白色光干渉顕微鏡による 表面トポグラフィ測定*

Optical Interferometry Microscope for Surface Topography Measurement

西川 孝**
Takashi NISHIKAWA

Key words

two-beam interferometry, phase shifting interferometry, vertical scanning interferometry, frequency domain analysis, white light phase shifting interferometry

1. ま え が き

1881年にAlbert A. Michelsonが、光速度計測のために、マイケルソン干渉計¹⁾を発明した。そのおよそ100年後の1985年に米国Arizona大学のJames C. Wyant²⁾のグループは、位相シフト法の原型とでもいえるシステムを開発し、IBMの研究者とともに磁気テープの表面性状を解析し、論文発表した。それから25年、白色光干渉顕微鏡市場に多数の会社が名乗りを上げ、独自技術の開発や既存技術のブラッシュアップにしのぎを削り、結果として、半導体、電子部品、表示デバイス、プラスチックフィルムなどの微小段差測定やナノレベル、サブナノレベルの表面性状測定に欠かせない装置としての地位を確立するに至った。ここでは、本技術の基本原理の紹介、課題と対策、現在の技術動向について述べる。

2. 二光束干渉計

通常の光学顕微鏡に市販されている二光束干渉対物レンズをつけることにより、白色光干渉顕微鏡が実現できる。二光束干渉対物レンズには、二種類ある。10倍、20倍、50倍、100倍は、Mirau（ミラウ）干渉方式、2.5倍、5倍は、Michelson干渉方式である。図1にMirau干渉方式の原理図³⁾を示す。顕微鏡の照明装置からの照射光Aは、レンズの中心線Bを通過後、レンズの対象物側に取り付けられたガラス板のC点で、通過する光束と反射する光束に分けられる。光軸上、対象試料表面とガラス板の表面を中心として線対称の位置に参照ミラーが載置されている。参照ミラーおよび対象試料表面で正反射した光は、再

びガラス板上の点Eで合流し、レンズにより集光されG方向へ進む光束となり、結像系へと導かれる。図2に撮像系の撮像面上の一画素に到達した対象物表面Dsからの光波と参照面Drからの光波の関係を示す。参照面からの光波Rと対象物表面から反射した光波L、M、Nは、もともと一つの光波が点Cで分離したものである。Mは、参照面までの距離と対象物面までの距離が正確に等しい場

図1 Mirau干渉対物レンズ

図2 光波干渉の模式図

*原稿受付 平成22年6月24日

**株式会社 ニコン（東京都千代田区有楽町1-12-1）
システムデザイナー

西川 孝

早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。
1975年総合化学会社研究所に入社。画像処理応用システム開発担当。2007年退社。同年より、ニコン営業統括部にて、顕微鏡応用システム開発を手掛ける。

図3 位相シフト型干渉方式説明図

合、撮像素子上の画素に位相差0で入射する。その結果、二つの光波は強め合い、当該画素の出力は最大となる。これが零次の干渉位置である。対象物面がわずかに高いと参照面からの反射光に対して時間的に早く撮像素子に入射する。その位相関係を表したものが、図2のLである。また、対象物面がわずかに低いと参照面からの反射光に対して時間的に遅く撮像素子に入射する。その位相関係を表したものが、図2のNである。この位相差 Δ は、対象物面の基準（参照面までの距離）からの差を d 、照射している光の平均波長を λ とすると(1)式で表せる。

$$\Delta = 2d/\lambda \cdot 2\pi \quad (1)$$

($2d$ は、高さの差が d のとき、光路長の差が2倍になることからくる)

(1)式を変形すると

$$d = \Delta\lambda / (4\pi) \quad (2)$$

となる。すなわち、干渉縞が現れている画像の各画素の位相差を計算して求めれば、その画素の対象物表面上の高さを算出することができる。

3. 位相シフト型干渉方式

上記の Δ を計算する方法として最初に提案された方法が位相シフト型干渉方式⁴⁾(PSI:Phase Shifting Interferometry)である(以後、位相シフト法と略す)。

図3は、干渉縞が現れている画像の焦点位置を光軸方向に z だけシフトさせた場合の一画素の濃度値の変化の様子を表している。これを数式で表すと

$$F(z) = I_0 + I_1 \cos(z - \Delta) \quad (3)$$

となる。ここで、 Δ が求めたい位相である。位相シフト法では、システム側からピエゾ素子に電圧を印加し、焦点位置を $\pi/2$, π , $3/2\pi$ ずらして、それぞれ濃度値 B , C , D 値を得る。シフト前の濃度値 A を含めて、以下の数式で表せる。

$$A = I_0 + I_1 \cos(0 - \Delta) = I_0 + I_1 \cos\Delta \quad (4)$$

$$B = I_0 + I_1 \cos(\pi/2 - \Delta) = I_0 + I_1 \sin\Delta \quad (5)$$

$$C = I_0 + I_1 \cos(\pi - \Delta) = I_0 - I_1 \cos\Delta \quad (6)$$

$$D = I_0 + I_1 \cos(3/2\pi - \Delta) = I_0 - I_1 \sin\Delta \quad (7)$$

各画素当たり4個のデータ A , B , C , D より、 Δ は、(8)式

図4 垂直走査型白色光干渉方式説明図

で計算される。

$$\Delta = \tan^{-1}(B - D) / (A - C) \quad (8)$$

Δ が分かれば、(2)式に代入することにより、 d が求まる。上記4サンプル点から求める方法の他、5~9サンプル点⁵⁾⁶⁾を用いる方法が提案されている。位相シフト方式によれば、サブナノメータの高さ分解能で表面高さを計測できるが、以下の使用限界がある。(8)式を解くと二つの角度が解となる。その一つを Δ とすると、もう一つは、 $-\pi + \Delta$ である。 Δ に相当する対象表面の高さを d とすると、基準位置より d だけ高い点と $\lambda/4 - d$ だけ低い点が解となる。どちらを選択するかは、隣接する画素との差が少ない方を選択する方法が一般的である。ただし、実際に $\lambda/4$ 以上の段差があった場合、位相の跳びと称するアーティファクトが発生する。これは、例えば厚さ d のステップ状の突起がある場合に $(\lambda/4 - d)$ の深さの凹みと観測されてしまう現象である。位相シフト方式は、 $\lambda/4$ ($\lambda = 520$ nm とすると 130 nm) 以上のステップ状の突起や凹みがない金属蒸着ミラー、ガラス面、鏡面研磨ウェハーなどの光沢面の表面性状の計測に適している。

4. 垂直走査型白色光干渉方式

一方で、上記位相シフト法適用外の金属加工面、プラスチックフィルム、液晶ディスプレイパネルのスペーサーなどの表面性状、表面形状を制限なしに計測できる方式が求められた。こうした要請に最初に応えた方式が、垂直走査型白色光干渉方式⁷⁾(VSI:Vertical Scanning Interferometry)である(以後、垂直走査法と略す)。図4は、焦点位置を光軸方向にずらしたときの注目画素の濃度値の変化を表している。図中のE点は、零次の干渉位置である。図2のMのケースで、位相ずれがないため最大の濃度値となる。図4のF点は、1波長分ずれた位置の濃度値であるが、白色光を照射した場合、各波長によりピークが異なるため、零次干渉の濃度値より低くなる。垂直走査法は、顕微鏡の焦点位置を順次光軸上、上から下に走査させながら、設定されたサンプリング間隔で光軸上の座標値と画像を取得していく。各画素当たり濃度値が最大と

なるサンプリング点の光軸上の座標を、その画素の高さ値とする。この基本原理を実現した装置が市場に出された後、高精度化、高速化のためのいくつかの改良技術が開発された。

5. 課題と対策

1980年代後半から、1990年代後半までの間は、光沢面用の位相シフト法、非光沢面で広い高さレンジ用の垂直走査法を使い分ける時代であった。その間、さまざまな対象物を計測することで、白色干渉顕微鏡方式特有の課題が明らかになり、その原因の究明と対策が検討された。

(1) Mirau 型干渉対物レンズの適正使用温度

図1の Mirau 型干渉対物レンズの光束を二つに分けるガラス板とレンズは、同じ筒状の金属製部材で保持されている。今、環境温度を適正な温度範囲を超えて上昇させてしまっ、ガラス板と参照ミラーを保持しているガラス板の間隔が Δ だけ伸びた場合、参照面側の光学距離は、 2Δ 増加する。この結果、対象物側と参照面側の光路長が等しい零次干渉位置で対象物の焦点がずれてしまう不具合が生じる。急激な温度上昇により、膨張した金属が元に戻らなくなり、適正温度でも使用不能になってしまうことがある。これを解決するために焦点深度がそれぞれ 0.90, 0.56 μm の 50 倍、100 倍の干渉対物レンズには、調整用の補正環を設け、このずれを修正できるようにしている。

(2) 参照面補正

図5に筆者のグループが開発した白色光干渉顕微鏡 BW-A501 を用いて計測した、オプティカルフラット表面の高さ画像を示す。表示高さレンジは、 -2 nm から $+5\text{ nm}$ で白黒の擬似カラーで高さを表現している。100 倍の干渉対物レンズを使用し、視野サイズは、 $85\mu\text{m} \times 64\mu\text{m}$ である。A, B は、視野が異なる。マウンドが密集した構造は、視野が異なる高さ画像に共通に現れていて、正確に一致している。この構造は参照面の表面構造である（参照面を基準にして、対象物面の高さとして計測しているので、高低が逆転している）。その粗さは、 Sa で、 0.77 nm である。したがって、少なくとも粗さが 1 nm 以下の対象物を計測する場合は、参照面補正を行う必要がある。参照面補正は、十分平滑なサンプルについて、視野を変えて複数回（例えば 40 回）測定し、足し込むことにより平均高さ画像を得る。これを参照面の高さ画像として保存しておく。次に被測定表面を測定し、参照面高さ画像を引き算することにより、真に近い高さ画像を得ることができる。

(3) 金属光沢面上の透明薄膜の測定

図6に示すように、金属光沢面上に対物レンズの焦点深度（例えば 20 倍の対物レンズでは $1.71\mu\text{m}$ ）以下の厚みの透明膜がある部分と金属光沢面が露出している部分がある場合、測定結果は、透明膜が存在する方が低く表示される。これは、焦点深度内に二つの光学界面がある場合、金属からの反射光が透明体からの反射光より十分に強いため、透明体を通過して金属表面の干渉縞を捉えたことに起

A と B で測定場所が異なる

図5 オプティカルフラットの表面の高さ画像

図6 金属光沢面上の透明薄膜を計測した場合のアーティファクト

因する。この場合、光学距離が $(n-1)d$ だけ長くなるため、あたかも $(n-1)d$ の凹みが存在しているように見えるアーティファクトが生じてしまう。

(4) 異種材料補正⁸⁾

光が対象物に当たって反射する場合に反射光がどの位相から反射するかは、屈折率の複素成分に依存する。屈折率の複素成分は、吸収係数であり、光の波長により異なる。透明ガラスなどの場合、位相ずれなしに反射する。着色透明物質などの場合、あたかも実際の表面から下に表面が存在するように位相ずれを起こす。視野の中に吸収係数の異なる領域がある場合には、この位相ずれを補正する必要がある。

(5) Batwings (こうもりの翼)⁹⁾

対象物面上の画素サイズと同程度の構造をもつ対象物を測定すると、構造のエッジ部に図7に示す batwings と称するアーティファクトが発生する。これは、光軸方向に焦点位置をずらして観測した干渉波形（例えば図4）が、乱されてしまい、零次干渉の位置の検出が不正になることによる。

(6) 斜面の計測

白色光干渉顕微鏡で測定可能な最大傾斜角を推定する場合、二種類の反射光について考慮する必要がある。第一は、正反射光である。正反射光は、図1の θ の $1/2$ の角度の斜面までレンズで集光できる。この角度は、レンズの仕様書に開口数 NA として記載されている。

$$NA = n \sin \theta \quad (9)$$

n は媒質の屈折率であり、通常空気であるので 1 である。

2本の垂直カーソルの高さの差は、53.7 nm、水平方向の差は、110 nm。実際の対象物面上の画素サイズは、130 nmである。図の滑らかな線は、サブピクセル処理により生成された画素に基づく。

図7 Batwings と称するアーティファクト

50 倍の干渉対物の NA は、0.55 である。したがって、正反射光は、対象物の傾斜角約 15 度まで集光できる。第二の反射光は、回折光である。回折光は、正反射光の周りに、ある角度で広がっているが、コヒーレンス性は保たれているので干渉を起こす。回折光干渉が支配的な材料は、セラミックス、不織布などの非光沢面の材料である。金属は、正反射光、回折光ともに強く、ガラスなどの光沢面では微弱である。回折光干渉を捉えることにより、筆者らの開発した装置では、約 25 度の傾斜面まで計測することが可能である。

6. 統 合 法

1990 年代後半より今日まで、ハードディスク、MEMS、フラットパネルディスプレイなどの産業分野からの強い要請があり、白色光干渉顕微鏡メーカーは、上記課題の解決の他、大型化、高速化、新しい応用分野の開拓など矢継ぎ早に新技術、新製品を上市してきた。その中で特筆すべきテーマは、材料の表面状態にかかわらず単一の方法で計測できる統合法の開発であろう。

- (1) 周波数領域解析法¹⁰⁾は、その一つである。この方法は、垂直走査型干渉法における零次干渉位置の特定を高速フーリエ変換処理を用いて行う方法である。図 4 に示した干渉波形をフーリエ変換すると、含まれるすべての波長の三角関数の位相項と振幅項が得られる。零次干渉位置は、すべての波長の干渉波で同一であるので、干渉波の位相項を光軸上の距離に変換すれば、すべて同じ値になるはずである。各干渉波の波長を λ とし、位相項 Δ を、光軸上の距離すなわち高さ d に変換すると $d = \Delta / (2\pi) \lambda$ となる。波数 $k = 2\pi / \lambda$ であるので、 λ を k に置き換えて式を変形すると、 $\Delta = dk$ が得られる。このことにより、波数 k を横軸に位相 Δ を縦軸にとってプロットし、線形回帰直線を求め、その傾きを得ることにより高さが決定できる。

- (2) もう一つの方法は、白色位相シフト法¹¹⁾ (WLPSI: White Light Phase Shifting Interferometry) である。図 4 で示した干渉強度波形の Z 軸方向のサンプリング点の干渉強度値から包絡曲線を求め、その最大点を算出し、その点を基準として位相シフト法によりコサイン関数を決定し、位相を算出する方式である。

- (3) 上記二つの手法は、サブナノオーダーの高い精度でありながら、広い高さ測定レンジを実現している。しかしながら、なお、平滑面の測定精度は、単色位相シフト法に及ばなかった。筆者らのグループは、単色位相シフト法相当の高い精度であり、かつ広い高さ測定レンジをもつ方式の開発に着手し、2010 年にリリースした。5 章の参照面補正の項で測定結果の一部を紹介している。

7. お わ り に

白色干渉顕微鏡の基礎技術である PSI と VSI、その後に登場した改良技術、統合技術について駆け足で解説した。白色光干渉顕微鏡は、ナノオーダー、サブナノオーダーの表面性状の制御が求められる時代に突入し、ますますその重要性和期待度が増してきている。また、それに応える革新的技術が多くの研究者により提案されていて、まだまだ進化するという手応えを感じている人は、筆者だけではないだろう。

参 考 文 献

- 1) A. Michelson and E. Morley: On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether, Am. J. Sci., **34**, 203 (1887) 333.
- 2) B. Bhushan, J.C. Wyant and C.L. Koliopoulos: Measurement of Surface Topography of Magnetic Tapes by Mirau Interferometry, Appl. Opt., **24**, 10 (1985) 1489.
- 3) 小松啓: 干渉法 (二光束および多光束干渉法の原理と応用), ニコン テクニカル プレティン, **5** (1989) 7. (in Japanese)
- 4) J.C. Wyant, et al.: Development of a Three-dimensional Digital Optical Profiler, J. Tribol., **108** (1986) 1.
- 5) J. Schwider, et al.: Digital Wave-front Measuring Interferometry, Appl. Opt., **22**, 21 (1983) 3421.
- 6) K. Hibino, et al.: Phase-shifting Algorithms for Nonlinear and Spatially Nonuniform Phase Shifts, J. Opt. Soc. Am. A, **14**, 4 (1997) 918.
- 7) G.S. Kino and S.S.C. Chim: Mirau Correlation Microscope, Appl. Opt., **29**, 26 (1990) 3775.
- 8) A. Dubois: Effects of Phase Change on Reflection in Phase-measuring Interference Microscopy, Appl. Opt., **43**, 7 (2004) 1503.
- 9) A. Harasaki and J.C. Wyant: Fringe Modulation Skewing Effect in White-light Vertical Scanning Interferometry, Appl. Opt., **39**, 13 (2000) 2101.
- 10) P. de Groot and L. Deck: Surface Profiling by Analysis of White-light Interferograms in the Spatial Frequency Domain, J. of Mod. Opt., **42**, 2 (1995) 389.
- 11) A. Harasaki, J. Schmit and J.C. Wyant: Improved Vertical-scanning Interferometry, Appl. Opt., **39**, 13 (2000) 2107.