

Вплив електричних і теплових взаємодій на характеристики НВЧ-плати

Джон Кунрод (John Coonrod), інженер, Rogers Corp.

Нагрівання високочастотних кіл і матеріалів друкованої плати відбувається від встановлених на неї пристроїв або від зовнішніх джерел енергії. У статті докладно описується низка досліджень, що показують, як електричні та теплові взаємодії впливають на параметри різних матеріалів плат.

Властивості друкованої плати змінюються під час її нагрівання. Взаємодія між електричними і тепловими ефектами позначається на характеристиках плати не в кращий бік. Наприклад, на популярне запитання розробників про величину максимальної допустимої потужності конкретної друкованої плати можна дати чітку відповідь тільки після аналізу електричних і теплових взаємодій. Розуміння цих взаємодій і того, як вони впливають на параметри плат, надає значну допомогу під час роботи з матеріалами для плат і в усуненні неполадок у НВЧ-додатках високої потужності.

Теплопровідність і деякі електричні характеристики впливають одна на одну. Щоб краще зрозуміти електричні та теплові взаємодії в матеріа-

лі друкованої плати, уявімо його за допомогою теплової моделі. Така модель складається з гарячих і холодних областей, або резервуарів, з'єднаних теплопровідним матеріалом (див. рис. 1а). Непоганим провідником тепла є мідь із теплопровідністю (ТС) близько 400 Вт/м/К, що вважається хорошим показником. Для імітації теплового потоку в мікросмужковій друкованій платі без наскрізних металізованих отворів (PTH) у базову теплову модель встановлюють теплоізолятор між гарячим і холодним резервуарами (див. рис. 1б). Більшість підкладок, використовуваних у виробництві друкованих плат, вважаються теплоізоляторами з типовими значеннями теплопровідності в діапазоні 0.20–0.30 Вт/м/К. Передбачається, що верхній шар міді є сигнальним шаром (або гарячим резервуаром), а нижній шар міді — заземлювальним (холодним резервуаром). З рисунка 1б видно, що тепловідвід прикріплений до заземленої поверхні.

Співвідношення, що описує передачу тепла між гарячим і холодним резервуарами в базовій тепловій моделі на рисунку 1а, має такий вигляд:

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

де H — тепловий потік; k — теплопровідність; A — площа на межі розділу «резервуар — провідник тепла»; $\Delta T = T_H - T_C$ — різниця температур і L — довжина провідника тепла, що з'єднує резервуари. У цій моделі передбачається, що температура провідника тепла досягла рівноваги. Проста модель і рівняння вказують на те, що теплопереда-

ча між резервуарами в разі провідника з низькою теплопровідністю порівняно менша. Так відбувається в мікросмужковій схемі на рисунку 1б, де підкладка виступає в ролі провідника з низькою теплопровідністю. Відстань між резервуарами також впливає на кількість переданого тепла: наприклад, тонший провідник сприяє передачі більшого теплового потоку. Такий потік ефективніше передає тепло заземлювальному шару (радіатору), більшою мірою сприяючи охолодженню друкованої плати.

Найпростіша теплова модель мікросмужкової плати передбачає, що тепло генерується на сигнальному шарі, хоча таке уявлення не є цілком коректним. У загальному випадку джерелом тепла всередині друкованої плати є радіочастотний нагрів або встановлений на ній активний пристрій. Якщо тепло генерується таким пристроєм, використовується проста модель, у якій вважають, що тепловий потік виникає в сигнальному шарі.

У разі радіочастотного нагріву генерація тепла пов'язана з внесеними втратами і часто викликана поєднанням втрат, включно з втратами провідника в сигнальному шарі та діелектричними втратами в матеріалі підкладки. У цьому сценарії джерело тепла не перебуває повністю в сигнальному провіднику, але у відносно тонких платах, де переважають втрати в провіднику, більша частина тепла генерується в сигнальному шарі. Точніше, найбільше тепло виділяється в областях, де щільність струму найвища, тобто на межі розділу «мідь — підкладка» сигнального провідника. У додатках, де тепло є результатом радіочастотного нагріву, розподіл тепла збігається з розподілом щільності струму. Маючи це на увазі, можна моделювати розподіл тепла, порівнюючи лінію передавання зі смужковою лінією з крайовим зв'язком (зв'язком з вузького боку) або шлейфом (відгалуженням) на друкованій платі.

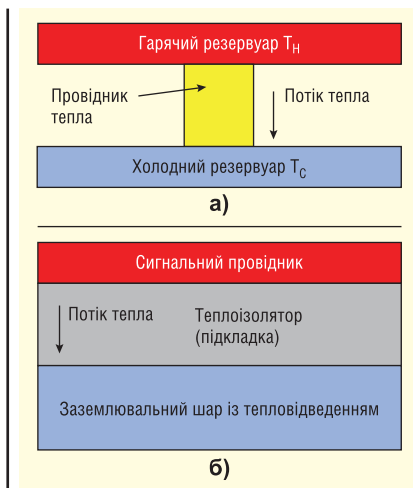


Рис. 1. Базова модель: теплового потоку в друкованій платі (а); мікросмужкової лінії (б)

ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛУ

Теплопровідність більшості матеріалів друкованих плат мала. Підкладки з майже чистого ПТФЕ мають дуже хороші електричні характеристики на надвисоких частотах, але зазвичай характеризуються низькими значеннями теплопровідності близько 0.2 Вт/м/К. У деяких підкладках із ПТФЕ з керамічним наповненням — вища теплопровідність у діапазоні 0.4–0.7 Вт/м/К. Загалом теплопровідність матеріалу друкованої плати, вища за 0.5 Вт/м/К, вважається хорошою, а якщо вона більша за 1.0 Вт/м/К, то відмінною.

Іншими параметрами матеріалу, що впливають на тепловий режим друкованої плати, є коефіцієнт теплового розширення (КТР), температура склування (Tg), тангенс кута втрат (Df), діелектрична проникність (Dk, або ε), номінальний тепловий індекс (RTI), шорсткість мідної поверхні, тепловий коефіцієнт діелектричної проникності (TCDk) та тепловий коефіцієнт тангенса кута втрат (TCDf). Параметри КТР і Tg зазвичай використовуються для забезпечення надійності. RTI — показник, що присвоюється матеріалам із сертифікатом UL для визначення максимальної температури, якій сировина може піддаватися необмежений час без погіршення характеристик.

Щодо сировини, яка використовується в друкованій платі, діє ще один показник, який найбільшою мірою стосується допустимої потужності плати. Це максимальна робоча температура (MPT). MPT визначає максимальну температуру, якій може піддаватися плата, не втрачаючи критично важливих властивостей. MPT завжди менше, ніж RTI матеріалу. Під час оцінювання максимальної радіочастотної пропускної здатності друкованої плати MPT використовують як максимальну температуру, якої схема може зазнавати протягом тривалих проміжків часу.

Наприклад, плата після зростання температури на 70 °C за температури довкілля 25 °C повинна витримувати вплив 95 °C необмежений час. Вплив РЧ-потужності, який спричиняє таке підвищення температури, вважається прийнятним, якщо номінальна MPT дорівнює 105 °C. Однак якщо збільшення температури плати перевищує 80 °C відносно довкілля, стає неприйнятним рівень прикладеної РЧ-потужності, який спричинив таке підвищення.

Параметри матеріалу Df і шорсткість мідної поверхні впливають на тепло, що

Таблиця 1. Поширені матеріали друкованих плат і типові значення їхніх параметрів, що визначають тепловий режим

	Dk	Df	Теплопровідність	TCDk
Майже чистий ПТФЕ	2.2–2.4	0.001	0.2	–150
ПТФЕ з керамічним наповнювачем	3.5	0.002	0.5	–30
ПТФЕ з керамічним наповнювачем і високим Dk	> 6	0.0025	0.7	–250
Вуглеводневий матеріал із керамічним наповнювачем	3.5	0.0035	0.6	50

виділяється друкованою платою, впливаючи на втрати, які вносяться: що втрати більші, то більше тепло, що виділяється, за умови РЧ-потужності, що подається. У плати з низьким Df і гладкою мідною поверхнею втрати, що вносяться, і тепло, що виділяється, менші під впливом РЧ-потужності. Показник Dk також впливає на втрати, оскільки матеріали з меншим Dk дають змогу використовувати плати з ширшими провідниками за заданого імпедансу, що призводить до менших втрат у провідниках і менших загальних втрат, що вносяться, а також до меншого виділення тепла. Таким чином, в ідеальній НВЧ-плати показники Dk і Df мають бути малими, мідна поверхня — гладкою, підкладка — тонкою, теплопровідність і MPT — високими. У таблиці 1 наведено зведені характеристики матеріалів, що використовуються в НВЧ-платах, які впливають на їхні теплові характеристики.

Іншими характеристиками матеріалу схеми, важливими для розуміння електротермічних взаємодій, є TCDk і TCDf.

TCDk — властивість усіх матеріалів плати і показник того, наскільки зміниться Dk при заданій зміні температури. Показник TCDf є мірою зміни Df при зміні температури. Ці параметри зазвичай вважаються визначальними для плат, що експлуатуються в середовищах зі змінною температурою. Наприклад, друкована плата з високим TCDk може

зазнавати змін імпедансу, що впливають на характеристики згоджувальних ланцюгів, оскільки Dk змінюється з температурою. Показник TCDf може виявитися необхідним для плат з обмеженими бюджетами втрат, де підвищення температури може призвести до зростання Df і втрат. TCDk і TCDf — параметри, які слід враховувати, щоб контролювати їхній вплив на електротермічні взаємодії.

На працездатність друкованої плати з мідними провідниками впливає також температурний коефіцієнт опору (ТКО) міді, який є мірою зміни її опору під час нагрівання. Відносно простий розрахунок цього параметра для застосувань із постійним струмом ускладнюється на надвисоких частотах. Це пов'язано з тим, що на вищих частотах втрати в провіднику, які є складовою частиною загальних внесених втрат, мають частотну залежність від питомого опору через глибину поверхневого шару.

ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНІ ВЗАЄМОДІЇ НА НВЧ-ПЛАТАХ

Для того, щоб краще зрозуміти електротермічні взаємодії на НВЧ-платах, було проведено низку досліджень. У першому з них розглядалися відмінності тільки за теплопровідністю, коли плату нагрівали під час проходження постійного струму; водночас ігнорува-

Мікросмужкова лінія передачі товщиною 0.508 мм з використанням різних матеріалів. Температура нагріву вища за температуру навколишнього середовища

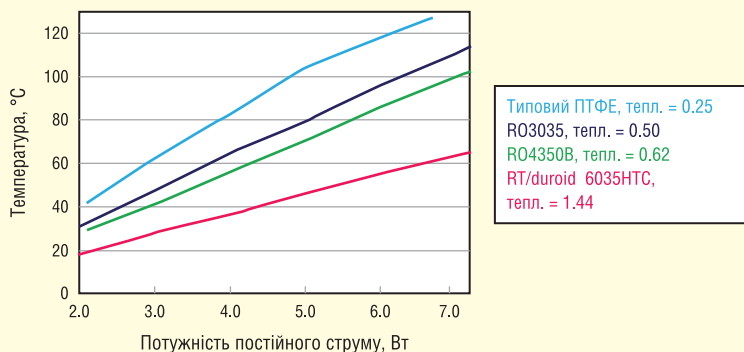


Рис. 2. Результати дослідження показують різне зростання температури при використанні матеріалів зі значно різною теплопровідністю

ли проблеми, пов'язані з впливом РЧ-потужності та втратами. У другому дослідженні розглядали зовнішнє нагрівання мікросмужкових фільтрів, і відстежували відповідні зміни їхніх характеристик. У третьому дослідженні лінії передачі з різними конфігураціями з різних матеріалів піддалися нагріванню під впливом РЧ-потужності на різних частотах. Нарешті, ми коротко проаналізуємо теплові зображення мікросмужкового смужкового фільтра, що нагрівається під впливом РЧ-потужності, і обговоримо кілька конфігурацій теплового розподілу.

На рисунку 2 показано результати дослідження з використанням матеріалів однакової товщини, але зі значно різною теплопровідністю. Схеми було виконано на простих друкованих платах із подвійним шаром міді та узгоджувальним резистором поверхневого монтажу, припаяним до середини ланцюга. На плати подавали потужність постійного струму, і вимірювали рівноважні температури за різних її рівнів. Схеми були змонтовані на радіаторі з водяним охолодженням. Видно, що лінії на основі матеріалів із вищою теплопровідністю нагрівалися меншою мірою відносно температури навколишнього середовища [1].

У наступному дослідженні використовували плати, виготовлені з декількох матеріалів; усі плати мали однакову стандартну конструкцію. На плати було встановлено фільтри Чебишева на мікросмужковій лінії з крайовим електромагнітним зв'язком. Рівень пульсацій фільтрів: 0.1 дБ; центральна частота: 2.5 ГГц; смуга пропускання: 235 МГц; зворотні втрати в смузі пропускання: кращі, ніж 15 дБ. Через відмінності у виготовленні плат і властивостей матеріалів центральні частоти і смуги пропускання різних фільтрів дещо різнилися, але

	Заявлені TCDk	Виміряні TCDk
RT/duroid 6002	12	17
RO4350B	50	51
ПТФЕ з керам. нап., Dk = 6.15	-262	-256
RO4360G2, Dk = 6.4	-131	-127

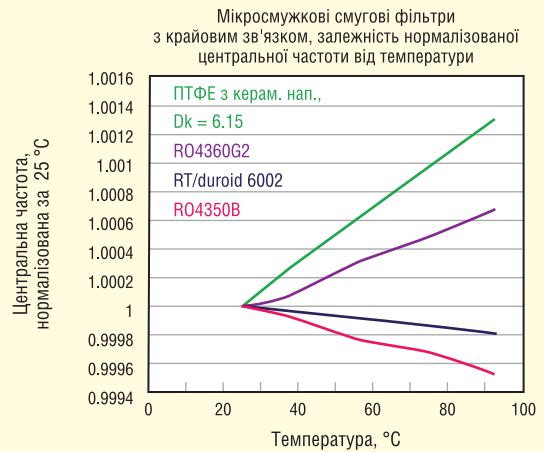


Рис. 3. Графік залежності нормованої Dk від температури у стандартних високочастотних друкованих плат

варіації центральної частоти в результаті були нормалізовані. Метою цього дослідження було встановити, як показник TCDk впливає на центральну частоту при нагріванні фільтра. На рисунку 3 порівнюються заявлені виробниками значення TCDk

ПРОДАМ

матеріали Rogers

зі складу або на замовлення

ЄВРОКОНТАКТ

www.eurocontact.kiev.ua

т/ф +380 44 500 7991

info@eurocontact.kiev

ЄВРОКОНТАКТ

www.eurocontact.kiev.ua

т/ф +380 44 500 7991

info@eurocontact.kiev.ua

матеріалів із вимірними TCDk плат, які зазнали впливу різних температур.

Як видно з рисунка 3, є відмінності між вимірними значеннями TCDk фактичних плат, якщо порівняти зі значеннями, зазначеними в технічних описах. На те є кілька причин. Технічні описи часто є результатами дослідження матеріалів у тесті з фіксованим смужковим резонатором, у якому зазвичай аналізують необроблену підкладку. У цьому тесті використовується слабко зв'язаний смужковий резонатор, і тест набагато меншою мірою чутливий до калібрування вимірювальної системи, кабелів і роз'євів. У ньому використовується менше змінних, ніж у вимірах з мікросмужковими фільтрами з крайовим зв'язком, де центральну частоту можна змінити за допомогою калібрування, кабелів і роз'євів. Це дослідження було задумано з метою вивчення однієї схеми для кожного набору даних, і через їхню обмеженість отримані результати не можна вважати статистично вірогідними. Навпаки, випробування з фіксованим смужковим резонатором на необробленій підкладці проводилося на великій кількості зразків, і дані є статистично вірогідними.

Третє дослідження проводилося з використанням ліній передачі з різними властивостями матеріалів. Лінії піддалися РЧ-нагріву на різних частотах і рівнях потужності. У таблиці 2 подано коротку інформацію про характеристики схем і критичні властивості матеріалів плат у третьому дослідженні. Наведені в таблиці 2 значення внесених втрат були отримані в результаті тестування ланцюгів за допомогою методу диференціальної довжини [2]. У схемах використовувалася чиста нелуджена мідь без покриття.

У цьому дослідженні лінії передачі були пофарбовані чорною фарбою з відомою випромінювальною здатністю

для забезпечення точних вимірювань за допомогою тепловізійної камери. Чорна фарба збільшила внесені втрати, які залежно від конфігурації схеми виявилися більш-менш значними. У першому рядку таблиці 2 шорсткість (нерівність) міді дорівнює 2.8. Це нетипове значення було обрано для цілей дослідження. Усі схеми були мікросмужковими лініями передачі, за винятком схеми в третьому рядку, яка є заземленою сильнозв'язаною копланарною лінією; вплив на втрати, що вносяться, через фарбу в цій схемі є значнішим.

Схеми в перших двох рядках мають однакову товщину і шорсткість міді, але істотно відрізняються значеннями Df і теплопровідності. Незважаючи на те, що внесені втрати нижчі у матеріалі в першому рядку, перевага високої теплопровідності проявляється в меншому збільшенні теплового потоку за різних частот і рівнів потужності.

У лінії передачі в четвертому і п'ятому рядках — однакова товщина і дуже схожі параметри матеріалів, проте шорсткості мідної поверхні істотно різні. Перевага більш гладкої міді проявляється в меншому зростанні температури.

Нарешті, у лінії у шостому і сьомому рядках — вкрай різні значення параметрів. Матеріал в останньому рядку має найкращу комбінацію властивостей для цього дослідження, результати якого свідчать про найменше тепловиділення з порівняння різних рівнів потужності на різних частотах. Приклад деяких отриманих тепловізійних зображень наведено на рисунку 4, де показано відмінності між матеріалами плат у другому і четвертому рядках.

Термограми на рисунку 4 являють собою вигляд зверху плат з областю запуску сигналу у верхній частині зображення. На рисунках видно відмінності між тепловиділенням двох плат, що використовують одні й ті самі матеріали;

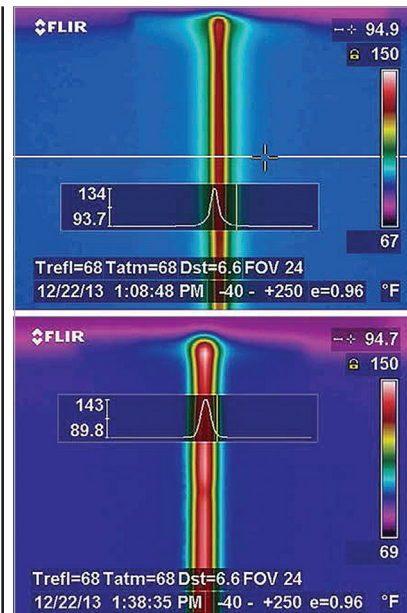


Рис. 4. Термограми з характеристиками плат, згаданими в рядках 2 і 4 таблиці 2; нагрівання потужністю величиною 85 Вт на частоті 3.4 ГГц

єдиною істотною різницею між платами є товщина підкладки. Тестування з вищою потужністю показало перевагу у використанні тоншої плати з коротшим тепловим трактом.

Завершальне дослідження було виконано для виявлення відмінностей у розподілі тепла під час використання інших схемних рішень НВЧ-ланцюгів, які значно відрізняються від ліній передачі. Як приклад для цього дослідження було використано фільтр із крайовим зв'язком.

Фільтр був виготовлений на ламінаті RO4003CTM товщиною 0.508 мм. Він був розрахований на центральну частоту 2 ГГц, смугу пропускання 175 МГц і зворотні втрати в смузі пропускання 15 дБ. Після нанесення чорної фарби значення кількох параметрів змінилися: централь-

Таблиця 2. Порівняння теплових характеристик ліній передачі на основі різних підкладок

Матеріал схеми	Тип лінії передачі	Dk	Df	Теплопровідність, Вт/м/К	Шорсткість поверхні міді (СКЗ)	Внесені втрати без чорної фарби на 3.4 ГГц, дБ/дюйм	Внесені втрати з чорною фарбою на 3.4 ГГц, дБ/дюйм	Підвищення температури, °C, 30 Вт при 2 ГГц	Підвищення температури, °C, 85 Вт при 3.4 ГГц
10 мм RT/duroid 5880 High Profile ED cu	Мікросмужкова	2.20	0.0009	0.20	2.8	0.12	0.18	13	34
10 мм RO4350B High Profile ED cu	Мікросмужкова	3.66	0.0037	0.64	2.8	0.17	0.27	8	22
10 мм RO4350B High Profile ED cu	СРPW, w18s6	3.66	0.0037	0.64	2.8	0.20	0.43	9	27
20 мм RO4350B High Profile ED cu	Мікросмужкова	3.66	0.0037	0.64	2.8	0.12	0.19	7	29
20,7 мм RO4350B LoPro; Low Profile ED cu	Мікросмужкова	3.55	0.0037	0.64	0.6	0.10	0.14	3	22
20 мм High Perf FR-4 Std. ED cu	Мікросмужкова	4.25	0.0200	0.25	1.4	0.36	0.37	10	74
20 мм RT/duroid 6035HTC Std. ED cu	Мікросмужкова	3.60	0.0013	1.44	1.8	0.08	0.11	2	14

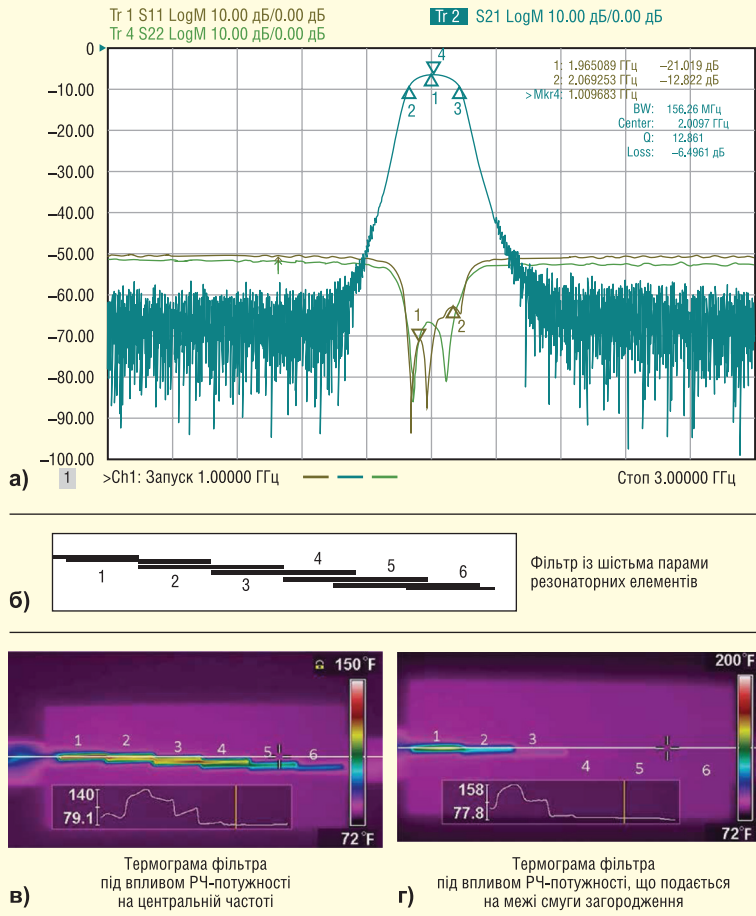


Рис. 5. Виміряні S-параметри аналізованого фільтра (а); вид згори базової конфігурації схеми (б); термограма фільтра на центральній частоті 2.010 ГГц за подавання 30 Вт (в); та сама прикладена потужність, але на частоті 1.900 ГГц у смузі загородження фільтра (г)

на частота становила 2.010 ГГц, смуга пропускання — 156 МГц, втрати, що вносяться, — 6.5 дБ у смузі пропускання. На рисунку 5 наведено докладні відомості про фільтр разом із термограмами, отриманими після подачі РЧ-потужності.

На рисунку 5в показано теплову діаграму мікросмужкового смугового фільтра на центральній частоті, отриману під час впливу РЧ-потужності величиною 30 Вт. Якщо, наприклад, частота прикладеної потужності зрушиться на 40 МГц, залишившись у смузі пропускання, діаграма спрямованості зміниться відносно вихідної. Біла лінія на цьому рисунку вирівняна по високотемпературних ділянках резонаторів фільтра на лівому боці схеми. Видно, що найвища температура (140 °F = 60 °C) щодо цієї білої лінії спостерігалася на кінці першого пов'язаного резонатора.

Унаслідок зміщення частоти випромінювання приблизно на 80 МГц донизу до рівня 1.93 ГГц, що розташований трохи нижче за межі смуги загородження, виникає тепловий розподіл, показаний

на рисунку 5г. З рисунка видно, що найвища температура спостерігається біля перших резонаторних елементів фільтра. Радіочастотна потужність надходить зліва від фільтра, а кінцеве навантаження знаходиться від нього праворуч.

Більш детальну інформацію щодо продукції компанії Rogers можна отримати, звернувшись до торгового представника в Україні — ТОВ «Євроконтакт»:
тел.: (044) 500-79-91,
e-mail: info@eurocontact.kiev.ua,
www.eurocontact.kiev.ua

Література:

1. John Coonrod. Improved Thermal Management of Microwave PCBs using Advanced Circuit Materials. Microwave Journal. November. 2011.
2. John Coonrod. Understanding the Variables of Dielectric Constant for PCB Materials Used at Microwave Frequencies. European Microwave Week. 2011.

СЕМІНАР КОМПАНІЇ ROGERS

В червні цього року компанія **Rogers** провела в країнах Європи низку семінарів, орієнтованих на кінцевих споживачів та на виробників друкованих плат ВЧ/НВЧ напрямку. Приємно, що такий захід не пройшов повз уваги споживачів з України. Хоча для учасників з України семінар відбувався у форматі вебінару, але це зрозумілі наслідки ситуації, в якій зараз знаходиться наша країна.

Компанія **Rogers** — один з потужних світових учасників ринку з виробництва матеріалів для ВЧ/НВЧ застосувань, в тому числі ламінованого матеріалу для плат. Вона має багаторічний успішний досвід в розробці спеціалізованих матеріалів. Крок за кроком компанія накопичує свій інтелектуальний та технічний потенціал. Її розробки, в яких використовуються різні технології, відносяться до різноманітних сфер застосування. Продукцію компанії можна знайти в бездротовій інфраструктурі, підсилювачах потужності, радарних системах, високошвидкісних цифрових мережах, гібридно-електричних транспортних засобах, високовольтній рейковій тязі, лазерних системах і в сфері перетворення енергії вітру та сонця.

На згаданому вже семінарі мова йшла про лінійку загальних PTFE та термостабільних матеріалів, про принципи визначення показників D_k та D_f . Також було презентовано інформацію щодо магнітно-діелектричних матеріалів та діелектричних матеріалів для 3D друку. Не оминули й цікаву тему щодо загальних технічних властивостей ВЧ/НВЧ матеріалів. Були згадані принципи та рекомендації щодо їх вибору в залежності від фактичної сфери застосування. На семінарі також приділили увагу технічним та технологічним нюансам, пов'язаним із обробкою матеріалів під час виробництва друкованих плат.

Семінар пройшов на одному диханні. В цілому, захід відбувся на достойному рівні, інформації було надано в достаток.

Очікувано, що деякі теми семінару з'являться і на сторінках журналу CHIP NEWS у вигляді статей, цікавих та корисних. Тож уважно слідкуйте за публікаціями!

www.rogers.com