

## Дифракционные фильтры на основе полиимидных и полиэтиленнафталатных трековых мембран

© А.В. Митрофанов,<sup>1</sup> П.Ю. Апель,<sup>2</sup> И.В. Блонская,<sup>2</sup> О.Л. Орелович<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
119991 Москва, Россия  
e-mail: mitrofa@sci.lebedev.ru

<sup>2</sup> Объединенный институт ядерных исследований,  
141980 Дубна, Московская область, Россия

(Поступило в Редакцию 23 января 2006 г.)

Обсуждается задача создания оптических фильтров для мягкой рентгеновской и жесткой ультрафиолетовой областей спектра с высоким уровнем блокировки ультрафиолетового и видимого фонового излучения. В отличие от традиционных тонкопленочных систем исследуются фильтры на основе трековых мембран (ТМ) — пористых полимерных пленок с микронными и субмикронными порами. Для изготовления фильтров предлагается использовать мембраны из полиэтиленнафталата (ПЭНФ) и полиимида (ПИ), ультрафиолетовый край поглощения которых лежит вблизи границы видимой области. Проведено сравнение мембран ПЭНФ и ПИ с известными пористыми полиэтилентерефталатными ТМ, получаемыми методом травления ионных треков. Проанализированы спектральные характеристики пленок ПЭНФ и ПИ, исследован процесс формирования „трековых“ пор при последовательной обработке образцов ускоренными тяжелыми ионами и химическими реагентами. Определены основные параметры получаемых пористых структур. Найдены условия обработки, при которых достигаются требуемые оптические характеристики формируемых мембран. Предложенные фильтры на основе ПЭНФ и ПИ трековых мембран могут быть использованы в рентгеновской астрономии в качестве фильтров детекторов солнечных телескопов и в оптических экспериментах с лабораторной плазмой.

PACS: 87.16.Dg

### Введение

Трековые мембраны (ТМ) — это пористый материал, нашедший широкое применение при фильтрации газовых и жидких сред. Менее известно, что трековые мембраны используются как фильтры оптического излучения в разных областях спектра [1–3]. Для этой цели служат пористые пленки с порами микронных и субмикронных размеров (по диаметру) из полиэтилентерефталата, ПЭТФ (Mylar, Melinex, Hostaphan). В технике ПЭТФ применяется также в качестве пленочных носителей информации и электроизоляции в конденсаторах. Монолитные пленки и пористые ПЭТФ-мембраны достаточно прочны и термостойки, что позволяет использовать их в различных лабораторных приборах и в бортовой аппаратуре рентгеновских телескопов [3] в условиях солнечного облучения и открытого космоса на околоземной орбите. Вместе с тем сейчас есть полимеры, заметно превосходящие ПЭТФ по ряду характеристик. К ним можно отнести хорошо известные пленки из термостойких полиимидов (ПИ) [4] и материала, способного в будущем заменить ПЭТФ во многих приложениях — полиэтиленнафталата (ПЭНФ) [5]. В данной работе рассматривается возможность изготовления из этих перспективных полимеров пористых мембран с заданными структурными параметрами. Исследуются свойства трековых мембран из ПИ и ПЭНФ, предлагаемых для использования в качестве дифракционных фильтров и опорных структур тонкопленочных рентгеновских фильтров.

### Физические характеристики полимерных пленок

В табл. 1 приведены справочные данные [4–10] о физических характеристиках ПЭТФ, ПЭНФ и наиболее распространенного из полиимидов на основе пиромеллитимида, существенные с точки зрения использования этих материалов при изготовлении фильтров оптического излучения. Плотность и элементный состав необходимы также при расчетах пробегов ускоренных ионов в материале при изготовлении ТМ. Граница поглощения, которая измерялась в данной работе, особенно важна при выборе полимера в экспериментах с жесткими требованиями к уровню блокировки видимого и УФ фонового излучения. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

### О дырчатом пропускании рентгеновских фильтров. Роль подложки

Традиционно изготовленный рентгеновский фильтр представляет собой однородную полимерную пленку толщиной порядка 0.1–10  $\mu\text{m}$ , напыленную с одной или двух сторон металлом, например, алюминием. Возможно использование многослойных покрытий из металлов, углерода, керамики или полимерных слоев. Толщина полимерной подложки, выбор материалов и толщины напыляемых слоев определяются рабочим спектральным диапазоном и требованием к уровню отсечки фоно-

Таблица 1.

Характеристика	Полимер		
	ПЭТФ	ПЭНФ	ПИ
Формула	$C_{10}H_8O_4$	$C_{14}H_{10}O_4$	$C_{22}H_{10}N_2O_5$
Плотность, $kg/m^3$	1.38–1.40	1.36–1.41	1.43
Прочность на разрыв, МПа	250–275	200–290	70–150
Модуль упругости, GPa	2–4	5.0–5.5	2–3
Термостойкость (максимальная рабочая температура), °C	115–170	155–180	250–320
Температура плавления или термического разложения, °C	264	273	Более 400
Температура стеклования, °C	70–80	120	321
УФ-граница прозрачности пленки толщиной 10–20 $\mu m$ , nm	310	375	420

вого излучения с длинами волн вне этого диапазона. Для мягкой рентгеновской и УФ-областей спектра ( $\lambda \sim 30\text{--}100\text{ nm}$ ) фильтры изготавливают без несущей полимерной подложки, которая практически при любой доступной толщине заметно поглощает „рабочее“ излучение. В этом случае фильтр делают в виде однородного слоя либо в виде сплошной тонкопленочной многослойной системы, причем свободно висящие слои, если их площадь велика, фиксируются на опорных сетках, чтобы обеспечить необходимую механическую и акустическую прочность. (Устойчивость полимерной пленки к продолжительному воздействию сильных акустических полей определяется такой принятой физической характеристикой пленочного материала, как стойкость к многократному изгибу.)

Двусторонняя металлизация полимерной основы и напыление многослойного покрытия обеспечивают не только заданное спектральное пропускание, но необходимы также для уменьшения вклада так называемого „дырчатого“ пропускания, возникающего на стадии изготовления или эксплуатации фильтра и вызванного либо дефектами напыления одиночного слоя, либо его старением (окислением), или какими-либо другими локальными повреждениями поверхности. Дырчатое пропускание фильтра легко визуально выявляется в виде картины „звездного неба“, если яркий источник света наблюдать через такой фильтр со сквозными (для света) дефектами напыленного металлического слоя (pinholes).

При двуслойном или многослойном устройстве рентгеновского фильтра заметно улучшаются его защитные свойства. Однако у этого правила есть исключения. Для длин волн, превышающих УФ-границу прозрачности полимерной пленки рентгеновский фильтр с двусторонней металлизацией можно рассматривать как высокодобротный резонатор Фабри–Перо. Очевидно, что эффективность подавления длинноволнового фонового излучения таким фильтром в проходящем свете в условиях резонансов значительно меньше, чем это следует из оценок, не учитывающих многократные отражения излучения от грани резонатора. Именно с таким обстоятельством столкнулись астрономы при эксплуатации станции ROSAT MISSION [8], когда в одном из приборов при рентгеновских наблюдениях некоторых

горячих звезд ошибочно была зафиксирована излишне высокая скорость счета. В этом приборе в качестве блокирующего рентгеновского фильтра перед детектором (микрочанальная пластинка) была установлена алюминизированная с двух сторон пленка из лексана (Lexan,  $C_{16}H_{14}O_3$ , бисфенол-А-поликарбонат) со сравнительно коротковолновой УФ-границей пропускания, находящейся около 230 nm (для тонких слоев полимера). Как оказалось, причиной ложного сигнала была высокая прозрачность лексана в УФ-диапазоне спектра. Детальные исследования оптических характеристик алюминизированных лексановых фильтров провели М. Бербера и его соавторы (М. Barbera et al. [8]), которые объяснили причину наблюдаемого ложного сигнала.

Для улучшения характеристик фильтра в резонатор Фабри–Перо необходимо внести эффективный поглотитель для УФ-диапазона. Это можно сделать несколькими способами. Самый простой и радикальный — использовать в качестве промежуточного слоя полимер, УФ-граница прозрачности которого сдвинута в видимую область, причем настолько, чтобы она оказалась за пределами спектральной чувствительности фотоприемника. Такая простая идея оказывается плодотворной и для технологии изготовления пористых дифракционных фильтров, и для композитных (многослойных) тонкопленочных фильтров на основе ТМ, когда важна роль полимерной матрицы, в которой происходит эффективное поглощение фонового излучения, испытывающего дифракцию на входных отверстиях пор [2].

### Спектральные характеристики полимерных пленок в УФ и видимом диапазонах

На рис. 1 представлены спектральные кривые пропускания однородных сплошных полимерных пленок из ПЭТФ толщиной 3.8 (1), ПЭНФ — 12 (2) и ПИ — 19 и около 0.34  $\mu m$  (3 и 4 соответственно). Оптические измерения были выполнены с помощью спектрофотометра Spekol UV-VIS (фирмы Carl Zeiss Technology) при спектральном разрешении 2 nm и нормальном падении пучка на образец. На том же рисунке приводится

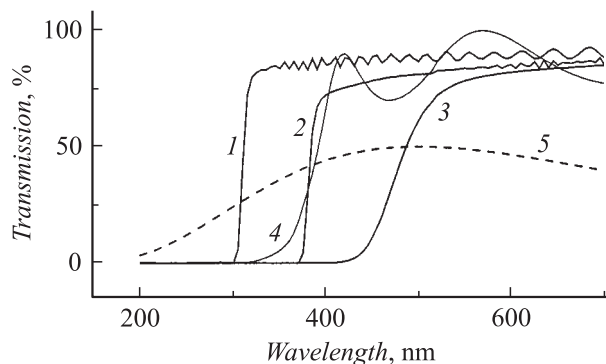


Рис. 1. Спектры пропускания полимерных пленок в УФ и в видимом диапазонах.

кривая 5 спектральной плотности излучения абсолютно черного тела с температурой 5770 К, моделирующего излучение Солнца в рассматриваемой спектральной области. Заметный сдвиг УФ-границ поглощения ПЭНФ и ПИ по отношению к границе поглощения ПЭТФ пленки указывает на преимущество рассматриваемых полимеров как материалов матриц рентгеновских дифракционных фильтров, предназначенных для эффективной блокировки длинноволнового фонового излучения Солнца или других источников с похожим спектром. Особенно результативным может быть применение мембран из ПЭНФ и ПИ в комбинации с так называемыми „солнечно-слепыми“ детекторами, которые, как правило, имеют длинноволновый „хвост“ чувствительности. Это некоторые типы металлических фотокатодов (например, Ве–Си катод), „открытая“ (безоконная) МКП, полупроводниковый алмазный детектор с УФ-границей чувствительности около  $0.2 \mu\text{m}$  и „солнечно-слепой“ фотодиод на основе AlGaN гетероструктуры с границей чувствительности около  $0.3 \mu\text{m}$  и т. д.

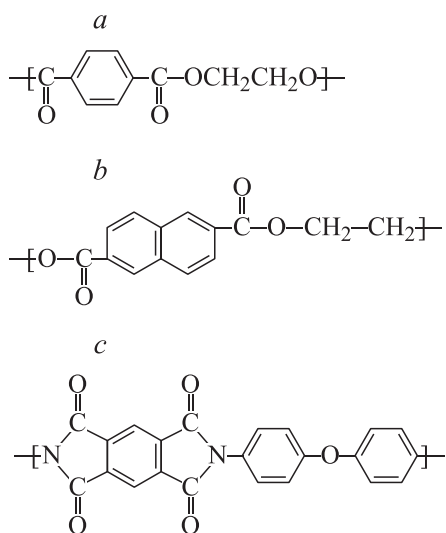


Рис. 2. Структурные формулы ПЭТФ (a), ПЭНФ (b) и ПИ на основе пиромеллитимида (c).

Положение границы пропускания в указанных полимерах определяется наличием в них сопряженных двойных связей с различной длиной цепи сопряжения. ПЭТФ содержит в своей цепи бензольное кольцо (рис. 2), которое сопряжено с двумя карбонильными группами ( $-\text{C}=\text{O}$ ). Такая структура имеет несколько полос поглощения в УФ-диапазоне, причем самая длинноволновая имеет максимум около  $300 \text{ nm}$ . ПЭНФ, в отличие от ПЭТФ, содержит нафталинную группировку вместо бензольной. Увеличение числа  $\pi$ -электронов, участвующих в сопряжении, сдвигает спектр поглощения ПЭНФ в сторону больших длин волн. Для ПИ мы имеем еще более протяженную полисопряженную систему (см. структурную формулу c на рис. 2), что приводит к дополнительному сдвигу края поглощения в видимую область спектра. Из этих трех полимеров только полиимид окрашен в желтый (а для толстых слоев даже в коричневый) цвет.

Отметим, что УФ-граница прозрачности полимеров не идеально резкая (особенно для полиимида) и смещается с изменением толщины пленки. Для пленок с толщиной порядка  $10\text{--}20 \mu\text{m}$  УФ-граница пропускания ПЭТФ, ПЭНФ и ПИ приблизительно равна  $310$ ,  $375$  и  $420 \text{ nm}$  соответственно. Доля поглощенной мощности от излучения Солнца этими пленками со стороны коротких длин волн (левее УФ-границы поглощения, рис. 1) составляет примерно 6 (ПЭТФ), 15 (ПЭНФ) и 23% (ПИ) от полной мощности излучения Солнца, равной около  $1370 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  (так называемой „солнечной постоянной“) вблизи земной орбиты за пределами атмосферы. Если толщина пленки уменьшается, ее граница прозрачности сдвигается в коротковолновую область. Так, полиимидная пленка толщиной около  $0.34 \mu\text{m}$  пропускает УФ-излучение чуть лучше, чем  $12 \mu\text{m}$  пленка из ПЭНФ, но она все же менее прозрачна к УФ-излучению, чем пленка ПЭТФ толщиной  $3.8 \mu\text{m}$  (рис. 1). Пленки любых полимеров с толщиной порядка  $0.01 \mu\text{m}$  или более тонкие прозрачны практически для всех длин волн оптического излучения.

## Методика изготовления ПЭНФ и ПИ трековых мембран

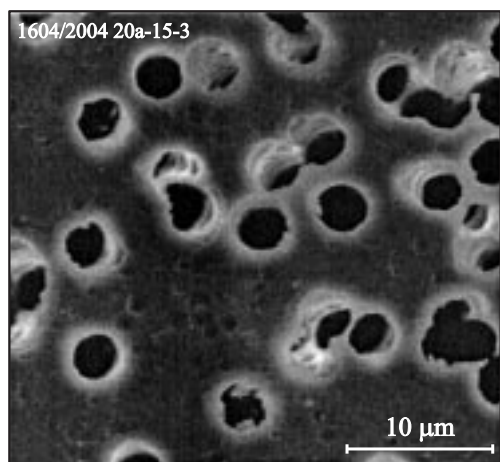
При изготовлении трековых мембран как материала для основы рентгеновских фильтров использовались промышленные полиэтилентерфталатные и полиимидные пленки. Пленки ПЭНФ Теопех производства фирмы Teijin (Япония) имели толщину  $12 \mu\text{m}$  и представляли собой материал, полученный методом экструзии из расплава с последующей двухосной ориентацией. Полиимидная пленка на основе пиромеллитимида номинальной толщиной  $20 \mu\text{m}$  была изготовлена в НПО „Пластик“ (Москва).

Полимерные пленки облучались сканирующим пучком ионов  $^{84}\text{Kr}$  с энергией  $253 \text{ MeV}$  на циклотроне У-400 Лаборатории им. Г.Н. Флерова ОИЯИ. Облучение проводилось в вакууме (при остаточном давлении воздуха порядка  $0.1 \text{ Pa}$ ). Интенсивность пучка ионов в процессе облучения составляла величину порядка

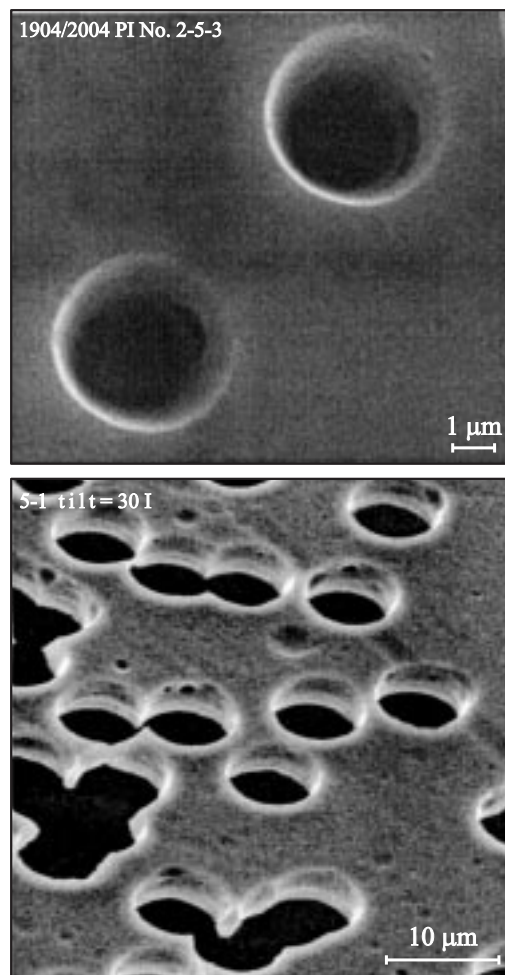
$10^{10} - 10^{11} \text{ s}^{-1}$ . Во время облучения пленка двигалась в направлении, перпендикулярном плоскости сканирования со скоростью  $0.05 - 0.2 \text{ m/s}$  (в зависимости от требуемой плотности пор в будущей мембране). Таким образом получали мембраны с каналами пор, ориентированными нормально к поверхности пленки.

Для получения мембран с каналами пор, разнесенными по углам входа в пленку, последняя огибала цилиндрический валик, радиус которого был равен высоте щели, определяющей размер ионного пучка по вертикали (схема облучения приведена, например, в работе [9]). В результате оси треков в пленке были распределены в интервале  $\pm 30^\circ$  по отношению к нормали (одномерный угловой разброс треков в пленке). Такое пространственное распределение треков в пленке обеспечивало существенное снижение числа взаимного наложения соседних пор и широкую одномерную угловую характеристику пропускания рентгеновского фильтра (по сравнению с массивом параллельных пор). Для данного исследования образцы пленки ПЭНФ были облучены в „непараллельном“ режиме (с угловым разбросом треком  $\pm 30^\circ$ ) пучком ионов с флюенсом  $2 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2}$ . На рис. 3 представлена электронная микрофотография поверхности образца изготовленной нами ПЭНФ трековой мембраны.

Перед травлением облученные пленки ПЭНФ были сенсibilизированы ультрафиолетовым излучением от эритемной лампы ЛЭ-30. Фотоокисление продуктов радиолиза в треках в случае ПЭНФ весьма эффективно для увеличения скорости и избирательности травления треков [5]. Благодаря увеличению избирательности травления треков вплоть до  $\sim 10^4$  при последующей химической обработке треки трансформировались в цилиндрические полые каналы [6]. Травление ПЭНФ-пленок проводили в 5М растворе NaOH при  $85^\circ\text{C}$ . В зависимости от времени травления (30–90 min) получались мембраны с различным диаметром пор и толщиной. При необходимости угол конуса пор в ПЭНФ может варьироваться выбором других условий травления, подобно тому как



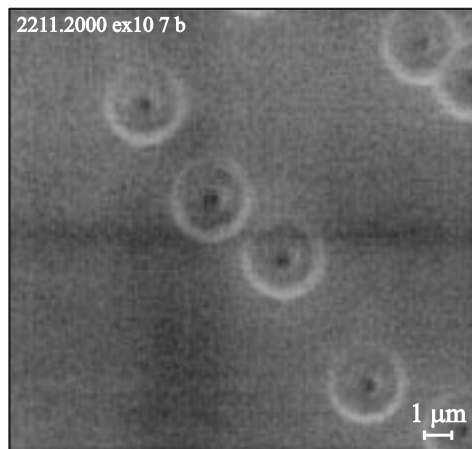
**Рис. 3.** Изображение поверхности одного из образцов ПЭНФ трековой мембраны.



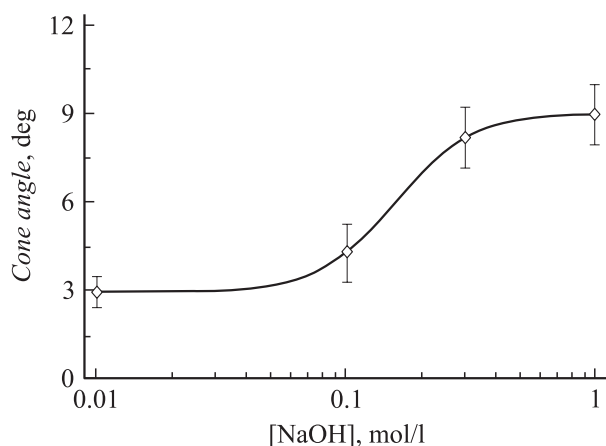
**Рис. 4.** Электронные микрофотографии поверхностей ПИ трековых мембран.

это делается обычно при изготовлении ПЭТФ трековых мембран [13].

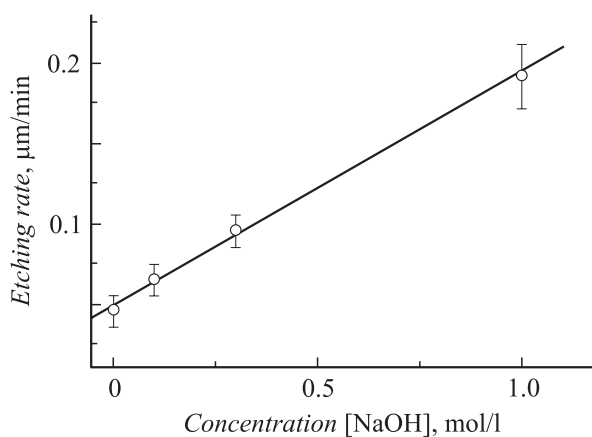
Полиимидная пленка была облучена, в отличие от ПЭНФ, нормально к поверхности, плотность облучения составила  $N = 7 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-2}$  (рис. 4 и 5). Облученные ионами ПИ образцы травил при температуре  $80^\circ\text{C}$  в растворе гипохлорита натрия (с плотностью  $1.22 \text{ kg/dm}^3$ ), к которому добавляли гидроксид натрия в количестве  $0.3 \text{ mol/l}$ . В работе [7] было установлено, что избирательность травления треков в ПИ зависит от pH раствора гипохлорита. Это обстоятельство позволило нам контролируемо увеличивать угол конуса вытравливаемых каналов за счет внесения в раствор дополнительного количества щелочи. Графики на рис. 6 и 7 показывают зависимости угла конуса  $\delta$  (полный угол при вершине конуса поры —  $2\delta$ ) и скорости травления пленки ПИ с поверхности от содержания NaOH в растворе NaClO. При содержании едкого натра  $1 \text{ mol/l}$  угол конуса достигает  $10^\circ$ . Одновременно с увеличением угла конуса увеличивается скорость травления ПИ-пленки. Эти два фактора в совокупности дают возможность варьировать параметры изготавливаемых мембран в широких пределах.



**Рис. 5.** Вид поверхности облученной ионами ПИ пленки после травления в 1М растворе NaOH в NaClO. Поры имеют заметную конусную форму.



**Рис. 6.** Половинный угол при вершине конуса травления  $\delta$  у полиимидных пленок, обработанных в растворе NaClO с начальной плотностью  $1.22 \text{ g/cm}^3$ , в зависимости от концентрации добавленного к раствору NaOH.



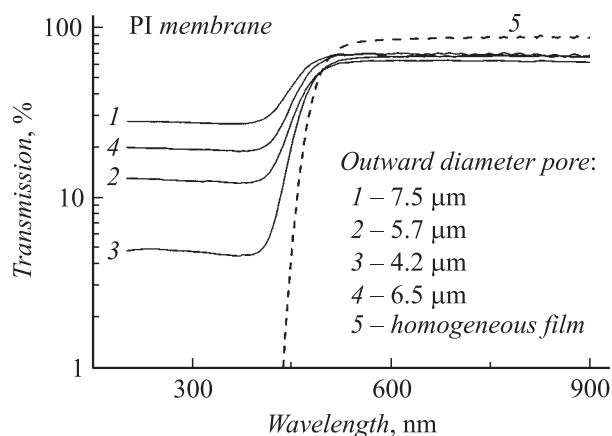
**Рис. 7.** Скорость травления поверхности ПИ-пленок в зависимости от содержания NaOH в растворе NaClO.

## Оптическое пропускание ПИ-фильтров

На рис. 8 приведены измеренные на спектрометре Spekol кривые пропускания серии ПИ-мембран с крупными порами. Левее УФ-границы прозрачности ПИ эти кривые практически при любой оптической плотности фильтров имеют малый наклон, что позволяет рассматривать данную серию пористых образцов из полиимидной пленки как набор нейтральных светофильтров с разной оптической плотностью для широкого диапазона от УФ до мягкой рентгеновской области спектра. В табл. 2 приведены измеренные параметры пор исследуемых полиимидных мембран с параллельными порами и плотностью пор  $N = 7 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-2}$  (с той же нумерацией образцов, что у кривых на рис. 8). Угол конуса  $\delta$  определялся с погрешностью около половины градуса.

## Обсуждение результатов

При решении экспериментальных задач рентгеновской и УФ-оптики представляют интерес ТМ со сквозными порами микронного и субмикронного размеров и плотностью пор  $N$  от  $\approx 10^5$  до  $10^9 \text{ cm}^{-2}$ . Трековая мембрана может выполнять роль нейтрального ослабителя, коллиматора, дифракционного фильтра, диффузного (матового) рассеивателя, фазового экрана с нерегулярной структурой неоднородностей показателя преломления и т.д. Оптические свойства фильтров на основе ТМ на заданной длине волны излучения  $\lambda$  определяются только формой и размерами пор мембраны и оптическими характеристиками материала мембран и дополнительных покрытий [1,2]. Для разных мембран можно предложить единый подход к оценке их оптических свойств, если воспользоваться масштабированием или ввести полный набор безразмерных параметров, характеризующих мембрану. В случае мембран с цилиндри-



**Рис. 8.** Спектры пропускания ПИ трековых мембран с крупными коническими порами типа „песочные часы“ с половинным углом конуса  $\delta = 8.5^\circ$  (кривые 1–4). Плотность пор  $N = 7 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-2}$ . Кривая 5 — спектр пропускания исходной пленки.



Таблица 2.

Характеристика	Номер образца			
	1	4	2	3
Внешний диаметр пор, $\mu\text{m}$	7.5	6.5	5.7	4.2
Минимальный внутренний диаметр пор, $\mu\text{m}$	6.7	5.5	4.5	3.0
Толщина мембраны, $\mu\text{m}$	5	7	8	9
Половинный угол конуса при вершине $\delta$ , deg	9	8.5	8.5	7.6

ческими параллельными порами такими основными параметрами могут быть величины  $P_1$ – $P_4$ , определяемые следующим образом:  $P_1 = \lambda/D$ ,  $P_2 = \lambda L/D^2$ ,  $P_3 = D/d$  и  $P_4 = \lambda/\lambda_{uv}$ . Здесь  $d$  — среднее расстояние между ближайшими соседними порами:  $d = 0.5N^{-1/2}$ ,  $\lambda_{uv}$  — УФ-граница прозрачности полимера (или его покрытия). В следующем приближении при описании оптических свойств пористой мембраны надо учитывать отклонение формы пор от цилиндрической, шероховатость стенок пор, конечную длину поглощения излучения в материале мембраны и т.д. Однако определяющие параметры в этой задаче — это  $P_1$ – $P_4$ . Параметры  $P_1$  и  $P_2$  характеризуют дифракционное качество входных и выходных отверстий пор и их каналов [1]. Вклад парных (двойных) и многократных наложений пор может быть описан с помощью параметра  $P_3$ . Нетрудно видеть, что  $P_3 = f(P_n) = 4*(P_n/\pi)^{1/2}$ , где  $P_n$  — номинальная пористость фильтра:  $P_n = \pi D^2 N/4$ . Поэтому параметр  $P_3$  можно заменить равноценной величиной  $P_n$ .

Параметр  $P_4 = \lambda/\lambda_{uv}$  указывает на длинноволновую границу спектрального диапазона, в котором ТМ с порами малого диаметра выполняют роль дифракционных фильтров даже без дополнительного покрытия полимерной матрицы металлом [14]. У мембран ПИ и ПЭНФ эта граница находится значительно правее по шкале длин волн, чем у всех других полимерных трековых мембран, изготавливаемых в настоящее время, в том числе и лавсановых (ПЭТФ) мембран. Сдвиг границы на величину в несколько десятков нанометров оказывается принципиально важным. Можно привести такой пример. У алмазного рентгеновского детектора область длин волн  $\lambda \leq 225 \text{ nm}$  соответствует фундаментальному поглощению кристалла алмаза, а в области  $\lambda \leq 350 \text{ nm}$  происходит поглощение на примесях [15], ответственное за остаточную чувствительность детектора к фоновому УФ-излучению. Поэтому оптические фильтры на основе трековых мембран из ПИ и ПЭНФ для алмазного детектора предпочтительнее, чем обычные ПЭТФ-мембраны с порами такой же геометрии и тем же размером пор. Кроме того, как уже отмечалось выше, мембраны ПИ и ПЭНФ обладают лучшими тепловыми и механическими свойствами по сравнению с аналогичными ПЭТФ-образцами трековых мембран.

Укажем еще на одно возможное применение изготовленных нами ПИ трековых фильтров. Они могут

быть использованы в качестве опорных подложек для сверхтонких полиимидных мембран, сформированных методом Лэнгмюра–Блоджетта. Таким образом из многослойных композиций можно изготавливать термостойкие рентгеновские фильтры с очень высоким уровнем подавления УФ-излучения и светового фона, аналогично тому, как это было сделано в работе [2] на основе ПЭТФ пористых мембран, покрытых с двух сторон пленками металла.

## Выводы

В результате проведенных экспериментов выявлено, что при помощи метода химического травления ионных треков могут быть изготовлены пористые полиимидные и полиэтиленафталатные мембраны, перспективные для использования в качестве дифракционных оптических фильтров и подложек тонкопленочных фильтров для приборов рентгеновской астрономии, а также для лабораторных приложений. Найдены условия радиационной и пострadiационной обработки пленок с целью получения мембран с заданными характеристиками, которые зависят от размеров пор, их плотности и формы каналов. Установлено, что весь набор параметров известных ПЭТФ трековых мембран может быть воспроизведен для мембран из ПЭНФ. Максимальная плотность пор у ПИ трековых мембран со сквозными порами ограничена величиной порядка  $(1-2) \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$  для используемых исходных пленок и реактивов из-за небольшой, но неизбежной конусности пор.

Из пленок ПИ и ПЭНФ нами были изготовлены серии мембран с крупными порами и измерены их параметры. Эти мембраны могут служить в качестве нейтральных оптических фильтров в мягкой рентгеновской и вакуумной ультрафиолетовой области спектра.

Авторы благодарят О.М. Иванова за проведение облучения образцов ускоренными тяжелыми ионами и Ф.А. Пудонина за подготовку образцов к РЭМ-исследованиям. Авторы признательны также С.Н. Акименко и Н.В. Левкович за помощь в экспериментах.

## Список литературы

- [1] *Mitrofanov A.V., Apel P.Yu.* // Nucl. Instrum. and Meth. 1989. Vol. A 282. P. 542–545.
- [2] *Митрофанов А.В.* // ПТЭ. 1997. № 5. С. 137–141.
- [3] *Апель П.Ю.* // Nucl. Instrum. and Meth. 2003. Vol. B 208. P. 11–20.
- [4] *Бессонов М.И., Котон М.М., Кудрявцев В.В., Лайус Л.А.* Полиимиды — класс термостойких полимеров. Л.: Наука, 1983. 328 с.
- [5] *Апель П.Ю., Блонская И.В., Оганessian В.Р. et al.* // Nucl. Instrum. and Meth. 2001. Vol. B 185. P. 216–221.
- [6] *Акименко С.Н., Мамонова Т.И., Орелович О.Л. и др.* // Мембраны. 2002. № 15. С. 21–28.
- [7] *Trautmann C., Bruechle W., Spohr R. et al.* // Nucl. Instrum. and Meth. 1996. Vol. B 111. P. 70.

- [8] *Barbera M., Collura A., Dara A.* et al. // *Experimental Astronomy*. 1997. Vol. 7. P. 51–63.
- [9] *Флеров Г.Н., Апель П.Ю., Дудык А.Ю.* и др. // *Ат. энергия*. 1989. Т. 67. № 4. С. 274–280.
- [10] Goodfellow-Material Information: <http://www.goodfellow.com>
- [11] *Powell Forbes R., Keski-Kuha Ritva A.M., Zombeck Martin V.* et al. // *Proc. SPIE*. 1997. Vol. 3113. P. 432–440.
- [12] *Tretyakova S.P., Apel P.Yu., Jolos L.V.* et al. // *Proc. 10th Int. Conf. on Solid State Nuclear Track Detectors*. 1980. N 2. P. 283–287.
- [13] *Mitrofanov A.V., Pudonin F.A., Apel P.Yu., Gromova T.I.* // *Nucl. Instrum. and Meth.* 1991. Vol. A 308. P. 347–351.
- [14] *Field J.E.* *The properties of diamond*. Lnd.: Academ. Press, 1979.
- [15] *Лучинин В.В., Голоудина С.И., Пасюта В.М.*, и др. // *Письма в ЖТФ*. 2005. Т. 31. Вып. 8. С. 57–61.