ХИМИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, 2021, том 55, № 4, с. 310–317

ПЛАЗМОХИМИЯ

УДК 541.64:547.673.5+621.384.5

КОНТАКТНЫЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОК ПОЛИПИРОМЕЛЛИТИМИДА, МОДИФИЦИРОВАННЫХ В РАЗРЯДЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

© 2021 г.
М. С. Пискарев[a], *, А. В. Зиновьев[a], Е. А. Скрылева[b], Б. Р. Сенатулин[b], А. К. Гатин[c], А. С. Кечекьян[a], М. А. Караханян[d], А. Б. Гильман[a], **, А. А. Кузнецов[a]

[a]*Институт Синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова Российской академии наук, ул. Профсоюзная, 70, Москва, 117393 Россия*

[b]*Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”, Ленинский просп., 4, Москва, 119049 Россия*

[c]*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, ул. Косыгина, 4, Москва, 119991 Россия*

[d]*ООО “ЭЛЕКТРОХИМПЛАСТ”, ул. Нижегородская, 70, Москва, 109052 Россия*

**E-mail: mikhailpiskarev@gmail.com*

***E-mail: plasma@ispm.ru*

Поступила в редакцию 08.02.2021 г.
После доработки 11.03.2021 г.
Принята к публикации 12.03.2021 г.

Исследованы контактные свойства, химическая структура и морфология поверхности пленок полипиромеллитимида, модифицированных в разряде постоянного тока на катоде и аноде. Показано существенное улучшение смачиваемости, увеличение работы адгезии, полной поверхностной энергии и ее полярного компонента, сохраняющиеся в течение длительного времени при хранении пленок на воздухе при комнатных условиях. Методом рентгенофотоэлектронной спектроскопии изучено изменение химической структуры модифицированных в плазме пленок и показано образование на поверхности кислород- и азотсодержащих групп. Исследование пленок методами атомно-силовой микроскопии свидетельствует об изменении морфологии поверхности и увеличении ее шероховатости. Модифицирование пленок в плазме приводит к существенному улучшению их адгезионных свойств.

Ключевые слова: полипиромеллитимид, разряд постоянного тока, модифицирование на аноде и катоде, смачиваемость, химическая структура, морфология поверхности пленок, адгезионные свойства

DOI: 10.31857/S0023119321040100

Благодаря сочетанию высокой термостойкости, хороших электроизоляционных и механических свойств, полиимидные материалы находят широкое применение при производстве кабельно-проводниковой продукции, в микроэлектронике, авиастроении, а в последнее время в таких перспективных областях, как производство гибких печатных плат, жидкокристаллических дисплеев и в качестве межслойной изоляции интегральных схем [1, 2]. Для обеспечения высокой адгезии поверхности к напыленным слоям металлов, например, Cu, Ag и др., необходимыми условиями являются хорошие контактные и адгезионные свойства поверхности полимерного материала [1, 3].

Поверхность пленок полиимидов имеет гидрофобный характер, величина краевого угла смачивания по воде ($\theta_в$) для пленок полипиромеллитимида составляет 70°–82° в зависимости от условий их получения [3]. Для улучшения контактных и адгезионных свойств полиимидов используют различные методы модифицирования, которые позволяют придать поверхности полимеров свойство гидрофильности [1]. Известны химические методы, например, воздействие раствором гидроксида калия на пленку Upilex-S [4] или газообразным SO_3 и концентрированной H_2SO_4 при малом времени контакта (~30 с) на пленку Upilex 50S [5]. В результате таких воздействий происходят химические реакции и на поверхности полимера образуется значительное количество полярных групп, обеспечивающих высокие адгезионные свойства. Следует отметить, что указанные выше методы являются “мокрыми” и в них используют

агрессивные химические соединения, применение которых минимизируют в современных микроэлектронных технологиях [1, 2]. Кроме того, воздействие раствора KOH приводит к изменению химической структуры достаточно толстого слоя пленки Upilex-S – глубина обработки при 5 мин воздействия составляет ~0.5 мкм [4].

В настоящее время одним из наиболее эффективных, технологичных, экологически чистых и используемых на практике в микроэлектронике методов модифицирования контактных и адгезионных свойств поверхности полимеров является воздействие низкотемпературной плазмы [6–8], позволяющее изменять свойства тонкого приповерхностного слоя материала [9]. Толщина модифицированного слоя полимеров, определенная экспериментально, составляет от 3 до 50 нм [10–12] в зависимости от природы полимера, вида использованного разряда и условий воздействия.

Известно, что обработка в различного типа разрядах и использование разных газовых сред позволяет изменять контактные свойства полиимидных пленок в очень широком интервале – придавать им свойства гидрофильности [13–16] или увеличивать гидрофобность [17]. Например, обработка пленки Kapton™ в разряде частотой 20 кГц (ток 150 мА, давление рабочего газа 13.3 Па, время 3 мин) позволила уменьшить $\theta_{в.}$ от 74.7° ± 0.3° до 11.4° ± 0.9° в атмосфере Ar и до 9.6° ± 0.5° в атмосфере O_2 [13]. Модифицирование полиимидной мембраны Matrimid 5218 в ВЧ-разряде в атмосфере CF_4 (13.56 МГц, мощность 80 Вт, давление 2.66 Па, время 1–4 мин) приводило к увеличению $\theta_в$ от 70° до 120° [17].

В результате модифицирования на поверхности гидрофилизованных полиимидных пленок наблюдали увеличение количества кислород- и азотсодержащих групп и увеличение шероховатости, обеспечивающих высокие адгезионные свойства пленок при незначительном изменении их толщины, что, несомненно, важно при получении печатных плат, жидкокристаллических дисплеев и межслойной изоляции интегральных схем [13–16].

Данная работа посвящена изучению процесса модифицирования пленок полипиромеллитимида в разряде постоянного тока. Этот метод не использовался ранее для модифицирования полиимидных материалов, в то время как он позволяет разделить воздействие активных частиц плазмы – ионов и электронов, и получить поверхность, характеризующуюся высокой степенью гидрофильности.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе использовали пленки полипиромеллитимида (ППИ) марки ПМ-1 (Россия) толщиной 50 мкм, которые по своей структуре идентичны полиимиду марки Kapton™. Процесс модифицирования в разряде постоянного тока проводили по методике и на установке, которые подробно описаны нами ранее [18]. Пленки предварительно обезжиривали этиловым спиртом, сушили при комнатных условиях и хранили в эксикаторе. Образцы размером 5 × 5 см^2 помещали на аноде или катоде, рабочим газом служил фильтрованный атмосферный воздух, давление в системе составляло p = 15 Па, ток разряда I = 50 мА, время обработки варьировали от 10 до 60 с.

Контактные свойства поверхности характеризовали величинами краевых углов смачивания (θ), которые измеряли с помощью прибора Easy Drop DSA100 (KRUSS, Германия) и программного обеспечения Drop Shape Analysis V.1.90.0.14 по двум рабочим жидкостям – деионизованной воде ($\theta_{в.}$) и глицерину ($\theta_{глиц.}$) (погрешность ±1°). Измерения проводили непосредственно после модифицирования пленок и после хранения в течение 14 сут на воздухе при комнатных условиях. Величину работы адгезии (W_a), полной поверхностной энергии (γ), ее полярного (γ^p) и дисперсионного (γ^d) компонентов рассчитывали по методике [19] на основании полученных экспериментально величин θ.

Изменения химической структуры пленок изучали методом рентгенофотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Спектры РФЭС регистрировали с помощью спектрометра PHI5500VersaProbeII с монохроматическим излучением AlKα ($h\nu$ = = 1486.6 эВ) мощностью 50 Вт, нейтрализация зарядов – двойная (с помощью электронной и ионной пушки), диаметр области анализа – 200 мкм. Атомные концентрации определяли по обзорным спектрам методом факторов относительной элементной чувствительности, а энергии связи спектров C1s, O1s и N1s – по спектрам высокого разрешения, снятым при энергии пропускания анализатора 11.75 эВ и плотности сбора данных 0.1 эВ/шаг. Аппроксимацию спектров выполняли нелинейным методом наименьших квадратов с использованием функции Гаусса–Лоренца, калибровку шкалы энергии связи (**E**), проводили по Au4f – 84.0 эВ и Cu2p3 – 932.6 эВ. Шкалу энергий связи корректировали по **E** пика спектра C1s – CH ароматических углеводородов 284.7 эВ [20], погрешность определения энергий связи ± 0.1 эВ.

Морфологию поверхности образцов пленок изучали с помощью атомно-силового микроскопа “Solver HV” (НТ-МДТ, Россия) в атмосфере воздуха при нормальных условиях с использованием стандартных кантилеверов марки HA-NC (НТ-МДТ, Россия) с радиусом закругления острия иглы 10 нм. Измерения проводили в полуконтактном режиме с построением топографии и фазового контраста поверхности. Величины средней (R_a) и среднеквадратичной шероховатости (R_{ms}) опреде-

ляли с использованием программного обеспечения NOVA версии 1.1.0.1851 (НТ-МДТ, Россия).

Адгезионные испытания проводили по методике ASTM 1876-01 [21], широко используемой в научных исследованиях. Ранее этот метод был применен нами для изучения адгезионных характеристик пленок политетрафторэтилена и подробно описан в работе [22]. В качестве адгезивов в экспериментах использовали эпоксидную смолу ЭД-20 горячего отверждения и полиуретановый клей (ПУ). Методики склеивания подробно описаны нами в [22]. Испытания по определению сопротивления отслаивания (***A***) проводили на разрывной машине Hounsfield H1K со скоростью 100 мм/мин. Результат измерений получен усреднением по 10 тестам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исходная пленка ППИ характеризуется значениями краевых углов смачивания по воде $\theta_{в.} = 73°$ и по глицерину $\theta_{глиц.} = 58°$. На рис. 1 представлено изменение $\theta_{в.}$ от времени обработки для пленок, модифицированных в разряде постоянного тока на аноде (***1***) и катоде (***2***) при токе разряда $I = 50$ мА и давлении рабочего газа (фильтрованный воздух) $p = 15$ Па. Видно, что увеличение времени обработки в плазме приводит к быстрому уменьшению величины краевого угла смачивания в течение первых 30 с, затем с ростом времени воздействия до 60 с кривые постепенно выходят на плато. Следует отметить, что при времени обработки 50 и 60 с, величины $\theta_{в.}$ для пленок, модифицированных на аноде, становятся несколько меньше, чем на катоде.

В табл. 1 приведены значения $\theta_{в.}$ и $\theta_{глиц.}$ для исходных и модифицированных на катоде и аноде в течение 60 с пленок, а также после их хранения в течение 14 сут на воздухе при комнатных условиях. Представлены рассчитанные значения величины работы адгезии (W_a) по воде и глицерину, поверхностной энергии (γ), ее полярного (γ^p) и дисперсионного (γ^d) компонентов. Видно, что воздействие плазмы приводит к практически полному растеканию жидкости – гидрофилизации поверхности полимера, модифицированного как на аноде, так и на катоде, а значения краевых углов смачивания, полученные для пленок, обработанных на катоде и аноде, различаются незначительно. В результате обработки в плазме происходит существенное увеличение работы адгезии, величина γ возрастает в ~1.9 раза, а γ^p почти в 6 раз. После хранения пленок в комнатных условиях в течение 14 сут значения $\theta_{в.}$ и $\theta_{глиц.}$ в большей степени возрастают у пленок, модифицированных на катоде, однако в обоих случаях поверхность пленок остается гидрофильной ($\theta_{в.} < 60°$).

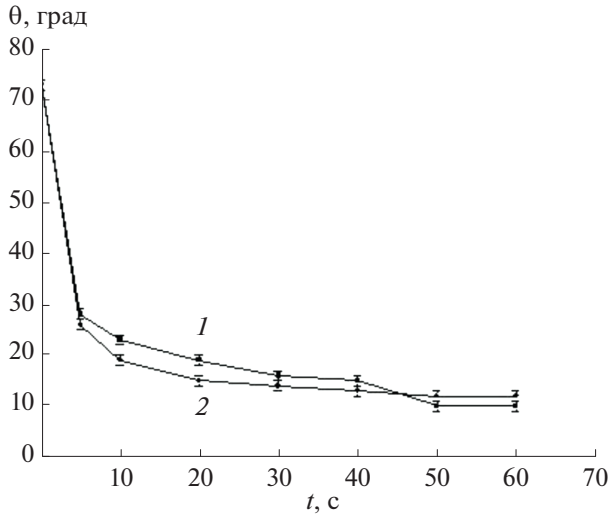


Рис. 1. Зависимость краевого угла смачивания по воде ($\theta_{в.}$) ППИ пленок от времени обработки в разряде постоянного тока (t) на аноде (***1***) и катоде (***2***) ($I = 50$ мА, $p = 15$ Па).

В структурной формуле ППИ, представленной на схеме, можно условно выделить 2 части: фраг-

Таблица 1. Величины краевых углов смачивания по воде ($\theta_{в.}$) и глицерину ($\theta_{глиц.}$), работы адгезии (W_a), полной поверхностной энергии (γ), ее полярного (γ^p) и дисперсионного (γ^d) компонентов для исходной, обработанной в плазме на катоде и аноде ($I = 50$ мА, $p = 15$ Па, $t = 60$ с) ППИ пленок и после их хранения на воздухе при комнатных условиях в течение 14 сут

Образец	Время хранения, сут	Угол смачивания, θ, град		W_a, мДж/ м^2		Поверхностная энергия, мДж/ м^2		
		$\theta_{в.}$	$\theta_{глиц.}$	вода	глицерин	γ	γ^p	γ^d
Исходный	–	73	58	94.1	97.0	38.4	9.4	29.0
Обработан на аноде	–	10	9	144.5	126.0	72.2	55.8	16.4
	14	51	40	118.6	112.0	50.0	26.1	23.9
Обработан на катоде	–	12	10	144.0	125.8	71.6	55.0	16.6
	14	59	50	110.3	104.2	43.2	20.7	22.5

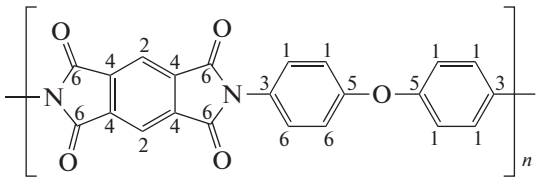
Таблица 2. Справочные значения энергии связи (**E**) спектров высокого разрешения C1*s*, O1*s* и N1*s* для полиимидных пленок марки Kapton^{TM} [20]

E, эВ	C1*s*						O1*s*		N1*s*
	1	2	3	4	5	6	1	2	
	284.7	285.55	285.68	285.76	286.29	288.1	532.03	533.26	400.6

Таблица 3. Атомные концентрации элементов для образцов исходной и обработанных в разряде постоянного тока на катоде и аноде ППИ пленок

Образец	Атомные концентрации, %			Отношение элементов	
	C	O	N	O/C	N/C
Исходный	77.8	16.6	5.3	0.21	0.07
Обработка на катоде	66.0	27.0	7.0	0.41	0.11
Обработан на аноде	68.0	24.0	8.0	0.35	0.12

мент пиромеллитимида (ПМД) и фрагмент оксидианилина (ОДА). Цифрами от 1 до 6 обозначены различные типы атомов углерода в составе полимерной единицы. Справочные значения пиков C1*s*, O1*s* и N1*s* приведены в табл. 2 [20].



Пик 1 соответствует 8-ми атомам углерода фенильных фрагментов части ОДА, не связанных с кислородом и азотом; пик 2 – двум атомам углерода ароматического фрагмента ПМД, не связанным с имидными группами; пик 3 – двум атомам углерода фрагмента ОДА, связанным с атомом азота; пик 4 – четырем атомам углерода ароматического фрагмента ПМД, входящими в имидный цикл, пик 5 – двум атомам углерода фрагмента ОДА, связанным с атомам кислорода и пик 6 – четырем атомам углерода карбонильных групп в имидных циклах ПМД. Пики 2–4 расположены очень близко, в диапазоне энергий связи 285.5–285.8 эВ. Сателлиты “встряски” (shake-up), обусловленные переходами π–π^*, в таблицу не включены.

Исследования методом РФЭС были проведены для исходной и модифицированных в разряде постоянного тока на катоде и аноде пленок ППИ при $I = 50$ мА и $p = 15$ Па в течение 60 с. Полученные данные представлены на рис. 2, 3 и 4.

В спектре C1*s* для исходной ППИ пленки (рис. 2а) пики 2–4 представлены одним широким пиком с максимумом в области **E** = 285.7 эВ. В результате разложения его на составные компоненты выделены следующие 4 пика, соответствующие: пик ***1*** (**E** = 284.7 эВ) – атомам углерода 1 ароматических фрагментов; пик ***2*** (**E** = 285.7 эВ) – атомам углерода 2, 3, 4; пик ***3*** (**E** = 286.4 эВ) – атомам углерода 5 ароматических фрагментов и пик ***4*** (**E** = 288.6 эВ) – атомам углерода 6 имидных циклов. В области 290–294 эВ присутствуют сателлиты “встряски” (пики “shake up”), характерные для π–π^* сопряженных систем.

В спектре O1*s* исходной пленки (рис. 3а) выделено 2 пика: пик ***1*** (**E** = 532.1 эВ) во фрагменте ПМД и пик ***2*** (**E** = 533.3 эВ) во фрагменте ОДА. Также присутствует пики “shake-up” сателлитов в области 536–540 эВ.

В спектре N1*s* (рис. 4а) исходной пленки присутствует один пик с **E** = 400.1 эВ атомов азота в имидных циклах.

В табл. 3 приведены атомные концентрации (ат.%) элементов C, O и N и их отношения для образцов исходной и обработанных в разряде пленок, а в табл. 4 – параметры спектров высокого разрешения, которые в рамках погрешности совпадают со справочными величинами.

После воздействия плазмы заметные изменения наблюдаются в спектрах C1*s* пленок ППИ, обработанных на катоде (рис. 2б) и аноде (рис. 2в). Особенно заметны эти изменения у пленок, модифицированных на аноде (табл. 3). Происходит существенное уменьшение интенсивности пика ***1*** (с 48 до 8%) и увеличение интенсивности пиков ***2*** (с 35 до 64%) и ***4*** (с 13 до 22%), сателлиты “встряски” пропадают. Ширина пика ***4*** на полувысоте (ПШПВ) возрастает от 0.9 эВ до 1.7 эВ. Для пленки, модифицированной на катоде, указанные изменения наблюдались в меньшей степени, а ПШПВ пика ***4*** увеличилась от 0.9 до 1.2 эВ.

Заметные изменения наблюдаются в структуре пика O1*s* пленки ППИ, модифицированной на катоде (рис. 3б, табл. 3). В спектре уменьшается интенсивность пика ***1*** и возрастает интенсивность пика ***2***. Сателлиты “встряски” присутству-

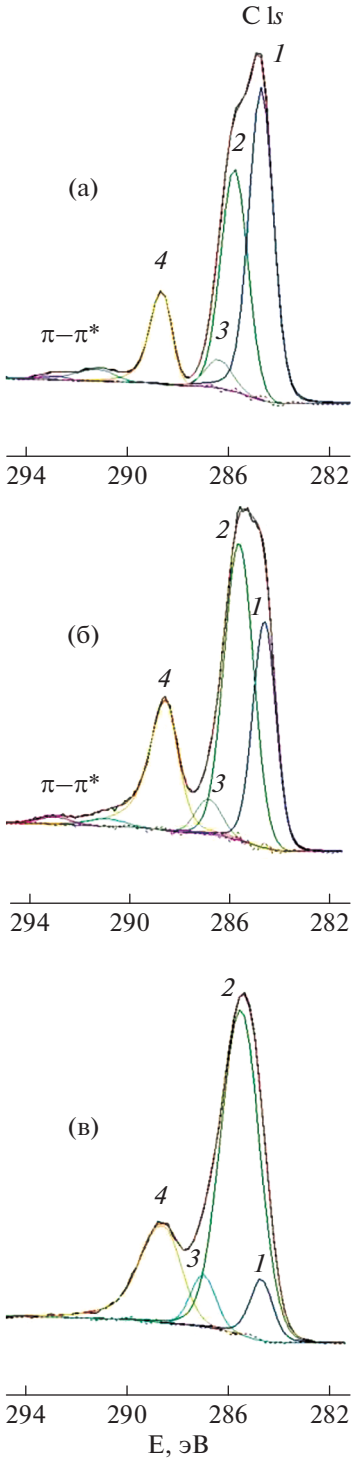


Рис. 2. Рентгенофотоэлектронные C1*s* спектры исходной ППИ пленки (а) и пленок, модифицированных в разряде постоянного тока (p = 15 Па, I = 50 мА, 60 с) на катоде (б) и аноде (в).

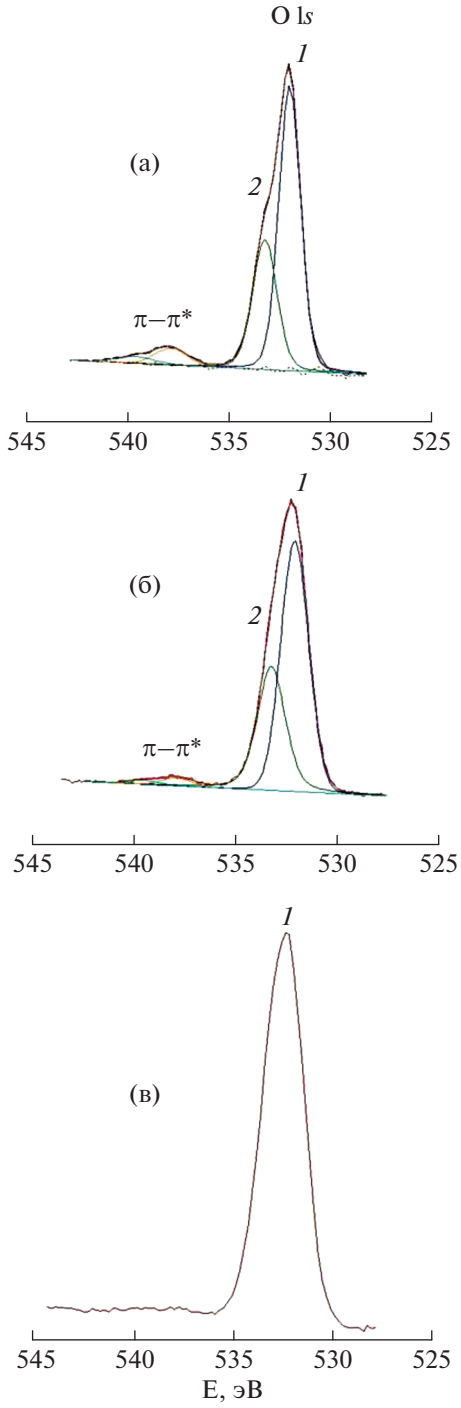


Рис. 3. Рентгенофотоэлектронные O1*s* спектры исходной ППИ пленки (а) и пленок, модифицированных в разряде постоянного тока (p = 15 Па, I = 50 мА, 60 с) на катоде (б) и аноде (в).

ют, но их интенсивность также меньше, чем в исходном образце. Отношение O/C увеличивается от 0.21 до 0.41. Для пленки, обработанной на аноде, отношение O/C возрастало до 0.35, при этом спектр O1*s* полностью терял свои характерные особенности, позволяющие четко выделить два пика с различными энергиями связи, соответствующие двум химическим состояниям кислоро-

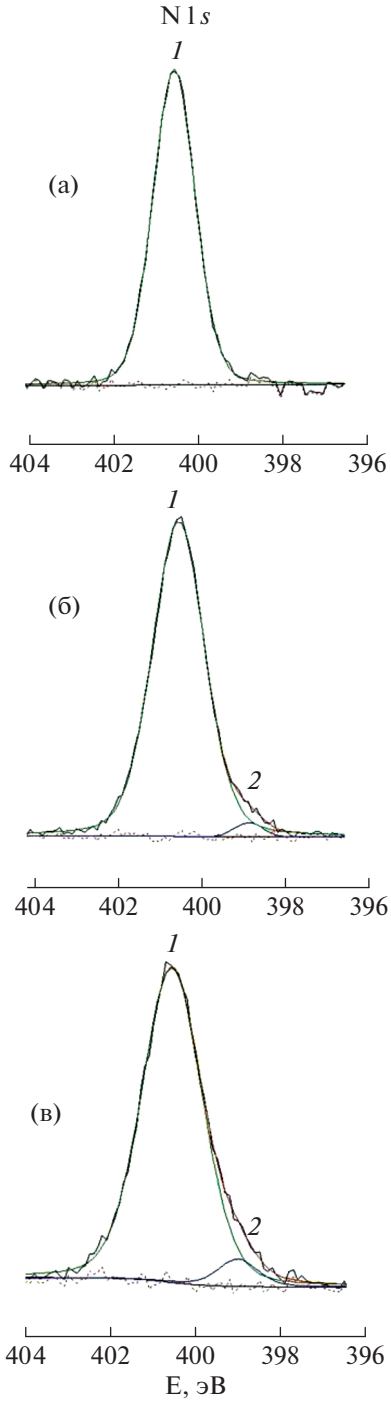


Рис. 4. Рентгенофотоэлектронные N1*s* спектры исходной ППИ пленки (а) и пленок, модифицированных в разряде постоянного тока (p = 15 Па, I = 50 мА, 60 с) на катоде (б) и аноде (в).

да в структуре полиимида (рис. 3в). Энергия связи спектра O1*s* после обработки составила 532.5 эВ, что трудно трактовать однозначно, т.к. в этой области могут находиться спектры различных форм кислорода, включая адсорбированные.

В спектрах азота N1*s* после обработки пленок в плазме и на катоде (рис. 4б), и на аноде (рис. 4в), кроме пика при 400.6 эВ, появляется пик при 399 эВ, соответствующий, по-видимому, группе –C=N– [23], а отношение N/C возрастает от 0.07 до 0.11–0.12.

Таким образом, воздействие плазмы на пленки ППИ, модифицированные в разряде постоянного тока на катоде и аноде, приводит к заметному увеличению на поверхности количества кислород- и азотсодержащих групп, вызывающих существенное увеличение гидрофильности (табл. 1). Образование таких групп может происходить как за счет раскрытия имидных циклов [13–15], так и в результате реакций радиационно-индуцированной окислительной деструкции [24, 25]. Протекание этих реакций под воздействием плазмы связано с высокой поглощенной дозой облучения, локализованной в тонком приповерхностном слое полимера [10].

Было проведено изучение морфологии поверхности исходной и модифицированных в плазме пленок ППИ с помощью метода атомно-силовой микроскопии (**АСМ**). На рис. 5 представлено трехмерное АСМ изображение поверхности исходной пленки (а) и пленок, модифицированных в разряде постоянного тока на катоде (б) и аноде (в) при I = 50 мА и p = 15 Па в течение 60 с. Расчеты величин средней (R_a) и среднеквадратичной шероховатости (R_{ms}) показали, что для исходной пленки они составляли 0.51 и 0.89 нм соответственно. После обработки в плазме на аноде наблюдали увеличение R_a и R_{ms} до 0.91 и 1.37 нм, соответственно, а в результате обработки на катоде указанные параметры возрастали до 1.07 и 1.87 нм. Полученные данные свидетельствуют, что воздействие плазмы в обоих случаях приводит к увеличению шероховатости образцов по сравнению с исходными значениями, при этом увеличение шероховатости поверхности более выражено для образцов, обработанных на катоде.

Изучение адгезионных свойств (сопротивления отслаивания, ***A***) было проведено для пар пленок ППИ/ППИ, ППИ/ПЭТФ и ППИ/ПТФЭ. Толщина пленок ПЭТФ составляла 40 мкм, а ПТФЭ 60 мкм. В качестве адгезивов использовали эпоксидную смолу ЭД-20 горячего отверждения и полиуретановый клей (ПУ). Полученные результаты приведены в табл. 5. Видно, что исходные пленки практически не склеивались, тогда как после обработки в плазме величина ***A*** возрастала многократно. Для пары полиимидных пленок наблюдали 10-кратное увеличение в случае ЭД-20, а при склеивании с пленкой ПЭТФ – 25-кратное. 30-кратный рост адгезии был найден для пары с ПТФЭ при использовании клея ПУ.

Таблица 4. Параметры спектров высокого разрешения для образцов исходной и обработанных в разряде постоянного тока на катоде и аноде ППИ пленок

Образец	Параметры	C1*s*				O1*s*		N1*s*	
		1	2	3	4	1	2	1	2
Исходный	**E**, эВ	284.7	285.7	286.4	288.6	532.1	533.3	400.6	–
	%	48	35	4	13	66	34	100	
Обработка на катоде	**E**, эВ	284.7	285.7	286.9	288.6	532.1	533.3	400.6	399.0
	%	28	44	5	23	64	36	98	2
Обработка на аноде	**E**, эВ	284.7	285.5	287.0	288.6	532.5		400.6	399.0
	%	8	64	6	22	100		95	5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суммируя полученные результаты, можно заключить, что обработка полипиромеллитимидных пленок в разряде постоянного тока на катоде и аноде приводит к существенной гидрофилизации поверхности полимера, сохраняющейся достаточно длительное время. Методом РФЭС показано изменение химической структуры поверхности – образование значительного количества новых кислород- и азотсодержащих групп. С помощью метода АСМ установлены морфологические изменения – увеличение степени шероховатости поверхности пленок по сравнению с исходной. Модифицированные в разряде постоянного тока пленки обладают высокой адгезией по отношению к различного рода клеям (адгезивам) в парах с полимерами различной химической природы. По-видимому, изменения в поверхностном слое пленок связаны с локализацией высокой суммарной дозы облучения в тонком поверхностном слое толщиной ~20–50 нм, поглощенной образцом при воздействии плазмы [10, 12].

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации тема № 0086-2019-0007. Исследования методом РФЭС проведены на оборудовании центра коллективного

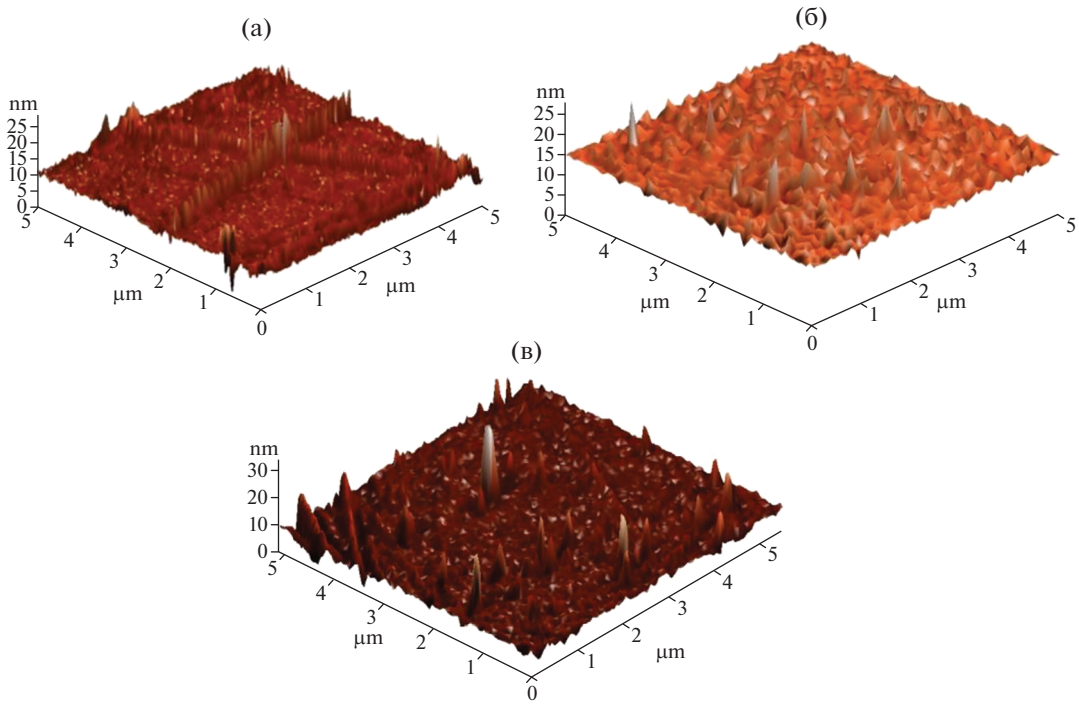


Рис. 5. Трехмерное АСМ изображение поверхности исходной ППИ пленки (а) и пленок, модифицированных в разряде постоянного тока (p = 15 Па, I = 0 мА, 50 с) на катоде (б) и аноде (в).

Таблица 5. Сопротивление отслаивания для исходных и модифицированных на аноде (15 Па, 50 мА, 60 с) ППИ пленок в паре с различными полимерными пленками, полученное в присутствии разных адгезивов

Образец	Клей	Сопротивление отслаивания (*A*), Н/м	
		Исходный образец	Обработан в плазме
ППИ/ППИ	ЭД-20	15 ± 1.2	170 ± 23
ППИ/ПЭТФ		10 ± 1	261 ± 21
ППИ/ПТФЭ	ПУ	10 ± 1	300 ± 27
ППИ/ПЭТФ		142 ± 13	550 ± 47

пользования “Материаловедение и металлургия” НИТУ МИСиС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Adhesion in Microelectronics / Eds Mittal K.L., Ahsan T. 2014. Scrivener Publ. LLC. 350 p.
2. *Ji D., Li T., Hu W., Fuchs H.* // Advanced Mater. 2019. V. 31. № 15. 1806070.
3. Polyimides and Other High Temperature Polymers: Synthesis, Characterization and Applications, V. 5 / Ed. Mittal K.L. 2009. CRC Press. 424 p.
4. *Okumura H., Takahagi T., Nagai N., Shingubara S.* // J. Polym. Sci. Part B, Polym. Phys. 2003. V. 41. № 17. P. 2071.
5. *Ranuccie E., Sandgren Å., Andronova N., Albertsson A.-C.* // J. Appl. Polym. Sci. 2001. V. 82. № 2. P. 1971.
6. *Cvelbar U., Walsh J., Černák M., de Vries H.W., Reuter S. et al.* // Plasma Proc. Polym. 2019. V. 16. № 1. 1700228.
7. Non-thermal plasma technology for polymeric materials : applications in composites, nanostructured materials, and biomedical fields / Eds. Thomas S., Mozetič M., Cvelbar U., Špatenka P., Praveen K.M., 2019. Amsterdam: Elsevier. 494 p.
8. *Weltmann K.-D., Kolb J.F., Holub M., Uhrlandt D., Šimek M. et al.* // Plasma Proc. Polym. 2019. V. 16. № 1. 1800118.
9. Modification of Polymer Properties / Eds. Jasso-Gastinel F., Kenny J.M. / Fabbri P., Messori M., Surface Modification of Polymers: Chemical, Physical and Biological Routes. 2016. Cambrige: William Andrew. P. 109.
10. *Пискарев М.С., Скрылева Е.А., Сенатулин Б.Р., Гильман А.Б., Кузнецов А.А.* // Химия высоких энергий. 2020. Т. 54. № 4. С. 325. [*Piskarev M.S., Skryleva E.A., Senatulin B.R., Gilman A.B., Kuznetsov A.A.* // High Energy Chem. 2020. V. 54. № 4. P. 299.]
11. *Corbella C., Pranda A., Portal S., De Los Arcos T. et al.* // Plasma Proc. Polym. 2019. V. 16. № 6. 1900019.
12. *Яблоков М.Ю., Соколов И.В., Малиновская О.С., Гильман А.Б., Кузнецов А.А.* // Химия высоких энергий. 2013. Т. 47. № 1. С. 76. [*Yablokov M.Yu., Sokolov I.V., Malinovskaya O.S., Gilman A.B., Kuznetsov A.A.* // High Energy Chem. 2013. V. 47. № 1. P. 32.]
13. *Tasaka S., Hibi K.* // J. Polym. Sci.: Part A, Polym. Chem. 1992. V. 30. P.1425.
14. *Гильман А.Б., Шифрина Р.Р., Потапов В.К., Тузов Л.С., Венгерская Л.Э., Григорьева Г.А.* // Химия высоких энергий. 1993. Т. 27. № 2. С. 79.
15. *Lin Y.-S., Liu H.-M., Tsai C.-W.* // J. Polym. Sci. Part B, Polym. Phys. 2005. V. 43. P. 2023.
16. *Lin Y.-S., Liu H.-M., Chen H.-T.* // J. Appl. Polym. Sci. 2006. V. 99. P. 744.
17. *Khosravifard S., Hosseini S.S., Boddohi S.* // J. Appl. Polym. Sci. 2020. V. 137. № 24. 48824.
18. *Demina T.S., Drozdova M.G., Yablokov M.Y., Gaidar A.I., Gilman A.B., Zaytseva-Zotova D.S., Markvicheva E.A., Akopova T.A., Zelenetskii A.N.* // Plasma Process. Polym. 2015. V. 12. № 8. P. 710.
19. *Wu S.* Polymer Interfaces and Adhesion. N.Y.: Marcel Dekker. 1982. P. 152
20. *Briggs D.* Surface analysis of polymers by XPS and static SIMS. Cambridge: Cambrige Univ. Press. 1998. 198 p.
21. ASTM 1876-2001 // Standard Test Method for Peel Resistance of Adhesives (T-Peel Test).
22. *Пискарев М.С., Гильман А.Б., Кечекьян А.С., Кузнецов А.А.* // Клеи, герметики, технологии. 2016. № 10. С. 15.
23. *Wagner C.D., Naumkin A.V., Kraut-Vass A., Allison J.W., Powell C.J., Rumble J.R.Jr.* NIST Standard Reference Database 20, Version 3.4 (web version) (http:/srdata.nist.gov/xps/) 2003.
24. *Kuroda S.-I., Mita I.* // Eur. Polym. J. 1989. V. 25. №. 6. P. 611.
25. *Sroog, C.E.* // Progr. Polym. Sci. 1991. V. 16. № 4. P. 593.