

УДК 666.1.056

А.А. Мельников¹, П.А. Щур¹

ПРОЗРАЧНЫЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИЕ АНТИОТРАЖАЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ITO, SiO₂, TiO₂

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-56-66

Разработаны и изготовлены прозрачные электропроводящие антиотражающие покрытия с высокой равномерностью покрытия на крупногабаритных подложках (до 350×500 мм). Разработанные покрытия сочетают свойства электропроводящих и антиотражающих покрытий, при этом изготавливаются в составе одного «стэка». Для покрытий на силикатных стеклах достигаются следующие характеристики: коэффициент пропускания $T > 93\%$, коэффициент отражения $R < 1\%$, поверхностное сопротивление $R_{\text{пов}} < 20 \text{ Ом/}\square$. Показаны натурные эксперименты по электронагреву указанных покрытий.

Ключевые слова: оптические покрытия, антиотражающие покрытия, электропроводящие покрытия, просветляющие покрытия, электронагрев.

A.A. Melnikov¹, P.A. Shchur¹

TRANSPARENT CONDUCTIVE ANTIREFLECTIVE COATINGS BASED ON ITO, SiO₂, TiO₂

Transparent conductive coatings are widely used nowadays. In this work simultaneously conductive and antireflective coatings produced within one stack of optical coating are proposed. Production method allows to receive the coatings with high uniformity on large size substrates (up to 350×500 mm). Transmittance $T > 93\%$, reflectance $R < 1\%$ and surface resistance $R_{\text{пов}} < 20 \text{ Ом/}\square$ for silicate glasses with such coatings. Demonstration of electrical heating of the coatings is showed.

Keywords: optical coatings, antireflective coatings, conductive coatings, enlightening coatings, electrical heating.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В настоящее время многослойные материалы остекления со специальными оптическими покрытиями обеспечивают высокую прозрачность, удельную ударную прочность, защиту экипажа от воздействия избыточных потоков теплового солнечного излучения, защиту летательного аппарата от радиолокационных станций, а также электромагнитную совместимость авионики [1–4]. Для нанесения оптических покрытий на материалы остекления в последние десятилетия в основном применяют методы низкотемпературного магнетронного и электронно-лучевого распыления [4–7]. В состав специальных оптических покрытий, как правило, входят тонкие слои фторидов и оксидов металлов. Метод реактивного магнетронного распыления позволяет получать толстые (общей толщиной $> 1 \text{ мкм}$) высококачественные покрытия при высокой равномерности

свойств покрытий, высокой производительности и низкой энергоемкости процесса, что объясняет большой интерес исследователей в различных областях науки и техники к нему. Магнетронное распыление значительно влияет на развитие упрочняющих, просветляющих и защитных покрытий [8–18].

Покрытия из оксида индия, легированного оловом (ITO), зарекомендовали себя как прозрачные электропроводящие покрытия с хорошими электрофизическими свойствами и стойкостью к воздействию окружающей среды, которые в настоящее время широко распространены на рынке [18–21]. Однако показатель преломления покрытия ITO в видимом диапазоне больше показателя преломления повсеместно используемых оптических подложек при длине волны 550 нм:

Материал	Показатель преломления
ITO-покрытия	~2,1
Силикатное и органическое стекла, поликарбонат	~1,52
Полиэтилентерефталатная (ПЭТФ) пленка	~1,65

Поэтому светопропускание подложки с одним слоем ITO-покрытия ограничено ввиду существенного отражения света в видимом диапазоне. В частности, на силикатном стекле толщиной 1 мм при изготовлении ITO-покрытия с поверхностным сопротивлением $<15 \text{ Ом}/\square$ интегральный коэффициент отражения (R) составляет не менее 11% (на чистом силикатном стекле ~8%). Вследствие этого актуальным является использование антиотражающих/просветляющих покрытий в одном «стэке» с покрытием ITO.

В данной работе представлены результаты по разработке и изготовлению ITO-покрытий на различных подложках с однослойным SiO_2 (AR1) и трехслойным $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2\text{--SiO}_2$ (AR3) антиотражающими покрытиями. Показано, что на силикатных стеклах возможно изготовление «стэка» покрытий на основе ITO, SiO_2 , TiO_2 , обеспечивающих: поверхностное сопротивление – не более $20 \text{ Ом}/\square$, интегральный коэффициент отражения (R) – не более 1%, коэффициент пропускания – не менее 93% в видимом диапазоне длин волн электромагнитного излучения.

Материалы и методы

Прозрачные электропроводящие покрытия изготавливали на силикатных стеклах и полимерных материалах в вакуумной установке УНИП-900П с рабочей камерой объемом 900 литров, оснащенной тремя планарными магнетронами с мишенями размером $737 \times 74 \times 6$ мм и планарным высоковольтным источником ионов холловского типа [20, 21], схема которой приведена на рис. 1. Протяженность ионного пучка, создаваемого источником ионов в зоне обрабатываемой подложки, составляла 70 см. Блоки питания типа ИВЭ-145 использовали для электропитания магнетронов и источника ионов.

Вакуумная установка оснащается форвакуумным агрегатом (АВР-150) и высоковакуумным турбомолекулярным насосом (Alcatel PR 2300), которые позволяют достигать остаточного давления не более 0,001 Па. Рабочее давление в вакуумной камере поддерживалось на значении 0,35 Па. Образцы подложек крепили термостойким скотчем на барабан диаметром 60 см с вертикальной осью вращения.

На силикатных стеклах и поликарбонате также изготовлены антиотражающие покрытия на основе SiO_2 и TiO_2 . Покрытия изготавливали при начальном давлении не более 0,002 Па методом реактивного магнетронного распыления при отработанных технологических режимах изготовления каждого слоя покрытий ITO, SiO_2 , TiO_2 .

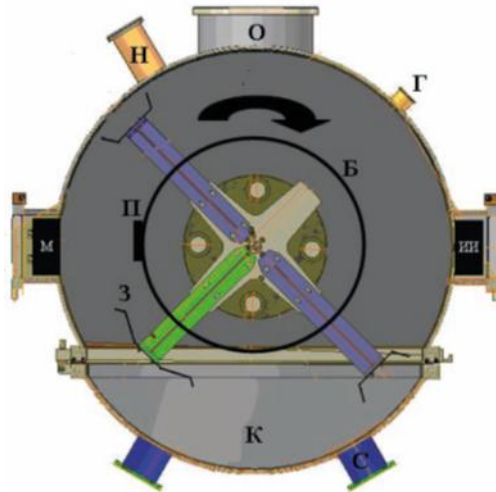


Рис. 1. Принципиальная схема установки УНИП-900П:

М – магнетрон; ИИ – источник ионов; З – заслонка; Б – вращающийся барабан; О – порт для откачки атмосферного воздуха; С – смотровое окно; Н – клапан напуска воздуха; К – крышка вакуумной камеры; Г – клапан подачи газа; П – подложка, закрепленная на барабане

Предварительную ионную обработку полимерного материала перед нанесением функционального покрытия проводили с целью увеличения адгезии поверхности источником ионов холловского типа при токе разряда до 0,5 А и разрядном напряжении до 2,5 кВ с использованием блока питания ИВЭ-343 в течение 5 мин. При достижении остаточного вакуума не более 0,002 Па в вакуумную камеру производили напуск рабочего газа аргона (Ar) до давления 0,35 Па, при котором происходило стабильное зажигание источника ионов [4].

Для распыления бездефектных, плотных и изолирующих материалов, таких как оксид титана и оксид кремния, применяли импульсные источники питания магнетронов с целью получения качественных покрытий. Использовали сплошные мишени из титана и кремния, состоящие из пяти секций, между которыми выдерживали зазор, равный 1 мм. Процесс распыления таких материалов имеет ограничения по скорости, а также сопровождается частыми дуговыми пробоями, влияющими на морфологию и поверхностную структуру мишени-катода. При использовании импульсных, особенно среднечастотных источников (10–200 кГц) процесс проводится практически при полном отсутствии пробоев, что сказывается на повторяемости процесса и равномерности покрытий. При этом скорость распыления таких диэлектриков, как оксиды титана и кремния, оказывается на уровне со скоростью распыления чистого материала [4]. В данной работе использована система с несбалансированным магнетроном, работающим вместе с импульсным источником питания с частотой 40 кГц.

Спектры пропускания и отражения в видимом диапазоне длин волн 380–780 нм для подложек с нанесенными покрытиями получали с помощью спектрофотометра Agilent Cary 5000. При расчете интегральных коэффициентов использовали нормировку на стандартный излучатель С и наблюдатель СИЕ 1964 Международной комиссии по освещению. Толщину покрытий оценивали по экстремумам спектров отражения спектрофотометрическим методом.

Для определения температур на поверхности подложек с противоположной поверхности с нанесенным электропроводящим покрытием использовали тепловизор с чувствительностью 7,5–14 мкм, разрешением матрицы 640×480 пикселей, частотой съемки 30 Гц. Поверхностное сопротивление ($R_{пов}$, Ом/□) оценивали мультиметром по

электрическому сопротивлению покрытия (R_i , Ом) между двумя медными шинами (электродами), нанесенными методом магнетронного распыления, с учетом отношения длины к ширине:

$$R_{\text{пов}} = R_i \frac{w}{L},$$

где w – длина шины, м; L – расстояние между шинами, м.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены разработанные «стэки» электропроводящих антиотражающих покрытий и их характеристики на силикатном стекле. Наиболее простой является схема нанесения одного слоя ИТО-покрытия на подложку (рис. 2, а, з). При этом оптические и электрофизические свойства покрытия являются взаимосвязанными с возможностью смещения баланса в сторону увеличения интегрального коэффициента пропускания (T) или уменьшения значений $R_{\text{пов}}$ корректировкой толщины и параметров процесса изготовления покрытий. Например, на силикатных стеклах возможно изготовление ИТО-покрытий с $R_{\text{пов}} < 25 \text{ Ом}/\square$ и $T > 86\%$ и $R_{\text{пов}} < 13 \text{ Ом}/\square$ и $T > 83\%$. Интегральный коэффициент отражения (R) приводится для отражения от всех граней подложки.

Для увеличения значений T и снижения значений R поверх покрытия ИТО может быть нанесено однослойное SiO_2 (AR1) или трехслойное $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-SiO}_2$ антиотражающее (AR3) покрытие (рис. 2, б, в), позволяющее увеличить значение T до 90% и снизить значение R до 5%, а интегральный коэффициент отражения от грани стекла с нанесенным покрытием – до 0,5%. В случае использования изделия в условиях воздушной среды с обеих сторон стекла, целесообразным будет двухстороннее нанесение покрытий, позволяющее еще в большей степени улучшить оптические характеристики (рис. 2, д, е).

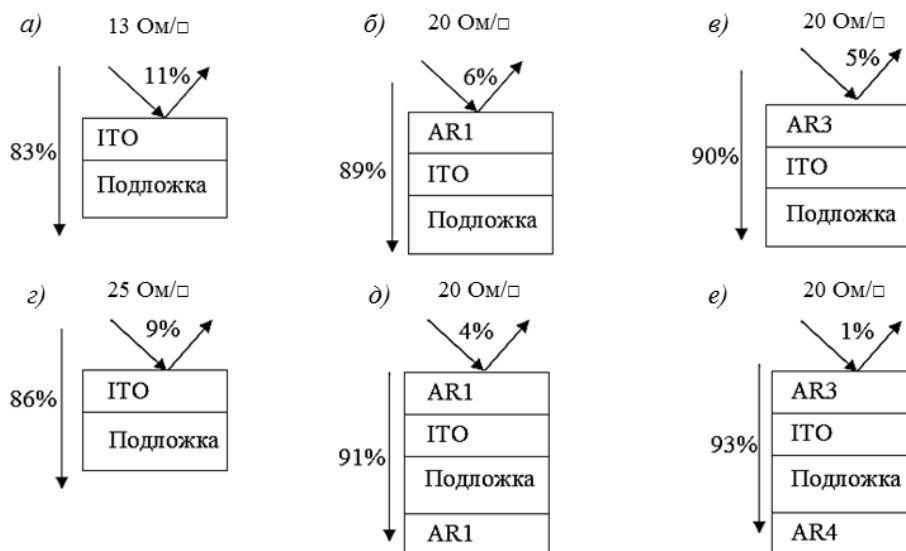


Рис. 2. Схемы возможного изготовления покрытий и их характеристики на силикатном стекле

В настоящее время разработаны составы покрытий и технология их изготовления на силикатных стеклах с $R_{\text{пов}} = 20 \text{ Ом}/\square$. При этом при нанесении покрытий на обе грани стекла $R < 1\%$, а $T > 93\%$. Для меньших величин поверхностного сопротивления значения оптических характеристик будут хуже. Ведутся также работы по изготовлению аналогичных «стэков» покрытий на полимерных материалах, в частности на ПЭТФ-пленке и поликарбонате. В настоящее время отработаны режимы нанесения

ITO-покрытия. Следует отметить, что ввиду особенностей процесса изготовления ITO-покрытий, при значении T , аналогичном значению для покрытия на силикатном стекле, $R_{\text{пов}}$ на полимерных материалах будет в 2–2,5 раза больше в связи с температурными ограничениями для полимерных материалов при их отжиге в вакууме.

Особенностью представленной технологии изготовления покрытий является легкая масштабируемость и большой объем загрузки подложек за один технологический цикл ввиду использования планарной схемы расположения магнетронов. Так, за одну загрузку может быть изготовлено до 0,9 м² ITO-покрытия, при этом процесс изготовления ограничивается по времени в основном откачкой вакуумной камеры и в настоящее время составляет 4–6 ч. В представленной работе удалось получить покрытия ITO на подложках с размерами до 500×350 мм с относительным отклонением по значениям оптической толщины, T и R – не более 5%. Предел габаритов одного изделия на имеющейся оснастке составляет 500×500 мм и может быть увеличен до 600×600 мм. Планируются также работы по изготовлению оптических покрытий реактивным магнетронным распылением с использованием имеющегося оборудования на подложках рулонного типа с высотой рулона 600 мм.

На рис. 3 представлены типичные спектральные характеристики пропускания и отражения ITO-покрытий различной толщины. Показана также спектральная чувствительность человеческого глаза с экстремумом на длине волны 555 нм. Интерференционная картина в спектрах пропускания и отражения зависит от дисперсии и толщины покрытия, толщина покрытий легко варьируется в процессе нанесения для попадания максимумов значений T в область наибольшей чувствительности человеческого глаза. Покрытия с представленными характеристиками могут быть получены на силикатном стекле с электропроводностью $>3000 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ и низким коэффициентом поглощения.

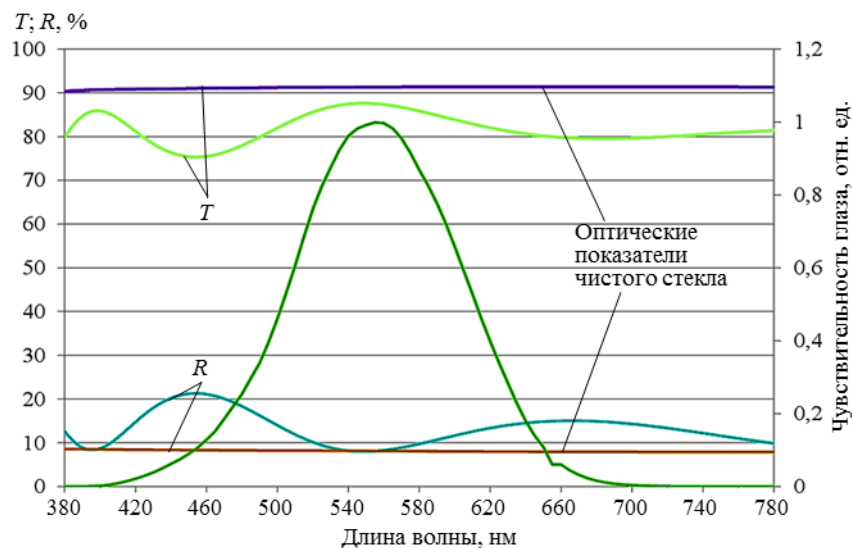


Рис. 3. Типичные спектры пропускания (T) и отражения (R) ITO-покрытий и чувствительность человеческого глаза в видимом диапазоне (—)

На рис. 4 представлены спектральные характеристики пропускания и отражения покрытий ITO с антиотражающим слоем AR3, нанесенным с одной стороны (рис. 2, в). Толщины слоев проводящего и антиотражающего покрытий рассчитаны так, чтобы образовывать «полку» максимумов значений T в наиболее чувствительном для человеческого глаза диапазоне 450–650 нм. Интегральные значения T и R составили >90 и $<5\%$ соответственно при $R_{\text{пов}}=20 \text{ Ом}/\square$.

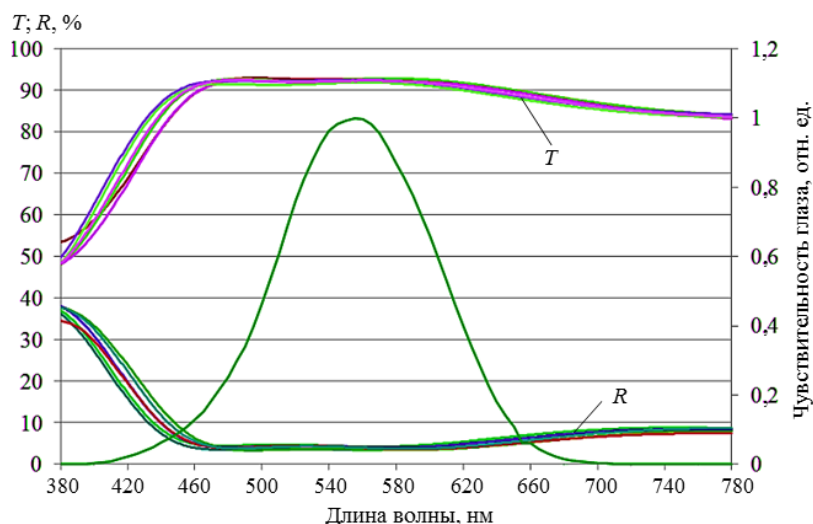


Рис. 4. Типичные спектры пропускания (T) и отражения (R) электропроводящих антиотражающих покрытий ITO+AR3 на силикатном стекле и чувствительность человеческого глаза в видимом диапазоне (—)

На рис. 5 представлен эффект схождения запотевания с силикатного стекла под действием резистивного нагрева электропроводящего антиотражающего покрытия. Стекло размером $210 \times 165 \times 1,5$ мм с нанесенным наполовину покрытием с поверхностным сопротивлением $20 \text{ Ом}/\square$ помещали в морозильную камеру, затем после образования наледи подключали к лабораторному источнику питания постоянного тока. Стекло с нанесенным покрытием прогревали до температуры 45°C за 1,5 мин при потребляемой мощности ~ 30 Вт, при этом наледь и запотевание устранились. В свою очередь, чистое стекло не избавилось от запотевания по истечении 9 мин.

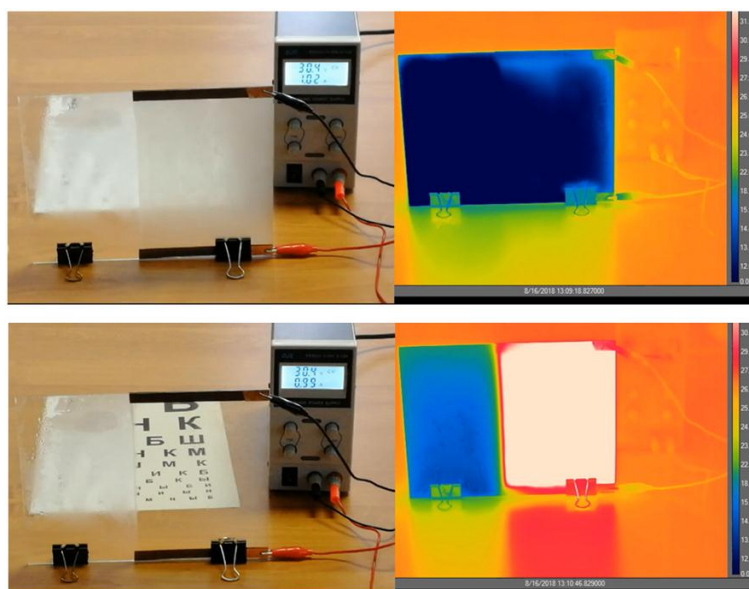


Рис. 5. Демонстрация устранения запотевания резистивным нагревом прозрачного электропроводящего покрытия на силикатном стекле

На рис. 6 представлен эффект электронагрева аналогичного силикатного стекла размером $345 \times 455 \times 6$ мм с покрытием, подключенным к электропитанию от трансформатора

с напряжением 110 В (переменный ток). На снимке тепловизора виден равномерный нагрев силикатного стекла с электрообогревным покрытием по всей площади образца.

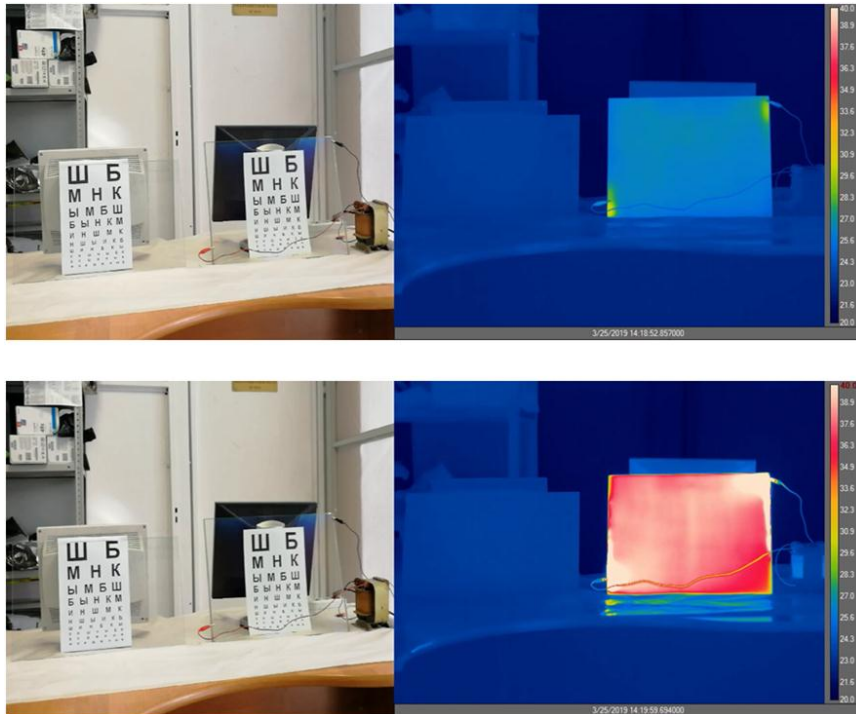


Рис. 6. Электронагрев силикатного стекла с прозрачным электропроводящим покрытием

На рис. 7 представлен эффект уменьшения интенсивности отражения с образца из стекла с нанесенным электропроводящим и антиотражающим покрытием ($R \approx 8\%$ – для чистого стекла и $R \approx 4\%$ – для стекла с покрытием) в видимом диапазоне длин волн 380–780 нм. Слева – стекло без покрытия, справа – стекло с электрообогревным покрытием ИТО.

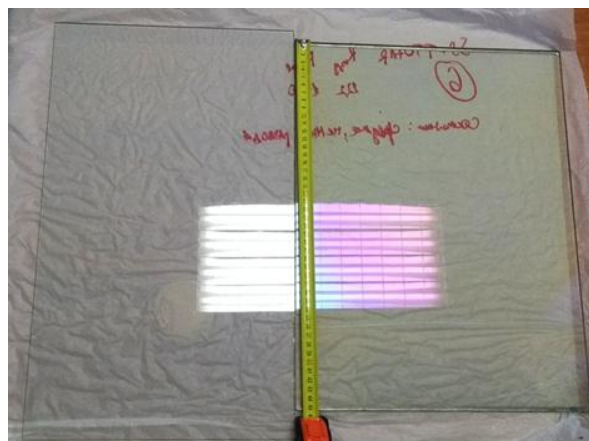


Рис. 7. Эффект снижения интенсивности отраженного света на образце из стекла с нанесенным электропроводящим антиотражающим покрытием

На рис. 8 представлен образец гибкой ПЭТФ-пленки толщиной 75 мкм размером 430×300×0,075 мм с нанесенным ИТО-покрытием с поверхностным сопротивлением $\sim 18 \text{ Ом}/\square$ и $T \approx 78\%$ и контактами с двух сторон, к которым присоединены щупы мультиметра.



Рис. 8. Образец ПЭТФ-пленки с нанесенным ИТО-покрытием

На рис. 9 и 10 представлен эффект нагрева ПЭТФ-пленки размером $320 \times 610 \times 0,075$ и $430 \times 300 \times 0,075$ мм с ИТО-покрытием в плоском и в частично свернутом состоянии соответственно. Показано, что эффект нагрева осуществляется в обоих случаях схожим образом. В отличие от нагрева покрытий на силикатном стекле, на ПЭТФ-пленке нагрев осуществляется не так равномерно, а с центрами нагрева предположительно в местах дефектов пленки, при этом невооруженным глазом видимых механических дефектов не выявлено. Поэтому при изготовлении прозрачных электропроводящих покрытий на полимерных материалах следует уделять особое внимание чистоте технологического процесса и недеформирующей предварительной обработке.

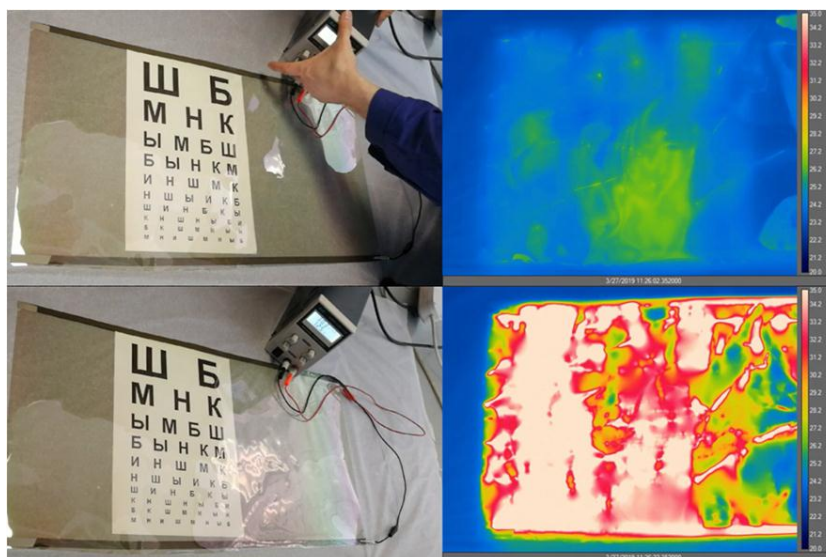


Рис. 9. Электронагрев ПЭТФ-пленки с ИТО-покрытием в плоском состоянии

На рис. 11 представлены временные зависимости температуры поверхности, противоположной поверхности с нанесенным ИТО-покрытием, силикатного стекла и ПЭТФ-пленки. Показано, что за счет управления электрической мощностью, потребляемой электропроводящим покрытием, можно управлять скоростью нагрева подложки. Для тонких ПЭТФ-пленок (при отсутствии подложки) для нагрева на $15\text{--}30^\circ\text{C}$ достаточно $200\text{--}400$ Вт/м² удельной мощности. Для силикатных стекол аналогичная удельная мощность существенно выше ввиду большей теплоемкости и зависит от толщины стекла.

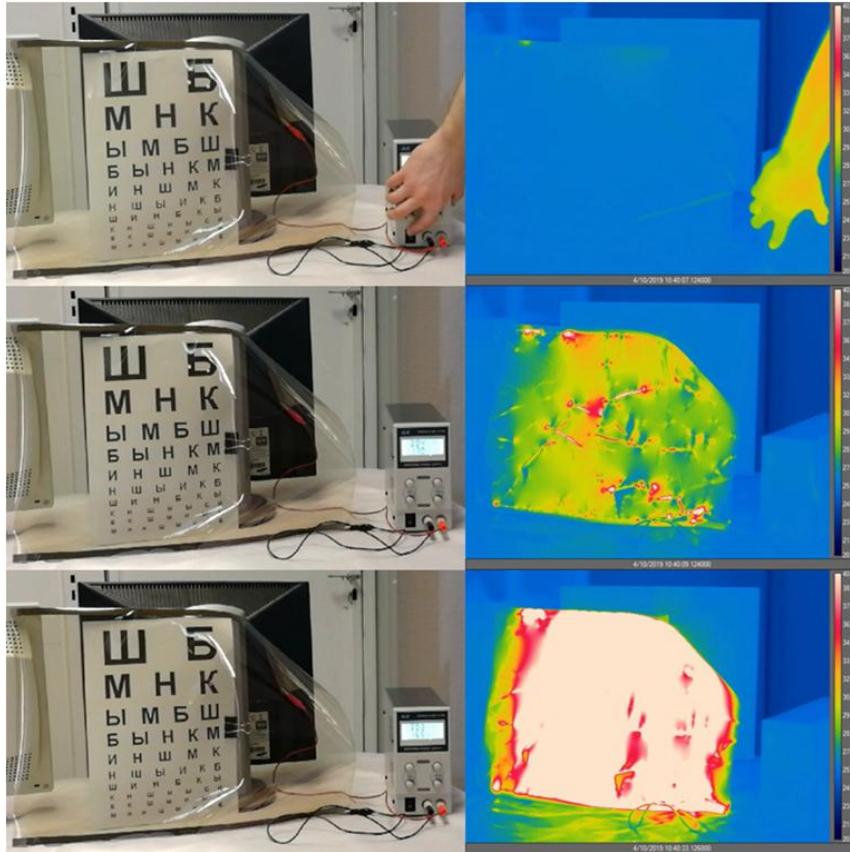


Рис. 10. Электронагрев ПЭТФ-пленки с ИТО-покрытием в частично свернутом состоянии

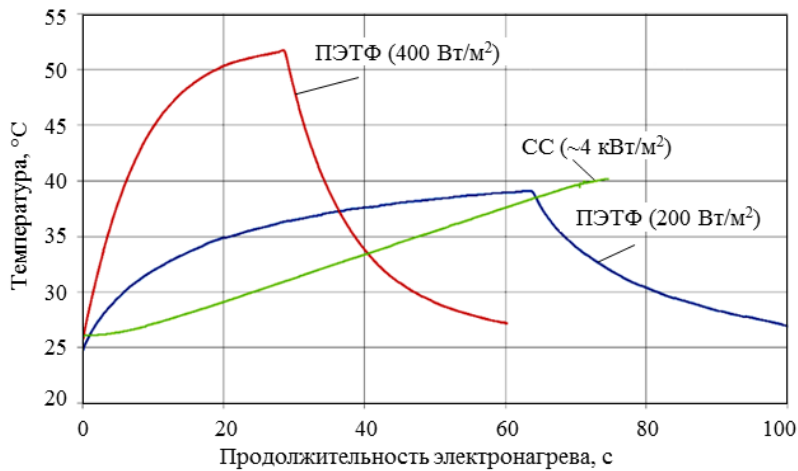


Рис. 11. Временные зависимости температуры поверхности, противоположной поверхности с нанесенным ИТО-покрытием, силикатного стекла (СС) толщиной 6 мм и ПЭТФ-пленки толщиной 75 мкм при различной удельной мощности нагрева

Поскольку ИТО-покрытия являются низкоэмиссионными и при протекании тока способны нагревать подложку, с их помощью можно регулировать яркостные температуры объекта в ИК-диапазоне, что продемонстрировано на рис. 12. По мере увеличения температуры силикатного стекла с электрообогревным покрытием отражаемая картина становится менее различимой, а при определенной температуре нагрева тепловая сигнатура полностью сливается с фоном

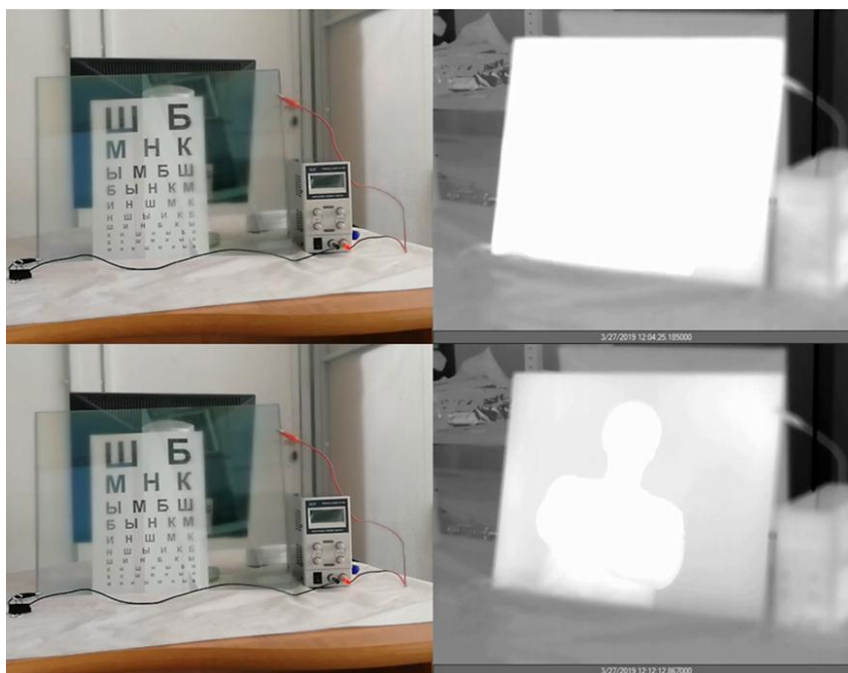


Рис. 12. Эффект управления тепловой сигнатурой объекта с помощью прозрачного электропроводящего покрытия

В работе продемонстрирована возможность изготовления «стэка» прозрачных электропроводящих антиотражающих покрытий на крупногабаритных подложках (размером – до 350×500 мм) с высокой равномерностью покрытия. Возможно увеличить габариты твердых подложек до 600×600 мм и гибких подложек – до 1800×600 мм. Показаны натурные эксперименты по электронагреву силикатных стекол и ПЭТФ-пленок с покрытиями и эффект более быстрого схождения запотевания и обледенения при электронагреве.

Заключения

Разработанные покрытия обеспечивают:

- увеличение коэффициента пропускания видимого света до значения $T > 93\%$ силикатного стекла и полимерной гибкой подложки из полиэтилентерефталата (ПЭТФ) за счет нанесения однослойных и многослойных просветляющих покрытий на основе ITO , SiO_2 , TiO_2 ;
- снижение коэффициента отражения видимого света до значения $R < 1\%$ на силикатном стекле и ПЭТФ-пленке с помощью нанесения просветляющего покрытия;
- реализацию электрообогрева – предотвращение запотевания и обледенения при нанесении высокопроводящего покрытия нанометровой толщины с поверхностным сопротивлением $R_{\text{пов}} < 20 \text{ Ом}/\square$;
- отражение электромагнитного излучения (ЭМИ) в инфракрасном и радиодиапазоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
2. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
3. Каблов Е.Н. Настоящее и будущее аддитивных технологий // Металлы Евразии. 2017. №1. С. 2–6.

4. 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.
5. Кузьмичев А.И. Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. Киев: Аверс, 2008. 244 с.
6. Jeong S.H., Lee J.W., Lee S.B., Boo J.H. Deposition of aluminum-doped zinc oxide films by RF magnetron sputtering and study of their structural, electrical and optical properties // *Thin Solid Films*. 2003. Vol. 435. P. 78–82.
7. Иевлев В.М., Кушев С.Б., Латышев А.Н. и др. Спектры поглощения тонких пленок TiO_2 , синтезированных реактивным высокочастотным магнетронным распылением титана // *Физика и техника полупроводников*. 2014. Т. 48. №7. С. 875–884.
8. Ellmer K., Welzel T. Reactive magnetron sputtering of transparent conductive oxide thin films: Role of energetic particle (ion) bombardment // *Journal of Materials Research*. 2012. Vol. 27. No. 5. P. 765–779.
9. Elinson V.M., Shchur P.A., Kirillov D.V. et al. Study of the Mechanical Characteristics of Single-Layer and Multilayer Nanostructures Based on Carbon and Fluorocarbon Coatings // *Pleiades Publishing, Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2018. Vol. 12. No. 2. P. 342–345.
10. Zhanga K., Wena M., Chengb G. et al. Reactive magnetron sputtering deposition and characterization of niobium carbide films // *Vacuum*. 2014. Vol. 99. P. 233–241.
11. Комлев А.Е., Шаповалов В.И., Шутова Н.С. Магнетронный разряд в среде аргона и кислорода при осаждении пленки оксида титана // *Журнал технической физики*. 2012. Т. 82. №7. С. 134–136.
12. Navabpoura P., Ostovarpourb S., Hampshirea J. et al. The effect of process parameters on the structure, photocatalytic and self-cleaning properties of TiO_2 and Ag-TiO_2 coatings deposited using reactive magnetron sputtering // *Thin Solid Films*. 2014. Vol. 571. Part 1. P. 75–83.
13. Leóna J.J.D., Garretta M.P., Zhanga J. et al. Aluminum titanium oxide alloys: Deposition of amorphous, transparent, corrosion-resistant films by pulsed DC reactive magnetron sputtering with RF substrate bias // *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2015. Vol. 36. P. 96–102.
14. Stana G.E., Boteaa M., Bonia G.A. et al. Electric and pyroelectric properties of AlN thin films deposited by reactive magnetron sputtering on Si substrate // *Applied Surface Science*. 2015. Vol. 353. P. 1195–1202.
15. Fakhouri H., Pulpytel J., Smith W. et al. Control of the visible and UV light water splitting and photocatalysis of nitrogen doped TiO_2 thin films deposited by reactive magnetron sputtering // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2014. Vol. 144. P. 12–21.
16. Juškevičius K., Audronis M., Subačius A. et al. High-rate reactive magnetron sputtering of zirconia films for laser optics applications // *Applied Physics A*. 2014. Vol. 116. No. 3. P. 1229–1240.
17. Солован М.Н., Брус В.В., Марьянчук П.Д. и др. Кинетические свойства тонких пленок TiN , полученных методом реактивного магнетронного распыления // *Физика твердого тела*. 2013. Т. 55. №11. С. 2123–2127.
18. Богатов В.А., Крынин А.Г., Попков О.В., Хохлов Ю.А. Влияние двухосной деформации на свойства прозрачного электропроводящего покрытия, осажденного на ПЭТФ пленку методом реактивного магнетронного распыления // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №1 (37). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.05.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-42-49.
19. Gorjanca T.C., Leonga D., Py C., Rotha D. Room temperature deposition of ITO using r.f. magnetron sputtering // *Thin Solid Films*. 2002. Vol. 413. P. 181–185.
20. Хохлов Ю.А., Богатов В.А., Крынин А.Г. Влияние распределения магнитного поля на свойства ITO покрытия, получаемого на полимерной пленке методом реактивного магнетронного осаждения // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №12. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.05.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-11-11.
21. Хохлов Ю.А., Богатов В.А., Березин Н.М., Крынин А.Г. Реактивное магнетронное осаждение ITO покрытия на полимерную пленку с применением секционированной системы напуска газов. *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №5. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.05.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-5-7-7.