

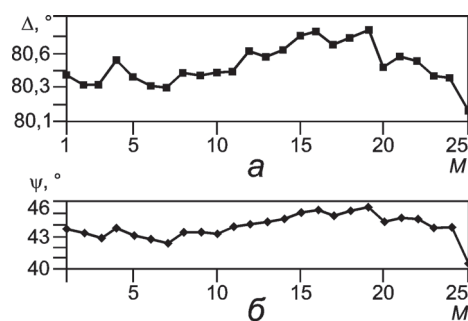


Рис. 1. Результаты измерений эллипсометрических углов Δ , ψ в различных точках пластины

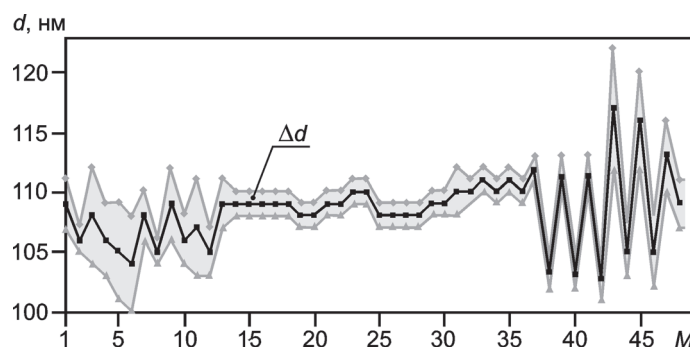


Рис. 2. Результаты измерений образцов на атомно-силовом микроскопе

Данная работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ с привлечением Центра коллективного пользования уникальным научным оборудованием в области нанотехнологий (ЦКП МФТИ) (государственный контракт № 16.552.11.7070).

Литература

1. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. М.: Техносфера, 2011.

2. Morton D. E., Johns B., Hale J. Optical monitoring of thin films using spectroscopic ellipsometry // Proc. 45th Tech. Conf.: Soc. Vac. Coaters. P. 299—305.

3. Woollam J. A. e. a. Overview of variable angle spectroscopic ellipsometry (VASE), part I: basic theory and typical applications // Optical Metrology. 1999. V. CR72. P. 3—75.

4. Азам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981.

5. Горшков М. М. Эллипсометрия. М.: Сов. радио, 1974.

Дата принятия 17.07.2013 г.

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

535.4

Применение S-преобразования в задачах спекл-интерферометрии

А. Е. ШТАНЬКО*, Г. С. КАЛЕНКОВ**, С. Д. ИВАНОВА*, О. А. КАЛУЦКОВ*

* Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия, e-mail: shtanki@newmail.ru

** Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия, e-mail: kalenkov@mail.ru

Предложена методика расшифровки спекл-интерферограмм на основе S-преобразования, заключающаяся в корректировке факторов, искажающих вычисляемый фазовый профиль. Получена экспериментальная оценка погрешности метода при измерениях перемещений. Показана возможность регистрации перемещений в сотые доли микрометра.

Ключевые слова: спекл-интерферограмма, S-преобразование, цифровая запись изображений, расшифровка интерферограмм.

A procedure of speckle interferograms decoding based on S-transformation is suggested. It includes the correction of factors distorting the calculated phase profile. The experimental assessment of the method error at measurement of shifts is obtained. The possibility of registration of shifts equal to hundredths of micrometer is presented.

Key words: speckle interferogram, S-transformation, digital image recording, interferogram decoding.

Во многих оптических методах исследования, таких как интерферометрия, профилометрия и других возникает задача расшифровки картин интерференционных полос. Наибольшее распространение получили метод фазовых

шагов [1] и метод, основанный на различных вариантах Фурье-преобразования [2], который интересен возможностью получения данных по отдельной картине, что важно при изучении динамических или быстропротекающих про-

цессов. Для предотвращения нежелательных эффектов, связанных с наложением спектров различных порядков, в методе Фурье-преобразования применяют оконное преобразование Фурье и вейвлет-преобразование [3]. В последнее время для решения ряда физических задач эффективно используют S-преобразование [4], представляющее гибрид оконного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования. Расшифровка картин в профилометрии при помощи S-преобразования позволяет повысить точность метода [5]. С формальной точки зрения, интерпретация картин полос в профилометрии и спекл-интерферометрии носит идентичный характер, несмотря на различие решаемых задач: в профилометрии измеряют форму объекта, а в спекл-интерферометрии — перемещение поверхности [6—14]. В связи с этим представляет интерес оценка потенциальных возможностей использования S-преобразования при расшифровке спекл-интерферограмм. В данной работе предложена методика расшифровки спекл-интерферограмм на основе S-преобразования и экспериментально оценена чувствительность метода при исследовании наноперемещений.

S-преобразование $S(x', f)$ представляет оконное преобразование Фурье, в котором размер гауссова окна связан с текущей частотой f сигнала обратной зависимостью. В одномерном случае

$$S(x', f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(x) \left[|f| / \sqrt{2\pi} \right] \exp[-0,5(x' - x)^2 f^2] \exp[-j\pi f x] dx,$$

где $h(x)$ — анализируемая функция; x' — текущий размер окна.

Фактический размер окна оказывается примерно равным текущему периоду анализируемого процесса, что позволяет автоматически оптимально сочетать пространственное и спектральное разрешения [5]. При использовании в интерферометрии S-преобразование, как и другие виды

Фурье-преобразования, предполагает получение интерференционных картин в полосах конечной ширины. В этом случае сигнал модулирует фазу несущей частоты. Распределение фазы $\Phi(f, x, y)$ несущей частоты f по пространственным координатам (x, y) может быть извлечено из S-преобразования от функции распределения интенсивности $I(x, y)$ в интерферограмме

$$\Phi(f, x, y) = \arctg [\text{Im}(S)/\text{Re}(S)], \quad (1)$$

где $\text{Im}(S)$, $\text{Re}(S)$ — соответственно мнимая и действительные части S-преобразования для несущей частоты f .

В отличие от вейвлет-преобразования определенная таким образом фаза оказывается привязанной к абсолютному отсчету, т. е. соотносится с аргументом несущей частоты в начале координат [4]. Для получения информации из двумерной интерференционной картины, описываемой распределением $I(x, y)$, достаточно последовательно применить одномерное S-преобразование для всех строк, содержащихся в картине.

Использование S-преобразования в задачах спекл-интерферометрии требует особого подхода вследствие специфики как самих интерферограмм, так и решаемых с их помощью физических задач. Характерная особенность спекл-интерферограмм — наличие мультипликативного спекл-шума, искажающего косинусоидальный профиль интерференционных полос и, как следствие, вносящего погрешность в определение их фазы.

Обычно в задачах исследования поля деформаций внимание фокусируется на зонах их концентрации, возникающих, например, на контуре отверстий или в местах сопряжения элементов. S-преобразование, как и другие оконные преобразования Фурье, искажает распределение фазы там, где в пределы окна попадает контур объекта или линия сопряжения. Это искажение наблюдается на протяжении порядка размера окна (так называемый краевой эффект). В результате получается, что именно там, где результаты измерений представляют наибольший интерес, полученные по интерферограмме данные оказываются искаженными. Ниже представлена методика корректной расшифровки спекл-интерферограмм на основе S-преобразования, позволяющая в существенной мере устранить указанные искажения.

Методика предполагает запись спекл-интерферограмм в полосах конечной ширины, которые вводят в промежутке времени между экспозициями путем поворота на некоторый угол одной из двух световых волн, накладываемых в плоскости регистрации. Период этих полос выбирают, исходя из компромисса между двумя факторами. С одной стороны, для S-преобразования разрешение близко к периоду полос, и меньший период позволяет достичь более высокого пространственного разрешения. С другой стороны, период должен быть существенно больше размеров спеклов и шага пикселей приемной матрицы фотокамеры, чтобы была возможность эффективно отфильтровать случайный спекл-шум и периодичную структуру матрицы.

Иногда из-за несовершенства оптико-механических устройств и неравномерности освещенности по полю интерференционной картины пространственная частота полос конечной ширины имеет местные отклонения. Поэтому для корректной расшифровки спекл-интерферограмм необходима дополнительная картина невозмущенных полос конеч-

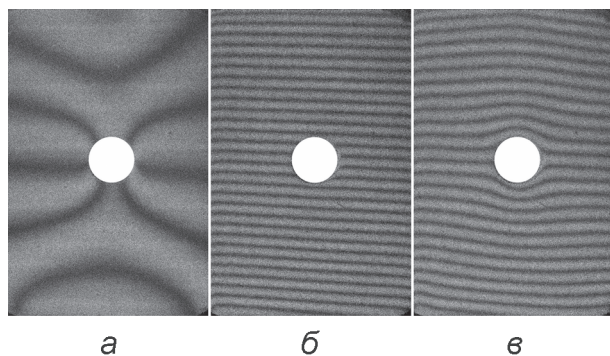
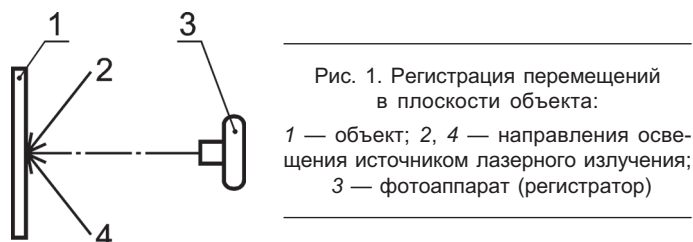


Рис. 2. Интерферограммы, отображающие:

а — вертикальную компоненту перемещений; б — невозмущенные полосы конечной ширины; в — вертикальную компоненту перемещений в полосах конечной ширины

ной ширины, получаемая в условиях отсутствия деформации объекта. По этой картине с применением S -преобразования следует вычислить исходное начальное распределение фазы $\Phi_0(f, x, y)$, которое в дальнейшем будет служить в качестве уровня отсчета для определения фазового сдвига, обусловленного деформированием объекта. Затем из распределения фазы $\Phi_1(f, x, y)$, найденного по рабочей интерферограмме, следует вычесть $\Phi_0(f, x, y)$. Этим устраняется систематическая погрешность, обусловленная девиацией фазы полос конечной ширины. Если полосы достаточно однородны, указанной коррекции не требуется.

Для устранения искажений фазы в начале и конце каждой строки или в местах ее пересечения с линией разрыва непрерывности полос предлагается осуществлять S -преобразование не построчно, а вдоль линий, параллельных контурам объекта. К примеру, если линия разрыва непрерывности картины имеет вертикальное направление, S -преобразование следует вычислять не по строкам, а по столбцам, ориентированным параллельно линии разрыва. Если объект содержит отверстие, то его можно вычислить вдоль окружности, охватывающей отверстие вблизи его контура. В общем случае S -преобразование может быть осуществлено вдоль кривой линии, примыкающей к контурной линии объекта. При этом искажения, обусловленные близостью этой линии к контуру, не возникнут, если она не имеет пересечений с контуром.

Влияние спекл-шума, как и в других подобных задачах, можно существенно снизить при помощи операции пространственного усреднения интенсивности плавающим окном заданного размера и формы. Это аналогично пространственному фильтру, срезающему высокие частоты. Необходимое условие: размер окна должен быть меньше характерного периода интерференционных полос.

Особенности использования S -преобразования в спекл-интерферометрии продемонстрированы в эксперименте по визуализации концентрации напряжений в области отверстия, находящегося в зоне упругих деформаций сжатия. Объектом исследования служила пластина с круглым отверстием, подвергаемая одноосному сжатию. Тангенциальные микроперемещения поверхности, вызванные сжатием, регистрировали двукратным фотографированием пластины в условиях ее симметричного двустороннего освещения лазерным излучением (рис. 1). Последующее поэлементное вычитание двух кадров позволило получить спекл-интерферограмму (рис. 2, а), на которой интерференционные полосы представляют линии равных перемещений в направлении сжатия (по вертикали) с ценой полосы 376 нм (для условий проведенного эксперимента). Интерферограмма наглядно отображает характер деформации. По сгущению полос вблизи отверстия оценивают степень концентрации деформаций и напряжений.

Количественная информация о поле перемещений была получена в соответствии с описанной выше методикой. Для этого взяты две интерферограммы. Первая (рис. 2, б) содержит картину невозмущенных полос конечной ширины при условии отсутствия деформации объекта. Для ее получения в промежутке времени между экспозициями угол между пучками, освещающими объект, изменяли на небольшую величину. Затем, не меняя угла освещения, делали вторую (дополнительную) экспозицию объекта в деформированном состоянии, которая в сочетании с первой давала интерферограмму, отображающую деформацию пластины в полосах конечной ширины (рис. 2, в).

Для уменьшения спекл-шума применяли предварительное сглаживание интерферограмм путем усреднения интенсивностей в пределах скользящего гауссова окна размером порядка $1/10$ периода полос.

Расшифровка интерферограмм сводилась к построчному вычислению по (1) распределения фазы $\Phi_0(f, x, y)$ невозмущенных и фазы $\Phi_1(f, x, y)$ возмущенных полос конечной ширины для несущей частоты f , дальнейшей сшивки этих полос и нахождению скорректированной фазы $\Phi(f, x, y)$ как разности $\Phi_1(f, x, y) - \Phi_0(f, x, y)$. Эта фаза линейно связана с конечным результатом расшифровки — полем вертикальных перемещений Δu соотношением

$$\Delta u = \Phi \delta / 2\pi,$$

где δ — цена интерференционной полосы. По результатам расшифровки строили поле перемещений в виде картины изолиний с ценой полосы 0,1 мкм, как показано на рис. 3, а. Изолинии подобны полосам на интерферограмме (см. рис. 2, а), но дают более подробную картину перемещений.

Для получения достоверной информации о поле перемещений в зоне отверстия, в соответствии с описанной выше методикой, применено одномерное S -преобразование вдоль окружности, охватывающей контур отверстия. Дальнейшее вычисление распределения перемещений вдоль окружности осуществляли по аналогии с описанным выше алгоритмом, использованным для строк. В результате было найдено распределение вертикальной компоненты перемещений Δu на контуре отверстия. В полярных координатах оно представлено на графике рис. 3, б.

Погрешности измерений перемещений в описываемом методе складываются из нескольких факторов. Часть из них в равной степени присуща всем методам корреляционной спекл-интерферометрии, например вибрационная нестабильность оптической схемы, дрейф частоты излучения лазера, спекл-шум и шум фотоприемника, квантование сигнала по уровню и пространству и другие. Однако существуют дополнительные влияющие факторы, приводящие к искажению косинусоидального профиля полос. К ним относятся

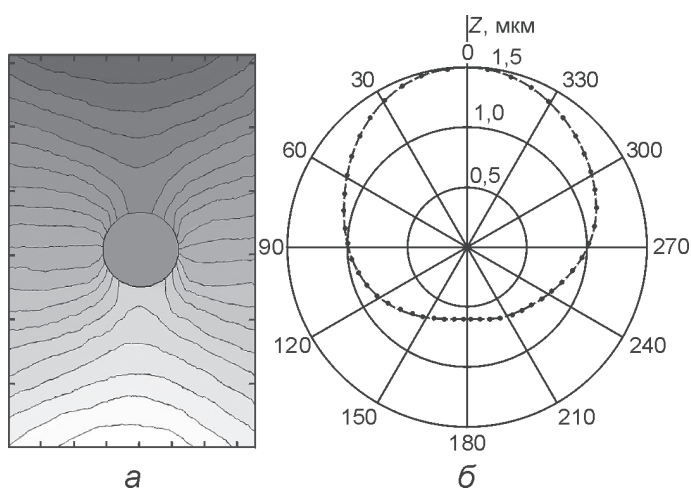


Рис. 3. Результаты расшифровки интерферограмм:

а — изолинии вертикальных перемещений с ценой полосы 0,1 мкм; б — распределение вертикальных перемещений Z по контуру отверстия, построенное в полярных координатах

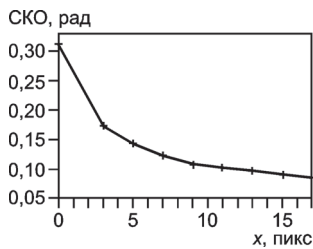


Рис. 4. График зависимости СКО линейного распределения перемещений от размера x гауссова окна

спекл-шум, неравномерность альбедо или освещенности объекта, нелинейность фотоприемника, а также квантование сигнала. В отдельном эксперименте была осуществлена опытная оценка погрешностей измерений перемещений, обусловленная совокупностью этих факторов. В ходе работы исследовали поле перемещений объекта, вызванное его поворотом как целого на небольшой угол $1 \cdot 10^{-5}$ рад. Здесь зависимость перемещения от координаты в плоскости объекта имела строго линейный характер. Однако результаты расчета перемещений на основе S-преобразования показывали некоторые отклонения от линейного закона, среднее квадратическое отклонение (СКО) которых позволяет составить представление о погрешности измерений перемещений данным методом и существенно зависит от уровня спекл-шума. Этот уровень определяется по значению усредняющего гауссова окна, использованного для сглаживания интерферограммы. На графике рис. 4 представлена построенная на основе экспериментальных данных зависимость СКО от размера гауссова окна. СКО можно принять за оценку погрешности измерения перемещения, обусловленную искажением косинусоидального профиля интерференционных полос. Увеличение размера окна до 17 пикс (при общей длине строки в 1500 пикс) приводит к погрешности измерения фазы 0,08 рад (1/75 периода полос), что для условий эксперимента соответствует перемещению в 3,5 нм.

Следует отметить, что указанная оценка получена в условиях сопоставления вычисленных перемещений друг с другом без соотнесения их с абсолютным началом отсчета. Поэтому остались неучтенными такие общие для всех методов спекл-интерферометрии источники погрешностей как нестабильность оптической схемы и дрейф частоты излучения лазера, часто дающие большой вклад. Приведенная оценка характеризует потенциальные возможности применения S-преобразования в спекл-интерферометрии в условиях, когда вклад иных аппаратных источников погрешностей будет сведен к меньшему значению по сравнению с указанным.

Представленные результаты позволяют сделать вывод, что S-преобразование можно использовать для извлечения фазовой информации, содержащейся в цифровых спекл-интерферограммах. Предложенная методика расшифровки спекл-интерферограмм на основе S-преобразования учитывает специфику спекл-интерферометрии как метода интерференционных измерений и дает возможность компенсировать некоторые аппаратные и методические источники погрешностей. При обеспечении высокого уровня стабильности оптических устройств, задействованных при регистрации спекл-интерферограмм, можно регистрировать перемещения поверхностей в диапазоне сотых долей микрометров.

Литература

1. Вишняков Г. Н., Левин Г. Г., Наумов А. А. Измерение поверхности трехмерных объектов методом проекции интерференционных полос // Оптика и спектроскопия. 1998. Т. 85. № 6. С. 1015—1019.
2. Zhang Z. H. Review of single-shot 3D shape measurement by phase calculation-based fringe projection techniques // Opt. Lasers Eng. 2012. V. 50. P. 1097—1106.
3. Huang L. e. a. Comparison of Fourier transform, windowed Fourier transform, and wavelet transform methods for phase extraction from a single fringe pattern in fringe projection profilometry // Opt. Lasers Eng. 2010. V. 48. P. 141—148.
4. Stockwell R. G., Mansinha L., Lowe R. P. Localization of the Complex Spectrum: The S-Transform // Proc. IEEE. 1996. V. 44. N 4. P. 998—1001.
5. Dursun A. e. a. Phase recovery from interference fringes by using S-transform // Measurement. 2008. V. 41. P. 403—411.
6. Ошурко В. Б. и др. Спекл-интерферометр для измерения радиальных перемещений // Измерительная техника. 2012. № 5. С. 41—43; Oshurko V. B. e. a. Speckle interferometer for measuring radial shift // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 5. P. 546—550.
7. Иванова С. Д., Штанько А. Е. Регистрация различий деформативных свойств подобных объектов с помощью дифференциального спекл-интерферометра // Измерительная техника. 2012. № 3. С. 37—40; Ivanova S. D., Shtanko A. E. Detecting differences in the deformation properties of identical objects by means of a differential speckle interferometer // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 3. P. 292—296.
8. Власов Н. Г., Штанько А. Е. Цифровой корреляционный спекл-интерферометр сдвига // Измерительная техника. 2010. № 6. С. 21—23; Vlasov N. G., Shtanko A. E. A digital correlation speckle shift interferometer // Measurement Techniques. 2010. V. 53. N 6. P. 626—628.
9. Иванова С. Д., Штанько А. Е. Спекл-интерферометр с удвоенной чувствительностью // Метрология. 2012. № 6. С. 17—21.
10. Власов Н. Г. и др. Исследование когерентности методом цифровой спекл-интерферометрии // Измерительная техника. 2006. № 7. С. 25; Vlasov N. G. e. a. Study of coherence by speckle interferometer // Measurement Techniques. 2006. V. 49. N 7. P. 664—665.
11. Власов Н. Г. Принципы построения современных интерферометров // Измерительная техника. 2010. № 3. С. 27—29; Vlasov N. G. Principles for the design of modern interferometers // Measurement Techniques. 2010. V. 53. N 3. P. 277—280.
12. Власов Н. Г., Тханг Н. В. Расчет интерферограмм одномерных объектов с повышенной точностью // Измерительная техника. 2006. № 8. С. 37—38; Vlasov N. G., Van Thang N. Calculation of interferograms for unidimensional objects with increased accuracy // Measurement Techniques. 2006. V. 49. N 8. P. 794—796.
13. Власов Н. Г. Амплитудное, фазовое и «когерентное» изображения // Измерительная техника. 2006. № 6. С. 29—32; Vlasov N. G. Amplitude, phase, and «coherent» images // Measurement Techniques. 2006. V. 49. N 6. P. 567—571.
14. Власов Н. Г., Штанько А. Е. Цифровая пространственная Фурье-спектроскопия // Измерительная техника. 2008. № 8. С. 31—33; Vlasov N. G., Shtanko A. E. Digital spatial Fourier spectroscopy // Measurement Techniques. 2008. V. 51. N 8. P. 854—857.

Дата принятия 23.07.2013 г.