

Физико-технологические ограничения при проектировании многослойной коммутиционной СВЧ-платы

А. А. Жуков, д. т. н., доцент, zhukov.aa@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация
ФГБОУВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»,
Москва, Российская Федерация

А. Ю. Калашников, аспирант, kalashnikov.ay@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

М. К. Соловьев, к. т. н., contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Проведена экспериментальная оценка диэлектрической постоянной и тангенса угла диэлектрических потерь полиимидного покрытия толщиной от 40 мкм до 160 мкм, полученного методом формирования из раствора с разнотолщиной не хуже 10%. Экспериментально определена адгезионная прочность в системе «полиимидное покрытие–металлизация» на пластине из нитрида алюминия и микросварного соединения золотой проволокой к металлизации системы Cr–Cu–Ni–Au, сформированной на поверхности полиимидного покрытия, оценена селективность травителя полиимида и проведен выбор режима жидкостного травления полиимидного покрытия на пластине из нитрида алюминия. Обобщены физико-технологические ограничения для конструирования многослойной коммутиционной СВЧ-платы космического назначения на основе полиимида. Полученные данные позволяют обоснованно подходить к моделированию и конструированию коммутиционных СВЧ-плат на основе полиимида.

Ключевые слова: полиимиды, многослойный, СВЧ-плата, ограничения

Physical and Technological Limitations for the Construction of a Multilayer Switching Microwave Board

A. A. Zhukov, Dr. Sci. (Engineering), associate professor, zhukov.aa@spacecorp.ru

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Moscow Aviation Institute (National Research Institute), Moscow, Russian Federation

A. Yu. Kalashnikov, postgraduate student, kalashnikov.ay@spacecorp.ru

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

M. K. Soloviev, Cand. Sci. (Engineering), contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Abstract. The dielectric constant and the dielectric loss tangent of a polyimide coating with a thickness of 40 μm to 160 μm , obtained by the solution coating method with a thickness difference of no worse than 10%, were experimentally evaluated. The adhesive strength was experimentally determined in the system «polyimide coating–metallization» on a substrate of aluminum nitride and a microwelded gold wire to metallize the Cr–Cu–Ni–Au system formed on the surface of the polyimide coating, the selectivity of the polyimide etchant was evaluated, and the polyimide liquid etching mode was selected coatings on a substrate of aluminum nitride. The physical and technological limitations for the construction of a multilayer switching microwave board for space purposes based on polyimide are summarized. The data obtained allow a reasonable approach to modeling and designing switching microwave boards based on polyimide.

Keywords: polyimides, multilayer, microwave board, limitations

Введение

Развитие радио- и микроэлектронной техники сопровождается повышением требований к технологичности, надежности функционирования, уменьшению массы и объема, улучшению электрических характеристик изделий при одновременном росте функциональных возможностей. Данные требования справедливы и для микроэлектронных изделий СВЧ-диапазона, современный этап разработки которых связан с необходимостью внедрения в процесс их проектирования передовых технологий и конструктивных решений. Оптимизацией структуры отдельных элементов конструкции, размеров и подбора совокупности применяемых материалов можно существенно повысить уровень характеристик гибридных интегральных схем и микросборок СВЧ. СВЧ-платы с многоуровневой коммутацией имеют сложную композиционную структуру чередующихся слоев проводников и диэлектриков, ввиду чего использование различных систем материалов в ней непременно связано с присущими им физико-технологическими ограничениями.

Надежность электронной аппаратуры во многом обеспечивается конструктивно-технологическими решениями [1]. Как показано в работе [2], рост функциональной сложности электронных устройств заставляет их разработчиков искать новые конструктивно-технологические решения проектирования и изготовления коммутационных плат. Использование в структуре платы толстых (10–30 мкм) пленок фоточувствительного органического диэлектрика [2] в качестве межуровневой и защитной изоляции позволяет снизить трудоемкость и себестоимость изготовления платы по сравнению с тонкопленочным прототипом. В работах [3, 4] показано, что в основе субмодуля многослойной кремниевой коммутационной платы в качестве СВЧ-межсоединений предполагается использование производных полимера типа бензоциклобутена. СВЧ-модуль, показанный в работе [5], представляет собой многослойную структуру, выполненную на жестком основании из нитрида алюминия. Теплопроводность AlN находится в диапазоне 170–220 Вт/(м·К), ее значение зависит от исходных порошковых материалов и способа производства пластины. ТКЛР нитрида алю-

миния равен 5,6 ppm/°C и близок к аналогичному параметру кремния (4,1 ppm/°C) и арсенида галлия (6,5 ppm/°C). Кроме того, этот материал может использоваться в толсто- и тонкопленочной технологии, для высокотемпературной пайки или пайки мягким припоем [6]. Ввиду тенденции к увеличению производительности и росту функциональной сложности электронных устройств остается необходимость разработки и применения новых конструктивно-технологических решений, а значит, существует актуальная задача обобщения физико-технологических ограничений при конструировании многослойной коммутационной СВЧ-платы для обеспечения обоснованного подхода к моделированию и конструированию СВЧ-плат на основе полиимида.

Цель работы — обобщение экспериментально определенных физико-технологических ограничений для обоснованного конструирования многослойной СВЧ-платы с многоуровневой коммутацией на основе полиимида.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить состав и структуру тестовых образцов;
- определить методы исследования;
- разработать метод формирования полиимидного покрытия толщиной более 40 мкм с разнотолщинностью не хуже 10% (при диаметре пластины 76 мм);
- экспериментально оценить диэлектрическую постоянную и тангенс угла диэлектрических потерь полиимидного покрытия толщиной от 40 мкм до 160 мкм;
- оценить селективность травителя полиимида;
- выбрать режимы жидкостного травления полиимидного покрытия на пластине из нитрида алюминия;
- экспериментально определить адгезионную прочность в системе «полиимидное покрытие – металлизация» на пластине из нитрида алюминия и микросварного соединения золотой проволокой к металлизации системы Cr–Cu–Ni–Au, сформированной на поверхности полиимидного покрытия;
- исследовать влияние режима термической обработки на стабильность свойств тестовой многослойной коммутационной СВЧ-платы с многоуровневой коммутацией на основе полиимида.

Объекты исследования

Объектами исследования служили:

– кремниевые пластины диаметром 76 мм [7] со сформированным полиимидным покрытием (для получения покрытия использовался лак АД-9103 ИС [8]);

– свободные пленки полиимида (ПИ) толщиной от 40 до 160 мкм (формирование пленок полиимида осуществляли дозированием материала на окисленную пластину с последующим центрифугированием и поливом [9], с дальнейшей термообработкой при 275 °С и механическим отделением).

– пластина из нитрида алюминия [10] со сформированной металлической маской (Cr–Cu);

– пластина из нитрида алюминия [10] со сформированной тестовой структурой «полиимидное покрытие – металлизация». Толщина полиимидного покрытия составляет 45 ± 5 мкм, а толщина металлизации — Cr–Cu 1 мкм. Размер контактной площадки — 1×1 мм.

Методы исследования

Визуальный осмотр тестовых образцов на наличие дефектов на поверхности, внешних признаков загрязнения, инородных включений, признаков отслоения проводящего рисунка проводился с помощью оптической и растровой электронной микроскопии.

Для определения элементного состава слоя на поверхности образца использовалась система анализа на основе энергодисперсионного спектрометра (eds).

Определение относительной диэлектрической проницаемости ϵ свободных пленок полиимидного покрытия проводили методом объемного резонатора при фиксированной резонансной частоте [11].

Профилометрию полученных образцов проводили при помощи стилусного профилометра с повторяемостью не хуже 0,6 нм, со скоростью не более 400 мкм/с, линейные измерения проводились методом непосредственной оценки с погрешностью не хуже 2 мкм.

Для определения адгезионной прочности микросоединения тестировались нормальным отрывом

с использованием установки тестирования микросоединений, позволяющей осуществлять тестирование в диапазоне от сотен миллиграммов до сотен килограммов с точностью $\pm 0,1\%$ от номинальной нагрузки.

Результаты и обсуждение

Для получения полиимидных покрытий менее 40 мкм центрифугированием известны технологические ограничения [12]. Для получения полиимидных покрытий толщиной более 40 мкм и с разбросом толщины покрытия не хуже 10% был разработан способ формирования толстого полимерного покрытия из раствора [9].

Значения толщины и разброса толщины полиимидных покрытий: для толщины полиимидного покрытия 50 ± 2 мкм разнотолщинность составляет не более 9%.

Для экспериментальной оценки диэлектрической постоянной и тангенса угла диэлектрических потерь полиимидного покрытия толщиной от 40 мкм до 160 мкм формированием толстого полимерного покрытия из раствора [9] были получены покрытия толщиной 42 мкм, 110 мкм, 158 мкм на окисленных кремниевых пластинах. Произведена термообработка при 275 °С в течение 30 мин с нагревом до заданной температуры не быстрее 1 °С/мин и проведены измерения. После измерения было произведена дополнительная термообработка при 275 °С в течение 60 мин с нагревом до заданной температуры не быстрее 1 °С/мин. Результаты измерения диэлектрической постоянной (ϵ) и тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta$) ($f = 10$ ГГц) до и после дополнительной термообработки, проведенные при 25 °С, представлены в табл. 1.

В результате повторной термообработки наблюдается снижение диэлектрической постоянной и уменьшение разброса значений диэлектрической постоянной в зависимости от толщины образца, снижается значение тангенса угла диэлектрических потерь, что может быть связано с процессами удаления влаги и повышения степени имидизации полиимида [13].

Оценку селективности жидкостного травителя полиимида проводили, определяя разницу в скоро-

Таблица 1. Результаты измерения диэлектрической постоянной (ϵ) и тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg} \delta$) ($f = 10$ ГГц) обработанных и необработанных при температуре пленок полиимида различной толщины

Параметр	Пленка ПИ 40 мкм	Пленка ПИ 110 мкм	Пленка ПИ 160 мкм
ϵ	3,68	4,02	4,58
$\text{tg} \delta$	0,00071	0,00035	0,00065
ϵ после 60 мин при 275 °С	3,56	3,85	3,88
$\text{tg} \delta$ после 60 мин при 275 °С	0,00015	0,0002	0,0004

сти травления полиимидного покрытия и пластины из нитрида алюминия [10] при температурном режиме жидкостного травления полиимида. В состав травителя входят водный раствор гидроксида калия, моноэтаноламин, триэтаноламин. Для исследования взята пластина из нитрида алюминия диаметром 76 мм со сформированной металлической маской на основе системы металлизации Сг–Си, толщина слоя металлизации составляет 3,5 мкм (рис. 1, а). Для определения равномерности травления пластина из нитрида алюминия условно разделена на 3 зоны (рис. 1, б).

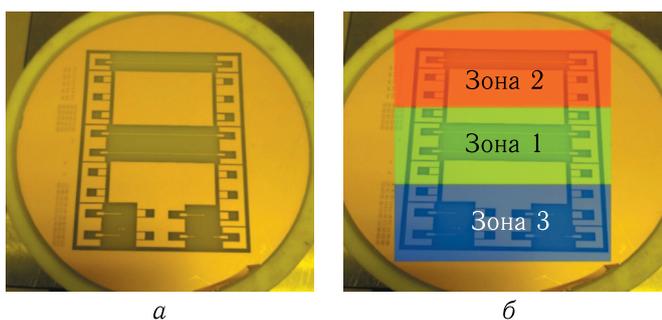


Рис. 1. Изображение пластины AlN с металлической маской (а) и пластины, условно разделенной на 3 зоны (б)

Воздействие жидкостным травителем полиимида производилось при температуре 50 °С.

На рис. 2, а показано изменение толщины одной стороны пластины из нитрида алюминия при варьируемом времени травления в травителе

полиимида, на рис. 2, б представлено изменение толщины пластины в трех зонах.

Экспериментально определенная скорость травления пластины нитрида алюминия составила 0,07 мкм/мин при температуре травителя 50 °С. В табл. 2 показана расчетная величина подтрав пластины из нитрида алюминия в результате травления слоя полиимида, толщиной 44 мкм.

Таблица 2. Расчетная величина подтрав пластины из нитрида алюминия в результате травления слоя полиимида толщиной 44 мкм

Материал	Толщина слоя, мкм	Время травления, мин	Скорость травления, мкм/мин
Слой полиимида	44	17	2,6
Нитрид алюминия (одна сторона)	1,19	17	0,07

Таким образом, экспериментально определено, что скорости травления отличаются более чем в 37 раз при оптимальном режиме травления полиимида ($T = 50$ °С), изменение толщины пластины в трех зонах имеет линейный характер и происходит равномерно. При формировании рисунка в слое полиимида толщиной 44 мкм подтрав пластины с одной стороны составит 1,19 мкм.

Исследование адгезионной прочности системы «пластина–полимер–металлизация» проводилось с помощью измерения величины усилия нормального отрыва проволоки, присоединенной методом пайки к поверхности контактной площадки, находящейся на слое полимера и выполненной из металлизации системы Сг–Си на пластине нитрида алюминия. На рис. 3 представлен общий вид образца до пайки проволоки (а) и схематичное изображение контактной площадки, находящейся на слое полиимида (б).

В табл. 3 представлены результаты измерений величины усилия нормального отрыва и среднее значение усилия отрыва проволоки, припаянной к поверхности контактной площадки.

На рис. 4 представлены изображения контактной площадки после измерения усилия отрыва (рис. 4, а) и обратная сторона разрушенного адге-

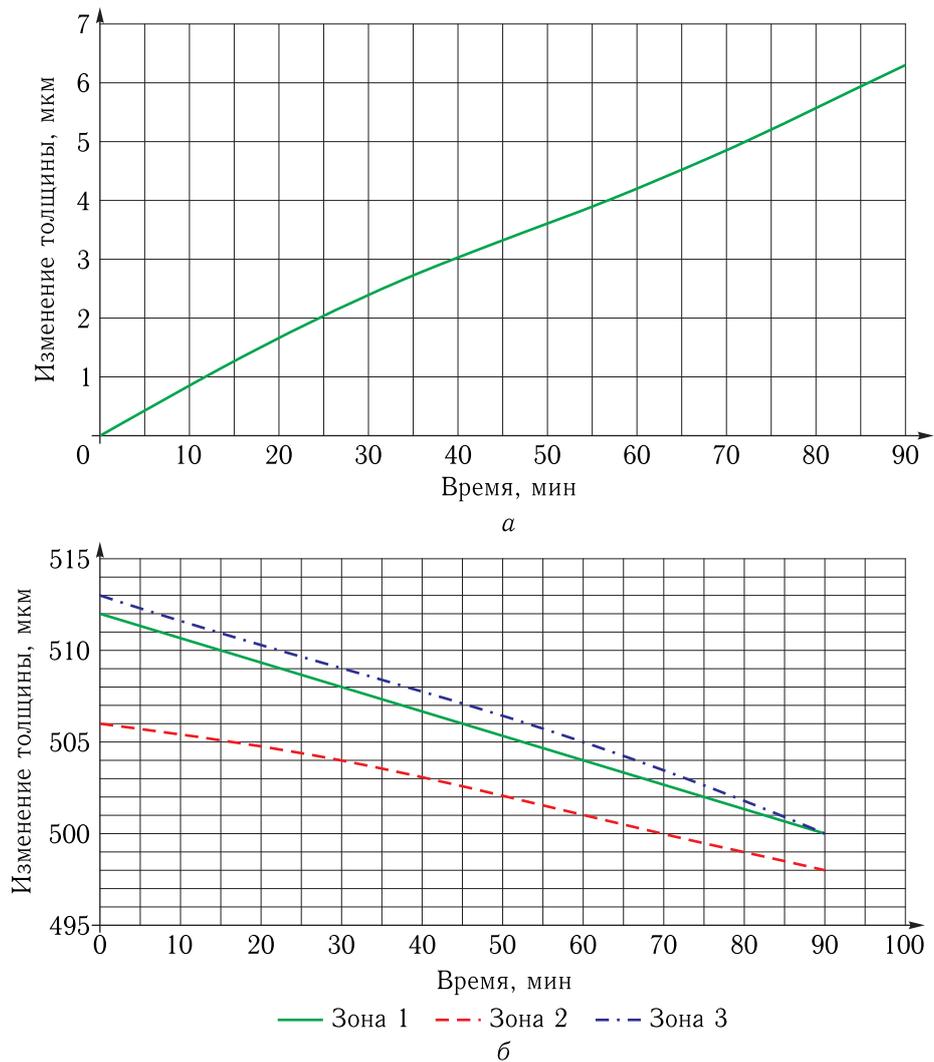


Рис. 2. Изменение толщины пластины с одной стороны при варьировании времени травления (а) и график изменения толщины пластины в трех зонах (б)

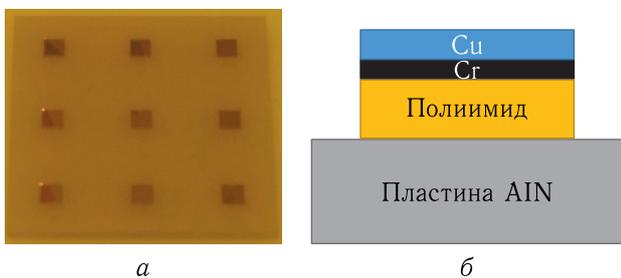


Рис. 3. Общий вид образца до пайки проволоки (а), схематичное изображение контактной площадки, находящейся на слое полиимида (б)

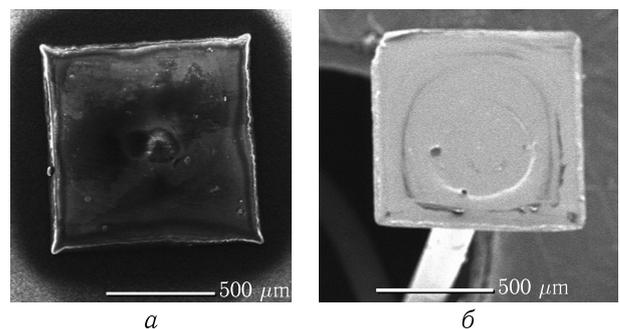


Рис. 4. Изображение контактной площадки 1 × 1 мм пластины со слоем полимера 45 мкм, полученное с помощью электронного микроскопа при увеличении в 50 раз: а) после измерения усилия отрыва; б) обратная сторона контактной площадки после отрыва (на проволоке)

Таблица 3. Результаты измерения усилия нормально-го отрыва проволоки, припаянной к поверхности контактной площадки

№ измерения (отрыва)	Усилие нормального отрыва, кг/мм ²
1	1,99
2	1,77
3	2,37
4	2
5	2,17
6	2,67
7	2,48
8	2,53
9	2,21
10	1,75
11	1,98
Среднее значение	2,17

зионного соединения контактной площадки, оставшаяся на проволоке после отрыва (рис. 4, б).

В табл. 4 показаны результаты eds-спектроскопии контактной площадки и с обратной стороны оторванной контактной площадки, оставшейся на проволоке после отрыва и схематичное изображение расслоения в системе «полиимидное покрытие–металлизация» в результате нормального отрыва.

По результатам eds-спектроскопии (табл. 4) видно, что на поверхности в месте отрыва контактной площадки находится полимер, в то время как на оторванной контактной площадке на проволоке, со стороны отрыва, находятся медь и хром.

Таким образом, методом нормального отрыва с погрешностью 0,1% от номинальной нагрузки измерена величина адгезии системы пластина–полимер–металлизация, где среднее арифметическое усилие нормального отрыва припаянной проволоки к поверхности металлической контактной площадки, сформированной на поверхности слоя полимера, нанесенного на пластину из нитрида алюминия, составило 2,17 кг/мм² по границе «полиимид–металлизация» для образцов, взятых с пластины со слоем полимера толщиной 45 мкм.

Таблица 4. Результаты eds-спектроскопии образцов пластины со слоем полимера 45 мкм

	Результаты измерения		Схематичное изображение отрыва
	Элемент	Массовых %	
Место отрыва контактной площадки на образце (на пластине)	C	36,48	
	N	35,03	
	O	27,05	
	Al	1,44	
Обратная сторона оторванной контактной площадки (на проволоке)	Элемент	Массовых %	
	Cr	29,65	
	Cu	70,35	

Результаты измерений СВЧ-параметров платы с многоуровневой коммутацией на основе полиимиды после температурных воздействий, параметры и режимы стабилизирующей термообработки подробно рассмотрены в работе [14].

Для определения адгезионной прочности микросварного соединения золотой проволокой к металлизации системы Cr–Cu–Ni–Au, сформированной на поверхности полиимидного покрытия, стабилизированного термообработкой [14], был выбран метод измерения усилия нормального отрыва. Микросварное соединение формировали ультразвуковым термокомпрессионным методом с мощностью ультразвука 80 ± 2 мА, силой прижатия капилляра 15 ± 1 г, длительностью микросварки 400 ± 5 мс, температурой нагрева пластины 150 ± 5 °С. Результаты измерения усилия нормального отрыва 25 мкм проволоки от поверхности металлизации системы Cr–Cu–Ni–Au, сформированной на полиимидном покрытии, представлены в табл. 5.

Среднее арифметическое значение усилия нормального отрыва для 25 мкм проволоки составило 7,46 г (усилие отрыва должно быть не менее 3,5 г в соответствии с ОСТ В 11 0998).

Исходя из проведенных экспериментальных исследований обобщенные физико-технологические ограничения для конструирования многослойной коммутационной СВЧ-платы на основе полиимиды представлены в табл. 6.

Таблица 5. Результаты измерения усилия нормально-го отрыва золотой проволоки диаметром 25 мкм от поверхности металлизации системы Сг-Cu-Ni-Au, сформированной на полиимидном покрытии

№ измерения	Усилие отрыва, г
1	10,359
2	10,331
3	6,3053
4	3,459
5	6,849
6	7,6349
7	7,134
8	7,66
Среднее	7,46

Выводы

Разнотолщинность, достигаемая при формировании полиимидного покрытия, не хуже 10%, что подтверждает возможность формирования межслойного диэлектрика многослойной СВЧ-платы на основе полиимида при расположении границ платы не менее чем в 10 мм от края пластины. Диэлектрическая постоянная и тангенс угла диэлектрических потерь полиимидного покрытия для частоты 10 ГГц при толщине слоя от 40 мкм до 160 мкм имеют значение 3,6–3,9 и $(2-4) \cdot 10^{-4}$ соответственно. Одновременное использование материалов нитрида алюминия и полиимида в структуре многослойной СВЧ-платы с количеством полиимидных слоев ≥ 1 при толщине от 40 до 100 мкм представляется возможным, т.к. скорости травления отличаются более чем в 37 раз при оптимальном режиме травления полиимида. Среднее арифметическое значение величины адгезионной прочности металлизации к полиимидному покрытию на пластине из нитрида алюминия составляет 2,17 кг/мм² при толщине покрытия 45 мкм, при этом отрыв происходит по границе «полиимидное покрытие–металлизация». В результате проведения стабилизирующей термообработки обеспечивается получение стабильных

Таблица 6. Обобщенные физико-технологические ограничения для конструирования многослойной коммутационной СВЧ-платы на основе полиимида

№	Физико-технологическое ограничение	Значение
1	Разнотолщинность покрытия полиимида толщиной более 40 мкм на пластине $\varnothing 76$ мм	Не хуже 10%
2	Диэлектрическая постоянная полиимидного покрытия для частоты 10 ГГц при толщине слоя от 40 мкм до 160 мкм	3,6–3,9
3	Тангенс угла диэлектрических потерь полиимидного покрытия для частоты 10 ГГц при толщине слоя от 40 мкм до 160 мкм	$(2-4) \cdot 10^{-4}$
4	Разность скоростей травления полиимида и нитрида алюминия	> 37
5	Среднее арифметическое значение величины адгезионной прочности металлизации к полиимидному покрытию на пластине из нитрида алюминия при толщине покрытия 45 мкм	2,17 кг/мм ²
6	Результат проведения стабилизирующей термообработки многослойной платы на основе полиимида при частоте 10 ГГц	Стабильные СВЧ-характеристики; температурная независимость СВЧ-характеристик
7	Среднее значение усилия отрыва золотой проволоки диаметром 25 мкм	7 г

СВЧ-характеристик в многослойной плате на основе полиимида при частоте 10 ГГц и достигается температурная независимость СВЧ-характеристик многослойной СВЧ-платы с многоуровневой коммутацией на основе полиимида. При оптимальном режиме микросварки среднее значение усилия отрыва золотой проволоки диаметром 25 мкм составляет более 7 г. Обеспечение оптимального режима создания микросварного соединения состоит в нагреве пластины до 150 °С, мощности ультразвука 80 мА, длительности микросварки 400 мс при силе прижатия капилляра 15 г.

Таким образом, полученные данные позволяют обоснованно подходить к моделированию и конструированию коммутационных СВЧ-плат на основе полиимида.

Список литературы

1. *Жарикова И. В., Невлюдова В. В.* Системологический подход при исследовании параметров РЭС // *Технология приборостроения*, 2014, № 2. С. 40–43.
2. *Спирин В. Г.* Многоуровневые платы с толстопленочной полимерной изоляцией // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2012. С. 3–7.
3. *Волосов А. В., Бавижев М. Д., Котляров Е. Ю., Панащенко П. В.* Приемопередающий модуль X-диапазона на кремниевой коммутационной плате // *Наноиндустрия*, 2018, № 82. С. 441–442.
4. *Тишин А. С., Котляров Е. Ю.* Малогабаритный приемопередающий submodule X-диапазона // http://conf59.mipt.ru/static/reports_pdf/2976.pdf (Дата обращения 10.10.2019).
5. *Пурьжинский С. З.* Разработка и создание действующих образцов цифровых и СВЧ-модулей с помощью 3DMS-технологии // *Электронные компоненты*, 2018, № 3. С. 80–83.
6. *Богданов Ю., Кочемасов В., Хасьянова Е.* Неорганические пластины. Характеристики, критерии выбора // *Электроника: наука, технология, бизнес*, 2014, № 2. С. 204–216.
7. ТУ БПКЖ.90.01.000. Пластины монокристаллического кремния.
8. Лак электроизоляционный АД-9103 ИС: ТУ 6-19-247-84 с изм. 1–4.
9. *Жуков А. А., Калашников А. Ю.* Способ получения диэлектрического слоя на основе полимерного покрытия в изделиях микроэлектроники: Патент 2692373 РФ / Патентообладатель — Акционерное общество «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем» (АО «Российские космические системы»), № 2018128409/05; заявл. 03.08.2018; опубл. 24.06.2019. Бюл. № 18. 15 с.
10. ТУ 5961-122-07621739-2014. Пластины алюминитридные.
11. ГОСТ 8.623-2006. Государственная система обеспечения единства измерений. Относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков. Методики измерений в диапазоне сверхвысоких частот: национальный стандарт: дата введения 2008-06-01. Москва: Стандартинформ, 2016. 35 с.
12. *Кручинин Д. Ю., Фарафонтова Е. П.* Фотолитографические технологии в производстве оптических деталей: Учеб. пособ. // Екатеринбург: Изд-во Урал-ун-та, 2014. 51 с.
13. *Ghosh M.* Polyimides: Fundamentals and Applications // CRC Press, 1996. 912 p.
14. *Жуков А. А., Калашников А. Ю., Поймалин В. Э.* Характеристики многослойной коммутационной СВЧ-платы микромодуля космического назначения // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2019, т. 6, № 4. С. 89–96.