



グレーティング素子を用いた導波路-自由空間の 機能的な光接続

栖原 敏明・西原 浩

大阪大学工学部電子工学科 〒565 吹田市山田丘 2-1

(1990年8月2日受理)

Multifunction Optical Interconnection of Waveguide and Free Space Using Grating Elements

Toshiaki SUHARA and Hiroshi NISHIHARA

Department of Electronics, Faculty of Engineering, Osaka University,
2-1, Yamada-Oka, Suita 565

1. ま え が き

導波型光デバイスの利用や光集積回路の構成に必要な自由空間の光ビームと導波光の結合(入出力結合)の有力手段のひとつとして、グレーティング結合法が古くから検討されてきた^{1,2)}。グレーティングカップラはプレーナ技術で作製可能で小型・安定な結合素子であり、高い結合効率を得ることも可能である。しかし、チャンネル導波路への適用が困難でほとんどプレーナ導波路への応用に限られる欠点があり、原理・構造がより簡単な端面直接結合でも同等またはそれ以上の効率を得られるので、単純な光接続を目的とするとき、グレーティング結合は必ずしも最も優れた方法であるとはいえない。

グレーティングはホログラムの一種とみなすことができ、ホログラフィの原理に基づく波面変換を利用して、種々の光学機能を実現できることは、ホログラフィック光学素子³⁾として知られている。グレーティングカップラも同様に波面変換を行わせることができ、導波路の特性と組み合わせることで、広範な受動的光学機能を実現または付加することができる²⁾。また複合機能を単一素子で実現することができ、冗長性のため構造に小欠陥が生じても特性はほとんど劣化しないなど、光デバイスの簡単化・集積化に有利な特長をもっている。すなわち、グレーティングカップラは、導波路-自由空間の機能的な光接続の手段として大きな可能性をもつ

ており、導波路を用いた光情報処理デバイスの実現のための重要な要素技術であるといえることができる。

本稿では、グレーティングカップラの基本特性、実現可能な付加的機能、設計・作製技術について概説し、また応用例を紹介する。

2. グレーティングカップラの基本特性^{1,2)}

基本的な直線状・均一周期のグレーティングカップラ(GC)を図1に示す。導波路は空間領域、導波層、基板(屈折率 $n_a, n_t, n_s; n_t > n_s > n_a = 1$) からなる構造とする。グレーティングは導波層の表面に設けられた周期 A の凹凸構造であり、グレーティングベクトル \mathbf{K} ($|\mathbf{K}| = K = 2\pi/A$) で特徴づけられる。

2.1 結合角

波長 λ , 伝播定数 $\beta_0 = Nk$ (N : 実効屈折率, $k = 2\pi/\lambda$) の導波光が伝播してGC領域に達したとき、 $\beta_q = \beta_0 + qK$ ($q = \pm 1, \pm 2, \dots$) なる伝播定数をもつ空間高調波が生じる。 $|\beta_q| < n_a k$ または $|\beta_q| < n_s k$ となる次数 q がある場合には、この高調波は図1下段のように空間中または基板中の波とGC面に沿う方向の波動ベクトル成分に関して位相整合が成立するので、

$$n_a k \sin \theta_q^a = n_s k \sin \theta_q^s = Nk + qK \quad (1)$$

で決まる出射角 θ_q^a, θ_q^s の放射となり、出力結合が生じる。図1では、応用上重要な基本次数 ($q = -1$) の結合のみを示し、高次の結合は省略した。

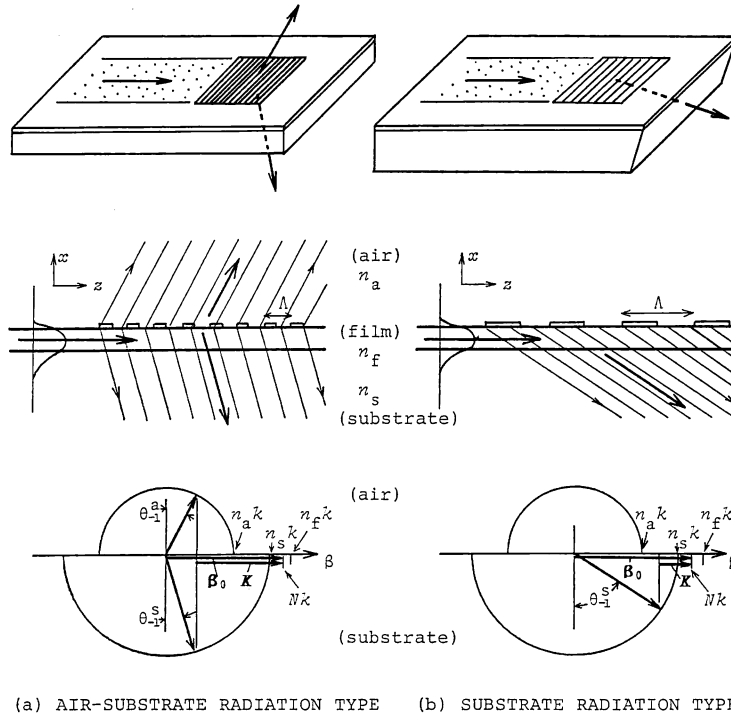


図1 基本的なグレーティングカップラ

周期 Λ が $1/(N+n_a) < \Lambda/\lambda < 1/(N-n_a)$ の範囲の GC は、図1 (a)のように基本次数放射が空間側と基板側の両側に生じるので空間-基板放射型とよぶことにする。また、 $1/(N-n_a) < \Lambda/\lambda < 1/(N-n_s)$ のものは図1 (b)のように基本放射が基板側のみに生じるので基板放射型とよぶことにする。後者の基板側放射は基板裏面で全反射するが、同図のように基板端面から空間に取り出せる。

GC を入力結合器として用いる場合には、式(1)で決まる角度のいずれかに等しい角で外部から光ビームを入射させれば、位相整合が成立し導波光が励振される。

2.2 出力結合効率

GC 領域を伝播する導波光は放射により外部に漏洩するので、その振幅は伝播とともに指数関数 $\exp(-\alpha_r z)$ の形で減衰する。 α_r は放射減衰係数とよばれる。またこれに伴って、出力される光ビームの振幅も同様の関数

$$g(z) = \begin{cases} \exp(-\alpha_r z); & 0 < z < L \\ 0 & ; z < 0, L < z \end{cases} \quad (2)$$

に比例した z 方向分布となる。GCは $0 < z < L$ の領域に設けられているとした。導波光パワーの減衰量は全放射パワーに等しいから、長さ L の GC の出力結合効率は

$$\eta_{out} = p_q^a \{1 - \exp(-2\alpha_r L)\} \quad (3)$$

と書くことができる。 p_q^a, p_q^s は全放射パワーから q 次

の空間側、基板側放射への分配比 ($\sum p_q^{a,s} = 1, \Sigma$ はすべての放射についての和を表し、空間-基板放射となる次数 q については p_q^a と p_q^s 、基板放射となる q については p_q^s をすべての q について和をとる) を表し、上式の p には出力として利用するビームに対応する添字の値を用いる (空間側放射を利用するときは p_q^a を、基板側放射を利用するときは p_q^s を代入する)。式(3)は高効率を得るには $\alpha_r L \gg 1$ とするとともに、 p を最大化する必要があることを示している。グレーティングの凹部と凸部の線幅が1:1に近い GC では、高次の結合は弱く $p_q (q \neq -1)$ は0または小さな値であり、基本次数 $q = -1$ のみで高い効率が得られる。空間-基板放射型 GC では放射パワーが両側にほぼ等分されてしまうため、 $p_{-1}^a \sim p_{-1}^s \sim 0.5$ となる。グレーティングをブレイズ化 (鋸歯状断面) すれば、 $p_{-1}^a \sim 1$ または $p_{-1}^s \sim 1$ とすることができるが、作製が困難であり、 θ や α_r を任意の値に設計できなくなるので、機能的接続に適さないなどの欠点がある。SiO₂/Si などの反射性の導波路基板を用いて、基板側放射の反射が空間側放射に同相重畳されるよう SiO₂ バッファ層の厚さを最適化すれば、 p_{-1}^s の値を増大することができ高効率化が図れる。一方、基板放射型 GC は、 $p_{-1}^s \sim 1$ が自動的に実現される

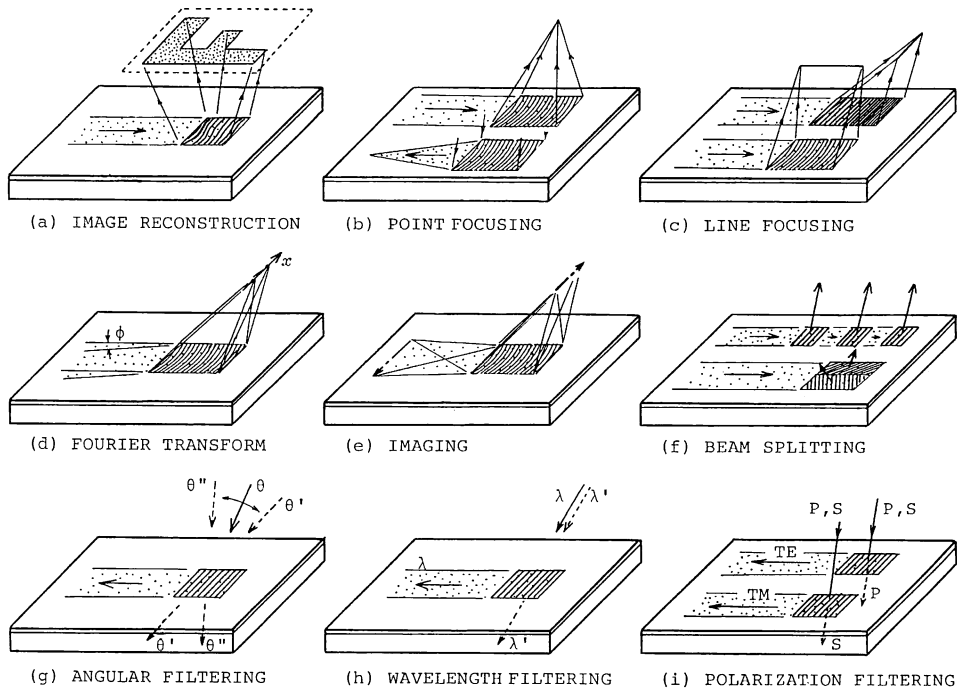


図 2 グレーティングカップラで実現できる各種の光学機能

ため高効率化に有利であり、周期が大きいため作製容易であるが、出力を空間に取り出すための基板端面加工が必要な欠点がある。

2.3 入力結合効率

GC は相反素子であるから、出力効率 η_{out} に等しい入力効率 η_{in} を得ることができる。しかし $\eta_{in} = \eta_{out}$ となるのは、ビーム入射角が結合角に等しいだけでなく、入射ビームの振幅分布 $h(x)$ も出力結合の射出光振幅分布 $g(x)$ に相似形である場合に限られる。一般の入射ビームの振幅分布 $h(x)$ は式(2)の $g(x)$ と相似形ではないので、

$$\eta_{in} = \eta_{out} \times \frac{|\int g(x)h(x)dx|^2}{\int |g(x)|^2 dx \int |h(x)|^2 dx} \quad (4)$$

となる¹⁾。すなわち、 η_{in} は η_{out} に対して $g(x)$ と $h(x)$ の重なり積分の値を倍数として低減する。この低減率は、 $h(x)$ がビーム幅と位置を最適化した一様分布、ガウス分布の場合には、それぞれ 0.814, 0.801 である。

3. 実現可能な各種の光学機能

図 2 に GC で実現可能な各種の光学機能を示す。以下の説明では空間側放射の利用を考えるが、基板側放射でもほとんど同様である。

3.1 画像再生

導波路上の媒体に、通常のホログラフィと同様に画像情報からの信号波と参照波としての平面波の干渉を記録して得られる GC は、導波路ホログラムとよばれ図 2 (a) のように画像を導波光により再生することができる⁴⁾。導波光伝播方向の逆転により実像、虚像を選択できる。記録の際に信号波の入射光軸を導波面に垂直とし、参照波入射角 θ_R を $\sin \theta_R = (\lambda_w/\lambda)N$ (λ_w : 記録光波長) を満たすように選べば、再生時の収差を最小にできる。この素子は当初は情報記録用ホログラムの集積化を目的に研究されたが、像面に任意の光強度分布(輝点の 2次元配列など)を実現する目的にも利用でき、次項の (b), (c) はその特殊例であると考えられる。

3.2 点集光

導波光を自由空間の球面波に波面変換するよう設計された曲線状・不等周期の GC は、図 2 (b) のように導波光を外部に集光して取り出す機能を有するので集光グレーティングカップラ (FGC) とよばれ、レンズ機能を果たす。焦点面の光振幅分布は FGC 面の瞳関数のフーリエ変換で与えられる。FGC の開口を $L_y \times L_x$ 、射出角を θ 、FGC 中心から測った空間側の焦点距離を f とすれば、 $\alpha_1 L_x \ll 1$ のとき(低効率のとき)の回折限界の焦点スポット 3 dB 全幅は、光軸射出面に垂直、平行な方

向にそれぞれ,

$$2\sigma_{\perp} = 0.88\lambda f/L_y, \quad 2\sigma_{\parallel} = 0.88\lambda f/L_x \cos\theta \quad (5)$$

で与えられる. $\alpha_r L_x$ が小さくない場合は z 方向瞳関数が式(2)の指数関数となるので, $2\sigma_{\parallel}$ は上式が与える値より大きくなるが, $\alpha_r L_x \sim 1$ では約3%の増大でありほとんど無視できる⁵⁾. しかし $\alpha_r L_x > 1$ ではFGCの有効開口長 $1/\alpha_r$ が L_x より小となり集光特性が劣化する. FGCは原理的には無収差のものが設計・作製可能であるが, 作製誤差や波長変化, 光軸ずれなどがある場合には収差が発生し, 主なものは非点収差とコマである⁶⁾. この機能の単純な応用は, 導波路と光ファイバの接続, 点光源による平行導波光の励振, 収束導波光の励振などである.

3.3 線集光

導波光を空間の円筒波に波面変換するよう設計したGCは, 図2(c)のように導波光を外部に線集光して取り出す機能を有するので線集光グレーティングカップラLFGCと呼ばれ, 円筒レンズの機能を果たす. 同図上部に示した集光は直線状・不等周期のGC, 下部に示した集光は曲線状・等周期のGCで実現される. 回折限界の集光線幅は, $\alpha_r L_x \ll 1$ のときおののお式(5)の $2\sigma_{\parallel}, 2\sigma_{\perp}$ で与えられ, $2\sigma_{\parallel}$ の $\alpha_r L_x$ に伴う増大も同様である.

3.4 フーリエ変換

レンズ機能を有するFGCは同時にフーリエ変換機能をも果たす. すなわち図2(d)のように導波光の伝播角 ϕ の成分は, ϕ が小的时候, 外部焦点を原点とする x 軸上の

$$x = Nf\phi \quad (6)$$

の点に集光されるので, 角度 ϕ を位置 x に変換する1次元フーリエ変換が行われる. 式(6)は実効屈折率 N を含む点(導波路内外の屈折率差による屈折の効果を表す)で通常のレンズの関係式と異なっている. 同様の1次元フーリエ変換は, 図2(b)下のFGCで入力結合と同時に実現でき, 図2(c)下のLFGCで実現することもできる.

3.5 結像

FGCは図2(e)のように1次元画像を結像する機能をもつ. FGCが発散導波光を収束球面波に変換するよう設計したものととして, 導波路側焦点距離を r , 空間側焦点距離を f , 出射角を θ とし, 図3のように座標をとり, 導波路内物点をA(0, $-r' \sin \delta'$, $-r' \cos \delta'$), 空間内像点をB($f' \cos \theta' \cos \epsilon'$, $f' \sin \epsilon'$, $f' \sin \theta' \cos \epsilon'$)とすれば, $r' \sim r$, $\delta' \sim 0$ のとき結像関係⁵⁾

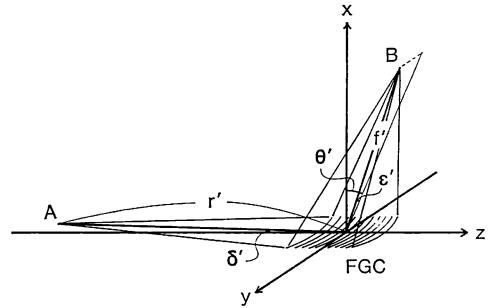


図3 集光グレーティングカップラの結像関係

$$\begin{aligned} \sin \epsilon' &= N \sin \delta', \quad \theta' \sim \theta, \\ N/r' + 1/f' &= N/r + 1/f \end{aligned} \quad (7)$$

が成り立ち, 図2(e)のように導波路内物体が光軸射出面に垂直な軸上に結像される. このときの倍率は $M = Nf'/r' \sim Nf/r$ である. 逆に点Bを物点とする入力結合を考えれば, $\theta' \sim \theta$, $f' \sim f$ のときには同様に倍率 $1/M$ の結像がなされる. しかし, θ', f' が θ, f と異なるときには入力結合率が低下するので, 通常のレンズのように物点距離を変化させて広範囲の倍率を得ることはできない.

3.6 ビーム分割

適当な効率に設計した複数のGCを図2(f)上部のように縦続配列すれば, 任意の比で導波光のパワー分割を行うことができる. また図2(f)下部のようにGCを複数のセグメントに横分割し, 放射方向の異なったものに設計すれば, 波面分割を行うことができる. このような構造は多ビームの合波や, 複合波面の励振にも利用できる.

3.7 角度フィルタリング

GCによる入力結合では, 入射角が式(1)の結合角に一致する場合に限り高い効率が得られ, 角度ずれがあると効率は急激に低下するので, 図2(g)のように角度フィルタリングがなされる. この角度選択性は導波光伝播が導波路面に沿う方向に限られることと導波モードが離散性をもつことに起因している. 角度ずれ $\Delta\theta$ に対する効率低減は式(4)を $g(z), h(z)$ を複素振幅として適用することで計算でき, $\alpha_r L_x \leq 1$ のとき近似的に

$$\eta_{in}(\Delta\theta) = \eta_{out} \times \text{sinc}^2(k \cos \theta L_x \Delta\theta / 2) \quad (8)$$

と書き表すことができる. これから3dB全幅で表した受容角は $2\Delta\theta = 0.88\lambda/L_x \cos \theta$ であり, 出力結合における出力ビームの回折拡がり角と同じ値である.

3.8 波長フィルタリング

GCによる出力結合で, 導波光の波長がわずかに変化したときは, 式(1)に従って出射角が変化する(空間には

角度変化の自由度がある)が、結合効率は殆ど変化しない。しかし入力結合で入射角を固定した場合は、波長が変化すれば入射角と結合角の間にずれが発生するので、結合効率が顕著に低下する。したがって図2(h)のように波長フィルタリングがなされる。式(1)から、波長変化 $\Delta\lambda$ に伴う結合角変化 $\Delta\theta$ は、モード波長分散を無視すれば近似的に $\Delta\theta = -\Delta\lambda/\lambda \cos\theta$ であるので、式(8)を適用することにより、 $\alpha_r L_z \leq 1$ のときの受容波長帯域幅は $2\Delta\lambda = 0.88\lambda/\alpha_r L_z$ であることがわかる。

3.9 偏光フィルタリング

GC は導波路内の TE 波と空間の S 偏光 (電界 \perp 入射面)、TM 波と P 偏光 (電界 \parallel 入射面) を結合する。TE と P、TM と S は電界が直交するので結合されない。実効屈折率 N は TE 波と TM 波で異なる値をとるので、TE 波と TM 波の混合が出力結合される場合には、各成分が S 偏光と P 偏光となるだけでなく、互いに角度分離される。また入力結合で入射角を固定した場合は、図2(i)のように一方の偏光のみが結合されるので偏光フィルタリングが行われる。結合する偏光は入射角と周期の組合せで選択できる。通常、 N_{TE} と N_{TM} の差、対応する結合角差は小さいが、受容角を小さくすることは容易であるので大きな消光比が得られる。同様にして異なる次数の導波モードの選択励振や分離を行うこともできる。

以上の機能分類は便宜上のものであり、たとえば(b)、(d)、(e)は同一素子の機能であり、(g)、(h)、(i)はすべての素子に共通である。また(b)、(c)を複合した機能の素子も実現でき、任意のものを(f)の方法で組合せできることはいうまでもない。なおフィルタリングは機能として利用できるが、応用上、好ましくない特性となる場合もあり、注意が必要である。

また、上では μm 厚さの薄膜導波路上の GC について述べたが、(a)~(f)の機能の素子は、光ビームを繰返し全反射(TIR)で伝播させる mm 厚さのガラス板光ガイドを用いても実現できる。本稿では GC と区別するため、この種の素子を TIR 型とよぶことにする。TIR 型は設計・作製が容易な特徴があるが、ガイドビームは離散的モードではないので、(g)~(i)の機能をもたない。

4. 設計・作製技術

4.1 設計法

4.1.1 仕様決定

導波路は集積しようとするすべての素子に適合するよ

う材料選択・設計され、この導波路を用いて GC を設計する機会が多い。GC のおこな仕様である開口 L_y 、 L_z 、焦点距離 f 、 r 、結合角 θ などのパラメータは、節2.3で述べた特性を考慮して、利用しようとする機能が要求を満たし、集積デバイスの全体の構成に適した値に決定する。開口は要求を満たす最小の値に選ぶことが、たんに小型化だけでなく、許容作製誤差・波長偏差などの観点からも有利である。

4.1.2 パターン設計

3章で述べた機能は導波光と空間波の間の波面変換として記述でき、この波面変換は2波の位相差に相当する位相変調を導波路面上で与えることで実現される。したがって2波の導波路面上の位相分布を $\Phi_1(y, z)$ 、 $\Phi_2(y, z)$ とすれば、GC のパターンは

$$\Phi_1(y, z) - \Phi_2(y, z) = 2m\pi + \text{const.} \quad (9)$$

で与えられる。ここで m ($=\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$) はグレーティング線の番号であり、上式を z または y について解くことで m 番目の線の形状を表す式が得られる。たとえば導波路内焦点距離 r 、空間内焦点距離 f の FGC では

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= kN\sqrt{y^2 + (z+r)^2} \\ \Phi_2 &= -kV\sqrt{y^2 + (z-f\sin\theta)^2} + (f\cos\theta)^2 \end{aligned}$$

であり、式(9)は y について解析的に解ける。

4.1.3 効率設計

機能的 GC の効率は、中心周期と等しい周期をもつ均一な GC で近似して解析できる。最大効率はパワー分配比 p の最大化と $\alpha_r L_z \gg 1$ で実現されるが、放射損失係数の条件 $\alpha_r L_z \gg 1$ は集光特性などの機能の劣化をもたらすので、効率・機能を両立させる $\alpha_r L_z = 1$ が設計指針となる。 p や α_r のデバイスパラメータ (各層の厚さ、屈折率) 依存性の計算法には、厳密法としてフロッケの定理による空間高調波展開に基づく数値解析や、近似法として伝送回路論的手法に基づく摂動論解析、モード結合理論による解析などがある¹⁾。近似法では解析的結果への代入計算のみで p や α_r の値が求まり、精度も $\alpha_r < 1\text{mm}^{-1}$ の素子の設計には十分なことが多い。グレーティング溝深さ h が十分小さなき、 α_r は h^2 に比例して増大する。図4に、ガラス/SiO₂/Si 導波路上の Si-N グレーティング (空間放射型) についての回路論的近似解析による計算例を示す。反射性基板を用いた構造であるので、SiO₂ 層の厚さを適当 ($t_b = 1.86\ \mu\text{m}$) に選ぶことにより $p = p^{-1}$ を最大値 0.72 とでき、 $L_z = 1\text{mm}$ のとき溝深さを $t_g = 0.035\ \mu\text{m}$ とすると $\alpha_r L_z = 1$ が実現できることがわかる。このとき式(3)より出力効

率は約60%となる。

4.2 作製技術

4.2.1 パターン作製

GC パターンの作製法には、(1)ホログラフィック干渉露光法と、(2)電子ビーム描画法がある。(1)は直線状・均一周期の GC や画像再生用 GC の作製には有力な技術であるが、FGC や複合機能 GC では作製光と結合光の波長差、導波路内外の波長差により発生する収差が問題となるので、応用に限られる。(2)はパターンをコンピュータ計算して電子ビーム走査で描画するので、高い自由度をもっている。しかし、機能的 GC は膨大なデータを必要とする曲線群パターンであるので、汎用装置では高い描画効率を得られない。著者らは、デジタル/アナログ信号処理を併用した走査制御で滑らかな曲線描画を高効率で行える光学素子作製専用の装置を開

発してきた(商品化がなされている)^{2,7)}。グレーティングの各線は、サンプリング点につき式(9)で計算した座標データをスープライン補間で必要数のデータとし、このデータを走査制御回路に転送し、アナログ処理した信号でビーム走査して描画される。

4.2.2 材料と加工法

グレーティング材料と加工法には、(1)レジストパターン自体をグレーティングとして用いる、(2)パターンを導波路表面にエッチングにより転写する、(3)導波路上に PCVD 堆積した Si-N 膜に反応性イオンエッチングによりパターンを転写する、(4)パターンをリフトオフ法で Ti 膜に転写した後、O₂ 中で熱酸化し TiO₂ グレーティングを得る。など、多くの組合せが可能である。(1)は作製容易であるが、レジストの屈折率は小さいので大きな α_r を得るには深い溝が必要、溝深さの制

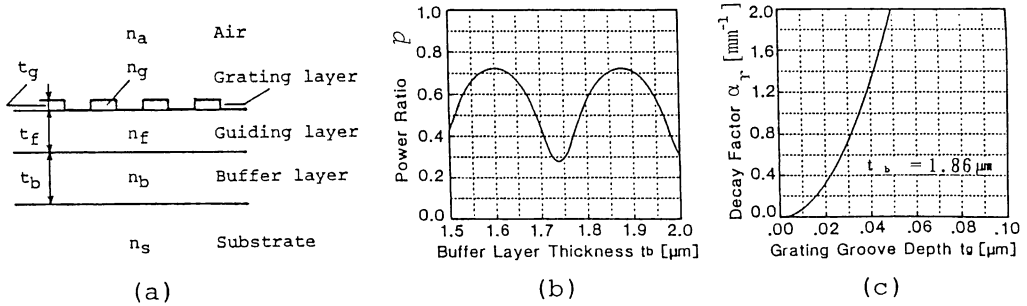


図4 ガラス (Corning # 7059)/SiO₂/Si 導波路上の Si-N グレーティングカップラ (空間放射型) のパワー分配比 p と放射損失係数 α_r

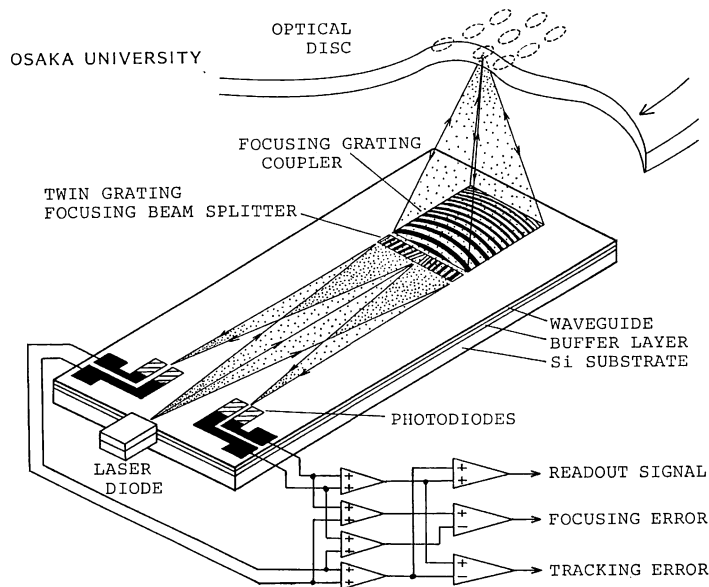


図5 光集積ディスクピックアップ

御が困難などの欠点がある。ガラス導波路には(3)、LiNbO₃導波路には(4)の適用で良好な結果が得られる。

5. 応用 例

図2(a)の画像再生の応用にはホログラムメモリの集積化がある^{4,8)}。TIRホログラムの集積化や液晶光スイッチとの組合せによる選択再生、図2(f)上のようなアレイ状のTIRグレーティングを用いた多段光スイッチの構成もなされている⁹⁾。また同様のTIRグレーティングアレイの光コンピューティングへの応用をめざした研究も行われている^{10,11)}。

図5はガラス/SiO₂/Si導波路にFGC, TGFBS, フォトダイオードを集積して構成した光集積ディスクピックアップを示す^{2,12,13)}。FGCは集光と導波路内外の往復結合に用いられ、図3に示した結像特性も利用されている。TGFBSはコプレーナブラッググレーティングの変形で、導波光を効率50%で回折し、波面2分割と弱集光の機能を実現している。デバイスはディスクからの反射光強度の検出、フォーカシング/トラッキング誤差の検出を行うことができる。また、このピックアップはFGCの角度フィルタリング機能と指数関数型瞳関数の効果により超分解特性をもつことが理論的に示されている^{14,15)}。

図6は3焦点FGC(TFGC)を用いた光磁気ディスクピックアップを示す¹⁶⁾。TFGCは3セグメントのFGCで偏光フィルタリング機能を利用して直交偏光成分を分離し、微小な磁気カー回転を差動法で検出するととも

に、誤差検出を可能にしたものである。波長フィルタ特性の悪影響は外部グレーティングとの組合せで除去されている。

また、図2(c)のLFGCによる線集光と1次元結像の機能を利用して、光カードのような1次元配列情報を並列に読み取るデバイスも提案されている¹⁷⁾。

図7は光集積干渉計型位置・変位センサーを示す¹⁸⁾。デバイスは図5のFGCを平行ビーム出力型に変更し、ブラッグ反射器(DBR)を追加したものであり、可動鏡からの信号波とDBRからの参照波の干渉を検出するの

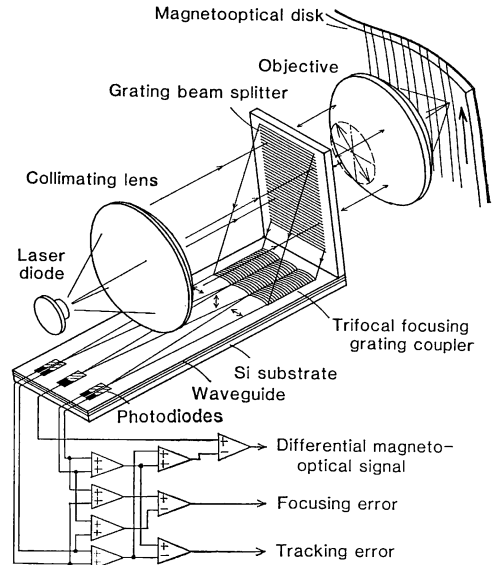


図6 3焦点 FGC (TFGC) を用いた光磁気ディスクピックアップ

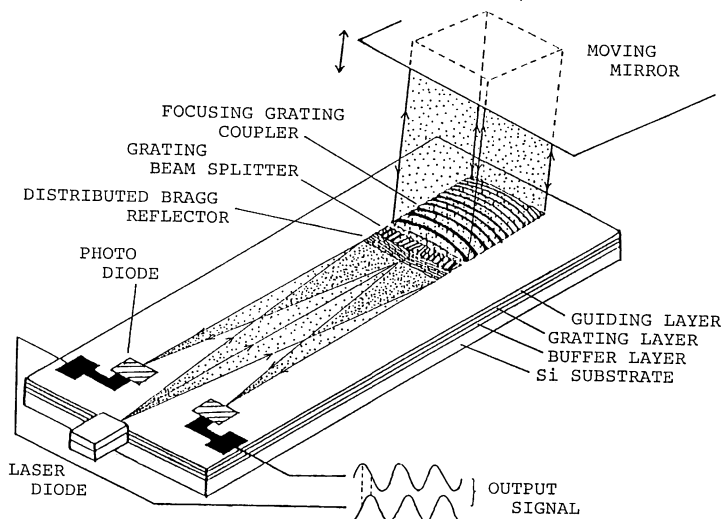


図7 光集積干渉計型位置・変位センサー

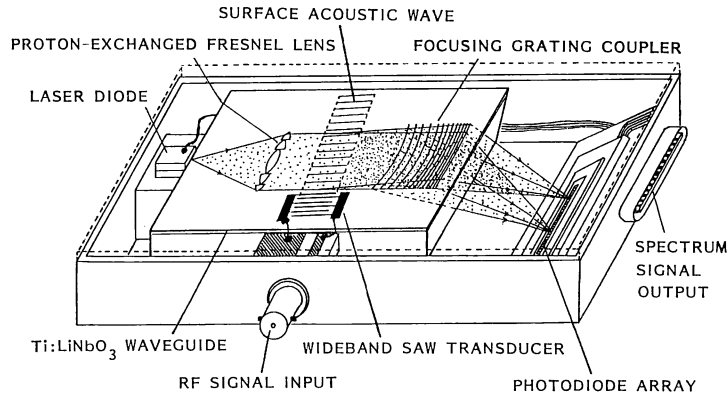


図8 FGCを用いた光集積RFスペクトルアナライザ

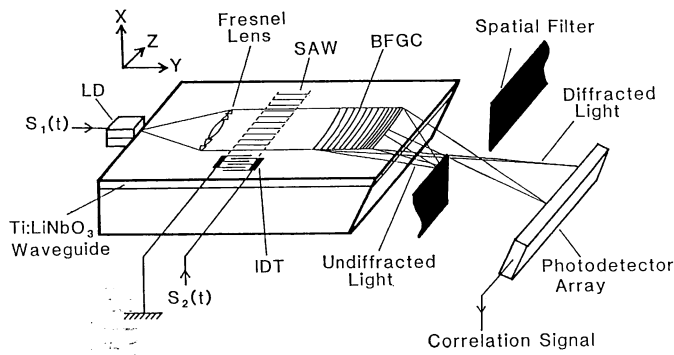


図9 2軸性FGC(BFGC)を用いた時間積分型コリレータ

で、出力電流の周期的変化を計数することで変位を計測できる。

図8はLiNbO₃導波路にFGCと導波型音響光学ブラッグセルを集積した光集積RFスペクトルアナライザを示す¹⁹⁾。導波光はブラッグセルで入力RF信号の周波数に比例した角で回折された後、FGCによりフーリエ変換されるので、焦点面上に光強度分布の形でスペクトルが得られる。また、このデバイスのFGCを長焦点のものとし、光検出器を除去して記録媒体を配置すれば、光集積プリンタヘッドとして応用できる²⁰⁾。

図9は2軸性FGC(BFGC)を用いた時間積分型コリレータを示す⁷⁾。BFGCは図2(c)上下のLFGCを複合したもので、焦点距離の異なる直交2円筒レンズの機能を有し、空間フィルタと集光が簡単な構成で実現できる。光源とブラッグセルに入力した2RF信号の相関が得られる。

図10は平行導波光励振用とフーリエ変換用の2個のFGCと導波型電気光学空間変調器を集積したマトリクスベクトル乗算器を示す²¹⁾。空間変調器での角度コー

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}b_1 + a_{12}b_2 \\ a_{21}b_1 + a_{22}b_2 \end{pmatrix}$$

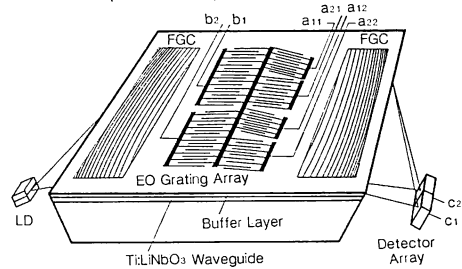


図10 光集積マトリクスベクトル全並列乗算器

ディングにより、全並列の乗算を行わせることができる。

以上のデバイスは実際に試作され、基本的な動作が実験で確認されているが、詳細は文献を参照されたい。

6. む す び

グレーティング素子を用いた機能的な光接続について概説した。応用についての著者らの研究は例にすぎず、多

くの発展が可能と思われる。半導体導波路デバイスや導波型非線形光学デバイスへの適用などが今後の課題であると考えている。また、光コンピューティングのための論理素子や VLSI チップ、モジュール間の接続への応用の将来発展が期待される。本解説が類似の応用や将来の発展のため多少でも参考になれば幸いである。

文 献

- 1) 西原 浩, 春名正光, 西原敏明: 光集積回路 (オーム社, 東京, 1985) pp. 88-100.
- 2) T. Suhara and H. Nishihara: "Integrated-optics components and devices using periodic structures," IEEE J. Quantum Electron., **QE-22** (1986) 845-867.
- 3) 西田信夫: "ホログラフィック光学素子", 応用物理, **51** (1982) 564-566.
- 4) T. Suhara, H. Nishihara and J. Koyama: "Waveguide holograms: a new approach to hologram integration," Opt. Commun., **19** (1976) 353-358.
- 5) 裏 升吾, 西原敏明, 西原 浩, 小山次郎: "光集積ディスクピックアップ用集光グレーティング", 信学論(C), **J 68-C** (1985) 803-811.
- 6) S. Ura, T. Suhara and H. Nishihara: "Aberration characterizations of a focusing grating coupler in an integrated-optic disc pickup device," Appl. Opt., **26** (1987) 4777-4782.
- 7) T. Suhara and H. Nishihara: "Guided-wave optical devices using periodic structures," 3rd Optoelectronics Conf. (OEC '90), 13B4-4, Chiba, July 11-13 (1990).
- 8) T. Suhara, H. Nishihara and J. Koyama: "An approach to integrated waveguide-hologram memory," Proc. SPIE, **176** (1979) 48-55.
- 9) 沢田雅彦, 西原敏明, 西原 浩, 小山次郎: "液晶光スイッチマトリクスを用いた集積化ホログラムメモリデバイス", 信学技報, **OQE 81**-116 (1982).
- 10) J. Jahns and A. Huang: "Planar integration of free-space optical components," Appl. Opt., **28** (1989) 1602-1605.
- 11) T. Kubota and M. Takeda: "Array illuminators using grating couples," Opt. Lett., **14** (1989) 651-652.
- 12) S. Ura, T. Suhara, H. Nishihara and J. Koyama: "An integrated-optic disc pickup device," IEEE J. Lightwave Technol., **LT-4** (1986) 913-918.
- 13) T. Suhara and H. Nishihara: "Integrated-optic disc pickup devices using waveguide holographic components," Proc. SPIE, **1136** (1989) 92-99.
- 14) 西原敏明, 西原 浩: "光集積ディスクピックアップにおける読み出し応答の解析", 光学, **18** (1989) 82-90.
- 15) 西原敏明, 西原 浩: "光集積ディスクピックアップにおける超分解読出しのシミュレーション", 光メモリシンポジウム '90, 千葉, 7月9-11日 (1990) pp. 49-50.
- 16) T. Suhara, H. Ishimaru, S. Ura and H. Nishihara: "Integration of detection optics for magneto-optical disk pickup," Trans. IEICE, **E 73** (1990) 110-115.
- 17) S. Ura, Y. Furukawa, T. Suhara and H. Nishihara: "Integration of waveguide gratings for parallel data pickup," Topical Meet. Integrated Photonics Research, WI 6, Hilton Head, March 26-28 (1990).
- 18) T. Suhara, S. Ura and H. Nishihara: "An integrated-optic interferometer position sensor," Conf. Laser Electro-Optics (CLEO '87), FQ 3, Baltimore, April 26-May 1 (1987).
- 19) 西原敏明, 原 邦彦, 西原 浩: "集光グレーティングを用いた光集積スペクトルアナライザ", レーザ研究, **17** (1989) 22-31.
- 20) T. Suhara, N. Nozaki and H. Nishihara: "An integrated acoustooptic printer head," 4-th Eur. Conf. Integrated Optics (ECIO '87), Glasgow, May 11-13 (1987) pp. 139-144.
- 21) M. Fujimura, T. Suhara and H. Nishihara: "Integrated optic full-parallel matrix-vector multiplier using angular coding technique," Conf. Opt. Computing (OC '90), 10H7, Kobe, April 8-12 (1990).