

В.А. БОГАТОВ, С.В. КОНДРАШОВ, Ю.А. ХОХЛОВ

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ И МАТЕРИАЛЫ

В период с 2007 по 2012 г. во ФГУП «ВИАМ» проведен комплекс исследований в области разработки функциональных оптических покрытий для авиационных материалов остекления, а также специальных оптических покрытий для поверхности планера, который включал:

- математическое моделирование интерференционных покрытий с заданными значениями коэффициентов пропускания и отражения в видимом, ближнем инфракрасном и СВЧ диапазонах спектра, а также слоистых полимерных материалов для элементов остекления и поверхности планера;
- разработку низкотемпературных ионно-плазменных технологий получения отдельных слоев и многослойных планарных наноструктур, содержащих диэлектрические, металлические и полупроводниковые слои на полимерных пленках и материалах остекления;
- разработку тепло- и радиозащитных материалов остекления с оптическими покрытиями;
- разработку пленочных материалов для покрытий планера со специальными свойствами, в том числе пленочных адаптивных электроуправляемых материалов.

При проведении исследований использованы созданные во ФГУП «ВИАМ» современные технологические и исследовательские стенды:

- автоматизированный стенд для низкотемпературного нанесения функциональных оптических покрытий на полимерные материалы на базе современных несбалансированных магнетронных систем и источников ионов, обеспечивающих реактивное нанесение покрытий в режимах ионного ассистирования и «дуального» магнетронного распыления;
- стенд оптических измерений, включающий спектрофотометры с компьютерной регистрацией и обработкой результатов измерений, перекрывающие диапазон длин волн 0,19–22 мкм, и спектроэллипсометр на диапазон 0,38–1,00 мкм. (Спектрофотометры укомплектованы приставками зеркального отражения с диапазоном изменения угла падения излучения от 10 до 80 град.)

В области математического моделирования функциональных оптических покрытий для полимерных материалов проведены расчетные исследования по численному анализу и синтезу интерференционных покрытий [1, 2] и слоистых материалов, а также отработаны методики определения оптических констант интерференционных тонких пленок и материалов подложек.

На основании проведенных исследований выбраны перспективные конструкции функциональных покрытий и слоистых полимерных материалов, экранирующих тепловое и СВЧ излучения. Оценка максимально возможного значения коэффициента ослабления солнечной энергии K идеальным теплозащитным материалом остекления нейтрального цвета с коэффициентом пропускания видимого света T_B и полным экранированием инфракрасного излучения $T_{ИК} = 0$ показывает, что при $T_B \geq 75\%$

величина $K = \frac{1}{N_B T_B}$ не может превышать значения 2,4. Здесь N_B – доля солнечной энергии, передаваемой в видимой области спектра (для солнечного излучения со спектральной интенсивностью AM1 – $N_B \approx 0,55$).

Предварительные расчеты по синтезу оптимальных покрытий состава: диэлектрик–металл–диэлектрик, диэлектрик–полупроводник–диэлектрик, полупроводник–металл–полупроводник – проводили с использованием справочных данных по значениям оптических констант отдельных слоев покрытий [3]. В качестве целевых функций для оптимизации использовали заданные значения интегрального коэффициента пропускания видимого света и минимальные значения коэффициента пропускания в ближней инфракрасной области спектра. При необходимости в качестве целевой функции использовали также условие минимального отклонения координат цветности покрытия от значений, соответствующих нейтральному цвету.

Недостаток справочных данных по оптическим константам как для материалов отдельных слоев покрытия, так и для ряда новых и модифицированных полимерных материалов остекления и пленок, во многом отразился на степени точности предварительных расчетов. Кроме того, как показали исследования по отработке технологических режимов низкотемпературного магнетронного нанесения отдельных слоев теплозащитных интерференционных покрытий на полимерные материалы, оптические константы тонких пленок (10–300 нм) в значительной степени зависят от технологии их получения.

С целью повышения точности расчетов были отработаны методики, позволяющие оперативно определять оптические константы материалов подложек и тонких пленок, а также начать формирование базы данных по оптическим константам материалов в области спектра 0,4–20 мкм. Методики основаны на решении обратной задачи фотометрии и позволяют по измеренным значениям коэффициентов пропускания и отражения исследуемых материалов и покрытий рассчитать их оптические константы. В тех областях спектра, где материалы подложек и тонких пленок непрозрачны, оптические константы рассчитывали по измеренным значениям коэффициентов отражения при разных углах падения излучения (10, 45 и 80 град). В области 0,4–1,0 мкм (наряду со спектрофотометрическим методом) использовали метод спектроскопии эллипсометрии.

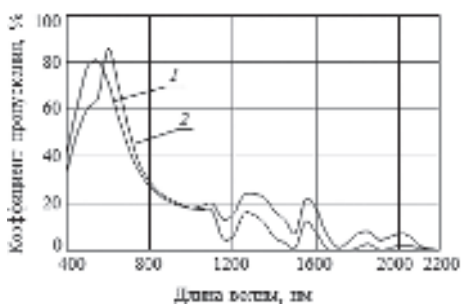


Рис. 1. Расчетные спектральные зависимости коэффициентов пропускания теплозащитных численно оптимизированных материалов остекления на основе органического стекла, ламинированного ПЭТФ пленкой с металлдиэлектрическими покрытиями на основе слоев серебра (1) и меди (2) и диэлектрических слоев диоксида титана

С использованием вышеперечисленных методов определены значения оптических констант (показатели преломления и поглощения) материалов и тонких пленок, перспективных для создания полимерного теплозащитного остекления: органического стекла СО-120С, поликарбоната марки «Macrolon» GP 099, термостабилизированной ПЭТФ пленки марки СТ-5, фторопластовой пленки Ф-50, тонкопленочных покрытий на основе серебра, меди, диоксида титана, нитрида алюминия, оксида индия, легированного оловом, получаемых методом низкотемпературного магнетронного нанесения, – в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра.

Исследования по определению оптических констант полимерных материалов и отдельных слоев покрытий позволили существенно повысить точность моделирования интерференционных покрытий и слоистых оптических материалов на полимерной основе, получаемых на применяемом технологическом оборудовании как для функциональных материалов остекления, так и для селективных низкоэмиссионных покрытий поверхности планера. Кроме того, применение методов, традиционно используемых в анализе и синтезе оптических покрытий для СВЧ диапазона спектра, позволило синтезировать слоистые материалы остекления с широкой полосой поглощения в СВЧ диапазоне.

На основе математического моделирования оптимизированы:

- органические материалы остекления с теплозащитными интерференционными металлдиэлектрическими покрытиями, обеспечивающие ослабление теплового потока солнечного излучения в 2,0–2,5 раза при интегральном коэффициенте пропускания видимого света $T_V = 73–79\%$;

- селективные низкоэмиссионные покрытия и пленочные материалы с заданными коэффициентами отражения на отдельных участках спектра и низкой интегральной излучательной способностью ($\epsilon \leq 0,1$) в инфракрасной области;

- прозрачные в видимой области спектра слоистые материалы, поглощающие $>80\%$ СВЧ излучения в широкой полосе сантиметрового диапазона спектра.

На рис. 1–3 показаны примеры спектральных характеристик оптимизированных функциональных оптических полимерных материалов.

В области разработки ионно-плазменных технологий получения многослойных функциональных покрытий и их отдельных слоев проведены исследования методов ионно-стимулированного и реактивного нанесения покрытий с применением автономных источников ионов, несбалансированных и «дualных» магнетронных систем и разработан ряд низкотемпературных технологий магнетронного нанесения металлических, диэлектри-

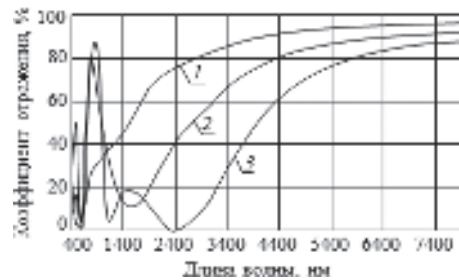


Рис. 2. Примеры расчетных спектров отражения селективных низкоэмиссионных покрытий с низким коэффициентом отражения в выборочных поддиапазонах длин волн видимого и ближнего инфракрасного диапазона: 1 – с одной полосой поглощения ($\lambda = 0,40–0,75$ мкм); 2 – с двумя полосами поглощения ($\lambda = 0,40–0,75$ мкм и $\lambda \approx 1,5$ мкм); 3 – с тремя полосами поглощения ($\lambda = 0,40–0,75$ мкм, $\lambda \approx 1,1$ мкм и $\lambda \approx 2,3$ мкм)

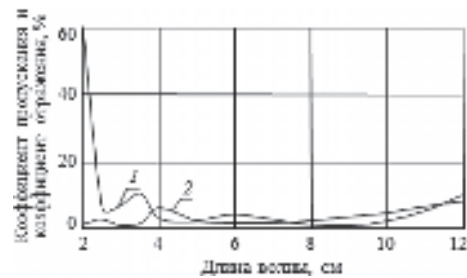


Рис. 3. Расчетные спектральные характеристики численно оптимизированного слоистого материала остекления, поглощающего СВЧ излучение, на основе органических стекол с прозрачным электропроводящим покрытием из оксида индия, легированного оловом: 1 – коэффициент отражения; 2 – коэффициент пропускания

Таблица 1

Характеристики материалов остекления

Состав материала (метод изготовления)	Применяемое покрытие	Коэффициент пропускания видимого света, %	Коэффициент ослабления теплового солнечного излучения	Коэффициент прохождения/отражения СВЧ излучения в сантиметровом диапазоне, %	Рабочая температура (при одностороннем нагреве), °С	Удельная ударная вязкость, кДж/м ²
Органическое стекло и ПЭТФ пленка (ламинирование)	Металлдиэлектрическое: — на основе серебра	75—77	2,0—2,2	$\left. \begin{array}{l} \frac{1-5}{80-90} \\ \frac{1-5}{80-90} \\ \frac{3-8}{50-70} \end{array} \right\}$	>120	—
	— на основе меди	70—72	2,0—2,2			
	Полупроводниковое на основе оксида индия	80—82	1,3			
Теплостойкое органическое стекло, поликарбонат, ПЭТФ пленка (вакуумное прессование)	Металлдиэлектрическое на основе меди	70—72	2,0—2,1	$\frac{1-5}{80-90}$	До 170	62—82
Силикатное и органические стекла, склеивающий слой (вакуумное прессование, заливка и полимеризация)	Полупроводниковое на основе оксида индия на силикатном стекле	75—80	1,3—1,5	$\frac{2-8}{5-10}$	>120	—

ческих и оксидных полупроводниковых покрытий на полимерные материалы, в том числе:

- технология низкотемпературного ионно-стимулированного нанесения металлических покрытий на основе меди, серебра, алюминия, титана и др.;

- технология низкотемпературного ионно-стимулированного нанесения диэлектрических оксидов и нитридов на основе титана, алюминия, кремния и др.;

- технология низкотемпературного нанесения градиентного оксинирида алюминия с переменным по толщине показателем преломления в диапазоне 1,6–2,1;

- технология низкотемпературного ионно-стимулированного нанесения прозрачного электропроводящего покрытия на основе оксида индия, легированного оловом, с интегральным коэффициентом пропускания видимого света >80% и величиной поверхностного сопротивления до 40 Ом/□;

- технология низкотемпературного ионно-стимулированного нанесения интерференционных покрытий со структурами: диэлектрик–металл–диэлектрик, диэлектрик–полупроводник–диэлектрик, полупроводник–металл–полупроводник, экранирующих тепловое и СВЧ-излучение.

Результаты исследований по разработке технологий нанесения функциональных оптических покрытий совместно с результатами математического моделирования слоистых полимерных материалов были использованы при разработке многофункциональных материалов остекления и пленочных материалов, предназначенных для снижения заметности летательных аппаратов в видимой и ближней инфракрасной областях спектра, в том числе при разработке технологии получения адаптивных электроуправляемых покрытий (АЭП).

Таблица 2

Характеристики адаптивных слоистых материалов с полупроводниковым покрытием на основе оксида индия на рабочую температуру до 130°C

Область применения (метод изготовления)	Оптические свойства	Время срабатывания, с
Покрытие поверхности планера ЛА (ламинирование, заливка и полимеризация)	Изменение яркости свечения от 0 до 600 кд/м ² Изменение коэффициента отражения от 15 до 70%	<1 10–30
Материалы для остекления ЛА (заливка и полимеризация)	Изменение коэффициента пропускания от 15 до 70%; ослабление теплового солнечного излучения в 1,5–4,0 раза	10–30

В процессе разработки этих материалов отработаны режимы изготовления слоистых полимерных материалов методами ламинирования, вакуумного прессования, заливки с последующей полимеризацией, необходимые для получения:

- слоистых тепло- и радиозащитных материалов остекления с оптическими покрытиями;

- слоистых низкоэмиссионных пленочных материалов для покрытий поверхности планера ЛА с селективными оптическими свойствами;

- адаптивных электрохромных покрытий (АЭХП) и материалов остекления на основе полимерной электрохромной системы (ЭХС), помещенной между двумя прозрачными электропроводящими покрытиями, на-

несенными на ПЭТФ пленку (ЭХС включает в себя гель-электролит, анодную и катодную электрохромные компоненты);

– адаптивных электролюминесцентных покрытий (АЭЛП) с яркостью свечения до 600 кд/м^2 на основе светобумаги, работающей на переменном токе в режиме предпробойной электролюминесценции.

Основные характеристики некоторых разработанных материалов приведены в табл. 1 и 2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крылова Т.Н. Интерференционные покрытия. Л.: Машиностроение. 1973. 224 с.
2. Фурман Ш.А. Тонкослойные оптические покрытия. Л.: Машиностроение. 1977. 264 с.
3. Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В. Оптические постоянные природных и технических сред: Справочник. Л.: Химия. 1984. 216 с.

А.А. БЕЛЯЕВ, С.В. КОНДРАШОВ,
В.В. ЛЕПЕШКИН, А.М. РОМАНОВ

РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

Многочисленные электротехнические и электронные приборы стали обязательной принадлежностью современного летательного аппарата (ЛА), где может устанавливаться до нескольких десятков различных антенных систем, создающих в большей или меньшей степени электромагнитные помехи. С другой стороны, само радиотехническое оборудование чувствительно к различного рода электромагнитным воздействиям – как от другого оборудования, так и в результате отражения электромагнитных волн от расположенных рядом элементов конструкций. В результате таких воздействий возникают разного рода нарушения в работе оборудования, что вызывает необходимость решения такой проблемы, как электромагнитная совместимость (ЭМС).

ЭМС определяют как способность технических средств функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам, не оказывать неблагоприятного влияния на биологические объекты. Одним из эффективных способов борьбы с указанными проблемами является использование радиопоглощающих материалов (РПМ). Необходимо также отметить, что конструктор, размещающий антенные системы на ЛА, зачастую существенно ограничен в выборе места и условий их расположения. Это также вызывает необходимость использования радиопоглощающих материалов для уменьшения взаимовлияния этих систем.

Практически любой радиопоглощающий материал является как минимум двухкомпонентным, а зачастую многокомпонентным, композиционным материалом.

В настоящее время принято следующее деление радиопоглощающих материалов по назначению:

- радиопоглощающие покрытия;
- конструкционные радиопоглощающие материалы;
- экранирующие радиопоглощающие материалы.