



УДК 666.1.056:621.793.7

**ПРОЗРАЧНЫЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ
ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ОСТЕКЛЕНИЯ**

А.Г. Крынин

Ю.А. Хохлов

кандидат технических наук

В.А. Богатов

кандидат технических наук

П.П. Кисляков

Ноябрь 2013

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Труды ВИАМ»,
№11, 2013 г.

А.Г. Крынин, Ю.А. Хохлов, В.А. Богатов, П.П. Кисляков

ПРОЗРАЧНЫЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ОСТЕКЛЕНИЯ

Приведены результаты исследований функциональных свойств прозрачного тепло- и радиозащитного материала авиационного остекления на основе органического стекла с оптическим интерференционным покрытием, а также результаты климатических испытаний экспериментальных образцов тепло- и радиозащитного остекления.

Ключевые слова: *интерференционное покрытие, магнетронное распыление, теплозащитный материал.*

A.G. Krynin, U.A. Khokhlov, V.A. Bogatov, P.P. Kislyakov

TRANSPARENT INTERFERENCE COATING FOR FUNCTIONAL GLASS MATERIALS

The results of studies of the functional properties of the transparent heat-radioprotective aircraft glazing material on the basis of organic glass with optical interference coating, and the results of environmental tests of experimental models of heat-radioprotective glazing are done.

Keywords: *interference coating, magnetron sputtering, heat-protective glazing material.*

При эксплуатации авиационной техники одним из факторов, влияющих на безопасность полета и комфортность условий для экипажа и пассажиров, является избыточный поток теплового солнечного излучения, проникающий в кабину и салон через элементы остекления. Кроме того, для контроля и управления движением воздушного транспорта при взлете и посадке в районе аэродромов используют радиолокационные станции, радиочастотное излучение которых приводит к превышению допустимого уровня сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения в кабине и салоне авиационной техни-

ки, что вредно для здоровья человека, а также является помехой для авионики. Для уменьшения теплового потока солнечного и СВЧ излучения, проходящих через элементы остекления, в зарубежных самолетах используют материалы остекления с интерференционными металл-диэлектрическими покрытиями, в частности, на элементах остекления самолетов «Боинг-747» используют многослойные покрытия на основе золота и прозрачных оксидов металлов [1].

На основании многолетнего опыта работы с подобными многослойными тонкопленочными покрытиями авторами был выработан алгоритм разработки таких покрытий. Вначале на основе имеющихся литературных данных требуется провести расчетный синтез перспективных вариантов покрытий по значениям оптических констант материалов. Потом производится отработка технологических режимов нанесения отдельных слоев покрытия. Когда получены стабильные, повторяемые технологические режимы нанесения каждого слоя, возникает необходимость исследования оптических свойств и расчетного уточнения оптических констант каждого слоя и выбор режимов нанесения. Этот пункт необходим потому, что оптические константы тонких пленок сильно зависят не только от способов и режимов нанесения [2, 3], но даже и от толщины пленок [4]. После уточнения оптических констант становится возможным провести расчетное уточнение состава покрытия с учетом реальных оптических констант. Далее следует провести исследование оптических характеристик выбранных вариантов многослойных покрытий и технологических особенностей последовательного нанесения слоев покрытия. Особенностью последовательного нанесения может являться, например, то, что на легкоокисляемые пленки металлов (например, серебра) не следует наносить в среде активного газа оксидные пленки, так как это приводит к деградации некоторых металлических слоев [5]. Затем, если возникает необходимость, стоит провести корректировку состава перспективных вариантов функционального покрытия. И завершающим этапом является исследование оптических и эксплуатационных свойств покрытия и при необходимости выбор и отработка технологии создания защиты оптического покрытия от воздействия факторов окружающей среды.

Математическое моделирование покрытий

Рассмотрим метод расчета интерференционных покрытий. Цель математического моделирования процесса прохождения электромагнитного излучения через тепло- и радиозащитный материал остекления заключается в определении структуры (состав и толщина слоев) материала. Объектом моделирования является многослойное покрытие,

состоящее из металлических и диэлектрических слоев и органического стекла в качестве подложки. Материал находится в среде с диэлектрической проницаемостью $\epsilon=1$, в которой распространяется электромагнитное излучение (рис. 1).

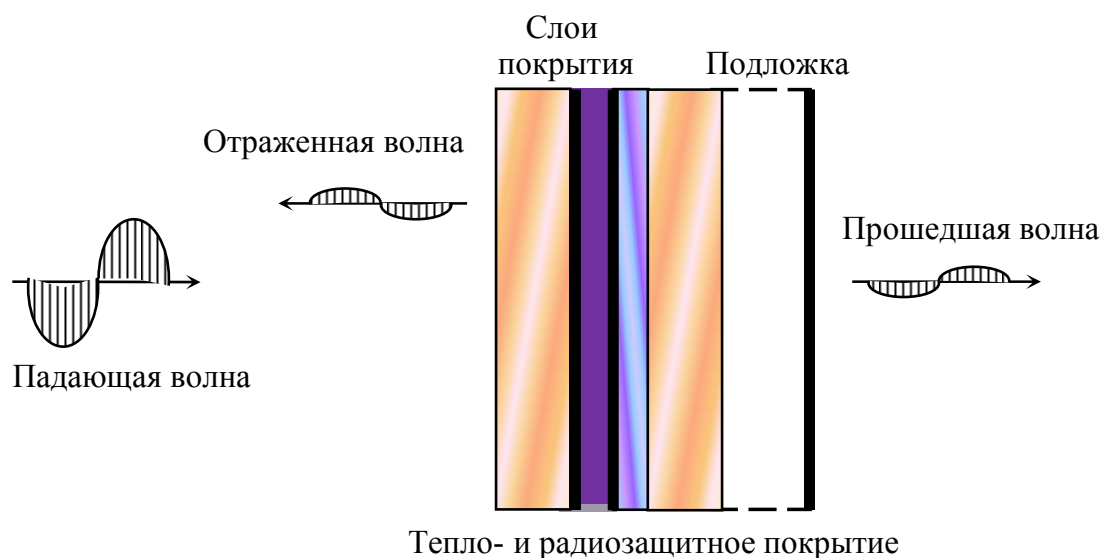


Рисунок 1. Объект моделирования – полимерный слоистый материал остекления с интегрированными электропроводящими покрытиями

Основным свойством объекта моделирования, необходимым для построения математической модели, является диэлектрическая проницаемость (или коэффициент преломления) слоев покрытий и подложки.

В математической модели могут быть сделаны следующие допущения:

- падающее излучение описывается линейно-поляризованной монохроматической волной с плоским фронтом;
- ширина пучка излучения много больше длины волны (отсутствие дифракционных эффектов);
- линейные размеры объекта (за исключением толщины) много больше длины волны излучения;
- поверхности слоев материала и покрытий – идеально плоские (шероховатость – много меньше длины волны);
- относительная магнитная проницаемость материалов слоев и электропроводящих покрытий равна 1;
- отдельные слои материала являются однородными и изотропными (взаимодействие электромагнитных волн с веществом каждого слоя определяется только величиной его диэлектрической проницаемости или коэффициента преломления).

В данном случае формальное математическое описание модели прохождения электромагнитного излучения через материал остекления может быть записано в виде решения уравнений Максвелла для распространения плоской электромагнитной волны в среде с переменной диэлектрической проницаемостью.

В работах [6, 7] приведена теория расчета многослойных оптических покрытий, основанная на решении уравнений Максвелла, позволяющая однозначно определить электрическое и магнитное поля в любой точке покрытия, а также рассчитать амплитудные коэффициенты пропускания и отражения от любой границы между слоями покрытия с учетом интерференции электромагнитных волн в многослойном покрытии. (Амплитудным коэффициентом отражения (пропускания) называют отношение амплитуды напряженности электрического поля отраженной (прошедшей) электромагнитной волны к амплитуде напряженности электрического поля падающей электромагнитной волны.)

В случае многослойного покрытия, состоящего из непоглощающих слоев, формулы для расчета амплитудных коэффициентов пропускания и отражения на произвольной границе раздела двух материалов с разными коэффициентами преломления при нормальном падении плоской волны имеют вид:

$$t_{i-1}^*(\lambda) = \frac{t_{i-1}(\lambda) \cdot t_i^*(\lambda) \cdot \exp(-i\varphi_i)}{1 + r_{i-1}(\lambda) \cdot r_i^*(\lambda) \cdot \exp(-2i\varphi_i)}; \quad r_{i-1}^*(\lambda) = \frac{r_{i-1}(\lambda) + r_i^*(\lambda) \cdot \exp(-2i\varphi_i)}{1 + r_{i-1}(\lambda) \cdot r_i^*(\lambda) \cdot \exp(-2i\varphi_i)}, \quad (1)$$

где $t_{i-1}(\lambda) = \frac{2 \cdot n_{i-1}(\lambda)}{n_{i-1}(\lambda) + n_i(\lambda)}$; $r_{i-1}(\lambda) = \frac{n_{i-1}(\lambda) - n_i(\lambda)}{n_{i-1}(\lambda) + n_i(\lambda)}$ – амплитудные (френелевские)

коэффициенты пропускания и отражения i -ой границы раздела (рис. 2) слоистого материала

соответственно; $\varphi_i = \frac{2\pi \cdot n_i(\lambda) \cdot d_i}{\lambda}$ – фазовая толщина слоя; $n_i(\lambda)$ – коэффициент преломления

i -го слоя; λ – длина волны излучения; d_i – толщина i -го слоя, i – индекс слоя, i – комплексная единица. Знак * обозначает эффективное значение амплитудного коэффициента (пропускания или отражения) группы слоев – от слоя, прилегающего к подложке, до расчетного слоя.

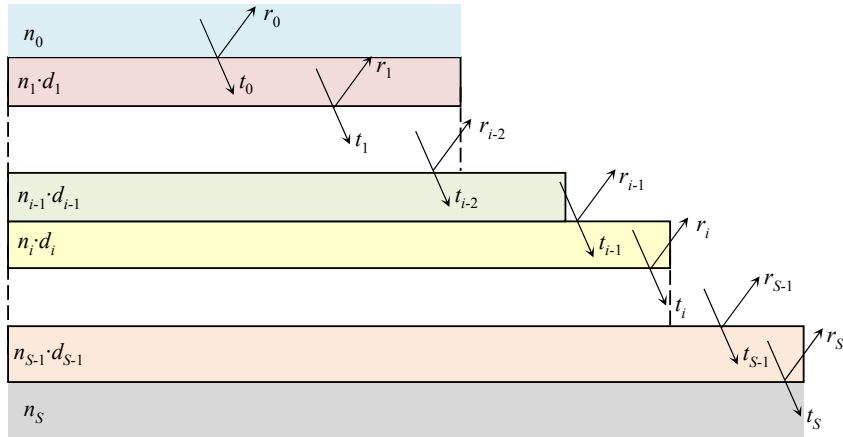


Рисунок 2. Иллюстрация рекуррентной процедуры расчета слоистого интерференционного материала

В настоящее время разработана математическая модель расчета интерференционных покрытий для оптического диапазона длин волн, основанная на рекуррентной процедуре расчета [6, 8] (см. рис. 2). Рекуррентная процедура расчета позволяет определить амплитудные коэффициенты отражения и пропускания многослойной системы. Расчет начинают с последнего слоя (слоя прилегающего к подложке), для которого определены френелевские коэффициенты на обеих границах раздела. На границе раздела с подложкой – это граничные условия:

$$t_{S-1}(\lambda) = \frac{2 \cdot n_{S-1}(\lambda)}{n_{S-1}(\lambda) + n_S(\lambda)}; \quad r_{S-1}(\lambda) = \frac{n_{S-1}(\lambda) - n_S(\lambda)}{n_{S-1}(\lambda) + n_S(\lambda)}; \quad (2)$$

на передней границе слоя:

$$t_{S-2}(\lambda) = \frac{2 \cdot n_{S-2}(\lambda)}{n_{S-2}(\lambda) + n_{S-1}(\lambda)}; \quad r_{S-2}(\lambda) = \frac{n_{S-2}(\lambda) - n_{S-1}(\lambda)}{n_{S-2}(\lambda) + n_{S-1}(\lambda)}. \quad (3)$$

Используя формулы (1), рассчитывают коэффициенты $t_{S-2}^*(\lambda)$ и $r_{S-2}^*(\lambda)$, которые определяют пропускание и отражение от слоя, находящегося на подложке. Затем, используя эти коэффициенты как новые граничные условия, проводят расчет для следующего слоя. Данную рекуррентную процедуру повторяют до тех пор, пока не будет добавлен последний слой, граничащий с внешней средой, из которой падает свет. В результате рекуррентной процедуры расчета будут определены амплитудные коэффициенты отражения $r_0(\lambda)$ и пропускания $t_0(\lambda)$ многослойной системы.

Энергетические коэффициенты отражения $R(\lambda)$ и пропускания $T(\lambda)$, а также изменение фазы света при отражении $\rho(\lambda)$ и пропускании $\tau(\lambda)$, как показано в работе [6], определяются следующими соотношениями:

$$R(\lambda) = |r_0(\lambda)|^2; \quad T(\lambda) = \frac{n_s}{n_0} \cdot |t_0(\lambda)|^2; \quad \rho(\lambda) = \arg r_0(\lambda); \quad \tau(\lambda) = \arg t_0(\lambda). \quad (4)$$

Способы нанесения оптического покрытия для тепло- и радиозащитного материала

Получение тонкопленочных покрытий с требуемыми свойствами чаще всего происходит ионно-плазменными методами, для металл-диэлектрических пленок лучше всего подходит метод магнетронного напыления [9, 10].

Метод магнетронного нанесения тонких пленок в вакууме реализуется путем создания над поверхностью катода-мишени планарного магнетрона электромагнитной «ловушки» для электронов плазмы. Для этого катод-мишень, изготовленный из распыляемого материала, располагают над полюсами магнитной системы, которые образуют замкнутый зазор. Часть магнитного потока, создаваемого магнитной системой, пронизывает катод и сосредоточивается над его рабочей поверхностью.

Магнитные силовые линии над рабочей поверхностью катода имеют форму похожую на арку. Если к катоду приложить отрицательный потенциал, то на электроны, находящиеся у поверхности катода, начинают действовать силы со стороны электрического и магнитного полей, которые приводят к дрейфу электронов в замкнутом зазоре над поверхностью катода. Электроны оказываются в электромагнитной «ловушке» и могут покинуть ее только за счет столкновений с атомами газа, что приводит к увеличению вероятности ионизирующих столкновений электронов с атомами. В результате, над поверхностью катода создается область плазмы высокой плотности. Ионы из этой области ускоряются электрическим полем в направлении катода и выбивают из него атомы и электроны вторичной эмиссии. Схема магнетронного распыления представлена на рис. 3 [9, 10].

Магнетроны бывают сбалансированными и несбалансированными. Их принципиальное отличие состоит в конфигурации магнитного поля, создаваемого над мишенью [11]. Если в сбалансированном магнетроне все силовые магнитные линии, вышедшие из южного полюса приходят в северный полюс магнитной системы магнетрона, то в несбалансированном магнетроне (рис. 4) часть силовых линий не замыкаются на центральный полюс, что позволяет создать дополнительную зону замагниченности электронов, а следовательно, дополнительную зону ионизации, а это, в свою очередь, облегчает горение разряда и обеспечивает иону бомбардировку подложки.

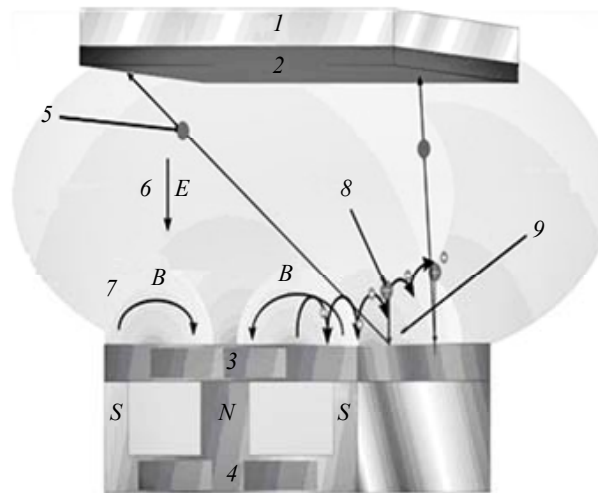


Рисунок 3. Схема магнетронного распыления:

1 – подложка; 2 – покрытие; 3 – катод-мишень; 4 – магнитная система; 5 – распыленный атом; 6 – электрическое поле E ; 7 – магнитное поле B ; 8 – ион аргона; 9 – область дрейфа электронов

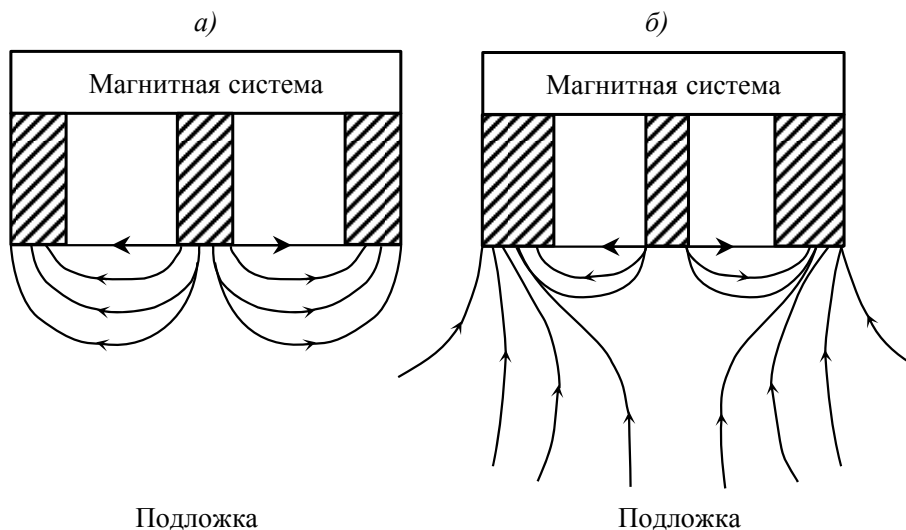


Рисунок 4. Конфигурация магнитного поля, создаваемого над мишенью сбалансированным (а) и несбалансированным магнетроном (б)

Еще одним важным инструментом ионно-плазменного нанесения покрытий является дуальный магнетрон. Очень сложно получить длительный устойчивый процесс, когда осаждаются диэлектрические пленки и используется постоянный ток, несмотря на прогресс в области стабилизации разряда [12]. Радиочастота (RF) применима на маленьких размерах подложки. Однако из-за высокой стоимости оборудования и размерных проблем высокочастотное распыление не подходит, если ширина подложки превышает 1 м. Высокая стабильность может быть получена при помощи биполярного импульса. Во время периода «отсутствие импульса» маленький положительный потенциал приложен к мишени, и таким образом производится нейтрализация поверхностных зарядов. Типичные частоты импульсов: 10–100 кГц. Оптимальным решением (рис. 5)

является расположение двух идентичных плоских магнетронов, установленных близко друг к другу в вакуумной камере. В любое время один из магнетронов находится под отрицательным потенциалом и действует как катод распыления, в то время как соседний магнетрон – анод. В пленках, произведенных с помощью магнетрона импульсного распыления, наблюдается существенно более высокая плотность и твердость, чем в пленках, полученных магнетронами постоянного тока (DC-процесс) [13]. Считается, что по сравнению с DC-распылением большее количество высокоэнергетичных ионов достигают подложки, что приводит к выгодной модификации структуры пленки [14].

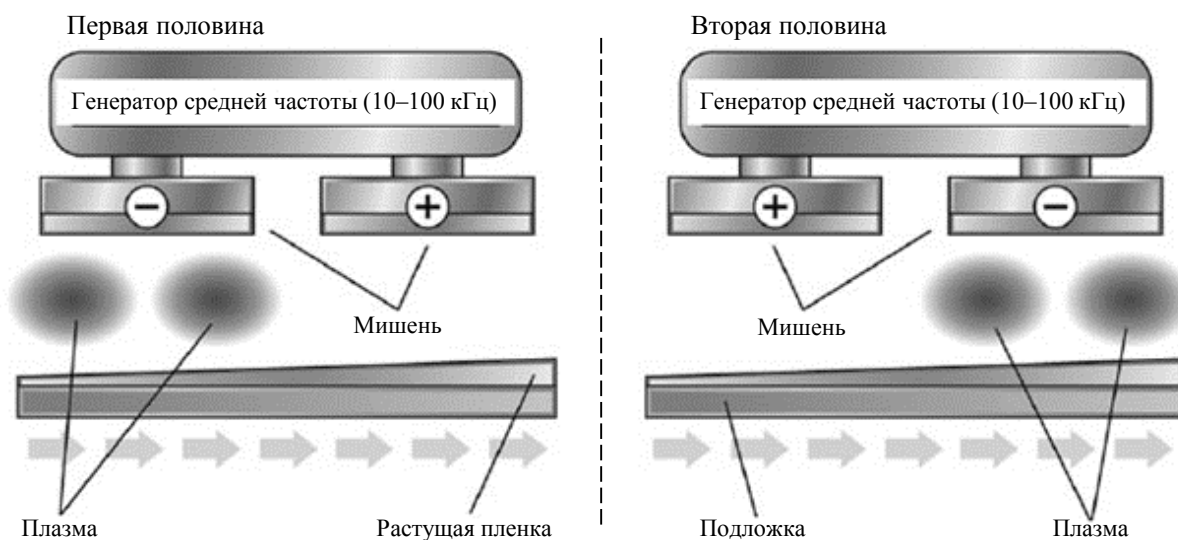


Рисунок 5. Принцип импульсного магнетронного распыления на примере дуального магнетрона

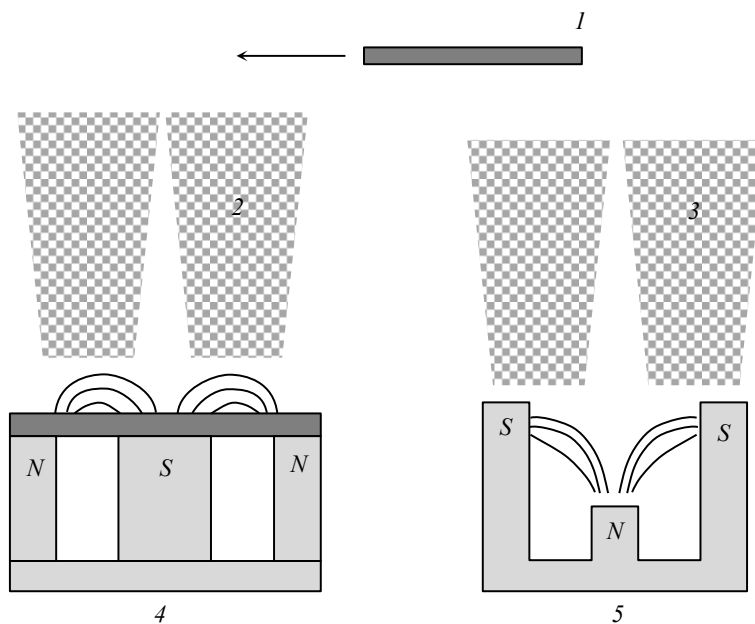


Рисунок 6. Схема процесса ионного асистирувания:
 1 – подложка; 2 – поток атомов; 3 – ионно-плазменный поток; 4 – магнетронная система; 5 – ионный источник

В связи со все более обширным применением полимерных материалов не только в авиации, но и в промышленности в целом [15, 16], часто возникает необходимость придать полимерным материалам определенные функциональные свойства с помощью тонкопленочных покрытий. При получении покрытий на полимерных материалах важной особенностью является невозможность проведения термообработки с температурой $>150^{\circ}\text{C}$ после технологического процесса нанесения покрытия. Отсюда возникает необходимость получения плотных и бездефектных пленок уже на стадии нанесения. Для этого использовалось ионное асистирирование, когда поток ионов инертного газа направлялся на подложку в процессе роста покрытий (рис. 6), что обеспечивало более высокую энергию атомов на поверхности, а следовательно, более высокую плотность и меньшее количество дефектов в покрытии – для этих целей применялся ускоритель ионов с азимутальным дрейфом, плотность тока которого составляла $100\text{--}1000\text{ А/м}^2$, а энергия ионов $300\text{--}600\text{ эВ}$ [17].

Состав и принцип действия тепло- и радиозащитного покрытия

С помощью магнетронного нанесения получены тепло- и радиозащитные покрытия со структурой «диэлектрик–металл–барьерный слой–диэлектрик». В таких покрытиях полупрозрачный слой металла ослабляет тепловое излучение, интерференционные диэлектрические слои увеличивают коэффициент пропускания в видимой области спектра, а барьерный слой защищает металлический слой от деградации при взаимодействии с кислородом. Энергия солнечного излучения, падающего на элемент остекления с покрытием, частично отражается и поглощается материалом остекления и покрытием, а частично проходит внутрь кабины и салона. Эффективность ослабления теплового потока солнечного излучения материалом остекления при сохранении высокого интегрального коэффициента пропускания в видимой области спектра определяется правильным выбором конструкции покрытия. Обычно покрытия включают диэлектрические слои оксидов металлов интерференционной толщины в несколько десятков нм, между которыми расположен слой металла с высокой электропроводностью. В качестве диэлектрических слоев наиболее часто применяют диоксид TiO_2 как материал, обладающий максимальным показателем преломления $n=2,3\text{--}2,7$ в видимой области спектра. В качестве металлического слоя наиболее эффективно применение тонких пленок из Ag , Au или Cu толщиной порядка нескольких нм. Барьерный слой для защиты металлического слоя толщиной $2\text{--}3\text{ нм}$ из Ti или AlN толщиной парой десятков нм. Схема покрытия приведена на рис. 7 [18].

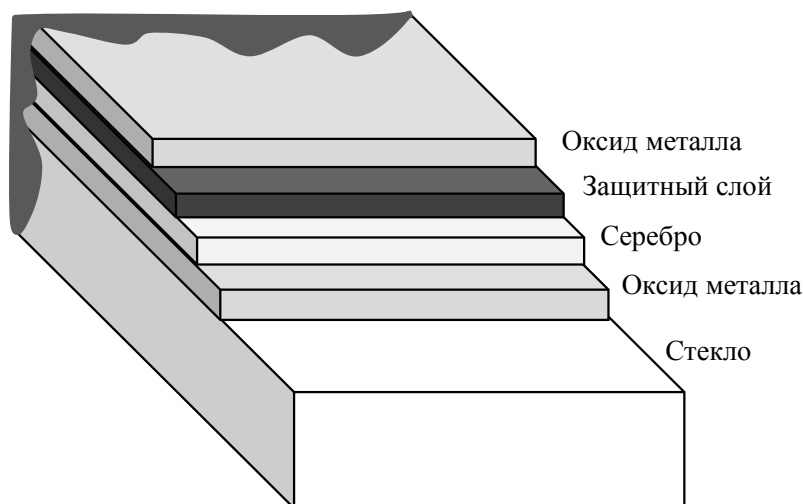


Рисунок 7. Состав тепло- и радиозащитного покрытия

В качестве функциональных оптических пленок в авиационном остеклении широко применяются прозрачные проводящие покрытия, такие как полупроводниковые оксиды и многослойные металл-диэлектрические пленки. В настоящее время ФГУП «ВИАМ» обладает технологией получения прозрачных электропроводящих покрытий с интегральным пропусканием в видимой области 70–80% и поверхностным сопротивлением 10–40 Ом/□ [19, 20].

Оптические свойства тепло- и радиозащитного материала

При проектировании тепло- и радиозащитного покрытия первой целью было получить максимальное значение спектрального коэффициента пропускания на длине волны 550 нм, так как на этой длине волны находится максимум чувствительности человеческого глаза, а коэффициент интегрального пропускания напрямую зависит от этой величины. Чтобы достичь такого максимума, толщины диэлектриков подбирались кратными четверти длины волны максимума (550 нм) [8]. Второй целью было ослабить солнечный поток в кабину летательного аппарата. Для этого толщина металлического слоя должна быть не менее 10–15 нм, чтобы большая часть излучения в ИК области отражалась от покрытия, а не поглощалась им (рис. 8).

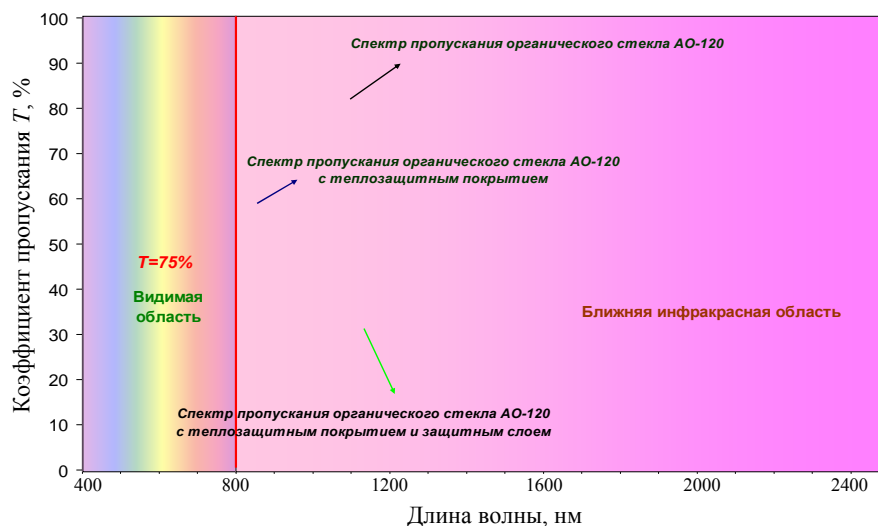


Рисунок 8. Характеристика спектрального пропускания тепло- и радиозащитного материала

Полученный материал ослабляет солнечный поток более чем в 2 раза, при этом интегральный коэффициент пропускания в видимой области составляет не менее 75%. Защита таких покрытий может осуществляться полимерной пленкой (рис. 9).

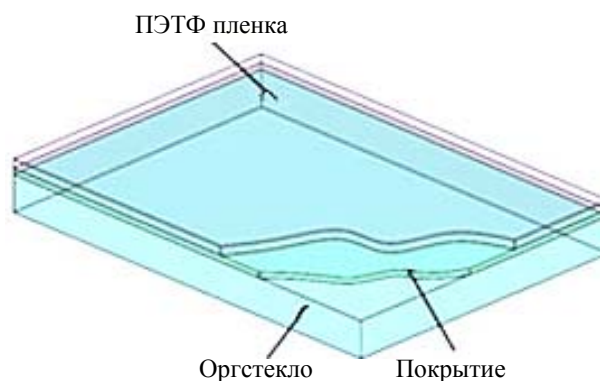


Рисунок 9. Состав остекления, разработанный для ослабления солнечного потока

Климатическая устойчивость тепло- и радиозащитного материала

Серьезный недостаток таких покрытий заключается в том, что они слабо устойчивы к воздействию окружающей среды, поэтому их необходимо защищать. В данной работе исследован прозрачный тепло- и радиозащитный материал с оптическим интерференционным покрытием, в котором защита тонкопленочного покрытия реализована с помощью полимерной пленки, нанесенной путем ламинирования (см. рис. 9).

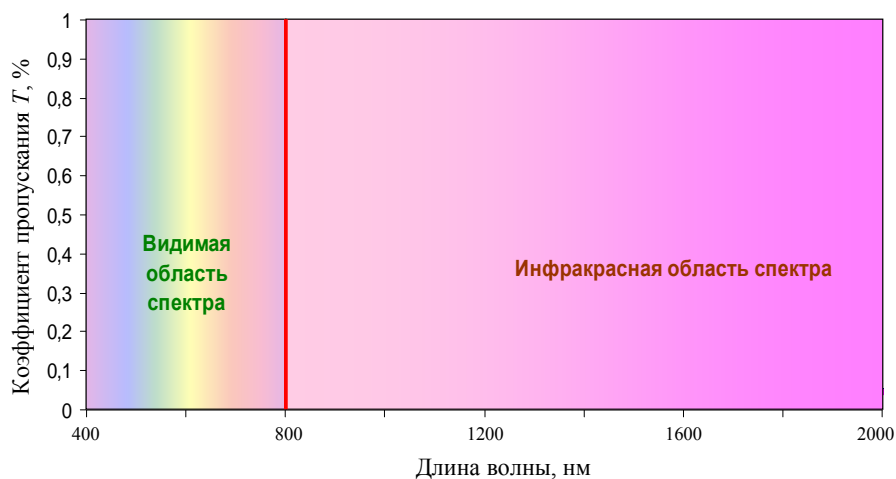


Рисунок 10. Сравнительная характеристика спектрального пропускания тепло- и радиозащитного материала до (—) и после климатических испытаний: УФО+1,5 года МЦКИ (—)

Ускоренные испытания такого материала на воздействие ультрафиолетового облучения (УФО) и на водопоглощение, а также натурные испытания в условиях естественного старения на открытой площадке МЦКИ (Московский центр климатических испытаний) в течение полутора лет прошли успешно, доказательством тому служит сравнительная характеристика спектрального пропускания тепло- и радиозащитного материала до и после климатических испытаний (рис. 10).

ЛИТЕРАТУРА

1. Boeing B 747 Cockpit Windows. www.sierracin.com.
2. Богатов В.А., Захаров С.С., Кисляков П.П., Крынин А.Г., Хохлов Ю.А. Влияние режимов магнетронного напыления на оптико-физические свойства медных нанопокровов // Наноматериалы и нанотехнологии. 2011. №4. С. 45–53.
3. Хохлов Ю.А., Крынин А.Г., Богатов В.А., Кисляков П.П. Оптические константы тонких пленок оксида индия, легированного оловом, осажденных на полиэтилен-терефталатную пленку методом реактивного магнетронного распыления (ближняя инфракрасная область спектра) // Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 24–28.
4. Rodriguez J., Gomez M., Ederth J., Niklasson G.A., Granqvist C.G. Thickness dependence of the optical properties of sputter deposited Ti oxide films // Thin Solid Films. 2010. V. 365. P. 119–125.
5. Захаров А.Н., Ковшаров Н.Ф., Оскомов К.В., Работкин С.В., Соловьев А.А., Сочугов Н.С. Свойства низкоэмиссионных покрытий на основе Ag и Cu, нанесенных

- на полимерную пленку методом магнетронного распыления //Перспективные материалы. 2012. №2. С. 62–70.
6. Путилин Э.С. Оптические покрытия: Учеб. пособ. СПб.: ГУИТМО. 2005. 230 с.
 7. Бернинг П.Х. Теория и методы расчета оптических свойств тонких пленок //Физика тонких пленок. Т. 1 /Под ред. Г. Хасса. М.: Мир. 1967. С. 91–151.
 8. Крылова Т.Н. Интерференционные покрытия. Л.: Машиностроение. 1973. С. 30–34.
 9. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. М.: Радио и связь. 1982. 73 с.
 10. Хохлов Ю.А. Технология оптических покрытий. М.: МГТУ им. Баумана. 2004. 81 с.
 11. Соловьев А.А., Захаров А.Н., Работкин С.В., Оскомов К.В., Сочугов Н.С. Характеристики плазмы несбалансированной магнетронной распылительной системы и их влияние на параметры покрытий ZnO:Ga //Физика и химия обработки материалов. 2009. №2. С. 58–65.
 12. Хохлов Ю.А., Богатов В.А., Березин Н.М. Стабилизация реактивного магнетронного осаждения магнитным полем //Физика и химия обработки материалов. 2012. №5. С. 46–50.
 13. Jager S., Szyszka B., Szczyrbowski J., Brauer G. Surface and Coating Technology. 2008. P. 1304–1314.
 14. Brauer G., Szyszka B., Vergo M., Bandorf R. Magnetron sputtering – Milestones of 30 years //Vacuum. 2010. №84. P. 1354–1359.
 15. Гращенко Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 231–241.
 16. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
 17. Гришин С.Д., Мамонов В.И., Марахтанов М.К., Хохлов Ю.А. Определение энергии ионов в плазме разряда с азимутальным дрейфом электронов //Физика и химия обработки материалов. 1986. №2. С. 131–132.
 18. Низкоэмиссионное покрытие, нанесенное на прозрачную подложку: пат. 2190692 Рос. Федерация; опубл. 10.10.2002.
 19. Богатов В.А., Кондрашов С.В., Хохлов Ю.А. Многофункциональные оптические покрытия и материалы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 343–348.

20. Богатов В.А., Кондрашов С.В., Хохлов Ю.А. Получение градиентного покрытия оксинитрида алюминия методом реактивного магнетронного распыления //Авиационные материалы и технологии. 2010. №3. С. 19–21.

Reference list

1. Boeing B 747 Cockpit Windows. www.sierracin.com.
2. Bogatov V.A., Zaharov S.S., Kislyakov P.P., Krynin A.G., Hohlov Yu.A. Vliyanie rezhimov magnetronnogo napyleniya na optiko-fizicheskie svoystva mednyh nanopokrytiy [Effect of magnetron sputtering conditions on the optical and physical properties of copper nano-coatings] //Nanomaterialy i nanotehnologii. 2011. №4. S. 45–53.
3. Hohlov Yu.A., Krynin A.G., Bogatov V.A., Kislyakov P.P. Opticheskie konstanty tonkih plenok oksida indiya, legirovannogo olovom, osazhdennyh na polietilentereftalatnuyu plenku metodom reaktivnogo magnetronnogo raspyleniya (blizhnyaya infrakrasnaya oblast' spektra) [Optical Constants of Thin Films of Indium Oxide Alloyed with Tin and Deposited onto Polyethylene Terephthalate Film by the Reactive Magnetron Sputtering Method (Infrared Short-Range Region of Spectrum)] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2013. №1. S. 24–28.
4. Rodriguez J., Gomez M., Ederth J., Niklasson G.A., Granqvist C.G. Thickness dependence of the optical properties of sputter deposited Ti oxide films //Thin Solid Films. 2010. V. 365. P. 119–125.
5. Zaharov A.N., Kovsharov N.F., Oskomov K.V., Rabotkin S.V., Solov'ev A.A., Sochugov N.S. Svoystva nizkoemissionnyh pokrytiy na osnove Ag i Su, nanesennyh na polimernuyu plenku metodom magnetronnogo raspyleniya [Properties of Ag and Cu-based low-emission coatings deposited on a polymer film by the magnetron sputtering method] //Perspektivnye materialy. 2012. №2. S. 62–70.
6. Putilin E.S. Opticheskie pokrytiya: Ucheb. posob. [Optical coatings: Study guide] SPb.: GUITMO. 2005. 230 s.
7. Berning P.H. Teoriya i metody rascheta opticheskikh svoystv tonkih plenok [Theory and computational methods of optical properties of thin films] //Fizika tonkih plenok. T. 1 /Pod red. G. Hassa. M.: Mir. 1967. S. 91–151.
8. Krylova T.N. Interferentsionnye pokrytiya [Interference coatings]. L.: Mashinostroenie. 1973. S. 30–34.
9. Danilin B.S., Syrchin V.K. Magnetronnye raspylitel'nye sistemy [Magnetron sputtering systems]. M.: Radio i svyaz'. 1982. 73 s.

10. Hohlov Yu.A. Tehnologiya opticheskikh pokrytiy [Technology of optical coatings]. M.: MGTU im. Baumana. 2004. 81 s.
11. Solov'ev A.A., Zaharov A.N., Rabotkin S.V., Oskomov K.V., Sochugov N.S. Harakteristiki plazmy nesbalansirovannoy magnetronnoy raspylitel'noy sistemy i ih vliyanie na parametry pokrytiy ZnO:Ga [Plasma characteristics of an unbalanced magnetron sputtering system and their effect on parameters of ZnO:Ga coatings] //Fizika i himiya obrabotki materialov. 2009. №2. S. 58–65.
12. Hohlov Yu.A., Bogatov V.A., Berezin N.M. Stabilizatsiya reaktivnogo magnetronnogo osazhdeniya magnitnym polem [Stabilization of reactive magnetron sputtering by a magnetic field] //Fizika i himiya obrabotki materialov. 2012. №5. S. 46–50.
13. Jager S., Szyszka B., Szczyrbowski J., Brauer G. Surface and Coating Technology. 2008. P. 1304–1314.
14. Brauer G., Szyszka B., Vergo M., Bandorf R. Magnetron sputtering – Milestones of 30 years //Vacuum. 2010. №84. P. 1354–1359.
15. Graschenkov D.V., Chursova L.V. Strategiya razvitiya kompozitsionnyh i funktsional'nyh materialov [Development strategy of composite and functional materials] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 231–241.
16. Kablov E.N. Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tehnologii ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategical Areas of Developing Materials and Their Processing Technologies for the Period up to 2030] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
17. Grishin S.D., Mamonov V.I., Marahtanov M.K., Hohlov Yu.A. Opredelenie energii ionov v plazme razryada s azimutal'nym dreyfom elektronov [Determination of ions energy in a plasma discharge with the azimuthal electron drift] //Fizika i himiya obrabotki materialov. 1986. №2. S. 131–132.
18. Nizkoemissionnoe pokrytie, nanesennoe na prozrachnuyu podlozhku [Low-emission coating deposited on a transparent substrate]: pat. 2190692 Ros. Federatsiya; opubl. 10.10.2002.
19. Bogatov V.A., Kondrashov S.V., Hohlov Yu.A. Mnogofunktsional'nye opticheskie pokrytiya i materialy [Multifunctional Optical Coatings and Materials] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 343–348.
20. Bogatov V.A., Kondrashov S.V., Hohlov Yu.A. Poluchenie gradientnogo pokrytiya oksinitrida alyuminiya metodom reaktivnogo magnetronnogo raspyleniya [Deposition of gradient aluminium oxynitride coating by the reactive magnetron sputtering method] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2010. №3. S. 19–21.