

05;07;12

## Цветовое кодирование изображений деформированных зон диффузно рассеивающих поверхностей при оптической обработке снимков спроецированных полос

© А.М. Ляликов

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы,  
230023 Гродно, Белоруссия

(Поступило в Редакцию 19 августа 1997 г.)

Разработан оптический метод окраски в различные цветовые тона изображений зон диффузно рассеивающих плоских поверхностей, имеющих различную степень деформации. Метод основан на принципах пространственной фильтрации при оптической обработке снимков спроецированных полос в белом свете. Приведены результаты экспериментальных апробаций.

При исследовании плоских поверхностей основную информацию о деформациях и напряжениях поверхности несут первые производные  $\partial\omega/\partial x$  и  $\partial\omega/\partial y$  от нормальных смещений поверхности  $\omega(x, y)$ , где оси  $Ox$  и  $Oy$  лежат в плоскости исследуемой поверхности [1]. Наиболее простой метод дифференцирования данных о смещениях является оптическое дифференцирование интерферограмм или муаровых картин [1–4]. При исследовании сравнительно больших смещений поверхности от методов голографической интерферометрии переходят к менее чувствительным методам проекции полос или нанесения сеток на исследуемую поверхность [1,2,5,6]. Применение оптических методов обработки снимков спроецированных полос позволило произвольным образом настраивать контурные полосы, а также регулировать чувствительность измерений при определении рельефа исследуемой поверхности [7–9].

В настоящей работе рассмотрено дальнейшее развитие метода [10], позволяющего визуализировать деформированные зоны диффузно рассеивающих поверхностей при оптической обработке снимков спроецированных полос с использованием пространственной фильтрации. Показана возможность окраски в различные цветовые тона изображений зон, имеющих различную степень деформации, при исследовании диффузно рассеивающих плоских поверхностей. Данный эффект достигается за счет оптической обработки снимков спроецированных полос в белом свете.

Ранее кодирование в различных цветах информации о параметрах состояния исследуемого объекта использовалось при оптической обработке голограмм фазового объекта для визуализации углов отклонения световых лучей в объекте [11,12], а также при определении направления градиента показателя преломления [13,14]. Псевдоцветовое кодирование изображений применялось для распознавания образов, например, различных кирпичных стен [15]. При изучении рельефа поверхности было предложено окрашивать в различные цвета области поверхности с одинаковой глубиной за счет проецирования в белом свете решетки на исследуемую поверхность [16].

Цветовая кодировка в данном методе основывалась на эффекте Тальбота при освещении периодической структуры белым светом.

Рассмотрим особенности оптической обработки в белом свете снимков спроецированных полос при исследовании деформаций плоской диффузно рассеивающей поверхности. Амплитудное пропускание такого снимка спроецированных полос [8,10]

$$\tau(x, y) \sim \left\{ 1 + \cos \left[ \frac{2\pi y}{T} + \Phi(x, y) \right] \right\}^{-\gamma/2}, \quad (1)$$

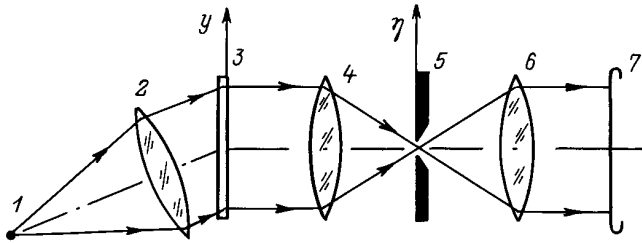
где  $T$  — период наблюдаемых полос в области недеформированной плоской поверхности,  $\gamma$  — коэффициент контрастности фотоэмульсии.

В выражении (1) функция  $\Phi(x, y)$  определяется как

$$\Phi(x, y) = \frac{2\pi\omega(x, y) \operatorname{tg} \theta}{T}, \quad (2)$$

где  $\omega(x, y)$  — нормальное смещение исследуемой поверхности вследствие деформации;  $\theta$  — угол между проецируемыми плоскостями теней, создающих на объекте систему полос, и нормалью к плоской поверхности объекта.

На рис. 1 приведена оптическая схема устройства для цветной визуализации изображений деформированных зон исследуемой диффузно рассеивающей поверхности при оптической обработке снимков спроецированных полос в белом свете. Снимок спроецированных полос  $3$  освещается коллимированным пучком от точечного источника света  $1$ . В этом случае в задней фокальной плоскости объектива  $4$  из-за диспергирующих свойств периодической структуры снимка спроецированных полос во всех порядках дифракции (кроме нулевого) будут строиться спектральные изображения точечного источника. Причем изображения последнего будут растянуты в плоскости визуализирующей щелевой диафрагмы  $5$  вдоль линии дисперсии, параллельной оси  $Oy$ . Предположим, что визуализирующая диафрагма  $5$  ориентирована так, что кромки щели параллельны оси  $Ox$ . При этом



**Рис. 1.** Оптическая схема устройства цветной визуализации изображений деформированных зон поверхности: 1 — точечный источник белого света; 2 — коллиматор; 3 — снимок спроецированных полос; 4, 6 — объективы; 5 — визуализирующая щелевая диафрагма; 7 — плоскость цветной визуализации.

сама щель выделяет в спектральном изображении точечного источника, сформированного дифрагированной волной на участках снимка [3], соответствующих изображению недеформированных зон исследуемой поверхности, только среднюю часть спектрального изображения 2 (рис. 2) с длиной волны  $\lambda_0$ . В этом случае в плоскости визуализации 7 (рис. 1), оптически сопряженной со снимком 3, изображение недеформированных зон исследуемой поверхности будет окрашено в зеленый цветовой тон ( $\lambda_0$ ). Если для волны, освещающей снимок 3, выполняется условие

$$\cos \alpha_0 = n\lambda_0/T, \quad (3)$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$ ;  $\alpha_0$  — угол между направлением освещающей волны и осью  $Oy$ , то с учетом (1) можно показать, что углы отклонения дифрагированных лучей от нормали снимка

$$\alpha_y = \frac{\lambda_0 n}{2\pi} \frac{\partial \Phi}{\partial y}. \quad (4)$$

В выражении (4)  $n$  определяет порядок дифракции волны, распространяющейся вдоль оптической оси (рис. 1) приемной части устройства. Из (4) видно, что спектральное изображение 3 (рис. 2) точечного источника, сформированного дифрагированной волной с участков снимка, соответствующих изображению деформированных зон исследуемой поверхности, сместится. Линейное смещение вдоль линии дисперсии определится как  $\eta_\lambda \approx \alpha_y f$ , где  $f$  — фокусное расстояние объектива 4 (рис. 1). В этом случае, визуализирующей щелью 5 перекрывается спектральный участок изображения источника 3 (рис. 2) с длиной волны  $\lambda$ , отличной от  $\lambda_0$ . Это приведет к окраске изображения деформированной зоны исследуемой поверхности в другие цвета, отличные от зеленого ( $\lambda_0$ ). Цветовой тон изображения деформированной зоны определяется величиной и знаком  $\eta_\lambda$ .

Следует отметить, что на рис. 2, иллюстрирующем положение спектральных изображений источника света относительно щели визуализирующей диафрагмы 1, в действительности изображения 2 и 3 наложены друг на друга и смещены вдоль оси  $\eta$ . Величину  $\eta_\lambda$  с

учетом дисперсии дифракционной решетки [17] можно представить аналогично, как в голографических цветных теневых методах [18],

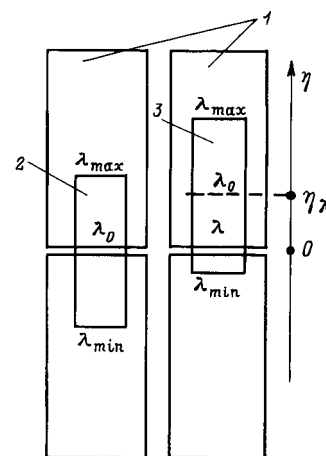
$$\eta_\lambda \approx \frac{(\lambda_0 - \lambda)nf}{T}. \quad (5)$$

Данная формула справедлива при распространении дифрагированной волны в  $n$ -м порядке дифракции только вблизи нормали снимка спроецированных полос 3 (рис. 1). Подставив в левую часть (5) вместо  $\eta$  с учетом (2), (4) величину смещения изображения источника света вследствие деформации поверхности для средней длины волны  $[(\lambda_0 + \lambda)/2]$ , окончательно получим рабочую формулу, связывающую количественно величину деформации  $\partial\omega/\partial y$  и цветовой тон  $\lambda$  визуализируемой зоны изображения исследуемой поверхности,

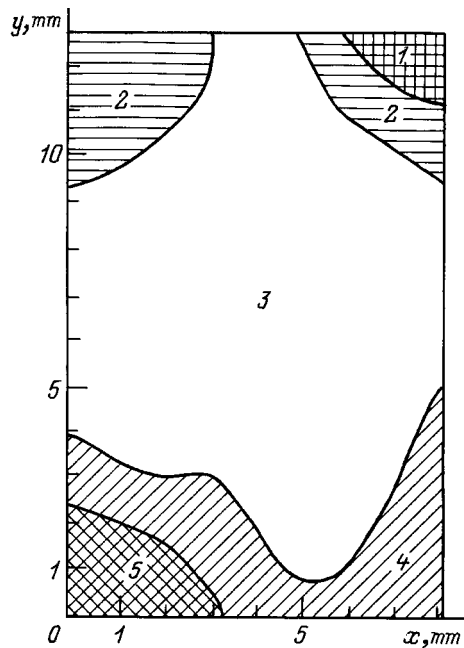
$$\frac{\partial\omega}{\partial y} \approx \frac{2(\lambda_0 - \lambda)}{(\lambda_0 + \lambda) \operatorname{tg} \theta}. \quad (6)$$

При визуальной оценке  $\partial\omega/\partial y$  следует учитывать, что регистрируемый диапазон цветных тонов от  $\lambda_{\min}$  до  $\lambda_{\max}$  определяется спектральной чувствительностью глаза. Это сужает диапазон измеряемых деформаций  $\partial\omega/\partial y$  визуальным методом. Из (6) следует, что чувствительность измерений, а также  $|\partial\omega/\partial y|_{\max}$  определяются геометрией регистрации снимков спроецированных полос ( $\operatorname{tg} \theta$ ) и не зависят от порядка дифракции. Их этого следует, что при измерениях целесообразно использовать волну, дифрагированную на снимке спроецированных полос в первый порядок, как наиболее яркий, а величину угла  $\theta$  при регистрации снимков выбирать с учетом требуемой чувствительности и диапазона измерения величины  $\partial\omega/\partial y$ .

Следует отметить, что подход к оценке чувствительности измерений и диапазона измеряемой величины  $\partial\omega/\partial y$ , а также спектральной чистоты цветового тона в визуализируемой картине аналогичен подходу в цветных



**Рис. 2.** Схема положения на визуализирующей щелевой диафрагме спектральных изображений точечного источника света.



**Рис. 3.** Цветная визуализация деформированных зон исследуемой алюминиевой пластины. Зоны окрашены в различные цветовые тона: 1 — красный, 2 — оранжевый, 3 — желто-красный, 4 — голубой, 5 — фиолетовый.

методах исследования фазовых объектов, восстановленных с голограммы [18].

Использование одного снимка спроецированных полос позволяет получить цветовую кодировку производной от смещения только в одном направлении — вдоль оси дисперсии периодической структуры снимка. Для цветовой кодировки величины  $\partial\omega/\partial y$  необходимо, чтобы спроецированные полосы снимка были ориентированы вдоль оси  $Oy$ . Переориентацию полос снимка вида (1) можно произвести за счет его перезаписи двумя когерентными пучками с изменением ориентации спроецированных полос в нужном направлении по методике перезаписи голограмм [19]. Для снимков спроецированных полос такая переориентация полос использовалась ранее при сравнении макрорельефа поверхностей [20]. Таким образом, можно получить новый снимок спроецированных полос с величиной периода, равного периоду полос исходного снимка (1), но уже с ориентацией полос вдоль оси  $Oy$ . Амплитудное пропускание такого снимка

$$\tau'(x, y) \sim \left\{ 1 + \cos \left[ \frac{2\pi x}{T} + \Phi(x, y) \right] \right\}^{-\gamma/2}. \quad (7)$$

При оптической обработке снимка вида (7) в схеме, приведенной на рис. 1, уже будут визуализироваться деформированные зоны изображения исследуемой поверхности, характеризующиеся производной  $\partial\omega/\partial x$ . Для количественной оценки величины  $\partial\omega/\partial x$  по цветовому тону используется аналогичная рабочая формула (6).

Метод цветного кодирования деформированных зон был экспериментально апробирован при визуализации

деформаций плоской алюминиевой пластины размером  $13 \times 8$  mm, которая подвергалась сильным пластическим деформациям. На рис. 3 приведена пластина, наблюдаемая в различных цветах в плоскости 7 устройства цветной визуализации (рис. 1). Цветной тон в наблюдаемой картине характеризует степень деформации  $\partial\omega/\partial y$  поверхности исследуемой пластины. Настройка цветной картины производилась так, чтобы изображения недеформированных зон были окрашены в желто-зеленый цветовой тон. На рис. 3 вся площадь пластины разбита на пять цветовых тонов. По средней длине волны каждого из пяти цветовых тонов в визуализируемой картине по рабочей формуле (6) была определена величина  $\partial\omega/\partial y$ . Оценка средней длины волны цветового тона производилась визуально при сравнении с эталонным цветовым тоном аналогично тому, как это делалось в цветовых теневых методах [18]. Относительная ошибка определения средней длины волны цветового тона в визуализируемой картине определялась как спектральной чистотой тона, так и субъективными особенностями глаза экспериментатора. В конкретном случае относительная ошибка определения средней длины волны цветового тона не превышала 25%, однако ее можно существенно понизить, например, за счет использования приемника с лучшим спектральным разрешением.

В заключение хотелось бы отметить, что вышеописанный метод визуализации деформаций диффузно рассеивающих поверхностей несколько уступает по точности ранее разработанному методу [10]. Однако в отличие от [10] этот метод позволяет одновременно визуализировать все деформированные зоны исследуемой поверхности.

Работа выполнена при поддержке Министерства народного образования Республики Беларусь.

## Список литературы

- [1] *Вест Ч.* Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 504 с.
- [2] *Козачок А.Г.* Голографические методы исследования в экспериментальной механике. М.: Машиностроение, 1984. 175 с.
- [3] *Patorski K., Kujawinska M.* // Appl. Opt. 1985. Vol. 24. N 18. P. 3044–3048.
- [4] *Patorski K., Post D., Cramek R., Guo Yifan* // Appl. Opt. 1987. Vol. 26. N 10. P. 1977–1982.
- [5] Голографические неразрушающие исследования / Под ред. Роберта К. Эрфа. М.: Машиностроение, 1979. 446 с.
- [6] *Корешев С.Н., Серегин А.Г.* // Опт. и спектр. 1994. Т. 77. № 6. С. 991–997.
- [7] *Ляликов А.М.* // Опт. и спектр. 1993. Т. 74. № 5. С. 865–869.
- [8] *Ляликов А.М.* // Опт. и спектр. 1994. Т. 77. № 6. С. 959–963.
- [9] *Ляликов А.М.* // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 3. С. 67–72.
- [10] *Ляликов А.М.* // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 3. С. 74–78.
- [11] *O'Hare J.E., Trolinger J.D.* // Appl. Opt. 1969. Vol. 8. N 10. P. 2047–2050.
- [12] *Белозеров А.Ф., Спорник Н.М.* // ОМП. 1971. № 3. С. 9–11.

- [13] Зейликович И.С., Спорник Н.М. // Опт. и спектр. 1979. Т. 46. № 2. С. 393–394.
- [14] Зейликович И.С., Ляликов А.М., Спорник Н.М. // Опт. и спектр. 1987. Т. 62. № 3. С. 659–663.
- [15] Бартель Х., Кейс С.К., Хаум Р. // Применение методов фурье-оптики / Под ред. Г. Старка. М.: Радио и связь, 1988. С. 472–508.
- [16] Litatilia S., Lin T.W. Yu F.T.S. // Opt. Commun. 1986. Vol. 58. N 2. P. 78–82.
- [17] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М., 1973. 719 с.
- [18] Бекетова А.К., Белозеров А.Ф., Березкин А.Н. и др. Голографическая интерферометрия фазовых объектов. Л., 1979. 232 с.
- [19] Зейликович И.С., Пулькин С.А. // Опт. и спектр. 1982. Т. 53. № 4. С. 588–589.
- [20] Ляликов А.М. // Опт. и спектр. 1996. Т. 80. № 5. С. 849–855.