



Получено: 2.05.2024 г. | Принято: 14.05.2024 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.3-4.190.198>

Научная статья

ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОЛЛОИДНЫХ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР. ЧАСТЬ 1

Е.В.Панфилова, к.т.н., доц., ORCID: 0000-0001-7944-2765 / panfilova.e.v@bmstu.ru

В.А.Дюбанов, асп., ORCID: 0009-0007-8569-3270

А.Р.Ибрагимов, асс., ORCID: 0000-0001-9689-1837

Д.Ю.Шрамко, асс., ORCID: 0000-0001-9689-1837

Аннотация. Коллоидные фотонно-кристаллические структуры – перспективный материал наноинженерии. Целью работы являлось создание комплекта масштабируемого оборудования для синтеза моно-дисперсных коллоидных частиц и получения из них сверхрешеток. Авторы представили описание комплекта, результаты исследования структур и сформулировали рекомендации по конструированию оборудования и реализации технологических процессов.

Ключевые слова: коллоидные фотонно-кристаллические структуры, сверхрешетки, фотоника, наноинженерия

Для цитирования: Е.В. Панфилова, В.А. Дюбанов, А.Р. Ибрагимов, Д.Ю. Шрамко. Лабораторный комплекс для получения коллоидных фотонно-кристаллических структур. Часть 1. НАНОИНДУСТРИЯ. 2024. Т. 17. № 3-4. С. 190-198. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.3-4.190.198>.

Received: 2.05.2024 | Accepted: 14.05.2024 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.3-4.190.198>

Original paper

LABORATORY COMPLEX FOR OBTAINING COLLOIDAL PHOTONIC-CRYSTAL STRUCTURES. PART 1

Е.В.Панфилова, Cand. of Sci. (Tech), Docent, ORCID: 0000-0001-7944-2765 / panfilova.e.v@bmstu.ru

В.А.Дюбанов, Postgraduate, ORCID: 0009-0007-8569-3270

А.Р.Ибрагимов, Assistant, ORCID: 0000-0001-9689-1837

Д.Ю.Шрамко, Assistant, ORCID: 0000-0002-0824-6772

Abstract. Colloidal photonic crystal structures are a promising material for nanoengineering. The goal of the work was to create a set of scalable equipment for the synthesis of monodisperse colloidal particles and the production of superlattices from them. The authors presented a description of the kit, the results of a study of the structures and formulated recommendations for the design of equipment and the implementation of technological processes.

Keywords: colloidal photonic crystal structures, superlattices, photonics, nanoengineering

For citation: Е.В. Панфилова, В.А. Дюбанов, А.Р. Ибрагимов, Д.Ю. Шрамко. Laboratory complex for obtaining colloidal photonic-crystal structures. Part 1. NANOINDUSTRY. 2024. Vol. 17. No. 3-4. PP. 190-198. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.3-4.190.198>.

¹ Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия / Bauman Moscow State Technical University (National Research university), Moscow, Russia



ВВЕДЕНИЕ

Структуры, получаемые на основе коллоидных фотонно-кристаллических (ФК) пленок, относятся к базовым материалам для технологий, реализуемых по наноинженерному принципу "снизу-вверх" (bottom-up). Перспективы их использования связывают с устройствами фотоники, оптоэлектроники, лазерной техники и ряда других областей [1]. В [2–4] представлены сенсорные устройства, принцип действия которых основан на смещении положения фотонной запрещенной зоны (ФЗЗ) при механическом, химическом и электростатическом воздействии на структуру. В [5] описан сенсор кислотности раствора, основанный на изменении функциональных зарядовых групп при изменении водородного показателя. В [6–7] рассмотрены варианты использования инверсных коллоидных структур с интегрированными биомиметическими материалами в накопителях и робототехнике. В [8–10] представлены образцы активируемых светом актуаторов, принцип действия которых основан на явлениях цис–транс-изомеризации, фотоциклизации или внутримолекулярном массопереносе. В [11–14] рассматривается применение коллоидных структур при создании цветных дисплеев, в том числе, на основе жидкких кристаллов, плазмонных структур и фотонных кристаллов, подобные дисплеи потребляют меньше питания при работе и требуют меньшего рабочего напряжения по сравнению с конвенциональными LC-дисплеями. Структуры, полученные на основе коллоидных фотонных кристаллов, позволяют повысить квантовый выход, улучшить биологическую активность, снизить токсичность и улучшить катализитические свойства вещества [15–16]. Помимо создания функциональных структур коллоидные слои заданной конфигурации используются в качестве маски при проведении процессов микросферной литографии [17].

Многообразие областей применения коллоидных ФК пленок актуализирует задачу получения различных комбинаций упаковки частиц и количества формируемых при этом слоев. Например, при формировании SERS-активных подложек [18] либо маскирующего слоя для микросферной литографии строго обязательным требованием является получение упорядоченного монослоя частиц. В то время как в фотонно-кристаллическом датчике деформации [19] требуется получение структуры толщиной в несколько мкм, что при характерных размерах частиц в сотни нанометров означает необходимость формирования не менее 10 слоев.

В основе процесса получения упорядоченных периодических коллоидных слоев лежит

INTRODUCTION

The structures obtained on the basis of colloidal photonic-crystalline (PC) films belong to the basic materials for technologies realised by the bottom-up nanoengineering principle. The prospects for their use are associated with photonics, optoelectronics, laser technology, and a number of other fields [1]. In [2–4] sensor devices were presented, the operation principle is based on the photonic forbidden zone (PFZ) position displacement under mechanical, chemical and electrostatic effects on the structure. In [5], a sensor of solution acidity based on the change of functional charge groups when the hydrogen index changes is described. In [6–7], variants of using inverse colloidal structures with integrated biomimetic materials in storage devices and robotics are considered. In [8–10] samples of light-activated actuators were presented, the operation principle of is based on the phenomena of cis-trans isomerisation, photocyclisation or intramolecular mass transfer. In [11–14] the colloidal structures application in forming the colour displays, including those based on liquid crystals, plasmonic structures and photonic crystals, such displays consume less power during operation and require less operating voltage compared to conventional LC displays. The structures obtained on the basis of colloidal photonic crystals allow increasing quantum yield, improving biological activity, reducing toxicity and improving catalytic properties of the substance [15–16]. In addition to creating functional structures, colloidal layers of a given configuration are used as a mask in microsphere lithography processes [17].

The diversity of applications of colloidal PC films highlights the problem of preparing the various combinations of particle packing and the number of layers to be formed. For example, when forming SERS-active substrates [18] or a masking layer for microsphere lithography, it is strictly necessary to obtain an ordered monolayer of particles. Whereas in a photonic crystal strain sensor [19], a structure with a thickness of a few microns is required, which, with characteristic particle sizes of hundreds of nanometres, means that at least 10 layers must be formed.

The process of obtaining ordered periodic colloidal layers is based on the phenomenon of self-organisation (self-assembly) of colloidal particles. External perturbing influences on the self-organising system transfer self-assembly into a controlled direction, affecting coagulation of colloidal microspheres, their movement in solution and the assembly rate into a crystal. The corresponding processes can be used to obtain structures with specified properties, including photonic bandgap (PBG) characteristics. PBG indicators are determined by the colloidal superlattice structure, which, in turn, is related to the colloidal system properties, monodispersity of the particles contained in it and the character of self-assembly. The latter depends on the method of obtaining colloidal particles, as well as modes of their deposition and parameters

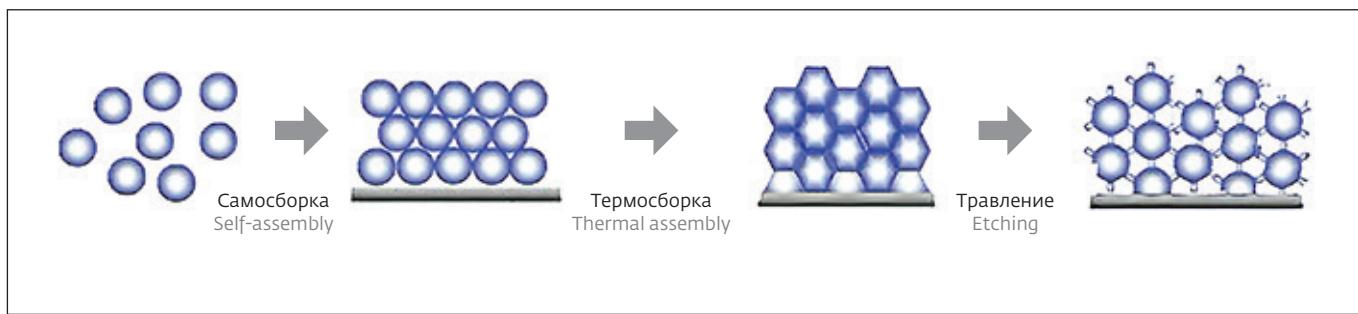


Рис.1. Структурные преобразования в технологии получения коллоидных фотонных кристаллов

Fig.1. Structural transformation stages in technology of colloidal photonic crystals formation

явление самоорганизации (самосборки) коллоидных частиц. Внешние возмущающие воздействия на самоорганизующуюся систему переводят самосборку в управляемое русло, влияя на коагуляцию коллоидных микросфер, их движение в растворе и скорость сборки в кристалл. Соответствующие процессы могут быть использованы для получения структур с заданными свойствами, в том числе характеристиками фотонной запрещенной зоны (ФЗЗ). Показатели ФЗЗ определяются строением коллоидной сверхрешетки, которое, в свою очередь, связано со свойствами коллоидной системы, монодисперсностью содержащихся в ней частиц и характером самосборки. Последний зависит от способа получения коллоидных частиц, а также режимов их осаждения и параметров используемого при этом оборудования. Происходящая при этом коагуляция коллоидных частиц детально описывается известной теорией Дерягина, Ландау, Фервея, Овербека (ДЛФО). Однако, существующая в настоящее время проблема получения бездефектных монокристаллических структур на достаточной для изготовления устройств площади в сотни микрометров тормозит перевод разработок в этой области наноинженерии в практическое русло. Для ее решения необходимо наличие специального оборудования, реализующего контролируемые и управляемые процессы синтеза монодисперсных коллоидных частиц и получения из них сверхрешеток. Поэтому целью данной работы являлась разработка и создание комплекта масштабируемого оборудования и специальной оснастки для лабораторий научных и учебных заведений, а также определение рациональных режимов их функционирования.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Процесс изготовления коллоидных ФК-структур состоит из этапов очистки подложек; синтеза коллоидных частиц; их самосборки и формирования коллоидных монослоев, пленок либо 3D-структур; упрочняющей термообработки; тонкой подгонки

of the equipment used in this process. The coagulation of colloidal particles occurring in this process is described in detail by the well-known theory of Deryagin, Landau, Fervay, Overbeck (DLFO). However, the current problem of preparing the defect-free single-crystal structures on an area of hundreds of micrometres sufficient for device fabrication hinders the transfer of developments in this area of nanoengineering into practical applications. For its solution it is necessary to have special equipment realising controlled and manageable processes of synthesis of monodisperse colloidal particles and obtaining superlattices from them. Therefore, the aim of this work was to develop and create a set of scalable equipment and special tooling for laboratories of scientific and educational institutions, as well as to determine the rational modes of their operation.

METHODS AND MATERIALS

The fabrication process of colloidal PC structures consists of the stages of substrate cleaning; synthesis of colloidal particles; their self-assembly and formation of colloidal monolayers, films or 3D structures; hardening heat treatment; fine fitting of monolayer lattice parameters by plasma etching and microscopic and spectral control (Fig.1).

Since colloidal solutions have a tendency to age, and unstrengthed structures degrade rapidly, there is an obvious need to create a complex of equipment characterised by a unity of place, implementing the above operations (Fig.2). The equipment used in it should provide possibility of monitoring and control of key process parameters. We have created a laboratory complex that meets these requirements. Currently, it is used both in the educational process and in research work to produce structures based on silicon dioxide (silica) particles and polystyrene monodisperse latex PS with diameters from 100 to 500 nm. Steps such as media purification and preparation, heat treatment and plasma etching are realised therein using commercial equipment. For the stages of colloidal solution synthesis and colloidal layer deposition, original plants, stands and tooling were designed

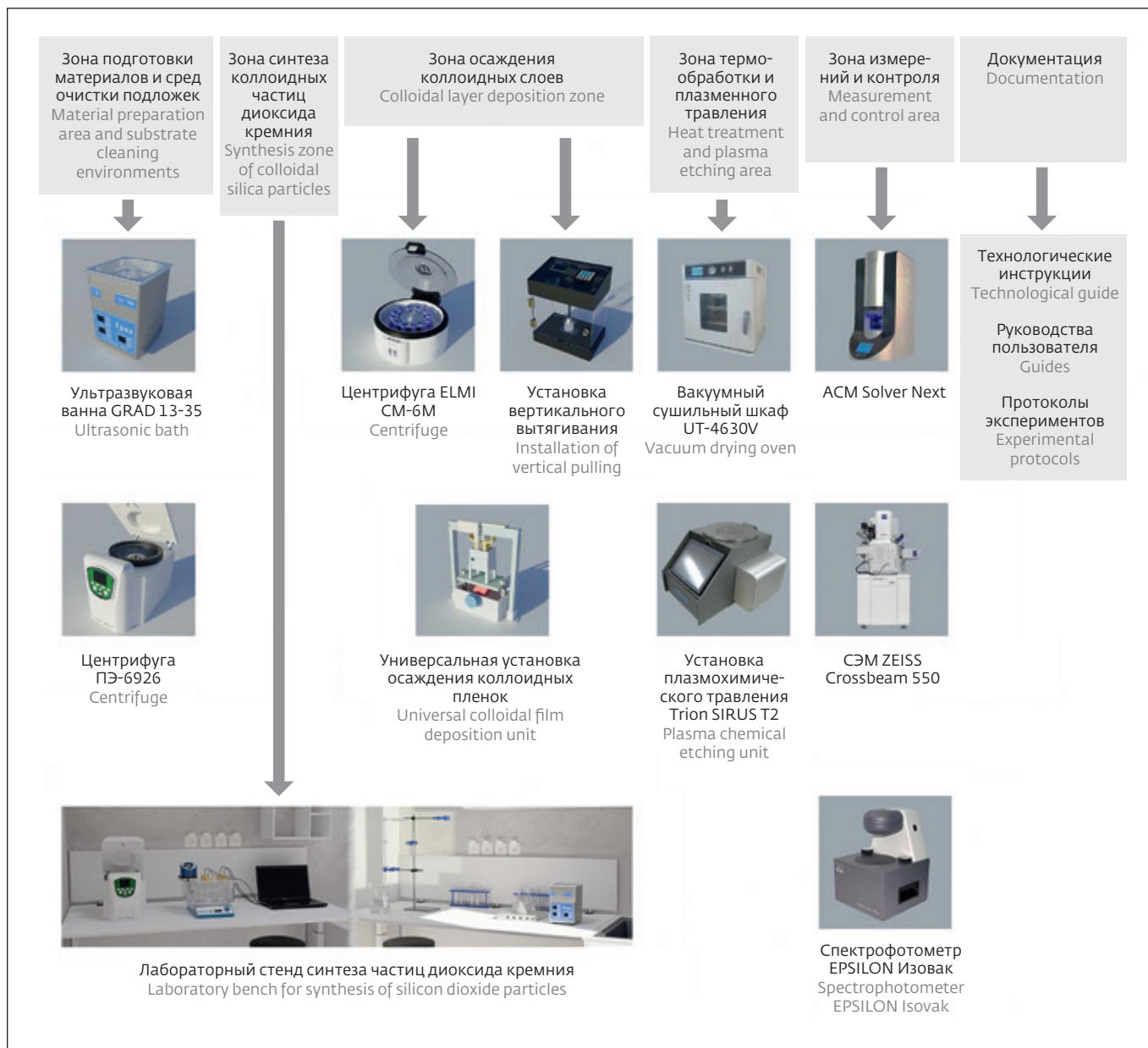


Рис.2. Структура лабораторного комплекса

Fig.2. Structure of the laboratory complex

параметров решетки монослоя плазменным травлением и микроскопического и спектрального контроля (рис.1). Поскольку коллоидные растворы имеют склонность к старению, а неупрочненные структуры быстро деградируют, очевидна необходимость создания характеризуемого единством места комплекса оборудования, реализующего названные выше операции (рис.2). Используемое в нем оборудование должно обеспечивать возможность контроля и управления ключевыми параметрами процесса. Нами был создан отвечающий названным требованиям лабораторный комплекс. В настоящее

и manufactured. The methods used in this process are described below.

Silicon dioxide SiO_2 , polystyrene PS and polymethyl methacrylate PMMA microspheres are used in practice to obtain colloidal FC structures. Organic microspheres are characterised by high monodispersity, silicon dioxide is thermally and chemically stable, and is easily integrated into optoelectronic circuits. Therefore, the presented complex is designed to operate with both organic materials and silicon dioxide. We use commercial standard polystyrene samples. Colloidal solution of silicon dioxide is synthesised on the basis of the laboratory complex.

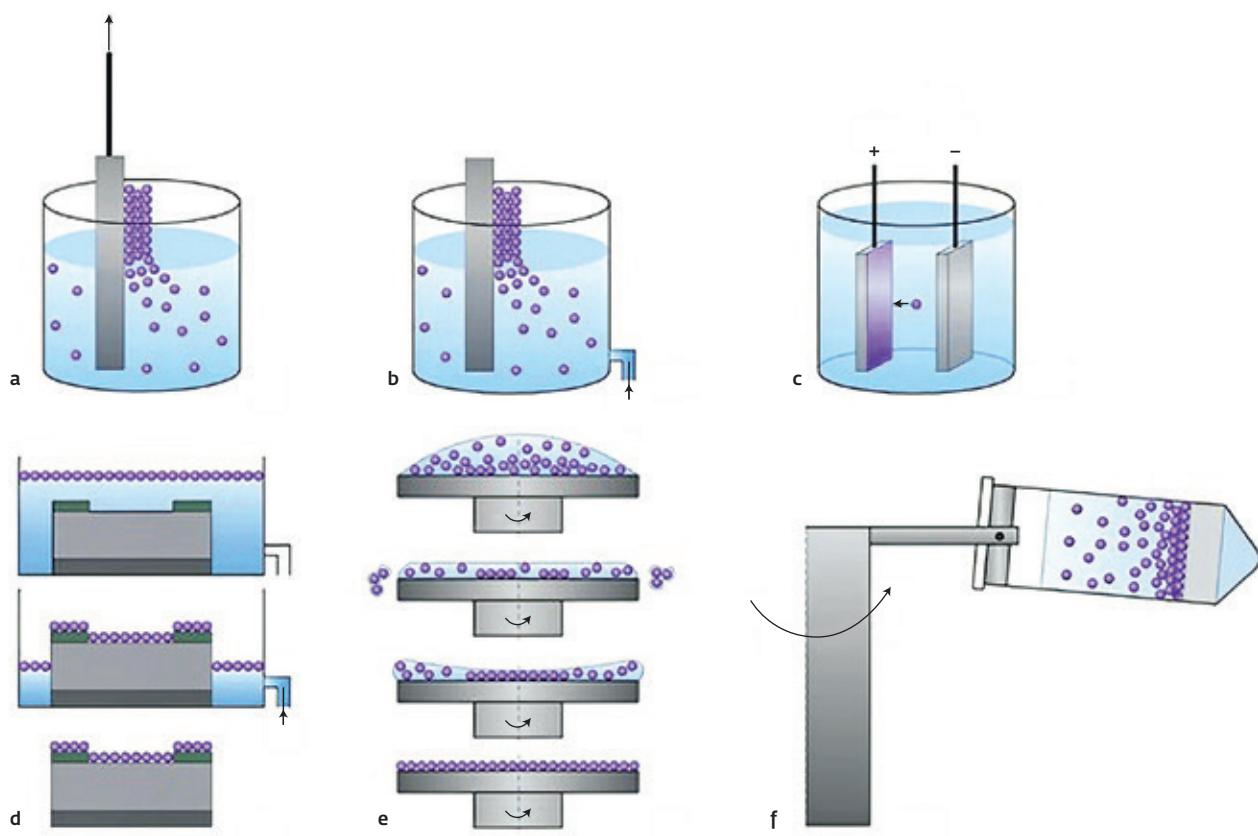


Рис.3. Методы управляемого воздействия на процесс самосборки при получении коллоидных ФК-структур: а – метод вертикального осаждения; б – метод вертикального осаждения; в – метод электрофоретического осаждения; г – метод Ленгмюра – Блоджетт; д – метод центрифугирования; е – метод центрифугирования в пробирках

Fig.3. Methods of controlled stimulation of self-assembly process in obtaining colloidal photonic crystals: a – dip coating; b – vertical deposition; c – electrophoretic deposition; d – Langmuir – Blodgett technique; e – spin coating; f – centrifugation method in test tubes

время он используется как в учебном процессе, так и в научно-исследовательской работе, для получения структур на основе частиц диоксида кремния (кремнезема) и полистирольного монодисперсного латекса PS диаметром от 100 до 500 нм. Такие этапы, как очистка и подготовка сред, термообработка и плазменное травление реализуются в нем на коммерческом оборудовании. Для этапов синтеза коллоидного раствора и осаждения коллоидных слоев были спроектированы и изготовлены оригинальные установки, стенды и оснастка. Ниже представлено описание используемых при этом методов.

Для получения коллоидных ФК-структур на практике используются микросфера диоксида кремния SiO_2 , полистирола ПС и полиметилметакрилата ПММК. Органические микросфера характеризуются высокой монодисперсностью, диоксид кремния обладает термической и химической стойкостью, легко интегрируется в оптоэлектронные

The synthesis of silicon dioxide particles (SDP) is carried out by the modernised Stober method in terms of the nucleation stage (Fig.3). It is this stage that determines the monodispersity of the obtained particles, for its increase the pretreatment of initial tetraethoxysilane (TEOS) is used. The size of formed SDPs is determined by the hydrolysis ratio and condensation rates, which, in turn, can be set by varying concentration of ammonia in the mixture.

To increase accuracy of the obtained results, the synthesis process is realised under conditions of strict control of a large number of factors determining the size and monodispersity of particles, such as: purity of the reagents used and their concentration, mixing protocol, reaction temperature, mixing frequency, and process duration.

To obtain colloidal films under conditions of externally controlled self-assembly, the laboratory complex uses electrophoresis, centrifugation, Langmuir – Blodgett and



схемы. Поэтому предлагаемый комплекс рассчитан на работу как с органическими материалами, так и с диоксидом кремния. Мы используем коммерческие стандартные образцы полистирола. Коллоидный раствор диоксида кремния синтезируется на базе лабораторного комплекса.

Синтез частиц диоксида кремния (ЧДК) осуществляется модернизированным в части этапа зародышеобразования методом Штобера (рис.3). Именно этот этап определяет монодисперсность получаемых частиц, для ее повышения используется предобработка исходного тетраэтоксисилана (ТЭОС). Размер формируемых ЧДК определяется соотношением скоростей процессов гидролиза и конденсации, которое, в свою очередь, может быть задано варьированием концентрации аммиака в смеси.

Для повышения точности получаемых результатов процесс синтеза реализуется в условиях жесткого контроля большого количества факторов, определяющих размер и монодисперсность частиц, таких как чистота используемых реагентов и их концентрация, протокол смешивания, температура реакции, частота перемешивания, длительность процесса.

Для получения коллоидных пленок в условиях управляемой внешнего воздействия самосборки в лабораторном комплексе используются электрофорез, центрифугирование, методы Ленгмюра - Блоджетт и вертикального осаждения, реализуемого либо посредством откачки раствора, либо вытягиванием подложки из него (так называемым, вертикальным вытягиванием). Схемы названных методов показаны на рис.3. В лабораторном комплексе реализуются все перечисленные методы управляемого воздействия.

В соответствии с теорией ДЛФО, взаимодействие обладающих двойным электрическим слоем коллоидных частиц происходит за счет электростатики и межмолекулярных Ван-дер-Ваальсовых сил. Первая приводит к стремлению частиц обособиться друг от друга, однако, при столкновениях, они могут образовывать комплексы. Соответственно, процесс формирования коллоидного кристалла можно разделить на три фазы. Первая фаза: частицы находятся в растворе в свободном движении, на отдалении друг от друга. Вторая фаза: частицы сближаются за счет испарения раствора и/или действия внешних сил, в частности силы тяжести, они находятся в зоне действия сил взаимного притяжения и отталкивания между частицами. Третья фаза: частицы сформировали решетку, раствор практически испарился, но между частицами остаются капиллярные мости. Задачей внешнего воздействия на коллоидную систему является создание условий для самосборки частиц и недопущения их коагуляции как в толще раствора, так и вблизи подложки.

vertical deposition methods, realised either by pumping the solution or by pulling the substrate out of it (so-called vertical pulling). Schemes of the mentioned methods are shown in Fig.3. The laboratory complex implements all of the above methods of controlled action.

According to the DLFO theory, interaction of colloidal particles possessing a double electric layer occurs due to electrostatics and intermolecular van der Waals forces. The former leads to desire of particles to separate from each other, however, they can form complexes during collisions. Accordingly, the colloidal crystal formation process can be divided into three phases. First phase: the particles are in solution in free movement, at a distance from each other. Second phase: the particles are brought closer together by evaporation of the solution and/or external forces, in particular gravity, they are in the zone of action of the forces of mutual attraction and repulsion between the particles. Third phase: the particles have formed a lattice, the solution has practically evaporated, but capillary bridges remain between the particles. The task of external influence on the colloidal system is to form conditions for self-assembly of particles and prevent their coagulation both in the solution thickness and near the substrate. The methods realising this approach differ from each other in the way of realisation of external influence on the particle interaction pattern at the first and second stages of colloidal crystal formation.

The vertical pulling method allows to obtain structurally ordered films with a given number of layers and packing density. The essence of the method consists in slow pulling of a vertically arranged substrate from a colloidal solution (Fig.3a). In this process, a meniscus area is formed at the three media air - colloidal solution - substrate interface due to surface tension forces. Evaporation of the solution results in a flow of particles towards the meniscus, forming the highest concentration of particles in this region. Formation begins with a single row of particles deposited on the substrate surface, stopped by frictional and capillary forces, taking into account mutual attraction and repulsion with other particles approaching the substrate [20]. Thus, as the substrate is stretched, hexagonal layers of particles are formed stepwise. To find the number of film layers (k) obtained by self-assembly methods, one can use the formula linking the average evaporation rates of solution and particles to the process parameters [20-21]:

$$k = \beta l j \frac{\phi_p}{0,605 v r (1 - \phi_p)}, \quad (1)$$

where β is a constant depending on the ratio of solute to meniscus velocities, l is the evaporation length, j is the evaporation intensity, ϕ_p is the particle volume fraction, v is the particle pulling velocity, and r is the particle radius.



Реализующие такой подход методы отличаются друг от друга способом реализации внешнего воздействия на картину взаимодействия частиц на первом и втором этапах формирования коллоидного кристалла.

Метод вертикального вытягивания позволяет получать структурно-упорядоченные пленки с заданным количеством слоев и плотностью упаковки. Суть метода заключается в медленном вытягивании вертикально расположенной подложки из коллоидного раствора (рис.3а). В этом процессе на границе раздела трех сред "воздух - коллоидный раствор - подложка" за счет сил поверхностного натяжения образуется область мениска. При испарении раствора возникает поток частиц в сторону мениска, образуя в этой области наибольшую концентрацию частиц. Формирование начинается с одного ряда частиц, осевших на поверхность подложки, останавливающихся силой трения и капиллярной силой с учетом взаимного притяжения и отталкивания с другими частицами, приближающимися к подложке [20]. Таким образом, по мере вытягивания подложки происходит поэтапное формирование гексагональных слоев частиц. Для нахождения количества слоев пленки (k), полученной методами самосборки, можно воспользоваться формулой, связывающей средние скорости испарения раствора и частиц с параметрами процесса [20-21]:

$$k = \beta l j \frac{\Phi_p}{0,605 v r (1 - \Phi_p)}, \quad (1)$$

где β - постоянная, зависящая от соотношения скоростей перемещения раствора к мениску; l - длина испарения; j - интенсивность испарения; Φ_p - объемная доля частиц; v - скорость вытягивания частицы; r - радиус частицы.

На основе теоретического расчета и математического моделирования была построена зависимость количества слоев от скорости вытягивания для 5% коллоидного раствора диоксида кремния с размером частиц 200 нм (рис.4).

Требованиями, предъявляемыми к оборудованию для апробации теоретических исследований, являются плавное и равномерное вытягивание подложки во время всего процесса, а также отсутствие вибраций и минимизация влияния внешних факторов, способных оказать влияние на процесс самосборки частиц.

Сочетание методов вертикального осаждения (рис.3б) и электрофореза (рис.3с) используется для решения задачи равномерного формирования коллоидных структур миллиметровой площади на подложке. В этом случае с целью обеспечения воспроизводимости структур по площади подложки необходимо создать условия, при которых

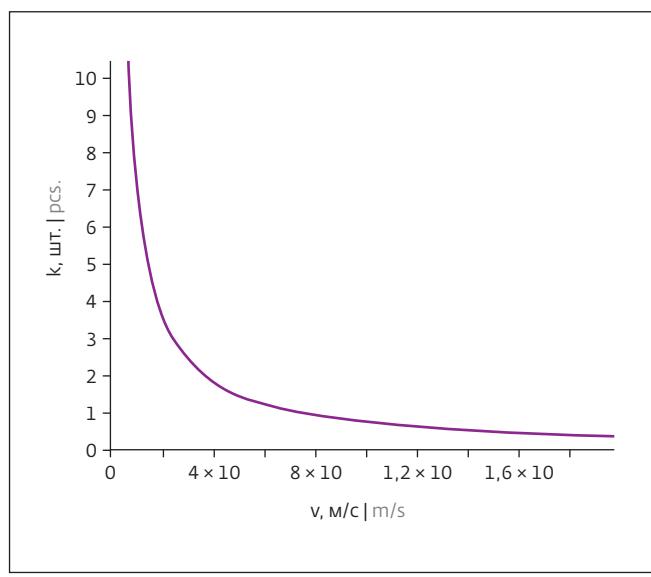


Рис.4. График зависимости количества слоев в коллоидной пленке от скорости вытягивания

Fig.4. Plot of dependence of the number of layers in the colloidal film on the pulling speed

Based on theoretical calculation and mathematical modelling, the dependence of the number of layers on the pulling speed was plotted for 5% colloidal silica solution with a particle size of 200 nm (Fig.4).

The equipment requirements for the validation of theoretical studies are smooth and uniform pulling of the substrate during the entire process, as well as the absence of vibrations and minimisation of the influence of external factors that can affect the process of self-assembly of particles.

The combination of methods of vertical deposition (Fig.3b) and electrophoresis (Fig.3c) is used to solve the problem of uniform colloidal structures formation of millimetre area on the substrate. In this case, in order to ensure structures reproducibility over the substrate area, it is necessary to make conditions under colloidal solution stability will not be disturbed in the volume, while particles coagulation of the dispersed phase should take place directly in the deposition zone. In accordance with the extended DLFO theory, in order to exclude coagulation, i.e. direct interaction between particles, it is necessary to carry out the ordering of microspheres in solution by applying an external influence that keeps microspheres in the sedimentation zone. The energy of such influence should be higher than the chaotic motion energy of microspheres, but less than the energy of the potential barrier characterising the adhesion of particles. Directionality of the impact will not prevent the particles from travelling along the deposition zone. Thus, self-assembly of particles into the structure occurs before their coagulation. Since the interaction energy of



устойчивость коллоидного раствора не будет нарушаться в объеме, при этом коагуляция частиц дисперсной фазы должна протекать непосредственно в зоне осаждения. В соответствии с расширенной теорией ДЛФО, для исключения коагуляции, то есть непосредственного взаимодействия между частицами, необходимо провести упорядочивание микросфер в растворе, прикладывая для этого внешнее воздействие, удерживающее микросферы в зоне осаждения. Энергия такого воздействия должна быть выше энергии хаотичного движения микросфер, но меньше энергии потенциального барьера, характеризующего слизание частиц. Направленность воздействия не будет препятствовать перемещению частиц вдоль зоны осаждения. Таким образом, самосборка частиц в структуру происходит до их коагуляции. Поскольку энергия взаимодействия частиц зависит от температуры, уменьшением температуры системы можно обеспечить увеличение потенциального барьера с уменьшением энергии теплового движения, то есть увеличить диапазон регулирования удерживающего воздействия. И наоборот, увеличение температуры позволяет реализовать самосборку в высокоустойчивых коллоидных системах с приложением меньших внешних воздействий. Регулировка толщины формируемой структуры в этом случае осуществляется контролируемым ограничением электрического потенциала с его уменьшением при удалении от подложки ввиду экранирования зарядами в растворе. В результате при достижении конечного слоя энергия внешнего электростатического воздействия W_3 снижается до величины, меньшей энергии взаимодействия частицы $W_{\text{взаим}}$ с соседями, количество которых равно n :

$$W_3 < nW_{\text{взаим}}. \quad (2)$$

Упрочнение полученных коллоидных кристаллов осуществляется посредством нагрева до температуры, соответствующей началу плавления материала частиц. При этом происходит удаление коллоидной среды и органических остатков из межсферических пустот, и между частицами образуются "мостики". Таким образом, структура коллоидного кристалла становится более прочной, а также улучшаются его оптические характеристики. В процессе термообработки частиц полистирола "мостики" образуются за счет возникновения новых химических связей в ходе термической деструкции и разрушения макромолекулярных связей.

Тонкая доводка диаметров сферических частиц до заданных размеров, а также корректировка межсферических расстояний

particles depends on temperature, decreasing temperature of the system can provide an increase in the potential barrier with energy decrease of thermal motion, i.e. increase the range of control of the restraining effect. Conversely, increasing of temperature makes it possible to realise self-assembly in highly stable colloidal systems with the application of smaller external influences. Adjustment of formed structure thickness in this case is carried out by controlled limitation of the electric potential with its decrease at a distance from the substrate due to screening by charges in the solution. As a result, when the final layer is reached, the energy of external electrostatic influence W_3 is reduced to a value smaller than interaction energy of the particle $W_{\text{взаим}}$ with its neighbours, the number of which is equal to n :

$$W_3 < nW_{\text{взаим}}. \quad (2)$$

Strengthening of the obtained colloidal crystals is carried out by heating to temperature corresponding to the beginning of melting of the particle material. In this case colloidal medium and organic residues are removed from interspherical voids and "bridges" are formed between particles. Thus, the colloidal crystal structure becomes stronger and its optical characteristics are improved. In the process of heat treatment of polystyrene particles like "bridges" are formed due to emergence of new chemical bonds in the course of thermal degradation and destruction of macromolecular bonds.

Fine tuning of spherical particle diameters to a given size as well as correction of interspherical distances to obtain non close-packed colloidal crystals (NCPCC) is carried out by plasma etching in a mixture of argon Ar and oxygen O₂. The etching process and, consequently, the resulting diameter of microspheres are most influenced by the gas flow rate, etching time and power of the source.

The obtained samples are controlled by electron and atomic force microscopy on a ZEISS Crossbeam 550 scanning electron microscope (Carl Zeiss Microscopy, Germany) and a Solver Next scanning probe microscope (NT-MDT, Russia), respectively, and spectrometry on an EPSILON optical spectrophotometer (IZOVAK, Belarus).

PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

Declaration of Competing Interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.



для получения неплотноупакованных коллоидных кристаллов (non close-packed crystal, NCPC) осуществляется методом плазменного травления в смеси аргона Ar и кислорода O₂. На процесс травления и, следовательно, на результирующий диаметр микросфер наибольшее влияние оказывают расход газа, время травления и мощность источника.

Контроль полученных образцов производится методами электронной и атомно-силовой микроскопии на сканирующем электронном микроскопе ZEISS Crossbeam 550 (Carl Zeiss Microscopy, Германия) и сканирующем зондовом микроскопе Solver Next (NT-MDT, Россия), соответственно, и спектрометрии на оптическом спектрофотометре EPSILON (ИЗОВАК, Беларусь).

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Панфилова Е.В. Перспективные методы формирования планарных наноструктур // Наноинженерия, Машиностроение. 2014. № 8. С. 29–33.
2. Chen G., Hong W. Mechanochromism of structural-colored materials // Advanced Optical Materials. 2020. Vol. 8. No. 19. P. 2000984.
3. Ding T. et al. Revealing invisible photonic inscriptions: images from strain // ACS Applied Materials & Interfaces. 2015. Vol. 7. No. 24. PP. 13497–13502.
4. Inan H. et al. Photonic crystals: emerging biosensors and their promise for point-of-care applications // Chemical Society Reviews. 2017. Vol. 46. No. 2. PP. 366–388.
5. Hongbo X. et al. H₂O-and ethanol concentration-responsive polymer/gel inverse opal photonic crystal // Journal of Colloid and Interface Science. 2022. Vol. 605. PP. 803–812.
6. Kocak G., Tuncer C., Bütün V. pH-Responsive polymers // Polymer Chemistry. 2017. Vol. 8. No. 1. PP. 144–176.
7. He G., Manthiram A. Nanostructured Li₂MnSiO₄/C cathodes with hierarchical macro-/mesoporosity for lithium-ion batteries // Advanced Functional Materials. 2014. Vol. 24. No. 33. PP. 5277–5283.
8. Hines L. et al. Soft actuators for small-scale robotics // Advanced materials. 2017. Vol. 29. No. 13. P. 1603483.
9. Wang Y. et al. Chameleon-inspired structural-color actuators // Matter. 2019. Vol. 1. No. 3. PP. 626–638.
10. Joshi G.K. et al. Ultrasensitive photoreversible molecular sensors of azobenzene-functionalized plasmonic nanoantennas // Nano Letters. 2014. Vol. 14. No. 2. PP. 532–540.
11. Ming T. et al. Resonance-Coupling-Based Plasmonic Switches // Small. 2010. Vol. 6. No. 22. PP. 2514–2519.
12. Franklin D. et al. Polarization-independent actively tunable colour generation on imprinted plasmonic surfaces // Nature communications. 2015. Vol. 6. No. 1. P. 7337.
13. Shao L., Zhuo X., Wang J. Advanced plasmonic materials for dynamic color display // Advanced Materials. 2018. Vol. 30. No. 16. P. 1704338.
14. Puzzo D.P. et al. Electroactive inverse opal: a single material for all colors // Angewandte Chemie. 2009. Vol. 121. No. 5. PP. 961–965.
15. Walish J.J. et al. Bioinspired electrochemically tunable block copolymer full color pixels // Advanced Materials. 2009. Vol. 21. No. 30. PP. 3078–3081.
16. Nonappa. Precision nanoengineering for functional self-assemblies across length scales // Chemical Communications. 2023. Vol. 59. No. 93. PP. 13800–13819.
17. Панфилова Е.В., Хань Н.Т.Х., Дюбанов В.А. Разработка процесса получения коллоидного монослоя полистирола для технологии микросферной литографии // Инженерный журнал: наука и инновации. 2020. № 10 (106). Р. 8.
18. Narayanan S. et al. Thin photonic crystal templates for enhancing the SERS signal: a case study using very low concentrations of dye molecules // Physica Scripta. 2024. Vol. 99. No. 3. P. 035512.
19. Snapp P. et al. Colloidal photonic crystal strain sensor integrated with deformable graphene phototransducer // Advanced Functional Materials. 2019. Vol. 29. No. 33. P. 1902216.
20. Беседина К.Н. Разработка методов управляемого формирования и исследование тонкопленочных опаловых наноструктур: дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2014.
21. Ko Y.G., Shin D.H. Effects of liquid bridge between colloidal spheres and evaporation temperature on fabrication of colloidal multilayers // The Journal of Physical Chemistry B. 2007. Vol. 111. No. 7. PP. 1545–1551.

XX

Международный салон
изобретений и новых технологий

НОВОЕ ВРЕМЯ

Устойчивое развитие
во время перемен!



ВСЕРОССИЙСКОЕ
ОБЩЕСТВО
ИЗОБРЕТАТЕЛЕЙ И
РАЦИОНАЛИЗАТОРОВ



ИЗОБРЕТАТЕЛЬ
И РАЦИОНАЛИЗАТОР



Россия, г. Севастополь

26-28
сентября
2024г.

www.newtime2022.simdif.ru

e-mail: aed-sevastopol@yandex.ru, monopor@list.ru

тел.: +7 978 739 37 18, +7 978 916 52 11, +7 908 861 28 38