

研究

横ずらし異径ビームスポット配置による 差動型ヘテロダイン干渉計

梅田 倫弘・太田 一也*・高柳 淳夫

東京農工大学工学部機械システム工学科 〒184 小金井市中町 2-24-16

(1993年3月24日受付, 1993年6月24日受理)

Differential Optical Heterodyne Profilometry Using Laterally Shifted Two Beams with Different Spot Size

Norihiro UMEDA, Kazuya OHTA* and Atsuo TAKAYANAGI

Department of Mechanical Systems Engineering, Faculty of Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16, Nakachou, Koganei 184

(Received March 24, 1993; Accepted June 24, 1993)

This paper describes a differential heterodyne profilometry which has a novel arrangement of laser beam spots on a sample. The laser beam spots with different diameter are laterally shifted by birefringent lens, which has different focal length for orthogonally polarized lights. The transverse Zeeman laser is used as a heterodyne light source. It is shown that the proposed heterodyne interferometer is insensitive from external mechanical vibration and is possible to measure an inclined sample surface. Also, the surface profiles of two samples are measured.

1. はじめに

超 LSI や X線反射鏡などの超精密加工技術の著しい進展にともなう、その表面構造や加工面の表面粗さを高精度にかつ安定に評価する計測手法が要求されている。このために、種々の手法が提案され、また実用に共されている方法もいくつかある¹⁾。それらのなかでも光ヘテロダイン干渉法を用いた表面形状計測法はナノメートルオーダーの垂直分解能を非接触に実現できるため多くの報告がある²⁾。しかし、参照光路と測定光路が分離している場合、空気ゆらぎや振動等の外乱によって最小測定限界が制限される。これを改善するためウォラストンプリズムによってわずかに二つの光路を分離した Sommargren 型光学系^{3,4)}や参照光と測定光を大小二つの同心円状スポット配置にした共通光路差動型ヘテロダイン干渉計⁵⁻⁷⁾が提案された。しかし、前者は参照点を

定めるため円状の測定軌跡となって直線の測定経路が不可能なこと、また、後者では傾斜面が原理的に測定されない等の欠点がある。そこで、われわれは大小二つのレーザースポットを同心円状にではなく、試料面内方向にわずかにずらして配置させる光学系を考案した。

本報では提案する測定光学系の原理と特性およびこれを用いた測定例を示して本光学系の有効性を明らかにする。

2. 原 理

2.1 光ヘテロダイン干渉計

光ヘテロダイン干渉計の光路に対する外乱の影響を除去する方法として Fig. 1 (a), (b)に示すような測定光路と参照光路の配置が考えられている³⁻⁷⁾。Fig. 1(a)は、二つの同一直径のレーザービームスポットを試料面内方向にわずかにずらす光学系であるのに対し、(b)は直径の異なる大小二つのビームスポットを同心円状に配置する光学系である。しかし、(a)の配置では測定点と参照点が定まらないこと、二つのビームスポット間隔の

* 現在: ファナック(株) 〒401-05 山梨県南都留郡忍野村
Present address: Fanuc Co. Ltd., Oshino-mura,
Minamituru-gun, Yamanashi 401-05

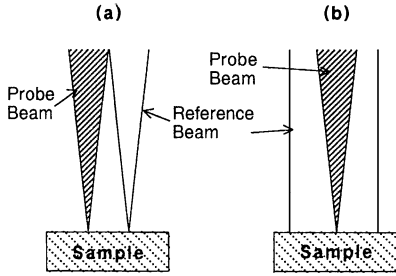


Fig. 1 Arrangements of laser beam spots on sample for laterally shifted interferometer (a) and for concentric interferometer (b).

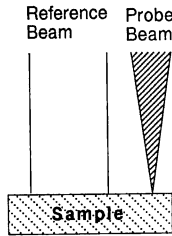


Fig. 2 Proposed arrangement of laser beam spots.

ピッチに対応した空間周波数の表面構造が測定できないこと、また (b) では表面の傾斜成分が測定されない欠点がある。

そこで、われわれは、Fig. 2 に示すような大小二つのビームスポットをわずかに試料面内方向にずらす光学配置を考案した。このようにすれば、測定点を明確に定めることができ、特定の空間周波数の表面構造の消失現象もない。また、試料面の傾斜成分も測定できる。Fig. 2 の光学配置のビームスポットによって得られるビート信号成分は次のようになる。

$$I = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\omega_b t + \phi_2 - \phi_1 + \theta_{2a} - \theta_{1a} + \theta_{2m} - \theta_{1m}) \quad (1)$$

ここで、 A_1 、 A_2 は光波の振幅、 ω_b はビート角周波数、 $\phi_2 - \phi_1$ は測定面におけるそれぞれのスポット内の平均高さに対応する光路長差、 θ_{1a} 、 θ_{2a} は各光路への空気の揺らぎ等の外乱による位相変化、 θ_{1m} 、 θ_{2m} は測定面の機械的振動による位相変化である。(1)式において、後述するように大スポットと小スポットの測定面上での位置ずれ量は高々 $50 \mu\text{m}$ であるため、複屈折レンズから測定試料までの距離 (約 50 mm) に比べはるかに小さい。すなわち、二つの光路に対する空気揺らぎの相関性は非常に高いと考えられるので、外乱に対する二つの光路への位相変化 θ_{1a} 、 θ_{2a} はほぼ等しいとして差し支えない。また、二つのスポットが同一試料面に入射する限り測定

面の機械的振動による位相変化 θ_{1m} 、 θ_{2m} は等しい。すなわち、ビート信号は次式のように表される。

$$I = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\omega_b t + \phi_2 - \phi_1) \quad (2)$$

(2)式の交流成分の位相項が大スポットの平均高さに対する小スポットの平均高さの高低差 h を与える。すなわち、

$$h = (\phi_2 - \phi_1)c / (2\omega_1) \quad (3)$$

ただし、 c は光の速度、 ω_1 は大スポットのレーザー発振角周波数である。

3. 実験配置

Fig. 2 のビームスポット配置を得るために、Fig. 3 に示す複屈折レンズを用いた干渉計を製作した。光源には周波数安定化横ゼーマンレーザー (STZL, $\lambda = 633 \text{ nm}$) を用いた⁹⁾。STZL は周波数のわずかに異なる二周波直交偏光成分からなっている。STZL の出射ビームはコリメータレンズによって拡大され複屈折レンズ (焦点距離 = $190, 260 \text{ mm}$)、対物レンズ (NA = 0.46) を通過して試料面に投射される。このとき、複屈折レンズの短焦点距離面に試料を設置した。そのため、試料面における二つのビームのずれは後述のように $50 \mu\text{m}$ となった。試料からの反射光は、対物レンズ、複屈折レンズを通過し、方位 45 度の直線偏光子を通して光検出器に入射してビート信号が検出される。検出されたビート信号は、電気位相計において STZL の参照信号と位相比較され、その位相情報はコンピュータに取り込み記録される。また、試料はコンピュータ制御されたパルスモータ駆動ステージによって面内方向に走査される。

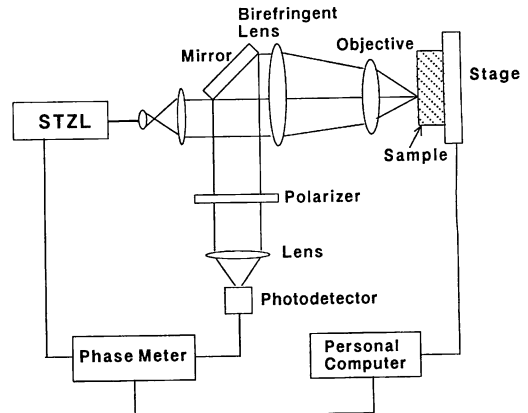


Fig. 3 Schematic of the optical heterodyne interferometer.

4. 実験結果

4.1 干渉計の性能評価

Fig. 3 に示したヘテロダイン干渉計の基本的な性能を評価するために、次の点について実験的に確認した。

- 1) 干渉位相の時間ドリフト
- 2) 耐振動特性
- 3) ビームスポットサイズ
- 4) 傾斜面の計測能力

1) 干渉計の時間安定性は、計測装置の縦分解能を決定する要因の一つであるため、重要な評価項目である。そこで、Fig. 3 に示す干渉計装置を全く防振対策をしていない光学定盤上に設置して時間ドリフト特性を調べた。30 分間、位相変動を測定した結果、最大変動幅は、1.6 度であった。すなわち(3)式を用いると 1.4 nm となり、従来の分離光路型ヘテロダイン干渉計に比べ安定した特性を示すことがわかった。

2) 光学系の機械的振動に対する耐性を調べるため、測定試料を加振させて位相計出力を記録した。すなわち PZT 圧電素子により反射鏡を光軸方向に周波数 1 Hz、振幅 125 nm で加振させて実験を行った。測定結果を Fig. 4 に示す。これより、試料の加振による周波数 1 Hz の成分が 0.5 nm の振幅で検出されていることがわかる。この値は、加振振幅に比べ 0.4% であることから、測定面の機械的振動は光学系の時間ドリフト特性とほぼ同等かそれ以下の影響を与えるに過ぎないことがわかった。

3) 本干渉計の試料面内の横分解能を決定する要因は、試料面でのレーザービームのスポット径である。そこで、Fig. 2 の干渉計のビームスポット径をナイフエッジ法により測定した。その結果、小スポットは 2.5 μm 、大スポットは 60 μm 、両スポットの中心間距離は 50 μm と測定された。

4) 以上のように、本干渉計の縦分解能は、時間的な熱ドリフトによって制限されて 1.4 nm となり、横分解能は小スポット径によって決まり 2.5 μm であること

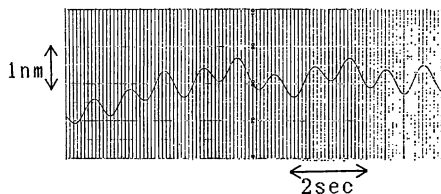


Fig. 4 Response of the interferometer to sinusoidal vibration.

がわかった。2 節でも述べたように本干渉計の特徴の一つは、傾斜面の測定が可能であることである。これを確かめるため、試料である反射鏡の一端を固定し、他端を圧電素子により 3 μm だけ光軸方向に微動させて傾き 0.3 mrad の傾斜面を作った。スポット位置を固定したまま、PZT 圧電素子に徐々に電圧を加えていったときの位相計出力の時間変化を Fig. 5 に示す。両スポットの中心間距離は 50 μm であるから、0.3 mrad に対する両スポットの光軸方向の高低差は 15 nm となる。これに対し、Fig. 5 に示されるように試料の傾斜変化の測定結果は 15.8 nm となって、ほぼ一致していることから、本干渉計によって傾斜面の測定も可能であることがわかった。

4.2 測定例

本干渉計を用いて 2 種類の試料について測定した。Fig. 6 (a) は、段差のある試料の測定結果である。この試料は、カバーガラス上に金を蒸着させ、さらにマスクによって一部を覆って金蒸着させて作製された。図よ

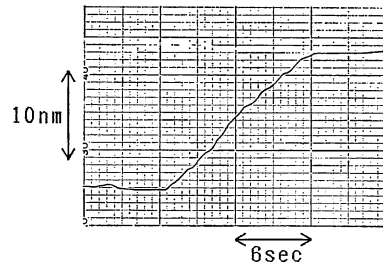


Fig. 5 Plot of the inclined sample surface measured with the interferometer.

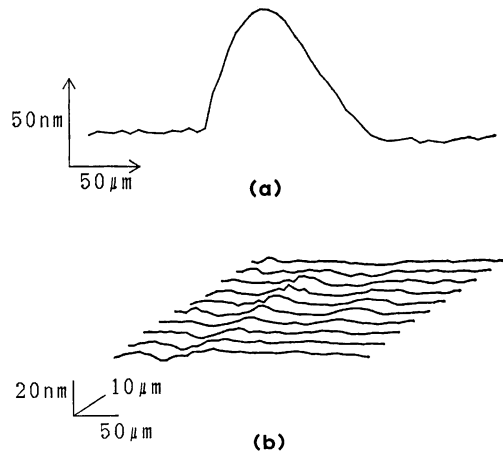


Fig. 6 (a) Line profile across a thin film edge. (b) Two dimensional profile of gold-coated optical flat.

り、この試料の段差は約 80 nm と測定された。一方、触針式表面粗さ計を用いて測定した結果、段差は 100 nm、幅は 50 μm であった。これらの測定結果の差異は、段差の幅が 50 μm とほぼ大小スポット間距離に匹敵するために生じたと考えられる。

Fig. 6 (b) は、金コーティングしたオプティカルフラット面の 280 \times 50 μm の領域の表面形状の測定結果である。これから、高さ 10 nm 程度の表面構造が明瞭に測定されていることがわかる。

5. ま と め

大小二つの測定スポットを試料面内方向にわずかにずらしたビームスポット配置を持つ干渉計を考案した。このようなスポット配置を得るために、横ゼーマンレーザーと複屈折レンズを組み合わせた光ヘテロダイン干渉計を製作して、縦分解能 1.4 nm、横分解能 2.5 μm の性能が得られた。また、実際に傾斜面や段差および 10 nm 程度の構造を持つ試料を観測して本干渉計の有効性を確認した。本干渉計によって、従来の差動型光ヘテロダイン干渉計では不可能であった傾斜面の測定が可能と

なり、Sommargren 型ヘテロダイン干渉計がもつ試料面の特定周期の構造の消失という欠点も解消される。

文 献

- 1) 芳野俊彦編著：光計測のニーズとシーズ (コロナ社、東京、1987) pp. 222-234.
- 2) 中島俊典：“ヘテロダイン干渉計測”，光学，9 (1980) 266-274.
- 3) G.E. Sommargren：“Optical heterodyne profilometry,” Appl. Opt., 20 (1981) 610-618.
- 4) R.P. Shukla, G.M. Perera, P. Venkateswarlu and M.C. George：“Interferometric techniques for correction of sample tilt in the Sommargren profilometer for surface roughness studies,” Opt. Laser Technol., 23 (1991) 98-104.
- 5) C.C. Huang：“Optical heterodyne profilometer,” Opt. Eng., 23 (1984) 365-370.
- 6) D. Pantzer, J. Politch and L. Ek：“Heterodyne profiling instrument for the angstrom region,” Appl. Opt., 25 (1986) 4168-4171.
- 7) M.J. Downs, W.H. McGivern and H.J. Ferguson：“Optical system for measuring the profiles of super-smooth surfaces,” Precis. Eng., 7 (1985) 211-215.
- 8) N. Umeda, M. Tsukiji and H. Takasaki：“Stabilized ^3He - ^{20}Ne transverse Zeeman laser,” Appl. Opt., 19 (1980) 442-450.