

Широкополосные окна для СВЧ-излучения с малым отражением, изготовленные при помощи 3D-печати

Д.И. Соболев, М.Д. Проявин, В.В. Паршин, В.И. Белоусов, А.В. Рябов

Институт прикладной физики РАН

Аннотация: в данной работе исследовалась возможность использования технологий 3D-печати для изготовления окон для СВЧ-излучения со специальной формой поверхности, обеспечивающей малые потери на отражение в диапазоне частот до 200 ГГц. Было достигнуто снижение отражения более 10 дБ в полосе несколько десятков ГГц.

Ключевые слова: СВЧ-излучение, диэлектрические свойства материалов, барьерные окна, аддитивные технологии

1. Введение

Развитие технологии 3D-печати имеет большой потенциал для промышленности, науки и техники. Существует ряд задач, которые трудно или практически невозможно реализовать с помощью традиционных методов механической обработки. В частности, 3D-печать диэлектрическими материалами является чрезвычайно удобным и дешевым инструментом для создания прототипов компонентов СВЧ-электроники. Для успешного применения необходимо исследовать диэлектрические свойства применяемых материалов, а также выбрать методы печати, обеспечивающие достаточную точность для выбранного частотного диапазона.

На данный момент существует несколько существенно отличающихся друг от друга технологий 3D-печати, каждая из которых имеет свои особенности и использует свои типы полимеров. Технология моделирования методом наплавления (FDM) широко доступна и проста в эксплуатации. Процесс послойного осаждения пластика также обуславливает широкий спектр используемых материалов. Однако данный вид 3D-печати характеризуется низкой точностью (до 100 микрон) и достаточно выраженной слоистостью, что ограничивает частотный диапазон применения. Кроме того, разрешение печати в поперечной плоскости ограничено диаметром используемого сопла и качеством выравнивания. Технология селективного лазерного спекания (SLS), ввиду схожего процесса плавления пластика, также имеет широкий выбор материалов. Однако, по сравнению с FDM, она обладает более высокой точностью и разрешением: толщина слоя составляет несколько десятков микрон, разрешение в поперечной плоскости примерно равно размеру гранул используемого пластика. Лидерами по качеству печати, безусловно, являются фотополимерные 3D-принтеры (SLA), единственным недостатком которых, на данном этапе, является ограниченный выбор материалов для печати и их схожесть по химическому составу.

В настоящее время на рынке представлено огромное количество различных материалов для 3D-печати, и их число постоянно растет. К сожалению, производители обычно не предоставляют информацию о диэлектрических характеристиках материалов, особенно в микроволновой и терагерцовой областях. Поэтому актуальной задачей является изучение этих свойств. В простейшем варианте исследуются свойства образцов, выполненных в виде вставок, полностью заполняющих поперечное сечение металлического прямоугольного одномодового волновода. Диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь могут быть получены из коэффициентов отражения и пропускания, полученных в результате экспериментов. В качестве

дополнительного метода исследования было также измерено влияние вставок из исследуемых материалов на добротность квазиоптического двухзеркального резонатора [1].

Одним из перспективных применений является изготовление компонентов СВЧ-техники со сложной формой поверхности, обеспечивающей значительное снижение коэффициента отражения проходящего излучения. Свойства используемых материалов ограничивают потенциальные приложения мощностью порядка 100 Вт. Таким приложением является спектроскопия, которая требует как широкополосных перестраиваемых источников микроволнового излучения, так и входных окон в рабочую камеру спектрометра с низким коэффициентом отражения на рабочих частотах, соответствующих окнам прозрачности атмосферы. Актуальной задачей является создание выходных окон с низким коэффициентом отражения для гиротронов, предназначенных для спектроскопии [2]. Другой пример – широкополосные элементы геофизических приборов. В случае широкополосных радиометров для исследования прозрачности атмосферы требуются окна с низким коэффициентом отражения в различных частотных диапазонах с характерной шириной перестройки 20 ГГц [3]. Исследованию и разработке таких окон была посвящена настоящая работа.

2. Исследование диэлектрических характеристик материалов

В процессе изучения свойств материалов использовались два метода, позволяющие проводить независимые эксперименты для повышения достоверности результатов. В первом методе тангенс потерь и диэлектрическая проницаемость рассчитывались из экспериментально полученных частотных зависимостей коэффициентов отражения и пропускания микроволнового излучения в прямоугольном волноводе со вставкой из исследуемых диэлектриков. Схема установки показана на рис. 1. Измерения проводились в Ка-диапазоне частот (26-40 ГГц), размеры исследуемого образца составляли 7,2 мм на 3,4 мм на 100 мм.

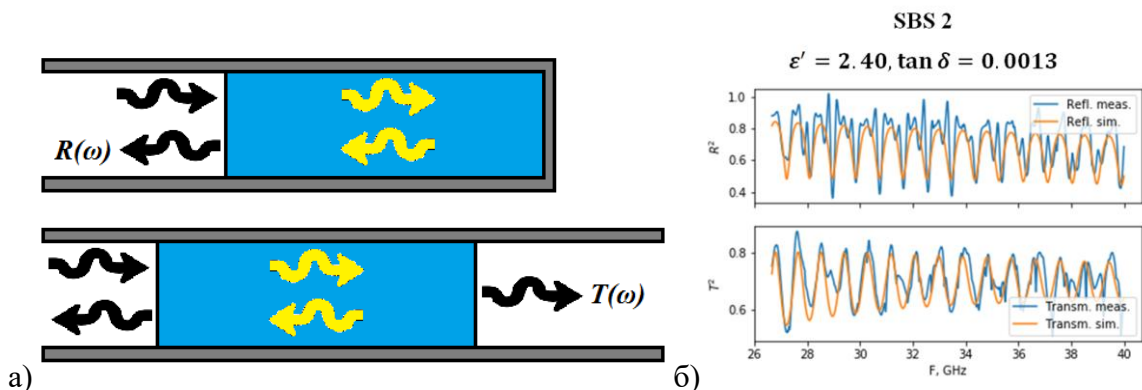


Рисунок 1. а) схема измерений исследуемого образца – коэффициенты отражения и прохождения; б) сравнение результатов измерений (синие кривые) с данными моделирования (оранжевые кривые) для пластика SBS в диапазоне частот 26-40 ГГц.

Второй метод измерения свойств диэлектриков заключался в помещении образцов в виде дисков в пространство между зеркалами высокодобротного открытого двухзеркального резонатора. Измеряя добротность пустой полости и полости с диэлектрической вставкой, можно с высокой точностью измерить свойства исследуемого образца.

В ходе экспериментов были исследованы полимерные образцы, напечатанные по различным технологиям. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Диэлектрические свойства образцов

Материал	Технология печати	Re ϵ	tg δ
Полиэтилентерефталат-гликоль (PETG) 1	FDM	2,31	$1,5 \cdot 10^{-3}$
PETG 2	FDM	2,47	$1,6 \cdot 10^{-3}$
Полилактид (PLA)	FDM	2,27	$6,2 \cdot 10^{-3}$
Стирол-бутадиен-стирол сополимер (SBS) 1	FDM	2,22	$1,6 \cdot 10^{-3}$
SBS 2	FDM	2,40	$1,3 \cdot 10^{-3}$
Visijet SL Clear	SLA	1,8	$3,3 \cdot 10^{-2}$
Visijet SL Flex	SLA	1,8	$3,5 \cdot 10^{-2}$
Visijet SL Hi-Temp	SLA	1,8	$3,5 \cdot 10^{-2}$
Полиамид	SLS	1,7	$3,5 \cdot 10^{-3}$

Анализ экспериментальных данных показывает, что SBS является лучшим из исследованных материалов. Однако отметим, что этот вид пластика подходит только для принтеров технологии FDM, точность печати которых заметно уступает другим. Минимальный слой печати составлял 100 мкм, а допуск по осям X и Y – около 300 мкм. Кроме того, при печати мелкомасштабных элементов поверхности их минимально возможный размер ограничен диаметром сопла, обычно в диапазоне 0,2-0,4 мм, что затрудняет изготовление деталей для высокочастотных применений. Для более точных методов SLA (MJP) и SLS лучшими из протестированных вариантов оказались Visijet SL Clear и Polyamid соответственно, которые имеют в несколько раз больший тангенс угла потерь (в случае Visijet SL Clear примерно на порядок). Однако при толщине детали в несколько миллиметров такие значения также являются удовлетворительными. Стоит также отметить, что для приложений с уровнем мощности в несколько ватт также могут быть использованы различные фотополимеры, имеющие на порядок большие потери, чем полиамид, но в то же время позволяющие достичь гораздо более высокой точности печати и качества поверхности.

3. Характеристики отражения барьерных окон

Для исследования формы поверхности окна, обеспечивающей наименьшее отражение, мы выбрали печать методом SLS из полиамида, так как этот материал обладает наименьшими потерями в наших экспериментах, что позволяет изготавливать мелкомасштабные структуры, пригодные для частот в несколько сотен ГГц. Первый вариант формы поверхности – покрытие плоскости пирамидами с размером основания меньше длины волны и острым углом при вершине [4]. Преимуществами такой поверхности является слабая зависимость коэффициента отражения от частоты и поляризации падающего излучения. Второй вариант – одномерная периодическая гофрировка специальной формы, предложенной в [5]. Этот профиль оптимизирован для минимизации отражения одной поляризации (направление электрического поля ортогонально направлению канавок) и диапазона частот 60-160 ГГц. Форма канавок и численный график частотной зависимости коэффициента отражения планарного диэлектрического полупространства с различными типами гофрировок показаны на рис. 2.

Были напечатаны три диска (рис. 5а) – первый имеет плоскую поверхность с обеих сторон, два других имеют гофрировку исследуемой формы также с обеих сторон. Сторона основания пирамид была выбрана равной 1 мм, а высота 2 мм. Период и глубина одномерной гофрировки составляют 2 мм и 2,5 мм, соответственно.

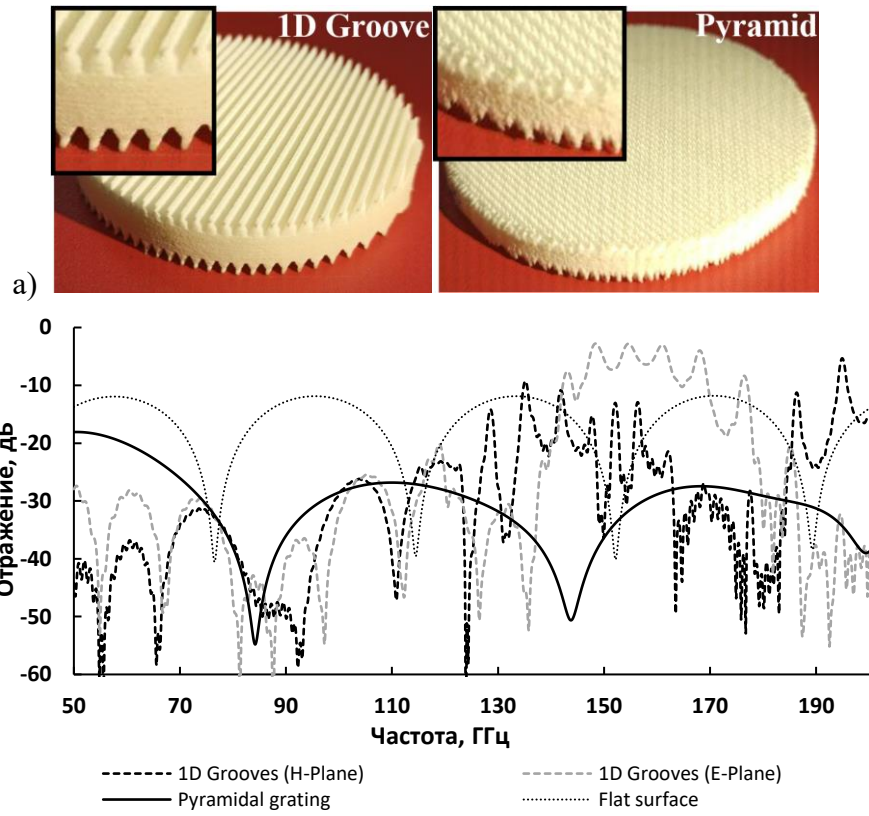


Рисунок 2. а) фотографии напечатанных прототипов барьерных окон; б) результаты численного моделирования отражения от дисков с различной формой поверхности.

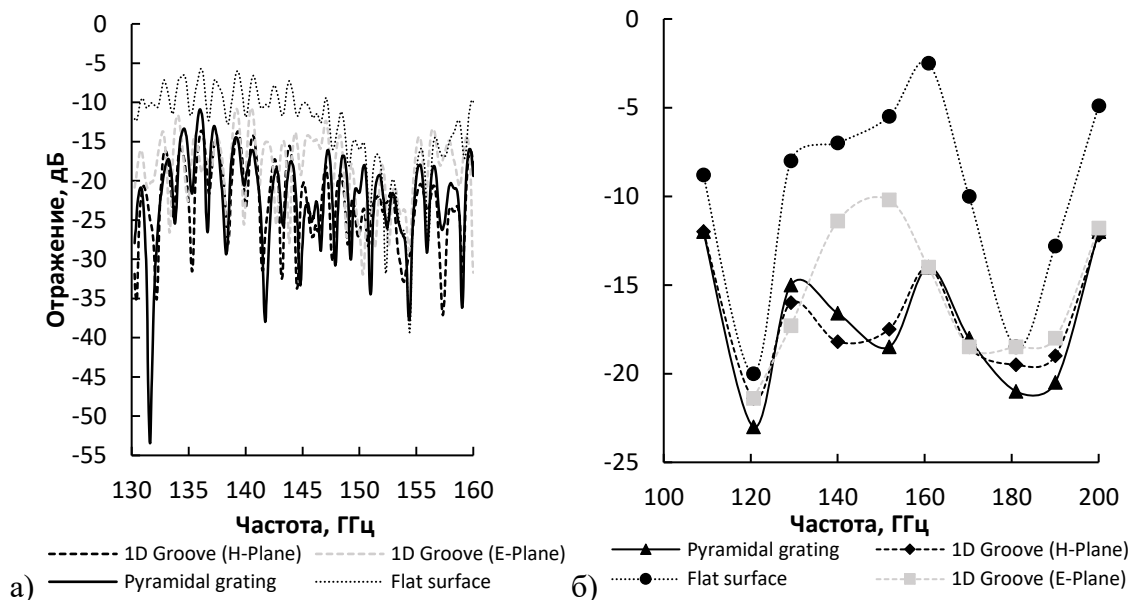


Рисунок 3. а) фотографии напечатанных прототипов барьерных окон; б) результаты численного моделирования отражения от дисков с различной формой поверхности.

Коэффициенты отражения были измерены на двух установках – в квазиоптическом резонаторе в диапазоне 110-200 ГГц с шагом измерения 10 ГГц, а также в панораме в диапазоне 130-160 ГГц с шагом 30 МГц. Диски располагались после гофрированного рупора, обеспечивающего преобразование моды прямоугольного волновода в гауссов волновой пучок с плоским фазовым фронтом. Диск с одномерной гофрировкой поверхности был измерен для обеих ортогональных

линейных поляризации. Результаты измерений показаны на рис. 3. Из графиков видно, что оба диска со специальной формой поверхности обеспечивают снижение отражения по крайней мере на 10 дБ в широкой полосе частот. Отметим, что вариант с пирамидами более выгоден, если требуется использование излучения произвольной поляризации, а вариант с одномерным гофром – при фиксированной линейной поляризации. Для сравнения был также изготовлен диск с периодическими глухими отверстиями с обеих сторон. Глубина, радиус и период отверстий соответствуют четвертьволновому просветлению с центральной частотой 125 ГГц. Результаты измерений отражения показаны на рис. 4.

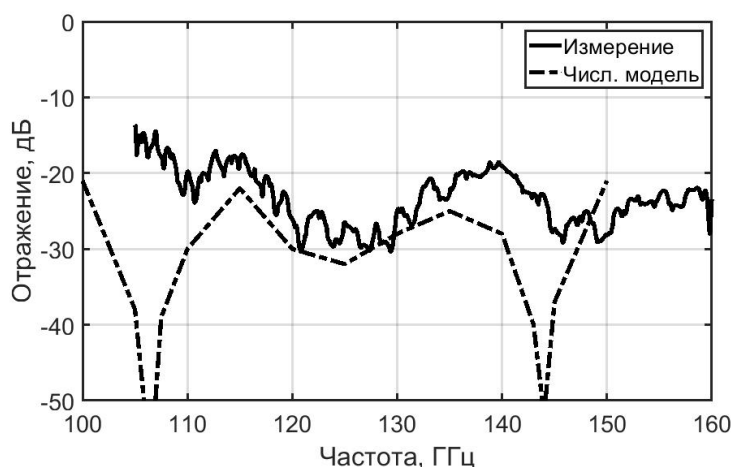


Рисунок 4. Отражение от тefлонового диска с периодическими отверстиями, рассчитанными на просветление с центральной частотой 125 ГГц.

3. Заключение

Исследованы диэлектрические характеристики материалов для 3D-печати компонентов СВЧ-приборов, работающих на частотах от десятков до сотен ГГц. Изготовлены и исследованы прототипы барьерных окон с формой поверхности, специально оптимизированной для обеспечения низкого отражения в широком диапазоне частот. Напечатанные окна обеспечивают снижение коэффициента отражения на 10 дБ и более в полосе несколько десятков ГГц, что позволяет использовать их в микроволновых устройствах, требующих приема/передачи сигнала в широком диапазоне частот.

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда (проект № 21-19-00877)**.

Список литературы

1. Vlasov S.N. et al. On permittivity measurement by a resonance method // *Radiophysics and Quantum Electronics*. – 1996. – Т. 39. – №. 5. – С. 410–415.
2. Manuilov V.N. et al. Design of a Second Harmonic Double-Beam Continuous Wave Gyrotron with Operating Frequency of 0.79 THz // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. – 2015. – Т. 36. – №. 12. – С. 1164–1175.
3. Nosov V.I. et al. A dual-wave atmosphere transparency radiometer of the millimeter wave range // *Instruments and Experimental Techniques*. – 2016. – Т. 59. – №. 3. – С. 374–380.
4. Ma J. Y. L., Robinson L. C. Night Moth Eye Window for the Millimetre and Sub-millimetre Wave Region // *Optica Acta: International Journal of Optics*. – 1983. – Т. 30. – №. 12. – С. 1685–1695.
5. Vlasov S.N. et al. Wideband windows for millimeter- and submillimeter-wave vacuum devices // *Radiophysics and Quantum Electronics*. – 2020. – Т. 63. – №. 2. – С. 115–123