

Правильный выбор материала основания может упростить обеспечение теплового режима

Дж. Раньери¹

УДК 621.3.049.7 | ВАК 05.27.06

Многие РЧ-, СВЧ- и силовые электронные схемы при работе нагреваются, и этот нагрев может приводить к ухудшению эксплуатационных характеристик и надежности устройств. Тепло, вырабатываемое схемой, зависит от множества факторов, среди которых входная мощность, КПД активных компонентов и потери в пассивных компонентах и линиях передачи. Во многих случаях применение конвекционного охлаждения плат с помощью вентилятора затруднительно или нецелесообразно, и тогда тепло необходимо отводить от компонентов и устройств, критичных к высокой температуре, путем формирования каналов с высокой теплопроводностью от компонента до металлического корпуса или радиатора.

Однако это не всегда возможно: например, установка радиатора в миниатюрных или многослойных конструкциях бывает осложнена или невозможна, и тогда рассеивание избыточного тепла может происходить только через диэлектрический материал печатной платы, который фактически должен выполнять функции радиатора. Такое решение может быть реализовано путем тщательного выбора материала основания платы. За счет применения материалов, специально созданных для рассеивания тепла, можно не только улучшить надежность схемы, но и обеспечить ее работоспособность при большей, чем на плате из обычного материала, мощности при таких же или даже меньших размерах устройства.

СТАБИЛЬНОСТЬ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА

КПД активных компонентов не достигает 100%, и часть энергии в них преобразуется в тепло. Перегрев активного компонента можно снизить, выбрав для платы такой материал, который был бы способен стать для него теплоотводящим каналом.

Кроме того, слой общей шины или прикрепленный к плате металлический радиатор образуют теплоотводящие каналы, которые позволяют безопасно отводить тепло, не вызывая повреждений установленных на плате компонентов поверхностного монтажа. В дополнение к этому, обеспечив стабильность теплового режима, можно свести к минимуму влияние нагрева на импеданс линий передачи СВЧ-сигналов, не

допустив изменения фазочастотной характеристики схемы, возможного при значительном повышении температуры.

Материалы плат характеризуются рядом типовых параметров, среди которых – теплопроводность (k или TC), диэлектрическая проницаемость (ϵ или Dk), тангенс угла диэлектрических потерь ($tg \delta$ или Df) и коэффициент теплового расширения (KTR или CTE). Материалы плат, предназначенные для высокочастотных аналоговых или высокоскоростных цифровых устройств, обычно представляют собой композиты на основе нескольких материалов, таких как стеклоткань и ПТФЭ (фторопласт). Теплопроводность материала или композита заданного типа можно рассчитать на основе его теплового поведения с помощью простых линейных выражений. Кроме того, существуют программы симуляции для прогнозирования теплоотвода через материал конкретного типа.

Источником тепла часто является активный компонент, например силовой транзистор в усилителе. Чтобы обеспечить длительный срок эксплуатации такого изделия (и самого активного компонента), имеет смысл ограничить его собственный нагрев.

В однослойных высокочастотных конструкциях может существенно нагреваться расположенная на верхней стороне платы схема, состоящая из микрополосковых линий или заземленных копланарных волноводов (GCPW), работающая при значительных уровнях мощности. Избыточное тепло должно отводиться от линий передачи, обычно через диэлектрик платы, в менее нагретую область на нижней стороне платы, как правило, на радиатор. Поперечное сечение платы

¹ Rogers Corp., менеджер по развитию бизнеса направления переносных решений в области соединений.

такой конструкции показано на схеме рис. 1; процесс отвода тепла от более нагретой области в менее нагретую может быть описан простым соотношением:

$$H = kA(\Delta T / L),$$

где H – тепловой поток, k – теплопроводность, A – площадь поперечного сечения канала, L – расстояние между областями с разной температурой, ΔT – разница температур между более нагретой и менее нагретой областями.

Очевидно, что конструкция с меньшим значением L (более тонкая) будет обеспечивать лучший теплоотвод через толщину платы (по оси Z); такой же эффект дает более высокое значение теплопроводности k . Следует отметить, что теплопроводность имеет место не только вдоль оси Z (по толщине платы), но и в плоскости X - Y .

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ СХЕМЫ

В высокочастотных и высокоскоростных (цифровых), а также в силовых электрических схемах перегрев как функция приложенной мощности возникает из-за суммарных потерь, включающих диэлектрические потери в материале платы, вносимые потери линий передачи и потери из-за теплопроводности материала платы (или тепловые потери). В активных схемах, где источник мощности (тепла), такой как транзистор или ИС, может быть установлен непосредственно на линиях передачи, может возникнуть значительное тепловое напряжение в интерфейсе между таким компонентом и материалом платы.

Перегрев активного компонента можно ограничить путем использования материалов плат с высокой теплопроводностью, а также при помощи теплоотводящих переходных отверстий, проходящих сквозь материал основания и соединяющихся с элементом конструкции, имеющим высокую теплопроводность – например, с металлическим радиатором или со слоем общей шины (рис. 2). Избегать экстремального перегрева необходимо в том числе из-за его воздействия на другие элементы схемы. Рост температуры может повлиять на характеристики потерь в компонентах поверхностного монтажа

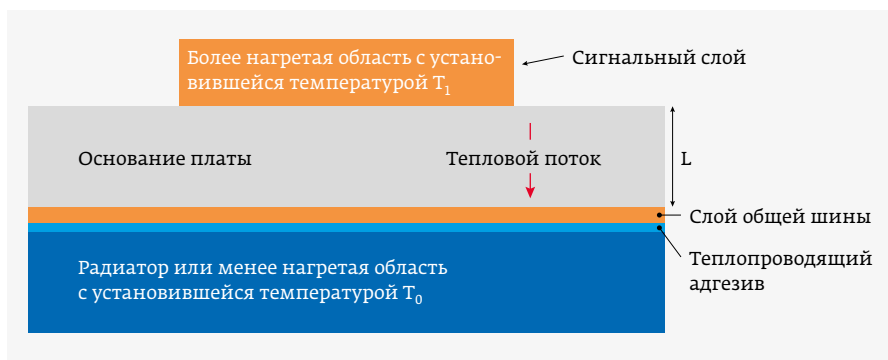


Рис. 1. Теплоотвод через основание печатной платы. Можно рассчитать тепловой поток от линий передачи, расположенных на верхней стороне, таких как микрополосковые линии, до области охлаждения на нижней стороне платы

и высокочастотных линиях передачи, таких как микрополосковые линии или заземленные копланарные волноводы, вызывая изменение сдвига фазы относительно его номинального значения.

Там, где использование радиатора невозможно из-за ограничений размеров и/или веса, избыточное тепло может рассеиваться только диэлектрическим слоем или, в случае многослойных плат, дополнительными слоями платы и/или окружающими структурами. К счастью, имея понимание, как различные свойства материала взаимосвязаны с температурой и какое влияние она на них оказывает, можно выбрать для платы материал с высокой теплопроводностью, способный обеспечить устойчивый тепловой режим при относительно высоких уровнях мощности даже без применения радиатора. Благодаря высокой теплопроводности и другим свойствам таких материалов также оказывается возможным разрабатывать и изготавливать схемы, способные работать при более

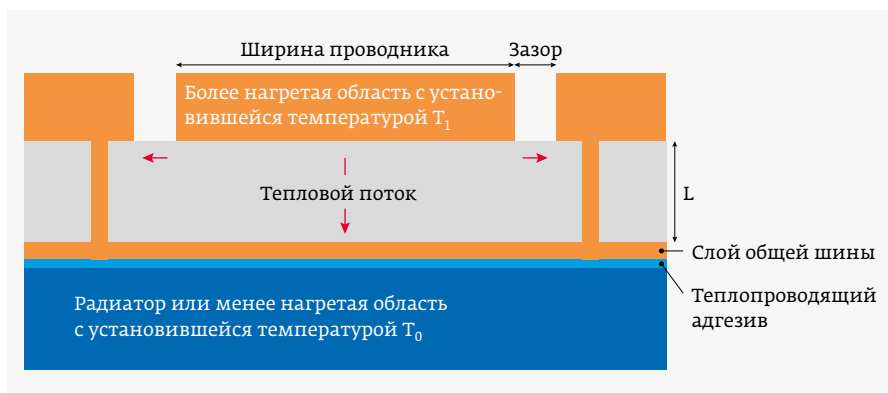


Рис. 2. Теплоотводящие переходные отверстия, формирующие каналы с большей теплопроводностью, чем у диэлектрического материала, которые позволяют отводить тепло от более нагретой области платы к менее нагретой

высоких уровнях мощности, обладая при этом меньшими размерами, чем схемы на основе менее теплопроводных материалов.

Несмотря на то, что теплопроводность большинства материалов высокочастотных плат относительно низка в сравнении с теплопроводностью меди, составляющей $400 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, для многих маломощных изделий считается приемлемой плата с теплопроводностью $0,5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Однако, если конструкция требует повышенного теплоотвода, решением могут быть материалы плат на основе фторопласта, такие как RT/duroid® 6035HTC от Rogers Corp. с $k = 1,44 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Имея значения теплопроводности, во много раз превосходящие таковые у обычных фторопластовых материалов для печатных плат, они обеспечивают достаточный теплоотвод при более высоких уровнях мощности, не жертвуя при этом отличными электрическими характеристиками фторопласта как изолятора. Когда рассеивание тепла диэлектрическим материалом платы или теплоотвод через него все же недостаточны, ситуацию можно улучшить с помощью дополнительных путей отвода тепла, например, через теплоотводные переходные отверстия, соединенные с радиатором.

При сравнении значений теплопроводности различных материалов плат следует учитывать, что этот параметр зависит от температуры, и его значение, указанное в документации на материал, соответствует определенной температуре, при которой проводились испытания.

МАКСИМАЛЬНАЯ РАБОЧАЯ ТЕМПЕРАТУРА

Один из параметров материалов для плат, используемых в задачах, требующих сертификации Underwriters' Laboratories (UL), – максимальная рабочая температура (T_{max} или MOT). Как правило, если T_{max} конкретной схемы неизвестна, проверенное эмпирическое правило рекомендует принять для данного материала $T_{max} = +85^\circ\text{C}$.

Дополнительные параметры материала платы, относящиеся к теплопроводности и обеспечению теплового режима, включают тангенс угла диэлектрических потерь, шероховатость поверхности проводников, коэффициент теплового расширения и, в меньшей степени, диэлектрическую проницаемость. Тангенс угла диэлектрических потерь характеризует потери энергии в схеме, относящиеся к диэлектрическому материалу – в отличие от потерь в проводниках, – и представляет собой меру склонности материала поглощать энергию электромагнитного поля, воздействию которого он подвергается. Меньшие значения Df соответствуют меньшим потерям в диэлектрике, меньшей поглощаемой электромагнитной энергии и меньшему образованию тепла из-за ее поглощения. Таким образом, низкое значение тангенса угла диэлектрических потерь и высокая теплопроводность – две характеристики материала платы, которые

в сочетании способствуют обеспечению качественного теплового режима, то есть низкого образования тепла при более высоких уровнях мощности. Это сочетание – хорошая отправная точка при выборе материала платы для мощных РЧ- и СВЧ-схем.

Поскольку к нагреву при повышенных рабочих уровнях мощности приводят различные формы потерь в схеме, при выборе материалов плат для эффективного обеспечения теплового режима наряду с потерями в диэлектрике следует принимать во внимание потери в проводниках. Последние зависят от типа материала проводника, при этом характеристики потерь в открытой меди отличаются от потерь в меди, покрытой материалом с большей проводимостью, таким как серебро. Шероховатость поверхности меди, применяемой для формирования проводников, также вносит свой вклад в потери: чтобы свести к минимуму теплообразование из-за потерь в проводниках, желательна минимальная шероховатость поверхности.

КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ

Коэффициент теплового расширения – критический параметр для описания явлений механического свойства, происходящих с материалами из-за изменения температуры; особенно велико его влияние в интерфейсах между различными материалами, например, в многослойных платах. Он описывает, насколько сильно материал расширяется при повышении температуры на каждый градус, и измеряется в ppm/°C. Интерфейсы материалов имеют место также и между микросхемами и другими устройствами, с одной стороны, и платами из таких материалов, как керамика и фторопласт с керамическим или стеклянным наполнителем, на которые они установлены, – с другой. Чтобы избежать напряжений в таких интерфейсах, различие КТР между материалами должно быть как можно меньше.

Значения КТР материала определяется по отношению к осям X, Y и Z, обычно они не одинаковы в двух плоскостях; то есть КТР, как правило, анизотропен.

По осям X-Y различия КТР могут приводить к чрезмерному механическому напряжению установленных чип-компонентов и компонентов в корпусах. По оси Z (по толщине материала платы) различия КТР при повышенных температурах могут создавать напряжения в тепло- или электропроводных металлизированных сквозных отверстиях.

Важно также отметить, что КТР редко носит линейный характер, он может изменяться при изменении температуры. Наиболее точные значения КТР приводятся для одного или нескольких определенных значений рабочей температуры. В этой связи необходимо обращать внимание на такой параметр пластмасс и композитов, как температура стеклования (T_g). Это температура, при которой аморфный материал меняет свое состояние с твердого стекловидного на более мягкое, резиноподобное.

КТР при температурах выше температуры стеклования обычно намного больше, чем при температурах ниже T_g . Поэтому температура стеклования является важным свойством материала; в частности, большие ее значения обычно позволяют получить более высокую надежность металлизированных отверстий.

Диэлектрическая проницаемость – один из тех параметров, на которые при выборе материала платы для определенного устройства инженеры обращают внимание в первую очередь. Для многих конструкций высокочастотных и высокоскоростных плат материалы с меньшими значениями Dk – примерно от 3,0 до 4,5 – обеспечивают контролируемые размеры рисунка схемы для РЧ- и СВЧ-частот при типовом импедансе 50 Ом. Доступны коммерческие материалы плат на основе полимеров (мягкие) – например, с применением фторопласта с различными наполнителями, – обладающие достаточно хорошей теплопроводностью и низкими значениями диэлектрической проницаемости.

Выбор для платы материала с высокой теплопроводностью – первый шаг к обеспечению теплового режима. Например, материалы плат на эпоксидной основе 92ML™ от Rogers Corp. имеют теплопроводность в плоскости 3,5 Вт/(м·К) (рис. 3). Обладая температурой стеклования 160 °С и низким КТР по оси Z, эти материалы специально предназначены для организации стабильного теплоотвода в мощных устройствах. Многие параметры, способствующие эффективному обеспечению теплового режима, присущи материалу RT/duroid 6035HTC, также от компании Rogers Corp. В нем применяется фторопласт с керамическим наполнителем; полученный композит обладает намного большей теплопроводностью, чем обычные фторопластовые материалы для печатных плат – 1,44 Вт/(м·К) при +80 °С. Диэлектрическая проницаемость материала по оси Z на частоте 10 ГГц составляет 3,50, и он обладает низким значением тангенса угла диэлектрических потерь по оси Z, равным 0,0013.

ИЗМЕРЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Измерения и моделирование играют существенную роль в создании наилучшего решения для обеспечения теплового режима при заданном материале и конструкции платы. Один из стандартов по измерениям теплопроводности – ASTM D5470 («Standard Test Method for Thermal Transmission Properties of Thermally Conductive Electrical Insulation Materials» – «Стандартная методика испытаний свойств теплопередачи теплопроводных электроизоляционных материалов» – методика измерения теплового сопротивления материалов различных типов, включая

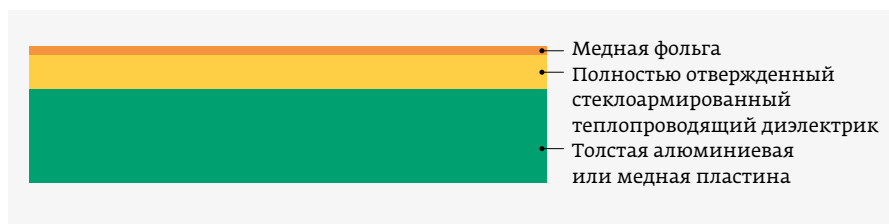


Рис. 3. Благодаря применению слоя общей шины большой толщины материал 92ML™ фактически позволяет сформировать встроенный радиатор для улучшения теплоотвода от источников тепла

жидкости); в соответствии с ним измеряется теплопроводность материалов по оси Z. В испытаниях методом лазерной вспышки по стандарту ASTM E1462 («Standard Test Methods for Insulation Integrity and Ground Path Continuity of Photovoltaic Modules» – «Стандартные методики испытаний на целостность изоляции и проводимости контура «земли» фотоэлектрических модулей») измеряется тепловая диффузия, которая может быть впоследствии использована для расчета теплопроводности по оси Z и по осям X-Y.

Для плоскостного и трехмерного (3D) анализа теплоотвода через структуру и от нее часто применяется программное обеспечение (ПО) для электромагнитной симуляции, такое как Ansys HFSS и Sonnet Software. Пакет Ansys IcePak содержит большое количество тепловых моделей, включая крупные объекты, такие как печатные платы, радиаторы, корпуса и тепловые трубы, и предоставляет пользователям возможность создавать свои собственные модели. ПО для теплового моделирования FloTHERM® от компании Mentor позволяет экспериментировать с различными материалами и интерфейсами между ними при моделировании обеспечения теплового режима на уровне платы, компонента и корпуса. Свободное ПО для теплового моделирования с открытым кодом Energy2D от Thermtest (www.thermtest.com) позволяет выполнять тепловой анализ многих стандартных материалов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Horn A. F. III, Caisse J. R. Ch.** Willhite Measurement and modeling of the effect of laminate thermal conductivity and dielectric loss on the temperature rise of HF transmission lines and active devices. Proceedings of DesignCon 2012.
2. **Coonrod J.** An Overview of Various Critical Thermal Issues for Microwave PCBs. Proceedings of the 2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2015), San Francisco, CA.
3. Standard Test Method for Thermal Transmission Properties of Thermally Conductive Electrical Insulation Materials. Standard D5470–12. ASTM International. www.astm.org.

Оригинальная публикация: High Frequency Electronics, Nov. 2017, P. 22–27. Публикуется с разрешения Rogers Corp.