位相空間による光導波路モード分布の評価

正員 國分 泰雄[†] 准員 鈴木 扇太[†]
正員 布施 常明^{†*} 正員 伊賀 健一^{††}

Evaluation of Modal Distribution of Optical Branching Waveguide by Phase Space

Yasuo KOKUBUN[†], Member, Senichi SUZUKI[†], Associate Member,
Tsuneaki FUSE^{†*} and Kenichi IGA^{††}, Members

あらまし. 多モード光分岐導波路は光通信システムにおいて重要であるが, 特性評価法が未だ確立されておらず, 特にモード分布依存性についての素子設計および評価に問題があった. 本論文では, 多モード光分岐導波路特性に対する新しい評価方法を提案し, 階段屈折率型と分布屈折率型の2つの分岐導波路について検討した. 最初に, 光線追跡法を用いて多モード分岐導波路の分岐特性を明らかにし, 光強度が等しく分配される分岐条件を得た. 次に, 出射端でのモード分布を評価する新しい手法として, 光線の位置と傾きを表す位相空間表現を導入し, 分岐比に対する最適条件が必ずしもモード分布に対しても最適とはならないことが明らかになった. さらに, 拡散分岐導波路を製作することにより, 実験結果と計算結果の定性的な比較, 検討を行なったので報告する.

1. ま え が き

加入者系や光LANなどの大規模ネットワークシステムにおいて, 多モード用光分岐回路は重要な素子の1つであり, これまで, いろいろな光分岐素子が製作され, 報告されてきた^{(1)~(3)}. 特に, 導波路型回路は再現性, 生産性の点で優れているが, 分岐比のモード分布依存性による不安定性の問題があり, 著者らはその解決法として図1のようなモードスクランブラ付光分岐導波路⁽⁴⁾を提案し, 実現してきた. また, 多モード導波路では, 分岐導波路を縦続接続すると個々の分岐点でのモード分布の偏りにより出射光の分岐比が安定せず, 我々が提案している図2のような網目構造スターカプラ⁽⁵⁾では重大な問題となっている. したがって, 分岐点でのモード分布を評価することが素子設計上重要となる. 本論文では, 多モード分岐導波路特性の新しい評価法を提案し, 階段屈折率型と分布屈折率

図1 モードスクランブラ付光分岐導波路
Fig.1 An optical branching waveguide with integrated mode scrambler.

図2 網目構造スターカプラ
Fig.2 A mesh waveguide optical star coupler.

[†]横浜国立大学工学部電子情報工学科, 横浜市
Faculty of Engineering, Yokohama National University,
Yokohama-shi, 240 Japan
^{††}東京工業大学精密工学研究所, 横浜市
Research Laboratory of Precision Machinery and Electronics,
Tokyo Institute of Technology, Yokohama-shi, 227 Japan
*現在, (株)東芝

型の2つの分岐導波路について検討した。最初に、光線追跡法を用いて多モード分岐導波路の分岐特性を調べ、光強度分配に関する分岐条件を明らかにした。次に、出射端でのモード分布特性を評価する新しい手法として、光線の位置と傾きを表す位相空間表現を導入し、分岐比に対する最適条件が必ずしもモード分布に対して最適とはならないことが明らかになった。さらに、拡散分岐導波路を製作することにより、実験結果と計算結果の定性的な比較、検討を行なったので報告する。

2. 光線の位相空間表現

分岐前後のモード分布を評価するために、出力光線の位置と傾きを位相空間に表現することを提案する。位相空間の横軸に光線の位置、縦軸に光線の傾きをとると、導波路に位置 x_i 、傾き $\dot{x}_i$ をもって入射し、出射時に位置 x 、傾き $\dot{x}$ をもつような光線は、導波路を伝搬しながら位相空間上を図3のように移動する。また、導波路構造により光線の伝搬可能な位相空間上の領域が決定され、伝搬途中でこの領域から出たものは

図3 伝搬光線の位相空間表現
Fig.3 Expression of propagating rays by the phase space.

図4 光導波路内の光線伝搬
Fig.4 Ray propagation in an optical waveguide.

放射光線となる。
図4(a)のような階段屈折率導波路の場合、光線の位置を導波路半幅で、傾きを臨界角で規格化した。

$$\begin{cases} \dot{X}_i = x_i / a & \dot{X}_i = \dot{x}_i / \tan \theta_c \\ X = x / a & \dot{X} = \dot{x} / \tan \theta_c \end{cases} \quad (1)$$

階段屈折率導波路の場合は、光線は全反射の繰り返しにより導波路を伝搬するので、伝搬光線は表1のように正方形の周および内部に存在し、正方形外部は放射光線となる。また、モード数に対応する量は、光線の傾きすなわち $|\dot{X}|$ であるので、X軸に近いほど低次モードとみなせる。さらに、光線は傾きの絶対値が変化せず位置のみが変化するように伝搬する。

分布屈折率導波路の場合は、式(2)のような二乗分布屈折率を仮定した。

$$n^2(x) = n^2(0) [1 - (gx)^2] \quad (2)$$

ただし、 x はコア中心からの距離である。図4(b)のように入射端から距離 z 伝搬した光線の位置 x と傾き $\dot{x}$ は次のようになる。

$$\begin{cases} x = x_i \cos(gz) + (\dot{x}_i / g) \sin(gz) \\ \dot{x} = -g x_i \sin(gz) + \dot{x}_i \cos(gz) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、導波路入射端での光線の位置と傾きをそれぞれ $x_i, \dot{x}_i, x, \dot{x}$ とし、光線の位置は導波路半幅で、傾きは最大角 $\theta_{\max} = \tan^{-1}(ga)$ で規格化する。

$$\begin{cases} \dot{X}_i = x_i / a & \dot{X}_i = \dot{x}_i / \tan \theta_{\max} \\ X = x / a & \dot{X} = \dot{x} / \tan \theta_{\max} \end{cases} \quad (1)'$$

表1 モード分布の位相空間表現			
	Step Index	Distributed Index	
Region of X and $\dot{X}$	$ X \leq 1, \dot{X} \leq 1$	$X^2 + \dot{X}^2 \leq 1$	
Expression of Mode Distribution on Phase Space (Uniform Mode Excitation)
Corresponding Value to Mode Order	$ \dot{X} $	$\sqrt{X^2 + \dot{X}^2}$	
Lower Mode	$ \dot{X} \rightarrow 0$	$\sqrt{X^2 + \dot{X}^2} \rightarrow 0$	
Higher Mode	$ \dot{X} \rightarrow 1$	$\sqrt{X^2 + \dot{X}^2} \rightarrow 1$	
Propagating Condition of Ray
Mode Conversion	Higher Mode ↓ Lower Mode
	Lower Mode ↓ Higher Mode

したがって、式(3)は次のようになる。

$$\begin{cases} \dot{X} = X_i \cos(gz) + \dot{X}_i \sin(gz) \\ \dot{\dot{X}} = -X_i \sin(gz) + \dot{X}_i \cos(gz) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)から、伝搬光線は次のような条件を満たすことがわかる。

$$X^2 + \dot{X}^2 \leq 1 \quad (5)$$

したがって、二乗分布屈折率導波路の場合は、表1のように伝搬光線は単位円の周および内部に存在し、円外部は放射光線となる。さらに、原点からの距離がモード次数に対応するので、原点に近い程低次モードとみなせる。また、光線は位相空間上を時計回りに回転するように伝搬する。

以上のように、光線の位置と傾きを位相空間上に表現することにより、光線の点の分布から直感的にモード分布を評価することができる。

3. 階段屈折率多モード導波路の光線追跡

コア内の屈折率 n_1 が一様であり、また一様な屈折率 n_2 のクラッドでおおわれた階段屈折率導波路に対しては、図5に示すように正方形断面形状の多モード分岐導波路を想定し、入力側のモード分布としては分布屈折率多モードファイバからの光分布を仮定した。導波路内の3次元的光線軌跡のうち分岐特性に関係するのは xz 平面内の光線軌跡であると考えられるので、光線追跡は光線軌跡を xz 平面に射影した2次元モデルで考えることができる。

図6は、階段屈折率導波路内の光線伝搬の様子である。ここで、式(1)のような規格化を行ない、図7に示すようなこぎり波関数を導入すれば、光線の位置と傾

図5 階段屈折率分岐導波路モデル

Fig.5 Model of a step-index branching waveguide.

図6 階段屈折率導波路内の光線表現法

Fig.6 Expression of rays in a step-index waveguide.

図7 のこぎり波関数 $S(X)$

Fig.7 Saw function $S(X)$.

きは、次の関係式で表される。

$$\begin{cases} X = S(X_l) \\ \dot{X} = \dot{X}_l (-1)^{\lfloor |X_l|/2 \rfloor} \end{cases} \quad (6)$$

ただし

$$X_l = X_i + \dot{X}_i (l/a) \tan \theta_c \quad [\] \text{ はガウス記号}$$

また、3次元モデルを2次元モデルとして考えているため、光線に y 方向に関する重みを付ける必要がある。その重み関数 $W(X, \dot{X})$ は、LEDのような一様モード励振の光源を仮定し、

$$W(X, \dot{X}) = \pi \sqrt{1 - X^2 - \dot{X}^2} \quad (7)$$

とした⁽⁶⁾。

そして、式(6)を用いて導波路内の光線追跡を行ない、出力光線については式(7)の重みを考慮した。伝搬角が途中で臨界角を越えるものは放射損失とみなした。

直線混合部をもつ 2×2 分岐導波路について、混合部の長さに対する分岐比と損失を計算した結果が、図8である。分岐比、損失ともに混合部の長さに依存することがわかり、分岐比が1付近で変動が少なく損失も小さいような最適点は、例えば $\theta_B = 4 \text{ deg}$ のとき、 $l/2a = 19.4$ となる。

次に、上記の導波路パラメータの場合について、出力光のモード分布を求めたものが図9である。ここで、位置 X の方向は、右側出射端では上方に、左側は下方にとり、左右出射端に対称になるようにした。ファイバから入射した光線は、最初図9の円内に分布していたものが導波路伝搬中に図のように広がったもの

図8 混合部の長さに対する分岐特性(階段屈折率)
Fig.8 Branching characteristic versus mixing length (Step-index).

図9 位相空間上のモード分布
Fig.9 Mode distribution on the phase space.

図10 位相空間上のモード分布
Fig.10 Mode distribution on the phase space.

図11 モードスクランブラ付光分岐導波路解析モデル
Fig.11 Model of the ray tracing for a branching waveguide with integrated mode scrambler.

と考えられる。図9からわかるように、光線の傾きの分布が不揃いであり、さらに、左右出力に対してモード分布に片寄りがある。すなわち、分岐比についてのみ設計しても、モード分布が等しくなるとは限らないことがわかる。図10は、分岐角を2degと小さくし、かつ、混合部の長さを $l/2a=60.0$ と長くし、モードの均一化をはかった場合のモード分布である。混合部が長くなったことにより、モード分布の均一傾向が見られるが、まだ十分なものとはいえない。

次に、著者らが以前から提案しているモードスクランブラ付光分岐導波路⁽⁴⁾がある場合の位相空間プロットを行なった。計算モデルは、図11のような構造で、屈曲の繰り返しにより、入射時のモード分布の片寄りを減少するものである。分岐比と損失の屈曲回数に対する特性を図12に示す。図13は、分岐比が1に近い屈曲回数8回のときの出力光のモード分布である。図10と比較することにより、モードスクランブラのモード分布均一化作用がわかる。

図12 屈曲回数に対する分岐特性
Fig.12 Branching characteristic versus bend number.

図13 位相空間上のモード分布
Fig.13 Mode distribution on the phase space.

4. 分布屈折率多モード導波路の光線追跡

分布屈折率導波路に対し、図14に示すような2次元の直線混合部をもつ多モード分岐導波路を想定し、式(4)を用いて光線追跡を行ない、式(5)の条件を満たさない光線は放射損失とした。この場合は、2次元モデルであるため、光線に重みを付けていない。

2×2光分岐導波路の分岐比と損失の混合部の長さに対する特性が図15である。ただし、合流部での損失を減少するために、入射光線を低次モード($\sqrt{X_L^2 + \dot{X}_L^2} \leq 1/2$)に制限した。分岐比と損失は、混合部の長さに大きく依存し、分岐比の最適点が導波路の蛇行ピッチ($L_p=31.7$)の半分の周期で現れ、階段屈折率とは異なった特性を示すことがわかる。例えば、分岐角4 deg のとき $l/a=82$ で分岐比の最適値となる。この条件時における出力光のモード分布を図16に示す。モード分布は、左右出力光で大きく異なり、右側出力は低次モード、左側出力は高次モードに片寄っていることがわかる。

以上のことから、特に光線位置が周期的に変化する分布屈折率導波路では、分岐回路を設計するときに、分岐比だけでなくモード分布についても考慮する必要

図14 分布屈折率分岐導波路モデル
Fig.14 Model of a distributed-index branching waveguide.

図15 混合部の長さに対する分岐特性(分布屈折率)
Fig.15 Branching characteristic versus mixing length (Distributed-index).

図16 位相空間上のモード分布
Fig.16 Mode distribution on the phase space.

があることがわかる。

5. モード分布の測定

イオン交換法により拡散分岐導波路を製作し、計算結果との比較を行なった。図17のような出力光の近視野像(NFP)から光線の位置Xに関する分布を、遠視野像(FFP)から光線の傾き $\dot{X}$ に関する分布を調べることができる。図18は、直線混合部をもつ2×2分岐導波路についての結果であり、規格化ミキシング長(l/a)は75.5、 $NA=0.39$ 、導波路幅 $125 \mu m$ である。図18から、左右出力光に対し、光線の位置と傾きの分布がともに同じような形をしていることがわかる。このことは、光線の位置に片寄りがあるという計算結果と異なるが、これは導波路の不完全性によりモード混合が計算よりも著しく促進されたものと考えられる。

図19は、屈曲回数14回、 $NA=0.3$ 、導波路幅が $100 \mu m$ のモードスクランブラ付2×2光分岐導波路⁽⁷⁾ についての結果である。直線混合部のみの結果である図18と比較して、遠視野像の形が大きく異なり、低

図17 出射光の近視野像と遠視野像
Fig.17 Near field pattern and far field pattern of the output light.

図18 拡散分岐導波路のモード分布
Fig.18 Mode distribution of the diffused branching waveguide.

図19 モードスクランブラ付拡散分岐導波路のモード分布
Fig.19 Mode distribution of the diffused branching waveguide with integrated mode scrambler.

次モードから高次モードまで均一に分布していることがわかる。このことは、モードスクランブラによるモード分布一様化を定性的に示すものと考えられる。

しかし、実際の導波路の屈折率分布は、階段屈折率型と二乗分布屈折率型の中間と考えられるので、より実際に近い屈折率分布での計算結果との比較を考えている。

ともかく、導波路の近視野像と遠視野像から位相空間プロットと対応するモード分布を得ることができると考えられる。これと類するものとして、多モード光ファイバにおけるモード電力分布測定に関する報告もあり⁽⁸⁾、現在データ処理の方法を検討している。

6. む す び

本論文では、多モード光分岐導波路の新しい特性評価法として、光線の位置と傾きによる位相空間を用いることを提案し、分岐回路設計時において分岐比だけでなくモード分布についても考慮する必要があることを明らかにした。また、位相空間による評価を実験結

果と定性的に比較した。

この新しい評価法は、平板マイクロレンズ⁽³⁾を用いる微小光学素子についても適用できるものと考えられる。

謝辞 日頃御指導いただく横浜国立大学土岐政弘教授、東京工業大学末松安晴教授に深謝する。また、御討議いただいた日本板硝子(株)山崎哲也氏、奥田栄次氏に感謝する。

文 献

- (1) E. Okuda, I. Tanaka and T. Yamasaki: "Planar gradient-index glass waveguide and its application to a 4-port branching circuit and star coupler", Appl. Opt., 23, pp.1745-1748 (1984).
- (2) 大島, 伊藤, 土沼, 藤井: "ミキサロッド付テーパファイバスターカブラ", 昭59信学光・電波全大, 337.
- (3) M. Oikawa and K. Iga: "Stacked array component with distributed-index planar micro-lens", 4th Topical Meeting on Graded-Index Optical Imaging Systems, Kobe, H2 (1984).
- (4) Y. Kokubun, S. Suzuki, T. Fuse, H. Uehara,

K. Iga, M. Oikawa and S. Misawa: "Novel mode scrambler for reducing mode dependence in multimode optical waveguide", Electron. Lett., 19, pp.1009-1010 (1983).

- (5) Y. Kokubun, S. Suzuki, Y. Iijima and K. Iga: "Mesh waveguide optical star coupler", Electron. Lett., 21, pp.482-484 (1985).
- (6) 國分, 布施, 伊賀: "多モード導波路型光分岐回路の光線追跡(Ⅱ)", 昭59信学光・電波大全, 388.
- (7) 國分, 鈴木, 伊賀: "モードスクランブラ付多モード導波路型光分岐回路(Ⅱ)", 昭59秋季応物, 14p-L-15.
- (8) S. Kawakami and H. Tanji: "Evolution of power distribution in graded-index fibres", Electron. Lett., 19, pp.100-102 (1983).

(昭和60年9月30日受付)

伊賀 健一

昭38東工大・理工・電気卒。昭40同大学院修士課程了。昭43同博士課程了。同年同精密工学研究所勤務。昭48同助教授。昭59同教授。光通信, 半導体レーザ, 光集積回路の研究に従事。最近, 2次元アレー光デバイスを提案, 昭41稲田賞, 昭53著述賞受賞。共著書に「光ファイバ通信入門」など。

國分 泰雄

昭50横浜国大・工・電気卒。昭52東工大大学院修士課程了。昭55同博士課程了。工博。同年同精密工学研究所助手。昭58横浜国大・工・電気工学科助教授。光通信, 光集積回路, 導波路型光回路の研究に従事。59年11月より60年10月AT&Tベル研究所研究員。共著書「Fundamentals of Microoptics」, 「光ファイバ」, 応用物理学会, IEEE, OSA各会員。

鈴木 扇太

昭59横浜国大・工・電気卒。現在, 同大学院修士課程在学中。光分岐導波路に関する研究に従事。

布施 常明

昭58横浜国大・工・電気卒。昭60同大学院修士課程了。在学中, モード依存性のない光分岐導波路の研究に従事。現在, (株)東芝勤務。