回折格子を用いた精密変位検出法*

森 山 茂 夫** 原 田 達 男**

A Precision Displacement Measurement
Using a Diffraction Grating

Shigeo MORIYAMA and Tatsuo HARADA

A new precision displacement measuring method using a diffraction grating was investigated. In this paper, the measuring principle and the experimental results are described. The measuring principle is based on an interference phenomenon. Interference fringes are produced by superposing of a pair of positive and negative order diffraction beams obtained by illuminating the grating perpendicularly with a monochromatic light beam. The displacement of the grating causes sinusoidal change

in brightness of the fringes. The displacement measurement is carried out by counting the fringes photoelectronically. Experimental system was constructed by using a reflection grating with the period of $1.43 \mu\text{m}$ and a laser diode as the monochromatic light source. The measuring performance with the precision of $0.1 \mu\text{m}$ over the range of 20 mm was confirmed in the experiment. An application to two-dimensional displacement measurement is also proposed.

Key words: displacement measurement, diffraction grating, interference fringes, linear scale, two-dimensional displacement measurement.

1. 緒 言

リソグラフィ関連の半導体製造装置をはじめ最近の多くの超精密機械においては、精密位置検出ならびに位置決め技術は必要不可欠な重要な技術となっており、それらの精度、特に位置検出精度が装置全体の精度を左右する場合も少なくない。しかしながら上記リソグラフィ装置用途に要求されるような、100 mm 以上の検出範囲にわたってサブミクロンの検出精度が得られる位置または変位量の検出器はこれまでレーザ干渉測長器とモアレじまを利用した光電式リニヤスケールが実用化されているにすぎなかった。

レーザ干渉測長器は $0.1 \mu\text{m}$ 以上の高精度検出が可能であるが、その反面装置構成が複雑・大型化する上に非常に高価であるという欠点を有している。他方、光電式リニヤスケール^{1)~4)}は小型・低価格であるものの、光の回折現象に起因する格子ピッチ上の制約から精度的には $0.5 \mu\text{m}$ 程度が限界であり、また従来の光電式リニヤスケールでは非接触検出とはいえ検出部を移動スケールにごく近接して配置せねばならず、使用上の制約をまねいていた。

このような背景のもとに筆者らは、従来型変位検出器の欠点を補った、小型・簡略かつ高精度な変位検出器を開発すべく検討を重ねてきたが、このほど新しい光学的変位検出法を考案、実験的にその作動を確認した。本検

出法は回折格子を基準スケールとする一種のモアレ干渉法に基づくものであるが、作動距離（移動物までの非接触空間距離）を 10 mm 程度とりながら $0.1 \mu\text{m}$ の検出精度が得られ、更に超小型・ローコストという特長を有している。

本報では検出原理について詳述すると共に、格子定数 $1.4 \mu\text{m}$ の反射型回折格子と半導体レーザによる干渉光源を組み合わせで行った原理実験の結果について述べる。

2. 原理と検出光学系

2.1 検出原理

本検出法は回折格子に単色光を垂直入射し、回折された正負同一次数の光どうしを干渉させて明暗の干渉じまを得るものであり、一種のモアレ干渉法に基づくものと言える。

本検出法の原理を図 1 を用いて説明する。同図に示すように反射型回折格子に波長 λ の単色光が垂直入射し、回折角 β で $\pm m$ 次光が反射回折する場合を考える。回折格子上の点 A における光学的位相を ϕ_A とし、空間上

Fig. 1 Diffracted light by reflection grating

* 原稿受付 昭和 57 年 8 月 16 日。昭和 57 年度精機学会春季大会学術講演会（昭和 57 年 3 月 23 日）にて発表。

** 正 会 員 （株）日立製作所（国分寺市東恋ヶ窪 1-280）

の任意の点Cにおける $+m$ 次光に関する位相 $\phi_C^{(+m)}$ を考えれば、 $\phi_C^{(+m)}$ は $\phi_E^{(+m)}$ と同一であり、更に $\phi_B^{(+m)}$ は ϕ_A と同一であるから $\phi_C^{(+m)}$ は式(1)で表せる。但し $\phi_E^{(+m)}$ 、 $\phi_B^{(+m)}$ はそれぞれ $+m$ 次光に関する点E、点Bの位相を表すものとする。

$$\phi_C^{(+m)} = \phi_A - \frac{2\pi}{\lambda} \overline{BE} \quad (1)$$

ここで

$$\overline{BE} = \overline{AN} \cdot \sin \beta - \overline{CN} \cdot \cos \beta$$

であるから式(1)は式(2)のようになる。

$$\phi_C^{(+m)} = \phi_A + \frac{2\pi}{\lambda} \overline{CN} \cdot \cos \beta - \frac{2\pi}{\lambda} \overline{AN} \cdot \sin \beta \quad (2)$$

同様に $-m$ 次光に関する位相 $\phi_C^{(-m)}$ は式(3)で表せる。

$$\phi_C^{(-m)} = \phi_A + \frac{2\pi}{\lambda} \overline{CN} \cdot \cos \beta + \frac{2\pi}{\lambda} \overline{AN} \cdot \sin \beta \quad (3)$$

点Cにおける上記二つの回折光の位相差 $\Delta\phi_C$ を考えれば式(4)のごとく求まり、ここに光の回折の関係式 $d \cdot \sin \beta = m\lambda$ を代入して結局式(5)を得る。但し d は回折格子の格子定数(格子溝のピッチ)である。

$$\begin{aligned} \Delta\phi_C &= \phi_C^{(+m)} - \phi_C^{(-m)} \\ &= -\frac{4\pi}{\lambda} \overline{AN} \cdot \sin \beta \end{aligned} \quad (4)$$

$$= -2\pi \frac{\overline{AN}}{(d/2m)} \quad (5)$$

式(5)の意味するところは、空間上の点Nに対して点Aすなわち回折格子が x 方向に移動すると点Cにおける両回折光の位相差に変化を生じることであり、その位相差変化は $d/2m$ を周期として繰り返す。そこで両回折光が良く干渉するように進行方向を一致させれば明暗の干渉縞を得ることができ、この干渉縞の数を数えることにより回折格子の変位量を知ることが可能となる。

式(5)において位相差 $\Delta\phi_C$ は距離 $\overline{AN}$ 、回折格子の格子定数 d および回折次数 m のみに依存し、単色光源の波長 λ には依存していない。このことから本検出原理においては、光源の波長 λ の大きさが変位の検出感度に影響を与えることはなく、光源としては可干渉な単一波長を有する単色光であれば良いことになる。

2.2 検出光学系

上記検出原理を実現する最も基本的な光学系を図2に示す。点光源からの単色光をコリメータレンズによって平行光とし、反射型回折格子に垂直に入射させる。そこで回折された ± 1 次の回折光 a, b をお互いに平行な反射鏡によってそれぞれ反射させた後ビームスプリッタを用いて合成、干渉させ、得られた明暗の干渉光をフォ

Fig. 2 Basic optical arrangement

Fig. 3 Improved optical arrangement permitting small misalignment of grating

トデタクタにより光電変換する。原理的にはこの光学系で検出可能であるが、実際には回折格子移動時に伴う回折格子の微小な傾き等のために幾何的な光路図形が理想的な対称図形からくずれ、干渉すべき二つの光の進行方向が平行でなくなるために良好な干渉信号が得られなくなる。

そこでこのような光学系のミスアライメントに対して寛容な、図3に示す検出光学系を考案した。回折格子に垂直入射して回折された正負次数の回折光 a, b をそれぞれキューブコーナあるいはポロプリズム等を用いて再び回折格子に対して斜めに入射させ、回折格子に対し垂直に回折された光 a', b' を取り出して干渉させる。キューブコーナでは出射光は入射光に対して常に平行となるため、回折格子の傾きに関係なく二度目に回折された光 a', b' はいずれも光源からの垂直入射光に対して平行となって良好な干渉性を得ることができる。キューブコーナの代わりにポロプリズムを用いた場合、回折格子の傾きに依じて回折光 a', b' も傾くが、両者の平行性は確保されるためやはり安定な干渉が得られる。また回折格子の上下動はいずれの場合にも回折光 a', b' の平行移動の原因となるが、ビーム径が重なっている限りは有効に干渉するため多少の上下動は許容される。

更に本検出光学系においては光が二度回折されるため、干渉の明暗周期は式(5)中に示される $d/2m$ の $1/2$ 、

Fig. 4 Photograph of optical head
Unit of scale in photograph is cm

すなわち $d/4m$ ごととなって検出感度が倍増される利点も得る。

本検出器では回折格子の移動方向弁別のため、偏光を利用して二相信号を作り出している。すなわち、図3に示すように回折光 a, b の光路中に偏光板 P_1, P_2 を挿入し、二度目に回折する光 a', b' を偏光軸がそれぞれ直交する直線偏光とする。これらの直線偏光 a', b' はビームスプリッターで二分された後、更にそれぞれの偏光軸と 45° の角をなす偏光軸を有する偏光板 P_3 と P_4 を通過し、それぞれフォトディテクタに入射して明暗信号に変換される。これら二つの明暗信号の位相は偏光板 P_3 と P_4 の偏光軸の角度に依存し、両者を直交させることにより 90° 位相のずれた二相信号を得ることができる。

正弦状に変化する二相信号は一般的な波形整形、符号弁別回路を介して信号処理され、明暗周期の位相 90° ごと、すなわち回折格子の移動量 $d/16m$ ごとのパルス信号に変換され計数される。例えば回折格子として 700 本/mm ($d \approx 1.43 \mu\text{m}$) のものを用い、回折次数 $m=1$ とすれば上記パルスは $0.089 \mu\text{m}$ ごととなる。高次回折光を用いれば更に分解能向上を図れるが、格子定数と光源の波長との兼ね合いからせいぜい 2 次光ぐらいまでが利用

できる限度であろう。

これまで述べた検出光学系ではすべて反射型の回折格子としたが、検出原理から明かなようにこれを透過型とすることも可能である。透過光学系を用いた場合でも検出感度は同一であり、前述した光学系ミスアライメントに関しても反射光学系に比べて大幅に寛容となるが、光源と受光光学系を回折格子をはさむように配置せねばならず、その応用範囲が制約される。

3. 検出実験

前章に述べた検出原理を確認するため実際に検出光学系を試作し、変位検出実験を行った。試作検出部の外観写真を図4、実験装置のブロック図を図5に示す。

実験に用いた反射型回折格子は、ガラス基板上の金蒸着膜上に有効長さ 20 mm にわたって 700 本/mm ($d \approx 1.43 \mu\text{m}$) の格子溝を刻線したものであり、当日立中央研究所所在のルーリングエンジン⁵⁾を用いて製作された。図6は上記回折格子の格子溝間隔精度を示す 1 次回折波面の干渉じま写真であり、基準スケールとして十分な $0.05 \mu\text{m}$ 以上の溝間隔精度を有しているものと確認される。干渉光源としては超小型ながら比較的大きな出力をとり出せる赤外半導体レーザ (波長 $\lambda=840 \text{ nm}$, 連続出力 3 mW) の利用を試みた。コリメータレンズは焦点距離 $f=5 \text{ mm}$, N.A.=0.25 の単凸レンズを用い、有効径 $\phi 2.5$ の平行ビームを作り出す。

検出光学系の幾何的寸法は主として正負回折光の回折角 β と作動距離によって定められる。回折角 β は $\sin^{-1}(m\lambda/d)$ で与えられ、1 次回折光 ($m=1$) を用いる本実験では約 36° となる。他方、作動距離として、機器組込みの容易さを考慮して 10 mm をとれば、検出光学系の大きさは図4に示す程度のものとなる。

回折光を折り返す反射光学系としてはキューブコーナが最も望ましいが、本実験では製作容易な直角二面鏡とし、これをレプリカ法⁶⁾で製作した。

Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup

Fig. 6 Interferogram of the grating
used in experiment
1st order, $\lambda=633 \text{ nm}$

Fig. 7 Two-phase signals obtained from photodetectors

フォトディテクタで光電変換して得られる干渉じまの明暗信号は前置増幅、波形整形の各回路を経てパルス化され、更に符号弁別回路によって回折格子の移動方向に対応したパルス列とされて UP-DOWN カウンタで計数される。このカウンタの内容は数字表示器により十進数で表示されるが、その単位は $d/16$ 、約 $0.09 \mu\text{m}$ 相当である。本実験ではこの最小分解能より微細な変位検出量を知るためアナログ二相信号をオシロスコープ上にリサーチ図形として描かせ、0.1 パルス相当まで読み取る。

反射型回折格子はストローク 25 mm の移動台上に設置され、マイクロメータヘッド送りされる。この回折格子の設置に際しては、検出光学系からのレーザービームと垂直、かつフォトディテクタへ入射する二つの光が重なるよう、回折格子の姿勢をアライメントする。このアライメントに際し赤外レーザー光は目視できないため、レーザー光を Kodak 社の IR-Phosphor プレートに照射、可視光に変換しながらアライメントした。

移動台の移動量は HP 社 5526 A 型レーザー干渉測長器により $0.01 \mu\text{m}$ 分解能で測定し、本検出器の検出精度を調べる基準とする。

4. 実験結果

図 5 の実験装置において、移動台を約 0.4 mm/s の速度で連続的に移動させて得られた二相干渉信号を図 7 に示す。この二相信号の時間周期から換算し、この明暗信号は回折格子移動量約 $0.36 \mu\text{m}$ を周期とするものであることがわかり、第 2 章に述べた検出原理の妥当性が実証された。

図 8 は試作検出器の直線性と検出再現性を調べた結果である。この測定はまず、レーザー測長値を見ながら移動台を 1 mm ごとに正確に静止し、その時の累積パルス数とリサーチ図形から読み取れる 1 パルス以下の端数を加算して検出移動量とする。これを回折格子の有効長さ

Fig. 8 Measurement error of experimental setup

20 mm にわたり往復して行い、得られた計 40 点のデータから最小二乗法を用いて最も適切な検出パルスの長さ換算係数を求める。実験の結果、この係数は $0.089283 \mu\text{m}/\text{パルス}$ と求まり、この係数を用いて前記 40 点の検出位置を μm 単位に換算、その値のレーザー測長値からの差を本検出器の検出誤差として示したものが図 8 である。同図より、検出距離は 20 mm と短いものの直線性誤差は $0.1 \mu\text{m}$ 以下、また検出再現精度も $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 程度で有意なヒステリシスは存在しないことがわかる。

上記の実験から検出パルスの長さ換算係数は $0.089283 \mu\text{m}$ と求まったが、この数値から逆に回折格子の格子定数 d を算出すると $d = 1.4285 \mu\text{m}$ ($\approx 700.02 \text{ 本/mm}$) となり、回折格子の刻線に用いたルーリングエンジンの割出し格子定数 $d = 1.4286 \mu\text{m}$ ($\approx 699.99 \text{ 本/mm}$) とわずか 6×10^{-5} の誤差で一致する。この誤差は回折格子の長さ 20 mm に対しては $-1.2 \mu\text{m}$ となるが、これはルーリングエンジン刻線時の温度 28°C に比べて本測定時の室温は約 22°C と 6°C ほど低く、回折格子ガラス基板の線膨張率 $9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ に起因する熱収缩量 $-1.1 \mu\text{m}$ を考慮すれば両者はほとんど一致する。

5. 検 討

前章までの実験から本検出器は予想通りの精度で変位量検出を行えることがわかったが、以下本検出器を実用化する上でのいくつかの問題点について検討する。

第一の問題点は本検出器の絶対精度に影響する回折格子の熱膨張である。基本的な問題解決は回折格子素材として熱膨張係数 α の小さい物質を選ぶことであるが、100 mm の検出距離に対しては石英ガラス ($\alpha = 5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$) でも $0.05 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ の誤差を生ずる。検出法を反射型のみに限定して光の透過率を無視すれば、インバー系超不変鋼 ($\alpha = 1 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$) などの低熱膨張合金を回折格子のレプリカ基板として用いることにより、 5°C の温度変化があっても $0.05 \mu\text{m}$ 以下の誤差とすることが可能である。しかしながら測定温度が常温より大きく異なる場合には、検出パルスの長さ換算係数をその温度に対して補正するような手段が必要となろう。

第二の問題点は干渉信号の強度変動に起因する検出誤差である。本実験では明暗の干渉信号を一定値のスライスレベルで比較・整形する DC 信号処理により計数パルスを得たが、この信号処理方法では光源の強度変動や回折格子の局所的な汚れ等による干渉光のレベル変動が検出誤差となる。特に光源として用いている半導体レーザの光出力は温度依存性が大きい、その影響は大きい。

最も根本的な解決法は検出器の干渉光路内に光路長変動手段を設け、干渉信号を AC 信号として処理することであるが、上記手段を光路内にコンパクトに組み込むことは実際上むずかしい。その次に考えられる方法は干渉光のレベル変動に応じてスライスレベルを変化させる、または干渉信号のレベルが一定となるようにゲインサーボする方法であるが、いずれも干渉信号のレベル変動をいかに検出するかがキーポイントとなる。干渉信号の強度レベルを得る一つの方法は、図 3 における回折光 a' , b' の一部を取り出し、これを一つのフォトディテクタに入射させて光電変換する方法である。上記回折光 a' , b' は偏光軸が直交しているためお互いに干渉せず、光電変換して得られる信号は回折光 a' , b' の強度和、すなわち干渉信号の強度レベルに比例した信号となる。

半導体レーザでは発振波長も温度依存性が比較的大きい。本検出器は前述したように原理的には光源の波長変動によって誤差は生じないものの、実際の検出光学系においては正負次数回折光路の幾何形状が完全には対称でなく、光路長に差がある場合にはその差に比例した誤差を生ずる。光路長の差を L 、レーザ波長を λ 、波長変動を $\Delta\lambda$ とすると変動前後に生ずる干渉じまの数 N は式 (6) で表され、干渉じま 1 周期に相当する移動量を $d/4$ とすれば、結局波長変動によって生ずる検出誤差 ϵ は式 (7) で計算できる。

$$N = \frac{L}{\lambda} - \frac{L}{\lambda + \Delta\lambda} \approx L \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2} \quad (6)$$

$$\epsilon = \frac{d}{4} N = L \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2} \cdot \frac{d}{4} \quad (7)$$

一例として $L=0.1$ mm, $\Delta\lambda=1$ nm とした場合、検出誤差 ϵ は約 $0.05 \mu\text{m}$ であり、 $0.1 \mu\text{m}$ の検出精度を追求する上では無視できない量である。半導体レーザの波長安定化技術はまだ実用化段階に達しておらず、検出光学系の正確なアライメント法を考案する必要がある。

これまでは一次元の変位検出法として述べてきたが、本検出原理によれば、回折格子として X, Y, Z 方向に刻線したクロス型格子を用いることにより XY 二次元の変位検出も可能であり、 X - Y 移動台等へ組み込むことにより座標寸法測定器や精密位置決め試料台など広い応用が期待できる。

6. 結 言

レーザ干渉測長器に代わる、コンパクトかつローコストな $0.1 \mu\text{m}$ 精度の非接触型変位検出器の開発を目的とし、基準スケールからの回折光を利用する新しい光学式変位検出法を考案し、実験的にその検出原理を確認した。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 回折格子に単色平行光を垂直入射させ、その結果得られる正負同一次数の回折光どうしを干渉させると明暗の干渉じまを生じ、格子溝と直角方向の回折格子の移動に伴ってその明暗は周期的に変化するため、その明暗数を計数することにより回折格子の移動量を知ることができる。
- (2) 干渉じまの明暗周期は回折格子の移動量 $d/2m$ (d : 格子定数, m : 回折次数) ごとであり、入射光の波長には依存しない。
- (3) 上記原理を確認するため、格子定数 $1.4 \mu\text{m}$ の反射型回折格子と赤外半導体レーザによる干渉光源とを組み合わせ検出実験を行った。その結果、信号処理に十分な S/N の干渉信号が得られ、移動距離 20 mm に対する検出誤差は $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 以下であった。またこの実験から、干渉光源としての半導体レーザの有用性を確認できた。

参 考 文 献

- 1) L. A. Sayce: Gratings in Metrology, J. Phys., E: Sci. Instrum., 5, (1972) 193.
- 2) 吉田庄一郎: 光電式エンコーダ, 高精度, 3, 3 (1971) 28.
- 3) G. N. Rassudova: The Use of Reflection Diffraction Gratings in Interference Systems for Measuring Linear Shifts, II, Opt. Spectrosc., 14, 4, (1963) 295.
- 4) 大野 勇, 桑原 一: サーボ用変換器, 計測と制御, 18, 11 (1979) 12.
- 5) 原田達男ほか: 無収差凹面回折格子用数値制御ルーリングエンジンの開発, 精密機械, 42, 9 (1976) 888.
- 6) G. W. Stroke: Handbuch der Physik, Vol. 29, Springer-Verlag, New York, N. Y., (1967) 734.