

УДК 621.01

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ТРАВЛЕНИЯ КОЛЛОИДНЫХ МАТРИЦ
ПОЛИСТИРОЛА И КРЕМНЕЗЕМА ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ФОТОННО-
КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР**

Као Ван Хоа,

Студент 4 курса, бакалавр 4 года

кафедра «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель: Е.В.Панфилова,

*кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в
машиностроении»*

Фотонный кристалл — твердотельная структура с периодически изменяющейся диэлектрической проницаемостью либо неоднородностью, период которой сравним с длиной волны света.

Фотонные кристаллы, благодаря периодическому изменению коэффициента преломления, позволяют получить разрешённые и запрещённые зоны для энергий фотонов, аналогично полупроводниковым материалам, в которых наблюдаются разрешённые и запрещённые зоны для энергий носителей заряда. Практически, это значит, что если на фотонный кристалл падает фотон, обладающий энергией (длиной волны, частотой), которая соответствует запрещённой зоне данного фотонного кристалла, то он не может распространяться в фотонном кристалле и отражается обратно. И наоборот, это значит, что если на фотонный кристалл падает фотон, обладающий энергией (длиной волны, частотой), которая соответствует разрешённой зоне данного фотонного кристалла, то он может распространяться в фотонном кристалле [1]. Этот эффект наиболее выражен в инверсных фотонных кристаллах, которые состоят из регулярно расположенных сферических пустотных пространств, окруженных твердыми стенками (рисунки 1, 2) [2].

Инверсные фотонные кристаллы получают так называемыми Темплатные методами, состоящими из трёх основных этапов. На первом этапе близкие по размерам коллоидные сферы равномерно самоорганизуется в виде трех- или двухмерных структур. На втором этапе пустоты в созданной темплатной структуре заполняют функциональным материалом. На третьем этапе исходные сферические частицы удаляют с помощью процессов растворения, термического разложения, вытравливания (Рисунок 2) [2]. При этом получают пористые структуры, или обратные реплики (Рисунок 3).

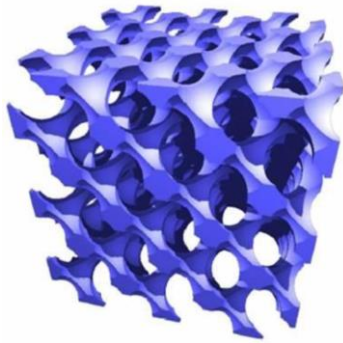


Рисунок 1. Результат компьютерного моделирования инверсной структуры [2].

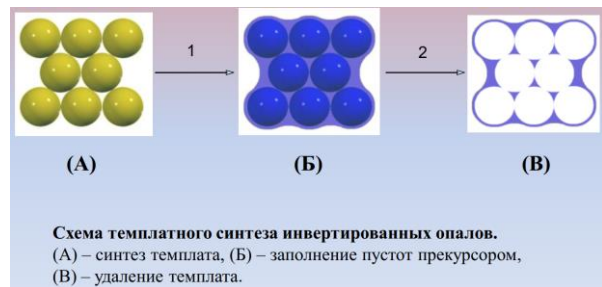


Рисунок 2. Синтез инверсного фотонного кристалла [2].

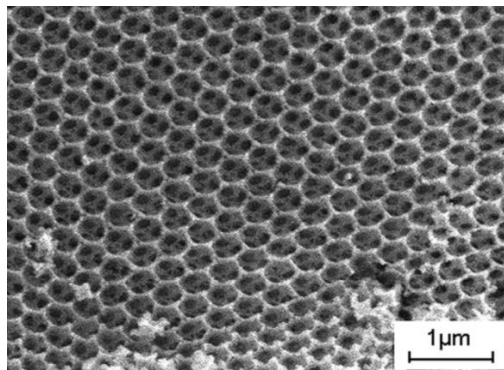


Рисунок 3. Структура инверсного фотонного кристалла [2].

Одной из главных технологических проблем является травления исходной структуры, поэтому это является одной из ключевых задач данной работы.

В литературных источниках упоминаются следующие режимы травления используемых в темплатных технологиях микросфер полистирола, кремнезёма и полиметилметакрилата (ПММА):

- Образцы прокаливали в печи при $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 6 часов [3],
- Образцы нагревали от 25 до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ при $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ мин-1; выдерживали при $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 5 ч; затем температуру увеличивали с 300 до $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ при $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ мин-1; выдерживали при $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 12 ч [4]; затем остужали до комнатной температуры в течение 3–4 часов.
- Образцы прокаливали при $680\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 30 минут [5],
- Травление растворителем проводили в тетрагидрофуране (ТГФ) при $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 4 ч [6],
- Пленку погружали в толуол на 12 ч при комнатной температуре, а затем сушили в печи с температурой $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ [7],
- Образцы выдерживали в ТГФ в течение 2 часов с последующим нагреванием при $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 30 минут [8],
- Образцы не только полистирола, но и ПММА травили в растворе: серная кислота — 950 мл, персульфат калия – 3 г, серебро азотнокислое – 3 г. Температура раствора $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, время обработки 20–30 с [9],
- Для травления объемного кремнезёма применяли следующий состав: плавиковая кислота (35%) – 16,7%, серная кислота (80%) – 22,7%, вода – 60,7%. Температура раствора $18\text{--}20\text{ }^{\circ}\text{C}$, время химической обработки 10 минут [9].

Поскольку на практике наиболее широко используется темплат из полистирола для проведения лабораторных исследований можно рекомендовать режимы травления этого материала, представленные в Таблице 1.

Таблица 1: Параметры метода травления

№	Растворитель	Время выдержки		Нагрев	
		Без выдержки	С выдержкой	Без нагрева	С нагревом
1	ТГФ	5 мин	-	при комнатной температуре	-
2	ТГФ	5 мин	-	-	До 65°C
3	ТГФ	-	2ч30	при комнатной температуре	-
4	ТГФ	-	2ч	-	До 65°C в течение 30 мин
5	Толуол	5 мин	-	при комнатной температуре	-
6	Толуол	5 мин	-	-	До 65°C
7	Толуол	-	12ч30	при комнатной температуре	-
8	Толуол	-	12ч	-	До 65°C в течение 30 мин

Результаты работы могут быть использованы при изготовлении ФК структур с применением технологии микросферной литографии.

Литература

1. *Steven G. Johnson*. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. Режим доступа: <http://ab-initio.mit.edu/book/> (дата обращения 13/03/2022).
2. *Абрамчук, Н. С.* Нанотехнологии. Азбука для всех // учебное пособие 2-е изд., испр. и доп. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/2664> (дата обращения 13/03/2022).

3. *Likui Wang, Qingfeng Yan, and X. S. Zhao.* From Planar Defect in Opal to Planar Defect in Inverse Opal. Режим доступа: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/la053470l> (дата обращения 13/03/2022).
4. *Geoffrey I.N. Mark R.* Opal and inverse opal photonic crystals: Fabrication and characterization. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.poly.2006.06.024> (дата обращения 13/03/2022).
5. *Hua Li, Jianfeng Wang, Shali Li, Jacques Robichaud, Dan Wang, Zhe Wu and Yahia Djaoued.* Silica single-layer inverse opal films: large-area crack-free fabrication and the regulation of transmittance in the visible region. Режим доступа: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2019/tc/c8tc04804e> (дата обращения 13/03/2022).
6. *Cheng-Yu Kuo, Shih-Yuan Lu, Shengfu Chen, Matt Bernards, Shaoyi Jiang.* Stop band shift based chemical sensing with three-dimensional opal and inverse opal structures. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2007.01.010> (дата обращения 13/03/2022).
7. *Sun Ha Park, Ok-Hee Kim, Jin Soo Kang, Kyung Jae Lee, Jung-Woo Choi, Yong-Hun Cho, Yung-Eun Sung.* Poly(3,4-Ethylenedioxythiophene) Inverse Opal Electrode Fabricated from Poly(3,4-Ethylenedioxythiophene): Poly(Styrene Sulfonate)-Filled Polystyrene Template for Dye-Sensitized Solar Cells. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.06.025> (дата обращения 13/03/2022).
8. *Hua Li, Jian Feng Wang, Guillaume Vienneau, Guo Bin Zhu, Xi Gang Wang, Jacques Robichaud, Bao-Lian Su and Yahia Djaoued.* A polystyrene/WO₃ opal composite monolayer film as a building block for the fabrication of 3D WO₃ inverse opal films. Режим доступа: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2017/ra/c7ra08998h> (дата обращения 13/03/2022).
9. *Галаганова Е. Н.* Опаловые пленки и формирование инверсных структур вакуумными методами // Политехнический молодежный журнал. 2018. №6.