

ビーム伝搬法によるモード変換型 Y 分岐スラブ光導波路中の光波伝搬の解析

正員 堀田 昌志[†] 正員 下代 雅啓[†]
 正員 沢 新之輔^{††}

Analysis of Lightwave Propagation in Mode-Conversion-Type Optical Y-Branching Slab Waveguides by Propagating Beam Method

Masashi HOTTA[†], Masahiro GESHIRO[†] and Shimnosuke SAWA^{††}, Members

[†] 愛媛大学工学部電気電子工学科, 松山市
 Faculty of Engineering, Ehime University, Matsuyama-shi, 790 Japan
^{††} 大阪府立大学工学部電気工学科, 堺市
 College of Engineering, University of Osaka Prefecture, Sakai-shi. 591 Japan

あらまし 低損失な Y 分岐光導波路として既に提案しているモード変換型スラブ Y 分岐中の光波伝搬をビーム伝搬法によって解析している。Y 分岐全体にわたる界分布の解析結果より, 途中に導入したモード変換部が極めて効率的に機能していることが確認された。

1. まえがき

近年, 光回路素子の低損失化に関する研究が盛んに行われている。筆者の 1 人は, これまでに, モード変換型 Y 分岐光導波路の低損失構成法を提案し⁽¹⁾, モード結合理論に基づく数値シミュレーションおよびイオン交換法による導波路の試作を通じて理論的ならびに実験的両側面からその低損失性を検討してきた^{(2)~(5)}。これまでの理論的検討では, 分岐部近傍やモード変換部等, 導波路途中での伝搬特性の詳細は不問に付し, 単に出射端でのモード電力のみに注目していた。しかし, モード変換型 Y 分岐の基礎特性をより深く理解するためには, 導波路全領域での光波の界分布特性を放射モードも含めて詳しく解析する必要があると考えられる。

そこで本論文では, 単一モードスラブ導波路からなるモード変換型 Y 分岐に沿う光波の伝搬特性をビーム伝搬法^{(6),(7)} (Propagating Beam Method 略して PBM) を用いて解析する。PBM によれば, Y 分岐の入口から出口にわたる任意の場所での光波の界分布特性が容易に解析でき, その伝搬の形態を視覚的にとらえることができる。

2. モード変換型 Y 分岐の低損失構成法

図 1 に示す実線の Y 分岐は, 2 モード伝送系に対する低損失構成法に基づいて設計したモード変換型 Y 分岐である^{(1),(2),(4)}。また, 通常の直線状 Y 分岐を破線で

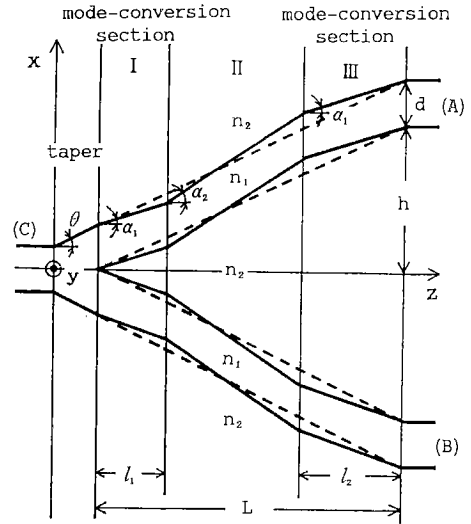


図 1 モード変換型 Y 分岐 (実線) と直線状 Y 分岐 (破線) の構造

Fig. 1 Mode-conversion-type Y-branch (solid line) and conventional linear Y-branch (dashed line).

示している。各分岐はステップインデックス型のスラブ導波路からなっている。テーパ部と分岐部における導波路の傾き角が等しい場合, テーパ部でのモード変換損は分岐部に比べてはるかに小さくなる⁽²⁾。そこで, 構造をできるだけ簡単にするためにテーパ部には直線状テーパを用いている。二つのモード変換部 (区間 I および III) は, それぞれ, テーパ部の出口での波動と主分岐部 (区間 II) の波動とのモード変換, ならびに, 主分岐部の波動と平行 2 線導波路 A および B の正規モードとの間のモード変換を円滑に行うように設計する。本論文では, 単一モード導波路を取り扱っているため, 入射導波モード, およびこれと最も強く結合する放射モード間のモード変換に注目する。すなわち, この二つのモード間で, 構成条件が満たされるようにモード変換部と主分岐部を設計する。スラブ導波路の場合, テーパ部と分岐部の接合点のごく近傍を除いて結合係数は導波路の傾きにほぼ比例すると考えてよい⁽²⁾。そこで, 構成条件に基づいて区間 I, II, III における二つのモード間の結合係数 C_I, C_{II}, C_{III} が,

$$C_I : C_{II} : C_{III} = 1 : 2 : 1 \quad (1)$$

となるように, 各区間の導波路の傾きを, 1 : 2 : 1 とする。また, モード変換部の長さは, 両モードのビート波長の 1/2 になるように決定する。すなわち,

$$l_i = \frac{\pi}{|\beta_\theta - \beta_r|}, \quad i=1, 2 \quad (2)$$

ここで、 β_0 および β_r は、モード変換部の入口における導波モードおよびこれと最も強く結合する放射モードの伝搬定数である。なお、各区間の導波路の傾き角、ならびにモード変換部長の決定に関する詳しい議論は文献(1)、(2)または(4)に見ることができる。

3. PBM 解析

前章で説明したモード変換型 Y 分岐および通常の直線状 Y 分岐を分流素子あるいは合流素子として用いた場合の光波の伝搬特性を PBM^{(6),(7)} により解析する。以下に解析で用いた構造パラメータを示す。

分岐角： $\theta=1^\circ$

分岐間隔： $h=18 \mu\text{m}$

導波路幅： $d=4 \mu\text{m}$

コアの屈折率： $n_1=1.5115$

クラッドの屈折率： $n_2=1.51$

以上のパラメータは、イオン交換法による拡散型導波路を想定して与えられており⁽⁶⁾、光の波長が $0.6328 \mu\text{m}$ で単一モード条件を満足している。この場合、コア

とクラッドの屈折率差は約 0.1% である。このように弱導波 (Weakly Guiding) 条件を満たしている誘電体導波路では、不連続部での反射波はほとんど無視できることが知られている⁽⁸⁾。ところで、PBM に基づく本解析では、反射波の影響は考慮されていないことになるが、導波路が弱導波条件を満たしている限り、これによって得られる解は高い解析精度を保持し得るものと考えられる。

今、単位電力の基本 TE₀ モードを入射モードとした場合、このようなパラメータに対して、式(2)よりモード変換部長を計算すると $l_1=200.6 \mu\text{m}$ 、 $l_2=245.2 \mu\text{m}$ となる。

図 2 は直線状 Y 分岐およびモード変換型 Y 分岐を分流素子として用いた場合の解析結果である。同図より、直線状 Y 分岐では、出射側平行 2 線導波路で光波の大きな蛇行が見られる。また、分岐部の入口付近でもわずかに認められる。これに対して、モード変換型 Y 分岐では、光波の蛇行がほとんどなく、分岐全体

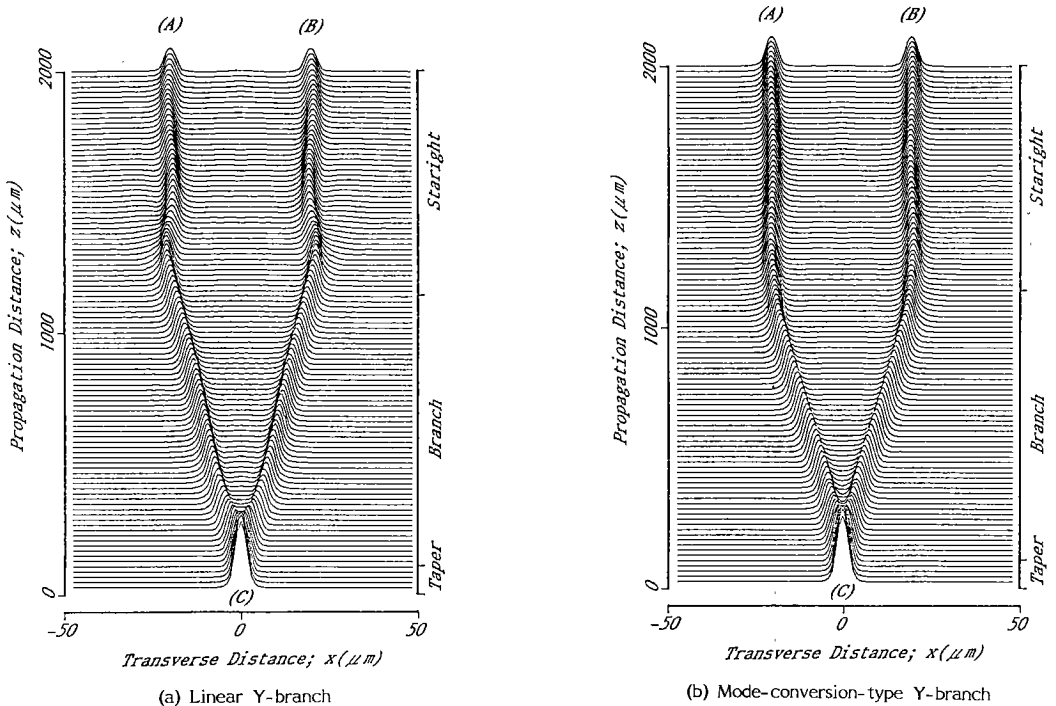


図 2 分流導波路としての Y 分岐を伝搬する光波
 Fig. 2 Lightwave propagation in Y-branches as beam splitters; (a) Linear Y-branch and (b) mode-conversion-type Y-branch. Material and structural parameters are assumed to be $n_1=1.5115$, $n_2=1.51$, $\theta=1^\circ$, $h=18 \mu\text{m}$, and $d=4 \mu\text{m}$. Mode-conversion sections are determined to be $l_1=200.6 \mu\text{m}$ and $l_2=245.2 \mu\text{m}$.

にわたって正規モード伝送が実現されているものと考えられる。更に、出射端における基本 TE_0 モードの電力を重畳積分によって評価した結果、直線状 Y 分岐では 0.74、モード変換型 Y 分岐では 0.93 の規格化電力が得られ、モード変換型 Y 分岐の低損失性が確認された。

次に、モード変換部長が最適値からずれた場合の影響を検討する。図 3 (a) および (b) は、 l_1 および l_2 が最適値からそれぞれ $100 \mu\text{m}$ 増減したモード変換型 Y 分岐を分流素子として用いた場合の解析結果である。同図より、モード変換部長が最適値から $100 \mu\text{m}$ 程度ずれても、光波の蛇行は直線状 Y 分岐より依然として小さいことがわかる。また、出射端における基本モードの規格化電力は、図 3 (a) で 0.80、同図 (b) で 0.79 となり、この程度のずれがあっても依然として直線状 Y 分岐よりも低損失である。現在の導波路作製技術をもってすれば、数 μm 以内の制御精度が可能であり、 $100 \mu\text{m}$ のずれというのは、実際の作製誤差よりはるかに大きく見積もっていることになる。

最後に、図 4 は直線状 Y 分岐およびモード変換型 Y 分岐を合流素子として用いた場合の解析結果である。単位電力をもつ基本 TE_0 モードを導波路 A および B の両方に入射した結果、分流素子として用いた場合と同様に、モード変換型 Y 分岐では、光波の蛇行がほとんど認められなかった。出射端における基本モードの電力を同じく重畳積分で評価すると、直線状 Y 分岐では 1.49、モード変換型 Y 分岐では 1.86 となり、この場合にもモード変換型 Y 分岐の方がかなり低損失であることが確認された。

4. むすび

本論文では、モード変換型 Y 分岐および直線状 Y 分岐を分流ならびに合流素子として用いた場合の光波の伝搬特性を放射モードを含めて PBM により解析した。その結果、導波-放射モード結合は導波路中の光波の蛇行という形で現れることが確認され、モード変換型 Y 分岐では、直線状 Y 分岐に比べてこの蛇行が小さいことが明らかとなった。そして、この結果は、光波の蛇行を除去するという方向で低損失な Y 分岐を合成でき

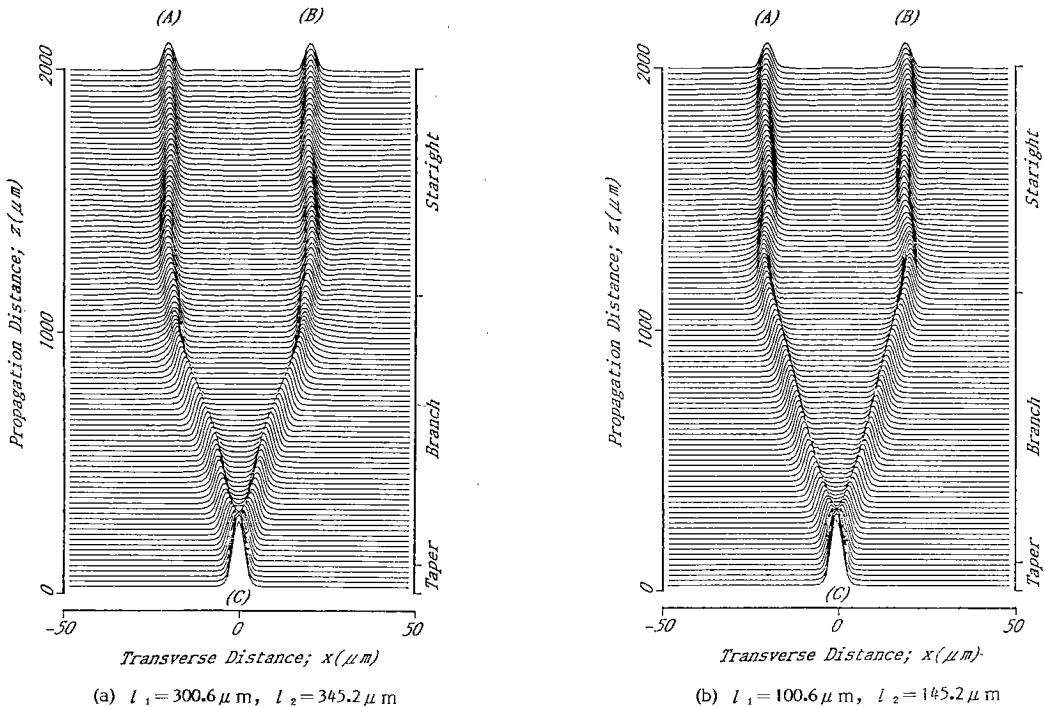


図 3 最適条件からずれたモード変換型 Y 分岐を伝搬する光波
 Fig. 3 Lightwave propagation in mode-conversion-type Y-branches which are not optimally designed, where (a) $l_1 = 300.6 \mu\text{m}$, $l_2 = 345.2 \mu\text{m}$ and (b) $l_1 = 100.6 \mu\text{m}$, $l_2 = 145.2 \mu\text{m}$. The other parameters are as in Fig. 2.

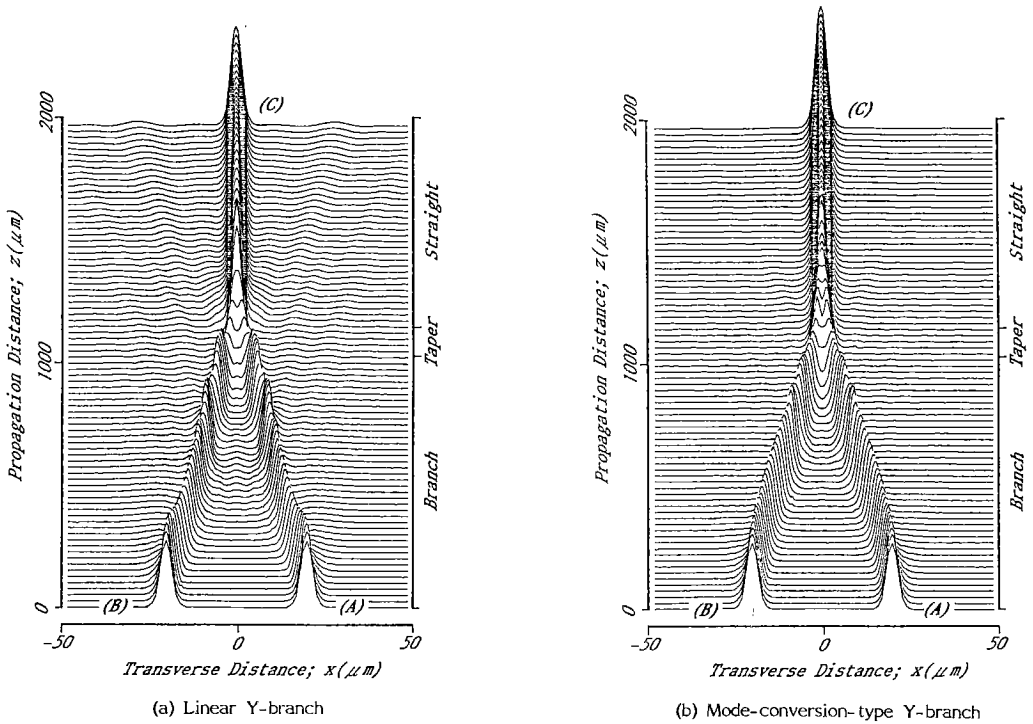


図4 合流導波路としてのY分岐を伝搬する光波
 Fig. 4 Lightwave propagation in Y-branches as beam combiners;
 (a) Linear Y-branch and (b) mode-conversion-type Y-branch. The waveguide parameters are as in Fig. 2.

る可能性を示唆している。更に、最適構成条件からのずれに対する許容度は現在の作製技術から見るとかなり高いものであることがわかった。最後に、Y分岐以外の光回路素子(例えば、円形曲りやテーパ等)に対して低損失構成理論を適用した例も報告されているが⁽¹⁾、これらについても光波伝搬の立場から検討を行う予定である。

謝辞 本研究に関し、多大の御援助を賜った住友電気工業株式会社研究開発本部の吉田健一博士、須川毅、西江光昭ならびに瀬村滋の諸氏に深謝する。また、有益な御討論を頂いた本学工学部助教小野和雄博士に謝意を表す。

文 献

(1) 沢新之輔：“多モード分布結合系の結合特性を利用したモード変換器の設計理論とその応用”，信学論(C), **J70-C**, 6, pp. 858-867 (1987-06).
 (2) 沢新之輔, 小野和雄, 森 誠二：“モード変換型光分岐導波路の構成理論”，信学論(C), **J71-C**, 3, pp. 432-443 (1988-03).

(3) 沢新之輔, 小野和雄, 森 誠二：“多モードY分岐光導波路の低損失構成法”，信学論(C), **J72-C-I**, 9, pp. 568-570 (1989-09).
 (4) Sawa S., Geshiro M. and Takeda F.：“Low-loss optical branching waveguides consisting of anisotropic materials”, IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., **MTT-39**, 7, pp. 1140-1147 (1991).
 (5) 沢新之輔, 小野和雄, 堀田昌志：“ガラス製モード変換型Y分岐光導波路の試作”，信学論(C), **J73-C-I**, 10, pp. 636-644 (1990-10).
 (6) Feit M. D. and Fleck J. A., Jr.：“Light propagation in graded-index optical fibers”, Appl. Opt., **17**, 24, pp. 3990-3998 (1978).
 (7) Weissman Z., Hardy A. and Marom E.：“Mode-Dependent Radiation Loss in Y Junctions and Directional Couplers”, IEEE J. Quantum Electron., **QE-25**, 6, pp. 1200-1208 (1989).
 (8) Gomaa L. R.：“Beam propagation method applied to a step discontinuity in dielectric planar waveguides”, IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., **MTT-36**, 4, pp. 791-792 (1988).

(平成3年5月7日受付, 6月14日再受付)