

Научная статья

УДК 666.1.056.8:539.231

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-89-99

ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ ПЛЕНКИ С АНТИБЛИКОВЫМ ПОКРЫТИЕМ

И.А. Сорокин¹, Л.В. Соловьянчик¹, И.В. Мекалина¹, А.Н. Цапенко¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Для предотвращения механических повреждений экранов индикаторных приборов наиболее целесообразно применять защитные стекла на полимерной основе, которые можно интегрировать в готовую конструкцию. Для улучшения качества отображения информации необходимо снизить интенсивность бликов и обеспечить максимальное светопропускание данных изделий, этого можно достичь путем нанесения оптических покрытий. Представлены результаты исследований, направленных на получение четырехслойного антибликового покрытия из оксидов титана и кремния на полимерной пленке с клеевым слоем и без него, изучены их характеристики.

Ключевые слова: антибликовая пленка, антиотражающая пленка, антиотражающее покрытие, антибликовое покрытие, просветляющее покрытие, реактивное магнетронное распыление

Для цитирования: Сорокин И.А., Соловьянчик Л.В., Мекалина И.В., Цапенко А.Н. Оптически прозрачные полимерные пленки с антибликовым покрытием // Труды ВИАМ. 2025. № 2 (144). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-89-99.

Scientific article

OPTICALLY TRANSPARENT POLYMER FILMS WITH ANTI-REFLECTIVE COATING

I.A. Sorokin¹, L.V. Solovyanchik¹, I.V. Mekalina¹, A.N. Tsapenko¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. At present, the most appropriate way to prevent mechanical damage to the screens of indicating devices is to use protective glasses on a polymer base, which can be integrated into the finished design. To improve the quality of displayed information, it is necessary to reduce the intensity of glare, as well as to ensure maximum light transmission of these products, which can be achieved by applying optical coatings. This paper presents the results of research on obtaining a four-layer anti-reflective coating based upon TiO₂ and SiO₂ on a polymer film with and without an adhesive layer, and presents their characteristics.

Keywords: anti-reflective film, anti-glare film, anti-glare coating, anti-reflective coating, reactive magnetron sputtering

For citation: Sorokin I.A., Solovyanchik L.V., Mekalina I.V., Tsapenko A.N. Optically transparent polymer films with anti-reflective coating. *Trudy VIAM*, 2025, no. 2 (144), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-89-99.

Введение

В настоящее время для предотвращения механических повреждений экранов индикаторных приборов наиболее целесообразно использовать защитные стекла на полимерной основе, которые можно интегрировать в готовую конструкцию. В качестве защитных стекол широко применяют акриловое стекло, поликарбонат или бронирующие полиэтилентерефталатные (ПЭТФ) пленки, которые обладают высоким коэффициентом пропускания света и минимальным показателем мутности.

Органические стекла достаточно давно используются в разных сферах. Данный материал имеет высокий коэффициент пропускания света (до 92 %), широкий диапазон рабочих температур, в ~3 раза легче силикатного стекла и в 5 раз лучше него противостоит ударным нагрузкам, не разрушается под воздействием ультрафиолета [1]. Среди недостатков можно отметить высокую вероятность наличия остаточных напряжений в листе, что приводит к растрескиванию при холодном изгибе, а также появлению на его поверхности царапин, которые оставляют твердые предметы.

Поликарбонат гораздо прочнее органического стекла, а обычное силикатное стекло он превосходит по прочности в 200 раз. Показатель пропускания света меньше, чем у акрилового стекла. Устойчив к нагрузкам и механическому воздействию, однако на нем также легко оставляют царапины даже неметаллические предметы [2, 3].

Благодаря особым свойствам ПЭТФ-пленка выделяется среди других полимеров. Материал обладает качествами поликарбоната и органического стекла, но по сравнению с ними более перспективен, сочетает характеристики, присущие аморфным и кристаллическим веществам. Имеет коэффициент пропускания света >90 %. За счет небольшой толщины пленок (в десятки раз меньше, чем у стекол) данный материал обладает наименьшими весовыми характеристиками и является гибким, что облегчает его внедрение в готовые конструкции.

Важным фактором при выборе защитных экранов выступает светораспределение излучателя света, в том числе отражение света от его поверхности. Коэффициенты зеркального отражения главных составляющих падающей волны по энергии на границе раздела двух сред описываются формулами Френеля [4] (рис. 1):

$$\rho_s = \left(\frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right)^2, \rho_p = \left(\frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \right)^2, \quad (1)$$

где ρ_s и ρ_p – коэффициенты отражения для s - и p -поляризованных волн; n_1 и n_2 – показатели преломления первой и второй среды (обычно первой средой является воздух, для которого $n_1 = 1$); θ_i и θ_t – углы падения и преломления.

В случае падения света под углом, близким к нормальному, коэффициент отражения часто называют отражательной способностью R , которую определяют исходя из формулы (1):

$$R = \left| \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right|^2. \quad (2)$$

С точки зрения эксплуатации защитных стекол немаловажной является минимизация бликов на их поверхности, появляющихся в результате падения света от внешнего источника и затрудняющих наблюдение за информацией, отображаемой на экране прибора. Кроме того, необходимо обеспечить максимальное светопропускание данных изделий, а следовательно, снизить потери на отражение. Обе цели могут быть достигнуты с помощью нанесения антибликовых (просветляющих) покрытий на поверхности защитных экранов.

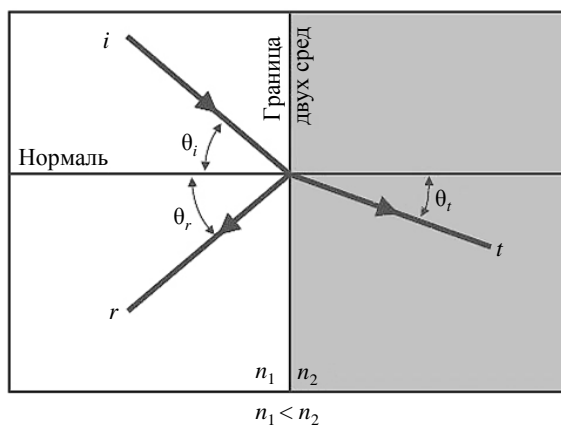


Рис. 1. Отражение и преломление светового луча на границе раздела двух сред (i , r , t – падающая, отраженная и преломленная волны; θ_i , θ_r , θ_t – углы падения, отражения и преломления) [5]

Оптические покрытия уже давно являются неотъемлемой частью многих современных устройств и приборов [6–8]. Использование антибликовых (антиотражающих, просветляющих) покрытий на прозрачных элементах в устройствах фотоники позволяет существенно снизить оптические потери.

Наибольшее распространение получили тонкопленочные просветляющие покрытия, основанные на явлении деструктивной интерференции падающей и отраженной волн, которые в случае однослойной структуры обеспечивают минимальное отражение при удовлетворении следующих условий [9]:

$$n_f = \sqrt{n_1 n_2}, d_f = \frac{\lambda_0}{4n_f} \quad (\text{при } n_f < n_2), \quad (3)$$

где n_f – показатель преломления покрытия; d_f – толщина покрытия, необходимая для возникновения деструктивной интерференции, нм; λ_0 – целевая длина волны для просветления, нм.

Недостатки, присущие однослойным структурам (эффективное просветление одной длины волны, невозможность идеального подбора материала и т. д.), устраняются путем нанесения двух- или многослойных покрытий, подход к проектированию которых остается прежним при некотором усложнении математического аппарата.

В настоящее время существуют несколько основных методов нанесения антибликовых покрытий, в состав которых, как правило, входят тонкие слои фторидов, нитридов или оксидов металлов: магнетронное распыление, химическое осаждение из газовой фазы, термическое испарение и процесс золь-гель [9–13]. Например, для изготовления солнечных батарей интерес представляют антиотражающие пленки с наночастицами оксида никеля толщиной от 50 до 300 нм, которые снижают коэффициент отражения до 6 % [14]. В качестве антиотражающих покрытий также можно использовать тонкие пленки $\text{Si}_x\text{N}_y\text{-SiO}_2$ в различных конфигурациях – в виде одно-, двух- или трехслойного покрытия, нанесение которого с двух сторон дополнительно повышает пропускание образцов. Однослойное антиотражающее покрытие дает незначительный вклад в повышение пропускания, однако основное преимущество заключается в простоте его изготовления [15].

Просветляющее покрытие также изготавливают золь-гель методом на основе SiO_2 , что позволяет получить светопропускание стекла, равное 99,7 % [16]. В работе [17] продемонстрирована возможность изготовления методом реактивного магнетронного распыления прозрачного многослойного покрытия на основе ИТО, SiO_2 , TiO_2 на

силикатных стеклах, обеспечивающего коэффициент отражения света не более 1 % и коэффициент пропускания света не менее 93 %. В работе [18] методом реактивного магнетронного распыления получено четырехслойное просветляющее покрытие на основе SiO_2 и ZnSnO на ПЭТФ-подложках, что позволило достичь интегрального коэффициента отражения в видимой области $\sim 1,33$ % (следует отметить, что при этом исключено отражение от задней поверхности подложки).

Среди перечисленных методов магнетронное распыление позволяет получить химически чистые равномерные покрытия при высокой воспроизводимости результатов и возможности точного контроля толщины покрытия, что особенно важно для многослойной структуры. Более того, данный способ позволяет сохранить подложку относительно холодной, что является одним из решающих факторов при нанесении на чувствительные к перегреву полимерные пленки.

В данной работе представлены результаты исследований, направленных на получение четырехслойного антибликового покрытия из оксидов титана и кремния на полимерной пленке с клеевым слоем и без него, а также их характеристики.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 15. «Наноструктурированные, аморфные материалы и покрытия» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [19–23].

Материалы и методы

Для проведения исследований осуществлены работы по подбору режимов нанесения на установке реактивного магнетронного распыления отдельных слоев четырехслойного антибликового покрытия на основе оксидов титана (мишень Ti) и кремния (мишень Si–Al в соотношении 90:10 (по массе)) на прозрачные ПЭТФ-пленки двух типов: без клеевого слоя и с клеевым слоем. Следует отметить, что наличие алюминия во второй мишени незначительно сказывалось на оптических характеристиках получаемых покрытий. Перед нанесением покрытия подложки проходили финишную ионную очистку в вакууме.

При фиксированном давлении, которое поддерживалось постоянным путем изменения потока аргона, выбрано значение стабилизируемого тока для каждой мишени: 7 и 3 А для Ti и Si–Al соответственно. Выбор стабилизируемого тока обусловлен обеспечением оптимальной для используемых материалов мощности разряда на основании ожидаемого значения напряжения в ходе процесса, что исключает вероятность перегрева, приводящего к расплавлению или растрескиванию мишеней, при сохранении достаточной скорости нанесения.

Питание разряда осуществляли с помощью униполярных импульсов с продолжительностью паузы 5 мкс. Для каждой мишени оптимизирована частота коммутации внутреннего генератора источника питания с целью предотвращения возникновения искр, являющихся следствием отравления катода диэлектрической пленкой [24], при максимально возможной стабильности тока разряда. Данные меры необходимы для недопущения развития дугового разряда, приводящего к нарушению работы системы и браку. Так, установлено, что частота 10 кГц для Ti не допускает образования искровых пробоев. Дальнейшее увеличение частоты нецелесообразно, так как приведет к деформации формы протекающего тока (большему отклонению от прямоугольной формы) [24]. Для Si–Al выбрана частота 40 кГц, являющаяся предельной для используемого источника питания. При данном значении не удалось достичь полного подавления искр, однако оно оказалось достаточным для предотвращения развития дугового разряда. Поскольку искровые пробои не влияют на характеристики покрытия и работу системы в целом, выбранная частота принята удовлетворительной.

Рабочий режим подбирали путем изменения потока натекания кислорода в вакуумную камеру. Выбор обусловлен обеспечением достаточной стехиометричности пленок при сохранении адекватной для поставленной задачи скорости нанесения (режим частично отравленной мишени или максимально приближенный к нему). В процессе нанесения поток кислорода для получения TiO_2 и SiO_2 поддерживался в диапазоне $16,5 \pm 1,5$ и $24,0 \pm 2,0$ (ст. $см^3$)/мин соответственно. Разброс значений натекания кислорода связан с влиянием внешних факторов, погрешностью измерительного оборудования, а также необходимостью поддержания постоянной скорости нанесения в ходе процесса. Скорость нанесения в свою очередь контролировали по показаниям кварцевого датчика толщины и электрическим параметрам разряда.

Изложенная методика изготовления антибликового покрытия применена для отработки нанесения монослоев оксидов. Подобранные режимы затем использовали для получения двухслойных и конечных четырехслойных покрытий состава $TiO_2-SiO_2-TiO_2-SiO_2$. Следует отметить, что двухслойное покрытие не позволяет достичь эффективного просветления в широком диапазоне длин волн для ПЭТФ-пленок, в связи с чем подробно не исследовано.

Спектры пропускания (при падении под углом 0 градусов) и отражения (при падении под углом 8 градусов) излучения исследовали с помощью спектрофотометра, оснащенного интегрирующей сферой, что позволило регистрировать суммарное отражение (как диффузную, так и зеркальную компоненты). Отражение от задней поверхности подложки не исключали из рассмотрения.

Толщину покрытий оценивали путем сопоставления полученных спектральных характеристик с их моделированием в программном пакете. Пример спектров отражения монослоев TiO_2 и SiO_2 , нанесенных на пленку без клеевого слоя, представлен на рис. 2.

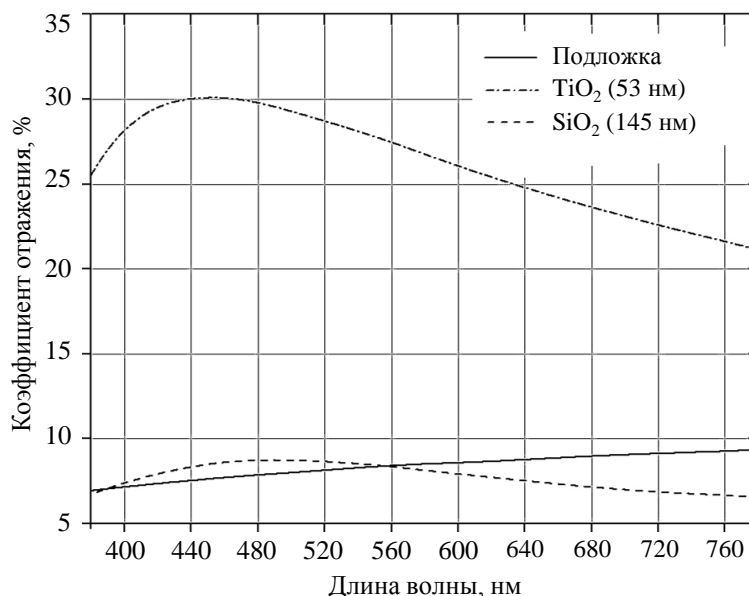


Рис. 2. Спектры отражения полимерной пленки без клеевого слоя с нанесением отдельных слоев оксидов

Проектирование (подбор необходимых толщин) конечного четырехслойного покрытия состава $TiO_2-SiO_2-TiO_2-SiO_2$ для достижения максимального просветления в видимом диапазоне осуществляли с помощью того же программного пакета.

Интегральные коэффициенты пропускания и отражения света определяли в соответствии с ГОСТ EN 410–2014. Расчет осуществляли с учетом относительного спектрального распределения энергии излучения стандартного источника света D65 и относительной спектральной чувствительности дневного зрения стандартного наблюдателя.

Для оценки температуры эксплуатации полимерные пленки подвергали температурному воздействию при –60 и +85 °С в течение 100 ч.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Спектры отражения ПЭТФ-пленок с четырехслойным антибликовым покрытием состава $TiO_2-SiO_2-TiO_2-SiO_2$ без клеевого слоя и с клеевым слоем представлены на рис. 3 (зависимость для пленки с клеевым слоем получена после снятия протектора).

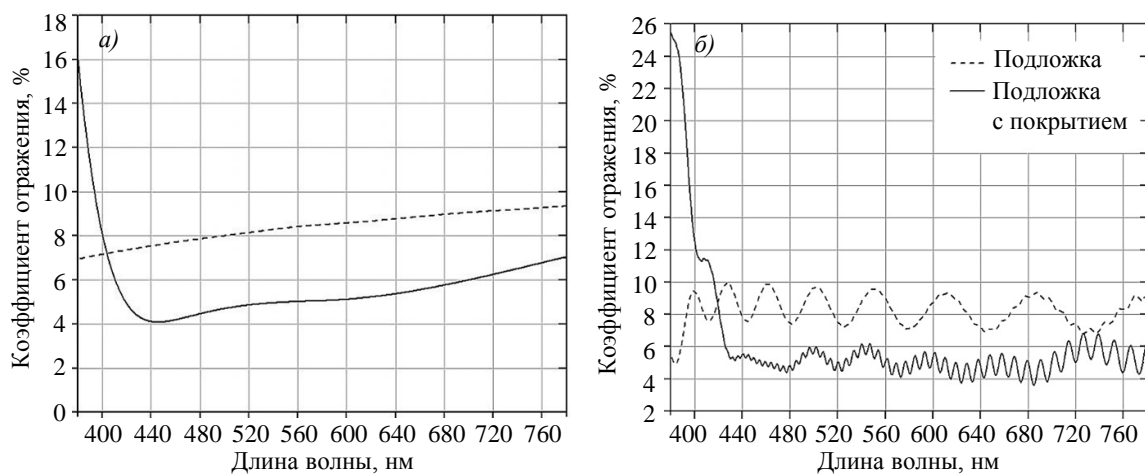


Рис. 3. Спектр отражения полимерной пленки без клеевого слоя (а) и с клеевым слоем (б) с четырехслойным антибликовым покрытием

Следует отметить, что формы спектров с наличием множества экстремумов, представленных на рис. 3, б, связаны с присутствием клеевого и бронирующего слоев на исходной ПЭТФ-пленке.

Интегральные оптические коэффициенты полученных полимерных пленок в сравнении с исходными подложками (без антибликового покрытия) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Интегральные оптические характеристики полимерных пленок

Полимерная пленка	Коэффициент пропускания света T , %	Коэффициент отражения света R , %
Без клеевого слоя и антибликового покрытия (исходная)	90,6	8,37
Без клеевого слоя с антибликовым покрытием	94,2	4,99
С клеевым слоем без антибликового покрытия (исходная)	91,3	8,36
С клеевым слоем и антибликовым покрытием	94,1	5,08

Нанесение четырехслойного антибликового покрытия позволяет повысить коэффициент пропускания света ПЭТФ-пленок до 94,2 % и при этом снизить коэффициент отражения света на ~39,8 % относительно исходных подложек.

Для определения температуры эксплуатации изготовлены модельные образцы полимерной пленки с антибликовым покрытием, перенесенные на органическое стекло с коэффициентом пропускания света 92,1 %. Изготовление модельных образцов обусловлено необходимостью создания равных условий теплового воздействия на внутреннюю поверхность пленки (отсутствие или наличие клеевого слоя без протектора). Полимерную пленку без клеевого слоя прикладывали на поверхность органического стекла и фиксировали по периметру герметизирующей лентой. Перенос пленки с клеевым слоем осуществляли путем последовательного снятия протектора и приглаживания пленки неметаллическим шпателем. Полученные образцы представлены на рис. 4.

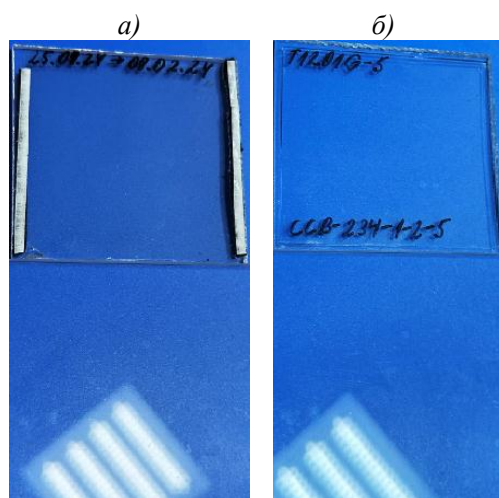


Рис. 4. Модельные образцы на основе органического стекла с приклеенной по краям (а) и по всей поверхности (б) полимерной пленкой с антибликовым покрытием

Антибликовое покрытие позволяет предотвратить появление бликов на поверхности. Необходимо также отметить, что из-за наличия воздушной среды между органическим стеклом и полимерной пленкой на образце без клеевого слоя коэффициент пропускания света на 7,20 % меньше относительно варианта с клеевым слоем.

В табл. 2 представлены результаты определения характеристик модельных образцов полимерных пленок с антибликовым покрытием до и после температурных воздействий при -60 и $+85$ °С в течение 100 ч.

Таблица 2

Коэффициент пропускания света модельных образцов на основе органического стекла с полимерной пленкой и антибликовым покрытием до и после температурных воздействий

Модельный образец	Коэффициент пропускания света T , %	
	исходный	после температурных воздействий
С приклеенной по краям полимерной пленкой (без клеевого слоя)	86,3	86,1
С приклеенной по всей поверхности полимерной пленкой (с клеевым слоем)	93,0	92,9

Воздействия температур -60 и $+85$ °С в течение 100 ч не влияют на оптические характеристики ПЭТФ-пленки с антибликовым покрытием: после температурных воздействий коэффициенты пропускания света образцов на основе полимерной пленки без клеевого слоя и с клеевым слоем снижаются на 0,23 и 0,11 % соответственно.

Исследована возможность нанесения антибликового покрытия состава $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-SiO}_2$ на обе стороны ПЭТФ-пленки без клеевого слоя. На рис. 5 представлен спектр отражения полученной полимерной пленки без клеевого слоя с двухсторонним четырехслойным антибликовым покрытием.

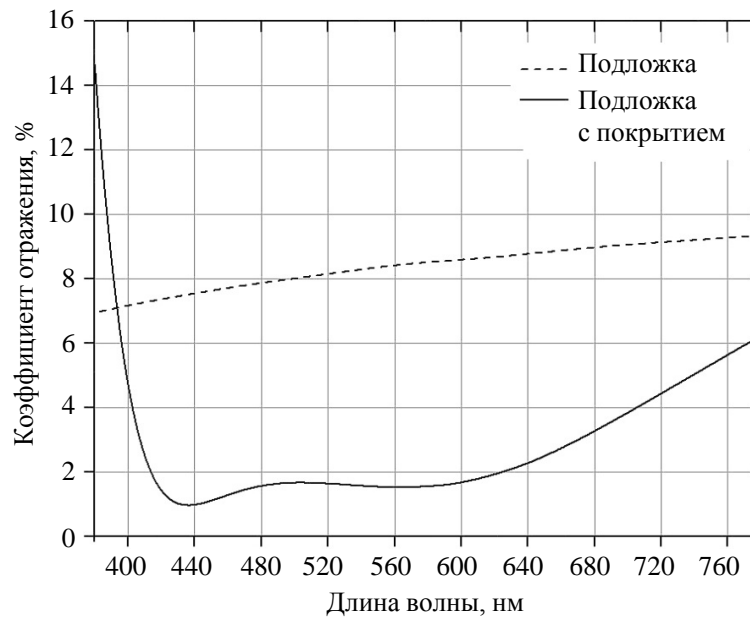


Рис. 5. Спектр отражения полимерной пленки без клеевого слоя с двухсторонним четырехслойным антибликовым покрытием

Полимерная пленка без клеевого слоя с двухсторонним антибликовым покрытием обладает следующими характеристиками:

Коэффициент пропускания света T , %	97,2
Коэффициент отражения света R , %	1,65
Коэффициент диффузного отражения света под углом 0 градусов, %	$\leq 0,5$
Неравномерность оптических характеристик по площади листа размером 300×500 мм, %	± 10
Температура эксплуатации, °С	От -60 до $+85$

Нанесение двухстороннего четырехслойного антибликового покрытия позволяет повысить коэффициент пропускания света ПЭТФ-пленки без клеевого слоя до 97,2 % и снизить коэффициент отражения света на 80,3 % по сравнению с показателями исходной полимерной пленки.

Заключения

Получены четырехслойные антибликовые покрытия на основе оксидов титана и кремния на ПЭТФ-пленках с клеевым слоем и без него, исследованы их характеристики. Описанный в данной работе способ изготовления четырехслойного антибликового покрытия состава $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-SiO}_2$ позволяет получать оптически прозрачные

(коэффициент пропускания света до 94,2 и 97,2 % для односторонних и двухсторонних покрытий соответственно) ПЭТФ-пленки с пониженным коэффициентом отражения света (не более 5,08 и 1,65 % для односторонних и двухсторонних покрытий соответственно), работоспособные в диапазоне температур от -60 до $+85$ °С.

Данные изделия можно использовать в качестве защитных экранов индикаторных приборов и для снижения интенсивности бликов на их поверхности. Кроме того, полученные пленки могут быть интегрированы в готовые конструкции.

Список источников

1. Руднев В.П., Мекалина И.В. Свойства органических стекол после натурального старения под нагрузкой в условиях влажных субтропиков // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 4 (69). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-84-95.
2. Чижов П.Н., Петрачков Д.Н., Шаталин В.А. и др. Влияние способа формования поликарбонатного листа на оптические характеристики изделий авиационного остекления // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-63-76.
3. Смирнова О.В., Ерофеева С.Б. Поликарбонаты. М.: Химия, 1975. 288 с.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики: в 5 т. 3-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. Т. 4: Оптика. 792 с.
5. Ильина Е., Лукин П. Влияние защитного экрана на светораспределение светильника // *Полупроводниковая светотехника*. 2012. Т. 4. № 18. С. 44–47.
6. *Optical interference coatings* / eds. N. Kaiser, H.K. Pulker. Berlin: Springer-Verlag, 2003. 503 p. DOI: 10.1007/978-3-540-36386-6.
7. Koglin J.E., Christensen F.E., Craig W.W. et al. NuSTAR hard X-ray optics // *Proceedings of SPIE*. San Diego, 2005. P. 5900. DOI: 10.1117/12.618601.
8. Harry G.M., Armandula H., Black E. et al. Thermal noise from optical coatings in gravitational wave detectors // *Applied Optics*. 2006. Vol. 45. No. 7. P. 1569–1574. DOI: 10.1364/ao.45.001569.
9. Shanmugam N., Pugazhendhi R., Elavarasan R.M. et al. Anti-reflective coating materials: A holistic review from PV perspective // *Energies*. 2020. Vol. 13. No. 10. P. 2631. DOI: 10.3390/en13102631.
10. Lequime M., Nadji S., Stojcevski D. et al. Determination of the optical constants of a dielectric layer by processing in situ spectral transmittance measurements along the time dimension // *Applied Optics*. 2017. Vol. 56. P. 181. DOI: 10.1364/ao.56.00c181.
11. Nadji S.L., Lequime M., Begou T. et al. Use of a broadband monitoring system for the determination of the optical constants of a dielectric bilayer // *Applied Optics*. 2018. Vol. 57. P. 877. DOI: 10.1364/ao.57.000877.
12. Дворецкая Е.В., Королев Д.В., Пискорский В.П., Валеов Р.А., Коплак О.В., Моргунов Р.Б. Магнетронное напыление оболочки железа и микровключения в микропроводах PrDyFeCoB // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 2 (67). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-85-96.
13. Богатов В.А., Крынин А.Г., Щур П.А. Влияние величины натекания в вакуумной камере на параметры реактивного магнетронного распыления и свойства покрытия оксида титана // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 1 (54). С. 17–22. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-17-22.
14. Константинова Ю.А. Антиотражающие покрытия для солнечных батарей // *Научные исследования: от теории к практике*. 2015. № 3. С. 198–200.
15. Цехановская М.С., Шейнбергер А.А., Куценко К.В., Иваничко С.П. Антиотражающие покрытия для полупроводниковых электрооптических устройств на основе InP // *Мат. докл. XIX Междунар. науч.-прак. конф.* Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2023. С. 177–179.

16. Троицкий Б.Б., Локтева А.А., Лопатин М.А. и др. Получение просветляющих покрытий из мезопористого диоксида кремния на силикатном стекле при пониженных температурах обжига геля // *Физика и химия стекла*. 2013. Т. 39. № 5. С. 715–722.
17. Мельников А.А., Щур П.А. Прозрачные электропроводящие антиотражающие покрытия на основе ИТО, SiO₂, TiO₂ // *Труды ВИАМ*. 2019. № 8 (80). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-56-66.
18. Kleinhempel R., Wahl A., Thielsch R. Large area AR coating on plastic substrate using roll to roll methods // *Surface and Coatings Technology*. 2011. Vol. 205. P. S502-S505. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.10.064.
19. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
20. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект и технологии*. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
21. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. № 1. С. 3–4.
22. Каблов Е.Н. Что такое инновации // *Наука и жизнь*. 2011. № 5. С. 2–6.
23. Лаптев А.Б., Павлов М.Р., Зеленева Т.О. Источники светового излучения для имитации старения полимерных материалов под воздействием солнечной радиации // *Труды ВИАМ*. 2024. № 5 (135). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-71-82.
24. Кузьмичев А.И. Магнетронные распылительные системы. Киев: Аверс, 2008. Кн. 1: Введение в физику и технику магнетронного распыления. 244 с.

References

1. Rudnev V.P., Mekalina I.V. Properties of organic glasses after natural aging under load in humid subtropics. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 02, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-84-95.
2. Chizhov P.N., Petrachkov D.N., Shatalin V.A. et al. Influence of the polycarbonate sheet molding method on the optical characteristics of aircraft glazing products. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 02, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-63-76.
3. Smirnova O.V., Erofeeva S.B. *Polycarbonates*. Moscow: Khimiya, 1975, 288 p.
4. Sivukhin D.V. *General course of physics*: in 5 vols. 3rd ed. Moscow: FIZMATLIT, 2005, vol. 4: Optics, 792 p.
5. Ilyina E., Lukin P. Effect of protective screen on light distribution of luminaire. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika*, 2012, vol. 4, no. 18, pp. 44–47.
6. *Optical interference coatings*. Eds. N. Kaiser, H.K. Pulker. Berlin: Springer-Verlag, 2003, 503 p. DOI: 10.1007/978-3-540-36386-6.
7. Koglin J.E., Christensen F.E., Craig W.W. et al. NuSTAR hard X-ray optics. *Proceedings of SPIE*. San Diego, 2005, p. 5900. DOI: 10.1117/12.618601.
8. Harry G.M., Armandula H., Black E. et al. Thermal noise from optical coatings in gravitational wave detectors. *Applied Optics*, 2006, vol. 45, no. 7, p. 1569–1574. DOI: 10.1364/ao.45.001569.
9. Shanmugam N., Pugazhendhi R., Elavarasan R.M. et al. Anti-reflective coating materials: A holistic review from PV perspective. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 10, p. 2631. DOI: 10.3390/en13102631.
10. Lequime M., Nadji S., Stojcevski D. et al. Determination of the optical constants of a dielectric layer by processing in situ spectral transmittance measurements along the time dimension. *Applied Optics*, 2017, vol. 56, p. 181. DOI: 10.1364/ao.56.00c181.
11. Nadji S.L., Lequime M., Begou T. et al. Use of a broadband monitoring system for the determination of the optical constants of a dielectric bilayer. *Applied Optics*, 2018, vol. 57, p. 877. DOI: 10.1364/ao.57.000877.

12. Dvoretzkaya E.V., Korolev D.V., Piskorskii V.P., Valeev R.A., Koplak O.V., Morgunov R.B. Magnetron sputtering of the iron shell and microinclusions in microwires PrDyFeCoB. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 02, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-85-96.
13. Bogatov V.A., Krynin A.G., Shchur P.A. Influence of the leakage value in the vacuum chamber on the parameters of reactive magnetron discharge and properties of titanium oxide coatings. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 17–22. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-17-22.
14. Konstantinova Yu.A. Anti-reflective coatings for solar batteries. *Nauchnye issledovaniya: ot teorii k praktike*, 2015, no. 3, pp. 198–200.
15. Tsekhanovskaya M.S., Sheinberger A.A., Kutsenko K.V., Ivanichko S.P. Anti-reflective coatings for semiconductor electro-optical devices based on InP. *XIX Int. scientific-practical. conf. Tomsk: Tomsk State Univ. of control systems and radioelectronics*, 2023, pp. 177–179.
16. Troitsky B.B., Lokteva A.A., Lopatin M.A. et al. Production of antireflective coatings from mesoporous silicon dioxide on silicate glass at low gel firing temperatures. *Fizika i khimiya stekla*, 2013, vol. 39, no. 5, pp. 715–722.
17. Melnikov A.A., Shchur P.A. Transparent conductive antireflective coatings based on ITO, SiO₂, TiO₂. *Trudy VIAM*, 2019, No. 8 (80), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 03, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-56-66.
18. Kleinhempel R., Wahl A., Thielsch R. Large area AR coating on plastic substrate using roll to roll methods. *Surface and Coatings Technology*, 2011, vol. 205, pp. S502-S505. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.10.064.
19. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
20. Kablov E.N. New Generation Materials – the Basis for Innovation, Technological Leadership, and National Security of Russia. *Intellekt i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.
21. Kablov E.N. Chemistry in aviation materials science. *Rossiyskiy khimicheskii zhurnal*, 2010, vol. LIV, no. 1, pp. 3–4.
22. Kablov E.N. What is the innovations. *Nauka i zhizn*, 2011, no. 5, pp. 2–6.
23. Laptsev A.B., Pavlov M.R., Zeleneva T.O. Light sources for simulating the aging of polymer materials under the influence of solar radiation. *Trudy VIAM*, 2024, no. 5 (135), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 10, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-71-82.
24. Kuzmichev A.I. *Magnetronnye spraying systems*. Kyiv: Avers, 2008, book 1: Introduction in physics and equipment of magnetron sputtering, 244 p.

Информация об авторах

Сорокин Илья Алексеевич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Соловьянчик Людмила Владимировна, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Мекалина Ирина Васильевна, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Цапенко Андрей Николаевич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Ilya A. Sorokin, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Lyudmila V. Solovyanchik, Deputy Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Irina V. Mekalina, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Andrey N. Tsapenko, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 28.11.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 02.12.2024.
The article was submitted 28.11.2024; approved and accepted for publication after reviewing 02.12.2024.