

4. Yuanzhe Piao. Multi-Ferroic Polymer Nanoparticle Composites for Next Generation Metamaterials// AOARD. Final Report. April 25th 2016. P.13
5. Лагарьков А.Н., Маклаков С.А., Осипов А.В., Петров Д.А., Розанов К.Н., Рыжиков И.А., Седова М.В., Старостенко С. Н., Якубов И.Т. Свойства слоистых структур на основе тонких ферромагнитных пленок // РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА. 2009. Т. 54. № 5. С. 625-633.
6. Хлопов Б.В., Чучева Г.В., Митягина А.Б. Фазовые изменения мультиферроидных магнитных материалов, применяемых в системах внешней памяти // Известия Саратовского университета, новая серия, серия Физика. Т. 17. Выпуск 1. 2017. С 21-33.
7. Митягин А.Ю., Хлопов Б.В. Аппаратура для уничтожения информации с современных носителей. Разработка и создание //Palmarium Academic Publishing, 2012. С. 168.
8. Хлопов Б.В. Оборудование для изменения магнитного состояния тонкопленочного слоя магнитного носителя информации // Т.-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2012. № 3. С. 56–60.
9. Хлопов Б.В., Чучева Г.В., Самойлова В.С., Шашурин В.Д., Митягина А.Б. Исследование возможности мультиферроидных метаматериалов на основе опаловых матриц изменять свои параметры под воздействием внешнего электромагнитного поля// Т.-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. №10. С.38-44.

Исследование процесса получения фотоннокристаллических пленок методом электрофореза

В.А. Дюбанов, Д.А. Езенкова, К.В. Мозер, Е.В. Панфилова
Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ), ул. 2-ая Бауманская д.5

Работа посвящена актуальной теме формирования фотоннокристаллических плёнок. Наиболее рациональным и перспективным способом формирования таких структур является метод электрофореза коллоидного раствора частиц кремнезёма или полистирола. Способ позволяет формировать плёнки с высокой равномерностью структуры и возможностью контролирования процесса. Предложены способы повышения качества формируемых плёнок путём использования специально разработанного стенда.

Investigation of the process of photonic crystalline films obtaining by the electrophoresis method. V.A. Dyubanov, D.A. Ezenkova, K.V. Mozer, E.V. Panfilova. The work is dedicated to the photonic crystal films forming. The most rational and promising way of forming such structures is the method of colloidal solution electrophoresis of silica particles or polystyrene. The method allows one to form films with a high uniformity of structure and makes it possible to control the process. Methods for improving the quality of the formed films by using specially designed equipment are suggested.

Введение. Сформированные из коллоидных микросфер кремнезема SiO₂ или полистирола пленки имеют структуру опаловой матрицы. Ее особенностью является наличие фотонной запрещенной зоны, которая препятствует распространению волны в определенном частотном диапазоне. Такие пленки являются перспективным материалом в фотонике, электронике, лазерной технике и других областях. В работе [1 – 2] авторами предложено использовать фотонные структуры на основе синтетического опала в ряде оптических устройств таких как оптические переключатели, зеркала, фильтры, волноводы, светодиоды и т.д. (рис. 1). В работе [3] авторы предлагают применять фотоннокристаллические структуры в качестве субстратов для люминесцентной микроскопии биологических объектов. В работе [4] кремнезёмные микросферы со средним диаметром 500 нм использовались для формирования литографической маски для переноса рисунка на подложку светодиодного фотонного

кристалла GaN. Авторами работы [5] была разработана плазменная сенсibilизированная инверсная опаловая плёнка для расщепления воды.

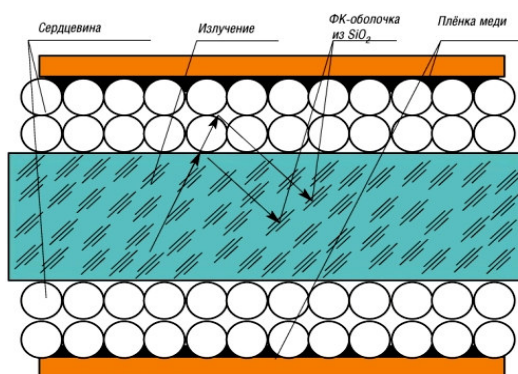


Рис. 1. Строение волновода [1].

Для формирования пленок, имеющих структуру опаловой матрицы, необходимо обеспечить последовательное упорядоченное осаждение коллоидных микросфер (частиц) на поверхности подложки в один или несколько слоев. Метод электрофореза позволяет получать образцы таких пленок в широком диапазоне толщин от нескольких сотен нанометров и даже монослоя до нескольких сотен микрометров. Причем, скорость формирования структуры может быть значительно выше, чем при естественном осаждении частиц из коллоидного раствора. Суть метода состоит в том, что в электрохимическую ванну с заранее приготовленным раствором помещают анод и катод. Под действием подаваемого напряжения частицы, имеющие на своей поверхности двойной электрический слой, начинают двигаться к одному из электродов, самоорганизуясь на его поверхности в пленку с периодической структурой (рис. 2). Направление и скорость движения частиц зависит от расположения электродов и соотношения сил, действующих на частицу.

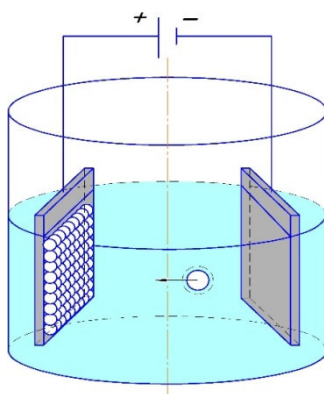


Рис. 2. Схема процесса электрофореза.

Проведение эксперимента. Поведение микросфер в условиях электрофореза является плохо прогнозируемым и зависит от большого числа факторов, в частности, заряда частицы, динамической вязкости коллоидной среды и т.п. Однако математическое моделирование процесса позволило подобрать рекомендуемые диапазоны значений управляемых факторов процесса: подаваемого напряжения, расстояния между электродами, концентрации коллоидных растворов и времени осаждения пленки. Для изучения процесса формирования структур был разработан экспериментальный стенд, представленный на рис. 3.

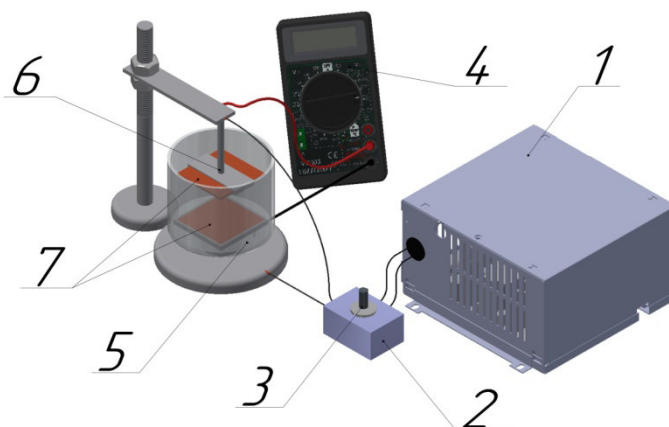


Рис. 3. Экспериментальный стенд для электрохимического осаждения.

Экспериментальный стенд состоит из блока питания 1, цепи понижения напряжения 2 с потенциометром 3, который служит для регулирования подаваемого напряжения, мультиметра 4, который предназначен для контролирования процесса осаждения, электрохимической ванны 5, подложкодержателя 6, который позволяет реализовать горизонтальную установку электродов (подложек), и электродов 7. Стенд позволяет варьировать следующие факторы: ориентацию подложек (электродов) в пространстве, расстояние между подложками - в диапазоне от 0 до 30 мм, напряжение – в диапазоне от 0 до 12 В. Кроме того при проведении исследования варьировались концентрация коллоидного раствора, ее величина не превышала 1%, и водородный показатель раствора pH.

При проведении эксперимента использовались коллоидные частицы кремнезема средним диаметром 250 нм и полистирола диаметром 330 нм. В качестве подложек использовались стальные пластины размером 18×18 мм.

Результаты экспериментальных исследований. Исследование оптических свойств получаемых пленок осуществлялось на спектрофотометре Izovac Epsilon SphE. Исследование структуры пленок производилось на сканирующем зондовом микроскопе Solver Next в атомно-силовом режиме. Наилучшее качество пленок было получено на образцах, сформированных на аноде. Такие пленки были равномерно распределены по поверхности подложки и обладали хорошей для опаловых пленок адгезией.

При визуальном анализе пленок кремнезема иризация не наблюдалась, однако исследование образцов на спектрофотометре показало наличие фотонной запрещенной зоны (ФЗЗ). Пленки полистирола обладали видимой иризацией, спектрам отражения образцов была характерна ФЗЗ (рис. 4), которая уходит в коротковолновую часть спектра, что согласуется с формулой Брэгговской дифракции, где длина волны λ соответствует диаметру частиц d . Можно заметить, что на спектре виднеется второй пик меньшего размера, возникающий по причине многослойности пленки. Рассеяние интенсивности отражения по поверхности образцов пленок не превышало 15%.

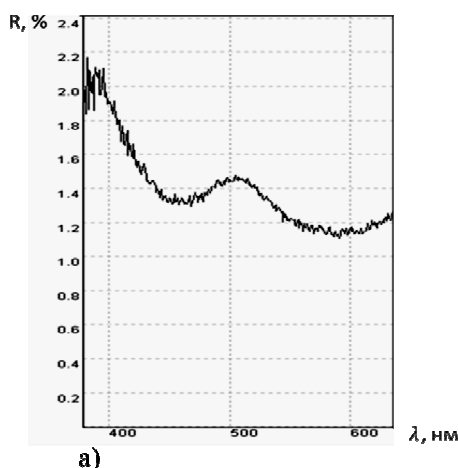


Рис. 4. Спектр отражения образца пленки полистирола, полученного при концентрации раствора 0,32% и напряжении 700 мВ.

В случае осаждения частиц кремнезема при увеличении прикладываемого напряжения было обнаружено смещение ФЗЗ в сторону меньших длин волн и ухудшение равномерности пленки по поверхности подложек. Также к смещению ФЗЗ влево приводило уменьшение водородного показателя рН.

При осаждении частиц полистирола увеличение напряжения также приводило к ухудшению качества пленки, что выражалось в уменьшении интенсивности отражения в области ФЗЗ.

Снижение качества пленок при увеличении напряжения можно объяснить ростом скорости осаждения частиц на подложку и связанным с этим нарушением процесса самоорганизации в упорядоченную опаловую матрицу.

Анализ результатов полнофакторных экспериментов, проведенных в процессе исследования, показал, что наилучшими в исследованных диапазонах условиями для формирования фотоннокристаллических пленок являются следующие режимы: для кремнезема - напряжение 1.5 В, водородный показатель рН 8; для полистирола - напряжение 0.7 В и концентрация раствора 0.2%.

Изображения, полученные в процессе исследования образцов на атомно-силовом микроскопе (АСМ), подтверждают закономерности, выявленные при визуальном и спектрофотометрическом исследовании образцов. На рис. 5 представлено изображение пленки кремнезема, на рис. 6 - профиль поверхности пленки кремнезема, а на рис. 7 -профиль поверхности пленки полистирола.

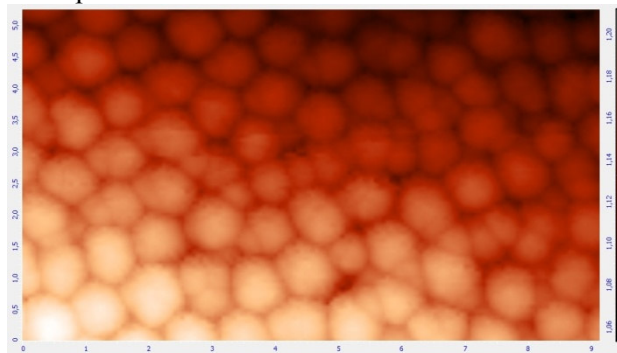


Рис. 5. Результаты АСМ исследования пленки кремнезема.

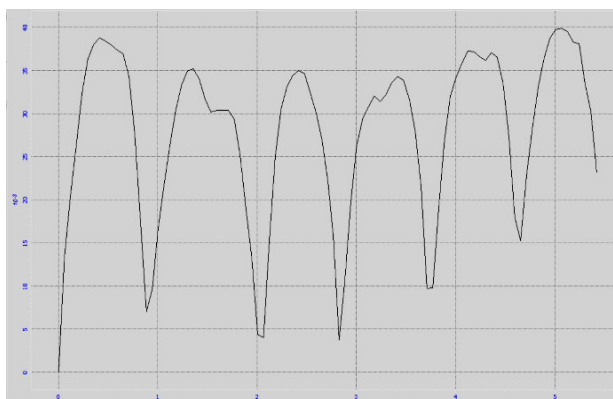


Рис. 6. Профиль поверхности пленки кремнезема.

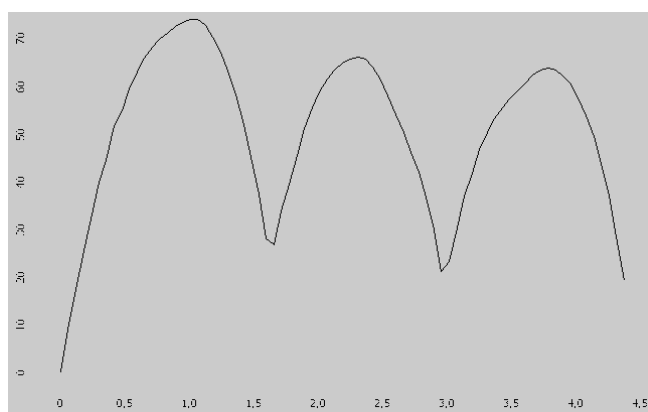


Рис. 7. Профиль поверхности пленки полистирола.

На качество изображений в большой степени влияет равномерность формируемых пленок. Наличие значительных неоднородностей приводит к потере связи между образцом и зондом, поэтому пригодные для анализа сканы были получены только на равномерных пленках с упорядоченной структурой и отсутствием агломераций частиц.

Заключение. Представленные результаты свидетельствуют о том, что метод электрофореза пригоден для формирования фотоннокристаллических пленок на основе частиц кремнезема и полистирола. Вследствие возможности варьирования подаваемого напряжения, геометрии оснастки и параметров коллоидного раствора данный способ позволяет контролировать скорость осаждения коллоидных микросфер, и соответственно, качество формируемой структуры. Продолжение представленного исследования авторы видят в отработке технологий формирования монослоя коллоидных частиц и получения нанокompозитного материала.

Литература

1. E. C. Nelson, N. L. Dias, K. P. Bassett, S. N. Dunham, V. Verma, M. Miyake, P. Wiltzius, J. A. Rogers, J. J. Coleman, X. Li and P. V. Braun, *Nat. Mater.*, 2011, **10**, 676–681 .
2. A. C. Arsenault, D. P. Puzzo, I. Manners and G. A. Ozin, *Nat. Photonics*, 2007, **1**, 468–472 .
3. V. Boyko, G. Dovbeshko, O. Fesenko V. Gorelik, V. Moiseenko, V. Romanyuk, T. Shvets, and P. Vodolazkyu, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2011, **30**, 535.
4. W. N. Ng, P. T. Lai, C. H. Leung and H.W. Choi, *J. Vac. Sci. Technol.*, 2008, **B 26**, 76.
5. R. B. Wehrspohn and J. Upping, *SPIE Newsroom*, 10.1117/2.1201111.003878.