ワンステップ位相シフト法を用いたアブラムソン干渉計 による表面形状計測*

桑 原 豊 明** 大 谷 幸 利*** 吉 澤 徹***

Profile Measurement using Abramson Interferometer by One-Step Phase Shifting Method

Toyoaki KUWAHARA, Yukitoshi OTANI and Toru YOSHIZAWA

An Abramson interferometer has been known as one type of oblique incidence interferometers. It can record an interferogram for rough or uneven nonoptical surfaces. However for a fringe analysis, a conventional multi-step phase shifting method has difficulties in applying to this interferometer because of quasi-common path arrangement in optics. For the solution of this problem, the Abramson interferometry using a one-step phase shifting method is proposed. For practical applications, two problems are overcome in this interferometer, elimination of the influence of multi-reflection and decreasing of error due to deviation from the reference carrier frequency are proposed in this one-step phase shifting method. A spatial filter is set up in optics and a revised algorithm in one-step phase shifting method is proposed. An experiment is made for demonstrating availability of this method using a Si wafer.

Key words : profile measurement, Abramson interferometer, oblique incidence interferometer, one-step phase shifting method, spatial fringe analysis

1. は じ め に

加工精度の向上に伴い、粗面や鏡面をもつ物体の表面形状をマイクロメートルオーダーからサブマイクロメートルオーダーで非接触に計測することが求められている。一般に光波干渉計は鏡面物体をサブマイクロメートルからナノメートルオーダーで計測するためには有効であるが、粗面物体については十分な反射光が得られないために、高いビジビリティをもった干渉じまが形成されず従来の干渉方式は必ずしも適していない。さらにまた、凹凸の激しい物体については干渉じまが密になりすぎるため、しまの判別が困難になる。これらの欠点を補う方式として、斜入射干渉計が報告されている^{1)~4)}。斜入射干渉計では計測光が計測対象面に対し斜めに入射し、物体表面での正反射成分が増加するところから、粗面物体に関しても干渉じまを得ることが可能となる。また、計測光の入射角を変えれば干渉じまの感度を調節できるところから、凹凸の激しい物体の計測も可能になる。

我々は斜入射干渉計の一つであるアブラムソン干渉計⁵⁾を用いて粗面や鏡面をもつ物体の表面形状計測を試みてきた。しかし、この干渉計で得られた干渉じまに位相シフト法を適用することは必ずしも容易ではない。これは機械的に参照面を移動させて光路差を変化させて位相のシフトをおこなった場合、光学系の構成上、結像する干渉じまの位置がシフト操作ごとにずれていく問題が生じるからである³⁾⁴⁾。そこで本研究では参照面と計測対象面との間のティルトを与えることによりキャリア周波数を持つ干渉じまから位相検出を試みる。キャリアじまから位相を算出する手法はすでにいくつか報告されている^{5)~8)}。ここでは、もっとも簡易なキャリアじまをCCDカメラ内の連続する

一方向の画素の光強度として検出したうえで空間的に位相算出をおこなうワンステップ位相シフト法⁹⁾¹⁰⁾を用いて、1枚の干渉じま画像から位相解析を試みる。

ここで従来のワンステップ位相シフト法はキャリア周波数が既知であると仮定しており、計測サンプルの形状によってはキャリア周波数が変化してしまうため誤差が生じてしまうという問題があった。また、アブラムソン干渉計を鏡面物体に適用すると、計測対象面と参照面との間で多重反射が起こり、多重の干渉じまが発生する¹¹⁾。このような干渉じまを位相解析する場合、得られる位相分布は大きな誤差を含む結果となる。以上の問題を解決するために、ここではキャリア周波数の変化に対応した位相算出式を提案し、より高精度な計測を試みる。また、鏡面物体によって生じる多重反射の影響を取り除くために、干渉じまを干渉計上に空間フィルタリングをすることにより鏡面物体の計測を可能にした。

2. 原 理

2.1 アブラムソン干渉計

図1にアブラムソン干渉計を示す。直角プリズムの底面と計測対象面を向かい合わせに設置し、一方の斜面から平行光を入射する。この干渉計ではプリズム底面がビームスプリッタと参照面を兼ねた表面になる。プリズム底面に達した光の一部は反射して参照光となる。透過した計測光は計測対象面に斜めに入射するため粗面物体においても正反射成分が多くなる。計測対象面で反射した光は再びプリズムに至り、プリズム底面からの参照光と重なり合って干渉する。このアブラムソン干渉計において得られる干渉じまの等高線間隔 Δh は計測対象面への入射角を α 、光線の波長を λ とすると次のように表される。

$$\Delta h = \frac{1}{\cos \alpha} \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

* 原稿受付 平成10年3月27日

** 学生会員 東京農工大学大学院 (現 セイコーエプソン(株):諏訪市大和3-3-5)

*** 正 会 員 東京農工大学工学部 (東京都小金井市中町2-24-16)

Fig.1 Principle of Abramson interferometer

Fig.2 Multiple reflection between reference surface and object surface

Fig.3 Optical arrangement of Abramson interferometer using one-step phase shifting method

Fig.4 Separation of the pure two-beam and multiple-beam interference pattern

(a) Without filtering aperture

(b) With filtering aperture

Fig.5 Interferogram of a silicon wafer

したがって、入射角 α によって干渉じまの感度を調節することができる。

2.2 多重反射の除去

参照面と計測対象面間における光の反射状態を図2に示す。ワンステップ位相シフト法では、干渉じまに空間的なキャリア周波数を与えるため、参照面と計測対象面の間にティルト β を与える。計測対象面に対し光線が斜めに入射するため反射率の高い鏡面物体の計測を試みる場合、計測対象面と参照面の間で反射を繰り返すため非正弦的な多重の干渉じまが発生する。しかも、ティルト β のために1回目と2回目の反射では計測対象面での反射角は異なる。

$$\theta_n = \theta_1 + (N-1) \cdot 2\beta \quad (2)$$

ここで、 N は反射の回数、 θ_n は N 回試料面で反射した光が参照面へ入射する角度である。

したがって、高次の反射光は反射角が大きくなるため、図3に示すような空間フィルタを干渉計に設置することによって多重反射成分を取り除くことが可能である。この光学系は波長633nmのHe-Neレーザからの出射光がレンズ系によって広げ

られた後、ミラー1で反射されてプリズムに入射する。このミラー1の角度を調節することで、計測対象面への入射角を調節する。プリズム底面で反射した光と計測対象面で反射した光は互いに干渉して干渉じまを形成する。この際に図3に示す空間フィルタを設けて多重干渉の影響を除去した。この干渉じまをCCDカメラによって取り込んだ後、8bitの階調でAD変換してコンピュータにより解析する。

鏡面物体として、例えばシリコンウエハを計測サンプルとした場合、フィルタリングレンズの焦点面では、図4に示すようなパターンが生じるので、適当なスポット部分を選択することで多重反射光の分離が可能になる。そこで、この部分に開口を配置して、2光束の干渉じまW1に対応したスポットを取り出すことを試みた。図5(a)に開口を配置しない場合、図5(b)に配置した場合に得られるシリコンウエハの干渉じまを示す。図5(a)においては多重干渉のために正弦性が失われた干渉じまとなっているが、図5(b)においては多重反射光がフィルタリングされ正弦状の干渉じまが得られている。

2.3 ワンステップ位相シフト法による位相算出

ワンステップ位相シフト法によって干渉じまの解析をおこなう。これは干渉じまにキャリア周波数を与え、受光素子上での各画素においてキャリア方向に位相シフトがなされているとし、空間的に位相を求める手法である。キャリア周波数が受光素子上で1周期あたり n 画素となっているとき、干渉じまの光強度 I は次式により表される。

$$I(i, j) = I_0(i, j) [1 + \gamma(i, j) \cdot \cos\{\phi(i, j) + \Delta\theta(i)\}] \quad (3)$$

ここで、 i はキャリア方向の画素の位置、 j はキャリアに垂直な方向の画素の位置、 I_0 はバイアス成分、 γ はコントラスト成分、 ϕ は形状を表す初期位相、 $\Delta\theta(i)$ は n 画素1周期として i 番目の位相である。

ここではキャリア周波数を高さ方向のダイナミックレンジを考慮して、ティルトを与えない状態とカメラのサンプリング限界である2画素1周期の中間より4画素1周期、つまり、 $\Delta\theta(i)$ は $\pi/2 \cdot i$ とした。 I_0 、 γ および ϕ はキャリア周波数に対し空間的に緩やかに変化する値であるので、連続する3画素内では一定とみなすことができる。したがって、未知数を I_0 、 γ 、 ϕ の3つとし、キャリア方向に連続する3画素から初期位相 ϕ を算出すると、 ϕ は次式により求められる¹⁰⁾。

$$\phi(i, j) = \tan^{-1} \left[\frac{I(i-1, j) - I(i+1, j)}{2 \cdot I(i, j) - I(i+1, j) - I(i-1, j)} \right] - \frac{\pi}{2} \cdot i \quad (4)$$

式(4)では画素間で $\pi/2$ の位相シフト量があるものとして初期位相 ϕ を算出している。このため形状の凹凸がはげしく、キャリア周波数が4画素で1周期という設定からずれる場合、画素間での位相シフト量が $\pi/2$ と見なせなくなり誤差の要因となる。ここで、この画素間における位相シフトのずれによる影響を検討する。画素間での位相シフトのずれ量を δ とすると、式(3)は次のように書き直すことができる。

$$I(i, j) = I_0(i, j) \cdot \left\{ 1 + \gamma(i, j) \cdot \cos \left[\phi(i, j) + \left\{ \delta + \frac{\pi}{2} \right\} \cdot i \right] \right\} \quad (5)$$

ここで、連続する3画素内では形状に変化がないとし、式(4)と式(5)からキャリア周波数の変化した場合に生じる位相誤差 $\Delta(\delta, \phi)$ を求める。

$$\Delta(\delta, \phi) = \tan^{-1} \left[\left(\frac{\cos \delta}{1 + \sin \delta} \right) \cdot \tan \phi \right] - \phi \quad (6)$$

この誤差は初期位相 ϕ が 0 、 $\pi/2$ 、 π 、 $3\pi/2$ となる4点では発生しないため、キャリアの倍の周波数で発生し、4画素1周期からのずれを意味する δ の増大とともにその誤差も増大する。

そこで、キャリア周波数の変化に適応可能な位相算出式を提案する。連続する4画素間での形状に変化がないとすると、この場合の位相シフト σ は $\delta + \pi/2$ と見なすことができるので、式(3)で顧慮した未知数を I_0 、 γ および ϕ の3つに σ を加えて4つとし、連続する4画素における光強度から初期位相 ϕ を求める。キャリア方向に連続する画素の光強度を I_i とすると、 $i \sim i+3$ の連続する4画素の中心 $i+1.5$ における初期位相値 $\phi_{i+1.5}$ は次式により求めることができる。

$$\phi_{i+1.5} = \tan^{-1} \frac{\sqrt{\{(I_1 - I_4) + (I_2 - I_3)\} \{ (I_2 - I_3) + (I_1 - I_4) \}}}{\{(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)\}} - \frac{\pi}{2} \cdot (i+1.5) \quad (7)$$

上式を用いることによって、計測対象の形状に応じてキャリア周波数が変化した場合にも位相検出することが可能となる。

Fig.6 Interferogram of a bent acrylic plate

Fig.7 Resultant perspective plot of Fig.6 using conventional algorithm

Fig.8 Resultant perspective plot of Fig.6 using new algorithm

3. 表面形状計測

ワンステップ位相シフト法のキャリア周波数変化への対応を調べるために、通常の干渉計では干渉じまを形成しにくい粗面物体としてアクリル板を取りあげ、これにたわみを与えて形状計測を試みた。アクリル板は両端を単純支持し、マイクロメータヘッドを利用して中心部に集中加重を加えた。図6(a)にティルトを与えないときの干渉じま、図6(b)に4画素で1周期のキャリアを与えたときの干渉じまを示す。ここでの計測光入射角 α は 79° であるため、干渉じま間隔 Δh は $1.67\mu\text{m}$ となっている。図6(b)におけるたわみの形状をみると、両端部でキャリア周波数が4画素で1周期の設定からずれてしまっている。図6(b)の干渉じまを従来の3画素を用いる位相算出式で解析した場合の

Fig.9 Measurement result of A-A' using FFT method

Fig.10 Measurement result of A-A' using one-step phase shifting method and phase difference from FFT method

結果を図 7 に示す。図 7 の結果を見ると、キャリア周波数が 4 画素で 1 周期の設定からずれてしまうたわみの両端部においては周期的な誤差が発生している。今回提案するキャリア周波数変化に依存しない位相算出式で解析した場合の結果は図 8 のようになる。図 7 と比較して、たわみの両端部においても周期的な誤差が発生していない。実際に、図 6(b) に示した中心部分 A-A' 断面についてフーリエ変換法⁷⁾によって位相解析した結果と比較をおこなった。従来のワンステップ位相シフト法における結果を図 9 に、今回提案した位相解析法による結果を図 10 に示す。おのおの実線が左側の軸を用いる高さ情報を表す位相、点線が右目盛でフーリエ変換法との差を表す。この結果から従来法においては P-V 値で $2\pi/5$ 、新手法においては $2\pi/11$ 程度の誤差となった。フーリエ変換法では、キャリア方向に連続する一列すべての画素を用いて干渉じまにデジタル的なフィルタリン

グを施してノイズの影響を除去していることを考慮すると、連続する 4 画素のみによる位相算出が可能な本手法は簡易であり実用的な手法である。

実際に、今回提案した位相算出式を用いて、鏡面物体であるシリコンウエハの表面形状計測を試みた。ここでの計測光の入射角 α は 81° であるため、干渉じま間隔 Δh は $2.0\mu\text{m}$ となっている。図 5(a) に示す多重の干渉じまを解析した表面形状を図 11 に示す。表面形状には大きな誤差を生じている。これに対し、図 5(b) は空間フィルタにより得られた 2 光束の干渉じまであり、この干渉じまを解析した結果得られる表面形状は図 12 のようになる。中心部の一断面の結果を図 13 に示す。新しいアルゴリズムの採用によって多重干渉の影響がなくなり、スムーズな表面形状となっている。さらに、この結果を比較するため、触針式測定機（ミットヨ：SURFTEST SV-400）による結果を図 14 に示す。図 13 の本方式と図 14 の触針式との比較によって 50mm の計測範囲で $0.2\mu\text{m}$ 程度の差異で両者が一致していることが判明した。

Fig.11 Perspective plot of a silicon wafer without spatial filtering

Fig.12 Perspective plot of a silicon wafer with spatial filtering

4. ま と め

本研究では、ワンステップ位相シフト法をアブラムソン干渉計に適用することによって、粗面や鏡面をもつ物体の表面形状計測を可能にした。本研究は以下に示す点の実現をおこなった。

- (1) 空間フィルタリングにより多重反射の影響を除去する光学系をとることで、鏡面物体の計測を可能にした。
- (2) 新たな位相算出式を提案し、ワンステップ位相シフト法をキャリア周波数変化に対応したものとすることで、計測の精度を P-V 値で $2\pi/11$ 程度に高めた。

参 考 文 献

- 1) N.Abramson: The Interferoscope: A New Type of Interferometer with Variable Fringe Separation, *Optik*, 30 (1969) 56.
- 2) K.G.Birch: Oblique Incidence Interferometry Applied to Non-Optical Surfaces, *J.Phys.E*, 6 (1973) 1045.
- 3) D.Boebel, B.Packros and H.J.Tiziani: Phase Shifting in an Oblique Incidence Interferometer, *Opt.Eng.*, 30, 12 (1991) 1910.
- 4) 大谷幸利, 吉澤徹, 押野則子: 位相シフト型アブラムソン干渉計による粗面測定, *精密工学会誌*, 60, 3 (1994) 432.
- 5) L.Mertz: Real-time Fringe-Pattern Analysis, *Appl.Opt.*, 22,10 (1983) 1535.
- 6) M.Takeda, H.Ina and S.Kobayashi: Fourier-transform Method of Fringe-pattern Analysis for Computer-based Topography and Interferometry, *J.Opt.Soc.Am.*, 72 (1982) 156.
- 7) S.Toyooka and M.Tominaga: Spatial Fringe Scanning for Optical Phase Measurement, *Opt.Com.*, 51, 2, (1984) 68
- 8) 新井泰彦, 横関俊介, 山田朝治: FM 復調技術を用いたアナログ処理による干渉縞の位相検出, *光学*, 23 (1994) 38.
- 9) N.Okuhara, R.Gu, Y.Otani and T.Yoshizawa: Interference Measurement of Non-optical Surface by One-step Phase Shifting Technique, *Frontiers in Information Optics, Topical Meeting of The International Commission for Optics Meeting Digest* (1994) 181.
- 10) R.Gu, T.Yoshizawa and Y.Otani: One-Step Phase Shifting 3-D Surface Profilometry with Grating Projection, *Opt. Laser Eng.*, 21 (1994) 61.
- 11) J.Schwider, R.Burow, K.-E.Ellsner, J.Grzanna, R.Spolaczky and K.Merkel: Semiconductor Wafer and Technical Flat Planeness Testing Interferometer, *Appl.Opt.*, 22 (1986) 1117.

Fig.13 Measurement result of a silicon wafer by one-step phase shifting method using new algorithm

Fig.14 Surface profile of a silicon wafer by stylus method