

## Отработка и исследование процесса получения фотонно-кристаллических пленок методом центрифугирования

© Е.В. Панфилова, Н.А. Гришаев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Рассмотрен один из перспективных методов формирования упорядоченного массива микросфер полистирола из коллоидной суспензии — центрифугирование. Простота и доступность способа обуславливают рациональность его применения в операции осаждения качественных упорядоченных планарных фотонно-кристаллических структур для устройств нанофотоники, нанозлектроники, сенсорики и систем безопасности. Приведено теоретическое описание происходящего при центрифугировании суспензии процесса самоорганизации коллоидных микросфер в упорядоченную структуру, так называемую опаловую матрицу. Показаны технологическое оборудование и оснастка, необходимые для реализации метода в лабораторных условиях. Рассмотрены технологические факторы, влияющие на отражение в области фотонной запрещенной зоны формируемых структур; построена и проанализирована математическая модель процесса центрифугирования коллоидной суспензии. Показаны подобранные основные режимы процесса центрифугирования, обеспечивающие приемлемое качество образцов.*

**Ключевые слова:** коллоидная суспензия, планарная структура, фотонный кристалл, метод *spin-coating*, упорядоченный массив, матрица, полистирол

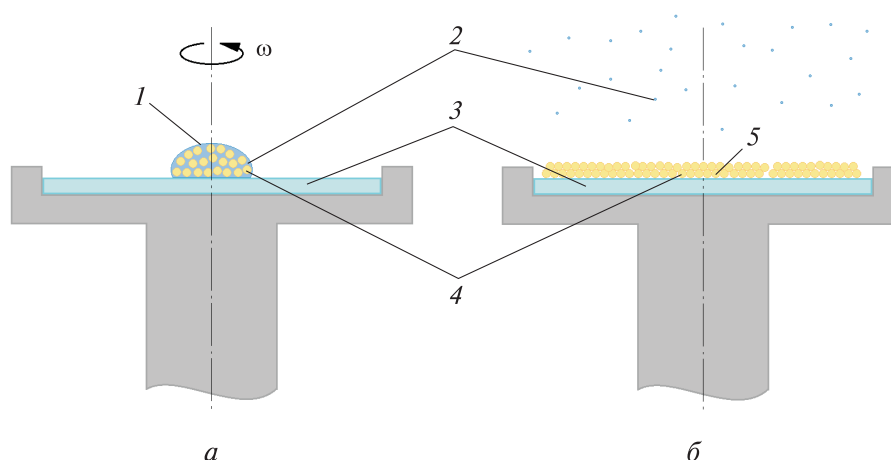
**Введение.** Процесс получения планарных фотонно-кристаллических структур — один из ключевых в производстве изделий оптоэлектроники [1, 2]. На сегодняшний день разработано достаточно большое количество методов получения фотонно-кристаллических структур, основанных на фундаментально разных физических принципах и явлениях. В работах [3, 4] представлены методы нанесения тонких пленок и их последующего травления, голографические методы и 3D-печать, относящиеся к технологии, реализуемой по принципу «сверху вниз», в работах [5, 6] — методы самоорганизации частиц из коллоидных суспензий, представляющие технологический принцип «снизу вверх». К группе последних методов относятся естественная седиментация, вертикальное осаждение, вертикальное вытягивание, электрохимическое осаждение, фильтрация и метод центрифугирования, рассматриваемый в данной работе.

Перечисленные способы самоорганизации частиц применяются при изготовлении трехмерных фотонно-кристаллических структур (у них коэффициент преломления периодически изменяется во всех трех пространственных направлениях), реализуемых в виде пленок

или массивных тел. При выборе метода следует учитывать характерные для него скорости процесса осаждения, ограничения на размеры микросфер и используемые материалы частиц и подложек, а также характерные дефекты структуры, получаемой данным методом.

Осаждение коллоидных частиц методом центрифугирования можно провести двумя способами. В работе [7] показана классическая схема центрифугирования: жидкость со взвешенными в ней частицами помещается в пробирки, которые закрепляются на многопозиционном роторе и затем вращаются вокруг его оси. Под действием центробежных сил частицы оседают на дно пробирок. Такая методика широко применяется, в частности, в медицине для разделения компонентов крови.

Другим вариантом реализации процесса является способ spin-coating [8]. Он применяется для получения пленок коллоидных кристаллов на подложках относительно больших площадей. Суть метода состоит в том, что несколько капель суспензии микросфер помещают в центр быстровращающейся (1000...10 000 об/мин) в горизонтальной плоскости подложки, после чего под действием центробежных сил раствор растекается по ее поверхности, образуя пленку (рис. 1). Процесс повторяют до тех пор, пока в планарной структуре не образуется требуемое количество слоев [9, 10].



**Рис. 1.** Схема операции осаждения планарной фотонно-кристаллической структуры способом spin-coating:

*а* — вращение подложки с нанесенной на нее каплей коллоидного раствора; *б* — полученный результат;  $\omega$  — угловая скорость вращения; 1 — капля коллоидного раствора; 2 — дисперсионная среда; 3 — подложка; 4 — микросферы (гипертрофированы); 5 — пленка коллоидного кристалла

Центрифугирование характеризуется максимальной скоростью образования статичного, относительно жесткого ансамбля микросфер, выделяющей его среди прочих методов самоорганизации (что приветствуется, например, в массовом производстве), но уступает им

по упорядоченности получаемых структур в связи с их более выраженной дефектностью и частыми нарушениями пространственной периодичности. Это можно объяснить тем, что вследствие высокой скорости вращения центрифуги дисперсионная среда коллоидного раствора испаряется быстрее, чем успевает произойти разделение частиц по размерам. Тем не менее этот метод успешно применялся для изготовления экспериментальных образцов оптоэлектроники [11] и измерителей показателя преломления среды [12].

Следует отметить, что исходные матрицы для этих устройств были несовершенны (наблюдались вакансии и отклонения от плотной гексагональной упаковки частиц), поэтому перед авторами данной работы стояла задача изучения основных закономерностей процесса центрифугирования коллоидной суспензии с целью повышения упорядоченности получаемых массивов микросфер, что в перспективе позволит добиться воспроизводимости результатов.

**Теоретические основы процесса получения планарных коллоидных структур методом центрифугирования.** В процессе центрифугирования на микросферу значимо действуют (рис. 2):

- сила тяжести  $mg$ ;
- сила Архимеда  $F_{\text{Арх}}$  (выталкивающая сила, действующая со стороны дисперсионной среды);
- центробежная сила  $F_{\text{ц}}$ , возникающая вследствие вращения микросферы вокруг оси ротора;
- сила Стокса  $F_{\text{Ст}}$  (сила сопротивления движению микросферы, также действующая со стороны дисперсионной среды);
- силы гравитационного взаимодействия с другими микросферами  $F_{\text{м-сф}}^{\text{м-сф}i}$ ;
- сила гравитационного взаимодействия с подложкой  $F_{\text{м-сф}}^{\text{подл}}$ ;
- капиллярные силы (по мере улетучивания дисперсионной среды)  $F_{\text{кап}}$ .

Согласно принципу Д'Аламбера, векторная сумма сил, действующих на микросферу, равна нулевому вектору:

$$m\vec{g} + \vec{F}_{\text{Арх}} + \vec{F}_{\text{ц}} + \vec{F}_{\text{Ст}} + \sum_{i=1}^n \vec{F}_{\text{м-сф}}^{\text{м-сф}i} + \vec{F}_{\text{м-сф}}^{\text{подл}} + (\vec{F}_{\text{кап}}) = \vec{0}. \quad (1)$$

Главной силой, определяющей организацию микросфер в упорядоченную структуру при центрифугировании, очевидно, является центробежная сила  $F_{\text{ц}}$ . Ее значение линейно зависит от центробежного ускорения  $G$ ,  $\text{м/с}^2$ :

$$G = \frac{\pi^2}{9 \cdot 10^5} \omega^2 r, \quad (2)$$

где  $\omega$  — угловая скорость вращения ротора, об/мин;  $r$  — расстояние от центра микросферы до оси вращения ротора, мм.

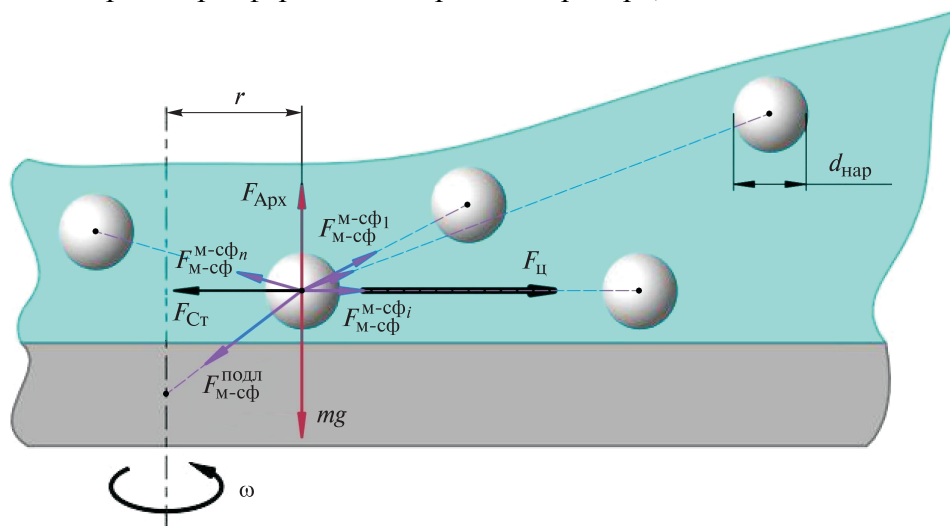


Рис. 2. Расчетная схема для исследования динамики микросферы при центрифугировании

Согласно второму закону Ньютона, величина центробежной силы  $F_{Ц}$ , Н:

$$F_{Ц} = mG, \quad (3)$$

где  $m$  — масса микросферы, кг.

В частности, для коллоидных микросфер центробежную силу можно рассчитать следующим образом:

$$F_{Ц} = \frac{\pi}{6} \rho d_{нар}^3 G, \quad (4)$$

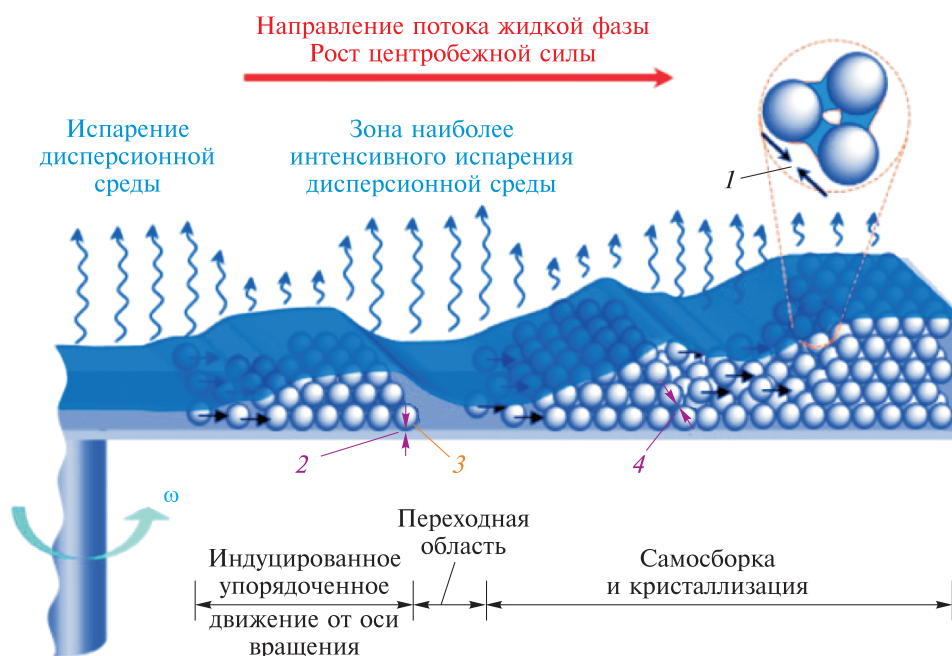
где  $\rho$  — плотность материала микросферы,  $\text{кг/м}^3$ ;  $d_{нар}$  — наружный диаметр микросферы, м.

Для частиц размером в сотни нанометров преобладающей является центробежная сила. Например, для сплошной микросферы полистирола диаметром 600 нм на крае круглой кремниевой подложки диаметром 76 мм при скорости вращения ротора 3500 об/мин центробежная сила  $F_{Ц} \approx 6,120 \cdot 10^{-13}$  Н, что превышает силу тяжести микросферы ( $mg \approx 1,176 \cdot 10^{-15}$  Н) более чем в 500 раз.

В результате воздействия перечисленных выше сил процесс получения пленки реализуется по представленному на рис. 3 сценарию.

После нанесения суспензии в центр подложки и запуска центрифуги под действием изначально небольшой (вследствие малости расстояния  $r$  до оси вращения) центробежной силы микросферы начи-

нают разбегаться от центра вращения, причем поскольку в любом коллоидном растворе имеет место некоторый разброс частиц по массам, более тяжелые частицы удаляются быстрее и активнее, чем легкие. По этой причине образуется переходная область, в которой дисперсионная среда рассредоточивается в тонкую пленку, что позволяет ей испаряться на этом участке наиболее интенсивно. Микросферы, перешедшие промежуточную область, приближаются к краю подложки. Здесь под действием уже значительно возросшей (из-за увеличения расстояния  $r$  от оси вращения) центробежной силы они нагромождаются друг на друга и, аналогично эффекту снежного кома, «кристаллизуются» в периодическую структуру по мере полного улетучивания дисперсионной среды.



**Рис. 3.** Комплексная картина осаждения микросфер из коллоидного раствора методом центрифугирования:

1 — капиллярные силы; 2 — силы гравитационного взаимодействия между микросферой и подложкой; 3 — микросфера, «сцепившаяся» с поверхностью подложки; 4 — силы гравитационного взаимодействия между микросферами

Этот процесс характеризуется большим количеством факторов, которые можно систематизировать следующим образом.

- Входные контролируемые и управляемые факторы:
  - материал микросфер;
  - средний диаметр микросфер;
  - материал подложки;

- геометрическая форма подложки;
- состав дисперсионной среды;
- масса сухого вещества в коллоидном растворе (далее — концентрация раствора);
- предварительные действия с раствором (никаких / центрифугирование при определенных параметрах);
- способ установки подложки на ротор (с помощью двустороннего скотча / на столике / на специальном держателе подложек);
- скорость вращения ротора центрифуги;
- продолжительность центрифугирования.
- Входные контролируемые, но неуправляемые факторы:
  - неоднородность микросфер по размеру;
  - дефектность и деформированность микросфер;
  - дефекты (в частности, шероховатость поверхности) подложки;
  - качество предварительной очистки подложки;
  - пространственное положение центра масс подложки относительно оси ротора центрифуги.
- Входные неконтролируемые и неуправляемые факторы:
  - квалификация оператора;
  - наладка оборудования;
  - кратковременные отклонения центрифуги от номинального режима работы;
  - вибрации поверхности, на которой расположена центрифуга;
  - прочие случайные факторы.

Получаемую в результате выполненного процесса коллоидную пленку можно охарактеризовать:

- интенсивностью отражения пленки в области фотонной запрещенной зоны;
- состоянием микросфер после центрифугирования (не изменились / деформировались / разрушились);
- количеством слоев в пленке;
- топологической упорядоченностью структуры.

**Экспериментальное исследование метода процесса получения планарных коллоидных структур методом центрифугирования.** Главная задача эксперимента — выявление зависимости пространственной периодичности получаемой в результате центрифугирования структуры от наиболее существенных из названных выше управляемых факторов. Именно регулярность исходной матрицы в итоге определит работоспособность и функциональность всех устройств, изготавливаемых на ее основе.

Для оценки топологической упорядоченности планарной структуры был введен параметр  $Y$ , характеризующий отражение в области

фотонной запрещенной зоны (ФЗЗ) образца. На спектре отражения фотонно-кристаллической пленки визуально определялась длина волны  $\lambda_{ФЗЗ}$ , соответствующая предполагаемой ФЗЗ структуры, и вычислялась площадь  $S_{ФЗЗ}$  под спектральной линией на небольшом участке длин волн ( $\lambda_{ФЗЗ} - 10$  нм;  $\lambda_{ФЗЗ} + 10$  нм) в окрестности этого значения (рис. 4). Затем рассчитывалась площадь  $S$  под спектральной линией на всем оптическом диапазоне (380...780 нм). Отношение этих площадей  $Y$  рассматривалось в качестве показателя качества структуры:

$$Y = \frac{S_{ФЗЗ}}{S}. \quad (4)$$

Значение этого параметра является непосредственной оценкой упорядоченности массива микросфер (чем больше  $Y$ , тем более упорядочена структура).

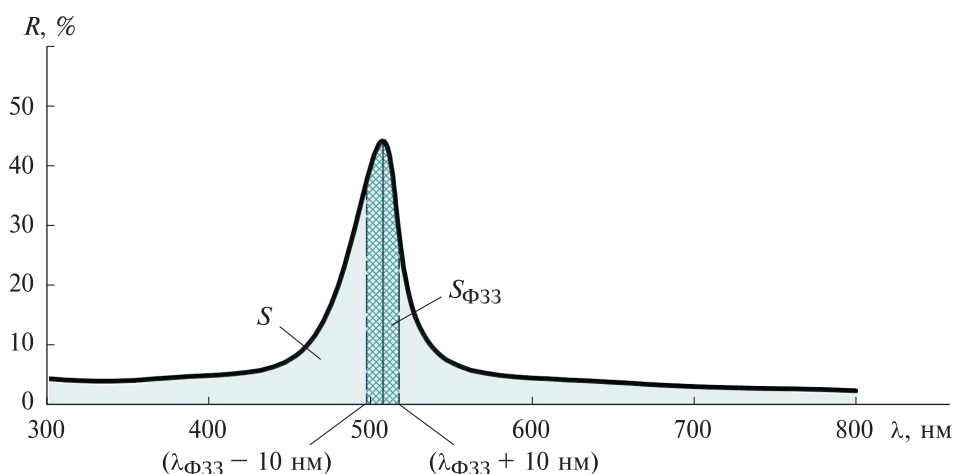


Рис. 4. График для определения выходного параметра  $Y$

Эксперимент был проведен в целях изучения влияния трех входных факторов и их взаимодействия на интенсивность отражения пленки в области ФЗЗ:

- 1) скорости вращения ротора центрифуги;
- 2) относительной массы сухого вещества в используемом коллоидном растворе (так называемой концентрации раствора);
- 3) диаметра микросфер.

Для минимизации погрешностей прочие входные факторы при проведении опытов были в максимально возможной степени стабилизированы. В качестве коллоидной суспензии использовались разбавленные этиловым спиртом стандартные образцы полистирольного

латекса *PS*, содержащего  $\text{NH}_2$  группы (рис. 5). В качестве подложек были выбраны пластины монокристаллического кремния из одной партии (рис. 6). Применение именно таких подложек обусловлено их крайне низкой нанометровой шероховатостью, что хорошо подходит для метода центрифугирования, поскольку в этом случае частицы не будут скапливаться в выступах подложки и образовывать нежелательные конгломераты. Очистка подложек проводилась в несколько типовых этапов — от протирки до отмывки в ультразвуковой ванне. Продолжительность центрифугирования составляла 20 мин для всех образцов. Для перевода прочих систематических факторов в категорию случайных была осуществлена рандомизация порядка проведения опытов.

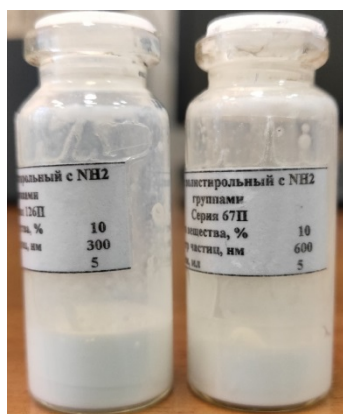


Рис. 5. Исходные суспензии микросфер полистирольного латекса



Рис. 6. Исходные кремниевые подложки

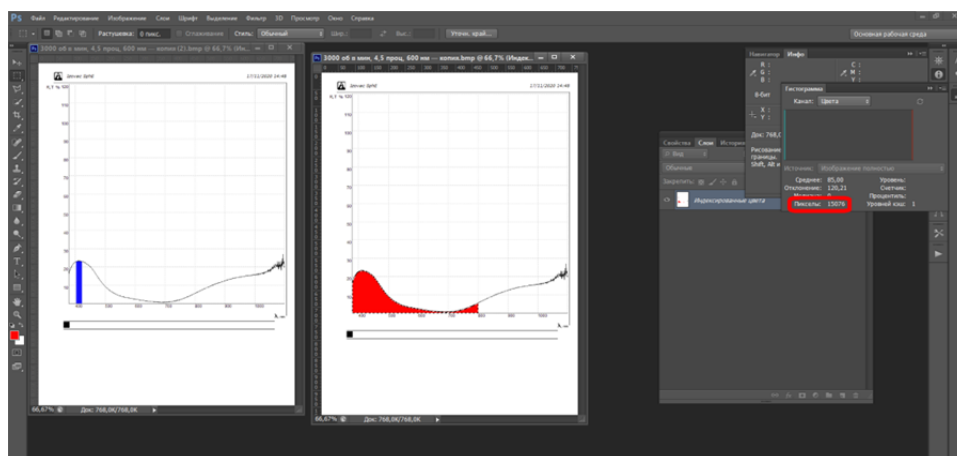
Собственно центрифугирование выполнялось на настольной лабораторной центрифуге *СМ-6М (ELMI)*, представленной на рис. 7. На выходе готовой пленки с помощью спектрофотометра *Izovac Epsilon SphE* проводилось снятие нескольких спектров отражения в разных точках образца. Из полученной выборки визуально (по высоте пика и узости области  $\Phi 33$ ) определялся наилучший спектр, по которому затем и вычислялось значение выходного параметра  $Y$ . Для этого в стандартной программе *Paint* необходимая область под кривой отражения заливалась определенным цветом, после чего с помощью *Adobe Photoshop* определялось количество пикселей, занимаемых этим цветом на картинке (рис. 8).

Исследование было реализовано по плану полного факторного эксперимента. Центром плана являлась точка, соответствующая следующим значениям входных факторов: скорость вращения ротора центрифуги 3250 об/мин; концентрация раствора 3,75 %; диаметр микросфер 450 нм.





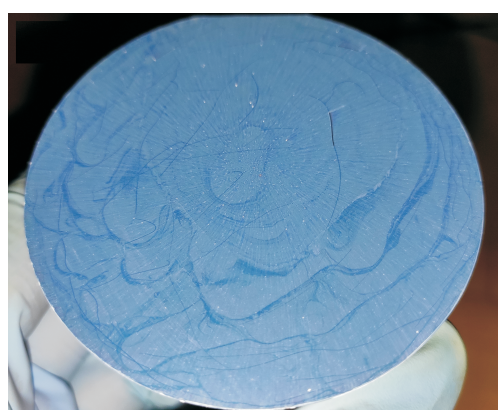
Рис. 7. Настольная лабораторная центрифуга CM-6M (ELMI):  
а — общий вид; б — дисплей



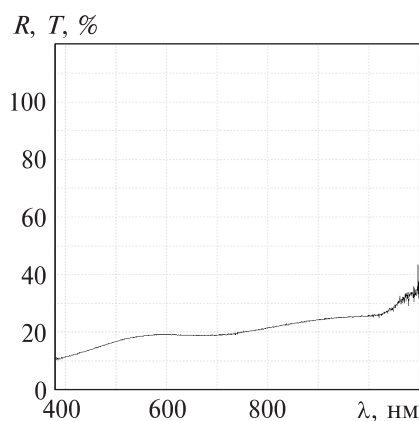
Диапазоны варьирования факторов представлены в табл. 1. Границы области исследования были определены по результатам предварительных экспериментов на широких диапазонах с учетом возможностей лаборатории, в которой проводилось исследование.

Диапазоны варьирования факторов и их перевод в безразмерный масштаб

Уровень	Скорость вращения ротора центрифуги, об/мин ( $X_1$ )	Концентрация коллоидного раствора, % ( $X_2$ )	Диаметр микросфер, нм ( $X_3$ )	В безразмерном масштабе
Нижний	3000	3	300	-1
Верхний	3500	4,5	600	+1

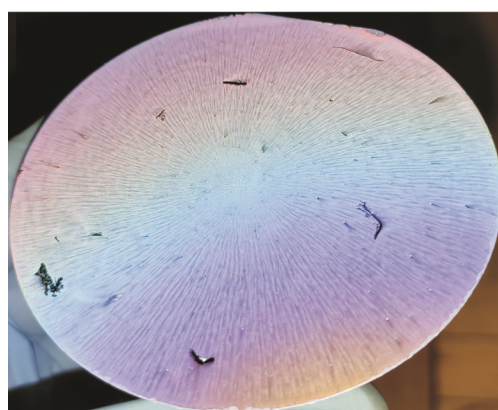


*a*

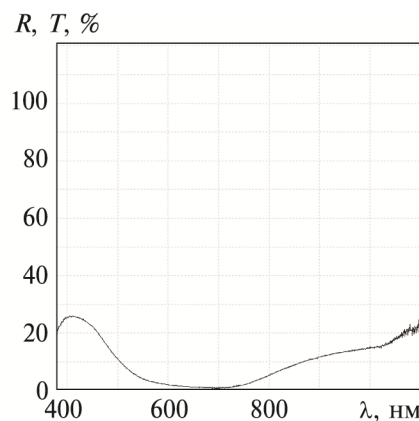


*б*

**Рис. 9.** Результат в опытной точке с параметрами 3000 об/мин; 4,5 %; 300 нм: *a* — макрофотография; *б* — спектр отражения (ФЗЗ практически отсутствует, однако пленка имеет хорошую сплошность на всей поверхности подложки)



*a*



*б*

**Рис. 10.** Результат в точке с параметрами 3500 об/мин; 3 %; 600 нм: *a* — макрофотография; *б* — спектр отражения (на поверхности подложки заметны небольшие дефекты сплошности, а также треки нежелательных крупных «комков» частиц, расходящиеся радиально (от центра подложки к краям), тем не менее пленка опалесцирует и на спектре отражения имеется область, соответствующая ФЗЗ)

В качестве функции отклика рассматривался параметр  $Y$ . Некоторые из полученных в ходе эксперимента образцов представлены на рис. 9 и 10.

Выявлено, что в рассмотренном диапазоне входных факторов увеличение скорости вращения и повышение концентрации микросфер в суспензии не способствуют улучшению фотонно-кристаллических свойств структуры, в то время как микросферы большего диаметра образуют более упорядоченную структуру.

**Обсуждение результатов.** После статистической обработки экспериментальных данных построена следующая математическая модель:

$$\begin{aligned} \hat{Y} = & 9,50987 \cdot 10^{-2} - 1,889875 \cdot 10^{-3} X_1 - 3,894725 \cdot 10^{-3} X_2 + \\ & + 4,232755 \cdot 10^{-2} X_3 - 2,67375 \cdot 10^{-3} X_1 X_2 - \\ & - 3,90625 \cdot 10^{-4} X_2 X_3 - 1,798125 \cdot 10^{-3} X_1 X_3 - 2,77645 \cdot 10^{-3} X_1 X_2 X_3. \end{aligned} \quad (5)$$

Для выявления оптимальных значений параметров, в том числе и за пределами исследованной области, был разработан план оптимизации процесса градиентным способом (табл. 2).

Таблица 2

Разработка плана оптимизации процесса

Фактор	Параметр оптимизации, шаг	
	в натуральном масштабе	в безразмерном масштабе
Скорость вращения $\omega$ ( $X_1$ )	100 об/мин	0,4
Концентрация раствора $c$ ( $X_2$ )	0,1 %	0,133
Диаметр микросфер $d$ ( $X_3$ )	50 нм	0,333

Оптимизация осуществлялась с помощью приложения Wolfram-Alpha. Обнаружено несколько экстремальных областей, анализ которых показал, что наибольшее значение выходного параметра  $\hat{Y}_{\max} = 0,162632$  достигается в глобальном максимуме — в точке с координатами  $(-1,4; 1,133; 1,333)$ , это в натуральном масштабе соответствует следующим значениям входных параметров:  $\omega_{\max} = 2900$  об/мин;  $c_{\max} = 4,6\%$ ;  $d_{\max} = 650$  нм. Микросферы при дальнейшем увеличении диаметра коагулируют на этапе перемещения вдоль подложки, и образующиеся конгломераты препятствуют упорядоченной самоорганизации. Варьирование концентрацией и скоростью вращения центрифуги в рамках исследованной области сказывается на качестве пленки в меньшей степени, и его можно использовать для тонкой регулировки процесса применительно к конкретным условиям проведения эксперимента.

**Заключение.** В результате экспериментальных исследований были выявлены наиболее рациональные режимы получения фотонно-кристаллических пленок полистирола из коллоидных суспензий, содержащих частицы большого диаметра (600...1000 нм). Это обуславливает применение таких пленок в качестве основы фотонно-кристаллических инверсных структур и гетероструктур для ближнего ИК-диапазона, а также в качестве темплата в микросферной литографии в производстве изделий оптоэлектроники, оптических и полупроводниковых сенсоров, ГКР-активных (ГКР — гигантского комбинационного рассеяния) подложек и фотонно-кристаллических марок с графическим кодом.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Busch K., et al. (ed.). *Photonic crystals: advances in design, fabrication, and characterization*. Weinheim, John Wiley & Sons, 2006.
- [2] Zhou W., Fan S. *Photonic Crystal Metasurface Optoelectronics*. Academic Press, 2019.
- [3] Baburin A.S., Ivanov A.I., Trofimov I.V., Dobronosova A.A., Melentiev P., Balykin V., Moskalev D.O., Pishchimova A.A., Ganieva L.A., Ryzhikov I., Rodionov I. Highly directional plasmonic nanolaser based on high-performance noble metal film photonic crystal. *Nanophotonics VII. International Society for Optics and Photonics*, 2018, vol. 10672, art. no. 106724D.
- [4] Liu Y., Wang H., Ho J., Ng R.C., Ng R.J.H., Hall-Chen V.H., Koay E.H.H., Dong Zh., Liu H., Qiu Ch.-W., Greer J.R., Yang J.K.W. Structural color three-dimensional printing by shrinking photonic crystals. *Nature communications*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 1–8.
- [5] Kuleshova V.L., Panfilova E.V., Prohorov E.P. Automated device for vertical deposition of colloidal opal films. *2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. Sochi, IEEE Publ., 2018, pp. 1–5. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501782
- [6] Bakhia T., Baranchikov A.E., Gorelik V.S., Klimonsky S.O. Local optical spectroscopy of opaline photonic crystal films. *Crystallography Reports*, 2017, vol. 62, no. 5, pp. 783–786.
- [7] Markelonis A. R., Wang J.S., Ullrich B., Wai Ch.M., Brown G.J. Nanoparticle film deposition using a simple and fast centrifuge sedimentation method. *Applied Nanoscience*, 2015, vol. 5, no. 4, pp. 457–468.
- [8] Toolan D.T.W., Fujii S., Ebbens S., Nakamura Y., Howse J. On the mechanisms of colloidal self-assembly during spin-coating. *Soft Matter*, 2014, vol. 10, no. 44, pp. 8804–8812.
- [9] Xu Y., Schneider G., Wetzel E.D., Prather D.W. Centrifugation and spin-coating method for fabrication of three-dimensional opal and inverse-opal structures as photonic crystal devices. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2004, vol. 3, no. 1, pp. 168–174.
- [10] Xu Y., Schneider G., Wetzel E.D., Prather D.W. Fabrication of self-assembled photonic-crystal structures by centrifugation and spin coating. *Lithographic and Micromachining Techniques for Optical Component Fabrication II. International Society for Optics and Photonics*, 2003, vol. 5183, pp. 16–24.

- [11] Galle L., Ehrling S., Lochmann S., Grothe J. Conductive ITO Interfaces for Optoelectronic Applications Based on Highly Ordered Inverse Opal Thin Films. *ChemNanoMat*, 2020, vol. 6, no. 4, pp. 560–566.
- [12] Nishijima Y., Ueno K., Juodkazis S., Mizeikis V., Misawa H., Tanimura T., Maeda K. Inverse silica opal photonic crystals for optical sensing applications. *Optics express*, 2007, vol. 15, no. 20, pp. 12979–12988.

Статья поступила в редакцию 23.03.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Панфилова Е.В., Гришаев Н.А. Отработка и исследование процесса получения фотонно-кристаллических пленок методом центрифугирования. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 4.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-4-2073>



**Панфилова Екатерина Вадимовна** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Научные интересы: нанотехнологии, коллоидные наноструктуры, тонкие пленки. Имеет более 120 научных работ. e-mail: [panfilova.e.v@bmstu.ru](mailto:panfilova.e.v@bmstu.ru)



**Гришаев Никита Алексеевич** — бакалавр кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Научные интересы: нанотехнологии, самоорганизующиеся структуры. e-mail: [nikita\\_grishaev@mail.ru](mailto:nikita_grishaev@mail.ru)

## Development and study of the process of photonic-crystal film depositing by centrifugation

© E.V. Panfilova, N.A. Grishaev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article describes one of the promising methods of depositing highly ordered arrays of polystyrene microspheres from colloidal suspension through centrifugation. The simplicity and availability of the method determine the sensibility of its application in the deposition of high-quality ordered photonic-crystal planar structures for devices in nanophotonics, nanoelectronics, sensorics and security systems. A theoretical description of the process of colloidal microspheres self-organization into an ordered structure, the so-called opal matrix, occurring during centrifugation of a suspension is given. The technological equipment and accessories required for the implementation of the method in laboratory conditions are shown. The technological factors affecting the reflection of the formed structures in the region of the photonic band gap have been studied; a mathematical model of the colloidal suspension centrifugation process was developed and analyzed. The main modes of the centrifugation process ensuring an acceptable quality of the samples have been selected.*

**Keywords:** colloidal suspension, planar structure, photonic crystal, “spin-coating” method, ordered array, matrix, polystyrene

### REFERENCES

- [1] Busch K., Busch, Lélkes S., Wehrspohn R. B., Féll H., eds. *Photonic crystals: advances in design, fabrication, and characterization*. Weinheim, John Wiley & Sons Publ., 2006.
- [2] Zhou W., Fan S. *Photonic Crystal Metasurface Optoelectronics*. Academic Press Publ., 2019, 246 p.
- [3] Baburin A.S., Ivanov A.I., Trofimov I.V., Dobronosova A.A., Melentiev P., Balykin V., Moskalev D.O., Pishchimova A.A., Ganieva L.A., Ryzhikov I., Rodionov I. *Nanophotonics VII. International Society for Optics and Photonics*, 2018, vol. 10672, art. no. 106724D.
- [4] Liu Y., Wang H., Ho J., Ng R.C., Ng R.J.H., Hall-Chen V.H., Koay E.H.H., Dong Zh., Liu H., Qiu Ch.-W., Greer J.R., Yang J.K.W. *Nature communications*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 1–8.
- [5] Kuleshova V.L., Panfilova E.V., Prohorov E.P. Automated device for vertical deposition of colloidal opal films. *2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. Sochi, IEEE Publ., 2018, pp. 1–5. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501782
- [6] Bakhia T., Baranchikov A.E., Gorelik V.S., Klimonsky S.O. *Crystallography Reports*, 2017, vol. 62, no. 5, pp. 783–786.
- [7] Markelonis A. R., Wang J.S., Ullrich B., Wai Ch.M., Brown G.J. *Applied Nanoscience*, 2015, vol. 5, no. 4, pp. 457–468.
- [8] Toolan D.T.W., Fujii S., Ebbens S., Nakamura Y., Howse J. *Soft Matter*, 2014, vol. 10, no. 44, pp. 8804–8812.
- [9] Xu Y., Schneider G., Wetzel E.D., Prather D.W. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2004, vol. 3, no. 1, pp. 168–174.
- [10] Xu Y., Schneider G., Wetzel E.D., Prather D.W. *Lithographic and Micromachining Techniques for Optical Component Fabrication II. International Society for Optics and Photonics*, 2003, vol. 5183, pp. 16–24.

- [11] Galle L., Ehrling S., Lochmann S., Grothe J. *ChemNanoMat.*, 2020, vol. 6, no. 4, pp. 560–566.
- [12] Nishijima Y., Ueno K., Juodkazis S., Mizeikis V., Misawa H., Tanimura T., Maeda K. *Optics express*, 2007, vol. 15, no. 20, pp. 12979–12988.

**Panfilova E.V.**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Electron Beam Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University; author of over 120 research publications. Research interests: nanotechnology, colloidal nanostructures, thin films. e-mail: panfilova.e.v@bmstu.ru.

**Grishaev N.A.**, undergraduate student, Department of Electron Beam Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: nanotechnology, self-organizing structures. e-mail: nikita\_grishaev@mail.ru.