

К 85-ЛЕТИЮ
Н.И. СИНИЦЫНА

УДК 535.546.722+546.271

ОПТИЧЕСКИЕ ПРОСВЕТЛЯЮЩИЕ МАТРИЧНЫЕ И ПОРИСТЫЕ
МЕТАМАТЕРИАЛЫ ДЛЯ УСТРОЙСТВ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

© 2022 г. Н. М. Ушаков^{a, c, *}, И. Д. Кособудский^{a, b}, М. Ю. Васильков^a, И. Н. Михайлов^a

^a Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Зеленая, 38, Саратов, 410019 Российская Федерация

^b Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,
Политехническая ул., 77, Саратов, 410054 Российская Федерация

^c Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
ул. Астраханская, 83, Саратов, 410012 Российская Федерация

*E-mail: nmu@bk.ru

Поступила в редакцию 05.03.2022 г.

После доработки 05.03.2022 г.

Принята к публикации 25.03.2022 г.

Разработаны слоистые просветляющие наноструктуры на основе $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ для защитных стекол различных оптоэлектронных устройств. Исследованы оптические характеристики пропускания и отражения метаматериалов на основе синтезированных матричных нанокомпозитов Ag@PMMA . Разработан новый тип оптически прозрачного электропроводящего электрода на основе пористого анодного оксида алюминия с тонкой пленкой золота.

DOI: 10.31857/S0033849422100151

ВВЕДЕНИЕ

Метаматериалы – это композиты, обладающие уникальными электрофизическими, радиофизическими и оптическими свойствами, отсутствующими в природных материалах [1]. В частности, метаматериалы могут обладать нулевой и отрицательной диэлектрической и магнитной проницаемостью [2], что обеспечивает прозрачность таких материалов в оптическом диапазоне длин волн [3]. Оптические просветляющие метаматериалы (ОПМ) находят широкое применение в качестве антиотражающих покрытий (АОП) для создания новых элементных баз оптоэлектроники, оптического хранения информации и преобразования солнечной энергии [4]. В качестве примеров оптически прозрачных метаматериалов можно привести слоистые пространственно-симметричные структуры в виде слоев обычного диэлектрика и метаматериала равной толщины с равными по модулю и противоположными по знаку диэлектрической и магнитной проницаемостями, описанные в работе [5], матричные композитные плазмонные материалы на основе диэлектрической матрицы с электропроводящими наночастицами [6], нанопористые слоистые структуры на поверхности диэлектрика [7]. ОПМ могут быть изготовлены из слоистых ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$; $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$) [8, 9] или матричных композитных материалов (Ag@PMMA) [10, 11]. В настоящее время наиболее

перспективным направлением развития ОПМ являются разработка и применение анизотропных пористых [12] и гиперболических метаматериалов [13], которые наиболее полно обеспечивают широкополосное оптическое согласование по импедансу устройства и окружающей среды, а также, являясь оптически прозрачными средами, способны осуществлять значительное уменьшение отражения электромагнитного излучения (ЭМИ) в терагерцовом диапазоне [14].

В оптическом режиме диэлектрические частицы с малыми потерями обеспечивают сильное электрическое и магнитное рассеяние, известное как резонансы Ми, функцию рассеяния для которых можно разложить в многополюсные ряды. Моды рассеянного электромагнитного поля определяются размером и структурными свойствами диэлектрических частиц [15]. Наночастицы кремния сферической формы размером в несколько сотен нанометров представляют собой уникальную оптическую систему. Согласно теоретическим предсказаниям, основанным на теории Ми, они могут проявлять сильные магнитные резонансы в видимом спектральном диапазоне. Основной механизм возбуждения таких мод внутри наночастиц очень похож на механизм возбуждения резонаторов с разъемным кольцом, но с одним важным отличием: наночастицы кремния имеют гораздо меньшие потери и способны сдвигать

гать длину волны магнитного резонанса в область видимых частот. В работе [16] экспериментально показано, что эти наночастицы обладают сильным магнитным дипольным резонансом, который можно непрерывно настраивать по всему видимому спектру, изменяя размер частиц, и визуально наблюдать с помощью оптической микроскопии в темном поле. Эти оптические системы открывают новые перспективы создания оптических метаматериалов с низкими потерями и нанофотонных устройств.

Таким образом, в оптическом частотном диапазоне для формирования диэлектрических 2D-метаматериалов перспективны материалы в виде кремниевых наносфер на стекле [17] и в виде нанодисков [18]. В целом диэлектрические резонаторы обеспечивают только π -фазовое изменение пропускания, когда электрические и магнитные резонансы находятся на разных частотах. Однако, перекрывая электрические и магнитные дипольные резонансы за счет изменения геометрии диэлектрических резонаторов, можно добиться изменения фазы на 2π , охватывающего весь диапазон. Это было подтверждено экспериментально даже без соблюдения условия равной ширины электрического и магнитного резонанса [18]. В цилиндрических диэлектрических дисках параметрами управления являются их высота, диаметр и пространственный период дисков. Расстояние между резонаторами дополнительно облегчает настройку резонансной связи, которая будет влиять на модовый состав, дисперсию фазы рассеяния и способствовать возникновению электромагнитно-индуцированной прозрачности в таких структурах. На оптических частотах диэлектрические метаповерхности позволяют наблюдать магнитный резонанс Ми при обратном рассеянии даже в отсутствие магнитных материалов. Полная компенсация обратного рассеяния была теоретически предсказана на частоте вне резонанса в массиве кремниевых наносфер, где электрическая и магнитная поляризуемости имеют равные значения.

В последнее время метаматериалы, эpsilon-близкие к нулю (ϵ near zero, ENZ) или с показателем преломления, близким к нулю, оказались в центре широкого исследования благодаря их аномальным электромагнитным свойствам в терагерцовом и оптическом диапазоне. Отрицательная поляризуемость, присущая метаматериалам ENZ, также делает возможным потенциальное применение таких материалов в режимах электромагнитной прозрачности и невидимости [19]. Диэлектрическая проницаемость может быть охарактеризована моделью Друде или Друде–Лоренца. Диэлектрическая проницаемость, близкая к нулю, получается, когда частота приближается к плазменной частоте. Поскольку благородные металлы имеют собственные плазменные частоты в УФ-области оптического спектра, то для работы с ENZ-мета-

материалами в видимой или ближней ИК-области оптического спектра на основе теории эффективной среды необходимо создание композитов путем включения благородных металлов в диэлектрическую среду-матрицу.

В данной работе предметом исследования являются оптически прозрачные покрытия на основе матрицы из полиметилметакрилата со встроенными наночастицами серебра (Ag@PMMA). ENZ-метаматериалы могут быть реализованы с помощью массива нанопроволок серебра или золота, выращенных в пористой диэлектрической матрице анодного оксида алюминия [20] и металлодиэлектрических многослойных структур [21]. В качестве быстро развивающейся области исследований, которая вызывает большой научный интерес, является разработка и исследование метаповерхностей для антиотражающих покрытий [22, 23].

В последние годы большое число исследований сосредоточено на изучении производства нанопористых материалов, таких как пористый кремний (pSi), нанопористый анодный оксид алюминия (ПАОА), и их применении для разработки различных оптоэлектронных высокоэффективных устройств. Различные оптические явления (например, поверхностно-плазмонный резонанс, отражательная интерференция, рамановская спектроскопия и др.), наблюдаемые в нанопористых композитных материалах, позволяют разработать высокоэффективные аналитические инструменты исследования материалов и устройств оптической обработки информации [24].

В общем, структуру самоорганизующегося ПАОА можно описать как матрицу оксида алюминия с плотно упакованными массивами гексагонально расположенных ячеек с цилиндрической порой в центре, которая растет перпендикулярно поверхности алюминиевой подложки [25]. Мембранный тип ПАОА может быть получен путем дополнительного травления оксидного барьерного слоя на дне поры. Это приводит к мембранам с вертикально прямыми наноканалами. Основными структурными параметрами ПАОА являются диаметр пор, расстояние между порами, длина пор и толщина оксидного барьерного слоя. В связи с этим геометрические особенности ПАОА могут варьироваться для диаметра пор в диапазоне 10...400 нм, для межпорового расстояния – 50...600 нм, для длины пор – от нескольких нанометров до сотен микрометров (для длины пор), для толщины оксидного барьерного слоя – 30...250 нм. Другими важными характеристическими параметрами ПАОА являются его плотность пор и пористость, которые могут быть получены в диапазонах ($10^9 \dots 10^{11}$)/ cm^2 и 5...50% соответственно. Структурные (диаметр пор, длина пор и межпоровое расстояние) и химические (распределение и содержание примесей, кристаллографическая

фаза) свойства ПАОА имеют решающее значение при определении его оптических свойств.

Таким образом, изготовление и структурная инженерия становятся ключевыми факторами при разработке оптических устройств на основе ПАОА. Электрохимическое осаждение является простым и недорогим методом модификации пор ПАОА с помощью металлических наноструктур. По сравнению с другими методами осаждения металлов, такими как CVD, ALD или термическое осаждение металлов, электрохимический метод не требует дорогостоящего оборудования и особых условий. Различные наноструктуры на основе металлов (т.е. нанопроволоки, наностержни, нанотрубки и наночастицы) были получены из ПАОА с использованием электрохимического осаждения [26].

Использование наноматериалов открыло новый тип поверхностного плазмонного резонанса (SPR), такой как волноводный (WG) и локализованный SPR (LSPR или LPR), который встречается исключительно в наночастицах и их структурах из благородных металлов. Взаимодействие света с наночастицами/структурами из благородных металлов приводит к генерации плазмонных колебаний определенной частоты, которые локализуются вокруг наночастиц. Колебания LPR зависят от размера, формы и среды, окружающей наночастицы/структуры. LPR чувствителен к изменениям среды локального показателя преломления, которые можно измерить с помощью сдвигов длины волны резонанса. Недавние исследования доказали, что пространственно близкая организация металлических наночастиц приводит к усилению сигналов LPR. Важное место в создании АОП занимают плазмонные нанокомпозиты в виде металл-диэлектрических матричных структур. В работе [27] сообщается о изготовлении, характеристизации и оптическом моделировании нанокомпозита золото-кремнезем и его интеграции в широкополосное АОП для кремниевой подложки.

Цель данной работы – синтезировать и исследовать оптическое отражение таких ОПП, как многослойные диэлектрические покрытия на основе пленок SiO_2 и TiO_2 , оптически прозрачные покрытия на основе матрицы из полиметилметакрилата со встроенными наночастицами серебра (Ag@PMMA) и пористые покрытия на основе ПАОА с тонкой пленкой золота ($\text{Au@Al}_2\text{O}_3$).

1. МНОГОСЛОЙНЫЕ АНТИОТРАЖАЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ НА СТЕКЛЯННЫХ ПОДЛОЖКАХ

Покрытия из диоксида кремния, полученные из золя диоксида кремния, обладают низким показателем преломления, превосходной устойчивостью к абразивному воздействию и отличной долговечностью. Покрытия из диоксида титана

обладают высокой пропускной способностью в видимой области спектра, а также высоким показателем преломления. Известно [28, 29], что на основе диоксида кремния и диоксида титана разработаны широкополосные многослойные просветляющие покрытия для видимой области оптического спектра. Получение просветляющих покрытий на подложках с низким показателем преломления намного сложнее, чем на подложках с высоким показателем преломления, из-за отсутствия материала с низким значением показателя преломления, обладающего одновременно хорошим сопротивлением механическому воздействию и высоким значением оптической прозрачности в видимой области спектра. Исходя из этого можно утверждать, что перспективнее разработка многослойных просветляющих покрытий. Более ранние работы [30, 31] показали, что $\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2$ -покрытия с показателем преломления 1.44...2.20 могут быть получены путем смешивания золь диоксида кремния и диоксида титана. Методами золь-гель-технологии в данной работе были синтезированы многослойные покрытия из диоксидов кремния и титана и их смеси. Покрытие наносили на стекло методом адсорбции из раствора, который реализован в работе в виде погружения подложки в золь. После нанесения покрытия образцы подвергались термической обработке в муфельной печи при температуре 500°C в течение 15 мин. Покрытия, полученные из золь диоксидов титана и кремния, были визуальным образом однородны и обладали хорошей стойкостью к механическому воздействию, что свидетельствует о высокой адгезии диоксидов титана и кремния к стеклу и подтверждает возможность применения золя данного состава в качестве основы для отражающего покрытия. Для определения фундаментальных зависимостей свойств покрытия от параметров их нанесения были проведены исследования реологических свойств золь в зависимости от длительности их созревания, а также определен показатель преломления полученных покрытий. Полученные в ходе эксперимента золи исследовали на стабильность гелеобразования. С течением времени фиксировали изменение показателя с помощью вискозиметра марки ВПЖ-1. С помощью сканирующего атомно-силового микроскопа была изучена наноморфология поверхностей покрытий.

Методика нанесения трехслойного покрытия состоит из трех этапов. На первом этапе на стекло наносится гибридное покрытие на основе $\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2$ и отжигается при $T = 500^\circ\text{C}$; на следующем этапе наносится покрытие TiO_2 и так же отжигается при $T = 500^\circ\text{C}$; финальным этапом является нанесение покрытия SiO_2 и также отжиг при $T = 500^\circ\text{C}$.

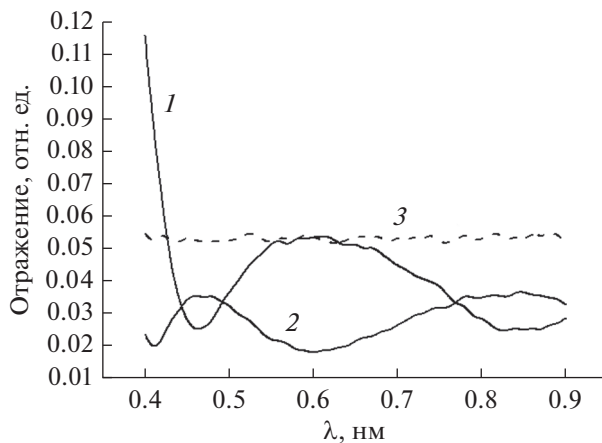


Рис. 1. Оптические спектры отражения трехслойного покрытия $(\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2)/\text{TiO}_2/(\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2)$ (кривая 1), четырехслойного покрытия $(\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2)/\text{TiO}_2/(\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2)/\text{SiO}_2$ на стеклянной подложке (кривая 2) и стекла без покрытия (кривая 3).

Оптические свойства полученных покрытий оценивали на UV/VIS-спектрофотометре “Shimadzu UV-3600 Plus”. Сравнительные спектры отражения трех- и четырехслойного покрытия на стекле приведены на рис. 1. Разработанные трехслойные покрытия на стеклянной подложке представляли собой слой $\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2$ толщиной 84 нм с показателем преломления $n = 1.78$, слой TiO_2 толщиной 134 нм с показателем преломления $n = 2.24$ и слой, аналогичный слою 1 (кривая 1). Лучшие результаты были получены на четырехслойных покрытиях на стекле.

Разработанные четырехслойные покрытия на стеклянной подложке представляли собой следующую структуру: 1) слой $\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2$ толщиной 84 нм с показателем преломления $n = 1.78$; 2) слой TiO_2 толщиной 67 нм с показателем преломления $n = 2.24$; 3) слой аналогичен слою 1, 4) слой SiO_2 толщиной 103 нм с показателем преломления $n = 1.45$ (кривая 2). Для сравнения на рис. 1 приведено спектральное отражение света от поверхности стеклянной подложки (кривая 3).

2. АНТИОТРАЖАЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ Ag@PMMA НА СТЕКЛЯННЫХ ПОДЛОЖКАХ

В основу способа получения полимерных нанокомпозитов были положены методы высокоскоростного термического разложения и химического восстановления определенного металлсодержащего соединения (МСС) в среде раствора полимера при ультразвуковом воздействии. Был разработан способ синтеза наночастиц серебра, основанный на восстановлении его аммиачного комплекса в растворе полимера в 1,2-дихлорэтане при небольшом нагреве реакционной смеси ($T = 70^\circ\text{C}$), метод

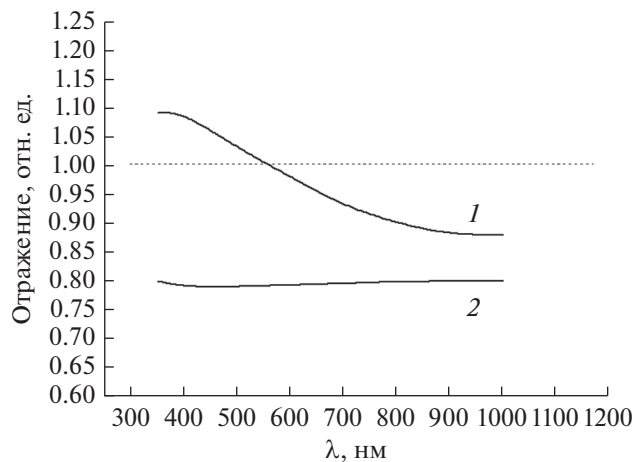


Рис. 2. Спектральные зависимости коэффициента отражения R для полимерного покрытия из PMMA на стекле (кривая 1) и композиционного нанопокрyтия Ag@PMMA на стекле (2); условно коэффициент отражения стеклянной подложки принят за единицу.

“мягкой” химии. Покрытия на стеклянных или полупроводниковых подложках наносили в жидкой фазе растворенного в дихлорэтане порошка Ag@PMMA капельным методом и механически равномерно с помощью ракеля распределяли по поверхности подложки. АОП высокого качества получают, когда наносимая композиция имеет хорошую смачиваемость с поверхностью подложки.

В целях проведения исследований оптических характеристик в работе были получены пленки PMMA толщиной от 5 до 50 мкм с концентрацией серебра от 0 до 15 мас. %, нанесенных на подстилающую поверхность стекла. На рис. 2 представлены спектральные зависимости коэффициентов отражения полимерного покрытия PMMA и композиционного покрытия Ag@PMMA равной толщины, 10 мкм. Полимерные покрытия с массовой концентрацией серебра 3% будут характеризоваться пропусканием, которое сопоставимо с PMMA, и кроме того, даже выше, чем пропускание стекла, вместе с тем коэффициент отражения R такого покрытия будет ниже по сравнению с тем же PMMA.

3. ПРОВОДЯЩИЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ПОРИСТЫХ МЕМБРАН АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Для многих оптоэлектронных приборов, таких как жидкокристаллические дисплеи, органические электролюминесцентные дисплеи, солнечные батареи и т.д., важными элементами являются оптически прозрачные проводящие электроды на основе оксидов (пленки и покрытия) [32]. Известные прозрачные проводящие оксиды (ППО) индий-олово имеют высокую оптическую прозрачность, широкую ширину запрещенной зоны и плазменную частоту в ИК-области спектра. Однако основ-

ным недостатком таких ППО является влияние их резистивности на однородность излучательных характеристик приборов с большой активной площадью. Например, органический люминесцентный дисплей не может равномерно эмитировать свет со всей активной площади при использовании ППО индий–олово. Уменьшение резистивности таких покрытий за счет увеличения плотности свободных носителей заряда в пленке приведет к смещению плазменной частоты в видимую область спектра и снижению оптической прозрачности. Решение этой проблемы возможно, если использовать электроды из пористого алюминия, как это предложено в работе [33].

Применение электродов из пористого алюминия обеспечивает высокую проводимость и прозрачность на большой площади, а также исключает использование редких металлов подобных индию. Однако были исследованы только структуры с малым аспектным отношением (отношение диаметра поры к ее высоте) в пределах от 1.4 до 5, что сужает круг применения такого типа электродов. Если в качестве переходного металла используется золото в форме кластеров, внедренных в поры, то в зависимости от их размеров и пористости мембраны наблюдается частотный сдвиг резонанса поверхностных плазмонов либо в коротковолновую область (“голубой сдвиг”), либо в длинноволновую область (“красный сдвиг”) оптического спектра [34]. При этом такие композитные материалы обладают почти на порядок лучшими нелинейными оптическими свойствами, чем для мембраны из оксида кремния. Если направление “голубого” частотного сдвига поверхностного плазмонного резонанса связано с уменьшением размеров заполненных металлом пор мембраны (квантово-размерный эффект), то “красный” сдвиг вызван уменьшением электронной плотности и экранированием взаимодействия *s*- и *d*-электронов в переходном металле (“spillover” эффект). При этом размеры кластеров золота, как правило, не превышают 2 нм. Влияние более крупнозернистых мезоскопических пленок золота на оптические свойства мембраны пористого алюминия практически не изучено.

В данной работе предлагается и исследуется другой тип прозрачного проводящего электрода на основе пористого анодного оксида алюминия с тонкой пленкой золота на одной из сторон. Предполагалось, что такие структуры обеспечивают высокую оптическую прозрачность и проводимость при высоких значениях аспектного отношения. При изготовлении мембраны был использован щавелевокислый электролит. После химического травления в растворе 0.3 М $C_2H_2O_4$ при 30°C в течение 2.5 ч барьерный слой оксида Al у “основания” пор уменьшался, оксидный нанопористый слой отделялся, дно пор растворялось и напылялся слой золота (со стороны дна пор). После этого

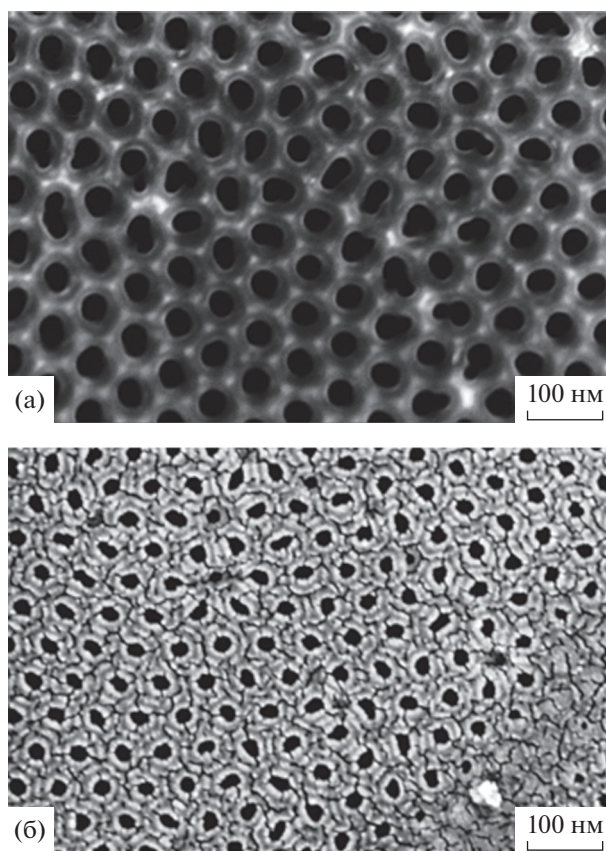


Рис. 3. Микрофотографии мембраны анодного оксида алюминия с односторонним золотым покрытием: а – поверхность мембраны без золотой пленки; б – с золотой пленкой.

этапа были исследованы оптические свойства полученных мембран с напыленным слоем золота и без него. Использовались мембраны со следующими параметрами: средняя плотность пор $\approx 10^{10} \text{ см}^{-2}$, длина поры $\approx 11 \text{ мкм}$, средний диаметр поры $\approx 65 \text{ нм}$, аспектное отношение 169, межпоровое расстояние примерно 105 нм, пористость $\approx 75\%$. Поры упорядочены гексагонально (рис. 3а). На поверхность мембраны напыляли слой золота толщиной около 100 нм с использованием установки магнетронного распыления (Cressington sputter coater 108 auto). Золотая пленка имела мезапористую структуру с размером зерна 25...30 нм и частично покрывала внутренние стенки пор (рис. 3б).

На рис. 4а, 4б приведены оптические спектральные зависимости диффузного (а) и нормального отражения (б) света через образцы с открытой поверхностью пористой мембраны оксида алюминия (кривая 1) и с напыленной на обратной стороне мембраны пленкой золота (кривая 2). Открытая мембрана становится практически прозрачной для света начиная с 350 нм и не имеет каких-либо особенностей в измеряемом диапазоне, 350...900 нм. В отличие от свободной мембраны спектральное

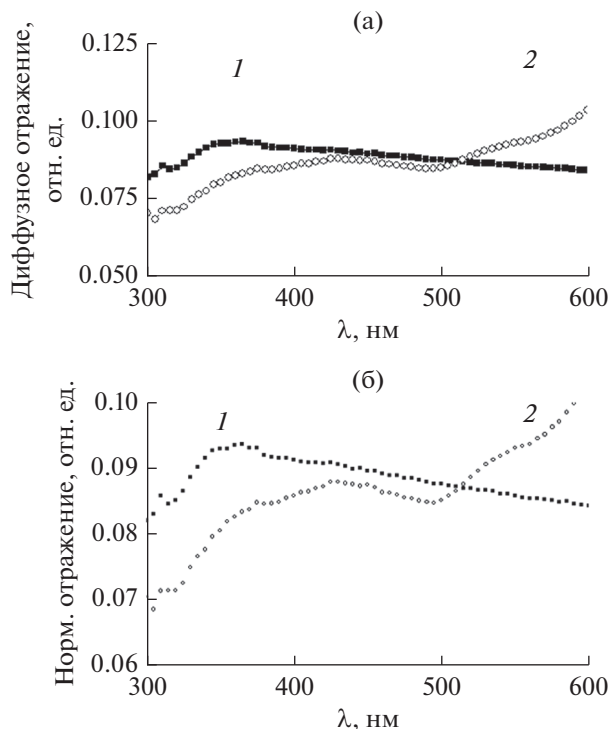


Рис. 4. Спектральное оптическое отражение свободной мембраны анодного оксида алюминия (1) и с нанесенной золотой пленкой (2): а – диффузное отражение; б – нормальное отражение.

пропускание мембраны с золотой пленкой имеет ряд особенностей. Влияние золотой пленки на спектр отражения композита начинается с длины волны 550 нм и растет в “красную” сторону ИК-области спектра. Соответственно, растет показатель преломления в этой области спектра, что указывает на появление участка аномальной дисперсии в таких структурах (измеренная дисперсионная зависимость не приведена). Спектр пропускания имеет максимум на 500 нм, что обусловлено началом роста поглощения света в золотой пленке на более длинных волнах. Удельная проводимость золотой пленки толщиной 100 нм составила 3.4×10^6 См/м, что соответствует результатам работы [36]. Оптическая прозрачность мембраны с золотой пленкой была в пределах 10...20% в широком диапазоне, 400...850 нм, что сравнимо с результатами работы [33], но аспектное отношение наших образцов на два порядка выше, чем в образцах пористого алюминия. Керамические пористые наноструктуры с золотой пленкой обеспечивают отражение значительно меньшее по сравнению со свободной поверхностью стеклянной подложки, особенно на коротких оптических волнах.

Таким образом, предлагаемые композитные структуры на основе пористого оксида алюминия и тонкой золотой пленки могут быть использова-

ны в качестве проводящих прозрачных электродов в устройствах оптоэлектроники с большой активной площадью излучения/поглощения света.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны трехслойные на основе $(\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2)/\text{TiO}_2/(\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2)$ и четырехслойные $(\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2)/\text{TiO}_2/(\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2)/\text{SiO}_2$ покрытия, которые наносятся на внешние стороны защитных стёкол для различных фотоэлектрических и оптоэлектронных устройств, обладают высокой адгезионной способностью и позволяют увеличить оптическое пропускание таких стёкол в диапазоне от 400 до 850 нм в среднем на 5...7% и снизить отражение света в 2...2.5 раза. Проведены исследования оптических характеристик (светопропускание, отражение) в видимой и ближней УФ- и ИК- области толстопленочных (5...50 мкм) ОПМ на основе синтезированных нанокompозитов $\text{Ag}@PMMA$. Установлены зависимости коэффициентов пропускания и отражения для данных материалов от концентрации нанодисперсного наполнителя. Оптимальным вариантом для получения возможного эффекта просветления является создание покрытий с концентрацией серебра от 1 до 3 мас. %. Полученные композиционные материалы могут быть использованы в качестве эффективных АОП для защитных стекол различных оптоэлектронных приборов, в том числе кремниевых фотоэлементов. Разработан новый тип прозрачного электропроводящего электрода на основе пористого оксида алюминия с тонкой пленкой золота на одной из сторон. Показано, что такие структуры при высоких значениях аспектного отношения обеспечивают высокую оптическую прозрачность и электропроводность. Предлагаемые композитные структуры на основе пористого оксида алюминия и тонкой золотой пленки могут быть использованы в качестве проводящих прозрачных электродов в устройствах оптоэлектроники с большой активной площадью излучения/поглощения света.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госзадание № 1021032425796-4-1.3.7; 1.3.2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуляев Ю.В., Лагарьков А.Н., Никитов С.А. // Вестн. РАН. 2008. Т. 78. № 5. С. 438.
2. Krishna A.S.R., Saba S.L., Krishna M.Gh. // Eur. Phys. J. Appl. Phys. 2017. V. 77. № 1. Article No. 201760376. <https://doi.org/10.1051/epjap/2017160376>

3. Nahvi F., Liberal I., Engheta N. // Opt. Lett. 2020. V. 46. № 16. P. 4591.
4. Hutter E., Fendler J.H. // Adv. Mater. 2004. V. 16. № 19. P. 1685.
5. Вытовтов К.А., Барабанова Е.А., Вишневецкий В.М. // РЭ. 2021. Т. 66. № 11. С. 1053.
6. Moiseev S.G. // Appl. Phys. A. 2011. V. 103. P. 619. <https://doi.org/10.1007/s00339-010-6193-z>
7. Shalin A.S., Nikitov S.A. // Progress in Electromagnetics Research B. 2013. V. 47. P. 127.
8. Chshelokova A.V., Kapitanova P.V., Poddubny A.N. et al. // J. Appl. Phys. 2012. V. 112. № 7. P. 073116.
9. Ali K., Khan S.A., Mat Jafri M.Z. // Int. J. Electrochemical Sci. 2014. V. 9. № 12. P. 7865.
10. Гадомский О.Н., Алтунин К.К., Ушаков Н.М. // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 90. № 4. С. 273.
11. Гадомский О.Н., Алтунин К.К., Ушаков Н.М. и др. // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 7. С. 83.
12. Sun J., Cui X., Zhang C. et al. // J. Mater. Chem. C. 2015. V. 3. № 27. P. 7187.
13. Wang G., Yang P., Qi G. et al. // J. Appl. Phys. 2020. V. 127. № 23. P. 233102. <https://doi.org/10.1063/5.0005700>
14. Zhao J., Zhang C., Cheng Q. et al. // Appl. Phys. Lett. 2018. V. 112. № 7. P. 073504. <https://doi.org/10.1063/1.5018017>
15. Evlyukhin A.B., Reinhardt C., Chichkov B.N. // Phys. Rev. B. 2011. V. 84. № 23. P. 235429. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.84.235429>
16. Kuznetsov A.I., Miroshnichenko A.E., Yu.H. Fu et al. // Sci. Rep. 2012. V. 2. P. 492. <https://doi.org/10.1038/srep00492>
17. Evlyukhin A.B., Novikov S.M., Urs Zywiets et al. // Nano Lett. 2012. V. 12. P. 3749. <https://doi.org/10.1021/nl301594s>
18. Decker M., Staude I., Falkner M., Dominguez J. // Adv. Optical Mater. 2015. V. 3. P. 813.
19. Alú A., Engheta N. // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 105. № 26. P. 263906.
20. Alekseyev L.V., Narimanov E.E., Tumkur T. et al. // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 97. № 13. P. 131107. <https://doi.org/10.1063/1.3469925>
21. Gao J., Sun L., Deng H. et al. // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 103. № 5. P. 051111. <https://doi.org/10.1063/1.4817678>
22. Chen H.-T., Zhou J., O'Hara J.F. et al. // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 105. № 7. P. 073901.
23. Zhang B., Hendrickson J., Nader N. et al. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. P. 241113. <https://doi.org/10.1063/1.4904827>
24. Santos A., Kumeria T., Losic D. // Trends Analytical Chem. 2013. № 44. P. 26.
25. Lee W., Ji R., Gösele U., Nielsch K. // Nature Mater. 2006. V. 5. P. 741.
26. Md Jani A.M., Losic D., Voelcker N.H. // Progress in Materials Sci. 2013. V. 58. № 5. P. 636.
27. Hedayati M.K., Abdelaziz M., Etrich Ch. et al. // Materials. 2016. V. 9. № 8. P. 636. <https://doi.org/10.3390/ma9080636>
28. San Vicente G., Bayón R., Germán N., Morales A. // Thin Solid Films. 2009. V. 517. № 10. P. 3157.
29. Li X.G., Shen J. // Thin Solid Films. 2011. V. 519. № 19. P. 6236.
30. Que W.X., Sun Z., Zhou Y. et al. // Thin Solid Films. 2000. V. 359. № 2. P. 177.
31. Gracia F., Yubero F., Holgado J.P. et al. // Thin Solid Films. 2006. V. 500. № 1-2. P. 19.
32. Afre R.A., Sharma N., Sharon Mah., Sharon Mad. // Rev. Adv. Mater. Sci. 2018. V. 53. № 1. P. 79.
33. Nakanishi T., Tsutsumi E., Masunaga K. et al. // Appl. Phys. Express. 2011. V. 4. № 2. P. 025201.
34. Tang H., Wu F., Wei Y., Li Q. // Chinese Optics Lett. 2005. V. 3. № 12. P. 722.
35. Dhara S., Sundaravel B., Ravindran T. R. et al // Chem. Phys. Lett. 2004. V. 399. № 4-6. P. 354.
36. Антонец И.В., Котов Л.Н., Некипелов С.В., Голубев Е.А. // ЖТФ. 2004. Т. 74. № 3. С. 102.