

スーパールミネッセントダイオードを用いた 高精度干渉顕微鏡の開発 Development of a high precision interference microscope using SLD

陳 軍, 安田洋司, 豊田光紀
CHEN Jun, YASUDA Yoji, TOYODA Mitsunori

東京工芸大学, 243-0297 神奈川県厚木市飯山南5-45-1
Tokyo Polytechnic University, 5-45-1 Iiyama-Minami, Atsugi, Kanagawa 243-0297, Japan

概要

光導波路や生物試料のような微小で透明な位相物体の高精度計測のため、スーパールミネッセントダイオード(SLD)を用いた透過型共通光路位相シフト干渉顕微鏡を開発しました。共通光路位相シフト干渉顕微鏡では、物体光と参照光がほぼ同じ光路を通過するため、振動や空気揺らぎなどの影響をほとんど受けず、高安定、高精度の位相計測を可能にしました。しかし、レーザのコヒーレントノイズがさらなる高精度化の障害となっています。そこで、レーザとLEDの長所を併せ持つSLDを用いることで、レーザの干渉性に起因するノイズが大きく低減され、超高精度の測定を可能にしました。

1. はじめに

光導波路や生物細胞のような微小で透明な位相物体の高精度計測はフォトニクスやバイオニクスの分野で強く求められている。我々はバイプリズムやウォラストンプリズムの横移動を用いた位相シフト干渉顕微鏡の研究に取り組んできた。^[1-3] このシステムでは干渉する2光波がほぼ同じ光路を通過するため、振動や空気ゆらぎなどの影響をほとんど受けない。また、必要な位相シフトはプリズムの横移動で精密に導入できる。微小な位相物体を高精度で計測できることから研究や生産現場で応用されている。しかし、光源に用いるレーザのコヒーレンス長が長いと、コヒーレントノイズが問題となる。そこで、低コヒーレンス光源を用いる共通光路位相シフト干渉顕微鏡を提案し、実験でその有効性を確かめたので報告する。

2. 光学系と原理

2.1 光学系

低コヒーレンス光源を用いた透過型位相シフト干渉顕微鏡の構成をFig 1に示す。これは透過型光学顕微鏡の結像系にウォラストンプリズム(WP, 分離角2°)を挿入したもので、光源には広帯域のスーパールミネッセントダイオード(SLD) (Thorlabs, SLD650T, 10mW, 中心波長640nm, 半値幅5nm)を用いた。共振器構造を持つ半導体レーザ(LD)と違って、SLDの活性層端面は反射防止膜が施されていて、増幅された自然放出光がそのまま出射し、干渉性の低い光となる。実験に用いたSLDのコヒーレンス長は約80 μ mである。一方、活性層のサイズ

はLDとほぼ同程度で、適度な空間コヒーレンスを有する。そのため、SLDは長いコヒーレンス長を必要としない共通光路干渉顕微鏡の光源として大変適していることがわかる。

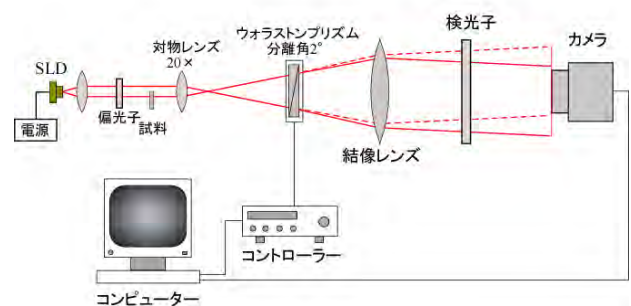


Fig 1 Experimental setup

SLDからの光はコリメートレンズで平行光としたのち、透過軸が45°方向にセットされた偏光子を通過して被検試料を照射する。このとき、被検試料を入射光の片側に位置するように設定し、残りの片側は参照光として用いる。試料は無限遠補正の対物レンズ(20倍、NA0.4)と焦点距離が200mmの結像レンズでカメラの撮像面に結像される。対物レンズを透過した光はWPによって偏光方向が直交の2つの光に分割され、検光子を通過して干渉する。干渉縞の強度分布はCCDカメラで検出され、画像ボードを介してコンピューターに取り込まれる。干渉縞の強度分布は

$$I(x, y; \delta_j) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi fx + \varphi(x, y) + \delta_j], \quad (1)$$

と表すことができる。ここで $a(x, y)$ と $b(x, y)$ は干渉縞のバイアスと振幅で、 $2\pi fx$ は干渉する2光波の波面の傾きで、また、 $\varphi(x, y)$ は被検の位相分布で、厚さ t 、屈折率分布 $n(x, y)$ の試料の場合、

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} t [n(x, y) - n_0], \quad (2)$$

となる。 δ_j はWPの横移動による位相シフトである。位相計測を行う際、 piezoelectric素子でプリズムを横方向に移動させて位相シフトを導入する。 2π の位相シフトを与えるための移動量は18.17 μ mである。4つの干渉縞画像を撮像して計算機に取り込み、4-Step位相導出アルゴリズム^[4]を用いて被検の位相分布を計算する。算出さ

れた位相分布から波面の傾き成分を除去したのち、(2)式から被検の屈折率分布或いは膜厚 t を算出する。

干渉する2光波はほぼ同じ光路を通り外乱や振動に強い。また、位相シフトはプリズムの横方向移動によって導入され、反射鏡の移動を用いた方法に比べ、同じ位相シフトを与えるための移動量が 60 倍程度大きくなる。このことからより精密な位相シフトを与えることができ、より高精度の位相計測が可能となる。

3 実験と実験結果

開発した干渉顕微鏡の性能を確かめるためいくつかの実験を行った。

3.1 干渉縞の鮮明度の比較

まずSLDとHe-Neレーザを用いたときの干渉縞を比較した。SLDとHe-Neレーザを用いたときの干渉縞画像をFig 2(a)と(b)に示し、それぞれのラインプロファイルをFig 2(c)と(d)に示す。レーザ光に比べ、干渉縞の鮮明度が若干低くなるが、バラつきが大きく減り、高精度の位相計測が可能となる。

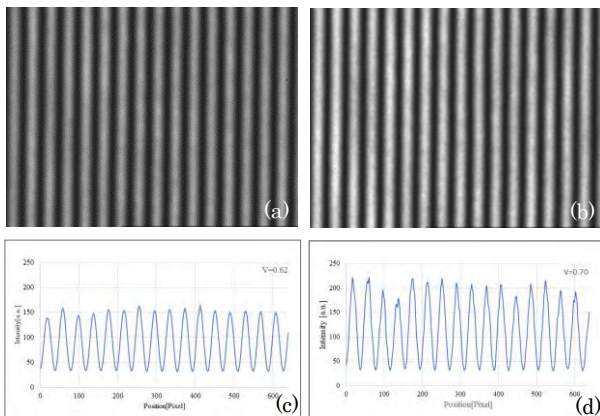


Fig 2 Interference fringe pattern and its line profile formed using a SLD (a, c) and a He-Ne laser (b, d)

3.2 システム誤差の低減

次にシステム誤差を評価するため、試料がない状態で、位相計測を行い、バックグラウンドノイズとして用いる。

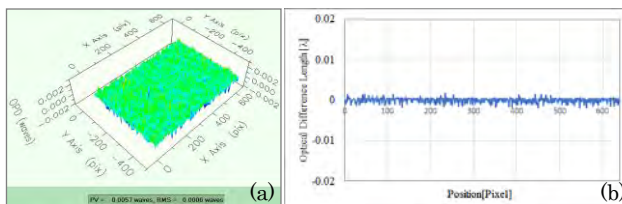


Fig 3 Experimental results for evaluating the residual noise of phase measurements: (a) 3D plot, (b) line profile.

システムの高い再現性から、このバックグラウンドノイズはほとんど変わらず、実際の計測結果から引き算することで除去できる。このように得られたシステムの残差をFig 3に示し、Fig 3(a)は3Dプロットで、(b)はラインプロフ

ファイルである。システム誤差を除いた波面のrms値が0.38nmと得られ、高精度の計測が可能であることが分かった。

3.3 ITO薄膜の計測

低コヒーレンス光源を用いた位相シフト干渉顕微鏡の有効性を示すため、対向ターゲット式スパッター法で作成したITO薄膜の測定を行った。サンプルの顕微鏡写真をFig 4(a)に示す。計測結果をFig 4(b)~(d)に示し、(b)は $\pi/2$ ずつの位相シフトを与えた時の4つの干渉縞画像の一つで、(c)は計測で得られた位相分布の3Dプロット、(d)は中心部の膜厚のラインプロファイルである。計測で得られた膜厚は約100nmで、膜作成時の目標膜厚と一致し、また、触針式膜厚計Dektok3030による計測値の97.4nmにも近い。

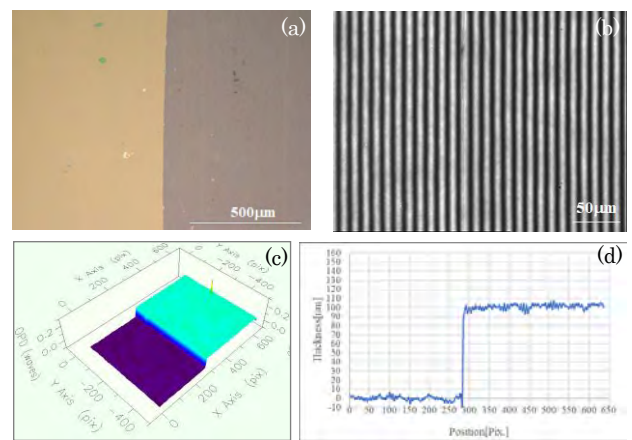


Fig 4 Experimental results for measuring the thickness of an ITO thin film: (a) micrograph of the sample, (b) interference fringe pattern, (c) 3D plot of the measured phase, (d) line profile.

5. おわりに

バイプリズムの横移動を用いた共通光路透過型位相シフト干渉顕微鏡に発振波長の半値幅が5nmほどある広帯域光源であるスーパーluminescentダイオードを光源として導入した。光源によるコヒーレントノイズを大きく低減できた。さらに、照明光に自然放出光を用いているため、高精度干渉計測と従来の肉眼による顕微鏡観察の両立を実現できる。

6. 参考文献

- [1] J. Chen, J. Endo, and H. Fujita, Proceeding of SPIE 4919, 364 (2002).
- [2] J. Endo, J. Chen, D. Kobayashi, Y. Wada, and H. Fujita, Appl. Opt. 41, 1308(2002).
- [3] 陳 軍, 東京工芸大学工学部紀要 Vol.43, No.1, PP.25-28(2020.6).
- [4] J. Schmit, and K. Creath, Appl. Opt. 34, 3610(1995).