

СТРУКТУРА
И СВОЙСТВА

УДК 541.64:535.012

ОПТИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОРИСТЫХ
ПЛЕНОК ПОЛИВИНИЛИДЕНФТОРИДА

© 2021 г. Е. А. Ефремова^а, И. Р. Крылов^б, А. А. Зинчик^{а,*}, У. В. Прохорова^б, В. И. Шоев^а,
О. В. Матвиевская^б, Д. И. Герасимов^с, И. С. Курындин^с, Г. К. Ельяшевич^с

^а Университет ИТМО. Физический факультет
197101 Санкт-Петербург, ул. Чайковского, 14, Россия

^б Санкт-Петербургский государственный университет. Физический факультет
198504 Санкт-Петербург, Университетская наб., 14, Россия

^с Институт высокомолекулярных соединений Российской академии наук
199004 Санкт-Петербург, Большой пр., 31, Россия

*e-mail: alexander.zinchik@metalab.ifmo.ru

Поступила в редакцию 07.07.2021 г.

После доработки 19.07.2021 г.

Принята к публикации 02.08.2021 г.

Исследована оптическая анизотропия ориентированных пленок поливинилиденфторида, сформированных экструзией расплава, и пористых пленок, полученных методом двустадийной вытяжки отожженных экструдированных образцов. По изменению поляризации света при его прохождении через пленки определена разность показателей преломления света, поляризованного в двух взаимно ортогональных плоскостях. Измерено пропускание света обоих направлений поляризации.

DOI: 10.31857/S2308112021060043

ВВЕДЕНИЕ

Поливинилиденфторид находит сегодня все более широкое применение в качестве пьезоактивного полимерного материала. Это касается прежде всего разнообразных пленочных материалов из ПВДФ для перспективных устройств нового поколения, таких как пьезосуперконденсаторы и пьезобиосенсоры [1–4]. Большинство процессов производства пленок и волокон ПВДФ основано на относительно простых и дешевых методах формования из растворов или расплавов [5–7]. Новым направлением является использование пленок из ПВДФ в качестве разделительного материала (сепаратора) в источниках тока с различными электролитами, что связано со стойкостью ПВДФ к органическим растворителям, кислотам и щелочам. Пористые пленки также могут служить основой (матрицей или подложкой) для нанокмозитов, изготавливаемых путем нанесения на пленку различных покрытий [8–10]. Кроме того, эти пленки перспективны как материалы, в которых пьезоподложка сочетается с другими активными компонентами, что дает возможность создания целого ряда гибридных систем. В центре внимания находятся пленки ПВДФ, получаемые экструзией расплава полимера, поскольку экструзия — экологически безопасный процесс, в котором не используются

токсичные растворители и/или добавки. Благодаря ориентированной структуре, которая формируется в условиях деформирующих воздействий, такие пленки демонстрируют сильное наведенное двулучепреломление [11–13].

Показатель преломления и двойное лучепреломление являются фундаментальными оптическими свойствами, поскольку они напрямую связаны с другими физическими характеристиками полимерных пленок, такими как кристалличность и функция ориентации молекул. Любая ориентированная полимерная пленка имеет два основных показателя преломления: один (n_{\parallel}) измеряется для света, поляризованного в плоскости, параллельной направлению ориентации, а другой (n_{\perp}) — для света, поляризованного в плоскости, перпендикулярной направлению ориентации. Разница между ними ($n_{\perp} - n_{\parallel}$) определяет двулучепреломление, которое характеризует оптическую анизотропию пленки.

Объектами исследования в настоящей работе служат пористые пленки ПВДФ, полученные экструзией расплава с последующими стадиями отжига и одноосного растяжения при комнатной и повышенной температурах (стадии порообразования). Формование пленок на стадии экструзии происходит в условиях приложения к расплаву растягивающего напряжения (фильерной вы-

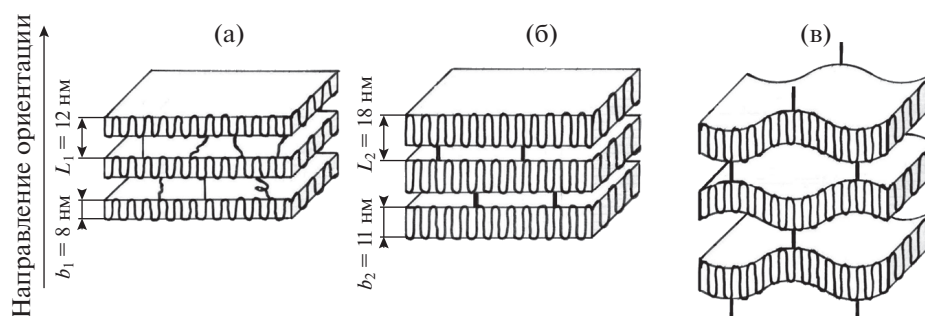


Рис. 1. Модель структуры пленок ПВДФ на стадиях экструзии (а), изометрического отжига (б) и одноосного растяжения (порообразования) (в), L_1 и L_2 – рентгеновский большой период, b_1 и b_2 – толщина ламели.

тяжки). Как было показано ранее [14–18], при кристаллизации расплава формируется ориентированная надмолекулярная структура в виде складчатых ламелярных кристаллитов, расположенных параллельно друг другу и перпендикулярно направлению течения расплава. После отжига пленки приобретают жесткоэластические свойства, а именно, способность к большим обратимым деформациям (порядка сотен процентов) [14, 15]. При последующем одноосном растяжении жесткоэластических образцов в пленках появляются разрывы сплошности – поры. При оптимальном выборе условий формирования пористой структуры в данном процессе были получены пленки с высокими значениями общей пористости (25–30%) [19, 20]. В отличие от хорошо изученных непористых слабоориентированных пленок ПВДФ [21] и пленок с низкой общей пористостью, составляющей порядка 10% [16–18], высокопористые пленки ПВДФ, которые являются новыми материалами, обладающими и пористостью, и пьезоактивными свойствами, практически не изучены.

В результате трансформации структурной организации пленки ПВДФ на разных этапах ее формирования имеют существенно различающиеся оптические свойства. Соответственно методы оптического неразрушающего контроля могут предоставить новую информацию о структуре полимера. Кроме того, устройства оперативного управления могут быть интегрированы непосредственно в установку по производству пористых пленок из ПВДФ. Одним из способов неразрушающего контроля является определение разницы показателей преломления для ортогональных направлений пленки – в направлении ориентации и в перпендикулярном к нему. Эта разница зависит от степени ориентации полимерного материала, которая определяется кратностью фильерной вытяжки на стадии экструзии и степенью деформации при растяжении жесткоэластических образцов.

Анизотропный характер структуры исследуемых пленок, обусловленный их ориентированной надмолекулярной организацией, предполагает большую разницу показателей преломления ($n_{\perp} - n_{\parallel}$), сравнимую с различием показателей преломления кристаллитов, полученных в работах [22–25]. Целью данной работы было исследование двойного лучепреломления ориентированных (экструдированных отожженных и пористых) пленок ПВДФ методом оптического неразрушающего контроля и установление связи между кратностью фильерной вытяжки на стадии формирования исходных пленок и разницей показателей преломления для двух ортогональных плоскостей поляризации света.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ориентированные пленки ПВДФ получали из гранул ПВДФ марки Kynar-720 (“Atofina Chemicals Inc.”, США) с молекулярной массой $M_w = 1.9 \times 10^5$, температурой плавления 168°C и плотностью 1.78 г/см^3 . Пленки формировали на лабораторной линии (“SCAMIA”, Франция) путем экструзии расплава полимера при температуре 200°C через плоскощелевую фильеру. Кристаллизация полимера происходила в зоне выхода расплава из фильеры, охлаждаемой потоком воздуха. Степень ориентации расплава регулировали кратностью фильерной вытяжки Λ , определяемой как отношение скорости приема пленки к скорости ее выхода из фильеры; Λ варьировали от 20 до 121. Экструдированные пленки отжигали в изометрическом состоянии в течение 1 ч при температуре, близкой к температуре плавления полимера.

На стадиях экструзии и изометрического отжига пленки приобретают ориентированную кристаллическую структуру, состоящую из стопок крупных ламелей (рис. 1) (пластинчатых кристаллов), в которых молекулярные цепи вытянуты в направлении ориентации пленки.

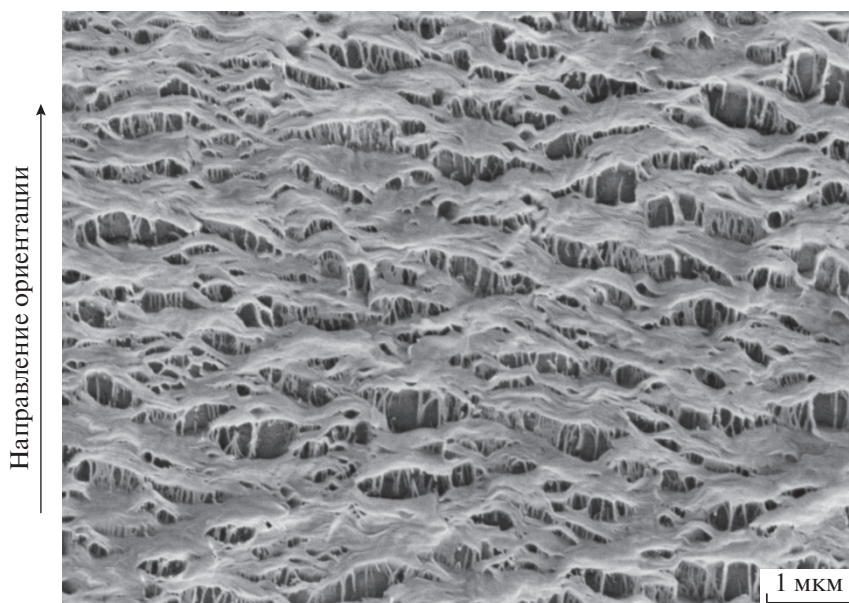


Рис. 2. Электронно-микроскопическая фотография поверхности пористой пленки, сформованной при $\Lambda = 121$.

Отожженные пленки подвергали двум стадиям одноосного растяжения: на 50% при температуре 25°C (“холодная” вытяжка), затем дополнительно на 40% при 100°C (“горячая” вытяжка). Процесс одноосного растяжения отожженных пленок приводит к раздвижению ламелей и появлению пор между ними. При высоких степенях деформации пленок при их получении в результате увеличения размера и числа пор в пленках формируются сквозные каналы, и образец становится проницаемым для жидкостей [19, 20]. Для стабилизации пористой структуры пленки выдерживаются в растянутом состоянии при 100°C для снятия внутренних напряжений, накопленных при одноосной деформации.

Степень ориентации пленок регулируется условиями их получения: для экструдированных образцов она определяется кратностью фильерной вытяжки Λ , а для пористых пленок ее величина возрастает как с повышением Λ , так и с увеличением степени одноосного растяжения на стадиях порообразования. В данной работе суммарная степень растяжения на “холодной” и “горячей” стадиях была одинаковой для всех образцов, что позволило исследовать зависимость характеристик оптической анизотропии пористых пленок от кратности фильерной вытяжки.

На рис. 2 представлен электронно-микроскопический снимок поверхности пористой пленки ПВДФ, сформованной при $\Lambda = 121$. Снимок демонстрирует рельефный характер поверхности, который связан с появлением в образце сквозных каналов [19]. Чередование расположенных параллельно друг другу рельефных образований из от-

вержденного материала и впадин (пор) между ними отражает характер внутренней структуры пористого образца, состоящей из стопок кристаллических ламелей, расположенных параллельно друг другу и соединенных “мостиками” напряженных проходных цепей. Ранее было показано [14], что структура данных пористых пленок характеризуется фрактальным набором структурных образований, имеющих разный масштаб: рельеф поверхности имеет субмикронный масштаб, а размер элементов внутренней кристаллической структуры — ламелей — составляет порядка десятков нанометров. В процессе растяжения и появления пор прозрачная отоженная пленка становится молочно-белой (непрозрачной в видимом свете) из-за сильного оптического рассеяния на стенках пор.

В работе регистрировали изменение направления плоскости поляризации света, проходящего через пленку ПВДФ. Измерения были произведены в зависимости от кратности фильерной вытяжки Λ как для экструдированных и затем отоженных пленок, так и для пористых образцов. По изменению направления поляризации была рассчитана разность показателей преломления Δn для света, поляризованного вдоль и поперек направления ориентации пленки. Разницу показателей преломления определяли с помощью установки, схема которой приведена на рис. 3.

Установка состоит из лазера и последовательно расположенных вдоль его оптической оси поляризатора, образца полимерной пленки, четвертьволновой пластинки, собирающей линзы, анализатора и фотоприемника. Первоначально

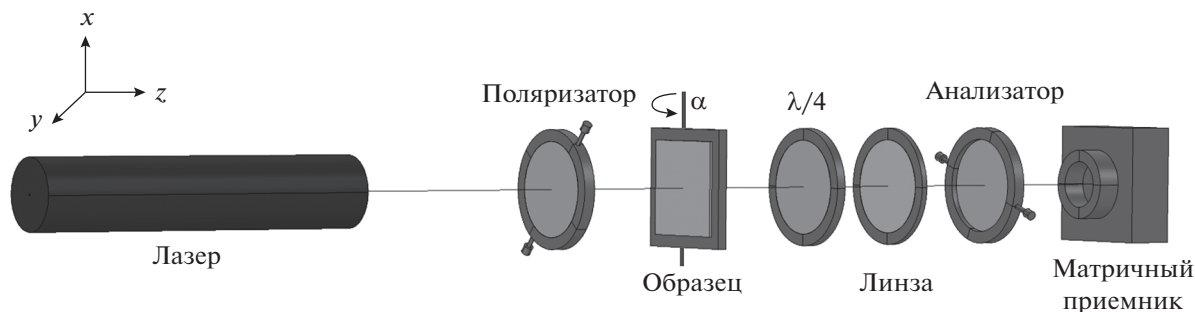


Рис. 3. Оптическая схема установки для определения разности показателей преломления.

все элементы установки располагаются перпендикулярно лазерному лучу, однако образец пленки можно вращать вокруг вертикальной оси X , чтобы изменить угол падения света на поверхность пленки. Ось пропускания поляризатора, находящегося перед исследуемым образцом, наклонена и образует угол 45° с направлением вытяжки пленки (с вертикальной осью X). В качестве источников излучения использовали лазеры с длиной волны 633, 532 и 407 нм.

Линейно поляризованный свет, проходя через полимерную пленку, становится эллиптически поляризованным в результате двойного лучепреломления. Для угла 45° между осью поляризатора и направлением ориентации полимерной пленки ось эллипса поляризации параллельна оси поляризатора для любой степени анизотропии пленки. После выхода из полимерной пленки луч проходит через четвертьволновую пластину. Ее “быстрая” ось направлена параллельно оси поляризатора и параллельно оси эллипса эллиптической поляризации света, падающего на четвертьволновую пластинку. На выходе из четвертьволновой пластинки свет снова становится линейно поляризованным, а направление поляризации зависит от эксцентриситета эллипса поляризации света перед четвертьволновой пластинкой и образует некоторый угол θ с направлением оси пропускания поляризатора. Линза собирает свет, рассеянный полимерной пленкой, на приемник. С помощью анализатора и приемника измеряется угол поворота плоскости линейной поляризации света θ при его прохождении через полимерную пленку и четвертьволновую пластинку.

Угол поворота плоскости поляризации θ и разность фаз $\varphi = 2\pi \frac{n_{\perp}h - n_{\parallel}h}{\lambda}$, которую вносит полимерная пленка толщиной h при прохождении света, линейно поляризованного в направлении, перпендикулярном направлению ориентации пленки, и направлении, параллельном направлению ориентации, связаны простым соотношением

$\theta = \frac{\varphi}{2}$, где $\theta > 0$ и $n_{\perp} > n_{\parallel}$, если поляризация начинает поворот в сторону направления ориентации пленки. Тогда по измеренному углу θ можно рассчитать разность показателей преломления по формуле

$$n_{\perp} - n_{\parallel} = \frac{\theta \cdot \lambda}{\pi \cdot h}, \quad (1)$$

где λ – длина световой волны в вакууме.

Угол θ поворота плоскости линейной поляризации света при прохождении полимерной пленки и четвертьволновой пластинки связан с измеряемым углом θ_0 соотношением $\theta = \theta_0 + m \times 180^\circ$, где m – целое число.

На практике угол θ оказывается больше 180° . В таком случае величина $m \times 180^\circ$ вносит неоднозначность в определение угла поворота поляризации θ по измеряемому углу θ_0 .

Для устранения неопределенности $m \times 180^\circ$ нами были проведены аналогичные измерения для полимерной пленки, повернутой на различные углы относительно вертикального направления – направления ориентации пленки (вокруг оси X). Если свет падает на пленку под некоторым углом α , эффективная толщина пленки увеличивается. Соответственно повышается разность хода (и разность фаз) для двух направлений поляризации. Так как она квадратично зависит от угла поворота пленки, при малых углах поворота пленки изменение поворота поляризации заведомо лишено неопределенности $m \times 180^\circ$.

$$\delta\theta = \pi \frac{h}{\lambda} (\sqrt{n_{\perp}^2 - \sin^2(\alpha)} - n_{\perp} - \sqrt{n_{\parallel}^2 - \sin^2(\alpha)} + n_{\parallel}) \quad (2)$$

Набор данных для значений угла поворота плоскости поляризации θ , соответствующих разным углам поворота пленки α , позволяет снять неопределенность, связанную с величиной $m \times 180^\circ$.

Угол поворота поляризации света θ при нормальном падении света на пленку определяет раз-

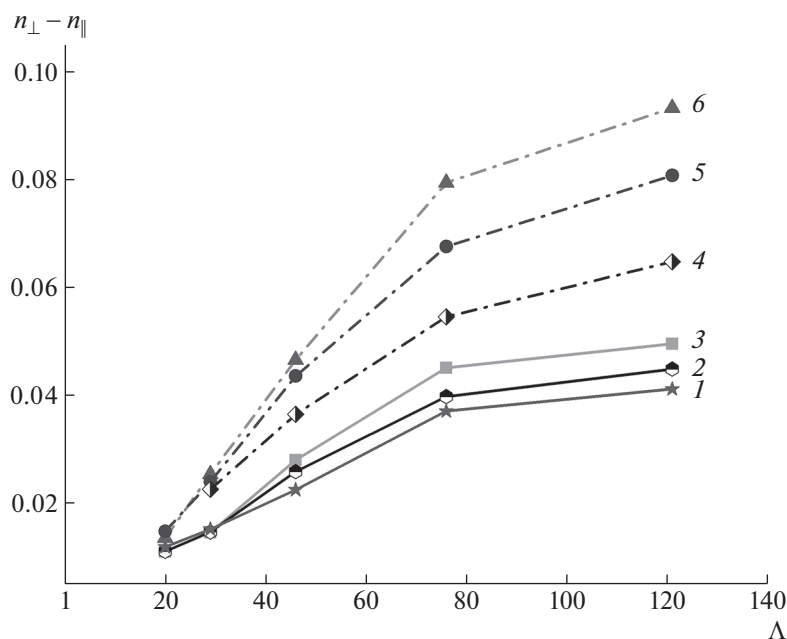


Рис. 4. Разница показателей преломления света, поляризованного в двух ортогональных направлениях, в зависимости от кратности фильерной вытяжки для отожженных (1–3) и пористых (4–6) пленок. Длина волны $\lambda = 407$ (1, 4), 532 (2, 5) и 633 нм (3, 6).

ность показателей преломления полимерной пленки по формуле (1).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 приведены рассчитанные по приведенной методике разности показателей преломления для двух ортогональных направлений поляризации света как функции кратности фильерной вытяжки для экструдированных и пористых пленок ПВДФ.

Отсутствие данных для пористой пленки, полученной при кратности фильерной вытяжки $\Lambda = 20$, при длине волны источника 407 нм связано с нулевым пропусканием образца в этом спектральном диапазоне.

Образцы со слабой ориентацией имеют разницу показателей преломления Δn порядка 0.01. Величина Δn практически линейно растет с повышением кратности фильерной вытяжки Λ и достигает 0.04 для отожженных образцов при Λ , стремящейся к 80. Затем величина Δn более плавно увеличивается с ростом Λ .

Как следует из рис. 4, для пористых пленок дополнительное одноосное растяжение в процессе порообразования приводит к дальнейшему существенному повышению разности показателей преломления, тем более значительному, чем выше была Λ при получении исходных образцов. Отметим, что зависимости Δn от Λ для пористых пленок сохраняют резкий практически линейный

рост в диапазоне значений Λ от 20 до 80 и более плавное увеличение при $\Lambda > 80$. Можно предположить, что проскальзывание полимерных цепей при высоких скоростях деформации расплава Λ приводит к замедлению роста степени ориентации образцов и, соответственно, характеристик их степени анизотропии.

Для сравнения можно привести результаты работы [21], которые демонстрируют рассчитанную разницу показателей преломления Δn для непористых сильно ориентированных пленок из ПВДФ, достигающую 0.04, что хорошо коррелирует с экспериментальными значениями, полученными в нашей работе.

Используя формулу (2) и экспериментальную зависимость угла поворота поляризации θ от поворота пленки α , можно методом наименьших квадратов найти с относительно высокой точностью (0.2 – 1%) разность показателей преломления $n_{\perp} - n_{\parallel}$ (рис. 4) и с гораздо меньшей точностью (1.5–7.0%) – сами показатели преломления. Результаты расчетов для $\lambda = 633$ нм приведены в табл. 1. Погрешности, указанные в табл. 1, равны утроенным стандартным отклонениям, полученным из разброса экспериментальных данных.

На основании данных этой таблицы можно предположить, что показатель преломления n_{\parallel} для света, поляризованного в направлении, параллельном направлению ориентации пленки, почти не зависит от кратности фильерной вытяжки. Показатель преломления n_{\perp} для света, поля-

Таблица 1. Показатели преломления пленок ПВДФ для света ($\lambda = 633$ нм), поляризованного в двух направлениях, рассчитанные по изменению направления поляризации света

Λ	h , мкм	n_{\perp}	$\Delta n = n_{\perp} - n_{\parallel}$	$n_{\parallel} = n_{\perp} - \Delta n$
Отожженная пленка				
20	96	1.42 ± 0.07	0.0110 ± 0.0001	1.41
29	57	1.39 ± 0.05	0.0146 ± 0.0001	1.37
46	36	1.41 ± 0.05	0.0280 ± 0.0002	1.39
76	23	1.42 ± 0.05	0.0451 ± 0.0005	1.38
121	17	1.45 ± 0.05	0.0497 ± 0.0005	1.40
Пористая пленка				
20	66	1.40 ± 0.05	0.0136 ± 0.0001	1.38
29	45	1.42 ± 0.05	0.0254 ± 0.0002	1.39
46	20	1.46 ± 0.05	0.0468 ± 0.0003	1.41
76	17	1.49 ± 0.02	0.0843 ± 0.0003	1.41
121	15	1.50 ± 0.10	0.0930 ± 0.0015	1.41

ризованного в направлении, перпендикулярном направлению ориентации, увеличивается с ростом кратности фильерной вытяжки Λ . Такой результат означает, что степень ориентации ламелей в структуре полимера повышается с увеличением кратности фильерной вытяжки, так как в противном случае пористость пленки должна только уменьшать показатели преломления.

Пористые пленки заметно рассеивают свет. Результаты измерения пропускания света пленками ПВДФ в зависимости от длины волны света представлены в табл. 2. Пропускание и рассеяние света пленками в зависимости от поляризации света приведены в табл. 3.

Таблица 2. Коэффициент пропускания пленками ПВДФ света разных длин волн

Λ	h , мкм	T_{\perp}		
		$\lambda = 633$ нм	$\lambda = 532$ нм	$\lambda = 407$ нм
Отожженная пленка				
20	96	0.84	0.84	0.70
29	57	0.85	0.84	0.71
46	36	0.91	0.87	0.81
76	23	0.92	0.90	0.85
121	17	0.92	0.90	0.85
Пористая пленка				
20	66	0.22	0.18	—
29	45	0.60	0.36	0.21
46	20	0.74	0.45	0.38
76	17	0.85	0.69	0.50
121	15	0.94	0.82	0.71

Экструдированные и отоженные пленки ПВДФ характеризуются высокими коэффициентами пропускания света в видимой части спектра, особенно в ее длинноволновой области [26]. Коэффициент пропускания света с длиной волны 633 нм составляет 80% при толщине пленки 20 мкм. В нашем случае для той же длины волны света коэффициент пропускания для отоженных пленок находится в пределах 85–90%. В то же время при переходе к коротковолновой области видимого диапазона спектра коэффициент пропускания для них значительно понижается, а рассеяние света увеличивается.

В табл. 3 приведены данные по коэффициенту пропускания T и коэффициенту рассеяния R , рассчитанному из T по соотношению

$$T \approx \left(1 - \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2\right) \cdot (1-R) \cdot \left(1 - \left(\frac{1-n}{1+n}\right)^2\right),$$

где $n \approx 1.4$.

Пропускание пленок измерено на длине волны 532 нм в двух направлениях поляризации света: параллельном (T_{\parallel}) и перпендикулярном (T_{\perp}) направлению ориентации пленок. Интересно, что более сильное рассеяние наблюдается для света, поляризованного в направлении, параллельном ориентации пленки, а показатель преломления является более высоким для света, поляризованного в перпендикулярном направлении.

Пористые пленки, как и можно было ожидать, в большей степени рассеивают свет и в меньшей степени его пропускают. Кроме того, для пористых образцов прослеживается более сильная зависимость коэффициента рассеяния от толщины пленки, чем для отоженных. Это может означать, что рассеяние от неровной рельефной по-

Таблица 3. Коэффициенты пропускания и рассеяния для света, поляризованного в направлении, параллельном направлению ориентации пленки ПВДФ, и ортогональном направлении, при $\lambda = 532$ нм

Λ	h , мкм	T_{\parallel}	T_{\perp}	R_{\parallel}	R_{\perp}
Отожженная пленка					
20	96	0.78	0.84	0.17	0.11
29	57	0.83	0.84	0.12	0.11
46	36	0.86	0.87	0.09	0.08
76	23	0.84	0.90	0.11	0.05
121	17	0.86	0.90	0.09	0.05
Пористая пленка					
20	66	0.16	0.18	0.83	0.81
29	45	0.30	0.36	0.68	0.62
46	20	0.43	0.45	0.54	0.52
76	17	0.65	0.69	0.31	0.27
121	15	0.76	0.82	0.20	0.13

верхности пористых пленок (рис. 2) вносит заметный вклад в рассеяние света такими пленками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных измерений получена разность показателей преломления для двух ортогональных направлений поляризации света для ориентированных отожженных и пористых пленок ПВДФ. Интересным результатом является то, что в видимой области спектра разность показателей преломления как у отожженных, так и у пористых пленок возрастает с увеличением длины волны света. Показано, что и отожженные, и пористые пленки ПВДФ сильнее рассеивают свет, поляризованный в направлении, параллельном направлению ориентации пленки, и имеют более высокий показатель преломления для света, поляризованного в перпендикулярном направлении. С ростом кратности фильерной вытяжки показатель преломления для света, поляризованного в направлении ориентации пленки, почти не изменяется, а для света, поляризованного в перпендикулярном направлении, повышается.

Полученные результаты показывают, что различие показателей преломления отожженных пленок определяется их структурой, формируемой на стадии экструзии из расплава, что связано с появлением преимущественной ориентации в одном из направлений. Разница показателей преломления Δn , которая незначительна для слабо ориентированной отожженной пленки, с ростом кратности фильерной вытяжки Λ увеличивается практически линейно и достигает 0.04 при Λ , стремящейся к 80. При дальнейшем росте Λ величина Δn повышается гораздо слабее, что, по-видимому, свидетельствует о снижении эффективности фильерной вытяжки при больших скоростях течения расплава.

Одноосное растяжение на этапе порообразования позволяет достичь существенно более высоких значений разности показателей преломления для пористых пленок, чем для отожженных образцов. Однако при этом сохраняется резкий практически линейный рост Δn в диапазоне кратности фильерной вытяжки Λ от 20 до 80 и более плавный рост при Λ выше 80. На рис. 4 также видно, что различие в значениях Δn для пористых пленок и отожженных образцов возрастает с увеличением Λ несмотря на то, что степень деформации на этапе порообразования была для всех образцов одинаковой. Аналогичный ход зависимости Δn для отожженных и пористых образцов, а также рост различия в Δn для пористых и отожженных пленок при увеличении Λ показывают, что величина фильерной вытяжки оказывает влияние на эффективность повышения ориентации

и на стадии экструзии, и при последующем одноосном растяжении на стадии порообразования.

Поскольку кратность фильерной вытяжки Λ является параметром технологического процесса получения полимерных пленок, проведенные в работе исследования позволяют сделать вывод о возможности осуществления неразрушающего контроля и оперативного вмешательства в процесс производства ориентированных и пористых полимерных материалов. Результаты исследований и технические разработки могут быть использованы на предприятиях полимерной промышленности при создании сепараторов для химических источников тока и диафрагм для электролитических конденсаторов.

Авторы выражают благодарность Ресурсному центру оптических и лазерных материалов СПбГУ и Междисциплинарному ресурсному центру нанотехнологий СПбГУ за предоставленное оборудование для проведения исследований.

Авторы, также выражают благодарность А.В. Курочкину и А.А. Шимко (Ресурсный центр оптических и лазерных материалов СПбГУ) за плодотворную дискуссию и помощь в проведении измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bar-Cohen Y., Zhang Q.* // *Electroactive Polymer Actuators and Sensors. MRS Bulletin.* 2008. V. 33. № 3. P. 173.
2. *Chang Y.M., Lee J.S., Kim K.J.* // *Solid State Phenomena.* 2007. V. 124–126. P. 299.
3. *Lebrun L., Guyomar D., Guiffard B., Cottinet P.-J., Putson C.* // *Sens. Actuators A.* 2009. V. 153. № 2. P. 251.
4. *Oshima K.H., Evans-Strickfaden T.T., Highsmith A.K., Ades E.W.* // *Biologicals.* 1996. V. 24. P. 137.
5. *Khayet M., Feng C.Y., Khulbe K.C., Matsuura T.* // *Polymer.* 2002. V. 43. № 14. P. 3879.
6. *Seol W.H., Lee Y.M., Park J.K.J.* // *Power Sources.* 2006. V. 163. P. 247.
7. *Kong J., Li K.J.* // *J. Appl. Polym. Sci.* 2001. V. 81. P. 1643.
8. *Rowan C.K., Paci I.* // *J. Phys. Chem. C.* 2011. V. 115. P. 8316.
9. *Ibrahim N.A., Wirzal M.D., Nordin N.A., Abd Halim N.* // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science.* 2018. V. 140. P. 012021.
10. *Shanshool H.M., Yahaya M., Yunus W.M.M., Abdullah I.Y.* // *Braz. J. Phys.* 2015. V. 45. P. 538.
11. *McFee J.H., Bergman Jr.J.G., Crane G.R.* // *Ferroelectrics.* 1972. V. 3. № 1. P. 305.
12. *Indra Devi P., Sivabharathy M., Ramachandran K.* // *Optik.* 2013. V. 124. P. 3872.
13. *Ohmori Y., Yoshino K., Inuishi Y.* // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1980. V. 19. P. 263.
14. *Dmitriev I.Yu., Bukošek V., Lavrentyev V.K., Elyashevich G.K.* // *Acta Chim. Slov.* 2007. V. 54. P. 784.

15. *Park I.K., Noether H.D.* // *Colloid Polym. Sci.* 1975. V. 253. P. 824.
16. *Sadeghi F., Tabatabaei S.H., Aiji A., Carreau P.J.* // *J. Polym Sci., Polym. Phys.* 2009. V. 47. P. 1219.
17. *Salimi A., Yousefi A.A.* // *Polym. Test.* 2003. V. 22. P. 699.
18. *Hu B., Cai Q., Xu R., Mo H., Chen C., Zhang F., Lei C.* // *J. Plast. Film. Sheeting.* 2015. V. 31. P. 269.
19. *Elyashevich G.K., Kuryndin I.S., Lavrent'ev V.K., Dmitriev I.Yu.* // *Polymer Science A.* 2018. V. 60. № 6. P. 734.
20. *Elyashevich G.K., Kuryndin I.S., Dmitriev I.Yu., Lavrentyev V.K., Saprykina N.N., Bukošek V.* // *Chinese J. Polym. Sci.* 2019. V. 37. № 12. P. 1283.
21. *Dessouky H.M., Lawrence C.A., Voice A.M., Lewis E.L., Ward I.M.* // *J. Opt. A.* 2009. V. 9. P. 1041.
22. *Cakmak M., Wang Y.* // *J. Appl. Polym. Sci.* 1989. V. 37. P. 977.
23. *Hahn B., Wendorff J.* // *Polymer.* 1985. V. 26. P. 1619.
24. *Ruan L., Yao X., Chang Y., Zhou L., Qin G., Zhang X.* // *Polymers.* 2018. V. 10. P. 228.
25. *Duan C., Mei W.N., Yin W., Liu J., Hardy J.R., Bai M., Ducharme S.* // *J. Phys., Condens.Matter.* 2003. V. 15. № 22. P. 3805.
26. *Серова В.Н.* Оптические и другие материалы на основе прозрачных полимеров. Казань: Казанский гос.-техн. ун-т, 2010.