

УДК 535.3: 778.38

Исследование процесса оптического формирования стабильных голографических линз из многокомпонентных фотополимеризующихся композиций

© 2012 г. С.Н. Менсов^{1,2}, М.А. Морозова¹, Ю.В. Полуштайцев², Е.С. Калинина³

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

² Институт металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева РАН, Нижний Новгород

³ ООО «МФИ Софт», Нижний Новгород

mensov@rf.unn.ru

Рассмотрена возможность оптического создания полимерных голографических линз, устойчивых к видимому излучению. Исследовано влияние параметров фоторегистрирующей среды и воздействующего излучения на распределение показателя преломления в формируемом светом фазовом транспаранте с целью выявления оптимальных режимов записи голографических линз, эффективно фокусирующих излучение.

Ключевые слова: фотополимер, нелинейная оптика, лазерное излучение, голография.

В настоящее время голографические оптические элементы находят широкое применение в лазерной технике [1–6]. Они не только с успехом заменяют стандартную рефракционную оптику при преобразовании лазерного (монохроматического) излучения [3; 4], но и более технологичны в изготовлении, дешёвы, могут быть адаптированы к световым пучкам сложной конфигурации [1; 2]. Для создания эффективных голографических элементов необходимы прозрачные среды, в которых можно формировать градиенты показателя преломления [7, 8]. Так, использование в фотополимеризующихся композициях (ФПК) неполимеризующихся добавок с иным, чем у полимера, показателем преломления позволяет создавать стабильные фазовые дифракционные структуры непосредственно оптическим излучением [9; 10]. Требуемые для этого пространственные распределения интенсивности воздействующего света могут быть обеспечены в оптических установках за счёт интерференционных процессов [11; 12]. При этом голографический способ записи позволяет создавать не только линзы с осевой симметрией, но и цилиндрические и астигматические линзы, изготовить которые традиционными способами технологически сложно. Однако, при оптическом создании голографической линзы, являющейся непериодической структурой с значительным по ширине пространственным спектром, необходимо учитывать, что жидкие фоторегистрирующие среды неодинаково эффективно отображают распределения интенсивности на разных пространственных масштабах [9; 10]. Частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) многокомпонентных ФПК не монотонна, а диапазон регистрируемых пространственных частот в значительной степени зависит от средней интенсивности интерференционной картины. Поэтому режим записи линзы в ФПК определяет её качество.

В данной работе рассмотрен процесс оптического формирования стабильных голографических линз из фотополимеризующихся композиций. Методами численного

моделирования исследована ЧКХ ФПК с неполимеризующейся добавкой, определены оптимальные условия записи голографической линзы в такой нелинейной среде.

Благодаря отсутствию поглощения энергии световой волны, восстанавливающей изображение, фазовые голограммы обладают большей дифракционной эффективностью по сравнению с амплитудными [3; 12]. Набег фазы в прозрачных голограммах может быть реализован как за счёт вариации толщины слоя среды, так и за счёт пространственного распределения показателя преломления [11, 12]. При этом, в отличие от дифракционных линз с поверхностным рельефом, фазовые транспаранты с объёмным неоднородным распределением показателя преломления более устойчивы к внешнему механическому воздействию. В общем случае функцию пропускания фазового транспаранта [3] можно представить как:

$$T(x) = \exp\{i \cdot k \cdot h(x) \cdot n(x)\} \quad , \quad (1)$$

где $k = 2\pi / \lambda$ – волновое число, λ – длина волны, $h(x)$ – изменение толщины фазового транспаранта, $n(x)$ – пространственное распределение показателя преломления.

Для обычной линзы характерно изменение её толщины от центра к периферии. Используя интегральный инвариант Лагранжа [3], в параксиальном приближении не трудно получить выражение для сдвига фазы волны по поперечной координате:

$$k \cdot h(x) \cdot (n - 1) = k \cdot h(0) \cdot (n - 1) - \frac{k \cdot x^2}{2 \cdot f} \quad . \quad (2)$$

Ширина распределения интенсивности в фокальной плоскости $z = f$ при падении плоской монохроматической волны E_0 на линзу с апертурой W будет определяться как $\Delta x_f = \lambda \cdot f / W$ [3]. Голографическая линза, которая обеспечивает набег фазы:

$$k \cdot h \cdot n(x) = k \cdot h \cdot n(0) + k \cdot h \cdot \Delta n \cdot \cos\left(\frac{k \cdot x^2}{2 \cdot f}\right) \quad , \quad (3)$$

также позволяет сфокусировать падающее излучение. Здесь Δn – изменение показателя преломления. Такая линза может быть создана светом в прозрачных фоторегистрирующих средах, в которых осуществима неоднородная по объёму полимеризация и возможно создание неоднородных по показателю преломления структур [9; 10]. Здесь требуемое распределение показателя преломления $n(x)$ обеспечивается соответствующим распределением интенсивности воздействующего излучения, которое, например, может быть получено при интерференции плоской и сферической волн [3; 11; 12].

Пространственная частота в выражении (3) линейно нарастает по радиусу линзы:

$$u(x) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{k \cdot |x|}{2\pi \cdot f} \quad . \quad (4)$$

Это означает, что для записи голографической линзы требуется материал, позволяющий регистрировать как низкие, так и высокие пространственные частоты интерференционного распределения интенсивности. Однако жидкие фотополимеризующиеся среды обладают частотно-контрастной характеристикой – вследствие диффузии компонентов ФПК регистрация световых распределений на различных пространственных частотах происходит с разной эффективностью [9; 10; 13]. Влияние характеристик многокомпонентной ФПК (диффузионных параметров ФПК и количества нейтральной компоненты в составе ФПК), параметров регистрируемой интерференционной картины (средней интенсивности воздействующего излучения и индекса модуляции), а также толщины слоя ФПК на модуляцию фазы и, соответственно, на эффективность фокусировки плоской монохроматической волны, падающей на формируемую светом голографическую линзу, было исследовано методом компьютерного моделирования.

Численный анализ процесса регистрации неоднородного распределения интенсивности в слое ФПК с нейтральной компонентой (НК) был произведён для одномерного случая – распределение интенсивности $I'(x') = I(x) / I_0$ задавалось в виде:

$$I'(x') = 1 + m \cdot \cos(u' \cdot x' \cdot k \cdot W) \quad , \quad (5)$$

где $x' = x / W$, $u' = u(x) \cdot 2\pi / k$, $I_0 = \langle I(x) \rangle_x$ – среднее значение интенсивности воздействующего излучения, m – глубина модуляции светового поля. Процесс перераспределения массовых долей компонент ФПК (мономера M , полимера P и нейтральной компоненты N) в ходе неоднородной фотополимеризации, определяющих пространственное распределение показателя преломления среды $n(x) = n_M \cdot M + n_P \cdot P + n_N \cdot N$, рассматривался в рамках модели [9; 10], учитывающей радикальную полимеризацию и диффузионный массоперенос:

$$\begin{cases} \frac{\partial N}{\partial t'} = \beta_{NM} \left(M \frac{\partial^2 N}{\partial x'^2} - N \frac{\partial^2 M}{\partial x'^2} \right) + \beta_{PN} \left(P \frac{\partial^2 N}{\partial x'^2} - N \frac{\partial^2 P}{\partial x'^2} \right) + \frac{\beta_{PN}}{P^*} \left(N \frac{\partial P}{\partial x'} - P \frac{\partial N}{\partial x'} \right) \frac{\partial P}{\partial x'} \\ \frac{\partial M}{\partial t'} = \beta_{NM} \left(N \frac{\partial^2 M}{\partial x'^2} - M \frac{\partial^2 N}{\partial x'^2} \right) + \beta_{MP} \left(P \frac{\partial^2 M}{\partial x'^2} - M \frac{\partial^2 P}{\partial x'^2} \right) + \frac{\beta_{MP}}{P^*} \left(M \frac{\partial P}{\partial x'} - P \frac{\partial M}{\partial x'} \right) \frac{\partial P}{\partial x'} - \\ - \gamma \cdot I'(x') \cdot M \left(-\ln \frac{M}{1-N} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \end{cases} \quad (6)$$

Здесь $P(M, N) = 1 - M - N$, n_M , n_P , n_N – показатели преломления мономера, полимера и нейтральной компоненты, $t' = t / t_P$, $t_P = H_0 / I_0$ и $t_D = W^2 / D_M$ – характерные времена полимеризации и диффузии, D_M – коэффициент самодиффузии мономера, параметр β_{NM} характеризует взаимодиффузию мономера и нейтральной компоненты, $\beta_{MP} = \beta_M \cdot \exp\{-P/P^*\}$, $\beta_{PN} = \beta_{NM} \cdot \exp\{-P/P^*\}$, $\beta_M = t_P / t_D$, H_0 и γ – параметры, определяющие контраст композиции [9; 10].

При численном моделировании область непрерывного изменения аргументов $x' \in (0, L)$, $t' \in (0, T)$ заменялась дискретным множеством точек (сетку):

$$x' = i \cdot hx, \quad t' = \tau \cdot ht \quad . \quad (4)$$

где i , hx и τ , ht – номер и величина шага по пространственной координате x' и времени t' , соответственно. Дифференциальные уравнения в частных производных системы (6) решались с использованием комбинированной разностной схемы [14]:

$$\begin{cases} (1-\nu)N_{i+1}^{\tau+1} - [2(1-\nu) + a_i^\tau]N_i^{\tau+1} + (1-\nu)N_{i-1}^{\tau+1} = -c_i^\tau \\ (1-\nu)M_{i+1}^{\tau+1} - [2(1-\nu) + b_i^\tau]M_i^{\tau+1} + (1-\nu)M_{i-1}^{\tau+1} = -d_i^\tau + f_i^\tau \end{cases}, \quad (7)$$

с коэффициентами и дифференциальными операторами:

$$\begin{aligned} a_i^\tau &= \frac{hx^2}{\beta_{PN}^\tau ht}, \quad b_i^\tau = \frac{hx^2}{\beta_{MP}^\tau ht}, \quad f_i^\tau = b_i^\tau \cdot ht \cdot \gamma \cdot I_i' \cdot M_i^\tau \left(-\ln \frac{M_i^\tau}{1-N_i^\tau} \right)^\gamma, \\ c_i^\tau &= a_i^\tau N_i^\tau + \nu \Delta N^\tau - \left(1 - \frac{\beta_{NM}}{\beta_{PN}^\tau} \right) \cdot \Lambda(M^\tau, N^\tau) - \frac{\nabla N^\tau + \nabla M^\tau}{P^*} [\delta(M^\tau, N^\tau) - \nabla N^\tau], \\ d_i^\tau &= b_i^\tau M_i^\tau + \nu \Delta M^\tau + \left(1 - \frac{\beta_{NM}}{\beta_{MP}^\tau} \right) \cdot \Lambda(M^\tau, N^\tau) + \frac{\nabla N^\tau + \nabla M^\tau}{P^*} [\delta(M^\tau, N^\tau) + \nabla M^\tau], \\ \Lambda(M^\tau, N^\tau) &= M_i^\tau \Delta N^\tau - N_i^\tau \Delta M^\tau, \quad \Delta N^\tau = N_{i+1}^\tau - 2N_i^\tau + N_{i-1}^\tau, \\ \delta(M^\tau, N^\tau) &= M_i^\tau \nabla N^\tau - N_i^\tau \nabla M^\tau, \quad \nabla N^\tau = \frac{N_{i+1}^\tau - N_{i-1}^\tau}{2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Величина шага по пространственной координате определялась как $hx = 1 / (Nx - 1)$, где Nx – количество точек по пространственной координате. А величину шага по времени ht выбирали, исходя из условия устойчивости схемы ($\nu = 0.5$):

$$\frac{\beta_{NM} \cdot ht}{hx^2} < \frac{1}{2}. \quad (9)$$

Моделирование осуществлялось для значений $W = 500$ мкм, $W/f = 0.4$, $\lambda = 0.63$ мкм, $P^* = 0.13$, $\gamma = 4$, $\beta_{NM} = 10\beta_M$ при варьировании параметров среды и воздействующего излучения [9; 10]. Согласно результатам компьютерного моделирования процесс неоднородной полимеризации многокомпонентных ФПК в начальной стадии сопровождается возрастанием амплитуд распределения полимера и мономера, которые достигают максимального значения при $t \sim t_P$, когда скорость модификации среды максимальна. При этом амплитуда распределения НК монотонно возрастает по мере преобразования мономера в полимер за счёт перераспределения компонент ФПК. По завершении процесса полимеризации ($t \sim 2t_P$) пространственно-неоднородная полимерная структура не содержит реакционноспособный мономер и становится устойчивой даже к воздействию актиничного излучения. Значение результирующей амплитуды наведённого распределения показателя преломления определяется глубиной модуляции в распределении

интенсивности воздействующего излучения и количеством нейтральной компоненты с учётом пространственно-частотной зависимости $\Delta n(u)$, которая характеризуется величиной безразмерного параметра β_M (соотношением характерных времён полимеризации и диффузии) [9; 10]. С помощью численного моделирования были получены зависимости максимума интенсивности излучения, фокусируемого сформированной полимерной структурой, от параметра β_M (рис.1а при $N_0 = 0.1$, $m = 0.5$), количества нейтральной компоненты N_0 (рис.1б при $\beta_M = 0.22$, $m = 0.5$) и индекса модуляции m (рис.1в при $\beta_M = 0.22$, $N_0 = 0.1$) для разных значений толщины h . Здесь $I_H(0)$ – максимум интенсивности светового поля, сфокусированного «идеальной» голографической линзой (3).

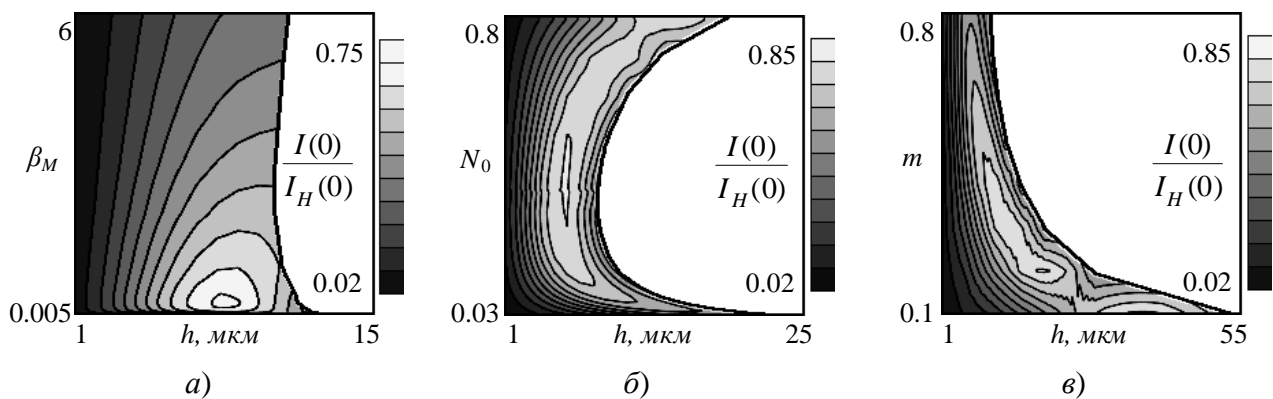


Рис. 1. Зависимость максимума интенсивности излучения, сфокусированного полимерной голографической линзой толщиной h , от параметра β_M , количества нейтральной компоненты N_0 , индекса модуляции m .

Как показывают результаты проведённых исследований, при неоднородной фотополимеризации диффузионные процессы приводят к сглаживанию оптически наводимых градиентов показателя преломления в высокочастотной области пространственного спектра. Поэтому запись таких распределений следует осуществлять с большей скоростью. Но с другой стороны, повышение интенсивности воздействующего излучения (снижение β_M) приводит к снижению эффективности перераспределения НК на низких пространственных частотах вследствие того, что за время «быстрой» полимеризации НК не успевает вытесняться из областей с большой конверсией мономера [9; 10]. Поэтому в соответствии с полученными зависимостями наилучшая фокусировка излучения достижима при $\beta_M = 0.22$ (рис.1а). В этом случае ЧКХ ФПК оптимально охватывает рабочий диапазон пространственных частот голографической линзы (рис.2а), в отличие от вариантов с меньшим $\beta_M = 0.005$ (рис.2б) или большим $\beta_M = 6$ (рис.2в), когда вклад приосевой области линзы или, соответственно, её периферии в фокусировку света несущественен.

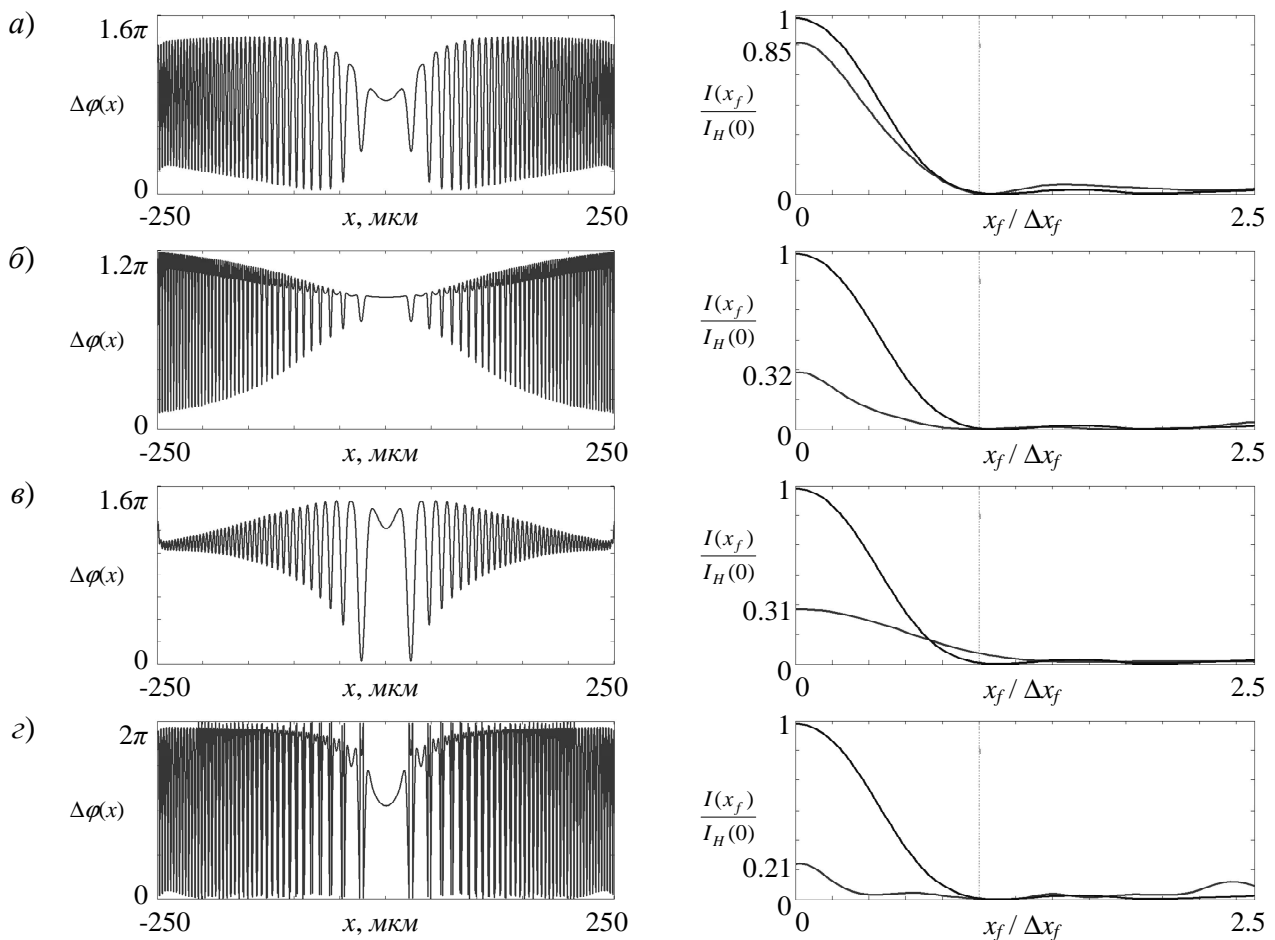


Рис. 2. Зависимость сдвига фаз от поперечной координаты и распределение нормированной интенсивности сфокусированной световой волны.

При указанной величине $\beta_M = 0.22$ оптимальный фазовый набег обеспечивается толщиной линзы $h = 8 \text{ мкм}$ (рис.1а). Эффективность фокусировки снижается при уменьшении или увеличении толщины линзы, когда набег фазы становится недостаточным или нарушается фазовый синхронизм (рис.2г).

При $\beta_M = 0.22$ и $h = 8 \text{ мкм}$ рассчитанное оптимальное содержание нейтральной компоненты в составе ФПК составляет $N_0 = 0.43$ (рис.1б). Однако, формирование гомогенного полимера (нерассеивающего оптическое излучение) возможно лишь при ограниченном количестве НК, введённой в ФПК (не более 10...15%). Поэтому, чтобы обеспечить эффективную фокусировку при меньшем количестве нейтральной добавки в составе ФПК, требуется большая толщина линзы h и меньшее значение индекса модуляции m (рис.1б и рис.1в). Следует учесть, что при значениях толщины линзы, превышающих 20 мкм , увеличивается светорассеяние на собственных термодинамических неоднородностях композиции [10]. Исходя из выше перечисленного, подобранные значения параметров процесса записи голографической линзы из ФПК с нейтральной компонентой ($\beta_M = 0.22$, $N_0 = 0.1$, $m = 0.2$ и $h = 19 \text{ мкм}$) позволяют создать линзу с эффективностью фокусировки 0.85 по отношению к «идеальной» голографической линзе (рис.2а).

Таким образом, добавление органических растворителей с малой вязкостью и низким показателем преломления в фотополимеризующиеся композиции на основе полифункциональных мономеров позволяет использовать их для оптической записи стабильных голографических линз излучением малой мощности [9; 10]. Эффективность формирования градиентов показателя преломления на разных пространственных масштабах зависит не только от вязкости композиции, но и от средней интенсивности регистрируемой интерференционной картины. Это позволяет оптимизировать процесс оптической записи светосильных голографических линз с требуемым значением фокусного расстояния.

Работа выполнена при поддержке Грантов РФФИ (12-03-01092-а, 11-03-12184-офи-м-2011 и 11-03-97040-р_поволжье_а).

Список литературы

1. Островский Ю.И. Голография и ее применение. М.: Наука, 1976.
2. Дзюбенко А.Г. Применение голографии в технике. М.: Знание, 1976.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973.
4. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
5. Акаев А.А., Майоров С.А. Оптические методы обработки информации. М.: Высш. школа, 1988.
6. Евтихийев Н.Н., Евтихьева О.А., Компанец И.Н., Краснов А.Е., Кульчин Ю.Н., Одинокое С.Б., Ринкевичюс Б.С. Информационная оптика. М.: Издательство МЭИ, 2000.
7. Фазовые оптические элементы – киноформы / Фишман А.И. // Соросовский Образовательный Журнал. – 1999. – №12. – С.76-83.
8. Гинзбург В.М. Голография. Методы и аппаратура. М.: Сов. Радио, 1974.
9. Использование нейтральных компонент с низкой вязкостью для повышения дифракционной эффективности фотополимерных голограмм / Батенькин М.А., Менсов С.Н., Романов А.В. // Оптика и спектроскопия. – 2008. – Т.104, №1. – С.149-154.
10. Оптическое формирование рельефных голограмм из ФПК с неполимеризационноспособными добавками / Батенькин М.А., Менсов С.Н., Романов А.В. // Оптический журнал. – 2008. – Т.75, №5. – С.34-36.
11. Оптическая голография. Т.1. / Под ред. Г. Колфилда. М.: Мир, 1982.
12. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. М.: Мир, 1978.
13. Модель процесса голографической записи на фотополимеризующихся композитах / Обуховский В.В., Смирнова Т.Н. // Оптика и спектроскопия. – 1993. – Т.74, №4. – С.778-785.
14. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. М.: Наука, 1971.