

研究

2分割反射形回折格子レンズを用いた 光ディスク光学系

辰巳 賢二*・松下 匡**

* 三菱電機(株)情報技術総合研究所 〒247 鎌倉市大船 5-1-1

** 三菱電機(株)通信機製作所 〒661 尼崎市塚口本町 8-1-1

(1995年3月9日受付, 1995年7月10日受理)

Optical Head System Using a 2-Divided Reflection Type Grating Lens

Kenji TATSUMI* and Tadashi MATSUSHITA**

* Information Technology R & D Center, Mitsubishi Electric Corporation,
5-1-1, Ofuna, Kamakura 247

** Communication Equipment Works, Mitsubishi Electric Corporation,
8-1-1, Tsukaguti Honmachi, Amagasaki 661

(Received March 9, 1995; Accepted July 10, 1995)

A new focus error detection method for an optical head has been developed using a 2-divided reflection type grating lens (2-divided RGL). The 2-divided RGL produces two diffracted beams whose focus positions are different from each other and a photodetector is placed between each focus position. It has been proven that this focus error detection method is insensitive to wavelength fluctuations. An optical head was constructed with the 2-divided RGL fabricated by UV lithography. If change of the wavelength of the laser diode is less than 10 nm, the offset of the focus error signal is less than $0.5\mu\text{m}$ and the sensitivity degradation is less than 0.5 dB. The experimental results show that the 2-divided RGL has theoretical performance. CD signal reconstruction was performed with the jitter of 22 ns.

1. はじめに

光ディスクシステムではより小型で、高速のアクセスを実現するため、小型、軽量の光ピックアップが要求されている。この要求を実現するためには光ピックアップを構成する部品点数を減ずることが重要である。特に光学系では1個の光学素子に複数の機能をもたせることが有効である。光の回折を利用する回折光学素子 (diffractive optical element; DOE) は任意の波面変換機能を持ち、複数のホログラム領域を1枚の基板上に形成できるので、1個の素子で複数の機能をもつ光学素子が可能である。このようなDOEを用いた光ピックアップ光学系として透過形¹⁻⁴⁾と反射形^{5,6)}を用いたものがある。反射形DOEを用いたものは透過形DOEを用いたものに比べて薄型の光ピックアップが構成可能である。しか

しながら、DOEは波長依存性が高く、光ピックアップ光学系に应用する場合には、フォーカス誤差信号にオフセットを生じるという問題がある。これを解決するためにDOEの ± 1 次回折光を用いた光検出器上での集光ビームパターンが対称になるように位相伝達関数を最適化した ± 1 次回折光の方向と光検出器の分割方向が平行になるような構成⁴⁾、ダブルナイフエッジ法を採用しDOEの1次回折光の方向と光検出器の分割方向が平行になるような構成の光ピックアップ光学系²⁾が提案されている。しかし、前者では面対称の光学系にしなければならず構成に制約を受けること、後者では光検出器での光量損失が大きいことや位置精度が厳しく、感度の設定がしにくいという課題がある。

本論文では、入射光を2つに分割しそれぞれの焦点位置が異なる回折光を発生する反射形DOEを用い、DOE

で分割された2つのビームの焦点位置をそれぞれ光検出器の前後になるようにすることによりフォーカス誤差信号を検出する方式を提案している。本方式では2つの回折光の方向と光検出器の分割方向を平行にできるので波長依存性が小さく、光検出器上のスポットを大きくできるので光量損失を小さくでき、また、焦点位置の差を変化させることにより感度設定が可能である。この反射形DOEは、ディスク照射光とディスクからのピット情報を含む反射光とを分離する機能、集光スポットを常にピット列に追従させるためのフォーカス誤差信号を得るためのセンサー光学系の機能および光路の折り曲げ機能の複数機能を有しており、以下2分割反射形回折格子レンズ(2-divided reflection type grating lens; 2分割RGL)と呼ぶ。2分割RGLおよびこれを用いた薄型の光ピックアップ光学系の設計と実験結果を述べるとともにCDを用いた信号の再生結果について述べる。

2. 光学系の構成

Fig. 1に、2分割RGLを用いた光ピックアップ光学系の構成を示す。光ピックアップは半導体レーザー(LD)、3ビーム用回折格子、6分割光検出器、2分割RGLおよび対物レンズから構成されている。ここで、2分割RGLは xy 座標の x 軸に沿って2つの部分に分割されたRGL-UとRGL-Lとからなっている。この構成において、LDからの出射光は回折格子により情報読取用の主ビームとトラッキング用の2つのサブビームに分割され2分割RGLに入射する。2分割RGLの出射光のうち、0次回折光は 90° 光路が曲げられて対物レンズに入射し、ディスク面上にほぼ回折限界のスポットで集光される。ディスクからのピット情報を有する反射光は逆の光路を通り対物レンズに入射し、LDの発光点を集光点とする集束光に変換され2分割RGLに入射する。2分割RGLのRGL-UおよびRGL-Lでそれぞれ発生する回折光のうち1次回折光は光路が曲げられ、6分割光検出器に集光する光に変換される。

フォーカス誤差信号はRGL-UおよびRGL-Lでそれぞれ発生する1次回折光の集光点が6分割光検出器の前後になるようにし、ディスクの変位に対して6分割光検出器上での強度変化が逆になるようにした方法で得ている。また、トラッキング誤差信号はツインビーム法で得ている。

Fig. 2はフォーカス誤差信号に関し、6分割光検出器上での集光ビームの形状がディスクと対物レンズの距離によりどのように変化するかを模式的に示したものであ

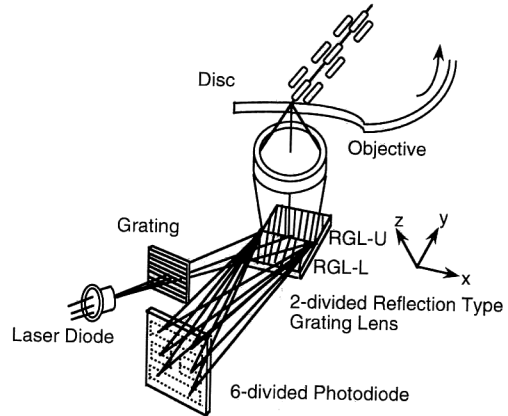


Fig. 1 Schematic view of an optical head with the 2-divided reflection type grating lens(2-divided RGL).

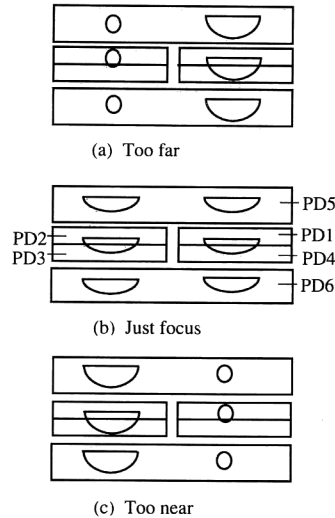


Fig. 2 Spot diagram on the surface of the 6-divided photodiode as the disc is moved. (a) Too far, (b) just focus, and (c) too near.

る。RGL-Uで発生する1次回折光は6分割光検出器を構成する光検出器PD2, PD3上に集光し、RGL-LのそれはPD1, PD4上に集光する。ディスクのフォーカスずれがないときにはFig. 2(b)に示すように、受光面PD₁~PD₆に入射する集光ビームの形状は略半円形になっているが、ディスクが対物レンズより遠ざかったとき、もしくは近づいたときにはそれぞれFig. 2(a), (c)に示すようなビーム形状になる。受光面PD₁~PD₆の光電流値を $I_1 \sim I_6$ とすると、フォーカス誤差信号FESは

$$FES = (I_1 - I_4) - (I_2 - I_3) \quad (1)$$

の演算により得ることができる。トラッキング信号 TES はツインビーム法により

$$TES = I_5 - I_6 \quad (2)$$

の演算により得ることができ、読出し信号 RF は

$$RF = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \quad (3)$$

で得られる。

3. 2分割 RGL の設計

3.1 格子パターン

2分割 RGL の格子パターンは LD, 6分割光検出器, 2分割 RGL の配置関係および LD の発振波長と1次回折光の焦点距離によって決まるものであり, 式(4)で定義される位相差が π の整数倍となる等位相曲線として表現される⁷⁾。

$$\Phi_i(x, y) = \Phi_{LD}(x, y) - \Phi_{Ri}(x, y) \quad (4)$$

式(4)において, 座標系 xyz は2分割 RGL 面上に xy 軸を, xy 平面に垂直に z 軸をとり, 原点は対物レンズの光軸と LD の光軸が交わる点にとっている。 $\Phi_{LD}(x, y)$ は LD を波源としたときの2分割 RGL 面上での位相, $\Phi_{Ri}(x, y)$ は6分割光検出器近傍に点光源 (参照光源) をおいたときの2分割 RGL 面上での位相である。ここで, $i=U$ は RGL-U に対応する参照光源, $i=L$ は RGL-L に対応する参照光源を表す。

LD は yz 平面内にあり z 軸に対して角度 θ をなし, 原点からの距離 R_{LD} のところに設置されている。参照光源は原点からの距離が R_{oi} で yz 平面とのなす角度が ϕ_i であり, 原点とを結ぶ直線を yz 平面に射影したときのベクトルが z 軸となす角度を θ_i とする。したがって, 各点の座標は次のように表せる。

LD の座標点 P_{LD} ; $(0, R_{LD}\sin\theta, R_{LD}\cos\theta)$

参照光源の座標点 P_{oi} ;

$$(R_{oi}\sin\phi_i, R_{oi}\cos\phi_i\sin\theta_i, R_{oi}\cos\phi_i\cos\theta_i) \quad (5)$$

$(i=U, L)$

2分割 RGL 上の点 $P(x, y, 0)$ と LD との距離を r_{LD} , 点 P と参照光源との距離を r_{oi} , λ_0 を基準波長とすると, 位相差 $\Phi_i(x, y)$ は,

$$\Phi_i(x, y) = 2\pi/\lambda_0 \cdot (r_{LD} - r_{oi}) \quad (6)$$

となり, これが π の整数倍となるよう x, y について解けば格子パターンが求まる。ここで,

$$\begin{aligned} r_{LD} &= \{x^2 + (y - R_{LD}\sin\theta)^2 + R_{LD}^2\cos^2\theta\}^{1/2} \\ r_{oi} &= \{(x - R_{oi}\sin\phi_i)^2 + (y - R_{oi}\cos\phi_i\sin\theta_i)^2 \\ &\quad + R_{oi}^2\cos^2\phi_i\cos^2\theta_i\}^{1/2} \end{aligned} \quad (7)$$

である。式(6), (7)より格子パターンを表す式を求めると, (x, y) に関する2次式が得られ, 楕円群を表して

ることがわかる。

3.2 近軸結像

2分割 RGL は LD が設置されている点 P_{LD} と参照光源の設置位置である点 P_{oi} を光源とする球面波で記録したホログラムと考えることができる。ディスクからの反射光は対物レンズに入射し, LD の発光点をほぼ集光点とする収束光に変換されて2分割 RGL に入射する。ディスクが合焦位置にあるときには, 収束光の集光点は LD の発光点に一致する。ディスクが変位すると収束光の集光点は, LD の発光点から移動するが LD と原点を結ぶ光軸上にあるので主光線の回折方向は変わらない。LD の発光点の近傍 P_c に収束する球面波が2分割 RGL に入射したとき, 回折光は非点光束になるがその近似的な結像関係は Smith の式⁸⁾より次式のように書ける。

$$1/R_s = F_1\cos^2\psi + G_1\sin^2\psi + H_1\sin\psi\cos\psi \quad (8)$$

$$1/R_t = F_1\sin^2\psi + G_1\cos^2\psi - H_1\sin\psi\cos\psi \quad (9)$$

$$\tan 2\psi = H_1/(F_1 - G_1) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} F_i &= 1/R_{oi} + \{(1 - \cos^2\phi_i\sin^2\theta_i)/\cos^2\phi_i\cos^2\theta_i \\ &\quad + \cos^2\theta\sin^2\phi_i\tan^2\theta_i/(1 - \cos^2\phi_i\sin^2\theta_i)\}(1/R_c \\ &\quad - 1/R_{LD}) \end{aligned} \quad (11)$$

$$G_i = 1/R_{oi} + \{\cos^2\theta/(1 - \cos^2\phi_i\sin^2\theta_i)\}(1/R_c - 1/R_{LD}) \quad (12)$$

$$H_i = \{\sin\phi_i\tan\theta_i\cos^2\theta/(1 - \cos^2\phi_i\sin^2\theta_i)\}(1/R_c - 1/R_{LD}) \quad (13)$$

ここで, R_s は球欠像に相当する像点距離, R_t は子午像に相当する像点距離, R_c は点 P_c と原点との距離である。

式(8)~(13)から収束点 P_c が LD から移動したとき ($R_c \neq R_{LD}$) には, 一般に $R_s \neq R_t$, すなわち非点収差が生じることがわかる。この非点収差が大きくなるとフォーカス誤差信号のリニア領域が狭くなったり, 直線性が悪くなる。光学系を薄型にするためには角度 θ, θ_i を 45° 近傍にする必要があり, このとき非点収差を小さくするためには角度 ϕ_i を小さくするのが望ましい。

3.3 波長変化時の主光線の移動方向

LD の発振波長が変化すると2分割 RGL による1次回折光の方向が変化し, 集光スポットは6分割光検出器上を移動するため, フォーカス誤差信号が影響を受ける。LD の発振波長が変化したときの光検出器上の集光スポットの位置変化は文献⁹⁾に記載されている式(9), (10)より求めることができる。Fig. 1の配置を考慮し, 主光線で考えると, 回折光の方向を決める角度 ϕ^1, θ^1 は次式で求められる。

$$\sin\phi^1 = \lambda/\lambda_0 \cdot \sin\phi_i \quad (14)$$

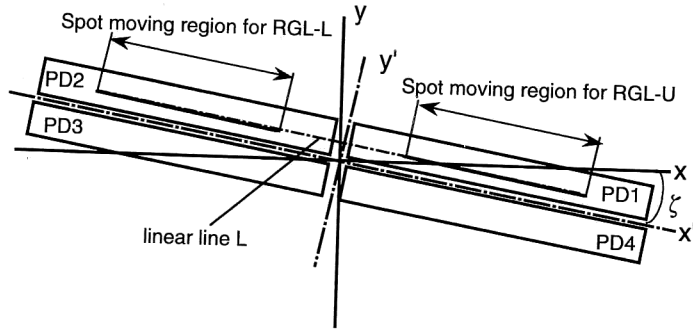


Fig. 3 Trajectory of principal ray on the 6-divided photodiode as the wavelength change of the LD.

$$\cos \phi^1 \sin \theta^1 = (1 - \lambda/\lambda_0 + \lambda/\lambda_0 \cdot \cos \phi_i) / \sqrt{2} \quad (15)$$

式(14)において、回折光の回折角度 ϕ^1 は ϕ_i にほぼ等しいので、 $\phi^1 = \phi_i + \delta\phi_i$ 、 $\lambda = \lambda_0 + \delta\lambda$ と近似すると、 $\delta\phi_i = \tan \phi_i \cdot \delta\lambda/\lambda_0$ となる。角度変化を光検出器上での位置変化に換算すると、

$$\delta x_i = R_{PD} \tan \phi_i \delta\lambda/\lambda_0 \quad (16)$$

が得られる。同様にして、角度 θ^1 の角度変化量 $\delta\theta$ は $\theta^1 = \pi/4 + \delta\theta$ とおき、 $\cos \phi^1 = \cos \phi_i - \sin \phi_i \cdot \delta\phi_i$ と近似して式(15)を用いると、 $\delta\theta = 1/\cos \phi_i \cdot (1/\cos \phi_i - 1) \times \delta\lambda/\lambda_0$ となる。光検出器上での位置変化に換算すると

$$\delta y_i = -R_{PD}(1/\cos \phi_i - 1)/\cos \phi_i \cdot \delta\lambda/\lambda_0 \quad (17)$$

で求められる。ここで、 $\delta\lambda$ は波長変化量、 R_{PD} は原点から6分割光検出器までの距離である。式(16)、(17)から主光線の位置変化量 δx_i 、 δy_i はともに波長変化量 $\delta\lambda$ に比例するので、集光スポットはFig. 3に示すように6分割光検出器上の直線Lに沿って移動することになる。x軸と直線Lのなす角度 ζ は、

$$\zeta = \tan^{-1} \{ -(1/\cos \phi_i - 1)/\sin \phi_i \} \quad (18)$$

となる。したがって、この直線Lと6分割光検出器の分割線を平行に設置すればLDの波長変化時にフォーカス誤差信号にオフセットを生じることはない。Fig. 3に6分割光検出器上での主光線の移動範囲を示す。この主光線の移動範囲は次節で述べるパラメータ値を用いると、波長変化量 ± 10 nmのとき、約 $200 \mu\text{m}$ である。

3.4 集光特性

1次回折光の詳細な集光特性は光線追跡により評価を行った^{10,11)}。本光学系で用いた主要な設計パラメータは以下のとおりである。LDと2分割RGLとの距離 R_{LD} ; 16.4 mm 、6分割光検出器と2分割RGLとの距離 R_{PD} ; 20 mm 、RGL-Uの角度 ϕ_U ; 20.6° 、RGL-Lの角度 ϕ_L ; 19.4° 、LDの設計中心波長 λ_0 ; 780 nm 。角度 ϕ_U と ϕ_L は6分割光検出器の寸法を考慮したとき非点収差を

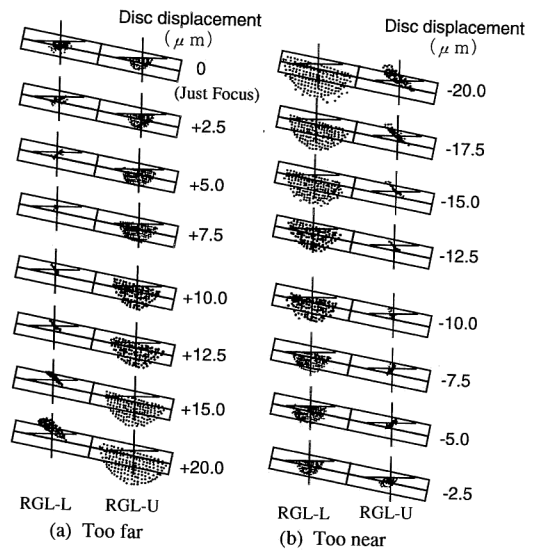


Fig. 4 Spot diagram on the surface of the 6-divided photodiode as the disc is moved.

小さくするように選んでいる。また、フォーカス誤差信号のリニア領域が約 $20 \mu\text{m}$ になるように光学系の倍率を考慮し、RGL-UとRGL-Lの集光位置間隔を 1.6 mm とした。Fig. 4は、ディスクと対物レンズとの距離を $2.5 \mu\text{m}$ おきに変化させたときの6分割光検出器面上における集光スポットの変化を示している。ジャストフォーカスのとき、6分割光検出器面上の集光スポットはいずれも直径は約 $100 \mu\text{m}$ の半円形である。ディスクが遠ざかるかもしくは近付くと一方のビームは単に広がるだけであるが、他方のビームは非点光束となって収束発散するのがわかる。非点隔差はいずれも約 $8 \mu\text{m}$ である。

3.5 フォーカス誤差信号特性

フォーカス誤差信号も、光線追跡により計算した。LDの放射パターンは接合面に平行な放射角度と垂直な

放射角度が異なるガウス分布とし、強度に応じて光線に重み付けをした。Fig. 5はLDの波長をパラメータとし、ディスク位置が変化するときのフォーカス誤差信号の計算値である。リニア領域は約 $\pm 9.4 \mu\text{m}$ であり、こ

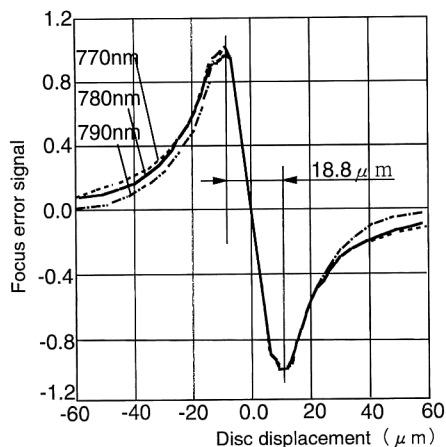


Fig. 5 Calculated focus error signals as the disc displacement is changed with the parameter of the wavelength of LD.

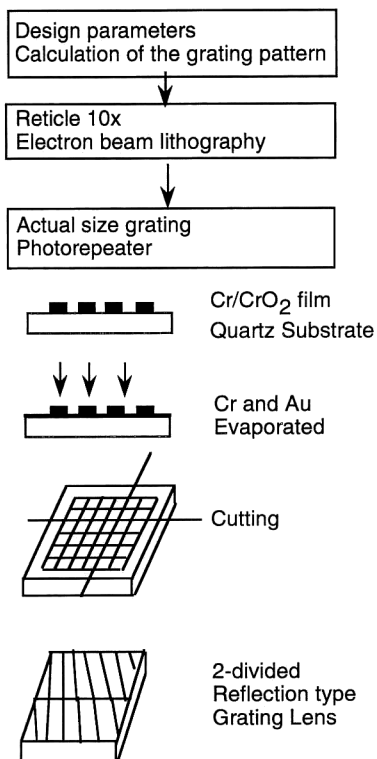
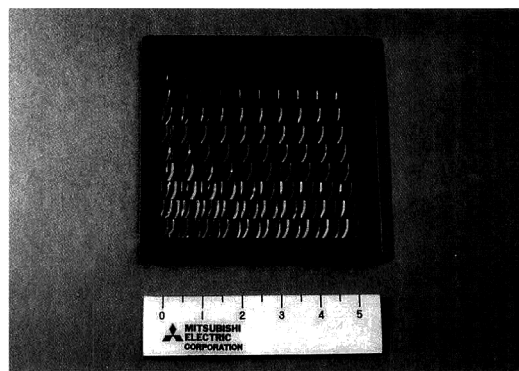


Fig. 6 Schematic diagram of the fabrication process of the 2-divided RGL.

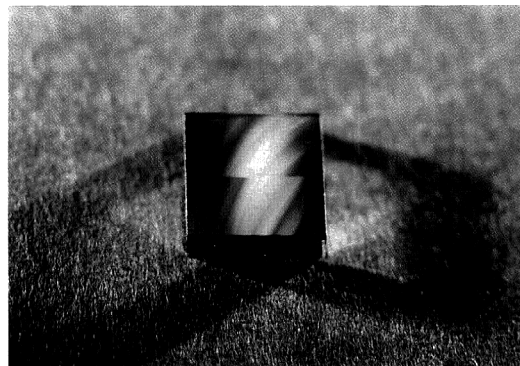
れは Fig. 4 におけるディスクが移動したときに集光スポットが片側の光検出器に移動する量 $\pm 10 \mu\text{m}$ とよく一致している。波長変化が $\pm 10 \text{nm}$ 以下であればフォーカス誤差信号のオフセットは $0.2 \mu\text{m}$ 以下であり、感度の劣化も 0.2dB 以下である。組立時におけるLDの波長バラツキは6分割光検出器の位置を調整することにより補正可能である。

4. 実験結果

Fig. 6は、2分割RGLの作製プロセスを示したものである。格子パターンは式(6)を解くことにより得られる曲線で表されるが、これの各点における接線を求めて折れ線近似をした。1セルの寸法が $5 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ の矩形を折れ線上に当てはめる方法をとった。電子線描画により原寸の10倍の大きさのレチクルを作り、フォトリピーターにより原寸大のマスクを作製する。この縮小プロセスで電子線描画で生じる量子化ノイズが低減され、スムーズな格子パターンが得られる。石英基板上的Cr/



(a)



(b)

Fig. 7 Photograph of the fabricated 2-divided RGL. (a) Photograph of a $2'' \times 2''$ quartz glass substrate with 100 2-divided RGLs, (b) 1-piece of the 2-divided RGL.

CrO₂ 2層構造の薄膜にパターンをUVリソグラフィーで作製した。最大回折効率を得るため薄膜Cr/CrO₂の厚さはできるかぎり1315Åになるようにした。最後に反射率を高めるためAu膜を全面にわたって蒸着した。波長780nmにおけるAu蒸着膜の反射率は98.7±0.5%であった。

Fig. 7(a)は、作製した2分割RGLの写真である。2インチ基板上に10×10の2分割RGLが作製されている。Fig. 7(b)は、素子1個の写真で外形寸法は5×5mmである。上下にRGLが作製されている様子がよくわかる。

Fig. 8は、製作した2分割RGL表面中央部分のSEM像である。RGL-UとRGL-Lとの境界は幅1μmで緩やかに変化しているが、光学特性への影響はない。格子断面形状を触針式の表面粗さ計(Talystep; Rank Taylor Hobson製)で測定した。結果をFig. 9に示す。これより、格子断面はほぼ矩形で、格子深さは1250Åであることがわかる。格子周期はRGL-Uで2.02~2.51μm, RGL-Lで2.09~2.74μmであるが、いずれも格子周期の製造誤差は0.1μm以下であり、格子の曲がり角度もほぼ計算どおりである。

0次回折光の波面収差の測定にはZYGO干渉計を用いた。2分割RGLの実使用形態に合わせ、干渉計のビームを2分割RGLに45°で入射させ参照平面で折り返した。測定結果の一例をFig. 10に示す。波面収差はrms値で最大でも0.016λと良好である。

Fig. 11は、ディスクを固定し、像面(6分割光検出器)を移動したときの1次回折光集光スポットの変化を光線追跡による計算値とともに示したものである。RGL-U, RGL-Lともに集光スポットの測定結果は計算値とよく一致しているのがわかる。

次に、RGLの回折効率を測定した結果、0次回折光の回折効率は51.6%、1次回折光の回折効率は17.2%であった。これらの値は、RGLを矩形断面をもつ薄い位相格子とし、格子溝深さの測定値1250Åを用いたときの0次回折光と1次回折光の回折効率の計算値¹²⁾53%と18%によく一致している。

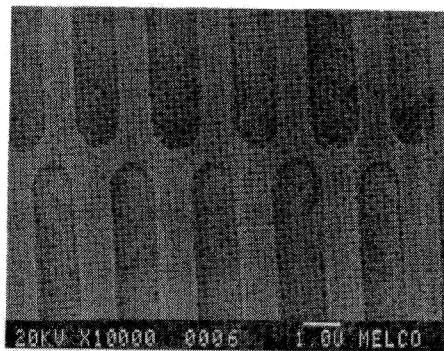


Fig. 8 Scanning electron microscope (SEM) photograph of the 2-divided RGL.

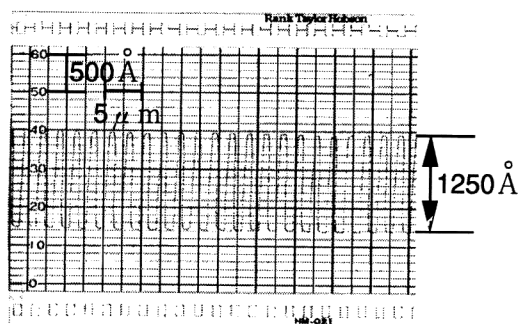
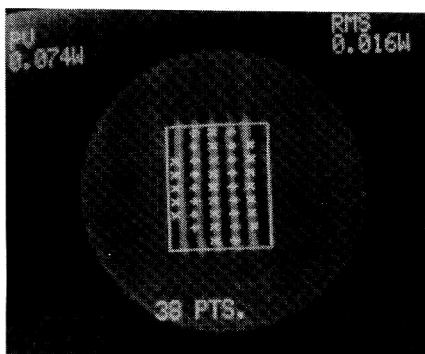
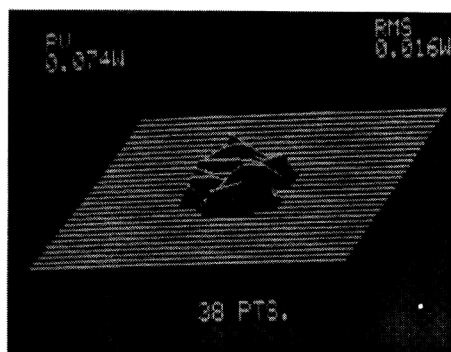


Fig. 9 Cross sectional trace of the 2-divided RGL by Talystep.



(a)



(b)

Fig. 10 Typical wavefront error of the zeroth-order diffraction beam of the 2-divided RGL. (a) Interference pattern, (b) wavefront error.

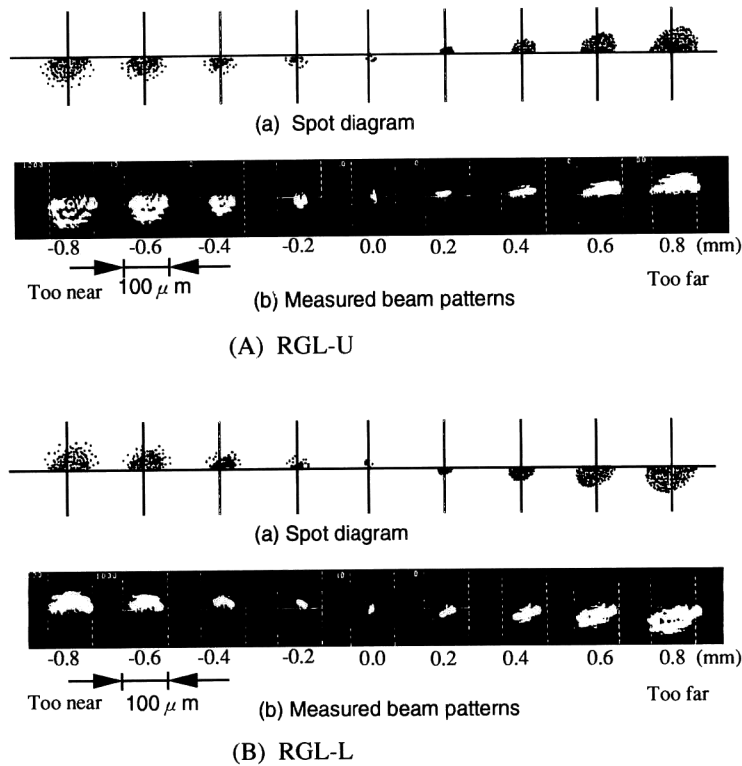


Fig. 11 Spot diagram and measured beam pattern for the first-order diffraction beam of the 2-divided RGL. (A) RGL-U, (B) RGL-L.

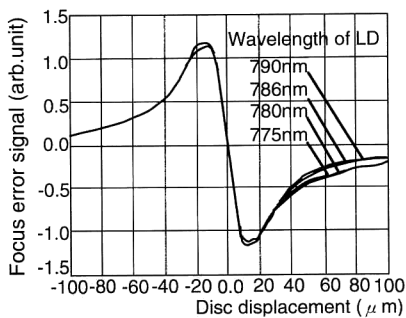


Fig. 12 Measured focus error signals as the disc displacement is changed with the parameter of the wavelength of LD.

Fig. 12はLDの波長をパラメータとしたときのフォーカス誤差信号の測定結果である。波長が ± 10 nm変化したときのオフセットは $0.5 \mu\text{m}$ 以下、感度低下は 0.5 dB以下、リニア範囲は $20 \mu\text{m}$ であり、波長依存性のほとんどないフォーカス誤差信号が得られている。

最後に、2分割RGLを用いた光ピックアップ光学系の性能を確かめるため、CDの再生実験を行った。再生

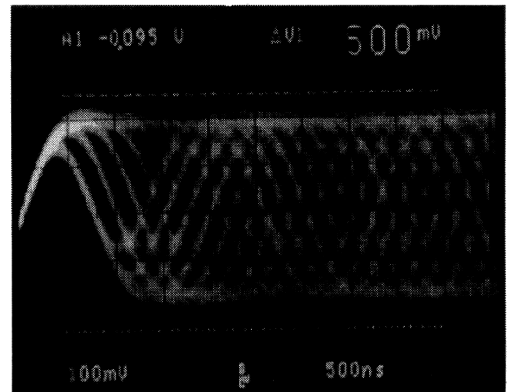


Fig. 13 Eye pattern of read-out signal of the CD.

信号のアイパターンを Fig. 13 に示す。3 T 信号に対するジッターは 22 ns であり、トラッキング幅は ± 0.5 mm であった。通常の光学系を用いた光ピックアップと同程度の性能が得られている。

5. まとめ

光ピックアップ光学系に用いる複数機能を有する 2 分

割反射形回折格子レンズの開発を行い、波長依存性の小さなフォーカス誤差信号検出法を提案するとともにその設計法と実験結果について述べた。1次回折光集光スポットやフォーカス誤差信号などの実験結果は計算結果とよく一致することがわかった。また、2分割反射形回折格子レンズを用いた光ピックアップでCDの再生実験を行った結果、通常の光学系を用いた光ピックアップと同程度の性能が得られた。

文 献

- 1) Y. Kimura, S. Sugama and Y. Ono: "High performance optical head using optimized holographic optical element," Jpn. J. Appl. Phys., **26**, Suppl. 26-4 (1987) 131-134.
- 2) Y. Kimura, S. Sugama and Y. Ono: "Compact optical head using a holographic optical element for CD players," Appl. Opt., **27** (1988) 668-672.
- 3) Y. Yoshida, T. Miyake, Y. Kurata and T. Ishikawa: "Three beam CD optical pickup using a holographic element," Proc. SPIE, **1401**, Optical Data Storage Technologies (1990) 58-65.
- 4) Y. Honguh and I. Hoshino: "Focusing-error detection using a mixed-aberration-generating holographic optical element," Jpn. J. Appl. Phys., **31** (1992) 544-547.
- 5) K. Tatsumi, T. Matsushita and S. Ito: "Multifunctional reflection type grating lens for the CD optical head," Jpn. J. Appl. Phys., **26**, Suppl. 26-4 (1987) 127-130.
- 6) S. Kadowaki, Y. Komma, S. Nishino, Y. Hori and M. Kato: "A very small holographic optical pick-up head with a movable single-assembly optical system," Jpn. J. Appl. Phys., **31** (1992) 542-543.
- 7) R. C. Fairchild and J. R. Fienup: "Computer-originated aspheric holographic optical elements," Opt. Eng., **21** (1982) 133-140.
- 8) R. W. Smith: "The s and t formulae for holographic lens elements," Opt. Commun., **21** (1977) 106-109.
- 9) E. B. Champagne: "Nonparaxial imaging, magnification, and aberration properties in holography," J. Opt. Soc. Am., **57** (1967) 51-55.
- 10) J. N. Latta: "Computer-based analysis of holography using ray tracing," Appl. Opt., **10** (1971) 2698.
- 11) H. W. Holloway and R. A. Ferrante: "Computer analysis of holographic systems by means of vector ray tracing," Appl. Opt., **20** (1981) 2081-2084.
- 12) R. Magnusson and T. K. Gaylord: "Diffraction efficiencies of thin phase gratings with arbitrary grating shape," J. Opt. Soc. Am., **68** (1978) 806-809.