

На правах рукописи

Андреева Мария Сергеевна

Динамика двухволнового взаимодействия световых пучков в пленке азосодержащего фоточувствительного полимера с жидкокристаллическими свойствами

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2004

Работа выполнена в Международном лазерном центре и на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Шмальгаузен Виктор Иванович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Бельдюгин Игорь Михайлович

кандидат физико-математических наук, доцент
Иванов Сергей Александрович

Ведущая организация: Физический институт им. П.Н. Лебедева (ФИАН)

Защита состоится 20 мая 2004 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.31 в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992 ГСП-2, Москва, ул. Академика Хохлова, д.1, Корпус нелинейной оптики, аудитория им. С.А. Ахманова

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ

Автореферат разослан 12 апреля 2004 года

Ученый секретарь диссертационного
Совета Д 501.001.31, доцент

Т.М. Ильинова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Задача двухволнового взаимодействия когерентных световых пучков в нелинейной среде изучается различными научными группами достаточно давно и подробно исследована. Тем не менее, появление новых нелинейно-оптических материалов и возможности новых приложений явления энергообмена световых пучков стимулирует продолжение исследований в этой области. В зависимости от материала, в котором происходит энергообмен, характер двухволнового взаимодействия может быть существенно различным. С появлением полимерных нелинейно-оптических материалов вновь становится актуальной задача изучения энергообмена световых пучков с учетом свойств конкретной среды. Явление энергообмена может иметь различные приложения, в частности оно используется в задачах адаптивной интерферометрии, где применение полимерных фоточувствительных пленок открывает новые перспективы.

Проблема регистрации малых изменений фазы и компенсации помех при измерении параметров вибрирующих объектов обычно решается интерферометрическими методами. Эти методы имеют высокую пороговую чувствительность обнаружения сигналов фазовой модуляции световых пучков и на сегодняшний день достаточно хорошо изучены. Для обнаружения малых фазовых сдвигов могут использоваться классические и так называемые адаптивные интерферометры. В классических оптических интерферометрах, благодаря специально разработанной конструкции, удается избежать необходимости дополнительной стабилизации рабочей точки. Однако такие приборы не могут работать в обычных лабораторных и производственных условиях, поэтому появилась необходимость создания нового типа интерферометров, которые могли бы стабильно работать в нормальных условиях. В настоящее время для задач виброметрии активно используются адаптивные интерферометры, в которых для осуществления стабилизации рабочей точки могут использоваться электромеханические корректоры, многоканальные электронные системы фазовой автоподстройки, а также оптические методы пространственно-временной стабилизации рабочей точки интерферометра. Одна из идей оптической стабилизации основана на использовании динамических голограмм в качестве элементов для совмещения волновых фронтов световых пучков (смесителей пучков) интерферометра. Динамическая голограмма, записанная в нелинейной среде, преобразует сигнал фазовой модуляции световых пучков на входе в нелинейную среду в сигнал амплитудной модуляции на выходе.

Появление новых сред, пригодных для динамической голографии, открывает новые возможности адаптивной интерферометрии. Поэтому в настоящее время не ослабевают интерес к поиску новых материалов и исследованию возможности их применения в динамической голографии. На практике для каждой конкретной задачи необходим оптимальный выбор фоточувствительной среды и режимов голографической записи. Решающую роль при выборе нелинейной среды играет величина светоиндуцированной добавки к показателю преломления, времена отклика и чувствительность среды.

Для оптических систем обработки и хранения информации на сегодняшний день наиболее перспективными считаются органические среды с нелинейно-оптическими свойствами. Среди таких соединений выделяются фоторефрактивные полимеры, смесевые фоточувствительные материалы на основе полимерных пленок с красителями, фоточувствительные материалы с химически присоединенными молекулами красителя. В задачах адаптивной интерферометрии наиболее хорошо изучено применение фоторефрактивных кристаллов и полупроводников, а также фоточувствительного материала бактериородопсина.

В настоящей диссертационной работе исследуется фоточувствительный гребнеобразный полимер с химически присоединенными молекулами азо-красителя (синтезированный на химическом факультете МГУ в лаборатории профессора В.П. Шибеева) с целью изучения возможности его использования в задачах адаптивной интерферометрии. В отличие от смесевых композиций, полимеры с химически присоединенными молекулами красителя имеют лучшую стойкость к повторяющимся световым и температурным воздействиям. К тому же, введение в них более высоких концентраций фотохромных фрагментов, отвечающих за величину светоиндуцированной анизотропии показателя преломления, не приводит к фазовому расслоению образцов. Часто для теоретического описания взаимодействия органических сред со светом используется феноменологический подход. Однако при таком подходе параметры модели не связаны явно с физическими константами среды, и при изменении внешних условий необходим подбор новых параметров, что достаточно неудобно. В противоположность феноменологическому, микроскопический подход позволяет явно связать параметры модели с характеристиками самого полимера.

В настоящей работе предпринята попытка описания светоиндуцированной анизотропии показателя преломления в азосодержащем фоточувствительном полимере с жидкокристаллическими (ЖК) свойствами как с помощью феноменологического, так и микроскопического подходов. Использование обоих подходов и сравнение результатов

позволяет выявить области их применимости. С учетом полученной модели светоиндуцированной анизотропии показателя преломления, а также феноменологического подхода, изучен энергообмен в азосодержащем гребнеобразном ЖК полимере. Теоретические исследования подтверждены экспериментально в схеме адаптивного интерферометра с пленкой азополимера в качестве смесителя световых пучков.

Цели диссертационной работы

1. Получить уравнения, описывающие динамику формирования светоиндуцированных вкладов в показатель преломления азосодержащего полимера с ЖК свойствами, из балансных уравнений для плотностей распределения *транс*- и *цис*-изомеров азокрасителя. Сравнить уравнения, полученные из микроскопической модели, с феноменологическими.
2. Теоретически изучить влияние ЖК свойств и внешних условий на динамику энергообмена при двухволновом взаимодействии в азополимере. Для выявления области применимости микроскопического и феноменологического подходов провести сравнение результатов, полученных из этих моделей.
3. В схеме адаптивного интерферометра с пленкой азосодержащего полимера в качестве смесителя световых пучков экспериментально изучить динамику энергообмена в азополимере при разных внешних условиях, таких как температура полимера, отношение интенсивностей пучков, полная плотность мощности излучения.
4. Экспериментально исследовать возможность преобразования пространственных фазовых искажений одного из взаимодействующих пучков на входе полимерной пленки в амплитудные искажения другого на выходе и наоборот (амплитудные в фазовые).

Исследование ориентировано на анализ возможности и перспектив использования полимерных пленок в качестве элементов для совмещения волновых фронтов световых пучков (смесителей световых пучков) в адаптивных интерферометрах.

Научная новизна работы заключается в получении уравнений, описывающих динамику светоиндуцированной анизотропии показателя преломления азосодержащего гребнеобразного полимера с ЖК свойствами из балансных уравнений для концентраций изомеров азокрасителя, а также теоретическом и экспериментальном изучении динамики энергообмена световых пучков в пленке азосодержащего ЖК полимера.

Практическая ценность

1. Получена система связанных уравнений для вкладов в показатель преломления азосодержащего полимера с ЖК свойствами, позволяющая описать светоиндуцированную анизотропию среды, явно связать макроскопические характеристики полимера с его физическими постоянными, а также учесть ЖК свойства среды, которые сильно влияют на характер частотных зависимостей показателей преломления.
2. Установлено, что пленка азосодержащего полимера может быть эффективно использована в задачах адаптивной интерферометрии для визуализации временной фазовой модуляции сигнального пучка с частотой выше единиц герц. Показано, что пространственная фазовая модуляция одного из пучков приводит к амплитудной модуляции другого и наоборот, что может быть использовано при изучении взаимодействия пучков, один из которых имеет искаженный волновой фронт.
3. Показано, что гребнеобразный азополимер с ЖК свойствами может использоваться в качестве смесителя световых пучков в адаптивном интерферометре, причем эффективность и скорость адаптации к низкочастотным изменениям фазы сильно зависят от температуры полимера, отношения интенсивностей взаимодействующих пучков, полной плотности мощности излучения.

Защищаемые положения

1. Параметр ориентационного порядка существенно влияет на динамику взаимодействия световых пучков в фоточувствительных азосодержащих полимерах с жидкокристаллическими свойствами.
2. Пленки фоточувствительного азосодержащего гребнеобразного полимера могут использоваться в качестве эффективных элементов совмещения волновых фронтов световых пучков (смесителей световых пучков) в адаптивном интерферометре для визуализации сигналов с частотой модуляции выше единиц герц.
3. В адаптивном интерферометре с пленкой фоточувствительного азосодержащего гребнеобразного полимера в качестве смесителя световых пучков пространственная фазовая модуляция сигнального пучка преобразуется в амплитудную модуляцию обоих пучков.

Апробация работы

Основные результаты работы опубликованы в 5 статьях в журналах «Квантовая электроника», «Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия.», «Известия РАН. Физика.», SPIE Proceedings. Кроме того, результаты докладывались на международных конференциях: Международная конференция «Оптика'99», (Санкт-Петербург, Россия, 1999), Международная научная молодежная школа «Оптика'2000», (Санкт-Петербург, Россия, 2000), Международная конференция «Ломоносов'2001», (Москва, Россия, 2001), XVII Международная конференция по когерентной и нелинейной оптике (КиНО'2001), (Москва, Россия, 2001), II Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика-2002», (Санкт-Петербург, Россия, 2002), «International Conference on Lasers, Applications and Technologies» (LAT'2002), (Minsk, Russia, 2002), III Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика-2003», (Санкт-Петербург, Россия, 2003) и на семинарах Международного лазерного центра и кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Полный объем работы 170 страниц, включая 41 рисунок (129 печатных страниц). Библиография содержит 144 наименования, в том числе 12 научных статей автора.

Личный вклад

Все использованные в диссертации результаты получены автором лично или при его определяющем участии.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **ВВЕДЕНИИ** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель диссертационной работы, описаны структура и содержание работы.

В **ПЕРВОЙ ГЛАВЕ** диссертации проведен вывод уравнений для светоиндуцированных вкладов в показатель преломления азосодержащего полимера с

ЖК свойствами из балансных уравнений для плотностей распределения *транс*- и *цис*-изомеров азокрасителей. Предложенный подход позволяет учесть светоиндуцированную анизотропию показателя преломления в среде и составить систему связанных уравнений для вкладов в показатель преломления полимера, индуцированных волной с произвольным направлением поляризации. Для решения задачи применен метод разложения плотностей углового распределения концентраций изомеров азокрасителей в ряд по полиномам Лежандра. Такой подход позволил связать коэффициенты в уравнениях для показателя преломления с материальными характеристиками самого полимера, а также удовлетворительно описать ряд наблюдаемых в эксперименте эффектов.

В параграфе 1.1 приведены основные сведения о строении гребнеобразного азосодержащего полимера с ЖК свойствами. Изложены основные допущения, используемые при построении модели взаимодействия молекулы азокрасителя с лазерным излучением. В модели предполагалось, что оптические свойства полимера зависят только от состояния азофрагментов (*транс-цис* изомеризации и ориентации молекул красителя). Под действием света молекулы красителя из более стабильного *транс*-состояния переходят в возбужденную *цис*-форму. *Транс-цис* изомеризация рассматривается в выделенном азофрагменте, при этом другие фрагменты не действуют на молекулу азокрасителя. Более медленным процессом является их переориентация в ходе теплового движения, причем *транс*-изомеры менее подвижны, чем *цис*-изомеры. Быстрые переходы не меняют ориентацию молекул красителя, которые переориентируются, только находясь в основном состоянии. Сечение поглощения *транс*-изомеров в направлении, параллельном поляризации падающего излучения, много больше сечения поглощения в перпендикулярном направлении. Сечения поглощения *цис*-изомеров не зависят от их ориентации. Поляризуемость *транс*-изомеров сильно зависит от направления, в то время как поляризуемость *цис*-изомеров изотропна. Записаны балансные уравнения для плотностей распределения *транс*- и *цис*-изомеров молекул азокрасителя:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial N_T(\theta, \varphi, t)}{\partial t} = -A(\theta)IN_T(\theta, \varphi, t) + \left(g_1 I + \frac{1}{\tau_c} \right) F(\theta, \varphi) N_C(\theta, \varphi, t) \\ \quad + D_T^{rot} \left(\nabla^2 N_T(\theta, \varphi, t) + \frac{1}{kT} \nabla(N_T(\theta, \varphi, t) \nabla U(\theta, \varphi)) \right) \\ \frac{\partial N_C(\theta, \varphi, t)}{\partial t} = A(\theta)IN_T(\theta, \varphi, t) - \left(g_1 I + \frac{1}{\tau_c} \right) F(\theta, \varphi) N_C(\theta, \varphi, t) + D_C^{rot} \nabla^2 N_C(\theta, \varphi, t) \end{array} \right. , \quad (1)$$

где $A(\theta) = \left\{ 1 + \frac{1}{\zeta} \cos^2 \theta \right\} \frac{q_T \sigma_T^\perp}{h\nu}$, $\zeta = \frac{\sigma_T^\perp}{\sigma_T'' - \sigma_T^\perp}$, $g_1 = \frac{\sigma_C q_C}{h\nu}$, $F(\theta, \varphi) \equiv 1 + 5SP_2(\bar{v}m)$,

$N_C(\theta, \varphi, t)$ и $N_T(\theta, \varphi, t)$ - нормированные на полное число частиц N_0 плотности распределения *транс*- и *цис*- изомеров, $\sigma_C, \sigma_T'', \sigma_T^\perp$ - сечения поглощения *цис*-изомеров и *транс*-изомеров в направлениях параллельном и перпендикулярном поляризации падающего излучения соответственно, причем $\sigma_T'' > \sigma_T^\perp$, D_C^{rot}, D_T^{rot} - коэффициенты вращательной диффузии изомеров, $S = (1/2)(3 \cos^2 \theta - 1)$ - параметр ориентационного порядка, описывающий степень ориентации длинных осей молекул вдоль направления директора. Поляризация падающего излучения полагалась линейной. Жидкокристаллические свойства были учтены путем введения потенциала взаимодействия *транс*-молекул $U(\theta, \varphi)$. Из уравнений (1) с использованием метода возмущений и представив плотности распределения *цис*- и *транс*-изомеров (N_C и N_T) как сумму стационарных значений (N_{C0} и N_{T0}) и малых нестационарных добавок ($\tilde{N}_C \ll N_{C0}$ и $\tilde{N}_T \ll N_{T0}$), получены балансные уравнения для добавок к плотностям распределения изомеров, отвечающих за светоиндуцированные свойства среды.

В параграфе 1.2 проведен вывод уравнений для коэффициентов разложения плотностей распределения *транс*- и *цис*-изомеров по полиномам Лежандра. Такое разложение использовалось для анализа перехода от балансных уравнений для плотностей распределения изомеров к уравнениям для светоиндуцированных показателей преломления среды. Рассмотрен частный случай аморфного полимера (параметр ориентационного порядка $S = 0$). Вследствие закона сохранения полного числа частиц и условия $D_C^{rot} \gg D_T^{rot}$ система для коэффициентов Лежандра содержит только коэффициенты разложения *транс*-изомеров. Показано, что показатель преломления полимера выражается только через нулевой, второй и второй присоединенный коэффициенты Лежандра. Симметрия рассматриваемой задачи приводит к тому, что полиномы нечетных порядков не входят в разложение.

В параграфе 1.3 проведен вывод уравнений для светоиндуцированных показателей преломления ЖК и аморфного полимера. Показано, что восприимчивости изомеров, а следовательно и светоиндуцированные добавки к показателю преломления по главным направлениям, выражаются через коэффициенты разложения по полиномам Лежандра *транс*-изомеров. В случае ЖК полимера получена система из трех связанных

уравнений для добавок к показателю преломления, демонстрирующих светоиндуцированную анизотропию показателя преломления полимера:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta n''}{dt} = K_{11}\Delta n'' + K_{12}\Delta n_1^\perp + K_{13}\Delta n_2^\perp + M_1 f(t) \\ \frac{d\Delta n_1^\perp}{dt} = K_{21}\Delta n'' + K_{22}\Delta n_1^\perp + K_{23}\Delta n_2^\perp + M_2 f(t), \\ \frac{d\Delta n_2^\perp}{dt} = K_{31}\Delta n'' + K_{32}\Delta n_1^\perp + K_{33}\Delta n_2^\perp + M_3 f(t) \end{cases} \quad (2)$$

где $\Delta n''$, Δn_1^\perp , Δn_2^\perp - вклады в показатель преломления в направлениях параллельном и перпендикулярных поляризации падающего излучения (по трем главным светоиндуцированным оптическим осям), коэффициенты $K_{i,j}$ и M_i выражаются через материальные параметры полимера. В связи с тем, что в случае аморфного полимера $\Delta n_1^\perp \equiv \Delta n_2^\perp$, (2) преобразуется в систему двух уравнений. В предельном случае пренебрежимо малой анизотропии полученные уравнения сводятся к известному феноменологическому уравнению первого порядка по времени.

ВТОРАЯ ГЛАВА работы посвящена теоретическому анализу энергообмена когерентных световых пучков, взаимодействующих в пленке азосодержащего гребнеобразного ЖК полимера. Проведен вывод связанных уравнений для интенсивностей и фаз световых пучков в случае симметричного и несимметричного падения. В силу того, что в задачах адаптивной интерферометрии сигнальный пучок обычно много слабее опорного, при изучении энергообмена использовалось приближение малого контраста интерференционной картины. Разность углов падения пучков считалась малой, что позволило, представляя сигнальный пучок в виде разложения в пространственный спектр, пренебречь взаимодействием спектральных компонентов друг с другом. Такой подход дает возможность изучать эффекты, связанные с преобразованием слабо искаженного волнового фронта сигнального пучка при прохождении полимерной пленки. Рассмотрены основные режимы энергообмена с использованием как феноменологической, так и микроскопической моделей среды. Получены частотные зависимости интенсивности сигнального пучка на выходе пленки в случаях симметричного и несимметричного падения световых пучков.

В параграфе 2.1 рассмотрен принцип двухволнового взаимодействия световых пучков в полимере (рис.1).

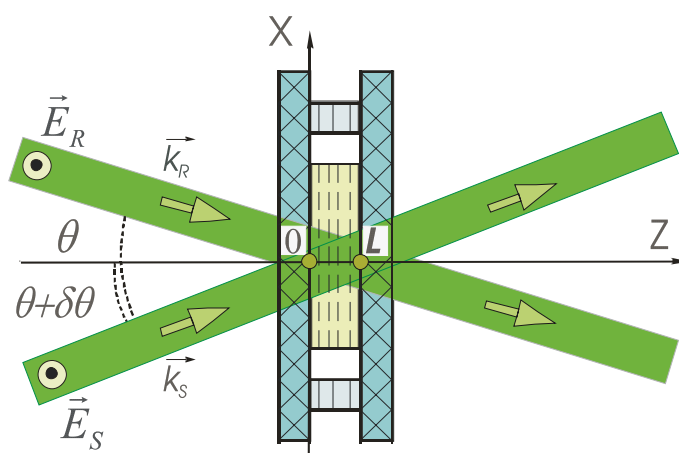


Рис. 1 Схема двухволнового взаимодействия когерентных световых пучков в пленке азосодержащего фоточувствительного полимера.

Два пучка – сигнальный (S) и опорный (R) в общем случае несимметричного падения сходились под углами θ и $(\theta + \delta\theta)$ к нормали к плоскости полимера, образуя в полимерной пленке интерференционную картину. $\vec{E}_{R,S}$, $I_{R,S}$ и $\vec{k}_{R,S}$ - напряженности электрического поля, интенсивности и волновые вектора опорной и сигнальной волн соответственно, причем $I_R \gg I_S$. Волновые фронты интерферирующих пучков считались малоотличающимися от плоских, а их поляризации одинаковыми и перпендикулярными к плоскости падения XZ (пучки s - поляризованы). В силу того, что толщина полимерной пленки (50 мкм) много меньше толщины стеклянных подложек, между которыми она заключена (4 мм), отраженное от стеклянных пластин излучение не влияло на характер взаимодействия пучков. Проведено сравнение энергообмена в случае микроскопической и феноменологической моделей азосодержащего полимера.

В параграфе 2.2 проведен вывод укороченных уравнений энергообмена световых пучков при их симметричном падении на произвольную нелинейную среду.

Считалось, что пересекаясь в среде, световые пучки образуют интерференционную картину вида:

$$I = I_0(1 + m \cos(Kx + \varphi(t) + \xi(z))), \quad (3)$$

где $I_0 = I_R + I_S$ - полная интенсивность света в текущем слое (в пределах рассматриваемого слоя $[z, z + dz]$ $I_0 = const$), $m = 2\sqrt{I_R I_S} / (I_R + I_S)$ - контраст интерференционной картины, $\xi = \varphi_{R0} - \varphi_{S0}$ - фазовый сдвиг световых пучков (положим $\xi = 0$ при $z = 0$), $K = |\vec{k}_R - \vec{k}_S|$ - модуль волнового вектора решетки. В случае симметричного падения вектор \vec{K} лежит в плоскости полимерной пленки, в несимметричном случае он направлен под некоторым углом: $\vec{K} = \{K_x, K_z\}$.

Уравнение для результирующей напряженности электрического поля световых волн $\vec{E} = \vec{E}_R + \vec{E}_S$ в выделенном слое полимера имеет вид:

$$\nabla^2 \vec{E} + k_0^2 \left(1 + \frac{\Delta n}{\bar{n}}\right)^2 \vec{E} = 0. \quad (4)$$

Здесь, $k_0 = 2\pi\bar{n}/\lambda$ - волновое число, а \bar{n} - средний (невозмущенный) показатель преломления, ∇^2 - оператор Лапласа. Уравнение (4) является нелинейным уравнением, так как решетка светоиндуцированного показателя преломления Δn сама зависит от интенсивности I_0 . Поэтому (4) совместно с уравнением, описывающим возникновение под действием света добавки к показателю преломления, полностью характеризуют процессы взаимодействия световых волн в слое фотохромного полимера.

Будем считать, что в полимере формируется гармоническая решетка показателя преломления:

$$\Delta n = \bar{n} \left\{ \Delta n^{(0)} + \frac{1}{2} m |\Delta n^{(1)}| \exp(i(Kx + \varphi(t) + \eta(z))) + \text{к.с.} \right\}, \quad (5)$$

где $\Delta n^{(0)}$ - стационарная добавка к показателю преломления, $\Delta n^{(1)} \equiv \Delta n^{(1)}(I_S, I_R, t)$ - добавка, вызванная модуляцией интенсивности.

Из (4) с учетом (3) и (5) получаем, что уравнения для интенсивностей взаимодействующих волн $I_S(z)$ и $I_R(z)$ и их разности фаз в общем случае имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial I_S}{\partial z} = -\frac{2I_S(I_0 - I_S)}{I_0} \rho \sin(\xi - \eta) \\ \frac{\partial I_R}{\partial z} = -\frac{I_R(2I_0 - I_R)}{I_0} \rho \sin(\xi - \eta) \\ \frac{\partial \xi}{\partial z} = \frac{2(I_0 - 2I_S)}{I_0} \rho \cos(\xi - \eta) \end{cases} \quad (6)$$

Величины ρ и η - соответственно амплитуда и фаза решетки показателя преломления, которые могут быть вычислены из материальных уравнений среды. Из (6) с использованием приближения малого контраста интерференционной картины ($I_S \ll I_R$) получены упрощенные уравнения энергообмена.

В параграфе 2.3 получена система уравнений для энергообмена пучков при их несимметричном падении на нелинейную среду. Использовалась схема двухволнового взаимодействия, представленная на рис.1 и считалось, что разность углов падения мала по сравнению с величиной самих углов.

В несимметричном случае вектор \vec{K} не лежит в плоскости пленки полимера, поэтому распределение интенсивности светового поля I зависит также от координаты z и имеет вид:

$$I = I_0 \left(1 + \frac{1}{2} m \cdot \exp(i(K \cos(\frac{\delta\theta}{2})x + K \sin(\frac{\delta\theta}{2})z + \varphi(t) + \xi(z))) + \text{к.с.} \right). \quad (7)$$

Решетка интенсивности вида (7) наводит в среде решетку показателя преломления:

$$\Delta n = \bar{n}(\Delta n^{(0)} + \frac{1}{2} m |\Delta n^{(1)}| \exp(i(K \cos(\frac{\delta\theta}{2})x + K \sin(\frac{\delta\theta}{2})z + \varphi(t) + \eta(z))) + \text{к.с.}). \quad (8)$$

В этом случае система уравнений энергообмена имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial I_S}{\partial z} = -\frac{2I_S(I_0 - I_S)}{I_0} \rho \sin(\xi - \eta) \\ \frac{\partial I_R}{\partial z} = -\frac{I_R(2I_0 - I_R)}{I_0} \rho \sin(\xi - \eta) \\ \frac{\partial \xi}{\partial z} = B_1 \text{tg} \theta \delta\theta + \frac{2(I_0 - 2I_S)}{I_0} \rho \cos(\xi - \eta) \end{cases} \quad (9)$$

Видно, что отличие (9) от системы (6) состоит в наличии в уравнении для разности фаз в (6) дополнительного члена, характеризующего сдвиг фаз, обусловленный геометрией эксперимента. Коэффициент B_1 пропорционален стационарному значению показателя преломления в полимере, поэтому не вносит вклад в энергообмен. При сравнении систем укороченных уравнений (6) и (9) показано, что учет малого угла расстройки $\delta\theta$ при несимметричном падении не влияет на характер энергообмена в среде, а вносит лишь дополнительный сдвиг фаз.

В **параграфе 2.4** рассмотрена феноменологическая модель для описания светоиндуцированной решетки показателя преломления, которая обычно используется для описания оптических характеристик органических сред. В случаях симметричного и несимметричного падения световых пучков получены уравнения для светоиндуцированного показателя преломления в установившемся и переходном режимах записи.

В **параграфе 2.5** рассматривается энергообмен световых пучков при симметричном падении с учетом уравнений для показателя преломления полимера, полученных из микроскопической модели в главе 1. Для получения аналитического решения системы уравнений для показателя преломления применен спектральный подход. Получены зависимости интенсивности сигнального пучка на выходе пленки от разности частот взаимодействующих пучков в установившемся режиме для феноменологической и микроскопической моделей среды.

В **параграфе 2.6** рассмотрен случай несимметричного падения световых пучков на пленку азополимера. Построены зависимости коэффициента двухволнового усиления интенсивностей разнонаклоненных компонентов при использовании феноменологической модели формирования решетки показателя преломления. Из этих зависимостей видно, что на некоторой частоте ($\Omega \cong 1$ рад/сек) существует область наиболее эффективного энергообмена. Проведенный теоретический анализ энергообмена разнонаклоненных световых пучков в пленке азополимера показал, что сдвиг частот между сигнальным и опорным пучками при учете слагаемых, описывающих пространственную диффузию 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. Этот эффект в случае сигнального пучка с искаженным волновым фронтом приводит к превращению фазовых

неоднородностей в сигнальном пучке в амплитудные и амплитудных в фазовые и может быть использован при изучении взаимодействия пучков с неплоскими волновыми фронтами. При преобразовании фазовой модуляции в амплитудную характерная длина преобразования существенно меньше (десятки микрометров), чем для преобразования амплитудной модуляции в фазовую (несколько сантиметров). Поэтому ожидается, что в отличие от преобразования фазовой модуляции в амплитудную при типичных параметрах азополимера в пленках толщиной 50 мкм эффект преобразования амплитудной модуляции в фазовую экспериментально наблюдаться не будет.

В **ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ** представлены результаты численных расчетов, проведенных на основе аналитических формул и систем уравнений, полученных в первой и второй главах. Проанализирована возможность пренебрежения полиномами Лежандра выше второго порядка при разложении в ряд плотностей распределения изомеров азокрасителя. Рассмотрено поведение коэффициентов Лежандра и показателей преломления в переходном процессе при модуляции интенсивности света. Построены частотные зависимости коэффициентов Лежандра, а также светоиндуцированных показателей преломления для разных значений параметра ориентационного порядка.

В **параграфе 3.1** проведен численный анализ возможности пренебрежения высшими полиномами при разложении плотностей распределения изомеров азокрасителей в ряд по полиномам Лежандра. Показано, что влиянием высших коэффициентов Лежандра на нулевой, второй и второй присоединенный можно пренебречь только в нестационарном процессе на временах, сравнимых с характерным временем установления процесса. С помощью численных расчетов показано, что для описания стационарного процесса, а также нестационарного на временах, больших времени установления, необходимо удерживать достаточно большое количество коэффициентов, причем это количество различно в зависимости от материальных параметров среды.

В **параграфе 3.2** проведено моделирование переходного процесса с учетом коэффициентов четвертого порядка с целью рассмотрения более широкого диапазона времен, чем в предыдущем параграфе, и изучения возможности пренебрежения высшими членами разложения для полимеров с ЖК свойствами. Для скачкообразного изменения интенсивности построены кривые установления коэффициентов $a_0(t')$, $a_2(t')$, $a_4(t')$, $a_{22}(t')$ и $a_{42}(t')$, где t' - безразмерное время. Из этих зависимостей видно, что в нестационарном процессе время установления

коэффициентов четвертого порядка больше, а их значения меньше, чем нулевого и второго. Таким образом, влияние коэффициентов 4-го порядка на низшие уменьшается с уменьшением интервала времени, на котором происходит установление. Построены зависимости светоиндуцированных показателей преломления от времени без учета модуляции.

В **параграфе 3.3** рассмотрен процесс установления с учетом гармонической модуляции интенсивности. Показано, что глубина модуляции коэффициентов Лежандра уменьшается с ростом их порядкового номера. Сильнее всего она влияет на нулевой, малое влияние модуляции на высшие коэффициенты является дополнительным доводом в пользу пренебрежения ими. Показано, что модуляция интенсивности приводит к модуляции показателей преломления.

В **параграфе 3.4** рассмотрен спектральный подход к решению уравнений для коэффициентов Лежандра, полученных в первой главе. В общем случае система для коэффициентов Лежандра решается численно, однако в случае гармонической модуляции интенсивности с частотой Ω она может быть решена аналитически. Находя аналитические решения для отдельных гармоник и пренебрегая взаимодействием между отдельными гармониками, можно получить аналитическое решение для произвольной малой модуляции интенсивности. Получены частотные зависимости мнимых и действительных частей, а также амплитуд и фаз коэффициентов Лежандра. Показано, что параметр порядка существенно влияет на характер поведения этих зависимостей.

В **параграфе 3.5** рассмотрен спектральный подход к решению уравнений для светоиндуцированных показателей преломления с использованием феноменологической и микроскопической моделей полимера. Получены частотные зависимости амплитуд, фаз, мнимых и действительных частей показателя преломления. Проведено сравнение характеристик и показано, что при определенных параметрах феноменологической модели для показателя преломления ее решение в частотном представлении достаточно хорошо согласуется с решением для показателя преломления, параллельного направлению поляризации падающего излучения, полученного из микроскопической модели. Расчетные кривые позволили определить область параметров, в которой среда удовлетворительно описывается феноменологическим уравнением.

В **ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ** приведены результаты экспериментального изучения динамики двухволнового взаимодействия когерентных световых пучков в пленке азополимера. Описана экспериментальная установка, представляющая собой адаптивный интерферометр с пленкой азополимера в качестве смесителя световых

пучков. Продемонстрирована возможность интерферометра визуализировать более быстрые по сравнению с характерным временем релаксации среды фазовые возмущения в одном из плеч. Показано, что скорость и эффективность энергообмена световых пучков в азополимере зависят от внешних условий, таких как температура, отношение интенсивностей взаимодействующих пучков, плотность мощности излучения. Экспериментально изучен отклик интерферометра на временную модуляцию фазы в одном из пучков, а также динамика энергообмена в переходном режиме при включении (выключении) одного из пучков. Показано, что пространственная фазовая модуляция сигнального пучка преобразуется в амплитудную модуляцию опорного.

В параграфе 4.1 описана схема экспериментальной установки (адаптивного интерферометра), представленная на рис.2.

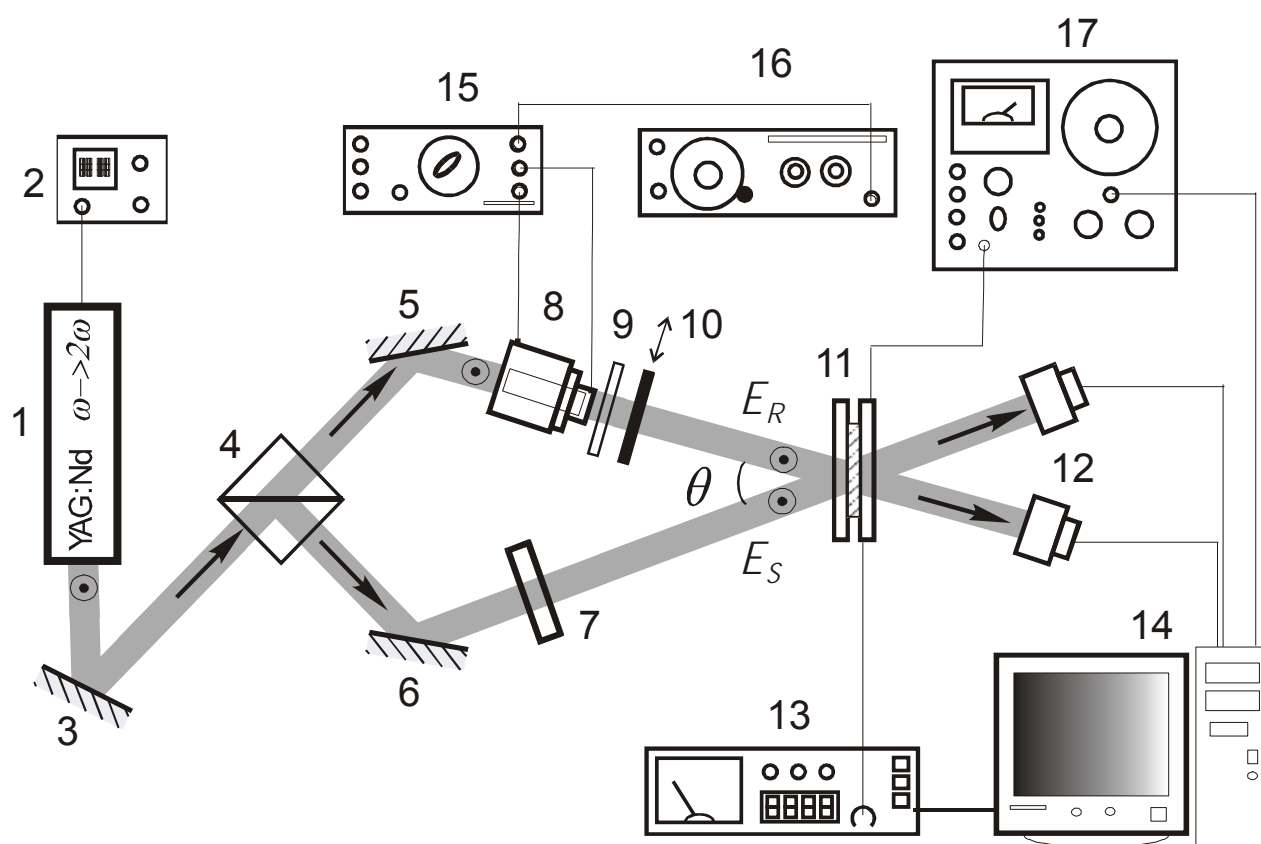


Рис.2 Схема адаптивного интерферометра с пленкой азосодержащего полимера.

Для проведения экспериментов использовалось излучение второй гармоники YAG:Nd лазера ($\lambda = 532$ нм) (1), которое после прохождения поворотного зеркала (3) попадало на делительный кубик (4) с коэффициентом деления 1/10. Отраженные зеркалами (5) и (6) световые пучки сходились под углом $\theta \cong 15^\circ$ в воздухе и пересекались в плоскости полимерного образца (смесителя световых пучков) (11), образуя интерференционную картину. В тракт одного из пучков для обеспечения

фазовой модуляции был помещен электрооптический модулятор (ЭОМ) (8). Изменение оптического пути сигнального пучка за счет внесения модулятора компенсировалось стеклянной пластиной (7). Пучки имели одинаковую линейную s - поляризацию. Деполяризация излучения, проходящего через модулятор, устранялась с помощью поляризатора (9). Нагрев полимера осуществлялся с помощью блока термостабилизации (13), а его ориентация - с помощью генератора (17). Управление ЭОМ осуществлялось при помощи звукового генератора (16) и высоковольтного усилителя (15). В зависимости от постановки эксперимента, прошедшее через пленку излучение регистрировалось фотодиодом или ПЗС камерой (12), которые могли быть помещены в любой из пучков. Сбор и анализ данных проводился с помощью персонального компьютера (14), оснащенного платой АЦП/ЦАП преобразователя. В параграфе приведены основные технические характеристики элементов экспериментальной установки.

В параграфе 4.2 описаны калибровочные эксперименты, проведенные для изучения работы различных узлов экспериментальной установки. Собрана экспериментальная установка, в которой в качестве смесителя световых пучков использовалась статическая амплитудная голограмма, записанная на фотопластине. Угол схождения пучков составлял 90^0 . В качестве источника излучения использовался *He-Ne* лазер ЛГН-207А ($\lambda=0.63$ мкм, мощность $\cong 1$ мВт). Измерены статическая, динамическая и амплитудно-частотная характеристики интерферометра, проведена калибровка фотодетектора.

В параграфе 4.3 представлены результаты экспериментов по изучению переходных процессов в адаптивном интерферометре с пленкой азосодержащего полимера. Эксперименты проводились на установке, представленной на рис.2. Изучалось явление энергообмена при временной фазовой модуляции одного из пучков интерферометра, а также в ходе переходного процесса при включении – выключении одного из взаимодействующих световых пучков. Показано, что такие внешние условия как температура, плотность мощности излучения, отношение интенсивностей пучков сильно влияют на скорость и эффективность энергообмена. С помощью ПЗС-камеры получены распределения интенсивности в тракте опорного и сигнального пучков при перекрытии одного из них для различных моментов времени после выключения.

В параграфе 4.4 описаны эксперименты по наблюдению превращения фазовой модуляции сигнального пучка на входе полимерной пленки в амплитудную модуляцию обоих пучков на выходе. Для внесения регулярных пространственных фазовых

искажений была использована линза (+1.5 дптр). Нерегулярные искажения обеспечивались травленной фазовой пластиной (масштаб неоднородностей составлял примерно 1 мм). Показано, что распределение интенсивности в тракте сигнального пучка сразу после его перекрытия (дифракция опорного пучка по направлению сигнального) сильно коррелирует с распределением интенсивности в искаженном сигнальном пучке. На рис.3 приведено распределение интенсивности в тракте сигнального пучка с искаженным волновым фронтом. (а), (в) – распределение интенсивности в сигнальном пучке со случайными фазовыми искажениями в различных точках пластины, (б), (г) – в опорном пучке, дифрагировавшем по направлению сигнального.

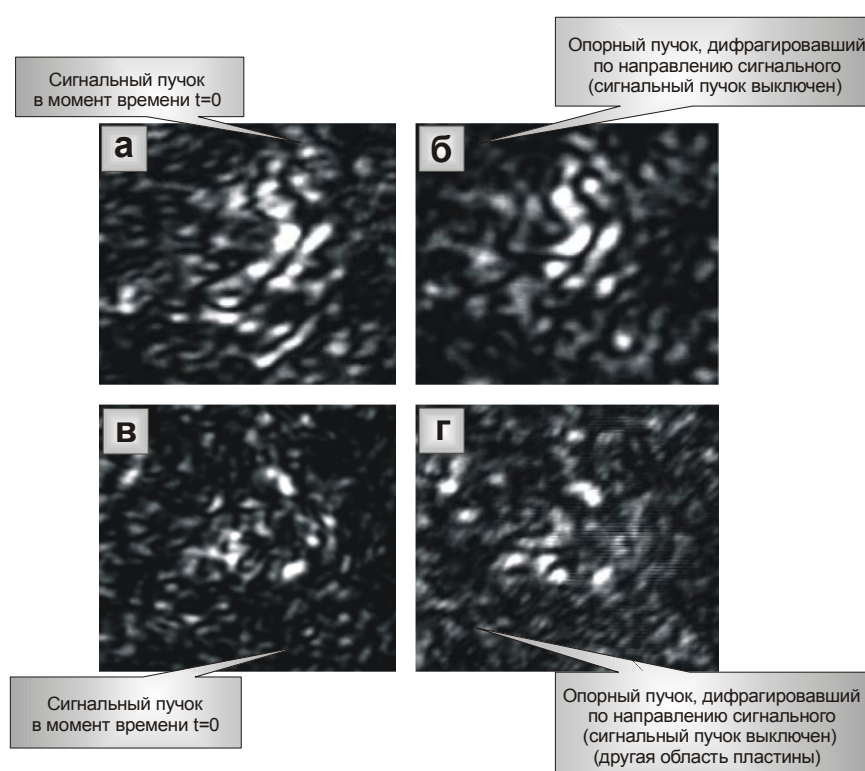


Рис.3 Распределение интенсивности в тракте сигнального пучка.

В **ЗАКЛЮЧЕНИИ** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Выведена система связанных уравнений для светоиндуцированных вкладов в показатель преломления азосодержащего полимера с ЖК свойствами из балансных уравнений для плотностей распределения *транс*- и *цис*-изомеров азокрасителей, которая позволила описать светоиндуцированную анизотропию среды и получить уравнения для

трех различных вкладов в показатель преломления, соответствующих трем главным направлениям. Полученная система уравнений в предельном случае пренебрежимо малой анизотропии сводится к известному феноменологическому уравнению.

2. Изучены типичные режимы энергообмена в азосодержащем фоточувствительном полимере, такие как взаимодействие световых волн, сдвинутых по частоте, переходной процесс при включении–выключении пучков, частотная модуляция одного из пучков. Теоретический анализ проведен с использованием как феноменологической, так и микроскопической моделей среды для случаев симметричного и несимметричного падения взаимодействующих пучков. В последнем случае разность углов падения пучков много меньше каждого из углов.

3. Теоретически показано, что при анализе переходных процессов методом разложения функции распределения частиц в ряд по полиномам Лежандра допустимо пренебрежение полиномами порядка выше второго.

4. Показано, что параметр ориентационного порядка для азосодержащего ЖК полимера сильно влияет на частотные зависимости светоиндуцированных показателей преломления и на характер анизотропии среды. Исследованы изменения параметра порядка в рамках диапазона, допускаемого используемой моделью.

5. Экспериментально продемонстрирована возможность визуализации фазовых возмущений с характерным временем, меньшим времени релаксации среды в адаптивном интерферометре с пленкой азополимера. При температурах в диапазоне $75 \div 90^{\circ}\text{C}$, длине волны источника когерентного излучения $\lambda=0.532$ мкм, плотности мощности излучения $\cong 125$ мВт/см², толщине пленки 50 мкм, угле схождения пучков 15° (в воздухе) диапазон детектируемых частот составил единицы герц.

6. Экспериментально показано, что такие параметры, как температура среды, отношение интенсивностей взаимодействующих пучков, плотность мощности излучения сильно влияют на скорость и эффективность энергообмена в переходном режиме (включение–выключение одного из пучков) и при временной модуляции фазы одного из взаимодействующих пучков. Эксперименты проведены на длине волны $\lambda=0.532$ мкм.

7. Показано, что в пленках азосодержащего фоточувствительного полимера с ЖК свойствами пространственная фазовая модуляция входящего светового пучка преобразуется в амплитудную модуляцию выходящего и наоборот. Амплитудная модуляция преобразуется в фазовую на длине в несколько сантиметров, в то время как

преобразование фазовой модуляции в амплитудную происходит на длине в десятки микрометров.

Публикации

1. Андреева М.С., Симонов А.Н., Шмальгаузен В.И., Шибаяев В.П. *Динамика двухволнового взаимодействия в пленке азосодержащего фоточувствительного жидкокристаллического полимера*// Квантовая электроника, Т.31, №7, сс.599-603, (2001)
2. Андреева М.С., Шмальгаузен В.И. *Энергообмен в пленке фоточувствительного азосодержащего полимера при двухволновом взаимодействии разнонаклоненных световых пучков*// Известия РАН, серия Физическая, Т.66, №8, сс.1145-1148, (2002)
3. Андреева М.С., Шмальгаузен В.И. *Энергообмен когерентных световых пучков в азосодержащем фоточувствительном полимере*// Вестник Московского университета, Сер.3. Физика. Астрономия, №1, сс.29-32 (2003)
4. Andreeva M.S., Simonov A.N., Shmal'gauzen V.I. *Two-wave coupling in azo-containing photosensitive polymers with liquid crystal properties*// SPIE Proceedings, V.4750, pp.247-255, (2001)
5. Андреева М.С., Шмальгаузен В.И. *Светоиндуцированная анизотропия показателя преломления азосодержащего полимера с жидкокристаллическими свойствами*// Квантовая электроника, Т.34, №1, сс.37-40, (2004)
6. Андреева М.С., Симонов А.Н., Шмальгаузен В.И. *Динамика процессов двухволнового взаимодействия в пленках азосодержащих фоточувствительных полимеров с ЖК свойствами*// Международная конференция «Оптика'99», (Санкт-Петербург, Россия, 1999)
7. Андреева М.С. *Поляризационное управление динамикой энергообмена в пленке фоточувствительного азо-содержащего полимера с ЖК свойствами*// Международная научная молодежная школа «Оптика'2000», (Санкт-Петербург, Россия, 2000)
8. Андреева М.С., Симонов А.Н., Шмальгаузен В.И. *Динамика двухволнового взаимодействия в пленке фоточувствительного азосодержащего ЖК полимера*// Международная конференция “Ломоносов'2001”, (Москва, Россия, 2001)
9. Andreeva M.S., Simonov A.N., Shmal'gauzen V.I. *Two-wave coupling in azo-containing photosensitive polymers with liquid crystal properties*// XVII Международная конференция по когерентной и нелинейной оптике (КиНО'2001), (Москва, Россия, 2001)
10. Андреева М.С., Симонов А.Н. *Энергообмен в пленке азосодержащего ЖК полимера при двухволновом взаимодействии разнонаклоненных пучков*// II Международная

конференция молодых ученых и специалистов «Оптика-2002», (Санкт-Петербург, Россия, 2002)

11. Andreeva M.S., Shmal'gauzen V.I. *Nonlinear two-beam coupling in azo-containing polymer with liquid crystalline properties*// “International Conference on Lasers, Applications and Technologies” (LAT’2002), (Minsk, Russia, 2002)

12. Андреева М.С., Шмальгаузен В.И. *Светоиндуцированная анизотропия показателя преломления азосодержащего полимера с ЖК свойствами*// III Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика-2003», (Санкт-Петербург, Россия, 2003)