

研 究 解 説

新しい導波路型光スイッチ

A New Optical Waveguide Switch

加 藤 恒 夫*・藤 井 陽 一**

Tsuneo KATO and Yoichi FUJII

新しい形式の光スイッチ、とくに、光デジタルスイッチの動作モードの改良を目的として、新しい光スイッチの形式を提案し、この動作特性を解析した。非対称 X 分岐スイッチで、bar ステートか cross ステートの 2 つの状態をとるものを検討した。

1. は じ め に

本報告では、新しい形式の光スイッチ、とくに、光デジタルスイッチの動作モードの改良を目的として、新しい光スイッチの形式を提案し、この動作特性を解析した。

光デジタルスイッチの解析は、導波路自体の特性、上部電極による制御電界分布、分岐導波路における光波伝搬解析の 3 点からなっている。

導波路の電磁界分布の解析結果から表面屈折率を 0.02 以上に設定し導波層厚を 2~3 μm 程度に抑えることが、シングルモード条件、等価屈折率の大きさ、印加電圧に対する効率性の点から見て、最適といえる。上記の結論として得た理想的な導波路条件のもと、分岐において光波がどのような振る舞いをするかを、ビーム伝搬法 (Beam Propagating Method: BPM) を用いて解析した^{1),2)}。

BPM の解析においては、再現性よくパターンニングが行える構造と、分岐角を大きくとることを念頭においた。また、非対称 X 分岐スイッチの場合、bar ステートか cross ステートの 2 つの状態をとるが、これを入射ブランチに関わらず、出射ブランチが一致するようなスイッチに変形することができないか検討した。

2 章でビーム伝搬法について述べ、3 章で計算結果および考察、4 章で結論を述べる。

2. ビーム伝搬法 (Beam Propagating Method: BPM)^{3),4)}

2.1 光波伝搬解析と BPM

3 次元スカラー波動方程式は、下記で表される。

$$\square E = 0 \quad (2.1)$$

* 国際電信電話 (株)

** 東京大学名誉教授・日本大学理工学部

電界を、ゆっくり変化近似 (slowly varying) によって、伝搬方向 x 方向に激しく変化する位相項と振幅包絡線を表す項に分ける。

$$E = \phi \exp(-ikx) \quad (2.2)$$

$$\{\nabla^2 - 2ik_0(d/dx) + k^2 - k_0^2\} \phi \quad (2.3)$$

ただし、 $k = \beta_{0n}$ $k_0 = \beta_{0n_0}$ n_0 はクラッドの屈折率、屈折率差が十分小さいとして、

$$(d/dx) \phi = \{-i/2k_0 \nabla^2 - i(k - k_0)\} \phi \quad (2.4)$$

ここで右辺第 1 項は、自由空間における光の伝搬、右辺第 2 項は屈折率が n_0 と異なる導波構造による位相遅れを表している。BPM では、十分微小な距離 h に関して、第 1 項の効果と第 2 項の効果とを交互に作用させ、特殊な構造中の光波の伝搬の様子を知るものである。

例えば、図 1 のテーパ導波路の場合、まず、初期電界 $\phi(x, y)$ を $h/2$ だけ自由空間伝搬させ、つぎにこの区間全体分に相当する位相変化量を微小区間の中間で考慮し、最後に $h/2$ だけ自由空間伝搬させることによって、次のステップの入力電界 $\phi(x+h, y)$ が求められる。

いま述べたことを、以下で簡単に定式化する。ここでは、2 次元 BPM について述べ、3 次元構造の場合は等価屈折率法により、スラブに置き換えて適用することができる。スラブ導波路の場合には、式 (2.4) は次式で表される。

$$(d/dx) \phi = \{-i/2k_0 \nabla^2 - i(k - k_0) - \alpha\} \phi \quad (2.5)$$

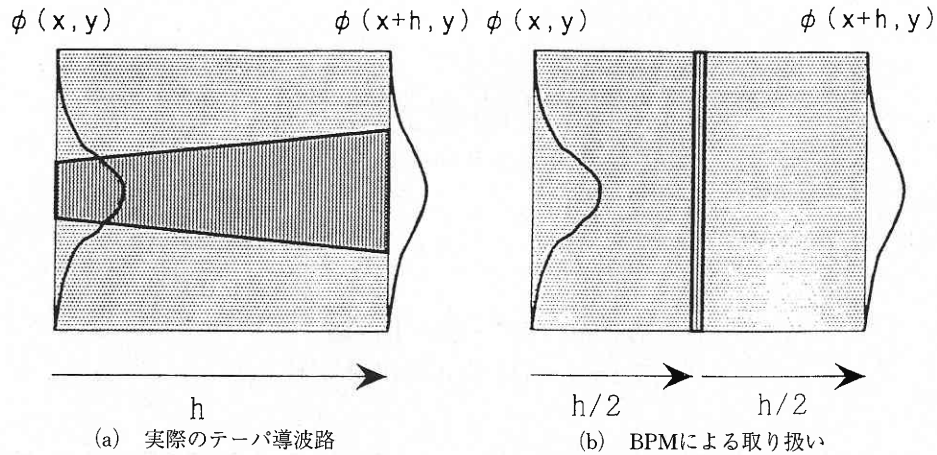


図1 BPMのテーパ導波路の取り扱い例

ただし

$$\nabla^2 = (d/dz)^2 + (d/dy)^2 \quad (2.6)$$

であり、一般化するために損失を表す項 $-\alpha \phi$ を付加した。

式 (2.5) の右辺第 1 項の自由空間における光の伝搬を表す項を演算子 A, 第 2, 3 の導波構造の影響を表す項を演算子 B とすると, 式 (2.5) はつぎのように書き表される。

$$(d/dx) \phi = (A + B) \phi \quad (2.7)$$

$$A = -i/2 k_0 \nabla^2 \quad (2.8a)$$

$$B = -i(k - k_0) - \alpha \quad (2.8b)$$

いま, A, B の x 依存性がないとして式 (2.7) の形式的な解を求めると, (2.9) となる。

$$\phi(x+h, y) = \exp[h(A+B)] \phi \quad (2.9)$$

ここで, 非可換の演算子 a, b に対するつぎの Baker-Hausdorff の定理 [30] を参考にする。

$$\exp a \exp b = \exp \{a + b + 1/2 [a, b] + 1/12 [a - b, [a, b]] + \dots\} \quad (2.10)$$

$a = hA, b = hB$ とするとき, 微小区間の長さ h を十分小さくすれば $O(h^2)$ 以上の微少量は無視することができるから

$$\exp \{hA + hB\} = \exp \{hA\} \exp \{hB\} \quad (2.11)$$

とおくことができる。さらに, 式 (2.10) は

$$\exp \{hA + hB\} = \exp \{hA/2\} \exp \{hB\} \exp \{hA/2\} \quad (2.12)$$

とすると精度が向上することが知られている。式 (2.12) と (2.10) とより

$$\phi(x+h, y) = \exp \{hA/2\} \exp \{hB\} \exp \{hA/2\} \phi \quad (2.13)$$

と表される。式 (2.13) は電界 $\phi(x, y)$ を距離 $h/2$ にわたって自由空間伝搬させ, つぎに図 1 の斜線部分に相当する位相変化量を微小区間の中間で考慮し, 最後に再び距離 $h/2$ にわたって, 自由空間伝搬させることにより電界 $\phi(x, y+h)$ を求める操作を表している。つぎに, A, B の x 依存性を考慮し, 具体的に行う計算を説明する。

2.2 FFT-BPM

まず, 上述の演算子 A の効果について考える。演算子 A は, 自由空間における光の伝搬を表すものであり, 式 (2.1) において対応するスラブ ($d/dy = 0$) の波動方程式は

$$\{\nabla^2 + k_0^2\} \psi = 0 \quad (2.14)$$

である。ただし自由空間の電界と区別するために ψ とおいた。上式の解は以下のようにして求めることができる。まず, ψ をフーリエ積分を用いてつぎのように表す。

$$\psi = \int_{(-\infty, \infty)} \{\Psi \exp(2i\pi \rho y)\} \quad (2.15)$$

ここで, $\Psi(\rho, x)$ は空間周波数が ρ の平面波成分の振幅

係数である。式 (2.15) を (2.14) に代入すると、 $\Psi(\rho, x)$ に対する微分方程式は

$$\{(d/dx)^2 + \beta^2\} \Psi = 0 \quad (2.16)$$

となる。ただし、ここで

$$\beta = k_0^2 - (2\pi\rho)^2 \quad (2.17)$$

である。また $x = x_0$ での電界分布が既知であり $\phi(x_0, y)$ であるとする。 $\Psi(\rho, x_0)$ を $\phi(x_0, y)$ の振幅係数であるとする

$$\Psi = F\{\phi\} = \int_{-\infty}^{+\infty} \phi \exp(-2i\pi\rho y) dy \quad (2.18)$$

で与えられる。ただし、 $F\{\}$ はフーリエ変換を表す。式 (2.18) を用いると (2.16) の解は

$$\Psi(x) = \Psi(x_0) \exp(-2i\beta(x-x_0)) \quad (2.19)$$

で与えられる。したがって、スラブの波動方程式 (2.14) の解は、つぎのように表される。

$$\phi = F^{-1}[F(\phi) \exp(-2i\beta(x-x_0))] \quad (2.20)$$

ただし、ここで F^{-1} はフーリエ逆変換を示す。上式が $x = x_0$ で $\phi(x_0, y)$ なる分布の電界を距離 $(x-x_0)$ にわたって自由空間伝搬させた場合の電界分布 $\phi(x, y)$ を求める関係式である。

つぎに図 1 に示すように $x = x$ で $\phi(x, y)$ なる分布の電界を距離 $h/2$ にわたって自由空間伝搬させた場合の電界分布 $\phi(x+h/2, y)$ を考える。式 (2.20) を用いると $\phi(x+h/2, y)$ は

$$\begin{aligned} \phi(x+h/2, y) \\ = F^{-1}[\exp(-2i\beta h/2) F(\phi)] \end{aligned} \quad (2.21)$$

と表される。ここで、 \exp の肩の位相変化量のうちで共通位相変化分 $\exp[-ik_0 h/2]$ を $\exp[-i\beta h/2]$ に足し引きしてフーリエ変換操作の外に出すと上式はつぎのようになる。

$$\begin{aligned} \phi(x+h/2, y) \\ = \exp(-2ik_0 h/2) F^{-1}[\exp(-2i\beta h/2) F(\phi)] \end{aligned} \quad (2.22)$$

ただし、ここで

$$\delta\beta = \beta - k_0 = \sqrt{[(kn)^2 - 2\pi\rho^2]} - k_0 \quad (2.23)$$

である。式 (2.13) と (2.23) を比較すると演算子 $\exp(hA/2)$ は

$$\begin{aligned} \phi(x+h/2, y) = \exp(-2ik_0 h/2) F^{-1} \\ [\exp(-2i\delta\beta h/2) F(\phi)] \end{aligned} \quad (2.24)$$

であることがわかる。上式が演算子 A の具体的な内容である。

つぎに、演算子 B について考える。式 (2.7) において演算子 B のみについて考えると、

$$(d/dx) \Theta = B\Theta \quad (2.25)$$

であるから、その解は

$$\Theta = \Theta_0 \exp\{\int B dx\} \quad (2.26)$$

で与えられる。区間 h の距離が十分微小なとき、上式の微分はつぎのように近似することができる。

$$\begin{aligned} \Theta(1,2) / \int_{(x, x+h)} B dx \\ = h/2 \{B(x) + B(x+h)\} \end{aligned} \quad (2.27)$$

以上から、式 (2.13) における演算子 $\exp(hB)$ は

$$\exp(hB) = h/2 \{B(x) + B(x+h)\} \quad (2.28)$$

という演算を表していることがわかる。 B は式 (2.8b) で与えられるようにスカラー量であるから、演算子 $\exp(hB)$ の具体的な操作は、電界に式 (2.28) 右辺の位相補正項を付加することである。

式 (2.24), (2.28) で表される演算子 A , および B の意味することを理解すると、式 (2.13) の $\phi(x+h, y)$ はつぎのように求められる。

1) 前半の距離 $h/2$ にわたる自由空間伝搬:

$$\begin{aligned} \phi(x+h/2, y) = \exp(-2ik_0 h/2) F^{-1} \\ [\exp(-2i\delta\beta h/2) F(\phi)] \end{aligned} \quad (2.29a)$$

2) 位相補正:

$$\begin{aligned} \phi(x+h/2, y) = \exp(h/2 \{B(x) + B(x+h)\}) \\ \phi(x+h/2, y) \end{aligned} \quad (2.29b)$$

3) 後半の距離 $h/2$ にわたる自由空間伝搬:

$$\phi(x+h/2, y) = \exp(-2ik_0 h/2) F^{-1} [\exp(-2i\delta\beta h/2) F(\psi)] \quad (2.29c)$$

2.3 計 算 条 件

ここでは、本研究で解析に用いた BPM の諸条件を示す。解析には、前述のとおり 2 次元の FFTBPM を用い、深さ方向の等価屈折率はグレーティング導波路の光線近似法によって求めた。水平面はステップ型の屈折率分布を仮定している。

波長	λ	1.55 μm
断面方向のステップ	dx	0.05 μm (100 μm を 2048 分割)
伝搬方向のステップ	h	1.00 μm

3. BPM 計算結果および考察

このスイッチは基本的に光波の干渉を用いていないため設計条件、動作電圧等に対する許容範囲が広いという利点をもっているが、逆に分岐角が小さく、素子長が長くなる、パターンニングに難点があるといった問題をかかえている。

ここでは分岐角を広げる、再現性のあるパターンニングが可能な構造を目的にシミュレーションを行った。以下の計算結果においては、スイッチングの消光比を、規格化出力、すなわち 2 本の出射導波路に閉じ込められた光強度の合計に対する片側（左側）の導波路に閉じ込められた光強度の割合によって表す（左の導波路中の強度）／（左右導波路中の強度の合計）。

ここで、各導波路の光強度は、厳密に高屈折率部分に閉じ込められた強度のみを取っており、クラッドにしみだしている裾の部分を考慮していないため、実際の消光比より数値上は悪い値になっている。

消光比はデジタル（0 or 1）な応答という点に基づき 10 dB 取れることを目安にした。また、導波路深さはやや深めの 4.0 μm としている。動作電圧が大きめの値になっているが、導波路深さを浅くすることによりこの動作電圧は大幅に減少させることができる。なお、電極の長さは、6.0 mm とした。

3.1 分岐部のクサビの影響

分岐部の鋭角のパターンニングは、従来のフォトリソグラフィパターンニング技術では困難を伴う。どうしても分岐の股の部分が丸まり短くなってしまい、マスクパターンのとおりパターンニングを行うことが難しい。非対称分岐導波路において、モードの断熱変化による片方の出射ブランチへのパワーの集中は、厳密には分岐直後に起こるわけではない。

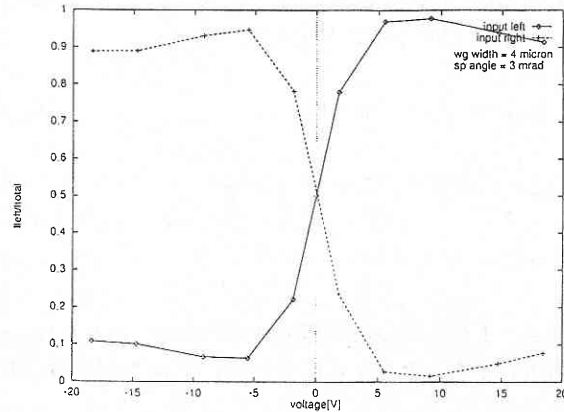


図 2 分岐角 3.0 mrad の X 分岐導波路においてクサビ形を切り取ったときのスイッチング特性（縦軸は、規格化出力：進行方向に対して左側の出射ブランチに閉じ込められた光強度の、左右出射ブランチからの光強度の和に対する割合を示している。）

分岐直後、各導波路に半々にパワーが分割されるが、2 本の出射ブランチの間隔が 1~2 μm 程度になったところで、2つの導波路間の結合係数が大きくなりモードソートリングが生じる。したがって、このパワーの移行が起きる以前であれば、分岐が切断されていても問題は生じないと考えられる。

ここでは、分岐部において、幅 1.0 μm のクサビ形をあらかじめ切断することを想定した。この条件であれば、再現性のよいパターンニングを行うことができる。

図 2 は、分岐角 3.0 mrad の X 分岐導波路においてクサビ形を切り取ったときのスイッチング特性である。（縦軸は、規格化出力：進行方向に対して左側の出射ブランチに閉じ込められた光強度の、左右出射ブランチからの光強度の和に対する割合を示している。）

デジタルな応答という点に関する限り、動作電圧が上昇するという点もなく、理想的なスイッチングを行う。なお、この切断構造による放射損失は 10% 程度であった。以下の計算においては、全ての場合でこの切断構造を仮定する。

3.2 偏波によるスイッチ差

TM モードの制御は電気光学効果係数 r_{33} を通じた Δn_z の変化、TE モードの制御は r_{23} を通じた Δn_y の変化によって行う。

所定の条件における Rb イオン交換によって生じる屈折率変化は、 n_z , n_y で異なり、また外部電界による屈折率変化も r_{33} , r_{23} の差により、そのスイッチング特性に差を生じるのは避けられない。プレーナ電極による、 n_z の変化率は 116 [pm/V] 程度、 n_y の変化率は 44 [pm/V] 程度である。

図3は導波路幅 $4.0\ \mu\text{m}$ 、分岐角 $4.0\ \text{mrad}$ のY分岐導波路における偏波によるスイッチングの違いである。同じ消光比を達成するためには、TEモードは2倍程度の電圧を要する。広いブランチから入射した光はより高屈折率の出射ブランチを、狭いブランチからの入射光は低屈折率の出射ブランチを選択する。TEモードのスイッチングはあまりよくない。TM、TEモードの動作点を正確に揃えるには、より細かい設計が必要である。両偏波の差異が小さいという利点をもつスイッチであるが、以下ではTMモードを中心に話を進める。

3.3 分岐角および導波路の表面屈折率差

最初に、Y分岐導波路で分岐角を徐々に変えてスイッチング特性を調べた。導波路の屈折率差 0.007 、導波路幅 $4\ \mu\text{m}$ の場合のTMモードのスイッチ特性を調べた。分岐角が大きくなるとルーティングが緩やかになり、消光比も劣化する。スイッチング電圧は、 $2.0\ \text{mrad}$ のとき 35V 、 $6.0\ \text{mrad}$ のとき 53V である。分岐角 $2.0\ \text{mrad}$ の場合は電界を大きくすると再びクロストークがわずかに増加する。

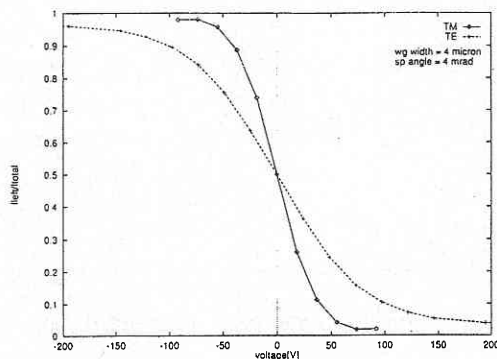
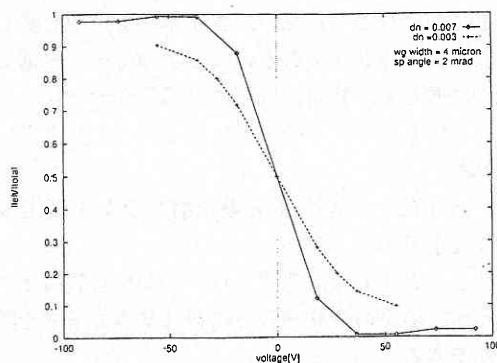
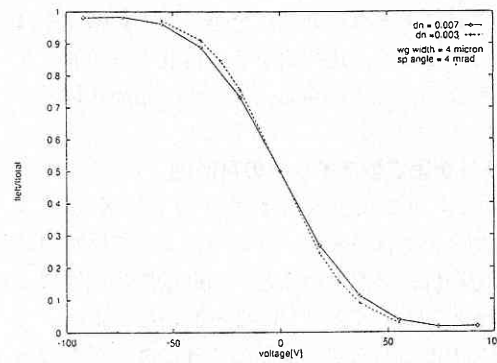


図3 導波路幅 $4.0\ \mu\text{m}$ 、分岐角 $4.0\ \text{mrad}$ のY分岐導波路における偏波によるスイッチング特性の相違



(a) 分岐角 $2.0\ \text{mrad}$ の場合



(b) 分岐角 $4.0\ \text{mrad}$ の場合

図4 Y分岐において分岐角がそれぞれ $2.0\ \text{mrad}$ 、 $4.0\ \text{mrad}$ 、導波路Y分岐において分岐角が $2.0\ \text{mrad}$ 、 $4.0\ \text{mrad}$ のとき、導波路の等価屈折率差を 0.007 から 0.003 にしたときのスイッチング特性

つぎに、導波路の表面屈折率の変化がスイッチング特性に与える影響を調べた。

図4はY分岐において分岐角が $2.0\ \text{mrad}$ 、 $4.0\ \text{mrad}$ のとき、導波路の等価屈折率差を 0.007 から 0.003 にしたときのスイッチング特性である。分岐角 $4.0\ \text{mrad}$ のときは大きな変化が現れていないが、 $2.0\ \text{mrad}$ ではスイッチング電圧、クロストークともに劣化している。このことから表面屈折率差は、ある程度の大きさが必要であることがわかる。

3.4 2段階分岐角の影響

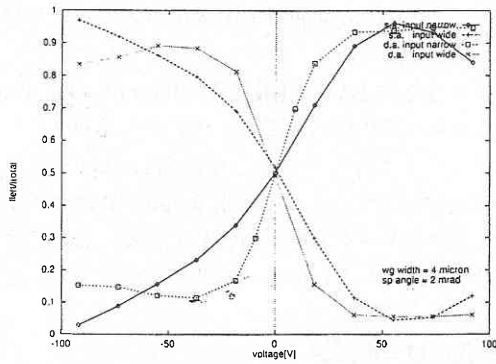
前述のとおり、モードの断熱変化による片方の導波路へのパワーの集中は分岐直後に起こるわけではない。分岐直後、各導波路に半々にパワーが分割されるが、2本の出射ブランチの間隔が $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 程度になったところで、2つの導波路間の結合係数が大きくなりモードソーティングが生じる。モードソーティングがおこる以前の分岐は、モード変換が生じないようにし、位相を揃えて等量の光が入射するように設計すればよい。

初期モード変換を低減する方法として、最初のテーパの広がり角を大きくして、初期モード変換を低減し、その後断熱変形効果が得られるような分岐角にするという方法がある。

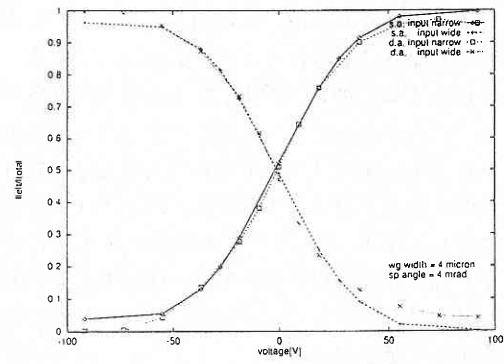
分岐角 $2.0\ \text{mrad}$ のY分岐を初期分岐角 θ_2 を $8.0\ \text{mrad}$ にした場合のスイッチング特性を調べた。図4の分岐角 $2.0\ \text{mrad}$ の場合に見られたクロストークのわずかな悪化は完全に消えている。また、スイッチングが急峻になり、動作電圧が低減されている。

2段階分岐角Y分岐導波路の分岐角依存性を調べた。分岐角を2段階にすることによって、クロストークが低減されるだけでなく、スイッチング特性が急峻になっている。

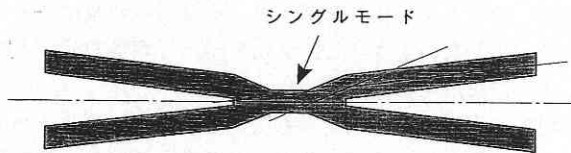
分岐角 $4\ \text{mrad}$ 以下、 θ_1 が小さくなるほど、動作電圧の低減幅が大きくなっている。これは、分岐直後の初期



(a) 分岐角2.0 mrad の場合



(b) 分岐角4.0 mrad の場合

図5 非対称 X 分岐スイッチに拡張した特性例 分岐角 $\theta_1 = 2.0$ mrad および 4.0 mrad図6 出射ブランチ固定型スイッチ シングルモードの中央部の長さは20 μm

モード変換を抑圧していることを表している。

これを非対称 X 分岐スイッチに拡張したのが、図5で、分岐角 θ_1 が2.0 mrad および4.0 mrad の場合を表している。分岐角2.0 mrad では、Y 分岐の場合と同様、電圧に対する出力変化は急峻になっているが、クロストークが幾分劣化している。分岐角4.0 mrad の場合の (b) では、Y 分岐の場合の特性を引き継ぎ、動作電圧の改善は見られていないが、全般的には非常に安定していて理想的な特性を示している。クロストーク特性を分岐角の関数として求めた。2段階分岐にすることによる大幅な改善はそれほどめだたないが、クロストークは分岐角を小さくすればするほど向上するものではなく、比較的小さい角度で最適値が存在することがわかる。この場合は、 θ_1 が3.5 mrad 付近で -30 dB 近くになっている。

3.5 出射ブランチ固定型スイッチの可能性

図5の2つのグラフでも見られたように、X 分岐スイッチの出射ブランチは、入射ブランチによって反対側になる。これは方向性結合器でいうと、制御電界の極性により bar ステートと cross ステートになるといってよい。これを入射ブランチに関わらず、電界の符号により一方の出射ブランチを選ぶようなものにならないか検討を行った。

この方向決定型スイッチを実現するためには、入射ブランチに関わらず中央の分岐部分において0次あるいは1次の同一のモードを励振しなければならない。そのため導波

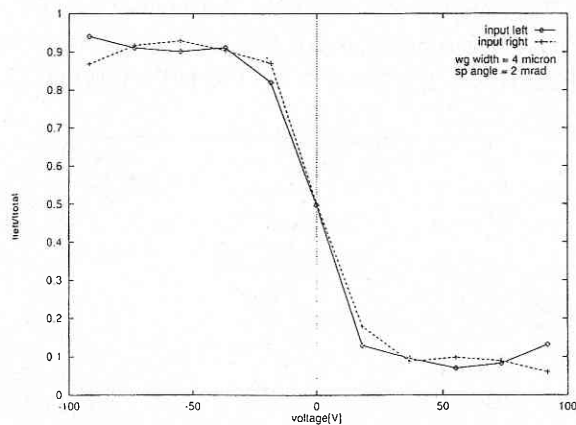


図7 出射ブランチ固定型スイッチの動作特性

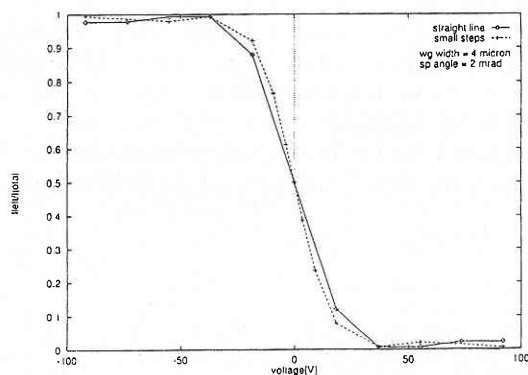
路形状は完全な対称形になる。

モードの断熱変形効果は可逆な原理であるため、これを実現するためには、放射モードへのモード変換を含む過程を経なければならない。さまざまな構造を試したが、分岐部分に純粋な0次あるいは1次のモードを励振するのは非常に難しく、結局、分岐中央部分を十分狭くして横方向に対してもシングルモードにする方法で最も良い結果が得られた。

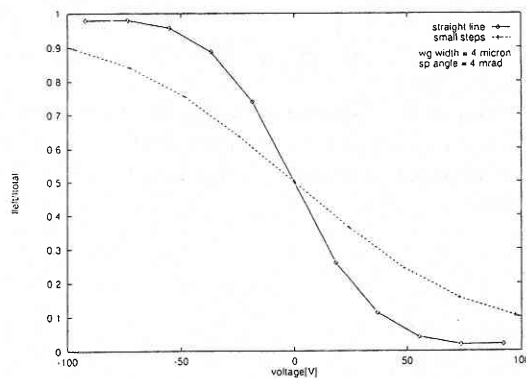
図6にその対称 X 分岐出射ブランチ固定型スイッチの構成を示す。

この方法では、導波パワーの50%を放射モードとして失うが、中央の分岐部分で純粋は基本モードを励振することができる。

シングルモードの中央部の長さは20 μm で十分であり、図7に示す結果が得られた。非対称 X スイッチがクロス形状の特性を示すのに対し、この構造では左右の入力の出力が同じ形をとっている。



(a) 分岐角2.0 mrad の場合



(b) 分岐角4.0 mrad の場合

図8 2段階分岐角, 分岐角2.0 mrad, 4.0 mrad の場合の微小ステップスイッチの特性例 スイッチング特性は直線の導波路の場合と比較

3.6 露光用マスクの微小ステップのスイッチングへの影響

計算の最後にもう一つ, 現実的な問題のスイッチング特性への影響を考える。

パターンニングに用いられるマスクは, 最近では電子ビーム描画によって作製されることが多く, 精度は大幅に改善されているが, ビームを x , y 方向にしかひかないものが多く, その場合斜線はギザギザの直線パターンによって置き換えられることになる。

この階段状微小ステップは, $0.1\ \mu\text{m}$ 程度にまで小さくすることができるが, ここでは $0.5\ \mu\text{m}$ の場合の影響をいくつかのY分岐パターンについて調べてみた。 $0.5\ \mu\text{m}$ という自由空間における導波光の波長の $1/3$ 程度にあたり, その影響は少なからずあると予想される。

2段階分岐角, 分岐角2.0 mrad の場合の微小ステップについて計算した。このときのスイッチング特性を直線の導波路の場合と比較したのが図8である。

スイッチング特性を劣化させるところか, 予想に反して, 動作電圧を低下させている。この結果は, 理論的解析的には検証していない。しかし, 図8に示される分岐角4.0 mrad の場合はその特性を悪化させている。やはりモード変換が起こるということであろう。

4. ま と め

本報では, デジタルスイッチの設計に際し, BPM を利用して光波伝搬の解析を行った。ここでは, 再現性のよいパターンニングを行える構造, 分岐角を広げることを念頭において計算を行った。

分岐のまたの部分のクサビ形を切りとめることは, スイッチング特性に大きな変化を与えず, 構造的放射損は10%程度であった。Y分岐スイッチとして動作するのは, 2.0 mrad から $6\sim 7$ mrad であったが, 分岐角を大きく取ると, 動作電圧, 消光比等が劣化するというトレードオフの関係

があることから, $2\sim 4$ mrad 程度が動作も安定しており, 適当と考えられる。クロストークの面から見ると, 3.5 mrad 付近で最も特性がよくなっている。

分岐角を2段階にする方法は, 初期モード変換を低減するのに有効な方法であるが, 分岐角が4 mrad 以下において, クロストークを低減するだけでなく, 動作電圧の低減にもつながることがわかった。入射ブランチに関わらず, 出射ブランチを揃えるというテーマは, 中央部分の導波路幅を狭くし, 横方向についてもシングルモードにすることによって, 実現できる可能性がある。

中央部のモードを成形しなおすはたきがあるため, 最も簡単なY分岐導波路でも有効に活用することができると考えられる。しかしこの場合, 入射パワーの半分を放射モードで失うことも事実である。

最後にEB描画パターンの影響であるが, やはり分岐角が大きくなると特性を劣化させる方向にはたらくようである。しかし, 分岐角2.0 mrad の場合は, 特性は改善され, 10 dB のスイッチング電圧17 V を達成している。いずれにせよ, スイッチング特性は導波路幅に割合敏感であることがわかる。

分岐角に対する定式化を行うことは避けた。モードの断熱変形効果は非常にせまい条件下でのみ成立し, 導波路の細かい形状に敏感であるので詳細なスイッチング特性は, そのつどBPMあるいはその他の解析法により調べるのがよいと考えられる。アレイとする場合は, クロストークが積算されるため, $13\sim 15$ dB 程度の消光比が望ましい。しかし, ON/OFF SHG の前段にスイッチとして挿入する場合は, 高調波パワーは入射光パワーの2乗に比例することから, 10 dB 程度で十分と考えられる。

終わりに, 素子製作に御協力を賜った, 東京大学工学部多田教授研究室, 東京大学生産技術研究所第3部藤田教授研究室内の各位に感謝の意を表す。(1996年5月28日受理)

参 考 文 献

- 1) A. Nayer, W. Nevenkamp, L. Thylen, B. Lagerstrom, "A beam propagation method analysis of active and passive waveguide crossings", IEEE, J.L.T.; vol. 3; pp. 4-25; (1983).
- 2) L. Thylen, P. Svensson and W.K. Burns", Beam propagation method analysis of the digital optical switch", Tech. Digest IGWO'89, WBB229; (1989).
- 3) 岡本勝就, 「光導波路の基礎」, コロナ社, (1992).
- 4) M.D. Feit and J.A. Fleck, "Light propagation in graded index optical fibres", Appl. Opt., vol. 17; pp. 3990, (1978).