

## イオン交換ガラス導波路による光方向性結合器

Optical Directional Coupler by the Ion-exchanged Glan Waveguides

藤 井 陽 一\*・日 高 秀 人\*

Yoichi FUJII and Hideto HIDAKA

ガラス中に、銀、カリウム等を、300°C程度のそれほど高くない温度で（電界をかけることもある）、移入するイオン交換法を用いると、比較的容易に光導波路をつくることができる。この導波路を背中合わせに2枚重ねて、結合度可変の光方向性結合器をつくり、光ヘテロダイン検出器に応用した。

## 1. 序

光導波路で光回路を構成する場合、直線導波路自体の特性と共に、導波路分岐、合流、交差、曲がり、屈折等の、回路構成上必要となる基本的な要素の特性を明らかにすることは重要である。これらの比較的簡単な構造だけでも、特性のモード、偏波面依存性を利用して、各種の機能をもつデバイス（たとえば、TE-TM モードスプリッタ<sup>1)</sup>等）を構成することができる。我々は、二導波路重ね合わせ構造（立体交差）の光方向性結合器を提案し、<sup>2)</sup>イオン交換法によるガラス導波路を用いて実験した。さらに、この系の光方向性結合器としての特性を計算し、その伝播定数、交差角依存性、およびヘテロダイン検出系に用いた場合の特性について明らかにしたので報告する。

## 2. 二導波路重ね合わせ構造の光方向性結合器

## —特性の計算—

## 2-1 はじめに

光ヘテロダイン検出系では、信号光、局発光の空間位相分布と偏波を光検出器上で一致させる必要がある。この方法として、空間波の場合は、ハーフミラーやグレーティングを用いたものが考えられるが、光ファイバとの整合性や機械的安定性を考えると、導波路型のデバイスを用いることが望ましい。一番簡単には、2つの導波路を合流させる形のもので考えられるが、この構造では、入出力の導波路の正規化伝播定数が同じである場合、最低-3 dBの放射損失が生ずることが知られている。<sup>3),4)</sup>我々は、将来の光 IC の三次元化とも見合った構造の図1のような系について検討を加えた。<sup>2)</sup>この系は、チャンネルガイドを2枚貼り合わせて交差させた構造をもつものであり、交差角  $\theta$  を変化させることにより、交差部における結合度  $\alpha$  ( $\equiv P_2/P_0$ ) を変化させることができる。この系は、単なる方向性結合器としても、また、積み重ねた

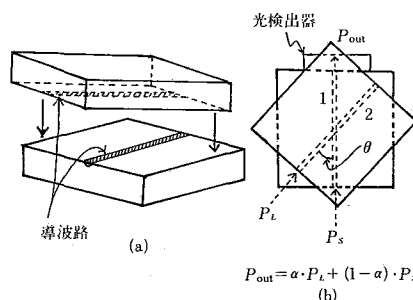


図1 素子構造

光回路間の結合方法の1つとしても興味深い系である。以下、2-2~2-4では、この結合器の諸特性を解析する。

## 2-2 結合度

## ① 近似計算

結合度  $\alpha$  の角度 ( $\theta$ ) 依存性を解析的に近似して考えてみる。第1次近似として、交差部のある断面を考えると、モード0から1への変換係数  $C_{01}$  は、

$$C_{01} \approx \frac{\iint E_0 \cdot E_1 \cdot dS}{\left(\iint E_0^2 dS\right)^{1/2} \cdot \left(\iint E_1^2 dS\right)^{1/2}} \quad (1)$$

となる。結合が弱い場合は、これを結合係数とする結合モード方程式が各断面で成り立ち、この積分として最終的な結合度が求められるが、今の場合、2枚の導波路間の間隔を0とすると、弱結合近似は、不適當である。分岐前後の入/出力の各分岐間の結合は無視し、交差部の中心断面でのモード変換のみを考える。入力モードは、交差部中心では断面が2倍の導波路のモードに変換されると考え、最低次モードのみ考えると、結合度  $\alpha$  は、(1)を用いて、

$$\alpha \approx \frac{1}{2} C_{01} \quad (2)$$

ここで、モード0は、2倍断面のモード、モード1は、角度  $\theta$  だけ傾いた出力分岐2のモードと近似できる。

\* 東京大学生産技術研究所 第3部

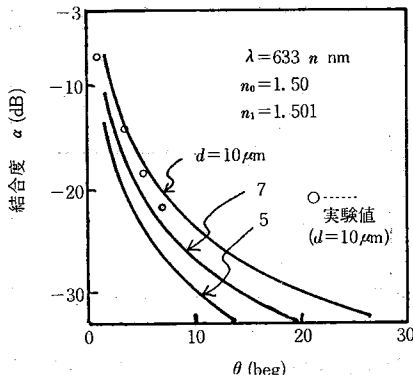


図 2  $\alpha(\theta)$  の計算例 (実線)

$\alpha(\theta)$  の計算例を図 2 に示す。

② BPM (Beam Propagation Method) による数値計算

前節に示した解析では、(i) 入/出力の導波路間の結合を無視、(ii) 2つのチャネルガイドの伝播定数が異なる場合の表現が困難、(iii) 放射モードの評価が困難、等の難点がある。そこで、 $\Delta n$  が比較的小さい場合の光波伝播の解析法として知られている BPM<sup>(4,5)</sup> を用いて数値計算を行った。BPM とは、スカラー波動方程式：

$$(\nabla^2 + K^2 n^2(\mathbf{r})) \cdot \phi = 0 \quad (3)$$

を、(i)  $\Delta n = n(\mathbf{r}) - n_0$  が小さく、その  $z$  方向(波の伝播方向)の変化の割合が小さい、(ii) 波は  $z$  方向に進む、の仮定の下に、光波伝播を、近似的に、(i) 一様媒質(屈折率  $n_0$ ) 中の Helmholtz 方程式： $(\nabla^2 + K^2 n_0^2) \cdot \phi = 0$  を解く、(ii)  $\Delta n$  による位相の修正、の 2 段階に分けて考えるものである。(i) は Fourier 空間で考えると、展開係数の変化を容易に計算できる。

②-1 近似の範囲

近似の適用範囲としては、簡単には、展開した場合の空間周波数の横方向成分

$$k_x = 2\pi m/L, \quad k_y = 2\pi n/L \quad (4)$$

が、実際に予想される電磁界の横方向空間周波数より大きい範囲にまで及んでいること、すなわち、

$$k_x^{\max} = k_y^{\max} = \frac{2\pi}{L} \cdot N > k \cdot \sin \theta_{\max} \quad (5)$$

が成り立つことが挙げられる。導波路自体が  $z$  軸に対して角度  $\theta$  だけ傾いている場合は、上記の  $\theta_{\max}$  を  $\theta_{\max} + \theta$  でおきかえたものとなる。したがって、適用条件は、

$$k_x^{\max}, k_y^{\max} > k \cdot \sin(\theta_{\max} + \theta) \quad (6)$$

$$\left( \begin{aligned} \theta_{\max} &\approx (n_{\max}^2 - n_0^2)^{1/2} \\ k_x^{\max}, k_y^{\max} &= \frac{2N}{L} \pi \end{aligned} \right)$$

である。図 3 のように座標をとり、図中の定数で計算を行った。このとき、 $k_x^{\max} = k_y^{\max} \approx 20k \sin \hat{\theta}$  となり、十分精度良い近似となる。(  $\hat{\theta} = \theta_{\max} + \theta$  )

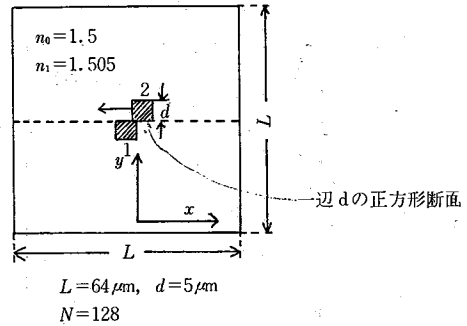


図 3 計算に用いた座標

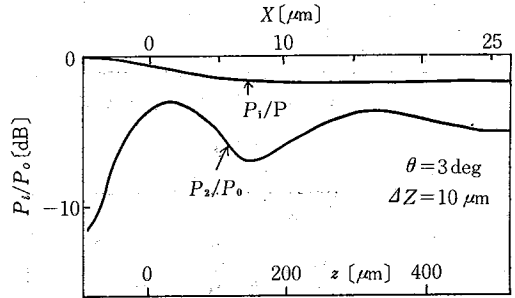


図 4 パワー分配比の  $z$  方向変化の例

②-2 計算結果

まず予備段階として、一次元の平面導波路の固有モードの伝播を確認した後、図 3 の設定で立体交差系の光波の伝播を計算した。計算は、両導波路共にシングルモードの状況で、

- i) 両導波路がまったく同じ場合の結合度の角度依存性
- ii) 両導波路の伝播定数が異なる場合の結合度の角度依存性

について行った。計算結果を図 4~6 に示す。図 4 には、各分岐のパワーの  $z$  方向変化の典型例を示す。 $P_2/P_0$  が振動的になるのは、両導波路間の結合によるものである。図 5 に、 $z \rightarrow \infty$  でのパワー伝達比および各分岐のパワーを示す。 $\theta = 1.5^\circ$  付近では、 $3^\circ$  以上と比べて、 $P_1/P_0$  と  $P_2/P_0$  の大小が逆転している。また  $\theta = 1.5^\circ, 3^\circ$  に固定して、導波路 2 の  $\Delta n$  ( $\equiv \Delta n_2$ ) を変化させたときの  $P_1/P_0$  の変化を図 6 に示す。したがって明らかに  $\theta \approx 1.5 \text{ deg}$ 、 $\Delta n_2/\Delta n_1 \approx 1$  の付近では導波路 2 に結合しやすい状況にあると言える。これを図 7 のように光線モデルで定性的に考えてみる。横方向の光線が導波路に対して角度  $\theta_0$  をもってジグザグに入射すると異なった部分に入るときに屈折する ( $\theta_0$ )。このとき、 $\theta_0$  が導波路 2 の伝播角  $\theta_1$  との間に  $\theta_1 - \theta = \theta_0$  の関係にあるときに有効に導波路 2 を励振するものと考えられる。計算に用いた導波路の場合、

$$\theta_1 = \theta_0 = 3.46^\circ, \quad \theta_0' \approx 1.7^\circ$$

で、 $\theta = 1.5^\circ$  の場合にはほぼ上式の関係が成り立ってい

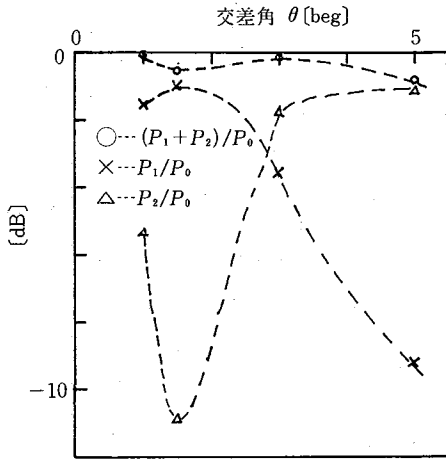


図 5 結合度およびパワー伝達比の交差角依存性

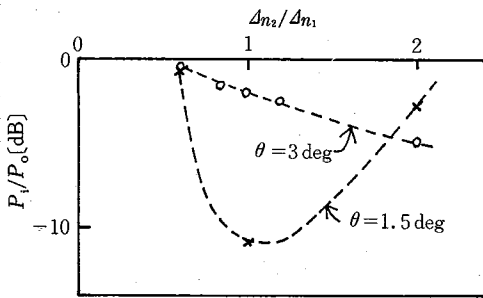


図 6 2つの導波路が異なる場合の結合度

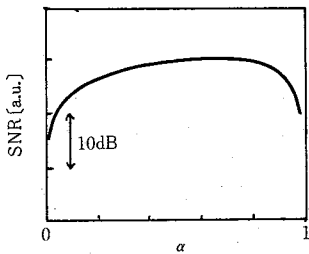


図 7 SNRのalpha依存性の例

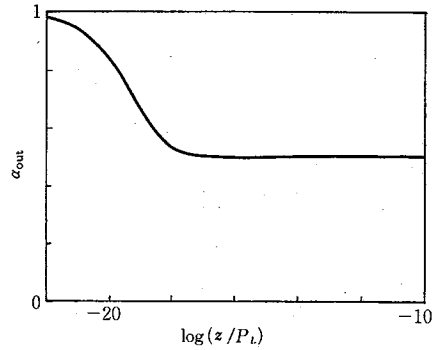


図 8 熱雑音の大きさ (Z/PL) に対する最適結合係数 alpha\_opt

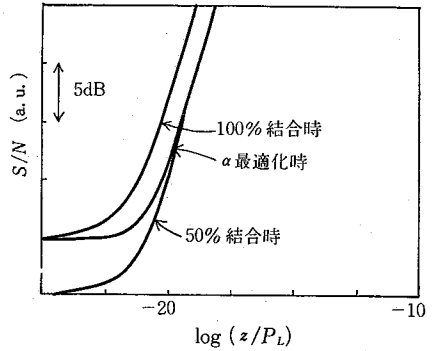


図 9 PDの場合のSNR比

ii)  $S/N \propto P_s'$  なので、 $P_s'$  は大きい ( $\alpha$  が大きい) 方がよい。

の相反する2条件があるからである。したがって、 $S/N$  を最大にするためには、与えられた  $P_s, P_L$  に対し、 $\alpha$  を調整する必要があり、 $\alpha$  を容易に変化できることが望ましい。 $S/N$  最適化の条件を、光検出器に、① P.D を用いた場合、② A.P.D を用いた場合、の2つについて考えてみる。

① P.D(フォトダイオード)を用いた場合

P.Dを用いたヘテロダイン検波の場合

$S/N$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{2\alpha \cdot P_s \cdot (1-\alpha) \cdot P_L \cdot (\epsilon\eta/h\nu)^2}{2e\{id + (1-\alpha) \cdot P_L \cdot (\epsilon\eta/h\nu)\} + 4kTe/R_L} \\
 &\quad \times \frac{1}{\Delta\nu} \\
 &= \frac{\alpha \cdot (1-\alpha)}{(1-\alpha) \cdot x + y/P_L + z/P_L} \cdot \frac{P_s}{\Delta\nu} \\
 &\equiv f(\alpha) \cdot (P_s/\Delta\nu) \tag{7} \\
 x &= h\nu/\eta, \quad y = id \cdot e/(\epsilon\eta/h\nu)^2 \\
 z &= \frac{2kTe}{R_L(\epsilon\eta/h\nu)^2}
 \end{aligned}$$

で  $f(\alpha)$  は、例えば図7のように変化し、 $\alpha$  の最適値が存在する。 $\alpha_{opt}$  は  $z/P_L$  の関数となる。(図8)

図9に、結合器なしの100%結合、50%結合(ハーフミラー使用時に相当)の場合と比較して、 $\alpha$  を最適化した

る。

### 2-3 ヘテロダイン検波系に用いた場合の $S/N$ 最適化条件

この光方向性結合器を光ヘテロダイン検波系の信号光、局発光の結合に用いる場合の特性を考える。ヘテロダイン検波系に用いる場合は、入力1に信号光( $P_s$ )、入力2に局発光( $P_L$ )を入れ、たとえば出射端1'に光検出器を置いて検波する(図1)。この場合、以下に示すように  $S/N$  比を最大にするための  $\alpha$  の最適値  $\alpha_{opt}$  が存在する。出射端での信号光、局発光パワーを各々  $P_s' (= \alpha \cdot P_s)$ 、 $P_L' (= (1-\alpha) \cdot P_L)$  とすると、

i) ショット雑音限界の検波に近づけるため、 $P_L'$  が大きい ( $\alpha$  が小さい) 方がよい。

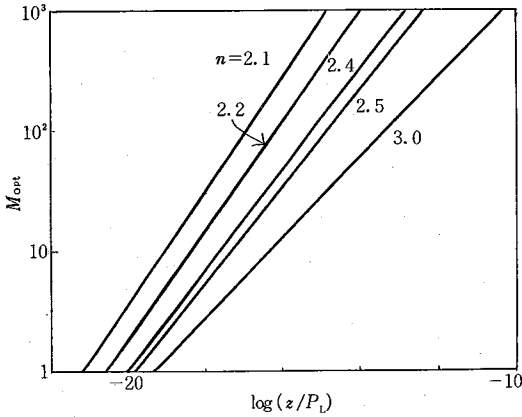


図10  $Z/P_L$  に対する最適増倍率  $M_{opt}$

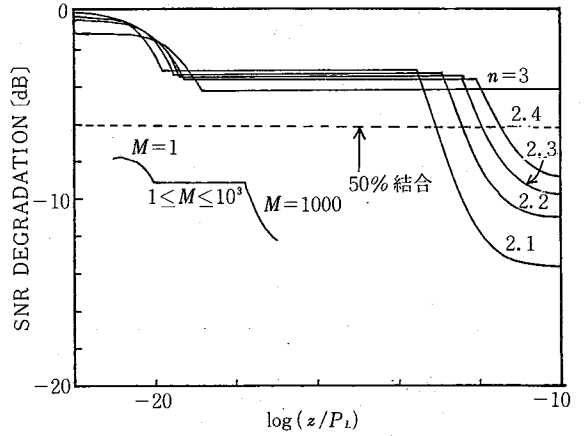


図12  $Z/P_L$  に対する SN 比の劣化

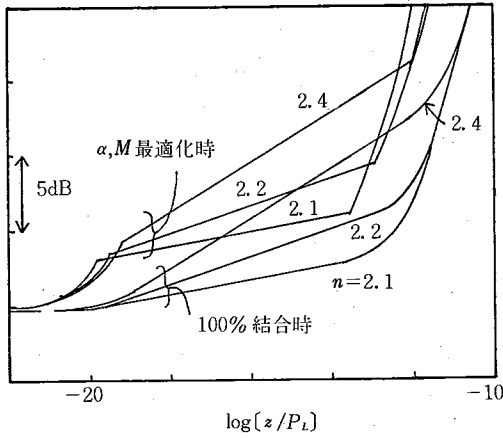


図11  $S/N$  (APD の場合)

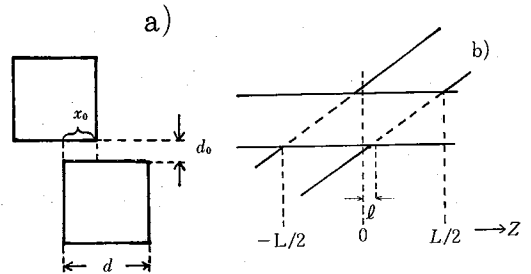


図13 計算のモデル

場合の  $S/N$  を示す。これより、 $\alpha$  最適化の効果は 1~2 dB 程度である。

② APD(なだれフォトダイオード)を用いた場合  
ADP を光検出器に用いた場合は、  
 $S/N$

$$\begin{aligned} &= \frac{2M^2 \cdot \alpha P_s \cdot (1-\alpha) \cdot P_L \cdot (en/h\nu)^2}{M^n \cdot 2e\{id + (1-\alpha) \cdot P_L \cdot (en/h\nu)\} + 4kTe/R_L} \\ &\quad \times \frac{1}{\Delta\nu} \\ &= \frac{M_2 \cdot \alpha \cdot (1-\alpha) \cdot P_s \cdot P_L}{M^n \{(1-\alpha)xP_L + y\} + Z} \cdot \frac{1}{\Delta\nu} \\ &= \frac{M^2 \alpha (1-\alpha)}{M^n \{(1-\alpha)x + y/P_L\} + Z/P_L} \\ &\quad \times \frac{P_s}{\Delta\nu} \end{aligned} \quad (8)$$

$n$ : 雑音増倍指数,  $M$ : 増倍率

實際上,  $n=2\sim 3$ ,  $M=1\sim 10^3$  と考えられ, この範囲で最適化を考える。σと共に  $M$  も最適化する場合には,  $y$  は実際は十分小さいことを考えて,

$$\alpha_{opt} \approx \frac{1}{2} \frac{n}{n-1}$$

$$M_{opt} \approx \left\{ \frac{2Z}{(n-2) \cdot (1-\alpha_{opt}) \cdot x} \cdot \left( \frac{1}{P_L} \right)^{1/n} \right\} \quad (9)$$

となり,  $\alpha_{opt}$  は  $n$  のみに依存する。この場合,  $M_{opt}$  を図 10 に, また①と同様に  $S/N$  を図 11, 12 に示す。これより,  $\alpha$  最適化の効果は 3 dB 程度である。

また,  $M$  を固定した場合は,  $\alpha$  の最適化によって, 5~10 dB 程度 (典型例) の  $S/N$  改善が期待できる。以上のように,  $\alpha$  の最適化によりある程度の  $S/N$  向上が期待できる。実用上は, APD を用いる場合に意味があると思われる。

#### 2-4 帯域幅

立体交差系の特性の波長依存性 (帯域) を考える。厳密に求めるには困難を伴うので, ここでは簡単に見当をつけるために, 図 13 のようにバッファ層 (屈折率  $n_0$ , 厚さ  $d_0$ ) が入っており, 両導波路間の結合が十分小さい場合を考える。

この場合, 結合モード方程式:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} \phi_1 + j\delta \cdot \phi_1 &= j\kappa(z) \cdot \phi_2 \\ \frac{d}{dz} \phi_2 - j\delta \cdot \phi_2 &= -j\kappa(z) \cdot \phi_1 \end{aligned} \quad (10)$$

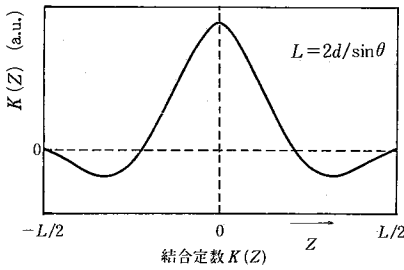


図14 結合定数  $K(z)$

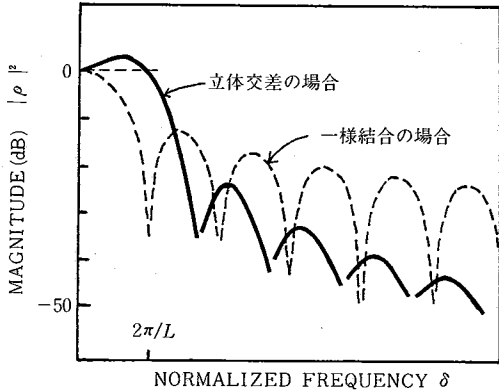


図15 規格化した帯域通過特性

$\phi_1, \phi_2$ : 各分岐の電磁界,  $k(z)$ : 結合定数  
 $\delta = \beta_0 - \beta$ : 正規化周波数  
 が成り立ち、結合が十分小さいものとすれば、  

$$\rho = |\phi_2 / \phi_1|_{z=L/2}$$

$$= 1 \int_{-L/2}^{L/2} k(z) \cdot \exp\{-j2\delta z\} \cdot dz$$

の関係がある。<sup>9)</sup> (すなわち、フィルタ応答の絶対値は、結合定数  $k(z)$  のフーリエ変換で与えられる)。この関係を用いてフィルタとしての応答を求める。

図 13 で  $x_0 > 0$  の区間 ( $x$  方向に重なった区間) の結合のみを考えて、他の部分では結合を無視すると、 $x(z)$  は、

$$x(z) \propto \frac{1}{2k_x} \sin k_x x_0 + x_0 \cos\{k_x(d-x_0)\} \quad (11)$$

となる。図 3 中の定数を用いた計算例を図 14 に示す。これより、フィルタ応答  $|\rho|^2$  は図 15 のようになる。図中に、長さ  $L$  の一様な結合の場合 (長さ  $L$  の平行な結合器で、 $\delta=0$  で crossover state になる場合) の応答を併記する。2 者を比較すると、立体交差系では、

- i) side lobe が低減 (2nd peak が 12.5 dB 低下)
- ii) peak が一様結合の場合の中心周波数からずれば、 $\delta = k_x$  なる点に移る。
- iii) shape factor (≒ 応答関数の包絡線を考慮して、ある rejection level でのバンド幅/3 dB 低下幅) は、図 16 のようになる。たとえば、rejection level =

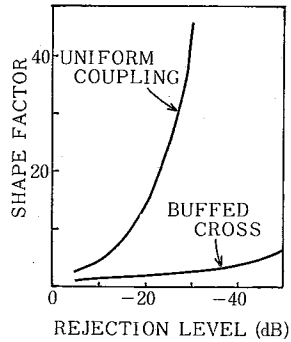
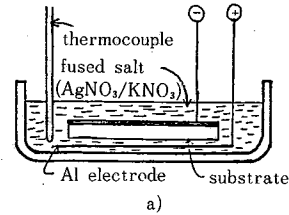


図16 shape factor の比較



k1

lpo

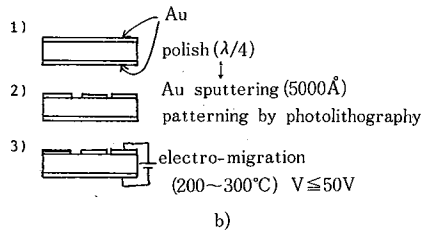


図17 実験系と作製プロセス

-30 dB では、31.6 (一様結合), 1.48 (立体交差) となり非常によい特性を示す。

等の特徴がある。この系は、バッファ層の厚みおよび交差角  $\theta$  を制御できれば、各導波路は直線よく、導波路間隔に複雑な形の重みづけをする場合<sup>7)</sup> と比べると、簡単にフィルタとしての応答にも遜色のないものが得られる。また  $k_x$  を選ぶことにより、ピーク周波数  $\delta_p = k_x$  が変えられるので、フィルタ応答関数の形に自由度がある。

### 3. 実験と結果

前記のような光方向性結合器を、イオン交換ガラス導波路 (チャンネルガイド) を 2 枚重ね合わせたもので実現した。同様な立体交差の実現法として、MMA 薄膜を用いた例がある。<sup>8)</sup> また、光導波路を平行に重ね合わせて押しつけ、平行ガイドによる結合および、光導波路と光ファイバとの結合を得た例もある。<sup>9)</sup>

導波路作製プロセスを図 7 に示す。交換イオンとしては  $Ag^+$  と  $K^+$  を試みた。side diffusion 低減のため金属マスクを用いたが、<sup>10)</sup> Au 膜 5000 Å では、拡散のマスクとして十分機能せず、マスクで覆った部分でも導波光が

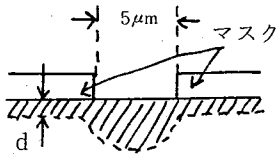


図18 導波路形状の模式図

表 1 ガラス導波路の諸元

\*: at 6328Å \*\* 平面導波路の値

ion	条 件	モード数 *	$\Delta n$	Loss (dB/cm) **
Ag <sup>+</sup>	300°C, 90min	3	0.13	1.50
K <sup>+</sup>	350°C, 10min	1	0.091	0.95



図19 突起の干渉顕微鏡写真

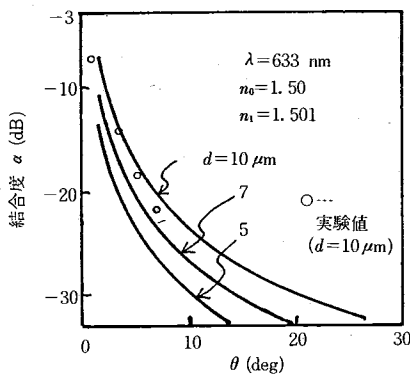


図20  $\alpha$  の測定例 (○印)

観察された。したがって、実際には、図18のような導波路ができていないものと考えられる。

導波路の諸元を表1に示す。マスクの下にできた平面導波路の導波モードの伝播定数の測定値から  $d$  (したがって、Au中のK<sup>+</sup>の拡散定数)を推定するとK<sup>+</sup>の場合、深さの幅方向にシングルモードとなる条件が存在する。完全なマスクを使った場合、線幅5μmでは、幅方向にシングルモードにはできないが、このような方法を用いることによりシングルモード化できる。また、導波路部分

は若干盛り上がるのが観察された(図9)。このようなチャンネルガイドを2枚作り、マッチングオイルを間にに入れて重ね合わせ、マイクロメータで押しつけた。この実験系では、マイクロメータにより、導波路間の間隔を変えることが可能である。結合度の角度依存性の一例を図20に示す。

#### 4. ま と め

2つの導波路で構成した立体交差系について、方向性結合器としての特性を計算した。数値計算とよく合うモデルの確立が課題である。また、BPMの有用性を確認した。さらにヘテロダイン検波系に用いた場合の特性を計算し、 $\alpha$ を最適化することにより、ある程度のS/N向上が得られることを示した。また弱結合の場合に波長依存性を計算し、この系の有用性を示した。イオン交換ガラス導波路を用いて実験を行い、この系の実現可能性を示した。

日頃、ご討論していただく、本所濱崎教授、荒川助教授およびイオン交換法について、ご教示いただいた東工大・伊賀助教授、伊賀研・及川氏に深謝いたします。

(1982年12月3日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) H. Nakajima et al; "Crosstalk characteristics of Ti-LiNbO<sub>3</sub> Intersecting waveguides and their application as TE/TM mode splitters" IEEE Trnas, MTT-30, 4, 617 (1982)
- 2) 日高, 藤井, 荒川 "二導波路重ね合わせ構造の光ヘテロダイン検波用方向性結合器" 57年春, 応物予稿集
- 3) R. Baets and P. E. Lagasse; "Calculation of radiation loss in integrated-optic tapers and Y-Junctions" Appl. Opt. 21, 11, 1972, (1982)
- 4) J. Van Roey et al; "Beam propagation method: analysis and assessment" J. Opt. Soc. Am, vol. 71, 7, 803 (1981)
- 5) M. D. Feit and J. A. Fleck. Jr; "Light propagation in graded-index optical fibers" Appl. Opt. vol. 17, 24, 3980 (1978)
- 6) H. Kogelnik; "Filter response of nonuniform almost periodic structures" B. S. T. J. vol. 55, 1, 109 (1976)
- 7) R. C. Alferness and P. S. Cross; "Filter characteristics of codirectionally coupled waveguides with weighted coupling", IEEE Trans. QE-14, 11, 843 (1978)
- 8) D. G. Dalgoutte et al; "Externally mounted fibers for integrated optics interconnections", Appl. Opt. vol. 14, 8, 186 (1975)
- 9) 小松他, "高分子材料を用いた多層膜光回路素子" 信学技報, OQE 81-136, 77, (1982)
- 10) C. D. W. Wilkinson and R. Walker; "The diffusion profile of stripe optical waveguides formed by ion exchange", Ele. Lett. vol. 14, 8, 599 (1978)