

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК С ГРАДИЕНТОМ ДВОЙНОГО ЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ

© 2005 г. **Ш. Ш. Гватуа**, канд. физ.-мат. наук; **Н. С. Топуридзе**, канд. хим. наук; **Ю. М. Благидзе**; **Л. К. Шарашидзе**; **И. Я. Павленишвили**, канд. хим. наук; **К. Г. Джапаридзе**, академик АН Грузии; **Л. И. Надареишвили**, доктор хим. наук

Институт кибернетики АН Грузии, г. Тбилиси, Грузия

E-mail: gvatua@cybern.acnet.ge

Кратко описан метод изготовления полимерных оптических элементов с новым свойством – осевым градиентом двойного лучепреломления (ГДЛП), и приведены результаты экспериментального исследования их оптико-поляризационных свойств. ГДЛП-элементы изготавливались из тонких пленок поливинилового спирта (ПВС, $d = 100\text{--}150$ мкм) и полиэтилентерефталата (ПЭТФ, $d = 190$ мкм). Показано, что в середине ГДЛП-элемента градиент двойного лучепреломления Δn экспоненциально увеличивается вдоль центральной оси z , причем $\Delta n_{\max} \approx 0,02$. Увеличение температуры формования ГДЛП-элемента с 80 до 90 °С улучшает линейность зависимости $\Delta n = f(z)$, хотя в периферической зоне она ухудшается и становится ломаной.

Коды OCIS: 160.5470, 310.6860.

Поступила в редакцию 30.12.2004.

Введение

Изучение закономерностей распространения электромагнитных волн оптического диапазона в неоднородных средах приобрело большое значение в связи с развитием волоконной оптики, особенно с возникновением в 70-х годах промышленности средств волоконно-оптических систем передачи [1, 2]. Оптические элементы на основе сред с градиентом показателя преломления позволили расширить возможности построения оптических систем различного назначения [3, 4], так что развитие градиентной оптики до сих пор было сосредоточено на создании и исследовании градиентов показателя преломления [5]. До недавнего времени, однако, оставалась без внимания возможность получения материалов и элементов на их основе с градиентом других оптических параметров, например, градиентом двойного лучепреломления.

Нами впервые были опубликованы сообщения о создании полимерных материалов с новым оптическим свойством – осевым градиентом двойного лучепреломления [6–8]. В результате появилось второе направление исследований в градиентной оптике – оптика материалов и элементов на их основе с градиентом двойного лучепреломления – ГДЛП-оптика*.

В данной работе кратко рассматриваются метод изготовления и принцип действия устройства для создания в полимерных пленках заданного ГДЛП, а также приведены результаты оптико-поляризационных исследований полимерных ГДЛП-элементов.

* В англоязычной литературе GB-optics (Gradient Birefringence).

Методы создания и исследования ГДЛП-элементов

Известно, что деформация полимеров при температуре выше температуры стеклования в области высокоэластичного состояния сопровождается разрывыванием гибких цепей макромолекул и ориентацией их сегментов в направлении растяжения [9]. Полимерный образец принимает симметрию одноосного кристалла, оптическая ось которого совпадает с направлением растяжения. Ориентация оптически анизотропных молекулярных цепей и их сегментов является причиной возникновения в полимере двойного лучепреломления Δn , которое является функцией относительной деформации растяжения образца:

$$\Delta n = n_o - n_e = \gamma \eta, \quad (1)$$

где n_o и n_e – показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей соответственно, γ – оптический коэффициент деформации, $\eta = \Delta l/l$ – относительное удлинение (отношение удлинения к первоначальной длине образца).

При одноосном растяжении полимерной пленки, имеющей форму прямоугольника, удлинение по всей ширине пленки практически одинаково. Поэтому степень ориентации и, следовательно, значение двойного лучепреломления поперек направления растяжки также практически одинаковы, хотя, строго говоря, даже в условиях гомогенного растяжения, т. е. без образования шейки, удлинение по ширине образца неодинаково. Удлинение увеличивается по обе стороны от средней части образца в направлении его свободных (не зажатых) краев, что проявляется в сужении образца, которое в свою оче-

редь нарастает от зажатых краев образца к его центру в направлении растяжения. Относительное значение сужения и распределение удлинений по направлению растяжения зависят от соотношения длин сторон прямоугольника и режима деформации, а именно скорости деформации, относительного удлинения, температуры и др. Тем не менее, этой разницей в значениях удлинений по ширине образца можно пренебречь, поскольку она довольно незначительна для создания ощутимого Δl , особенно для центральной части полимерного образца.

Если же растяжению подвергать образец полимерной пленки, имеющий форму трапеции, в направлении, параллельном основаниям трапеции, когда зажимы расположены не взаимопараллельно, а под некоторым выбранным углом φ , то относительное удлинение Δl по высоте z не будет одинаковым и будет увеличиваться в направлении от большего основания трапеции к меньшему, т. е. в направлении z возникает ГДЛП (рис. 1а). Если на большом основании трапеции удлинение будет равно нулю (что может быть реализовано в ряде конструкций устройств формирования ГДЛП-элемента), то интервал ГДЛП будет максимальным.

Нами были разработаны несколько конструкций устройств для растяжения пленочных полимерных образцов в механическом поле с заданной неоднородностью. В результате получали ГДЛП-элемент с заданным градиентом удлинения и, следовательно, с заданным осевым градиентом двойного лучепреломления [10, 11]. Эти конструкции отличаются друг от друга различным относительным вкладом разных видов деформаций (продольные и поперечные растяжение и сжатие) в результирующую деформацию. Одна из конструкций такого устройства и метод изготовления ГДЛП-элементов из полимерных пленок кратко описаны ниже.

Принципиальная схема устройства для растяжения полимерного образца с градиентом удлинения приведена на рис. 1а. Полимерный пленочный образец l в виде трапеции высотой z_{\max} заключен между зажимами 2 и 4 с непараллельными относительно друг друга кромками. Для выявления характера распределения удлинений на образец l чернилами можно нанести координатную сетку. С помощью электродвигателя, редуктора и зубчатой передачи зажимы 2 и 4 приводятся во вращение в противоположных направлениях вокруг параллельных осей 3 и 5 с одинаковой постоянной угловой скоростью $\omega \approx 0,0785 \text{ с}^{-1}$. При вращении кромки зажимов 2 и 4 перемещаются по боковой поверхности конусов. Высоты конусов совпадают с осями вращения 3 и 5 , а образующие конусов составляют с их высотами углы φ_1 и φ_2 . Кромки зажимов 2 и 4 могут быть установлены под разными углами относительно осей вра-

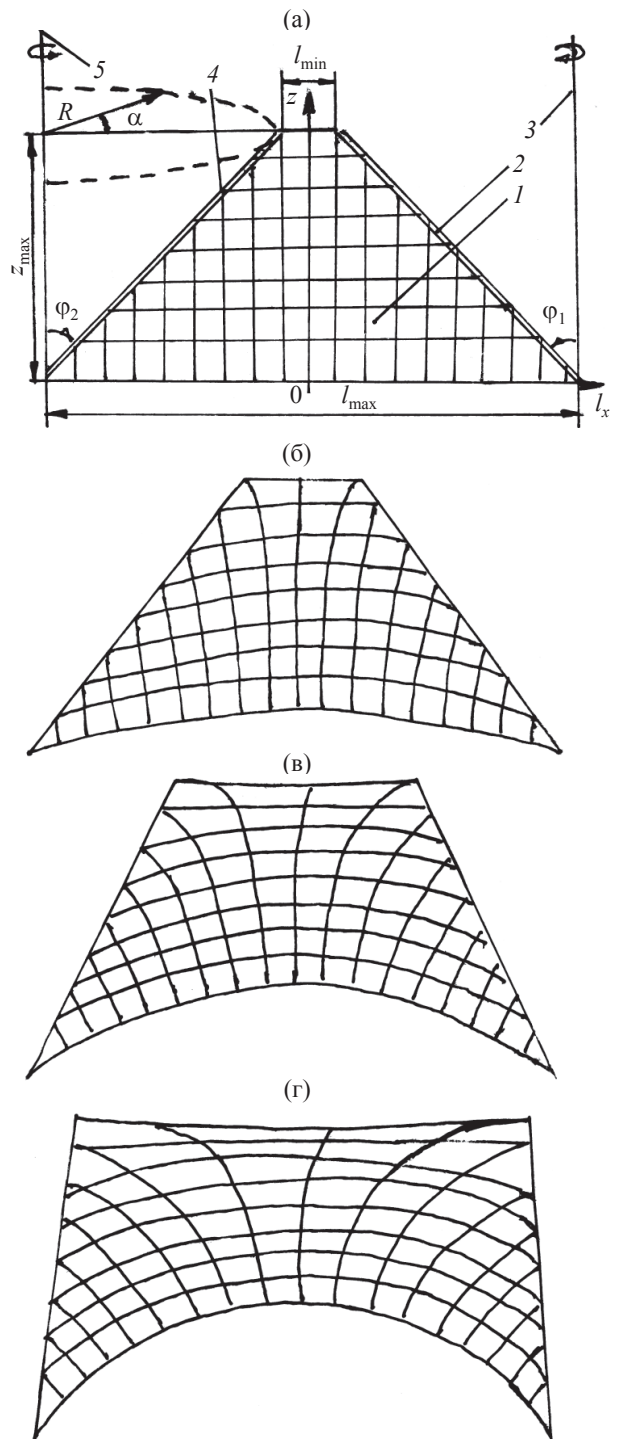


Рис. 1. Схема устройства для изготовления ГДЛП-элемента и топографические картины распределения деформации в нем: а – $\alpha = 0^\circ$, б – $\alpha = 40^\circ$, в – $\alpha = 60^\circ$, г – $\alpha = 80^\circ$; l – пленочный полимерный образец; $2, 4$ – кромки зажимов образца l ; $3, 5$ – оси вращения кромок зажимов, α – угол разворота, R – радиус разворота.

щения 3 и 5 ($\varphi_1 \geq \varphi_2$; $\varphi_1 > 0$, $\varphi_2 = 0$), а точки пересечения их с осями вращения являются “мертвыми” точками, и расстояние между ними равно большому основанию трапеции l_{\max} , которое должно оставаться приблизительно постоянным в течение процесса неоднородного растяжения в пределах угла $\alpha = 0^\circ - 90^\circ$

поворота зажимов 2 и 4, в то время как с увеличением z абсолютное значение Δl и значение η увеличиваются.

Как видно из рис. 1б, 1в, 1г, изменение формы образца в процессе неоднородного растяжения подчиняется сложным закономерностям. Идеализируя процесс деформации предположением, что изменения расстояний между кромками зажимов 2 и 4 точно соответствуют изменениям продольных и поперечных размеров полимерного образца, приходим к следующим выводам:

1. В процессе поворота зажимов 2 и 4 в интервале $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ происходит не только продольное, но и поперечное растяжения, уменьшающие степень анизотропии.

2. При $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$ расчетные изменения длины и ширины образца по центральной части при $l_x = 0$ имеют вид

$$\Delta l = 2z_{\max} \operatorname{tg}(1 - \cos\alpha), \quad (2)$$

$$\Delta z = z_{\max} \left(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi \sin^2 \alpha} - 1 \right), \quad (3)$$

причем $\Delta z_{\max} = z_{\max}(\sec\varphi - 1)$.

3. Критерий обеспечения преимущественного направления ориентации имеет вид

$$\Delta z < \Delta l / 2m, \quad (4)$$

что эквивалентно неравенству $\cos\alpha < 1 - \Delta z / mR$, где $m = 1, 2, 3, \dots$, а $R = z_{\max} \operatorname{tg}\varphi > \Delta z$ – радиус основания воображаемых конусов, по боковым поверхностям которых перемещаются зажимы 2 и 4. Неравенство (4) выполняется для всех значений $\alpha = 0^\circ - 90^\circ$ и с ростом m становится все более выраженным.

4. При $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$ и $\alpha = 90^\circ$ длина образца l по всей ширине z_{\max} становится одинаковой и равной l_{\max} , а полимерный образец принимает вид, подобный прямоугольнику.

5. Кромки зажимов 2 и 4 могут быть не только прямыми, но и иметь более сложную, практически произвольную форму, когда для отдельных участков φ_1 и φ_2 различны и меняются непрерывно или ступенчато.

В качестве исходных образцов для создания ГДЛП-элементов служили пленки поливинилового спирта (ПВС) толщиной 100–150 мкм, которые изготавливались по известной технологии [12], и пленки полиэтилентерефталата (ПЭТФ) толщиной 190 мкм заводского изготовления. Неоднородное механическое растяжение пленочных образцов ПВС и ПЭТФ, изначально имеющих форму равнобедренной трапеции с основаниями $l_{\max} = 72$ мм, $l_{\min} = 8$ –10 мм и высотой $z_{\max} = 32$ –33 мм, вдоль направления оснований осуществлялось устройством [8, 10], схематично показанным на рис. 1а. Полимерные пленочные

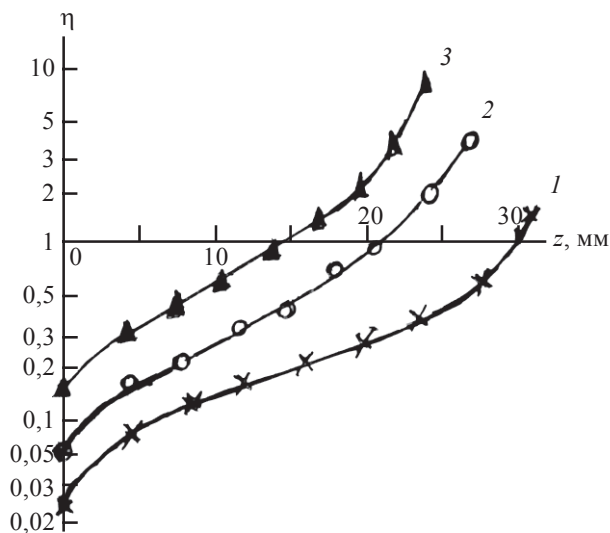


Рис. 2. Зависимости относительного удлинения вдоль направления градиента двойного лучепреломления $\eta = f(z)$: 1 – $\alpha = 40^\circ$, 2 – $\alpha = 60^\circ$, 3 – $\alpha = 80^\circ$.

образцы подвергались неоднородному растяжению обычно при температуре 80 или 90 °С на воздухе, а при 20 °С – в воде (ПВС).

На рис. 1а $\alpha = 0$ и размер элементарной ячейки $z l_x$ координатной сетки приблизительно равен 4×4 мм, кроме ряда при $z = 0$, где $z l_x \approx 6 \times 4$ мм. На рис. 1б, 1в, 1г представлены экспериментальные топографические картины деформации образца рис. 1а для углов α , равных соответственно 40°, 60° и 80°, для которых с точностью $\pm 0,1$ мм были измерены $\eta_l = f(z)$. Результаты измерений в полулогарифмическом масштабе приведены на рис. 2. Как видно из экспериментальных зависимостей $\eta_l = f(z)$, для всех трех случаев вблизи $z_1 = 0$ и $z_2 = z_{\max}$ наблюдается более быстрый рост η_l по сравнению со средней областью z , где рост относительного удлинения и, следовательно, значения двойного лучепреломления подчиняется приблизительно экспоненциальному закону:

$$\eta_l \approx \exp(cz), \quad (5)$$

где c – постоянная.

С другой стороны, для тех же экспериментальных топографических картин (рис. 1б, 1в, 1г) по центру образца при $l_x = 0$ наблюдается сокращение z_{\max} от 33 мм при $\alpha_a = 0$ до 23,6 мм при $\alpha_r = 80^\circ$, т. е. $\Delta z_{\max} = -9,4$ мм и вместо удлинения имеет место сжатие. В таблице приведены экспериментальные значения параметров деформации образца (сжатия и удлинения). Таким образом, наблюдается сложная связь между особенностями наложенного на образец неоднородного механического поля и топографической картиной распределения деформаций: растяжение и сжатие в образце распределены неоднородно, и область преимущественно направлен-

Экспериментальные значения параметров сжатия и удлинения

Вариант рисунка	α , град	Сжатие		Удлинение	
		η_z	l_x , мм	η_z	l_x , мм
1б	40	-(0,085-0)	$\pm(0-16)$	0-0,125	$\pm(16-32)$
1в	60	-(0,19-0,03)	$\pm(0-28)$	0,23	± 32
1г	80	-0,28	0	0,013-0,54	$\pm(4-32)$

ной деформации расположена в центральной части образца вдоль оси z , по направлению которой смещается материал образца, вызывая ярко выраженное сужение в середине его нижней части.

Исследование поляризационных характеристик полученных ориентированных полимерных пленок проводилось с помощью компенсатора Берека и поляризационного микроскопа МИН-8, а также на лабораторной экспериментальной установке, оптическая схема которой приведена на рис. 3. Плоскополяризованное излучение He-Ne-лазера 1 типа ЛГ-201 с длиной волны $\lambda = 632,8$ нм и диаметром пучка примерно 1 мм падало перпендикулярно на исследуемый полимерный пленочный образец 2, закрепленный в подвижной рамке, которая имела возможность перемещения в горизонтальной плоскости с равномерной скоростью с помощью низкооборотного электромотора 3 типа РД-09. Рамка с образцом может быть установлена также в вертикальной плоскости на требуемом расстоянии относительно центральной оси z ГДЛП-элемента. Анализатором служила призма Рошона 4, пройдя которую, излучение лазера 1 падало на фотодиод 5 типа ФД-01к, и сигнал регистрировался однокоординатным самописцем КСП-4 б.

Плоскость, в которой лежит электрический вектор колебания плоскополяризованного лазерного излучения, устанавливалась под углом 45° к оптической оси тонкопленочного градиентно-ориентированного полимерного образца с помощью анализатора призмы Рошона 4 с точностью угловой установки приблизительно $\pm 30'$. Автоматическая запись диаграммы зависимости двойного лучепреломления Δn вдоль центральной оси ГДЛП-элемента z , совпадающей с направлением градиента Δn , перпендикулярного оптической оси или, что тоже самое, основаниям образца-трапеции, осуществлялась как при скрещенном положении электрического вектора лазерного излучения и анализатора 4 ($I_\perp = f(z)$), так и при параллельной установке ($I_\parallel = f(z)$).

Известно [13], что интенсивность монохроматического светового излучения, прошедшего сквозь вышеописанную установку при скрещенном положении плоскости колебания **E**-вектора лазерного луча 1 и анализатора 4, при условии, что **E**-вектор лазерного излучения составляет угол 45° с оптической

кой осью исследуемого пленочного полимерного образца, определяется выражением

$$I_\perp = I_0 \sin^2[(\pi/\lambda)\Delta n d], \quad (6)$$

а при параллельном положении соответствующих плоскостей поляризации

$$I_\parallel = I_0 \cos^2[(\pi/\lambda)\Delta n d], \quad (7)$$

где I_0 – интенсивность лазерного луча, падающего на исследуемый образец, $\lambda = 632,8$ нм – длина волны излучения лазера, d – толщина исследуемого образца, $\Delta n = n_o - n_e$ – величина двойного лучепреломления.

Поделив соответствующие левые и правые части уравнений (6) и (7) друг на друга и преобразуя, получим, что

$$\Delta n = \lambda/(\pi d) \arctg \sqrt{I_\perp/I_\parallel}. \quad (8)$$

На рис. 3 в качестве примера-вставки на позиции 5 показан вид экспериментальных диаграмм зависимостей относительных интенсивностей лазерного излучения $I_\perp = f(z)$ и $I_\parallel = f(z)$, прошедших сквозь ГДЛП-элемент из ПВС исходной толщины $d_0 = 150$ мкм, изготовленный при температуре 80°C на воздухе, при угле разворота кромок зажимов 2 и 4 $\alpha = 60^\circ$ (см. рис.1). Причем вид I_\perp соответствует скрещенному положению **E**-вектора излучения лазера 1 и анализатора 4, а вид I_\parallel – их параллельному расположению. Незначительные отклонения экспериментальных кривых как по значениям I_{\max} и I_{\min} , так и по форме от кривых по уравнениям (6) и (7), по-видимому, следует отнести к влиянию как исходных локальных неоднородностей в полимерной пленке, так и возникающих в процессе ее формирования в виде одноосного ГДЛП-элемента. Однако в основном экспериментальные диаграммы находятся в хорошем согласии с теоретическими выражениями.

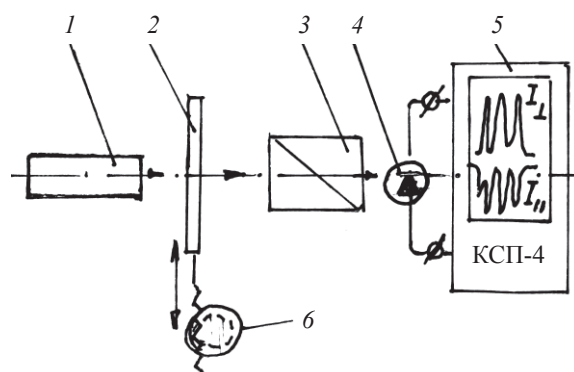


Рис. 3. Оптическая схема установки для измерения градиента двойного лучепреломления: 1 – He-Ne-лазер, 2 – ГДЛП-элемент в рамке-держателе, 3 – призма Рошона, 4 – фотоприемник ФД-01К, 5 – самописец КСП-4, 6 – электродвигатель РД-09.

С помощью экспериментальных диаграмм $I_{\perp} = f(z)$ и $I_{\parallel} = f(z)$ и измеренных толщин образцов $d = f(z)$ из выражения (8) вычислялось значение двойного лучепреломления Δn вдоль направления сканирования для любой точки полимерного ГДЛП-элемента.

Результаты экспериментального исследования и их обсуждение

В работах [8, 10, 14] было экспериментально показано, что толщина тонкопленочного полимерного ГДЛП-элемента $d = f(z)$ линейно уменьшается с ростом z . Например, для ГДЛП-элемента из аморфной пленки ПВХ с начальной толщиной $d_0 = 110$ мкм, подвергнутой неоднородной деформации в воде при температуре 20 °С, конечная толщина при $z_{\max} = 25$ мм равнялась $d_{\min} = 40$ мкм, а относительное удлинение $\eta = f(z)$ и двойное лучепреломление $\Delta n = f(z)$, измеренное компенсатором Берека, были подобны друг другу и приблизительно линейны для $z = 20$ – 25 мм, имели существенные отклонения от линейности при $z \approx 0$ – 5 мм, причем $\Delta n_{\max} = 1,4 \times 10^{-2}$ и $\eta_{\max} \approx 6,2$.

Линейность $\Delta n = f(z)$ улучшается при изготовлении ГДЛП-элемента на воздухе и увеличении температуры. Было исследовано большое количество ГДЛП-элементов, полученных с помощью вышеописанной методики, при температуре 80 °С на воздухе и других идентичных условиях изготовления. Результаты исследования, полученные расчетом экспериментальных диаграмм $I_{\perp} = f(z)$ и $I_{\parallel} = f(z)$ по вышеуказанной методике, приведены на рис. 4 и 5.

На рис. 4 приведены графики зависимостей $\Delta n = f(z)$ для центральной части ГДЛП-элемента на основе аморфного тонкопленочного образца ПВХ с начальной толщиной $d_0 = 110$ мкм, изготовленного при $t = 80$ °С с различной степенью максимального относительного удлинения $\eta_{\max} = \Delta l_{\max}/l_{\min}$.

При $\eta_{\max} = 1,1$ – $1,6$ зависимость $\Delta n = f(z)$ (кривая 1) состоит из двух линейных участков *a* и *b*. При этом $d(\Delta n)/dz = \text{tg}\theta$ и $\text{tg}\theta_a \approx 0,07 \times 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$, а $\text{tg}\theta_b \approx 0,6 \times 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$. При $\eta_{\max} = 3,4$ можно выделить третий линейный участок *c* (кривая 2) с $\text{tg}\theta_c \approx 0,95 \times 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$, а при $\eta_{\max} = 6,8$ – $7,25$ – четвертый – *e* (кривая 3) с $\text{tg}\theta_e \approx 1,7 \times 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$. Из-за сокращения z_{\max} в зависимости от η_{\max} ($z_{b,\max} = 32$ мм, $z_{c,\max} = 28$ мм и $z_{e,\max} = 24$ мм) максимальная линейная скорость изготовления ГДЛП-элемента менялась и составляла $v_{b,\max} \approx 2,5$ мм/с, $v_{c,\max} \approx 2,2$ мм/с и $v_{e,\max} \approx 1,9$ мм/с.

Скачкообразное изменение тангенса угла наклона зависимости $\Delta n = f(z)$ и количества линейных участков при сопутствующем росте $\text{tg}\theta$ ($\text{tg}\theta_a < \text{tg}\theta_b < \text{tg}\theta_c < \text{tg}\theta_e$) с ростом значений деформации (рис. 4) может быть связано с особенностями процессов ориентации молекулярной структуры аморфного

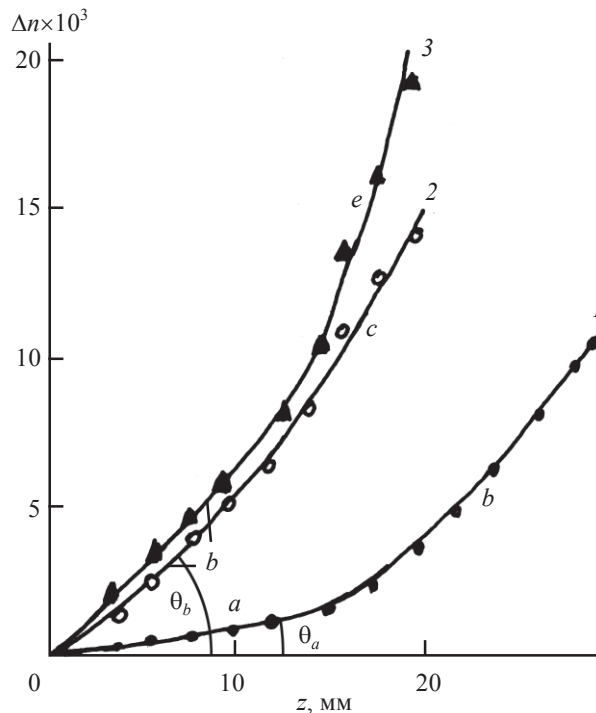


Рис. 4. Зависимости $\Delta n = f(z)$ для различных η_{\max} : 1 – $\eta_{\max} = 1,1$ – $1,6$, 2 – $\eta_{\max} = 3,35$ – $3,4$, 3 – $\eta_{\max} = 6,8$ – $7,25$. Пояснения см. в тексте.

полимера в высокоэластичном состоянии [9], когда, в частности, скачкообразно вовлекаются в ориентированное состояние отдельные характерные сегменты молекулярных цепей и/или участки надмолекулярной структуры аморфного полимера. Увеличение же $\text{tg}\theta$ с ростом деформации свидетельствует о повышении жесткости макромолекул и всей структуры в целом.

Более сложный характер двойного лучепреломления наблюдается вдоль прямых, параллельных центральной оси z и отстоящих от нее на расстояниях $l_4 = 11$ мм и $l_5 = 14$ мм, причем зависимость $\Delta n = f(z_{l=0})$ (рис. 5). Как видно из этого рисунка, $\Delta n = f(z_{l=11})$ (кривая 4) и $\Delta n = f(z_{l=14})$ (кривая 5) скачкообразно меняют наклон ($\text{tg}\theta$) к оси z , причем в среднем $\text{tg}\theta_{4,5} > \text{tg}\theta_3 = 0,8 \times 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$ для центра ГДЛП-элемента, изготовленного при $t = 90$ °С. Такой характер зависимостей 4 и 5 формируется в периферийной зоне ГДЛП-элемента из-за нарастания деформации в направлении, перпендикулярном оптической оси конкретной области элемента с координатой $(\pm l_x, z)$, что коррелирует с данными, полученными при анализе рис. 1б, 1в, 1г.

Здесь следует отметить, что оптическая ось ГДЛП-элемента перпендикулярна основаниям образца-трапеции только для центральной оси z . Для прямых, параллельных оси z , при $l_x \neq 0$ с ростом значения $\pm l_x$ растет отклонение их от коллинеарности с осью z , т. е. оптическая ось имеет кривизну, обратную кривизне широтных линий координатной

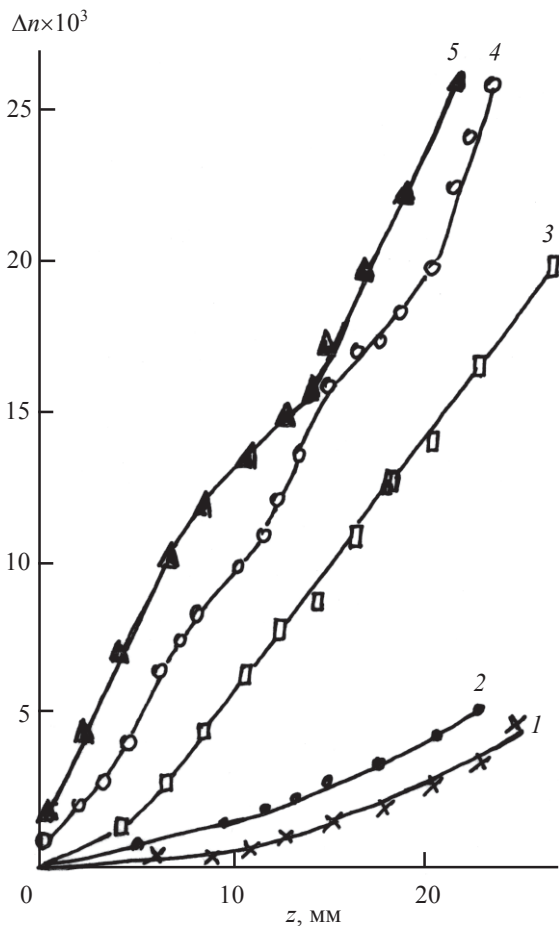


Рис. 5. Зависимости $\Delta n = f(z)$ и $\Delta n = f(z_{lx})$: 1 – ПЭТФ, $\alpha = 60^\circ$, $t_{\text{изг}} = 80^\circ \text{C}$; 2 – ПЭТФ, $\alpha = 80^\circ$, $t_{\text{изг}} = 80^\circ \text{C}$; 3 – $l_x = 0$, $\text{tg}\theta_3 = 0,8 \times 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$, $t_{\text{изг}} = 90^\circ \text{C}$; 4 – $l_x = 11 \text{ мм}$, $t_{\text{изг}} = 90^\circ \text{C}$; 5 – $l_x = 14 \text{ мм}$, $t_{\text{изг}} = 90^\circ \text{C}$.

сетки (рис. 1б, 1в, 1г), что вызвано неизменностью размера боковых сторон образца-трапеции, зафиксированных в кромках зажимов 2 и 4, и соответствующим уменьшением высоты ГДЛП-элемента z_{max} с ростом значения деформации.

На рис. 5 (кривые 1, 2) показаны также $\Delta n = f(z)$ для ГДЛП-элементов из пленок ПЭТФ, причем степень деформации в случае 2 выше, чем в случае 1. Видно также, что линейность зависимости $\Delta n = f(z)$ выше для пленки ПЭТФ по сравнению с пленкой ПВС при температуре формирования $t = 80^\circ \text{C}$ и несколько ниже по сравнению с ПВС-образцом, изготовленным при $t = 90^\circ \text{C}$, а максимальное значение двойного лучепреломления меньше примерно в 4 раза.

Если менять угол наклона плоскости ГДЛП-элемента β при одновременном сохранении перпендикулярности лазерного луча к оси z , то наблюдается приблизительно линейное уменьшение значения $\Delta n = f(\beta)$ с ростом z от 100% до 30%. Это связано с увеличением эффективной толщины образца с увеличением угла β при постоянном значении степени ориентации макромолекул полимера для данной координаты z , т.е. значение двойного лучепреломления зависит только от степени ориентации молеку-

лярной структуры полимерной пленки, отнесенной к единице толщины.

Аналогичный результат наблюдается при исследовании ГДЛП-элемента на основе пленок ПВС, составленного из двух одинаковых ГДЛП-элементов с совпадающими осями z_1 и z_2 и имеющими одинаковые зависимости $\Delta n_1 = f(z)$ и $\Delta n_2 = f(z)$ типа 3 (рис. 5), т.е. зависимости $\Delta n = f(z)$ как для единичного, так и для парного ГДЛП-элемента идентичны.

Таким образом, увеличение температуры формирования ГДЛП-элемента с $t_4 = 80^\circ \text{C}$ до $t_5 = 90^\circ \text{C}$ (рис. 4 и рис. 5) улучшает линейность зависимости $\Delta n = f(z)$. В то же время в периферийной зоне ГДЛП-элемента эта линейность ухудшается из-за нарастания и неоднородного распределения значения деформации в направлении, перпендикулярном направлению основной деформации. Увеличение угла между тестирующим лазерным лучом и плоскостью ГДЛП-элемента ведет к уменьшению эффективного двойного лучепреломления при одновременном сохранении характера зависимости $\Delta n = f(z)$, а та же зависимость как для единичного, так и для парного, составленного из одинаковых ГДЛП-элементов, идентична при совмещении осей z обоих образцов.

В заключение отметим, что исследованные ГДЛП-элементы с осевым градиентом двойного лучепреломления могут быть применены во всех без исключения областях элементной базы традиционной поляризационной оптики, в том числе в виде:

- поляризационного компенсатора без наличия подвижных элементов;
- полярископов с возможностью привязки значений Δn по полю сложной интерференционной картины;
- поляриметров атмосферы и гидросферы;
- сахариметров;
- интерференционно-поляризационных рефрактометров и светофильтров и др.,

а также в световодных интегрально-оптических устройствах с целью создания многоканальных систем передачи, разделения, преобразования и селекции световых пучков по их модовым характеристикам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гроднев И.И., Ларин Ю.Т., Теумин И.И. Оптические кабели. М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. Чео П.К. Волоконная оптика: приборы и системы. М.: Энергоатомиздат, 1988.
3. Волоконная оптика и приборостроение / Под ред. Бутусова М.М. Л.: Машиностроение, 1987.
4. Акопов Л.И., Бегиашвили А.Г., Бегиашвили Г.А., Гватуа Ш.Ш. Акустическая волоконно-оптическая антенна. Патент Грузии № Р3106 // Бюл. промышл. собств. Грузии. 2003. № 7 и № 20; патент Российской Федерации № 2234105 // Бюл. изобр. и патент. 2004. № 6 и № 22.

5. Бронфин Ф.Б., Ильин В.Г., Каранетян Г.О., Лифшиц В.Я., Максимов В.М., Саттаров Д.К. Фокусирующие оптические элементы с регулярным распределением показателя преломления // ЖПС. 1973. Т. 18. № 3. С. 523–548.
6. Nadareishvili L., Gvatua Sh., Lekishvili N., Gvatua N., Japaridze K. Investigation of Optical Properties Polymer Subject to Solid Phase Transformation // Intern. Conf. of Polymer Characterization, POLYCHA-8. January 11–14. 2000. Programme and book of abstracts. Denton. USA. P. 60.
7. Надарейшвили Л.И., Гватуа Ш.Ш. Формирование полимерных макроповерхностных сред с заданным градиентом показателя преломления и двулучепреломления // Сб. трудов Междунар. конф. “Прикладная оптика-2000”. Санкт-Петербург. 2000. Т. 1. С. 34–35.
8. Nadareishvili L. The method of obtaining and investigation of polymer films with the given gradient of birefringence // Georg. Eng. News. 2001. № 2. P. 73–76.
9. Каргин В.А., Слонимский Г.Л. Краткие очерки по физико-химии полимеров. М.: Химия, 1967. С. 165–177.
10. Nadareishvili L., Gvatua Sh., Topuridze N., Blagidze Yu., Sharashenidze L., Pavlenishvili I., Japaridze K. Obtaining and Investigation of Polymer Films with Birefringence gradient // Proc. of the Institute of Cybernetics Georgian Academy of Sciences. 2002. V. 2. № 1–2. P. 189–197.
11. Надарейшвили Л.И., Топуридзе Н.С., Гватуа Ш.Ш., Павленишвили И.Я., Шарашидзе Л.К., Благидзе Ю.М., Джапаридзе К.Г. Конструктивные решения формирования ГДЛП-элементов // Georgian Engineering News. 2003. № 1. С. 1101–103.
12. Ушаков С.Н. Поливиниловый спирт и его производные. М.–Л.: Изд. АН СССР. Т. 1, 2, 1960.
13. Ильин Р.С., Федотов Г.И., Федин Л.А. Лабораторные оптические приборы. М.: Машиностроение, 1966. С. 202–214.
14. Nadareishvili L., Gvatua Sh., Blagidze Yu., Zaikob G. A new direction in gradient optics // J. of the Balkan Tribological association. 2003. V. 9. № 2. P. 207–214.