

Характеристики многослойной коммутиционной СВЧ-платы микромодуля космического назначения

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

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

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

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

В. Э. Поймалин, *аспирант, contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Экспериментально исследованы потери (S_{2,1}) СВЧ-платы с многоуровневой коммутацией на основе двух типов органического диэлектрика (далее СВЧ-плата) в зависимости от температуры и продолжительности термической обработки. В качестве органического диэлектрика рассматриваются фоточувствительный негативный полимер Epoclad и нефоточувствительный полипиромеллитимид. Показано, что стабилизация параметров потерь СВЧ-платы достигается с помощью термообработки, проводимой перед монтажом кристаллов, при температуре, определенной для каждого типа рассмотренного органического диэлектрика. Обнаружено, что наиболее стабильные характеристики после температурного воздействия от -196 до $+200$ °C показывает СВЧ-коммутиционная плата на частоте 10 ГГц на основе полипиромеллитимида, изменение СВЧ-параметра (S_{2,1}) в которой составили не более $-0,26$ дБ, что означает возможность эксплуатации приборов на ее основе после воздействия температур широкого диапазона.

Ключевые слова: СВЧ-плата, полипиромеллитимид, epoclad, СВЧ-характеристики, температурное воздействие

Characteristics of a Multilayer Switching Microwave Board for a Space Purpose Micromodule

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

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

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

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

V. E. Poimalin, *postgraduate student, contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper presents an experimental study of the losses (S_{2,1}) of a microwave board with multilevel switching based on two types of organic dielectric depending on the temperature and duration of heat treatment. The photosensitive negative polymer Epoclad and the non-photosensitive polypyromellitimide are considered as an organic dielectric. It is shown that stabilization of the parameters of losses of the microwave board is achieved by heat treatment carried out before the chips mounting at the temperature determined for each type of the considered organic dielectric. It was found that the most stable characteristics after temperature exposure from -196 to $+200$ °C are shown by a microwave switching board at the frequency of 10 GHz based on polypyromellitimide, the change in the microwave parameter (S_{2,1}) in which was no more than -0.26 dB, which means that it is possible to operate the devices based on it after exposure to a wide range of temperatures.

Keywords: microwave board, polypyromellitimide, epoclad, microwave parameters, temperature exposure

Введение

Интерес к многослойным коммутационным СВЧ-платам вновь возник несколько лет тому назад в связи с развитием техники связи на частотах от 1 ГГц и выше. Реализация микросборок и гибридных интегральных схем в виде многослойной конструкции с бескорпусными СВЧ-кристаллами позволяет увеличить степень интеграции при сохранении или уменьшении массогабаритных характеристик по сравнению с аналогами. В многослойных конструкциях используют диэлектрические слои низко- или высокотемпературной керамики или органического диэлектрика. При этом важным показателем остается стабильность характеристик многослойных коммутационных плат. В особенности стабильность важна для изделий космического назначения, где компоненты микроэлектроники могут испытывать воздействие температур в широком диапазоне от криогенных до сотен градусов Цельсия.

К сожалению, результатов систематических исследований по стабилизации структуры многослойных коммутационных СВЧ-плат на основе органического диэлектрика, функционирующих на частоте 10 ГГц, не обнаружено, в связи с чем определение характеристик и метода стабилизации параметров коммутационной СВЧ-платы представляется актуальной задачей.

Цель работы — исследование способа стабилизации параметров структуры СВЧ-платы с многоуровневой коммутацией на основе органического диэлектрика с помощью термической обработки, проводимой перед монтажом кристаллов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить состав и структуру тестовых образцов;
- определить температурно-временную зависимость термообработки тестовых образцов;
- выявить зависимость изменения СВЧ-параметров от температурного воздействия на тестовые образцы.

Особенности функционирования бортовых СВЧ-устройств предъявляют с ростом частоты обрабатываемого сигнала все более жесткие требования к применяемым схемотехническим и конструк-

торско-технологическим решениям [1]. Согласно требованиям комплексной микроминиатюризации изделий, основными путями совершенствования микросборок (МСБ) и СВЧ-гибридных интегральных схем (ГИС) являются улучшение электрических характеристик; снижение массы и габаритов; улучшение тепловых режимов работы; повышение надежности; повышение технологичности; снижение стоимости [2]. Известен ряд методов обеспечения стабильности микроэлектронных конструкций. Тонкопленочные ГИС и МСБ имеют сложную слоистую структуру проводников, обеспечивая более высокую плотность монтажа в сравнении с толстопленочными и, следовательно, позволяют получить микросхемы с лучшими электрическими, массогабаритными и другими характеристиками [3]. Использование кремния в качестве основы коммутационной платы в малогабаритных модулях [4] обеспечивает ряд преимуществ по сравнению с традиционными материалами:

- топологические нормы современной кремниевой технологии намного превосходят возможности технологии керамических многослойных плат;
- применение тонкопленочных конденсаторов, интегрированных в коммутационную плату, повышает надежность СВЧ-узла;
- теплопроводность кремния намного превосходит теплопроводность стеклополимеров и ЛТСС, сравнима с теплопроводностью псевдосплавов, применяемых для согласования термического расширения кристаллов СВЧ интегральных схем и меди [4]. Перспективным материалом подложек мощных ГИС является нитрид алюминия. Нитрид алюминия характеризуется хорошей теплопроводностью, высоким удельным электрическим сопротивлением и сравнительно невысоким значением диэлектрической проницаемости [5]. В работах [6–9] показаны подходы к обеспечению надежности и стабильности изделий электронной техники. Для обеспечения долговременной стабильности параметров в работе [6] рассмотрены варианты:
 - искусственной стабилизации элементов до их установки в проектируемое изделие. Отмечается, что ответственным этапом искусственной стабилизации является правильный выбор физико-химической модели механизма изменения параметров;

– использования защитных покрытий [7]. Известно, что повышение температуры и напряженности электрического поля ускоряет процесс старения ИС. Роль механизмов отказов в этом процессе различна, многие из них связаны с физико-химическими реакциями, поэтому использование защитных покрытий является одним из вариантов повышения надежности при эксплуатации и стабильности характеристик электронной техники. В работе [8] показано, что материалы на основе кремний-органических полимеров широко используются для защиты. Композиции [9] рекомендуют для защиты ГИС СВЧ и иных изделий электронной техники.

– учет потерь тепла, термостабилизации и исключение перегрева микросхемной конструкции представляется одним из приемов повышения стабильности и надежности СВЧ узлов [7];

– использование толстопленочной полимерной изоляции в многоуровневой плате, как показано в работе [10], исключает ее пробой и снижает паразитную емкость между проводниками разных уровней, что повышает быстродействие электронных устройств.

Таким образом, анализ специальной литературы показывает, что результатов систематических исследований характеристик и приемов стабилизации структуры многослойных коммутационных СВЧ-плат, функционирующих на частоте 10 ГГц на основе органического диэлектрика, не обнаружено, а представленное исследование призвано восполнить данный пробел.

Объекты исследования

Объектами исследования служили тестовые образцы, представляющие собой многослойные СВЧ-платы с многоуровневой коммутацией системы металлизации Cr–Cu–Ni или Cr–Cu–Ni–Au_{гальв.} на основе органического диэлектрика, где органический диэлектрик представлен фоточувствительным негативным полимером (далее — фотополимер) [11] или нефоточувствительным полипиромеллитимидом [12]. СВЧ-плата с многоуровневой коммутацией на основе органического диэлектрика состоит из N чередующихся слоев металлизации и органического диэлектрика. Проводящие

слои выполнены из систем металлизации Cr–Cu–Cr, Cr–Cu–Ni или Cr–Cu–Ni–Au_{гальв.} толщиной от 3 до 10 мкм, на которых сформирован функциональный топологический рисунок структуры дорожек и которые соединены между собой металлизированными переходными отверстиями. Диэлектрические слои включают в себя металлизированные отверстия и состоят из органического диэлектрика толщиной от 40 до 100 мкм. Топология платы служит для подведения информационных и управляющих сигналов к СВЧ-кристаллам, установленным на нее, и отведения обработанной информации от кристаллов дальше по функциональному тракту. В связи с тем, что свойства СВЧ-сигналов сильно зависят от структуры проводящей области, имеет место изменение характеристик сигнала, связанное с температурно-временным воздействием на структуру «металл–диэлектрик». Тестовые образцы выполнены на подложке из нитрида алюминия или кремния, толщина которой составляет от 0,3 до 0,5 мм [13, 14] (рис. 1).

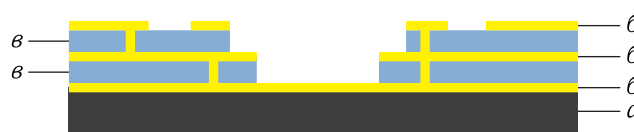


Рис. 1. Схематичное изображение поперечного сечения конструкции многослойной СВЧ-платы с многоуровневой коммутацией на основе органического диэлектрика, где a — подложка; b — проводящие слои; v — органический диэлектрик

Технологический процесс изготовления образцов схематично представлен на рис. 2. Последним слоем формируют металлический слой с топологическим рисунком, на который производят монтаж кристаллов.

Формирование функциональных проводящих структур начинали с нанесения слоя металлизации с помощью метода магнетронного распыления тонких пленок после обработки поверхности подложки химическими и плазмохимическими методами. Процесс нанесения тонкопленочной проводящей структуры Cr–Cu–Ni производили за один цикл. Слой Cr в данной системе имеет назначенное адгезионное подслоя в проводящей системе Cr–Cu–Ni. Толщина слоя Cu для проводящих слоев платы составляет от 3 мкм до 5 мкм. Защитный

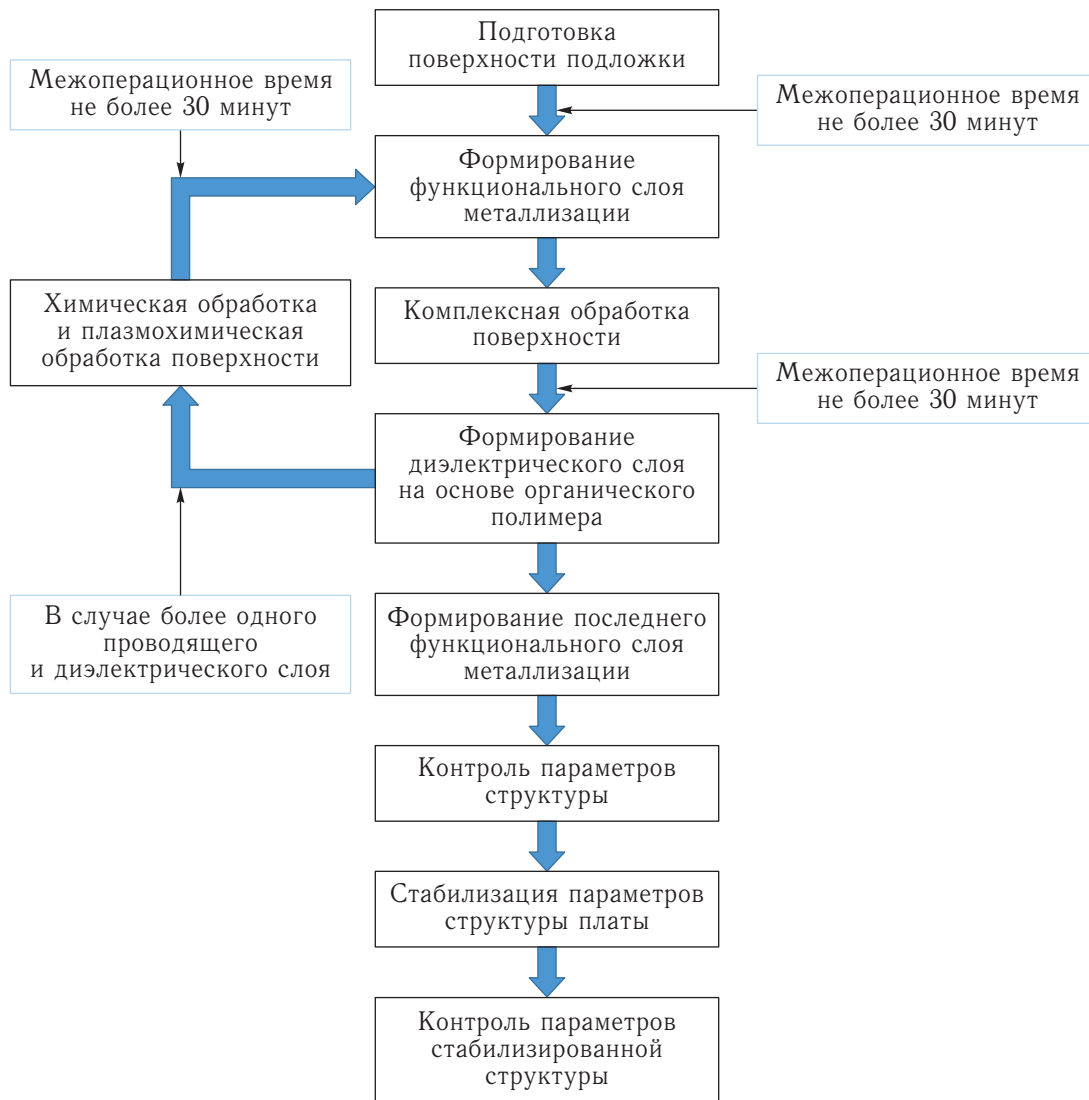


Рис. 2. Технологический маршрут изготовления тестового образца

слой Ni в данной проводящей системе имеет толщину 0,3 мкм. Далее гальваническим способом осаждали слой золота толщиной от 0,5 до 1 мкм для системы $\text{Cr-Cu-Ni-Au}_{\text{гальв}}$. Получаемая топология сформирована с помощью фотолитографических процессов, жидкостного химического травления. Диэлектрические слои (толщина одного слоя составляет приблизительно 50 мкм) реализованы формированием толстого полимерного покрытия из раствора [15]. Фоточувствительность полимера позволяет формировать топологию диэлектрического слоя экспонированием с зазором через фототаплон с последующим проявлением и термо-

обработкой. Рисунок слоя диэлектрика на основе полипиромеллитимида формируют травлением в щелочном травителе через предварительно сформированную медную маску. Подготовка поверхности перед нанесением полимерного покрытия представляет собой последовательность из операций химической обработки в органическом растворителе, плазмохимической в кислородной плазме и термической обработок. После получения многослойной структуры производили измерения СВЧ-параметров функциональных элементов. Стабилизация параметров полученной СВЧ-платы с многоуровневой коммутацией на основе фотополимера осуществлялась

методом термической обработки в термощкафу при температуре ниже температуры деструкции органического диэлектрика на 10%. При этом нагрев осуществляли при скорости не более 1 °С/мин и последующей выдержке в течение 12–15 ч. Охлаждение производили до комнатной температуры в объеме термощкафа. Стабилизация параметров полученной СВЧ-платы с многоуровневой коммутацией на основе полипиромеллитимида представляет собой термическую обработку со ступенчатым нагревом со скоростью не более 1 °С/мин в течение 9–11 ч и последующей выдержкой в течение не менее 1,5 ч при температуре на 20% ниже температуры имидизации, с дальнейшим охлаждением до комнатной температуры в объеме термощкафа. На рис. 3 изображена температурно-временная зависимость стабилизирующей термообработки СВЧ-платы с многоуровневой коммутацией на основе фотополимера и полипиромеллитимида. Участки АВ, АС, CD, EF характеризуют зоны нагрева, скорость которого не превышает 1 °С/мин; участки BC, DE, FG — зоны выдержки при соот-

ветствующих температурах; а участки GH, КН — охлаждение до исходной температуры. Участок JK показывает выдержку при температуре на 10% ниже температуры его деструкции.

Методы исследования

Измерения величины прохождения сигнала в СВЧ-линии проводились с помощью векторного анализатора цепей. Для определения динамики изменения S-параметров СВЧ-линий от времени термической обработки, термообработка проводилась циклами с выдержкой по 1 ч. В процессе измерения с векторного анализатора подавали сигнал на частоте 10 ГГц на тестовые СВЧ-линии разного вида (микроросконовые, симметричные, копланарные) и измеряли S-параметры. Были измерены S-параметры СВЧ-линий плат обоих вариантов исполнения после воздействия повышенной и пониженной температур (после погружения плат в жидкий азот). Для получения динамики изменения

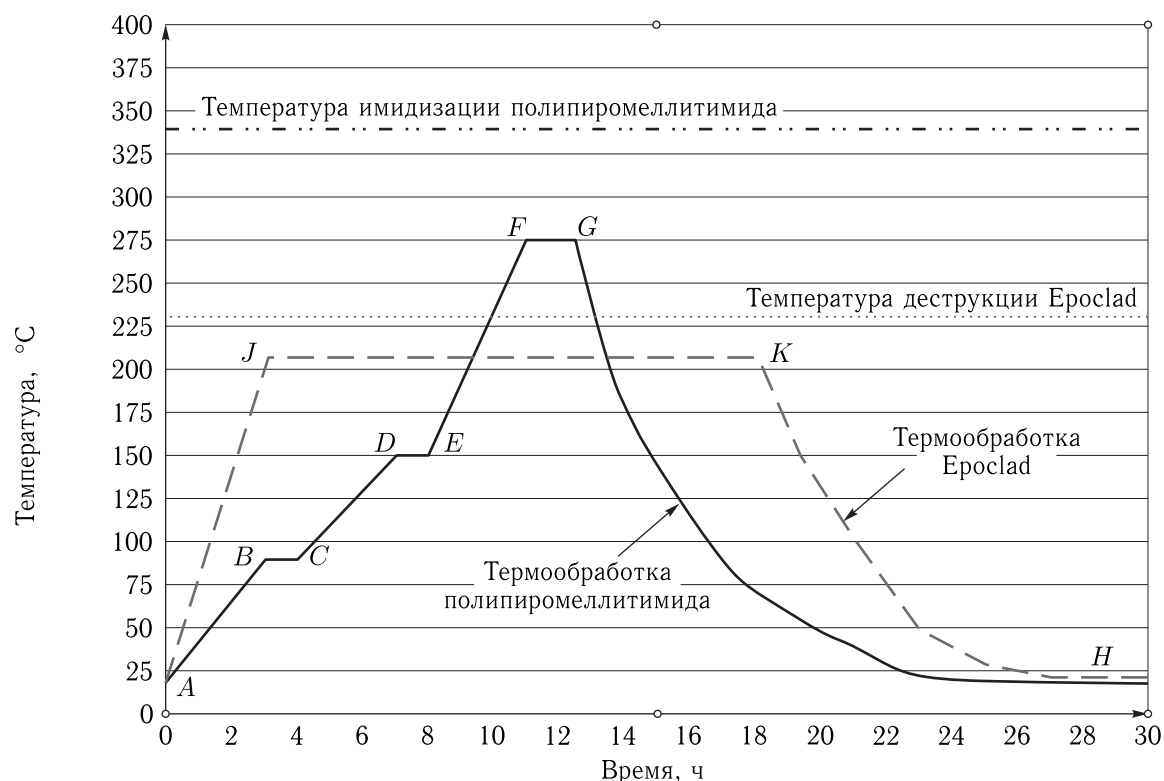


Рис. 3. Температурно-временные зависимости термообработок СВЧ-плат с многоуровневой коммутацией на основе Epoclad и полипиромеллитимида

СВЧ-параметров функциональных элементов от времени термической обработки многослойную структуру на основе полипиромеллитимида подвергали термообработке циклами с выдержкой по 1 ч при температуре 200 °С и проводили измерения характеристик после каждого цикла. Качество фотолитографии и металлизации оценивали с методом оптической микроскопии.

Результаты и обсуждение

На рис. 4 показаны результаты измерений СВЧ-параметров платы с многоуровневой коммутацией на основе фотополимера после многократной термообработки, где $S(2,1)$ — величина прохождения сигнала в СВЧ-линии, номер измерения — порядковый номер процесса термообработки, где 1 — измерение до термообработки.

На рис. 4 видно, что при первых циклах обработки величина $S(2,1)$ резко ухудшается, но после (в среднем после восьми циклов) возвращается в исходное состояние. Следует отметить, что характер изменений СВЧ-параметров примерно одинаковый независимо от вида тестовых СВЧ-линий.



Рис. 4. Результаты измерений СВЧ-параметров платы с многоуровневой коммутацией на основе фотополимера с системой металлизации Cr–Cu–Ni после многократной термообработки

Из рис. 5 и 6 видно, что после температурного воздействия величина $S(2,1)$ стабильна. Для СВЧ ГИС с многоуровневой коммутацией на основе полипиромеллитимида независимо от материала металлизации температурная зависимость СВЧ-характеристик от времени и количества цик-

лов нагревания и/или охлаждения отсутствует, что свидетельствует о стабильности и температурной независимости свойств многослойной структуры на основе полипиромеллитимида в результате термообработки.



Рис. 5. Результаты измерений СВЧ-параметров многослойной структуры на основе полипиромеллитимида с системой металлизации Cr–Cu–Ni

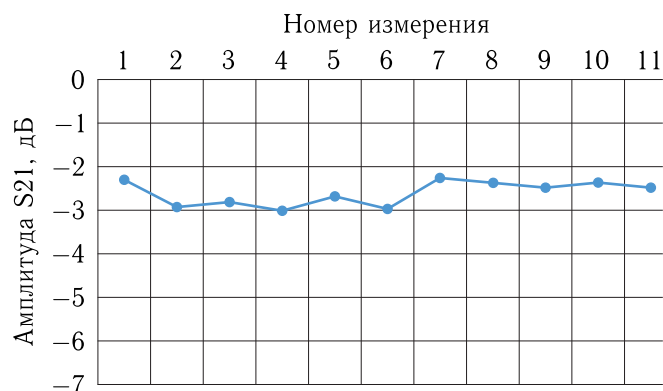


Рис. 6. Результаты измерений СВЧ-параметров многослойной структуры на основе полипиромеллитимида с системой металлизации Cr–Cu–Ni–Au

В результате температурного воздействия при -196 °С на СВЧ-платы с многоуровневой коммутацией на основе полипиромеллитимида с системой металлизации Cr–Cu–Ni изменение значения $S(2,1)$ составило $-0,26$ дБ, что является величиной, входящей в допуск измерительной системы.

В результате температурного воздействия при -196 °С на СВЧ-платы с многоуровневой коммутацией на основе фотополимера с системой метал-



Рис. 7. Изображение локального отслоения, наблюдаемого в результате температурного воздействия при $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ на СВЧ-платы с многоуровневой коммутацией на основе фотополимера с системой металлизации Cr-Cu-Ni , где 1 — место локального отслоения металлизации СВЧ-линии, 2 — сохранившийся участок металлизации СВЧ-линии, 3 — фотополимер

зации Cr-Cu-Ni изменение значения $S(2,1)$ составило $-1,84\text{ дБ}$, наблюдались локальные отслоения металлизации полимера (рис. 7).

Выводы

Изменение СВЧ-характеристик функциональных элементов в процессе термообработки, вероятно, обусловлено протеканием физико-химических процессов не только в металлизации СВЧ-платы с многоуровневой коммутацией на основе органического диэлектрика, но и на границе раздела металлизации с слоем органического диэлектрика, а также и в самом слое полимера.

Таким образом, в результате проведения стабилизирующей термообработки обеспечивается получение стабильных СВЧ-характеристик в многослойной плате на органическом диэлектрике. Термообработку проводят при следующих режимах: для СВЧ-платы с многоуровневой коммутацией на основе фотополимера при температуре на 10 % ниже температуры деструкции органического диэлектрика со скоростью нагрева не более $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ и времени выдержки 12–15 ч и для СВЧ-платы с многоуровневой коммутацией на основе полипиромеллитимида при обработке со ступенчатым нагревом со скоростью не более $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ в течение 9–11 ч и выдержкой в течение не менее 1,5 ч при температуре на 20 % ниже температуры имидизации с дальнейшим остыванием до комнатной температуры. При этом для СВЧ-платы с многоуровневой коммутацией на основе полипиромеллитимида при мень-

шей технологичности нефоточувствительного материала в процессе формирования структуры многоуровневой коммутационной платы по сравнению с фотополимером наблюдается стабильность адгезионных характеристик при воздействии экстремально низких температур ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$), а также неизменное значение параметра $S(2,1)$ СВЧ-линии.

Список литературы

1. *Климачев И. И., Иовдальский В. А.* СВЧ ГИС. Основы технологии и конструирования. М.: Техносфера, 2006. 352 с.
2. *Бондаренко О. Е., Федотов Л. М.* Конструктивно-технологические основы проектирования микросборок. М.: Радио и связь, 1988. 156 с.
3. *Ермолаев Ю. П.* Конструкции и технология микросхем / Ю. П. Ермолаев, М. Ф. Пономарев, Ю. Г. Крюков. М.: Сов. радио. 1980. 254 с.
4. *Тишин А. С., Котляров Е. Ю.* Малогабаритный приемопередающий submodule X-диапазона. http://conf59.mipt.ru/static/reports_pdf/2976.pdf (Дата обращения 24.09.2019).
5. *Часнык В. И.* Применение высокотеплопроводной керамики из нитрида алюминия в вакуумных электронных приборах СВЧ // Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2013, № 4. С. 8–12.
6. *Ранченко Г. С.* Повышение параметрической надежности элементной базы бортовой радиоэлектронной аппаратуры методом искусственной стабилизации / Г. С. Ранченко, Е. В. Бондаренко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, 2003, № 6. С. 139–142. http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2003_6_35 (Дата обращения 24.09.2019).
7. *Строгонов А. В.* Оценка долговечности БИС по результатам ускоренных испытаний // Технологии в электронной промышленности, 2007, № 3. С. 90–96.
8. *Коблова Л. Б.* Полиорганосилоксановые покрытия с повышенной твердостью и эластичностью, предназначенные для защиты изделий электронной техники // *Фундаментальные исследования*, 2017, № 12-2. С. 297–302.
9. *Бирюлин Г. В., Егоров В. И., Попов Ю. Ю., Савицкая Л. А.* Тепловой режим микросборок // Исследования и разработки в области физики и приборостроения: Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, 2006, № 31. С. 115–117.

10. *Спирин В. Г.* Многоуровневые платы с толсто пленочной полимерной изоляцией // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2012, № 5. С. 3–7.
11. EpoCore & EpoClad — Negative Tone Photoresist Series. <https://www.microresist.de/en/products/negative-photoresists/uv-lithography-broadband-and-i-line-exposure/epocore-epoclad-serien> (Дата обращения 24.09.2019).
12. *Жуков А. А.* Физико-химические и технологические основы получения полиимидных структур для микроэлектронных устройств, устройств микромеханики и микросенсорики. Дисс...д. т. н. М., 2014. 315 с. <http://www.dissercat.com/content/fiziko-khimicheskie-i-tekhnologicheskie-osnovy-polucheniya-poliimidnykh-struktur-dlya-mikroelektronnykh-ustroystv-dlya-mikromekhaniki-i-mikrosensorniki>
13. ТУ БПКЖ.90.01.000. Пластины монокристаллического кремния.
14. ТУ 5961-122-07621739-2014. Пластины алюмонитридные.
15. *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.