

**П. В. Сомов**

(ГГУ имени Ф. Скорины, Гомель)

Науч. рук. **И. В. Семченко**, д-р физ.-мат. наук,  
чл.-кор. НАН Беларуси

## **МЕТАМАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ДВОЙНЫХ СПИРАЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ 3D-ПЕЧАТИ**

Основной задачей создания метаматериалов на основе двойных спиралей является возможность достижения уникальных оптических и электромагнитных свойств полученных структур. Особый интерес к исследуемым структурам обусловлен их сильными киральными свойствами, а также резонансом излучения, достигаемым путём варьирования геометрических параметров спирали для различных длин волн.

Так как метаматериалы производятся с использованием 3D-печати, то необходимым шагом является создание трёхмерной модели исследуемой структуры [1]. Не каждая 3D модель подходит для 3D-печати, поэтому необходимо соблюдать следующие правила при создании модели:

– Геометрия модели должна быть замкнута, иначе 3D-принтер не сможет напечатать структуру правильно.

– У создаваемой структуры не должны присутствовать нависающие элементы, в противном случае без должной опоры (перемычки, рёбра жёсткости) структура разрушится.

– Полигоны не должны пересекаться/накладываться друг на друга, в противном случае возможен разрыв структуры.

– Модель должна располагаться на подложке для придания конструкции устойчивости.

– Печать модели должна происходить последовательно, иначе возможно разрушение материала образца.

Для автоматического соблюдения всех нюансов, указанных выше, существуют программы-слайсеры, которые позволяют ускорить и оптимизировать процесс подготовки к печати и осуществить управление работой 3D-принтера.

Пример модели метаматериала, которая пригодна для применения технологий 3D-печати, представлен ниже:



Рисунок 1 – модель элемента метаматериала в виде двойной спирали, пригодная для 3D-печати

Предварительные расчёты показывают, что исследуемый резонанс проявляется более выражено, если спираль состоит из полуцелого числа витков. В этом случае на полной длине спирали укладывается нечётное число полуволн, что позволяет получить более сильную отражённую волну.

Данная модель представляет из себя структуру, состоящую из  $N = 2,5$  витков, радиус витка спирали  $R = 4,79$  мм, шаг спирали  $h = 16,59$  мм, радиус поперечного сечения спиральной нити  $r = 1$  мм.

Варьируя параметры спирали, можно достигнуть резонанса падающего излучения при выполнении условия  $\lambda = P$ , где  $\lambda$  – длина волны падающего излучения,  $P$  – длина витка спирали [2].

От радиуса поперечного сечения нити зависит ширина резонансного диапазона.

Выбор рабочего диапазона длин волн ограничен техническими возможностями 3D-принтера. Спираль с радиусом витка менее 0,8 мм напечатать не удаётся, радиус поперечного сечения нити также ограничен минимальным возможным значением в 0,2 мм. Поэтому существенным недостатком применения 3D-печати является невозможность создания структур, пригодных для получения резонанса выше терагерцового диапазона ввиду ограниченности разрешающей способности самого принтера [3].

Для оптимизации процесса создания метаматериалов удобно печатать сразу массив, состоящий из двойных спиралей, так как для дальнейших исследований потребуются различные конфигурации метаматериалов, а массивы спиралей, в свою очередь, легко совмещаются друг с другом с помощью подложек.

В качестве примера такого массива ниже будет представлена структура, состоящая из подложки и множества двойных спиралей с разными геометрическими параметрами.

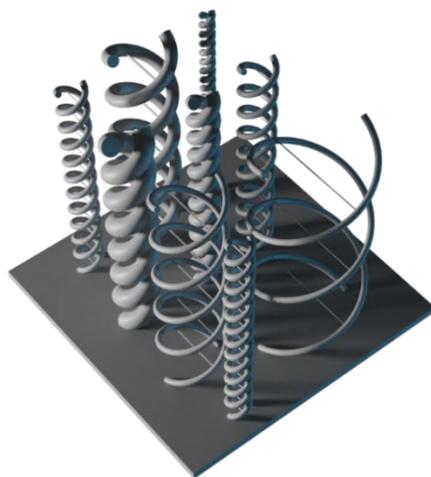


Рисунок 2 – модель массива спиралей с разными геометрическими параметрами

В ходе печати возможны следующие проблемы [4]:

– Повреждение геометрии структуры. Решением этой проблемы является настройка в программе-слайсере траектории движения сопла принтера.

– Неоднородность (пористость) структуры. После печати структуру необходимо погрузить в специальные ванны с приготовленным раствором для удаления шероховатостей (состав раствора варьируется в зависимости от материала, используемого для печати).

В данном исследовании в качестве материала печати используются пластик и фотополимер.

Напечатанные образцы получились достаточно шероховатыми, поэтому следующим шагом является избавление структуры полученных метаматериалов от неоднородности. Сделать это возможно различными способами: химическим травлением, осаждением металла, гальваническим травлением, погружением структуры в раствор. Было принято решение применить погружение структуры сначала в раствор меди (меднение структуры) для получения однородной структуры, а затем в раствор азотнокислого серебра (серебрение структуры) для получения высоких проводящих свойств метаматериала.

## Литература

1. Сомов, П. В. Киральные метаматериалы на основе волнистых поверхностей [Электронный ресурс]: X Респ. науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов (Гомель, 22 апреля 2021 года) : сборник материалов : в 2 ч. Ч. 1. / М-во образования Республики Беларусь, Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины ; редкол. : Д. Л. Коваленко (гл. ред.) [и др.]. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2021. – С. 194 – 196.

2. Семченко, И. В. Оптимальная форма спирали: равенство диэлектрической, магнитной и киральной восприимчивостей / И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. Л. Самофалов. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2009. – 36 с.

3. Large-Area 3D-Printed Chiral Metasurface Composed of Metal Helices [Electronic resource] / S. V. Golod, V. A. Seyfi, A. F. Buldygin, A. E. Gayduk, V. Ya. Prinz // Wiley Online Library, 2018 – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adom.201800424>. – Date of access: 22.03.2022.

4. Transformation of the polarization of electromagnetic waves by helical radiators [Electronic resource] / I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, A. L. Samofalov // SpringerLink, 2007. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1064226907080037>. – Date of access: 22.03.2022.

5. Manufacturing chiral electromagnetic metamaterials by directional rolling of strained heterofilms [Electronic resource] / E. V. Naumova, V. Ya. Prinz, S. V. Golod, V. A. Seleznev, R. A. Soots, V. V. Kubarev // ResearchGate, 2009 – URL: <https://www.researchgate.net/publication/230951758>. – Date of access: 22.03.2022.

**С. Т. Тарасевич, М. С. Лещик**

(ГрГУ имени Я. Купалы, Гродно)

Науч. рук. С. Д. Лещик, канд. техн. наук, доцент

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫХОДА МЕТАЛЛА ПО ТОКУ ИЗ ЭЛЕКТРОЛИТОВ С ДОБАВКОЙ НАНОЧАСТИЦ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ПЛАЗМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА**

**Введение.** При электроосаждении покрытий на детали машин-важны не только технологические режимы процесса, но и характеристики самих электролитов. Например, для электролитов хромирова-