**Исследования особенностей рассеяния и поглощения электромагнитных волн на искусственных моделях панцирей диатомовых водорослей**

***Решетова М.В.1,2,а, Цветинович Ю.1,б, Катыба Г.М.3,4,б, Боков К.А.5, Епифанов Е.О.2,в, Минаев Н.В.2,б, Горин Д.А.1,г***

*аСтудент, бк.ф.-м.н., васпирант, гд.х.н*

*1Сколковский институт науки и технологий, Фотоника и квантовые материалы, Москва, Россия*

*2Институт фотонных технологий, Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники, НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Троицк, Россия*

*3Институт Общей Физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия*

*4Институт Физики Твердого Тела им. А.Ю. Осипьяна РАН, Черноголовка, Россия*

*5ЦКП «Визуализация высокого разрешения» (Advanced Imaging Core Facility), Москва, Россия*

*E–mail: maruav@yandex.ru*

В природе диатомеи представляют из себя одноклеточные микроводоросли с панцирем из диоксида кремния. Диатомовые водоросли могут быть разных размеров (от 2 до 2000 мкм) и разной формы. Такие объекты изучаются, например, с целью создания биосенсоров и фильтрующих мембран [1], [2]. Для фотоники особый интерес представляют свойства панцирей диатомовых водорослей как сложных дифракционных элементов с эффектами объёмного резонанса для электромагнитных волн [3].

С использованием технология двухфотонной фемтосекундной полимеризации [4] и технологии цифровой светодиодной проекции на основе 3D-моделей оболочки диатомовой водоросли *Coscinodiscus oculus-iridis* были созданы объемные структуры. Размеры самых маленьких отверстий в мембране *Coscinodiscus oculus-iridis* порядка 30 нм. Такая периодическая структура приводит к явлениям дифракции при прохождении через неё видимого света. Технология двухфотонной полимеризации в нашей аппаратной реализации дает разрешения порядка пятисот нанометров, поэтому с её помощью можно создать увеличенную структуру, которую можно исследовать в частотных диапазонах отличных от видимого света. Технология цифровой светодиодной проекции позволяет создавать структуры с разрешением порядка 50 мкм. Таким образом, возможно создание моделей с различными масштабными коэффициентами. В работе проведено предварительное исследование спектральных свойств созданных структур в ИК диапазоне от 2,5 мкм до 20 мкм и в терагерцовом диапазоне от 0,1 ТГц до 2 ТГц.

Работа по печати на установке двухфотонной полимеризации проводилась с использованием второй гармоники фемтосекундного лазера ТЕМА-100 (Авеста, Россия): λ = 525 нм, длительность импульса t ~ 200 фс, частота повторения f = 70 МГц. Благодаря нелинейности процесса поглощения света в двухфотонных 3D оптических принтерах, область полимеризации (воксель) оказывается крайне компактной, что позволяет достигать микронного и субмикронного разрешения. Поскольку стояла задача создания структуры с максимально высоким разрешением, то для печати использовался иммерсионный объектив с высокой кратностью и большой числовой апертурой (100x/ NA 1,4 Oil). Такой объектив дает недостаточно большое рабочее поле, поэтому для создания протяженной структуры необходимо разбиение модели на небольшие элементы и затем печатать массив этих элементов.

Напечатанные с помощью технологии двухфотонной полимеризации структуры состояли из трех слоев с отверстиями с двумя характерными диаметрами 15 мкм и 2 мкм. Высота одного слоя составляла порядка 20 мкм, общий размер в полученной структуры в плоскости составил 300 мкм. В ходе работы измерены спектры поглощения материала и созданной из него структуры методом НПВО в ИК области. Создание такого искусственного биоподобного объекта обеспечивает возможность его повторного создания и позиционирования, что важно, например, при разработке биомиметических устройств.

Для измерений в терагерцовом диапазоне использовался терагерцовый импульсный спектрометр [5]. На основе спектров получен комплексный показатель преломления фотополимера в диапазоне от 0.1 ТГц до 2 ТГц. Полученные данные позволяют определить диапазоны прозрачности используемого полимера и сформировать требования к масштабу модели панциря диатомовой водоросли, при котором будет возможно пронаблюдать резонансные явления, проявляющиеся в дифракции, интерференции, и поглощения электромагнитных волн в искусственных биоподобных структурах. В дальнейшем планируется проведение измерений распределения интенсивности поля за сформированной структурой для конкретной длины волны падающего излучения и регистрация дифракционных картин в терагерцовом диапазоне. Полученные данные будут сравниваться с результатами численного моделирования распространения излучения через структуру подобную мембране диатомовой водоросли.

Измерения ИК спектров образцов проводились на базе ЦКП «Визуализация высокого разрешения» (Advanced Imaging Core Facility) Сколтеха.

**Литература**

1. W. Yang, “Diatoms: Self assembled silica nanostructures, and templates for bio/chemical sensors and biomimetic membranes,” Analyst, vol. 136, no. 1, 2011.

2. M. Sprynskyy, I. Kovalchuk, and B. Buszewski, “The separation of uranium ions by natural and modified diatomite from aqueous solution,” J. Hazard. Mater., vol. 181, no. 1–3, pp. 700–707, 2010.

3. A. Mcheik, S. Cassaignon, J. Livage, A. Gibaud, S. Berthier, and P. J. Lopez, “Optical Properties of Nanostructured Silica Structures From Marine Organisms,” Front. Mar. Sci., vol. 5, no. April, 2018.

4. S. Maruo, O. Nakamura, and S. Kawata, “Three-dimensional microfabrication with two-photon-absorbed photopolymerization,” vol. 22, no. 2, pp. 132–134, 1997.

5. К. И. Зайцев и др., “Применение терагерцовых технологий в биофотонике. Часть 1: методы терагерцовой спектроскопии и визуализации тканей,” Фотоника, vol. 13, no. 7, pp. 680–687, 2019.