光干渉法による大段差のナノメートル計測*

高橋康英** 木曾又一郎** 寺本仁志*** 岩田耕一†

Optical Interferometry for Nanometer Measurement of a Large Step

Yasuhide Takahashi, Mataichiro Kiso, Hitoshi Teramoto and Koichi Iwata

This paper describes a high precision measurement technique to obtain a step height of optical parts which have large steps on the surfaces. In this study, a technique was developed with which steps of a few millimeter height can be measured in the accuracy of the order of a few nanometers. In the first step, white light interferometry is adopted to obtain a coarse value on the order of sub-microns, then heterodyne laser interferometry (with a Zeeman type He-Ne laser) is adopted to acquire the precise value on the order of a few nanometers. In the latter system, the rays reflected at the upper and lower side of the step are made to interfere. In order to obtain the two parallel beams, two Wollaston prisms are introduced. This system expands the dynamic range and brings the easy beam alignment. The experiment results show that the accuracy in the order of a few nanometers is achieved for the measurement of as large as a few millimeters.

Key words: large step, nanometer measurement, equivalent wavelength method, white light interferometry, Wollaston prism heterodyne laser interferometry, Zeeman type He-Ne laser

1. 緒 言

ナノメートル（以下nm）オーダの微細形状の測定は、最近、STM, AFM^{1)~3)}, 走査形電子顕微鏡等の発達により著しい進歩をとげている。狭い範囲に限定すると、実用面では物体の寸法測定の精度が限界に近付きつつあるとの印象を受ける。これはヘテロダイン干渉法やエレクトロニクスに関連する各種の技術、例えば、半導体の加工の応用まで含めた諸技術の発達によるところが大きい。しかし、(1) 3次元的に広い領域、(2) nmオーダの高い絶対精度、(3) 設備費用が比較的低コスト、(4) 熟練を要せず容易に計測が可能、(5) 複雑なデータ処理が不要、(6) 非接触計測が可能、という要求に応え得る方法は少ない。

本研究では、上記の要求をある範囲で満たし、かつ、1mm前後の大きな段差を有する高精度加工部品について、その段差をnmオーダの高精度で計測することを試みた。干渉法としては古典的と言える白色干

渉法⁴⁾と新しいヘテロダイン干渉法を組み合わせることによって、初めに意図した目的に沿った計測が可能となり、好結果を得ることができた。以下、その方法と結果について述べる。

2. 計 測 の 方 法

解析的に不連続な大段差を有する高精度加工部品、例えば、光学的平面に突起や溝を付加したもの等を 10^{-6} オーダの高い相対精度で計測するのは容易ではない。現在、大寸法の高精度計測には(1)干渉しま計測法、(2)合致法、(3)合成波長法等⁵⁾が挙げられる。この場合、計測寸法はmのオーダであり、必要精度が 10^{-6} m、あるいは 10^{-7} mであることが多く、相対精度は 10^{-6} 程度となる。

本研究では、直径が6mm、厚さが1mmの合成石英製平面基板を大口径ガラス基板にオプティカルコンタクトし、段差を有する試料を製作してこれを計測の対象にした。この段差寸法に対し 10^{-6} 程度の相対精度を得るには、nmオーダの精度で段差を計測する必要がある。通常、ひとつの方法のみでは、 10^{-6} もの高相対精度の確保は極めて困難である。筆者らは2種類の光干渉法を併用する手法を開発して適用した。

* 原稿受付 平成4年7月2日

** 正 会 員 三菱電機(株)(尼崎市塚口本町8-1-1)

*** 三菱電機(株)

† 正 会 員 大阪府立大学工学部(堺市学園町1-1)

2. 1 計測の手順

計測の手順は、まず超精密加工（フロートポリッシング）された計測対象の平面を、三面合わせ法⁹⁾などの予備的試験によって、突起やうねりがないことを観察しておく（うねりは単調な凹面で、計測範囲内で最大0.3 nm）。続いて、第1ステップの白色干渉法では $\pm \lambda/4$ （波長 $\lambda \doteq 632.8 \text{ nm}$ ）以内の精度で段差寸法を計測し、第2ステップのヘテロダイン干渉法ではnmオーダの精度の計測を行う。なお、一般に光の干渉として示される寸法（ h ）と λ との関係式

$$h = \frac{1}{2} \lambda N + \varepsilon \quad (1)$$

に対し、第1ステップでは第1項の N （正の整数）を、第2ステップでは第2項の端数 ε を求めることに相当する。上記のプロセスのフローを図1に示す。

2. 2 白色干渉法による計測

第1ステップに適用した白色干渉法では、標準的なマイケルソンの干渉計にレーザ測長器を付加し、図2に示す光路構成で段差を計測した。試料は透明な合成石英であるが、光源にキセノンランプを使用した場合、可視光の4%程度を反射するので干渉計は十分に機能し得る。

まず、図2に示す構成において、X-Yステージを調整して $Lr = Ls$ の条件を設定し、基準面上にカラー干渉しまの0次のしまを形成する。次にX-Yステージを移動し、 $Lr = Lm$ の条件を設定すると計測対象の段差上面側に先の基準面のカラー干渉しまと同一のしまが現れる。この状態に至るまでのX-Yステージの移動量をレーザ測長器で計測するとこの値が、式

Fig.1 Flow chart for nanometer measurement of a large step

Fig.2 Schematic diagram of white light interferometry

Fig.3 Photo of color interference fringe

(1)中の h の近似値となり、 N の値が決定できる。

2. 3 ヘテロダイン干渉法による計測

第2ステップに適用したヘテロダイン干渉法は、周波数がわずかに異なる二つの光波を重ねて得られるビート波の位相変化を計測して、高精度で光路差を検出する方法であり、条件によっては0.03 nmまで検出可能とされている⁷⁾。本研究では光源に横ゼーマンレーザを使用し、図4に示す光路構成で段差のnm計測を実施した。レーザ光源は出力が3 mW、試料位置でのスポット径が約0.8 mm、二つの光波の周波数差が約200 kHzである。

ここで採用した光路構成では、2箇所反射する光波間の干渉を利用する。このように相対変位を検出する手法を取ることで、試料に加わる振動や空気のゆらぎ等の影響を相殺し、計測の高精度化を図った。

従来、表面粗さ計などの高精度計測の光路構成⁸⁾では、ウォラストンプリズム⁹⁾で2ビームに分岐後、対物レンズを使用して試料表面に焦点を結ぶ方法をとっている。大段差計測の場合には、段差上下の両面同時にレーザビームの焦点を結ばせることが困難なため、ここでは2枚のウォラストンプリズムを背面对称に配

Fig.4 Schematic diagram of heterodyne laser interferometry

Fig.5 Photo of Wollaston prism holder

置する方法をとった。これによって、ゼーマンレーザの測定光は第1のウォラストンプリズムでp波とs波に分歧・屈折させられ、第2のプリズムで両光波が平行になるように再度屈折させられる。これによって、対物側プリズムから射出されるレーザ光を平行ビームとして試料表面に照射することができる。この方法では二つのビームが平行で、個々のビームの開き角がほぼゼロであるため、焦点の調整が不要になる。加えて、二つのプリズムの設定距離を変化させることによって、ビーム間隔が自由に調整できるため、計測試料の大きさに対応した計測が可能であることも大きな特徴になっている。

レーザ出力部の1/4波長板は、若干含まれる楕円偏光モードを直線モードに改善する補償板である。ここでの光路系では、レーザが有した3～4%程度の楕円偏光の割合を約1%に縮小することができた。続くガラス基板は、位相計測の基準ビート波を得るためのビームスプリッタの役目をする。移動ステージは市販のX-Yステージを使用しており、位置センサは光軸と直角方向で、このステージの移動量を検出している。これらの構成部品は、床から振動が伝達するのを防止するためすべて除振台上に固定した。試料は光源の光軸と直交に設置するのが理想である。しかし、直交の条件では、試料から反射した戻り光がレーザ発振の安定性に影響を及ぼすので、試料面は光軸に対しわずかに傾けた。この傾斜による段差誤差を極力小さくするため、光源と試料の距離は1400mmと大きくとった。

3. 計測誤差発生要因の検討

上記の計測方法全体では、計測誤差の発生要因として、(1)床振動、(2)空気の流れ、暗騒音、

(3)試料の取付け面の姿勢、(4)移動ステージの送り変動、(5)気象条件の変化、(6)ゼーマンレーザの発振の不安定さと周波数誤差、(7)光学系の非線形性、(8)信号処理系の非線形性と変動、が列挙できる。ここでは、上記の要因を対象に、誤差発生要因を抽出し、それらの低減を試みた。

第1ステップの白色干渉法で式(1)のNを決定するとき、計測精度を $\pm \lambda/4$ 以内に収める必要がある。実際には段差計測時、0次のしまの発生位置が段差の上下で一致するようにステージの調整に注意を払った。その結果、既知の段差値と比較した場合、計測誤差を $0.06 \mu\text{m}$ 以内に収めることができ、とくに問題がなかった。

そこで、以下では第2ステップのヘテロダイン干渉法の計測誤差についての検討結果を述べ、各項目ごとに推定される最大計測誤差を示す。

3.1 床振動の影響

計測装置は全光路系を同一除振台に設置しているため、実験建屋外の各種振動の影響を受けにくいことがわかった。ただし、二つのウォラストンプリズムを別々のスタンドで保持すると、光軸が合わせにくい上、振動の影響でプリズム間に相対変位が生じやすいので、図5に示す一つの鏡筒に固定した。これによって、光電検出信号のS/N比の向上とドリフトの縮小が図れ、位相計の出力信号の安定性が増加した(実測誤差： $\pm 0.3 \text{ nm}$ 以内)。

3.2 空気の流れと暗騒音

実験室はクリーンルームであるため空気の流れがあり、また暗騒音が大きいことから、極めてわずかなはあるが光路系が加振され、検出信号のS/N比の低下を招いた。そこで、光路系をアクリル樹脂製のカバーで覆ったところ、空気の流れと暗騒音の影響が大幅に減少した。カバーの有無に対する位相計の出力信号

(a) With optical path cover
(b) Without optical path cover
Fig.6 Output signal of phase meter

を図6に比較して示す。同図(b)のカバー無しの場合では、寸法に換算して $\pm 10.2 \text{ nm}$ 相当のノイズが生じており、後述する段差読みとり時、大きな誤差をもたらすことが予想される。しかし、カバーで覆った後は(a)に示すようにノイズを $\pm 0.3 \text{ nm}$ 以内に低減でき、目標とする計測精度にほとんど影響しないことが確認された(実測誤差: $\pm 0.3 \text{ nm}$ 以内)。

3.3 試料の取付け姿勢

試料を光軸に対し傾斜させて取り付けると、段差計測値にかたより誤差が生じる。図7中に示す状態に試料を傾斜させた場合、真の段差を t とすると計測誤差 Δt は、

$$\Delta t = t \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad (2)$$

式(2)から、段差 1 mm 当たりの誤差は図7に示す曲線で示される。今回の計測では設置角度 θ を $9'$ にしたため、 3.4 nm 程度の誤差が生じる。 nm オーダの計測を行うには、この値が無視できないため、ここでは設置によるかたより($\pm 1'$)誤差を式(2)で算出し、段差計測値を補正することにした(補正誤差: $\pm 0.8 \text{ nm}$ 以内)。

3.4 移動ステージの送り変動

移動ステージは6自由度の送り変動を有する。しかし、並進3自由度方向の送り変動は本実験の計測誤差にほとんど影響しないため、回転3自由度方向の送り変動のみを検討した。その結果、ステージの移動範囲を規定して往復させると、送りによる変動には、再現

Fig.7 Calculated error caused by set-up angle

(a) With traverse fluctuation

(b) Without traverse fluctuation

Fig.8 Output signals

性があることがわかった。そこで、この変動成分をパソコンのメモリーに記憶させておき、実際の計測時には、この成分をパソコン上で減算することにした。図8(a)にステージの送り変動分と、この変動を含めた計測対象の段差部上面の形状を示す。同データには、段差部上面にステージ自体の変動分が生じているのが見られる。段差部上面のデータからステージの変動分を減算した結果、図8(b)の形状が得られ、段

差部上面が非常に高精度な平面に加工されているのが確認できた(補正誤差: $\pm 0.4 \text{ nm}$ 以下)。

3.5 その他の誤差の影響と検討

・気象条件(温湿度, 気圧)の変化

空気の屈折率の変化によるレーザ波長の変化¹⁰⁾については, 温湿度と気圧による影響を求めて段差計測値を補正し, さらに温度変化による計測試料の伸縮量についても同様に補正することにした(補正誤差: $\pm 0.1 \text{ nm}$ 未満)。

・レーザの発振の不安定さと周波数誤差

使用レーザは, よう素安定化He-Neレーザのi線との比較から周波数の安定性と絶対誤差が 10^{-8} 以内であることがあらかじめ試験されており, 計測精度への影響が無視できる(誤差: $\pm 0.1 \text{ nm}$ 未満)。

・光学系の非線形性

前記した楕円偏光のモードが存在するとnm計測の直線性に影響する。そこで, 楕円偏光の割合(楕円の短径 b /長径 a)を試験的に調整し, 図4中の計測試料の位置でp波の射光箇所固定ミラーを, s波の射光箇所に超高精度の移動ステージを設置して, 図9中に示すようなステージの移動量に対する位相変化を調べた。両者が比例の関係にある場合が理想であるため, この直線との差異 $\Delta\phi$ を計測誤差として求め, 光学系の直線性を調べた。その結果図9のデータを得た。同図によると, 例えば偏光の割合が10%では誤差が約 1.5 nm である。図4の光路系で $1/4$ 波長板を用いた場合, 前述のごとく楕円偏光の割合を1%程度に縮小したため, 図9からこの条件の誤差が 0.8 nm 以内と推定される(誤差: $\pm 0.8 \text{ nm}$ 以内)。

・信号処理系の誤差

光電検出器以降の総合誤差を図10に示す測定系によって調べた。電気カウンタの時間測定値を基準にした場合, この誤差は次式で示される。

$$\frac{\lambda}{2} \times \left(1 - \frac{\Delta A_a / A_a}{\Delta T / T} \right) \quad (3)$$

ここで

ΔA_a : 位相変化に対応したA/D変換器の値

A_a : 位相量 $2\pi(\text{rad})$ に対する校正値

ΔT : 位相変化に対応したカウンタの値

T : 発振出力の周期

位相を $0 \sim 2\pi(\text{rad})$ 変化させた結果, 信号処理系の誤差は $\pm 0.4 \text{ nm}$ 以下に収まることがわかった(誤差: $\pm 0.4 \text{ nm}$ 以下)。

以上, 計測誤差に及ぼす要因を列挙した。計測のかたより値になる試料の取付け姿勢と気象の変化成分に

Fig.9 Non linearity of the optics

Fig.10 Calibration of electric measurement system

については, 計測値の補正が可能である。これより, 計測誤差要因別に示したばらつき推定誤差について, 2乗平均値を算出すると, 約 1.3 nm を得るため, ナノメートルオーダの計測精度が確保できたと判断できる。

4. 計測結果

以上に示す計測誤差の検討結果を踏まえ, 5個の試料について段差を測った。計測データを表1に示す。同データは, 各試料についてそれぞれ8回の計測を行った平均値である。

ヘテロダイン干渉法において, 標準偏差の最大は 0.9 nm であり再現性が良かった。ステージを移動して得た段差部の形状は, 図8(b)に示すように, 段差エッジ部はレーザビーム径の影響を受け, 多少, 丸みを帯びている。しかし, 段差の計測を目的とする場合には, この丸みがあっても計測精度に影響しない。

ここで得た 0.9 nm は, 3章であらかじめ示した計測誤差の 1.3 nm の範囲に収まっており, 列挙した誤

Table 1 Summary of measured values

Number of sampling : 8
Dimension : μm

Sample		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
White light interferometry	X_i	1012.74	1012.70	1012.76	1012.71	1012.71
	σ_{i-1}	0.045	0.039	0.025	0.058	0.055
	N	3201 (① ($\lambda/2$)N=1012.8276 μm)				
Heterodyne laser interferometry	X_i	②	-0.1143	-0.1125	-0.1171	-0.1158
	σ_{i-1}		0.0009	0.0007	0.0009	0.0008
	Wavelength compensation	③	+0.0034	+0.0035	+0.0036	+0.0033
	Thermal expansion of the specimen	④	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0011
	Correction due to slant alignment	⑤	-0.0037	-0.0037	-0.0037	-0.0037
Step height : (①+②+③+④+⑤)			1012.712	1012.714	1012.710	1012.708
						1012.711

Where X_i : Average value
N : Number of the order σ_{i-1} : Standard deviation
 λ : Wavelength (0.6328195 μm)

Work distance : 35 mm

Fig.11 Influence of work distance

差要因とそれぞれの誤差量がほぼ妥当であることをある程度示しているとみられる。

つぎに、図11にウォラストンプリズムの対物面から試料表面までの距離（以下ワークディスタンスと記す）を変化した場合の計測結果を示す。同データは、ワークディスタンスの変化の影響を受けにくい本計測方法の特徴を検証することと、計測値のばらつきの程度を再度調べたものである。同データでは、ワークディスタンスを大幅に変更しても、段差計測値の変化が少なく、 $\pm 0.6\text{nm}$ の範囲に納まっている。このばらつきは、試料の姿勢変化やステージの送り変動補正の誤差などによるとみられ、ワークディスタンスの変化の影響が少ないというこの計測方法の特徴を示す結果となっている。

5. ま と め

白色干渉法とヘテロダイン干渉法を併用することによって、mmオーダの大段差をnmオーダの精度で計測することを試みた。

まず最初にnm計測の誤差要因と要因別に誤差を列挙した。そして、これらの総合誤差が1.3nm程度に収まることを示した。

つぎに、5個の試料につき8回の繰返し計測を実施した結果、データのばらつきは標準偏差で0.9nmであった。この値は、各種の振動や試料の取付け姿勢等の影響を含んだものであり、空気除振台と一体化鏡筒の利用による振動の低減、アクリルカバーによる空気の流れと周囲騒音の低減、ステージ送り変動分の減算補正によって、得られたものである。

このほかに、本方法では2個のウォラストンプリズムを背面对称に配列することによってアライメント調整が容易になり、かつ、ワークディスタンスを大きく自在に取れるという特長を得ることができた。

参 考 文 献

- 1) Y.Martin, C.C.Williams and H.K.Wickramasinghe: Atomic Force Microscope-Force Mapping and rofiling on a sub100-Å scale, J.Appl.Phys. 61,10 (1987) 4723.
- 2) 中山 貴: STMファミリーにおけるレーザーの利用, レーザー研究, 19,2 (1991) 147.
- 3) 津田展宏, 山田啓文, 単学伝, 佐藤秀寿, 加藤博行, 打田忠: AFM の試作と回折格子の形状測定, 精密工学会誌, 57,9 (1991) 1615.
- 4) F.A.Jenkins and H.E.White: Fundamentals of Optics, McGraw-Hill, New York, (1982) 271.
- 5) 松本弘一: 最新精密計測技術, 総合技術センター (1987) 149.
- 6) 末田 哲夫: 光学部品の使い方と留意点, オプトロニクス社, (1990) 290.
- 7) 田中 充: 最近のナノメートル計測技術, 応用物理, 56,6 (1987) 734.
- 8) G.E.Sommargren: Optical Heterodyne Profilometry, Appl.Opt., 20,4 (1981) 610.
- 9) 鶴田 匡夫: 応用光学II, 培風館 (1990) 159.
- 10) 桜井 好正: 光学的測定ハンドブック, 朝倉書店, (1982) 570.