

# モード分割多重伝送のためのPLC型モード制御デバイス



北海道大学  
大学院情報科学研究院  
准教授

さとう たかのり  
佐藤 孝憲

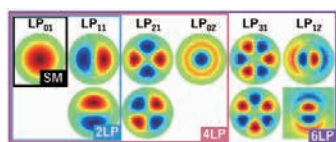


北海道大学  
大学院情報科学研究院  
教授

さいとう くにまさ  
齊藤 晋聖

## 1. モード分割多重伝送

空間分割多重 (SDM) 光伝送における要素技術の1つに、複数の定在状態 (モード) を用いて光信号の多重化を行う「モード分割多重 (MDM)」技術がある。ファイバ中の伝搬路 (コア) が円対称な光ファイバでは、図1に示す直線偏光 (LP) モードが存在し、伝搬可能なモード数が少数となるよう設計したファイバが数モードファイバ (FMF) である (LP<sub>ml</sub> モードの添え字は、周 (m) 及び径方向 (l) の次数で、m>0 では位相のずれた2モードが縮退し、LP<sub>11a</sub>、LP<sub>11b</sub>モードのように呼び分ける)。単一モード (SM) が伝搬するコアを複数配置して空間多重度を上げるマルチコアファイバ (MCF) と比べると、FMFのほうがより高い空間多重度を実現できるものの、モード間の伝送特性差が大きく、MIMO信号処理を見据えた伝送システムにおいては信号復元精度の劣化を招き、最大伝送距離の制限要因となることから、長距離伝送においてはモード数の拡張が困難である。そこで、図2に示すような長距離伝送システムの中継器において、光増幅だけでなくモード交換やモード損失差の低減を行うことで、モード間伝送特性差を均質化することが有効である。本稿では、このようなモード制御を行う石英系平面光波回路 (PLC) を用いたデバイスについて紹介する。



■ 図1. ファイバ中を伝搬するLPモードの電界分布

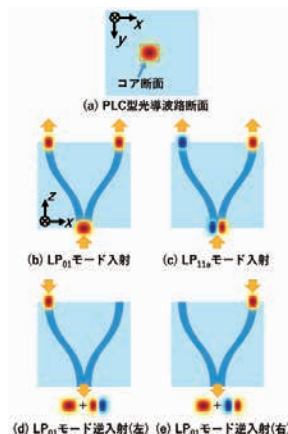


■ 図2. FMFを用いた長距離伝送システムの構成例

## 2. PLC型モード合分波器

半導体レーザからの光波でFMFの各モードを励振するには、モード合波器 (MUX) が必要となる。光の相反性により、モードMUXは特別な場合を除いて逆方向入射によりモード分波器 (DeMUX) としても機能する。PLC型のモード合分波器は集積度が高く、かつ、後述のような柔軟なモード制御が可能である。

図3 (a) に、石英系PLC型光導波路の断面図を示す。コアとその周囲は光ファイバと同じくガラスから成り、屈折率の高いコア部を全反射しながら光波が進む。光ファイバと同じ材料であり、低損失に相互接続可能である。図3 (b) のようなY字状のコア (以下、Y字導波路) を形成すれば、光等分岐素子として動作させることができる (厳密性は欠くが、ここではファイバモードの呼称に合わせて説明する)。また、図3 (b) のLP<sub>01</sub>モードだけでなく、図3 (c) のように高次のLP<sub>11a</sub>モードも等分岐し、これらの出射位相は入射モードの対称性に対応している。光の線形性と相反性より、図3 (b) と図3 (c) の足し合わせの状態並びに逆伝搬状態も成立する。すなわち、図3 (d)、(e) のように、上の枝導波路の片側にLP<sub>01</sub>モードを入射した場合、下側の幹導波路ではLP<sub>01</sub>/

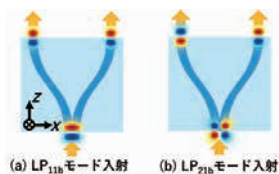


■ 図3. PLC型Y字導波路における光伝搬

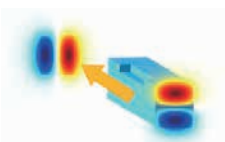


LP<sub>11a</sub>モードが励振されることを意味している。このように、Y字導波路は1種のモード合分波器として機能する。

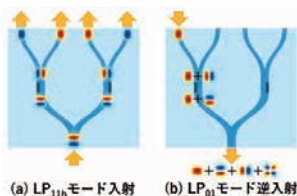
さらに次数の高いモードでもこのような等分岐動作を行えるが、PLCの性質上（単一層の加工をする限りにおいて） $x$ 方向にしか分岐できないため、 $y$ 方向の次数は不変である。具体的には図4のように、LP<sub>11b</sub>/LP<sub>21b</sub>モードに対しては、枝導波路側でLP<sub>11b</sub>モードとして出射する。しかし、モード合分波動作としては、最終的にLP<sub>01</sub>モードの出力とする必要がある。そこで、図5のようなL型導波路を用いたモード回転子（LP<sub>11a</sub>/LP<sub>11b</sub>モード交換器）が有用である。これをY字導波路の前後に配置することで、 $y$ 方向の次数を落とすことができるため、原理的には任意の次数のモードを入射した場合においても、Y字導波路とモード回転子を組み合わせることで、LP<sub>01</sub>モードの出力を得ることができる。図6 (a)、(b) は、より高次のモードに対応させた構成の一例であり、図6 (a) のようにLP<sub>11b</sub>モードを入射した場合でもLP<sub>01</sub>モードとして出射され、逆側から入射した場合はLP<sub>01</sub>/LP<sub>11a</sub>/LP<sub>11b</sub>/LP<sub>21b</sub>モードの重ね合わせとして出射される。



■ 図4. PLC型Y字導波路における高次モードの光伝搬



■ 図5. L型導波路を用いたモード回転子



■ 図6. 4モード合分波器の構成例

### 3. PLC型モード制御デバイス

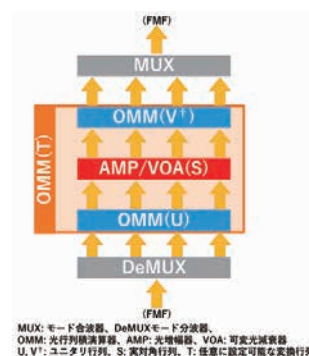
図6の4モード合分波器は、図2の中継器におけるモードMUX/DeMUXとして利用可能な具体的なデバイスの一例であるが、モードMUXで分波されたLP<sub>01</sub>モードをそれぞれ増幅するだけでは、中継器前後のFMF中で生じたモード

間遅延差や損失差を補償することができない。そこで、最近検討されているのが光モード振幅に対する行列積演算回路（OMM: Optical matrix multiplexer）である。図7は、4つの入力光振幅に対して任意のユニタリ行列 $U$ を乗算した出力を得ることが可能なOMMの基本構成を示している。図中では省略しているが、Y字導波路の他に位相制御素子・分岐比制御素子が含まれており、これらを制御することで、任意のユニタリ変換を行うことができる。図8のように、図7のOMMを2つと、その間に光増幅器・減衰器を挟めば、伝達行列表現としては $T=USV^+$ となる。これは、特異値分解の行列表現であり、任意の行列による光振幅変換が可能であることを意味している。伝達行列 $T$ を適切に設定することで、モード交換や利得/損失差の制御も任意に可能となり、前後段のFMFリンクに応じたモード間伝送特性差の補償が可能となる。ただし、この構成では単純な線形変換が施されるだけであり、中継器単体で遅延の補償までには至らない。モード間遅延差の補償には、複数回にわたる中継器でのモード交換によりモード遅延差を平均化することが有効である。

このほか、既に6モード合分波器などが既に報告されているが、今後、更なるモード数拡大に向けたモード合分波器及びモード制御デバイスの検討に向けて注力していきたい。



■ 図7. 4×4光ユニタリ変換器の構成例



■ 図8. 中継器における任意モード制御デバイスの構成例