

07

## Определение геометрических параметров диффузно рассеивающих объектов

© В.И. Малюгин, Д.В. Кизеветтер, Е.О. Болдырева, А.В. Моданов

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Поступило в Редакцию 21 января 2008 г.

Спектрально-корреляционный метод диагностики применен для определения линейных размеров неоднородностей в оптических средах с диффузно рассеивающей поверхностью. Полученные экспериментальные данные находятся в хорошем соответствии с результатами численного моделирования и теоретическими представлениями. Метод реализован на простой технической базе и показана возможность его практического использования.

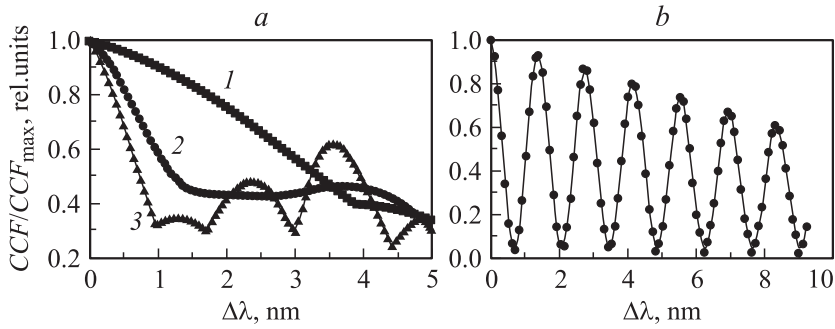
PACS: 06.60.mr, 42.25.fx, 42.30.ms, 78.20.bh

Для решения различных прикладных задач представляет интерес дистанционное определение высотных параметров рельефа и геометрических размеров оптических объектов с рассеивающей поверхностью. Во многих случаях диагностика таких объектов вызывает значительные технические трудности.

Принцип спектрально-корреляционного метода, представленного в данной работе, заключается в установлении корреляционных связей между распределениями интенсивности  $I(x, y)$  (спекл-картин) рассеянного объектом когерентного излучения при изменении длины волны [1]. Спекл-картины регистрировались матричной телевизионной камерой, и вычислялась функция взаимной корреляции ( $CCF$ ) по следующей формуле:

$$CCF(\Delta\lambda, x_0, y_0) = N \iint_{(S)} (I(\lambda, x, y) - \bar{I})(I(\lambda + \delta\lambda, x + x_0, y + y_0) - \bar{I}) dx dy,$$

где  $I(\lambda, x, y)$  — интенсивности рассеянного света на длинах волн при длине волны излучения,  $\lambda$ ,  $\bar{I}$  — среднее значение интенсивности по площади интегрирования,  $N$  — нормировочный множитель,  $x, y$  —



**Рис. 1.** Зависимости изменения нормированной взаимной корреляционной функции  $CCF/CCF_{\max}$  спекл-картин от диапазона перестройки длины волны  $\Delta\lambda$ , полученные методом численного моделирования: *a* — поверхности с различными среднеквадратическими высотами шероховатостей 1 —  $40\ \mu\text{m}$ , 2 —  $78\ \mu\text{m}$ , 3 —  $190\ \mu\text{m}$ ; *b* — для стеклянной пластины толщиной  $H = 100\ \mu\text{m}$  с диффузорассеивающей поверхностью.

координаты в плоскости наблюдения. Зависимость максимального значения взаимных корреляционных функций от длины волны  $CCF_{\max}(\lambda)$  позволяет определить диапазон перестройки длины волны  $\Delta\lambda_n$ , при котором наступает декорреляция спекл-структур, и затем оценить высотные параметры объекта по формуле

$$\sigma \geq \lambda^2 / 2\Delta\lambda_n. \tag{1}$$

Следует отметить, что важной особенностью данного метода является возможность дистанционного измерения высот шероховатости, больших длины волны излучения ( $\sigma \gg \lambda$ ), что не удастся другими известными оптическими способами [2].

Было проведено численное моделирование пространственного распределения интенсивности при рассеянии пучка когерентного излучения шероховатой поверхностью. Рельеф поверхности формировался с использованием методики, предложенной в работе [3]. На рис. 1, *a* приведена нормированная корреляционная функция  $CCF/CCF_{\max}(\lambda)$  спекл-картин, возникающих при отражении света с длиной волны  $\lambda = 1.0\ \mu\text{m}$  от поверхности с различными среднеквадратическими высотами шероховатостей. Приняв за величину  $\Delta\lambda_n$  значение, при котором функция

$CCF_{\max}(\lambda)$  имеет „излом“ (т.е. резкое изменение производной), высоту шероховатости определяем по формуле (1). Следует отметить, что функция  $CCF_{\max}(\lambda)$  зависит также от плотности вероятности распределения высот шероховатой поверхности, и если статистические свойства поверхности априори не известны, то формула (1) дает приближенную оценку.

Рассматривался также случай рассеяния излучения на плоскопараллельной прозрачной пластинке с шероховатой входной поверхностью. При моделировании предполагалось, что спекл-структуру формируют две волны: падающая волна, рассеянная от входной поверхности (первой поверхности), и волна, прошедшая плоскопараллельную пластинку, обратноотраженная от второй ее поверхности и далее рассеянная первой поверхностью. Предполагалось, также, что диффузным рассеянием, отраженным от второй поверхности, можно пренебречь. Корреляционная функция  $CCF/CCF_{\max}(\lambda)$  для пластины толщиной  $H = 100 \mu\text{m}$  имела периодический характер (рис. 1, *b*). Период спектральных биений  $\Delta\lambda_s$  этой функции связан с толщиной пластинки для случая нормального падения луча  $\gamma = 0$  соотношением  $H = \lambda_0^2/2\Delta\lambda_s n$ , где  $n$  — показатель преломления пластинки. В общем случае, при  $\gamma \neq 0$ :

$$H = \lambda^2(1 - (\sin^2 \gamma)/n^2)^{1/2} / (2\Delta\lambda_s(n - (\sin^2 \gamma)/n)). \quad (2)$$

Для проверки возможности применения описанной выше методики проводились измерения на образцах с шероховатой поверхностью и прозрачных оптических пластинах с диффузно рассеивающей поверхностью. Источником излучения служил инжекционный лазер с центральной длиной волны излучения  $\lambda = 1.05 \mu\text{m}$  и мощностью излучения 20 mW. Коллиматор создавал пучок инфракрасного излучения эллиптической формы размером  $5 \times 8 \text{mm}$  с угловой расходимостью  $0.1^\circ$ . Перестройка длины волны излучения достигалась за счет изменения температуры гетеропереходного лазера, установленного на микрохолодильнике, в интервале от  $-15$  до  $+25^\circ\text{C}$ . При точности регистрации изменения температуры  $\Delta T = 0.1^\circ\text{C}$  максимальный размер измеряемых неоднородностей составлял приблизительно  $550 \mu\text{m}$ . Учитывая, что интервал перестройки длины волны при использованном температурном диапазоне  $\Delta T \approx 30^\circ\text{C}$  составлял  $\Delta\lambda \approx 21 \text{nm}$ , имелась возможность регистрировать неоднородности рельефа только с размерами более  $26 \mu\text{m}$ .

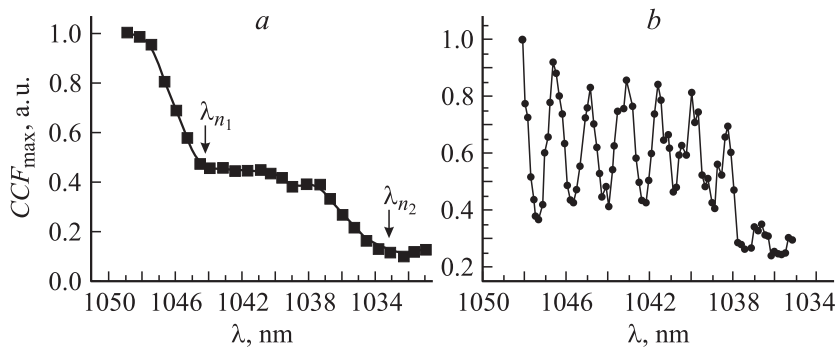
Изготавливались образцы поверхности со степенью шероховатости более  $30 \mu\text{m}$  методом продавливания алюминиевой фольги шлифовальными шкурками. Измеренное на профилометре среднее квадратическое

отклонение высоты профиля  $\sigma = 62 \mu\text{m}$  не позволяет в полной мере характеризовать микрорельеф, так как плотность распределения высот профиля образца имела многомодальный характер. Исходя из графика плотности высот профиля поверхности были получены оценки наиболее вероятных высот шероховатости, которые составляли  $\sigma_1 \approx 115 \mu\text{m}$  и  $\sigma_2 \approx 32 \mu\text{m}$ .

Для определения высоты шероховатости поверхности образца из профилированной фольги спектрально-корреляционным методом измерялось распределение интенсивности отраженного от поверхности лазерного излучения при изменении длины волны и рассчитывалась зависимость максимальных значений корреляционной функции  $CCF_{\text{max}}(\lambda)$  (рис. 2, *a*). Как следует из графика, имеются две области слабой корреляционной зависимости  $CCF_{\text{max}}(\lambda)$ , возникающие при  $\lambda_{n1} \approx 1044 \text{ nm}$ , спектральный интервал  $\Delta\lambda_1 = \lambda - \lambda_{n1} = 4.8 \text{ nm}$  и  $\lambda_{n2} \approx 1033 \text{ nm}$  с  $\Delta\lambda_2 = \lambda - \lambda_{n2} = 16 \text{ nm}$ . Используя выражение (1), получаем характерные размеры высот шероховатостей  $\sigma_{n1} \cong \lambda^2/2\Delta\lambda_1 = 114 \mu\text{m}$  и  $\sigma_{n2} \cong \lambda^2/2\Delta\lambda_2 = 34 \mu\text{m}$ . Различие высот шероховатостей, полученных из плотности распределения высот, по данным профилометрических измерений и спектрально-корреляционным методом составляло около 10%.

В качестве объекта для измерения толщины оптических элементов с рассеивающей излучение поверхностью было выбрано покровное оптическое стекло с нанесенным на переднюю поверхность диффузно рассеивающим покрытием. Спекл-структура отраженного от пластины света формировалась излучением, отраженным от передней и задней поверхностей пластины. Толщина пластины  $H$  по ее длине изменялась в пределах  $170\text{--}200 \mu\text{m}$ . Полученная зависимость  $CCF_{\text{max}}(\lambda)$  имела ярко выраженную периодичность (рис. 2, *b*), обусловленную наличием периодичности в динамике изменения структуры спекла. Период зависимости  $CCF_{\text{max}}(\lambda)$ , полученной при угле наблюдения телевизионной камеры  $\varphi = 15^\circ$  относительно нормали, рассчитывался по формуле (2) и составлял  $195 \mu\text{m}$ . При выборе угла наблюдения телевизионной камеры в направлении зеркального угла отраженного излучения вид зависимости  $CCF_{\text{max}}(\lambda)$  качественно не изменялся в широком диапазоне углов наблюдения  $0 < \varphi \leq 25^\circ$ .

Как показали проведенные исследования, спектрально-корреляционный метод с достаточно высокой точностью позволяет получить информацию о высотных параметрах различных типов микрорельефов и линейных размерах как прозрачных объектов, так и объектов с



**Рис. 2.** Зависимость максимальных значений функции взаимной корреляции спекл-картин от длины волны: *a* — для шероховатой поверхности, *b* — для стеклянной пластины с диффузно рассеивающей поверхностью.

диффузно рассеивающей поверхностью. Интервал измеряемых размеров определяется возможностью перестройки спектрального диапазона излучателя и позволяет измерять высоты неоднородностей, существенно больших длины волны излучения. Полученные экспериментальные данные находятся в хорошем соответствии с результатами численного моделирования и теоретическими представлениями. Достоинством предложенного метода является использование недорогого серийно выпускаемого оборудования, возможность диагностики прозрачных сред с загрязненными или дефектными поверхностями, рассеивающих сред, а также определения параметров рельефа поверхностей, расположенных в труднодоступных местах.

## Список литературы

- [1] Франсон М. Оптика спеклов. М.: Мир, 1980. 171 с.
- [2] Топорец А.С. Оптика шероховатой поверхности. Л.: Машиностроение, 1988. 191 с.
- [3] Кармалита В.А. Цифровая обработка случайных колебаний. М.: Машиностроение, 1986. 80 с.