

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 4
Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 4

ORIGINAL ARTICLE

Электродинамика, микроволновая техника, антенны
Electrodynamics, Microwave Engineering, Antennas

УДК 621.372.833

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-4-31-44>

Широкополосный волноводно-микроразрывной переход для частотного диапазона 60 ГГц

А. В. Можаровский¹✉, А. А. Артеменко¹,
Р. О. Масленников¹, И. Б. Вендик²

¹ООО "Радио Гигабит"

ул. Ошарская, д. 95, корп. 2, Нижний Новгород, 603105, Россия

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)
ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

✉ andrey.mozharovskiy@radiogigabit.com

Аннотация

Введение. Частотный диапазон вблизи 60 ГГц – один из наиболее перспективных для создания высокоскоростных систем связи нового поколения за счет использования широкой полосы частот передаваемых сигналов, существенно превышающей доступные значения до 6 ГГц в традиционных частотных диапазонах. Активное развитие систем связи диапазона около 60 ГГц подкрепляется расширением многообразия соответствующих полупроводниковых компонентов и планарных устройств, реализуемых на СВЧ печатных платах и имеющих интерфейс на основе микроразрывных линий передачи. Для измерения и отладки полупроводниковых компонентов и планарных устройств возникает необходимость их соединения с волноводным интерфейсом измерительного оборудования, что может быть выполнено с помощью волноводно-микроразрывного перехода.

Цель работы. Разработка и исследование планарного широкополосного волноводно-микроразрывного перехода для частотного диапазона около 60 ГГц, обеспечивающего малый уровень вносимых потерь.

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели проанализировано влияние неоднородностей в структуре перехода на его характеристики, а также исследованы методы устранения таких неоднородностей. Анализ влияния неоднородностей и расчет характеристик разработанного перехода выполнены с помощью электродинамического моделирования и подтверждены результатами экспериментального исследования изготовленных образцов широкополосного волноводно-микроразрывного перехода.

Результаты. Разработанный переход основан на электромагнитном взаимодействии через щелевую апертуру в экране микроразрывной линии и не содержит в своей структуре слепых переходных отверстий, часто применяемых для переходов миллиметрового диапазона частот, но значительно увеличивающих сложность и стоимость изготовления. Переход выполнен с возможностью непосредственного подсоединения к отрезку прямоугольного волновода стандартного сечения WR-15 без дополнительных модификаций в структуре волновода. По результатам моделирования и экспериментального исследования полоса пропускания перехода равна полной полосе пропускания волновода WR-15, а именно 50...75 ГГц по уровню –2 дБ коэффициента прохождения, а потери, вносимые в передаваемый сигнал, не превышают 0.8 дБ на частоте 60 ГГц.

Заключение. Широкая полоса пропускания сигнала, небольшие потери, устойчивость к неточностям изготовления и простота интеграции позволяют использовать волноводно-микроразрывной переход для соединения различных микроразрывных и волноводных устройств миллиметрового диапазона длин волн.

Ключевые слова: миллиметровый диапазон длин волн, волноводно-микроразрывной переход, печатная плата, металлический волновод

Для цитирования: Широкополосный волноводно-микроразрывной переход для частотного диапазона 60 ГГц / А. В. Можаровский, А. А. Артеменко, Р. О. Масленников, И. Б. Вендик // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 4. С. 31–44. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-4-31-44

© Можаровский А. В., Артеменко А. А., Масленников Р. О., Вендик И. Б., 2019



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 27.03.2019; принята к публикации после рецензирования 16.08.2019; опубликована онлайн 27.09.2019

Design of Wideband Waveguide-to-Microstrip Transition for 60 GHz Frequency Band

**Andrei V. Mozharovskiy¹✉, Aleksey A. Artemenko¹,
Roman O. Maslennikov¹, Irina B. Vendik²**

¹LLC "Radio Gigabit"

95, bld. 2, Osharskaya Str., 603105, Nizhny Novgorod, Russia

²Saint Petersburg Electrotechnical University

5, Professor Popov Str., 197376, St Petersburg, Russia

✉ andrey.mozharovskiy@radiogigabit.com

Abstract

Introduction. The frequency band around 60 GHz is one of the most promising to realize new generation communication systems with high data rate due to the utilization of a wide operational frequency band that significantly exceeds traditional frequency bands below 6 GHz. High interest in the development of 60 GHz communication systems is related to the recent evolution of MMIC technology that allows creating effective components for this band and the variety of planar devices. Both are typically realized on printed circuit boards and have interfaces that are based on microstrip lines. The wideband waveguide-to-microstrip transition is required to test various active and passive planar devices with microstrip interfaces in order to provide an effective interconnection between the standard waveguide interface of measurement equipment and planar microstrip structures.

Objective. The paper deals with the design of planar wideband waveguide-to-microstrip transition with low insertion loss level in the 60 GHz frequency band.

Materials and methods. The main objective is achieved by analyzing of discontinuities in waveguide-to-microstrip transition structure and their influence on transition characteristics. The transition characteristics are analyzed using full-wave electromagnetic simulation and confirmed with experimental investigation of designed wideband waveguide-to-microstrip transition samples.

Results. The designed transition is based on an electromagnetic coupling through a slot aperture in a microstrip line ground plane. The transition is performed without using blind vias in its structure that provides low production cost and allows integrating the WR-15 rectangular waveguide in a simple manner without any modifications in the waveguide structure. Results of the electromagnetic simulation are confirmed with experimental investigations of the fabricated waveguide-to-microstrip transition samples. The designed transition provides operation in the nominal bandwidth of the WR-15 waveguide, namely, 50...75 GHz with the insertion loss level of 2 dB and with less than 0.8 dB insertion loss level at the 60 GHz frequency.

Conclusion. The designed waveguide-to-microstrip transition can be considered as an effective solution for interconnection between various waveguide and microstrip millimeter-wave devices due to its wideband performance, low insertion loss level, simple integration and robustness to the manufacturing tolerances structure.

Key words: millimeter wave band; waveguide-to-microstrip transition; printed circuit board; hollow metal waveguide

For citation: Mozharovskiy A. V., Artemenko A. A., Maslennikov R. O., Vendik I. B. Design of Wideband Waveguide-to-Microstrip Transition for 60 GHz Frequency Band. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 4, pp. 31–44. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-4-31-44

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Submitted 27.03.2019; accepted 16.08.2019; published online 27.09.2019

Введение. Активное развитие систем высокоскоростной радиосвязи обусловлено в настоящее время необходимостью беспроводной передачи больших объемов информации, таких как интернет-трафик, мультимедиа и потоковое видео высокого разрешения. Миллиметровый диапазон длин волн (30...300 ГГц) является привлекательным для создания таких систем, поскольку он обеспечивает возможность использования для передачи сигнала широких полос частот вплоть до нескольких гигагерц, что обуславливает значительное увеличение скорости передачи.

Внимание многих разработчиков коммерческих систем связи привлекает диапазон частот около 60 ГГц, в котором уже работают системы Wi-Fi нового поколения [1], радиорелейные линии для сотовых систем связи, сети фиксированного беспроводного доступа, а также будут развернуты мобильные сети следующего 5-го поколения [2]. В этот диапазон входит линия поглощения кислорода, что определяет большие значения затухания электромагнитной энергии при распространении, вплоть до 16 дБ/км [3]. Это существенно ограничивает возможность использования указанного диапазона для передачи данных на большие расстояния. В связи с этим в большинстве стран для данного диапазона упрощена (или отсутствует) процедура лицензирования частот и устройств, а также приняты ослабленные регуляторные ограничения [4–6]. Благодаря этому частотный диапазон вблизи 60 ГГц получил наибольшее развитие для систем связи, предназначенных для работы на короткие расстояния: до 10...20 м внутри помещений и до 300...500 м вне помещений [1, 7].

Большой интерес к разработке систем высокоскоростной радиосвязи частотного диапазона вблизи 60 ГГц подкрепляется также активным развитием и расширением соответствующей полупроводниковой компонентной базы. Различные устройства миллиметрового диапазона частот, в том числе, например, маломощные усилители (МШУ), смесители, фильтры и антенны, выполняются в основном в виде планарных микрополосковых структур с использованием таких технологий, как СВЧ печатные платы, низкотемпературная совместно обжигаемая керамика (Low Temperature Co-Fired Ceramic – LTCC), полупроводниковые технологии.

Измерительное оборудование миллиметрового диапазона длин волн обычно имеет волноводный

интерфейс, что гарантирует малые потери распространения, возможность передачи сигналов большой мощности и простой способ подсоединения исследуемых устройств. Для измерения и отладки планарных устройств необходимо их соединение с волноводным интерфейсом измерительного оборудования. Для передачи сигнала от микрополосковых устройств к волноводному измерительному оборудованию необходимо использование волноводно-микрополоскового перехода.

В настоящей статье представлены разработка и исследование планарного широкополосного волноводно-микрополоскового перехода для частотного диапазона около 60 ГГц с использованием распространенной высокочастотной технологии изготовления печатных плат. К переходу предъявлены требования обеспечения малого уровня вносимых потерь, широкой полосы пропускания сигнала и устойчивости характеристик к неточностям изготовления. Также важно обеспечить возможность непосредственного подключения стандартного волновода WR-15 к разработанному переходу без необходимости модификаций в структуре волновода, что характерно для многих типов аналогичных волноводно-микрополосковых переходов [8–17].

Важной проблемой при разработке волноводно-микрополоскового перехода является обеспечение малого уровня потерь на прохождение, поскольку с повышением рабочей частоты до миллиметрового диапазона существенно возрастают потери в печатных структурах при возникновении неоднородностей. Таким образом, важной научной задачей является анализ влияния неоднородностей в структуре перехода на его характеристики, а также исследование методов устранения таких неоднородностей.

Для решения поставленной задачи была выбрана структура волноводно-микрополоскового перехода, основанная на электромагнитном взаимодействии через щелевую апертуру в экране микрополосковой линии [18–20]. Для концентрации электромагнитной энергии в области перехода используются металлизированные переходные отверстия, соединяющие волновод по всему периметру (кроме небольшого промежутка в месте подведения сигнала микрополосковой линией) с экранирующим проводником, расположенные на внутреннем уровне печатной платы, что позволяет эффективно продлить волновод в теле печатной платы и расположить излучающий элемент

внутри волновода. Важной задачей является исследование влияния величины промежутка в металлизированных сквозных переходных отверстиях, необходимого для подведения сигнала микрополосковой линией. Для устранения эффекта влияния промежутка в переходных отверстиях рассмотрено размещение непосредственно по центру подводящей микрополосковой линии дополнительного переходного отверстия, электрически соединяющего подводящий волновод с экраном микрополосковой линии. Изучено два подхода к реализации такого переходного отверстия: на основе глухого отверстия, соединяющего верхний слой печатной платы и экран микрополосковой линии, а также оригинальный подход на основе сквозного отверстия, существенно упрощающий технологические требования и уменьшающий стоимость изготовления печатной платы.

Постановка задачи. Рассмотрим основные характеристики прямоугольного волновода и микрополосковой линии.

Полые металлические волноводы находят широкое применение в случаях, когда необходимо обеспечить малые потери распространения сигнала или передачу сигналов большой мощности на высоких частотах. Прямоугольные волноводы используются для передачи сигналов с линейной поляризацией, а волноводы с круглым или квадратным сечением – с круговой или двумя ортогональными линейными поляризациями. Из-за ограничений по размеру и массе жесткие волноводы обычно используются на частотах от 1 ГГц до сотен гигагерц [21].

Все волноводы могут быть классифицированы по размеру, полностью определяющему их частотную полосу пропускания. Одна из основных классификаций прямоугольных волноводов дана Международной электротехнической комиссией (International Electrotechnical Commission – IEC) в соответствующем стандарте [22]. Так, например, в соответствии с данной классификацией волновод WR-15, имеющий поперечное сечение 3.75×1.88 мм, предназначен для передачи сигналов с частотой 50...75 ГГц.

Основной модой сигнала, распространяющегося в прямоугольном волноводе, является мода TE_{10} , не имеющая составляющей электрического поля по направлению распространения сигнала.

Наименьшая частота распространения нижней моды TE_{10} в волноводе WR-15 составляет

39.97 ГГц. Наименьшие частоты распространения более высоких мод имеют большие значения, что обеспечивает некоторую полосу частот, в которой распространяется только одна, основная, мода. Для волновода WR-15 ближайшей модой является TE_{20} , которая распространяется на частотах более 80 ГГц. Таким образом, полосу пропускания волновода WR-15 можно строго считать равной 40...80 ГГц. Однако для обеспечения наилучшей передачи сигнала стандартом рекомендуется использовать волновод WR-15 для сигналов с полосой частот 50...75 ГГц.

Микрополосковая линия представляет собой планарную структуру, состоящую из центрального проводника, отделенного от проводящего экрана диэлектрической подложкой. Микрополосковая линия проста в изготовлении с использованием технологии печатных плат, которая имеет низкую стоимость в массовом производстве. К недостаткам по сравнению с прямоугольным волноводом можно отнести ограничения по мощности передаваемого сигнала и большой уровень потерь. Аналитическое исследование микрополосковой линии представлено во многих источниках, например в [20].

Основной распространяющейся модой в микрополосковых линиях передачи является квази-ТЕМ-мода. Отличие от чистой ТЕМ-моды, для которой отсутствуют продольные составляющие электрического и магнитного полей, определяется тем, что данная линия не является симметричной и только часть электрического поля концентрируется в подложке между микрополоском и заземленным экраном, а остальная часть – рядом с микрополоском в воздухе. Это приводит к различиям в структуре полей в воздухе (относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 1$) и в подложке ($\epsilon > 1$) и, как следствие, к появлению продольных составляющих электрического поля, которые становятся более заметными с ростом частоты.

Структуры электрического и магнитного полей прямоугольного волновода и микрополосковой линии имеют значительное сходство, что обеспечивает возможность разработки волноводно-микрополоскового перехода в широкой полосе частот.

В литературе описано многообразие волноводно-микрополосковых переходов: с использованием отрезка проводника, помещенного внутрь волновода [8–11], с использованием согласующего

металлического гребня [12], основанных на электромагнитном взаимодействии через щель в стенке волновода [13, 14]. Однако такие переходы мало приспособлены для работы в миллиметровом диапазоне частот, так как требуют модификаций в структуре волновода, которые должны выполняться с очень высокой точностью, что приводит к значительному увеличению стоимости их изготовления и трудностям монтажа.

Наиболее перспективными в миллиметровом диапазоне частот являются волноводно-микрорископоскоые переходы с электромагнитным (бесконтактным) взаимодействием через щелевую апертуру в проводнике экрана микрорископоскоой линии [18, 19]. Данный тип перехода не требует модификаций в структуре волновода, что обеспечивает простое подключение планарных устройств и устойчивость к неточностям изготовления.

Волноводно-микрорископоскоые переходы с электромагнитным взаимодействием через щелевую апертуру в проводящем экране микрорископоскоой линии, предназначенные для работы на частоте 60 ГГц, часто выполняются на керамической подложке по технологии LTCC, что обусловлено большей точностью изготовления, широкими технологическими возможностями и малым уровнем потерь. Однако использование этой технологии приводит к значительно большей стоимости и срокам изготовления в сравнении со стандартными высокочастотными технологиями изготовления печатных плат. Возможность применения стандартных материалов высокочастотных печатных плат для разработки волноводно-

микрорископоскоых переходов миллиметрового диапазона частот была показана в [19]. Однако представленный в [19] переход имел ограниченную полосу пропускания (11.5 % по отношению к центральной частоте 60 ГГц) и значительный уровень потерь (около 2 дБ на частоте 60 ГГц). Кроме того, в структуре волноводно-микрорископоскоого перехода, представленного в [18], использовались глухие металлизированные переходные отверстия, что существенно увеличивает стоимость изготовления и сопровождается существенными технологическими ограничениями.

В настоящей статье представлена разработка широкополосного волноводно-микрорископоскоого перехода с малыми потерями на частоте 60 ГГц с использованием стандартной технологии изготовления печатных плат. Разработка выполнена с применением электродинамического моделирования и исследований характеристик экспериментального образца перехода.

Результаты электродинамического моделирования волноводно-микрорископоскоого перехода. Для разработанного волноводно-микрорископоскоого перехода выбрана структура, представленная на рис. 1: *a* – продольный разрез; *b* – вид сверху; *в* – вид снизу. В качестве материала диэлектрической подложки использован СВЧ-материал RO4003С фирмы "Rogers", обладающий на частоте 60 ГГц $\epsilon = 3.54$ [23]. Значения тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta = 0.0058$ задавались в соответствии с экспериментальными данными, представленными в [24].

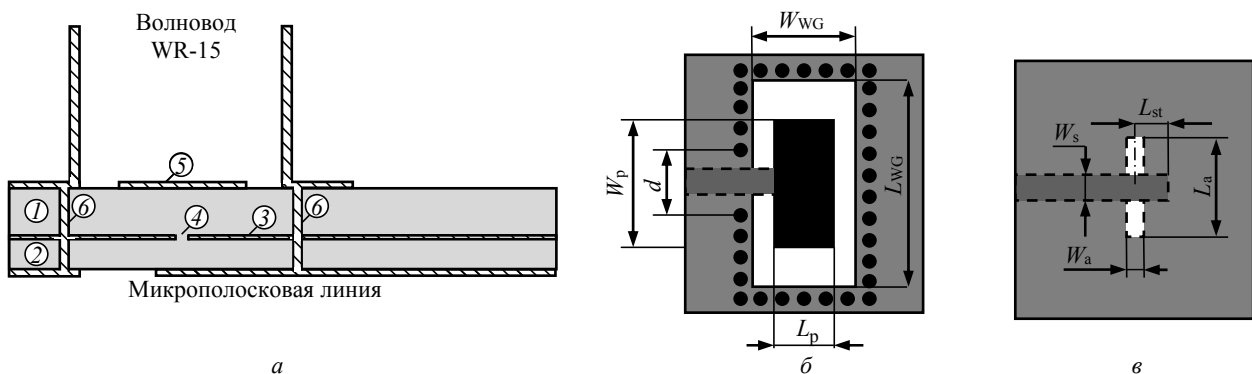


Рис. 1. Структура волноводно-микрорископоскоого перехода

Fig. 1. The waveguide-to-microstrip transition structure: *a* – cross-section; *b* – top view; *в* – bottom view

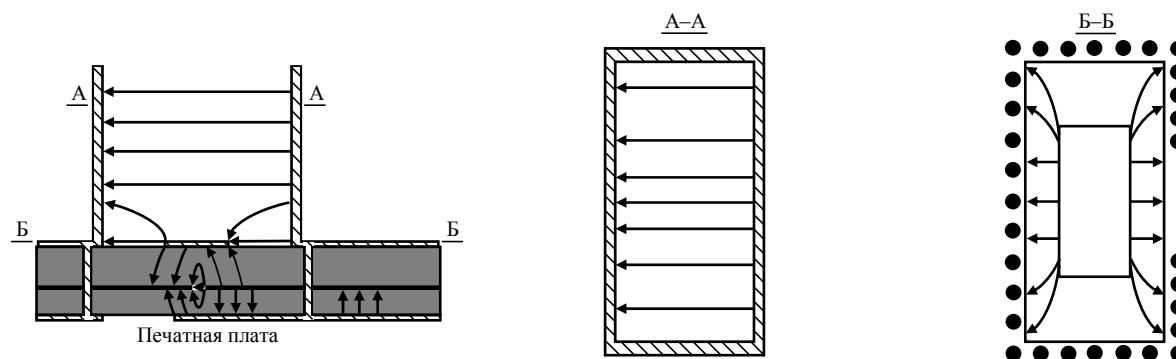


Рис. 2. Структура электрических полей в волноводно-микрорисполосковом переходе

Fig. 2. The electric fields distribution in the waveguide-to-microstrip transition

Рассматриваемая структура имеет три слоя металлизации, разделенных диэлектрической подложкой, включающей два слоя 1, 2 СВЧ-материала RO4003С толщиной 0.203 мм каждый и связующего препрега RO4450В толщиной 0.2 мм также производства фирмы "Rogers". Средний слой металлизации 3 является непрерывным экранирующим металлическим слоем, с одной стороны которого подходит отрезок волновода, а с другой стороны располагается микрорисполосковая линия. Передача сигнала между волноводом и микрорисполосковой линией осуществляется через щелевую апертуру 4 в экранирующей поверхности с использованием излучающего элемента 5 на верхнем слое металлизации, что позволяет добиться лучшего согласования перехода в широкой полосе частот. Общая толщина печатной платы 0.66 мм, толщина каждого слоя металлизации 18 мкм. Структура электрических полей в разработанном волноводно-микрорисполосковом переходе представлена на рис. 2.

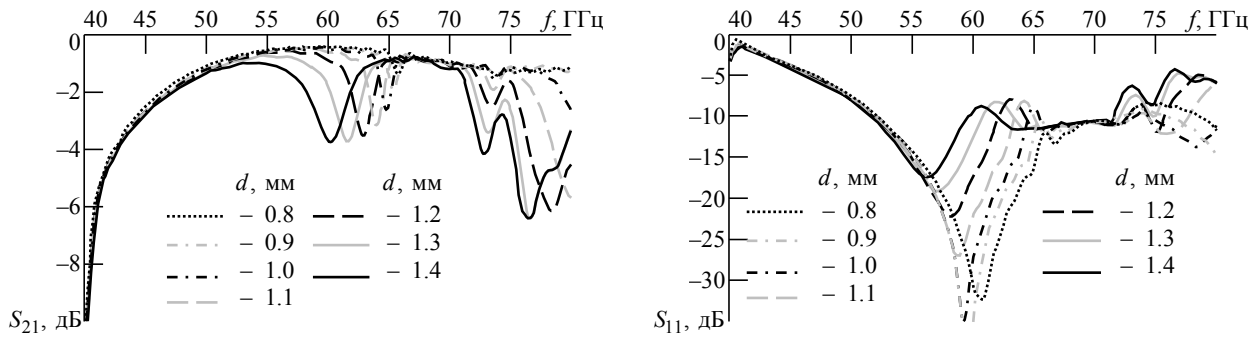
Часто для увеличения ширины полосы пропускания волноводно-микрорисполоскового перехода используют несколько излучающих элементов, расположенных друг над другом [16]. Анализ показал, что при соответствующем выборе параметров перехода возможно при помощи одного излучающего элемента обеспечить полосу пропускания перехода, равную всей полосе пропускания подводящего отрезка волновода.

Использование металлизированных переходных отверстий (см. рис. 1, б), соединяющих волновод по всему периметру (кроме небольшого промежутка в месте подведения сигнала микрорисполосковой линией) с экранирующим проводником, позволяет эффективно продлить волновод и расположить излучающий элемент внутри него. При этом в целом для перехода выполняется ограни-

чение на отсутствие модификаций в стандартном подводящем отрезке волновода. Расстояние между соседними переходными отверстиями оказывает большое влияние на характеристики волноводно-микрорисполоскового перехода [15], поэтому оно выбрано минимально возможным исходя из технологических ограничений. Использовались сквозные переходные отверстия диаметром 0.18 мм при расстоянии между соседними отверстиями 0.2 мм. В месте подведения сигнала микрорисполосковой линией реализовать переходные отверстия с заданными параметрами не представляется возможным, и, как следствие, возникает некоторый промежуток в переходных отверстиях.

Избежать промежутка в переходных отверстиях в месте подведения сигнала микрорисполосковой линией можно с помощью применения слепых переходных отверстий между двумя верхними слоями металлизации [15, 16]. Однако это приводит к усложнению технологии производства и, соответственно, к увеличению стоимости изготовления. В настоящей статье представлены результаты исследования влияния промежутка между сквозными переходными отверстиями, расположенными около подводящей микрорисполосковой линии, на характеристики волноводно-микрорисполоскового перехода.

Моделирование разработанной структуры волноводно-микрорисполоскового перехода выполнено программой трехмерного электродинамического моделирования CST Microwave Studio. Исследовалось влияние на параметры перехода величины промежутка в переходных отверстиях в месте подведения сигнала микрорисполосковой линией d в пределах 0.8...1.4 мм. Полученные в результате моделирования частотные зависимости коэффициентов прохождения S_{21} и отражения S_{11} представлены на рис. 3.

Рис. 3. Частотные зависимости коэффициентов прохождения S_{21} и отражения S_{11} Fig. 3. Frequency dependences of transmission S_{21} and reflection S_{11} coefficients

Из результатов моделирования следует, что при расположении переходных отверстий по всему периметру волновода при малом промежутке в переходных отверстиях волноводно-микрорископический переход обеспечивает полосу пропускания, равную всей полосе пропускания подводящего волновода. Однако при наличии значительного (более 1 мм) промежутка в переходных отверстиях имеет место провал в коэффициенте прохождения в полосе пропускания. При увеличении промежутка в переходных отверстиях провал увеличивается по глубине и смещается в сторону меньших частот. При электродинамическом моделировании удалось обнаружить, что с увеличением промежутка в переходных отверстиях растет уровень побочного излучения и увеличивается концентрация электромагнитной энергии на внутренних слоях платы, что и объясняет наличие провала в коэффициенте передачи волноводно-микрорископического перехода. Модели плотности электрического поля в сечении перехода для промежутка в переходных отверстиях диаметром 0.8 и 1.4 мм представлены на рис. 4.

Предложен метод реализации волноводно-микрорископического перехода, позволяющий без увеличения его сложности избежать использования промежутка в переходных отверстиях. Метод заключается в размещении дополнительного сквозного переходного отверстия непосредственно по центру подводящей микрорископической линии. При этом необходимо, чтобы ширина линии была достаточно большой ($W_s > 0.4$ мм), что полностью согласуется с шириной микрорископической линии 50 Ом на выбранной структуре печатной платы. В этом случае можно расположить переходные отверстия по всему периметру волновода. При этом вокруг переходного отверстия, расположенного по центру микрорископической линии, необходим круглый ободок, освобожденный от металлизации, для предотвращения замыкания микрорископической линии на проводящий экран. Такая структура образует неоднородность подводящей линии. Для компенсации этой неоднородности можно, в частности, использовать уширение части линии, находящейся непосредственно под волноводом.

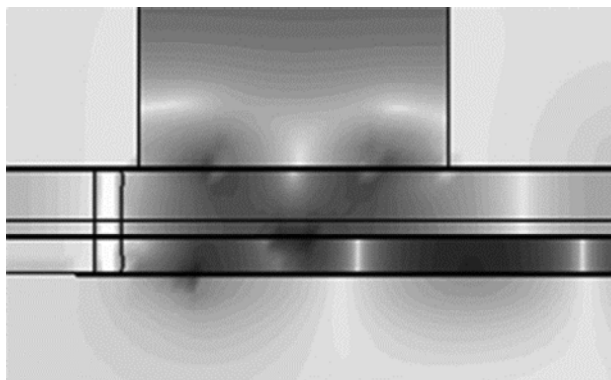
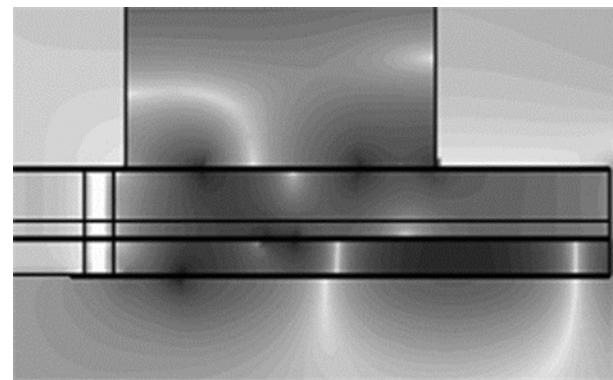
 $d = 0.8$ мм $d = 1.4$ мм

Рис. 4. Модели плотности электрического поля в сечении перехода

Fig. 4. Models of the electric field density in the transition cross section

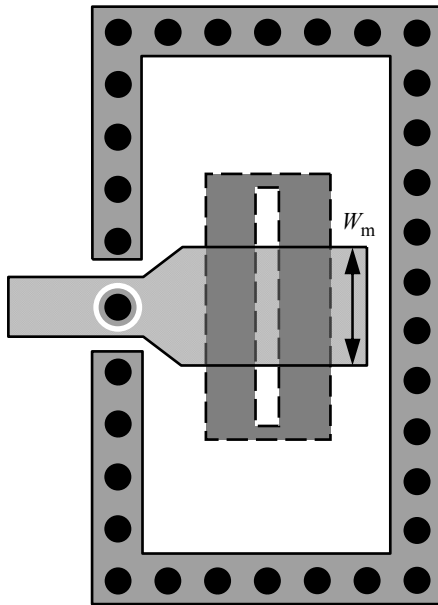


Рис. 5. Структура разработанного волноводно-микрополоскового перехода с дополнительным переходным отверстием

Fig. 5. The structure of the designed waveguide-to-microstrip transition with an additional hole

Итоговая структура разработанного волноводно-микрополоскового перехода с дополнительным переходным отверстием в центре подводящей линии представлена на рис. 5. Размеры элементов перехода (см. рис. 1) составляют $W_{WG} = 1.88$ мм, $L_{WG} = 3.76$ мм, $W_p = 2$ мм, $L_p = 0.93$ мм, $W_s = 0.45$ мм, $W_a = 0.18$ мм, $L_a = 1.8$ мм, $L_{st} = 0.6$ мм. Для компенсации влияния переходного отверстия выбрано уширение линии в месте подсоединения волновода до $W_m = 0.9$ мкм.

На рис. 6 приведены результаты моделирования коэффициентов отражения и прохождения

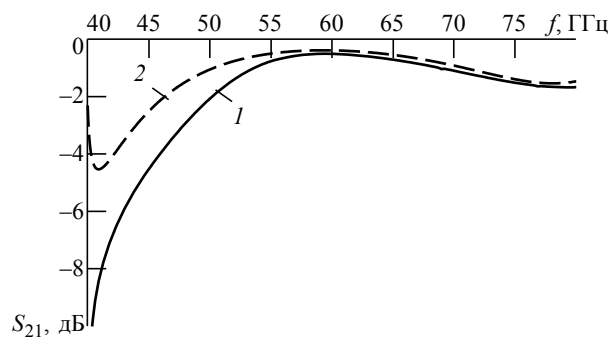
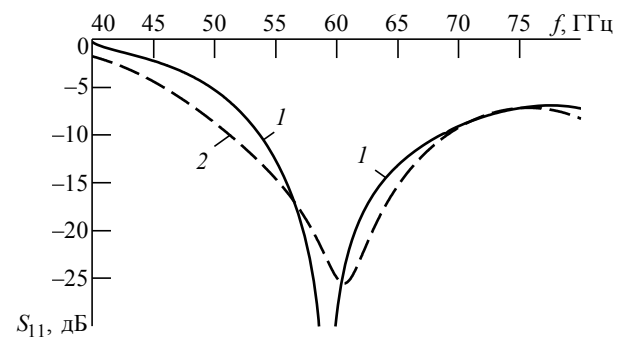


Рис. 6. Частотные зависимости коэффициентов прохождения и отражения волноводно-микрополоскового перехода с дополнительным переходным отверстием

Fig. 6. Frequency dependences of reflection and transmission coefficients of a waveguide-to-microstrip transition with an additional hole: 1 – through hole; 2 – blind hole

волноводно-микрополоскового перехода с дополнительным переходным отверстием в центре подводящей линии (кривые 1). Для сравнения на рис. 6 приведены результаты моделирования для волноводно-микрополоскового перехода со структурой на основе глухого переходного отверстия, соединяющего верхний слой металлизации с экраном микрополосковой линии на внутреннем слое металлизации (кривые 2). Результаты моделирования показывают, что разработанный переход обеспечивает передачу сигнала из волновода в микрополосковую линию во всей полосе пропускания волновода. При этом обеспечивается плавное изменение коэффициента прохождения благодаря наличию переходных отверстий по всему периметру волновода. Разработанный переход имеет характеристики, близкие к характеристикам перехода с глухим отверстием, что подтверждает эффективность предложенного подхода. Потери в переходе составляют менее 0.5 дБ на центральной частоте 60 ГГц, полоса пропускания по уровню -1 дБ коэффициента прохождения более 15 ГГц (или более 25 % от центральной частоты 60 ГГц). Во всей полосе пропускания волновода (50...75 ГГц) обеспечивается передача сигнала с потерями, не превышающими 2 дБ.

Для оценки влияния неточностей изготовления на характеристики разработанного перехода дополнительно проведено его моделирование с измененными размерами проводников и зазоров между ними. Предельные отклонения размеров ширины проводников и зазоров при моделировании были выбраны равными $\pm 10\%$, что обеспечивается стандартной технологией производства печатных плат.



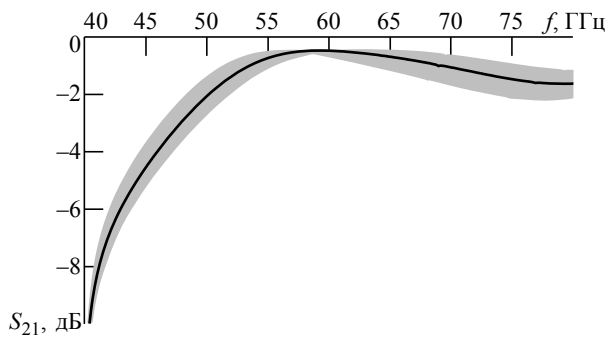
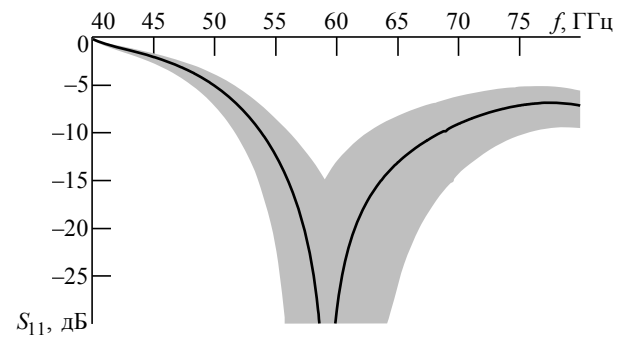


Рис. 7. Влияние неточностей изготовления на характеристики волноводно-микроразветвляющего перехода

Fig. 7. The influence of manufacturing inaccuracies on the waveguide-to-microstrip transition characteristics: gray region belongs to a range of characteristics with 10 % inaccuracy; black line shows simulation results without inaccuracies

Область разброса результатов электродинамического моделирования при различных комбинациях отклонений размеров отдельных элементов перехода показана на рис. 7 серым цветом; черная линия представляет исходные результаты моделирования. Как видно из результатов моделирования, отклонение размеров отдельных элементов перехода приводит к небольшому смещению рабочей полосы частот. При этом значения коэффициента прохождения изменяются в пределах не более 0.4 дБ от исходного значения. Следует отметить, что в подавляющем большинстве случаев изготовленные печатные платы имеют значительно меньший разброс размеров, что обеспечивает хорошую повторяемость характеристик переходов во всем рабочем диапазоне частот.



Экспериментальные исследования. Для экспериментальной проверки разработанного волноводно-микроразветвляющего перехода был изготовлен двусторонний переход "волноводно-микроразветвляющая линия-волноводно" с дополнительным переходным отверстием в центре подводящей линии. Фотография изготовленной печатной платы двустороннего перехода представлена на рис. 8.

В качестве подложки использовался указанный ранее СВЧ-материал печатных плат RO4003С фирмы "Rogers", что обеспечило значительно меньшую стоимость изготовления, чем традиционно используемые в диапазоне миллиметровых волн LTCC-технологии. Размер печатной платы составил 50×20 мм. Расстояние между двумя волноводно-микроразветвляющими переходами выбрано равным 30 мм для обеспечения удобного подсоединения фланцев волноводов, имеющих диаметр около 20 мм. Следует отметить, что потери распространения в микроразветвляющей линии с шириной проводника 0.45 мм длиной 30 мм составляют 2.5...3 дБ.

Измерения двустороннего волноводно-микроразветвляющего перехода проводились с использованием генератора на диоде Ганна, перестраиваемого в диапазоне частот 55...62 ГГц и имеющего волноводный выходной интерфейс. Переданный сигнал принимался и анализировался спектроанализатором Agilent E4407В совместно с понижающим внешним смесителем Agilent 11970V. При измерениях образцы двусторонних переходов закреплялись в предварительно позиционированное и закрепленное лабораторное оборудование, что позволило минимизировать механическое воздействие (перегибы, кручения и пр.) на платы и тем самым улучшить повторяемость

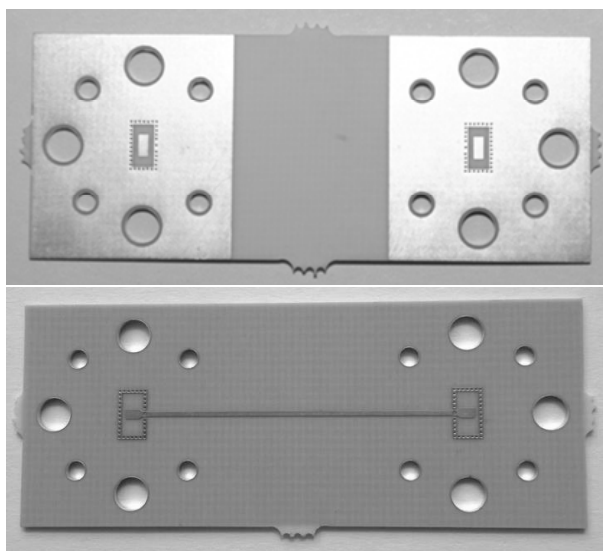


Рис. 8. Макет печатной платы с двусторонним переходом "волноводно-микроразветвляющая линия-волноводно"

Fig. 8. Model of a printed circuit board with a double sided transition "waveguide-microstrip line-waveguide"

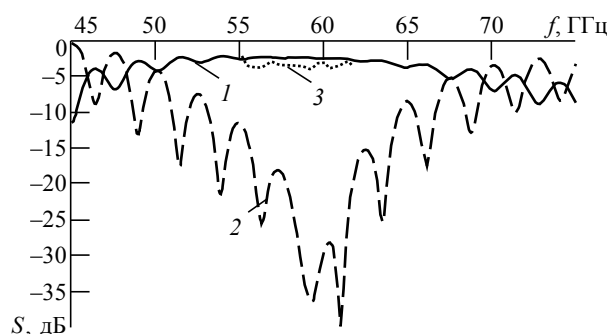


Рис. 9. Результаты моделирования и измерения характеристик двустороннего перехода "волновод–микрополосковая линия–волновод"

Fig. 9. Simulation and measurement results of the double sided transition "waveguide–microstrip line–waveguide" characteristics: 1 – S_{21} , simulation; 2 – S_{11} , simulation; 3 – S_{21} , measurements

измеренных характеристик. Для уменьшения смещения подводящего волновода относительно печатной платы в ней были выполнены специальные отверстия для позиционирования с помощью штифтов стандартного волноводного фланца UG-385/U.

Результаты электродинамического моделирования частотных зависимостей коэффициентов прохождения S_{21} (кривая 1) и отражения S_{11} (кривая 2), а также измеренные значения коэффициента прохождения S_{21} двустороннего перехода "волновод–микрополосковая линия–волновод" (кривая 3) представлены на рис. 9.

Из результатов измерения следует, что ослабление в полосе пропускания волноводно-микрополоскового перехода хорошо согласуется с результатами моделирования и составляет в среднем 4...4.5 дБ (по результатам моделирования 3.5 дБ). Таким образом, с учетом потерь в микрополосковой линии потери в одном волноводно-микрополосковом переходе составляют не более 0.8 дБ. Неравномерность результатов измерения составляет около 1 дБ и объясняется неточностью изготовления. Измерения нескольких экземпляров печатных плат показывают совпадающие результаты, что доказывает устойчивость перехода к неточностям изготовления.

Заключение. В настоящей статье представлены результаты разработки и исследования пла-

нарного широкополосного волноводно-микрополоскового перехода для частотного диапазона 50...75 ГГц. Волноводно-микрополосковый переход основан на взаимодействии электромагнитных полей в волноводе и микрополосковой линии через щелевую апертуру в проводнике экрана микрополосковой линии. Для изготовления использована стандартная высокочастотная технология производства печатных плат, что обеспечивает малую стоимость изготовления по сравнению с LTCC-технологией. Благодаря использованию дополнительного переходного отверстия в центре подводящей микрополосковой линии удалось обеспечить полосу пропускания разработанного перехода, равную всей полосе пропускания подводящего волновода WR-15.

Экспериментальные исследования выполнены на двустороннем переходе "волновод–микрополосковая линия–волновод". Измерения характеристик перехода подтвердили результаты электродинамического моделирования. Измерения нескольких экземпляров изготовленных переходов показали хорошую устойчивость перехода к неточностям изготовления. По полученным результатам полоса пропускания перехода составляет 25 ГГц (более 40 %) по уровню –2 дБ коэффициента прохождения, а потери – не более 0.8 дБ на центральной частоте 60 ГГц.

В результате проведенного исследования созданием дополнительного переходного отверстия в центре подводящей микрополосковой линии, позволяющего устранить неоднородность в структуре перехода, обеспечен низкий уровень потерь в волноводно-микрополосковом переходе в диапазоне 50...75 ГГц. Представленный подход позволяет удовлетворить всем поставленным при разработке перехода требованиям. Широкая полоса пропускания сигнала, небольшие потери, устойчивость к неточностям изготовления и простота интеграции позволяют использовать волноводно-микрополосковый переход для соединения различных микрополосковых и волноводных устройств миллиметрового диапазона длин волн.

Авторский вклад

Можаровский А. В. – исследование способов устранения влияния неоднородностей в структуре перехода. Разработка конструкции перехода с глухим отверстием. Проведение электродинамического моделирования разработанных конструкций переходов. Подготовка текста статьи.

Артеменко А. А. – разработка конструкции перехода со сквозным отверстием по центру микрополосковой линии. Проведение измерений изготовленных образцов двусторонних структур.

Масленников Р. О. – руководство работой.

Вендик И. Б. – руководство работой. Подготовка текста статьи.

Authors' contributions

Andrey V. Mozharovskiy – the study of ways to eliminate the influence of irregularities in the transition structure. Development of a transition design with the blind hole that eliminate the influence of irregularities. Full-wave simulation of the developed transition structures. Preparation of the paper text.

Aleksei A. Artemenko – development of the design of the transition with a through hole in the center of the microstrip line. Carrying out measurements of manufactured samples of back-to-back transition structures.

Roman O. Maslennikov – management of the work.

Irina B. Vendik – management of the work. Preparation of the paper text.

Список литературы

1. 802.11-2016 – IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks – Specific requirements. Pt. 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Std. 802.11-2016. doi: 10.1109/IEEESTD.2016.7786995
2. Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work! / T. S. Rappaport, Shu Sun, R. Mayzus, Hang Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. Samimi, F. Gutierrez // IEEE Access (Invited). 2013. Vol. 1, № 1. P. 335–349. doi: 10.1109/ACCESS.2013.2260813
3. Stevens M., Grafton G. The Benefits of 60 GHz Unlicensed Wireless Communications. 10 p. URL: <https://www.faltnann.de/pdf/white-paper-benefits-of-60ghz.pdf> (дата обращения: 08.07.2019)
4. Решение ГКПЧ от 20.12.2011 № 11-13-06-1. Об использовании радиоэлектронными средствами фиксированной службы полосы радиочастот 57-64 ГГц (в ред. от 10.03.2017 г. № 17-40-03). URL: http://grfc.ru/upload/medialibrary/713/Reshenie_GKRCH_ot_10.03.2017_17_40_03_15.02.2019.docx (дата обращения: 11.07.2019)
5. Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Operation in the 57–64 GHz Band. URL: http://fjallfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-13-112A1.pdf (дата обращения: 08.07.2019)
6. ECC Recommendation (09)01. Use of the 57–64 GHz Frequency Band for Point-to-Point Fixed Wireless Systems. URL: <http://www.erodocdb.dk/Docs/doc98/official/pdf/Rec0901.pdf> (дата обращения: 08.07.2019)
7. Wells J. Multi-Gigabit Microwave and Millimeter-Wave Wireless Communications. Norwood, MA: Artech House, Inc., 2010. 224 p.
8. Kim K. W., Na C. H., Woo D. S. New Dielectric-Covered Waveguide-to-Microstrip Transitions for Ka-Band Transceivers // IEEE MTT-S Inter. Microwave Symp. Philadelphia, PA, USA. 8–13 June 2003. Digest. Vol. 2. Piscataway: IEEE, 2003. P. 1115–1118. doi: 10.1109/MWSYM.2003.1212564
9. Refined Characterization of E-plane Waveguide to Microstrip Transition for Millimeter-Wave Applications / Y. Tikhov, J.-W. Moon, Y.-J. Kim, Y. Sinelnikov // Asia-Pacific Microwave Conf. Sydney, Australia, 3–6 Dec. 2000. Piscataway: IEEE, 2000. P. 1187–1190. doi: 10.1109/APMC.2000.926043
10. Shih Y.-C., Ton T.-N., Bui L. Q. Waveguide-to-Microstrip Transitions for Millimeter-Wave Applications // IEEE MTT-S Inter. Microwave Symp. New York, USA, 25–27 May 1988, Digest. Piscataway: IEEE, 1988. P. 473–475. doi: 10.1109/MWSYM.1988.22077
11. Lou Y., Chan C. H., Xue Q. An in-line Waveguide-to-Microstrip Transition Using Radial-Shaped Probe // IEEE Antennas and Propagation Society Inter. Symp. Honolulu, USA, 9–15 June 2007. Piscataway: IEEE, 2007. P. 3117–3120. doi: 10.1109/APS.2007.4396196
12. A Full Wave Analysis of Microstrip-to-Waveguide Transitions / H. W. Yao, A. Abdelmonem, J. F. Liang, K. A. Zaki // IEEE MTT-S Inter. Microwave Symp. San Diego, USA, 23–27 May 1994. Digest. Vol. 42, № 12. P. 2371–2380. doi: 10.1109/MWSYM.1994.335341
13. Grabherr W., Huder B., Menzel W. Microstrip to waveguide transition compatible with MM-wave integrated circuits // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1994. Vol. MTT-42, № 9. P. 1842–1843. doi: 10.1109/22.310597
14. Hyvonen L., Hujanen A. A Compact MMIC-Compatible Microstrip to Waveguide Transition // IEEE MTT-S Inter. Microwave Symp. San Francisco, USA, 17–21 June 1996. Digest. Piscataway: IEEE, 1996. P. 875–878. doi: 10.1109/MWSYM.1996.511077
15. A Novel Waveguide to Microstrip Transition in Millimeter-Wave LTCC Module / Z. Wang, L. Xia, B. Yan, R. Xu, Y. Guo // IEEE Inter. Symp. on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies for Wireless Com-

munications. Hangzhou, China, 16–17 Aug. 2007. Piscataway: IEEE, 2007. P. 340–343. doi: 10.1109/MAPE.2007.4393616

16. Xinfeng D. An Integrated Millimeter-Wave Broadband Microstrip-to-Waveguide Vertical Transition Suitable for Multilayer Planar Circuits // IEEE Microwave and Wireless Components Lett. 2016. Vol. 26, iss. 11. P. 897–899. doi: 10.1109/LMWC.2016.2614973

17. Millimeter-Wave Topside Waveguide-to-Microstrip Transition in Multilayer Substrate / Y. Ishikawa, K. Sakakibara, Y. Suzuki, N. Kikuma // IEEE Microwave and Wireless Components Lett. 2018. Vol. 28, iss. 5. P. 380–382. doi: 10.1109/LMWC.2018.2812125

18. Wideband Aperture Coupled Stacked Patch Type Microstrip to Waveguide Transition for V-Band / H. Y. Lee, D. S. Jun, S. E. Moon, E. K. Kim, J. H. Park, K. H. Park // IEEE Proc. of Asia-Pacific Microwave Conf. Yokohama, Japan, 12–15 Dec. 2006. Piscataway: IEEE, 2006. P. 360–362. doi: 10.1109/APMC.2006.4429440

19. Волноводно-микрорешетчатый переход в частотном диапазоне 60 ГГц / А. А. Артеменко, Р. О. Масленников, А. Г. Севастьянов, В. Н. Скорин // 19-я Международная Крымская конф. "СВЧ-техника и телекоммуникаци-

онные технологии" (КрыМиКо'2009). Севастополь, 14–18 сент. 2009. Севастополь: Вебер, 2009. С. 505–506.

20. Microstrip Lines and Slotlines / K. C. Gupta, R. Garg, I. Bahl, P. Bharia. 2nd ed. Boston/London: Artech House, Inc., 1996. 535 p.

21. Pozar D. M. Microwave Engineering. 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2012. 756 p.

22. IEC 60153-2:2016. Hollow Metallic Waveguides. Pt. 2: Relevant Specifications for Ordinary Rectangular Waveguides. Standard of the International Electrotechnical Commission, 2016. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/24898> (дата обращения: 08.07.2019)

23. Felbecker R., Keusgen W., Peter M. Estimation of Permittivity and Loss Tangent of High Frequency Materials in the Millimeter Wave Band using a Hemispherical Open Resonator // IEEE Inter. Conf. on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems (COMCAS). Tel Aviv, Israel, 7–9 Nov. 2011. Piscataway: IEEE, 2011. P. 1–8. doi: 10.1109/COMCAS.2011.6105829

24. Horn A. Dielectric Constant and Loss of Selected Grades of Rogers High Frequency Circuit Substrates from 1–50 GHz: Technical Report 5788 / Rogers Corporation. Chandler, AZ, 2003. 12 p.

Информация об авторах

Можаровский Андрей Викторович – старший инженер по СВЧ-устройствам и антенной технике ООО "Радио Гигабит". Окончил Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского (2011) по специальности "Информационные системы и технологии". Соискатель кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 30 печатных работ. Сфера научных интересов – антенно-фидерные устройства миллиметрового диапазона длин волн, включая печатные, волноводные и линзовые антенны и антенные решетки; планарные и волноводные дуплексирующие устройства и фильтры.
E-mail: andrey.mozharovskiy@radiogigabit.com
<https://orcid.org/0000-0002-9827-6720>

Артеменко Алексей Андреевич – кандидат технических наук (2013), директор по исследованиям и разработкам ООО "Радио Гигабит". Автор около 50 научных работ и 14 патентов. Сфера научных интересов – антенная техника, включая апертурные антенны, особенно антенны миллиметрового диапазона длин волн, антенные решетки, печатные антенны, антенны с электронным управлением лучом; СВЧ-техника, включая пассивные устройства и активные радиочастотные модули, такие как волноводно-микрорешетчатые переходы, поляризационные селекторы, фильтры на металлических и поверхностных волноводах; СВЧ-приемопередатчики на современной электронной компонентной базе диапазонов частот от 0 до 90 ГГц.
E-mail: alexey.artemenko@radiogigabit.com

Масленников Роман Олегович – кандидат физико-математических наук (2012), генеральный директор ООО "Радио Гигабит". Автор более 100 печатных научных работ и более 30 изобретений. Сфера научных интересов – алгоритмы оптимальной обработки сигналов в современных беспроводных системах связи.
E-mail: roman.maslennikov@radiogigabit.com

Вендик Ирина Борисовна – доктор технических наук (1991), профессор (1993) кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), руководитель лаборатории СВЧ-микроэлектроники указанного университета. Член ряда международных сообществ, в том числе IEEE (senior member) и EuMA. Автор более 300 научных работ. Сфера научных интересов – исследование свойств материалов для электроники (сверхпроводники, сегнетоэлектрики, метаматериалы); разработка устройств микроволнового и терагерцового диапазонов.

E-mail: ibvendik@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5632-1223>

References

1. 802.11-2016 – IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks – Specific requirements. Pt. 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Std. 802.11-2016. doi: 10.1109/IEEESTD.2016.7786995
2. Rappaport T. S., Sun Shu, Mayzus R., Zhao Hang, Azar Y., Wang K., Wong G. N., Schulz J. K., Samimi M., Gutierrez F. Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work! IEEE Access (Invited). 2013, vol. 1, no. 1, pp. 335–349. doi: 10.1109/ACCESS.2013.2260813
3. Stevens M., Grafton G. The Benefits of 60 GHz Unlicensed Wireless Communications. 10 p. Available at: <https://www.faltmann.de/pdf/white-paper-benefits-of-60ghz.pdf> (accessed 08.07.2019)
4. Decision of the State Committee for Emergencies of 12.12.2011 no. 11-13-06-1. On the use by radio-electronic means of the fixed service of the radio frequency band 57-64 GHz (as amended on March 10, 2017 no. 17-40-03). Available at: http://grfc.ru/upload/medialibrary/713/Reshenie_GKRCH_ot_10.03.2017_17_40_03_15.02.2019.docx (accessed 11.07.2019) (In Russ.)
5. Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Operation in the 57–64 GHz Band. Available at: http://fjallfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-13-112A1.pdf (accessed 08.07.2019)
6. ECC Recommendation (09)01. Use of the 57–64 GHz Frequency Band for Point-to-Point Fixed Wireless Systems. Available at: <http://www.erodocdb.dk/Docs/doc98/official/pdf/Rec0901.pdf> (accessed 08.07.2019)
7. Wells J. Multi-Gigabit Microwave and Millimeter-Wave Wireless Communications. Norwood, Artech House, Inc., 2010, 224 p.
8. Kim K. W., Na C. H., Woo D. S. New Dielectric-Covered Waveguide-to-Microstrip Transitions for Ka-Band Transceivers. IEEE MTT-S Inter. Microwave Symposium. 8–13 June 2003 Philadelphia, PA, USA. Digest, vol. 2. Piscataway, IEEE, 2003, pp. 1115–1118. doi: 10.1109/MWSYM.2003.1212564
9. Tikhov Y., Moon J.-W., Kim Y.-J., Sinelnikov Y. Refined Characterization of E-plane Waveguide to Microstrip Transition for Millimeter-Wave Applications. Asia-Pacific Microwave Conf. 3–6 Dec. 2000, Sydney, Australia. Piscataway, IEEE, 2000, pp. 1187–1190. doi: 10.1109/APMC.2000.926043
10. Shih Y.-C., Ton T.-N., Bui L. Q. Waveguide-to-Microstrip Transitions for Millimeter-Wave Applications. IEEE MTT-S Inter. Microwave Symp. 25–27 May 1988, New York, USA. Digest. Piscataway, IEEE, 1988, pp. 473–475. doi: 10.1109/MWSYM.1988.22077
11. Lou Y., Chan C. H., Xue Q. An in-line Waveguide-to-Microstrip Transition Using Radial-Shaped Probe. IEEE Antennas and Propagation Society Inter. Symp. 9–15 June 2007, Honolulu, USA. Piscataway, IEEE, 2007, pp. 3117–3120. doi: 10.1109/APS.2007.4396196
12. Yao H. W., Abdelmonem A., Liang J. F., Zaki K. A. A Full Wave Analysis of Microstrip-to-Waveguide Transitions. IEEE MTT-S Inter. Microwave Symp. 23–27 May 1994, San Diego, USA. Digest, vol. 42, no. 12, pp. 2371–2380. doi: 10.1109/MWSYM.1994.335341
13. Grabherr W., Huder B., Menzel W. Microstrip to waveguide transition compatible with MM-wave integrated circuits. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1994, vol. MTT-42, no. 9, pp. 1842–1843. doi: 10.1109/22.310597
14. Hyvonen L., Hujanen A. A Compact MMIC-Compatible Microstrip to Waveguide Transition. IEEE MTT-S Inter. Microwave Symp. 17–21 June 1996, San Francisco, USA. Digest. Piscataway, IEEE, 1996, pp. 875–878. doi: 10.1109/MWSYM.1996.511077
15. Wang Z., Xia L., Yan B., Xu R., Guo Y. A Novel Waveguide to Microstrip Transition in Millimeter-Wave LTCC Module. IEEE Inter. Symp. on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies for Wireless Communications. 16–17 Aug. 2007, Hangzhou, China. Piscataway, IEEE, 2007, pp. 340–343. doi: 10.1109/MAPE.2007.4393616
16. Xinfeng D. An Integrated Millimeter-Wave Broadband Microstrip-to-Waveguide Vertical Transition Suitable for Multilayer Planar Circuits. IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2016, vol. 26, iss. 11, pp. 897–899. doi: 10.1109/LMWC.2016.2614973
17. Ishikawa Y., Sakakibara K., Suzuki Y., Kikuma N. Millimeter-Wave Topside Waveguide-to-Microstrip Transition in Multilayer Substrate. IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2018, vol. 28, iss. 5, pp. 380–382. doi: 10.1109/LMWC.2018.2812125
18. Lee H. Y., Jun D. S., Moon S. E., Kim E. K., Park J. H., Park K. H. Wideband Aperture Coupled Stacked Patch Type Microstrip to Waveguide Transition for V-Band. IEEE Proc. of Asia-Pacific Microwave Conference, 2006. 12–15 Dec. 2006, Yokohama, Japan. Piscataway, IEEE, 2006, pp. 360–362. doi: 10.1109/APMC.2006.4429440
19. Artemenko A. A., Maslennikov R. O., Sevast'yanov A. G., Ssorin V. N. *Volnovodno-mikropoloskovyi perekhod v chastotnom diapazone 60 GGts* [Waveguide to microstrip transition in the 60 GHz frequency band]. 19th Intern. Crimean conf. Microwave Engineering and Telecommunication Technologies (KryMiKo'2009). September, 2009. Sevastopol, Veber, 2009, pp. 505–506. (In Russ.)
20. Gupta K. C., Garg R., Bahl I., Bharia P. Microstrip Lines and Slotlines. 2nd ed. Boston/London, Artech House, Inc., 1996, 535 p.
21. Pozar D. M. Microwave Engineering. 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2012, 756 p.

22. IEC 60153-2:2016. Hollow Metallic Waveguides. Pt. 2: Relevant Specifications for Ordinary Rectangular Waveguides. Standard of the International Electrotechnical Commission, 2016. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/24898> (accessed 08.07.2019)

23. Felbecker R., Keusgen W., Peter M. Estimation of Permittivity and Loss Tangent of High Frequency Materials in the Millimeter Wave Band using a Hemispherical

Open Resonator. IEEE Inter. Conf. on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems (COMCAS). 7-9 Nov. 2011, Tel Aviv, Israel. Piscataway, IEEE, 2011, pp. 1-8. doi: 10.1109/COMCAS.2011.6105829

24. Horn A. Dielectric Constant and Loss of Selected Grades of Rogers High Frequency Circuit Substrates from 1-50 GHz: Technical Report 5788. Rogers Corporation. Chandler, AZ, 2003, 12 p.

Information about the authors

Andrey V. Mozharovskiy – Senior microwave systems and antennas engineer in LLC "Radio Gigabit". He graduated from Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (2011) with a degree in "Information Systems and Technologies". He is a PhD student of the Department of Microradioelectronics and Radio Technology at Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 30 scientific publications. Area of expertise: various millimeter wavelength range antenna and feeding systems, including printed, waveguide and lens antennas and antenna arrays; planar and waveguide duplexing devices and filters.

E-mail: andrey.mozharovskiy@radiogigabit.com

<https://orcid.org/0000-0002-9827-6720>

Aleksei A. Artemenko – Cand. Sci. (Engineering) (2013), R&D director in LLC "Radio Gigabit". The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: antenna technology, including aperture antennas, especially millimeter-wave antennas, antenna arrays, printed antennas, and electronically controlled antennas; microwave technology, including passive devices and active radio frequency modules, such as waveguide-to-microstrip transitions, polarization selectors, filters on metal and surface mounted waveguides; microwave transceivers on a modern electronic component base in frequency bands from 0 to 90 GHz.

E-mail: alexey.artemenko@radiogigabit.com

Roman O. Maslennikov – Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2012), CEO in LLC "Radio Gigabit". The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: optimal signal processing algorithms in modern wireless communication systems.

E-mail: roman.maslennikov@radiogigabit.com

Irina B. Vendik – Dr. Sci. (Engineering) (1991), Professor (1993) of the Department of Microradioelectronics and Radio Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University, Head of the Laboratory of Microwave Microelectronics named university. She is a member of a number of international communities, including IEEE (senior member) and EuMA. The author of more than 300 scientific publications. Area of expertise: properties of materials for electronics (superconductors, ferroelectrics, metamaterials); microwave and terahertz devices.

E-mail: ibvendik@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5632-1223>