

P18-2010-107

И. И. Барашкова¹, Э. И. Бунятова, Л. И. Кравец

ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫЕ ТРЕКОВЫЕ МЕМБРАНЫ —
ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МАТЕРИАЛ
ДЛЯ ТОНКИХ МИШЕНЕЙ
С ПОЛЯРИЗОВАННЫМИ ПРОТОНАМИ

Направлено в журнал «Перспективные материалы»

¹Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, Москва

<p>Барашкова И. И., Бунятова Э. И., Кравец Л. И. Полипропиленовые трековые мембраны — перспективный материал для тонких мишеней с поляризованными протонами</p> <p>С целью создания нового рабочего вещества поляризованной мишени предложено использовать полипропиленовые трековые мембраны, получаемые облучением полипропиленовых пленок пучком высокоэнергетических тяжелых ионов с последующим химическим травлением латентных треков этих частиц. Для придания мембранам парамагнитных свойств, необходимых для осуществления процесса динамической поляризации ядер, в образцы методом термической диффузии вводили нитроксильный радикал 2,2,6,6-тетраметил-пиперидин-1-оксил. С помощью метода электронного парамагнитного резонанса получена информация о парамагнитных центрах в полимерной матрице мембран, проведено определение концентрации нитроксильного радикала и вращательной подвижности спинового зонда в них.</p> <p>Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзепелова и в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.</p> <p>Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2010</p>	<p>P18-2010-107</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------

<p>Barashkova I. I., Bunyatova E. I., Kravets L. I. Polypropylene Track Membranes — a Promising Material for Thin Targets with Polarized Protons</p> <p>With the purpose of creating a new working substance of a polarized target it has been suggested to use polypropylene track membranes produced by irradiation of polypropylene films by a high-energy heavy ion beam and a subsequent chemical etching of the latent tracks of these particles. In order to provide the membranes with paramagnetic properties required for realization of the process of dynamic polarization of nuclei, a nitroxyl radical 2,2,6,6-tetramethyl-piperidine-1-oxyl was introduced into the sample by the method of thermal diffusion. By the electronic paramagnetic resonance method information was received about paramagnetic centers in the polymeric matrix of the membranes, a concentration of the nitroxyl radical and a rotary mobility of the spin probe in them were determined.</p> <p>The investigation has been performed at the Dzhelapov Laboratory of Nuclear Problems and at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.</p> <p>Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2010</p>	<p>P18-2010-107</p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------

ВВЕДЕНИЕ

Под термином динамическая поляризация ядер (ДПЯ) понимают процесс достижения высокой степени поляризации спинов электронов в веществе под действием высокочастотных магнитных полей и передачи этой поляризации ядерной спиновой системе. Получение объектов (мишеней) с высокой поляризацией ядер представляет большой интерес для физики элементарных частиц, поскольку является инструментом для исследований спиновых взаимодействий в экспериментах по рассеянию частиц на выведенных пучках ускорителей. Используемая в этих экспериментах поляризованная мишень (ПМ), основной частью которой является рабочее вещество (РВ), представляет собой технически сложный прибор, сочетающий несколько главных частей, необходимых для осуществления в веществе процесса ДПЯ, таких как магнит с сильным постоянным магнитным полем (2,5–5,0 Тл), криогенные системы, обеспечивающие сверхнизкие температуры ($T < 0,5$ К), источник сверхвысокой частоты (СВЧ). Основные требования, которые предъявляются к РВ мишени: высокое содержание в веществе поляризуемых ядер и их высокая поляризация. В экспериментах с ПМ важной проблемой является также эффективное охлаждение РВ. Во избежание нагрева вещества, прежде всего от тепловыделения СВЧ и связанного с этим снижения степени поляризации ядер, предпочтительно иметь в РВ развитую поверхность. Для этого, например, РВ, представляющие собой жидкости, используются в виде замороженных в жидком азоте капель-шариков, диаметром несколько миллиметров.

В последние годы в качестве рабочего вещества при создании мишеней с поляризованными ядрами водорода (протонов или дейтронов) все чаще стали применять полимеры [1]. Данные материалы представляют собой твердые вещества, что существенно упрощает их использование в качестве мишеней и открывает новые экспериментальные возможности. Особенно интересны полимеры с общей формулой $(-CH_2-)_n$ и $(-CD_2-)_n$ благодаря максимальному среди твердых органических веществ содержанию атомов водорода. Для некоторых экспериментов в ядерной физике особенно необходима тонкая (пленочная) мишень на основе этих материалов.

Для придания полимерам парамагнитных свойств в их состав вводят соединения, проявляющие магнитные свойства. В качестве вещества, обладаю-

шего магнитными свойствами, часто используется высокостабильный легколетучий нитроксильный радикал 2,2,6,6-тетраметил-пиперидин-1-оксид (ТЕМПО) с общей формулой $C_9H_{18}NO$. Пары радикала обладают способностью диффундировать в аморфные части полимеров, что приводит к образованию парамагнитной системы, необходимой для создания поляризации ядер в веществе динамическими методами.

Ранее в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Джелепова Объединенного института ядерных исследований (Дубна), а затем совместно с Институтом им. Пауля Шеррера (Швейцария) были разработаны рабочие вещества мишеней на основе полимеров с ТЕМПО в виде порошков, гранул, пленок (толщиной до 12,5 мкм) и микротрубок из полиэтилена (ПЭ) и его сополимера с полипропиленом (ПП) [2, 3]. Удельная поверхность этих РВ относительно невелика. В связи с этим в качестве РВ, особенно для тонкой мишени, с поляризованными протонами представляют интерес пленки с меньшей толщиной и с большей удельной поверхностью на основе полимеров общей формулы $(-CH_2-)_n$ с введенным в них свободным радикалом ТЕМПО. Такое РВ будет, возможно, интересным для решения проблемы поляризации ядер 3He [4].

Для оценки пригодности полимерного соединения в качестве рабочего вещества поляризованной мишени проводят исследование его парамагнитных свойств. Для этой цели используют метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), с помощью которого возможно получить информацию не только о парамагнитных центрах и их локальном окружении, но и о самой среде. Введение в полимерную матрицу нитроксильных радикалов, в частности радикала ТЕМПО, приводит к образованию системы неспаренных электронов в РВ мишени, которая одновременно при этом является и парамагнитным зондом. Радикал-зонд, размер которого составляет всего несколько ангстрем, при этом выполняет также роль молекулярного датчика, что позволяет получать информацию о структуре и динамике полимеров [5].

В данной работе с целью увеличения удельной поверхности тонкопленочного рабочего вещества ПМ использованы трековые мембраны (ТМ) из ПП, которые получали облучением полипропиленовых пленок пучком высокоэнергетических тяжелых ионов с последующим химическим травлением латентных треков этих частиц до получения сквозных пор. Для придания мембранам парамагнитных свойств, необходимых для осуществления процесса динамической поляризации ядер, в образцы вводили нитроксильный радикал ТЕМПО.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектами исследований служили полипропиленовые трековые мембраны, изготовленные на основе ПП-пленки Torayfan T2400 производства фирмы «Toray» (Япония) с номинальной толщиной 10,0 мкм. По данным изгото-

вителя, пленка имеет двухосную ориентацию и состоит из изотактического полимера. Плотность материала пленки составляет около $0,92 \text{ г/см}^3$, что соответствует 80 %-й степени кристалличности. Измерение электронных спектров оптического поглощения образцов показало, что в пленку входит фенольный антиоксидант Irganox 1010, содержание которого составляет 0,1 %. Для получения мембран образцы пленок облучали ионами ксенона, ускоренными на циклотроне У-300 Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований (Дубна). Флюенс ионов варьировали. Условия облучения приведены в [6]. Использовали пучки ионов ксенона с энергией $\sim 1 \text{ МэВ/нуклон}$. Энергия ионов была достаточной для создания сквозных треков в исследуемых пленках.

Химическое травление облученных пленок для получения сквозных пор проводили при температуре $80 \text{ }^\circ\text{C}$ в водном растворе хромового ангидрида с концентрацией 1000 г/л. Методика травления подробно описана в [7]. Структурные и химические изменения, происходящие в поверхностном слое образующихся мембран, оценивали методом ИК-спектроскопии многократно нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО). Использовали спектрофотометр «Specord M-80» (Carl Zeiss Jena). В качестве элемента МНПВО применяли призму из германия с углом 45° (число отражений 24) и призму из KRS-5 с углом 55° (число отражений 14). Для количественной характеристики изменений структуры в облученных тяжелыми ионами ПП-пленках при химическом травлении использовали соотношения интенсивности полос поглощения $1168, 998 \text{ см}^{-1}$ (колебания цепи в кристаллической фазе) и 971 см^{-1} (колебания цепи в аморфной фазе). Содержание антиоксиданта в мембранах определяли экстракцией навески образца гексаном в течение 24 ч при комнатной температуре и спектрофотометрированием раствора при длине волны 275 нм с использованием спектрофотометра «Specord M-40» (Carl Zeiss Jena).

Исследование микроструктуры образцов, а также определение диаметра пор на поверхности мембран проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа «JSM-840» (JEOL) с разрешением 10 нм. Перед просмотром на образцы напыляли в вакууме тонкий слой золота. Краевой угол смачивания поверхности мембран определяли с помощью горизонтального микроскопа, снабженного гониометром. Для измерений использовали воду (бидистиллят), точность измерений составляла $\pm 1^\circ$.

Спектры электронного парамагнитного резонанса регистрировали на спектрометре RADIOPAN (Польша) при различных температурах. Спиновый зонд-радикал в мембраны вводили методом термической диффузии, для чего образцы выдерживали в герметичной ампуле в парах радикала ТЕМПО при комнатной температуре в течение 24 ч. Вводили такое количество спинового зонда, чтобы избежать дипольного и обменного уширения, искажающего форму линии спектра. После этого с целью равномерного распределения ра-

дикала в образцах производили их нагрев при температуре 80 °С в течение 6 ч. При записи спектров амплитуда модуляции была меньше ширины линии и не превышала 0,5 Гс. Во избежание эффекта насыщения ЭПР-переходов, искажающего форму линии, уровень мощности радиочастотного поля в резонаторе спектрометра не превышал 3 мВт.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование процесса травления полипропилена в растворах, содержащих соединения шестивалентного хрома, позволило выявить следующие закономерности. Воздействие этого реагента на ПП-пленку приводит к изменению ее поверхностных свойств. Так, при обработке необлученной пленки в водном растворе хромового ангидрида с концентрацией 1000 г/л при 80 °С в течение 10 мин краевой угол смачивания уменьшается от 98 до 65°, т. е. происходит гидрофилизация поверхности полимера. Подобная гидрофилизация свидетельствует о том, что при травлении полимера наблюдается окисление его поверхности с образованием новых полярных групп. Анализ ИК-спектров образцов, снятых методом МНПВО с призмой из германия, подтверждает этот вывод. На ИК-спектрах протравленных образцов были обнаружены новые полосы поглощения при 1720 и 3460 см⁻¹, интенсивность которых растет по мере увеличения времени травления. Указанные полосы могут быть отнесены к валентным колебаниям карбонильных и гидроксильных групп [8], образующихся в результате окисления поверхностного слоя полипропилена. Кроме того, наблюдается уменьшение интенсивности полос при 1168 и 998 см⁻¹, связанных с кристаллической фазой полипропилена, а также некоторое увеличение интенсивности полосы при 971 см⁻¹. Эти факты указывают на то, что в процессе травления наблюдается аморфизация полимера. Последнее объясняется деструкцией макромолекул в процессе травления и образованием низкомолекулярных фракций полимера. Подобных изменений не обнаруживается на ИК-спектрах, записанных как на призме KRS-5, так и обычным способом. Это свидетельствует об образовании нарушенного слоя в тонком поверхностном слое полимера. По оценке авторов [9], глубина подобного слоя составляет около 10 нм. При варьировании условий травления глубина поверхностного нарушенного слоя, как было установлено, изменяется.

Аналогичные данные были получены нами при травлении облученных ионами ПП-пленок. Очевидно, образование аморфизированного поверхностного слоя в этом случае происходит и на стенках пор, что приводит к повышению доли аморфной фазы в мембранах. В процессе химического травления, кроме того, наблюдается расходование антиоксиданта. Определение концентрации антиоксиданта при проведении травления в водном растворе хромового ангидрида с концентрацией 1000 г/л показывает, что уменьшение его содержа-

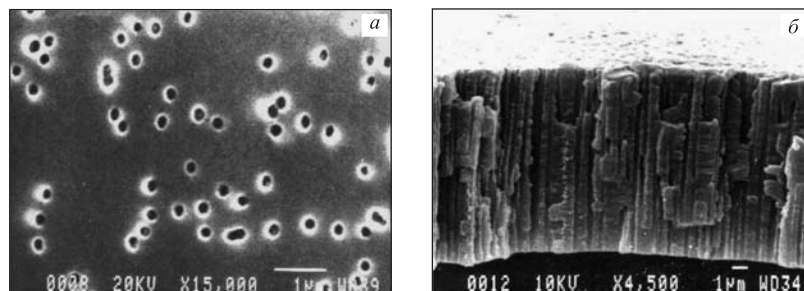


Рис. 1. Электронные микрофотографии поверхности (а) и поперечного скола (б) полипропиленовой трековой мембраны с диаметром пор 0,25 мкм

ния происходит со скоростью $5 \cdot 10^{-3} \%$ /мин. Наличие на поверхности мембран нарушенного (деструктурированного) слоя и уменьшение концентрации антиоксиданта сказывается на свойствах ПП ТМ — образующиеся мембраны обладают несколько меньшей устойчивостью к окислению [7]. Однако это не только не затрудняет их использование в качестве рабочего вещества в поляризованных мишенях, а способствует, как мы увидим ниже, повышению коэффициента диффузии стабильного радикала ТЕМПО в матрицу мембран. На рис. 1 представлены микрофотографии поверхности (а) и поперечного скола (б) ПП ТМ с диаметром пор 0,25 мкм. Можно видеть, что трековые мембраны имеют симметричную структуру — поры мембран представляют собой цилиндрические каналы, поперечные сечения которых не изменяются по глубине. Наличие в трековых мембранах пор в виде цилиндрических каналов является большим преимуществом мембран данного типа, поскольку это позволяет производить расчеты общей удельной поверхности мембран и средней концентрации адсорбированных веществ, в частности радикала ТЕМПО, на единицу поверхности.

Для проведения исследований методом ЭПР были отобраны следующие опытные образцы: исходная (необлученная тяжелыми ионами) ПП-пленка марки Т2400 (образец № 1), ПП ТМ с диаметром пор 0,40 мкм и плотностью пор 10^7 см^{-2} (образец № 2), ПП ТМ с диаметром пор 0,15 мкм и плотностью пор $2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ (образец № 3). Для оценки эффективности использования ПП ТМ в качестве рабочего вещества поляризованной мишени исследование их парамагнитных свойств проводили в сравнении с образцом из ПЭ со средней молекулярной массой 35000 (Sigma Aldrich Co), представляющим собой порошок плотностью $0,906 \text{ г/см}^3$ с содержанием около 50 % аморфной фазы (образец № 4). Параметры полипропиленовых образцов приведены в табл. 1.

Исследование процесса термической диффузии радикала ТЕМПО показывает, что введение его в исследуемые образцы приводит к изменению их окраски. Так, если исходная необлученная пленка бесцветна и прозрачна, то

Таблица 1. Параметры исследуемых полипропиленовых образцов

Образец	Характеристика	Толщина, мкм	Диаметр пор, мкм	Плотность пор, см ⁻²	Удельная поверхность, дм ² /мг
№ 1	ПП-пленка	10,0	—	—	$2,6 \cdot 10^{-2}$
№ 2	ПП ТМ	9,5	0,40	10^7	$6,3 \cdot 10^{-2}$
№ 3	ПП ТМ	9,8	0,15	$2 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^{-1}$

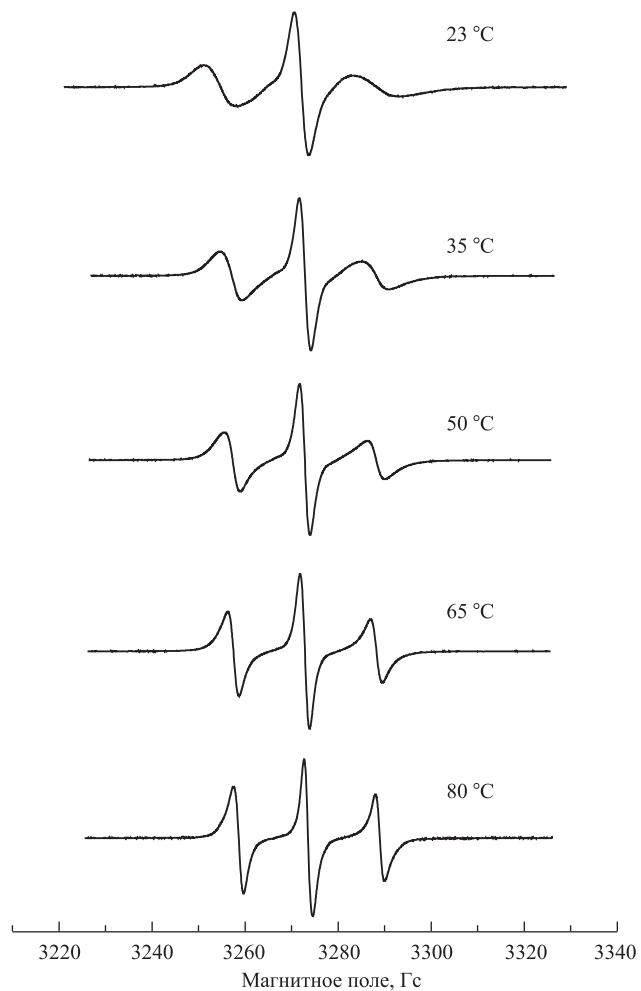


Рис. 2. Спектры ЭПР радикала ТЕМПО в исходной полипропиленовой пленке (образец № 1) при различной температуре

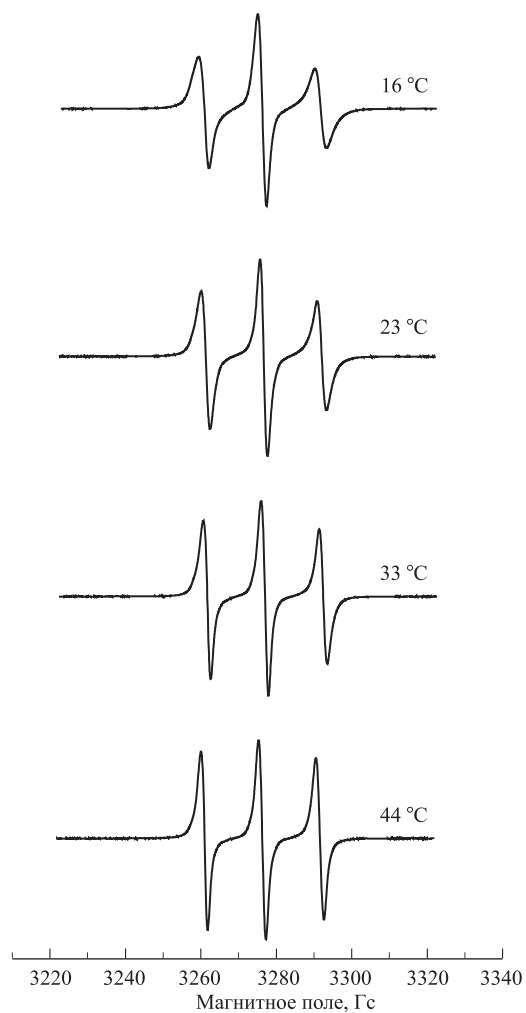


Рис. 3. Спектры ЭПР радикала ТЕМПО в полиэтилене (образец №4) при различной температуре

после выдержки в парах радикала, имеющего оранжево-красный цвет, она приобретает характерный оранжевый цвет. Мембраны после выдержки в парах радикала приобретают более интенсивную окраску, что свидетельствует о большей удельной поверхности образцов. Расчет общей удельной поверхности исследуемых образцов подтверждает данный вывод. У мембраны с диаметром пор $0,40 \text{ мкм}$ и плотностью пор 10^7 см^{-2} (образец №2) удельная

поверхность в 2,5 раза больше по сравнению с удельной поверхностью необлученной ПП-пленки, а у мембраны с диаметром пор 0,15 мкм и плотностью пор $2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ (образец № 3) — почти в 6 раз. Спектры ЭПР спинового зонда для образцов № 1 и № 4 представлены на рис. 2 и 3. Следует отметить, что характерный вид спектров отражает сегментную подвижность макромолекул данных полимеров.

Использование стабильных радикалов для исследования полимеров основано на анализе изменения ширины линии ЭПР, вызванного подвижностью радикалов, которая, в свою очередь, зависит от подвижности молекул окружающей среды. Поэтому радикал-зонд является датчиком информации о локальном окружении. Вид спектра ЭПР радикалов при этом определяется его вращательной подвижностью, которая характеризуется временем корреляции (τ_c) и связана с эффективной частотой вращения следующим соотношением:

$$\nu = 1/2\pi\tau_c. \quad (1)$$

Времена корреляции вращения спинового зонда (τ_c) рассчитывали в рамках модели изотропного вращения [10] в так называемой области быстрого вращения по формуле

$$\tau_c = 6,65 \cdot 10^{-10} \Delta H_{+1} [(I_{+1}/I_{-1})^{1/2} - 1], \quad (2)$$

где I_{+1} и I_{-1} — интенсивности компонент сверхтонких взаимодействий в низко- и высокочастотном полях соответственно, ΔH_{+1} — ширина линии в низкочастотном поле. Времена корреляции вращения спинового зонда рассчитывали в предположении изотропного вращения по стандартной методике [10]. Температурные зависимости времени корреляции вращения представлены на рис. 4. Можно видеть, что времена корреляции для образцов из полипропилена (как для исходной пленки, так и для трековых мембран) при низких температурах различаются незначительно, а в области температур от 50 до 80 °С наблюдается некоторое различие — времена корреляции вращения зонда в образце трековой мембраны с диаметром пор 0,15 мкм (образец № 3) несколько выше по сравнению с исходной ПП-пленкой (образец № 1) и образцом трековой мембраны с диаметром пор 0,40 мкм (образец № 2). Наблюдаемое отличие может быть вызвано различием в удельной поверхности образцов, наличием пор, которые могут вызывать изменение в молекулярной организации полимера (например, его структурирование) вблизи стенок. В результате может измениться локальная подвижность полимера вблизи стенки поры. Времена корреляции зонда в ПЭ намного ниже, чем в ПП, что вызвано различиями в сегментной подвижности макромолекул в данных полимерах.

Для определения концентрации радикала в полимерах были приготовлены эталонные растворы радикала известной концентрации в гексане. Градуировочная зависимость приведена на рис. 5. Образцы полимеров выдерживали

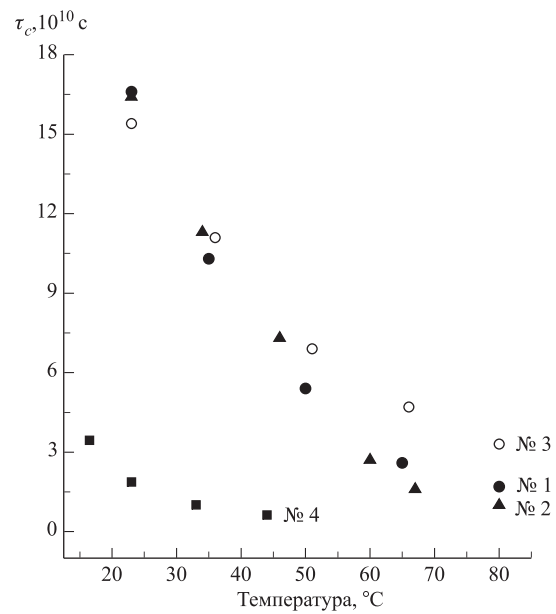


Рис. 4. Температурная зависимость времени корреляции вращения спинового зонда в исследуемых образцах (нумерация кривых соответствует нумерации образцов в табл. 1)

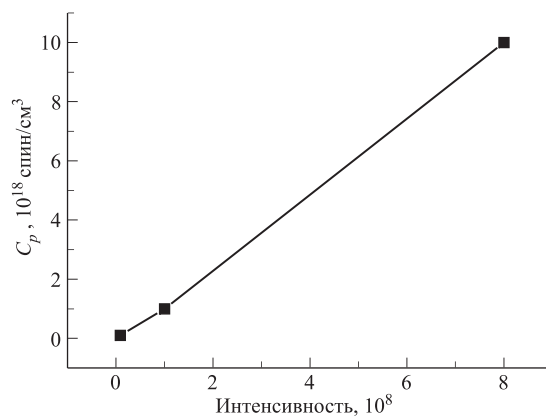


Рис. 5. Градуировочная зависимость (зависимость концентрации радикала C_p от интегральной интенсивности спектра) для определения концентрации радикалов ТЕМПО в исследуемых образцах

Таблица 2. Концентрация зонда и ширина линии ΔH_{+1} спектров ЭПР в исследуемых образцах после их выдержки в парах радикала ТЕМПО в течение 16 сут

Образец	Концентрация зонда, спин/см ³	Ширина линии ΔH_{+1} , Гс
Исходная ПП-пленка (№ 1)	$4,2 \cdot 10^{18}$	8,6
ПП ТМ с диаметром пор 0,40 мкм (№ 2)	$6,0 \cdot 10^{18}$	8,2
ПП ТМ с диаметром пор 0,15 мкм (№ 3)	$6,8 \cdot 10^{18}$	8,2
ПЭ, порошок (№ 4)	$1,5 \cdot 10^{18}$	3,8

в парах радикала 16 сут при комнатной температуре. Спектры эталонных образцов и спектры радикала в полимерах регистрировали при одинаковых условиях (толщина ампулы, количество образца, параметры прибора). Концентрация спинового зонда в полимерах получена сопоставлением интегральной интенсивности исследуемого и эталонного образцов. В табл. 2 приведены величины: ширина линии ΔH_{+1} для исследованных полимерных образцов и концентрация зонда. Анализ экспериментальных данных показывает, что значения концентрации зонда для полипропиленовых образцов оказались близкими по величине и несколько выше, чем в образце полиэтилена. Это означает, что радикал ТЕМПО достаточно хорошо растворяется в пленках из полипропилена. Важно подчеркнуть, что количество радикала, введенного в образец, зависит от условий его введения: температуры, времени выдержки и т. д. Меняя эти условия, можно изменять концентрацию радикала в полимере. Спектры ЭПР радикалов в исследуемых полимерах приведены на рис. 6. Можно видеть, что спектры всех полимеров уширены и искажены по сравнению со спектрами данных образцов после их выдержки в парах радикала в течение 24 ч (рис. 2, 3). Это вызвано дипольными и обменными взаимодействиями неспаренных электронов радикала, что является основными причинами уширения линий.

Концентрационное уширение в свою очередь определяется подвижностью и характером распределения радикала в полимере — локальной концентрацией радикала, которая может быть в несколько раз больше, чем средняя концентрация [5]. Наиболее значительно на ширину линии ЭПР нитроксильных радикалов при этом могут влиять следующие взаимодействия: сверхтонкие взаимодействия с ядром азота в молекуле радикала, обменные и дипольные взаимодействия неспаренных электронов. Из предыдущих опытов ДПЯ в полимерах с ТЕМПО известно, что оптимальная средняя концентрация радикала, например, в ПЭ, должна составлять $2 \cdot 10^{19}$ спин/см³. В системе полимер–ТЕМПО при повышенных концентрациях радикала указанные взаимодействия имеют место, что приводит к уширению ширины линий спектра

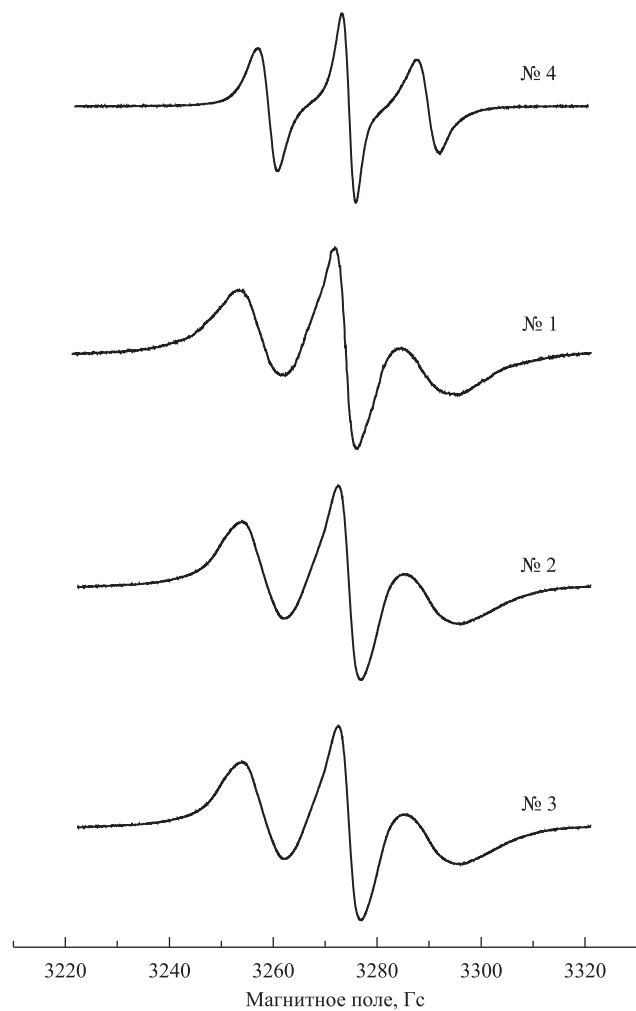


Рис. 6. Спектры ЭПР полимеров после выдерживания их в парах радикала в течение 16 сут при комнатной температуре (нумерация кривых соответствует нумерации образцов в табл. 1)

ЭПР. Однако не исключена возможность, что в мишенях в условиях ДПЯ, особенно при реализации одного из способов передачи поляризации от электронов к ядрам (механизм термического смешивания), например, дипольные взаимодействия могут привести к образованию в веществе энергетического резервуара коллективно взаимодействующих электронных спинов, способствующих поляризации ядерных спинов протонов [11–13]. Этот метод ДПЯ

возможен при ширине спектра линии ЭПР парамагнитной добавки в рабочем веществе мишени до 200 Гс [14]. Следует учитывать, однако, что средняя (реальная, определенная в проведенных нами экспериментах) концентрация радикала как в ПП, так и в ПЭ несколько ниже, чем локальная, поскольку данные полимеры являются аморфно-кристаллическими, у которых аморфная фаза составляет 20 % (ПП) и 50 % (ПЭ). Диффузия же низкомолекулярных соединений, как известно, происходит преимущественно по аморфным участкам. Кроме того, исследования, проведенные нами, были выполнены лишь при комнатной и повышенной температурах. В этих условиях невозможно определить локальную концентрацию и вклады в ширину спектра ЭПР дипольных и обменных взаимодействий неспаренных электронов радикала. Одним из способов определения локальных концентраций является исследование методом ЭПР радикалов в замороженных матрицах. Мы планируем проведение этих работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложено новое вещество для тонкой мишени с поляризованными протонами на основе полипропиленовых трековых мембран. С помощью сканирующего электронного микроскопа определены диаметр и плотность пор на поверхности исследованных образцов мембран. Проведен расчет удельной поверхности исследованных образцов ПП ТМ. Анализ ИК-спектров мембран указывает на аморфизацию полимера и на образование на их поверхности нарушенного слоя глубиной около 10 нм.

Для придания ПП ТМ парамагнитных свойств, необходимых для вещества мишени, в образцы методом термической диффузии был введен стабильный радикал ТЕМПО. Образцы исследованы методом электронного парамагнитного резонанса. Определены основные параметры спектров ЭПР, средняя концентрация радикала в образцах, а также вращательная подвижность радикала-зонда в полимере. Анализ спектров показывает, что значения концентрации радикала в ПП ТМ могут быть достаточно высоки и зависят от условий термической диффузии. ПП-матрица трековой мембраны представляет собой достаточно хороший растворитель для нитроксильного радикала.

Проведенные исследования позволяют рассматривать полипропиленовые трековые мембраны со стабильным радикалом ТЕМПО как перспективные материалы в качестве вещества для тонких мишеней с поляризованными протонами. Однако окончательное заключение об эффективности использования ПП ТМ в мишенях можно будет сделать после проведения исследований динамической поляризации протонов в этих материалах.

Авторы благодарны А. М. Вассерману за ряд консультаций и поддержку работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bunyatova T. I.* Free Radicals and Polarized Targets // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 526, No. 1–2. P. 22–27.
2. *Van den Brandt B. et al.* Dynamic Nuclear Polarization in Thin Polymer Foil and Tubes // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 356, No. 1. P. 36–38.
3. *Van den Brandt B. et al.* Dynamic Nuclear Polarization in Thin Polyethylene Foils via ^4He Film // Nucl. Instr. Meth. A. 1996. V. 381, No. 2–3. P. 219–222.
4. *Van den Brandt B. et al.* Magnetic Coupling between ^3He and Nuclei in a Substrate. A Possible Way to Polarize Bulk ^3He // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 356, No. 1. P. 138–141.
5. *Вассерман А. В., Коварский А. Л.* Спиновые метки и зонды в физикохимии полимеров. М.: Наука, 1986. 246 с.
6. *Апель П. Ю. и др.* Воздействие ускоренных тяжелых ионов на поликарбонат // Химия высоких энергий. 1989. Т. 23, № 4. С. 327–332.
7. *Кравец Л. И., Дмитриев С. Н., Апель П. Ю.* Получение и свойства полипропиленовых трековых мембран // Химия высоких энергий. 1997. Т. 31, № 2. С. 108–113.
8. *Дехант И. и др.* ИК-спектроскопия полимеров. М.: Химия, 1976. 300 с.
9. *Апель П. Ю. и др.* // Коллоидный журнал. 1992. Т. 54, № 4. С. 220–223.
10. *Кузнецов А. Н.* Метод спинового зонда. М.: Наука, 1976. 210 с.
11. *Провоторов Б. Н.* О магнитном резонансном насыщении в кристаллах // ЖЭТФ. 1962. Т. 41, № 5. С. 1582–1591.
12. *Borghini M.* Spin-Temperature Model of Nuclear Dynamic Polarization Using Free Radicals // Phys. Rev. Lett. 1968. V. 20, No. 9. P. 419–421.
13. *Abragam A., Goldman M.* Principles of Dynamic Nuclear Polarization // Rep. Prog. Phys. 1978. V. 41, No. 3. P. 395–467.
14. *Hall D. A. et al.* Polarization-Enhanced NMR Spectroscopy of Biomolecules in Frozen Sol // Science. 1997. V. 276. P. 930–932.

Получено 8 сентября 2010 г.

Редактор Е. В. Сабаева

Подписано в печать 20.10.2010.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,2. Тираж 260 экз. Заказ № 57128.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/