

Поляриметрические характеристики полимера PEPC, легированного фотоизомеризуемым хромофорным азокрасителем SY3

Е. А. Акимова, В. Г. Абашкин*, А. Ю. Мешалкин, К. С. Лошманский, В. С. Ботнарь

*Институт прикладной физики, Молдавский государственный университет,
г. Кишинев, MD-2028, Молдова
e-mail: yabaskin48@yahoo.com

Поступила в редакцию 03.04.2023

После доработки 31.05.2023

Принята к публикации 07.06.2023

Синтезированы азополимеры PEPC-Solvent Yellow3 при различных их концентрациях (10–50 мас. %) в полимере с азогруппами в боковой цепи. Методом стержневого покрытия с микрометрическим контролем толщины получены однородные по толщине пленки на стеклянных подложках. Лазер с длиной волны 473 нм из спектральной области поглощения использовался для индуцирования анизотропии. Для измерения изменений поляриметрических параметров (эллиптичности и азимута, параметров Стокса) линейно поляризованного зондирующего луча гелий-неонового лазера использовали цифровой поляриметр. Пошаговое изменение направления поляризации лазера накачки производилось с помощью полуволновой пластины. Исследована фотоиндуцированная зависимость азимутального угла зондирующего луча и двулучепреломления от падающих углов поляризации луча накачки для образцов PEPC-SY3 (10 и 30 мас. %). Установлено, что фотоиндуцированное линейное двулучепреломление определяется углом между поляризациями луча накачки и зондирующего луча, которое достигает максимального значения при угле 90° между ними.

Ключевые слова: поляризационная голография, азополимеры, динамический и геометрический фазовый сдвиг, поляриметрия, анизотропия

УДК 681.785.552

<https://doi.org/10.52577/eom.2023.59.4.33>

ВВЕДЕНИЕ

Состояние поляризации, одного из наиболее важных параметров для описания световых волн, изучается и широко применяется в оптической микроскопии, нелинейном взаимодействии света с веществом, биологической характеристике, модуляции светового поля и т. д. [1–3]. Возможность управления поляризацией луча, а также точное и полное измерение состояний поляризации светового поля имеет большое значение как для теоретических, так и для прикладных исследований в области оптики.

Поляризационная голография, впервые описанная Ш. Д. Какичашвили еще в 1972 г. [4], позволяет регистрировать и восстанавливать не только амплитуду и фазу света, как в обычной (скалярной) голографии, но и его поляризацию. В отличие от обычных фазовых или амплитудных голограмм поляризационные голограммы действуют путем локального изменения состояния поляризации световых волн, проходящих через них. Благодаря этой особенности поляризационная или векторная голография также позволяет создавать усовершенствованные дифракционные опти-

ческие элементы, называемые оптикой четвертого поколения (4G), в которой двойное лучепреломление среды пространственно модулируется по поверхности оптического элемента. Специфическая функция этих компонентов получается путем модуляции ориентации оси анизотропии в плоскости двулучепреломления среды.

Волновой фронт света, проходящего через среду, регулируется за счет изменения длины оптического пути, которая для изотропной среды определяется как произведение показателя преломления материала и расстояния, пройденного в среде. Фазовый сдвиг, возникающий в результате изменения этого пути, называется динамическим фазовым сдвигом, так как этот параметр напрямую влияет на время распространения волны через среду. Управляемое изменение динамической фазы лежит в основе методов формирования светового поля, реализуемых традиционными оптическими компонентами. Динамические фазовые изменения, влияющие на распространение света в среде, были успешно применены для количественной фазовой визуализации и фазочувствительных измерений в целях

наблюдения за слабопоглощающими биологическими образцами [5] и измерения топографии поверхности [6].

Геометрический фазовый сдвиг, наоборот, возникает в результате распространения световой волны в анизотропном пространстве. Этот сдвиг зависит только от геометрии пути через анизотропную среду, преобразующую параметры световой волны. Источниками геометрического фазового происхождения являются молекулярная анизотропия и наноструктуры, вызывающие анизотропное рассеяние, в которых фазовый сдвиг прошедшей световой волны прямо пропорционален ориентации эффективной оптической оси, форме анизотропных рассеивающих частиц или тому и другому.

В современной оптике управление светом через геометрическую фазу также становится важным благодаря новым оптическим технологиям 4G [7, 8]. Исключительные характеристики технологии 4G открывают совершенно новые пути для развития различных направлений оптики.

Одним из перспективных материалов для реализации полностью управляемых дифракционных оптических элементов среди трех основных типов поляризационных голографических материалов являются азополимерные материалы [9]. Они отличаются от других светочувствительных полимеров наличием обратимой *trans-cis*-фотоизомеризации азохромов, что сопровождается молекулярной переориентацией полимерной матрицы. Это позволяет динамически изменять амплитудно-фазовые переходы.

Азосодержащие материалы обладают эффектом фотоиндуцированного двулучепреломления и дихроизма, что дает возможность использовать их в качестве динамически изменяющегося материала, управляющего распределением компонентов электрического поля пучков с поляризационными особенностями. Перед началом освещения записывающим/накачивающим лучом азополимер содержит асимметричные молекулы, которые по своей природе анизотропны. Поскольку они ориентированы хаотично и все ориентации равновероятны, вся пленка азополимера изотропна. При облучении линейно поляризованным светом азополимеры претерпевают циклы *trans-cis-trans*-изомеризации. После нескольких таких циклов избыток хромофоров выравнивается перпендикулярно поляризации лазера, что приводит к макроскопическому фотоиндуцированному двойному лучепреломлению (Δn) в образце.

Фотоиндуцированное двойное лучепреломление увеличивается с повышением дозы экспозиции до достижения определенного уровня насыщения.

Одной из основных особенностей азополимеров является поляризационно-зависимый процесс фотоизомеризации [10]. Вероятность реакции фотоизомеризации между стержнеобразной *trans*-формой и изогнутой метастабильной *cis*-формой зависит от угла между направлением поляризации луча накачки и дипольным моментом азомолекулы. Поскольку полосы поглощения *trans*- и *cis*-конфигураций перекрываются, циклы *trans-cis-trans*-фотоизомеризации и селективного по углу поглощения фотонов непрерывно повторяются при освещении и приводят к ориентации азомолекул перпендикулярно направлению поляризации падающего света. Для создания оптических элементов 4G необходимы среды не только с двойным лучепреломлением, но и с модуляцией ориентации осей анизотропии.

Цель данной работы – исследование фотоиндуцированной модуляции ориентации осей анизотропии и фотоиндуцированного двулучепреломления в тонких пленках азополимеров путем измерения изменений поляриметрических параметров (эллиптичности и азимута, параметров Стокса) линейно поляризованного зондирующего луча. Для исследования наведенной анизотропии в тонких пленках азополимеров последние будут освещаться лазерным лучом накачки, поляризация которого будет вращаться пошагово.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез азополимеров и изготовление тонких пленок

Светочувствительный азополимер был синтезирован полимеризацией poly-N-(2,3-ерохурролу) carbazole (PEPC) с хромофором азокрасителя Solvent Yellow 3 (SY3). SY3 (4'-amino-2,3'- dimethylazobenzene) с содержанием красителя 90% был приобретен в компании Sigma-Aldrich и использован без дополнительной очистки. Азополимеры PEPC-SY3 с различной концентрацией SY3 (10, 20, 30, 40 и 50%) получали растворением 1,0 г PEPC и соответствующих навесок SY3 (0,1; 0,2; 0,3; 0,4 и 0,5 г) в толуоле. Затем раствор кипятили с помощью обратного холодильника в течение 8 часов при температуре 220 °С. Реакция присоединения азокрасителя к полимерной матрице PEPC осуществлялась через эпоксидную

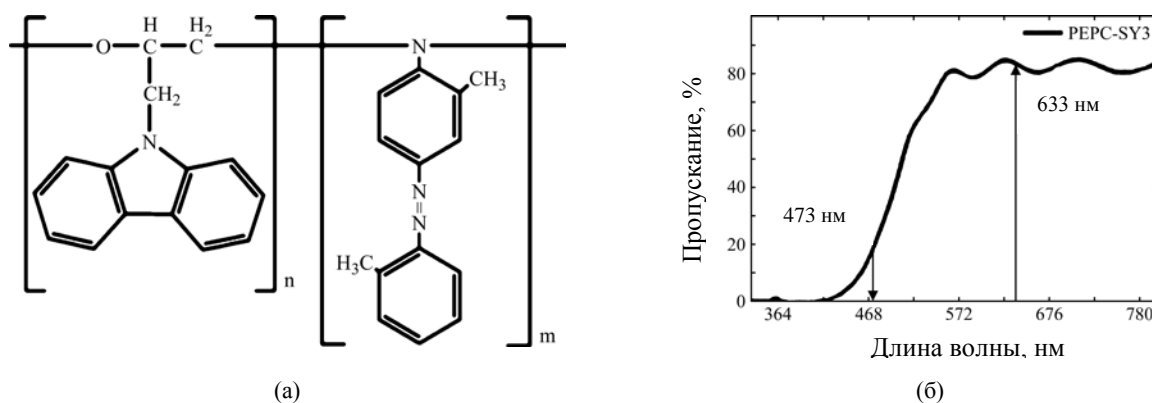


Рис. 1. Химическая структура синтезированного PEPC-SY3 – азополимера SY3 (а); спектр пропускания синтезированной тонкой пленки азополимера PEPC-SY3 (б).

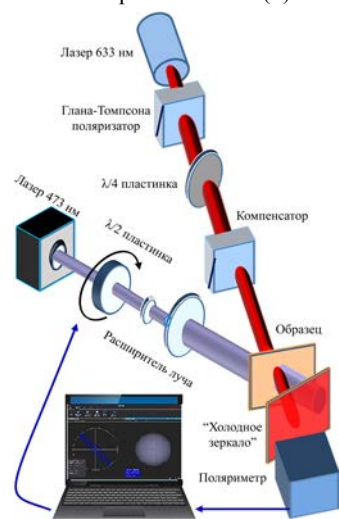


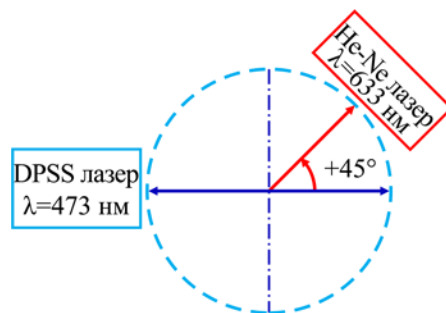
Рис. 2. Оптическая установка для контроля анизотропии: He-Ne лазер (633 нм, мощность 1 мВт, многомодовый), поляризатор Глана-Томпсона, волновая пластина $\lambda/4$, компенсатор Солей-Бабинэ SBC-VIS, «холодное» зеркало FM04, поляриметр PAX1000VIS, лазер DPSS (473 нм, мощность – 75 мВт), волновая пластина $\lambda/2$ внутри поворотного модуля K10CR1/M, расширитель луча BE5x (все комплектующие производства Thorlabs).

группу, которая вскрывалась первичным амином азокрасителя.

По окончании реакции раствор азополимера охлаждали до комнатной температуры и пропускали через целлюлозный фильтр (номинальное содержание золы 0,015%). Эта последняя операция проводилась для разделения возможных и нежелательных неполимеризованных кристаллических частиц азокрасителя. Химическая структура PEPC-SY3 представлена на рис. 1а. Согласно спектру пропускания, представленному на рис. 1б, для длины волны 473 нм коэффициент пропускания составляет 19%, а для длины волны 633 нм – более 80%.

Изготовление тонких пленок на основе азополимера осуществлялось путем нанесения покрытия с помощью стержня, движущегося относительно подложки (с использованием изготовленного программируемого устройства для нанесения покрытия). Этот метод обеспечивает однородность, а также регулируемое расстояние между стержнем и

Рис. 3. Поляризационные состояния лазеров. Начальное положение однорежимного лазера DPSS составляет 0° , а направление вращения – по часовой стрелке, как показано; фиксированная ориентация поляризации He-Ne лазера $+45^\circ$ для контроля на поляриметре.



стеклянной подложкой пленки (микрометрический винт с градуировкой в десятые доли нанометра), что приводит к осаждению тонких слоев в нанометрическом диапазоне толщин. Образцы всех толщин высушивали в течение 12 часов при комнатной температуре.

Поляриметрические измерения

Двулучепреломление определяется как разница между показателями преломления в двух взаимно ортогональных направлениях. В случае, когда двулучепреломление вызвано освещением линейно-поляризованным светом, оно выражается уравнением для линейного двулучепреломления $\Delta n = n_{\perp} - n_{\parallel}$, где n_{\perp} и n_{\parallel} – показатели преломления вдоль и перпендикулярно направлению поляризации записывающего луча.

Оптическая установка для измерения фотоиндуцированной анизотропии в тонких полимерных пленках показана на рис. 2. В нашей

установке использовались два лазера. Неактивный многомодовый неполяризованный зондирующий гелий-неоновый лазерный луч с длиной волны 633 нм был поляризован кальцитовым поляризатором Глана–Томпсона (коэффициент экстинкции – 100000:1). Параксиальный гауссов зондирующий пучок проходит через этот линейный поляризатор, ориентированный под углом 45° к вертикальной оси, и его мощность на образце составляет менее 1 мВт. В качестве волновой пластины применена плавно регулируемая волновая пластина нулевого порядка компенсатора Солей–Бабине. Он был отрегулирован в положение волновой пластины $\lambda/2$ с ориентацией $45^\circ \pm 0,05^\circ$ и эллиптичностью $\pm 0,05^\circ$. Следует отметить, что компенсатор поддерживает однородное замедление по апертуре луча при заданной настройке. Из-за того, что длина волны находится вне полосы поглощения азополимера (см. рис. 2), и малой мощности зондирующего луча он не создает и не влияет на фотоиндуцированную анизотропию в образце. Этот луч нормально падает на поверхность образца и входную апертуру поляриметра.

Важнейшим параметром поляриметрических измерений является стабильность зондирующего луча, величину которой необходимо контролировать. Поляриметр в режиме осциллографа отображает данные в виде графиков для выбранного набора параметров поляризации, которые постоянно обновляются на экране по мере получения значений. Долговременные оптические параметры, которые были в наших экспериментах, записывались и контролировались:

- нормализованные параметры Стокса: S_1, S_2, S_3 ;
- параметры эллипса поляризации: азимут и эллиптичность;
- степень поляризации;
- общая интенсивность: S_0 .

Зондирующий луч проходит через освещенное лазером накачки пятно на образце. Параметры выходной эллиптичности χ и азимута ψ выходного зондирующего луча регистрируются в режиме реального времени с помощью системы поляризационного анализа PAX1000VIS (Thorlabs), называемой «поляриметр». Зная состояние поляризации падающего света и измеряя параметры Стокса, можно определить фотоиндуцированное двулучепреломление.

Одномодовый лазер DPSS с лучом накачки на длине волны 473 нм использовался для индуцирования анизотропии в азополимерных пленках. Волновая пластина $\lambda/2$ устанавливалась

внутри отверстия в поворотном модуле, что приводило к пошаговому вращению состояния поляризации пучка накачки. Диаметр луча был расширен в 5 раз на поверхности образца с помощью фиксированного расширителя пучка. За счет увеличения диаметра пучка достигается более равномерное распределение интенсивностей в апертуре. Это важно для получения однородных свойств образца под лазерным пятном во время измерений. Лучи накачки и зондирования пересекаются в перпендикулярной плоскости и под углом 13° на тонкой пленке. Поляриметр всегда предварительно настраивали, так как регулировка имеет решающее значение для точных поляриметрических измерений. Мы отрегулировали положение поляриметра относительно входа зондирующего луча, а именно: центрирование входной апертуры и нормальное падение зондирующего луча. Опция программного обеспечения «Индикатор считывания выравнивания» очень помогает выполнить этот шаг настройки для устранения артефактов.

Дихроичное зеркало для длинноволновой области спектра пропускания использовалось для предотвращения влияния на показания поляриметра прямого и рассеянного света лазерного луча накачки. Этот компонент («холодное» зеркало FM04) устанавливался под углом падения 45° с лучом He-Ne лазера перед поляриметром. Оптическое пропускание зеркалом длины волны 633 нм составляет более 85%, а отражение – более 90% для длины волны 473 нм.

Измерения проводились при повороте плоскости поляризации луча лазера накачки от 0 до 180° (рис. 3) с шагом 10° и облучении материала излучением с длиной волны 473 нм после времени экспозиции 6 мин, определенного в нашей работе [11]. Таким образом, для каждого образца регистрировались временные и угловые значения азимута, эллиптичности и двулучепреломления в зависимости от угла плоскости поляризации лазера накачки. Данные с поляриметра сохраняются и обрабатываются специализированным программным обеспечением. Величина интенсивности света на образце составляет примерно 450 мВт/см^2 .

Спектрофотометрическое измерение

Спектры пропускания UV-VIS регистрировали на двухлучевом спектрофотометре Specord UV/Vis при комнатной температуре в спектральном диапазоне длин волн от 300 до 800 нм. В двухлучевом

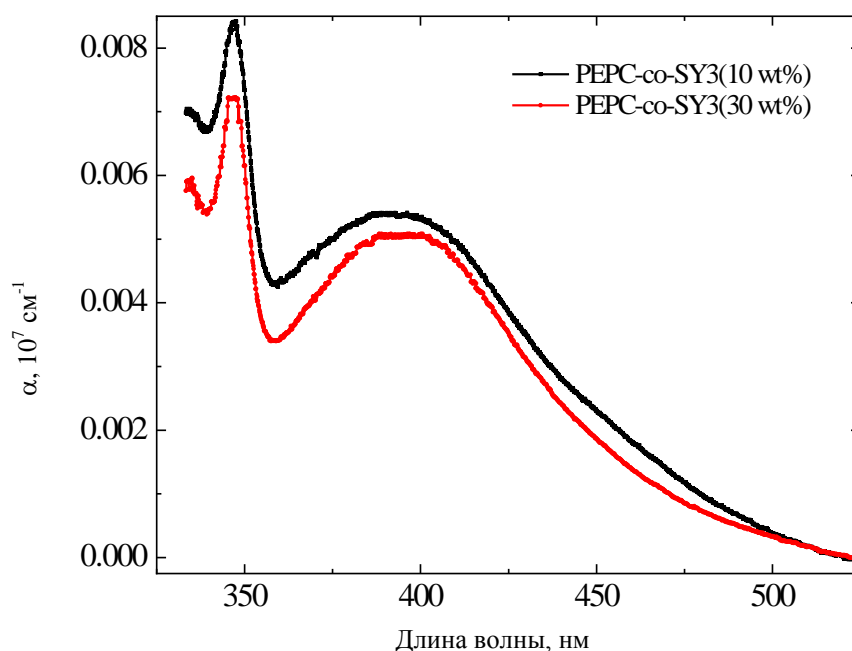


Рис. 4. Спектральное распределение коэффициента поглощения азополимеров PEPC-SY3 с 10 и 30 мас.% азокрасителя SY3.

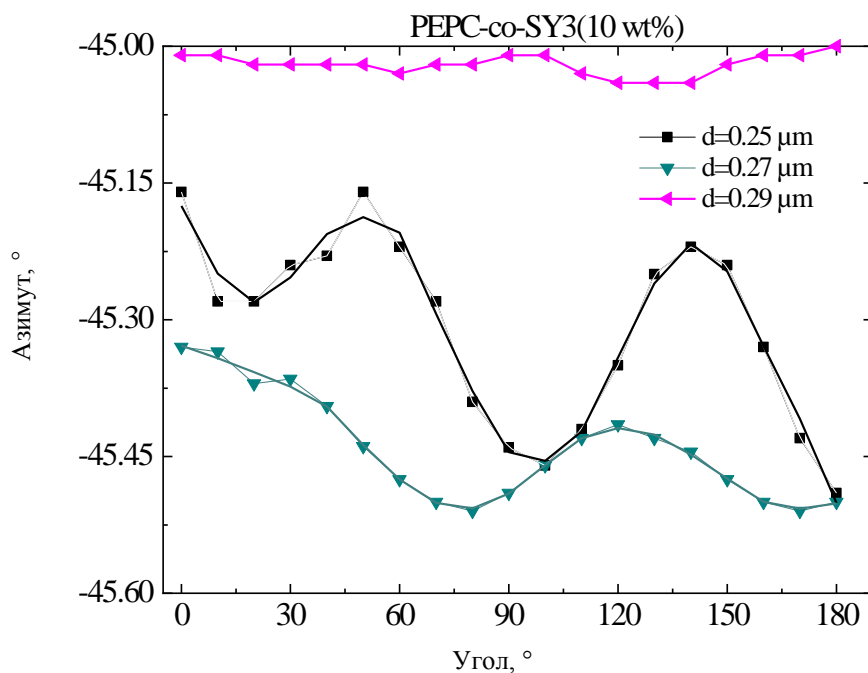


Рис. 5. Зависимость азимутального угла зондирующего луча от угла падающей поляризации луча накачки для образцов PEPC-SY3 (10 мас. %).

спектрофотометре один луч падает на образец, нанесенный на исследуемую стеклянную подложку, а второй – только на эталонную стеклянную подложку. Спектрометр был значительно модифицирован софтом, имеющим графический интерфейс пользователя и драйвер (Visual Basic). Графический интерфейс отображает спектры пропускания и отражения, фон и линию 100% в одном окне. Спектры пропускания $T(\lambda)$ и отражения $R(\lambda)$, полученные непосредственно с прибора, затем пересчитывались в спектры коэффициента поглощения $\alpha(\lambda)$.

Очень важно знать толщину пленки d , чтобы правильно сравнивать коэффициенты поглощения пленок. Толщину полученных пленок определяли с помощью модифицированного цифрового интерференционного микроскопа МИИ-4 в режиме отражения с увеличением 530x и разрешением по глубине 10 нм [10]. Смещение интерференционных полос света, отраженного от области осажденного азополимера и области стеклянной подложки, регистрировалось и затем обрабатывалось. Для расчета толщины образца по интерферограмме применялась разработанная программа Optic Meter [12].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Спектр коэффициента поглощения ($\alpha(\lambda)$) азополимеров РЕРС-SY3 с различными концентрациями азокрасителя представлен на рис. 4. Спектр коэффициента поглощения получен из спектров пропускания и отражения по закону Бугера–Ламберта:

$$\alpha(\lambda) = -\frac{1}{d} \ln(I_T - I_R) / I_0, \text{ где } I_T, I_R, I_0 -$$

интенсивности пропускания, отражения и падения света и d – толщина пленки. Спектр поглощения для обеих концентраций азокрасителей (10 и 30 мас.%) имеет два максимума поглощения. Один максимум находится около 345 нм, что связано с электронным переходом *trans*-изомеров. Максимум около 390 нм можно отнести к *cis*-переходу азополимеров. Отметим, что концентрация азокрасителя не сильно влияет на спектр поглощения в диапазоне длин волн 500–650 нм. По этому спектру мы определили, что интенсивность света с длиной волны 473 нм затухает в e раз на толщине пленки примерно 1 мкм, а свет с длиной волны 633 нм не поглощается исследуемым азополимером. Таким образом, тонкие пленки толщиной от 250 до 750 нм, использованные в наших экспериментах, поглощают свет накачки практически равномерно по всей толщине. Интересно, что поглощение на длине волны 473 нм у образцов с 30 мас.% азокрасителя ниже на 30%, чем у образцов с 10 мас.%. Возможным объяснением этого может быть увеличение рассеяния с увеличением количества азокрасителя.

С помощью оптической установки, описанной в разделе 2.2, были определены зависимости выходного азимутального угла поворота (ψ) зондирующего луча от угла падающей поляризации (относительно горизонта) луча накачки для азополимерных тонких пленок РЕРС-SY3 с содержанием SY3 от 10 до 30% и различной толщиной пленки в диапазоне 250–800 нм. Все точки данных получены при насыщении в конце воздействия луча накачки, которое составляет 6 мин. Было подтверждено, что фотоиндуцированные изменения достигают насыщения за это время экспозиции. По истечении 6 мин производились измерения. Результаты этого эксперимента для образцов с 10 мас. % SY3 представлены на рис. 5. Из него видно, что азимут зондирующего луча очень слабо зависит от угла поляризации луча накачки для более толстых пленок ($d = 0,29$ мкм, $\psi \sim 0,04^\circ$ и $d = 0,29$ мкм, $\psi \sim 0,135^\circ$). Для более тонких образцов ($d = 0,25$ мкм, $\psi \sim 0,34^\circ$,

$d = 0,27$ мкм, $\psi \sim 0,2^\circ$) азимут следует повороту угла поляризации луча накачки и достигает своего максимального значения при угле примерно 0° между азимутом и углом поляризации луча накачки. При этом минимальное значение азимутального угла при угле между ними равно около 45° . Хотя видно, что азимутальное вращение для этих образцов невелико. Независимость положения азимута от угла поляризации линейно поляризованного луча накачки свидетельствует в пользу того, что фотоиндуцированные изменения показателя преломления лежат только в поперечной плоскости образца и эти изменения не имеют продольной составляющей. Это согласуется с известным фактом, что линейно поляризованный пучок возбуждает линейное фотоиндуцированное двулучепреломление.

Для проверки поведения фотоиндуцированного двулучепреломления были измерены зависимости фотоиндуцированного двулучепреломления от угла поляризации пучка накачки. Фотоиндуцированное двулучепреломление (Δn) мы рассчитывали по следующей формуле из [13]:

$$\Delta n = \frac{\lambda}{2\pi d} \arctan\left(\frac{S_3}{S_2}\right),$$

где λ – длина волны зондирующего лазера; d – толщина пленки; S_2 и S_3 – компоненты вектора Стокса (S_0, S_1, S_2, S_3).

Зависимость наведенного в образце двулучепреломления после освещения лучом лазера накачки от угла ориентации поляризации луча накачки показана на рис. 6. Из него видно, что фотоиндуцированное двулучепреломление колеблется от $\Delta n = 0$ до $\Delta n = \pm 0,017$ в зависимости от угла между направлениями поляризации зондирующего и накачивающего пучков с одинаковой амплитудой при комнатной температуре. Обращает внимание тот факт, что максимальные отклонения имеют место при том же угле между этими поляризациями, что и максимальные отклонения азимутального положения $\sim 0^\circ + 90^\circ$ и $\sim 45^\circ + 90^\circ$.

Как видно из рис. 6, влияние толщины пленки на отклонения Δn пренебрежимо мало в диапазоне толщин 0,25–0,30 мкм. Угловые положения азимутов максимума и минимума достаточно хорошо совпадают с толщинами полученных образцов полимера.

Для образцов составов РЕРС-SY3 (30 мас. %) кривые поведения на рис. 7 по форме колебаний угла азимута аналогичны поведению образцов РЕРС-SY3 (10 мас. %).

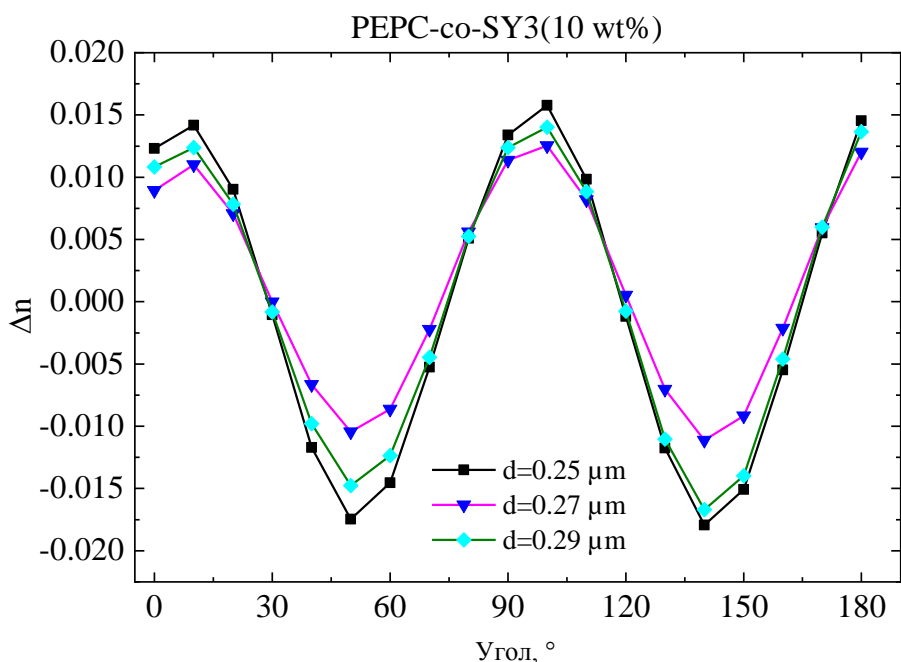


Рис. 6. Зависимость двулучепреломления образца по зондирующему лучу от угла падающей поляризации луча накачки для образцов PEPC-SY3 (10 мас. %).

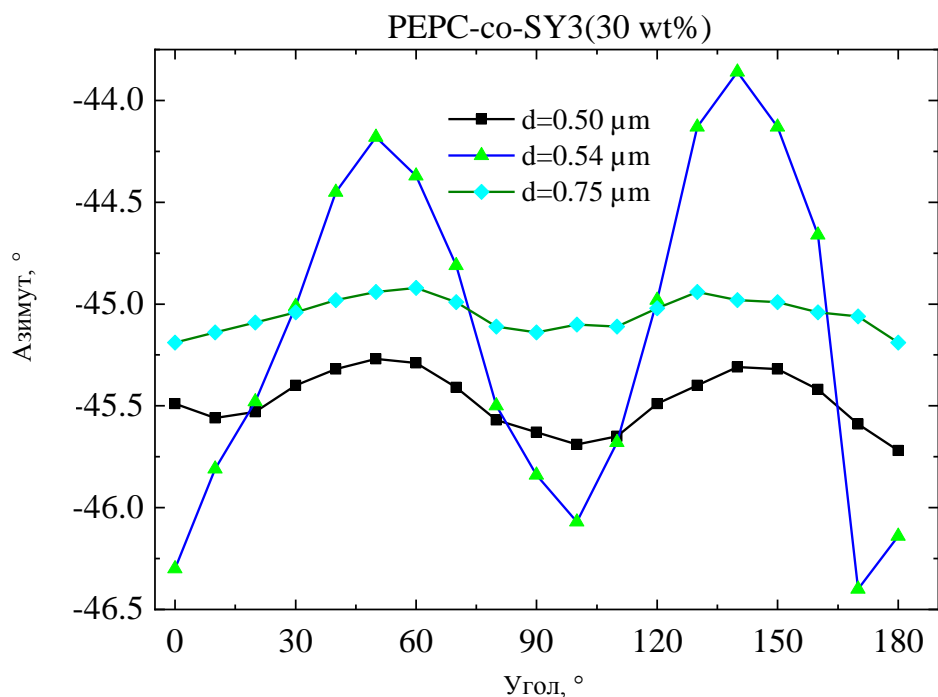


Рис. 7. Зависимость индуцированного азимута зондирующего луча от угла падающей поляризации луча накачки для образцов PEPC-SY3 (30 мас. %).

Через 6 мин облучения при достижении насыщения (первые точки) значения Δn лежат в диапазоне $0,008 \div 0,0075$. Эти значения очень близки к данным, полученным для образцов состава PEPC-SY3 (10 мас. %), а именно $\Delta n = 0,008 \div 0,0125$ (см. рис. 6). Видно, что для более толстых пленок изменения азимута максимальны для обоих полимерных составов.

Известно, что азополимеры обладают значительным линейным фотоиндуцированным двулучепреломлением, вызванным линейно

поляризованным световым излучением за счет *trans-cis-trans*-изомеризации и последующей ориентации хромофоров внутри азополимерной пленки. Позднее было обнаружено, что в азополимерах также индуцируется круговое двулучепреломление, но при освещении эллиптически поляризованным светом, пропорциональное повороту азимута света, проходящего через оптически активную среду [14]. Этот эффект объясняет образование хиральных групп в химической структуре аморфных азополимеров.

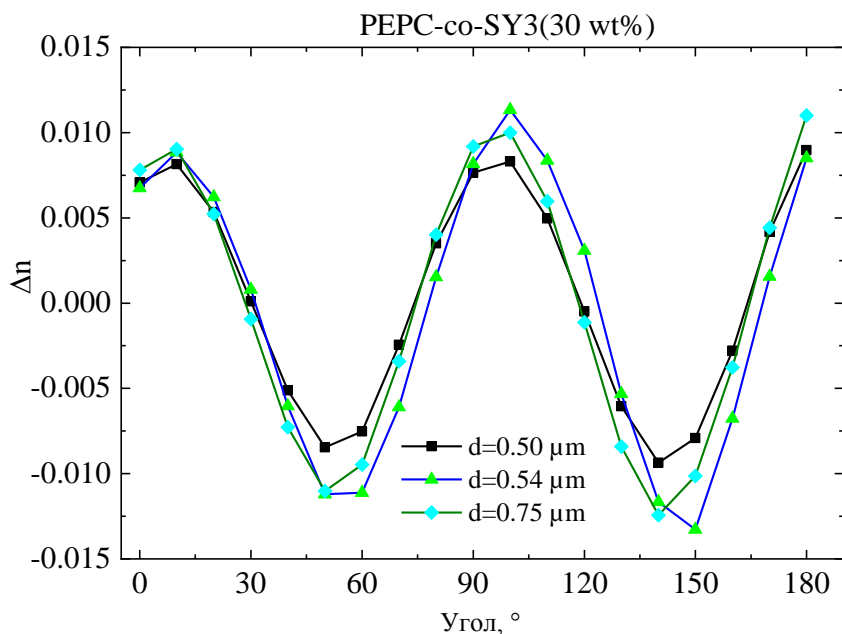


Рис. 8. Зависимость двулучепреломления образца зондирующего луча от угла падающей поляризации луча накачки для образцов PEPC-SY3 (30 мас. %).

Однако в работе [15] было показано, что при прохождении параксиального гауссова пучка через карбазолсодержащий азополимер вектор Пойнтинга (рассеивающая сила) состоит в основном из продольной составляющей, распределение которой полностью повторяет интенсивность пучка. Почти вся световая энергия в этом случае направлена вдоль оптической оси. Различия между лучом с круговой поляризацией и лучом с линейной поляризацией в этой модели несущественны. В работе [16] установлено, что характер деформации, индуцированной продольной составляющей, сильно зависит от толщины пленки полимера, а сила оптического градиента, действующая не на боковую цепь азокрасителя, а на основную цепь полимера, способствует полимерному движению. Можно предположить, что *trans-cis-trans*-изомеризация с последующей ориентацией молекул азополимера перпендикулярно поляризации падающего света является причиной «плоскостного» линейного фотоиндуцированного двойного лучепреломления. Продольная составляющая падающего светового поля влияет на полимерную матрицу карбазола, что проявляется в виде азимутального вращения [17].

Следует отметить, что поведение кривых Δn для образцов PEPC-co-SY3 (10 мас. %) и PEPC-co-SY3 (30 мас. %) сходно как по форме, так и по величине.

ВЫВОДЫ

Обобщая полученный результат, можно заключить, что анизотропия, фотоиндуци-

рованная в PEPC-co-SY3 при освещении линейно поляризованным актиничным светом, имеет некоторые особенности. Наблюдаемые азимутальные повороты зондирующего луча мало зависят от угла между линейной поляризацией накачивающего луча и линейной поляризацией зондирующего луча, в то время как он существенно отличается для разных толщин азополимерных пленок. Поведение фотоиндуцированного линейного двулучепреломления PEPC-co-SY3 определяется углом между линейной поляризацией луча накачки и линейной поляризацией зондирующего луча, достигающего максимального значения при угле 90° между линейными поляризациями луча накачки и зондирующим лучом.

Нами показано, что геометрическая фаза анизотропных карбазолсодержащих азополимеров, в отличие от динамической, может быть измерена поляриметрическим методом без привлечения методов интерферометрии. Это возможно потому, что геометрическая фаза не определяется разностью оптических путей, а является результатом анизотропии внутри пленки за счет фотоиндуцированного изменения ее пространственной структуры. В случае азополимеров можно предположить, что геометрическая фаза образована не только азокрасителем, но и полимерной матрицей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа частично поддержана проектом The National Agency for Research and Development of Moldova (ANCD20.80009.5007.03) и International Project of Program ERA.NetRusPlus (ANCD21.80013.5007.1M).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Ippolito, S., Polarized high-resolution imaging, *Nat. Photonics*, 2008, vol. 2, no. 5, p. 273.
- Garcia, M., Edmiston, C., Marinov, R., Vail, A., et al., Bio-inspired color-polarization imager for real-time in situ imaging, *Optica*, 2017, vol. 4, no. 10, p. 1263.
- Li, P., Zhang, Y., Liu, S., Ma, C., et al., Generation of perfect vectorial vortex beams, *Opt. Lett.*, 2016, vol. 41, no. 10, p. 2205.
- Kakichashvili, Sh.D., On polarization recording of holograms, *Opt. Spectrosc.*, 1972, no. 33, p. 324.
- Park, Y., Depeursinge, C. and Popescu, G., Quantitative phase imaging in biomedicine, *Nat. Photonics*, 2018, no. 12, p. 578.
- De Groot, P., Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography, *Adv. Opt. Photonics*, 2015, no. 7, p. 1.
- Escuti, M.J., Kim, J. and Kudenov, M.W., Geometric-phase holograms, *Opt. Photonics News*, 2016, no. 27, p. 22.
- Lee, Y.-H., Recent progress in Pancharatnam–Berry phase optical elements and the applications for virtual/augmented realities, *Opt. Data Process Storage*, 2017, no. 3, p. 79.
- Zhai, Y., Cao, L., Liu, Y. and Tan, X., A Review of polarization-sensitive materials for polarization holography, *Materials* (Basel), 2020, vol. 13, no. 23, p. 5562.
- Bagatur, S., Schlesag, M. and Fuhrmann-Lieker, T., Polarization dependent photoinduced supramolecular chirality in high-performance azo materials, *Molecules*, 2021, no. 26, no. 10, p. 2842.
- Losmanschii, C., Achimova, E., Abashkin, V., Botnari, V., et al., Photoinduced anisotropy in azopolymer studied by spectroscopic and polarimetric parameters, Proc. ICNBME-2021 “5th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering”, I. Tiginyanu et al. (eds.). Springer Nature Switzerland AG2022, 2022, vol. 87, p. 314.
- Мешалкин, А.Ю., Андриеш, И.С., Абашкин, В.Г., Присакар, А.М. и др., Цифровой метод измерения толщины нанометровых пленок на базе микроинтерферометра МИИ-4, *ЭОМ*, 2012, т. 48, № 6, с. 114.
- Nikolova, L. and Ramanujam, P.S., *Polarization Holography*, Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- Meshalkin, A., Robu, S., Achimova, E., Abashkin, V., et al., Direct photoinduced surface relief formation in carbazole-based azopolymer using polarization holographic recording, *J. Optoelectron. Adv. Mat.*, 2016, vol. 18, nos. 9–10, p. 763.
- Azzam, R.M.A. and Bashara, N.M., *Ellipsometry and Polarized Light*, North-Holland, Amsterdam, 1977.
- Khonina, S.N., Ustinov, A.V., Volotovskiy, S.G., Ivliev, N.A., et al., Influence of optical forces induced by paraxial vortex Gaussian beams on the formation of a microrelief on carbazole-containing azopolymer films, *Appl. Optics*, 2020, vol. 59, no. 29, p. 9185.
- Ishitobi, H., Nakamura, I., Kobayashi, T., Hayazawa, N., et al., Nanomovement of azo polymers induced by longitudinal fields, *ACS Photonics*, 2014, no. 1, p. 190.

Summary

Photo-induced anisotropy measurements were carried out in thin films of azopolymers PEPC with Solvent Yellow 3, with the concentrations of 10 wt% and 30 wt% of polymers with azo groups in their side-chain. The experimental dependences of the azimuths of the probe beam at the pump beam angles for samples were studied. The photoinduced dependence of the sample birefringence of the probe beam at the incident polarization angle of the pump beam was carried out by the polarimetric method for the studied samples. The geometric phase of anisotropic carbazole-containing azopolymers, in contrast to the dynamic phase, can be measured by the proposed polarimetric method without involving interferometry methods. This is possible because the geometric phase is not controlled by the difference in optical paths but is the result of a change of polarization inside the films due to photoinduced changes in its spatial structure.

Keywords: polarization holography, azopolymers, dynamic and geometric phases shift, polarimetry