






Научная статья

УДК 661.682

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-2-152-163>

CC BY 4.0

Влияние лазерной обработки на композитные пленки с нанодисперсным SiO₂

Наталья Игоревна Черкашина* , Вячеслав Иванович Павленко , Андрей Иванович Городов ,
Дарья Александровна Рыжих , Елена Витальевна Форова 

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: natalipv13@mail.ru

АННОТАЦИЯ: Введение. Исследование направлено на изучение влияния лазерной обработки на композитные пленки, полученные на основе полиимидных трековых (ядерных) мембран и наполненных нанодисперсным SiO₂; на изменение их оптических и структурных свойств. **Материалы и методы исследования.** Полиимидные трековые (ядерные) мембраны использовались в качестве полимерной матрицы. Диаметр треков 200 нм, толщина мембраны 25 мкм. Заполнение треков нанодисперсным SiO₂ проводили путем гидролиза тетраэтоксисилана в присутствии трековых мембран. Для модифицирования поверхности композитной пленки использовали иттербиевый импульсный волоконный лазер Minimarker 2-20 A4 PA. Было изучено изменение микроскопии поверхности композитных пленок, их оптическая плотность, ИК-Фурье спектры и смачиваемость поверхности в зависимости от лазерной обработки. **Результаты и обсуждение.** Установлена возможность создания композитной пленки на основе полиимидной трековой (ядерной) мембраны и нанодисперсного SiO₂ путем гидролиза тетраэтоксисилана в присутствии мембраны. Методом энергодисперсионного анализа показано, что оксид кремния полностью заполнил объем пор трековой мембраны. Лазерное модифицирование поверхности композитного материала (композитной пленки) приводит к увеличению краевого угла смачивания от $\theta = 66,75 \pm 1,55^\circ$ до $\theta = 101,52 \pm 3,03^\circ$. Таким образом, материал приобретает гидрофобные свойства. Также модифицирование пленок лазером оказывает положительный эффект на коэффициент пропускания пленок, а именно данный коэффициент увеличивается. Наибольшие изменения наблюдаются в инфракрасной области излучения, средний прирост пропускания составляет +70,48%. **Заключение.** Полученные результаты исследования представляют важное значение для понимания механизмов создания композитных пленок с улучшенными оптическими свойствами, что в дальнейшем может быть использовано для создания композитных пленок с заданными оптическими свойствами для различных областей применений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: композитная пленка, трековая мембрана, нанодисперсный SiO₂, лазерная обработка, оптические свойства, модифицирование, краевой угол смачивания.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-79-10064 (продление), <https://rscf.ru/project/19-79-10064/> с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Черкашина Н.И., Павленко В.И., Городов А.И., Рыжих Д.А., Форова Е.В. Влияние лазерной обработки на композитные пленки с нанодисперсным SiO₂ // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т.15, № 2. С. 152–163. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-2-152-163>. – EDN: HWIKQS.

ВВЕДЕНИЕ

Полиимиды — класс высокоэффективных полимеров, содержащих имидные группы. Их преимущества: высокие механические свойства, термостабильность в широком диапазоне температур (от –250°C до +350°C), устойчивость к ультрафиолетовому излучению и высокая химическая стойкость [1–4]. Полиимиды используются в авиационной и космической промышленности, ядерной энерге-

тике, электронике, элементах солнечных батарей, устройствах отражения как зеркальный материал подложки с низкой плотностью поверхности [5, 6]. Из полимеров, в том числе полиимидов, изготавливаются трековые мембраны — полупрозрачные, тонкие пленки с гладкой поверхностью [7, 8]. Для получения трековых (ядерных) мембран полимерная пленка подвергается облучению пучками тяжелых ускоренных ионов и химическому травлению, размер пор будет зависеть от интенсивности, энергии

© Черкашина Н.И., Павленко В.И., Городов А.И., Рыжих Д.А., Форова Е.В. 2023

и выбираемых режимов травления [9–11]. Особое место занимают трековые мембраны в медицине [12–15]. Кроме того, трековые мембраны применяются для ультрафильтрации, концентрирования сред в промышленности и для создания полимерных нанокомпозитов [16–19].

Однако их применение в оптике ограничено из-за низкого коэффициента пропускания света в видимой области 400–760 нм, а также из-за высокого влагопоглощения, связанного с особенностями молекулярной структуры, а именно с наличием гидрофильных имидных колец [20, 21]. Выявляется необходимость получения модифицированных полиимидных мембран с хорошим коэффициентом пропускания света, оптической однородностью и гидрофобной поверхностью для создания оптических систем [22]. Такая актуальность связана с ростом технологического процесса. Растет спрос на материалы с расширенными характеристиками. Если рассматривать полимерные материалы по отдельности, то их свойства predeterminedены, и для некоторых областей они являются недостаточно функциональными или не подходят под требования, из-за чего их применение может быть ограничено. Поэтому развивается направление по созданию композитных материалов на их основе с новыми улучшенными электрическими, оптическими, тепловыми, механическими и другими свойствами.

С интегрированием наполнителя в поры трековых мембран получается композит с уникальными свойствами, что расширяет область его применения. Нанонаполнители заполняют объем полимера благодаря таким процессам, как полимеризация, золь-гель метод, смешение растворов [23], электроформирование [24], осаждение, ионный обмен. Метод зависит от желаемого конечного результата.

Известно, что применение нанонаполнителей практически в любых композитах позволяет повысить функциональные характеристики материала. Например, в работе [25] показано, что введение углеродных нановолокон в количестве 1 масс.% в полипропиленовую матрицу позволяет увеличить прочность при изгибе на 22%, прочность при разрыве – на 29%, а ударную вязкость – на 23%. В другой работе [26] на примере нанокомпозитов бисмалеимид/углеродные нанотрубки экспериментально продемонстрировано, что деформация жгутов углеродных нанотрубок (вытяжка) от 0 до 12% дает увеличение модуля упругости этих нанокомпозитов от 118 до 293 ГПа.

В Китае разработан нанокомпозит из поливинилового спирта и изопророксида титана (IV) [27]. Нанокомпозит имеет широкое перестраиваемое окно показателя преломления – 1,65–1,95 на длине волны 550 нм. Установлено, что применение разработанных просветляющих пленок в перовскитных модулях

солнечных элементов увеличивает эффективность преобразования энергии с 16,57 до 17,25%.

В Индии обнаружено, что нелинейные оптические свойства нанокомпозитов MoS_2 /поливиниловый спирт можно регулировать, изменяя концентрацию наночастиц MoS_2 в полимерной матрице, а также обрабатывая ультразвуком определенную концентрацию в разное время. Установлено, что с увеличением концентрации наночастиц MoS_2 в полимерной матрице самофокусировка трансформируется в самодефокусировку.

В работе [28] показано, что введение кремнеземного наполнителя приводит к значительному снижению деградации оптических свойств полимерного композита под действием вакуумного ультрафиолетового излучения.

В качестве нанонаполнителей для полимерных композитов могут применяться как неорганические вещества: кремнезем, глина, керамика – так и металлы и их оксиды: золото, серебро, алюминий, железо, кобальт и прочее, а также органические материалы, например, углеродные нанотрубки или графен [29, 30].

Несмотря на то, что исследованиям по получению композитных пленок и нанопленок, в том числе на основе полиимида, посвящено много работ [31–35], до настоящего времени не выявлен эффективный способ, позволяющий полностью избежать агрегации наночастиц при введении его в полимер.

В данном исследовании получена полимерная композитная пленка на основе трековой мембраны, которая заполнялась кремнеземом. А также исследована возможность повышения коэффициента пропускания и улучшения оптических характеристик композитной пленки путем модифицирования ее поверхности с использованием лазерной обработки. Известно, что модифицирование с использованием энергетического воздействия как ионизирующего излучения, так и лазерной обработки влияет на изменение свойств поверхности обрабатываемого материала и позволяет создавать материалы с заданными (регулируемыми) свойствами [36–41].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Композитный материал создавался на основе полиимидной трековой (ядерной) мембраны. Диаметр пор – 200 нм, плотность пор – $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$, толщина полиимидной мембраны 25 мкм (производитель it4ip, Бельгия). На рис. 1 представлены СЭМ-изображения исходной полиимидной трековой (ядерной) мембраны, на которой видны кратеры – входные и выходные отверстия, имеющие произвольное расположение, от одиночного расположения до наслаивания. Поры наполняли кремнеземом, для протекания ре-

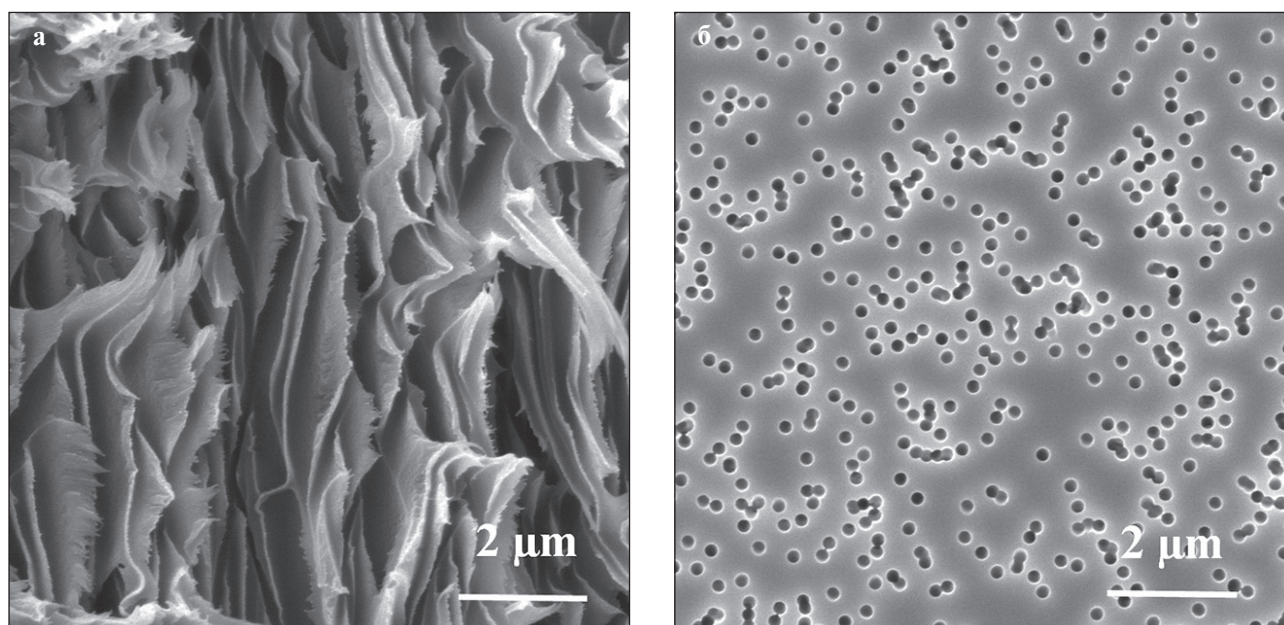


Рис. 1. СЭМ-изображения полиимидной трековой (ядерной) мембраны в разрезе (а) и вид сверху (б)

акции гидролиза использовали реактивы: тетраэтоксисилан (ТЭОС) чда ТУ 2637-187-44493179-2014, уксусная кислота ледяная хч ГОСТ 61-75.

Для заполнения пор трековых мембран продуктами гидролиза использовали ультразвуковую обработку. Для этого применяли ультразвуковую ванну **TECHMANN® LABORANT** модель L-22 (производитель ООО «ТЭКМАНН», Россия). Параметры работы ультразвуковой ванны представлены в табл. 1.

Для модифицирования поверхности композитной пленки использовали иттербиевый импульсный волоконный лазер **Minimarker 2-20 A4 PA** (производитель ООО «Лазерный Центр», Россия). Параметры работы лазера представлены в табл. 2.

На основании расчета уравнения реакции были подобраны оптимальные соотношения для протекания реакции гидролиза, соотношения представлены в табл. 3.

Образцы готовили следующим образом: трековые мембраны размером 2×2 см опускали в бюксы и заливали тетраэтоксисиланом (ТЭОС) (рис. 2а, рис. 2б), далее производилось воздействие ультразвуком в течение 30 минут (рис. 2в). После в бюксы, согласно табл. 3, добавляли остальные компоненты, реакция протекала в кислой среде ($\text{pH} \approx 3$) в присутствии катализатора – уксусной кислоты. После образцы выдерживали в ультразвуке еще 1,5 часа при температуре 60°C (рис. 2г). После проведения гидролиза пленки промывались дистиллированной водой, с поверхности удалялись крупные продукты гидролиза. Далее пленки высушивали при комнатной температуре и подвергали высокоэнергетическому лазерному воздействию.

Таблица 1

Параметры работы ультразвуковой ванны

Параметр	Значение
Мощность, Вт	90–120
Частота, КГц	37
Нагрев, Вт	120

Таблица 2

Параметры работы лазера

Параметр	Значение
Длина волны основного излучения, нм	1064
Максимальная выходная мощность излучения, Вт	20
Максимальная энергия в импульсе излучения, мДж	1,0

Таблица 3

Соотношения компонентов для реакции гидролиза

Природа катализатора	Соотношения компонентов, с учетом последовательности их введения в раствор (вода и катализатор добавляются одновременно)	
	CH_3COOH	$(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4\text{Si}$, мл 35



Рис. 2. Процесс протекания гидролиза. Подготовка проб (а, б), процесс гидролиза (в), результат гидролиза (г)

Таблица 4

Режимы обработки образцов лазером

Образец	Кол-во проходов	Мощность, %	Скорость перемещения луча, мм/с	Частота модуляции, кГц,	Длительность импульса, нс
1	—	—	—	—	—
2	1	100	85	40	4
3	1	80	85	40	4
4	1	60	85	40	4

Для исследования воздействия лазера на образцы композитной пленки были подобраны 3 режима обработки с разными параметрами мощности. Режимы представлены в табл. 4.

Первый образец – немодифицированная композитная пленка.

Для измерения размера частиц в растворе с течением времени использовали анализатор размера частиц Zetatrac (Microtrac Inc, США).

Для исследования морфологии поверхности пленок использовали сканирующий электронный микроскоп MIRA3 TESCAN (Tescan, Чехия).

Краевой угол смачивания определяли методом сидячей капли с использованием прибора Krüss DSA30 (Krüss GmbH, Германия).

Для исследования изменений коэффициента пропускания и оптической плотности использовали прибор Спектрофотометр LEKI SS1207 (MEDIORA, Финляндия).

Для измерения оптических спектров пропускания, внутри- и межмолекулярного взаимодействия кремнезема и полимеров применялся ИК-Фурье спектрометр VERTEX 70 (Bruker Optik GmbH, Германия).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По мере протекания гидролиза в растворе образовывались частицы оксида кремния. В начале эксперимента размер частиц, в среднем, составлял 0,00283 мкм (рис. 3), что меньше, чем размер пор в 71 раз, это позволяет предположить, что продукты гидролиза зашли в поры и продолжили рост частиц внутри треков. Данное предположение подтверждают результаты микроскопии, описанные ниже.

С течением времени рост частиц продолжается, на графике представлен момент времени достижения частицами среднего размера 0,1520 мкм, рис. 4. Далее рост частиц продолжался до среднего размера частиц 0,340 мкм и 0,480 мкм, после измерения не проводились, так как размер частиц превысил размер пор трековых мембран.

Как было указано выше, гидролиз проводили при температуре 60°C, это связано с доказанными явлениями того, что при увеличении температуры количество образующихся частиц увеличивается, а ре-

акция протекает быстрее. Это объясняется тем, что процесс образования частиц состоит из двух стадий: периода индукционного формирования зародышей и их роста в последующем. В индукционный период осуществляется прирост концентрации и полимеризация в микрочастицы молекулярного SiO₂, что напрямую зависит от температуры протекания реакции. Так как скорость протекания реакции гидролиза растет с увеличением температуры, то и число микрочастиц, образовавшихся в этот период, увеличивается, следовательно, возрастает количество активных соударений при их агрегации, а значит формируется больше зародышей. На второй стадии происходит рост размеров частиц, сформированных в индукционный период, новых зародышей не образуется.

Для исследования морфологии поверхности композитных пленок и их заполнения нанокремнеземом были получены и проанализированы результаты микроскопии (рис. 5).

По данным СЭМ-изображений, из рис. 1 видно, что изначально пленка имеет четко выражен-

Рис. 3. Распределение образующихся частиц по размеру в начале эксперимента

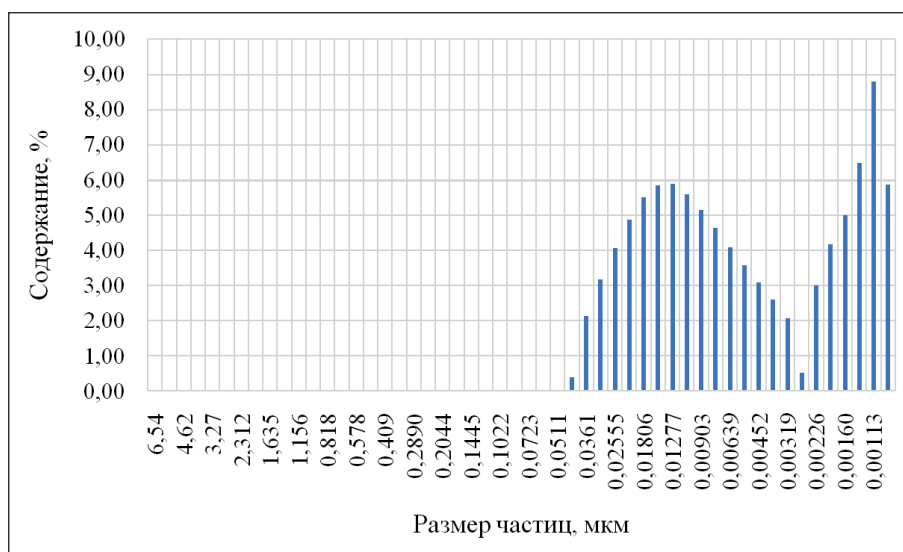
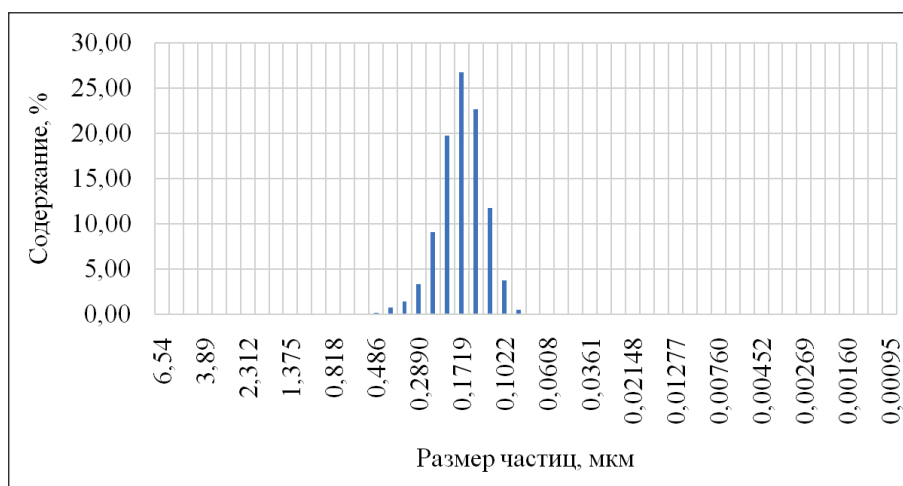


Рис. 4. Распределение образующихся частиц по размеру в середине эксперимента



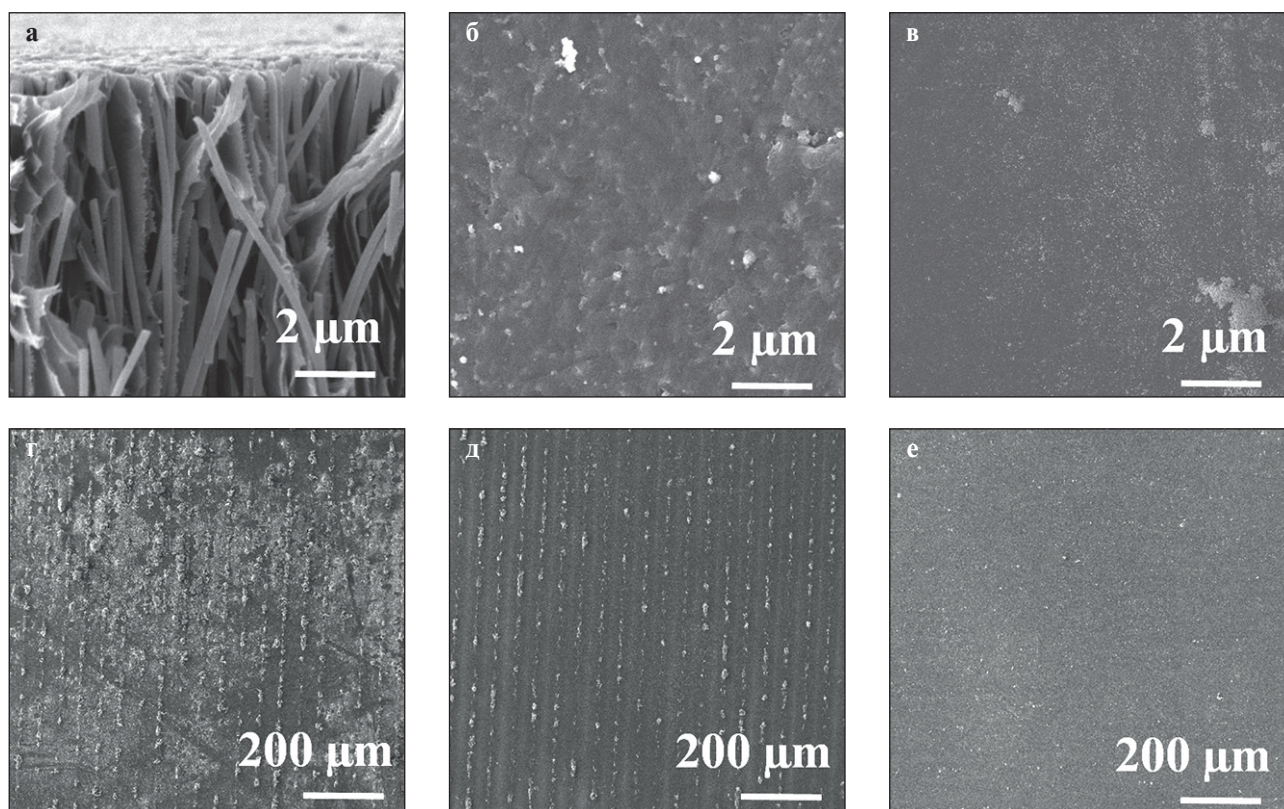


Рис. 5. СЭМ-изображения немодифицированных (а–в) и модифицированных лазером пленок (г) на режиме 2, (д) на режиме 3, (е) на режиме 4

ные отверстия, в разрезе треки пленки полые. После проведения гидролиза в присутствии пленки можно наблюдать заполнение треков кремнеземом (рис. 5а). Поверхность пленки больше не имеет четко выраженных отверстий, что свидетельствует о их заполнении (рис. 5а–в). На рисунках 5 г–е представлены микрофотографии композитных мембран, облученных лазером, на втором, третьем и четвертом режиме из табл. 4. Поры мембран остаются заполненными, не разрушаются, кремнезем заполняет весь свободный объем треков. По мере прохода лазера на мембране, облученной на втором режиме, можно наблюдать вспучивания по траектории луча (рис. 5г). Схожий эффект можно наблюдать и у образца пленки, облученного на 3 режиме из табл. 4 (рис. 5д). Однако, как можно видеть, вспучивание мембраны менее интенсивное, это связано с уменьшенной мощностью воздействия на композитную пленку на 20%. На рис. 5е изображена композитная мембрана, модифицированная лазером на 4-м режиме из табл. 4. Объем мембраны так же остается заполненным, видимых изменений нет, однако на поверхности пленки можно заметить отсутствие вспучиваний, так как мощность воздействия лазера была снижена на 40%, в сравнении с режимом 2 (рис. 5г).

Также подтверждением того, что оксид кремния полностью заполнил объем пор, являются данные энергодисперсионного анализа, представленного на рис. 6. На рис. 6 изображение скола композитной трековой мембраны, отражающей химический состав материала, на котором показано заполнение объема кремнеземом.

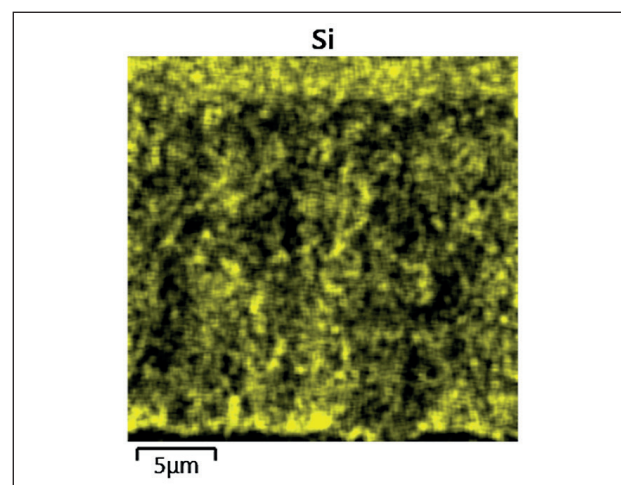


Рис. 6. Данные энергодисперсного анализа скола композитной пленки

На рис. 7, 8 представлены спектры поглощения света композитной пленкой. Спектры были сняты для 4-х образцов: немодифицированная композитная пленка и модифицированная композитная пленка, облученная лазером на режимах из табл. 4.

Как видно из графиков, коэффициент пропускания модифицированных образцов увеличился. Наибольшие изменения наблюдаются в видимом и инфракрасном спектре от 500–1000 нм, а в области 330–500 нм изменений между образцами почти нет – коэффициент пропускания и оптическая плотность композитных пленок, подвергшихся воздействию лазера, ближе к усредненным значениям немодифицированной мембраны.

Наибольшие изменения между немодифицированными (образец 1) и модифицированными (образцы 2–4) композитными пленками наблюдаются

при длине волны 960 нм, коэффициент пропускания увеличился на 92,53%. С уменьшением длины волны разница коэффициента пропускания уменьшается. Наибольшая разница на длине волны 1000 нм составляет +89,97%, на длине волны 920 нм – +82,61%, при 880 нм – +66,92%, при 840 нм – +62,82%, при 800 нм – +57,09%, при 760 нм – +41,44%.

Оптическая плотность модифицированных композитных пленок уменьшалась по сравнению с немодифицированными. Наибольшее уменьшение наблюдается при длине волны 960 нм, оптическая плотность уменьшилась на 20,42%. При длине волны 1000 нм уменьшилась на 20,39%, при 920 нм уменьшилась на 18,60%, при 880 нм уменьшилась на 15,86%, при 840 нм уменьшилась на 14,62%, при 800 нм уменьшилась на 13,08%, при 760 нм уменьшилась на 9,78%.

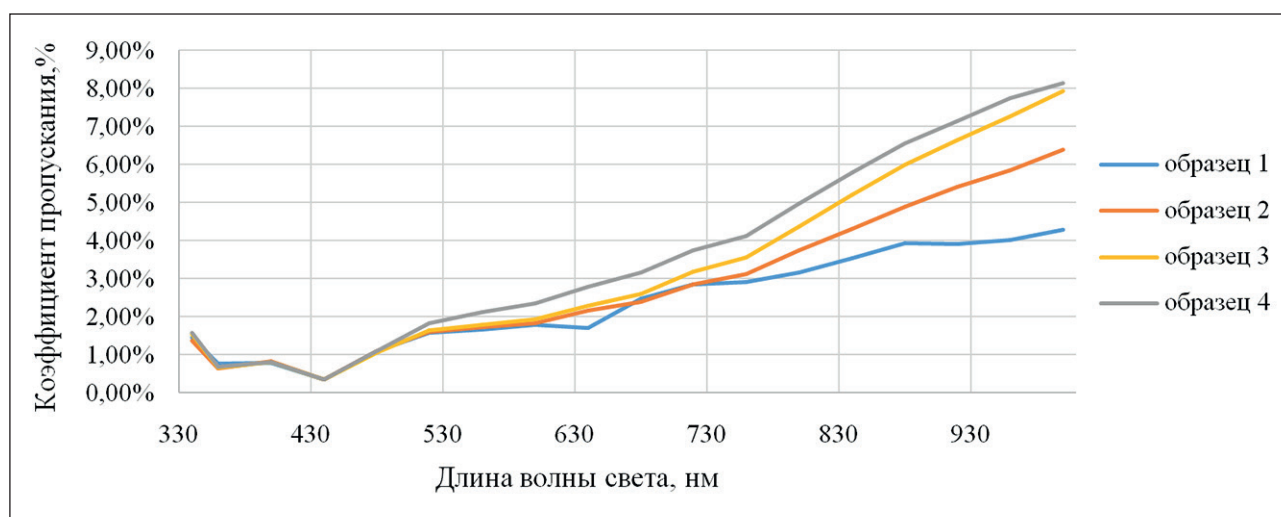


Рис. 7. Спектры поглощения света композитных пленок

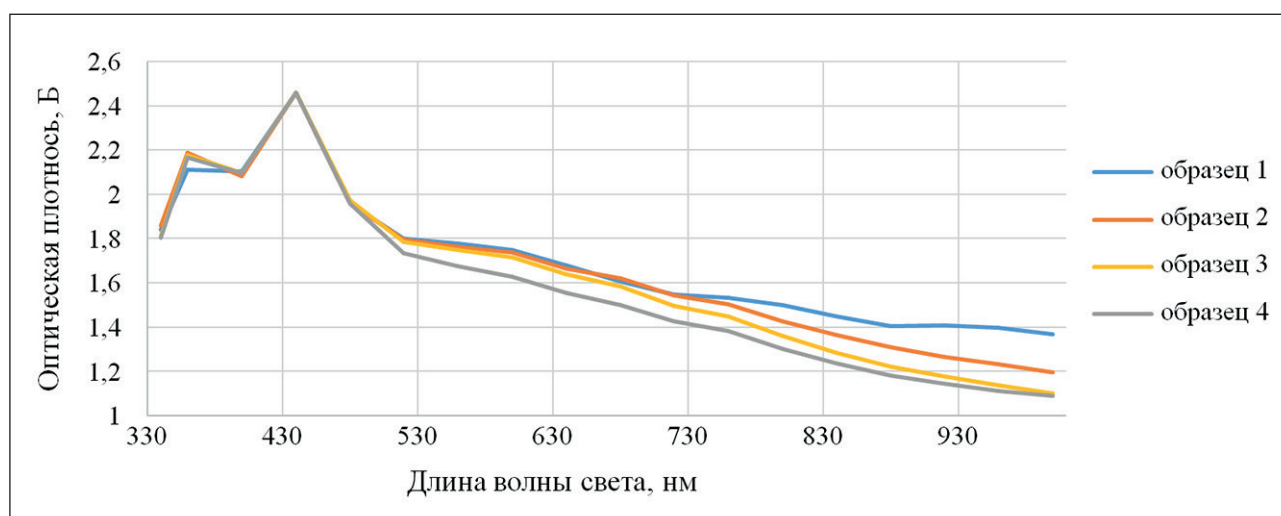


Рис. 8. Спектры поглощения света композитных пленок

На рис. 9 представлены данные ИК-спектров немодифицированной лазером композитной пленки и модифицированной высокоэнергетическим лазерным воздействием режимами из табл. 4. Исходя из полученных данных, можно увидеть, что данные образцы имеют типичное строение для полиимида. На диаграмме присутствуют полосы поглощения 1380–1780 см^{-1} , что свойственно имидному циклу и колебаниям связей C–N и C=O. Выраженный пик на отметке 1728 см^{-1} свидетельствует о карбонильной группе C=O. Также пик при 876 см^{-1} указывает на C–N колебания, а пик 1505 см^{-1} присущ валентным колебаниям C=C.

Группа сложных эфиров отображается на ИК-Фурье спектре полосами высокой интенсивности: в интервале поглощения 1249–1276 см^{-1} C–O, пик при 1126 см^{-1} свидетельствует о валентных колебаниях C–C(O)–O, также данный пик является характерным для кремнийорганических соединений и проявляется при связывании этоксигрупп Si–O–C.

Область 3400–3500 см^{-1} указывает на наличие связанных гидроксильных групп (воды).

Сравнительный анализ спектров модифицированных и не модифицированных лазером композитных пленок выявил, что новых пиков не образовалось, а интенсивность существующих пиков после модифицирования композитных пленок изменилась. Наблюдается снижение интенсивности пика при 1728 см^{-1} и увеличение интенсивности на пиках 1388 см^{-1} , 1247 см^{-1} , 1170 см^{-1} .

Смачиваемость композитных пленок оценивалась методом сидячей капли, смачивание производилось дистиллированной водой и диодометаном. Как известно, полиимиды более гидрофильны в сравнении с полимерами, что объясняется гидрофильной природой имидных колец. Выше была описана необходимость получения полиимидных мембран с уменьшенным водопоглощением. Результаты измерения краевого угла смачивания представлены в табл. 5. На рис. 10 представлены фотографии капли воды на композитных пленках, обработанных высокоэнергетическим лазерным излучением, согласно табл. 4. Начальные значения экстраполированы на нулевой момент времени.

Таблица 5

Данные по краевому углу смачивания водой и диодометаном

Sample	Контактные углы смачивания водой, ° (град.)	Контактные углы смачивания диодометаном, ° (град.)
1	66,75 + 1,55	48,51 + 1,05
2	101,52 + 3,03	52,52 + 1,34
3	82,41 + 2,03	52,56 + 1,34
4	70,59 + 1,13	50,57 + 1,85

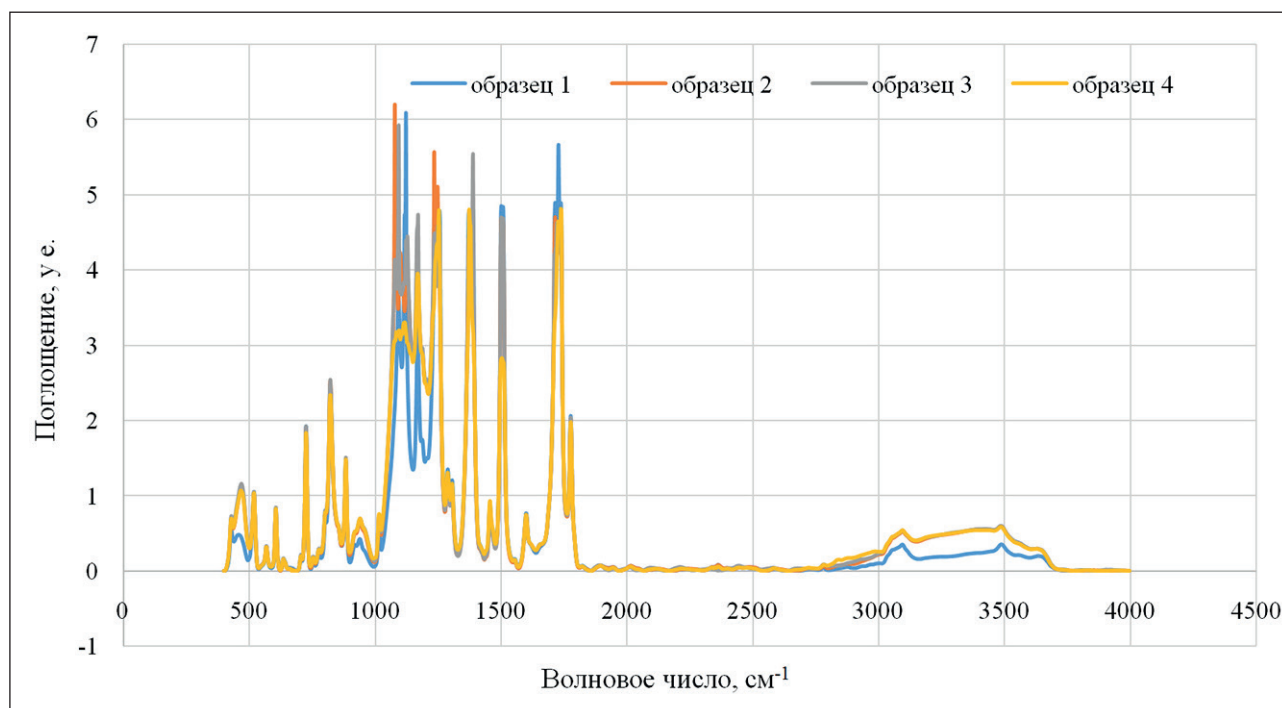


Рис. 9. ИК-Фурье спектры немодифицированной и модифицированной лазером композитной пленки

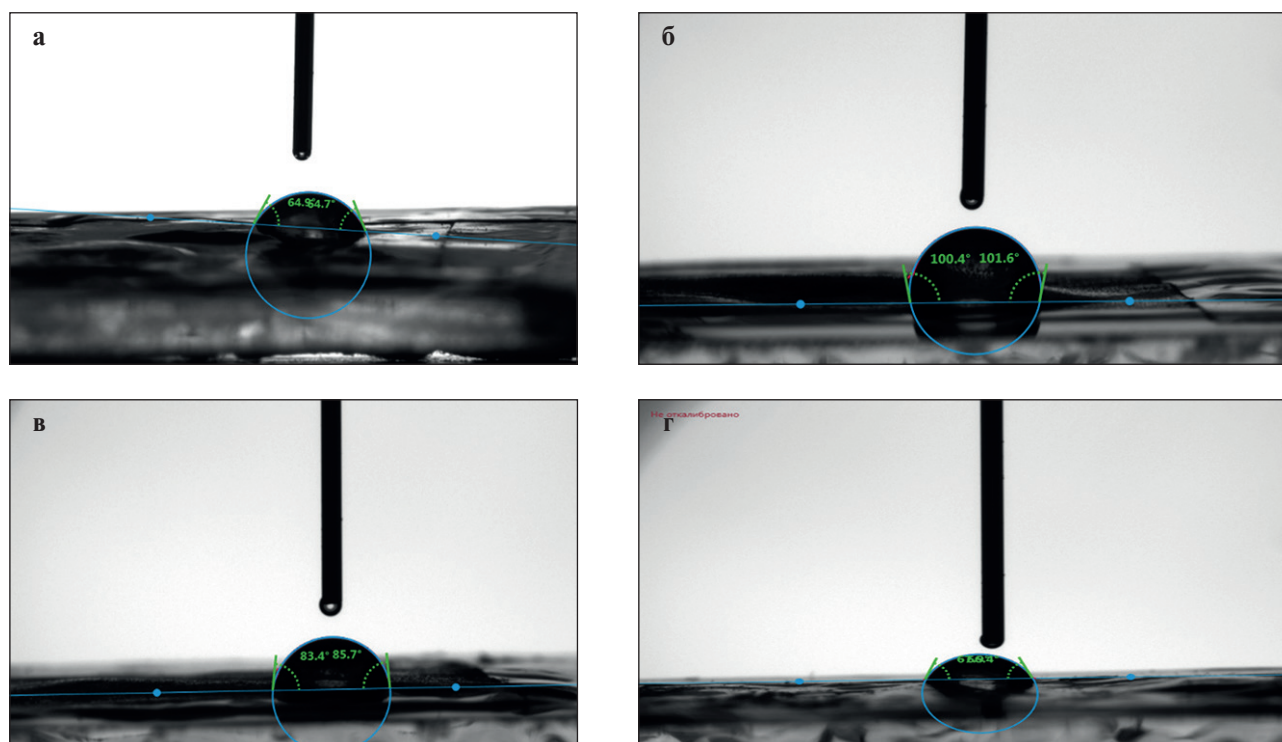


Рис. 10. Фотографии капли воды на немодифицированных (а) и модифицированных лазером композитных пленках в режиме 2 (б), в режиме 3 (в), в режиме 4 (г)

Таблица 6

Данные по свободной энергии поверхности, дисперсной и полярной части

Образец	Дисперсная часть [мН/м]	Полярная часть [мН/м]	Свободная энергия поверхности [мН/м]
1	35,10 + 2,06	10,47 + 1,27	45,57 + 2,34
2	32,86 + 4,53	2,77 + 1,21	35,63 + 1,51
3	32,83 + 4,50	4,09 + 1,21	36,96 + 1,52
4	33,96 + 1,64	8,89 + 2,01	42,84 + 1,67

Анализ полученных данных показывает тенденцию снижения гидрофильности композитной пленки с увеличением мощности воздействия на нее от 60% до 100% при прочих равных характеристиках. Наибольшая разница показаний смачиваемости наблюдается между немодифицированной композитной пленкой – $\theta = 66,75 \pm 1,55^\circ$ и мембраной, облученной на мощности 100% – $\theta = 101,52 \pm 3,03^\circ$. Гидрофильные свойства образца были изменены на гидрофобные.

Так, образец, облученный на втором режиме из табл. 4, показал увеличение гидрофобности на 52,01% по сравнению с немодифицированным образцом, гидрофильность образца 3 уменьшилась на 23,46% в сравнении с исходным, а гидрофиль-

ность 4 образца уменьшилась на 5,75%. Данные по свободной энергии поверхности, дисперсной и полярной части представлены в табл. 6.

Поверхностная энергия характеризуется как энергия межмолекулярного взаимодействия частиц на границе раздела фаз с частицами каждой из контактирующих фаз. Как видно из табл. 6, свободная энергия тем меньше, чем выше значение краевого угла смачивания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана композитная полиимидная пленка на основе полиимидной трековой мембраны, заполненная нанодисперсным оксидом кремния с улучшенными

оптическими характеристиками и водопоглощением. Подобраны оптимальные режимы воздействия итербиевого импульсного волоконного лазера и показана зависимость параметра мощности воздействия на свойства композитной пленки.

Модифицирование поверхности композитного материала приводит к увеличению краевого угла смачивания от $\theta=66,75\pm 1,55^\circ$ до $\theta=101,52\pm 3,03^\circ$. Таким образом, материал приобретает гидрофобные свойства.

Также модифицирование пленок лазером оказывает положительный эффект на коэффициент пропускания пленок, который увеличивается. Наибольшие изменения наблюдаются в инфракрасной области излучения, средний прирост пропускания составляет +70,48%.

Необходимо продолжать исследования для отработки иных режимов лазерного воздействия с целью изменения характеристик наполненной мембраны, что позволит расширить области ее применения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Cherkashina N.I., Pavlenko V.I., Noskov A.V. Synthesis and property evaluations of highly filled polyimide composites under thermal cycling conditions from -190°C to $+200^\circ\text{C}$. *Cryogenics*. 2019; 104: 102995. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2019.102995>
2. Забегаева О.Н., Сапожников Д.А., Выгодский Я.С. Молекулярные композиты на основе полиимидов // *Высокомолекулярные соединения*. 2020. 2. 186–199. <https://doi.org/10.31857/S230811472002017X>
3. Ma J., Liu X., Wang R., Lu C., Wen X., Tu G. Research Progress and Application of Polyimide-Based Nanocomposites. *Nanomaterials*. 2023; 13(4): 656. <https://doi.org/10.3390/nano13040656>
4. Malinský P, Romanenko O, Havránek V, Cutroneo M, Novák J, Štěpanovská E, Mikšová R, Marvan P, Mazánek V, Sofer Z, Macková A. Graphene Oxide and Polymer Humidity Micro-Sensors Prepared by Carbon Beam Writing. *Polymers*. 2023; 15(5): 1066. <https://doi.org/10.3390/polym15051066>
5. Yang S.-Y. (Ed.) *Advanced Polyimide Materials: Synthesis, Characterization, and Applications*; Elsevier: Saint Louis, MI, USA; 2018.
6. Gouzman I., Grossman E., Verker R., Atar N., Bolker A., Eliaz N. Advances in Polyimide-Based Materials for Space Applications. *Adv Mater*. 2019; 31(18): 1807738. <https://doi.org/10.1002/adma.201807738>
7. Iwasa R., Suizu T., Yamaji H., Yoshioka T., Nagai K. Gas separation in polyimide membranes with molecular sieve-like chemical/physical dual crosslink elements onto the top of surface. *Journal of Membrane Science*. 2018; 550: 80-90. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.12.064>
8. Radzyńska-Lenarcik E, Pyszka I, Urbaniak W. The Use of Polymer Membranes for the Recovery of Copper, Zinc and Nickel from Model Solutions and Jewellery Waste. *Polymers*. 2023; 15(5): 1149. <https://doi.org/10.3390/polym15051149>
9. Kozlovskiy A., Borgekov D., Kenzhina I. et al. PET Ion-Track Membranes: Formation Features and Basic Applications. *Nanocomposites, Nanostructures, and Their Applications. NANO 2018. Springer Proceedings in Physics*. 2019; 221: 461-479. https://doi.org/10.1007/978-3-030-17759-1_31
10. Pe'py G., Boesecke P., Kuklin A., et al. Cylindrical nanochannels in ion-track polycarbonate membranes studied by small-angle X-ray scattering. *Applied Crystallography*. 2007; 40: 388-392. <https://doi.org/10.1107/S0021889807000088>
11. Tianji Ma, Jean-Marc Janot, Sebastien Balme Track-Etched Nanopore/Membrane: From Fundamental to Applications. *Small Methods*. 2020; 4 (9): 2000366. <https://doi.org/10.1002/smt.202000366>
12. Jian-Xin Yang, Zhi-Bo He, Shi-Lun Guo Identification and harmfulness analysis of solid particles contained in medical injections and their removal by nuclear track membranes. *Perspectives in Science*. 2019; 12: 100399. <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2019.100399>
13. Nana Jin, Li Xue, Ying Ding, Yingjia Liu, Fan Jiang, Ming Liao, Yanbin Li, Jianhan Lin A microfluidic biosensor based on finger-driven mixing and nuclear track membrane filtration for fast and sensitive detection of Salmonella. *Biosensors and Bioelectronics*. 2023; 220: 114844. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.114844>
14. Zhi-Bo He, S.-L. Guo, Applications of Nuclear Track Membranes to Filtration of Medical Injections and Various Transfusions to Remove Solid Particles. *Physics Procedia*. 2015; 80: 131-134. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.11.081>
15. Босых Е.О., Сохорева В.В., Пичугин В.Ф. Исследование возможности применения ядерных трековых мембран для офтальмологии // *Мембраны и мембранные технологии*. 2014. 4 (4). 267.

16. Calvo J.I., Bottino A., Capannelli G., Hernández A. Comparison of liquid–liquid displacement porosimetry and scanning electron microscopy image analysis to characterise ultrafiltration track-etched membranes. *Journal of Membrane Science*. 2004; 239 (2): 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2004.02.038>
17. Виноградов И.И., Нечаев А.Н., Арно Россоу Композитные мембраны на основе трековой мембраны и нанокаркасов хитозана. Наука России: Цели и задачи. Сборник научных трудов по материалам XXVII международной научно-практической конференции 10 июня 2021 г. 2021. 152 с. <https://doi.org/10.18411/sr-10-06-2021-26>
18. Khlebnikov N.A., Polyakov E.V., Borisov S.V., Shepatkovskii O.P., Krasil'nikov V.N. Application of Nanocomposite Track Membranes for Electron Microscopy Samples Preparation. *Advanced Materials Research*. 2014; 1082: 51–56. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1082.51>
19. Al Harby NF, El-Batouti M, Elewa MM. Prospects of Polymeric Nanocomposite Membranes for Water Purification and Scalability and their Health and Environmental Impacts: A Review. *Nanomaterials*. 2022; 12(20): 3637. <https://doi.org/10.3390/nano12203637>
20. Wu T., Dong J., Gan F., Fang Y., Zhao X., Zhang Q. Low dielectric constant and moisture-resistant polyimide aerogels containing trifluoromethyl pendent groups. *Applied Surface Science*. 2018; 440: 595–605. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.132>
21. Yin J, Mao D, Fan B. Copolyamide-Imide Membrane with Low CTE and CME for Potential Space Optical Applications. *Polymers*. 2021; 13(7): 1001. <https://doi.org/10.3390/polym13071001>
22. Mao D., Lv G., Gao G., Fan B. Fabrication of polyimide films with imaging quality using a spin-coating method for potential optical applications. *Journal of Polymer Engineering*. 2019; 39(10): 917–925. <https://doi.org/10.1515/polyeng-2019-0177>
23. Jiang H., Xu L., Chen G., Fang X. Aqueous Solution Blending Route for Preparing Flexible and Antistatic Polyimide/Carbon Nanotube Composite Films with Core-Shell Structured Polyimide/Graphene Microspheres. *Polym. Compos*. 2022; 43: 6062–6073.
24. Zhou X., Ding C., Cheng C., Liu S., Duan G., Xu W., Liu K., Hou H. Mechanical and Thermal Properties of Electrospun Polyimide/Rgo Composite Nanofibers Via in-Situ Polymerization and in-Situ Thermal Conversion. *European Polymer Journal*. 2020; 141: 110083. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.110083>
25. Майникова Н.Ф., Ярмизина А.Ю., Трофимов Д.В., Костромина Н.В., Кравченко Т.П., Яковлева К.А. Исследование влияния углеродных нанонаполнителей на свойства композитов на основе полипропилена // *Пластические массы*. 2020. 3–4. 23–25. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2020-3-4-23-25>
26. Козлов Г.В., Долбин И.В. Сравнительный анализ эффективности углеродных нанотрубок и графена в армировании полимерных нанокомпозитов // *Журнал технической физики*. 2020. 62 (8). 1240–1243. <https://doi.org/10.21883/FTT.2020.08.49608.078>
27. Huo M., Hu Y., Xue Q., Huang J, Xie G. Solution-Processed Large-Area Organic/Inorganic Hybrid Antireflective Films for Perovskite Solar Cell. *Molecules*. 2023; 28(5): 2145. <https://doi.org/10.3390/molecules28052145>
28. Pavlenko V.I., Zabolotny V.T., Cherkashina N.I., Edamenko O.D. Effect of vacuum ultraviolet on the surface properties of high-filled polymer composites. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2014; 5(3): 219–223. <https://doi.org/10.1134/S2075113314030137>
29. Hsiao Y.-S., Chang-Jian C.-W., Uang T.-Y., Chen Y.-L., Huang C.-W., Huang J.-H., Wu N.-J., Hsu S.-C., Chen C.-P. Lightweight Flexible Polyimide-Derived Laser-Induced Graphenes for High-Performance Thermal Management Applications. *Chemical Engineering Journal*. 2023; 451(3): 138656. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138656>
30. Pavlenko V.I., Cherkashina N.I. Synthesis of hydrophobic filler for polymer composites. *International Journal of Engineering and Technology*. 2018; 7(2): 493–495. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.15341>
31. Xing S., Pan Z. Wu X., Chen H., Lv X., Li P., Liu J., Zhai J. Enhancement of Thermal Stability and Energy Storage Capability of Flexible Ag Nanodot/Polyimide Nanocomposite Films Via in Situ Synthesis. *Journal of Materials Chemistry*. 2020; 8(36): 12607–12614. <https://doi.org/10.1039/D0TC02516J>
32. Yadav D., Borpatra G. M., Karki S., Ingole P.G. A Novel Approach for the Development of Low-Cost Polymeric Thin-Film Nanocomposite Membranes for the Biomacromolecule Separation. *ACS Omega*. 2022; 7(51): 47967–47985. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05861>
33. Borpatra Gohain M., Karki S., Yadav D., Yadav A., Thakare N.R., Hazarika S., Lee H.K., Ingole P.G. Development of Antifouling Thin-Film Composite/Nanocomposite Membranes for Removal of Phosphate and Malachite Green Dye. *Membranes*. 2022; 12(8): 768. <https://doi.org/10.3390/membranes12080768>
34. Nam V.B., Shin J., Choi A., Choi H., Ko S.H., Lee D. High-Temperature, Thin, Flexible and Transparent Ni-Based Heaters Patterned by Laser-Induced Reductive Sintering on Colorless Polyimide. *Journal of Materials Chemistry*. 2021; 9(17): 5652–5661. <https://doi.org/10.1039/D1TC00435B>

35. Zhang Y., Ma Z., Ruan K., Gu J. Multifunctional $Ti_3C_2Tx-(Fe_3O_4/Polyimide)$ Composite Films with Janus Structure for Outstanding Electromagnetic Interference Shielding and Superior Visual Thermal Management. *Nano Research*. 2022; 15(6): 5601–5609. <https://doi.org/10.1007/s12274-022-4358-7>
36. Jun Xu, Guojun Zhang, Congyi Wu, Weinan Liu, Tian Zhang, Yu Huang, Youmin Rong Organic solvent assisted laser processing of transparent polymer films based on the swelling and penetration behavior. *Optics & Laser Technology*. 2022; 150: 107937. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.107937>
37. Yastrebinsky R.N., Pavlenko V.I., Matukhin P.V., Cherkashina N.I., Kuprieva O.V. Modifying the surface of iron-oxide minerals with organic and inorganic modifiers. *Middle East Journal of Scientific Research*. 2013; 18(10): 1455–1462. <https://doi.org/10.5829/idosi.mejsr.2013.18.10.7098>
38. Anwer G., Acherjee B. Laser polymer welding process: Fundamentals and advancements. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 61(1): 34-42. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.307>
39. Matyukhin P.V., Pavlenko V.I., Yastrebinsky R.N., Cherkashina N.I. The high-energy radiation effect on the modified iron-containing composite material. *Middle East Journal of Scientific Research*. 2013; 17 (9): 1343–1349. <https://doi.org/10.5829/idosi.mejsr.2013.17.09.70100>
40. Mishra L., Mishra D., Mahapatra T.R. Optimization of process parameters in Nd:YAG laser micro-drilling of graphite/epoxy based polymer matrix composite using Taguchi based Grey relational analysis. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 62(14): 7467-7472. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.501>
41. Dahmen M., Vedder C., Baek S., Stollenwerk J. Dual-beam laser-based processing of tribological polymer coatings. *Procedia CIRP*. 2022; 11: 257-260. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.08.061>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Черкашина Наталья Игоревна – доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник-руководитель научно-исследовательской лаборатории «Разработка научно-технических основ создания полимерных систем из возобновляемого растительного сырья», Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, natalipv13@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0161-3266>

Павленко Вячеслав Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная химия», Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, belpavlenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3464-1880>

Городов Андрей Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная химия», Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, gorodov-andreyu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5530-3282>

Рыжих Дарья Александровна – младший научный сотрудник, аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная химия», Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, sinebokd@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8886-6022>

Форова Елена Витальевна – инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории «Разработка научно-технических основ создания полимерных систем из возобновляемого растительного сырья», Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, unir.bstu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7510-3547>.

ВКЛАД АВТОРОВ

Черкашина Н.И. – научное руководство; постановка целей и задач исследования; анализ результатов исследования; доработка текста статьи.

Павленко В.И. – составление плана экспериментальных работ; анализ результатов исследования; выводы статьи.

Городов А.И. – разработка методологии исследования; анализ результатов исследований; графическое и табличное представление результатов.

Рыжих Д.А. – проведение экспериментальной части исследования; анализ результатов исследования; графическое и табличное представление результатов; написание первоначального текста статьи.

Форова Е.В. – проведение литературного обзора; проведение экспериментальной части исследования,

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 28.02.2023; одобрена после рецензирования 27.03.2023; принята к публикации 31.03.2023.