

DOI: 10.18721/JPM.14301
УДК 53.08

ТЕРМОАКТИВАЦИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПЛЕНОК ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА, ОБЛУЧЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ КСЕНОНА

**Ю.А. Гороховатский¹, Д.Э. Темнов¹,
Н.С. Шабанова¹, А.Н. Нечаев², А. Россоу²**

¹ Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,
Санкт-Петербург, Российская Федерация;

² Объединенный институт ядерных исследований,
г. Дубна Московской области, Российская Федерация

Методом термостимулированной токовой спектроскопии в работе проанализировано электретное состояние в облученных на циклотроне пленках полиэтилентерефталата. Изучено поведение термостимулированных токов деполяризации в образцах пленок, полученных на разных технологических стадиях изготовления трековых мембран. Результаты исследования указывают на существенное изменение спектров энергетических состояний электрического заряда, накопленного при поляризации пленок после их облучения ускоренными тяжелыми ионами ксенона, затем последующей ультрафиолетовой обработки и щелочного травления латентных треков. С помощью метода Эйринга рассчитаны параметры релаксационных процессов (энергия активации и эффективный частотный фактор), возникающих в трековых мембранах. Указанные существенные изменения спектров свидетельствуют о возможности создания электретного состояния в облученных пленках и трековых мембранах на их основе.

Ключевые слова: электрет, трековая мембрана, полиэтилентерефталат, термостимулированный ток деполяризации, метод Эйринга

Ссылка при цитировании: Гороховатский Ю.А., Темнов Д.Э., Шабанова Н.С., Нечаев А.Н., Россоу А. Термоактивационная спектроскопия пленок полиэтилентерефталата, облученных тяжелыми ионами ксенона // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2021. Т. 14. № 3. С. 8–20. DOI: 10.18721/JPM.14301

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

THERMOACTIVATED CURRENT SPECTROSCOPY OF POLYETHYLENE TEREPHTHALATE FILMS IRRADIATED BY HEAVY XENON IONS

**Yu.A. Gorokhovatsky¹, D.E. Temnov¹,
N.S. Shabanova¹, A.N. Nechaeff², A. Rossouw²**

¹ Herzen State Pedagogical University of Russia,
St. Petersburg, Russian Federation;

² Joint Institute for Nuclear Research,
Dubna of Moscow region, Russian Federation

The paper analyzes the electret state of polyethylene terephthalate (PET) films irradiated on the IC-100 cyclotron (JINR LAR) using thermostimulated spectroscopy methods. Thermally stimulated discharge currents (thermally stimulated depolarization) of PET film samples obtained at different technological stages of track membrane manufacturing are studied. The results of the analysis of thermally stimulated



depolarization currents indicate a significant change in the spectra of the energy states of the electric charge accumulated during the polarization of PET films, during irradiation with accelerated heavy Xe ions, ultraviolet treatment, and alkaline etching of latent tracks. The parameters of relaxation processes (activation energy and effective frequency factor) occurring in track membranes are calculated using the Eyring method. A significant change in the energy state spectra of the electric charge accumulated during the polarization of PET films as a result of ion-track processes in them indicates the possibility of creating an electret state in PET films and track membranes irradiated with heavy ions on their basis.

Keywords: electret, track membrane, polyethylene terephthalate, thermal-stimulated discharge current, Eyring method

Citation: Gorokhovatsky Yu.A., Temnov D.E., Shabanova N.S., Nechaeff A.N., Rossouw A., Thermoactivated current spectroscopy of polyethylene terephthalate films irradiated by heavy xenon ions, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 14 (3) (2021) 8–20. DOI: 10.18721/JPM.14301

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Результаты фундаментальных и прикладных исследований, полученные в последнее время с использованием пучков тяжелых ионов низких и средних энергий, убедительно свидетельствуют об актуальности и перспективности применения тяжелых ионов в наукоемких промышленных технологиях. Изучение фундаментальных физических процессов взаимодействия частиц с твердым телом лежит в основе их практического использования для радиационно-ионной модификации материалов [1].

Пучки ускоренных тяжелых ионов можно использовать как уникальный инструмент для преобразования нано- и микроструктуры твердых тел, в том числе для получения трековых мембран [2 – 4, 7].

Создание полимерных трековых мембран с помощью ускорителей тяжелых ионов – это одно из важнейших направлений применения ионно-трековых технологий. Трековые мембраны, полученные на основе полиэфирных пленок из полиэтилентерефталата (ПЭТФ) и поликарбоната (ПК) эффективно используются в процессах глубокой переработки воды, в биотехнологии для получения вакцин и сывороток, в медицине в качестве ключевого фильтрующего элемента плазмодифильтров, в аналитической химии и санитарно-биологическом анализе окружающей среды [10, 11].

Современные трековые мембраны в основном получают на основе пленок из полиэфиров, таких как полиэтилентерефталат (ПЭТФ) и поликарбонат. Так, ПЭТФ – полимер, который представляет собой сложный термопластичный полиэфир терефталевой кислоты и этиленгликоля. Пленки ПЭТФ, из которых изготавливают трековые мембраны, представляют собой композицию, структура которой включает как аморфную, так и кристаллическую фазы. ПЭТФ в аморфном состоянии характеризуется взаимным беспорядочным расположением цепей макромолекул с единичными отдельными образованиями упорядоченной структуры. Кристаллическое состояние ПЭТФ характеризуется наличием в материале кристаллитов – сложенных пучков макромолекул в виде складчатых пачек. Размер кристаллитов в пленках составляет около 5 – 10 нм, а степень кристалличности – примерно 40 – 50 %.

Структурные и физико-химические характеристики трековых мембран на основе ПЭТФ, облученных тяжелыми ионами, зависят от параметров ионного пучка, химического состава облучаемой полимерной пленки и ее структуры, а также методов физико-химической обработки в ней латентных треков. Формирование трека тяжелого иона в полимерном материале является комплексным физико-химическим процессом. Высокоэнергетичный многозаряд-

ный ион, проходя через пленку ПЭТФ, вступает в кулоновское взаимодействие с его электронной подсистемой. В результате облучения тяжелыми ионами наблюдается аморфизация ПЭТФ и уменьшение размеров кристаллитов. Кроме того, деструкция макромолекул ПЭТФ сопровождается ростом числа карбоксильных групп в полимере [8, 9].

Треки в ПЭТФ обладают способностью к избирательному химическому травлению при воздействии водных растворов щелочных металлов. В сложноэфирных полимерах, в том числе в ПЭТФ, протекает химическая реакция взаимодействия травителя с разрывом сложноэфирных связей, отщеплением молекул этиленгликоля и терефталат-иона с образованием на поверхности карбоксильной и гидроксильной групп, определяющих отрицательный электрический заряд поверхности материала. В целях повышения избирательности травления треков используют метод фотоокисления продуктов радиолиза в треках под действием «мягкого» ультрафиолетового (УФ) излучения в присутствии кислорода [4, 5, 12, 15].

Следует отметить, пленки из ПЭТФ также используются для производства электретов с устойчивым электрическим зарядом. Электрет представляет собой диэлектрик, длительное время сохраняющий поляризованное состояние после снятия внешнего воздействия, которое привело к поляризации этого диэлектрика, и создающий в окружающем пространстве квазипостоянное электрическое поле. Электретное состояние присуще в разной мере всем диэлектрикам, в том числе и ПЭТФ.

Анализ литературных источников показал, что методы ионно-трекового электретирования полимерных пленок изучены недостаточно. Можно предположить, что в результате бомбардировки ускоренными тяжелыми ионами, по аналогии с представленными выше воздействиями УФ-облучения и щелочного травления треков, будут также изменяться электретные свойства полимерной пленки. Это будет связано с изменением морфологии и химической структуры ПЭТФ пленки после воздействия на нее как процессов ионизирующего излучения, так и высокощелочного термического гидролиза.

Для анализа влияния ионно-трековой обработки ПЭТФ на изменение электретных свойств, в представленной работе с помощью методов термостимулированной деполяризации исследовались изменения свойств трековых мембран на основе полиэтилентерефталата (ПЭТФ) [17 – 21].

Термоактивационная токовая спектроскопия широко применяется для исследования процессов электрической релаксации и, в частности, электретного состояния в различных диэлектрических материалах [17 – 22]. Одним из наиболее популярных методов термоактивационной спектроскопии, применяемым для исследования релаксации заряда в электретах, является метод термостимулированного тока разрядки, или термостимулированной деполяризации (ТСД). Измерение термостимулированных токов разрядки осуществляется в режиме короткого замыкания внешней цепи (т. е. в случае, когда сопротивление внешней измерительной цепи много меньше сопротивления исследуемого диэлектрика). Анализ формы кривой ТСД (температурная зависимость начального участка пика тока, температурное положение максимума тока и т. п.) позволяет определить на основе экспериментальных данных наиболее вероятную энергию активации электрически активных дефектов и их эффективный частотный фактор (способы обработки данных ТСД подробно описаны в статье [21]).

В качестве мотивации представленной работы следует отметить, что авторы ставят задачу понять, как изменяются свойства заряженной поверхности пленок ПЭТФ и трековых мембран на их основе, для того чтобы расширить спектр их практического применения. Трековые мембраны, обладающие свойствами электрета, могут найти дальнейшее применение в преобразователях различного назначения, например в системах герметизации, в фильтрах и мембранах, в биомедицинской технологии.

Материалы и методы

Образцы были изготовлены из пленки ПЭТФ марки Hostaphan RNK толщиной 30 мкм производства компании Mitsubishi Polyester Films (Германия). Облучение ионами ксенона $^{132}\text{Xe}^{+26}$ проводилось пучком с энергией 1,16 МэВ под углами $\pm 35^\circ$ последовательно с каждой стороны на циклотроне ИЦ-100 Лаборатории ядерных реакций имени Г.Н. Флёрва Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна Московской области, Россия). Длина пробега иона в ПЭТФ составляла около 20 мкм. Поверхностная плотность пор с каждой стороны составляла $N = 4,5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$. После циклотронного облучения, перед химическим травлением все образцы подвергали действию УФ-излучения в течение 2 ч с каждой стороны. УФ-излучение выполняли на воздухе, применяя лампы ЛЭ-30 (производства завода «Лисма», г. Саранск, Россия); в качестве фильтра использовали исходную ПЭТФ-пленку, периодически заменяя ее на свежую. Интенсивности УФ-излучения, измеренные радиометром ТПК-ПКМ, составляли 3 – 4 Вт/м² в диапазоне УФ-А (315 – 400 нм) и 1 Вт/м² в диапазоне УФ-В (280 – 315 нм). Плотность нано- и микропор на поверхности определяли с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) Hitachi SU8020. Помимо этого, исследовали под указанным микроскопом сколы мембран, полученных при помощи техники охрупчивания полимерной матрицы мягким фотоокислением.

В данной работе методом термостимулированной деполяризации были исследованы различные образцы пленок ПЭТФ и трековых мембран на его основе.

Образцы № 1 – № 6 сначала облучали УФ-светом; время экспозиции составляло по 2 ч с каждой стороны пленки. Затем их подвергали химическому травлению. Последнее проводили в термостате при температуре 80 °С при концентрации раствора гидроксида натрия NaOH, равной 1 моль/л в течение разных периодов времени: от 1 до 6 мин.

Измерения диаметра пор на поверхности образцов проведены методом РЭМ, и результаты представлены в табл. 1.

Для измерения термостимулированных токов деполяризации использовалась установка TSC-II фирмы Setaram (Франция).

Процесс измерения токов деполяризации образцов включал в себя следующие этапы:
 поляризация образцов при постоянной температуре $T_p = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ в электрическом поле напряженностью 5 кВ/мм в течение времени $t_p = 0,5 \text{ мин}$;
 их охлаждение со скоростью 4 °С/мин в электрическом поле до достижения температуры $T_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$;

Т а б л и ц а 1

**Структурные характеристики облученных пленок ПЭТФ
после травления в щелочных растворах**

Номер образца	Время травления, мин	Средний диаметр пор на поверхности, нм	Данные РЭМ
1	1,0	25	Нет сквозного протравливания
2	2,0	36	
3	3,0	57	
4	4,0	78	
5	5,0	160	Сквозное протравливание
6	6,0	232	

П р и м е ч а н и е. Образцы № 7, 8, 9 – исходные пленки, не подвергнутые травлению; образец № 8 был экспонирован УФ-лучами, образец № 9 – УФ-лучами и ионами ксенона.

их выдержка при температуре T_0 в отсутствие электрического поля в течение времени $t_0 = 1$ мин;

нагревание образцов с заданной скоростью (4, 7 или 9 К/мин) до температуры $T_f = 130$ °С с одновременным измерением токов деполяризации (использовался электромметр Keithley 6517E).

С целью исключения доступа кислорода к образцам, все измерения проводились в вакуум-камере в атмосфере газообразного гелия.

Экспериментальные результаты

В работе были исследованы образцы, полученные на разных стадиях изготовления трековых мембран (см. процедуру работы с образцами в предыдущем разделе), а также проводилось сравнение результатов с соответствующими данными по исходной полимерной пленке ПЭТФ.

На рис. 1 представлены кривые ТСД исходной полимерной пленки, полученные при двух различных скоростях нагревания образца.

На представленных зависимостях отчетливо наблюдается несколько максимумов, связанных с релаксационными процессами, которые, как правило, относятся к различным молекулярным движениям внутри полимера:

высокотемпературный α -процесс (дипольно-сегментальный) в области 90 °С, обусловленный ориентационными поворотами полярных звеньев макромолекулы в условиях, когда возможно сегментальное движение, т. е. в высокоэластическом состоянии;

β - и γ -процессы (дипольно-групповые) в областях температуры 60 и 25 °С соответственно, обусловленные подвижностью концевых и боковых полярных групп макромолекул (они могут проявляться и в стеклообразном состоянии).

Для определения энергии активации этих процессов использована методика, согласно которой применяются различные линейные скорости нагревания образца и затем используются численные методы решения на основе регуляризирующих алгоритмов Тихонова – Арсеньева. Нахождение искомым параметров – частотного фактора ω и энергии E активации электрически активных дефектов (ЭАД) по экспериментальной зависимости означает в математическом плане решение следующего интегрального уравнения:

$$j(T) \sim \int_0^{\omega_m} d\omega \int_0^{E_m} G(E, \omega) \xi(E, \omega, T, \beta) dE, \quad (1)$$

где T – температура образца; β – скорость его нагревания; $G(E, \omega)$ – функция распределения ЭАД; $\xi(E, \omega, T, \beta)$ – подынтегральная функция, конкретный вид которой определяется физической моделью, заложенной в теорию явления термостимулированной деполяризации.

Анализ уравнения (1) показывает, что решение данной задачи возможно только в том случае, если известно значение частотного фактора ω . Однако на практике эта величина неизвестна заранее и решение оказывается неоднозначным. Чтобы обойти указанную трудность, в статье [5] предложен способ сопоставления энергетических спектров, которые численно восстановлены по кривым тока ТСД, измеренным для данного образца при двух скоростях нагревания и прочих равных условиях. Если значение частотного фактора выбрано правильно, то виды энергетических спектров не должны различаться для разных скоростей нагревания. Напротив, различие восстановленных спектров для разных скоростей нагревания свидетельствует о необходимости подбора другого значения частотного фактора.

Таким образом, применение данной методики позволяет с достаточной степенью достоверности определять параметры ЭАД в исследуемом материале даже в случае, когда наблю-

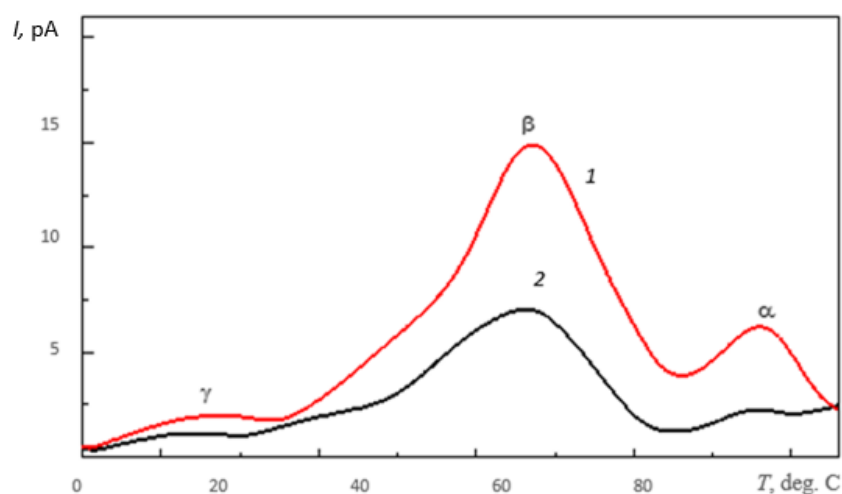


Рис. 1. Спектры ТСД исходных пленок ПЭТФ при двух скоростях нагревания образцов: 9 К/мин (1) и 7 К/мин (2)

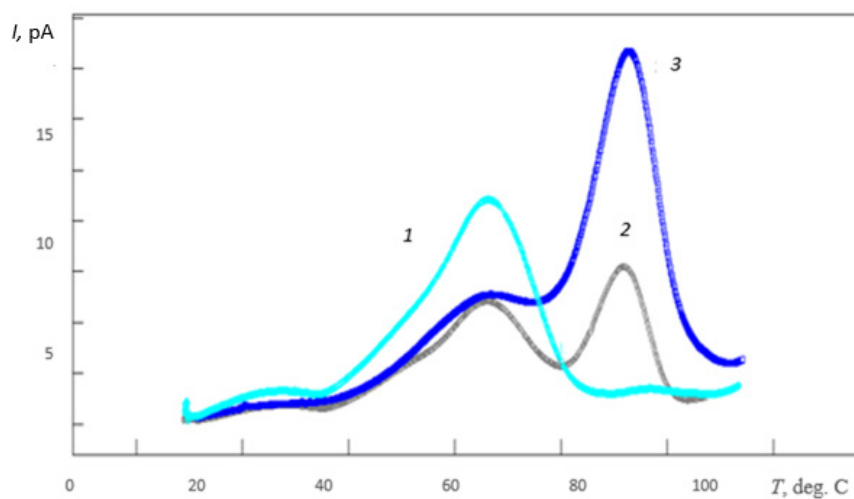


Рис. 2. Спектры ТСД пленок исходного ПЭТФ (1), облученного ионами ксенона (2) и затем УФ-фотонами (3) при скорости нагревания образцов 7 К/мин

даемые в нем релаксационные процессы не являются моноэнергетическими, а электрически активные дефекты имеют сложное энергетическое распределение.

Энергии активации релаксационных процессов по результатам обработки спектров ТСД оказались равными (в эВ): 1,24, 0,93 и 0,45; они также соответствуют уменьшению температуры максимума деполяризационного пика.

Облучение пленок ПЭТФ ионами ксенона и фотонами УФ-диапазона существенно увеличивает интенсивность α -релаксации, что означает увеличение сегментальной подвижности полярных звеньев макромолекул в облученных образцах (рис. 2), что, по-видимому, обусловлено аморфизацией образцов при облучении ионами [17].

Дальнейшее травление пленок с увеличением его продолжительности от 0,5 до 6 мин существенно меняет спектр токов ТСД как по температурной шкале, так и по интенсивности

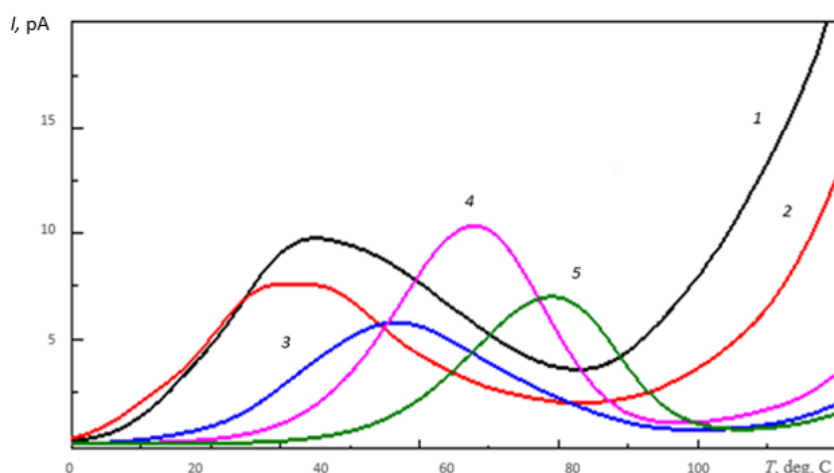


Рис. 3. Спектры ТСД пленок ПЭТФ, облученных ионами ксенона и УФ-фотонами при последующем химическом травлении образцов № 1 – № 5 (номера кривых соответствуют номерам образцов).
Скорость нагревания образцов – 7 К/мин

(рис. 3). Можно предположить, что в этом случае наиболее существенным для релаксации заряда становится другой процесс, связанный, по всей видимости, сначала с образованием зарядовых ловушек на стенках треков, а затем с их опустошением.

Как видно из данных, приведенных на рис. 3, максимум токов ТСД смещается в высокотемпературную область с увеличением времени травления, а его интенсивность остается примерно одинаковой.

Для всех использованных времен травления были вычислены параметры данного релаксационного процесса: энергия активации и эффективный частотный фактор (табл. 2); для этого применялся метод Эйринга [6].

Как известно [4], увеличение времени травления приводит к увеличению среднего диаметра пор, образуемых в трековых мембранах. Это подтверждается данными, представленными в табл. 2.

Можно обратить внимание, что зависимость энергии активации от среднего диаметра пор практически линейна (рис. 4,*a*), а соответствующая зависимость эффективного частотного фактора носит ярко выраженный нелинейный характер (рис. 4,*b*).

Т а б л и ц а 2

Параметры дипольно-группового релаксационного процесса, наблюдаемого в пленках ПЭТФ при различных временах травления

Время травления, мин	Средний диаметр пор, нм	Энергия активации, эВ	Эффективный частотный фактор, 10^{10} с^{-1}
1	36	0,70	2,4
2	57	0,73	4,4
3	78	0,76	5,4
4	160	0,88	150
5	232	0,97	1100

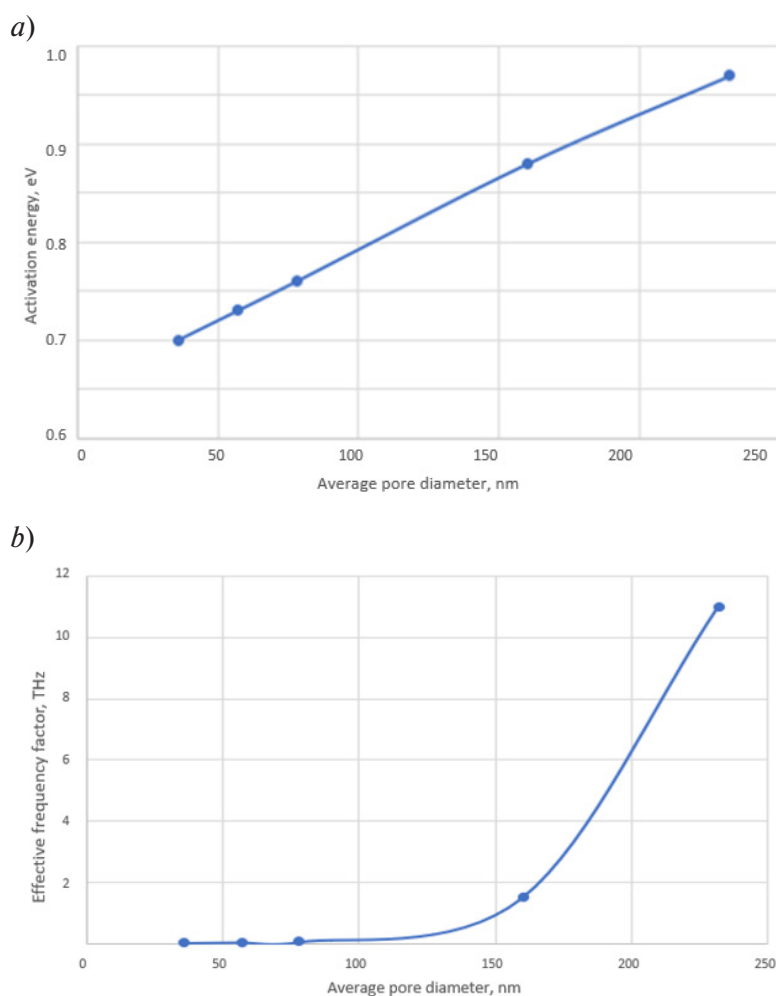


Рис. 4. Зависимости энергии активации (а) и эффективного частотного фактора (б) от среднего диаметра пор при увеличении времени травления образцов

Резкий рост частотного фактора при увеличении среднего диаметра пор, по всей видимости, может свидетельствовать об образовании сквозных пор в пленках ПЭТФ при времени травления, достаточном для этого явления, и об увеличении свободного объема полимера. Рост энергии активации позволяет предположить, что при увеличении времени травления происходит образование все более и более глубоких ловушек носителей заряда.

С помощью метода релаксационных карт [7] была рассчитана степень разупорядоченности полимерной системы. При увеличении времени травления она возрастает с 25,2 (время травления 1 мин) до 36,6 (это время составляет 5 мин), и это означает, что степень разупорядоченности может служить характеристикой общего объема «рыхлого» полимера вдоль стенок пор, образующегося в процессе травления.

Заключение

Метод термоактивационной спектроскопии впервые был применен в настоящем исследовании к трековым мембранам, изготовленным на основе пленок ПЭТФ. Показано существенное влияние процессов ионно-трековой технологии, таких как облучение тяжелыми ионами ксенона $^{132}\text{Xe}^{+26}$, УФ-сенсibilизация и травление треков пленок ПЭТФ, на спектры токов ТСД. По полученным спектроскопическим данным рассчитаны значения параме-

тров релаксаторов, а также степень разупорядоченности полимерной системы для трековых мембран с различным диаметром пор. Для исходных ПЭТФ-пленок отчетливо наблюдается несколько релаксационных процессов, которые, как правило, связываются исследователями с различными молекулярными движениями внутри полимера; в частности, имеет место высокотемпературный процесс (дипольно-сегментальный) в области температур 90 °С, который обусловлен ориентационными поворотами полярных звеньев макромолекулы в условиях, когда возможно сегментальное движение. Облучение пленок ПЭТФ ионами ксенона и УФ-фотонами существенно увеличивает интенсивность α -релаксации, что означает увеличение сегментальной подвижности в облученных образцах. Дальнейшее травление пленок с увеличением времени травления существенно меняет спектр токов ТСД как по температурной шкале, так и по пиковой интенсивности. Можно предположить, что в этом случае наиболее существенным для релаксации заряда становится другой процесс, связанный, по всей видимости, с образованием и дальнейшим опустошением зарядовых ловушек на стенках треков. Максимум спектра токов ТСД смещается с увеличением времени травления в высокотемпературную область, при этом зависимость энергии активации от среднего диаметра пор практически линейна, а соответствующая зависимость эффективного частотного фактора носит ярко выраженный нелинейный характер.

Резкое увеличение частотного фактора, скорее всего, свидетельствует об образовании сквозных пор в пленках ПЭТФ при достаточном для этого времени травления. Увеличение энергии активации позволяет предположить, что происходит образование все более и более глубоких ловушек носителей заряда при увеличении времени травления. Результаты могут свидетельствовать о существенном изменении спектра энергетических состояний накопленного при поляризации таких пленок электрического заряда и возможности создания в подобных материалах электрентного состояния. Параметры релаксационных процессов трековых мембран могут быть поставлены в соответствие структурным особенностям таких объектов.

Благодарности

Авторы благодарят сотрудников Центра прикладной физики Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флёрва (г. Дубна Московской области) за помощь в реализации исследований: О.М. Иванова (за облучение пленок на циклотроне ИЦ-100), Т.И. Мамонову (за синтез мембран), Н.В. Лизунова (за РЭМ-исследования) и П.Ю. Апеля (за реализацию идеи эксперимента и плодотворное обсуждение экспериментальных данных).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства просвещения Российской Федерации (государственное задание, проект № FSZN-2020-0026).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Флёрв Г.Н., Апель П.Ю., Дидык А.Ю., Кузнецов В.И., Оганесян Р.Ц. Использование ускорителей тяжелых ионов для изготовления ядерных мембран // Атомная энергия. 1989. Т. 67. № 4. С. 274–280.
2. Bouffard S., Gervais B., Leroy C. Basic phenomena induced by swift heavy ions in polymers // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. В. 1995. Special Issue. Vol. 105. No. 1–4. Pp. 1–4.
3. Li Ch., Sun Y., Jin Y., Liu G., Hou M., Ma F., Patnaik A. Latent track effect of swift argon ions in polyimide // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. В. 1998. Vol. 135. No. 1–4. Pp. 234–238.
4. Enge W. On the question of nuclear track formation in plastic material // Radiation Measurements. 1995. Vol. 25. No. 1–4. Pp. 11–26.



5. **Ditlov V.A., Gaatchegov A.U., Enge W. et al.** The radial etching velocity for tracks in polymer films // *Radiation Measurements*. 1997. Vol. 28. No. 1–6. Pp. 137–144.
6. **Митрепев А.М.** Теоретические представления о формировании и эволюции треков заряженных частиц // *Успехи физических наук*. 2002. Т. 172. № 10. С. 1131–1164.
7. **Апель П.Ю.** Треки ускоренных тяжелых ионов в полимерах. Дис. ... д-ра хим. наук. Спец. 02.00.09. Химия высоких энергий. Москва: Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флёрера Объединенного института ядерных исследований, 1998. 194 с.
8. **Apel P., Schulz A., Spohr R., Trautmann C., Vutsadakis V.** Track size and track structure in polymer irradiated by heavy ions // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. B. 1998. Vol. 146. No. 1–4. Pp. 468–474.
9. **Apel P., Spohr R., Trautmann C., Vutsadakis V.** Track structure in polyethylene terephthalate irradiated by heavy ions: LET dependence of track diameter // *Radiation Measurements*. 1999. Vol. 31. No. 1–6. Pp. 51–56.
10. **Mchedlishvili B.V., Beryozkin V.V., Oleinikov V.A., Vilensky A.I., Vasilyev A.B.** Structure, physical and chemical properties and applications of nuclear filters as a new class of membranes // *Journal of Membrane Science*. 1993. Vol. 79. No. 2–3. Pp. 285–304.
11. **Kuznetsov V.I., Kuznetsov L.V., Shestakov V.D.** Track membranes of the third generation (TMG-3), their properties and industrial application // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. B. 1995. Special Issue. Vol. 105. No. 1–4. Pp. 250–253.
12. **Apel P.** Track etching technique in membrane technology // *Radiation Measurements*. 2001. Vol. 34. No. 1–6. Pp. 559–566.
13. **Kaur S.A., Amrita J.** Track etched membranes for electronic applications // *International Journal of Science and Research*. 2015. Vol. 4. No. 1. Pp. 1414–1417.
14. **Martin C.R.** Nanomaterials: A membrane based synthetic approach // *Science*. 1994. Vol. 266. No. 5193. Pp. 1961–1966.
15. **Apel P., Spohr R.** Introduction to ion track etching in polymers. Ion-tracks.de. Available: <http://www.ion-tracks.de/introduction1/> Retrieved 2013-01-21.
16. **Speight J.G., Lange N.A.** Lange's handbook of chemistry. 16th edition. New York, Chicago, San Francisco, Lisbon, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, San Juan, Seoul, Singapore, Sydney, Toronto: McGraw-Hill Education, 2005. Pp. 2758–2807.
17. **Schneidearn W.A., Wendorff J.H.** Physical mechanism of the electrical polarization of polyethylene terephthalate // *Colloid and Polymer Science*. 1984. Vol. 262. No. 10. Pp. 761–768.
18. **Cañadas J.C., Diego J.A., Mudarra M., Parsa S.E., Sellarès J.** Effects of UV radiation on the charge trapping capability of PET // *Journal of Physics*. D. 2019. Vol. 52. No. 15. P. 155301.
19. **Gasanov A.Sh., Magerramov A.M., Nuriev M.A., Orudzhev I.A.** Relaxation of the electret charges of PET films after the action of the aerosol particles // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2012. Vol. 48. No. 4. Pp. 343–347.
20. **Lacabanne C., Chatain D., Monpagens J.C.** Thermally stimulated current and creep in poly(ethylene terephthalate) // *Journal of Applied Physics*. 1979. Vol. 50. No. 4. Pp. 2723–2731.
21. **Гужова А.А., Темнов Д.Э., Галиханов М.Ф.** Влияние параметров электретирирования на поверхностные и электретные свойства полиэтилентерефталата // *Известия Российского государственного педагогического университета имени А.И. Герцена*. 2013. № 157. С. 55–60.
22. **Van Turhout I.** Thermally stimulated discharge of polymer electrets. Amsterdam: Elsevier, 1975. 340 p.
23. **Vanderschuren J.G.** Thermally stimulated relaxations in solids. Edited by P. Briunlich. Berlin: Springer-Verlag, 1979.
24. **Gorokhovatsky Yu., Temnov D., Marat-Mendes J.N., Dias C.J.M., Das-Gupta D.K.** On the nature of thermally stimulated discharge current spectra in polyethylene terephthalate // *Journal of Applied Physics*. 1998. Vol. 83. No. 10. Pp. 5337–5341.

25. **Temnov D., Fomicheva E., Tazekov B., Karulina E., Gorokhovatsky Yu.** Electrets properties of polyethylene films with starch and aerosil // Journal of Materials Science and Engineering (David Publishing). A. 2013. Vol. 3. No. 7. Pp. 494–498.

26. **Гороховатский Ю.А., Бордовский Г.А.** Термоактивационная токовая спектроскопия высокоомных полупроводников и диэлектриков. М.: Наука, 1991. 248 с.

27. **Eyring H., Gibbs P.** Nonclassical reaction kinetics // Science. 1951. Vol. 113. No. 2926. Pp. 104–105.

28. **Doulut S., Bacharan C., Demont P., Bernes A., Lacabanne C.** Physical aging and tacticity effects on the α relaxation mode of amorphous polymers by thermally stimulated techniques // Journal of Non-Crystalline Solids. 1998. Vol. 235–237. 2 August. Pp. 645–651.

Статья поступила в редакцию 15.06.2021, принята к публикации 22.06.2021.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГОРОХОВАТСКИЙ Юрий Андреевич – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой общей и экспериментальной физики Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

191186, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 48
gorokh-yu@yandex.ru

ТЕМНОВ Дмитрий Эдуардович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей и экспериментальной физики Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

191186, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 48
tde@herzen.spb.ru

ШАБАНОВА Наталья Сергеевна – аспирантка кафедры общей и экспериментальной физики Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

191186, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 48
natashshabanov@yandex.ru

НЕЧАЕВ Александр Николаевич – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флёрова Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области, Российская Федерация.

141980, Российская Федерация, г. Дубна Московской области, ул. Жолио-Кюри, 6
nechaeffalexander@yandex.ru

РОССОУ Арно – аспирант Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флёрова Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области, Российская Федерация.

141980, Российская Федерация, г. Дубна Московской области, ул. Жолио-Кюри, 6
arnoux.rossouw@gmail.com

REFERENCES

1. **Flerov G.N., Apel P.Yu., Didyk A.Yu., et al.**, Use of heavy-ion accelerators to produce nuclear membranes, Soviet Atomic Energy. 67 (4) (1989) 763–770.



2. **Bouffard S., Gervais B., Leroy C.**, Basic phenomena induced by swift heavy ions in polymers, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, Special Issue.* 105 (1–4) (1995) 1–4.
3. **Li Ch., Sun Y., Jin Y., et al.**, Latent track effect of swift argon ions in polyimide, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B.* 135 (1–4) (1998) 234–238.
4. **Enge W.**, On the question of nuclear track formation in plastic material, *Radiat. Meas.* 25 (1–4) (1995) 11–26.
5. **Ditlov V.A., Gaatchegov A.U., Enge W., et al.**, The radial etching velocity for tracks in polymer films, *Radiat. Meas.* 28 (1–6) (1997) 137–144.
6. **Miterev A.M.**, Theoretical aspects of the formation and evolution of charged particle tracks, *Physics-Uspekhi.* 45 (10) (2002) 1019–1050.
7. **Apel P.Yu.**, Treki uskorenykh tyazhelykh ionov v polimerakh [Tracks of accelerated heavy ions in polymers]: Thesis for Dr. of Sci. (Chem. Sci.), Spec. 02.00.09. High Energy Chemistry, Joint Institute for Nuclear Research, Moscow, 1998 (in Russian).
8. **Apel P., Schulz A., Spohr R., et al.**, Track size and track structure in polymer irradiated by heavy ions, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B.* 146 (1–4) (1998) 468–474.
9. **Apel P., Spohr R., Trautmann C., Vutsadakis V.**, Track structure in polyethylene terephthalate irradiated by heavy ions: LET dependence of track diameter, *Radiat. Meas.* 31 (1–6) (1999) 51–56.
10. **Mchedlishvili B.V., Beryozkin V.V., Oleinikov V.A., et al.**, Structure, physical and chemical properties and applications of nuclear filters as a new class of membranes, *J. Membr. Sci.* 79 (2–3) (1993) 285–304.
11. **Kuznetsov V.I., Kuznetsov L.V., Shestakov V.D.**, Track membranes of the third generation (TMG-3), their properties and industrial application, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. Special Issue.* 105 (1–4) (1995) 250–253.
12. **Apel P.**, Track etching technique in membrane technology, *Radiat. Meas.* 34 (1–6) (2001) 559–566.
13. **Kaur S.A., Amrita J.**, Track etched membranes for electronic applications, *Intern. J. Sci. Res.* 4 (1) (2015) 1414–1417.
14. **Martin C.R.**, Nanomaterials: A membrane based synthetic approach, *Sci.* 266 (5193) (1994) 1961–1966.
15. **Apel P., Spohr R.**, Introduction to ion track etching in polymers. Ion-tracks.de. Available: <http://www.ion-tracks.de/introduction1/> Retrieved 2013-01-21.
16. **Speight J.G., Lange N.A.**, Lange's handbook of chemistry, 16th edition, McGraw-Hill Education, New York, Chicago, San Francisco, Lisbon, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, San Juan, Seoul, Singapore, Sydney, Toronto (2005) 2758–2807.
17. **Schneidearn W.A., Wendorff J.H.**, Physical mechanism of the electrical polarization of polyethylene terephthalate, *Colloid and Polymer Science.* 262 (10) (1984) 761–768.
18. **Cañadas J.C., Diego J.A., Mudarra M., et al.**, Effects of UV radiation on the charge trapping capability of PET, *J. Phys. D.* 52 (15) (2019) 155301.
19. **Gasanov A.Sh., Magerramov A.M., Nuriev M.A., Orudzhev I.A.**, Relaxation of the electret charges of PET films after the action of the aerosol particles, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 48 (4) (2012) 343–347.
20. **Lacabanne C., Chatain D., Monpagens J.C.**, Thermally stimulated current and creep in poly(ethylene terephthalate), *J. Appl. Phys.* 50 (4) (1979) 2723–2731.
21. **Guzhova A.A., Temnov D.E., Galikhanov M.F.**, Influence of electretting parameters on the surface and electret properties of polyethylene terephthalate, *Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences. Physics.* (157) (2013) 55–60 (in Russian).
22. **Van Turhout I.**, Thermally stimulated discharge of polymer electrets, Elsevier, Amsterdam, 1975.
23. **Vanderschuren J.G.**, Thermally stimulated relaxations in solids. Ed. by P. Briunlich, Springer-Verlag, Berlin, 1979.

24. **Gorokhovatsky Yu., Temnov D., Marat-Mendes J.N., et al.**, On the nature of thermally stimulated discharge current spectra in polyethylene terephthalate, *J. Appl. Phys.* 83 (10) (1998) 5337–5341.
25. **Temnov D., Fomicheva E., Tazekov B., et al.**, Electrets properties of polyethylene films with starch and aerosol, *J. Mater. Sci. Eng. A (David Publishing)*. 3 (7) (2013) 494–498.
26. **Gorokhovatsky Yu.A., Bordovsky G.A.**, Thermal activation current spectroscopy of high-resistance semiconductors and dielectrics, Nauka Publishing, Moscow, 1991 (in Russian).
27. **Eyring H., Gibbs P.**, Nonclassical reaction kinetics, *Sci.* 1951. Vol. 113 (2926) (1951) 104–105.
28. **Doulut S., Bacharan C., Demont P., et al.**, Physical aging and tacticity effects on the α relaxation mode of amorphous polymers by thermally stimulated techniques, *J. Non-Cryst. Sol.* 235 –237 (2 August) (1998) 645–651.

Received 15.06.2021, accepted 22.06.2021.

THE AUTHORS

GOROKHOVATSKY Yuriy A.

Herzen State Pedagogical University of Russia

48 Moyka Emb., St. Petersburg, 191186, Russian Federation

gorokh-yu@yandex.ru

TEMNOV Dmitry E.

Herzen State Pedagogical University of Russia

48 Moyka Emb., St. Petersburg, 191186, Russian Federation

tde@herzen.spb.ru

SHABANOVA Natalya S.

Herzen State Pedagogical University of Russia

48 Moyka Emb., St. Petersburg, 191186, Russian Federation

natashshabanov@yandex.ru

NECHAEFF Alexander N.

Joint Institute for Nuclear Research

6, Joliot-Curie, Dubna of Moscow region, 141980, Russian Federation

nechaeffalexander@yandex.ru

ROSSOUW Arnoux

Joint Institute for Nuclear Research

6, Joliot-Curie, Dubna of Moscow region, 141980, Russian Federation

arnoux.rossouw@gmail.com