

# Покращення терморегулювання друкованих плат мікрохвильового діапазону з використанням сучасних матеріалів

Джон Кунрод (John Coonrod), Rogers Corp.

**В статті, щоб проілюструвати терморегулювання друкованих плат на практиці, детально описано експеримент, який показує тепловий потік в друкованій платі при різних рівнях потужності із використанням матеріалів з різними тепловими властивостями.**

Зі зростанням величини попиту на сучасний рівень інтеграції вузлів мікрохвильової радіоелектронної апаратури, та пов'язаним із цим підвищенням рівнем густини потужності друкованих плат, на перший план, як ніколи раніше, виходить проблема оптимізації їх нагріву. Справа тут полягає в тому, що, як відомо, температура має вирішальний вплив на надійність апаратури в цілому. Розуміння належного вирішення проблем температурного режиму мікрохвильової друкованої плати вимагає від проєктувальників знання певної базової теорії щодо теплового потоку в друкованій платі, а також теплових властивостей матеріалів, що в ній використовуються. Для наочної демонстрації керування тепловим потоком в друкованій платі, в ході експерименту порівнюється залежність показників від рівня потужності, а також їх залежність

від типу застосованого матеріалу (його теплопровідних характеристик).

Для розгляду такого прикладу нам знадобиться звичайна мікросмужкова схема. Вона допоможе відобразити хід потоку тепла через друковану плату, включаючи ефекти наскрізного переходу через перехідні отвори, які використовуються для з'єднання із «землею» ізольованих зон друкованої плати.

Базова тепла модель характеризується наявністю гарячих та холодних областей (зон), з'єднаними між собою теплопровідним матеріалом, яким частіше всього стає мідь (див. рис. 1). Теплопровідність міді приблизно 400 Вт/м/К, що є дуже хорошим показником. Для моделі, яка більше нагадує тепловий потік у мікросмужковій друкованій платі з перехідними отворами з верхньої до нижньої частини плати, базова модель модифікована за допомогою теплових ізоляторів,

які тепер оточують теплопровід у вигляді мідної смужки. Перехідний отвір є металізованим отвором в друкованій платі, що служить для електричного з'єднання провідних схем, які знаходяться на різних провідних шарах (під провідним шаром друкованої плати розуміють провідну схему друкованої плати, розташовану в одній площині). При цьому ізоляційний матеріал друкованої плати є теплоізолятором (рис. 1б). Такий матеріал, зазвичай — це склотекстоліт фольгований марки FR-4, має теплопровідність (ТП) приблизно 0.25 Вт/м/К. При створенні моделі для мікросмужкової друкованої плати (рисунк 1в) верхній мідний шар вважається сигнальним шаром (гарячою зоною), тоді як нижній мідний шар вважається площиною заземлення (холодною зоною).

У цій базовій тепловій моделі співвідношення для передачі тепла між гарячою та холодною зонами є:

$$H = -kA \frac{\Delta T}{L},$$

$$H = -kA \frac{T_H - T_C}{L},$$

де  $H$  — тепловий потік,  $k$  — теплопровідність,  $A$  — площа на межі із теплопровідником,  $\Delta T$  — різниця температур носія  $T_H$  та середовища  $T_C$ ,  $L$  — довжина теплопровідника, що з'єднує зони. У цій моделі передбачається, що температура в теплопровіднику досягла рівноваги. Проста модель і надані рівняння показують, що для теплопровідника із низькою теплопровідністю між зонами відбуватиметься менший теплообмін. Що є очевидним. Відстань між зонами (шарами друкованої плати) також впливатиме на

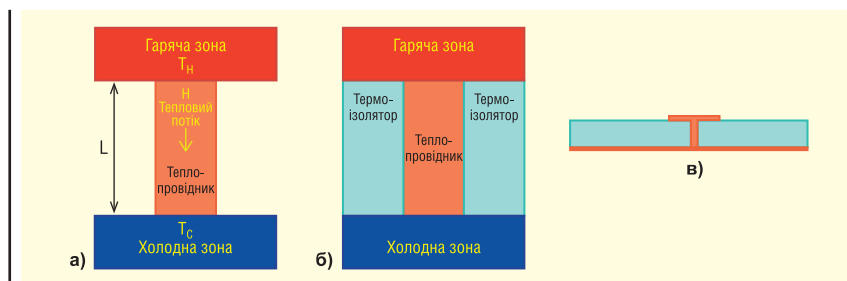


Рис. 1. Базові моделі теплового потоку

Таблиця 1. Порівняння підвищення температури мікросмужкових ліній для друкованих плат різної товщини та значень ТП

	Товщина, міл	Теплопровідність, Вт/м/К	Dk	Df	Частота, МГц	ВЧ потужність, Вт	Підвищення температури відносно навколишнього середовища, °C
Матеріал А	20	0.25	3.50	0.0023	3000	30	45
Матеріал А	10	0.25	3.50	0.0023	3000	30	36
Матеріал Б	20	0.50	3.50	0.0023	3000	30	23

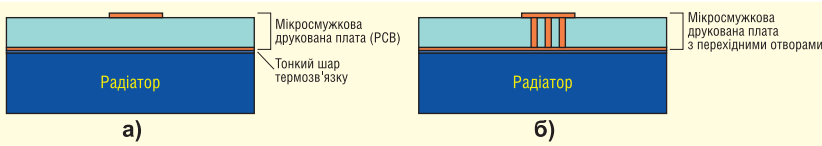


Рис. 2. Поперечний переріз мікросмужкової друкованої плати: без перехідних отворів (а); з перехідними отворами для передачі тепла (б)

кількість переданого тепла, тоді як тонший провідник тепла між шарами зменшує резистентність теплового потоку.

При апроксимації цієї спрощеної моделі до мікросмужкової друкованої плати сигнальний шар друкованої плати вважається гарячою зоною, а площа заземлення друкованої плати — холодною (див. рис. 2). Також передбачається, що площа заземлення, для підтримки постійної температури, термічно приєднана до ефективного радіатора, температура якого є значно нижчою, ніж температура сигнального шару.

Шари мікросмужкової друкованої плати можуть бути з перехідними отворами або без них. Модель, що відповідає мікросмужковій друкованій платі без перехідних отворів, показана на рисунку 2а, тоді як модель, що представляє мікросмужкову друковану плату із заземленням через численні перехідні отвори, показана на рисунку 2б. Ці отвори використовуються для з'єднання двох мідних поверхонь плати. Модель на рисунку 2б є загальною для мікросмужкових друкованих плат, на яких встановлено активний елемент, наприклад, силовий транзистор, який генерує тепло. Численні отвори під таким теплогенератором в англійській літературі називають «а via farm» (дослівно — «перехідна ферма»).

При порівнянні матеріалів різної товщини (мається на увазі товщина діелектричної основи матеріалу плати), з різними значеннями ТП, як це показано у таблиці 1, але з незмінними іншими ключовими параметрами, такі як тестова потужність і частота, можна побачити залежність зміни температури від типу матеріалу. Наприклад, три матеріали в таблиці 1 мають однакове значення відносно діелектричної проникності (Dk) і коефіцієнта дисипації (Df), а також використовуються на тій самій частоті (3000 МГц) та з таким же рівнем потужності (30 Вт). У жодному з матеріалів немає заземлення

через перехідні отвори, але підвищення температури відносно температури навколишнього середовища для всіх трьох матеріалів різне. Як можна бачити, воно цілком залежить від товщини матеріалу та значення його ТП. Найбільше зростання температури відносно температури навколишнього середовища відбувається в найтовщому матеріалі друкованої плати з найнижчим значенням ТП. Зазначимо, що у цій моделі, яка, як відомо, є досить консервативною, але справедливою навіть для такого простого порівняння, не застосовується технологія заземлення через перехідні отвори.

Як показано в таблиці 1, матеріали для друкованих плат із нижчим значенням ТП, при однаковій величині прикладеної потужності, призводять до значного підвищення температури над температурою навколишнього середовища. Тоді як матеріали з вищим значенням ТП призводять до меншого підвищення температури над температурою навколишнього середовища. Деякі значення ТП матеріалів, які зазвичай використовуються у високочастотних друкованих платах, наведено в таблиці 2. На жаль, більшість матеріалів друкованих плат, які використовуються в мікрохвильовій сфері, мають відносно низькі значення ТП, що пов'язано із необхідністю досягати балансу між всіма параметрами ізоляційного матеріалу плат у цій галузі техніки.

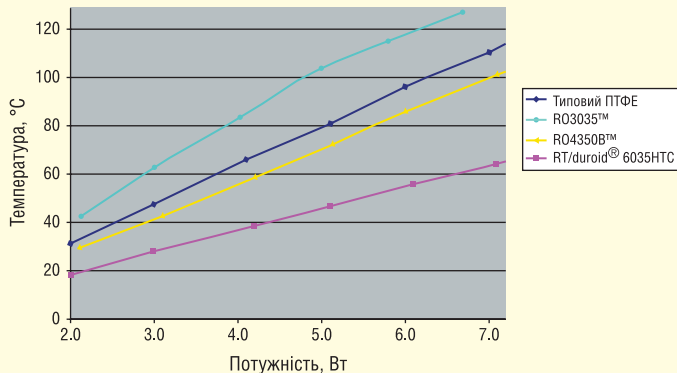
З точки зору теплопровідності будь який із загальноживаних у виробництві високочастотних плат матеріал типу FR-4 має гірший показник ТП порівняно з RO4350B™ або RT/duroid® 6035HTC виробництва Rogers Corp. Тим не менш значення ТП провідникової міді, яке становить приблизно 400 Вт/м/К, буде на декілька порядків вищим за будь яке інше значення ТП інших типів матеріалів із вказаних в таблиці 2. Це беззаперечно доводить наскільки ефективно металізовані перехідні отвори можуть впливати на розподіл теплового потоку.

Таблиця 2. Значення ТП для найбільш поширених матеріалів високо-частотних друкованих плат

	ТП, Вт/м/К
High Tg FR-4	0.24
Nearly Pure PTFE	0.20
Ceramic Filled PTFE	0.50
RO4350B™ Laminate	0.62
RT/duroid® 6035HTC Laminate	1.44

Щоб зрозуміти вплив рівня ТП для різних матеріалів друкованих плат, було проведено дослідження їх теплового зображення. З цієї метою було використано мікросмужкові конструкції на основі підкладок з різних діелектричних матеріалів з абсолютно різними значеннями ТП. Вплив генерованого тепла для цих матеріалів досліджувався із перехідними отворами («фермами») та без них. Нагрівання виконувалося постійним струмом. Задля усунення впливу мікрохвильового сигналу і зосередження лише на факторах впливу ТП матеріалу всі друковані плати в дослідженні мали однакову товщину 20 міл із навантаженням кінцевого резистором номіналом 100 Ом і однаковими за формою струмопровідними мідними елементами (а також з провідною міддю однакової структури). Як вже було сказано, в них використовувалися різні ізоляційні матеріали. Після подачі живлення від джерела напруги постійного струму кожному колу та кінцевому резистору давали достатньо часу для досягнення теплової рівноваги. На рисунку 3 показана різниця нагріву плати відносно температури навколишнього середовища (25 °C). Різниця показана для плат, виготовлених з різних типів матеріалів без застосування перехідних отворів. Як зображено на рисунку 3 і було наведено раніше в таблиці 2, матеріали з найвищими значеннями ТП демонструють найменше підвищення температури. Якщо порівняти ці криві з графіками для плат, що використовують перехідні отвори, тобто які можуть направляти частину тепла на радіатор для тепловідводу, то зростання температури тут є меншим, хоча загальні тенденції однакові.

На рисунку 4 показані мікросмужкові схеми в перерізі: без перехідних отворів (а); з перехідними отворами (б); з наскрізним переходом, у вигляді «паркану» (в). Мікросмужка без наскрізних



**Рис. 3. Порівняння підвищення температури плат товщиною 20 міл із матеріалів з різними ТП відносно температури навколишнього середовища**

зводить до менших діелектричних втрат і меншої генерації тепла, що виділяється в друкованій платі. Крім того, друкована плата з матеріалу з низьким значенням Dk також буде давати менше втрат і менше генеруватиме тепла, ніж плата з матеріалу з вищими значеннями Dk. Умова матиме місце при застосуванні конструкції кола з контрольованим опором, а матеріал з меншим показником Dk дозволить використати широкі провідники. Зрозуміло, що ширші провідники дають менші втрати в провідниках, ніж вузькі.

До переліку основних властивостей матеріалу з найбільш позитивним впливом на рівень теплопровідності увійдуть: найвища ТП, найнижчий Df, найменш шорстка поверхня міді, товстіший діелектрик та найнижчий за показником Dk. Звичайно, у практичних конструкціях завжди є ті чи інші компроміси. Наступний приклад це наочно демонструє. В ньому використовується мікросмужкова лінія передачі 20 міл на діелектрику з Dk 3.5 в умовах забезпечення 30 Вт радіочастотної потужності на частоті 3 ГГц. Оскільки таке рішення потребує досягнення хорошої продуктивності з низькими втратами, то в його основу мав би закладатися матеріал на базі PTFE діелектрика з керамічним наповнювачем з Df приблизно 0.0023 (Polytetrafluoroethylene — політетрафторетилен, PTFE (ПТФЕ), відомий, як фторопласт-4). Але PTFE матеріал порівняно дорогий, так само як і його подальша обробка, використовувати цей матеріал складно. Тому для прикладу було розглянуто дешевшу альтернативу — вуглеводневий ламінат з Df 0.0037.

Використовуючи просту модель для порівняння підкладок, прогнозоване підвищення температури над температурою навколишнього середовища становить приблизно 45 °C для PTFE та приблизно 21 °C для вуглеводневого ламінату. Незважаючи на те, що підкладка з PTFE має нижчу Df, ніж у вуглеводневого ламінату, останній має менший підйом тепла через своє значення ТП 0.62 Вт/м/К порівняно лише з 0.25 Вт/м/К для ламінату з PTFE.

Максимальна робоча температура мікrohвильової друкованої плати є важливим параметром, який слід враховувати при плануванні допустимого нагріву конструкції плати. Це пов'язано з тим, що відповідно до умов пожежної безпеки, які визначені за стандартом Underwriters Laboratory (UL), перевищення максимальної робочої температура для матеріалу і компонентів плати не допускається взагалі. Це не стосується короточасних підвищень температури,

отворів, як правило, є схемою із радіочастотним сигналом, де активна доріжка (сигнальна доріжка або сигнальний шар) не може бути під'єднана до площини заземлення. У цьому випадку зменшення нагріву відбувається за рахунок ТП властивостей самого діелектричного матеріалу плати. Звичайно, чим тонша підкладка, тим коротший шлях відводу тепла і відповідно менший нагрів друкованої плати.

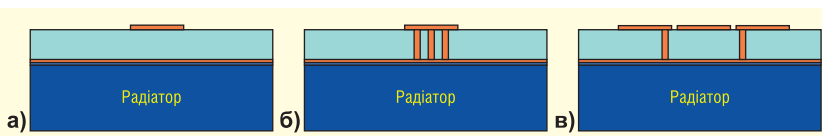
Для мікросмужкових плат з встановленими активними елементами, що генерують тепло, для покращення розсіювання тепла зазвичай використовується конфігурація з наскрізними отворами, як це показано на рисунку 4б. Активні елементи, встановлені на платі, зазвичай заземлюються, тому перехідні отвори — це найефективніший спосіб запобігання перегріву плати.

На рисунку 4в зображена досить рідкісна конфігурація мікросмужкової друкованої плати. В перерізі вона більше схожа на заземлений копланарний хвилевід, ніж на мікросмужку, з тією перевагою, що вона дозволяє відводити тепло від активних елементів, які не можуть бути заземлені за допомогою металізованих наскрізних/перехідних отворів, чи розсіювати тепло у площині x-y з урахуванням значення ТП. У цьому випадку критичним для оптимального розсіювання тепла є значення ТП ізоляційного матеріалу плати. В такому виконанні плати відстань між активною трасою та копланарною «землею» з наскрізним переходом порівняно з товщиною плати

має бути невеликою. Вона може бути в діапазоні 125 мкм (5 міл). Завдяки мінімізації шляху теплового потоку передача тепла від сигнального шару (траси радіочастотного сигналу) до заземленої поверхні стає більш ефективною. Однак у цій конфігурації необхідно вирішити деякі електричні проблеми, які пов'язані із близькістю копланарної «землі» до сигнальної поверхні (траси сигналу).

Однією з частин належного вирішення проблеми надлишкового нагріву мікrohвильових друкованих плат є розуміння взаємозв'язку між втратами в колі, прикладеною потужністю та спровокованим нагрівом. Високоякісний нагрівання контуру в основному пов'язане з втратами, які в ньому відбуваються. А в мікросмужкових схемах, таких як використані в цій статті для прикладу, існує кілька типів втрат, включаючи втрати в провіднику (втрати на провідність), діелектричні втрати та втрати на випромінювання. Ці втрати пов'язані з дизайном самої плати, а також з вибором її матеріалу. Різновиди матеріалів друкованих плат відрізняються товщиною та типом міді, яка звісно впливає на рівень втрат. Наприклад, мідні провідники з шорсткатою поверхнею зазнають вищих втрат, ніж мідні провідники з гладкою поверхнею. Якість кріплення міді до діелектрика також може впливати на рівень втрат мікросмужкової друкованої плати.

Іншою властивістю матеріалу, яка впливає на втрати, є значення Df матеріалу друкованої плати. Нижче Df при-



**Рис. 4. Поперечний переріз друкованої плати із мікросмужкою: без перехідних отворів (а); з перехідними отворами («фермами») (б); з наскрізним переходом, у вигляді «паркану» (в)**

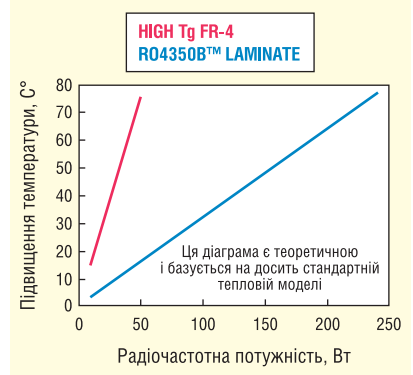
які пов'язані з паянням при складанні вузлів апаратури. Тут маються на увазі виключно довгострокові впливи, які мають місце за високої температури. Саме вони мають викликати занепокоєння. Фактично, значення допустимої температури ламінату можна використовувати в простій моделі, це дає можливість проілюструвати деякі відмінності в матеріалах при розгляді мікросмушкової лінії передачі на матеріалі товщиною 20 міл.

Припускається, що максимально допустима робоча температура в цьому прикладі схеми дорівнює  $+105\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а температура навколишнього середовища становить  $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Метою цього прикладу є уникнення підвищення температури більш ніж на  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , не порушуючи властивості матеріалу. Як показано на рисунку 5, вибір матеріалу друкованої плати значно впливає на потужність, яку може передати мікросмушкова схема, при цьому матеріали мають більше значення ТП і менше Df. Приклад приводиться для частоти 800 МГц; на вищих частотах, за того самого рівня потужності радіочастотного сигналу, відбуватиметься сильніше нагрівання. Хоча шорсткість мідного провідника, про яку згадано раніше, може мати мінімальний вплив на нижчих частотах, але

при цьому вона може більше впливати на втрати на вищих частотах, перетворюючись на додаткове тепло, що виділяється в друкованій платі з мідними провідниками, які мають шорстку мідну поверхню.

Підсумовуючи, все що сказано вище, проходження теплового потоку через високочастотну друковану плату можна проаналізувати за допомогою досить простої моделі. Використання простої моделі демонструє переваги матеріалу з високим показником теплопровідності та допомагає обрати найбільш ефективну стратегію керування рівнем нагріву друкованої плати. При цьому, досить ефективним методом покращення відводу тепла від друкованої плати, може стати застосування груп перехідних отворів. Але в цьому випадку треба проявляти певну обережність, оскільки такий підхід не завжди можливо застосувати з активними трасами радіочастотного сигналу.

Загалом, увага до вибору матеріалу плати з відповідними характеристиками, такими як хороша ТП, низький коефіцієнт розсіювання, гладка поверхня мідного провідника та низька діелектрична проникність, допоможе не тільки при розробці високопродуктивної із радіочастотних міркувань друкованої плати,



**Рис. 5.** Приклад залежності рівня нагріву мікросмушкових ліній 20 міл, виготовлених на основі різних ізоляційних матеріалів

але також покращить її тепловий режим, який безпосередньо впливає на надійність вузла в цілому.

**Більш детальну інформацію щодо продукції компанії Rogers можна отримати, звернувшись до її торгового представника в Україні — ТОВ «Євроконтакт ЛТД.»:**

**тел.: (044) 500-79-91,**

**e-mail: info@eurocontact.kiev.ua,**

**www.eurocontact.kiev.ua** **CN**

# ПРОДАМ

## матеріали Rogers

### зі складу або на замовлення

**ЄВРОКОНТАКТ**

[www.eurocontact.kiev.ua](http://www.eurocontact.kiev.ua)

т/ф +380 44 500 7991

info@eurocontact.kiev

**ЄВРОКОНТАКТ**

[www.eurocontact.kiev.ua](http://www.eurocontact.kiev.ua)

т/ф +380 44 500 7991

info@eurocontact.kiev.ua