

称号及び氏名 博士（工学） 阪本 隼志

学位授与の日付 平成 31 年 3 月 31 日

論文名 「伝搬モードを用いた光導波路デバイスの高度化  
に関する研究」

論文審査委員 主査 平井 義彦

副査 川田 博昭

副査 岡本 晃一

## 論文要旨

1970 年の半導体レーザの室温連続発振の成功を契機に、光エレクトロニクス技術は、光通信、光情報処理、光センシング、映像ディスプレイなどの非常に広い分野に渡って利用されている。中でも光通信は、半導体レーザの発展と相まって  $20\text{dB/km}$  の低損失な光ファイバが実現されるなど、様々な光エレクトロニクス技術を集め飛躍的に発展し、現在では、FTTH (Fiber To The Home) や、波長あたり  $400\text{Gbps}$  を超える大容量光伝送システムが実現されるに至っている。

光通信では、強度、波長、位相、偏波などの光の自由度を使った、多重化や高次の変復調が行われてきた。光導波路構造を伝搬する光の伝搬においては、電磁界分布が離散化された状態＝モードが実現される。光通信ではこれまで伝搬モードが基底モードのみのシングルモード伝送が主に用いられてきたが、複数のモード（マルチモード）を励振できる光ファイバを用いて、各モードに情報を載せて多重化を行う大容量伝送が報告され始めている。これは空間的な電磁界分布の自由度を用い多重化しているため空間多重伝送と呼ばれ、光通信の伝送容量拡大だけでなく、信号処理やセンシングにおいて、次世代技術としても期待されている。光通信では安定した特性が必要とされるため、多くの場合、光導波路構造をもとにした単一モードに対して有効な、光源、変復調器、合分波器により構成されている。このため、モード多重を使いこなすには、0 次モードと高次モードを変換するモード変換器が重要となる。モード変換器は、ファイバ型、LCOS (Liquid Crystal on Silicon) などを用いた空間フィルタ型、光導波路型などが存在する。とりわけ、石英系光導波路 (PLC: Planar Lightwave Circuit) を用いた PLC 型モード変換器は、すでに光通信システムに用いられていることからわかるように、信頼性や光学特性、機能集積化の観点で有望な技術の一つであると考え

られる。しかしながら、従来の光導波路技術は主に単一モード伝搬をベースとして構築されてきたため光導波路型モード変換器に関する理論的考察は多くはなく、様々な光回路を実現するためにはさらなる考察が必要となるものと思われる。また、デバイスを作製する観点からも、従来のシングルモード光導波路デバイスに比べて、高アスペクト比で高精度な構造を実現することが求められる。さらに、マルチモードは、複数のモードが混ざった状態であるが、一般的に各モードを完全に分離して評価するためには、光強度ではなく電磁界の複素振幅そのものの評価が必要となるため、評価技術自体を新たに生み出す必要がある。以上のとおり、通信をはじめとして、従来使われてなかった光の自由度を使うという観点でマルチモードに対する期待は大きい。その反面、マルチモードを扱うための理論的位置づけや有効な光導波路デバイス技術は十分とは言えず、いまのところ使用されるモード数や応用例はまだ多くはなく、その可能性を十分に引き出せていないのではないかとと思われる。本論文では、光導波路を用いたモード変換器の基本特性を解析的、実験的に明らかにし、マルチモードを用いた光導波路デバイスの高度化や新たな応用先の発掘を目的とする。

本論文は、全7章から構成されており、以下に各章の概要を述べる。

第1章では、本研究の背景、目的及び内容について概略を示し、本論文の構成について述べた。

第2章では、モード変換器について検討が不足している、波長特性やモード変換特性などの基本特性の理論的考察を行った。光導波路を用いたモード変換器の代表例である、モードカップラとマルチモード干渉計について、波長特性やモード変換特性と光導波路構造パラメータとの関係を解析的に導出し、その基本特性を明らかにした。導出した解析式の有効性を示す為に、マルチモード干渉計の光導波路幅により波長特性を制御し、波長依存性が小さくなる極値条件を用いた広帯域カップラを設計した。例として設計した青と緑の光を合波するカップラは、緑が広帯域化するよう光導波路幅を設定し、損失1dBとなる帯域が505-645nmと赤を含む波長域まで合波可能であることを示した。

第3章では、モードカップラによる波長選択性を利用した、波長合分波光回路の小型化について論じた。モードカップラを用いた波長合分波光回路の新たな適用先として、RGBカップラと5色カップラを選定し、波長合分波光回路の基本構造を考案した。考案した基本構造を適用して各カップラを設計し、数値解析により妥当性を検証した。その結果、従来のRGBカップラの半分以下の長さが実現可能なことを確認した。実際に、石英系PLCを用いて新たに考案したRGBカップラを試作し、それぞれの波長スペクトルを評価した。作製したRGBカップラは、R、G、B各波長に対して-1.5dB以上の高い透過率が得られた。さらに、5色カップラについては、新たにPLCを用いて実現し、全ての波長に対して-2.0dB以上の高い透過率が得られ、モードカップラを用いた波長合分波光回路の小型化が有効であることを示した。

第4章では、モードカップラによる強度カップラを用いて、同一波長複数光源による高出力化に対応したカップラの検討結果について論じた。適用先として、映像デバイス向けのRRGGBカップラを想定し、RとGの2光源をモード多重により強度合波する手法を考案した。カップラより出射されるモード多重されたビーム形状について論じ、遇モード同士の合波とすることで、映像デバイス向けの良質な点光源(RRGGB光源)が得られることを示した。最後にPLCを用いて、設計したカップラを作製し、従来のシングルモードでは合波不可能であった同一波長の光を90%以上合波する強度カップラを実現し、本手法が多光源を用いた高出力化に有効であることを示した。

第5章では、マルチモード光回路のモードクロストークを低減する手法について論じた。従来のダイレクトに所望のモードに変換する直接遷移型のモードカップラではなく、中間のモードを経て所望のモードに2段階で変換する間接遷移型のモードカップラを新たに提案し、数値解析でモードクロストークが従来比約-20dBとなることを示した。続いて、PLCを用いて、設計した低モードクロストークカップラを作製し、特性を評価した。評価時のファイバの軸ずれにより、本来のカップラのモードクロストーク特性よりも低い値となったものの、損失-0.8dB、

モードクロストーク-30dB 以下の低損失で低モードクロストークなカプラが得られ、本手法の有効性を示した。

第 6 章では、低コスト化に向けた簡易な光導波路作製技術として、ポリマー光導波路のモード変換器への適用検討を行った。検討方法としては、典型的なモード変換器を用いる RGB カプラへの適用検討を行った。まず、RGB 波長域において、シングルモード動作するポリマー光導波路の構造を設計し、2 種類の材料に対して、フォトリソグラフィまたはナノインプリント法を用いて埋め込み型のポリマー光導波路を作製した。続いて、出射ビーム形状を測定し、青から赤の波長域でシングルモード動作していることを確認した。伝搬損失は青、緑、赤の波長に対してそれぞれ、4.4, 2.0, 0.8dB/cm で、方向性結合器としての動作を確認した。ポリマー光導波路を用いて青から赤の波長域でシングルモード動作するカプラを新たに作製し、RGB カプラとして、ポリマー光導波路の適用可能性を見出した。

第 7 章では、本研究で得られた研究成果を総括した。

本研究で得られた結果は、伝搬モードを用いて、小型化、高出力化、低モードクロストーク化を実現しており、光導波路デバイスの高度化を実現する上で、新たな知見を与えるものである。さらに、光通信分野に限らず、映像分野、光分析分野、光センシング分野などの課題に対して、伝搬モードを活用した光導波路デバイスによる解決手法を実証しており、光導波路デバイスの新たな応用について可能性を広げるものであり、光エレクトロニクス分野の発展に寄与すると考える。

## 審査結果の要旨

本論文は、光導波路デバイスの高度化に関するもので、光導波路型モード変換器の基本特性の理論的解析、モード変換器を用いた光導波路デバイスの広帯域化、小型化、低クロストーク化、および新規応用先の創出に関する研究を行った。以下に得られた成果を示す。

1)モード変換器の基本特性を解析的に導出した。光導波路型モード変換器の代表例である、モードカプラとマルチモード干渉計について、波長特性やモード変換特性と導波路構造の関係を解析的に導出することにより、導波路幅により波長の透過特性を制御し、超広帯域なカプラが実現可能であることを明らかにした。

2)モードカプラを用いて、映像デバイス向け三原色 RGB 合波器である超小型 RGB カプラを実現した。高次モードを利用した異波長合波により、カプラ長を従来の半分以下に小型化し、さらにモードの多重化により同一波長合波も実現した。

3)光センシング用にモードクロストークを抑制したモードカプラを実現した。モード間のクロストークを低減するために、中間モードを介して所望のモードに間接的に変換する新規なモードカプラを考案した。試作したモードカプラの評価を行い、モード変換効率-0.8dB、モードクロストーク-30dB 以下の優れた特性を有することを実証した。

4)低コスト化に向けた簡易な光導波路作製技術として、ポリマー導波路のモード変換器への適用を検討した。典型的なモード変換器を用いる RGB カプラへの適用検討を行い、RGB 波長において、シングルモード動作可能であることを確認し、RGB カプラへ適用可能であることを明らかにした。

以上の成果は、伝搬モードを用いて、光導波路デバイスの広帯域化、小型化、同一波長合波、低モードクロストーク化といった高度化を実現するとともに、映像分野、光センシング分野など光通信以外への応用も検証したものであり、光エレクトロニクス分野の発展に学術的・産業的に大きく

貢献するものと認められる。

また、申請者が自立した研究活動を行うことに必要な能力と学識を有することを証したものである。