

УДК 621.3.049.7 DOI 10.30894/issn2409-0239.2021.8.2.82.87

Устройство экранирования элементов СВЧ-модуля многослойной платы для приемо-передающего модуля АФАР космического назначения

В. Э. Поймалин, *poimalin.ve@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. В. Буянкин, *buyankin.av@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. А. Нелин, *к. воен. н., innovation@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Л. Е. Рагулина, *к. ф.-м. н., ragulina.le@mipt.ru*

ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)», Москва, Российская Федерация

М. В. Рыжаков, *tryzhakov@apptech.mipt.ru*

ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Представлен способ экранирования элементов СВЧ-модуля, основанного на принципах формирования клетки Фарадея, с разномоментными и разночастотными трактами приемо-передающего модуля АФАР, исключающий их взаимное электромагнитное влияние. Дано описание структуры многослойной платы и различных конструктивных элементов, позволяющих ограничить (экранировать) сигнал в небольшом объеме, соизмеримом с размером монолитной интегральной схемы или набором монолитных интегральных схем, изолируя паразитные электромагнитные наводки. Рассмотрен полиимид как диэлектрический материал многослойной СВЧ-платы для использования в устройствах космической техники, а также перспективные конструктивные решения для уменьшения массы и габаритов модуля.

Ключевые слова: клетка Фарадея, экранирование, электромагнитная совместимость, ЭМС, многослойные СВЧ-платы

Shielding Device for Microwave Electronic Components of a Multilayer Board for the AFAR Transceiver Module for Space Purposes

V. E. Poymalin, *poimalin.ve@spacecorp.ru*

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

A. V. Buyankin, *buyankin.av@spacecorp.ru*

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

A. A. Nelin, *Cand. Sci. (Military)*, *innovation@spacecorp.ru*

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

L. E. Ragulina, *Cand. Sci. (Phys.-Math.)*, *ragulina.le@mipt.ru*

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)", Moscow, Russian Federation

M. V. Ryzhakov, *mryzhakov@applmech.mipt.ru*

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)", Moscow, Russian Federation

Abstract. A method of shielding the elements of a microwave module based on the principles of forming a Faraday cage, with different power and different frequency paths of the AFAR receiving-transmitting module, excluding their mutual electromagnetic influence, is presented. A description of the structure of a multilayer board and various structural elements is given, allowing to limit (screen) the signal in a small volume, commensurate with the size of a monolithic integrated circuit or a set of monolithic integrated circuits, isolating parasitic electromagnetic interference. Polyimide is considered as a dielectric material of a multilayer microwave board for use in space technology devices, as well as promising design solutions for reducing the mass and dimensions of the module.

Keywords: Faraday cage, shielding, electromagnetic compatibility, EMC, multilayer microwave boards

Введение

Современное развитие электроники стремительно движется в сторону уменьшения размеров и увеличения интеграции разрабатываемых устройств. Развивается направление монолитных интегральных схем (МИС) и систем на кристалле (СнК), но существенным ограничивающим фактором применения данных элементов является малая выходная мощность. В связи с этим актуально создание модульных сборок, в которых МИС являются узлами и комбинацией этих узлов достигается повышение мощности конечного устройства. Наиболее применимые на сегодняшний день технологии — LTCC- и HTCC-технологии и различные варианты 3D-СВЧ-сборок с помощью многослойных органико-неорганических технологий, что дополнительно освещено в [1–3]. Но в связи с высокой функциональностью каждой МИС их общее взаимодействие требует отдельной тщательной проработки вопросов электромагнитной совместимости (ЭМС), а в связи с общими вопросами миниатюризации желательными вариантами создания многослойных модулей являются либо максимально миниатюрный блок, либо малоразмерный модуль, содержащий в себе тракты разных частот. Особенно ярко выражены данные требования в космической отрасли, где наиболее интересны для разработки СВЧ приемно-передающие модули, которые в связи с разбиением рабочих частот в рамках даже одного диапазона должны принимать и передавать сигналы на физически разнесенных частотах, что приводит снова к вопросам ЭМС [4–10].

Во всех указанных источниках изложена теория электромагнитного экранирования в широком диапазоне частот. Дана единая методика и инженерные формулы расчета экранов как электрического, так и магнитного полей для разных видов экранов. Исследованы основные закономерности и характеристики многослойных комбинированных экранов и рекомендованы оптимальные конструкции [4]. Даны более специфические уточнения физических принципов, которые в итоге позволяют исследовать экранирующее действие сплошных экранов различной формы и различного материала, влияние на экранирующий эффект стыков, щелей и отверстий в экране, рассматриваются многослой-

ные и стальные экраны [5]. Анализируются электронные, атомные, молекулярные процессы и взаимосвязь между ними в поверхностных фазах. Обсуждаются явления в областях пространственного заряда, природа поверхностных электронных состояний, размерные эффекты [6, 8]. Изучаются вопросы возбуждения радиоволн различными источниками в свободном пространстве, при наличии и отсутствии тел, в волноводах, резонаторах и других направляющих системах [5]. Излагаются вопросы распространения радиоволн различных диапазонов в естественных средах, а также методы исследования этих сред [7, 9]. Изложены основные понятия, расчетные методы и принципы конструктивной реализации современных устройств СВЧ для возможностей их моделирования в современных САПР [10].

В результате работ, выполненных по проекту №074-11-2018-014 от 31.05.2018 по соглашению между АО «Российские космические системы» и Минобрнауки России с кооперацией с МФТИ (постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. №218), был проработан вариант экранирования узлов СВЧ-модулей на многослойных платах для улучшения характеристик ЭМС.

Способ экранирования в многослойной плате

Описываемый вариант экранирования направлен на защиту СВЧ-модулей от внешнего и внутреннего паразитного электромагнитного излучения (ЭМИ) и может быть использован для экранирования узлов СВЧ-модуля от любого ЭМИ. Как наиболее удачный вариант защиты от ЭМИ рассматривалось экранирование с помощью клетки Фарадея [11], принцип работы которой можно описать следующим образом: при попадании замкнутой электропроводящей оболочки в электрическое поле свободные электроны оболочки начинают двигаться под воздействием этого поля. В результате противоположные стороны клетки приобретают заряды, поле которых компенсирует внешнее поле. Причем в области высоких частот действие этого способа основано на отражении электромагнитных

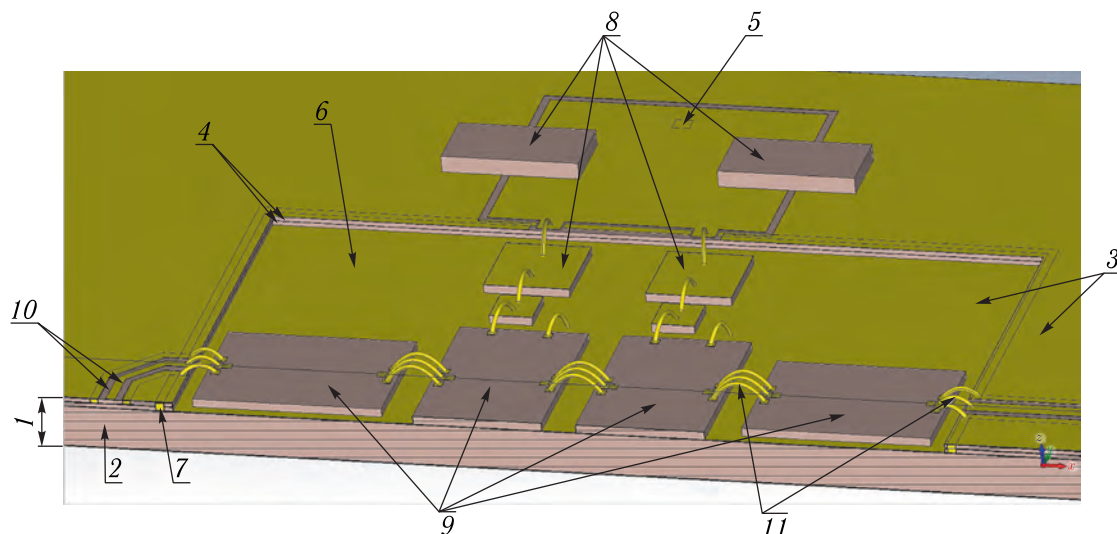


Рис. 1. Общий вид многослойной СВЧ-платы: 1 — многослойная плата; 2 — керамическая подложка; 3 — проводящие металлические слои; 4 — диэлектрические слои; 5 — переходные отверстия; 6 — колодец; 7 — вертикальная металлизированная стенка — барьерный экран; 8 — пассивные элементы, не требующие экранирования (резисторы, конденсаторы, индуктивности); 9 — активные (кристаллы) и пассивные элементы, нуждающиеся в экранировании; 10 — зазор для копланарной линии; 11 — разварка СВЧ-элементов

волн от поверхности экрана и затухании высоко-частотной энергии в его толще вследствие тепловых потерь на вихревые токи. Но в области высоких частот есть серьезное ограничение, связанное с соотношением расстояний между металлизациями и длиной волны сигнала. Следовательно, для одного частотного диапазона и даже для соседних есть возможность унифицировать конструкцию клетки, но чем выше частота, тем меньший диапазон частот будет являться экранируемым.

Для устранения ограничения клетки Фарадея был разработан вариант экранирования, представленный на рис. 1. Устройство экранирования электронных узлов выполнено по технологии многослойных плат, описанной в [1, 11–14, 16, 17], и представляет собой многослойную плату с установленными на нее активными (кристаллы) и пассивными (конденсаторы, индуктивности, резисторы) элементами.

Многослойная плата 1 состоит из керамической подложки 2 толщиной 0,5 мм, служащей теплоотводом, и N последовательно нанесенных проводящих металлических 3 и $(N - 1)$ диэлектрических 4 слоев из полиимида. Полиимид (полипиломеллитимид) входит в список разрешенных материалов для использования в космической технике и обладает малым тангенсом диэлектрических

потерь, что позволяет использовать его в СВЧ-технике на частотах до 40 ГГц.

При этом полиимид чрезвычайно нагревостойкий в условиях длительной эксплуатации и хорошо противостоит деформирующим нагрузкам при высокой температуре, он не плавится и не становится пластичным вплоть до температуры пиролиза [18]. Исходя из этого он может быть использован в высоко-мощных устройствах, в том числе и с малыми областями разогрева, формируемыми мощными МИС. Проводящие металлические слои 3 нанесены на подложку 2 и на каждый диэлектрический слой 4, на которых в дальнейшем формируется топология, отвечающая схемотехническому рисунку, и полигоны металла–земли, причем земляные полигоны заполняют почти все оставшееся пространство на поверхности диэлектрического слоя 4 (рис. 2).

Межслойные электрические соединения выполнены с помощью переходных отверстий 5 в диэлектрике, причем соединения могут проводиться с любого слоя на любой. При этом в плате сформированы колодцы 6, на дно которых установлены активные и пассивные элементы 9, требующие экранирования. По периметру колодца 6 выполнена замкнутая полая область в виде канавок в диэлектрических слоях 4, заполненных металлом

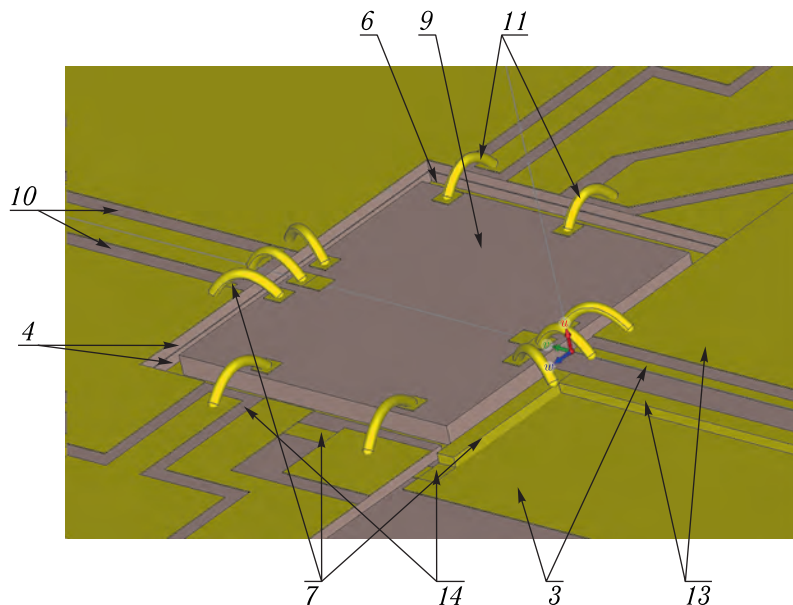


Рис. 2. (См. также рис. 1 и подпись к нему.) Общий вид колодца *б* сверху с установленными в него элементами *9*; *13* — экранирующий переход — рукав; *14* — окна

и заземленных, образуя сплошную металлическую стенку *7*, которая является барьерным экраном (см. рис. 1 и 2) для элементов *9*, установленных в колодец *б*. Таким образом, барьерный экран *7* защищает электронные узлы *9*, находящиеся в колодце *б*, от любого ЭМИ, распространяющегося вне колодца. При этом барьерный экран *7* дополнительно защищает элементы схемы *8*, находящиеся вне колодца, и элементы *9*, находящиеся в соседних колодцах, от паразитного излучения, формируемого мощными элементами в колодце *б*.

Для подачи питания и управляющих сигналов к кристаллу и вывода обработанной информации в барьерном экране *7* выполнены неметаллизированные области — окна *14*. Окна *14* используются для проведения всех низкочастотных дорожек сквозь барьерный экран *7*. При этом количество и размер окон *14* должны быть минимально возможными для используемого конструктивного исполнения.

В вертикальной металлизированной стенке *7* для высокочастотных дорожек в *i*-м проводящем слое выполнены экранирующие переходы — рукава *13* (см. рис. 2), которые представляют собой земляные полигоны, находящиеся в проводящих слоях под $(i + 1)$ дорожкой и над $(i - 1)$ дорожкой и соединенные по всей длине высокочастотной дорожки барьерными экранами, расположенными на рас-

стоянии, равном зазору *10* копланарной линии передач от высокочастотной дорожки (см. рис. 2). При этом рукав *13* и стенка *7* выполнены из одного металла или сплава металлов для обеспечения наилучших СВЧ-характеристик высокочастотной дорожки, проведенной внутри рукава *13*. На многослойную плату установлены активные и пассивные элементы тракта, причем элементы, требующие экранирования *9*, установлены в колодцы *б*, а элементы, не требующие экранирования *8*, установлены на верхнем проводящем слое. После установки проводится разварка кристаллов на проводящий рисунок на всех проводящих слоях.

Таким образом формируется экранирование по всей протяженности тракта, что позволяет создать частотно независимые каналы в одном модуле, незначительно увеличивая его габариты и массу.

Заключение

С помощью описанного метода экранирования можно создавать электронные СВЧ-модули на основе многослойных плат с минимальными размерами и максимально возможной интеграцией и обеспечить возможность проектировать разночастотные каналы в одном модуле без лишних потерь

и просачивания сигналов помех между рядом расположенными трактами или отдельными узлами.

Материал статьи разработан на основе выполненной в рамках комплексного проекта работы АО «Российские космические системы» по Соглашению с Минобрнауки России от 31.05.2018 № 074-11-2018-014, заключенного на основании постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных учреждений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, в рамках подпрограммы “Институциональное развитие научно-исследовательского сектора” государственной программы Российской Федерации “Развитие науки и технологий на 2013–2020 годы”».

Список литературы

1. *Lin B.-Q., Lin T.-C., Chang Y.-W.* Redistribution layer routing for integrated fan-out wafer-level chip-scale packages // Proc. of ICCAD. November 2016. P. 1–8.
2. *Tseng C.-F., Lui C.-S., Wu C.-H., Yu D.* InFO (wafer level integrated fan-out) technology // Proc. of ECTC. May 2016. P. 1–6.
3. Handbook of advanced dielectric, piezoelectric and ferroelectric materials / Ed. by Ye. Zuo-Guang. Cambridge (England): Woodhead Publishing Limited, 2008. 1096 p.
4. *Гроднев В.В.* Электромагнитное экранирование в широком диапазоне частот. М.: Связь, 1972. 674 с.
5. *Каден Г.* Электромагнитные экраны в высокочастотной технике и технике электросвязи. Пер. с немецкого. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1957. 327 с.
6. *Киселев В.Ф., Козлов С.Н., Зотеев А.В.* Основы физики поверхности твердого тела. М.: МГУ, 1999. 284 с.
7. *Марков Г.Т., Петров Б.М., Грудинская Г.П.* Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Сов. радио, 1979.
8. *Ржевкин К.С.* Физические принципы действия полупроводниковых приборов. М.: Изд-во МГУ, 1986. 256 с.
9. *Сазонов Д.М.* Антенны и устройства СВЧ. М.: Высшая школа, 1988.
10. *Шапиро Д.Н.* Электромагнитное экранирование. Долгопрудный: Интеллект, 2010. 120 с.
11. *Chapman S.J., Hewett D.P. and Trefethen L.N.* // Mathematics of the Faraday Cage, SIAM Review. 2015. Vol. 57, No 3. P. 398–417.
12. *Жуков А.А., Калашников А.Ю., Поймалин В.Э.* Характеристики многослойной коммутационной СВЧ-платы микро модуля космического назначения // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2019. Т. 6, вып. 4. С. 89–96.
13. *Жуков А.А., Калашников А.Ю., Соловьев М.К.* Физико-технологические ограничения при проектировании многослойной коммутационной СВЧ-платы // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2020. Т. 7, вып. 2. С. 70–77.
14. *Калашников А.Ю., Жуков А.А.* Особенности планирования композиционной структуры многослойной СВЧ-платы // Наноиндустрия. 2020. Т. 13. С. 415–416.
15. Пат. RU2692373, Российская Федерация, МПК B05D1/36, H01L21/108. Способ получения диэлектрического слоя на основе полимерного покрытия в изделиях микроэлектроники / А.Ю. Калашников, А.А. Жуков; заявитель и патентообладатель АО «Российские космические системы». № 20181284; заявл. 03.08.2018; опубл. 24.06.2019, бюлл. № 18.
16. Пат. RU2713572, Российская Федерация, МПК H01L 21/77. Способ изготовления СВЧ-гибридной интегральной микросхемы космического назначения с многоуровневой коммутацией / В.Э. Поймалин, А.Ю. Калашников, А.А. Жуков; заявитель и патентообладатель АО «Российские космические системы». № 2019124359; заявл. 01.08.2019; опубл. 05.02.2020, бюлл. № 4.
17. Пат. RU2713572, Российская Федерация, МПК H05K 3/46, H05K 3/42, H01L 21/00, H01L 23/00. Многослойная коммутационная плата СВЧ-гибридной интегральной микросхемы космического назначения и способ ее получения (варианты) / В.Э. Поймалин, А.А. Жуков, А.Ю. Калашников; заявитель и патентообладатель АО «Российские космические системы». № 2019138189; заявл. 26.11.2019; опубл. 28.02.2020, бюлл. № 7.
18. *Майофис И.М.* Химия диэлектриков: Учеб. пособ. М.: Высшая школа, 1970. 332 с.