

Толстые металлические покрытия ламинатов RT/duroid для СВЧ-приложений

Ламинаты RT/duroid производятся как с одно- или двусторонней металлизацией медной фольгой, так и с толстым металлическим покрытием на одной стороне и тонкопленочной металлизацией медной фольгой на другой стороне. Толстый металлический слой обычно имеет толщину от 0,5 мм до 12,7 мм (рисунок 1) и служит заземлением для полосковых и микрополосковых цепей. Такие платы в ряде случаев имеют преимущества при разработке, производстве и эксплуатации по сравнению с платами, покрытыми с обеих сторон тонкой медной фольгой.

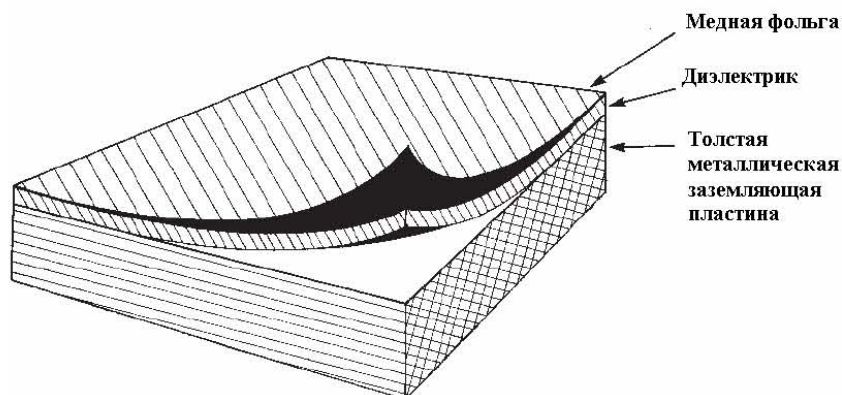


Рисунок 1 – Подложка с толстым металлическим основанием

Достоинства диэлектрических пластин с толстым металлическим основанием

Теплоотвод

Армированные стеклянными волокнами композиты на основе политетрафторэтилена (PTFE), такие, как RT/duroid 5880, имеют довольно низкий коэффициент теплопроводности (типичные значения от 0,26 Вт/м*К до 0,41 Вт/м*К) по сравнению с алюминием (220Вт/м*К) или оксидом алюминия (от 9,7 Вт/м*К до 15,6 Вт/м*К). При проектировании цепей высокой мощности разработчик должен учесть тепло, выделяемое активными элементами, потери на омическом сопротивлении проводников и потери в диэлектрике.

Толстая металлическая подложка обеспечивает хороший теплоотвод, позволяя контролировать температуру компонентов схемы. Активные и пассивные компоненты, в частности, диоды и резисторы, закрепляются непосредственно на металлической пластине в канавках или глухих отверстиях, сделанных в диэлектрике. Такой монтаж позволяет обеспечить максимальный теплоотвод в участках сильного нагрева.

В высокоточных цепях близкое расположение и непосредственный тепловой контакт диэлектрика с теплоотводящей заземляющей пластиной минимизируют тепловые

потоки. Кроме того, толстый слой металлизации устраняет тепловой барьер паяного или клевого соединения с радиаторами, используемыми в случае обычных плат с двусторонним фольгированием (рисунки 2, 3).

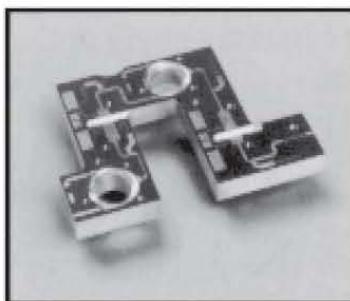


Рисунок 2 – Схема усилителя мощности на плате из материала RT/duroid 5880 с алюминиевым покрытием

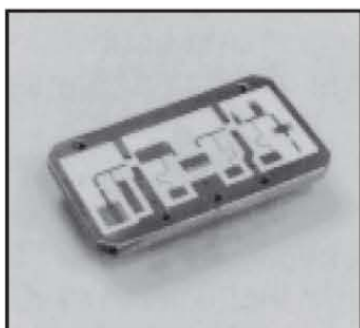


Рисунок 2 – Схема усилителя мощности на плате из материала RT/duroid 6010 с медным покрытием

Монтаж соединительных элементов

Если печатная плата и соединительные элементы не представляют собой единого целого, могут возникнуть проблемы надежности переходов от коаксиальных волноводов к микрополосковым или полосковым линиям при помощи возбуждателей, закрепляемых на кромке. Различие коэффициентов теплового расширения платы и соединителей вызывает усталостные повреждения из-за тепловых циклических нагрузок в местах прикрепления соединительных проводников к плате вплоть до появления проблем при установке в процессе монтажа.

Использование ламинатов с толстым металлическим основанием позволяет решить эту проблему двумя путями:

1. Коэффициент теплового расширения всей такой платы (СТЕ) в плоскости (x,y) определяется преимущественно СТЕ жесткой металлической пластины. Влияния различий СТЕ на надежность соединений можно избежать, если использовать соединители и толстое покрытие из одного и того же металла.
2. Соединитель может крепиться непосредственно к общим жестким шасси, образованным заземляющей пластиной печатной платы. Вертикальные прорези

или отверстия для крепежных винтов на фланце облегчают установку соединителей. Проводник, припаянный к дорожке на плате, образует надежное соединение без механических напряжений (рисунок 4).

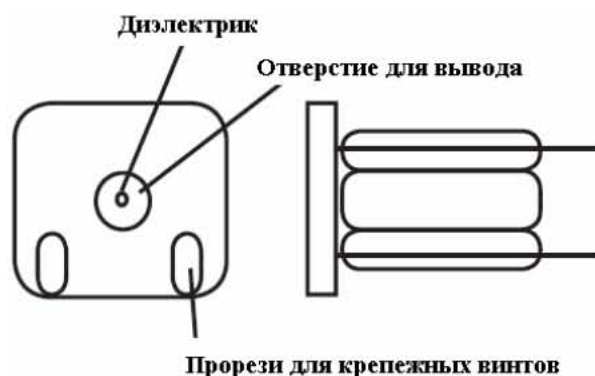


Рисунок 4 – Соединитель возбуждателя с прорезями для крепежных винтов, позволяющих производить регулировку по вертикали

Закрепление компонентов платы

Активные и пассивные компоненты платы могут быть закреплены непосредственно на заземляющей пластине в прорезях или углублениях, сделанных сквозь диэлектрик путем фрезерования. Для прикрепления транзисторов к заземляющей пластине могут быть использованы обычные методы соединений, например, эвтектическим силиконовым золотом или токопроводящим клеем.

Электрические соединения выполняются при помощи широко известных методов проводных, полосковых контактов или пайки. Эти соединения могут быть выполнены для компонентов внутри платы, для дорожек на краю платы, вырезов и углублений.

Кроме лучшего теплоотвода благодаря наличию толстого металлического слоя также обеспечивается жесткая основа для крепления. При выборе металла с СТЕ, близким к СТЕ устанавливаемых компонентов, например, Kovar, улучшается надежность конструкции при экстремальных тепловых циклических нагрузках. Как упоминалось выше, СТЕ платы с толстым металлическим покрытием определяется преимущественно СТЕ жесткой металлической пластины. Аналогичным образом, выбор металла пластины с соответствующим СТЕ увеличивает надежность монтажа поверхностных компонентов из-за уменьшения деформации закрепленных или припаянных выводов при изменениях температуры.

Тепловое растрескивание проводников

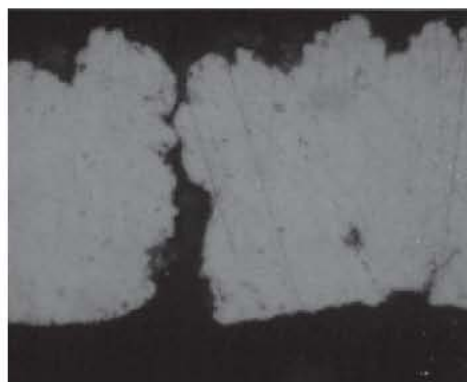
Экстремальные тепловые нагрузки или циклические изменения температуры окружающей среды могут вызывать появление трещин в медных дорожках на платах с тонкой медной фольгой (рисунок 5).

Условия эксплуатации в космическом пространстве предъявляют особенно жесткие требования к платам ввиду больших и быстрых температурных скачков. Различие СТЕ в плоскости (x;y) меди (около 17 ppm/0C) и армированного стекловолокном PTFE-композита (около 40 ppm/0C) в диапазоне от – 100 0C до +150 0C приводит к недопустимым деформациям тонкой медной фольги. Напряжения в медном слое

нарастают, и в конечном итоге при достаточно больших деформациях возникает трещина. Толстая медная заземляющая пластина выдерживает практически любую деформацию относительно мягкого диэлектрика, что практически позволяет решить данную проблему.



а



б



в

Рисунок 5 – Появление трещин в медных проводниках после теплового циклического нагружения: типичный вид при увеличении 60X (а), та же трещина при увеличении 625X (б) и картина трещины, полученная при помощи сканирующего электронного микроскопа при увеличении 145X (в).

Стабильность размеров

Медная фольга обычно наносится на РТФЕ-диэлектрик путем фиксации и нагрева при температуре выше +327 °С, соответствующей температуре плавления кристаллов РТФЕ. Отличие СТЕ фольги от СТЕ диэлектрика приводит к появлению внутренних деформаций при остывании платы. Эти деформации распределяются между подложкой и медной фольгой с более высоким модулем упругости в соответствии с их относительной толщиной в плате. Когда в процессе изготовления печатной платы слой медной фольги удаляется путем травления, остаточная деформация подложки снижается на величину, зависящую от количества удаленной медной фольги.

Снижение деформации приводит к появлению двух проблем при производстве печатных плат. Платы, на одной стороне которых остается фольга, имеют тенденцию коробиться или изгибаться. Чаще всего это случается с тонкими платами и может потребовать их специального закрепления для последующей обработки. Другая проблема – сжатие при травлении, или изменение размеров в плоскости (x;y) при удалении фольги, наблюдаемое в виде искажения рисунка на плате по сравнению с фотошаблоном. Степень этого искажения зависит от многих факторов, в т.ч. от ориентации армирующих волокон в плоскости (x;y) диэлектрика, доли удаленной фольги, преимущественной ориентации элементов рисунка печатной платы и относительной толщины фольги по сравнению с подложкой. Обычно с этим борются двойным травлением платы и компенсацией фотошаблона путем регулировки его размеров для обеспечения относительного уменьшения деформации. Двойное травление включает в себя две последовательности наложения маски, травления и удаления маски. На первом этапе вытравливается большая часть медной фольги, которую необходимо удалить, так что большая часть деформации снимается до второго этапа.

Однако если диэлектрик надежно закреплен на толстом металлическом листе, жесткая заземляющая плоскость предотвращает деформации и изгибы платы, а также искажение рисунка. Дальнейшие операции могут быть прецизионными.

Поскольку толстый и тонкий металлические слои прикрепляются к диэлектрику одновременно в процессе высокотемпературного нагрева, внутренние деформации, хотя еще присутствуют, но приходится больше на подложку. Если плата несбалансированна, она может в процессе производства изгибаться или коробиться в случае недостаточно толстого металлического слоя. Таки деформации могут сохраняться и после удаления медной фольги. Для сохранения плоскости платы равной толщине металлического слоя должна быть в 2 – 3 раза толще слоя диэлектрика.

Размещение в корпусе

Микрополосковые печатные платы обычно помещаются в металлический корпус для защиты активных элементов и обеспечения экранирования. Платы с толстым металлическим основанием легко закрепляются при помощи винтов. Высверливание отверстий в диэлектрике позволяет избежать деформации ползучести из-за сжатия и ослабления подложки под головками винтов. В некоторых случаях толстое металлическое основание может одновременно служить заземлением и дном корпуса. Избежать проблем, связанных с ползучестью, можно либо закреплением крышки к ребру днища, либо сквозным высверливанием диэлектрика в местах, где плата будет крепиться с лицевой стороны (рисунок 6).

В противоположность этому печатные платы из диэлектрика с тонким двусторонним медным фольгированием требуют соблюдения особых предосторожностей при установке в корпус, хотя не всегда эти усилия дают удовлетворительные результаты.

Если платы фиксируются при помощи винтов, деформация ползучести под действием сжатия головками винтов еще больше усиливается из-за тепловых циклических нагрузок в процессе эксплуатации, что может приводить к ослаблению материала (подробнее см. в тех.описании RT 4.7.2 «Как избежать проблем, вызванных ползучестью при монтаже плат»). Хороший контакт с дном для охлаждения также затруднителен.

Если платы должны крепиться к дну корпуса пайкой или при помощи лака, необходимо соблюдать осторожность во избежание повреждения компонентов платы, чувствительных к нагреву. Пустот между платой и днищем корпуса трудно избежать. Эти пустоты уменьшают тепловой поток к радиатору, что приводит к снижению надежности, а также к росту сопротивления заземления компонентов платы.

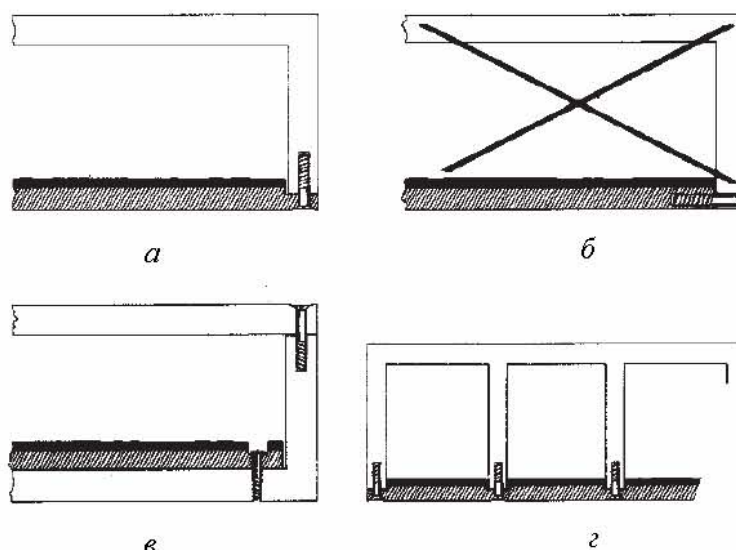


Рисунок 6 – Типовые конструкции корпусов: рекомендуемые (а, в, г) и нерекомендуемая (б).

Свойства металлов, применяемых для изготовления толстого основания

Для изготовления толстого основания обычно выбирают алюминий, латунь и медь, причем алюминий чаще всего. Свойства металлов и диэлектрических подложек представлены в таблицах 1 и 2. Для специфичных задач могут быть выбраны и другие металлы со специальными свойствами. Представленные данные включают свойства Kovar, Invar, композита медь-Invar-медь для получения близких значений СТЕ пластины и компонентов платы и свойства нержавеющей стали, применяемой для изготовления прочных, жестких и устойчивых к коррозии металлических пластин.

Таблица 1

Типичные свойства применяемых металлов

Свойство	Алюминий	Медь	Латунь
Номер сплава	6061	110	Cartridge (патронный сплав)
Предел прочности	137,9	241,3	310,2

на разрыв, ГПа			
Удельный вес	2,7	8,9	8,5
Удельная теплоемкость, Дж*кг*К	960	385	375
Коэффициент теплопроводности (СТЕ), Вт/м*К	180	390	120
Коэффициент теплового расширения, ppm/К	24	17	20
Проводимость, мкОм*см	5	2	6
Относительное значение цена/площадь	1,0	1,5	1,4

Таблица 2

Типичные свойства диэлектрических подложек
с толстым металлическим основанием

Свойство*	Значение
Сопротивление отслаиванию диэлектрика от металлической подложки, Н/м (ширины образца) **	
а. RT/duroid 6010, толщина 0,025 дюйма	429
б. RT/duroid 5880, толщина 0,031 дюйма	536
Сдвиговая прочность, Н/м **	
а. RT/duroid 6010	24100
б. RT/duroid 5880	26800
Шероховатость поверхности, средне-квадратич., тип., мкм ***	2
Допуск на толщину заземляющей пластины,	

а. стандарт.	различный
б. с малым допуском	±50 мкм
Параллельность	1,4 мм макс.

Примечания:

* - значения пересчитаны в Си при допущении 1 фунт = 453,6 г, 1 lbs./in = 18,86 Н/м

** - значения получены при шероховатости границы 2 мкм

*** - обе стороны заземляющей пластины имеют одинаковую шероховатость

Толщины металлов представлены в таблице 3. Эти толщины и допуски соответствуют промышленным стандартам, что сокращает время выполнения заказов и уменьшает стоимость продукции. Эти и другие толщины доступны с малыми допусками 50 мкм.

Таблица 3

Промышленные толщины металла, дюйм

Медь*	Латунь	Алюминий
0,020±0,0035	0,020±0,003	0,020±0,003
0,032±0,004	0,025±0,003	0,025±0,003
0,040±0,005	0,032±0,004	0,032±0,0035
0,050±0,006	0,040±0,004	0,040±0,004
0,064±0,006	0,050±0,005	0,050±0,005
0,093±0,007	0,064±0,005	0,063±0,005
0,125±0,007	0,093±0,006	0,080±0,006
0,187±0,008	0,125±0,006	0,090±0,006
0,250±0,010	0,187±0,007	0,100±0,007
	0,250±0,009	0,125±0,007
		0,160±0,009
		0,190±0,011
		0,250±0,014
		0,313±0,015
		0,375±0,017
		0,500±0,023

* - медное покрытие для материалов типа ТММ не производится

Выбор сплава для заземляющей пластины

Обычно определяется компромиссом между многими факторами, включая разработку, удобство изготовления, затраты на производство, обслуживание и др.

Стоимость

Алюминий имеет наименьшую стоимость на единицу площади пластины при заданной толщине, но если толщина определяется требованиями механической прочности, скорее всего лучше выбрать латунь.

Мощность

Для изделий с высокой электрической мощностью, в которых требуется высокая теплопроводность пластины для лучшего теплоотвода, больше всего подойдет медь. Ее теплопроводность в два раза лучше, чем у алюминия, и в три раза лучше, чем у латуни. Кроме того, ее СТЕ лучше соответствует СТЕ кремниевых микросхем и медной фольги. Высокая удельная теплоемкость алюминия может быть полезна при некоторых режимах работы, особенно при кратковременных и интенсивных нагрузках.

Радиочастотные потери

На высоких частотах становятся существенными потери в проводниках, в частности, в дорожках печатной платы и заземляющих линиях. Потери в проводниках на этих частотах являются функцией удельного электрического сопротивления и шероховатости поверхности. Радиочастотные потери могут быть минимизированы путем задания в спецификации более гладкой границы диэлектрик-металлическая пластина, но при этом придется пожертвовать уменьшением прочности сцепления этих поверхностей.

На высоких частотах и для уменьшения потерь лучше предпочтительнее использовать медь или алюминий, чем латунь, имеющую большее удельное сопротивление.

Вес

Благодаря очень низкому удельному весу и высокому отношению прочность-вес алюминий чаще всего оказывается предпочтительнее в разработках для авиации и космоса, критичных к весу изделий.

Обрабатываемость материала

При нагреве до высоких температур, необходимом для ламинирования платы (соединения диэлектрика с металлической пластиной), происходит отжиг и полный отпуск алюминия и меди. Для этих металлов не рекомендуется использовать сложные формы деталей. Резьбовые отверстия требуют очень внимательного обращения, витки резьбы легко срезаются. По возможности желательно использовать конструкции без резьбовых отверстий в металлической пластине. На рисунке 6,б представлен нежелательный случай, в то время как на рисунках 6а,в,г резьба нарезается в отверстиях корпуса.

Медь обрабатывается легко, с хорошим контролем допусков, и, в отличие от алюминия и меди, позволяет нарезать в отверстиях надежную внутреннюю резьбу.

Коррозионная стойкость

Алюминиевый сплав 6061 имеет превосходную коррозионную стойкость и в этом отношении пригоден для многих разработок.

Медный сплав 110 легко окисляется и быстро корродирует при контакте с промышленными загрязнителями, такими, как оксиды серы или азота, при высокой

влажности и попадании соляной пыли. Для этого сплава во всех случаях необходимо коррозионностойкое покрытие.

Латунь лучше меди, но хуже алюминия. Для нее обычно рекомендуется использовать защитное покрытие.

Металлизированные сквозные отверстия

Заземляющие пластины из меди и не содержащих свинца латунных патронных сплавов могут обрабатываться на стандартных линиях для производства печатных плат без специальных предосторожностей. Сплавы, содержащие свинец, загрязняют гальванические ванны.

Наибольшие затруднения вызывают сквозные металлизированные отверстия в алюминии. Для того, чтобы нанести металлизацию, необходимо удалить с поверхности алюминия тонкий, плотный слой оксида алюминия с сильной адгезией. При использовании растворов или сильных реагентов, например, азотной кислоты, для снятия слоя оксида алюминия необходимо соблюдать осторожность во избежание переноса реактивов в последующие ванны. По этой причине часто имеет место «двойное цинкование», когда сначала производится снятие оксида алюминия, цинкование, затем снятие слоя цинка и повторное цинкование. Это - трудноконтролируемый процесс. Высокая вязкость некоторых растворов препятствует металлизации отверстий с большим отношением глубины к диаметру.

Обработка плат с толстым металлическим основанием

В общем виде процесс производства СВЧ-платы из диэлектрика с толстым металлическим основанием соответствует стандартному процессу для изготовления печатных плат. Ниже перечислены необходимые доработки и меры предосторожности.

Очистка

Процесс очистки и обезжиривания плат с толстым металлическим основанием не требует применения специальных мер предосторожности. Однако использование растворов для травления, например, соляной кислоты при предварительной очистке меди перед нанесением фоторезиста или защитной краски, требует маскирования толстого алюминиевого слоя во избежание быстрого воздействия кислотой. Толстый слой меди или латуни не нуждается в маскировании, травление приведет только к полировке металлической поверхности.

Примечание

Необходимо избегать абразивной очистки пемзой или другими средствами ламинатов RT/duroid с медным покрытием. Абразивные микрочастицы на поверхности фольги делают воронки, которые впоследствии в условиях тепловых циклических нагрузок приводят к образованию трещин.

Маскирование

Металлические заземляющие покрытия, особенно алюминиевые, в различных технологических процессах подвергаются химическому воздействию в ваннах для травления, металлизации и др. Везде, где это происходит, необходимо маскировать толстое металлическое покрытие.

Для выбора доступного метода маскирования необходимо учесть сложность поверхности, доступность материалов, требования по охране окружающей среды и требования техники безопасности по работе с растворами, количество обрабатываемых изделий и стоимость.

1. **Маскирующая лента** является быстрым, удобным и недорогим способом нанесения маски на плоские простые поверхности. Необходимо просто приложить самоклеющуюся ленту на требуемую поверхность, обращая внимание на углы и края. Перерывающиеся полоски ленты предотвратят просачивание технологических растворов. В качестве меры особой предосторожности края и стыки могут быть покрашены устойчивым к действию этих растворов лаком, который снимется вместе с лентой при ее удалении. Оба конца сквозного отверстия должны быть закрыты.

2. **Фоторезистивная пленка** является альтернативой маскирующей ленты для простых поверхностей. Этой пленкой ламинируется заземляющая пластина, затем, после обработки платы, пленка снимается.

3. **Жидкий фоторезист**, наносимый распылением, кистью или погружением, эффективен для сложных извилистых поверхностей. Однако он может не лечь и не покрыть полностью стенки отверстий малого диаметра. В этих случаях необходимы другие средства, например, заглушки.

4. **Лак** наносится аналогично жидкому фоторезисту с тем преимуществом, что благодаря большей вязкости он полностью покрывает отверстия малого и среднего диаметров. Полости и стенки отверстий большого диаметра можно покрыть методом распыления или погружения. После завершения процесса обработки платы лак обычно снимается при помощи соответствующего растворителя.

Нанесение рисунка

Толстые металлические заземляющие пластины не подвержены действию химических веществ, используемых при трафаретной печати или в процессе фотомаскирования. Жесткость и плоскостность плат с толстым металлическим основанием гарантируют точное воспроизведение рисунка на медной фольге, часто превосходя обычные платы с двусторонним фольгированием. Отсутствие усадки при травлении позволяет получить малые допуски при формировании рисунка.

Травление

Большинство металлов, используемых для толстослойных покрытий, легко поддаются действию растворов для травления меди, поэтому обязательно следует использовать маскирование. Неправильно выполненное маскирование может привести не только к повреждению изделия, но и к загрязнению ванн для травления. Для травления плат с толстым алюминиевым покрытием без маскирования алюминия можно применять пероксидисульфат аммония.

Применение

Платы из материала RT/duroid с толстым металлическим покрытием получают все большее признание среди инженеров-разработчиков и технологов СВЧ-устройств.

Платы толстым металлическим основанием на основе диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью, например, RT/duroid 6010 из PTFE-композиата с наполнителем из керамических волокон, заменяют подложки на основе окиси алюминия

при проектировании усилителей мощности. Такие платы обеспечивают хорошие тепловые свойства и стабильность размеров в сочетании с эффективностью производства.

При разработке «супер-компонентов» используются преимущество этих плат, связанное со стабильностью размеров дорожек, соединяющих дискретные элементы в алюминиевых корпусах, размещенных в углублениях заземляющей пластины. В результате получаются компактные высоконадежные модули, в которых решены многие проблемы соединений и размещения, характерные для модулей на основе окиси алюминия.

Платы с толстым металлическим основанием на основе диэлектрика с низкой диэлектрической проницаемостью, например, RT/duroid 5880, находят применение в разработках полосковых и микрополосковых устройств от излучающих элементов больших антенных решеток, фазовращателей, делителей мощности и питающих цепей для этих антенн до дискретных СВЧ-устройств: фильтров, ответвителей и переключателей.

Уникальные свойства плат на основе материала RT/duroid с толстым металлическим покрытием использованы уже во многих разработках для уменьшения их стоимости и повышения надежности.