

07;12

Дифференциальная низкокогерентная интерферометрия для *in situ* диагностики прозрачных микроструктур

© В.В. Иванов, В.А. Маркелов, М.А. Новиков, С.С. Уставщиков

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

E-mail: ivanov@ipm.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 15 октября 2003 г.

Предложен и продемонстрирован новый метод дифференциального измерения профиля прозрачных структур, основанный на волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии. Благодаря высокой помехоустойчивости, метод может быть использован для бесконтактной *in situ* диагностики микроструктур в экстремальных условиях.

Оптические интерференционные методы измерений широко применяются для диагностики микро- и наноструктур. Это связано с бесконтактным неразрушающим характером интерференционных измерений и их высокой точностью. Для некоторых видов измерений, таких как контроль отклонений поверхности от заданной формы, измерение высоты ступенек в ступенчатых структурах, контроль травления и микрообработки, диагностика неоднородностей показателя преломления, градиентов температуры и т.д., могут быть использованы дифференциальные методы, в которых измеряется разность высот или толщин двух участков структуры [1–3]. Для диагностики ступенчатых структур и некоторых других приложений особый интерес представляет низкокогерентная дифференциальная интерферометрия, так как она позволяет однозначно измерять разности высот (толщин), превышающие $\lambda/2$ [1,2]. В настоящей работе предложен новый метод дифференциальной низкокогерентной интерферометрии, оптимизированный для *in situ* диагностики прозрачных структур.

Предлагаемый метод основан на модификации низкокогерентной интерферометрии, известной как интерферометрия с общим оптическим путем. Один из возможных вариантов реализации предлагаемого метода показан на рис. 1. Линейно поляризованный свет от низкокогерентного

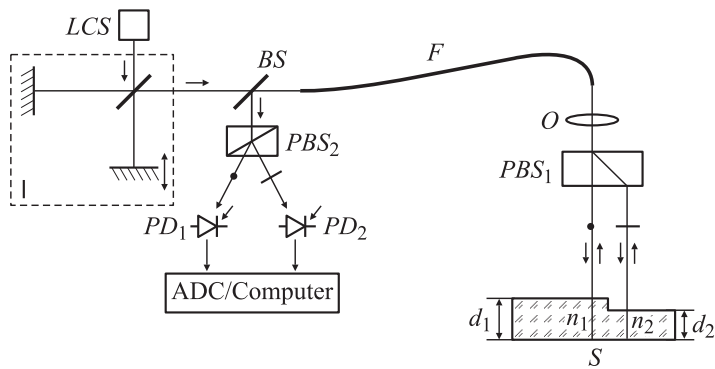


Рис. 1. Принципиальная схема дифференциального низкокогерентного интерферометра: *LCS* — низкокогерентный источник света; *I* — перестраиваемый интерферометр; *BS* — 50%-ный светоделитель; *PBS₁*, *PBS₂* — поляризационные расщепители; *O* — объектив; *S* — образец; *PBS₁*, *PBS₂* — фотоприемники; *ADC* — аналого-цифровой преобразователь.

источника *LCS* проходит через перестраиваемый интерферометр *I*, оптическое волокно *F* и попадает на поляризационный расщепитель *PBS₁*, разделяющий падающее на него излучение на два параллельных ортогонально поляризованных зондирующих пучка. Отразившись от верхней и нижней поверхностей образца, пучки воссоединяются в поляризационном расщепителе *PBS₁*, проходят обратно по волокну *F* и через 50%-ное зеркало *BS* и поляризационный расщепитель *PBS₂* (призму Волластона) попадают каждый на свой фотоприемник (*PD₁*, *PD₂*). Поляризационные эффекты в волокне *F* могут быть скомпенсированы применением поляризационного контроллера либо 45-градусного фарадеевского ротатора, установленного перед поляризационным расщепителем *PBS₁*. При перестройке интерферометра *I* фототок *J_{1,2}* на выходе фотоприемников *PD₁*, *PD₂* изменяется следующим образом [4] (рис. 2):

$$\begin{aligned}
 J_{1,2}(x) &= \bar{J}_{1,2} + j_{1,2}^{(0)}(x) + j_{1,2}(x) + j_{1,2}(-x), \\
 j_{1,2}^{(0)}(x) &= A_{1,2}^{(0)} \Gamma(x) \cos[4\pi x / \lambda_S], \\
 j_{1,2}(x) &= a_{1,2} \Gamma(n_{1,2}^{gr} d_{1,2} - x) \cos[4\pi(n_{1,2} d_{1,2} - x) / \lambda_S], \quad (1)
 \end{aligned}$$

где *x* — разность оптических длин плеч перестраиваемого интерферометра; $\bar{J}_{1,2}$ — часть фототока, не зависящая от *x*; $A_{1,2}^{(0)}$, $a_{1,2}$ — амплитуды

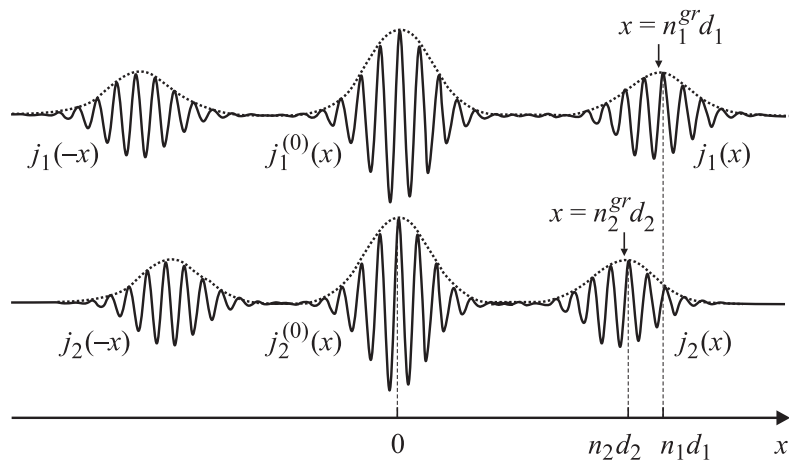


Рис. 2. Интерференционные сигналы в дифференциальном низкокогерентном интерферометре. Серые кривые — огибающие интерференционных сигналов.

интерференционных сигналов; $\Gamma(x)$ — огибающая функции когерентности излучения на фотоприемниках; λ_S — центральная длина волны источника света; $n_{1,2}$ и $d_{1,2}$ — показатели преломления и геометрические толщины образца в точках измерения; $n_{1,2}^{gr} = n_{1,2} - \lambda_S (dn_{1,2}/d\lambda)_{\lambda_S}$ — групповые показатели преломления образца. Если измеряемая разность оптических толщин $n_1^{gr} d_1 - n_2^{gr} d_2$ меньше или порядка длины когерентности света ($10 \div 20 \mu\text{m}$), т. е. если интерференционные сигналы $j_1(x)$ и $j_2(x)$ перекрываются, измерение разности оптических толщин образца сводится к определению положения центрального интерференционного максимума сигнала $j_1(x)$ в „системе координат“, заданной интерференционными максимумами сигнала $j_2(x)$ (рис. 2). Это позволяет отказаться от измерения разности длин плеч перестраиваемого интерферометра x , а также обеспечивает слабую зависимость результатов измерения от характера модуляции $x(t)$, что ведет к упрощению и удешевлению измерительной системы, особенно если речь идет о прецизионных измерениях. При этом для измерения разности оптических толщин достаточно модулировать разность длин плеч перестраиваемого интерферометра в пределах нескольких длин когерентности используемого излучения.

Интерференционные сигналы $J_1(x)$, $J_2(x)$ не зависят от оптического пути между перестраиваемым интерферометром и образцом [5]. Благодаря этому метод нечувствителен к изменениям оптической длины волокна F , некоррелированным флуктуациям оптических путей зондирующих пучков на трассе между образцом и поляризационным расщепителем PBS_1 и перемещению образца вдоль зондирующих пучков.

Погрешность измерения разности оптических толщин может быть представлена как

$$\delta h = \delta z + M(\lambda_S/2), \quad (2)$$

где $\delta z < \lambda_S/2$ — ошибка измерения положения интерференционных максимумов сигнала $j_1(x)$ в системе координат, связанной с интерференционными максимумами сигнала $j_2(x)$; $M(\lambda_S/2)$ — ошибка, связанная с неправильным распознаванием центральных максимумов интерференционных сигналов $j_1(x)$, $j_2(x)$; M — целое число. Можно показать, что если погрешность (2) связана только с аддитивными шумами света, то

$$\delta z = C_\varphi(\lambda_S/4\pi)\sqrt{(\sigma_1/a_1)^2 + (\sigma_2/a_2)^2}, \quad \sigma_1/a_1, \sigma_2/a_2 \ll 1, \quad (3)$$

где $\sigma_{1,2}$ — стандарт шума в соответствующем канале измерения, $C_\varphi \approx 1$ — коэффициент, определяемый конкретным алгоритмом обработки интерференционных сигналов (1). Вероятность ошибки в целое число полуволн может быть оценена из среднеквадратичной неопределенности измерения сдвига максимумов огибающих интерферограмм (1):

$$\delta D_{env} \approx C_D I_{coh} \sqrt{(\sigma_1/a_1)^2 + (\sigma_2/a_2)^2}, \quad \sigma_1/a_1, \sigma_2/a_2 \ll 1, \quad (4)$$

где $C_D \approx 1$ — коэффициент, определяемый способом нахождения максимумов огибающих, I_{coh} — длина когерентности источника света. Можно ожидать, что вероятность ошибиться в измерении разности оптических толщин на $\lambda_S/2$ мала, если $\delta D_{env} \ll \lambda_S/2$. Если $\sigma_{1,2}$ определяется дробовым и избыточным шумом источника света, то при использовании согласованного фильтра (фильтра с передаточной характеристикой, идентичной спектру сигналов (1)) при средней мощности на фотоприемниках $\bar{P}_{1,2} = 30 \mu\text{W}$, видности интерференционных сигналов $a_{1,2}/\bar{J}_{1,2} = 1/2$ (теоретический максимум видности

для интерферометра с общим оптическим путем), чувствительности фотоприемника 0.35 A/W, скорости модуляции разности длин плеч измерительного интерферометра 50 mm/s, максимально возможной, $\lambda_S = 800$ nm и $l_{coh} = 8$ μ m, $\delta z \approx 3 \cdot 10^{-3}$ nm, а $\delta D_{env} \approx 4 \cdot 10^{-4}$ μ m, что соответствует 1/1000 интерференционной полосы. Таким образом, в рассматриваемой ситуации вероятность ошибки $\pm \lambda/2$ очень мала.

Новый метод продемонстрирован нами экспериментально для измерения профиля стеклянной подложки сферического зеркала с радиусом кривизны 5 m. Схема экспериментальной установки соответствует рис. 1. Источником излучения служил суперлюминесцентный диод с $\lambda_S = 820$ nm, $l_{coh} = 8$ μ m и выходной мощностью 100 μ W. Разность плеч перестраиваемого интерферометра модулировалась перемещением одного из зеркал интерферометра, прикрепленного к мембране динамика. Специальных мер по виброизоляции перестраиваемого интерферометра и измерительной головки с образцом не предпринималось. Перестраиваемый интерферометр был соединен с измерительной головкой одномодовым оптическим волокном длиной 5 m; состояние поляризации света на входе поляризационного расщепителя PBS_1 контролировалось поляризационным управителем. В качестве расщепителя PBS_1 использовалась кальцитовая пластина, вырезанная под 45° к оптической оси. Расстояние между пучками составляло 570 μ m; диаметр пучка на поверхности образца не превышал 50 μ m. Интерференционные сигналы с фотоприемников после усиления оцифровывались и обрабатывались в персональном компьютере.

Среднеквадратичная погрешность измерения при усреднении по 10 измерениям составляла около 2 nm и определялась артефактами использованного алгоритма обработки интерференционных сигналов. С точностью до ошибок измерений была подтверждена нечувствительность метода к перемещению образца вдоль оптической оси системы в пределах 100 μ m. Было также показано, что метод малочувствителен к характеру модуляции разности хода в перестраиваемом интерферометре, а также к акустическим шумам и вибрациям, действующим на перестраиваемый интерферометр: фазовый шум в перестраиваемом интерферометре на 3 порядка превосходил достигнутую точность измерений. Таким образом, уже в простейшем демонстрационном эксперименте удалось получить нанометровое продольное разрешение при измерении профиля тестового объекта и продемонстрировать высокую помехоустойчивость метода.

Список литературы

- [1] *Dave D.P., Milner Th.E.* // Opt. Lett. 2000. V. 25. P. 227–229.
- [2] *Dave D.P., Milner Th.E.* // Appl. Opt. 2002. V. 41. P. 2038–2042.
- [3] *Zhou Zh.-F., Zhang T., Zhou W.-D.* // Appl. Opt. 2002. V. 41. P. 125–129.
- [4] *Rao Y.J., Jackson D.* // Measurements in Science and Technology. 1996. V. 7. P. 981–999.
- [5] *Ivanov V.V., Novikov M.A.* et al. // Proc. SPIE. 2002. V. 4900. P. 548–555.