

# Энергообмен когерентных световых пучков с пространственными фазовыми искажениями в пленке азосодержащего полимера

М.С.Андреева, В.И.Шмальгаузен

*Экспериментально изучен энергообмен когерентных световых пучков с искаженным волновым фронтом в пленке фоточувствительного азосодержащего полимера. С помощью адаптивного интерферометра с пленкой азополимера в качестве элемента для совмещения волновых фронтов световых пучков проведены эксперименты по визуализации фазы – преобразованию пространственных фазовых искажений одного из пучков на входе в среду в амплитудные искажения другого пучка на выходе. Экспериментальные результаты согласуются с теоретическим выводом о том, что пространственная фазовая модуляция на входе в полимерную среду преобразуется в амплитудную модуляцию на выходе и наоборот.*

**Ключевые слова:** азосодержащий полимер, двухволновое взаимодействие, адаптивный интерферометр, визуализация фазы.

## 1. Введение

Высокая чувствительность, стойкость к световым воздействиям, а также возможность управления динамическими характеристиками при помощи внешних воздействий на сегодняшний день являются основными причинами большого интереса к изучению фоточувствительных азосодержащих полимерных материалов [1–3]. Изменение показателя преломления в таких полимерах связано с обратимой *транс-цис*-изомеризацией молекул азокрасителя. Под действием света молекулы красителя из более стабильного *транс*-состояния переходят в *цис*-форму, обратный процесс может быть как вынужденным под действием света, так и спонтанным в ходе тепловой релаксации. В работе [4] показано, что азосодержащие полимеры с жидкокристаллическими свойствами могут использоваться в качестве элементов для совмещения волновых фронтов (смесителей световых пучков) в адаптивных интерферометрах. Адаптивные интерферометры этого типа [5] отличаются от обычных, в которых совмещение волновых фронтов световых пучков происходит на выходном полупрозрачном зеркале, тем, что в них роль смесителя пучков играет динамическая голограмма, записываемая в нелинейном материале.

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению энергообмена между сигнальным и опорным световыми пучками в адаптивном интерферометре с пленкой жидкокристаллического азополимера и объяснению наблюдаемых эффектов на основании теоретических выводов, приведенных в работе [6]. Экспериментально продемонстрировано, что малые пространственные фазовые искажения одного из пучков, взаимодей-

ствующих в пленке азосодержащего фоточувствительного полимера, преобразуются в амплитудные искажения другого пучка.

## 2. Энергообмен когерентных световых пучков в азосодержащем полимере

В работе [6] рассмотрено взаимодействие пучков, падающих на пленку полимера под разными углами к нормали. Решение такой задачи может использоваться для изучения энергообмена при искаженном волновом фронте сигнального пучка. Для этого пучок с малыми искажениями волнового фронта представляется в виде суммы пространственных спектральных компонент с плоскими волновыми фронтами, наклоненных под различными углами к поверхности пленки. Интенсивность искаженного пучка предполагается много меньшей, чем плоского опорного, благодаря чему нелинейным взаимодействием пространственных гармоник друг с другом можно пренебречь. Нами исследовался слабо искаженный волновой фронт одного из пучков, поэтому предполагалось, что разность углов падения пучков много меньше каждого из углов,  $\delta\theta \ll \theta$ .

Геометрия взаимодействия опорного пучка (R) и отдельной спектральной компоненты сигнального пучка (S), наклоненных под углами  $\theta$  и  $\theta + \delta\theta$  к нормали к плоскости полимера, представлена на рис.1. Поляризации интерферирующих пучков считаются одинаковыми и перпендикулярными к плоскости падения  $xz$  (пучки являются s-поляризованными). Влиянием на характер энергообмена отраженных от границы раздела подложка – воздух световых пучков пренебрегаем.

Поскольку фоточувствительный полимер обладает локальным откликом на световое воздействие, энергообмен в нем может идти или в переходном режиме (за времена порядка времени релаксации), или в стационарном режиме, если частоты взаимодействующих волн различны [4].

В соответствии с предположением, что сигнальный

М.С.Андреева, В.И.Шмальгаузен. Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы;  
e-mail: andreeva\_maria@mail.ru, shm@lado3.ilc.msu.su

Поступила в редакцию 12 января 2005 г., после доработки – 11 мая 2005 г.

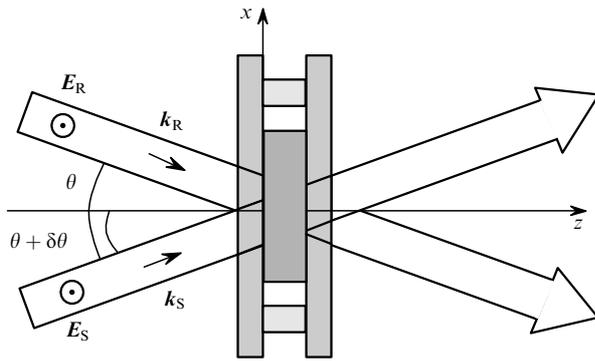


Рис.1. Схема двухволнового взаимодействия когерентных световых пучков в пленке азосодержащего фоточувствительного полимера;  $E_{R,S}$  и  $k_{R,S}$  – напряженности электрического поля и волновые вектора опорной и сигнальной волн, интерферирующих в пленке полимера.

пучок много слабее опорного, развитая в [6] теория использовала приближение малого контраста интерференционной картины. В этом приближении, а также для малых углов наклона одного из пучков решетки интенсивности и показателя преломления можно считать гармоническими. При рассмотрении задачи энергообмена между пучками, имеющими одинаковые углы наклона относительно нормали к плоскости полимера, вектор решетки интенсивности ориентирован в плоскости полимерного слоя. То, что пучки имеют разные наклоны, приводит к изменению пространственного периода решетки интенсивности, а следовательно к изменению глубины модуляции решетки показателя преломления вследствие конечности пространственного разрешения среды. Изменение наклона одного из пучков в плоскости падения значительно сильнее влияет на период решетки показателя преломления, чем наклон в перпендикулярной плоскости, лишь незначительно изменяющий период, поэтому при анализе учтем угловую расстройку только в плоскости падения пучков. Поскольку сигнальный и опорный пучки дифрагируют на одной и той же записанной ими в полимере решетке показателя преломления, то амплитудные искажения на выходе пленки будут проявляться в обоих пучках.

Уравнения энергообмена для случая симметричного падения в [4] являются универсальными для различных фоточувствительных сред, отличаясь только видом функции  $\Delta n^{(1)}$  (глубина модуляции решетки показателя преломления). Вид функции  $\Delta n^{(1)}$  для конкретной среды может быть найден как теоретически с использованием различных моделей, так и экспериментально. В случае разнонаклоненных пучков надо учитывать, что глубина модуляции решетки показателя преломления зависит и от интенсивностей сигнального и опорного пучков, и от разности углов падения. В установившемся режиме уравнения энергообмена сдвинутых по частоте (на величину  $\Omega$ ) пучков преобразуются к следующему виду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_S}{\partial z} &= -2I_S \text{Im}[\Delta n^{(1)}(I_S, I_R, \delta\theta)], \\ \frac{\partial I_R}{\partial z} &= -\frac{I_R(2I_0 - I_R)}{I_0} \text{Im}[\Delta n^{(1)}(I_S, I_R, \delta\theta)], \\ \frac{\partial \xi}{\partial z} &= B_1 \tan \theta \delta\theta + \text{Re}[\Delta n^{(1)}(I_S, I_R, \delta\theta)]. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $I_0$  – интенсивность падающего пучка;  $I_{R,S}$  – интенсивности опорного и сигнального пучков; коэффициент  $B_1$  пропорционален стационарному значению светоиндуцированной добавки к показателю преломления полимера;  $\xi$  – разность фаз между сигнальным и опорным пучками. Из (1) видно, что учет малого угла расстройки  $\delta\theta$  явно влияет лишь на дополнительный сдвиг фаз между пучками. С учетом пространственной диффузии, описывающей конечное пространственное разрешение полимерной пленки,  $\Delta n^{(1)}$  также зависит от разности углов падения, но эта зависимость является слабой.

Для изучения поведения амплитуды и фазы различных спектральных компонент при постоянной частотной расстройке взаимодействующих пучков удобно работать с фазовым сдвигом  $\Delta \xi = \xi(\delta\theta) - \xi(\delta\theta = 0)$  и нормированной интенсивностью  $I_S^{\text{norm}} = I_S(\delta\theta)/I_S(\delta\theta = 0)$ .

Выражения для этих величин на выходе тонкого слоя толщины  $z_0$  могут быть легко получены из системы (1) путем разложения в ряд по малому углу  $\delta\theta$ :

$$I_S^{\text{norm}} = \exp[c(\Omega)\delta\theta z_0], \quad (2)$$

$$\Delta \xi = [2d_1(\Omega) + d_2(\Omega)\delta\theta]z_0, \quad (3)$$

где коэффициенты  $c(\Omega)$ ,  $d_1(\Omega)$ ,  $d_2(\Omega)$  могут быть рассчитаны с использованием уравнений [6], которые мы не приводим здесь из-за громоздкости выражений. При малых углах  $\delta\theta$  амплитуда и фаза каждой спектральной компоненты линейно зависят от угла расстройки (учитываем только первый член разложения в ряд по степеням  $\delta\theta$ ).

Таким образом, сдвиг частот между сигнальным и опорным пучками при учете диффузионных слагаемых в уравнении для светоиндуцированного показателя преломления приводит к появлению зависимости интенсивности и фазы сигнального пучка на выходе полимерной пленки от разности углов наклона взаимодействующих пучков и от разности частот пучков. Аналогичная зависимость проявляется также в переходном процессе при включении или выключении одного из пучков. Такой эффект в случае сигнального пучка с искаженным волновым фронтом приводит к превращению фазовых неоднородностей в сигнальном пучке в амплитудные искажения в опорном пучке и может быть использован при изучении взаимодействия пучков с неплоскими волновыми фронтами. Для качественного анализа этих процессов нам достаточно учесть линейный характер зависимостей фазы и логарифма амплитуды от угла расстройки. Эффективная длина преобразования фазовых искажений в амплитудные зависит от характерного масштаба фазовых искажений (в эксперименте использовались неоднородности размером около 0.5 мм).

### 3. Экспериментальное наблюдение преобразования фазовых искажений в амплитудные

Для проверки теоретических результатов, описанных в [6], был поставлен эксперимент по изучению преобразования пространственных фазовых искажений волнового фронта одного из пучков, взаимодействующих в пленке азополимера, в амплитудные искажения другого пучка в переходном процессе. Схема экспериментальной установки (адаптивного интерферометра) представлена на

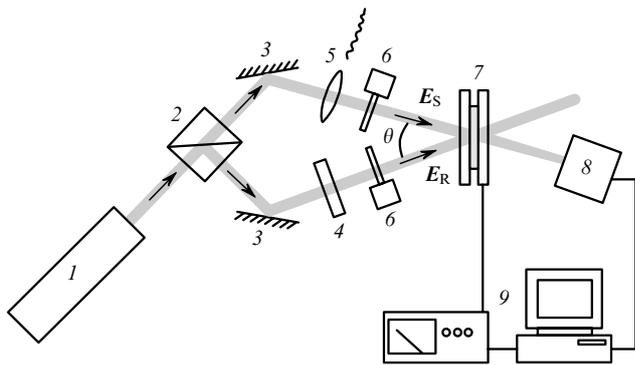


Рис.2. Схема экспериментальной установки: 1 – Nd:YAG-лазер с удвоением частоты; 2 – делительный кубик (1 : 10); 3 – зеркала; 4 – компенсатор; 5 – объект, вносящий пространственные фазовые искажения (линза и травленая стеклянная пластинка); 6 – переключатели; 7 – ячейка с полимером; 8 – ПЗС-камера; 9 – система управления экспериментом.

рис.2. Выбор длины волны излучения осуществлялся исходя из спектральных свойств полимерной пленки. Азополимер SPK-4/4 (20 % красителя), изучавшийся в настоящей работе, имел максимум поглощения в области длин волн 350–400 нм [7]. Максимальное изменение показателя преломления полимера достигается при облучении его светом с длиной волны, лежащей в более длинноволновой области спектра. В задачах записи и хранения голограмм обычно используются различные источники света. Для управления свойствами среды длина волны должна лежать в области поглощения полимера. В задачах адаптивной интерферометрии используется один источник излучения, поэтому для эффективной записи динамических голограмм он должен обеспечивать такую длину волны излучения, которая попадает в область поглощения полимера, но в то же время не слишком сильно поглощается образцом.

Для проведения экспериментов использовалось излучение второй гармоники Nd:YAG-лазера 1, которое попадало на делительный кубик 2 с коэффициентом деле-

ния 1/10. Плотность мощности опорного пучка на входе в среду составляла 60 мВт/см<sup>2</sup>, сигнальный пучок был в 10 раз слабее. Отраженные зеркалами 3 световые пучки сходились под углом  $\theta \approx 15^\circ$  в воздухе и пересекались в плоскости полимерного образца 7, образуя интерференционную картину. Толщина пленки полимера была 50 мкм, что обуславливалось необходимостью ее оптимизации из-за большого поглощения полимера. Толщина стеклянных подложек (4 мм), между которыми заключен полимер, была много больше толщины пленки. Блок термостабилизации и генератор входили в систему управления 9. В тракт сигнального пучка был введен объект 5, вносящий пространственные фазовые искажения. Регулярное искажение волнового фронта сигнального пучка вносилось положительной очковой линзой 1.5 дптр, нерегулярные фазовые искажения – травленой стеклянной пластинкой со случайными фазовыми неоднородностями, которые имели характерный масштаб около 0.5 мм. Пучки имели одинаковую линейную s-поляризацию и могли «выключаться» при помощи переключателей 6. Управление температурой полимерной пленки осуществлялось блоком термостабилизации. Ориентирующее переменное электрическое поле с частотой 350 Гц и амплитудой около 50 В прикладывалось к образцу с помощью системы прозрачных электродов. Распределение интенсивности в тракте сигнального пучка на выходе полимерной пленки регистрировалось ПЗС-камерой 8. Видеосигнал с камеры подавался на плату ввода-вывода изображений компьютера, а затем обрабатывался при помощи специальной программы.

На рис.3,а представлен профиль интенсивности сигнального пучка после прохождения пленки полимера при внесении в тракт сигнального пучка линзы. Видно, что пучок сфокусирован по сравнению с пучком до внесения линзы (рис.3,б). В некоторый момент времени сигнальный пучок перекрывался, однако из-за светоиндуцированного рассогласования решеток показателя преломления и интенсивности в течение времени релаксации наблюдалась дифракция опорного пучка по направлению сигнального, причем время затухания зависело от

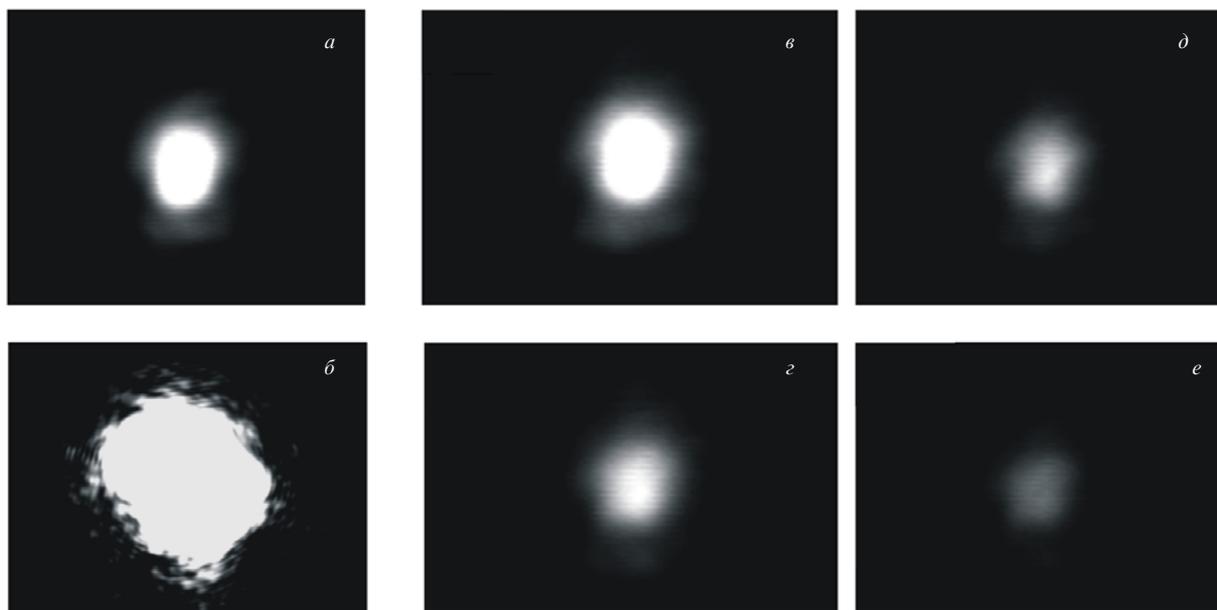


Рис.3. Распределение интенсивности в тракте сигнального пучка после (а) и до фокусировки (б), а также распределение несфокусированного на входе опорного пучка, дифрагировавшего по направлению перекрытого сигнального пучка, в различные моменты времени (в–е).

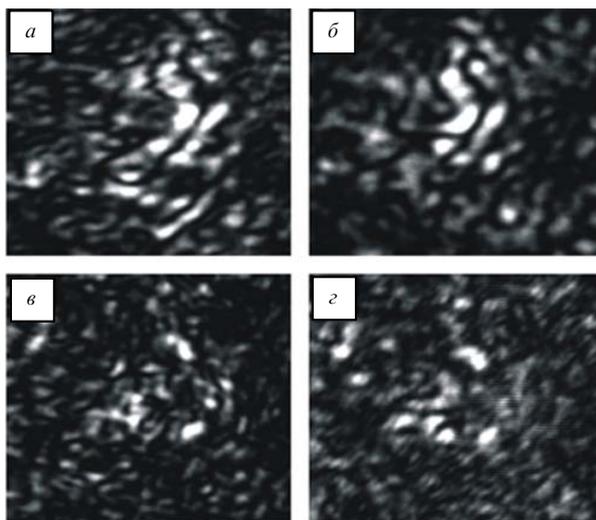


Рис.4. Распределение интенсивности в тракте сигнального пучка со случайными искажениями волнового фронта для различных областей фазовой пластины (*а, в*), а также распределение интенсивности в дифрагировавшем по направлению сигнального пучке (*б, г*) для областей (*а*) и (*в*) соответственно в случае, когда сигнальный пучок перекрыт.

внешних условий (температуры, отношения интенсивностей пучков, полной плотности мощности излучения). На рис.3,б–г показано распределение интенсивности по сечению пучка, дифрагировавшего в направлении сигнального. Видно, что форма распределения интенсивности в дифрагировавшем опорном пучке практически совпадает с распределением интенсивности в сигнальном пучке с искаженным волновым фронтом до его выключения. Таким образом, этот эксперимент позволяет наблюдать, как вследствие энергообмена фазовые искажения сигнального пучка переходят в амплитудные искажения опорного.

На рис.4 представлен профиль интенсивности сигнального пучка, в который внесена травленая стеклянная фазовая пластинка с нерегулярными искажениями фазы. Как и в эксперименте с регулярными искажениями, в некоторый момент времени сигнальный пучок выключался и наблюдалась дифракция опорного пучка по направлению сигнального. Из рис.4,б хорошо видно, что характер амплитудных искажений в пучке, дифрагировавшем по направлению сигнального, такой же, как и в сигнальном пучке (рис.4,а), что говорит о наблюдаемой

визуализации фазовых искажений. Для подтверждения регулярности получаемых эффектов эксперимент был проведен для различных областей фазовой пластинки. На рис.4,в, г приведены результаты аналогичных экспериментов для области фазовой пластинки, содержащей другие фазовые неоднородности. Видно, что эффект визуализации фазы наблюдается для различных фазовых неоднородностей.

#### 4. Заключение

Установлено, что в адаптивном интерферометре, который содержит полимерную пленку, интенсивности спектральных компонент, наклоненных под различными углами к нормали, преобразуются при прохождении полимерной пленки по-разному. По этой причине, а также вследствие энергообмена пучков в пленке фазовые искажения волнового фронта сигнального пучка преобразуются в амплитудные искажения опорного пучка (наблюдается эффект визуализации фазы). Объяснить это явление можно следующим образом: если волновой фронт одного из пучков искажен, то решетка показателя преломления в полимере тоже искажена. Опорный пучок с плоским волновым фронтом, дифрагируя на искаженной решетке, в свою очередь приобретает амплитудные искажения и несет информацию о фазовых искажениях в сигнальном пучке.

Таким образом, в настоящей работе экспериментально показано, что в адаптивном интерферометре с пленкой фоточувствительного азосодержащего полимера в качестве смесителя световых пучков пространственная фазовая модуляция сигнального пучка преобразуется в амплитудную модуляцию опорного.

Работа поддержана грантом РФФИ № 02-02-16721.

1. Мюльман Г., Ван-дер-Ворст Дж. В кн.: *ЖК полимеры с боковыми мезогенными группами* (М.: Мир, 1992, с. 421).
2. Holme N.C.R., Ramanujam P.S. *Opt. Lett.*, **21**, 902 (1995).
3. Симонов А.Н., Ларичев А.В. *Квантовая электроника*, **28**, 87 (1999).
4. Андреева М.С., Симонов А.Н., Шмальгаузен В.И., Шibaев В.П. *Квантовая электроника*, **31**, 599 (2001).
5. Барменков Ю.Ю., Кожевников Н.М. *Письма в ЖТФ*, **17**, 32 (1991).
6. Андреева М.С., Шмальгаузен В.И. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **66**, 1145 (2002).
7. Nalva H.S., Miyata S. (Eds) *Nonlinear optics of organic molecules and polymers* (Boca Raton: CRS Press, 1997).