

Министерство образования и науки  
Российской Федерации  
Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ  
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,  
НАНОСТРУКТУР  
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

***МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ***

**выпуск 8**

**ТВЕРЬ 2016**

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145  
ББК Ж36:Г5+В379  
Ф50

**Рецензент сборника:**

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики конденсированного состояния Тверского государственного университета  
*Н.Н. Большакова*

**Рецензирование статей осуществляется на основании Положения об рецензировании статей и материалов для опубликования в Межвузовском сборнике научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».**

**Официальный сайт издания в сети Интернет:  
[www.physchemaspects.ru](http://www.physchemaspects.ru)**

**Ф50** Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2016. – Вып. 8. – 448 с.

ISBN 978-5-7609-1161-2

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 7747789 от 13.12.2011

Сборник составлен из оригинальных статей теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145  
ББК Ж36:Г5+В379

ISBN 978-5-7609-1161-2

ISSN 2226-4442

© Коллектив авторов, 2016  
© Тверской государственной  
университет, 2016

УДК 535.211

**РЕЛЬЕФНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ГОЛОГРАММЫ В  
ТОНКОСЛОЙНОЙ СРЕДЕ С ТЕРМОИНДУЦИРОВАННЫМ  
ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ**

С.Р. Симаков, В.И. Иванов

*ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»*

*600021, Хабаровск, ул. Серьшева, д. 47*

*ivanov@festu.khv.ru*

**Аннотация:** Проведен теоретический анализ эффективности отражательной рельефной голограммы в тонкослойной среде. На основе двумерной стационарной тепловой задачи проанализирован коэффициент рельефной нелинейности, обусловленной фазовым переходом (плавлением) тонкого слоя среды.

*Ключевые слова:* динамическая голография, рельефные голограммы, фазовый переход.

Среди механизмов нелинейности, использующихся в динамической голографии (и проявляющихся, в частности, при самовоздействии излучения), большую группу составляют механизмы рельефной записи голограмм, основанные, например, на тепловом расширении среды, световом давлении, эффекте Марангони) [1-3]. При этом динамическая голограмма представляет собой решетку амплитудного френелевского коэффициента отражения  $\rho$  («поверхностную» голограмму). Б.Я. Зельдовичем с сотрудниками предложен соответствующий метод обращения волнового фронта излучения отражающей поверхностью (ОВФ-П) [4]. Поверхностные отражательные голограммы позволяют значительно снизить эффекты самовоздействия опорных волн [5-7].

Целью данной работы является исследование коэффициента рельефной нелинейности для отражательной голограммы, обусловленного термоиндуцированным фазовым переходом (плавлением) в тонкослойной среде.

Независимо от природы «поверхностной» нелинейности, ее можно описать, используя зависимость комплексного амплитудного коэффициента отражения от интенсивности  $\beta = (\partial\rho/\partial I)$ .

Найдем коэффициент поверхностной нелинейности для рельефного механизма. В данном случае механизм нелинейности состоит в модуляции рельефа, т.е. толщины слоя среды:

$$\beta = (\partial\rho/\partial l)(\partial l/\partial I). \quad (1)$$

Эффективность ОВФ-зеркала на основе рельефной голограммы определяется глубиной модуляции рельефа  $h_1$  [8]:

$$R_{PC} = I_s^*/I_s = |\rho_0 k h_1 / 2|^2, \quad (2)$$

где  $I_s$  – интенсивность сигнальной волны,  $I_s^*$  – интенсивность

дифрагированной (сопряженной) волны,  $\rho_0$  – амплитудный коэффициент френелевского отражения границы раздела сред,  $k = 2\pi/\lambda$  – волновой вектор.

Из (1) видно, что эффективность ОВФ-зеркала сильно зависит от френелевского коэффициента и для слабоотражающих сред невысока. Обойти эту зависимость можно используя тонкопленочные структуры, коэффициент отражения в которых определяется интерференционными явлениями, которыми легко управлять (меняя среднюю толщину слоя).

Рассмотрим следующую структуру – тонкопленочная среда толщиной  $l$  – плоское зеркало с коэффициентом отражения  $R_m = 1$  (см. рис. 1). Коэффициент отражения такой структуры (для нормального падения) определяется интерференцией [8]:

$$\rho = (r + \exp[-(\alpha + j\gamma)l])(1 - r \exp[-(\alpha + 2j\gamma)l])^{-1}, \quad (3)$$

где  $r$  – амплитудный коэффициент френелевского отражения границы раздела сред;  $\gamma = (2\pi/\lambda + \delta)$ ;  $\delta$  – скачок фаз на поверхности зеркала;  $n$  и  $\alpha$  – показатели преломления и поглощения среды соответственно.

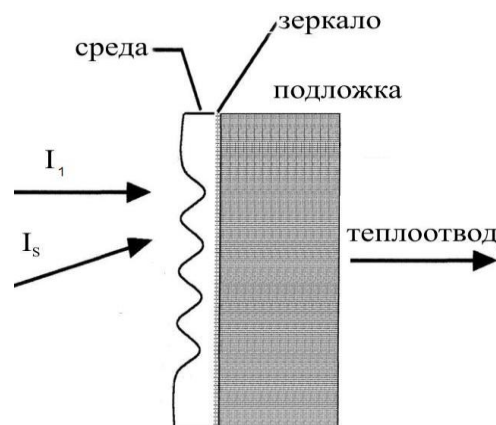


Рис. 1. Рельефная отрагательная голограмма. Тепловая задача.

Примем условие  $r \ll 1$  и ограничимся случаем амплитудной модуляции  $\rho$ , тогда из выражения (2) получаем:

$$\beta = \frac{(1 - r^2) \sqrt{\alpha^2 + 4\gamma^2} \exp(-\alpha l)}{(1 + r^2 \exp(-2\alpha l) - 2r \exp(-\alpha l) \cos(2\gamma l))} \left( \frac{dl}{dI} \right). \quad (4)$$

Главная особенность полученного выражения состоит в периодической зависимости коэффициента  $\beta$  от средней толщины пленки  $l$ .

Для расчета величины  $(\partial l / \partial I)$  рассмотрим конкретный механизм модуляции рельефа за счет термоиндуцированного фазового перехода – плавления твердого тела.

Рассматриваемая ниже упрощенная модель не включает рассмотрение динамического равновесия пар-жидкость-твердое тело. Задача включает в себя расчет теплового режима в системе пленка – подложка – термостат. Считаем, что излучение с интенсивностью  $I = I_0(1 + m \cos(ax))$  падает на зеркальную поверхность ( $R_m = 1$ ) подложки ( $Z = 0$ ), обратная сторона которой ( $Z = -L$ ) находится в контакте с термостатом, имеющим температуру  $T_0$ . Для обычной схемы ОВФ-П имеем  $I_0 = I_1 + I_s$ , где  $I_1$  – интенсивность опорной волны;  $m = 2(I_1 I_s)^{1/2} / (I_1 + I_s)$  – глубина модуляции интерференционной картины; ( $a = 2\pi/\Lambda$ ), где  $\Lambda$  – пространственный период модуляции.

Установившееся температурное поле в пленке  $T_i$  и подложке  $T_f$  определяем из стационарного уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial z^2} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} = -2\alpha I_0 (1 + m \cos(ax)). \quad (6)$$

Граничные условия:

$$T_f(-L) = T_0, T_i(0) = T_f(0), \quad (7)$$

$$\lambda_f \left. \frac{\partial T_f}{\partial z} \right|_{z=0} = \lambda_i \left. \frac{\partial T_i}{\partial z} \right|_{z=0}. \quad (8)$$

Теплоотдачу через внешнюю поверхность  $z = l$  считаем пренебрежительно малой:

$$\left. \frac{\partial T_i}{\partial z} \right|_{z=l} = 0. \quad (9)$$

Здесь  $\lambda_f$  и  $\lambda_i$  – коэффициенты теплопроводности подложки и тонкопленочной среды соответственно,  $L$  и  $l$  – толщины подложки и слоя среды. В равновесии температура внешней поверхности пленки равна температуре плавления  $T_i(l) = T_{melt}$ .

Для случая малой глубины модуляции ( $m \ll 1$ ) можно искать  $T_{i,f}$  в виде:

$$T_{i,f} = T_0 + \delta T_{i,f}^0(Z) + m \delta T_{i,f}^* \cos(ax), \quad (10)$$

где  $l = l_0 + m l_1 \cos(ax)$ . С точностью до 1-го порядка по  $m$  условие  $T_i(l) = T_{melt}$  преобразуется в

$$\delta T_i^0(l_0) = T_{melt} - T_0, \quad (11)$$

$$\delta T_i^*(l_0) = - \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=l_0} = 0. \quad (12)$$

Используя (11), получаем следующее решение:

$$l_0 = \left[ \frac{L^2 \lambda_i^2}{\lambda_f^2} + \frac{\lambda_i (T_{melt} - T_0)}{\alpha I_0} \right]^{1/2}, \quad (13)$$

$$l_1 = -l_0 \left[ 0,5 + \frac{\lambda_i th(aL)}{\lambda_f a l_0} \right] \left[ 1 + \frac{\lambda_i th(aL)}{\lambda_f a l_0} \right]^{-1}, \quad (14)$$

$$\delta T_f^0 = 2\lambda I_0 l_0 (z+1) / \lambda_f, \quad (15)$$

$$\delta T_i^0 = 2\alpha I_0 (l_0 z - z^2 / 2 + l_0 L \lambda_i / \lambda_f) / \lambda_i, \quad (16)$$

$$\delta T_f^* = \frac{2\alpha I_0 (l_0 + l_1) sh[a(z+l)]}{a\lambda_f ch(aL)}, \quad (17)$$

$$\delta T_i^* = 2\alpha I \left[ (l_0 + l_1) \left( z + \lambda_i th(aL) / (\lambda_f a) \right) - z^2 / 2 \right] / \lambda_i. \quad (18)$$

Для большой толщины подложки ( $L \gg l_0$ ) выражения упрощаются:

$$l_0 \approx \lambda_f (T_{melt} - T_0) / (2\alpha I_0 L). \quad (19)$$

Используя выражение (12)-(17) из (1) с точностью до членов первого порядка по  $|\rho|, m\alpha l, mkl_1$  (малая модуляция толщины пленки) имеем для коэффициента ОВФ-отражения:

$$R_{PC} \approx 4k^2 l_1^2 \left[ (n-1)^2 + \kappa^2 \right]. \quad (20)$$

где  $n$  и  $\kappa$  – показатели преломления и поглощения материала пленки соответственно,  $\varphi_1 = \arctg \kappa / (n+1)$ ,  $\varphi_2 = \arctg 2\kappa / (2n-1)$ .

Приведенные результаты позволяют рассчитать эффективность динамической рельефографии на основе сред с фазовым переходом (в том числе для ОВФ излучения) [9-13].

### Библиографический список:

1. **Иванов, В.И.** Термоиндуцированные механизмы записи динамических голограмм: монография / В.И. Иванов. – Владивосток: Дальнаука, 2006. – 142 с.
2. **Гуцко, Ю.П.** Фазовая рельефография / Ю.П. Гуцко. – М.: Радио. – 1974. – 168 с.
3. **Иванов, В.И.** Пространственно-временные характеристики термоиндуцированного механизма записи рельефных динамических голограмм / В.И. Иванов, А.И. Ливашвили, Т.Н. Брюханова, Н.Н. Рекунов // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2011. – № 1. – С. 65-68.
4. **Зельдович, Б.Я.** Обращение волнового фронта / Б.Я. Зельдович, Н.Ф. Пилипецкий, В.В. Шкунов. – М.: Наука, 1985. – 248 с.
5. **Иванова, Г.Д.** Нелинейная линза в дисперсной среде / Г.Д. Иванова, С.И. Кирюшина, А.В. Мяготин // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – Часть 1. <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=19194>.
6. **Иванов, В.И.** Тепловое самовоздействие излучения в тонкослойной жидкофазной среде / В.И. Иванов, Г.Д. Иванова, В.К. Хе // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=17046>.

7. **Иванов, В.И.** Термоиндуцированное самовоздействие гауссова пучка излучения в жидкой дисперсной среде / В.И. Иванов, А.А. Кузин, А.И. Ливашвили // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия «Физика». – 2010. – Т. 5. – № 1. – С. 5-8.
8. **Брюханова, Т.Н.** Пространственно-временные характеристики термооптической рельефографии / Т.Н. Брюханова, Г.Д. Иванова, А.А. Кузин, Н.Н. Рекунова // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 8. – Часть 2. – С. 243-246.
9. **Иванов, В.И.** Обращение волнового фронта при четырехволновом смещении непрерывного излучения в условиях сильного самовоздействия / В.И. Иванов, А.И. Илларионов, И.А. Коростелева // Письма в Журнал технической физики. – 1997. – Т. 23. – № 15. – С. 60-63.
10. **Окишев, К.Н.** Светоиндуцированный рельеф на поверхности зеркальной полимерной пленки / К.Н. Окишев, Г.Д. Иванова, Н.Н. Рекунова // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – Часть 1. <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=19023>.
11. **Иванов, В.И.** Характеристики нелинейного отражения при обращении волнового фронта излучения поверхностью / В.И. Иванов, А.И. Илларионов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 1997. – № 6. – С. 69-71.
12. **Ivanov, V.I.** Efficiency and dynamic range of nonlinear reflection of a four-wavelength mixture of radiation / V.I. Ivanov, S.R. Simakov // Russian Physics Journal. – 2001. – V. 44. – № 1. – P. 117-118.
13. **Иванов, В.И.** Голографическая чувствительность наногетерогенной среды с размытым фазовым переходом / В.И. Иванов, С.Р. Симаков // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2015. – Вып. 7. – С. 216-219.