

# Оптимизация процесса получения фотоннокристаллических масок для наносферной литографии

© Р.М. Жуков, А.Р. Ибрагимов, Е.В. Панфилова

Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ), ул. 2-ая Бауманская д.5, стр. 1

*Перспективным способом получения массивов наночастиц и двумерных фотонных кристаллов является наносферная литография. В работе представлены результаты экспериментальных исследований процесса формирования фотоннокристаллического коллоидного слоя, выполняющего роль маски. Наиболее технологичным способом формирования такой структуры является метод вертикального вытягивания подложки из коллоидного раствора. За счет варьирования параметрами раствора и скоростью движения подложки метод позволяет получать фотоннокристаллические пленки с заданными характеристиками. В работе представлены результаты оптимизации процесса формирования пленок.*

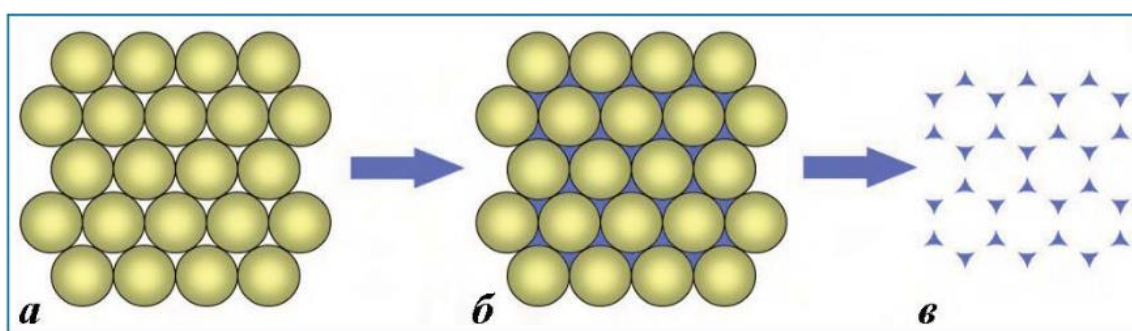
***Optimizing of the photonic crystal nanosphere lithography mask deposition process. R.M.Zhukov, A.R. Ibragimov, E.V. Panfilova. Nanosphere lithography is a perspective method of nanoparticles and two dimensional photonic crystals obtaining. We present the results of the experimental investigation of vertical deposition process and optimizing the films deposition conditions necessary to obtain desired film properties. Vertical deposition method has gained great interest because of its simplicity and possibility of condition variation.***

**Введение.** Быстрое развитие нанотехнологий открывает новые возможности для получения массивов наночастиц и двумерных фотонных кристаллов, в том числе, развиваются и методы их формирования, одним из которых является наносферная литография. Суть наносферной литографии заключается в формировании массивов упорядоченных наночастиц при помощи масок, образованных микрочастицами, которые упорядочить гораздо проще. Одним из способов получения таких масок является осаждение микрочастиц из коллоидного раствора. На первом этапе наносферной литографии близкие по размерам сферические коллоидные частицы (их средний размер может составлять от 200 нм до 1 мкм) «упаковывают» на требуемой подложке – как правило, на гладкой поверхности кремния – в виде плотноупакованного монослоя. Несмотря на то, что коллоидные сферы плотно прижаты одна к другой, монослой содержит систему эквидистантных пустот треугольной формы (рис. 1а). На втором этапе на монослой напыляют тонкий слой требуемого вещества, как правило, толщиной <100 нм, которое не проникает в области, «затененные» коллоидными частицами, и достигает подложки только в открытых местах. В результате этой процедуры на подложке возникает система упорядоченных наночастиц требуемого вещества, разделенных коллоидными сферами

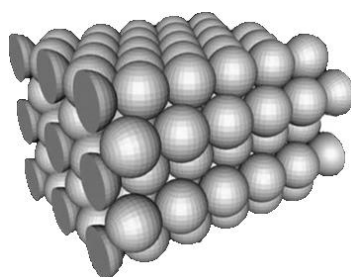
---

Жуков Р.М., Ибрагимов А.Р., Панфилова Е.В. Оптимизация процесса получения фотоннокристаллических масок для наносферной литографии [Электронный ресурс] // Вестник РВО. – 2019. – № 1 (23.03.2019). – Режим доступа: <https://www.vestnik-rvo.ru/ru/issues/2019-01/184/>

(рис. 1б). На последнем этапе коллоидные частицы удаляют путем растворения в соответствующем растворителе (рис. 1в) [1]. При получении слоя требуемого вещества вакуумным методом формируется структура, регулярность которой будет зависеть от упорядоченности слоя полученного на этапе формирования коллоидной пленки. Поэтому первоочередной задачей является достижение структурно упорядоченного коллоидного слоя. Необходимо подобрать соответствующие материалы, способы и режимы формирования таких структур. Коллоидные частицы должны быть однородны по размеру и форме, этому требованию наилучшим образом соответствует полистирольный монодисперсный латекс. При формировании пленки из коллоидных сферических частиц, частицы выстраиваются в фотоннокристаллическую опаловую матрицу (рис.2). Метод вертикального вытягивания [2] подложки из коллоидного раствора является наиболее технологичным способом ее получения, так как позволяет варьировать скоростью вытягивания, и получать бездефектную опаловую матрицу с заданными свойствами.

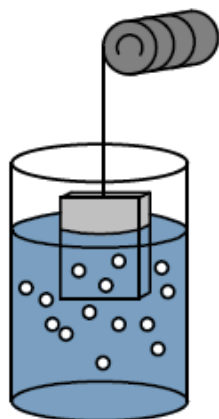


**Рис. 1.** Схема процесса наносферной литографии: а – монослой сферических коллоидных частиц, б – пустоты между частицами заполнены требуемым веществом, в – упорядоченный массив наночастиц требуемого вещества, полученный в результате удаления исходных коллоидных сфер [1].



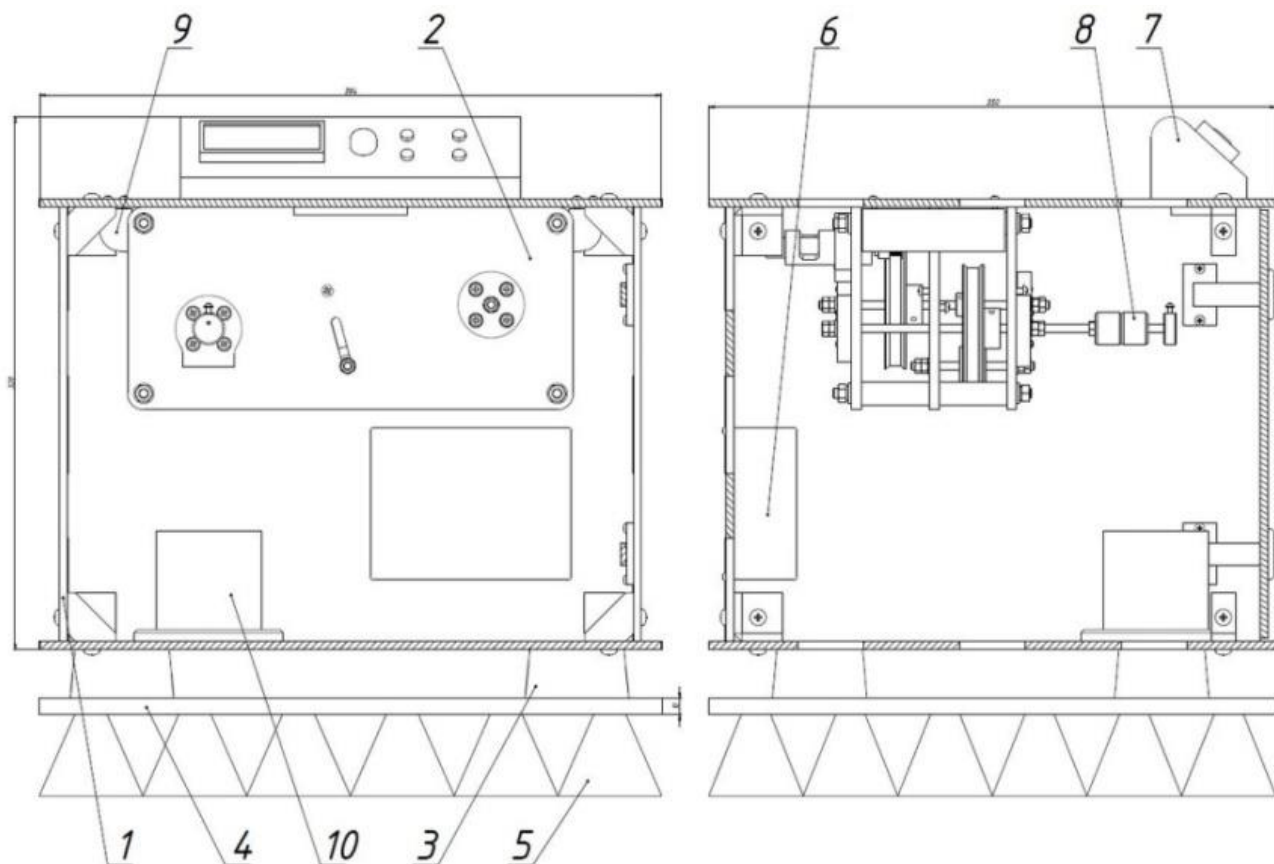
**Рис. 2.** Структура опаловой матрицы.

**Метод вертикального вытягивания.** При перемещении подложки возникает поток частиц, направленный в сторону мениска. При этом на них действует сила тяжести, компенсируемая капиллярной силой. Таким образом, частицы осаждаются на подложке, формируя гексагонально ориентированные слои [3]. Схематично метод изображён на рисунке 3.



**Рис. 3.** Схема метода вертикального вытягивания из коллоидного раствора.

**Экспериментальное оборудование.** Для получения бездефектных коллоидных пленок необходимо обеспечить равномерное движение подложек в процессе их вытягивания из раствора. Причем, скорость вытягивания, определяющая свойства структуры, зависит от размера частиц, то есть желательно предусмотреть возможность варьирования скоростью. При этом должны быть исключены возмущающие воздействия на раствор и подложку. Для решения этих задач была разработана установка для нанесения фотоннокристаллических коллоидных пленок методом вертикального вытягивания [4] (рис 4).

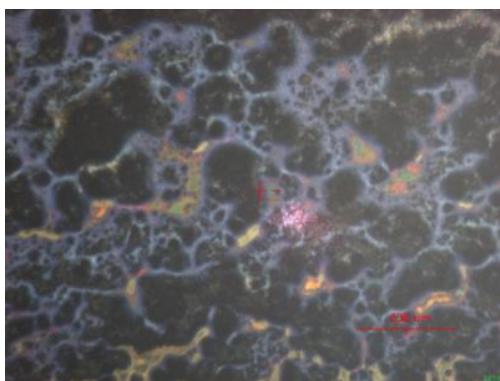


**Рис. 4.** Схема установки вертикального вытягивания.

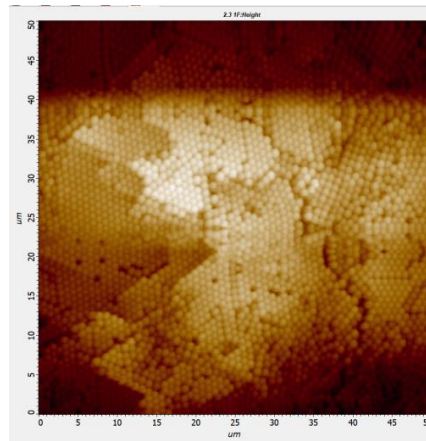
Установка состоит из: редуктора (рис. 4, поз. 2), который обеспечивает процесс вертикального вытягивания, с помощью крюков (рис. 4, поз. 9) редуктор крепится к потолку коробу (рис. 4, поз. 1), это один из уровней виброзащиты, которая содержит еще несколько уровней: 36 пирамид пенополиуретана (рис. 4, поз. 5), жесткую пластину весом 10 кг (рис. 4, поз. 4) и 4 пирамиды пенополиуретана (рис. 4, поз. 3). Катушка (рис. 4, поз. 8) крепится к выходному валу редуктора, на нити, намотанной на катушку, крепится подложка, которая опускается в стакан с раствором (рис. 4, поз. 10). Для управления двигателем и работы пользователя с установкой через интерфейс (рис. 4, поз. 7), собрана система управления, в которую входит микроконтроллер Arduino, драйвер, располагающиеся в блоке питания (рис. 4, поз. 6), и дисплей, цифровая кнопка и тактовые кнопки, располагающиеся на коробе.

Установка обеспечивает скорость вытягивания в диапазоне от 0,01 до 3 мм/мин, погрешность высоты вытягивания составляет 0,1 мм. Поскольку в процессе движения подложки происходит деформирование частиц, зависящее от скорости вытягивания, то варьирование скоростью позволяет управлять параметрами опаловой матрицы и корректировать положение фотонной запрещенной зоны.

**Оптимизация процесса получения коллоидной пленки.** Выявление оптимальных условий получения коллоидных пленок осуществлялось экспериментальным образом. Контроль качества пленок осуществлялся методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) и спектрофотометрии. Задача заключалась в получении бездефектных структурно упорядоченных в опаловую матрицу пленок. Результаты предварительных экспериментов показали, что качество пленок зависит от концентрации коллоидного раствора и скорости вытягивания. На рисунках 5 и 6 приведены изображения пленки, полученной из 10% коллоидного раствора полистирольного монодисперсного латекса с диаметром частиц 220 нм на скорости вытягивания 0,8 мм/мин. Очевидно, что пленка распределена по подложке неравномерно, структурная упорядоченность по площади подложки отсутствует, имеются трещины и прочие дефекты.

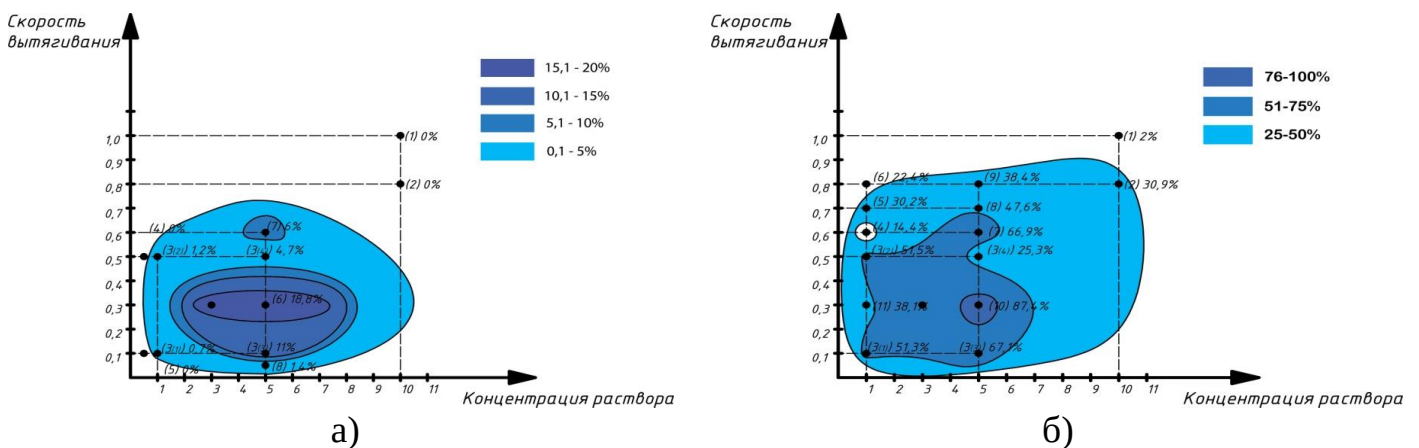


**Рис. 5.** Макроскопический анализ пленки, полученной методом вертикального вытягивания из 10% коллоидного раствора полистирольного монодисперсного латекса (скорость 0,8 мм/мин).



**Рис. 6.** АСМ-анализ пленки, полученной методом вертикального вытягивания из 10% коллоидного раствора полистирольного монодисперсного латекса (скорость 0,8 мм/мин).

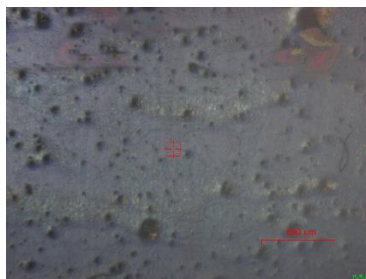
Оптимизация процесса вертикального вытягивания осуществлялась на основании результатов полного факторного эксперимента (ПФЭ). При его проведении интервал варьирования скоростей составлял 0,1 – 0,5 мм/мин, а концентрация раствора варьировалась от 1% до 5%. Критериями оптимизации были относительная площадь структурно упорядоченной пленки и интенсивность отражения в области фотонной запрещенной зоны (рис. 7).



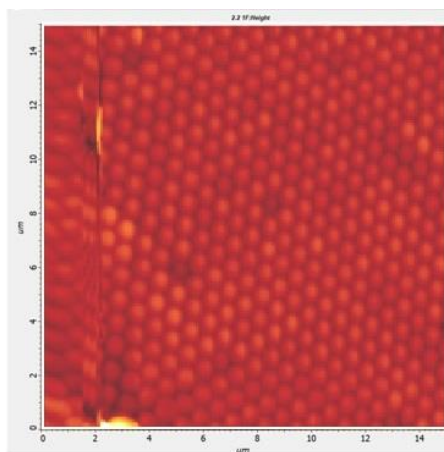
**Рис. 7.** Результаты оптимизации процесса вертикального вытягивания по критериям относительной площади структурно упорядоченной пленки (а) и интенсивности отражения в области фотонной запрещенной зоны (б).

Результаты ПФЭ и последующего исследования факторного пространства выявили области, в которых получают пленки с максимальными значениями критериев. На рисунках 8, 9 представлены изображения пленки, полученной при оптимальных режимах. Для частиц полистирола размером 220 нм таковыми являются скорость вертикального вытягивания 0,3 мм/мин и концентрация раствора 5%.





**Рис. 8.** Макроскопический анализ пленки, полученной методом вертикального вытягивания из 5% коллоидного раствора полистирольного монодисперсного латекса (скорость 0,3 мм/мин).



**Рис. 9.** АСМ-анализ пленки, полученной методом вертикального вытягивания из 5% коллоидного раствора полистирольного монодисперсного латекса (скорость 0,3 мм/мин).

**Заключение.** Метод вертикального вытягивания при использовании специального оборудования является наиболее технологичным и позволяет получать равномерные коллоидные пленки с возможностью варьирования режимами нанесения. Исследование процесса получения пленок показало, что существуют режимы (скорости вытягивания и концентрация коллоидного раствора), обеспечивающие оптимальное качество получаемых пленок. Получаемые таким образом двумерные структуры могут быть использованы в качестве масок для наносферной литографии, а трехмерные – в качестве матриц для формирования нанокомпозитов.

## Литература

1. Нанотехнологии. Азбука для всех [Электронный ресурс] / Под ред. Ю.Д. Третьякова. - 2-е изд., испр. и доп. - М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. - <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785922110488.html>
2. Панфилова Е.В. Перспективные методы формирования планарных наноструктур, Наноинженерия, № 2014/08, М., Машиностроение, 2014 – с. 29-33.

3. Беседина К.Н. Разработка методов управляемого формирования и исследование тонкопленочных опаловых наноструктур: дис. к.т.н., МГТУ им. Н.Э. Баумана, М., 2014. – 163 с.
4. Жуков Р.М., Кулешова В.Л., Панфилова Е.В., Прохоров Е.П. Проектирование стенда для вытягивания фотонно-кристаллических пленок, INTERMATIC – 2017, Материалы Международной научно-технической конференции, М., МИРЭА, 2017 – с. 303-307.