

## 技術報告

## 細線状反射鏡型ナノメートル分解能高感度変位センサー

北島 博愛・小嶋 幹男・久恒 正希・水野 英明

九州工業大学工学部電気工学科電子工学教室 〒804 北九州市戸畑区仙水町 1-1

(1992年12月2日受付, 1993年3月8日受理)

A Highly Sensitive Displacement Sensor with  
a Resolution of Nanometer Order in a  
Fine-Wire-Like Cylindrical Reflection Mirror

Hiroe KITAJIMA, Mikio KOJIMA, Masaki HISATUNE and Hideaki MIZUNO

Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology,  
1-1, Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu 804

(Received December 2, 1992; Accepted March 8, 1993)

A highly sensitive displacement sensor has been constructed that is based on the characteristics of the change of the reflected ray inversely proportional to the curvature radius of a cylindrical mirror. A cylindrical mirror is composed of a fine wire or a reflection grating with radius of several tens micrometers.

## 1. ま え が き

半導体集積素子, 精密光学機器等の設計や超精密加工, あるいは次世代光ディスクプレーヤーの精密位置制御等に関連して, クォーターサブミクロンからナノメートルオーダーの分解能を有する微小変位センサーの開発が要請されている<sup>1,2)</sup>.

微小変位センサーとしては, 臨界角法<sup>3)</sup>, 非点収差法<sup>2)</sup>, ナイフエッジ法, ヘテロダイナ検波法<sup>4)</sup> や光点変位法等があり, ナノメートルオーダーの分解能を有するが, いずれの場合も光路長はセンチメートルオーダーの光学系となるので, 変位センサーとして精密機械に組み込むことを容易にするため, ミリメートルオーダーの光路長の変位センサーの開発が要請されている.

本論文では金属細線や光学回折格子の溝等を円筒反射鏡として用いた場合に, その曲率半径が小さい程微小変位に対する反射光の反射角変化が大きくなることに着目した. このとき, 集光レンズで集光した光スポットを反射鏡に入射させた際に, 細線状反射鏡からの反射光が集光レンズに入射すると, そのレンズからの出射光の角度変化は集光レンズの光学定数で決まり, 顕著な角度変化

は得られなくなるから, 反射鏡からの反射光が再び集光レンズに入射しないような系を構成している. すなわち, 光線を円筒反射鏡の中心軸よりずれた位置に入射させるか, または光線を円筒反射鏡の長さ方向に対して斜角を持たせ入射させている. 例えば, 半径  $10\ \mu\text{m}$  の金線を反射鏡として用いると, 光路長  $5\ \text{mm}$  で 1000 倍の光重心点変位が得られ, それを半導体光重心点位置検出素子 (PSD) で検出することにより, ナノメートルオーダーの分解能を持つ高感度変位センサーが実現し得ることがわかったので報告する.

## 2. 原理と光学系

Fig. 1 に示すように, 半径  $R$  の円筒反射鏡の  $X=X_0$  および  $Y=Y_0$  の点 A に光線が入射すると, 光線は反射鏡の中心点 O と点 A を結ぶ線を法線として反射し, PSD 上の点 C に入射する. いま円筒反射鏡が  $\Delta X$  だけ変位すると入射光線は点 B より反射する. その際, 円筒反射鏡の中心点 O' と点 B を結ぶ法線と X 軸とのなす角は  $\alpha$  から  $\alpha + \Delta\alpha$  へと変化する. したがって, 点 B から反射した光線は点 A から反射した光線より  $2 \cdot \Delta\alpha$  だけ変化して PSD 上の点 D に入射する.

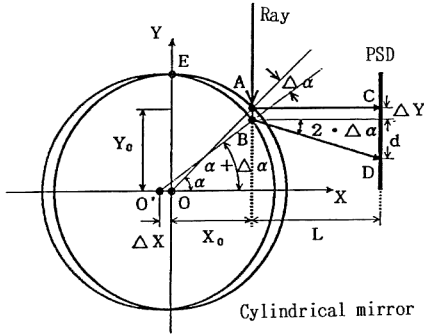


Fig. 1 Cylindrical mirror and reflection angle.

同図より,

$$R \cdot \cos(\alpha + \Delta\alpha) = X_0 + \Delta X \quad (1)$$

$$\alpha = \cos^{-1}(X_0/R) \quad (2)$$

ここで  $\Delta\alpha$  を  $(\Delta X/R)$  の2次の項まで求めると,

$$\Delta\alpha = \frac{-1}{\{1 - (X_0/R)^2\}^{1/2}} \cdot \frac{\Delta X}{R} - \frac{X_0}{2R} \cdot \frac{1}{\{1 - (X_0/R)^2\}^{3/2}} \cdot \frac{(\Delta X)^2}{R^2} \quad (3)$$

である。PSD 上での光重心点変位は  $d + \Delta Y$  で,

$$\Delta Y = R \cdot \{\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin \alpha\} \quad (4)$$

$$d = 2 \cdot \Delta\alpha \cdot L \quad (5)$$

と示される。ただし、 $L$  は反射点から PSD 受光面までの距離で、 $Y$  軸に平行に入射した場合は、円筒反射鏡の微小変位に対して一定である。ここで、(4)式から、 $\Delta Y$  は光路長  $L$  に無関係であるので、(5)式から、 $L$  を大きくとることにより、 $\Delta Y \ll d$  とすることができるから、円筒の  $X$  軸方向変位に対する光重心点変位の  $\Delta Y$  は無視することができる。また、(5)式中の  $\Delta\alpha$  は(3)式の右辺第2項の  $(\Delta X/R)$  の2次の項に係数  $X_0$  を含んでいるので、円筒の中心が入射点であれば  $X_0=0$  となり、 $(\Delta X/R)$  の2次の項の影響がないが、中心軸からずれた位置に入射すると  $X_0$  がゼロでなくなり  $(\Delta X/R)$  の2次の項の影響が現れるので、 $d$  の  $\Delta X$  に対する直線域が狭くなる。

2次の項を無視した1次近似の光線マトリクスは、

$$\begin{bmatrix} \Delta X_2 \\ \Delta X_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{2}{R} \cdot \frac{-1}{\{1 - (X_0/R)^2\}^{1/2}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta X_1' \end{bmatrix} \quad (6)$$

となる。ここに、 $\Delta X_1, \Delta X_1'$  は入射光の入射位置および入射角で、 $\Delta X_2, \Delta X_2'$  は反射光の反射位置および反射角である<sup>5)</sup>。光路長を  $L$  として、 $\Delta X_1' = 0$  と仮定すると、円筒反射鏡の変位  $\Delta X$  に対する反射光の光重心点変位の倍率  $M$  は、

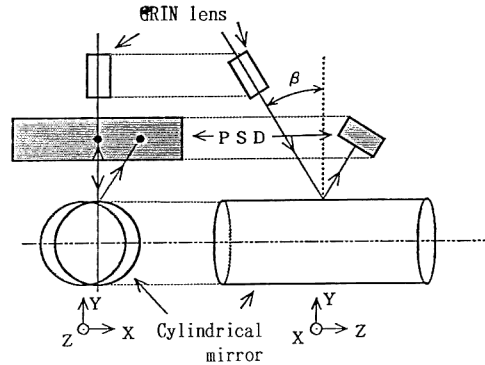


Fig. 2 Schematic for oblique angle incidence into a cylindrical mirror.

$$M = \left| \frac{\Delta X_2' \cdot L}{\Delta X_1} \right| = \frac{2}{R} \cdot \frac{L}{\{1 - (X_0/R)^2\}^{1/2}} \quad (7)$$

となる。 $R, L, X_0$  の単位はいずれも mm である。

ここで円筒反射鏡は凸面鏡であるのに対して、光学回折格子等の溝を反射鏡として用いれば凹面鏡となるが、凹面鏡の場合は光線マトリクスの式(6)の曲率半径  $(-R)$  を正  $(+R)$  にすればよい。

具体的数値例として、円筒反射鏡の半径  $R = 10 \mu\text{m}$  で  $\alpha = \pi/4$  ラジアンの場合、光路長  $L = 10 \text{ mm}$  で倍率  $M = 2828$  倍となる。

通常の光学系では収差を小さくするために、円筒反射鏡の中心軸に光線を入射させる。すなわち、Fig. 1 において  $X_0=0$  として、入射点を  $E(X=0, Y=R)$  とする。すると、(3)式における  $(\Delta X/R)^2$  の項がゼロになり、 $\Delta X$  に対する  $d$  の直線域は広がる。しかし、垂直入射の場合、Fig. 2 のように入射させないと、集光レンズに反射鏡からの反射光が再び入射してしまう。集光レンズからの出射角変化は主として集光レンズの光線マトリクス要素 (A, B, C, D) の  $|C|$  の値と集光レンズへの入射光の位置変位量との積で決まる。細線状反射鏡からの反射角変化は非常に大きい、集光レンズと円筒反射鏡間の距離が短い (1mm 以内) ので、集光レンズ端面における反射光の位置変化は小さい。したがって、集光レンズからの出射光の光重心点変位を 1000 倍ぐらいに拡大するには、従来の光学系と同等の光路長を必要とする。したがって、集光レンズから出射する光重心点変位の倍率は集光レンズの光学定数により制限され、このような短い光路長での高倍率は得られない。したがって、円筒反射鏡からの反射光が集光レンズに入射しないように、反射鏡の円筒断面の中心軸 (Fig. 1 における  $Y$  軸) からずれる位置に光線を入射させることも本論文の特徴である。また、Fig. 2 に示す光学系のよう

に X-Y 面の円周上では、入射光線を Fig. 1 における E 点に入射させ、反射鏡の Z 軸方向に対しては斜角に入射させた場合も考察している<sup>9)</sup>。

なお、円筒反射鏡が Y 軸方向に  $\Delta Y$  変位した場合は入射光の反射点の位置が  $\Delta Y$  だけ変化するが、変位した反射鏡の中心点と入射点とを結ぶ法線と X 軸とのなす角  $\alpha$  は変化しないので PSD 面上での光点変位は  $\Delta Y$  のみで光路長  $L$  によって拡大されない。したがって、Fig. 1 に示す光学系では主として X 軸方向の変位のみを拡大して検出することになる。

### 3. 数値例および実験結果と考察

Fig. 3 に直径  $20\ \mu\text{m}$  の反射鏡の微小変位に対する入射光の反射角変化の数値例を示す。同図(a)は  $\alpha = \pi/2$  の場合で、 $X_0 = 0$  を中心に  $\Delta X = \pm 1.6\ \mu\text{m}$  の範囲に対して誤差は 0.5% 以下、 $\Delta X = \pm 3.4\ \mu\text{m}$  で誤差は 2% 以下である。同図 (b) は  $\alpha = \pi/4$  の場合で、 $X_0 = 7.07\ \mu\text{m}$  を中心に  $\Delta X = \pm 0.06\ \mu\text{m}$  の範囲で誤差は 0.5% 以下、 $\Delta X = \pm 0.26\ \mu\text{m}$  で誤差は 2% 以下となる。

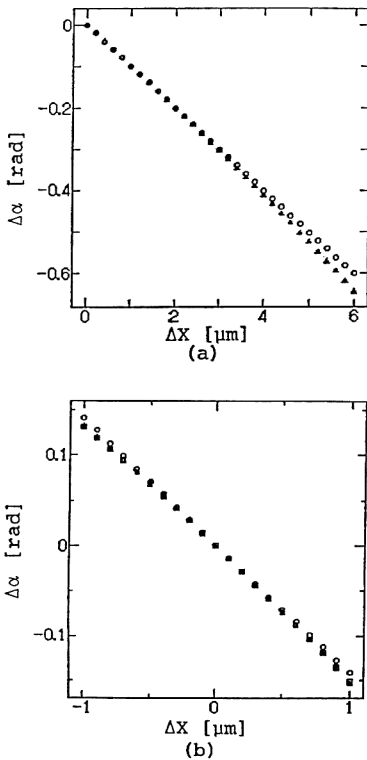


Fig. 3 Small displacement vs. reflection angle.  $\circ$ : 1st. approximation,  $\square$ : 2nd. approximation,  $\triangle$ : Strict solution, (a)  $R = 10\ \mu\text{m}$ ,  $\alpha = \pi/2$ , (b)  $R = 10\ \mu\text{m}$ ,  $\alpha = \pi/4$ .

実験に用いた光学系は、直径  $20\ \mu\text{m}$  の市販の金線を円筒反射鏡として用い、レンズは特注の先球分布屈折率レンズ (曲率半径  $0.9\ \text{mm}$ ,  $|C| = 1.0/\text{mm}$ ) を用い、一次元 PSD の有効長は  $10\ \text{mm}$ 、分解能は  $0.3\ \mu\text{m}$  のものを用いている。反射鏡と PSD 間の距離  $L$  は約  $5\ \text{mm}$  としている。ただし、PSD に入射するスポット径が大きくなっているため、仮に分解能が  $1\ \mu\text{m}$  に低下していると仮定すると、光点変位の倍率を 1000 倍にすればナノメートルオーダーの分解能が得られると思われる。

なお、誤差を [直線からのずれ]/[変域の長さ]  $\times 100\%$  と定義する。

Fig. 4 は  $\alpha = \pi/2$ ,  $\beta = \pi/4$  の場合で記録紙上で  $56,000$  倍に拡大されている。Fig. 4 は  $\pm 1.5\ \mu\text{m}$  の変域に対して誤差  $\pm 2.5\%$  以内である。

Fig. 5 は  $\alpha = \pi/4$  の場合で、記録紙上  $437,500$  倍の高倍率で測定しており、 $\pm 0.15\ \mu\text{m}$  の変域に対して誤差

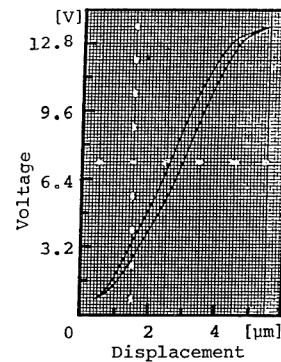


Fig. 4 Characteristics of cylindrical mirror displacement vs. optical centroid displacement output. (Oblique angle incidence,  $\alpha = \pi/2$ ,  $\beta = \pi/4$ ;  $R = 10\ \mu\text{m}$ ,  $M = 56,000$ )

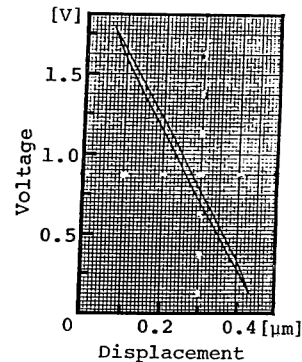
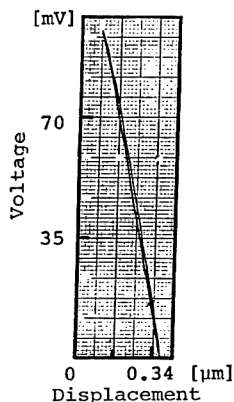


Fig. 5 Characteristics of cylindrical mirror displacement vs. optical centroid displacement output. (Normal incidence,  $\alpha = \pi/4$ ,  $\beta = 0$ ;  $R = 10\ \mu\text{m}$ ,  $M = 437,500$ )



**Fig. 6** Characteristics of groove mirror displacement vs. optical centroid displacement output. (Oblique angle incidence,  $\alpha=\pi/2$ ,  $\beta=\pi/4$ ;  $M=735,000$ )

$\pm 2.5\%$  以内である。これより、 $2\text{ nm}$  の変位に対して記録紙上では  $0.87\text{ mm}$  変位しているの、ナノメータオーダーの分解能を持っていることがわかる。

**Fig. 6** は格子周期  $10\text{ }\mu\text{m}$  の回折格子 (島津 G-100) に金をスパッタして、その格子溝を凹面鏡として  $\alpha=\pi/2$ ,  $\beta=\pi/4$  として測定したものである。記録紙上で約  $735,000$  倍に拡大されており、 $\pm 0.08\text{ }\mu\text{m}$  の変域に対して誤差は  $\pm 4\%$  以内である。

これらの実験では円筒反射鏡と PSD までの光路長は、いずれも  $5\text{ mm}$  と短いので、このように数十万倍に拡大してもノイズ成分が少ない。ただし、この実験に用い

た市販の金細線そのものの真円度が疑問であるが、このような細線の真円度の精密な測定技術そのものの開発が必要であるので、本論文では議論していない。

#### 4. む す び

集光レンズで集光して曲率半径が  $10\text{ }\mu\text{m}$  オーダーの細線状円筒反射鏡等に入射させ、その反射光が再び集光レンズに入射しないように工夫することにより、短い光路長で極めて高倍率の光重心点変位が得られ、ナノメータオーダーの高分解能を有する高感度変位センサーが実現し得ることを示した。

今後の課題として、複数の光ビームを用いた多次元変位問題や、位置の精密制御あるいは直線変位域の拡張等が挙げられる。また、細線の真円度の精密測定技術の確立も今後の課題である。

#### 文 献

- 1) 尾上守夫, ほか: 光ディスク技術 (ラジオ技術社, 1989) 序章.
- 2) 大越孝敬, 野田健一: 応用光エレクトロニクスハンドブック (昭晃堂, 1989) 6章.
- 3) T. Kono, K. Miyamoto and T. Musha: "High precision surface sensor," *Appl. Opt.*, **27** (1988) 103-108.
- 4) G.E. Sommargrem: "Optical heterodyne profilometry," *Appl. Opt.*, **20** (1981) 610-618.
- 5) 河野健治: 光結合系の基礎と応用 (現代工学社, 1991) 2章.
- 6) 村上拓大, 小嶋幹男, 北島博愛: "双方向光点変位型表面形状センサ", *信学論(C-I) J75-C1*, **10** (1992) 669-671.