



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.5.7>

УДК: 621.385.63

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАКЕТА ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Иванов А.А.¹, Морозкин М.В.¹, Орловский А.А.^{1,2}, Проявин М.Д.¹,
Розенталь Р.М.¹, Шмелёв М.Ю.¹

¹ ФИЦ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

² Волжский государственный университет водного транспорта,
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

Статья поступила в редакцию 27 марта 2024 г.

Аннотация. С помощью технологии фотополимерной трехмерной печати с последующей металлизацией изготовлен макет замедляющей системы для лампы бегущей волны Q-диапазона. Выявленные на измерительном микроскопе отклонения в размерах одного периода замедляющей системы не превышали величины 5 мкм. Результаты "холодных" электродинамических измерений изготовленной системы продемонстрировали хорошее соответствие расчетным данным.

Ключевые слова: лампа бегущей волны, замедляющая система, аддитивные технологии, трехмерная печать.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания FFUF-2024-0027.

Автор для переписки: Иванов Антон Алексеевич, a.ivanov@ipfran.ru

Введение

В связи с активным развитием технологий связи в миллиметровом диапазоне частот весьма востребованным является разработка мощных широкополосных усилителей СВЧ излучения. Одним из вариантов является использование ламп бегущей волны (ЛБВ) черенковского типа [1,2]. Однако изготовление ЛБВ миллиметрового диапазона сталкивается с проблемами, связанными с малыми размерами области взаимодействия электромагнитной волны с электронным пучком [3,4]. При продвижении в более высокочастотную область растут относительные погрешности изготовления деталей замедляющих систем и остальных СВЧ элементов конструкции ЛБВ. Также значительно усложняется технология изготовления замедляющих систем (ЗС), требующая большего числа точных оправок и отработки все более сложных технологических процессов. В этой связи представляет интерес исследование возможностей современных аддитивных технологий для создания ЗС ЛБВ миллиметрового диапазона.

Интенсивно развивающиеся аддитивные технологии в настоящее время находят всё более широкое применение в различных областях науки и техники, в том числе в электронике СВЧ [5-8]. Очевидными достоинствами трёхмерной (3D) печати по сравнению с традиционными технологиями являются её доступность, скорость изготовления деталей и умеренная стоимость. Ещё одним важным её преимуществом является возможность изготовления сложных изделий, в том числе с внутренними полостями сложной формы, в виде одной цельной детали.

В качестве макета для обработки новой технологии было решено использовать ЗС типа "петляющий волновод" для ЛБВ Q-диапазона. Характерные размеры элементов такой ЗС, с одной стороны, достаточно малы и позволяют оценить точность изготовления элементов конструкции толщиной в десятые доли миллиметра. С другой стороны, это дает возможность проверить качество и толщину металлизации поверхности в труднодоступных местах, что было бы затруднительно для более высокочастотных ЗС.

1. Модель замедляющей системы и технология изготовления

Замедляющая система типа "петляющий волновод" обеспечивает необходимые электродинамические характеристики (замедление и сопротивление связи) и при этом обладает технологичностью изготовления и механической прочностью. Вместо классического петляющего волновода с регулярным сечением использовалась модифицированная версия с переменным сечением, которая обладает улучшенными характеристиками [9]. Так, в полосе частот порядка 20 % при одинаковом замедлении ($n \sim 3.5$) сопротивление связи получается в 2.5-3 раза больше, чем у классического варианта. Для согласования ЗС с внешним волноводным трактом в широкой полосе частот был использован клиновидный согласующий трансформатор длиной 25 мм. Трехмерная модель ЗС с таким трансформатором представлена на рис. 1.

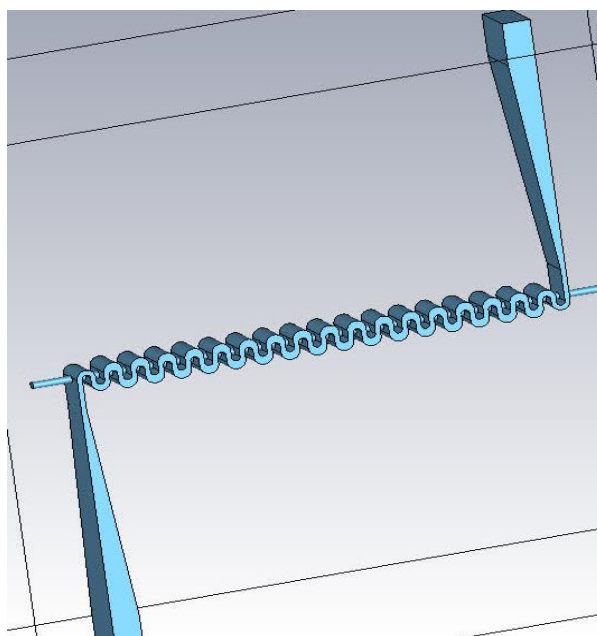


Рис. 1. Трехмерная модель замедляющей системы с согласующими трансформаторами.

В настоящее время существует несколько технологий изготовления проводящих структур на основе 3D-печати. Для изготовления подобных изделий может применяться непосредственно 3D-печать из металлов и сплавов. Однако печатающие металлом принтеры имеют наиболее высокую цену, сложны в эксплуатации и уступают по качеству создаваемой поверхности

другим аддитивным технологиям. Альтернативным методом изготовления СВЧ компонентов является печать из пластика с последующей металлизацией поверхности [10] или использованием полученной оправки для последующего создания металлической детали [11]. При этом аддитивные технологии позволяют изготавливать изделия с рабочими (подвергающимися экспозиции СВЧ полей) как внутренними, так и наружными поверхностями. В первом случае процесс изготовления предполагает печать пластиковой заготовки с последующим нанесением на неё (например, методами гальванопластики) относительно толстого металлического слоя, обладающего определённой прочностью, и удалением (например, путём плавления) пластика на заключительной стадии. Во втором случае, при печати наружных стенок и металлизации внутренних рабочих поверхностей электродинамических компонентов, пластик сам по себе обеспечивает их механические свойства, достаточно тонкослойной металлизации.

Технологии 3D-печати из пластика также имеют несколько разновидностей, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки. Наиболее распространённая технология FDM (Fused Deposition Modeling, создание модели методом послойного добавления расплавленного материала) позволяет создавать изделия с относительно низкой точностью, более того, для неё характерна довольно сильная неровность поверхности модели, что ограничивает её потенциальное применение в СВЧ электронике сантиметровым диапазоном длин волн. Более высокую точность изготовления обеспечивает технология 3D-печати на основе стереолитографии из фотополимерного материала и, в частности, её разновидность MJP (Multi Jet Printing), которая использовалась в исследованиях, представленных в данной работе. Технология MJP основана на печатающей головке с набором из миниатюрных сопел, количество которых может достигать нескольких сотен, и позволяет создавать элементы с мелкомасштабным профилем поверхности.

В отличие от стандартных стереолитографических принтеров, наличие головки с большим количеством сопел даёт также возможность использовать несколько материалов одновременно, что важно в случае необходимости создания поддержек для свисающих элементов из легко удаляемого (химически или термически) материала. Однако полимеры, используемые в данной технологии, имеют большой коэффициент поглощения по сравнению с полимерами, доступными для FDM-печати, что, вообще говоря, ограничивает их использование в качестве рабочей среды в СВЧ приборах.

Для металлизации напечатанных пластиковых заготовок в настоящее время разработаны различные методы, включая магнетронное напыление [12], гальванические методы [13], негальваническое осаждение металла с предварительной химической активацией поверхности [14], а также сочетание этих методов [15]. В данной работе была использована технология фотополимерной 3D-печати с металлизацией внутренней поверхности.

2. Изготовление макета замедляющей системы и измерение электродинамических характеристик

С помощью фотополимерного 3D-принтера с разрешением 7680x4320 пикселей и размером пикселя 30 мкм был изготовлен макет рассчитанной модели. Толщина аддитивного слоя при печати составляет 10 мкм. Время печати составляет около 5 ч. Последующая проверка размеров элементов ЗС на измерительном микроскопе подтвердила заявленную точность изготовления. Отклонения в размерах толщины "зуба" ЗС достигали 5 мкм при отсутствии разброса в периодичности самой структуры. Следующий этап изготовления включал в себя нанесение на фотополимер специального химически активного подслоя и последующую металлизацию медью толщиной 25 мкм. Время металлизации составило 6 часов (плотность тока 1.8 А/ч*дм² при токе 0.6 А). На рис. 2 представлен изготовленный по данной технологии макет ЗС.

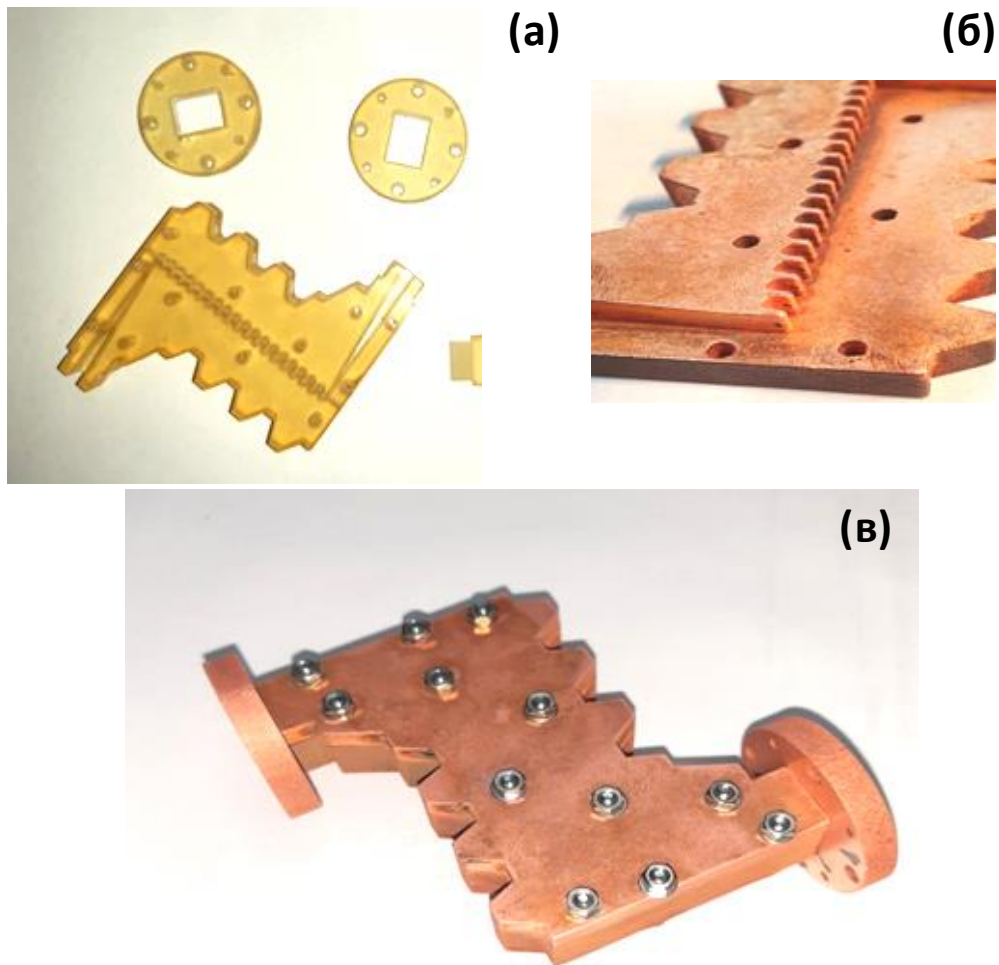


Рис. 2. Внешний вид исходного макета из фотополимера (а), макета после осуществления металлизации (б) и макета ЗС готового к измерениям (в).

С помощью векторного анализатора цепей были проведены измерения коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВн) и коэффициента затухания готового макета (рис.3). Видно, что экспериментальная кривая КСВн практически повторяет огибающую расчетной характеристики во всем диапазоне измерений. Однако измеренная величина затухания получилась больше расчётной на 4-5 дБ.

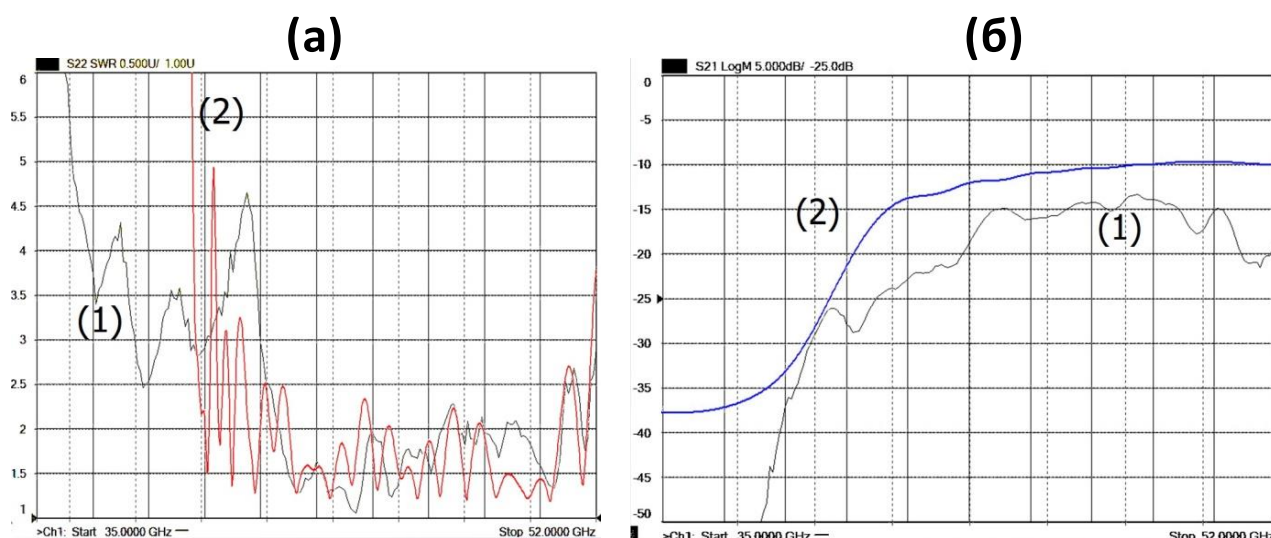


Рис. 3. Экспериментальные (1) и расчетные (2) характеристики КСВн (а) и затухания (б) ЗС.

Заключение

При разработке ЛБВ миллиметрового диапазона большое значение имеет правильный выбор параметров замедляющей системы, обеспечивающей оптимальные условия взаимодействия электромагнитной волны с электронным потоком. Возможность оперативного создания макета ЗС без необходимости создания полного комплекта конструкторской и технологической документации позволяет существенно ускорить процесс разработки. Вместе с тем, полученное расхождение величины затухания демонстрирует необходимость дальнейшего совершенствования технологии для снижения величины неоднородности поверхности.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН FFUF-2024-0027.

Литература

1. Алехин Ю.В. и др. Сверхширокополосные лампы бегущей волны. Исследование в СВЧ-КВЧ и ТГЧ диапазонах. Внедрение в производство. – 2015.
2. Paoloni C. et al. Millimeter wave traveling wave tubes for the 21st century //Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 2021. – Т. 35. – №. 5. – С. 567-603. <https://doi.org/10.1080/09205071.2020.1848643>
3. Богомолова Е.А. и др. ЛБВ миллиметрового и терагерцового диапазонов: особенности конструкций замедляющих систем и технологий изготовления //Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. – 2020. – №. 3. – С. 66-83.
4. Торгашов Р.А. и др. Разработка и исследование замедляющей системы для миниатюрной многолучевой лампы бегущей волны W-диапазона //Radiotekhnika i elektronika. – 2023. – Т. 68. – №. 10. – С. 992-997. <https://doi.org/10.31857/S0033849423100182>
5. Sence J. et al. Plastic and metal additive manufacturing technologies for microwave passive components up to Ka band //International Journal of Microwave and Wireless Technologies. – 2018. – Т. 10. – №. 7. – С. 772-782. <https://doi.org/10.1017/S1759078717001465>
6. Verploegh S. et al. Properties of 50–110-GHz waveguide components fabricated by metal additive manufacturing //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2017. – Т. 65. – №. 12. – С. 5144-5153. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2771446>
7. Проявин М.Д. и др. Разработка электродинамических компонентов для приборов СВЧ электроники с использованием технологии фотополимерной трёхмерной печати с химической металлизацией поверхности //Известия вузов. Радиофизика. – 2020. – Т. 63. – №. 5-6.
8. Стародубов А.В. и др. Учредители: Российская академия наук, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН //РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА. – 2022. – Т. 67. – №. 10. – С. 935-945. <https://doi.org/10.31857/S0033849422100126>.

9. Иванов А.А. Исследование возможности улучшения выходных характеристик ламп бегущей волны W-диапазона //Известия вузов. Радиофизика. – 2016. – Т. 59. – №. 8-9.
10. D’Auria M. et al. 3-D printed metal-pipe rectangular waveguides //IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – 2015. – Т. 5. – №. 9. – С. 1339-1349. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2015.2462130>
11. Chan K.Y., Ramer R., Sorrentino R. Low-cost Ku-band waveguide devices using 3-D printing and liquid metal filling //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2018. – Т. 66. – №. 9. – С. 3993-4001. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2018.2851573>
12. Sigmund P. Mechanisms and theory of physical sputtering by particle impact //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 1987. – Т. 27. – №. 1. – С. 1-20. [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(87\)90004-8](https://doi.org/10.1016/0168-583X(87)90004-8)
13. Шпак И.Е. Электролиты для гальванического меднения. – М. : Электроника, 1989.
14. Свиридов В.В. (ред.). Химическое осаждение металлов из водных растворов. – Университетское, 1987.
15. Dionigi M. et al. Simple high-performance metal-plating procedure for stereolithographically 3-D-printed waveguide components //IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2017. – Т. 27. – №. 11. – С. 953-955. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2017.2750090>

Для цитирования:

Иванов А.А., Морозкин М.В., Орловский А.А., Проявин М.Д., Розенталь Р.М., Шмелёв М.Ю. Применение аддитивных технологий для изготовления макета замедляющей системы лампы бегущей волны миллиметрового диапазона. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.5.7>