

解説**光ファイバと薄膜光導波路の光接続**

水本 哲 弥

東京工業大学工学部電子物理工学科 〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1

(1990年7月31日受理)

Optical Fiber-to-Waveguide Coupling

Tetsuya MIZUMOTO

Department of Physical Electronics, Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152**1. はじめに**

光通信・光情報処理において、光信号を処理する各種光回路素子間で、あるいは光端末間で光信号の入出力を行う必要がある。この場合、自由空間をそのまま伝搬させて光信号の授受を行うという方法も考えられるが、多くの場合は光ファイバを伝送路とし、これを介して光信号の授受を行う方法がとられる。いずれの場合においても、光信号の入出力に際しては信号の受ける接続損失ができるだけ小さいほうが望ましい。

ところで、光回路素子の形態は、大別するとバルク型と導波路型の二つに分類することができる。現段階では実際に使用されているのは大部分がバルク型素子であるが、導波路型素子も複数の光信号処理機能を集積化した光集積回路の実現を目標に開発が進められており、今後の発展・実用化が大いに期待されている。

光ファイバとバルク型光回路素子との光入出力を考えると、通常は、ファイバと回路素子の間にレンズ系を挿入して結合効率を確保するという方法がとられる。当然、導波路型光素子とファイバの接続においても、同様にレンズ系を介する方法が考えられる。しかし、導波路を伝搬する光の電磁界分布(モードプロファイル)は必ずしも光ファイバのそれと一致せず、むしろ両者は大きく異なる場合のほうが多いために、導波路型光回路素子と光ファイバの間で高効率な光信号入出力を実現するためには、一工夫必要となる。

本解説は、導波路型光回路素子を使用する場合に、光

ファイバを介して光の入出力を行うに際して、いかに効率よく光信号の入出力を行うかをテーマに、これまで提案されてきた方法のいくつかを紹介するものである。とくに、結合用の導波路を設けて接続する方法に関して詳しく述べる。

2. 導波路と光ファイバの接続における問題点

一般に導波路-光ファイバ間の結合効率に影響をおよぼす要因として、

- (1) 軸ずれ、角度ずれ
- (2) ファイバと導波路の屈折率差
- (3) ファイバと導波路を伝搬するモードプロファイルのくい違い

が挙げられる。

(1)の要因はもちろんバルク型素子との接続においても問題となる。しかし、導波路型素子中で光が伝搬する導波路コアの断面は光の波長オーダーであり、バルク型素子とファイバの接続に比べて、導波路型素子とファイバの接続においては、はるかに厳密な位置あわせが要求される。容易に精度よく軸合わせを実現する方法として、導波路形成時にファイバ位置合わせ用のガイド溝を同時形成する方法が検討されている¹⁻³⁾。実際に導波路型光素子をファイバに接続するにあたっては、これらの方法を採用することが必要不可欠であると考えられる。

また(2)の屈折率差は、いわゆるフレネル反射損失となるが、これもバルク型素子とファイバ接続の場合と共

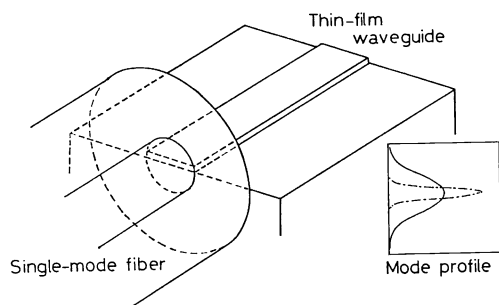


図1 単一モード光ファイバと薄膜導波路のモードプロファイル(実線:ファイバ, 一点鎖線:導波路)の違い

通の問題である。これを低減するために、通常は導波路もしくはファイバ端面に反射防止膜をコーティングする方法が採られる。

上記二つの問題以外に導波路型素子を光ファイバに接続する際に生ずる固有の問題が(3)の要因である。すなわち、多くの導波路コアはファイバコアに比べてかなり扁平であり、また導波路幅もファイバに比較して狭いことが多い。したがって多くの場合において、ファイバを接続したい導波路と、ファイバのモードプロファイルは大きく異なる(図1)。これによる接続損失の増加は大きい。これは、導波路中で光が波長オーダーの導波路コア近傍のファイバに比べれば狭い領域に閉じ込められて伝搬することによるものであり、バルク型素子に光ファイバを接続する場合に光ビームが発散しないように注意を払うことが必要であると対照的である。

3. 導波路と光ファイバの光結合法

導波路-光ファイバ間の光入出力法として、これまで提案もしくは試みられた方法には、次のようなものがある。

- (1) レンズ系を介する
- (2) 端面バットジョイント
- (3) 導波路を加工する

(1)の方法は、バルク型回路素子とファイバとの接続において通常用いられるのと同様に、導波路端面と光ファイバの間にマイクロレンズを挿入するか⁴⁻⁶⁾、もしくは接続すべき光ファイバの先端をレンズ状に加工し⁷⁾、光ファイバから出射される光を収束させて導波路に入射させるものである。この方法では、とくに導波路コアのアスペクト比が1から大きく異なる場合には、モードプロファイルの不一致を補正するのが難しく、小さな接続損失を実現することが困難であると考えられる。

(2)の方法は、導波路の端面と光ファイバの破断面を直接突き合わせる方法で、もっともシンプルであるが、導波路伝搬光とファイバ伝搬光のモードプロファイルが似通っている場合にのみ高い入出力効率が達成可能である。たとえば、Ti 拡散 LiNbO₃ 導波路を伝搬する光のモードプロファイルはシングルモード光ファイバを伝搬する光のプロファイルに比較的近い⁸⁾ため、たんにお互いの端面を突き合わせただけでも、0.7 dB という小さな接続損失が実現されている⁸⁾。また、石英系導波路において、導波路の屈折率分布(コア、クラッドの屈折率ならびに導波路コアのサイズ)がシングルモード光ファイバとほぼ同じである場合には、導波路コアの形状が矩形であっても、円形コアの光ファイバとのモードプロファイルの一致はよく、小さな接続損失が実現できる^{2,9)}。しかし、ファイバの端面を直接突き合わせることで小さな接続損失で光ファイバと接続可能な導波路は限られており、この方法をすべての導波路型素子に適用することはできない。

(3)に分類される方法として、

- (a) 端面ミラー反射¹⁰⁾
- (b) 導波路レンズを設ける¹¹⁾
- (c) テーパー状導波路でモードプロファイルを変換する^{11,12)}
- (d) 接続用導波路を特別に設ける^{13,14)}

が挙げられる。それぞれの原理図を図2に示す。

この中で(d)の方法は、原理的にはどのような導波路に対しても接続損失の大幅な低減が可能であるという特徴をもつ。これからこの方法を中心に解説を加える。

4. 分布結合導波路を用いた導波路-ファイバ光接続

導波路と光ファイバの接続において接続損失の低減を図るためには、ファイバと導波路を伝搬するそれぞれの光電磁界のプロファイルのくい違いによる損失増加を極力抑えることが重要である。この点に着目し、図2(d)に示すように、結合したい導波路(WG2)上に中間層を介してシングルモードファイバのコア径と同程度の断面寸法を有する導波路(WG1:以後この導波路のことを接続導波路とよぶ)を設ける方法が提案されている¹³⁾。以下ではこれについて述べる。

4.1 均一接続導波路を用いたファイバ-導波路接続

ファイバの伝搬モードとプロファイルの整合をとるために設けた接続導波路は多モード導波路であるが、導波路サイズがファイバコアと整合がとれているので、適当

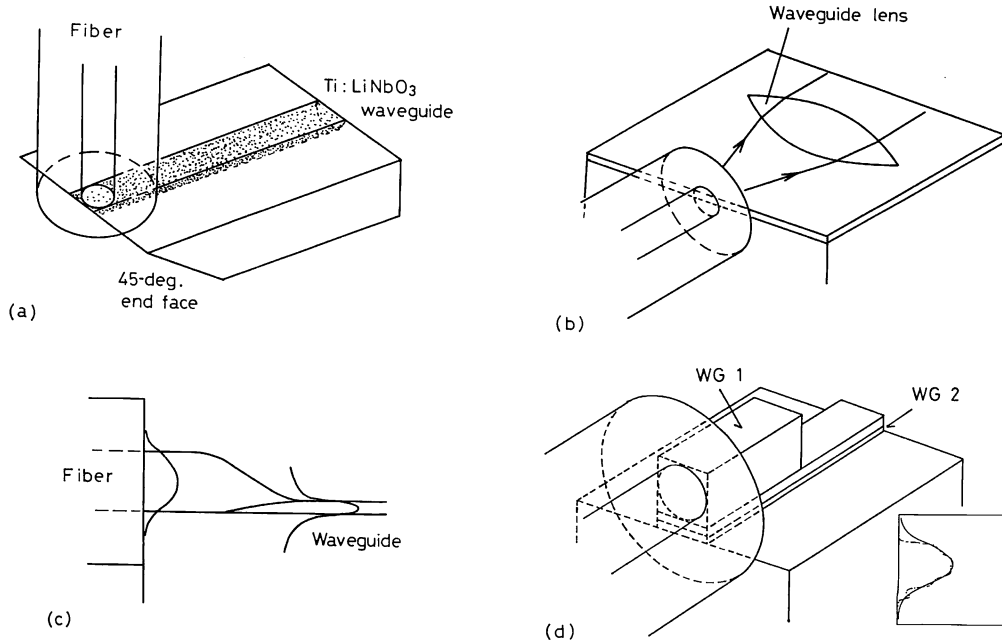


図 2 光ファイバ-導波路結合法

(a)導波路端面ミラー加工, (b)導波路レンズ, (c)モードプロファイル
 整合用導波路, (d)結合導波路を用いる。

な位置関係でファイバと接続した場合には、導波路中ではファイバの伝搬モードに最も近いプロファイルをもつ最低次モードが強く励振される。ここで、適当な位置関係というのは、接続導波路の中心をファイバの中心軸付近に配置することを意味する（軸ずれが大きいと、導波路の高次モードが強く励振される）。接続導波路に励振された光電磁界は、図 3 (a)に示すように結合導波路中を伝搬しながら分布結合によって最終的に光信号を伝えたい下の導波路 WG 2 へ徐々に移行する。

図 3 (a)で、プロファイルを表す左側の実線はファイバを、また右側の実線は WG 2 を伝搬するモードを表し、左側の破線はファイバによって導波路入射端面で励振されたプロファイルを表す。破線で示されるように、 x 方向に伝搬しながら徐々に WG 2 に分布が偏っていく様子がわかる。

一般に、伝搬方向に均一な構造を有する導波路を 2 本近接して置いたときに、一方の導波路に入射したあるモードが他方の導波路へ移行する割合（結合率）は伝搬距離に対して正弦関数的に変化し、2 本の導波路を伝搬するモードの伝搬速度が等しい位相整合状態にあるときに最大の結合率が得られる¹⁵⁾。この様子が図 3 (b)に示されている。ここで光の波長は $1.3 \mu\text{m}$ と仮定しており、接続導波路の屈折率 $N_a=1.5010$ で最低次モードが

WG 2 の伝搬モードと位相整合状態となり、伝搬距離 2.36 mm で最大の結合率 95% が得られる。

したがって接続導波路の設計時には、WG 2 も含めた接続導波路系全体で最低次モードのプロファイルがファイバを伝搬するモードと整合がとれるように導波路 WG 1 の断面寸法を決定し、その屈折率は WG 2 と位相整合状態が実現できるように決定される。さらに移行する割合は、伝搬距離に対して正弦関数的に変化するので、“適当な長さ”で接続導波路を打ち切る必要があり、これによって WG 2 に移行した電磁界はそのままその導波路中を伝搬していく。仮に接続導波路を“適当な長さ”で打ち切らなかつたらどうなるであろうか。この場合には、いったんは WG 2 に結合された電磁界が、再びもとの導波路に戻ることになる。

入射光ファイバに接続された導波路系が多モード伝搬可能な場合には、励振される高次モードの影響も考慮して最適な接続導波路の構造を決定する必要がある。さらに導波路不連続部における反射も考慮に入れて、コア径 $10 \mu\text{m}$ の単一モードファイバから導波路 WG 2 に入力される光電力の割合（伝達効率）を計算した結果を図 4 に示す。この図は、WG 2 の導波路厚 g の変化に応じて、最大の伝達効率を得られるように接続導波路の屈折率 N_a を変化させた計算結果であり、 N_a を適切に選

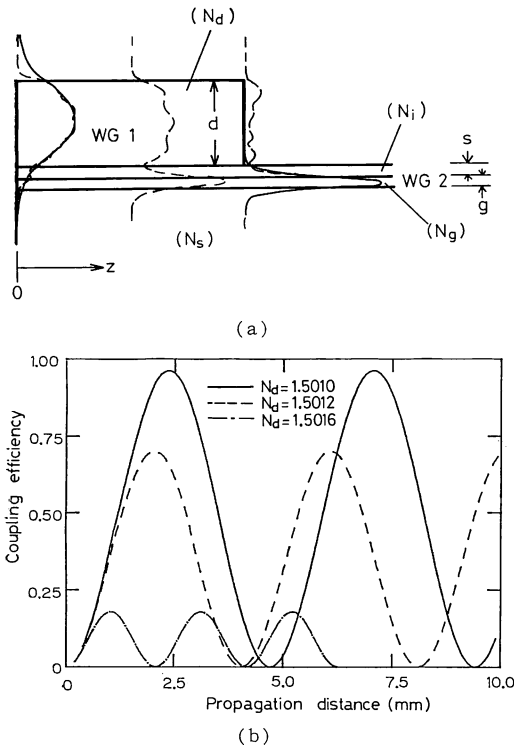


図3 (a)接続導波路から下の導波路への光電磁界移行の様子(()内のパラメータは屈折率を表す)と、(b)結合率の伝搬距離依存性 ($N_i=1.4468$, $N_g=1.540$, $N_s=1.4468$, $d=10\ \mu\text{m}$, $s=1.5\ \mu\text{m}$, $g=1.0\ \mu\text{m}$, 導波路の幅はすべて $10\ \mu\text{m}$)

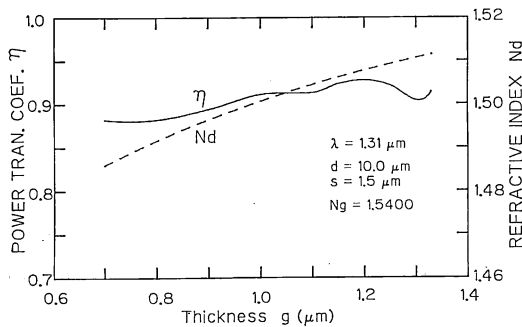


図4 ファイバと導波路 WG2 間の光電力伝達効率の計算結果(実線) 導波層厚 g の変化に応じて、最大の伝達効率を得られるように N_d を破線で示されるように変化させている ($N_i=N_s=1.4468$).

べば、ファイバコアに比べてはるかに薄い導波路にも効率よく光が入力されることがわかる。なお、 N_d の変化に応じて接続導波路長も変化させる必要がある。

ところで、もし製作時に接続導波路のサイズや屈折

率、さらには中間層の厚さや屈折率等が、設計値とずれてしまったらどうなるであろうか。これらのずれは、接続導波路を伝搬する電磁界の伝搬速度の変化をもたらす、このことがさらには下の導波路への結合度を变化させる。その結果、最適な接続導波路長が変化してしまう。たとえば、接続導波路の屈折率が変化した場合、最低次モードの結合率は図3(b)に示すように変化する。

この“導波路パラメータの設計値からの変動に対する結合効率劣化”を低減するために、接続導波路の構造を伝搬方向にテーパ状に変化させるという方法が有効であることがわかった¹⁴⁾。次節でこれについて述べる。

4.2 テーパ状接続導波路を用いたファイバ-導波路 接続

前節で述べたように、伝搬方向に構造の均一な結合導波路系を用いた場合には、下の導波路との電磁界エネルギーの授受を最大にするためには、2本の導波路間で位相整合状態を実現することが必要であった。しかし、結合導波路の構造を伝搬方向に変化させると、状況は変わってくる。

電磁界が伝搬するにつれて接続導波路の構造(具体的には導波路コアの幅・高さ、もしくは屈折率)が変化する場合には、それにつれて導波路中を伝搬する電磁界の伝搬速度も変化する。したがって均一結合導波路系の場合とは異なり、場所によらず一定の結合が存在するのではなく、導波路間の結合の強さも場所によって変化する。一方の導波路からの他方の導波路へ電磁界エネルギーが最も効率よく移行するのは、2本の導波路が位相整合状態にある場合であるから、接続導波路と下の導波路の位相整合がとれる近傍で強い結合を生じ、それ以外の場所における両導波路間の電磁界エネルギーのやりとりは小さくなる。

図5に、導波路幅が $+z$ 方向に線形テーパ状に減少し

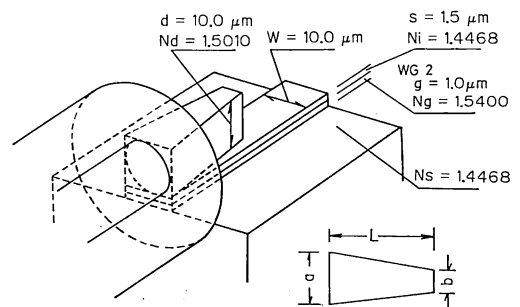


図5 テーパ状結合導波路を用いたファイバ-導波路結合器 N_d, N_i, N_g, N_s は各部の屈折率を表す。

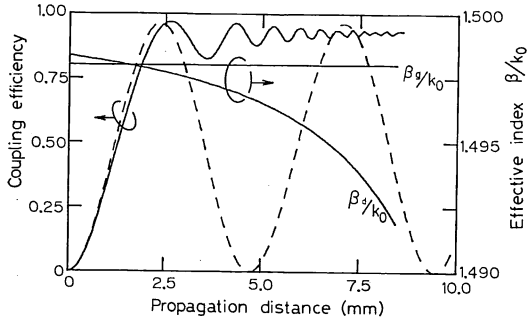


図 6 結合効率の伝搬距離依存性
 テーパー結合導波路: 実線, 均一結合導波路: 破線. β_a/k_0 , β_g/k_0 はそれぞれテーパー状結合導波路の最低次モード, 導波路 WG2 の伝搬モードの実効屈折率を表す.

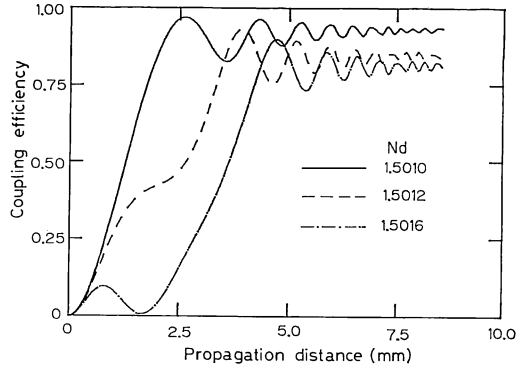


図 7 テーパー状接続導波路の屈折率 N_d が変化した場合の結合効率の伝搬距離依存性

ている接続導波路を用いたファイバ-導波路結合器の構造を示す。ここで、WG2 の構造は伝搬方向に均一である。接続導波路の左側入射端面で励振された最低次モードの光電力に対する下の導波路に移行した光電力の割合(結合効率)の、伝搬距離に対する変化を計算した結果が図 6 に示してある。計算で仮定した光の波長は 1.3 μm であり、導波路の各パラメータは図 5 に示すとおりである。図中には、接続導波路の最低次モードの実効屈折率 β_a/k_0 と、WG2 を伝搬する最低次モードの実効屈折率 β_g/k_0 の x 方向変化も示している。この図より、接続導波路と WG2 を伝搬するモードの位相整合がとれている近傍で強く光電力の移行が生じ、その後、伝搬定数の差が大きくなるために強い電力の移行が起こらない様子が見とれる。この例では、伝搬距離 7.5 mm 以上で 93% 以上の結合効率を得られている。

このような構造で、導波路のサイズ(コアの幅・高さ)や屈折率が設計値からずれた場合を考える。設計値からのずれが小さい場合には、テーパー状に変化していることにより、接続導波路のどこかで WG2 と位相整合がとれる点が存在すると期待できる。その場合には高い結合効率が期待できる。

図 7 は、テーパー状接続導波路の屈折率をパラメータとして、伝搬距離に対する結合効率の変化を表している。たとえば伝搬距離 7.5 mm で、図 3 (b) と比較すると、同じ屈折率変化に対しテーパー構造を用いたほうが均一導波路構造の場合に比べて結合効率の変化が小さいことがわかる。

同様に接続導波路または WG2 のサイズが変化した場合も、テーパー構造では結合効率の変化が小さいことが示される。すなわち結合導波路系にテーパー構造を採用す

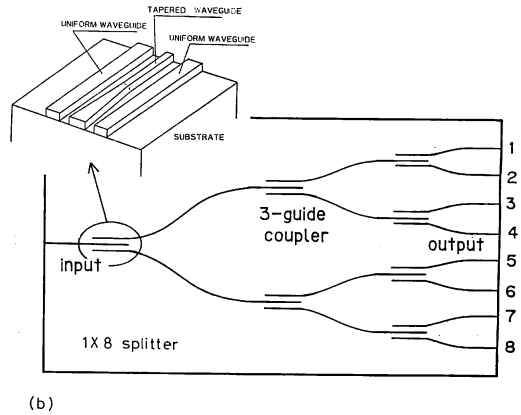
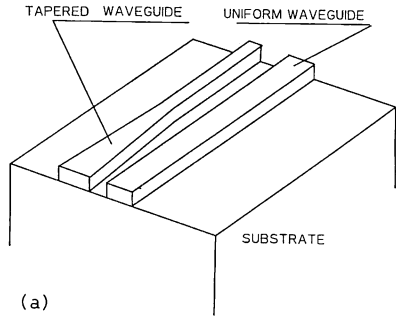


図 8 テーパー状結合導波路系を用いた (a) 方向性結合器, および (b) 1x8 光スプリッタ (7 個の 3 分岐結合器はすべて挿入図に示すテーパー結合線路を用いる)

ることによって、“導波路構造の設計値からのずれに対する結合効率の劣化”をある程度抑えることができる。さらに、同様の理由から結合効率の波長依存性、偏波依存性も小さいことがわかる。

もちろん位相整合点が存在しないほど大きく変動した場合には、上述の議論は成り立たない。

これらの性質はテーパ状導波路を含む結合導波路系に共通のもので、この特性を生かした方向性結合器¹⁶⁾、分配器¹⁷⁾等の構成(図8)も提案され、試作・実験的検討も行われている。

5. おわりに

光ファイバと導波路型光回路素子間の光の入出力に関して、モードプロファイルの違いを克服し、高い結合効率を実現するための方法として、接続用の導波路を設ける方法を中心に紹介した。接続導波路の構造を光の伝搬方向にテーパ状に変化させることによって、導波路構造の変化による結合効率の変動が小さくなること、さらに結合効率の波長依存性、偏波依存性を小さくすることができる。しかし、いずれにせよ高効率な結合を実現するためには、導波路のサイズならびに屈折率をある程度の範囲内に制御する必要があることはいうまでもない。さらに結合導波路に必要な長さが mm オーダーになるといっても、改善すべき今後の課題である。

日頃ご指導いただく本学内藤喜之教授に感謝申し上げます。また、本稿で示した数値計算結果は、本研究室博士課程蔡元敏君によってなされたものであることを記して感謝いたします。

文 献

- 1) L. P. Boivin: "Thin-film laser-to-fiber coupler," *Appl. Opt.*, **13** (1974) 391-395.
- 2) Y. Yamada, M. Kawachi, M. Yasu and M. Kobayashi: "High-silica multimode channel waveguide structure for minimizing fiber-waveguide-fiber coupling loss," *J. Lightwave Technol.*, **LT-4** (1986) 277-282.
- 3) C. H. Henry, G. E. Blonder and R. F. Kazarinov: "Glass waveguides on silicon for hybrid optical packaging," *J. Lightwave Technol.*, **7** (1989) 1530-1539.
- 4) 岸本綾造: "集束ロッドレンズを用いた単一モードファイバ用集束ビーム光学系の設計法", 電子通信学会論文誌, **J69-C** (1986) 280-289.
- 5) H. Ghafoori-Shiraz and T. Asano: "Microlens for coupling a semiconductor laser to a single-mode fiber," *Opt. Lett.*, **11** (1986) 537-539.
- 6) 吉野 薫: "ハイブリッド集積型光学結合回路の特性", 電子情報通信学会春季全国大会, C-278 (1990) pp. 4-333.
- 7) G. Wenke and Y. Zhu: "Comparison of efficiency and feedback characteristics of techniques for coupling semiconductor lasers to single-mode fiber," *Appl. Opt.*, **22** (1983) 3837-3844.
- 8) J. Noda, O. Mikami, M. Minakata and M. Fukuma: "Single-mode optical-waveguide fiber coupler," *Appl. Opt.*, **17** (1978) 2092-2096.
- 9) N. Shimizu, N. Imoto and M. Ikeda: "Fusion splicing between optical circuits and optical fiber," *Electron. Lett.*, **19** (1983) 96-97.
- 10) B. E. Kincaid, R. Blachman, J. L. Nightingale and R. A. Becker: "Surface-coupled LiNbO₃ guided-wave structure," *Opt. Lett.*, **14** (1989) 335-337.
- 11) P. K. Tien, G. Smolinsky and R. J. Martin: "Radiation field of a tapered film and a novel film-to-fiber coupler," *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, **MTT-23** (1975) 79-85.
- 12) N. Yamaguchi, Y. Kokubun and K. Sato: "Low-loss spot-size transformer by dual tapered waveguide (DTW-SST)," *J. Lightwave Technol.*, **8** (1990) 587-594.
- 13) Y. Cai, T. Mizumoto, E. Ikegami and Y. Naito: "Efficient coupling between single-mode fiber and thin-film waveguide," *14-th European Conference on Optical Communication* (IEE, Brighton, 1988) pp. 569-572.
- 14) Y. Cai, T. Mizumoto and Y. Naito: "Fiber-waveguide coupler having a linear-tapered form," *Trans. IEICE Jpn.*, **E71** (1988) 931-933.
- 15) たとえば, 西原 浩, 春名正光, 栖原敏明: 光集積回路, (オーム社, 東京, 1985) 第3章.
- 16) Y. Cai, T. Mizumoto and Y. Naito: "Analysis of the coupling characteristics of a tapered coupled waveguide system," *J. Lightwave Technol.*, **8** (1990) 90-98.
- 17) Y. Cai, T. Mizumoto and Y. Naito: "Analysis of the coupling characteristics of a tapered three-guide coupled system," *J. Lightwave Technol.*, (to be published in Oct. 1990).