

Технология изготовления металл-диэлектрических фотонных кристаллов для ТГц и миллиметрового диапазонов методом 3D-печати

А.Н. Агафонов¹, А.С. Решетников¹, И.А. Цибизов², А.А. Шахмин²

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

²ООО «Гидекс», Домостроительная 16, Санкт-Петербург, Россия, 194292

Аннотация. В работе рассмотрена возможность использования технологий 3D печати при изготовлении фотонно-кристаллических структур ТГц и миллиметрового диапазонов. Предложен и исследован подход, заключающийся в изготовлении полимерной фотонно-кристаллической матрицы методом 3D-печати, основанной на фотополимеризации, с последующей заливкой пустот матрицы легкоплавким хорошо отражающим в терагерцовом диапазоне материалом (использовался сплав Вуда).

1. Введение

Появление источников терагерцового излучения [1,2] и приборов [3], работающих в терагерцовом диапазоне, поставило задачу формирования элементной базы для управления характеристиками терагерцового излучения. В работе предложен метод создания пассивных элементов терагерцовой микрооптики на основе аддитивных технологий.

Технология 3D печати позволяет формировать двух- и трехмерные фотонно-кристаллические структуры, которые было бы практически невозможно реализовать, например, известной технологией литографии. Отметим, что технологии интерференционной литографии и другие “групповые технологии” применяемые для создания фотонно-кристаллических структур, в частности ИК-диапазона, обладают ограничениями, связанными с невозможностью изготовления с их помощью непериодических фотонных структур с произвольной топологией, в частности фотонно-квазикристаллических структур, в то время, как последние имеют ряд привлекательных свойств с точки зрения управления спектральными характеристиками перед периодическими фотонно-кристаллическими структурами. Технологии 3D печати свободны от этого ограничения и в принципе позволяют создавать почти любую заданную трехмерную топологию.

Вместе с тем остаются нерешенными следующие проблемы, связанные с реализацией фотонно-кристаллических элементов с помощью 3D печати:

1) создание “пропускающих” фотонно-кристаллических структур (т.е. действие которых основано на разности показателей преломления оптических материалов узлов фотонно-кристаллической решетки и заполнения) требует использования материалов с высоким значением показателя преломления – с этим связаны усилия исследователей по созданию полимерных композитов с включением оптически плотных частиц. Включение оптически плотных частиц (обычно оксидов) часто приводит к разрушению полимерной структуры.

Кроме того, получившийся композит должен обладать хорошим пропусканием в ТГц-диапазоне. Работы по созданию “пропускающих” фотонных кристаллов с помощью 3D-печати в основном посвящены либо созданию волокон с фотонно-кристаллическим сердечником, либо применению порошков оксидов для изготовления фотонно-кристаллических структур.

2) не определены границы диапазонов длин волн, в которых применимы технологии 3D-печати для изготовления фотонно-кристаллических структур, исходя из разрешения принтера. Разрешение современных 3D-принтеров варьируется в достаточно широком диапазоне. Технология 3D печати, действие которой основано на использовании, эффекта многофотонной полимеризации обладает разрешением 150-200 нм, что вполне достаточно для реализации многоуровневого микрорельефа и трехмерных оптических структур не только терагерцового диапазона, но и более коротковолнового оптического. Однако, использование многофотонной литографии ограничено скоростью записи и, как правило, применяется для создания элементов фотоники небольших размеров. В тоже время, задачи практического использования терагерцового диапазона требует создания элементов с относительно большими апертурами (диаметр апертуры дифракционного оптического элемента, применяемого в работе [4] для формирования вращающегося пучка составляла 100 мкм). Поэтому в данной работе исследованы подходы к созданию двух и трехмерных фотонно-кристаллических структур, основанные на использовании “традиционной” 3D-печати без использования эффекта многофотонной полимеризации.

Для создания двумерных металл-диэлектрических фотонно-кристаллических устройств (частотные фильтры, волноводы, делители пучка, разветвители) длинноволнового терагерцового диапазона (1 -3 мм) в данной работе впервые был предложен подход, заключающийся в изготовлении полимерной фотонно-кристаллической матрицы методом 3D-печати с последующим обращением матрицы легкоплавким и хорошо отражающим в терагерцовом диапазоне материалом -сплавом Вуда.

2. Выбор метода 3D печати

Согласно [5], аддитивная технология – процесс объединения материала с целью создания объекта из модели, как правило, слой за слоем, в отличие от субтрактивных производственных технологий, подразумевающих удаление избыточного материала.

Обычно под аддитивными технологиями понимают различные варианты 3d печати, однако, при изготовлении оптических микроструктур необходимо учитывать и методы, обычно не называемые 3d печатью, в частности, методы, основанные на гальваническом осаждении материала или комплексные методы, включающие в себя как аддитивные, так и субтрактивные этапы, например, LIGA и SIGA технологии.

В настоящее время существует большое многообразие вариантов 3d печати, обзору которых посвящено достаточно большое количество работ. При изготовлении оптических структур аддитивными технологиями необходимо учитывать ограничения, которые можно, можно отнести к следующим типам:

1. Точность изготовления (заданный уровень шероховатости поверхностей, погрешности формы элемента, погрешности позиционирования, однородности материала по объему и т.д.)

2. Специфические требования к материалу оптических структур (заданные оптические, механические, теплофизические свойства и т.д.)

В некоторых случаях необходимо учитывать требования к скорости и стоимости изготовления единичного образца.

Таким образом, требования, предъявляемые к оптическим микроструктурам для управления характеристиками излучения терагерцового диапазона (в частности, фотонных кристаллов и квазикристаллов и фотоннокристаллических волноводных структур) существенно ограничивают круг технологий, пригодных для их изготовления.

Следует отметить, что существует достаточно большое количество аддитивных технологий, позволяющих формировать структуры с микронной и субмикронной точностью, что является избыточным для всего ТГц диапазона длин волн. Обзор такого рода технологий приведен в [6]. Как правило, такие технологии достаточно сложны и требуют дорогостоящего оборудования,

что делает их применение при коммерческом производстве оптических структур ТГц диапазона нецелесообразным. В тоже время некоторые из наиболее распространенных технологий 3d печати обеспечивают точности, сопоставимые с требуемыми и возможность их использования требует дополнительного изучения.

Наиболее распространенные методы 3d печати базируются на следующих процессах [7]:

- Фотополимеризация (Vat photopolymerization). При фотополимеризации жидкий фотополимер в емкости селективно отверждается актиничным излучением.
- Струйное нанесение (Material jetting). При струйном нанесении материала печатающая головка избирательно наносит материал на необходимые участки. Как правило, наносятся фотополимеры с вторичными материалами, используемыми для создания опорных структур во время процесса сборки. Нанесенная структура отверждается с помощью УФ излучения.
- Экструзия (Material extrusion). При экструзии материала термопластичный материал продавливается через нагретое сопло и осаждается на платформе.
- Плавление порошков (Powder bed fusion). При плавлении в порошковом слое частицы материала (например, пластика, металла) избирательно сплавляются вместе с использованием источника тепловой энергии, например, лазера.
- Струйная печать связующим веществом (Binder jetting). Частицы материала избирательно соединяются вместе с помощью жидкого связующего агента (например, клея).
- Листовая ламинация (Sheet lamination). При листовом ламинировании тонкие листы материала (например, пластика или металла) соединяют вместе, используя различные способы (клей, ультразвуковая сварка и т.д.) для формирования объекта. Каждый новый лист материала размещается поверх предыдущих слоев. Лазер или нож используется для обрезки границы вокруг нужной части, а ненужный материал удаляется.
- Осаждение материала при помощи направленного энергетического воздействия (Directed energy deposition). Сфокусированная тепловая энергия используется для локального плавления материала (как правило, металла) при его нанесении.

Наиболее распространенная в потребительском сегменте технология FDM ограничена точностью механической системы позиционирования и диаметром сопла, что существенно ограничивает возможность ее использования при производстве оптических структур ТГц диапазона.

Технологии печати металлом, как правило также имеют ограничения связанные с системой позиционирования печатающей головки и диаметром используемой проволоки, а в случае порошковой печати – с наличием достаточно большой зоны неполного спекания (шириной до 0,3 мм) [7], что также ограничивает их применимость.

Таким образом из приведенных методов печати потенциально достаточной для изготовления оптических структур ТГц диапазона точностью обладают следующие методы SLA и DLP, использующие фотополимеризацию. При этом разрешение по вертикальной оси обусловлено свойствами используемого полимера и точностью механической системы позиционирования столика (до 5 мкм), а по плоскости – разрешающей способностью оптической системы и рассеянием излучения в слое полимера (до 30 мкм).

3. Изготовление тестовых структур

В данной работе предлагается заполнять пустоты изготовленной методами 3d печати полимерной матрицы металлами или сплавами. Для изготовления тестовых структур методом DLP использовался принтер Wanhao Duplicator 7 с фотополимером Wanhao Resin, а для печати методом SLA – Formlabs Form2 с фотополимером Formlabs Clear.

Основные параметры использованного оборудования приведены в таблице 1.

В качестве металлического сплава для заполнения пустот в диэлектрической матрице был использован сплав Вуда. Выбор этого сплава обусловлен, в первую очередь, низкой температурой плавления, что позволяет использовать широкий спектр полимеров с температурой плавления выше 70С в качестве диэлектрических матриц.

Для измерения спектров отражения и пропускания (в случае полимера) использовался импульсный терагерцовый (ТГц) спектрометр Tera K-8 производства компании Menlo Systems GmbH.

Таблица 1. Основные параметры использованных 3d принтеров.

Параметр	Form2	Wanhao Duplicator 7
Разрешение по плоскости XY	140 мкм	400 мкм
Минимальная толщина слоя	25 мкм	35 мкм
Область построения	14.5 × 14.5 × 17.5 см	12 × 6.8 × 20 см

Измерения на отражение обоих образцов проводились под углом 45 градусов к источнику излучения. Для измерения фона использовалось золотое зеркало (золото чистое без покрытия; толщина слоя до 3000Å; подложка из кварцевого стекла). И образцы, и золотое зеркало устанавливались в один и тот же держатель, без его перестройки в процессе измерений. Выполнялось три последовательных измерения фон-образец. Далее сигнал от образца делился на фон и умножался на 0,985 для учета отражения от золота. Образец Wanhao измерялся на пропускание под нормальным углом падения луча. Образец устанавливался в перетяжку (фокус) оптической системы линз. Выполнялось три последовательных измерения фон-образец. Далее сигнал от образца делился на фон.

Пример спектров отражения и пропускания одного из фотополимеров (Wanhao) приведен на рисунках 1 и 2.

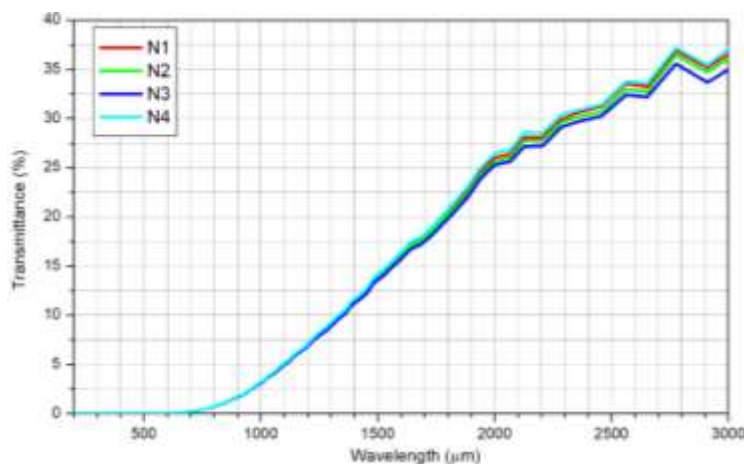


Рисунок 1. Спектр пропускания фотополимера Wanhao Resin.

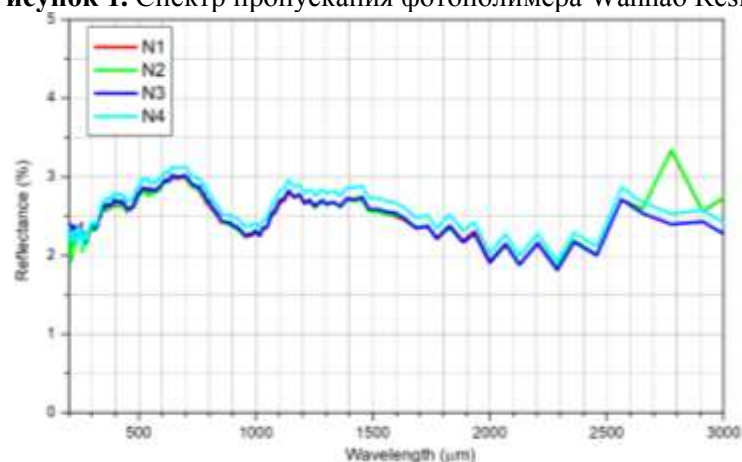


Рисунок 2. Спектр отражения фотополимера Wanhao Resin.

Спектр отражения сплава Вуда приведен на рисунке 3.

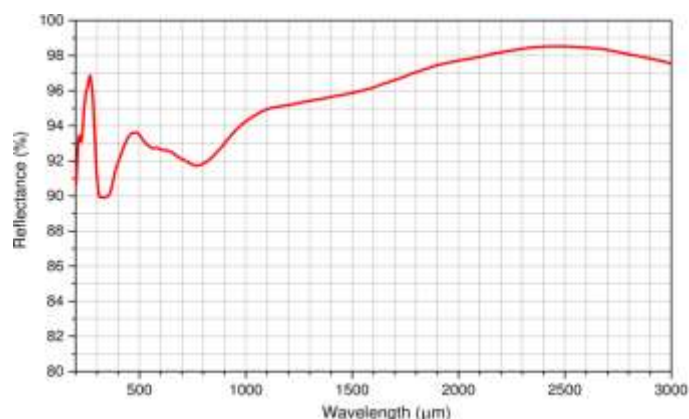


Рисунок 3. Спектр отражения сплава Вуда.

Отметим высокую отражательную способность сплава Вуда в длинноволновой области терагерцового спектра, что вместе с его легкоплавкостью (температура плавления сплава Вуда около 70С) позволяет рассчитывать на его использование в качестве отражающих элементов периодической металлдиэлектрической оптической структуры терагерцового диапазона, изготовленной методом обращения полимерной фотонно-кристаллической матрицы, изготовленной с помощью 3D-печати. Оптические свойства полимера Wanhao позволяют рассчитывать на его использование в качестве диэлектрического наполнителя (после заполнения пустот сплавом Вуда) в случае, если не требуется высокой энергетической эффективности волноводного устройства. Если требуется высокая энергетическая эффективность устройства, изготовленная двумерная периодическая структура в некоторых случаях может быть извлечена из полимерной матрицы.

В качестве тестовых моделей использовались массивы отверстий диаметрами 0,8 мм, 1,2 мм, 1,5 мм, 2 мм в квадратных пластинах 15x15 мм толщиной 4 мм. Разработка 3d моделей осуществлялась в пакете Компас 3D, после чего осуществлялся экспорт в формат STL для последующей печати.

Следует отметить, что конвертирование в STL формат вносит некоторую погрешность в геометрию модели, в частности, сечения отверстий описываются многогранниками. Уменьшение влияния такого рода дефектов представляет собой отдельную задачу, которая частично описана в [8]

Результаты печати на принтере Wanhao оказались неудовлетворительными, при диаметре отверстий менее 2-х мм размеры отверстий существенно искажались за счет относительно толстого слоя фотополимера, сравнительно малой разрешающей способности и влияния эффекта близости.

Пример результатов печати на принтере Form2 приведен на рисунке 4.

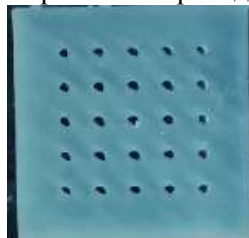


Рисунок 4. Внешний вид образцов после печати на принтере Form2. Диаметр отверстий 1,2 мм.

Укрупненные изображения отверстий приведены на рисунках 5 и 6.

Следует отметить, что практически все отверстия с диаметром 0,8 мм имеют дефекты, подобные приведенному на рис. 8в, что говорит о необходимости усовершенствования техники печати или перехода на более точное оборудование при создании отверстий такого или меньшего диаметра. Влияние эффекта близости также заметно на образце с диаметром 1,2 мм. Измеренное значение диаметра отверстий оказалось равным 0,9 мм.

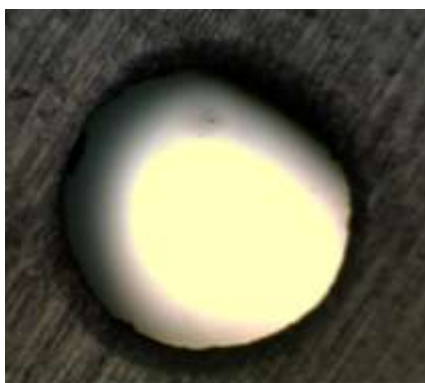


Рисунок 5. Единичное отверстие диаметром 1,5 мм.



Рисунок 6. Единичное отверстие диаметром 0,8 мм.

После создания системы отверстий проводилось их заполнение расплавленным сплавом Вуда. Заполнение отверстий осуществлялось методом окунания в расплав при температуре около 80С. Специальные техники литья не применялись. Заполнение отверстий диаметром 0,8 мм не проводилось в связи с неудовлетворительным качеством образца после 3d печати. После заполнения отверстий расплавом, температура образцов снижалась до комнатной и проводилось механическое удаление остатков сплава с поверхности образцов. Внешний вид образцов после механического удаления излишков сплава Вуда приведен на рисунках 7 и 8.



Рисунок 7. Внешний вид образцов после заполнения отверстий сплавом Вуда. Диаметр отверстий 2 мм.



Рисунок 8. Внешний вид образцов после заполнения отверстий сплавом Вуда. Диаметр отверстий 1,2 мм.

На торцах образцов видно, что сплав прошел на всю глубину отверстий. Изображения единичных отверстий после заполнения сплавом Вуда приведены на рисунках 10а,10б

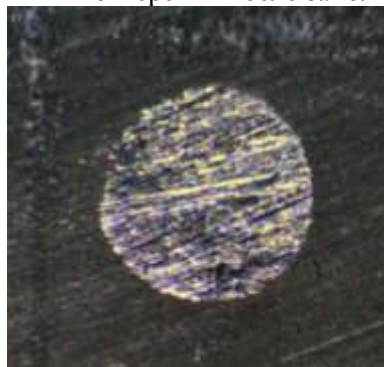


Рисунок 9. Внешний вид единичного отверстия после заполнения сплавом Вуда. Диаметр отверстия 2 мм.



Рисунок 10. Внешний вид единичного отверстия с дефектом формы на границе образца (в объеме отверстие имеет цилиндрическую форму) после заполнения сплавом Вуда. Диаметр отверстия 1,2 мм.

Несмотря на наличие такого рода дефектов, сплав полностью заполняет свободное пространство в отверстиях. Также, как говорилось выше, наличие эффекта близости приводит к уменьшению диаметра отверстия относительно проектного, т.е. в эксперименте проектному отверстию 1,2 мм соответствовало реальное с диаметром около 0,9 мм.

4. Заключение

В работе предложен метод изготовления фотонно-кристаллических структур ТГц и миллиметрового диапазонов с использованием методов 3D печати, экспериментальным путем показана возможность изготовления таких структур на базе полимерных матриц, полученных методами STL печати с последующим заполнением пустот сплавом Вуда.

Совокупность полученных результатов говорит о потенциальной возможности использования подобных методов для изготовления фотонно-кристаллических структур с отверстиями диаметром до 0,5 мм, что, однако требует дополнительной экспериментальной проверки.

5. Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-29-03303 мк «Разработка методов компьютерного проектирования и изготовления с помощью технологий аддитивного производства объемных элементов микрооптики терагерцового диапазона».

6. Литература

- [1] Knyazev, B.A. Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements / B.A. Knyazev, G.N. Kulipanov, N.A. Vinokurov // *Measurement Science and Technology*. – 2010. – Vol. 21. – P. 13.
- [2] Glyavin, M.Yu. Development and applications of THz gyrotrons // *EPJ Web of Conferences*. – 2017. – Vol. 149. – P. 01008.
- [3] Lee, Y.-S. *Principles of Terahertz Science and Technology* – Springer, 2009.
- [4] Pavelyev, V.S. Transmissive diffractive microoptics for high-power THz laser radiation / V.S. Pavelyev, B.O. Volodkin, K.N. Tukmakov, B.A. Knyazev, Yu.Yu. Choporova // *AIP Conference Proceedings*. – 2018. – Vol. 1989. – P. 020025.
- [5] ASTM International, *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies – Designation: F2792 – 12a, 2013*. – P. 1.
- [6] Petrov, A.K. Main directions in the development of additive technologies for micron-resolution printing // *Inorganic Materials*. – 2017. – Vol. 53(12). – P. 1349-1359.
- [7] Wong, K.V. A Review of additive manufacturing / K.V. Wong, A. Hernandez // *ISRN Mechanical Engineering*. – 2012. – Vol. 2012. – P. 208760.
- [8] Agafonov, A.N. Elements of the Terahertz Power Reflective Optics with Free-Form Surfaces / A.N. Agafonov, B.A. Knyazev, V.S. Pavelev // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2019. – Vol. 55(2). – P. 148-153.

The technology of manufacturing metal-dielectric photonic crystals for THz and millimeter-wave ranges by 3D printing

A.N. Agafonov¹, A.S. Reshetnikov¹, I.A. Tzibizov², A.A. Shakhmin²

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

²Tydex LLC, Domostroitelnaya str. 16, St. Peterburg, Russia, 194292

Abstract. The method for the manufacture of two-dimensional and three-dimensional metal-dielectric photonic crystals for THz and millimeter-wave ranges using 3D printing is described. A feature of the proposed method is the use of SLA for making a dielectric base and casting a Wood's alloy to form conductive parts.