

# 解説

## モードフィールド整合用導波路

柳川 久治

古河電気工業(株) 〒290 市原市八幡海岸通 6

(1990年8月2日受理)

### Mode-Field Converting Optical Waveguide

Hisaharu YANAGAWA

Furukawa Electric Co., Ltd., 6, Yawata-Kaigandori, Ichihara 290

#### 1. はじめに

導波路型光部品の研究開発の進展とともに、光ファイバと光導波路の接続を中心とする実装技術の確立が急がれている<sup>1)</sup>。一方、光導波路の伝搬損失の低減<sup>2)</sup>により、光ファイバと光導波路の接続損失、異なる導波路型光部品同士の接続損失が、全挿入損失のなかで大きな割合を占めるようになってきている。したがって、光部品の最も重要な評価パラメータの一つである挿入損失を下げるためには、接続損失の低減が必要である。接続損失は、

- ① モードフィールド形状・寸法の不整合による損失
- ② 屈折率の不整合による反射損失
- ③ 接続端面の凹凸による散乱損失
- ④ 軸芯合わせ不完全(軸ずれ、軸傾斜)による損失

等の損失要因に分解されるが、ここでは①のモードフィールド不整合による損失を低減するための光導波路、すなわち、モードフィールド整合用光導波路について述べる。モードフィールド整合用導波路の入出力端面のモードフィールドの形状・寸法は、それぞれ接続対象となる入力側・出力側の光導波路(光ファイバを含む)のそれと一致しており、入出力端面間ではモードフィールドが徐々に変化するテーパ導波路となっている(図1)。このようなモードフィールド整合の機能は、これまで、二つのレンズ(形状変換用および寸法変換用)を使用することにより実現されてきた。しかしながら、mmオーダーの寸法のレンズを二つ、導波路とは数mm程度離れたところに相対位置をサブミクロンの精度で保持することは、耐温度特性、機械的安定性等を考慮すると、容易で

はない。このような接続箇所が複数に及ぶ複雑な光部品では、なおさらである。その点、温度的・機械的に安定な端面突き合わせ接続が可能で、集積化に適したモードフィールド整合用導波路が望まれる。

以下、2.でモードフィールド不整合損失を見積もり、3.でモードフィールド整合用導波路の最近の報告例の紹介を行い、最後にモードフィールド整合用導波路の今後の課題等を含めまとめる。

#### 2. モードフィールドの不整合による損失

一般に、二つの異なる形状・寸法のモードフィールド間での結合効率 $\eta$ は、これらの重畳積分で表される。すなわち、正規化されたモードフィールドの分布関数をそれぞれ $\phi_1, \phi_2$ とすると、

$$\eta = \left| \int \phi_1 \cdot \phi_2 dS \right|^2 \quad (1)$$

となる<sup>3)</sup>。

いま、一例として、断面円形の光ファイバと矩形の導波路型光部品との接続を考える。これらのモードフィールドはガウシアン分布で比較的良好に近似できることが知られており、それぞれ光ファイバのモードフィールド径を $2w_1$ 、矩形導波路の楕円状のモードフィールドの長径、短径を $2w_1, 2w_2$ とすると、これらの間の結合効率は、

$$\eta = \frac{4w_1w_2w_1^2}{(w_1^2+w_1^2)(w_1^2+w_2^2)} \quad (2)$$

と表される<sup>4)</sup>。これにより、モードフィールドの不整合による損失 $L$ は、以下により求まる。

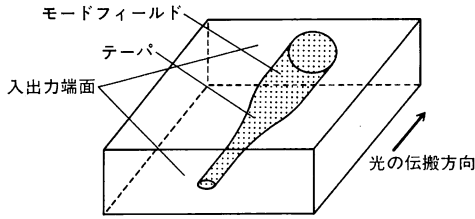


図1 モードフィールド整合用導波路

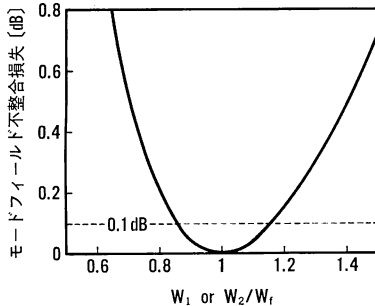


図2 モードフィールド不整合損失

$$L = -10 \cdot \log \eta \quad (3)$$

$w_1$  としては通信用の標準単一モードファイバ ( $2w_1 = 9.5 \mu\text{m}$ ) を仮定し、矩形導波路のモードフィールドを  $2w_1 = 6 \mu\text{m}$ ,  $2w_2 = 4 \mu\text{m}$  とすると、 $L = 1.9 \text{ dB}$  となる。これは  $0.1 \text{ dB/cm}$  の導波路  $19 \text{ cm}$  分の伝搬損失にも相当する。図2に  $w_1 = w_2$  としたときのモードフィールド不整合損失の計算結果を示す。モードフィールド不整合に割り当てられる損失値を  $0.1 \text{ dB}$  とすれば、図2より、モードフィールドは  $\pm 15\%$  程度の範囲で一致させる必要のあることがわかる。

### 3. モードフィールド整合用導波路の報告例

前述したように、モードフィールド整合用導波路はモードフィールドが伝搬方向に徐々に変化するテーパ導波路からなっている。モードフィールドはコアとクラッド間の屈折率差  $\Delta$  およびコア寸法によって決定されるので、モードフィールド整合用導波路では、 $\Delta$  もしくはコア寸法もしくはこれら両者が長手方向に変化する構造となっている。以下、上記の3タイプのモードフィールド整合用導波路の試作報告例について、とくに  $\Delta$  およびコア寸法の両者を変化させたタイプのものについては詳細に、紹介する。

#### 3.1 $\Delta$ を変化させた導波路

Ti 拡散  $\text{LiNbO}_3$  導波路は、 $\text{LiNbO}_3$  基板上にコアドーパントとなる Ti 薄膜を形成し、これを高温に加

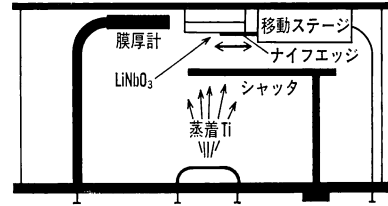


図3 Ti テーパ膜蒸着系

熱、拡散することにより作製される。この Ti 薄膜の膜厚を伝搬方向に沿って変化させることにより、コア屈折率、すなわち、 $\Delta$  を変化させたモードフィールド整合用導波路が試作されている<sup>5)</sup>。具体的には、図3に示すように、蒸着装置内において  $\text{LiNbO}_3$  基板上にナイフエッジを配置し、これを蒸着中に移動させることにより、 $2.1 \text{ mm}$  の長さにわたって Ti 膜厚を  $750 \text{ \AA}$  から  $375 \text{ \AA}$  の間で変化させている。蒸着後このサンプルを  $1,025^\circ\text{C}$  で6時間加熱し、コア幅、厚がそれぞれ  $6 \mu\text{m}$ ,  $3.5 \mu\text{m}$  で、 $\Delta$  が  $0.40\%$  から  $0.16\%$  に変化するテーパ導波路が得られている。この導波路では、波長  $1.3 \mu\text{m}$  におけるモードフィールド直径 (楕円の長径 $\times$ 短径) が  $4.3 \mu\text{m} \times 2.8 \mu\text{m}$  と  $6.2 \mu\text{m} \times 4.4 \mu\text{m}$  の範囲で変化しており、 $8 \mu\text{m}$  コアのコーニング製単一モードファイバとのモードフィールド不整合損失は  $0.45 \text{ dB}$  で、伝搬損失を除いたテーパによるモードフィールド変換にともなう放射損失は  $0.05 \text{ dB}$  であった。

このタイプの導波路はテーパ形状が滑らかに形成できるものの、テーパに沿ってモードフィールドの形状・寸法のみならず、光のコア内への閉じ込めの程度も変化しており、チャンネル導波路のパターンに不整があると損失増加を起こしやすい。 $\Delta$  のみをテーパとする導波路は、製造方法が限定されるせいか、報告例は少ない。

#### 3.2 コア寸法を変化させた導波路

コア幅を変化させたテーパは、チャンネル導波路のパターニングを行うときのフォトリソグラフィにおいてテーパのパターンを含むフォトマスクを使用すれば容易に作製できることから、古くから試作されている。たとえば、文献6)では、図4に示すようなパターンの幅テーパをもつ Ti 拡散  $\text{LiNbO}_3$  導波路を試作し、波長  $0.6328 \mu\text{m}$  において伝搬損失を除くモードフィールド変換による放射損失がテーパ1カ所当り  $0.4 \text{ dB}$  以下であったと報告されている。

図3で述べた成膜時の基板へのシャドウイングのテクニク (シャドウマスク法) は、コア厚のテーパ形成に使用される。たとえば、基板となるコーニング 2947 ガ

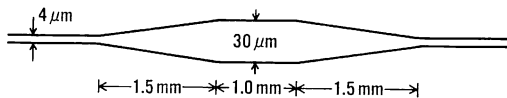


図 4 幅テーパ用フォトマスクパターン

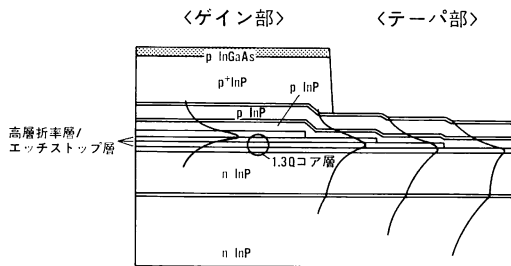


図 5 多層コアを利用したコア厚テーパ

ラス上に、コアとなるコーニング 7059 ガラスをスパッタリングし、長さ 1 cm にわたってコア厚を  $1 \mu\text{m}$  から  $2 \mu\text{m}$  に変化させたテーパ導波路（チャネル導波路ではなくスラブ導波路）が試作されている<sup>7)</sup>。

また、最近、InGaAsP レーザダイオードにおいて、非常に薄い高屈折率膜とストップエッチ膜からなる対を多数積層することにより形成したコアの構成対を、伝搬方向に沿って 1 対ずつエッチングにより除去し、等価的にコア厚を変化させたテーパ（図 5）も報告されている<sup>8)</sup>。

イオン交換導波路では、拡散時間を変化させることにより、コア幅およびコア厚の両方を同時に（ただし独立ではない）変化させることができる。実際に、ソーダライムガラス基板との  $\text{Ag} \leftrightarrow \text{Na}$  イオン交換時に、 $\text{AgNO}_3$  溶液に基板をつける時間を場所とともに変え、長さ 12 mm にわたってコア幅×厚が  $9 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$  から  $16 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$  に放物線状に変化するテーパ導波路が試作されている<sup>9)</sup>。この例では、波長  $1.15 \mu\text{m}$  における  $10 \mu\text{m}$  コア単一モードファイバとの不整合損失は 0.4 dB、伝搬損失を除くモードフィールド変換による損失は 0.8 dB であった。

以上、コア寸法を変化させたモードフィールド整合用導波路では、先に述べた  $\Delta$  を変化させたモードフィールド整合用導波路と同様に、モードフィールドの形状・寸法とともに、コア内への光の閉じ込めの強度が変化している。とくに、幅方向のテーパをフォトマスクパターンにより形成した場合、フォトマスクによる  $0.1 \mu\text{m}$  程度の凹凸（フォトマスク作製時の電子ビーム一画素に対応）がテーパパターンに重畳することとなり、損失増加を生じやすくなる。

### 3.3 $\Delta$ , コア寸法の両者を変化させた導波路

以上述べてきた  $\Delta$  もしくはコア寸法を変化させるモードフィールド整合用導波路では、入出力端でモードフィールドを大きく変化させると片端での光の閉じ込めの強度が弱くなり、導波路構造の不完全性により損失が生じやすい。これに対し、 $\Delta$ , コア寸法の両者を変化させ、すなわち光導波路断面を（高い  $\Delta$ , 小さいコア）と（低い  $\Delta$ , 大きいコア）との間で徐々に変化させ、コア内への光の閉じ込めを強い状態に保ったままモードフィールドを変化させると、低損失で大きくモードフィールドを変化させることができる<sup>10)</sup>。したがって、 $\Delta$  およびコア寸法の両方を変化させたテーパ導波路はモードフィールド整合用導波路として最も望ましく、以下に述べるいくつかの製法が提案されている。

#### 3.3.1 アニール再拡散による方法

イオン交換ガラス導波路において、コアドープのイオンをアニールし再拡散させる方法であり、この方法では、光の閉じ込めの強度の指数である正規化周波数 ( $\Delta$  とコア面積の積の平方根に比例) が位置によらず一定に保たれるという特徴がある。古くは、 $\text{CO}_2$  レーザのスポット加熱によるテーパ作製が提案されているが<sup>11)</sup>、その試作結果については報告されていない。最近、BK 7 を基板とする Ag イオン交換導波路を、5 mm にわたり  $385^\circ\text{C}$  から  $315^\circ\text{C}$  の温度傾斜をもつ電気炉内でアニールして作製したモードフィールド整合用導波路が報告された<sup>12)</sup>。テーパ長は 6 mm であり、モードフィールドは波長  $1.3 \mu\text{m}$  において  $5.4 \mu\text{m} \times 3.6 \mu\text{m}$  から  $7.6 \mu\text{m} \times 5.1 \mu\text{m}$  に拡大された。この導波路とコーニング製単一モードファイバとのモードフィールド不整合損失は 0.23 dB であり、伝搬損失を除くモードフィールド変換による放射損失は 0.1 dB 以下と低損失であった。

この方法によるモードフィールド整合用導波路では、厚さ方向と幅方向の変化量が独立ではなく、モードフィールドの形状変換と寸法変換を自由に行うのは困難である。

#### 3.3.2 光重合による方法

光重合により形成したプラスチック光導波路では、露光時間とともに得られる屈折率変化が増加するが、その増加の程度は飽和傾向を示す。この性質をうまく利用すると、高い  $\Delta$ , 小さいコアと、低い  $\Delta$ , 大きいコアを結ぶテーパ導波路を形成することができる<sup>13)</sup>。すなわち、図 6 (1) に示すように、幅方向のテーパパターンをもつフォトマスクを用いて、まず第 1 回目の露光を行う。これにより、コアの部分の屈折率  $n_1$  はクラッド部分の屈

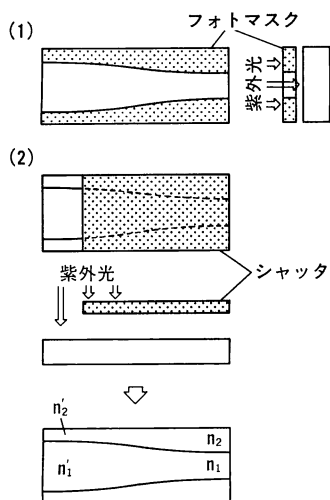


図6 光重合によるテーパの形成方法

折率  $n_2$  より高くなる。次に、同図(2)に示すように、シャッターを用いて幅広の部分のみ第2回目の露光を行うと、 $n_1, n_2$  はそれぞれ増加し  $n_1', n_2'$  となる。しかしながら、屈折率増加量は露光時間とともに鈍化するのので、 $n_1' - n_2' < n_1 - n_2$  となり、幅広の部分の  $\Delta$  は幅狭の部分に比べて低くなる。この方法により、シリコン基板上に PMMA クラッド、PST-PMMA コア (厚さ  $1.5 \mu\text{m}$ ) を形成し、長さ  $2 \text{mm}$  にわたり、 $\Delta$  およびコア幅がそれぞれ、 $0.31\%$  から  $0.13\%$ 、 $3 \mu\text{m}$  から  $6 \mu\text{m}$  に変化するモードフィールド整合用導波路が試作されている。 $0.63 \mu\text{m}$  におけるモードフィールド形状は  $3.6 \mu\text{m} \times 1.8 \mu\text{m}$  (ピーク値の  $1/e^2$  となる全幅) から  $6.4 \mu\text{m} \times 1.5 \mu\text{m}$  であり、伝搬損失を除くモードフィールド変換にともなう放射損失は  $0.5 \text{dB}$  以下 (測定誤差内) であった。

この方法によるモードフィールド整合用導波路では、厚みの方向のテーパを作るのは容易ではない。

### 3.3.3 2重テーパによる方法

これまで紹介してきた例では、いずれも、コアは一つの系統の材料で形成されており、屈折率変化はその材料系の構成比の変化によっていた。これに対し、図7に示すように、薄く高屈折率  $n_1$ 、厚くより低屈折率  $n_2$  の一様な屈折率分布をもつ二つのコア層を用い、これら両コア層の接触部分において二つの厚テーパを重ねた構造のモードフィールド整合用導波路が提案されている<sup>14)</sup>。二つのコアの重なる部分を一つの複合コアとみなすと、複合コアにおいて光の感じる平均的な屈折率は、二つのコアの厚さに応じ  $n_1, n_2$  の中間の値をとる。したがっ

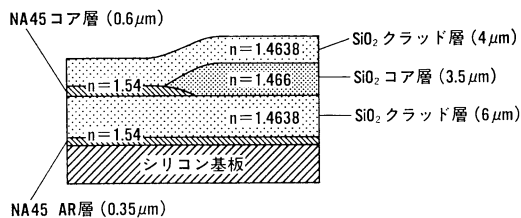


図7 コア厚の2重テーパ

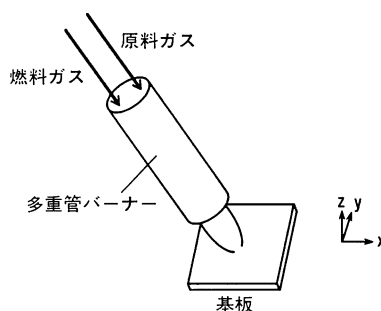


図8 火炎堆積法による薄膜形成

て、厚さの2重テーパは、実効的に、 $\Delta$  および厚さの変化するテーパとして動作する。図7に示す構造のモードフィールド整合用導波路は、スパッタリングによるガラス薄膜形成にシャドウマスク法を適用することにより実現されており、長さ  $2.5 \text{mm}$  にわたって、 $\Delta$  およびコア厚がそれぞれ  $0.6 \mu\text{m}$ 、 $4.9\%$  から  $3.5 \mu\text{m}$ 、 $0.15\%$  に変化するテーパが試作されている。この導波路では、波長  $0.63 \mu\text{m}$  においてモードフィールド直径が  $0.5 \mu\text{m}$  から  $2.6 \mu\text{m}$  に変化しており、挿入損失は  $0.7 \text{dB}$  (伝搬損失を除くモードフィールド変換にともなう放射損失は  $0.2 \sim 0.5 \text{dB}$ ) であった。

上記報告例は幅方向に閉じ込め作用のないスラブ導波路に関するものであるが、チャンネル導波路での試作の報告が待たれる。この方法では、 $\Delta$  を大きく変化させることが容易で、大きなモードフィールド寸法変換比が得られるという特徴がある。

### 3.3.4 火炎堆積法による方法

火炎堆積法によるガラス薄膜形成では、図8に示すように、多重管に燃料ガスと種々のガラス材料に対応する原料ガスが供給され、燃料ガス燃焼による高熱により原料ガスの化学反応 (加水分解反応) が行われる。すなわち、蒸着法、スパッタ法等面単位で膜形成が行われる通常の堆積法とは異なり、火炎堆積法では点 (スポット) 単位で膜形成が行われる。したがって、多重管と基板の相対移動とともに、原料ガスの混合比を変えることにより、ある位置 ( $x, y, z$ ) に堆積されるガラスの屈折率

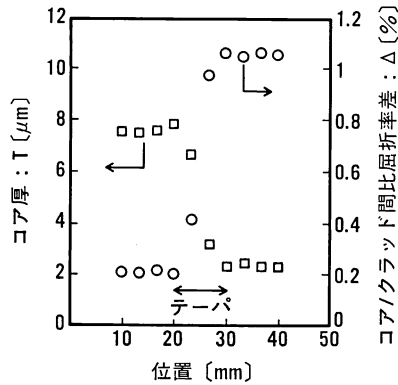


図 9 Δ, コア厚の測定値

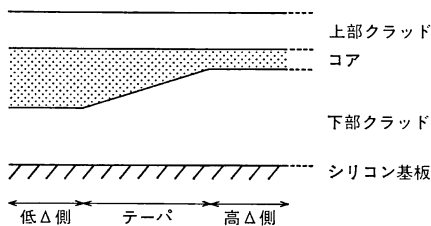


図 10 コア側面の断面図

を自由に制御でき、屈折率、すなわち、 $\Delta$  のテーパを容易に形成できる。また、膜厚は堆積時間によるので、位置ごとに堆積時間を変えることにより、コア厚のテーパも容易に形成できる。

火炎堆積法のこの特徴を利用し、 $\Delta$ 、コア幅、コア厚のすべてをテーパとしたモードフィールド整合用導波路が試作されている<sup>15)</sup>。報告例では、まず、クラッドを  $\text{SiO}_2$ 、コアを  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  とし、コア厚が  $7.5 \mu\text{m}$  から  $2.3 \mu\text{m}$ 、 $\Delta$  が  $0.2\%$  から  $1.05\%$  まで変化するスラブ導波路が形成されている。テーパ長は  $10 \text{ mm}$  であり、これらに対応するプリズムカップラ法による測定値を図 9 に示す。次に、コア幅が  $7 \mu\text{m}$  から  $4.5 \mu\text{m}$  に変化するパターンをもつフォトマスクを用いてフォトリソグラフィを行い、ドライエッチングによるチャンネルパターン形成後、再び火炎堆積法により上部クラッド層を形成し、コア埋め込みを行っている。このチャンネル導波路のコア部分の側面断面図を図 10 に示す。ここでは、コア厚のテーパはコアと下部クラッドの界面の傾斜によって実現されており、コア上面が平坦であるのが特徴的である。これにより、チャンネル導波路パターン化のための露光、フォトリソグラフィが問題なく行われる。このようにして試作されたモードフィールド整合用導波路は波長  $1.55 \mu\text{m}$  において評価され、モードフィールド寸法は低  $\Delta$  側が  $10.5 \mu\text{m} \times 9.9 \mu\text{m}$ 、高  $\Delta$  側が  $6.0 \mu\text{m} \times$

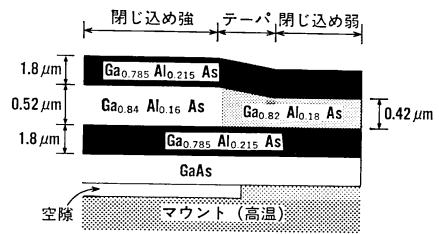


図 11 MBE によるテーパ形成

$4.2 \mu\text{m}$  であった。これらの  $9.5 \mu\text{m}$  コア標準単一モードファイバ、半導体導波路型光スイッチとのモードフィールド不整合損失はそれぞれ  $0.2 \text{ dB}$ 、 $0.3 \text{ dB}$  であり、伝搬損失を除いたテーパによるモードフィールド変換損失は  $0.1 \text{ dB}$  と測定誤差内であった。

火炎堆積法によるモードフィールド整合用導波路では、 $\Delta$ 、コア幅、コア厚の三つのパラメータがそれぞれ独立に制御できるので、寸法、形状の両者の変換が自由にできる。

### 3.3.5 MBE による方法

MBE (分子線エピタキシー) による AlGaAs 系半導体成膜においては、基板温度が高いほど、Ga/Al の比、成膜速度とも低下する。したがって、基板面内において温度分布を生じさせることにより、 $\Delta$  およびコア厚のテーパが実現できる。

図 11 に示すように、GaAs 基板内において高温のマウントに接触する部分とそうでない部分とで温度傾斜を設けることにより形成したテーパ導波路が報告されている<sup>16)</sup>。この導波路では、 $\Delta$  およびコア厚はそれぞれ  $0.79\%$  から  $0.50\%$ 、 $0.52 \mu\text{m}$  から  $0.42 \mu\text{m}$  に変化している。

この方法によるモードフィールド整合用導波路は、高い  $\Delta$  で厚いコアと低い  $\Delta$  で薄いコアを結ぶテーパ導波路となっており、コアへの閉じ込めの強度を変えることによりモードフィールド寸法を変えている。したがって、低い  $\Delta$  の部分においては、導波路構造の不完全性により損失増加を生じやすいという問題がある。

## 4. おわりに

$0.1 \text{ dB/cm}$  程度の低い伝搬損失の導波路が実現され、接続もそれに応じて低損失に行われることが望まれる。2. では、そのためにはモードフィールドの差異を  $\pm 15\%$  程度以下に抑えることの必要なことを述べた。また、3. では、モードフィールド整合用導波路の試作例を紹介し、最近ではモードフィールド変換比の大きくとれる  $\Delta$  およびコア寸法の両者を変化させたテーパ導波路が多く

検討されていること、モードフィールド不整合損失・モードフィールド変換にともなう放射損失を足し合わせても 1 dB 以下のものが報告され始めていること、を述べた。

モードフィールド整合用導波路は、①同一基板上の光機能デバイスとファイバとの接続用 (例: LiNbO<sub>3</sub> スイッチ基板入出力部に設けられたもの<sup>5)</sup>), ②別基板の光機能デバイスとファイバの接続用 (例: 半導体光スイッチとファイバの接続用<sup>15)</sup>), ③各種の光機能デバイスを収容するハイブリッド光集積回路基板用 (試作報告例は未だない), 等の用途が考えられるが, いずれの形態にせよ実用化されていない。今後は, さらに低損失化を図ることにより挿入損失で 0.1 dB 程度の値を実現するとともに, 機械的・温度的に安定な実装技術を開発することが望まれる。

#### 文 献

- 1) E. J. Murphy: "Fiber attachment for guided wave devices," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, **6** (1988) 862-871.
- 2) Y. Ohmori, T. Kominato, H. Okazaki and M. Yasu: "Low loss GeO<sub>2</sub> doped silica waveguides for large scale integrated optical devices," *Tech. Dig. 13th Conf. Opt. Fiber Commun.*, Jan. (1990) paper WE 2.
- 3) たとえば, R. G. Hunsperger: *Integrated Optics: Theory and Technology*, 2nd ed. (Springer-Verlag, Berlin, 1984) pp. 89-90.
- 4) H. Kogelnik: "Coupling and conversion coefficients for optical modes in quasi optics," *Microwave Research Institute Symposia Ser.*, **14** (Polytechnic Press, New York, 1964) pp. 333-347.
- 5) P. G. Suchoski and R. V. Ramaswamy: "Constant-width variable-index transition for efficient Ti:LiNbO<sub>3</sub> waveguide-fiber coupling," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, **LT-5** (1987) 1246-1251.
- 6) B. Chen, G. L. Tangonan and A. Lee: "Horn structures for integrated optics," *Opt. Commun.*, **20** (1977) 250-252.
- 7) H. L. Cox, Jr., S. D. O'Connor, P. R. Ashley and R. L. Morgan: "Development of tapered glass coupling waveguides for source radiation input into multichannel LiNbO<sub>3</sub> arrays," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, **6** (1988) 1045-1050.
- 8) T. L. Koch, U. Koren, G. Eisenstein, M. G. Young, M. Oron, C. R. Giles and B. I. Miller: "Tapered waveguide InGaAs/InGaAsP multiple-quantum-well lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **2** (1990) 88-90.
- 9) J. C. Campbell: "Tapered waveguides for guided wave optics," *Appl. Opt.*, **18** (1979) 900-902.
- 10) 川上彰二郎, 白石和男, 相沢芳三: "光ファイバ埋込型デバイスの一構成法", 昭和63年電子情報通信学会春季全国大会 (1988) C-457.
- 11) K. Baba, K. Shiraishi, O. Hanaizumi and S. Kawakami: "Buried ion-exchanged optical waveguides with index profiles controlled by rediffusion," *Appl. Phys. Lett.*, **45** (1984) 815-817.
- 12) H. Zhenguang, R. Srivastava and R. V. Ramaswamy: "Low-loss near adiabatic single-mode passive waveguide tapers," *Integrated and Guided-Wave Optics 1989 Tech. Dig. Ser. 4* (OSA, New Orleans, 1989) pp. 156-159.
- 13) K. Miura, I. Sawaki and H. Nakajima: "Low-loss single-mode plastic waveguide fabricated by photopolymerization," *Integrated and Guided-Wave Optics 1988 Tech. Dig. Ser. 5* (OSA, Santa Fe, 1988) pp. 58-61.
- 14) N. Yamaguchi, Y. Kokubun and K. Sato: "Low-loss spot-size transformer by dual-tapered waveguides (DTW-SST)," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, **8** (1990) 587-594.
- 15) H. Yanagawa, S. Nakamura and I. Ohyama: "Direct fabrication of coupler waveguide with index and dimensional taper by flame hydrolysis deposition," *Integrated Photon. Research 1990 Tech. Dig. Ser. 5* (OSA, Hilton Head, 1990) pp. 43-44.
- 16) D. E. Bossi, W. D. Goodhue, L. M. Johnson, M. C. Finn, K. Rauschenbach and R. H. Rediker: "Fabrication and enhanced performance of reduced-confinement GaAlAs tapered waveguide antennas," *Integrated Photon. Research 1990 Tech. Dig. Ser. 5* (OSA, Hilton Head, 1990) pp. 41-42.