

解説

複合ゾーンプレートの光遅延回路への適用*

岡田 佳子**

日本女子大学物理学教室 〒112 東京都文京区目白台 2-8-1

(1989年6月8日受理)

Optical Pulse Delay Using Composite Zone Plates

Yoshiko OKADA**

Physics Laboratory, Japan Women's University,
2-8-1, Mejirodai, Bunkyo-ku, Tokyo 112

1. はじめに

光エレクトロニクスの研究を進めていくうえでの大きな目標に、光コンピュータ、ニューメディア、光エネルギー応用などがあり、昨今の光技術の発展が電子情報技術へ有効に応用されている。光には、外部からの電磁的ノイズに強く、また光と光の直接的な相互作用が著しく小さいこと、その周波数が従来の電気的情報処理系で行なわれている周波数に比べてけた違いに大きいことなどの特徴があり、とくに光配線技術の発展には大きな期待がかけられている。将来は、全ての情報を光信号にのせて処理する光-光制御システムの時代が来ると考えられている。大量の情報を高速で送るためには時間領域の多重化が必要でありこのようなシステムに適するデバイスとして光電子集積回路(OEIC)が研究されている^{1,2)}。このような時間領域の光回路では光パルスの分岐、合流、相互遅延などの機能が重要であり、このためには光源である半導体レーザーと低損失、軽量、無誘導などの特徴をもつ光ファイバーとの結合、および光ファイバー出力と OEIC との結合技術を開発する必要がある³⁻⁵⁾。

これまでに光結合素子として集束性ロッドレンズ、マイクロレンズ、球状レンズ、ゾーンプレートなど各種の

微小光学素子が検討されているが⁶⁻⁹⁾、われわれは回折格子型微小光学素子であるフレネルゾーンプレートに注目し、線形、円形、楕円形ゾーンプレートについて研究を重ねてきた¹⁰⁻¹³⁾。この光回路ではマルチチャンネル化が大きな目標の一つであるが、チャンネル数の増加に伴って個別光部品数が増加し挿入損失の累積、コリメートが困難になるといった問題点が生じる。そこでわれわれはこの問題点を克服するために光回路中の光学素子として複合ゾーンプレートを組み込んだコンパクトな光ファイバー遅延回路を提案した^{14,15)}。この複合ゾーンプレートはプレーナ構造で、結像機能をもつ空間分割型ビームスプリッターとして作用するため、光部品数を減少させ軸合せ工程を簡素化できるという利点をもつ。

ここでは光-電子技術の境界領域におけるわれわれの高速光電子システムの概要について、複合ゾーンプレートの設計および試作を含めて述べる。さらにこの複合ゾーンプレートを用いて可変光遅延回路を構成し、OEICへの光入出力結合回路としての適用の可能性を検討した結果について解説する。

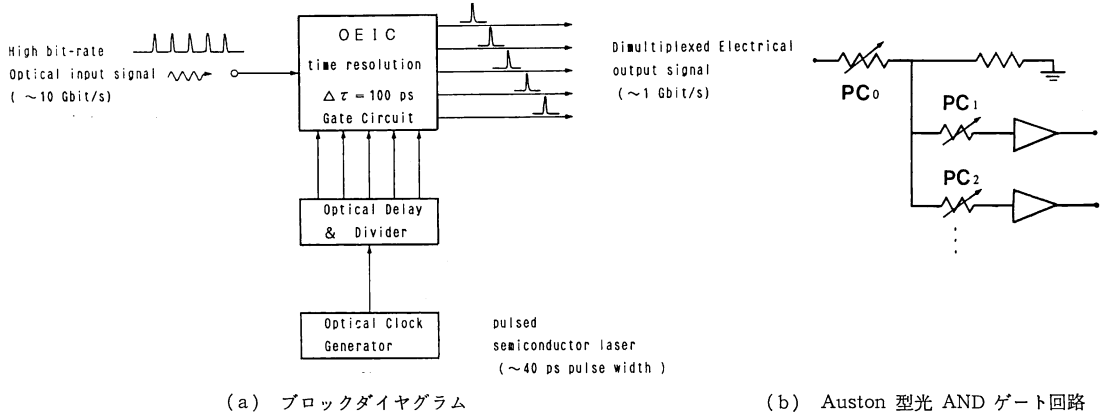
2. 高速光電子システムの概要

時分割多重信号伝送を目的とした高速光電子システムに適するデバイスとして、微小化された光デバイスと半導体集積回路を一体化した OEIC が考えられている。われわれのグループではそのシステムの一例として、短い光パルストリガーでゲート回路を制御する時分割ディマルチプレクサ回路について検討を進めている¹⁶⁾。

図1(a)は、われわれの時分割ディマルチプレクサ回

* 本稿は昭和63年度光学論文賞受賞記念講演(1989年4月2日、千葉大学)を骨子として、まとめたものである。

** 現在: 横浜国立大学工学部物質工学専攻 〒240 横浜府保土ヶ谷区常盤台 156
Present address: Department of Energy Engineering, Yokohama National University, 156, Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240

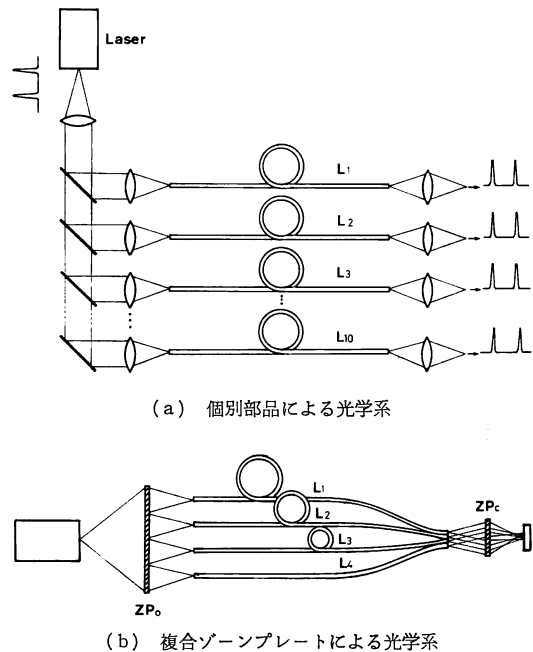


(a) ブロックダイアグラム (b) Auston 型光 AND ゲート回路
 図 1 時分割ディマルチプレクサ回路の概念

路の概念図である。図中の OEIC は、図 1 (b) に示すような Auston 型光 AND ゲートと増幅器とを集積化したもので、高速光パルス列を受けて任意の電気パルスを発生するという機能をもつ。この光 AND ゲートは、半絶縁性 GaAs 基板上に Au を蒸着した超高速光伝導素子により構成されている。すなわちこのシステムでは、まずモードロックされた半導体レーザーからの 10 Gbit/s 程度の高速光パルスを光遅延回路を介して遅延の異なる光パルスの空間列を作る。次にシグナルとなる光パルスを光伝導素子に照射し、かつ遅延を与えられた光パルスを光伝導型光ゲートに照射することによりスイッチングを行ない、時分割された電気パルス列を出力させる。そこで光クロックパルスジェネレータと OEIC チップを結合する光結合技術を開発する必要が生じてくる。

この光結合回路に要求される性能は、(1) 光パルスを多数の光ファイバ列へ分岐させ、(2) その光パルス列に 100 ps 程度の相対的遅延を与え、さらに、(3) それぞれの光パルスを集光してプレーナ型微小ゲート素子にアクセスすることである。つまり光入出力結合回路は、分岐機能、光遅延機能、集光機能をもつことが必要不可欠である。われわれはこれらの要求を満たすためにゾーンプレートの複合化を図ることを提案し、光回路中の光学素子としての適用について検討を始めた¹⁴⁾。

複合ゾーンプレートは、レンズ列機能をもった空間分割型ビームスプリッターとして作用するため、1 素子で光パルスの分岐、結像が可能である。図 2 (a) に示すように従来の光部品ハーフミラー、レンズ、光ファイバからなる光学系には、チャンネル数 (光ファイバ数) に相当するハーフミラーとその 2 倍のレンズが必要であり、チャンネル数の増加に伴う光回路の大型化という欠点がある。図 2 (b) に示すように複合ゾーンプレートと



(a) 個別部品による光学系 (b) 複合ゾーンプレートによる光学系
 図 2 光遅延回路による光クロックパルス列発生システム

長さの異なる光ファイバ列の組合せによる光学系は、チャンネル数にかかわらずゾーンプレート 2 点で構成可能である。ここでは従来の光部品を複合ゾーンプレートに変えることにより光回路のマイクロオプティクス化と部品数の減少による軸合せの簡素化を試みた。

3. 複合ゾーンプレートの設計および試作

高再現性、高効率化を図りやすい深紫外光リソグラフィ法を用いてわれわれの試作した円形フレネルゾーンプレートは、He-Ne レーザーの垂直入射光に対して理

論値に近い40%をこす結像効率と、ほぼ回折限界である1.3 μmのスポット径を示し良好な基礎特性をもつことが確かめられている¹²⁾。複合ゾーンプレートは、この円形ゾーンプレートを重複転写したもので、半導体レーザーからの出射光を直接分岐、結像する機能をもつ。その表面写真を図3(a)に示す。図3(b)は断面SEM写真であり、均一な矩形溝の形成がゾーンプレートの高効率を裏付けている。

図4に複合ゾーンプレート ZP₁・ZP₃ を用いた光遅延回路の構成を示す。ZP₁ は半導体レーザー光を平行光にし、同一基板上的 ZP₃ は焦点距離が短いため直接入射光をファイバー2の入射端に集光させる。結像素子である ZP₃ には、次の二つの条件(1) 結像ビームスポット径が光ファイバーのコア径以下であること、(2) 結

像角度 O_{beam} が光ファイバーの NA 値より小さいこと、を満たすことが要求される。

半導体レーザーからの球面波がゾーンプレートに垂直入射する場合、ゾーンプレートから結像点までの距離 b は、幾何光学的な結像公式(1)により半導体レーザーとゾーンプレート間距離 a に依存した変化を示す。

$$b = af / (a - f) \tag{1}$$

ここで f は入射波長に対する焦点距離である。ゾーンプレート半径を r_n とすると、結像角度 O_{beam} は

$$O_{beam} = \tan^{-1}(r_n/b) \tag{2}$$

となる。結像角度 O_{beam} とガウシアンビームのビーム径 $2\omega_0$ との関係から、ゾーンプレートの最小スポット径 $2\omega_{1/2}$ は

$$\begin{aligned} 2\omega_{1/2} &= (\log 2)^{1/2} (2\omega_0) \\ &= 0.8325 \cdot 2\lambda / \pi \tan O_{beam} \end{aligned} \tag{3}$$

と表わされ、光ファイバーのコア径を d_f とすると、条件(1)は

$$2\omega_{1/2} \leq d_f \tag{4}$$

となる。さらに条件(2)を表わすために、次式のように有効開口数 NA_{eff} を定義する。

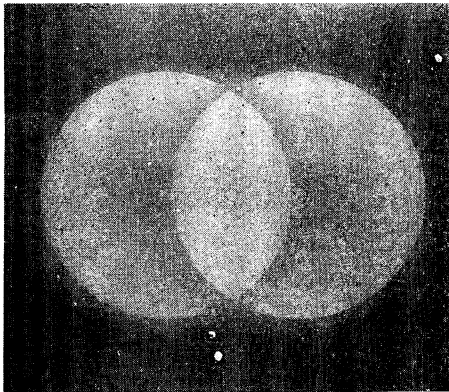
$$\begin{aligned} NA_{eff} &= \sin O_{beam} \\ &= \sin [\tan^{-1}(r_n/b)] \end{aligned} \tag{5}$$

NA_{eff} は半導体レーザーとゾーンプレート間距離 a に依存して変化し、条件(2)は、

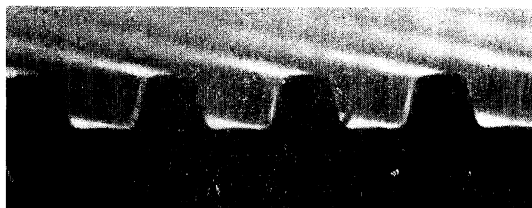
$$NA_{eff} \leq NA_{fiber} \tag{6}$$

と表わされる。図5に試作円形ゾーンプレート ($f=5.2$ mm) を用いた半導体レーザーと単一モードファイバー (コア径 $6 \mu\text{m}$, $NA 0.108$) との結合設計例を示す。(3)式および(5)式を用いて数値計算した、半導体レーザーからの距離 a に依存した有効開口数 NA_{eff} と結像スポット径をいずれも実線で示した。光源からゾーンプレートまでの距離が遠ざかるにつれて結像スポット径は漸次小さくなり有効開口数は増加する傾向がある。

図5における2条件を満足する a の範囲は、(4)式より光源から 7.1 mm 以上、(6)式より 8.8 mm 以下と



(a) 表面写真 1 mm



(b) 断面 SEM 写真 1 μm

図3 複合ゾーンプレートの写真

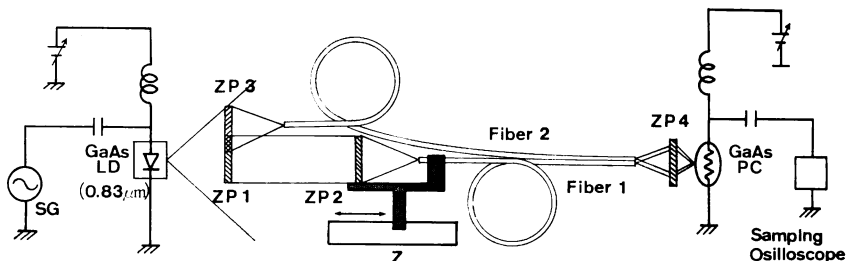


図4 複合ゾーンプレートを用いた可変光遅延回路構成図

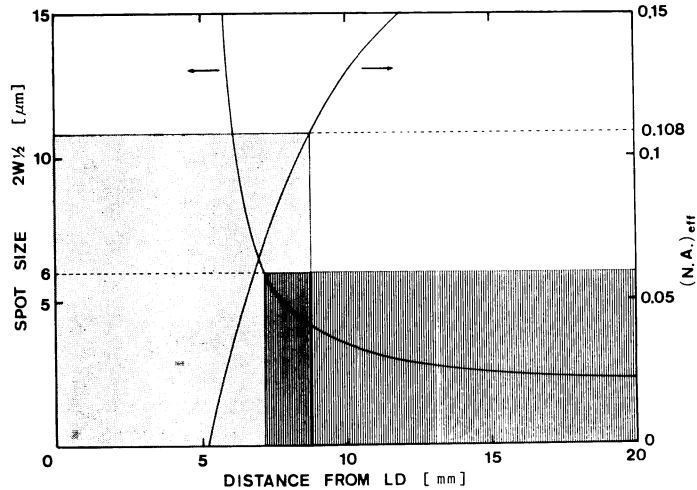


図 5 光ファイバーとゾーンプレートとの結合設計図

表 1 ゾーンプレートの特性

Sample	$2r_n$ (mm)	Maximum line width (μm)	Minimum line width (μm)	Zone number	Focal length (mm)	a (mm)	b (mm)	$2\omega_{1/2}$ (μm)	NA_{eff}
ZP ₁ (FC 100)	2.80	185.5	3.07	131	10.3	10.3	∞	—	—
ZP ₂ (FC 100)	2.80	185.5	3.07	131	10.3	∞	10.3	3.3	0.14
ZP ₃ (FC 050)	2.75	131.2	1.62	220	5.2	10.3	10.3	3.3	0.13
ZP ₄ (FC 030)	2.70	101.6	1.23	353	3.1	6.5	6.0	2.1	0.23

なる。また、He-Ne レーザーでの収差測定により試作ゾーンプレートの中心への入射角度が $\pm 5^\circ$ 以内では安定な結像スポット径、形状を示すことが確かめられており、光軸からの軸ずれ X は

$$X = a \tan \theta \quad (\theta \leq \pm 5^\circ) \quad (7)$$

と表わされる。(4)、(6)式、および(7)式により複合ゾーンプレート ZP₁・ZP₃ の中心間距離を設定する。

表 1 は回路中のゾーンプレートの各パラメーターをまとめたものである。光ファイバー干渉計など位相変化を情報とする場合は偏波保持型単一モードファイバーを用いる必要があるが、光強度のみを情報とする非干渉性光学系で分散が無視できる距離に対しては結合効率が大きく取れるマルチモードファイバーを適用できると考え、実験には、コア径 50 μm 、NA 値 0.21 のマルチモードファイバーを用いて光パルス出力強度の改善を図った。ZP₂ および ZP₃ によるマルチモードファイバーへの結合効率は、80%以上を示し、ZP₄ を用いて集光した出力端での光強度は入射光の約 10% であった。

4. 複合ゾーンプレートの光入出力回路への適用

図 4 の構成図において、パルス変調された半導体レーザー光はレーザーからその焦点距離位置に置かれたゾーンプレート ZP₁ ($f=10.3\text{mm}$) により平行となり、ZP₂ ($f=10.3\text{mm}$) に入射して集光し、ファイバー 1 に入力される。一方、同一基板上の ZP₃ ($f=5.2\text{mm}$) は焦点距離が短いため光パルスは集光して直接ファイバー 2 に入力される。2本の光ファイバーの出射端は平行に並べられ出射パルスは ZP₄ によって OEIC 上の光伝導素子上に集光する。ファイバー 1 の入射端は、ZP₂ の焦点位置 ($f=10.3\text{mm}$) に固定され ZP₂ と一体化して移動する。ZP₁ と ZP₂ との距離 Z を変化させることにより OEIC 上の光伝導素子上に照射される二つの光パルスには相対的遅延が生じる。つまりこの光学系は、図 2 (b) で提案した光ファイバー長の差による固定された遅延量をもつ光学系と異なり遅延量が可変であるという特徴をもつ。

この可変光遅延回路の機能を確認するために、パルス

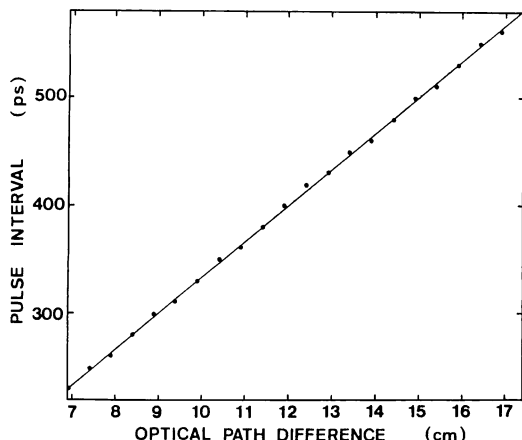


図 6 光路差に対するダブルパルス間隔

変調された GaAs/AlGaAs 半導体レーザーとコア径 50 μm , NA 値 0.21 のマルチモードファイバーを用いて移動距離 Z に伴う時間遅延量の測定を行なった。ストリークカメラにより測定された半値幅 40 ps の入射光パルスは、光回路を通過後遅延を与えられた光パルス列となりプレーナ型 GaAs 光伝導素子に入力される。図 6 にサンプリングオシロにより測定した、光路差 Z に対する二つのパルス間隔を示す。光速度を C_0 , 光路差を Z とすると、時間遅延量 t_d は、 $t_d = Z/C_0$ で与えられる。図 6 中の実線は光速度 $C_0 = 3.0 \times 10^8$ m/s を表わす。10 cm の移動による実験結果はこれとよく一致し、その出力変化は $\pm 1.5\%$ 以内であった。

5. おわりに

円形ゾーンプレートを重ねて複合ゾーンプレートは、空間分割型ビームスプリッターおよびコリメータ

レンズ両方の機能を合わせもつため光入出力結合回路中の光学素子としての適用を考え、設計、試作を行なった。さらに、これを用いて高速光パルス列に光学的遅延を与えて任意の電気パルス列を発生する可変光遅延回路を構成し、40 ps の光パルスを用いて光路差 Z に対する時間遅延量を測定したところ 300 ps の可変遅延電気パルス列の発生に成功した。これより試作複合ゾーンプレートは光入出力結合回路中の光学素子として十分機能することを確認した。

以上、受賞論文までの研究の概要について解説してきた。さらにこれからの課題として、光回路全体の効率の向上、マルチチャンネル化などがあげられる。これらの要求に適應できる新しい形の複合素子の開発が必要であり、そのための研究はますます活性化するものと思われる。われわれのグループでも本論文以降、図 7 に示すようなニアゾーンプレート列の試作を行ない¹⁷⁾、これとシリンドリカルレンズとの組合せによるマルチチャンネル化、および斜入射配置の採用による高効率化を図り空間分割型ビームスプリッターの有効性をさらに検討している。

本研究に関し、ご指導いただいた日本女子大学小館香椎子教授、ならびに東京大学工学部神谷武志教授に深く感謝いたします。また、実験のご援助をいただいた東京大学神谷研究室の飯田孝氏（現：浜松ホトニクス）、神山博之氏、日本女子大学小館研究室の皆様へ感謝いたします。

文 献

- 1) H. Yajima: *Tech. Dig. of OEC '86*, Tokyo (1986) pp. 16-17.
- 2) F. J. Leonberger, J. N. Walpole and J. P. Donnelly:

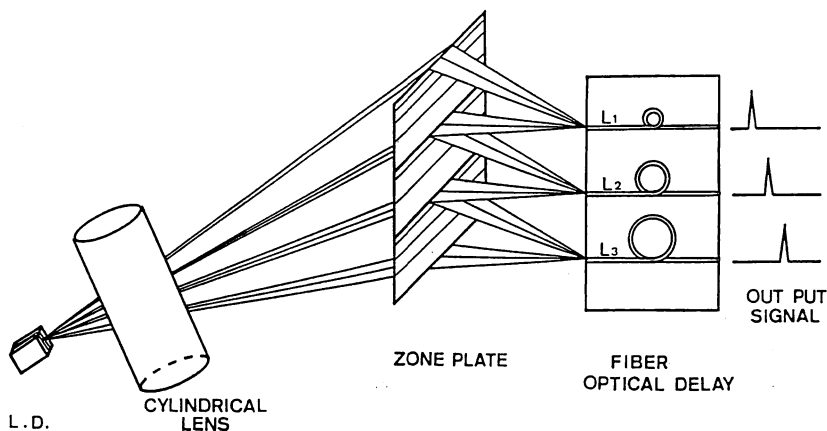


図 7 斜入射配置ニアゾーンプレートアレイの基本配置

- IEEE J. Quantum Electron., **QE-17** (1981) 830.
- 3) J. W. Googman, F. J. Leonberger, S. Y. King and R. A. Athale: Proc. IEEE, **72** (1984) 850.
 - 4) B. Mosleghi, J. W. Goodman, M. Tur and H. J. Shaw: Proc. IEEE, **72** (1984) 909.
 - 5) S. A. Newton, R. S. Howland, K. P. Jackson and M. J. Shaw: Electron. Lett., **19** (1983) 755.
 - 6) N. F. Borrelli and D. L. Morse: 4th Topical Meeting Gradient-index Optical Imaging Systems, D1 (1983).
 - 7) M. Oikawa, K. Iga and T. Sanada: Electron. Lett., **17** (1981) 453.
 - 8) C. Kojima, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **20**, Suppl. 20-1 (1981) 199.
 - 9) G. Hatakoshi and K. Goto: Appl. Opt., **24** (1985) 4307.
 - 10) K. Kodate, T. Kamiya, Y. Okada, M. Ichikura and Y. Okabe: *The 16th Symp. Ion Implantation and Submicron Fabrication* (1985) p. 205.
 - 11) K. Kodate, T. Kamiya and Y. Okada: *Tech. Dig of CLEO '85* (1985) p. 196.
 - 12) K. Kodate, T. Kamiya, Y. Okada and H. Takenaka: Jpn. J. Appl. Phys., **25** (1986) 51.
 - 13) 小館香椎子, 岡田佳子, 神谷武志: 光学, **14** (1985) 296.
 - 14) K. Kodate, Y. Okada, T. Iida and T. Kamiya: *Tech. Dig. of OEC '86*, Tokyo, A 9-1 (1986) p. 66.
 - 15) 岡田佳子, 小館香椎子, 神谷武志: 光学, **16** (1985) 364.
 - 16) T. Kamiya, T. Iida, I. Tanaka and H. Kamiyama: *Tech. Dig. of CLEO '87*, Baltimore, MB 2 (1987) p. 6.
 - 17) 馮小平, 小館香椎子, 神谷武志: レーザー研究, **16** (1988) 836.