

специальных терморегулирующих покрытий решают за счет применения современного математического моделирования тепловых процессов бортовой электронной аппаратуры на всех стадиях проектирования и ее жизненного цикла.

На этапе разработки эскизного проекта производится выбор оптимального технического предложения по реализации конструкции бортовой электронной аппаратуры КА. Для этого предварительно осуществляется создание макромоделей тепловых процессов и распределения тепловой мощности между микросистемными узлами за счет лучистого и кондуктивного теплообмена в целях определения интервальных температур микросистемных узлов и граничных условий для последующего детального моделирования тепловых процессов. На основе моделей тепловых процессов макро- и микроровня подготавливается решение о необходимых изменениях в конструкции печатных узлов и блока электронной аппаратуры КА.

При утверждении технического проекта на основе тепловых расчетов планируются термовакуумные испытания и осуществляется прогнозирование изменений температуры печатных узлов и компонентов, входящих в состав исследуемой аппаратуры в зависимости от режима работы. На данном этапе производится верификация созданных моделей тепловых процессов, уточнение теплофизических параметров электронных компонентов, а также осуществляется поиск возможных дефектов и неисправностей, связанных с нарушением температурного режима функционирования и формирования способов их исправления.

Верифицированные таким образом модели тепловых процессов позволяют повысить достоверность расчета температуры компонентов и печатных узлов, входящих в состав КА, а также оценить эффективность технических решений. На основе представленных моделей тепловых процессов производится оценка различных внешних ситуаций, способных возникнуть в процессе эксплуатации, а также оценивать изменение температурного поля бортовой электронной аппаратуры КА при выходе из строя определенной доли зарезервированных компонентов, что наиболее полно соответствует философии информационной поддержки жизненного цикла.

Полученные значения расчетного температурного поля печатных узлов и компонентов, входящих в состав блоков бортовой электронной аппаратуры КА, позволяют подтвердить и весторонне оценить эффективность применения современных технологий термостабилизации: тепловых трубок, контурных тепловых трубок, теплопроводящих панелей, современных алмазных CVD-теплоотводов и т.д.

Результатом данного многостороннего применения моделирования тепловых процессов является безусловное повышение эффективности разработки современных образцов бортовой электронной аппаратуры КА,

а также выбор наиболее оптимальных конструктивных решений с точки зрения массы, габаритов и стоимости и общих показателей эффективности разрабатываемого изделия.

УДК 541.64: 667.7; 612.3.049.77

Условия применимости цветных полиимидных слоев для микросистем функционального назначения

Кравцова В. Д.¹, Умерзакова М.¹, Коробова Н. Е.², Тимошенко С. П.², д.т.н., профессор, Турманова Е. Н.³, Исаккина О. Д.⁴, Исакаев Р. М.⁵

¹ Институт химических наук им. А. Б. Бектурова

Алматы, Республика Казахстан

² Национальный исследовательский университет

«Московский институт электронной техники»

korobova3@mail.ru

³ Казахский национальный университет им. аль-Фараби

Алматы, Республика Казахстан

⁴ Институт нефтехимического синтеза имени А. В. Топчиева РАН Россия

⁵ Казахстано-Британский технический университет

Алматы, Республика Казахстан

Синтез и исследование свойств новых полимеров и полимерных композиций являются приоритетным направлением современной науки в связи с их уникальными физико-механическими, термическими, электрооптическими и другими свойствами, определяющими применение материалов на их основе в различных областях, в том числе в полимерной оптике. Для целей оптики, оптоэлектроники и других областей науки и техники наиболее широко применяются такие известные полимеры, как полиметилметакрилат, полиакрилонитрил, полиамиды, полигидрокарбонат и некоторые другие высокомолекулярные соединения, на основе которых создаются также различные окрашенные композиции [1–2]. В последние годы с этой же целью разрабатываются новые материалы на основе полиимидов, наиболее изученным из которых является полипиromетилтимид. Благодаря хорошим электрооптическим, физико-механическим свойствам и повышенной термической устойчивости этот полимер находит применение в оптических технологиях при создании электрофотопрических, фототермооптических и жидкокристаллических сред, оптических модуляторов и переключателей, люминесцентных и других устройств [1]. Особенностью этого полиимида является характерная для него окраска от светло-желтой до коричневой. Это является причиной того, что УФ-граница прозрачности тонких полипиromетилтимидных пленок располагается в области 320–420 нм. При введении в полипиromетилтимид других соединений оптические свойства нового материала

по сравнению с исходным полимером снижаются. В последние годы появились сообщения о возможности применения в оптоэлектронике полиимидов неароматического строения, поглощающих при $\lambda < 400$ нм. К этой группе полимеров относятся также разрабатываемые нами полиимиды с трициклопентеновыми звеньями в основной цепи, образующие стабильные томогенные композиции с другими соединениями и обладающие высокими оптическими характеристиками [2]. Цель настоящей работы состояла в исследовании особенностей образования новых окрашенных композиций, их оптических, электрических и механических свойств.

Исследования проводились с растворами полиимид (ПИ), синтезированного по методике [2] в N,N'-диметилацетамиде (ДМАА). Для получения окрашенного полиимид применяли краситель активный ярко-красный 6С фирмы ООО «Уралхиминвест» (г. Уфа, Россия). Композиции ПИ с красителем получали смешиванием 20% растворов полимера с растворами красителя в этом же растворителе. Концентрацию красителя меняли от 0,1 до 5,0 мас. %. Из полученных растворов с помощью металлических шаблонов на стеклянных подложках формировали пленки толщиной 27 и 55 мкм, которые прогревали в воздушной среде до 250–350 °С в течение 60 мин. Объектами исследования были пленки из композиций алициклического полиимид с известным синтетическим красителем — активным ярко-красным 6С. Серию образцов получали механическим смешиванием компонентов. Для неокрашенных пленок алициклического полиимид ранее [3] нами было показано, что они являются более прозрачными в ультрафиолетовой части спектра. УФ-граница пленки этого ПИ толщиной 26 мкм находится в области 240 нм, для пленок толщиной 9 и 6 мкм — при 140 и 120 нм. Следует также отметить, что пленки при любой толщине и независимо от природы растворителя, в котором проводился синтез, имеют окраску от желтого до желто-коричневого. В табл. 1 приведены некоторые свойства пленок алициклического полиимид (ПИ-1) в сравнении с полипиромеллитимидом (ПИ-2). Известно, что оптические свойства полимерных пленок зависят от ряда факторов — толщины образцов, их подготовленности, условий проведения измерений и некоторых других. В настоящей работе изучена зависимость коэффициента пропускания в области 300–1400 нм от подготовленности образцов, в частности температуры их термообработки. На рис. 1 приведены спектры пропускания пленок толщиной ≈ 27 мкм, прогретых при 150, 200, 250, 300 и 350 °С. Можно видеть, что интенсивность и границы пропускания пленок, обработанных при температурах 150–300 °С, близки. Однако после прогрева при 350 °С наблюдается смещение в длинноволновую область. Это может быть связано с появлением окраски в пленках за счет изменения структуры макромолекул, являющегося следствием протекающих при высоких температурах реакций межмолекулярного сшивания и выделения в результате деградации окрашенных низкомолекулярных соединений.

Таблица 1. Свойства полиимидных пленок

Характеристики	Полимер	
	ПИ-1	ПИ-11
Плотность, кг/м ³	1,21	1,23
УФ-граница прозрачности пленки, нм	120–240 (толщина 9–28 мкм)	320–430 (толщина 0,34–19 мкм)
Показатель преломления, 25 °С	1,525	1,59–1,70
Прочность на разрыв, МПа	60–50	70–150
Модуль упругости, МПа	4200	2000–3000
Температура начала разложения, °С: – на воздухе	370	420
– в атмосфере инертного газа	420	более 450
Температура стеклования, °С	315	312
Удельное объемное сопротивление, Ом·м	(2,4–3,1) · 10 ¹⁵	(4,7–6,7) · 10 ¹⁵
Поверхностное сопротивление, Ом	2,1 · 10 ¹⁵	1,0 · 10 ¹⁶

В настоящей работе установлено, что при добавлении в растворы ПИ от 1,0 до 2,0 мас. % синтетического красителя образуются композиции, из которых можно получить прозрачные окрашенные пленки. На рис. 2 представлены спектры пропускания полиимидных пленок толщиной ≈ 27 мкм, содержащие разное количество красителя.

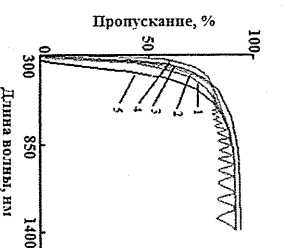


Рис. 1. Спектры пропускания в видимом и УФ-диапазонах пленок ПИ толщиной 27 мкм, высушенных при 150 (1), 200 (2), 250 (3), 300 (4) и 350 °С (5)

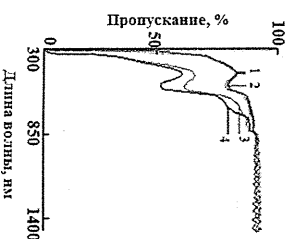


Рис. 2. Спектры пропускания пленок с 0,1 ((1), 0,5 (2), 1,0 (3) и 2,0 (4) мас. % красителя

По сравнению с исходным полиимидом пропускающая способность композиции при концентрации красителя до 2,0% в видимой области снижается на 22–25%. При большем количестве красителя, до 5 мас. %, пропускающая способность пленки снижается еще больше. При концентрации красителя в полиимиде до 5 мас. % по термическим и физико-механическим свойствам новый пленочный материал не уступал исходному полиимиду. При большем количестве этого компонента (до 7–10 мас. %) термостойкость начинает незначительно снижаться, что подтверждается результатами термогравиметрического анализа. Таким образом, по термической устойчивости композиции, содержащей до 5 мас. % красителя, сравнимы с исходным ПИ. Исследование электрических и механических свойств окрашенных полиимидных пленок показало их высокий уровень (табл. 2). При невысокой концентрации красителя, до 0,1 мас. %, значения диэлектрической проницаемости сравнимы с исходным полиимидом. Однако далее наблюдается небольшое ее возрастание, и при 3,0% окрашивающего соединения она достигает 3,80–4,02.

Таблица 2. Механические свойства алициклического ПИ и его композиций с красителем (25°С)

Концентрация красителя, мас. %	Физико-механические свойства		
	σ_p , МПа	E, МПа	λ , %
0	145	4200	24
1,00	150	4190	26
2,00	155	4150	30
3,00	155	4120	30
4,00	140	4000	24

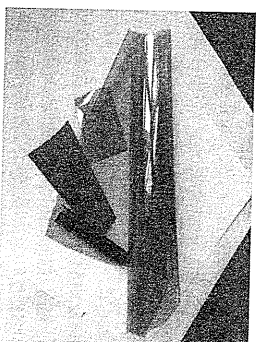


Рис. 3. Фотографии окрашенных полиимидных пленок

Исследования показали, что через 4 ч. прочность полиимидных пленок толщиной 55 мкм с 3,2 мас. % красителя снижается на 70–80%, в то время как диэлектрические характеристики теряют всего 40–50% от своих первоначальных значений. При выбранной концентрации красителя окрашенные полиимидные пленки, фотоэлементы которых приведены на рис. 3, являются прозрачными. Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие

положения и результаты: при концентрации красителя 0,5–1,0 мас. % коэффициент пропускания пленочного материала толщиной ≈ 27 мкм в области 400–900 нм составляет 80–90%, в случае 1,2–2,2 мас. % красителя этот показатель равен 60–70%. Установлено, что температура термообработки окрашенного материала в интервале 150–300°С практически не влияет на его пропускающую способность. Термическая устойчивость и механические свойства окрашенных композиционных пленок сравнимы со свойствами исходного полиимида. Изучено поведение новой полиимидной композиции в среде жидкого азота и установлено, что через 4 ч. механическая прочность полиимидных пленок толщиной 55 мкм с 3,0 мас. % красителя, как и исходного полиимида, снижается на 70–80%, в то время как электрическая прочность теряет всего 40–50% от своих первоначальных значений. Окрашенные композиции на основе алициклического полиимида благодаря высоким оптическим характеристикам и значениям электрической прочности, а также термической устойчивости и механической прочности перспективны для получения термостойких светоприемников, которые могут применяться в условиях как высоких, так и низких температур, в качестве материалов лазерной оптики, а также для производства окрашенных термостойких химических волокон.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках государственного заказа по гранту «Разработка технологии производства нового полимерного лака для изготовления термостойких электроизоляционных материалов (2015–2017 гг.), а также при финансовой поддержке Российского научного фонда при выполнении проекта 16-19-00177 «Исследование и разработка интеллектуальных МЭМС-датчиков с функциями самокалибровки и автоматизированных испытательных комплексов»

Литература

1. Серова В. Н. Полимерные оптические материалы. СПб.: Научные основы и технологии. 2015, 384 с.
2. Кравцова В. Д., Уметзакова М., Исаков Р., Рикходко О., Которова Н. Optical Transparent Fluoro-Containing Poly-imides Films with Low Dielectric Permeability. IC Micro- and nanoelectronics and Quantum (ICMNE-2014). — Zvenigorod, Russia, 6–8 окт. 2014. — P. 1–03.
3. Zhubayev B. A., Kraytsova V. D., Matishayev A. A., Umetzakova M. B., Isakov R. M., Rikhdok'ko O. Yu., Alrubaieva V. E. Optical and Electric Properties of Composite Films Based on Alicyclic Polyimide and Polyamine // Optics and Spectroscopy, 118 (4), 537–541 (2015).