

УДК 535.211

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМООПТИЧЕСКОЙ РЕЛЬЕФОГРАФИИ

¹Брюханова Т.Н., ²Иванова Г.Д., ²Кузин А.А., ²Рекунова Н.Н.

¹ФГБОУ ВПО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, e-mail: livbru@mail.ru;

²ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»,
Хабаровск, e-mail: tmeh@festu.khv.ru

Светоиндуцированная модуляция рельефа используется для записи оптической информации, для создания термооптических управляемых дефлекторов. В данной работе теоретически исследовано термозеркало на основе тонкой полимерной пленки. При облучении пучком излучения с синусоидальным пространственным распределением интенсивности нагрев пленки приводит к образованию соответствующего рельефа на ее поверхности. Предложена модель явления, в которой светоиндуцированное расширение тонкой пленки приводит к соответствующей ее деформации. На основе решения двумерной нестационарной тепловой задачи проанализированы пространственно-временные характеристики коэффициента рельефной нелинейности, обусловленной тепловым расширением среды. Тепловая задача решается в предположении, что теплоотвод от поверхности пленки конвективный и теплопередача вдоль пленки пренебрежимо мала. Предложено использовать термозеркало для компенсации тепловой линзы в тонкослойных жидкофазных нелинейно-оптических элементах.

Ключевые слова: динамическая голография, рельефные голограммы, тепловое расширение среды, обращение волнового фронта

THE SPATIAL AND TEMPORAL CHARACTERISTICS OF THE THERMO-OPTICAL RELIEF RECORDING

¹Bryukhanova T.N., ²Ivanova G.D., ²Kuzin A.A., ²Rekunova N.N.

¹Asia-Pacific State University, Khabarovsk, e-mail: livbru@mail.ru;

²Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: tmeh@festu.khv.ru

A light induced relief modulation is used to record optical information and to create the managed thermo-optical deflectors. In this paper it was investigated theoretically a thermo-mirror based on a thin polymer film. When exposed to a beam of radiation with sinusoidal spatial distribution of intensity the film heating leads to the formation of appropriate relief on its surface. The model of the phenomenon was proposed, in which light induced thin film extension leads to its appropriate deformation. It were analyzed the spatial-temporal characteristics of the relief nonlinearity using the decision of the two-dimensional thermal task of the thermal expansion of the film. The heat task is done under the assumption that the heat sink from the surface film is convective and heat transfer along the film is negligible. It was suggested to use a thermo-mirror for compensation of thermal lenses in thin-layer liquid-phase nonlinear-optical elements.

Keywords: dynamic holography, relief holograms, the thermal expansion of the medium, phase conjugation

Различные механизмы оптической нелинейности на поверхности раздела сред широко используются в динамической голографии для хранения и обработки оптической информации [1–4, 9]. При этом динамическая голограмма представляет собой решетку амплитудного френелевского коэффициента отражения γ («поверхностную» голограмму). Соответствующий метод обращения волнового фронта излучения отражающей поверхностью (ОВФ-П) впервые предложен Б.Я. Зельдовичем с сотрудниками [2]. Особенность этого метода состоит в том, что здесь требуется только одна опорная волна E_0 , которая записывает решетку $\delta\gamma$, интерферируя с сигнальной волной E_3 ($\delta\gamma \sim E_0 E_3$), и одновременно дифрагирует на этой отражательной решетке. Фазовое сопряжение будет точным, если волновой

фронт опорной волны совпадает с формой отражающей поверхности (которая может быть и неплоской).

В одной из первых экспериментальных работ по записи поверхностных динамических голограмм было использовано тепловое расширение среды [1]. Там же проведен анализ нелинейности для стационарного режима записи, а частотно-временные и пространственные характеристики нелинейности не исследованы.

Целью данной работы является исследование пространственно-временной зависимости коэффициента рельефной нелинейности, обусловленной тепловым расширением слоя среды.

Независимо от природы «поверхностной» нелинейности, ее можно описать, используя зависимость комплексного

амплитудного коэффициента отражения от интенсивности $I(r) = |E(r)|^2$ (в обозначениях работы [2]) падающего излучения:

$$\rho(I) = \rho(I_0) + \frac{\partial \rho}{\partial I} [I(r) - I_0] + \dots, \quad (1)$$

где r – радиус-вектор в плоскости раздела сред; I_0 – среднее значение интенсивности

излучения; $\rho = \frac{E_{\text{отр}}(r)}{E_{\text{пад}}(r)}$; $\beta = \frac{\partial \rho}{\partial I}$ – коэффициент

поверхностной нелинейности.

Пусть на зеркально отражающую поверхность падает строго нормально плоская волна $E_0 \exp(-ikz)$, под углом θ_3 к нормали когерентная с ней слабая сигнальная волна E_3 (рис. 1). В результате интерференции волн E_0 и E_3 коэффициент отражения становится промодулированным [2]:

$$\rho(r) = \rho_0 + \beta \left[E_0 E_3^*(r) \exp(-ik_3 r) + E_0^* E_3(r) \exp(ik_3 r) + |E_3|^2 \right]. \quad (2)$$

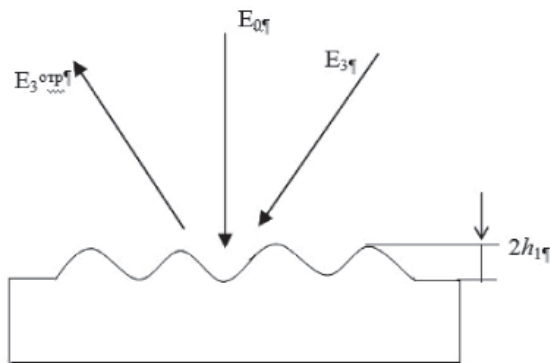


Схема записи рельефной голограммы

Поглощение света с поперечно-неоднородным профилем интенсивности $I(r)$ вызывает неоднородный прогрев поверхностных слоев материала зеркала. Из-за теплового расширения в максимуме интенсивности зеркало выпучивается

где $\text{tg} \varphi_0 = \frac{ak^2}{\omega}$.

Соответствующие начальные и граничные условия будут иметь вид

$$U(x, y, 0) = -\frac{q_0}{\lambda} (1 + \cos Ky)(\ell - x); \quad U(\ell, y, t) = 0; \quad \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0. \quad (13)$$

навстречу пучку, т.е. образуется решетка рельефа [2]:

$$\delta h(r) = h_1 \cos(k\theta_3 r + \varphi) = A [E_0 E_3^* \exp(-ik\theta_3 r) + k.c.]. \quad (3)$$

Для нахождения амплитуды рельефа сначала необходимо решить следующую двумерную нестационарную тепловую задачу:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right); \quad (4)$$

$$\theta(x, y, t) = T(x, y, t) - T_0, \quad (5)$$

где T_0 – начальная температура среды.

С граничными и начальными условиями $0 \leq x < \ell$; $-\infty < y < \infty$; $\theta(x, y, 0) = 0$; (6)

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\frac{q_0}{\lambda} (1 + \cos Ky) I_0 (1 + \sin \omega t);$$

$$\theta(x, y, \ell) = 0, \quad (7)$$

где $K = k\theta_3$ – волновой вектор интерференционной решетки; $a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$ – температуро-

проводность среды; λ – коэффициент теплопроводности материала; c_p и ρ – удельная теплоемкость и плотность среды соответственно.

Удобно вести функцию $V(x)$, удовлетворяющую уравнению

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = 0 \quad (8)$$

и условиям:

$$\frac{\partial V}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\frac{q_0}{\lambda} (1 + \cos Ky) (1 + \sin \omega t); \quad V(\ell) = 0. \quad (9)$$

Из равенств (8) и (9) можно найти вид функции $V(x)$:

$$V(x) = \frac{q_0}{\lambda} (\ell - x) (1 + \cos Ky) (1 + \sin \omega t). \quad (10)$$

Решение исходной задачи ищем в виде

$$\theta(x, y, t) = U(x, y, t) + V(x). \quad (11)$$

Подстановка (11) в (5) приводит к задаче вида

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) - \frac{q_0}{\lambda} (\ell - x) \sqrt{a^2 K^4 + \omega^2} \times (\sin \varphi_0 \cos Ky + \cos \varphi_0 \cos \omega t + \cos(\omega t - \varphi_0) \cdot \cos Ky), \quad (12)$$

Используя функцию Грина [5] для задачи (12)–(13) и проводя соответствующие интегрирования, получим искомое выражение для температуры:

$$\theta(x, y, t) = -\frac{2q_0 K^2}{\lambda \ell} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\cos \beta_n x}{\beta_n^2 (\beta_n^2 + K^2)} \cos Ky - \frac{2q_0 \omega}{\lambda \ell} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\cos \beta_n x}{\beta_n^2 \sqrt{a^2 \beta_n^4 + \omega^2}} \cos(\omega t - \psi_0) - \frac{2q_0 \sqrt{a^2 K^4 + \omega^2}}{\lambda \ell} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\cos \beta_n x \cos Ky \cos(\omega t - \phi_0 - \alpha_0)}{\beta_n^2 \sqrt{a^2 (\beta_n^2 + K^2)^2 + \omega^2}} + \frac{q_0}{\lambda} (\ell - x)(1 + \cos Ky)(1 + \sin \omega t),$$

$$\text{где } \beta_n = \frac{\pi(2n+1)}{2\ell} \quad (n=0, 1, \dots); \quad \text{tg} \psi_0 = \frac{\omega}{a\beta_n^2}; \quad \text{tg} \alpha_0 = \frac{\omega}{a(\beta_n^2 + K^2)}.$$

Модуляция рельефа определяется тепловым расширением среды:

$$\delta h(z) = \gamma \int_0^l (T - T_0) dx, \tag{14}$$

где γ – коэффициент линейного теплового расширения среды.

Учитывая, что $\beta = \frac{r_f k h_1}{2I_0}$ [2], найдем коэффициент поверхностной нелинейности, учитывая только переменную составляющую модуляции рельефа:

$$\beta = r_f (1 - r_f^2) k \gamma \lambda^{-1} \left\{ \frac{l^2 \sin \omega t}{2} - \frac{\sqrt{a^2 K^4 + \omega^2}}{l} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \cos(\omega t - \phi_0 - \alpha_0)}{\beta_n^3 \sqrt{a^2 (\beta_n^2 + K^2)}} \right\}. \tag{15}$$

Полученное выражение показывает, как коэффициент рельефной нелинейности зависит от частоты модуляции падающего излучения и волнового вектора динамической голограммы. Проведенный анализ может представлять интерес для расчета пространственно-временных характеристик фазосопреженных зеркал, используемых в прикладных задачах нелинейной оптики [1–8], для компенсации термонаведенных искажений в нелинейных средах [10–15].

Список литературы

1. Бетин А.А. Отражение излучения СО2-лазера при вырожденном четырёхволновом взаимодействии в жидкостях / А.А. Бетин, Е.А. Жуков, О.В. Митропольский // Квантовая электроника. – 1985. – т. 12. – № 9. – С. 1890.
2. Голубцов А.А. Обращение волнового фронта при светоиндуцированном профилировании формы поверхности поглощающего вещества / А.А. Голубцов, Н.Ф. Пилипечкий, А.Н.Сударкин, В.В. Шкунов // Квантовая электроника. – 1981. – Т. 8.
3. Иванов В.И. Влияние термодиффузии на термлинзовый отклик в жидкофазной дисперсной среде / В.И. Иванов, Г.Д. Иванова, В.К. Хе // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов, межвуз. сб. науч. тр. / под общ. ред. В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2013. – Вып. 5. – С. 112–115.
4. Иванов В.И. Термоиндуцированные механизмы записи динамических голограмм^ монография. – Владивосток: Дальнаука, 2006. – 143 с.

5. Иванов В.И., Иванова Г.Д., Хе В.К. Тепловое самовоздействие излучения в тонкослойной жидкофазной среде // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. URL: www.science-education.ru/120-17046.
6. Иванов В.И., Илларионов А.И., Коростелева И.А. Обращение волнового фронта непрерывного излучения в условиях сильного самовоздействия // Письма в «Журнал технической физики». – 1997. – Т. 23. – № 15. – С. 60–63.
7. Иванов В.И., Карпец Ю.М., Окишев К.Н., Ливашвили А.И. Термодиффузионный механизм просветления двухкомпонентной среды лазерным излучением // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 2. – С. 39–42.
8. Иванов В.И., Кузин А.А., Ливашвили А.И., Хе В.К. Динамика светоиндуцированной тепловой линзы в жидкофазной двухкомпонентной среде // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2011. – Т. 4. – № 134. – С. 44–46.
9. Иванов В.И., Ливашвили А. И., Брюханова Т. Н., Рекунова Н. Н. Пространственно-временные характеристики термоиндуцированного механизма записи рельефных динамических голограмм // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2011. – № 1. – С. 065–068.
10. Иванов В.И., Ливашвили А.И. Электрострикционный механизм самовоздействия излучения в жидкости с наночастицами // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. – 2009. – Т. 4. – № 2. – С. 58–60.
11. Иванов В.И., Ливашвили А.И. Эффект Дюфура в дисперсной жидкофазной среде в поле гауссова пучка // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов, межвуз. сб. науч. тр. / под общ. ред. В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2013. – Вып.5. – С. 116–119.

12. Иванов В.И., Ливашвили А.И., Окишев К.Н. Термодиффузионный механизм изменения оптического пропускания двухкомпонентной среды // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2008. – Т. 51. – № 3. – С. 50–53.

13. Ливашвили А.И., Иванова Г.Д., Хе В.К. Стационарный термолинзовый отклик наножидкости // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов, межвуз. сб. науч. тр. / под общ. ред. В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2014. – Вып. 6. – С. 227–230.

14. Окишев К.Н. Термодиффузионный механизм нелинейного поглощения суспензии наночастиц / К.Н. Окишев, В.И. Иванов, С.В. Климентьев, А.А. Кузин, А.И. Ливашвили // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 23. – № 2. – С. 106–107.

15. Ivanov V.I., Illarionov A.I., Korosteleva I.A. Technical Physics Letters. – 1997. – Vol. 23. – № 1. – P. 600–601.

References

1. Betin A.A. Otrazhenie izlucheniya SO_2 -lazera pri vyrozhdennom chetyrjohvolnovom vzaimodejstvii v zhidkostjakh / A.A. Betin, E.A. Zhukov, O.V. Mitropolskij. Kvantovaja jelektronika. 1985. t. 12. no. 9. pp. 1890.

2. Golubcov A.A. Obrashhenie volnovogo fronta pri sve-toinducirovannom profilirovanii formy poverhnosti pogloshhajushhego veshhestva / A.A. Golubcov, N.F. Pilipecikij, A.N. Sudarkin, V.V. Shkunov. Kvantovaja jelektronika. 1981. T. 8.

3. Ivanov V.I. Vlijanie termodiffuzii na termolinzovyy otklik v zhidkofaznoj dispersnoj srede / V.I. Ivanov, G.D. Ivanova, V.K. Khe. Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov, mezhvuz. sb. nauch. tr. / pod obshhej redakciej V.M. Samsonova, N.Ju. Sdobnjakova. Tver: Tver. gos. un-t, 2013. Vyp. 5. pp. 112–115.

4. Ivanov V.I. Termoinducirovannye mehanizmy zapisi dinamicheskikh gologramm. Monografija. Vladivostok: Dalnauka, 2006. 143 p.

5. Ivanov V.I., Ivanova G.D., Khe V.K. Teplovoe samovozdejstvie izlucheniya v tonkoslojnoj zhidkofaznoj srede. Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2014. no. 6. URL: www.science-education.ru/120-17046.

6. Ivanov V.I., Illarionov A.I., Korosteleva I.A. Obrashhenie volnovogo fronta nepreryvnogo izlucheniya v uslovijah silnogo samovozdejstviya. Pisma v «Zhurnal tehnichej fiziki». 1997. T. 23. no. 15. pp. 60–63.

7. Ivanov V.I., Karpec Ju.M., Okishev K.N., Livashvili A.I. Termodiffuzionnyj mehanizm prosvetlenija dvuhkomponentnoj srede lazernym izlucheniem. Izvestija Tomskogo politehniceskogo universiteta. 2007. T. 311. no. 2. pp. 39–42.

8. Ivanov V.I., Kuzin A.A., Livashvili A.I., Khe V.K. Dinamika svetoinducirovannoj teplovoj linzy v zhidkofaznoj dvuhkomponentnoj srede. Nauchno-tehnichekie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehniceskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki. 2011. T.4. no. 134. pp. 44–46.

9. Ivanov V.I., Livashvili A.I., Brjuhanova T.N., Reku-nova N.N. Prostranstvenno-vremennye harakteristiki termoinducirovannogo mehanizma zapisi relefnih dinamicheskikh gologramm. Vestnik Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta. 2011. no. 1. pp. 065–068.

10. Ivanov V.I., Livashvili A.I. Jelektristikcionnyj mehanizm samovozdejstviya izlucheniya v zhidkosti s nanochasticami. Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Fizika. 2009. T. 4. no. 2. pp. 58–60.

11. Ivanov V.I., Livashvili A.I. Jeffekt Djufura v dispersnoj zhidkofaznoj srede v pole gaussova puchka. Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov, mezhvuz. sb. nauch. tr. / pod obshhej redakciej V. M. Samsonova, N.Ju. Sdobnjakova. Tver: Tver. gos. un-t, 2013. Vyp. 5. pp. 116–119.

12. Ivanov V.I., Livashvili A.I., Okishev K.N. Termodiffuzionnyj mehanizm izmeneniya opticeskogo propuskaniya dvuhkomponentnoj srede. Izvestija vysshih ucbebnih zavedenij. Priborostroenie. 2008. T. 51. no. 3. pp. 50–53.

13. Livashvili A.I., Ivanova G.D., Khe V.K. Stacionarnyj termolinzovyy otklik nanozhidkosti. Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov, mezhvuz. sb. nauch. tr. / pod obshhej redakciej V. M. Samsonova, N.Ju. Sdobnjakova. Tver: Tver. gos. un-t, 2014. Vyp. 6. pp. 227–230.

14. Okishev K.N. Termodiffuzionnyj mehanizm nelinejnogo pogloshhenija suspenzii nanochastic / K.N. Okishev, V.I. Ivanov, S.V. Klimentev, A.A. Kuzin, A.I. Livashvili. Optika atmosfery i okeana. 2010. T. 23. no. 2. pp. 106–107.

15. Ivanov V.I., Illarionov A.I., Korosteleva I.A. Technical Physics Letters. 1997. Vol. 23. n. 1. pp. 600–601.

Рецензенты:

Карпец Ю.М., д.ф.-м.н., профессор кафедры «Физика и теоретическая механика», ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», г. Хабаровск;

Криштоп В.В., д.ф.-м.н., профессор кафедры физики, проректор по учебной работе, ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», г. Хабаровск.