レーザーオリジナル

斜入射配置高効率ゾーンプレートアレイの試作

馮 小平*†・小舘香椎子*・神谷武志**

(1988年8月23日 受理)

Fabrication of High-Efficiency Zone Plate Array with
Oblique Incidence ConfigurationXiao Ping FENG*†, Kashiko KODATE*
and Takeshi KAMIYA**

(Received August 23, 1988)

A micro Fresnel zone plate has a special merit of its planar structure and flexibility in the design of focusing characteristics, which may be attractive as the micro-optical component for the input/output coupling for opto-electronic systems. The present report describes a configuration of a spatially divided beam splitter using a rod lens and a linear zone plate array with oblique incidence. A linear zone plate array with the linewidth changed from 0.9 to 2 μm was fabricated by holographic exposure and printing with deep UV light contacted exposure. At oblique incidence, the diffraction efficiency reaches 60% under the condition close to the Bragg angle. By using a fabricated spatially divided beam splitter, the simultaneous focusing and separation of a laser output are demonstrated.

Key Words: Zone plate array, Oblique incidence, Micro-optical component, Holographic element, Opto-electronic system.

1. はじめに

光通信システムや、光情報処理システムの実用化にみられるようにオプトエレクトロニクス

の発展はめざましいものがあるが、それに伴ない、これらの光源である半導体レーザーに見合った大きさ、重さをもつコンパクトな光学部品への要求が高まっている。また、現在、これら

* 日本女子大学物理学教室 (〒112 東京都文京区目白台2-8-1)

** 東京大学工学部電子工学科 (〒113 東京都文京区本郷2-7-8)

† 現在電気通信大学 (〒182 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1)

* Physics Laboratory, Japan Women's University (Mejirodai, Bunkyo-ku, Tokyo 112)

** Department of Electronic Engineering, University of Tokyo (Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113)

Present Address: The University of Electro-Communications (Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182)

の主要な装置は個別光学部品により構成されている。しかし高機能性、小型化、量産化、高信頼性を要求される次世代の光応用システムにおいては、これらの個別部品型デバイスの集積化が必要とされ、近年半導体基板上に、半導体レーザーなどの光デバイスとトランジスタなどの電子デバイスを同時にとりつけた光電子集積回路(OEIC)の研究開発も活発化している¹⁾。これらの光回路に、光ビームの分岐、合流、相互遅延や光ファイバーとの接続機能をもつ多数の微小光学素子を組み込み、また、マルチポート化入出力接続技術を開発することが必要とされている。

我々は、このような要求にこたえる受動型光学部品として平面構造で小型、結像特性などの設計の自由度が大きく将来量産性の向上を見込みやすいリソグラフィ技術に立脚したマイクロフレネルゾーンプレートの適用を考え、検討を加えて来ている。これまでにEB描画によるマスク作成と深紫外リソグラフィ転写工程によるレリーフ格子作成によって格子ピッチ $1\mu\text{m}$ 以下、グループ深さ $1\mu\text{m}$ 以上のものを再現性よく作成した²⁾。

一方深い溝の位相格子の回折格子は垂直入射で40%以上、ブラック条件に近い斜入射条件で60~80%が期待できることがわかっている^{3,4)}。

本研究では、これらに基づいて光回路における半導体レーザーと多数本の光ファイバーとの同時接続用として斜入射配置の高効率な分岐、結像機能を併せ持つ空間分割型ビームスプリッタについて検討した結果について述べる。ここでは、スポット形状の制御が容易となるリニアゾーンプレートアレイと円柱レンズの組合せ方式を用いた。まずこの空間分割型ビームスプリッタの構成と円柱レンズに関しSkew Rayを含めた一般的な光線追跡による設計の結果を2で示し、3ではホログラフィ法によるマスクと深紫外リソグラフィ法によるリニアゾーンプレートアレイの試作について述べる。4では試作ゾーンプレートアレイの分岐、結像機能などの基礎特性について述べる。

2. リニアゾーンプレートアレイを用いた空間分割型ビームスプリッタの基本設計

2.1 空間分割型ビームスプリッタ

Fig.1に示す光学配置によって半導体レーザー(1/e幅: $\theta_{\perp}=30^{\circ}$, $\theta_{\parallel}=15^{\circ}$)と三本の光ファイバー(N.A. = $\sin 2\alpha_F = 0.17$)を同時に接続することを考える。Fig.1に示すようにレーザービームの垂直方向の広がりを円柱レンズによって結像させ、水平方向の広がりをゾーンプレートアレイによって分岐、結像させる。ま

Fig.1 Configuration of a spatially divided beam splitter with oblique incidence.

Fig. 2 Schematic diagram of design procedures.

た、ゾーンプレートの高効率化を図るため、レーザー出射ビームをブラッグ条件に近い角度で入射し、作成プロセスの選択によって、ブレイズ化が容易となるリニアゾーンプレートを用いることにする。更に、円形のスポットを得るため、円柱レンズとリニアゾーンプレートの両者によるスポットの広がり角度を等しくなるようにし、これを α_0 とおく。光ファイバーと効率よく結合するためには $\alpha_0 \leq \alpha_F$ が要求される。

Fig.2に以上の条件と要求を満たすための円柱レンズとリニアゾーンプレートアレイの組合せによる空間分割型ビームスプリッタ設計のブロック図を示す。設計は、ゾーンプレート、円柱レンズ、両者の結合という部分に分けられる。

2.2 光線追跡近似による円柱レンズの結像解析

円柱レンズによる結像の解析を、Fig.3に示

Fig.3 Ray tracing of a rod lens.

すような座標系を用いて行う。光源を原点に置き、円柱レンズの中心から光源までの距離を l 、円柱レンズの半径を R とする。光源から出た光線ベクトル k_1 によりベクトル k_2 が入射点 P_1 で円柱レンズにより屈折され、さらに出射点 P_2 から円柱レンズを出て出射光線ベクトル k_3 となる。

Fig.4 Computed curves of focusing pattern at the focal plane of a rod lens.
R: Diameter of a rod lens.

次に述べる光線追跡の方法により、角度 ϕ , θ を持つ入射光線ベクトル $\mathbf{k}_1 (\cos \phi \sin \theta, \cos \phi \cos \theta, \sin \phi)$ から $P_1, \mathbf{k}_2, P_2, \mathbf{k}_3$ と P_3 を求める。

まず、 $\mathbf{k}_1 \parallel \overrightarrow{OP_1}$ つまり

$$|\mathbf{k}_1 \times \overrightarrow{OP_1}| = 0 \quad (1)$$

より $P_1 (R \cos \beta_1, l + R \sin \beta_1, h_1)$ を求める。

$$h_1 = l \tan \phi \{ \cos \theta - \sqrt{(\frac{R}{l})^2 - \sin^2 \theta} \}$$

$$\cos \beta_1 = \frac{l}{R} \sin \theta \{ \cos \theta - \sqrt{(\frac{R}{l})^2 - \sin^2 \theta} \}$$

$$\sin \beta_1 = \frac{l}{R} \{ -\sin^2 \theta - \cos \theta \sqrt{(\frac{R}{l})^2 - \sin^2 \theta} \} \quad (2)$$

さらに上式より法線ベクトル $\mathbf{n}_1 (\cos \beta_1, \sin \beta_1, 0)$ も得られる。

点 P_1 において Snell の法則及び $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{n}_1$ が一平面内にある条件より次の方程式が得られる。但し、 N は円柱レンズの屈折率である。

$$\frac{|\mathbf{k}_1 \times \mathbf{n}_1|}{|\mathbf{k}_1 \parallel \mathbf{n}_1|} = N \frac{|\mathbf{k}_2 \times \mathbf{n}_1|}{|\mathbf{k}_2 \parallel \mathbf{n}_1|} \quad (3)$$

$$\mathbf{k}_2 \cdot (\mathbf{k}_1 \times \mathbf{n}_1) = 0$$

上式を解くとベクトル $\mathbf{k}_2 (x_2, 1, z_2)$ が求められる。

$$\begin{aligned} x_2 &= \frac{-W_A \sqrt{W_C} - W_B \cot \beta_1}{W_A^2 - W_B^2} \\ z_2 &= z_1 \frac{-W_A \cot \beta_1 - \sqrt{W_C}}{W_A^2 - W_B^2} \end{aligned} \quad (4)$$

となる。

$$\text{但し } W_A = x_1 - \cot \beta_1$$

$$W_B = N^2 (x_1^2 + 1) - (N^2 - 1) z_1^2$$

$$W_C = -W_A^2 + (1/\sin^2 \beta_1) W_B$$

P_1 と同様に $\mathbf{k}_2 \parallel \overrightarrow{P_1 P_2}$ より点 $P_2 (R \cos \beta_2, l + R \sin \beta_2, h_2)$ は、次のようになる。

$$\sin \beta_2 = \sin \beta_1 - \frac{2 (\sin \beta_1 + x_2 \cos \beta_1)}{1 + x_2^2} h_2$$

$$\cos \beta_2 = \cos \beta_1 - \frac{2 x_2 (\sin \beta_1 + x_2 \cos \beta_1)}{1 + x_2^2}$$

$$h_2 = h_1 - \frac{2 z_2 R (\sin \beta_1 + x_2 \cos \beta_1)}{1 + x_2^2} \quad (5)$$

この式より法線ベクトル $\mathbf{n}_2 (\cos \beta_2, \sin \beta_2, 0)$ も得られる。

$\mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3, \mathbf{n}_2$ についても式(3)と(4)と同様な方法で $\mathbf{k}_2, \mathbf{n}_2$ から $\mathbf{k}_3$ を求めることができ、最後に $\mathbf{k}_3 \parallel \overrightarrow{P_2 P_3}$ つまり

$$|\mathbf{k}_3 \times \overrightarrow{P_2 P_3}| = 0 \quad (6)$$

より平面 $y = s$ との交点 $P_3 (x_s, s, z_s)$ が求められる

$$\begin{aligned} P_3: x_s &= R \cos \beta_2 + x_3 (s - l - R \sin \beta_2) \\ z_s &= h_2 + z_3 (s - l - R \sin \beta_2) \end{aligned} \quad (7)$$

となる。

上式を用いた計算機シミュレーションの結果を Fig. 4, 5 に示す。計算では円柱レンズの半径を Fig. 4, 5 に示す。計算では円柱レンズの半径は R で規格化をしている。Fig. 4 には円柱レンズの焦点面上の結像パターンを示してある。Y-Z 座標上においては、円柱レンズによって中心を対象とする直線に近い結像が得られることが判る。このような近似のもとでは、円柱レンズの中心から光源までの距離 l が $l = 1.813R$ となる時、光源から結像スポットまでの距離 y_R は $y_R = 8.78R$ となる。ここでの半径 R の値はゾーンプレート の全幅 W_P によって決まってくる。Fig. 5 は試作したゾーンプレートに半導体レーザー光 ($\lambda = 0.83 \mu\text{m}$) を 38 度で斜入射した時のゾーンプレート上における光強度分布を示したものである。試作ゾーンプレートについては 4 で述べるが半導体レーザー光に対しては焦点距離は 4.6mm となるので、円柱レンズの半径 R を 10mm とすると光源からゾーンプレートまでの距離は 2.3 で示す(8)式により 83mm となる。円柱レンズにより屈折した光線の強度分布はゾーンプレート面上 (Fig. 5) では焦点面上 (Fig. 4) より X 方向が充分絞られていないが、ゾーンプレートの結像面 $X F_{zp} - X F_{zp}$ (Fig. 4) においては X 方向が焦点面上と同程度に絞られている。

Fig.5 Computed curves of the intensity profile focused by a rod lens at the zone plate with oblique incidence configuration (38 degree).
Light source: $\lambda = 0.83 \mu\text{m}$.

さらにゾーンプレートによる回折でZ方向の分布も分岐、収束される。

2.3 ゾーンプレートの設計

光源から出た光線は円柱レンズによって直線に近い円弧状に結ばれるが、ゾーンプレートをその間に置くことによって光が回折され、3分岐のゾーンプレートの結像作用のため、3つの点に結像する (Fig.6)

レーザービームの広がり角度を $2\phi_m (= \theta_{//})$ 、ゾーンプレートへの入射角度を ϕ_a とし結像の広がり角度を $2\alpha_0$ とすると、全幅 W_p のゾーンプレートを作成する場合、光源、ゾーンプレートと結像点の相対位置は以下になる。光源からゾーンプレートまでの距離 L_{zp} :

$$\begin{aligned} a &= W_p / [\tan(\phi_a + \phi_m) - \tan(\phi_a - \phi_m)] \\ h_z &= a \tan \phi_a, \\ L_{zp} &= a / \cos \phi_a \end{aligned} \quad (8)$$

a : 光源から ZP までの水平距離

中央の結像点からゾーンプレートまでの距離

$$b_2: \quad b_2 = (W_p/6) \arctan \alpha_0 \quad (9)$$

Fig.6 Configuration of a linear zone plate array.

よって、円柱レンズの結像点から光源までの距離 Y_R は

$$Y_R = L_{zp} + b_2 \quad (10)$$

となる。

この条件で設計されたゾーンプレートが、回折限界で支配されると仮定したときの結像スポット径を推定する計算シミュレーションは現在検討中であり、詳しくは別の論文で発表の予定である。ここでは次の近似式を用いる。

スポット径 $2\omega(f)$ のレーザー光が、焦点距離 f のゾーンプレート上に入射したとき、焦点面上の最小スポット径 $2\omega_0$ はゾーンプレートの幅 $W_p/6$ と焦点距離 f により、次式から近似的

Fig.7 Fabrication process of a linear zone plate array.

に求めることができ

$$2\omega_0 \doteq 2f\lambda/\pi (W_p/6) \quad (11)$$

半値幅は

$$2\omega_{1/2} = 0.8325 (2\omega_0) \quad (12)$$

となる³⁾。

これらの式を用いると今回試作したゾーンプレートで実現出来る結像スポット径は He-Ne レーザー ($\lambda = 0.63\mu\text{m}$) の平行光に対し、およそ $2.1\mu\text{m}$ となる。

3. リニアゾーンプレートアレイの作成法

Fig.7 に示すような手順を用いて3分岐の空間分割型リニアゾーンプレートアレイを試作した。

Fig.8 にホログラフィ法によるリニアゾーンプレートアレイマスクの作成光学系を示す。作成波長と使用波長の違いについては、試作ゾーンプレートの大きさ (2mm) が点光源とするレンズ L_3 からの距離に比べて十分に小さいので、テーラー展開を2次まで取り入れた近似のもとで検討したゾーンプレートの斜入射配置で角度条件も含む波長変換の式(13)を用い、無収差条件となる作成配置を用いた。

$$\begin{aligned} & (1/\lambda)(\sin\theta_i + \sin\theta_r) \\ &= (1/\lambda')(\sin\theta'_i + \sin\theta'_r) \end{aligned} \quad (13)$$

λ : 作成波長

λ' : 使用波長

θ_i : 作成入射角度

θ_r : 作成結像角度

θ'_i : 使用入射角度

θ'_r : 使用結像角度

Fig. 8 Experimental set-up for holographic exposure.

M, mirror; H.M., half mirror; L, lens; P.H., pin hole;
C.L., cylindrical lens; Z.P., zone plate.

光源にはHe-Cdレーザー ($\lambda=0.325\mu\text{m}$) を用い、2光束の干渉により作成する。さらにミラーM、シリンドリカルレンズC、Lと遮光板を平行移動し数回に分けて露光すると同一焦点面上に結像し分岐機能をもつゾーンプレートアレイが得られる。

遮光材には、我々が探紫外光に対し有望であると着目して来ている均一性の高い、a-Si膜をPCVD法により石英基板上に塗布して用いた⁵⁾。ホログラフィックに露光されたパターンはRIE法によるドライエッチングプロセスでa-Si膜に転写される。さらにこのa-Si膜のマスクの深紫外リソグラフィ法を用いたフォトリソグロフOD UR1013への転写によって、大きさ2mm×4mm、全幅6mmの位相型3分岐リニアゾーンプレートアレイを試作した。

4. 試作リニアゾーンプレートアレイの基礎特性

Fig. 8に示すようなホログラフィ露光法装置によってマスクパターンを形成した。

この光学系を用いると大きい曲率半径の外側の微小部分にだけ干渉縞が作成されるので、ほとんど直線のリニアゾーンプレートが出来る。2光束 E_1 と E_2 を、次式のようにあらわすことが出来る。

$$E_1 = A_1 \exp i \left\{ \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} (y \cos \phi_0 + z \sin \phi_0) \right\}$$

$$E_2 = \{ A_2 / (2\pi \sqrt{(y-f)^2 + z^2})^{1/2} \} \times \exp i \left\{ \omega t + \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(y-f)^2 + z^2} \right\} \quad (14)$$

ω : 角周波数 f : Cyレンズ焦点からZpまでの距離

この2光束の干渉による光強度分布から作成される連続的な非周期格子のピッチの数値計算結果をFig. 9に示す。

また図中には試作リニアゾーンプレートの表面SEM観察によって得られたピッチの値を示してある。これにより、数値計算と一致する最小 $0.98\mu\text{m}$ ～最大 $2.10\mu\text{m}$ 、1489本のピッチをもつリニアゾーンプレートが作成されていることが確かめられた。

試作リニアゾーンプレートの入射角に依存した結像スポットを10倍の対物レンズで拡大し、TVカメラで観測した (Fig. 10)。He-Neレーザー ($\lambda=0.63\mu\text{m}$) の平行ビームを光源として観測した光強度分布と垂直入射での結像パターンをFig. 11に示す。垂直入射でのスポットサイズは $10.0\mu\text{m}$ である。

斜入射における結像効率の測定は、結像スポットの測定系 (Fig. 10) を用いてTVカメラの代りに $300\mu\text{m}$ のスリットと太陽電池を用いて測定した。効率はゾーンプレート上の入射光パワー (I) 焦点面上においたスリットを通過した光パワー (I_0) との比 ($I_0/I \times 100 (\%)$) で求めた。試作したリニアゾーンプレートはFig. 12に

Fig.9 Computed curves of zone pitch dependent on the zone position.
(marks of SEM observation results)

Fig.10 Experimental setup for measuring focusing characteristics.

示すように垂直入射で40%、結像の最適入射位置である27度近傍では、60%を越す良好な結果を示したが、この試作ゾーンプレートの断面形状はFig. 13のSEM写真が示すようにラメラ型の矩形状を示しており、露光・現像工程における作成条件の最適化が得られたと考えられる。ゾーンピッチを考慮した作成光学系の検討などによって更に高効率化を期待できる。

試作した三分岐空間分割型ゾーンプレートアレイのHe-Neレーザーの垂直入射光による結像パターンと光強度分布の測定結果をFig. 14に示

すが、同一焦点面上に三つのほぼ均一でかつ強度も等しい直線状の結像パターンを得ることが出来た。

更に試作に使用した焦点距離60mmのシリンドリカルレンズをリニアゾーンプレート前方54mmの所に挿入し平行入射ビームの垂直、水平方向の結像を試みたところ、Fig. 15に示すようなほぼ円形に近い結像スポットと光強度分布が得られ光ファイバーへの接続の可能性が確められた。

Fig. 11 Change in the intensity profile at the focal plane vs incident angle.

Fig. 12 Experimental results of focusing efficiency vs incident angle.

Fig. 13 SEM sectional view of a linear zone plate.

Fig. 14 Focusing characteristics of a linear zone plate array.

Fig. 15 Focusing characteristics on using a cylindrical lens and a linear zone plate.

4. まとめ

光回路における半導体レーザーと多数本の光ファイバーの同時接続を目指して、斜入射配置高効率空間分割型ビームスプリッターアレイについて検討を行った。その結果

(1) 空間分割型で収束機能を持つリニアゾンプレートアレイと円柱レンズの組合せにより、 $1:n$ のレーザービームの分岐及びファイバーへの斜入射結合の同時達成の可能性を理論的に示

した。

(2) 光線追跡により、垂直方向結像用円柱レンズの結像の検討を行い、斜入射配置におけるゾーンプレート上での光強度分布の計算シミュレーションの結果を得た。

(3) ホログラフ法によるa-Siマスクと深紫外リソグラフィ法による転写により斜入射条件で60%を越す良好な結像特性を持つリニアゾーンプレートの試作を行った。

(4) 3分岐リニアゾーンプレートアレイを試作し、同一焦点面上での均一な光強度分布をもつ直線状の結像を確認した。

(5) 試作リニアゾーンプレートアレイと円柱レンズとの組合せによって良好な円形スポットが得られ、空間分割型ビームスプリッタが多数本の光ファイバーとの結合に有効であることを実証した。

今後OEIC等の光回路用分岐・結合素子として効率の向上をめざすために、さらに最適な設計や作成条件の検討などを加えていく予定である。

謝辞

a-Si膜の塗布及びエッチングに関して御助力を頂いた東大工学部、菅野卓雄教授、羽鳥文敏氏、畝川康夫氏、に深謝致します。SEM観察や数値計算にご協力願った日本女子大小館研究室、下村恭子氏、坪智子氏、斉藤佐代氏、望月彰子氏に感謝いたします。

また、本研究は文部省科学研究費一般研究(C)「軟X線及び深紫外リソグラフィによる機能性微小光学素子の作成と応用に関する研究」の援助を受けて行っている。

参考文献

- 1) 神谷武志：レーザー研究，**15** (1987) 1020.
- 2) K. Kodate, H. Takenaka and T. Kamiya, : Appl. Opt., **23** (1984) 504.
- 3) K. Kodate, T. Kamiya, Y. Okada and H. Takenaka: Jap. J. Appl. Phys. **25** (1986) 223.
- 4) R.C. Enger and S.K. Case: J. Opt. Soc. Am. **22** (1983) 3320.
- 5) K. Kodate, H. Tamura, Y. Okabe and T. Kamiya: Jpn. J. Appl. Phys. **23** (1984) 382.