

# 極限的空間利用を目指した集積光モードスイッチの研究開発

## Integrated Optical Mode Switch toward Ultimate Space Exploitation



**浜本 貴一 (Kiichi HAMAMOTO, Dr. Sc. Techn.)**  
九州大学 大学院総合理工学研究院 教授  
(Professor, Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University)  
Optica (旧 OSA), IEEE, 電子情報通信学会、応用物理学会  
受賞: MOC Contribution Award 賞 (2019 年)  
著書: Active Multi-Mode-Interferometer Laser Diodes and Semiconductor Optical Amplifiers, Hartung-Gorre Verlag 出版 (2000 年)  
研究専門分野: 光エレクトロニクス

### あらまし

光の空間モードを自由に交換することのできる光モードスイッチの研究開発を行っている。システム実証を進めるため、光モードスイッチと多芯光ファイバとを結合させるための 3 次元導波路技術について検討を進めた。その結果、機械学習を取り入れることにより、自動で光導波路を認識しながら 3 次元導波路を製造することが可能であることを明らかにしたので報告する。

### 1. イントロダクション

Beyond 5G を見据え、情報通信ネットワークを支える光ファイバの伝送容量増大のための研究開発が活発化している。その重要技術である空間多重伝送技術は、飛躍的に伝送容量を増大させる技術として期待され、海底ケーブル網等への実装が進められようとしている。一方で、情報通信量の増大の主要発生個所は、データセンターであることも報告されており、比較的近距離の情報通信網への空間多重技術の適用も検討されるようになってきている。このデータセンターなどを想定し、これまでに空間モードを自由に交換することのできる光モードスイッチを世界に先駆けて提案している [1]。本稿ではあまり馴染みのない方にもご理解頂けるよう、少し技術解説的な説明を 2 章にて議論させて頂く。その後、これまで得られてきた成果、更には今後

の展望などについて議論を進めていく。

### 2. 光の空間モードと光モードスイッチとは？

では、ここで言う“光の空間モード”、そして“光モードスイッチ”とはいったい何なのか？実現できると、何がうれしいのか？まずは、基本概念の話を進めさせて頂く。

#### (1) 光の空間モードとは何なのか

情報通信の観点から光で使える資源として見ると、1) 振幅、2) 波長、3) 位相、4) 偏波、が挙げられる。例えば光の波長であれば、異なる波長それぞれに対して異なる信号を乗せたいうで束ね（合波）、一本の光ファイバを通して送ることで、通信容量（一度にどれだけの情報量を送受信できるか、という目安に相当する）を増大させることができる。受信側では波長ごとに光を分解（分波）できるため、あたかも複数のファイバで信号を送ったかのように多くの情報量を受信することが可能になるわけである。光通信技術は、この例に示されるように光の資源を活用し、可能な限り多くの情報量を送るよう研究開発が進められてきた。そして、光の最後の資源と言われるのが“空間”である。更に空間の多重化技術として大別すると 1) 多芯コアによる空間多重化、2) 空間モードによる空間多重化、の 2 種類がある。多芯コアによる多重化とは、ファイバ 1 本内に従来はコアが 1 本だったところを複数本のコアにより多重化する技術で、光ファイバ製造技術の高度化が特に重要である。そして、本稿で説明する研究に深くかかわるのが、空間モードの多重化技術である。一般に光の”形”のイメージと言えば、中心が明るく、脇に向かって暗くなっていく、というイメージではないかと思われる。この光の”形”、すなわち“空間モード”のことは基本（もしくは 0 次）モードと呼ばれる（図 1(a)参照）。これまで広く実用化されてきた光通信システムにはこの基本モードを使うことで発展してきている。しかし理論的には、空間モードには基本モード以外のモードも存在することが分かっている。例えば中心が暗く、その両脇が明るい、というモードは 1 次モード（図 1(b)参照）と呼ばれ、理論的には定在波として存在し得る。光の波長（注：可視光域では色に相当する）が同一であっても、モードが違えばそ

# 極限的空間利用を目指した集積光モードスイッチの研究開発

## Integrated Optical Mode Switch toward Ultimate Space Exploitation

それぞれの光を区別できるため、通信信号を多重化することができる。結果として、通信容量増大につながる、ということから、光の最後の資源として昨今研究開発が活発化している。

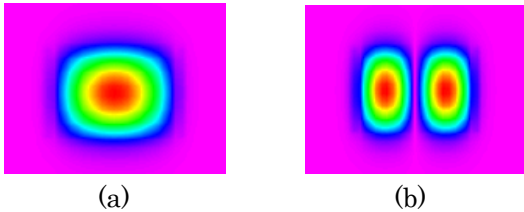


図 1. 光の空間モード  
(a) 基本 (0 次) モード、(b) 1 次モード

### (2) 光モードスイッチとは何か

前述の光の空間モードは理論上の話であって、基本モード以外の空間モードを作り出すことはそう簡単とは言えない。現時点では、光の空間モードを自由を作り出す光デバイス技術としては発展途上の段階にあると考えている。なお、これまでに発表されている空間モード多重伝送システム実証は、パッシブデバイスを用いて異なる空間モードを作り出したものを多重化した発表が殆どである。

瞬間的に、かつ自由に、所望の空間モードへの“入れ替え”が可能にならないのか？この機能を具体化したものが光モードスイッチである[1]。なお我々が提案している光モードスイッチは、“スイッチ”と呼んでおり、モード変換器とは少し異なる。あるモードを、所望の別のモードに“変換”するだけの機能に加え、同時に複数のモードがデバイスに入った際に、それぞれのモードを入れ替えることが可能なデバイスで、モードを“交換”する機能を持っている。このことを図 2 の模式図で説明する。例えば、単に一つのモードを別のモードに変換するモード変換機能だけのデバイスを伝送路に入れてしまうと (図 2(b))、既に変換後のモードと同じモードで伝送している信号があれば干渉してしまい、いずれの情報も受信が不可能になる。一方で、モードを入れ替える“交換”機能のあるデバイスを伝送路に入れる場合 (図 2(a))、前述の干渉は起きず、送信情報は保全される。

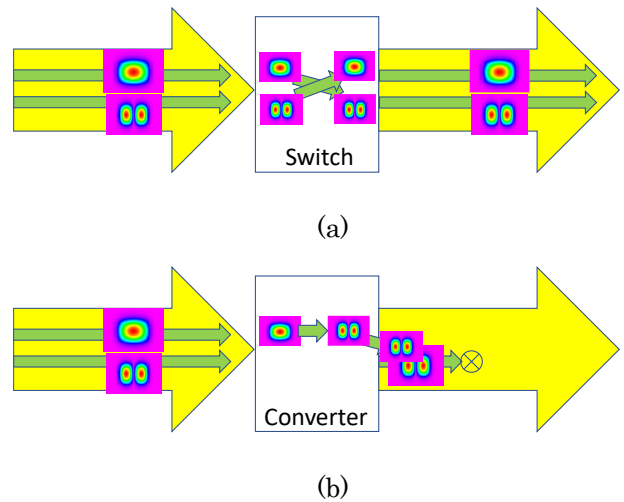


図 2. 交換と変換の違い (伝送路途上に挿入した場合)  
(a) 交換、(b) 変換

### (3) 光モードスイッチのメリット

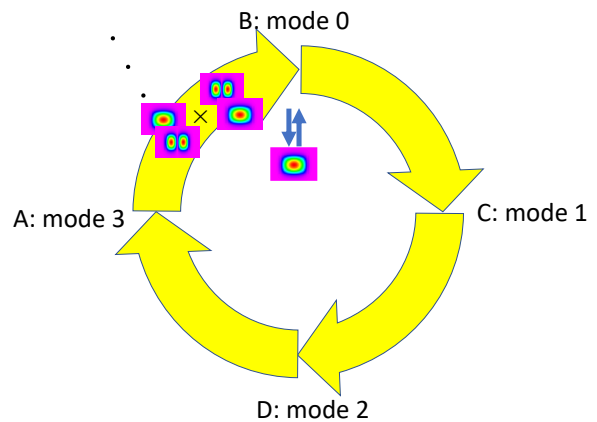


図 3. リングネットワークとモードアド・ドロップ

では、“交換”ができると何がうれしいのか？ここで情報ネットワーク構成として、リングネットワークを考える (図 3 参照)。ある信号が A から B に向かう途中までは、基本モード (0 次モード) で進んでいるケースを考える。リングネットワークでは、ある地点で所望の信号を落としたり (ドロップ)、追加したり (アド)、という情報信号のやりとりがある。そして B 地点には、モード番号 0 が割り当てられていて、0 次モードの信号であればドロップができる場合を考える。さて、B 地

# 極限的空間利用を目指した集積光モードスイッチの研究開発

## Integrated Optical Mode Switch toward Ultimate Space Exploitation

点のユーザが所望する情報が1次モードで近くまでいて、また他の情報も並行して0次モードで伝送されていたとする。この時このままでは、B地点のユーザが所望した信号とは別の信号をドロップしてしまうことになるので、例えば0次モード0の情報信号と1次モードの情報信号の“モード”だけを同時に入れ替えれば、つまり”交換”すれば、B地点で所望の情報信号を受け取ることができることになる。もしモードを“交換”することなく運用しようとする、伝送モードを固定的に運用せざるを得なくなり、ある地点間では使われていないモードがあっても、一定時間の間は使えないなどの硬直的なネットワーク運用を強いられることになり、ネットワーク資源の効率的な運用ができなくなる。言い換えれば、より多くの情報を限られたネットワーク資源で送受信するためには、フレキシブルに運用することが重要で、そのためには、“交換”という機能が大事だ、ということになる。

### (4) どんな原理を使うのか？

基本的には位相変化を与えることで光の空間モードを交換することが可能になる。ここでは最も基本的な2モード光スイッチの原理を説明する。入射ポートから入射された0次モード光をまず2つの光に分岐する。2つに分けられた光はそれぞれ別の平行した伝搬経路を伝搬する構成としたうえで、片方には位相を $\pi$ シフトさせる。具体的には片方の経路の材料屈折率を変化(減少)させ、位相を $\pi$ だけ進ませる。その後再び合波させると、1次モード光に変換される。同じ動作条件で、基本モード光ではなく1次モード光を入射した場合は0次モード光に変換される。つまり、0次モードと1次モードとが交換される。

前記の屈折率変化は、半導体コア層(Si)中に電流を流すことで得ることができる(キャリア・プラズマ効果)。電流を流せるように、*pn*もしくは*pin*構造(\*1)を形成する。電流注入以外の屈折率変化機構もあり、ヒーターを導波路上に形成し、熱光学効果により屈折率を変化させる手法であっても良い。

### 3. 研究開発状況

以上説明してきた光モードスイッチについては、世界初の基本実証にこれまで成功してきており[2, 3]、数

10 ns レベルでのモード切替も確認してきている。将来この光モードスイッチを実用化させるためには、以下の課題を解決していく必要がある。

#### (1) システム実証

#### (2) 更なる高次モード展開

特にデバイスは、基本動作を確認しただけでは、その有用性までを広く理解して頂き、普及発展するところにまではなかなか至らない。“分かりやすく”デバイスの有用性をアピールするためにも、デバイスをモジュール化したうえで、システム実証することが重要である。そのためには、実現した光モードスイッチと、伝送路となる光ファイバ(特にここでは多芯ファイバ: MCF (multi-core fiber))との接続技術確立が課題である。なお、通常の光ファイバは基本モードしか伝送できない。伝送中のモード間クロストーク抑制を視野に入れ、モード保持も期待される MCF の利用が最も有望と考えている。その接続技術の有力候補として、モスキート法[4](\*)による複数3次元導波路製作技術の検討をこれまでに進めてきた。CNC (computer numerical control) 機器 (\*3) をベースに改造した導波路形成装置を開発し、導波路コアを形成するシリンジ移動ステージを動作させて3次元導波路を複数本形成した。ステージ移動機構はステッピングモータとボールスクリューから構成され、1  $\mu\text{m}$  以下の分解能で機械的な位置制御が可能な構成とした。機械的な機構改良の検討を重ねた結果、コア形成位置は現時点では横方向で10  $\mu\text{m}$  程度、垂直方向で40  $\mu\text{m}$  程度以内のずれ量であることをこれまでに確認している[5]。しかしながら、まだ必要とする制御範囲(1  $\mu\text{m}$  程度以内のずれ量)には達していない。そこで、複数本の導波路を描画する際に機械的移動量(ステッピングモータ回転数)にのみ頼っていたこともずれ量が大きくなる原因の一つと考え、ハードウェアだけではなく、ソフトウェア的な検討も並行して進めることとした。具体的には、3次元導波路結合の対象となるデバイスの光導波路幅を瞬時に評価できるかどうか機械学習による画像診断の検討を行った。その結果、実際に試作した光導波路とほぼ同じ値として評価されることを確認した。更には、機械学習による画像認識を用いて、同一画像内の複数の光導波路を迅速に認識できるかどうかについても検

# 極限的空間利用を目指した集積光モードスイッチの研究開発

## Integrated Optical Mode Switch toward Ultimate Space Exploitation

討を進め、通常のデスクトップ PC レベルの CPU であっても 15 ms 以内の認識が可能であることを明らかにした[6]。

### 4. 将来展望

光モードスイッチ基本動作の発表以降、世界各所から光モードスイッチング及びその関連発表が続いており、本稿に示した通信ネットワークへの適用以外の応用用途として、機器内光配線を意識したと思われる発表なども相次いでいる。なお紙面の都合により“更なる高次モード展開” [7]に関する検討詳細には触れなかった。モード多重数を飛躍的に向上させるデバイス技術はまだ未成熟である。比較的規則性に優れる空間 1 次元モード (\*4) がモード基底 (\*5) としても提案されるようになっており [8]、更なる高次モード展開に関するデバイス研究としても、今後一層の飛躍が期待される。

### おわりに

光モードスイッチのシステム実証に向けて、そのモジュール化技術、特に MCF との結合のための 3 次元導波路形成技術の検討を進めてきた。今後更に製作導波路の位置精度向上を目指すと共に、画像認識を用いた接続位置認識などによりモジュールを実現し、システム実証へと進めていきたい。

### 用語解説

- \*1 半導体に電気を流すための電氣的構造。p 型半導体と n 型半導体とを接続させたものが pn 構造、その間に真性半導体を挟んだものが pin 構造。
- \*2 慶応大学石榑教授らによって提案された 3 次元導波路製造方法。コア、クラッド共にモノマー材料を用い、紫外光照射硬化により導波路を形成する。
- \*3 コンピュータ制御により自動化された工作機械。代表例として、CNC フライス、CNC 旋盤、3 次元プリンタなどがある。
- \*4 空間モードの高次化の方向 (展開方向) が、空間的に 1 次元方向に限定されたモード基底のこと。1 次元方向に展開されていることに起因し、各モード間の伝搬定数差に規則性が生じるため、光学デバイス

設計が用意となること、モードクロストークが生じにくくなる可能性があること、等の特徴がある。

- \*5 空間モードの高次モード展開を定義する、いわば空間モードの分類に相当。現在、LP (linearly polarized) モードによるモード多重伝送が最も多く研究されている。LP モードは 2 次元空間モードであり、その伝搬定数差に規則性を見出すことは難しく、高次展開を進めていく際、光デバイス設計には課題を有している。また厳密には縮退モードを含んでおり、伝送路におけるモードクロストークが不可避であることが報告されている。

### 参考文献

- [1] R. Takakura, et. al., JJAP, **53**, 08MB10, 2014
- [2] R. Imansyah, et. al., Tech. Dig. MOC, D3, 2015
- [3] R. Imansyah, et. al., JJAP, **55**, 08RB06, 2016
- [4] K. Soma et. al., JSTQE, 3611310, 2013
- [5] 松原他、信学会総合大会、B-10-41、2021
- [6] S. Matsubara, et. al., Tech. Dig. MOC, PD-2, 2021
- [7] J. Zhang, Tech. Dig. OECC, VP101, 2020
- [8] 浜本 貴一、信学論文, J100-C, 72, 2017

この研究は、平成 29 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、平成 30 年度～令和 2 年度に実施されたものです。