

## МИКРОЭЛЕКТРОННЫЙ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ МОДУЛЬ НА МНОГОСЛОЙНОЙ ПЛАТЕ

© 2022 г. А. В. Буянкин<sup>а</sup>, А. А. Жуков<sup>а, б, \*</sup>, А. Ю. Калашников<sup>а</sup>, В. Э. Поймалин<sup>а</sup>

<sup>а</sup> АО «Российские космические системы»,

ул. Авиамоторная, 53, Москва, 111250 Российская Федерация

<sup>б</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Волоколамское шоссе, 4, Москва, 125993 Российская Федерация

\*E-mail: zhukov.aa@spacecorp.ru

Поступила в редакцию 02.12.2021 г.

После доработки 08.02.2022 г.

Принята к публикации 25.02.2022 г.

Проведено моделирование и предложена микроэлектронная технология устройств сверхвысоких частот (СВЧ) на основе многослойных коммутационных плат с защитой от электромагнитного излучения. Изготовлены и испытаны платы, макет модуля малошумящего усилителя (МШУ) С-диапазона (3.4...8 ГГц) и исследованы его характеристики (коэффициент усиления 50 дБ, коэффициент шума 1.4 дБ). Продемонстрировано, что предложенная технология позволяет создавать малогабаритные устройства с частотой до 40 ГГц высокого качества для систем связи и информационно-телекоммуникационных систем, космического и наземного назначения.

DOI: 10.31857/S0033849422090042

### ВВЕДЕНИЕ

Постоянное увеличение средств информационного обмена все сильнее нагружает существующие системы передачи и приема информации. В условиях Земли возможно использование почти неограниченного количества ретрансляторов и изменение системы работы с сигналами, но в условиях космического пространства необходима система, позволяющая обеспечить непрерывную передачу информации с длительным сроком активного существования. Система должна соответствовать условиям мощности, выделяемой на каждый узел, массогабаритным характеристикам и надежности, предъявляемым к каждому узлу, что особенно важно при создании малоразмерных спутников [1]. При учете указанных условий, создание устройств космического назначения определяет цель поиска и улучшения технологий производства каждого отдельного узла спутникового оборудования.

Целью работы является расчетно-экспериментальная оценка возможности создания микромодуля СВЧ-малошумящего усилителя (МШУ) с уменьшенными массогабаритными характеристиками на основе многослойных СВЧ-плат на полиимиде, выполненных по микроэлектронной технологии.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- исходя из особенностей технологии разработать функциональную схему МШУ и конструкцию микромодуля;
- разработать 3D-модель платы микромодуля для анализа СВЧ-характеристик;
- с учетом данных, полученных при моделировании, отработать технологию формирования многослойных коммутационных плат на полиимиде;
- реализовать макет микромодуля и оценить его характеристики.

### 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В работе представлен вариант развития технологии создания коммутационных многослойных СВЧ-плат на полиимиде для космического применения [2–5] на примере создания МШУ радиолокационного С-диапазона. Представленный вариант отличается использованием процессов микроэлектроники при послойном формировании структуры платы, что характеризуется повышенной точностью формирования и технологичностью (возможностью оперативного изменения топологии, что принципиально при отработке и макетировании конструкции) по сравнению с известной технологией создания коммутационных многослойных СВЧ-плат (что важно для изделий высоких частот), с помощью низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (Low Temperature Co-Fired Ceramic, LTCC). Как известно, технологический

**Таблица 1.** Параметры аналогов малошумящего усилителя

Номер аналога	Производитель	$F$ , ГГц	Усиление, дБ	$K_{ш}$ , дБ	ТШ, К	Размер, мм
1	Southwest Antennas, Inc.	4...8.5	20	1.8	150	73 × 25 × 19
2	Linwave Technology Ltd.	2...12	25	4	443	30 × 20 × 10
3	АО “Микроволновые системы”	2...18	34	4	443	44 × 22 × 44
4	АО “НПФ “Микран”	0.0001...6	30	4	443	75 × 50 × 50
5	АО “НПФ “Микран”	2...6	27	3	292	75 × 50 × 50

Примечание:  $K_{ш}$  – коэффициент шума, ТШ – тепловой шум.

процесс LTCC основан на нанесении токопроводящих паст методом трафаретной печати на керамические листы с последующим спеканием, что определяет конструктивно-технологические ограничения и топологические нормы [6, 7]. Несмотря на существующие достоинства, характерные для массового производства, технология LTCC имеет ряд недостатков и проблемных моментов, указанных в работах [7–9]. Кроме того, предложенная технология характеризуется использованием доступных материалов и процессов российского производства.

Анализ специальной литературы [10] показывает, что МШУ монтируют максимально близко к антенне, это позволяет минимизировать шумы, но увеличивает размеры. В космической технике чаще используют МШУ с SMA-входом (Sub-miniature version A – соединитель для подключения коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 50 Ом) (табл. 1), которые устанавливают в единый корпус с приемными трактами бортового оборудования для защиты МШУ от негативных факторов космического пространства и уменьшения потерь при передаче сигнала между МШУ и остальной частью приемного тракта.

## 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе были исследованы следующие объекты:

- 3D-модель многослойной коммутационной СВЧ-платы;
- технология формирования многослойной коммутационной СВЧ-платы на основе полиимида;
- многослойная коммутационная СВЧ-плата на основе полиимида;
- макет микромодуля МШУ на основе многослойной коммутационной СВЧ-платы.

В 3D-модели многослойной коммутационной СВЧ-платы было рассмотрено влияние топологии в разных слоях, различных частей тракта друг на друга. Проведено моделирование передачи сигнала по элементам топологии при введении различных особенностей формирования слоев материала

[11, 14], а также исследовано влияние введения и исключения дополнительных конструктивных элементов [13, 15]. Кроме того, моделировалось влияние изменения общих потерь и частотных свойства полиимида в связи с допуском на СВЧ-параметры материала.

Для реализации технологии изготовления многослойной коммутационной СВЧ-платы на основе слоев из полиимида использовали пластину диаметром 76 мм, выполненную из нитрида алюминия [5] с классом шероховатости поверхности не хуже 12. Три слоя металлизации в структуре платы были выполнены на основе систем металлизации Cr–Cu–Ni и Cr–Cu–Ni–Au толщиной 3...5 мкм, слой хрома, меди и никеля были получены вакуумным магнетронным распылением, а слой золота – гальваническим осаждением. Топологический рисунок слоя металла выполнен жидкостным химическим травлением через фоторезистивную маску, полученную спреевым методом и экспонированием с последующим проявлением. Два слоя полиимида, сформированного из раствора полиамидокислоты в диметилформамиде [12], толщиной  $50 \pm 2.5$  мкм выполняли комбинированным методом [11]. Вертикальную структуру соединений элементов в плате и элементы экранирования [13] осуществляли в слое полиимида металлизированными отверстиями, формируемыми жидкостным химическим травлением через металлическую маску, выполненную вакуумным магнетронным распылением и фотолитографическими процессами. Для стабилизации характеристик коммутационной платы после формирования многослойной структуры на основе слоев из полиимида производилась ступенчатая термообработка [14].

Для оценки характеристик была изготовлена многослойная коммутационная СВЧ-плата на основе полиимида, особенностью технологии изготовления которой является использование материалов и процессов российского производства.

Геометрические размеры макета микромодуля МШУ составляют  $34 \times 34 \times 15$  мм. Для холодного резервирования спроектирован двухканальный вариант для применения в составе блока аппаратуры с общей герметизацией. При этом габариты

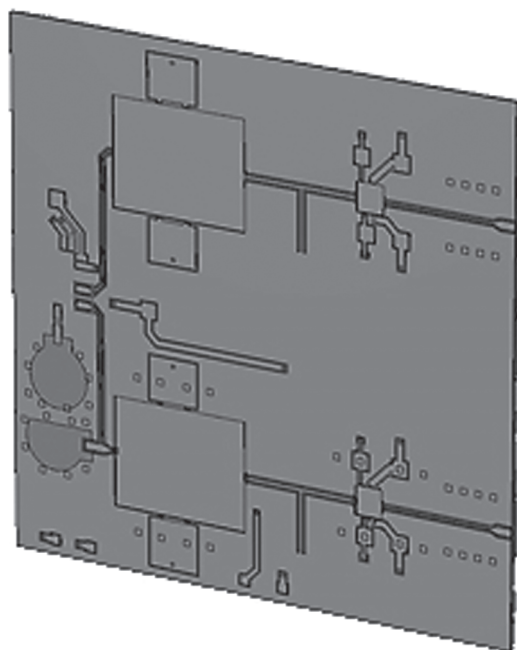


Рис. 1. 3D-модель многослойной коммутационной СВЧ-платы микромодуля МШУ.

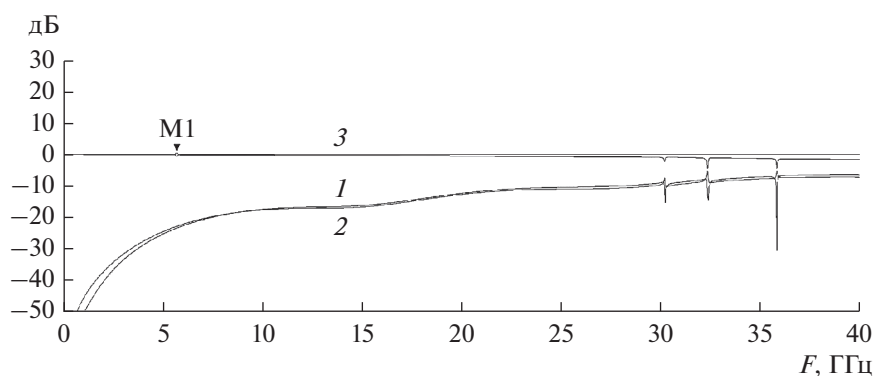


Рис. 2. Характеристики прохождения сигнала, полученные в 3D-модели коммутационной платы: коэффициенты отражения по входу  $S_{11}$  (1) и выходу  $S_{22}$  (2), коэффициент прохождения сигнала  $S_{21}$  (3); для точки M1  $F = 5.7$  ГГц  $S_{21} = -0.15309$  дБ.

данного устройства меньше, чем габариты аналогов, представленных в табл. 1.

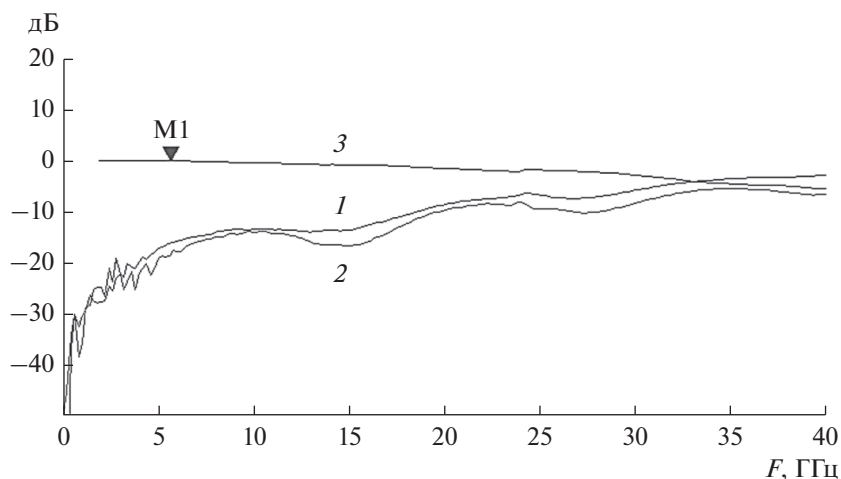
В данной работе были использованы следующие методы.

Визуальный осмотр тестовых образцов на наличие дефектов на поверхности, внешних признаков загрязнения, инородных включений, признаков отслоения проводящего рисунка проводили с помощью оптической микроскопии при увеличении до  $500\times$ .

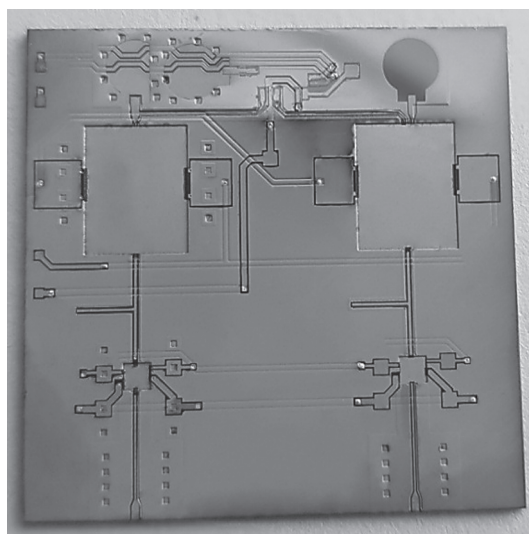
Измерения величины прохождения сигнала и  $S$ -параметры в СВЧ-линии проводили с помощью векторного анализатора цепей.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлена 3D-модель многослойной коммутационной платы, а на рис. 2 результаты моделирования — характеристики прохождения сигнала в коммутационной плате. Видно, что потери при прохождении сигнала на частоте 5.7 ГГц незначительны и составляют 0.15 дБ (кривая 3). При этом коэффициенты отражения по входу и выходу ( $S_{11}$  и  $S_{22}$  соответственно) находятся на уровне  $-20$  дБ, до 30 ГГц не превышают  $-10$  дБ, а до 40 ГГц  $-5$  дБ, следовательно, не создают условий для возбуждения устройства. Полученные данные позволяют предположить, что при ограничениях [3] в рамках данной технологии на полиимиде воз-



**Рис. 3.** Измеренные характеристики прохождения сигнала в изготовленной коммутационной плате: коэффициенты отражения по входу  $S_{11}$  (1) и выходу  $S_{22}$  (2), коэффициент прохождения сигнала  $S_{21}$  (3); Для точки M1  $F = 5.7$  ГГц;  $S_{21} = -0.0336$  дБ.



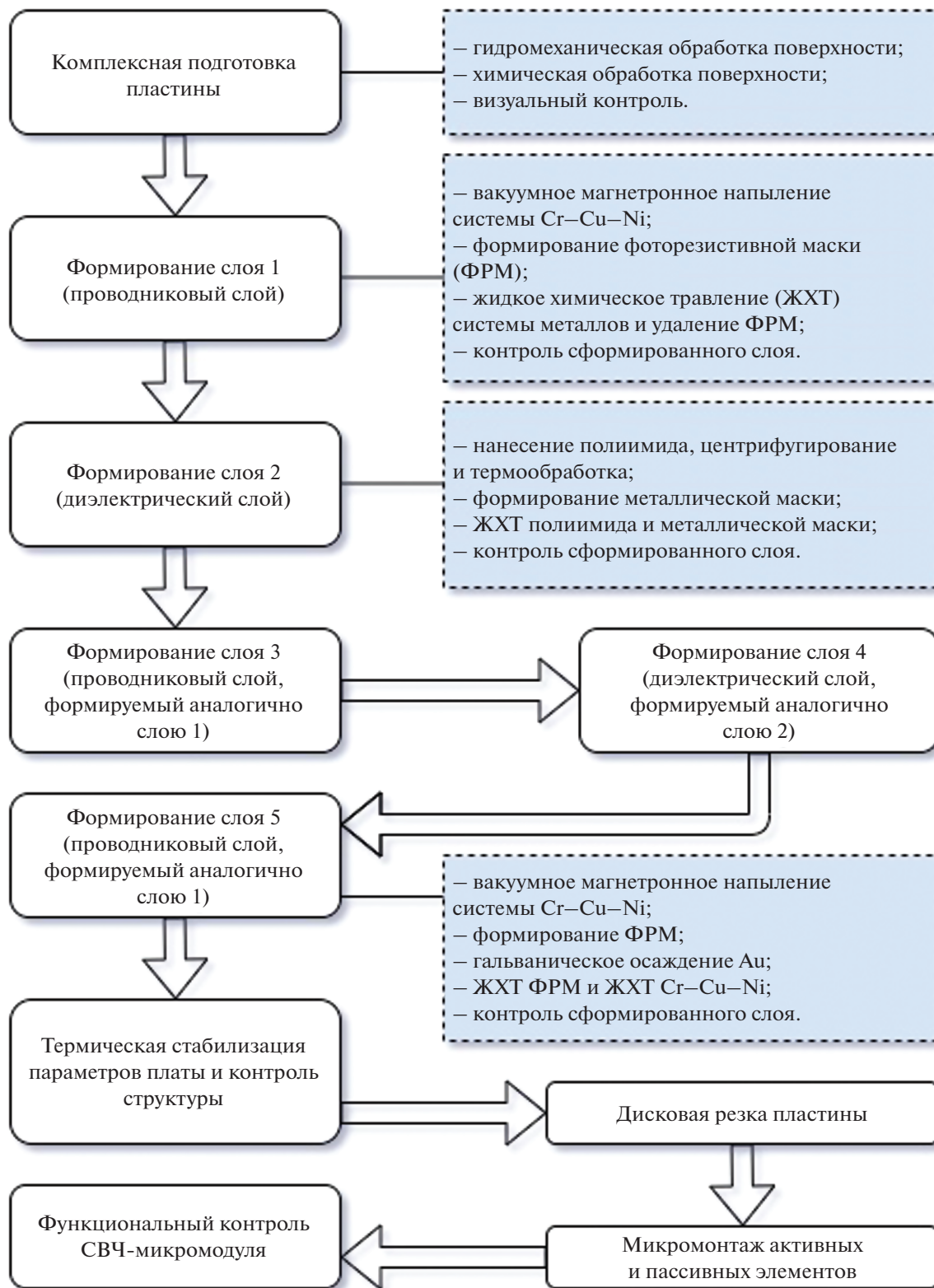
**Рис. 4.** Внешний вид изготовленной многослойной коммутационной СВЧ-платы микромодуля МШУ.

можно создание СВЧ-устройств с рабочими частотами до 40 ГГц.

Сравнение характеристик, полученных при моделировании (см. рис. 2) и при измерении (рис. 3) изготовленной многослойной коммутационной СВЧ-платы микромодуля МШУ (рис. 4), показывают хорошее совпадение особенно до 28 ГГц. Как видно из рис. 2 и 3 потери в изготовленном образце еще ниже на данной частоте ( $-0.15$  дБ в модели,  $-0.03$  дБ в образце), но при этом коэффициенты отражения изменились не критично (приблизительно  $-20$  дБ в модели и приблизительно  $-15$  дБ в образце), следовательно, в изготовленном образце по сравнению с моделью сигнал при

прохождении тракта будет претерпевать меньше искажений, что важно для МШУ.

Схема технологического процесса формирования многослойной платы представлена на рис. 5. Для повышения адгезионной прочности микромонтажных соединений в многослойной структуре по представленному маршруту предусмотрена возможность реализации металлизации анкерного типа [4, 15], место расположения которого на плате представлено на рис. 6а. На рис. 6б схематично показано поперечное сечение металлизации анкерного типа. Для показанного конструктивного элемента в слое диэлектрика (1) процессами вакуумного магнетронного напыления и фотолито-



**Рис. 5.** Технологический маршрут изготовления макета микромодуля МШУ на основе многослойной коммутационной СВЧ-платы.

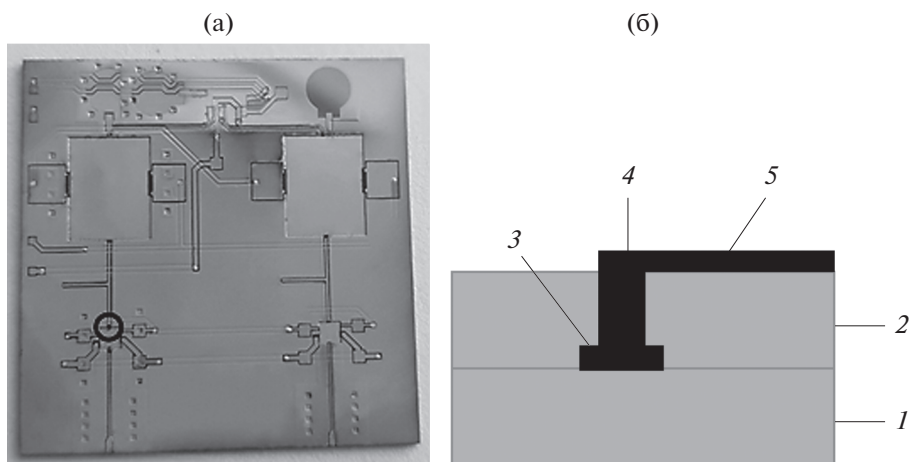


Рис. 6. Место расположения металлизации анкерного типа на плате (а) и ее схематичное изображение (б): 1 – первый слой диэлектрика; 2 – второй слой диэлектрика; 3 – расширение-манжета металлизации анкерного типа; 4, 5 – металлизация.

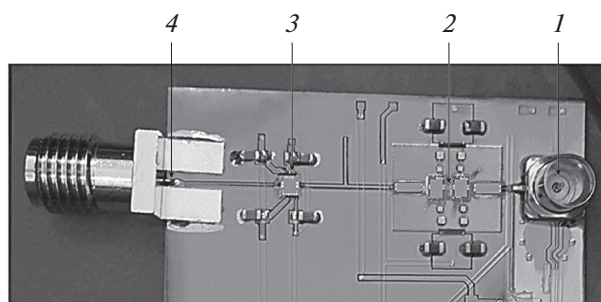


Рис. 7. Макет микромодуля МШУ, выполненный на основе изготовленной коммутационной платы: 1 – вход тракта; 2 – монолитная интегральная схема МШУ; 3 – монолитная интегральная схема буферного усилителя; 4 – выход тракта.

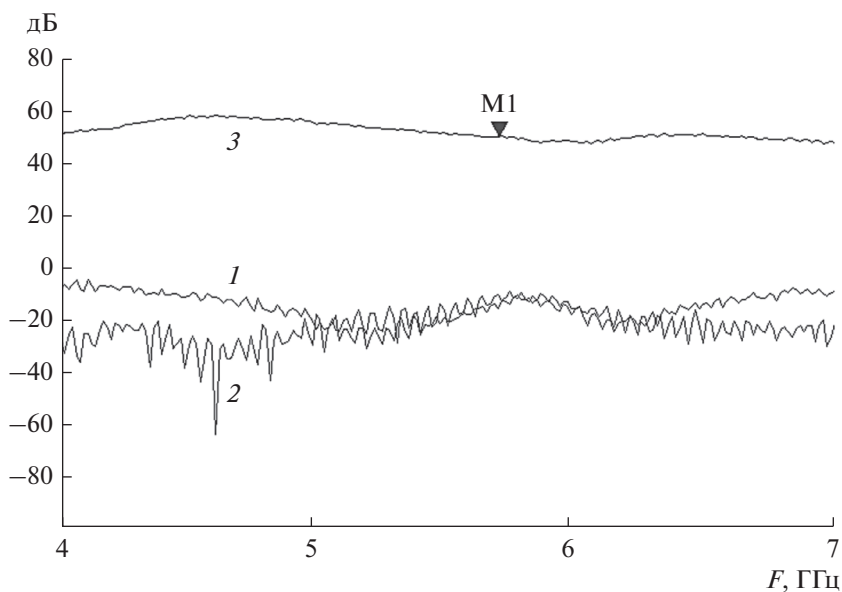


Рис. 8. Измеренный уровень проходящего сигнала в макете микромодуля МШУ на основе изготовленной многослойной коммутационной СВЧ-платы: коэффициенты отражения по входу  $S_{11}$  (1) и выходу  $S_{22}$  (2), коэффициент прохождения сигнала  $S_{21}$  (3), для точки M1  $F = 5.7$  ГГц;  $S_{21} = 51.233$  дБ.



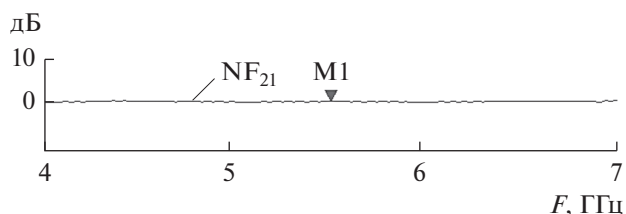


Рис. 9. Коэффициент шума  $NF_{21}$  в макете микромодуля МШУ; для точки M1  $F = 5.7$  ГГц;  $S_{21} = 1.4029$  дБ.

графии формируют расширение-манжету (3), затем – второй слой диэлектрика (2) с переходным отверстием, заполняемым металлизацией (4, 5), получаемой процессами вакуумным магнетронным напылением, электрохимическим осаждением и фотолитографией.

Для микромодуля МШУ (рис. 7), выполненного на основе многослойной коммутационной СВЧ-платы микромодуля МШУ (см. рис. 2) после измерений были получены характеристики прохождения сигнала (рис. 8, 9). Как видим из рис. 8 и 9, в рабочей полосе МШУ усиление составляет приблизительно. Сравнительный анализ (см. табл. 1) показал, что у ближайшего аналога № 3 по параметру усиления коэффициент усиления в 1.5 раза меньше, а коэффициент шума в 2.9 раз выше, а у аналога № 1 по параметру шума коэффициент усиления в 2.5 раза меньше, причем коэффициент шума в 1.3 раза выше.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведены исследования разработанных и изготовленных 3D-моделей, макета многослойной коммутационной СВЧ-платы на основе полиимида и технологии ее формирования. Проведена расчетно-экспериментальная оценка возможности создания СВЧ-микромодулей малощумящего усилителя С-диапазона на основе многослойных коммутационных СВЧ-плат на полиимиде, выполненных по микроэлектронной технологии. Изготовлен и исследован макет микромодуля МШУ с уменьшенными массогабаритными характеристиками. Параметры усиления и коэффициента шума представленного макета микромодуля МШУ превосходят в 1.5 и 1.3 раза параметры ближайших известных аналогов. Показано, что выбранные материалы и разработанные конструктивно-технологические решения позволяют разрабатывать и изготавливать СВЧ-устройства в частотном диапазоне до 40 ГГц. Разработанные и изготовленные по предложенной технологии СВЧ-микромодули найдут применение при создании бортовой аппаратуры космической техники, 5G-модемов, в том числе интегрированных в виде модулей в современные радиоэлектронные устройства (телефоны, навигационные модули, планшеты,

ноутбуки и др.), миниатюрных устройств, обеспечивающих работоспособность систем типа “умный дом”, “умный город”, “умный транспорт” и др.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верник П.А. // Тр. 1-й Междунар. конф. “Проектирование будущего. Проблемы цифровой реальности”. Москва. 8–9 февр. 2018. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2018. С. 38.
2. Жуков А.А., Калашиников А.Ю., Поймалин В.Э. // Ракетно-космич. приборостроение и информ. системы. 2019. Т. 6. № 4. С. 89.
3. Жуков А.А., Калашиников А.Ю., Соловьев М.К. // Ракетно-космич. приборостроение и информ. системы. 2020. Т. 7. № 2. С. 70.
4. Калашиников А.Ю., Жуков А.А. // Наноиндустрия. 2020. Т. 13. № S4. С. 415.
5. Пурьжинский С.З., Пибалк Д.В., Калашиников А.Ю. // В мире научных открытий. 2015. № 8. С. 216.
6. Иовдальский В.А., Ляпин Л.В. Многослойные керамические платы ГИС СВЧ-диапазона на основе LTCC. М.: КУРС, 2021.
7. Каргин Н.И., Волосов А.В., Миннебаев С.В., Блинов П.И. // Электрон. техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. № 3. 2014. С. 10.
8. Лютов А.В. // Труды конф. “Радиолокация и связь – перспективные технологии”. Москва, 3 мая 2015. С. 60.
9. Чигиринский С. // Компоненты и технологии. 2009. № 11. С. 130.
10. Карпов Ю. // Компоненты и технологии. 2007. № 1. С. 86.
11. Жуков А.А., Калашиников А.Ю. Способ получения диэлектрического слоя на основе полимерного покрытия в изделиях микроэлектроники // Патент РФ № 2692373. Оpubл. офиц. бюл. “Изобретения и полезные модели”. № 18 от 27.06.2019 г.
12. Бессонов М.И., Котон М.М., Кудрявцев В.В., Лайус Л.А. Полиимиды – класс термостойких полимеров. Л.: Наука, 1983.
13. Поймалин В.Э., Буйанкин А.В. Устройство экранирования электронных узлов многослойной СВЧ-платы от электромагнитного излучения // Патент РФ № 2713650. Оpubл. офиц. бюл. “Изобретения и полезные модели”. № 4 от 10.02.2020 г.
14. Поймалин В.Э., Жуков А.А., Калашиников А.Ю. Способ изготовления СВЧ-гибридной интегральной микросхемы космического назначения с многослойной коммутацией // Патент РФ № 2713572. Оpubл. офиц. бюл. “Изобретения и полезные модели”. № 4 от 10.02.2020 г.
15. Поймалин В.Э., Жуков А.А., Калашиников А.Ю. Многослойная коммутационная плата СВЧ-гибридной интегральной микросхемы космического назначения и способ ее получения (варианты) // Патент РФ № 2715412. Оpubл. офиц. бюл. “Изобретения и полезные модели”. № 7 от 10.03.2020 г.