

УДК 667.6+66.063.6.022.36+66.082.4+655.3.025+655.3.022.42

СТРУЙНАЯ ПЕЧАТЬ АЛЮМООКСИДНОГО ЗОЛЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОСВЕТЛЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

Е.А. Еремеева^a, Е.А. Пидько^{a,b}, А.В. Виноградов^a, А.В. Яковлев^a

^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^b Технический университет Эйндховена, Эйндховен, 5600 MB, Нидерланды

Адрес для переписки: Eremeeva@scamt.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 10.10.16, принята к печати 22.12.16

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-16-23

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Еремеева Е.А., Пидько Е.А., Виноградов А.В., Яковлев А.В. Струйная печать алюмооксидного золя для формирования просветляющих покрытий // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 1. С. 16–23. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-16-23

Аннотация

Предмет исследования. Впервые описывается формирование просветляющего покрытия на основе алюмооксидной бемитовой фазы AlOON с низким показателем преломления (1,35), полученного нанесением методом струйной печати на поверхность непористых подложек. Предложенный подход позволил увеличить контрастность цветопередачи интерферирующих изображений на основе диоксида титана на 32% и позволил сформировать цветные изображения с широким углом обзора и высокой стабильностью. **Методы.** Для синтеза золя использован классический золь-гель-подход с применением пептизирующих агентов и нагреве при 90 °С. Смесь обработана на сонификаторе до получения вязкого золя. Вязкость определялась вискозиметром Brookfield HA/HB, а поверхностное натяжение – тензиометром Kyowa DY-700. Алюмооксидные чернила наносились на полированные предметные стекла (26×76 мм², Paul Marienfeld, Германия) поверх нанесенного титандиоксидного интерферирующего слоя. Для печати использован струйный принтер Canon Pixma IP 2840 и Dimatix DMP-2831. Толщина напечатанного слоя AlOON после высыхания на воздухе и удаления растворителей составила не более 150 нм с показателем преломления не менее 1,32 во всем видимом диапазоне. **Основные результаты.** Впервые получены устойчивые коллоидные чернила на основе алюмооксидной матрицы с рН, близкой к нейтральной. Определены способы управления реологическими свойствами коллоидной системы с возможностью контроля вязкости и поверхностного натяжения условиями управляемого золь-гель подхода. Представлены механизмы контролируемой коалесценции осажденных капель, позволяющие наносить просветляющий слой с точностью толщины до 10 нм. Представлена полная характеристика морфологии частиц и топология поверхности напечатанных объектов, изученных при помощи оптического, атомно-силового и сканирующего электронного микроскопов. **Практическая значимость.** Предложен подход для получения цветных интерференционных изображений с использованием двух видов чернил с разными показателями преломления. Использование метода струйной печати для осуществления таких задач дает возможности применения предложенной технологии для изготовления планарных волноводов, а также формирования фотон-индуцированных панелей для создания нового поколения компьютеров.

Ключевые слова

интерференция, струйная печать, гетероструктура, золь-гель, бемит, AlOON, просветляющие покрытия

INKJET PRINTING OF ALUMOOXIDE SOL FOR DEPOSITION OF ANTIREFLECTING COATINGS

Е.А. Eremeeva^a, Е.А. Pidko^{a,b}, А.В. Vinogradov^a, А.В. Yakovlev^a

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^b Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, Netherlands

Corresponding author: Eremeeva@scamt.ru

Article info

Received 10.10.16, accepted 22.12.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-17-1-16-23

Article in Russian

For citation: Eremeeva E.A., Pidko E.A., Vinogradov A.V., Yakovlev A.V. Inkjet printing of alumooxide sol for deposition of antireflecting coatings. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 16–23. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-16-23

Abstract

Subject of Research. This work describes for the first time the formation of antireflective coating on the base of boehmite phase of AlOOH with low refractive index (1.35) by inkjet printing on the nonporous substrate. This method gives the possibility to increase the contrast of colorful interfering images by 32% obtaining by inkjet printing of titanium dioxide sol. The usage of this technology enables to obtain patterns with wide viewing angle and makes them highly stable. **Methods.** Traditional sol-gel method with peptizing agents and heating for 90°C was applied for sol synthesis. Then the mixture was under sonic treatment for the obtaining of viscous sol. The viscosity was determined by Brookfield HA/HB viscometer, and the surface tension by Kyowa DY-700 tensiometer. Aluminum oxide ink was deposited on polished slides (26×76 mm², Paul Marienfeld, Germany), over titanium oxide layer. To print titania ink, we use a desktop office printer Canon Pixma IP 2840 and Dimatix DMP-2831. The thickness of an inkjet AlOOH layer after drying in the air and removal of the solvents did not exceed 150 nm with an RI not less than 1.35 in the entire visible range. **Results.** The stable colloidal ink was obtained for the first time on the base of aluminum oxide matrix with neutral pH. The rheology was regulated by controlling parameters of sol-gel method in the system of aqueous titanium dioxide sol and by adding ethanol that affects the charge of double electrical layer of disperse phase. The controllable coalesce of drops enables to apply antireflection coating within the thickness accuracy of 10 nm. The morphology of particles and the topology of printed structures were analyzed by optical, scanning electron and atomic-force microscopes. **Practical Relevance.** We have proposed the approach to obtain colorful, interference patterns using two types of high refractive inks with different refractive indexes. The inkjet printing method opens new opportunities for preparing optical waveguides and forming photon-induction panels for new generation of computers.

Keywords

interference, inkjet printing, heterostructures, sol-gel, boehmite, AlOOH, antireflection coatings

Введение

Метод создания цветных изображений струйной печатью с использованием коллоидных прозрачных высокорепродуктивных чернил, содержащих наночастицы диоксида титана (TiO₂) [1], является перспективной альтернативой таких методик формирования цветных изображений, как СМЯК и RGB, основанных на использовании пигментов. Появление цвета при печати материалами с высоким показателем преломления (ПП) обуславливается появлением отраженных световых волн, образованных на границе раздела фаз двух материалов с различным ПП – TiO₂ (фазы с высоким показателем преломления) и воздуха или среды с более низким показателем преломления. Интерферируя друг с другом, они образуют световую волну, комплиментарную толщине слоя, вызвавшего это явление. Несомненным преимуществом такого метода формирования цветного изображения является отсутствие ограничений получения оттенков цвета при использовании обычных методов цветной струйной печати. Однако насыщенность окраски, отвечающей за контрастность получаемого изображения, во многом будет зависеть от величины разности показателей преломления, формируемой оптической структурой наносимого материала и материалом подложки, а также определяться интенсивностью бликов отраженного света, возникающего на границе раздела фаз с воздухом [1]. Для получения интерференционного эффекта на твердых субстратах достаточно нанесения чернил с высоким ПП, которые формируют оптическую наноструктуру на поверхности полимерного листа с низким ПП. При разнице показателей преломления этих слоев $\Delta = 0,2$ становится возможным наблюдение интерференции невооруженным глазом [2]. Однако для усиления интерференции и увеличения контрастности цветопередачи прибегают к дополнительным методам, например, к формированию прозрачных гетероструктур с увеличенным коэффициентом отражения или к расширению спектральной полосы отраженного света для увеличения его суммарной интенсивности.

В настоящей работе авторы применили комбинацию этих подходов, обеспечивая синергетический эффект усиления контрастности в тонких интерференционных слоях. Для этого были использованы специальные коллоидные чернила на основе бемита (гидроокись алюминия), которые, в отличие от коллоидного кремнезема, обладают увеличенной реологической стабильностью и не конденсируются в печатающих головках. Использование алюмооксидной фазы в виде тонкослойного покрытия оказывает антибликовый эффект, который, несмотря на снижение интенсивности отраженного света, увеличивает визуальную видимость цвета от интерферирующего TiO₂ слоя на подложке из стекла (рис. 1).

Эффекты просветления активно изучались ранее, особенно на примере золь-гель-кремнезема SiO₂ [3–9]. Однако в настоящей работе такой подход впервые был апробирован с применением метода нанесения низкорепродуктивного материала на струйном принтере, существенно увеличив функциональную перспективу вышеописанного подхода. Толщина наносимых слоев может регулироваться от нескольких десятков нанометров до десятков микрометров за счет регулирования объема и состава капли, выходящей из сопла головки принтера. В то же время нанокристаллическая алюмооксидная фаза чрезвычайно стабильна: она не разлагается в течение длительного времени и полностью экологически безопасна. Более того, высокая контрастность интерференции позволяет проектировать яркие изображения и осуществлять распознавание объекта под определенным углом, при этом сам объект визуально сохраняет первоначальный вид.

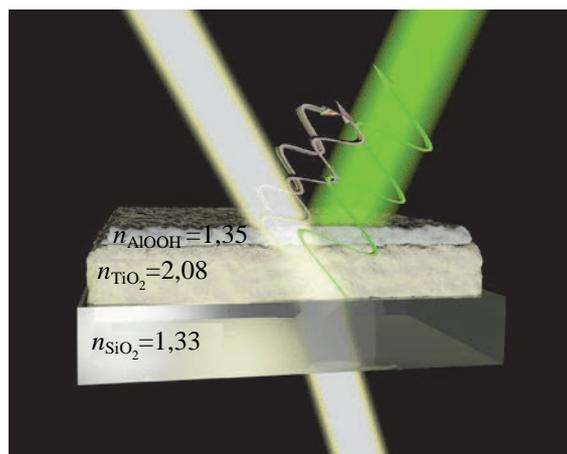


Рис. 1. Визуализация траектории падающего, преломленного и отраженного луча света структуры с тремя слоями, имеющими разные показатели преломления стекла (снизу–вверх): SiO_2 – $n=1,33$; TiO_2 – $n=2,08$; AlOOH – $n=1,35$

Технология приготовления образцов

Синтез золя на основе AlOOH. Для приготовления золя на основе бемита использованы изопропоксид алюминия (Aluminum isopropoxide $\geq 98\%$, Sigma-Aldrich) и деионизованная вода. К 2,2 г изопропоксида алюминия было добавлено 50 мл воды при температуре 90 °С. Затем смесь была помещена в ультразвуковую ванну при температуре нагрева 90 °С при постоянном перемешивании в течение 15 минут до получения наночастиц бемита и полного испарения изопропилового спирта, появившегося в результате реакции гидролиза изопропоксида алюминия. Итоговую суспензию обрабатывали ультразвуком на протяжении двух часов до образования вязкого золя. Полученный стабильный продукт, имеющий значение дзета-потенциала в +45 мВ, остывал до комнатной температуры.

Синтез чернила на основе AlOOH. Полученный золь сушили при 50 °С при пониженном давлении до достижения концентрации твердой фазы не менее 5 мас. %.

Для достижения оптимального поверхностного натяжения и вязкости использовался этанол. Введение спирта гомогенизировалось в течение 12 дней. Затем готовилась серия образцов с разным содержанием этанола для выявления оптимального состава чернил для печати.

Печать структур бемита. Для струйной печати изображений использовались полированные предметные стекла ($26 \times 76 \text{ мм}^2$, Paul Marienfeld, Германия). Печать осуществлялась картриджем, в который предварительно заливалось 8 мл AlOOH-чернил. В настройках драйвера принтера устанавливалось максимальное качество печати. Далее проводилась печать на одной и той же выбранной подложке в однопроходном методе.

Результаты и обсуждение

Кристаллическая структура бемита, приготовленного золь-гель-способом, исследовалась методом порошкового рентгенофазового анализа. Положение характеристических рефлексов в рентгенофазовом анализе образцов соответствует типичной структуре бемита № 21-1307 по базе данных JCPDS.

Такие нанокристаллические частицы при активной поверхностной протонизации образуют устойчивые коллоиды при высоком содержании активной твердой фазы в растворе. При высыхании чернила способны образовывать твердые оттиски формируемой структуры. В зависимости от концентрации самих чернил и плотности капельного нанесения сформированные слои могут обладать различной толщиной с шагом до 10 нм и суммарным диапазоном до 1 мкм, что полностью перекрывает диапазон создания оптических гетероструктур. При этом сами чернила представляют собой прозрачные опалесцирующие золи, в отличие от наиболее популярных в настоящее время нанопигментных чернил, которые активно применяются на самых современных полиграфических площадках при промышленном использовании струйной печати. Как известно, образование золя обеспечивается возникновением дисперсной фазы, стабилизированной наличием двойного электрического слоя с высоким значением дзета-потенциала, описывающего происходящие в системе электрокинетические явления. Стабильность коллоидных чернил регулировалась поверхностной протонизацией путем контроля дзета-потенциала и контролированием pH во время синтеза. Известно, что при значении дзета-потенциала более 30 мВ коллоиды на основе оксидов становятся высокостабильными [6] в течение длительного времени. Без электростатического барьера между частицами происходит быстрая агрегация частиц, и их средний размер резко возрастает. В нашем случае дзета-потенциал +45 мВ для бемитового золя в водной среде означал, что частицы не склонны к коагуляции и осаждению. Вторая составляющая просветляющих чернил – это легколетучий компонент – этиловый спирт. Его роль в системе – повышение скорости испарения, т.е. регулирование скорости пере-

хода в твердое состояние. Низкая концентрация этанола в системе приводит к медленному высыханию, неравномерности полученной структуры. Избыточная концентрация приводит к быстрому высыханию и образованию эффекта «пятна от кофе» – увеличению толщины внешнего края высохшей капли [10, 11]. На рис. 2 приведены значения поверхностного натяжения и вязкости системы в зависимости от концентрации золя и этанола. Исходя из полученных данных, выбран оптимальный состав чернил, включающий в себя 40 об.% золя $AlOON$. Для использования таких чернил в печати они должны удовлетворять нескольким гидродинамическим параметрам, чтобы режим формирования и выхода капли жидкости из сопла обеспечивал большую скорость. В этой связи для полученной жидкости были рассчитаны теоретические критерии: число Z , критерий Рейнольдса и параметр Вебера [12]. Все они удовлетворяли поставленным условиям, учитывая физические особенности полученных чернил: вязкость, плотность, скорость формирования капель и поверхностное натяжение.

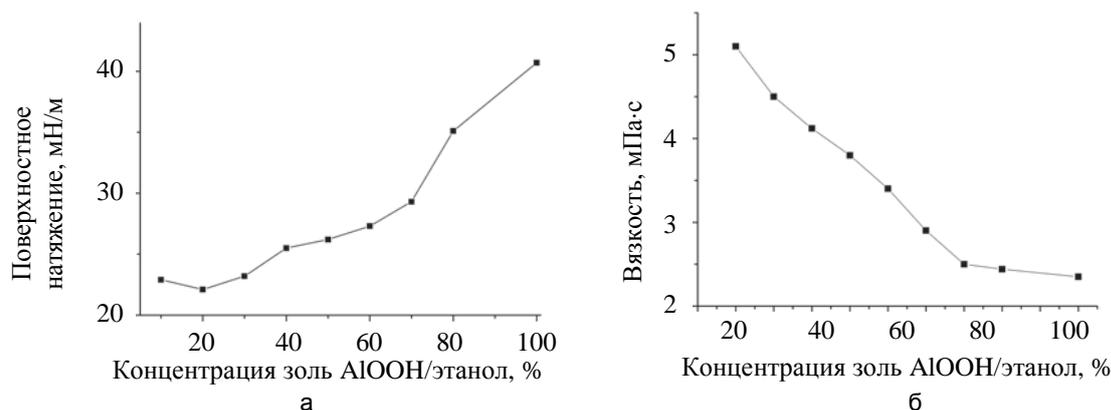


Рис. 2. Графики зависимости значения: поверхностного натяжения чернил от концентрации алюмооксидного золя в среде этанола (а); вязкости чернил от концентрации алюмооксидного золя в среде этанола (б)

Особенности печати пленок и образования капель на основе $AlOON$

Геометрические параметры твердой структуры, формируемой после высыхания капли чернил, будут определяться исходными свойствами растворителя. Чаще всего для регулирования свойств вязкости используют диметилформамид или этиленгликоль, обладающие низким поверхностным натяжением. Если использовать вещества для контролируемой сушки с высокой температурой кипения и низким значением поверхностного натяжения, поток «Марангони» будет двигаться в направлении, противоположном потоку конвекции (рис. 3, а–в), что может предотвратить сегрегацию частиц по линии контакта в течение всего процесса сушки, обеспечивая однородность капли чернил (рис. 3, г) [13]. Механизм образования и высыхания капли коллоидных чернил продемонстрирован на рис. 3.

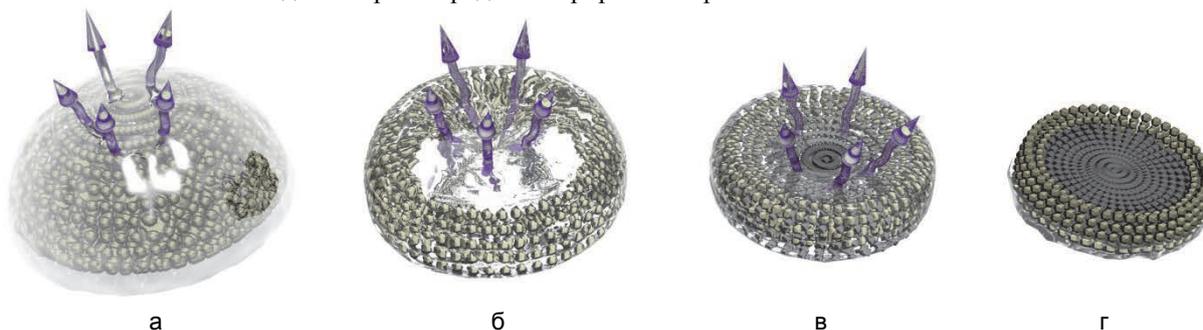


Рис. 3. Визуализация стадий образования твердой структуры на примере одной капли в процессе высыхания: нанесенная капля коллоидных чернил (а); стадии постепенного испарения растворителя из системы с перераспределением твердой фазы по уменьшающемуся объему нанесенной капли (б, в); сформированная однородная и равномерная твердая структура (г)

С другой стороны, использование реагента, контролирующего процесс сушки, может продлить процесс испарения из-за повышенной температуры кипения, что облегчит контроль формирования однородных структур. В случае использования этанола для контроля вязкости и величины поверхностного натяжения водных чернил образуется самоорганизующийся монослой алюмооксидных частиц. Поток «Марангони» противоположен конвекционному потоку, что в результате приводит к уменьшению внешнего потока конвекции и позволяет наночастицам золя самоупорядочиваться в гомогенный двухмерный слой без эффекта краевого утолщения полученной структуры (рис. 4).

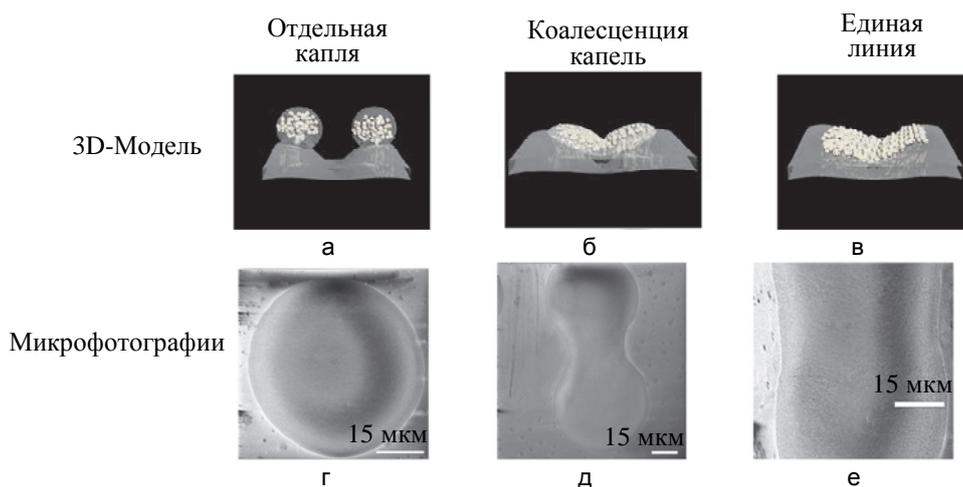


Рис. 4. Механизм коалесценции капель золь-гель-чернил с демонстрацией формирования однородного массива: модели двух нанесенных капель чернил $AlOON$ на поверхность субстрата (а); модель слияния капель коллоидных чернил в процессе испарения растворителя из системы (б); модель образования однородного слоя бемитовой фазы на поверхности субстрата с перепадом рельефа (в); микрофотография капли нанесенных чернил, полученная на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) (г); микрофотография СЭМ коалесцирующих капель коллоидных чернил (д); микрофотография СЭМ образованной единой однородной формы (е)

Таким образом, капля до перехода в твердое состояние должна набрать вязкость, необходимую для фиксации сформированной структуры. Несмотря на то, что большинство методов, развиваемых в этом направлении, продемонстрировали свои успехи, до сих пор остается ряд ограничивающих факторов, таких как свойства подложки, препятствующих развитию общей концепции по реализации этого подхода. На рис. 5 показано, что золь-гель-чернила, которые конденсируются в процессе испарения растворителя, ведут себя одинаково, несмотря на тип субстрата, на который они наносятся [14, 15]. Полученные данные подтверждаются в процессе микроскопического анализа (рис. 5). Чернила были нанесены на два разных типа подложек – Na-K стекло, а также стекло, покрытое слоем оксида In-Sn.

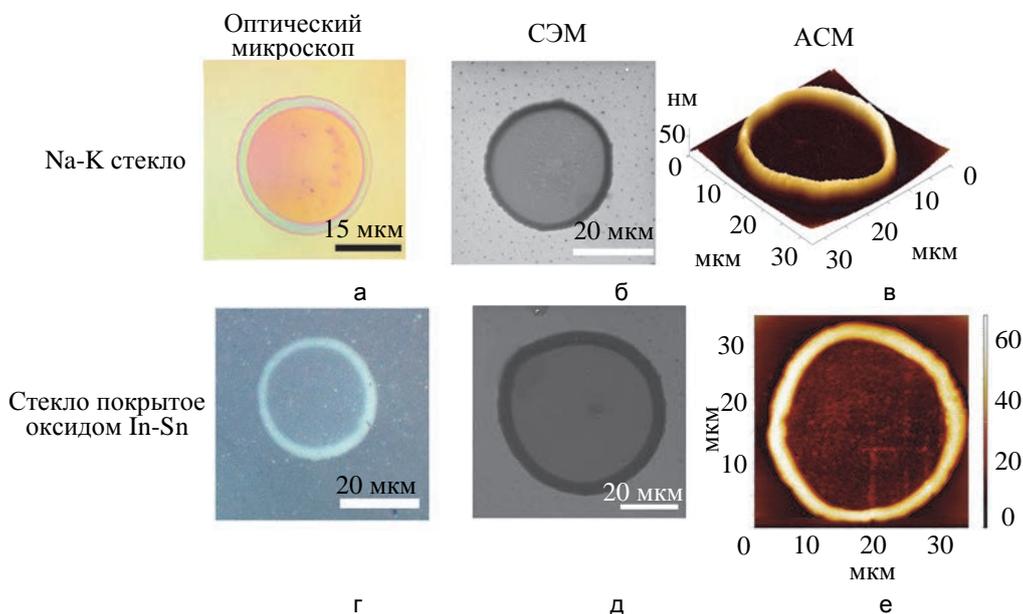


Рис. 5. Результат формирования твердого остатка после нанесения капли струйной печатью на поверхности субстратов различной химической природы. Фотографии высохшей капли чернил на основе $AlOON$: нанесенной на Na-K стекло, полученные на оптическом микроскопе (а), СЭМ (б) и атомно-силовом микроскопе (АСМ) (в); нанесенной на стекло, покрытое оксидом In-Sn, полученные на оптическом микроскопе (г), СЭМ (д) и АСМ (е)

Оптические свойства полученных низкорелрактивных пленочных структур

Измерения ПП тонких пленок TiO_2 , $AlOON$ проведены на конфокальном микроскопе. Неполаризованный падающий свет от галогеновой лампы (HL-2000-FHSA) был сфокусирован на поверхности плен-

ки объективом (Mitutoyo M Plan APO, NA 0.55) со способностью к увеличению в $50\times$ раз. Отраженный свет был собран таким же объективом и направлен в спектрометр (HORIBA LabRam HR) с охлаждающей ПЗС-камерой (Andor DU 420A-OE) и дифракционной решеткой с периодом 150 г/мм. Полученный спектр был нормализован при помощи известного спектра галогеновой лампы. Спектр отражения разных мест пленки позволил оценить погрешность ПП на разных длинах волн. Исходя из интерферирующего спектра, был рассчитан ПП пленок, согласно примеру, представленному в работе [3].

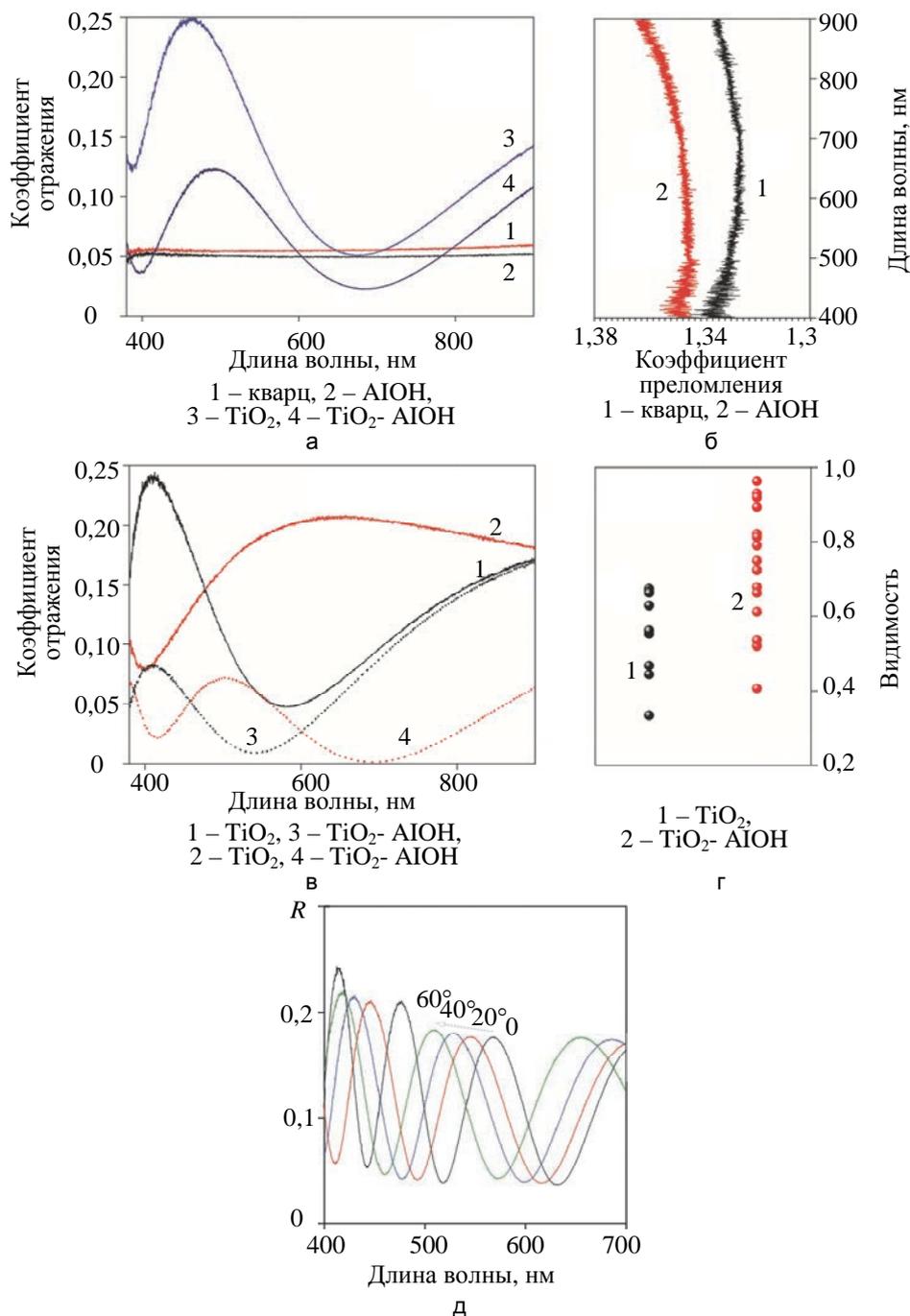


Рис. 6. Спектры отражения пленочной структуры AlOON, сформированной методом струйной печати: коэффициент отражения (а); показатель преломления (б); коэффициент отражения разных по толщине структур, содержащих слои TiO₂ и AlOON (в); видимость нанесенной пленки в зависимости от нанесенного состава (г); зависимость интерференционной и отражательной (R) способности пленки из слоя высокорефрактивного и низкорефрактивного материалов от угла падения света (д)

По сравнению с титанооксидным покрытием кварцевого стекла и гетероструктурой из AlOON и TiO₂ показатель отражения ниже, что видно из рис. 6, а. Это может быть объяснено следующим образом. Показатель преломления тонкого слоя AlOON сравним с показателем преломления плавленого кварца, рис. 6, б, а отражение света от структуры, состоящей из слоев с разными показателями преломления –

$n_{\text{AlOON}}=1,35$, $n_{\text{TiO}_2}=2$, и $n_{\text{SiO}_2}=1,33$ – приводит к снижению интенсивности отраженного света, согласно уравнению

$$R(\lambda) = \left[\frac{n_1 n_3 - n_2^2(\lambda)}{n_1 n_3 + n_2^2(\lambda)} \right]^2,$$

где R – коэффициент отражения; n_1 – показатель преломления SiO_2 ; n_2 – показатель преломления TiO_2 ; n_3 – показатель преломления AlOON ; λ – длина волны, нм.

С другой стороны, уменьшение интенсивности отраженного света обеспечивает нулевую отражательную способность на определенных длинах волн (рис. б, в). Из-за этого интерференция отраженного света выглядит более контрастной.

На рис. б, г, приведено сравнение спектров видимости V интерференционных полос отраженного света пленок TiO_2 и $\text{TiO}_2\text{-AlOON}$, определяемой уравнением

$$V = (I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) / (I_{\text{max}} + I_{\text{min}}),$$

где I_{max} , I_{min} – минимумы и максимумы отраженного света. Средние значения V в пределах всего диапазона спектра для TiO_2 и $\text{TiO}_2\text{-AlOON}$ пленок составили 0,56 и 0,74 соответственно.

На рис. б, д, приведены результаты измерения интерференционной и отражательной способности пленки в зависимости от длины волны и угла падения оптического излучения прибора. Видно, что интерференционная способность пленки повышается с увеличением угла обзора.

Впервые методом струйной печати были сформированы просветляющие покрытия с прецизионной точностью, что свидетельствует об уникальности продемонстрированных результатов. Достичь этого удалось за счет использования алюмооксидных золь-гель-чернил с высокой адгезией к непористой подложке. Кроме того, полученные данные являются основой для использования мягкой химии при создании объектов квантовой коммуникации и эффективной площадки для транспорта фотонов в будущем. Высокая точность нанесения и уникальные оптические характеристики неорганических золь-гель-материалов могут быть основой для получения планарных волноводов, маскирования микроэмбоцированных полимеров, а также формирования фотон-индуцированных панелей с широким углом обзора как основы для создания суперкомпьютера, работающего по принципу фотон/сигнал. Расширяя возможности струйной печати, мы открываем новое научное направление, обладающее колоссальным прикладным значением.

Заключение

В представленной работе впервые применены нанокристаллические золь-гель-системы для создания управляемой интерференции в тонких пленках с использованием бесцветных чернил на основе коллоида AlOON . Наличие высокорелрактивного слоя обеспечивает интерференцию на субстрате, в то время как низкорелрактивное покрытие позволяет выделить монохроматическое отражение света, комплементарное по длине волны с толщиной предыдущего слоя. Уникальные оптические, морфологические и текстурные свойства просветляющих тонких AlOON -пленок позволили реализовать это явление на практике. Впервые разработаны чернила, которые безопасны для экосистемы и не выгорают от действия ультрафиолетового света. В связи с этим авторы надеются, что полученные данные не только приведут к созданию новых технологий цветной печати, но и обеспечат экологическую чистоту процесса. Представленная технология расширяет границы области применения струйной печати для нанесения оптических структур и наноконструкций.

Литература

1. Gaudiana R.A., Minns R.A. High refractive index polymers // *Journal of Macromolecular Science: Part A – Chemistry*. 1991. V. 28. N 9. P. 831–842. doi: 10.1080/00222339108054062
2. Yakovlev A.V., Milichko V.A., Vinogradov V.V., Vinogradov A.V. Inkjet color printing by interference nanostructures // *ACS Nano*. 2016. V. 10. N 3. P. 3078–3086. doi: 10.1021/acsnano.5b06074
3. Goldsmith J., Vasilyev V., Vella J.H., Limberopoulos N.I., Starman L. Black Aluminum: a novel anti-reflective absorbing coating // *NAECON 2014 - IEEE National Aerospace and Electronics Conference*. Dayton, 2014. P. 69–70. doi: 10.1109/naecon.2014.7045780
4. Rajesh D., Swati R. Transparent conducting zinc oxide as anti-reflection coating deposited by radio frequency magnetron sputtering // *Indian Journal of Physics*. 2012. V. 86. N 1. P. 23–29. doi: 10.1007/s12648-012-0010-9
5. Zheng Y., Kikuchi K., Yamasaki M., Sono K., Uehara K. Two-layer wideband antireflection coatings with an absorbing layer // *Applied Optics*. 1997. V. 36. N 25. P. 6335–6338. doi: 10.1364/ao.36.006335

References

1. Gaudiana R.A., Minns R.A. High refractive index polymers. *Journal of Macromolecular Science: Part A – Chemistry*, 1991, vol. 28, no. 9, pp. 831–842. doi: 10.1080/00222339108054062
2. Yakovlev A.V., Milichko V.A., Vinogradov V.V., Vinogradov A.V. Inkjet color printing by interference nanostructures. *ACS Nano*, 2016, vol. 10, no. 3, pp. 3078–3086. doi: 10.1021/acsnano.5b06074
3. Goldsmith J., Vasilyev V., Vella J.H., Limberopoulos N.I., Starman L. Black Aluminum: a novel anti-reflective absorbing coating. *NAECON 2014 - IEEE National Aerospace and Electronics Conference*. Dayton, 2014, pp. 69–70. doi: 10.1109/naecon.2014.7045780
4. Rajesh D., Swati R. Transparent conducting zinc oxide as anti-reflection coating deposited by radio frequency magnetron sputtering. *Indian Journal of Physics*, 2012, vol. 86, no. 1, pp. 23–29. doi: 10.1007/s12648-012-0010-9
5. Zheng Y., Kikuchi K., Yamasaki M., Sono K., Uehara K. Two-layer wideband antireflection coatings with an absorbing layer. *Applied Optics*, 1997, vol. 36, no. 25, pp. 6335–6338. doi: 10.1364/ao.36.006335

6. Liena S.-Y., Wuua D.-S., Yehb W.-C., Liuc J.-C. Tri-layer antireflection coatings (SiO₂/SiO₂-TiO₂/TiO₂) for silicon solar cells using a sol-gel technique // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2006. V. 90. N 16. P. 2710–2719. doi: 10.1016/j.solmat.2006.04.001
7. Kermadia S., Agoudjilb N., Salia S., Tala-Ighila R., Boumaoura M. Sol-gel synthesis of SiO₂-TiO₂ film as antireflection coating on silicon for photovoltaic application // *Materials Science Forum*. 2009. V. 609. P. 221–224. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.609.221
8. Shen B., Li H., Xiong H., Zhang X., Tang Y. Study on low-refractive-index sol-gel SiO₂ antireflective coatings // *Chinese Optics Letters*. 2016. V. 14. N 8. Art. 083101-1-3. doi: 10.3788/col201614.083101
9. Xi J.-Q., Schubert M.F., Kim J.K., Schubert E.F., Chen M., Lin S.-Y., Liu W., Smart J.A. Optical thin-film materials with low refractive index for broadband elimination of Fresnel reflection // *Nature Photonics*. 2007. V. 1. P. 176–179. doi: 10.1038/nphoton.2007.26
10. Yunker P.J., Still T., Lohr M.A., Yodh A.G. Suppression of the coffee-ring effect by shape-dependent capillary interactions // *Nature*. 2011. V. 476. P. 308–311. doi: 10.1038/nature10344
11. Birnie D.P., Kaz D.M., Taylor D.J. Surface tension evolution during early stages of drying of sol-gel coatings // *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 2009. V. 49. N 2. P. 233–237. doi: 10.1007/s10971-008-1849-2
12. Riddick T.M. *Control of Colloid Stability Through Zeta Potential*. Wynnewood, USA, Livingston Publ., 1968.
13. Burgos M., Langlet M. Condensation and densification mechanism of Sol-Gel TiO₂ layers at low temperature // *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 1999. V. 16. P. 267–276.
14. Matavz A., Frunza R.C., Drnovsek A., Bobnar V., Malic B. Inkjet printing of uniform dielectric oxide structures from sol-gel inks by adjusting the solvent composition // *J. Mater. Chem. C*. 2016. V. 4. P. 5634–5641. doi: 10.1039/c6tc01090c
15. Jeong S., Song H.C., Lee W.W., Choi Y., Ryu B.H. Preparation of aqueous Ag Ink with long-term dispersion stability and its inkjet printing for fabricating conductive tracks on a polyimide film // *Journal of Applied Physics*. 2010. V. 108. N 10. P. 102805. doi: 10.1063/1.3511686
6. Liena S.-Y., Wuua D.-S., Yehb W.-C., Liuc J.-C. Tri-layer antireflection coatings (SiO₂/SiO₂-TiO₂/TiO₂) for silicon solar cells using a sol-gel technique. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2006, vol. 90, no. 16, pp. 2710–2719. doi: 10.1016/j.solmat.2006.04.001
7. Kermadia S., Agoudjilb N., Salia S., Tala-Ighila R., Boumaoura M. Sol-gel synthesis of SiO₂-TiO₂ film as antireflection coating on silicon for photovoltaic application. *Materials Science Forum*, 2009, vol. 609, pp. 221–224. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.609.221
8. Shen B., Li H., Xiong H., Zhang X., Tang Y. Study on low-refractive-index sol-gel SiO₂ antireflective coatings. *Chinese Optics Letters*, 2016, vol. 14, no. 8, art. 083101-1-3. doi: 10.3788/col201614.083101
9. Xi J.-Q., Schubert M.F., Kim J.K., Schubert E.F., Chen M., Lin S.-Y., Liu W., Smart J.A. Optical thin-film materials with low refractive index for broadband elimination of Fresnel reflection. *Nature Photonics*, 2007, vol. 1, pp. 176–179. doi: 10.1038/nphoton.2007.26
10. Yunker P.J., Still T., Lohr M.A., Yodh A.G. Suppression of the coffee-ring effect by shape-dependent capillary interactions. *Nature*, 2011, vol. 476, pp. 308–311. doi: 10.1038/nature10344
11. Birnie D.P., Kaz D.M., Taylor D.J. Surface tension evolution during early stages of drying of sol-gel coatings. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2009, vol. 49, no. 2, pp. 233–237. doi: 10.1007/s10971-008-1849-2
12. Riddick T.M. *Control of Colloid Stability Through Zeta Potential*. Wynnewood, USA, Livingston Publ., 1968.
13. Burgos M., Langlet M. Condensation and densification mechanism of Sol-Gel TiO₂ layers at low temperature. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 1999, vol. 16, pp. 267–276.
14. Matavz A., Frunza R.C., Drnovsek A., Bobnar V., Malic B. Inkjet printing of uniform dielectric oxide structures from sol-gel inks by adjusting the solvent composition. *J. Mater. Chem. C*, 2016, vol. 4, pp. 5634–5641. doi: 10.1039/c6tc01090c
15. Jeong S., Song H.C., Lee W.W., Choi Y., Ryu B.H. Preparation of aqueous Ag Ink with long-term dispersion stability and its inkjet printing for fabricating conductive tracks on a polyimide film. *Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 108, no. 10, pp. 102805. doi: 10.1063/1.3511686

Авторы

Еремеева Елена Александровна – инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Eremeeva@scamt.ru

Пидько Евгений Александрович – PhD по химии, профессор-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; доцент, Технический университет Эйндховена, Эйндховен, 5600 MB, Нидерланды, pidko@scamt.ru

Виноградов Александр Валентинович – кандидат химических наук, главный инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, avv@scamt.ru

Яковлев Александр Вячеславович – инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, yakovlev@scamt.ru

Authors

Elena A. Eremeeva – engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Eremeeva@scamt.ru

Evgenii A. Pidko – PhD, Research Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Associate professor, The Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 5600 MB, Netherlands, pidko@scamt.ru

Alexander V. Vinogradov – PhD, Head research engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, avv@scamt.ru

Alexander V. Yakovlev – engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, yakovlev@scamt.ru