

解説

光導波路と光結合のシミュレーション

小柴正則

北海道大学工学部電子工学科 〒060 札幌市北区北13条西8丁目

(1994年12月28日受理)

Simulation of Optical Waveguides and Optical-Coupling Phenomena

Masanori KOSHIBA

Department of Electronic Engineering, Hokkaido University,
Kita-13, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo 060

1. ま え が き

長距離幹線系を中心に導入されてきた光通信システムを光加入者系に適用, 拡大していくための技術課題は極めて多岐にわたっているが, とりわけ光信号の多重化や合分波, 光路切替といった機能をもつ光デバイスの高性能化が強く求められている. こうした光デバイスの極限性能を追求するには, その基本構成要素である光導波路や光導波路にさまざまな機能を付加するために頻繁に利用される光結合の詳細な設計・シミュレーションが不可欠である. 実際, ここ数年, 導波路型光デバイスの設計を支援するための CAD (computer aided design), いわば光 CAD の研究開発が立ち上がり始め, 一部は商品化されるに至っている¹⁾.

本稿では, 光加入者システム構築のための要素技術のなかから, 光ファイバーと光導波路との接続の問題や光結合を巧みに利用した光スイッチの問題などを取り上げ, 筆者の研究室で開発中の光 CAD システム ELM (expert lightwave modelling system, 従来名 PHOTO-NIX^{2,3)}) による解析事例を示しながら, 光導波路や光結合の設計・シミュレーションのアウトラインを述べる.

2. 光導波路の種類

光を局所的に閉じ込めて任意の方向に導波させる光導波路の構造には, 実にさまざまなものがあり, その材料もガラス (石英系, 多成分系), 強誘電体 (LiNbO₃ 系, LiTaO₃ 系), 化合物半導体 (GaAs 系, InP 系), プラスチックなど, 極めて多岐にわたっている.

図1に, 光ファイバーと光導波路の代表格である石英系光導波路, LiNbO₃系光導波路, 半導体系光導波路の断面構造の一例を示す. ここに n は屈折率である. なお, LiNbO₃系光導波路の屈折率 n_i ($i=x, y, z$) については, Ti 拡散 LiNbO₃ 導波路を想定し, Ti 拡散前の基板の屈折率を $n_{s,i}$, 拡散による屈折率の最大変化量を $\Delta n_{i,x,y}$ 方向の屈折率分布関数をそれぞれ $f(x), g(y)$, 屈折率分布と Ti 拡散濃度との関係の異方性を表すパラメータを α_i として

$$n_i(x, y) = n_{s,i} + \Delta n_i [f(x)g(y)]^{\alpha_i} \quad (1)$$

のように与えられるものとする. また, 拡散前の Ti パターン幅を W_0 , x, y 方向の拡散長をそれぞれ d_x, d_y として, 屈折率分布関数を具体的に

$$f(x) = \frac{\text{erf}[(x+W_0/2)/d_x] - \text{erf}[(x-W_0/2)/d_x]}{2 \text{erf}(W_0/2d_x)} \quad (2)$$

$$g(y) = \exp[-(y/d_y)^2] \quad (3)$$

とする.

3. 光導波路のモデリング

光導波路のモデリングにはいくつかの階層があるが, おおよそ, 固有値問題, 初期値問題, 決定問題といった階層に大別することができる.

固有値問題は, 伝搬方向に一樣な, すなわち構造や屈折率が変化しない光導波路の固有モード (導波モード) の実効屈折率 n_{eff} やモードフィールド $\phi(x, y)$ を評価するもので, 解析の対象領域は導波路の断面になる²⁻⁶⁾.

初期値問題は, こうした導波モードが, 曲りや分岐,

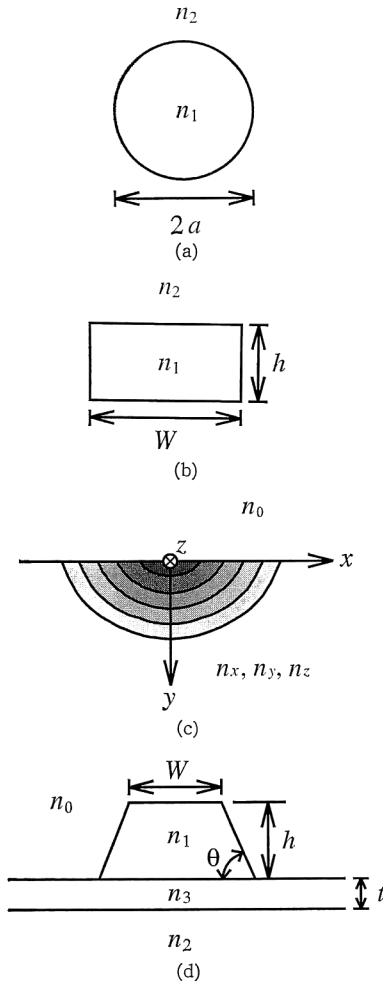


図 1 光導波路

(a) 光ファイバー, (b) 石英系光導波路, (c) LiNbO₃系光導波路, (d) 半導体系光導波路.

結合部など, さまざまな不連続箇所をもった光導波路内をどのように伝搬していくかを逐次的に評価するもので, 解析の対象領域は光導波路全体であるが, 実質的には, 伝搬方向の微小区間 Δz ごとにその前後の光波動場 $\phi(x, y, z)$, $\phi(x, y, z + \Delta z)$ を関係づける計算を繰り返す行い, 導波光の変化や空間的な発展を調べる^{2,7)}.

決定問題は, 不連続箇所を有する光導波路の入出力特性を決定論的に直接評価するもので, 初期値問題の場合とは異なり, 解析の対象領域は始めから不連続箇所をすべて含めた光導波路全体になる.

4. 光導波路の解析法

光導波路の解析法にもさまざまなものがあるが, 光導波路や光結合の設計・シミュレーションに使用するため

には, できるだけ汎用性, 信頼性の高いものが望ましい. ELM では, 固有値問題に対して FEM (有限要素法), 初期値問題に対して FFT-BPM (導波路断面内の光波動場の離散化に高速フーリエ変換を用いたビーム伝搬法) と FE-BPM (導波路断面内の光波動場の離散化に有限要素法を用いたビーム伝搬法), 決定問題に対して FEM を採用している.

光導波路の解析法には, FEM や BPM のほかにもいろいろあるので, 詳細については解説論文⁴⁻⁷⁾や解説書⁸⁻¹¹⁾を参考にしていきたい.

5. 光結合のシミュレーション事例

5.1 光ファイバーと光導波路との接続

光加入者システムの構築に向けて, 光ファイバーと光導波路との接続を中心とする光実装の問題がクローズアップされている. 光導波路そのものの低損失化によって, 光ファイバーと光導波路との接続損失や異なる光導波路間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おり, こうした接続損失の低減化が課題である.

ところで, 光ファイバーと光導波路との接続損失には, モードフィールドの不整合によるもの, 屈折率の不整合によるもの, 軸ずれや角度ずれによるものなどがあるが, とりわけモードフィールドの不整合による損失が問題である. ここでは, 図 1 に示した各種の光導波路のモードフィールドを調べるために, ELM を用いて固有値問題解析を行う. 動作波長を $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ とし, 導波路の諸元を表 1 に示す. ここに Δ はコアとクラッドの比屈折率差である.

図 2 は, ELM により算出された基本モードのモードフィールドの振幅の相対値を 10% 間隔の等高線で表示

表 1 光導波路の諸元

光ファイバー
$2a = 8.9 \mu\text{m}$, $n_1 = 1.45$, $\Delta = 0.27\%$
石英系光導波路 ¹²⁾
$W = 10 \mu\text{m}$, $h = 8 \mu\text{m}$, $n_1 = 1.45$, $\Delta = 0.24\%$
LiNbO ₃ 系光導波路 ¹³⁾
$W_0 = 14 \mu\text{m}$, $d_x = 4.007 \mu\text{m}$, $d_y = 3.381 \mu\text{m}$, $n_0 = 1$, $n_{sx} = 2.138$, $n_{sy} = n_{sz} = 2.214$, $\Delta n_x = 0.0196$, $\Delta n_y = \Delta n_z = 0.0074$, $\alpha_x = 1$, $\alpha_y = \alpha_z = 0.55$
半導体系光導波路 ¹⁴⁾
$W = 5.2 \mu\text{m}$, $h = 2.0 \mu\text{m}$, $t = 0.4 \mu\text{m}$, $\theta = 60^\circ$, $n_0 = 1$, $n_1 = 3.3735$, $n_2 = 3.3504$, $n_3 = 3.3278$

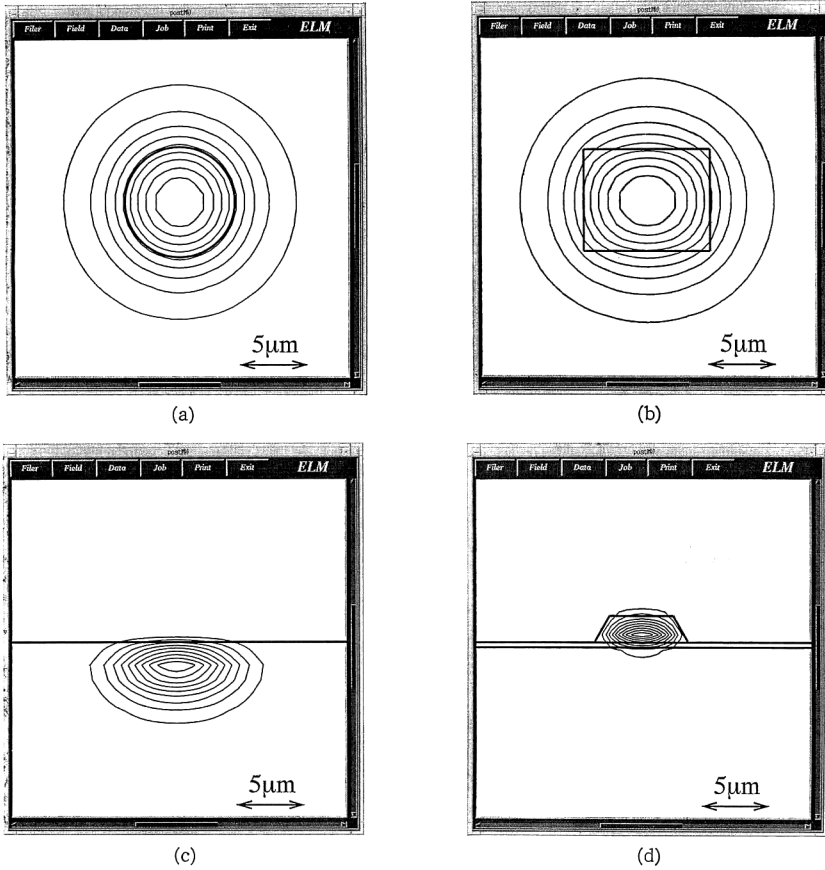


図2 モードフィールド
 (a) 光ファイバー, (b) 石英系光導波路, (c) LiNbO₃系光導波路,
 (d) 半導体系光導波路.

表2 モードフィールド径

光導波路	w_x (μm)	w_y (μm)
光ファイバー	10.86	10.86
石英系光導波路	12.16	11.04
LiNbO ₃ 系光導波路	9.34	4.38
半導体系光導波路	5.02	2.08

したものである。また、水平、垂直方向のモードフィールド径 w_x, w_y を表2に示す。モードフィールドは、導波路の種類によって光ファイバーのそれとは大きく異なることがわかる。

図3は光ファイバーと光導波路とを突き合わせ接続したときの接続損失^{2,11)}を

$$\text{Coupling loss} = -10 \log \eta \quad (\text{dB}) \quad (4a)$$

$$\eta = \frac{4n_{\text{eff}1}n_{\text{eff}2} \left(\iint_{\Omega} \phi_1 \phi_2 dx dy \right)^2}{(n_{\text{eff}1} + n_{\text{eff}2})^2 \iint_{\Omega} \phi_1^2 dx dy \iint_{\Omega} \phi_2^2 dx dy} \quad (4b)$$

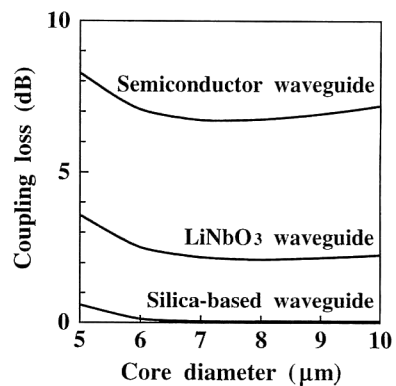


図3 光ファイバーと光導波路との接続損失

によって評価したものである。ここに Ω は導波路の断面を表し、添字1は光ファイバーに関する量であること、添字2は光ファイバーに接続される光導波路に関する量であることを意味する。石英系光導波路の場合には、こうした単純なバットカップリングでも接続損失は

かなり小さいが、これは、コアの寸法やコアとクラッドの屈折率差が光ファイバーとほぼ同程度になっていることによる。これに対して、他材料系の光導波路の場合には、このような構造を採用することは難しく、モードフィールドの不整合によって接続損失は不可避免的に大きくなる。このため、モードフィールド整合用導波路、あるいはスポットサイズ変換器と呼ばれる光デバイスが各種開発されており、本特集号においても最新の成果が紹介されているので参考にさせていただきたい。

5.2 マッハ・ツェンダー型光スイッチ

光交換や光回線切替などの役割を担う光スイッチは、光加入者システムにおいて最も重要なデバイスとして位置づけられている。ここでは、光結合の典型とも言える光方向性結合器を利用したマッハ・ツェンダー型光スイッチを取り上げ、その設計例を示す。

まず、図4(a)に示すような石英系光導波路からなる光方向性結合器を考え、簡単のため、等価屈折率法⁷⁻⁹⁾を用いて3次元構造を(b)のような2次元構造に置き換える。動作波長を $\lambda=1.29\mu\text{m}$ とし、石英系光導波路の諸元は前述したものと同一とする。

ところで、長さ l の結合部の偶モード、奇モードの実効屈折率は、導波路間隔を $S=2.2\mu\text{m}$ としたとき、それぞれ $n_e=1.4485764$, $n_o=1.4482717$ となるので、完全

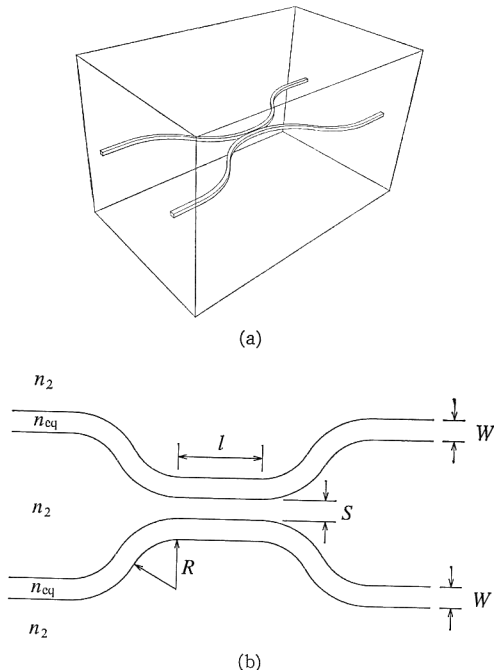


図4 光方向性結合器
(a) 3次元構造, (b) 2次元構造.

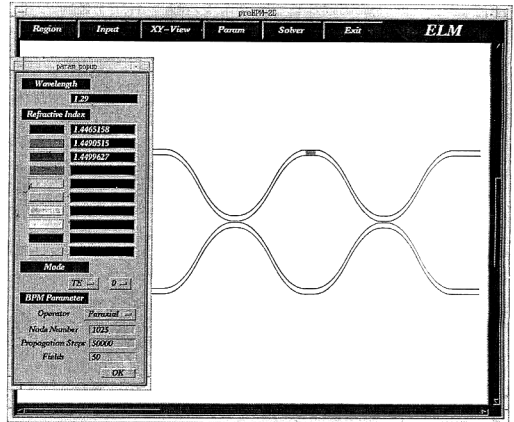


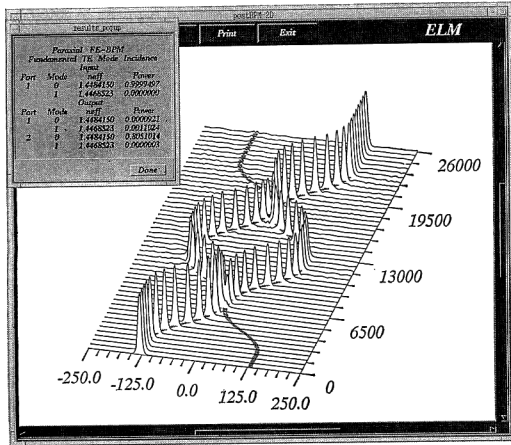
図5 マッハ・ツェンダー型光スイッチ

結合長 L_c を、よく知られた公式⁸⁻¹¹⁾ $L_c=0.5\lambda/(n_e-n_o)$ によって見積もると、 $L_c \approx 2.12\text{mm}$ となる。この値は実験値¹²⁾ $L_c \approx 2.23\text{mm}$ と比較的よく一致しているが、実際にはS字導波路部においても光結合が生ずるため、結合部の長さを $l=L_c$ としたのでは光方向性結合器としての所望の特性は得られない。

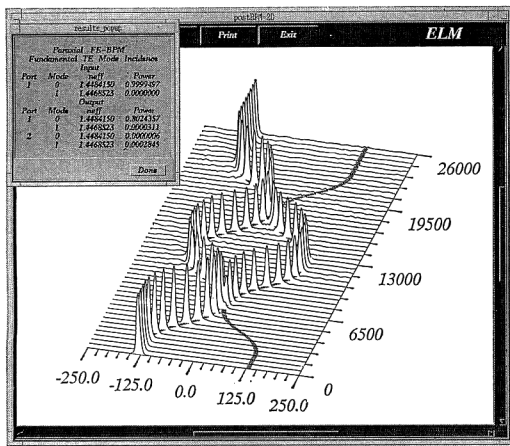
そこで、S字導波路部も含めた光方向性結合器全体の結合特性を求めるために、ELMを用いて初期値問題解析を行う。S字導波路の曲率半径を $R=50\text{mm}$ としたとき、結合部の長さを $l \approx 1.44\text{mm}$ に設定すると、上側の導波路の左方から入射した光はほぼ完全に下側の導波路の右方から出射する。したがって、S字導波路部の実効的な結合長は $\Delta l=L_c-l \approx 0.68\text{mm}$ と見積もられる。この値は実験値¹²⁾ $\Delta l=0.63\text{mm}$ と比べてやや大きい、いずれにしてもS字導波路部の光結合を考慮する必要があることがわかる。

さて、マッハ・ツェンダー型光スイッチは、図5に示すように二つの3dB光方向性結合器と同一の長さをもつアーム導波路とで構成される。二つの光方向性結合器は3dB結合器となるように、その結合部の長さを $l=L_c/2-\Delta l \approx 0.38\text{mm}$ としている。また、上側のアーム導波路に π だけの位相差を与えるために、そのコア部の屈折率を $\Delta n=0.01$ だけ変化させることができたとして、 $n'_1=n_1+\Delta n=1.46$ とする。アーム導波路を伝搬する基本モードの実効屈折率は、この位相差が $0, \pi$ の場合に対して、それぞれ $n_{\text{eff}}=1.4484150$, $n'_{\text{eff}}=1.4492575$ となるので、 π だけの位相差を与えるのに必要なアーム導波路の長さ $d=0.5\lambda/(n'_{\text{eff}}-n_{\text{eff}}) \approx 0.77\text{mm}$ となる。

以上のようにしてレイアウトされたマッハ・ツェンダー型光スイッチの動作を確認するために、ELMを用いて初期値問題解析を行う。図6(a), (b)はそれぞれ位相



(a)



(b)

図6 マッハ・ツェンダー型光スイッチのスイッチング特性
(a) クロス状態, (b) バー状態.

差が $0, \pi$ の場合の光伝搬の様子を示したものである。位相差がない場合、光は対角ポートに出力される(クロス状態)のに対して、上側の導波路に π だけの位相差を与えた場合には、光は平行ポートから出力され(バー状態)、光スイッチとして動作していることがわかる。

なお、アーム導波路の屈折率を変化させるのに、石英系光導波路では一般に熱光学効果が利用される。こうした屈折率変化を与えるのに利用される物理現象には、このほかにも電気光学効果、音響光学効果、磁気光学効果、量子閉じ込めシュタルク効果、非線形光学効果などさまざまなものがあり、使用される導波路材料と密接に関係している。

5.3 ホログラフィックグレーティング

最後に、決定問題の一例としてグレーティングを取り

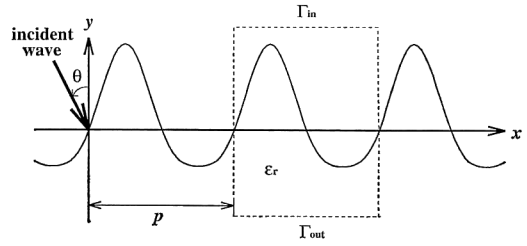


図7 ホログラフィックグレーティング

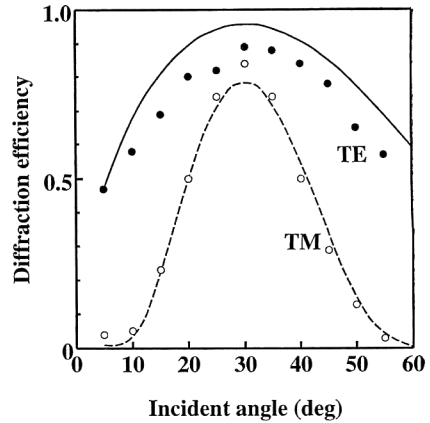


図8 ホログラフィックグレーティングの回折特性

上げる。グレーティングの用途はさまざまあるが、波長多重通信用合分波器としても広く利用されている。ここでは、図7に示すようなホログラフィックグレーティング¹⁵⁾を考え、グレーティング周期を p として、グレーティングプロファイルを

$$y = 0.2 \sin(2\pi x/p) + 0.04(4\pi x/p - \pi/2) \text{ (}\mu\text{m)} \quad (5)$$

とする。また、動作波長を $\lambda = 0.83 \mu\text{m}$ 、グレーティング周期 $p = 0.83 \mu\text{m}$ 、グレーティング材料を金として、その比誘電率を $\epsilon_r = -21.60 - j1.40$ とする。

このようなグレーティングの回折特性を調べる問題は、光の伝搬方向に対して構造や屈折率が急変し、また、有意な反射が存在するので、初期値問題として処理することはできない。ここでは、この問題を ELM を用いて決定問題として解析する。

図8はホログラフィックグレーティングの回折効率の入射角 θ 依存性を示したものであり、TE 波入射、TM 波入射のいずれの場合も実験値(●, ○)¹⁵⁾と比較的よく一致した結果が得られている。なお、この解析では、図7に示したグレーティングの1周期に相当する領域(破線で囲まれた領域)に FEM を適用し、入射側境界 Γ_{in} 、出射側境界 Γ_{out} においてフロケの解と接続している。

6. む す び

光導波路、光結合の設計・シミュレーションを行おうとした場合に直面する問題を、固有値問題、初期値問題、決定問題に分類し、それぞれの問題の具体的な解析事例を示した。ここでは、スカラ波解析の結果を紹介したが、光加入者システム用光デバイスの高性能化を極限まで追求するような段階においては、ベクトル波解析はもちろんのこと、直接3次元解析することも必要になると予想される。光CADの性能はソルバーの性能でほとんど決まってしまうので、より高精度で、より高速な、そしてより汎用性の高い光導波路解析ツールの開発が今後とも必要である。また、特に3次元解析の場合には、3次元形状のモデリング、解析結果のグラフィックス表示に一層の工夫が必要であり、本稿がこうした問題に関心をもっていただけるきっかけになれば幸いである。

文 献

- 1) 小柴正則：“光CADで光ICを実現”，エレクトロニクス，**38** (1993) 59-61.
- 2) 小柴正則：“光集積回路の設計・シミュレーション”，電子情報通信学会論文誌，**77-C-I** (1994) 159-167.
- 3) M. Koshiha and Y. Tsuji：“An analysis/design tool for optical waveguides: PHOTONIX-GUIDE,” *Fifth Optoelectronics Conference Technical Digest* (1994) pp. 418-419.
- 4) 小柴正則：“電磁界解析”，テレビジョン学会誌，**38**(1984) 1045-1052.
- 5) 小柴正則：“光導波路の解析法”，応用物理，**61** (1992) 22-29.
- 6) 小柴正則：“光導波路の有限要素法解析”，光学，**22**(1993) 590-595.
- 7) 小柴正則：“導波光伝搬の解析法”，レーザー研究，**19** (1991) 295-305.
- 8) 西原 浩，春名正光，栖原敏明：光集積回路 (オーム社，東京，1985).
- 9) 小柴正則：光導波路解析 (朝倉書店，東京，1990).
- 10) 岡本勝就：光導波路の基礎 (培風館，東京，1992).
- 11) M. Koshiha: *Optical Waveguide Theory by the Finite Element Method* (KTK Scientific Publishers/Kluwer Academic Publishers, Tokyo/Dordrecht, 1992).
- 12) N. Takato, K. Jinguji, M. Yasu, H. Toba and M. Kawachi: “Silica-based single-mode waveguides on silicon and their application to guided-wave optical interferometers,” *J. Lightwave Technol.*, **6** (1988) 1003-1010.
- 13) L. Berniner, U. Hempelmann and E. Strake: “Numerical analysis of passive integrated-optical polarization splitters: Comparison of finite-element method and beam-propagation method results,” *J. Opt. Soc. Am. B*, **8** (1991) 422-433.
- 14) R. J. Deri, A. Shahar, E. Cola, R. N. Thurston, W. J. Tomlinson, A. Yi-Yan and M. Seto: “Single-mode semiconductor optical waveguides with large dimensions suitable for compact bend applications,” *Appl. Phys. Lett.*, **57** (1990) 2396-2398.
- 15) H. Asakura, K. Hagiwara, M. Iida and K. Eda: “External cavity semiconductor laser with a Fourier grating and an aspheric lens,” *Appl. Opt.*, **32** (1993) 2031-2038.