

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-97-105

Черкашина Н.И., Павленко З.В., Манаев В.А., Самойлова Е.С., Сидельников Р.В.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: cherkashina.ni@bstu.ru*

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ И ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ПОЛИИМИДНЫХ ТРЕКОВЫХ (ЯДЕРНЫХ) МЕМБРАН

Аннотация. В работе представлены результаты исследования поверхностных, в том числе оптических свойств полиимидной пленки ПМ-1 и полиимидной трековой мембраны. Для исследования использовали полиимидные (трековые) ядерные мембраны производства ION TRACK TECHNOLOGY FOR INNOVATIVE PRODUCT (it4ip, Бельгия). Диаметр пор составлял 200 нм, плотность пор $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-1}$, толщина полиимидной мембраны 25 мкм. Представлены данные ИК-спектроскопии. Показано, что уменьшение интенсивности пиков ИК-спектров мембраны по сравнению с пленкой является следствием окислительной деструкции полиимида после облучения тяжелыми ионами и химического травления. Представлены данные влияния облучения тяжелыми ионами и химического травления полиимидной пленки для получения мембраны на гидрофобность/гидрофильность поверхности. Оптическую плотность пленки и трековых мембран определяли в диапазоне длин волн 350–950 нм. Измерения оптической плотности проводили с шагом в 50 нм. В работе показано, что несмотря на сильное различие спектральной зависимости оптической плотности полиимидной пленки и трековой мембраны, оптическая плотность пленки ПМ-1 и трековой мембраны достаточно низкая во всем исследованном диапазоне длин волн и не превышает значения 0,26 и 0,42 соответственно.

Ключевые слова: полиимидные мембраны, тяжелые ионы, химическое травление, оптическая плотность, краевой угол смачивания, морфология поверхности.

Введение. В настоящее время полимерные материалы используют для получения нанопористых трековых (ядерных) мембран. Трековые мембраны нашли широкое применение в процессах микрофльтрации для отделения вирусов, фракционирования коллоидных растворов и, в том числе, в медицине, в процедуре гемофльтрации и плазмафереза (отделение форменных элементов крови от плазмы). Также мембраны могут быть использованы для создания химических и биохимических сенсоров [1–6]. Много исследований посвящено применению трековых мембран для получения металлических структурированных реплик [7, 8]. Недавние исследования показали, что полиимидные трековые мембраны могут найти применение и в создании полимерных нанокомпозитов, в том числе для радиационно-защитных материалов авиационно-космического назначения [9–11].

Трековые мембраны изготавливают из различных полимеров (поликарбонат, полиэтилен-нафталат, полиэтилентерефталат, полиимид, полипропилен и поливинилиденфторид) [12–15]. Наибольшее распространение получили трековые мембраны на основе полиэтилентерефталата. Трековые мембраны из полиэтилентерефталата остаются на мировом рынке уникальными в плане точности геометрического размера пор и узкого распределения пор по размерам [16]. Однако они характеризуются низкими физико-механическими свойствами, умеренной химической

стойкостью и плохой термостойкостью (до 120 °С). Что не позволяет их использовать в качестве матрицы для создания радиационно-защитных композитов, в том числе для космической промышленности. Полиимид является чрезвычайно перспективным материалом, производство и потребление которого быстро растет. Использование полиимида обусловлено его высокими механическими характеристиками, радиационной и химической стойкостью, а также широким температурным диапазоном эксплуатации (от -250 °С до +350 °С), что выгодно отличает его среди других полимерных материалов [17].

Для получения трековых мембран полимер в виде пленки облучается пучком тяжелых ионов (Ar, Kr, Xe и др.) и подвергается химическому травлению [18]. Путем изменения параметров облучения (энергии, интенсивности), режима травления, химической и фотохимической обработки перед травлением можно получать мембраны с различными видами пор [19, 20]. При облучении полиимида налетающий тяжелый ион, проходя через пленку, теряет свою энергию в основном на ионизацию. Энергия, которая передается полимерной мишени тормозящимся ионом, достаточна для разрыва большого числа химических связей в пределах траектории иона. Для полиимида, как представителя класса полимеров, характерно наличие большого числа связей, разрыв которых под действием тяжелых ионов преобразует его структуру.

Данная работа посвящена изучению изменения поверхностных, в том числе оптических свойств полиимидной пленки под влиянием облучения тяжелыми ионами и последующего химического травления с целью использования полученных данных для создания полимерных композитов с терморегулирующими свойствами авиационно-космического назначения.

Методология. Для исследования использовали полиимидные (трековые) ядерные мембраны с гидрофильной поверхностью (производитель ION TRACK TECHNOLOGY FOR INNOVATIVE PRODUCT (it4ip), Belgium). Диаметр пор составлял 200 нм, плотность пор $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-1}$, толщина полиимидной мембраны 25 мкм.

Для оценки влияния облучения тяжелыми ионами и последующего химического травления

на структуру и оптические характеристики трековой мембраны проводилась ее сравнительная характеристика с исходной полиимидной пленкой марки ПМ-1 (производитель АО «Институт пластмасс им. Г.С. Петрова», Россия). Полиимидная пленка (ПМ-1) изготавливается методом полива из полиимидного лака АД-9103, полученного в растворе диметилформамида. Основной особенностью полиимидной пленки является способность сохранять механические и электроизоляционные свойства в широком интервале температур (от $-250 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+350 \text{ }^\circ\text{C}$). **Основные физико-механические и электрические характеристики полиимидной пленки ПМ-1 представлены в таблице 1.**

Таблица 1

Основные физико-механические и электрические характеристики полиимидной пленки марки ПМ-1

№	Наименование характеристик	Показатели
1	Прочность при разрыве, МПа	150–180
2	Относительное удлинение при разрыве, %	70–90
3	Модуль упругости при растяжении, МПа	3000...3500
4	Электрическая прочность, кВ/мм	210...270
5	Диэлектрическая проницаемость (частота 10^3 Гц)	3,0...3,5
6	Тангенс угла диэлектрических потерь при 10^3 Гц	0,0025–0,003
7	Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·м	10^{14} – 10^{15}
8	Коэффициент теплопроводности Вт/м·К	0,14–0,20
9	Удельная теплоемкость от 20 до $300 \text{ }^\circ\text{C}$, Дж/кг·К	10^{14} – 10^{15}
10	Коэффициент линейного теплового расширения (20 – $250 \text{ }^\circ\text{C}$)	$(20-30) \cdot 10^{15}$

Морфология поверхности пленок и трековых мембран была исследована с помощью сканирующего электронного микроскопа (TESCAN MIRA 3 LMU).

ИК-Фурье спектры исследуемых веществ были получены с помощью ИК-спектрометра VERTEX 70. Исследования проводили в диапазоне волновых чисел 4000 – 400 см^{-1} .

Оптическую плотность пленок и трековых мембран определяли на фотоэлектрическом фотометре КФК-3 в диапазоне длин волн 350 – 950 нм . Измерения оптической плотности проводили с шагом в 50 нм . Образец пленки (мембраны) крепили на предметное стекло (размер $2,5$ на $3,5 \text{ см}$) и помещали в отделение, предназначенное для кюветы. В качестве сравнения использовали предметное стекло одинаковой толщины.

Для определения краевого угла смачивания исследуемых веществ на них наносили каплю дистиллированной воды 1 мл . Краевой угол смачивания θ определяли как угол между касательной, проведенной к поверхности смачивающей жидкости, и смачиваемой поверхностью твердого тела.

Основная часть. На рис. 1 представлены микрофотографии полиимидной пленки ПМ-1 (рис. 1 а, б) и полиимидной трековой мембраны (рис. 1 в, г). Анализ рис. 1 показал, что микроструктура поверхности исходной полиимидной пленки ПМ-1 гладкая и ровная без расслоений. Исследуемая полиимидная мембрана, полученная путем облучения тяжелыми ионами и последующей химической обработкой, обладает структурой с ярко выраженными круглыми порами и соответствует типичной микроструктуре трековой мембраны (рис. 1 в, г). Диаметр трек (пор) почти одинаков на всем участке мембраны и составляет около 200 нм . Поры расположены хаотично на всем участке съемки, а также можно заметить значительное перекрывание пор. По данным рис. 1 г была рассчитана концентрация трек, которая составляет $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-1}$, что соответствует концентрации заявленной производителем.

На рис. 2 представлены ИК-спектры полиимидной пленки ПМ-1 и полиимидной трековой мембраны. Данные, представленные на рис. 1 показали, что полученные ИК-спектры как пленки, так и мембраны имеют типичное строение для

полиимида. В ИК-спектрах пленки ПМ-1 и мембраны (рис. 2) имеются характеристические для имидного цикла полосы поглощения при 1380 см^{-1} и 1780 см^{-1} , отвечающие соответственно колебаниям связей C–N и C=O в имидном цикле. Наличие карбонильной группы C=O также выражено значительными по интенсивности пиками при 1728 см^{-1} . Также присутствует полоса поглощения при 876 см^{-1} , характерная для C–H колебаний, а проявление полос поглощения при 2840 и 2935 см^{-1} указывают на наличие в структуре полимера метоксигрупп с характерными валентными колебаниями связей C–H. Валентные колебания C=C- представлены двумя пиками при

1575 см^{-1} и 1505 см^{-1} . Сложноэфирная группировка проявляется на спектрах сильными по интенсивности полосами. Эфирные группировки имеют в ИК-спектре две полосы валентных колебаний: C–O; C–C(O)–O и O–C–C соответственно. Колебания первой группировки на ИК-спектре пленок выражены очень интенсивной полосой поглощения при $1249\text{--}1276\text{ см}^{-1}$, а колебания второй группировки - сильным пиком при 1126 см^{-1} . Полоса поглощения в области $3400\text{--}3500\text{ см}^{-1}$ свидетельствует о присутствии связанных гидроксильных групп (химически связанной воды).

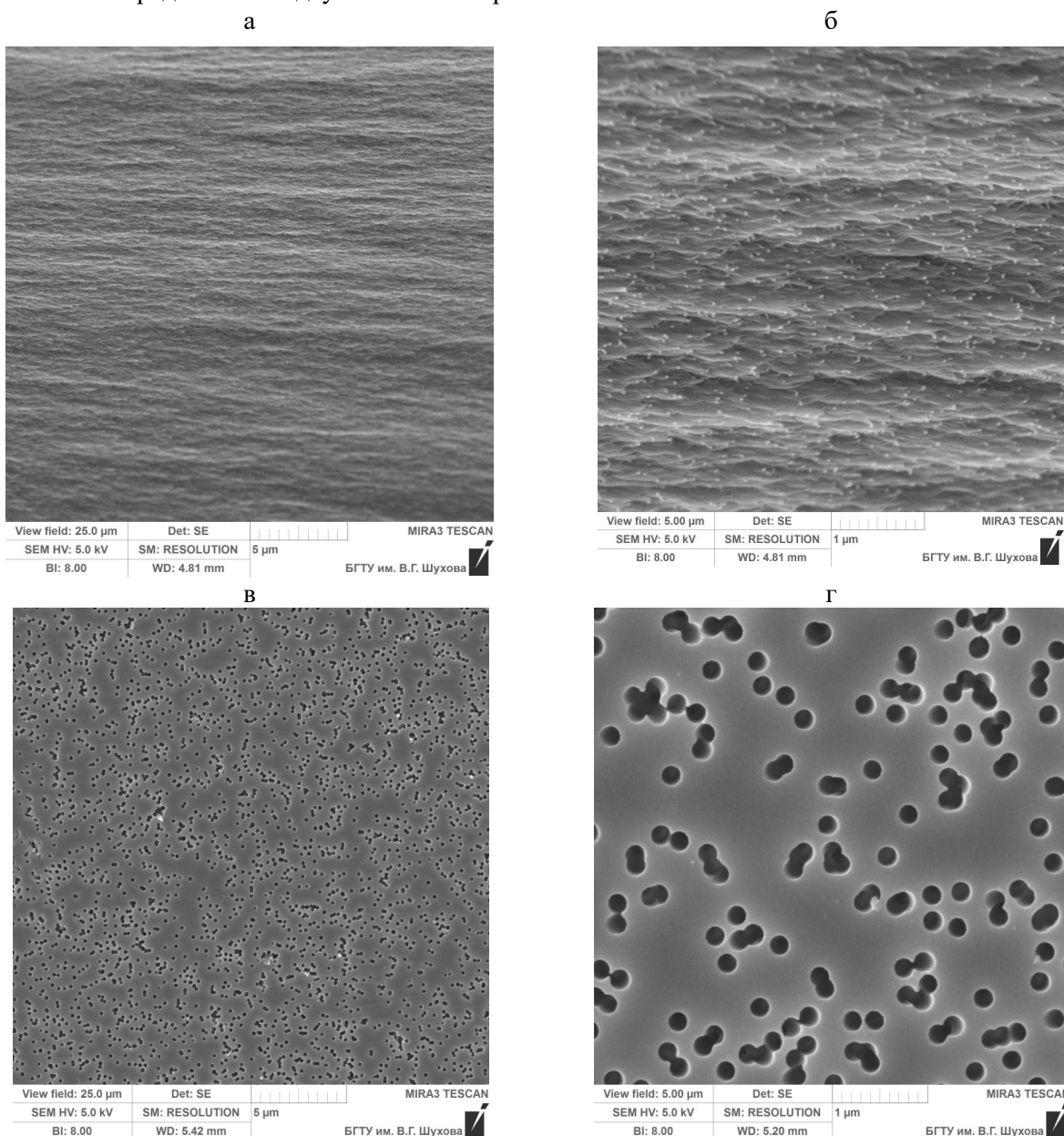


Рис. 1. Микрофотографии исходной пленки (а), облученной ионами Ar^{12+} (б) и полученной трековой мембраны (в, г)

Сравнительный анализ спектров пленки ПМ-1 и полиимидной трековой мембраны (рис. 2) показал, что интенсивность пиков мембраны

значительно меньше, чем у полиимидной пленки. Хорошо известно, что облучение полимеров потоком высокоэнергетических частиц приводит к их

окислительной деструкции [21]. Поэтому уменьшение интенсивности пиков ИК-спектра является следствием окислительной деструкции полиимида после облучения тяжелыми ионами и химического травления.

На рис. 3 показано изображение капли дистиллированной воды на поверхности полиимидной пленки МП-1 (а) и полиимидной трековой мембраны (б).

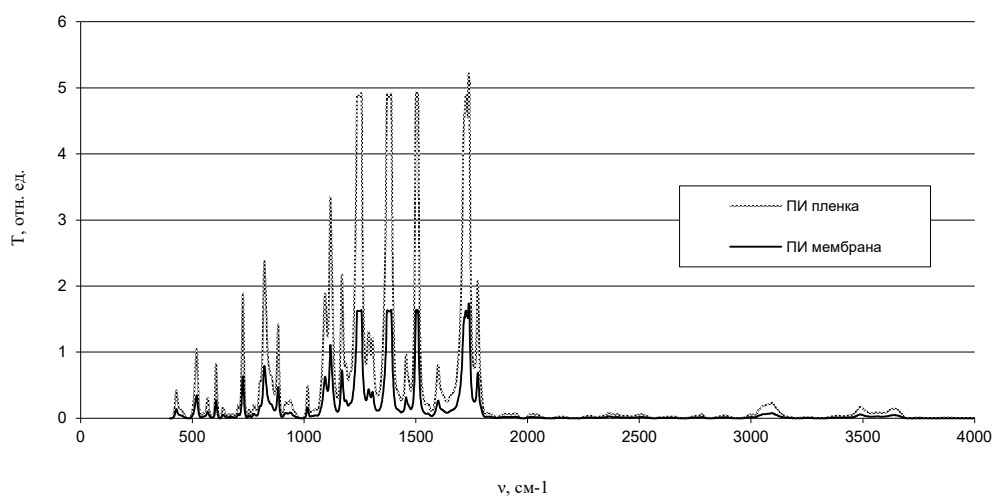


Рис. 2. ИК-спектры полиимидной пленки МП-1 и полиимидной трековой мембраны

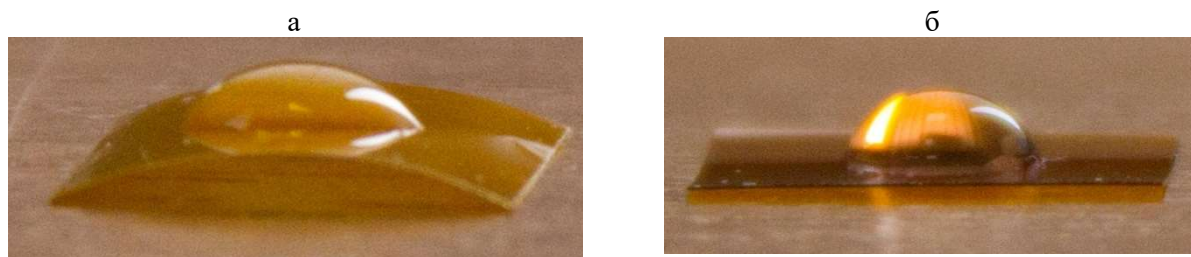


Рис. 3. Изображение капли воды на поверхности полиимидной пленки МП-1 (а) и полиимидной трековой мембраны (б)

Анализ данных на рис. 3 показал, что поверхность полиимидной пленки ПМ-1 обладает гидрофобной поверхностью (краевой угол смачивания $>90^\circ$), а поверхность полиимидной трековой мембраны обладает гидрофильной поверхностью (краевой угол смачивания $<90^\circ$). Таким образом, воздействие тяжелых ионов и химическое травление полиимидной пленки для получения трековой мембраны заметно снизило гидрофобность поверхности и поверхность приобрела гидрофильные свойства.

Для оценки изменения оптических характеристик пленки после воздействия тяжелых ионов и травления (для получения трековой мембраны) измеряли оптическую плотность образцов в широком диапазоне длин волн (350...950 нм). Оптическая плотность выражается формулой:

$$D = \log(I_0/I_1), \quad (1)$$

где D – оптическая плотность, I_0 – интенсивность падающего на пленку света; I_1 – интенсивность света, исходящего из данного участка пленки. Показатели оптической плотности большинства

пленок варьируются от 0.20 (D_{\min}) в наиболее прозрачных участках до 3.00 (D_{\max}) в самых черных [22, 23].

На рис. 4 приведены спектры полиимидной пленки ПМ-1 и трековой мембраны. Характер кривой спектральной зависимости оптической плотности полиимидной пленки ПМ-1 заметно отличается от кривой спектральной зависимости оптической плотности трековой мембраны. Наибольшее различие в кривых наблюдается в области $\lambda < 550$ нм. Спектр оптической плотности полиимидной пленки ПМ-1 имеет ярко выраженную полосу с максимумом при длине волны $\lambda = 450$ нм и резкий спад в области $\lambda = 400$ и 700 нм. Спектр оптической плотности трековой мембраны имеет ярко выраженные полосы с максимумами при длинах волн $\lambda = 500$ и 700 нм и резкий спад в области $\lambda = 600$ и 850 нм.

Как следует из анализа полученных результатов (рис. 4), воздействие тяжелых ионов и химическое травление полиимидной пленки для получения трековой мембраны оказывает заметное влияние на характер спектральной зависимости

оптической плотности (наблюдается появление новых полос поглощения). Изменение спектральной зависимости оптической плотности, вероятно, связано с увеличением интегрального коэффициента отражения в результате изменения показателя преломления и присутствия диффузного

отражения, возникающего на неоднородностях вблизи поверхности, формируемых при воздействии тяжелых ионов и химического травления полиимидной пленки.

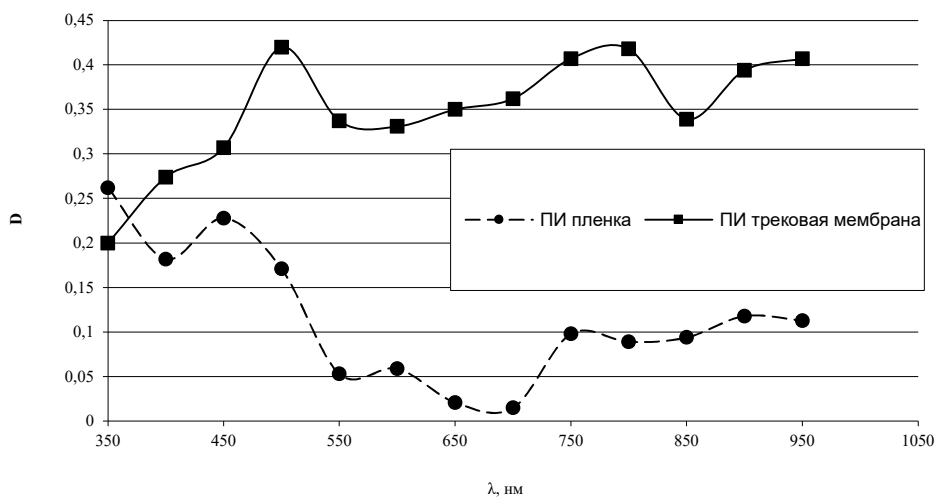


Рис. 4. Спектральная зависимость оптической плотности полиимидной пленки ПМ-1 и трековой мембраны

Несмотря на сильное различие спектральной зависимости оптической плотности полиимидной пленки и трековой мембраны, видно, что оптическая плотность пленки ПМ-1 и трековой мембраны достаточно низкая во всем исследованном диапазоне длин волн и не превышает значения 0,26 и 0,42 соответственно. Поэтому, можно рассматривать полиимидную трековую мембрану как нейтральный светофильтр с разной оптической плотностью для широкого диапазона от жесткой ультрафиолетовой области до мягкой рентгеновской с высоким уровнем блокировки ультрафиолетового и видимого фонового излучения [24].

Выводы. Микроструктура поверхности исходной полиимидной пленки ПМ-1 гладкая и ровная без расслоений. Исследуемая полиимидная мембрана, полученная путем облучения тяжелыми ионами и последующей химической обработкой обладает структурой с ярко выраженными грубыми порами и соответствует типичной микроструктуре трековой мембраны. Диаметр пор составлял 200 нм, плотность пор $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-1}$, толщина полиимидной мембраны 25 мкм.

Сравнительный анализ спектров пленки ПМ-1 и полиимидной трековой мембраны показал, что интенсивность пиков мембраны значительно меньше, чем у полиимидной пленки. Уменьшение интенсивности пиков ИК-спектра является следствием окислительной деструкции полиимида после облучения тяжелыми ионами и химического травления.

Поверхность полиимидной пленки ПМ-1 обладает гидрофобной поверхностью (краевой угол смачивания $>90^\circ$), а поверхность полиимидной трековой мембраны обладает гидрофильной поверхностью (краевой угол смачивания $<90^\circ$).

Оптическая плотность пленки ПМ-1 и трековой мембраны достаточно низкая во всем исследованном диапазоне длин волн и не превышает значения 0,26 и 0,42 соответственно. Исследуемая трековая мембрана может найти применение в оптических приборах в качестве нейтрального светофильтра. Такие светофильтры будут обладать малой пропускной способностью ультрафиолетового и видимого фонового излучения.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10064).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Максимова Е.В., Прокофьева Ю.В., Казанцева Н.Н., Почиталкина И.А. Применение трековых мембран для очистки воды из природных водоемов // *Успехи в химии и химической технологии*. 2009. Т. XXIII. №10 (103). С. 37–41.
2. Akapiev G.N., Dmitriev S.N., Erler B., Shirikova V.V., Schulz A., Pietsch H. Ion track membranes providing heat pipe surfaces with capillary structures // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2003. Vol. 208. Pp. 133–136.

3. Козловский А.Л., Боргеков Д.Б., Здоровец М.В., Архангельски Е., Шумская Е.Е., Канюков Е. Ю. Применение трековых мембран в процессах прямого и обратного осмоса // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series. 2017. no. 1. Pp. 45–51.
4. Wang P., Wang X., Ling Y., Wang M., Ding S., Shen W., Wang Z., Wang Y., Liu F. Ultrafast selective ionic transport through heat-treated polyethylene terephthalate track membranes with sub-nanometer pores // Radiation Measurements. 2018. Vol. 119. Pp. 80–84.
5. Кравец Л.И., Гильман А.Б. Модифицирование трековых мембран с использованием низкотемпературной плазмы // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2018. Т. 61. Вып. 4-5. С. 4–30.
6. Сырцова Д.А., Тепляков В.В., Кочнев Ю.К., Нечаев А.Н., Апель П.Ю., Adeniyi O.R., Petrik L. Структура и свойства трековых мембран из поли-4-метилпентена-1 // Мембраны и мембранные технологии. 2016. Т. 6. № 1. С. 17–26.
7. Danine A., Schoenleber J., Ghanbaja J., Montaigne F., Boulanger C., Stein N. Microstructure and thermoelectric properties of p-type bismuth antimony telluride nanowires synthesized by template electrodeposition in polycarbonate membranes // Electrochimica Acta. 2018. Vol. 279. Pp. 258–268.
8. Zhu X.R., Wang C.M., Fu Q.B., Jiao Z., Wang W.D., Qin G.Y., Xue J.M. Preparation of Ag/Cu Janus nanowires: Electrodeposition in track-etched polymer templates // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2015. Vol. 356–357. Pp. 57–61.
9. Cherkashina N.I., Pavlenko V.I., Manaev V.A., Kuprieva O.V., Kashibadze N.V., Samoilova E.S. Multilayer coatings based on polyimide track membranes and nanodispersed lead // Progress in Organic Coatings. 2020. Vol. 138, 105432.
10. Гумирова В.Н., Абдурашидова Г.С., Бедин С.А., Забалуева Н.П., Кувайцева М.А., Разумовская И.В. Особенности разрушения трековых мембран и композитов полимер/металл, полученных на их основе методом шаблонового синтеза // Физика твердого тела. 2015. Т. 57, вып. 2. С. 328–331.
11. Пат. 2681517, Российская Федерация, МПК 2017.01 G21F 1/12. Полимерный композит для защиты от ионизирующего излучения на основе трековых мембран и способ его получения / Павленко В.И., Лончаков Ю.В., Курицын А.А., Колобов Ю.Р., Черкашина Н.И., Манаев В.А. заявитель и патентообладатель Белгород.гос. техн. ун-т им. В.Г. Шухова; заявка № 2018117120, заявлено: 07.05.2018 г; опубликовано 07.03.2019.
12. Schauries D., Mota-Santiago P., Gilbert E.P., Kirby N., Trautmann C., Kluth P. Structure, morphology and annealing behavior of ion tracks in polycarbonate // European Polymer Journal. 2018. Vol. 108. Pp. 406–411.
13. Starosta W., Wawszczak D., Sartowska B., Buczkowski M. Investigations of heavy ion tracks in polyethylene naphthalate films // Radiation Measurements. 1999. Vol. 31. Pp. 149–152.
14. Kakitani K., Koshikawa H., Yamaki T., Yamamoto S., Sato Y., Sugimoto M., Sawada Shin-ichi. Preparation of conductive layer on polyimide ion-track membrane by Ar ion implantation // Surface and Coatings Technology. 2018. Vol. 355. Pp. 181–185.
15. He X., Sun Z., Wan C. Track polypropylene membrane based on irradiation with fragments from fission of uranium // Radiation Measurements. 2006. Vol. 41. Pp. 112–113.
16. Kutuzau M., Kozlovskiy A., Borgekov D., Kenzhina I., Zdorovets M., Chernik A., Alisienok O., Shumskaya A., Kaniukov E. Optimization of PET Ion-Track Membranes Parameters // Materials Today: Proceedings. 2019. Vol. 7. Pp. 866–871.
17. Bessonov M.I., Koton M.M., Kudryavtsev V.V., Laius L.A. Polyimides: Thermally Stable Polymers. Plenum, New York, 2-nd edition, 1987. 125 p.
18. Волков В.В., Мчедлишвили Б.В., Ролдугин В.И., Иванчев С.С., Ярославцев А.Б. Мембраны и нанотехнологии // Российские нанотехнологии. 2008. Т. 3. №11-12. С. 67–101.
19. Власов С.В., Кочнев Ю.К., Виленский А.И. Влияние ориентационной вытяжки на геометрическую форму пор трековых мембран из полиэтилентерефталата // Пластические массы. 2010. № 9. С. 27–31.
20. Виленский А.И., Берёзкин В.В., Соболев В.Д. Формирование пор в полиимиде, облучённом высокоэнергетическими ионами и изучение свойств полученных мембран // Коллоидный журнал. 2009. Т. 71, № 4. С. 465–472.
21. Prasad S.G., De A., De U. Structural and Optical Investigations of Radiation Damage in Transparent PET Polymer Films // International Journal of Spectroscopy. 2011. Article ID 810936.
22. Tsalafoutas I.A., Papoutsis G.V., Maniatis P.N., Gogos K.A. Optical density variations in CT films and their effect on image quality // British Journal of Radiology. 2006. Vol. 941. Pp. 425–431.
23. Cosslett A., Cosslett V.E. The optical density and thickness of evaporated carbon films // British Journal of Applied Physics. 1957. Vol. 8. Pp. 374–376.
24. Mitrofanov A.V., Apel P.Y., Blonskaya I.V., Orelovitch O.L. Diffraction filters based on polyimide and poly(ethylene naphthalate) track

membranes // Technical Physics. 2006. Vol. 51. Pp. 1229–1234.

Информация об авторах

Черкашина Наталья Игоревна, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной химии E-mail: cherkashina.ni@bstu.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Павленко Зоя Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: belpavlenko@mail.ru Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Манаев Владимир Алексеевич, научный сотрудник кафедры теоретической и прикладной химии. E-mail: xxi-vek.2015@yandex.ru Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Самойлова Екатерина Сергеевна, студент (бакалавр) кафедры теоретической и прикладной химии. E-mail: terry.kot@mail.ru Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

Сидельников Роман Владимирович, студент (бакалавр) кафедры теоретической и прикладной химии. E-mail: roman.sidelnikov@mail.ru Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила в январе 2020 г.

© Черкашина Н.И., Павленко З.В., Манаев В.А., Самойлова Е.С., Сидельников Р.В., 2020

***Cherkashina N.I., Pavlenko Z.V., Manaev V.A., Samoiloa E.S., Sidelnikov R.V.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: cherkashina.ni@bstu.ru*

STUDY OF THE STRUCTURE AND OPTICAL DENSITY OF POLYIMIDE TRACK (NUCLEAR) MEMBRANE

Abstract. *The paper presents the results of a study of the surface and optical properties of the PM-1 polyimide film and the polyimide track membrane. For the study, polyimide (track) nuclear membranes manufactured by ION TRACK TECHNOLOGY FOR INNOVATIVE PRODUCT (it4ip, Belgium) is used. The pore diameter is 200 nm, the pore density is $5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-1}$, and the thickness of the polyimide membrane is 25 μm . The data of IR spectroscopy are presented. It is shown that the decrease in the intensity of the peaks of the IR spectra of the membrane compared to the film is a consequence of the oxidative degradation of the polyimide after exposure to heavy ions and chemical etching. The data on the effects of heavy ion irradiation and chemical etching of a polyimide film to obtain a membrane on surface hydrophobicity / hydrophilicity are presented. The optical density of the film and track membranes is determined in the wavelength range of 350–950 nm. The optical density is measured in increments of 50 nm. It is shown that despite the strong difference in the spectral dependence of the optical density of the polyimide film and the track membrane, the optical density of the PM-1 film and the track membrane is quite low in the entire studied wavelength range and does not exceed 0.26 and 0.42, respectively.*

Keywords: *polyimide membranes, heavy ions, chemical etching, optical density, contact angle, surface morphology.*

REFERENCES

1. Maksimova E.B., Prokofieva Yu.V., Kazantseva H.H., Pochitalkina I.A. The use of track membranes for the purification of water from natural reservoirs [Primenenie trekovyh membran dlja ochistki vody iz prirodnyh vodoemov]. *Uspehi v himii i himicheskoy tehnologii*. 2009. T. XXIII. No.10 (103). Pp. 37–41. (rus)

2. Akapiev G.N., Dmitriev S.N., Erler B., Shirikova V.V., Schulz A., Pietsch H. Ion track membranes providing heat pipe surfaces with capillary

structures. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2003. Vol. 208. Pp. 133–136.

3. Kozlovsky A.L., Borgekov D.B., Zdorovets M.V., Arkhangelsky E., Shumskaya E.E., Kanyukov E.Yu. Use of track membranes in the processes of direct and reverse osmosis [Primenenie trekovyh membran v processah prjamogo i obratnogo osmosa]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*. 2017. No. 1. Pp. 45–51. (rus)

4. Wang P., Wang X., Ling Y., Wang M., Ding S., Shen W., Wang Z., Wang Y., Liu F. Ultrafast selective ionic transport through heat-treated polyethylene terephthalate track membranes with sub-nanometer pores. *Radiation Measurements*. 2018. Vol. 119. Pp. 80–84.
5. Kravets L.I., Gilman A.B. Modification of track membranes using low-temperature plasma [Modificirovanie trekovyh membran s ispol'zovaniem nizkotemperaturnoj plazmy]. *Izvestija vuzov. Himija i himicheskaja tehnologija*. 2018. T. 61. Vol. 4-5. Pp. 4–30. (rus)
6. Syrtsova D.A., Teplyakov V.V., Kochnev Yu.K., Nechaev A.N., Apel P.Yu., Adeniyi O.R., Petrik L. Structure and properties of track membranes made of poly-4-methylpentene-1 [Struktura i svojstva trekovyh membran iz poli-4-metilpentena-1]. *Membrany i membrannye tehnologii*. 2016. Vol. 6. No. 1. Pp. 17–26. (rus)
7. Danine A., Schoenleber J., Ghanbaja J., Montaigne F., Boulanger C., Stein N. Microstructure and thermoelectric properties of p-type bismuth antimony telluride nanowires synthesized by template electrodeposition in polycarbonate membranes. *Electrochimica Acta*. 2018. Vol. 279. Pp. 258–268.
8. Zhu X.R., Wang C.M., Fu Q.B., Jiao Z., Wang W.D., Qin G.Y., Xue J.M. Preparation of Ag/Cu Janus nanowires: Electrodeposition in track-etched polymer templates. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2015. Vol. 356–357. Pp. 57–61.
9. Cherkashina N.I., Pavlenko V.I., Manaev V.A., Kuprieva O.V., Kashibadze N.V., Samoiloa E.S. Multilayer coatings based on polyimide track membranes and nanodispersed lead. *Progress in Organic Coatings*. 2020. Vol. 138, 105432.
10. Gumirova V.N., Abdurashidova G.S., Bedin S.A., Zabalueva N.P., Kuvaitseva M.A., Razumovskaya I.V. Features of the destruction of track membranes and polymer / metal composites obtained on their basis by the template synthesis method [Osobennosti razrusheniya trekovyh membran i kompozitov polimer/metall, poluchennyh na ih osnove metodom shablonnogo sinteza]. *Fizika tverdogo tela*. 2015. T. 57. Vol. 2. Pp. 328–331. (rus)
11. Pavlenko V.I., Lonchakov Yu.V., Kuritsyn A.A., Kolobov Yu.R., Cherkashina N.I., Manaev V.A. Polymer composite for protection against ionizing radiation based on track membranes and method for its preparation. Patent RF, no. 2681517, 2018.
12. Schauries D., Mota-Santiago P., Gilbert E.P., Kirby N., Trautmann C., Kluth P. Structure, morphology and annealing behavior of ion tracks in polycarbonate. *European Polymer Journal*. 2018. Vol. 108. Pp. 406–411.
13. Starosta W., Wawszczak D., Sartowska B., Buczkowski M. Investigations of heavy ion tracks in polyethylene naphthalate films. *Radiation Measurements*. 1999. Vol. 31. Pp. 149–152.
14. Kakitani K., Koshikawa H., Yamaki T., Yamamoto S., Sato Y., Sugimoto M., Sawada Shin-ichi. Preparation of conductive layer on polyimide ion-track membrane by Ar ion implantation. *Surface and Coatings Technology*. 2018. Vol. 355. Pp. 181–185.
15. He X., Sun Z., Wan C. Track polypropylene membrane based on irradiation with fragments from fission of uranium. *Radiation Measurements*. 2006. Vol. 41. Pp. 112–113.
16. Kutuzau M., Kozlovskiy A., Borgekov D., KENZHINA I., Zdorovets M., Chernik A., Alisienok O., Shumskaya A., Kaniukov E. Optimization of PET Ion-Track Membranes Parameters. *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 7. Pp. 866–871.
17. Bessonov M.I., Koton M.M., Kudryavtsev V.V., Laius L.A. Polyimides: Thermally Stable Polymers. Plenum, New York, 2-nd edition, 1987. 125 p.
18. Volkov V.V., Mchedlishvili B.V., Roldugin V.I., Ivanchev S.S., Yaroslavtsev A.B. Membranes and Nanotechnology [Membrany i nanotehnologii]. *Rossijskie nanotehnologii*. 2008. T. 3. No. 11-12. Pp. 67–101. (rus)
19. Vlasov S.V., Kochnev Yu.K., Vilensky A.I. The influence of orientation drawing on the geometric shape of the pores of track membranes made of polyethylene terephthalate [Vlijanie orientacionnoj vytjazhki na geometricheskiju formu por trekovyh membran iz polijetilentereftalata]. *Plasticheskie massy*. 2010. No. 9. Pp. 27–31. (rus)
20. Vilensky A.I., Berezkin V.V., Sobolev V.D. Pore formation in a polyimide irradiated with high-energy ions and study of the properties of the resulting membranes [Formirovanie por v poliimide, oblučjonnom vysokojenergeticheskimi ionami i izuchenie svojstv poluchennyh membran]. *Kolloidnyj zhurnal*. 2009. Vol. 71, No. 4. Pp. 465–472. (rus)
21. Prasad S.G., De A., De U. Structural and Optical Investigations of Radiation Damage in Transparent PET Polymer Films. *International Journal of Spectroscopy*. 2011. Article ID 810936.
22. Tsalaifoutas I.A., Papoutsis G.V., Maniatis P.N., Gogos K.A. Optical density variations in CT films and their effect on image quality. *British Journal of Radiology*. 2006. Vol. 941. Pp. 425–431.
23. Cosslett A., Cosslett V.E. The optical density and thickness of evaporated carbon films. *British Journal of Applied Physics*. 1957. Vol. 8. Pp. 374–376.
24. Mitrofanov A.V., Apel P.Y., Blonskaya I.V., Orelovitch O.L. Diffraction filters based on pol-

yimide and poly(ethylene naphthalate) track membranes. Technical Physics. 2006. Vol. 51. Pp. 1229–1234.

Information about the authors

Cherkashina, Natalia I. PhD, Assistant professor. E-mail: cherkashina.ni@bstu.ru. Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Pavlenko, Zoya V. PhD, Assistant professor. E-mail: belpavlenko@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Manaev, Vladimir A. Researcher. E-mail: xxi-vek.2015@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Samoilova, Ekatherine S. Bachelor student. E-mail: terry.kot@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Sidelnikov, Roman V. Bachelor student. E-mail: roman.sidelnikov@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received in January 2020

Для цитирования:

Черкашина Н.И., Павленко З.В., Манаев В.А., Самойлова Е.С., Сидельников Р.В. Изучение структуры и оптической плотности полиимидных трековых (ядерных) мембран // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 3. С. 97–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-97-105

For citation:

Cherkashina N.I., Pavlenko Z.V., Manaev V.A., Samoilova E.S., Sidelnikov R.V. Study of the structure and optical density of polyimide track (nuclear) membrane. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 3. Pp. 97–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-97-105