДМ) являє собою тримач-тепловідвід світлодіодного випромінювача, який виконаний у вигляді єдиного 3D теплопровідного світловідбиваючого дзеркалізованого елемента, що виготовляється з матеріалу MIRO-SILVER 4270AG компанії ALANOD GmbH & Co (Німеччина) різної товщини. Основа тримача-тепловідводу механічно утримує три або більше вигнутих відбивачів-радіаторів, які розташовані на відстані один від одного. На фронтальних

поверхнях теплопровідних відбивачів-радіаторів сформовано дзеркальні покриття із загальним коефіцієнтом відбиття до 98 %. Світловипромінювальні напівпровідникові прилади рівномірно встановлюються пайкою на контактні майданчики алюміній-поліімідних комутаційних плат. Плати зі світлодіодами приклеюють до поверхні відбивачів-радіаторів за допомогою теплопровідного клею TCOR компанії Electrolube (Великобританія) з теплопровідністю до 1,8 Вт/м·К.

Сутність запропонованих технічних рішень більш детально пояснюється конкретними прикладами їх виконання. На нижче наведених фотографіях представлено послідовність виготовлення різних типів світлодіодних модулів на SMD, міні-COB і COB світлодіодах, зовнішній вигляд модулів, їхній склад і компоновання.

На рис. 6 представлено послідовність операцій складання зразка об'ємного світлодіодного міні-COB модуля потужністю 15 Вт на MCOB світлодіодах потужністю до 1,5 Вт.

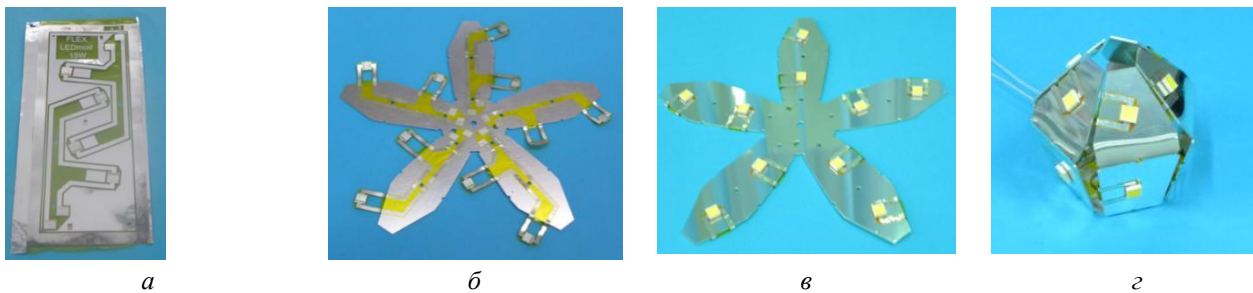


Рис. 6. Зразок дзеркалізованого об'ємного СДМ потужністю 15 Вт, його склад, компоновання і послідовність складання: *a* – гнучка плата, *б* – гнучко-жорстка плата, *в* – гнучко-жорстка плата зі світлодіодами, *г* – об'ємний світлодіодний модуль

На рис. 7 представлено послідовність формування об'ємного світлодіодного SMD модуля.

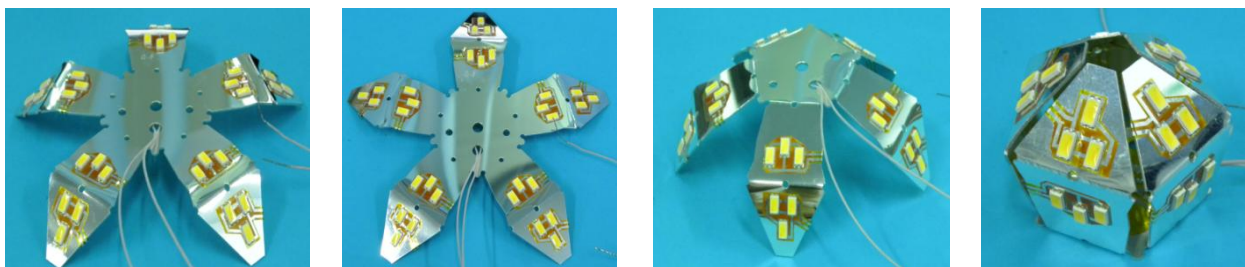


Рис. 7. Послідовність формування об'ємного світлодіодного SMD модуля

На рис. 8 представлено експериментальний зразок об'ємного дзеркалізованого світлодіодного модуля потужністю 15 Вт на COB – світлодіодах.



Рис. 8. Експериментальний зразок об'ємного дзеркалізованого СДМ потужністю 15 Вт на COB – світлодіодах компанії CREE, США

Запропоновані технічні рішення забезпечили підвищення енергетичної та оптичної ефективності об'ємних світлодіодних модулів при гарантуванні ефективного відведення тепла від світлодіодних приладів. Розроблена технологія дала змогу поліпшити теплові та

оптичні параметри світлодіодних модулів для нових прототипів потужних ламп із цоколем E27. Зокрема для ламп, що працюють у діапазоні потужностей від 15 до 40 Вт і більше в колбах із типорозмірами A95 і A105. Позитивний технічний результат було забезпечено завдяки збільшенню площі тримачів-тепловідводів для відводу тепла кондукцією (більш ніж у 2,5 – 3 рази порівняно з СДМ плоского типу з діаметром плоского радіатора до 80 мм) [12, 13].

2.3. Нові підходи для створення ефективних комбінованих друкованих плат на теплопровідних основах із діелектриками з полііміду

Авторами розглянуто варіанти технічних рішень комбінованих друкованих плат на теплопровідних основах з декількома типами ПП плівок – основ з термозварювальними термопластичними адгезивними покриттями. Верхні комутувальні шари плат складаються з алюмінієвої або мідної фольги, теплопровідні основи плат виконані з міді або з алюмінієвого сплаву. Діелектричні шари плат виконуються з поліімідної плівки-основи завтовшки до 25 мкм із термопластичними покриттями з двох боків завтовшки від 3 до 15 мкм кожна, за допомогою яких ПП діелектрик з'єднується з шаром металеві фольги та металеві теплопровідною основою.

На рис. 9 показано структуру комбінованої плати з діелектриком із поліімідної плівки з термозварювальними термопластичними покриттями з двох боків.

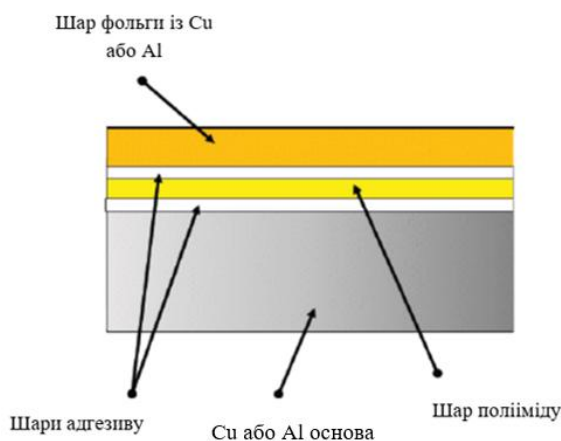


Рис. 9. Структура комбінованої плати з діелектриком із поліімідної плівки – основи з термозварювальними термопластичними покриттями

Наразі світове лідерство у створенні нових поліімідних матеріалів і в розширенні сфер їхнього застосування в промислових масштабах зберігає компанія DuPont (США). Відомі китайські компанії, такі як компанія Suzhou Kyung Industrial Materials Co. Ltd, яка була заснована в 2003 р., і компанія SOLVER POLYIMIDE, яка заснована в листопаді 2010 р., також досягли істотних успіхів. Вони професійно займаються дослідженнями та новими розробками, серійним виробництвом поліімідних плівок, теплопровідних поліімідних плівок, ПП плівок з термозварювальним термопластичним покриттям, а також експортом та імпортом різноманітних поліімідних матеріалів для двигунів та трансформаторів, матеріалів для 3D-друку, електротехнічних виробів і різноманітних пристроїв та обладнання.

2.3.1. Комбіновані друковані плати на теплопровідних основах із теплопровідними діелектриками з полііміду з термозварювальними термопластичними покриттями

Застосування в платах на теплопровідних основах промислових ПП плівок з підвищеною теплопровідністю від 0,36 до 0,75 Вт/(м·К) з адгезивними покриттями порівняно зі стандартними поліімідними плівками з теплопровідністю 0,12 Вт/(м·К) дає змогу суттєво зменшити повні теплові опори таких плат та розширити сферу їхнього застосування.

Теплопровідні ПІ плівки з адгезивними покриттями являють собою тришарові структури, які безпосередньо впливають на характеристики повних теплових опорів комбінованих теплопровідних друкованих плат.

Компанія DuPont виробляє і постачає на ринок теплопровідну термозварювальну поліімідно-фторопластову (ПМФ) плівку DuPont™ Kapton®120FMT616. Теплопровідна термозварювальна поліімідно-фторопластова плівка DuPont™ Kapton® 120 FMT616 володіє всіма перевагами теплопровідної поліімідної плівки Kapton® МТ завтовшки 25 мкм, а також додатковими перевагами термозварювальним фторполімерним покриттям Teflon® FEP, що нанесене на обидва боки плівки Kapton® МТ завтовшки 2,5 мкм кожне. Для використання в електронних пристроях плівки Kapton® МТ і Kapton® FMT вдало поєднують свої високі електричні властивості, теплопровідність (0,46 Вт/(м•К)) і механічну міцність. Плівки Kapton® МТ і Kapton® FMT мають вищий модуль пружності, ніж просто плівки Kapton® HN без покриття. Застосування DuPont™ Kapton®120FMT616 рекомендується в тих випадках, коли потрібна плівка, здатна до термозварювання, що має теплопровідність, вологостійкість і хімічну стійкість [14].

Компанія Suzhou Kying Industrial Materials Co. Ltd також виробляє і постачає на ринок теплопровідну термозварювальну поліімідно-фторопластову плівку KYMIDE KYPIFMT 616. Плівка KYMIDE KYPIFMT 616 – це теплопровідна поліімідна плівка завтовшки 25 мкм, вкрита шарами фторполімерної смоли з двох боків завтовшки до 3 мкм кожен. Загальна товщина плівки становить 0,031 мм. Плівка KYMIDE KYPIFMT 616 має термоізоляційні властивості і підвищену теплопровідність (0,36 Вт/(м•К)). Плівка має добру ізоляцію, хороший баланс електричних, хімічних і фізичних властивостей. Важливою перевагою ПМФ плівок є можливість фторопластових шарів зварюватися між собою і з поліімідом. Ця перевага дає змогу збільшити герметичність при з'єднанні шарів плівки, підвищити хімічну стійкість і гідростабільність багатошарових виробів [15].

Для отримання максимальних значень опору розшаруванню (не менше 5 Н/см) багатошарових матеріалів великої площі процес пресування термозварювальних поліімідно-фторопластових плівок рекомендується проводити за таких технологічних параметрів: $T_{\text{прес.}} = 270 - 280^{\circ}\text{C}$; $P_{\text{прес.}} = 5 - 10 \text{ МПа}$; $t_{\text{прес.}} = 10 \text{ мин}$. Процес монолітизації таких плівок відбувається за температури плавлення фторопластового шару (тобто за $270 - 280^{\circ}\text{C}$) [16].

2.3.2. Комбіновані друковані плати на теплопровідних основах з діелектриками з полііміду з термозварювальними термопластичними поліімідними покриттями

Компанія SOLVER POLYIMIDE виробляє і постачає на ринок термопластичний поліімідний лак SolverPI-Liquid 1620. Термопластичний поліімідний лак SolverPI-Liquid 1620 має гарну ударну в'язкість при виготовленні у вигляді плівки. Лак призначений для радіаційно-стійкого покриття емальованих проводів і поліімідних плівок, а також для просочення вугілля- і склопластиків і для інших цілей. Температурний режим експлуатації виробів на основі лаку SolverPI-Liquid 1620 – від мінус 60°C до плюс 220°C , короткочасно до 300°C . Лак також широко використовується у виробництві як поліімідний клей, що утворює низьков'язкі розплави при температурах $320 - 350^{\circ}\text{C}$. Під час нагрівання відбувається перетворення клею з поліамідокислотної форми в поліімідну. При зазначеній температурі поліімідний клей переходить у в'язкотекучий стан і забезпечує щільне з'єднання поверхонь, що зшиваються і забезпечують хорошу якість склеювання (міцність розшарування не менше 5 Н/см). За такого підходу склеювання поліімідних плівок малої площі (до декількох дм^2) можна здійснювати без попередньої активації поверхні плівок і не потрібне застосування спеціалізованого обладнання для щільного притиснення поверхонь, що склеюються, протягом усього часу термообробки. Застосовуваний для виготовлення ПІ покриттів рідкий термопластичний поліімідний лак SolverPI-Liquid 1620 має аналогічні властивості, що й типові рідкі поліімідні термореактивні лаки, і може бути використаний у технологічних процесах виготовлення ПІ матеріалів, що виготовляються з термореактивних ПІ лаків. Такі термопластичні покриття

мають гарну стійкість до високих температур, радіаційну стійкість, стійкість до вологи, корозійну стійкість, і мають малі значення коефіцієнта теплового розширення.

Термопластичні поліімідні покриття з лаку SolverPI-Adhesive 1620 можуть бути застосовані для виготовлення комбінованих друкованих плат на теплопровідній основі з тонкими діелектриками з будь-яких стандартних промислово випущених термореактивних ПІ плівок. А також з тонкими діелектриками з теплопровідних поліімідних плівок, що серійно випускаються і були розглянуті в цій статті раніше, такими як плівка DuPont™ Kapton® MT, плівка DuPont™ Kapton® MT + або плівка КУРІ – МТ. Термопластичні поліімідні покриття з лаку SolverPI-Adhesive 1620 також дають змогу виготовляти спеціалізовані двосторонні безадгезивні гнучкі ПІ плати з алюмінієвим покриттям [17, 18].

Плівки поліімідні з термопластичними поліімідними покриттями та поліімідні клеї з різних термопластичних ПІ лаків також можуть бути використані при створенні комбінованих плат типу MC PCB, що згинаються. Застосування поліімідних гнучких плівок з термопластичними ПІ покриттями дає змогу за необхідності згинати плоскі комбіновані плати з теплопровідною основою. При цьому можна виконати одноразовий вигин алюмінієвої основи, діелектрика і металевої комутуючої фольги спільно в композиті. Вигнута комбінована плата дає змогу створювати надійні складні 3 D конструкції виробів. Поліімідний матеріал (ПІ плівка – основа з термопластичними ПІ покриттями) діє як буфер механічних напружень і не передає ці механічні напруги через структуру плати, що призводить до збільшення терміну експлуатації електронних модулів на їхній основі.

На рис. 10 представлено варіанти вигнутих плат із металевою основою MC PCB компанії BAKNOR (Канада) [19].

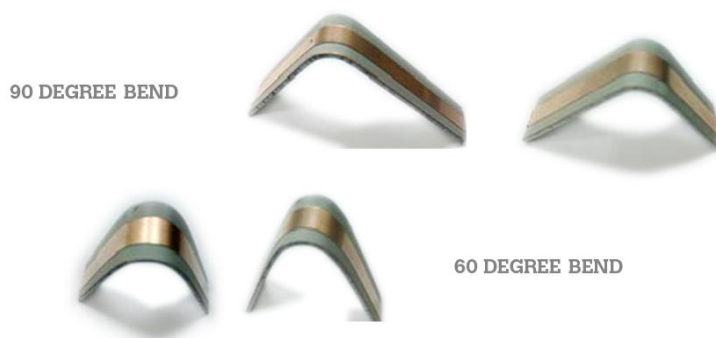


Рис. 10. варіанти вигнутих плат із металевою основою MC PCB компанії BAKNOR

Застосування сучасних промислових поліімідних плівок з термозварювальними фторопластовими покриттями та ПІ плівок з термопластичними поліімідними покриттями, що термозварюються, у комбінованих платах з теплопровідними основами, зокрема й таких, що згинаються, дають змогу суттєво розширити інноваційні можливості різних електронних модулів і друкованих вузлів, які розробляються.

Висновки

1. Проведено аналіз даних науково-технічних джерел щодо вибору сучасних матеріалів, призначених для використання при розробці та виготовленні комбінованих плат на теплопровідних основах з теплопровідними діелектриками з тонких плівок полііміду.

2. Розглянуто основні аспекти, що визначають проектний вигляд друкованих плат на металевих теплопровідних основах, у яких застосовано як діелектрики поліімідні плівки, зокрема зі збільшеною теплопровідністю в інтервалі від 0,12 до 0,75 Вт/(м К).

3. Розглянуто конструктивні характеристики різних дослідницьких зразків тонких поліімідних плівок, зокрема теплопровідних, і виконано розрахунок їхніх теплових опорів. Результатами розрахунків підтверджено можливість створення комбінованих друкованих

плат на теплопровідних основах зі стандартними типорозмірами зі зменшеними значеннями теплових опорів поліімідних діелектриків від $\sim 0,23$ ° до $\sim 0,037$ °C/Вт.

4. Досліджено конструктивні параметри та теплові властивості розроблених комбінованих плат із застосуванням тонких поліімідних діелектриків та діелектричних адгезивів для приймачів концентрованого сонячного випромінювання, що підтвердили на практиці можливість забезпечення середніх значень повних теплових опорів ділянок теплових кіл «ПІ шар – шар діелектричного адгезиву», що не перевищують 0,43 C/Вт, та які не поступаються за тепловою ефективністю платам МС РСВ зі стандартними розмірами.

5. Досліджено конструктивно-технологічні рішення об'ємних світлодіодних (СД) модулів при гарантуванні ефективного відводу тепла від світлодіодних джерел завдяки застосуванню комбінованих теплопровідних плат, що являють собою тримачі-тепловідводи світлодіодних випромінювачів, виконаних у вигляді єдиного 3D-тепловідбивного світловідбивального дзеркалізованого елемента, який є єдиним 3D-тепловідбивальним. Позитивний технічний результат було забезпечено завдяки збільшенню площі тримачів-тепловідводів більш ніж у 2,5 – 3 рази порівняно з СД модулями плоского типу. Розроблена технологія дала змогу поліпшити теплові та оптичні параметри світлодіодних модулів для прототипів потужних ламп із цоколем Е27. Зокрема для ламп, що працюють у діапазоні потужностей від 15 до 40 Вт і більше в колбах з типорозмірами А95 і А105.

6. Підтверджено потенційну можливість реалізації нових підходів для розроблення ефективних конструктивно-технологічних рішень комбінованих друкованих плат на теплопровідній основі, зокрема й тих, які можна вигинати, із застосуванням різних типів тонких теплопровідних ПІ плівок, які випускають у промисловості, із термозварювальними термопластичними покриттями, які термозварюються. Найкращий технічний результат забезпечують промислові теплопровідні ПІ плівки з термозварювальними термопластичними покриттями американських і китайських компаній, як-от DuPont, Suzhou Kyng Industrial Materials Co.Ltd і Solver Polyimide. При теплопровідності використовуваних тонких ПІ плівок в інтервалі від 0,12 до 0,75 Вт/(м К) їхні тришарові структури з двосторонніми термопластичними адгезивними покриттями дають змогу забезпечити значення повних теплових опорів від 1,5 до 2,8 °C•см²/Вт).

7. У компанії ТОВ "НВП "ЛТУ" (Україна) розроблено технологію та освоєно дрібносерійне виробництво поліімідних безадгезивних гнучких лакофольгових шаруватих матеріалів з потрібними геометричними розмірами та широкою номенклатурою застосовуваних алюмінієвих, мідних, нікелевих та інших типів фольги, які працюють у діапазоні температур від мінус 200 °C до плюс 250 °C для гнучких друкованих плат і які можна використати практично у всіх галузях спеціального приладобудування. Фахівці компанії успішно застосовують нові підходи для розроблення комерційно прийнятних конструкторських і технологічних рішень мікроелектронних модулів і друкованих вузлів на основі гнучких безадгезивних алюміній-поліімідних плат. Ці рішення дозволяють також ефективно використовувати Chip-on-board (COB) і Chip-on-flex (COF) технології для їх складання.

Список літератури:

1. Боднар Д. Металеві та композитні теплопровідні матеріали для потужних напівпровідникових корпусів // Компоненти та технології. 2014. № 12. С. 155 – 160.
2. Максимов А. Порівняльне дослідження теплопровідних властивостей матеріалів // Напівпровідникова світлотехніка. 2013. №4. С. 13 – 15.
3. Поліімідна плівка DuPont™ Kapton® HN, <https://www.dupont.com/products/kapton-hn.html> // офіційний сайт (дата звернення 05.02.2023).
4. Теплопровідна електроізолююча поліімідна плівка типу KYPI-MT (Китай), <https://www.kyng.com> // офіційний сайт (дата звернення 05.02.2023).
5. Теплопровідна поліімідна плівка DuPont Kapton MT, <https://www.dupont.com/products/kapton-mt.html> // офіційний сайт (дата звернення 05.02.2023).
6. Теплопровідна поліімідна плівка DuPont™ Kapton® MT+, <https://www.dupont.com/products/kapton-mt-plus.html> // Офіційний сайт (дата звернення 05.02.2023).

7. Муравйов Ю. Особливості проектування та виробництва друкованих плат на металевій основі // Електронні компоненти. Україна. 2010. № 7/8. С. 83 – 86.
8. Борщов В.М. Дослідження теплових характеристик високоефективних приймачів концентрованого сонячного випромінювання нового покоління / В.М. Борщов, В.А. Антонова, О.М. Лістратенко, Я.Я. Костишин, Г.В. Буеров, І.Т. Тимчук, М.А. Проценко // Технологія приладобудування. 2012. №1. С. 3-9.
9. Борщов В.М., Лістратенко О.М., Проценко М.А. и др. Нові підходи до створення високоефективних приймачів випромінювання концентраторних сонячних модулів // Радіотехніка. 2019. Вип. 197. С. 123 – 136.
10. DuPont™ CooLam™ LA03525016 thermal substrate. Rich Wessel i Kurt Roberts, DuPont Circuit & Packaging Materials, Research Triangle Park, NC. How Substrate Materials Affect LED Reliability // Lighting Technology. July, 2012, <https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/supplements/lt/features/articles/14414> // офіційний сайт (дата звернення 05.02.2023).
11. Patent US № US8707551B2. Bendable circuit board for LED mounting and interconnection // Daniel I. Amey et al., DuPont Electronics Inc., 2014.
12. Борщов В.М., Лістратенко О.М., Проценко М.А. и др. Нові конструктивно-технологічні рішення світлодіодних модулів для ламп-ретрофітів // Технологія та конструювання в електронній апаратурі. 2016. №6. С.3 – 10.
13. Борщов В.М., Лістратенко О.М., Проценко М.А. и др. Високоефективні об'ємні СДМ для надпотужних ламп побутового та промислового застосування // Оптиелектроніка та напівпровідникова техніка. 2017. Вип. 52. С.70 – 80.
14. Теплопровідна поліімідно-фторопластова плівка DuPont™ Kapton® 120FMT616, <https://www.dupont.com/products/kapton-fmt.html> // офіційний сайт (дата звернення 05.02.2023).
15. Теплопровідна поліімідно-фторопластова плівка, що термозварюється KYMIDE KYPIFMT 616 (Китай), <https://www.kying.com> // офіційний сайт (дата звернення 05.02.2023).
16. Власов І.С. Багатошарові полімерні матеріали та технологія отримання листів з орієнтованих поліімідно-фторопластових плівок : автореф. дис. ... канд. техн. наук. 2000. 22 с.
17. Термопластичний поліімідний лак SolverPI-Liquid 1620 (Китай), <http://www.chinapolyimide.com/solverpi-liquid-1620> // офіційний сайт (дата звернення 05.02.2023).
18. Patent China № CN102408564B. Thermoplastic polyimide and preparation method of two-layer process adhesive-free double-side flexible copper clad plate using thermoplastic polyimide // Shengyi Technology Co Ltd., 2013.
19. Вигнуті плати з металевою основою MC PCB, <http://www.baknor.com/heat-sinks/bendable-metal-core-pcb> // офіційний сайт (дата звернення 05.02.2023).

Надійшла до редколегії 02.03.2023

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>

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>

Суддя Олександр Валерійович – ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», науковий співробітник; Україна; e-mail: 4el1195@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2403-979X>

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

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>