

УДК 535.36

Ю. Ц. Батомункуев, Н. А. Мещеряков

(Новосибирск)

**СТАБИЛИЗАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЙ  
ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС ПРИ ЗАПИСИ  
ОБЪЕМНОЙ ГОЛОГРАММЫ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ**

Теоретически исследуется возможность стабилизации положения интерференционных полос относительно регистрируемой голограммы при наличии фотоиндуцированного и термоиндуцированного изменений среднего показателя преломления и толщины светочувствительной среды в процессе записи объемных голограмм в реальном времени.

**Введение.** Голографические среды с записью объемных голограмм в реальном времени (фотополимеры [1], реоксан [2], фоторефрактивные кристаллы [3]), наряду с достоинствами, обладают препятствующим их практическому использованию недостатком: вследствие смещения интерференционных полос в процессе экспозиции происходит стирание регистрируемых голограмм, приводящее к уменьшению дифракционной эффективности [4, 5]. Известно, что оптимальным выбором интенсивностей и углов распространения в среде записывающих волн возможна стабилизация положения интерференционных полос в объеме пропускающей голограммы [6–8]. Но при этом не учитывались термоиндуцированные изменения показателя преломления и толщины среды (из-за нагрева или охлаждения среды во время экспозиции).

В настоящей работе теоретически исследуется возможность стабилизации положений интерференционных полос при фотоиндуцированном и термоиндуцированном изменениях толщины и среднего показателя преломления светочувствительной среды во время записи пропускающих и отражающих объемных голограмм. Анализируются условия отсутствия смещения интерференционных полос относительно голограммы, регистрируемой плоскими волнами. Указываются условия, при которых изменением температуры можно пренебречь. Рассматриваются отдельные схемы записи, проводятся численные расчеты фотоиндуцированного и термоиндуцированного смещений интерференционных полос для полимерной среды типа реоксан.

**Условие стабилизации положений интерференционных полос в динамической голографической среде.** На рисунке представлены схемы записи объемной пропускающей (*a*) и отражающей (*b*) голограмм двумя плоскими волнами с интенсивностями  $I_r$ ,  $I_o$  и длиной  $\lambda_0$  в динамической среде

толщиной  $L$ , с показателем преломления  $n$  и линейным коэффициентом температурного расширения  $\alpha$ . В процессе экспозиции в результате фотоиндуцированного ( $\Delta n_o^f, \Delta n_r^f$ ) и термоиндуцированного ( $\Delta n_o^T, \Delta n_r^T$ ) изменений среднего показателя преломления среды происходит непрерывное изменение углов распространения записывающих волн в среде, приводящее к смещению интерференционных полос относительно записываемой голограммы [7]. С другой стороны, фотоиндуцированное и термоиндуцированное изменения толщины среды ( $\Delta L_o^f, \Delta L_r^f, \Delta L_o^T, \Delta L_r^T$ ) приводят к смещению уже сформированного распределения показателя преломления в записанной голограмме относительно интерференционных полос, тем самым обеспечивая возможность динамической стабилизации положений интерференционных полос при совпадении скоростей и направлений смещения голограммы и интерференционных полос.

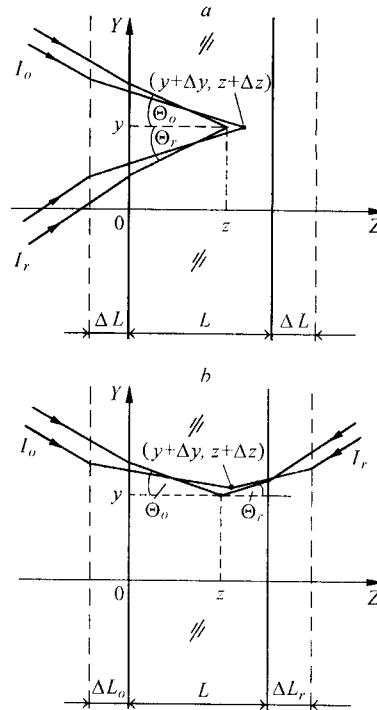
Условие стабилизации положений интерференционных полос относительно голограммы представляется в виде системы

$$\begin{cases} \Delta\varphi(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z) - \Delta\varphi(x, y, z) = 0, \\ \Delta x = \Delta x^f + \Delta x^T, \\ \Delta y = \Delta y^f + \Delta y^T, \\ \Delta z = \Delta z^f + \Delta z^T, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\Delta\varphi(x, y, z)$ ,  $\Delta\varphi(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z)$  – разности фаз записывающих волн в точках  $(x, y, z)$  и  $(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z)$ ;  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  – сдвиг интерференционных полос в точке  $(x, y, z)$ ;  $\Delta x^f, \Delta y^f, \Delta z^f, \Delta x^T, \Delta y^T, \Delta z^T$  – фотоиндуцированный и термоиндуцированный сдвиги голограммы в точке  $(x, y, z)$ .

При этом термоиндуцированное изменение показателя преломления и толщины среды может происходить в результате дополнительного нагрева или охлаждения во время записи.

**Стабилизация положений интерференционных полос объемной голограммы.** Для пропускающей и отражающей объемных голограмм, представленных на рисунке, ограничимся рассмотрением разности фаз записывающих волн в плоскости  $YOZ$ . Записывая разности фаз  $\Delta\varphi(y, z)$ ,  $\Delta\varphi(y + \Delta y, z + \Delta z)$  через оптические пути (эйконалы) и углы распространения волн в среде  $\Theta_o, \Theta_r$  (в воздухе  $\Theta_o^a, \Theta_r^a$ ) и разлагая полученные выраже-



ния по малым параметрам  $\Delta y/y$ ,  $\Delta z/z$ ,  $(\Delta n_o^f + \Delta n_o^T)/n$ ,  $(\Delta n_r^f + \Delta n_r^T)/n$ ,  $\Delta L_o/L = (\Delta L_o^f + \Delta L_o^T)/L$ ,  $\Delta L_r/L = (\Delta L_r^f + \Delta L_r^T)/L$ , получим условие стабилизации (1) в виде

$$\begin{cases} \frac{2\pi z}{\lambda_0} \left[ \frac{\Delta n_o^f + \Delta n_o^T}{\cos \Theta_o} \mp \frac{\Delta n_r^f + \Delta n_r^T}{\cos \Theta_r} + \frac{n(\Delta z^f + \Delta z^T)}{z} (\cos \Theta_o \mp \cos \Theta_r) \right] = 0, \\ \frac{2\pi}{\lambda_0} (\Delta L_o + \Delta L_r) [n \cos \Theta_o - \cos \Theta_o^a - n \cos \Theta_r + \cos \Theta_r^a] = 0, \\ \frac{2\pi}{\lambda_0} (\Delta y^f + \Delta y^T) [\sin \Theta_o \mp \sin \Theta_r] = 0. \end{cases} \quad (2)$$

В этих и последующих выражениях знаки « $\rightarrow$ » соответствуют пропускающим голограммам, а « $\leftarrow$ » – отражающим. Для отражающей голограммы второе выражение системы (2) заменяется на следующее:

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} \left[ \Delta L_o (\cos \Theta_o^a - n \cos \Theta_o) - \Delta L_r (\cos \Theta_r^a - n \cos \Theta_r) - \frac{\Delta n_r^f + \Delta n_r^T}{\cos \Theta_r} L \right] = 0. \quad (2a)$$

Заметим, что в первом приближении термоиндуцированное изменение толщины и показателя преломления приводит к независимому дополнительному изменению разности фаз записывающих волн. Оптимальным изменением пространственного распределения температуры и оптических характеристик сред возможно выполнение условий (2) и (2a) при заданных параметрах записывающих волн.

Для пропускающей голограммы при отсутствии фотоиндуцированного и термоиндуцированного сдвигов голограммы или их взаимной компенсации ( $\Delta L_o + \Delta L_r = \Delta L^f + \Delta L^T = 0$ ,  $\Delta y^f + \Delta y^T = 0$ ,  $\Delta z^f + \Delta z^T = 0$ ) система (2) сведется к полученным ранее условиям [6, 7]. В случае когда запись пропускающей голограммы производится в среде на неподвижной прозрачной подложке ( $\Delta L^f + \Delta L^T = 0$ ), вторым выражением в системе (2) можно пренебречь.

Рассмотрим интересные с практической точки зрения частные случаи.

1. *Несимметричная схема записи* ( $\Theta_o \neq \Theta_r$ ). В этом случае для пропускающей голограммы стабилизация имеет место при отсутствии во время экспозиции сдвига поверхности среды, на которую падают записывающие волны ( $\Delta L^f + \Delta L^T = 0$ ), и взаимной компенсации термоиндуцированного и фотоиндуцированного сдвигов голограммы вдоль оси  $0y$  ( $\Delta y^f + \Delta y^T = 0$ ). Сдвиг голограммы и интерференционных полос вдоль оси  $0z$  при этом может быть различным ( $\Delta z^f + \Delta z^T \neq 0$ ). Изменение температуры в процессе экспозиции определяется из первого выражения системы (2).

В параксиальной области углов ( $\Theta_o \ll 1$ ,  $\Theta_r \ll 1$ ) первое выражение системы (2) для пропускающей голограммы сводится к виду  $\Delta n = \Delta n_o^f + \Delta n_o^T = \Delta n_r^f + \Delta n_r^T = \frac{\Delta z^f + \Delta z^T}{z} n = n\gamma_z + n\alpha_z \Delta T$ , где  $\gamma_z$ ,  $\alpha_z$  – относительная усадка (набухание) и коэффициент линейного температурного расширения среды во время экспозиции вдоль оси  $0z$ .

При этом получаем, что стабилизация происходит при такой температуре, когда относительное изменение показателя преломления  $\Delta n/n$  равно относительному сдвигу голограммы от начального положения вдоль оси  $0z$ . В частном случае, когда фотоиндуцированное и термоиндуцированное изменения показателя преломления и толщины среды имеют противоположные знаки, стабилизация происходит при нагреве (охлаждении) среды, если фотоиндуцированное изменение толщины имеет отрицательный (положительный) знак.

В случае отражающих голограмм стабилизация имеет место при температуре, когда термоиндуцированные изменения показателя преломления, толщины среды, смещения интерференционных полос и голограммы компенсируются их фотоиндуцированными изменениями ( $\Delta n_r^f + \Delta n_r^T = \Delta n_o^f + \Delta n_o^T = 0$ ,  $\Delta L^f + \Delta L^T = \Delta z^f + \Delta z^T = \Delta y^f + \Delta y^T = 0$ ). Соответствующее изменение температуры равно  $\Delta T = -\frac{\Delta n_o^f}{dn} = -\frac{\Delta n_r^f}{dn} = -\frac{\gamma_z}{\alpha_z} = -\frac{\gamma_y}{\alpha_y}$ , где  $\frac{dn}{dT}$  –

термооптический коэффициент;  $\gamma_y, \gamma_z, \alpha_y, \alpha_z$  – соответственно относительная усадка и коэффициент линейного температурного расширения среды вдоль осей  $0y$  и  $0z$ .

В частном случае, когда фотоиндуцированное и термоиндуцированное изменения показателя преломления и толщины среды имеют противоположные знаки, стабилизация происходит при нагреве среды ( $\Delta T > 0$ ).

2. *Схема записи с волнами одинаковой интенсивности.* При равенстве локальных интенсивностей записывающих волн (выполнении условий  $\Delta n_o^f + \Delta n_o^T = \Delta n_r^f + \Delta n_r^T = \Delta n$ ,  $\Delta n_o^f = \Delta n_r^f = \Delta n^f$ ) первое выражение системы (2) для пропускающих голограмм сводится к виду

$$\Delta n = n \frac{\Delta z^f + \Delta z^T}{z} \cos \Theta_o \cdot \cos \Theta_r = n(\gamma_z + \alpha_z \Delta T) \cos \Theta_o \cdot \cos \Theta_r,$$

откуда получаем, что стабилизация имеет место при оптимальном выборе температуры и углов наклона волн, а также при выполнении дополнительного условия: относительное изменение показателя преломления в процессе экспозиции совпадает по знаку, но меньше по абсолютной величине относительного изменения толщины среды.

Для отражающих голограмм при равенстве локальных интенсивностей записывающих волн, а также выполнении условия  $\Delta y^f + \Delta y^T = 0$  система (2) с учетом (2а) сводится к виду

$$\begin{cases} \frac{\Delta n}{\cos \Theta_r} + n\gamma_z \cos \Theta_o = 0, \\ \Delta L_o (\cos \Theta_o^a - n \cos \Theta_o) - \Delta L_r (\cos \Theta_r^a - n \cos \Theta_r) - \frac{\Delta n L}{\cos \Theta_r} = 0. \end{cases}$$

Подставляя первое выражение во второе, получаем при записи на термостабильной подложке ( $\Delta L_r = 0$ )  $\frac{\Delta L_o}{L} (\cos \Theta_o^a - n \cos \Theta_o) + n\gamma_z \cos \Theta_o = 0$ .

Сократив на  $\gamma_z = \frac{\Delta L_o}{L}$ , находим  $\cos \Theta_o^a = 0$ . Это означает, что запись отражающих голограмм необходимо производить при скользющем угле падения волны в среде. При этом изменение температуры равно  $\Delta T = -\frac{\gamma_y}{\alpha_y}$ .

Таким образом, и в этом случае получаем, что в среде на подложке стабилизация имеет место при оптимальном выборе температуры и углов наклона волн, а также при одновременном выполнении следующего условия: фотоиндуцированное смещение голограммы вдоль оси  $0y$  в процессе экспозиции компенсируется соответствующим термоиндуцированным смещением.

Величина изменения температуры  $T$  получается из первого уравнения

$$\text{системы (2) и равна } \Delta T = \frac{\mp \frac{\Delta n^f}{n} - \gamma_z \cos \Theta_o \cdot \cos \Theta_r}{\alpha_z \cos \Theta_o \cdot \cos \Theta_r \pm \frac{dn}{ndT}}, \text{ где } \frac{dn}{ndT} \text{ — термооптический}$$

коэффициент среды.

3. *Симметричная схема записи* ( $\Theta_o = \Theta_r = 0$ ). В случае пропускающей голограммы стабилизация происходит при такой температуре, когда фотоиндуцированное и термоиндуцированное изменения показателя преломления имеют противоположные знаки и взаимно компенсируют друг друга ( $\Delta n_o^f - \Delta n_r^f = -(\Delta n_o^T - \Delta n_r^T)$ ), а также фотоиндуцированный сдвиг голограммы по оси  $0y$  компенсируется термоиндуцированным сдвигом ( $\Delta y^f + \Delta y^T = 0$ ).

Для отражающей голограммы на подложке ( $\Delta L_r \approx 0$ ) стабилизация имеет место при скользящих углах в воздухе к поверхности среды, а величина изме-

$$\text{нения температуры равна } \Delta T = -\frac{\frac{\Delta n^f}{n} + \gamma_z \cos^2 \Theta}{\alpha_z \cos^2 \Theta + \frac{dn}{ndT}}. \text{ Однако при этом не требу-}$$

ется взаимной компенсации фото- и термоиндуцированного смещений голограммы по оси  $0y$ .

Из системы (2) также следует условие, когда изменением температуры  $\Delta T$  в процессе записи пропускающей и отражающей голограмм можно пренебречь:

$$|\Delta TL| \ll \left| \frac{\frac{\Delta n^f}{n} \pm \gamma_z \cos \Theta_o \cdot \cos \Theta_r}{\alpha_z \cos \Theta_o \cdot \cos \Theta_r \pm \frac{dn}{ndT}} L \right|.$$

**Численный пример.** Вычислим изменение разности фаз плоских волн для пропускающей голограммы в среде типа реоксан толщиной 3 мм с показателем преломления  $n = 1,493$ , фотоиндуцированным изменением среднего показателя преломления  $\Delta n_o^f = \Delta n_r^f = 10^{-4}$ , коэффициентом температурного расширения  $\alpha = 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ , при изменении температуры на  $\Delta T = 2 \text{ }^\circ\text{C}$  для углов волн в среде  $\Theta_o = 0^\circ$ ,  $\Theta_r = 30^\circ$  ( $\gamma_z = 0$ ,  $\lambda_0 = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ ).

Термоиндуцированное изменение показателя преломления равно

$$\Delta n_o^T = \Delta n_r^T = \frac{dn}{dT} \Delta T = -(n\alpha + 2 \cdot 10^{-6}) \Delta T,$$

где значение термооптического коэффициента  $\frac{dn}{dT}$  взято из [9].

Тогда изменение разности фаз из системы (2) равно

$$\Delta \varphi_o^T = \left( \frac{2\pi L}{\lambda_0} \Delta n_o^T \right) - \left( \frac{2\pi L}{\lambda_0} \Delta n_r^T \right)$$

Видно, что при изменении температуры на 2 °С в процессе экспозиции термоиндуцированное изменение разности фаз в 5,8 раза превышает фотоиндуцированное, при этом происходит смещение интерференционных полос при толщине среды  $L$  почти на половину периода.

Легко рассчитать, что стабилизация достигается при изменении температуры в процессе экспозиции на 0,4 °С. В этом случае соответствующее термоиндуцированное изменение показателя преломления равно  $\Delta n_o^T = \Delta n_r^T = 5 \cdot 10^{-5}$ , а изменение толщины  $\Delta L^T = 0,1$  мкм. При фотоиндуцированном изменении  $\Delta n_o^f = \Delta n_r^f = -10^{-4}$  стабилизация достигается при изменении температуры на -0,4 °С.

Вычислим изменение разности фаз плоских волн для отражающей голограммы с теми же параметрами среды, что и для пропускающей голограммы при изменении температуры на 2 °С.

Тогда изменение разности фаз на границе среды при  $z=0$  и углах  $\Theta_o = \Theta_r = 40^\circ$  (в воздухе  $\Theta_o^a = \Theta_r^a = 68^\circ$ ) из второго выражения системы (2) равно

$$\begin{aligned} & \frac{2\pi L}{\lambda_0} \left[ \alpha \Delta T (\cos \Theta_o^a - n \cos \Theta_o) - \frac{\Delta n^T}{\cos \Theta_o} \right] - \frac{2\pi L}{\lambda_0} \frac{\Delta n^f}{\cos \Theta_o} \approx \\ & \approx \frac{2\pi \cdot 3 \cdot 10^{-7} \text{ м}}{5 \cdot 10^{-7} \text{ м}} (2,2 \cdot 10^{-4} - 1,2 \cdot 10^{-4}) \approx 1,2\pi. \end{aligned}$$

Видно, что при изменении температуры на 2 °С в процессе экспозиции термоиндуцированное изменение разности фаз в 1,8 раза превышает фотоиндуцированное, при этом происходит смещение интерференционных полос примерно на половину периода.

Легко рассчитать, что стабилизация достигается при изменении температуры в процессе экспозиции на 1,1 °С, а соответствующие термоиндуцированные изменения показателя преломления и толщины равны  $\Delta n^T = -1,6 \cdot 10^{-4}$ ,  $\Delta L^T = 3 \cdot 10^{-7}$  м.

При фотоиндуцированном изменении  $\Delta n_o^f = \Delta n_r^f = -10^{-4}$  стабилизация достигается при изменении температуры на -1,1 °С. Все расчеты выполнены

для среды на термостабильной прозрачной подложке в случае отсутствия усадки толщины среды ( $\Delta L_r = 0, \gamma = 0$ ).

**Закключение.** Таким образом, в работе показано, что при записи объемной голограммы в реальном времени возникающая дополнительная разность фаз между записываемыми волнами из-за незначительного изменения температуры во время экспозиции позволяет компенсировать фотоиндуцированное изменение разности фаз этих же волн.

Получены условия стабилизации положения интерференционных полос в динамической голографической среде для пропускающих и отражающих голограмм плоских волн, позволяющие определить оптимальные температурные режимы записи по известным физическим характеристикам среды (чувствительность  $\Delta n^f$ , относительная усадка  $\gamma$ , термооптический коэффициент  $\frac{dn}{dT}$ , коэффициент линейного температурного расширения  $\alpha$ ) и устанавливающие дополнительные требования к физическим характеристикам сред. Указаны условия, при которых изменением температуры в процессе экспозиции можно пренебречь.

Проведены численные расчеты для голографической среды типа реоксан толщиной 3 мм, показывающие, что повышение температуры на 2 °С приводит к превышению термоиндуцированного изменения разности фаз записываемых волн по сравнению с фотоиндуцированным изменением для пропускающих голограмм в 5,8 раза, для отражающих – в 1,8 раза.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барачевский В. А. Новые регистрирующие среды для оптической голографии. Л.: Наука, 1983. С. 3–27.
2. Суханов В. И., Лашков Г. И., Петников А. И. др. Запись фазовых голограмм на органическом полимерном материале с дисперсией, изменяющейся вследствие триплет-сенситивизированных процессов // Оптическая голография. Л.: Наука, 1979. С. 24–42.
3. Петров М. П., Степанов С. И., Хоменко А. В. Фоточувствительные электрооптические среды в голографии и оптической обработке информации. Л.: Наука, 1983. С. 270.
4. Суханов В. И., Петников А. Е., Ащеулов Ю. В. Запись голограмм во встречных пучках на органическом материале реоксан // Оптическая голография. Л.: Наука, 1983. С. 56–64.
5. Смирнова Т. М., Сарбаев Т. А., Тихонов Е. А. Голографическая запись отражательных решеток на фотополимеризуемом композите в реальном времени // Квантовая электроника. 1993. № 2.
6. Батомункуев Ю. Ц., Сандер Е. А., Шойдин С. А. Аберрации пропускающих объемных голограмм // Автоматизация проектирования оптических систем: Мат-лы Всесоюз. сем. М.: ГОИ им. С. И. Вавилова, 1988. С. 101–112.
7. Мамаев А. В., Шкунов В. В. Условия статической записи трехмерных голограмм в динамических средах // Оптическая голография с записью в трехмерных средах. Л.: Наука, 1989. С. 56–64.
8. Зельдович Б. Я., Ильиных П. Н., Нестеркин О. П. Запись статической голограммы движущейся интерференционной картиной в фоторефрактивных кристаллах // ЖЭТФ. 1990. 98, № 3. С. 861.
9. Waxler R. M., Horowitz D., Feldman A. Optical and physical parameters of plexiglas 55 and lexan // Appl. Opt. 1979. 18, N 1. P. 101.