

導波路オプティクス： 古典的ファイバオプティクスを超える

ジェフ・ヘクト

新世代技術に集積光回路を組み入れるには、われわれの光についての見方を拡大する必要がある。光は、伝送し、操作する幅広い範囲のオプティクスにつながるのである。

導波路オプティクスは、溶融ガラスの表面張力によって円形断面に線引きされる古典的な固体ガラス光ファイバとは、著しい差がある。導波路オプティクスに含まれるのは、ダイオードレーザの活性層の平面導波路、光を伝送し、カプラ、リング共振器、雌雄積光チップの他のコンポーネントとして機能する多くの種類の平面導波路などである。導波路オプティクスは、ノーベル賞受賞のレーザ周波数コムをフォトニックチップに集積することさえ可能である。

導波路オプティクスのルーツは、ジェームズ・クラーク・マクスウェル (James Clerk Maxwell) の電磁放射理論にさかのぼる。レイリー卿 (Lord Rayleigh) が、1897年に、中空金属シリンダの数学的導波理論を初めて開発し、その後、非導電性誘電体導波路の研究が行われた。その理論は電磁波一般用に開発され、電波でテストされ、光ファイバの全反射、平面導波路の導光を説明することも示されている。

モーダル効果

導波路理論は、モードパターンを含め、光と他の電磁波の伝搬を説明している。センチメートルスケールの長方形金属導波路は、ほぼ同サイズのマイクロ波信号でよく機能する。伝搬モードは、20世紀半ばまでは重要にならなかった。その時点で、電波の周波数が数

十GHzとなり、多くの波が導波路内部に収まるようになったのである。1950年代、電話トラフィックを伝送するための5cm「ミリ波導波路」の設計者は、この長尺埋込導波路で60GHz(0.5mm)を伝送しようとしたとき、マルチモード伝送がどの程度の問題を起こすかを理解していなかった。

モーダル効果がファイバオプティクスに現れたのは、1950年代に全反射ベースのファイバオプティクスが開発された数年後である。ファイバコアを

マイクロメートルに縮小することで医療アプリケーションで分解能を改善しようとしていた開発者は、ファイバに奇妙なパターンを見つけて驚いた。米アメリカンオプティカル社 (American Optical) のエリアス・シュニッツァー氏 (Elias Snitzer) は、そのパターンがシングルモード伝送であると認識した。ミリ波導波路に取り組んでいたチャールズ・カオ氏 (Charles Kao) は、光ファイバのシングルモード伝送がミリメートル導波路のマルチモード伝送問題

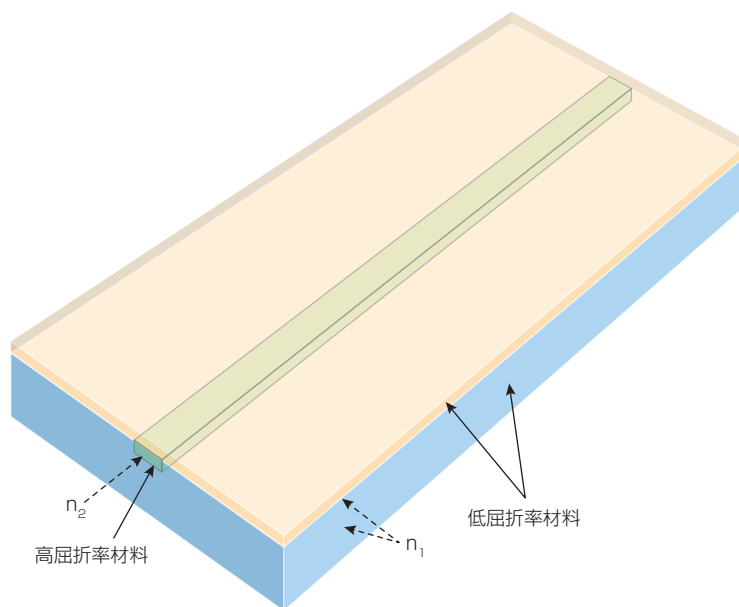


図1 クラッドとして機能する低屈折率材料ブロックに埋めこんだ高屈折率材料の単一平面導波路。その導波路は、低屈折率の材料への堆積でもよいが、両サイドと上方で空気がクラッドとして機能する、あるいは平面層に埋めこみ、空気を上方クラッドとすることもあり得る。ほとんどのアプリケーションで、導波路は薄くて狭い。

を回避することを示唆した。ただし、シングルモードファイバは、1980年代までは広く普及していなかった。

導波理論は、全反射がすべてでないことも明らかにした。そうではなく、エバネッセント波が高屈折率コアから低屈折率クラッドまで広がり、指数関数的に強度が低下する。モードのように、サイズが波長オーダーの場合、これは重要な意味を持つ。

平面導波路と集積オプティクス

1969年、ベル研のステュワート・E・ミラー氏 (Stewart E. Miller) がモノリシック「集積オプティクス」開発を提案した。これは、低屈折率クラッドに埋めこんだ $2\mu\text{m}$ のシンプルな高屈折率平面ガラス導波路で光を伝搬する(図1)。計算から分かったことは、2つの近接した平行導波路間にエバネッセント波がリークすること、それらの間で光学的に結合した光であるということである。他の初期の考えに含まれていたのは、シリカまたは空気で囲まれたシリコン導波路の作製、リチウムナイオベート導波路にチタンを拡散することで変調器を作製することだった。

平面導波路は、間もなくダイオードレーザに用途を見出した。その長方形横断面は、ダブルヘテロ構造で用いられるフォトリソグラフィや半導体製造技術に適合する。そこでは、高屈折率活性層が、2つの低屈折率層で挟まれている。ダイオードレーザで用いられ普及しているストライプ形状は、平面導波路である。厚さはマイクロメートル以下、わずかに数マイクロメートル幅である。

集積フォトニクスの進歩は全体として、著しく遅かった。光領域のフォトンは、電子よりも大きく、物質を介したそれらの相互作用は一般に、電子の

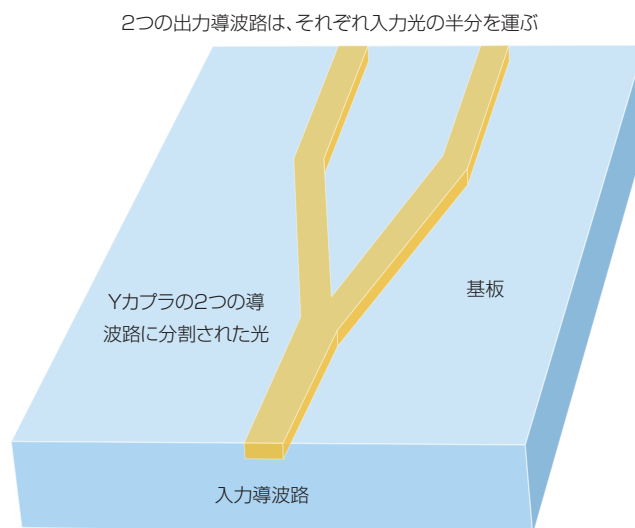


図2 平面導波路を対称的に分割することで、Yカブラで光を等しく分けられる。

場合よりも弱いので、集積光コンポーネントはトランジスタを小さくする傾向にある。しかし、そうした制約を克服すると大きな進歩が訪れた。

集積フォトニクス用の材料

シリコンは集積フォトニクス向けの主要材料である。なぜなら巨大な産業基盤があり、フォトニクスにとって極めて重要な電子コンポーネントを供給できるからである。シリコンは、 $11000 \sim 3500\text{nm}$ まで透明であり、 1310nm と 1550nm ウィンドウに広がる。その範囲でシリコンの高い屈折率、約3.5により、小さなコンポーネントで強い曲がり度で光を導波する。その最大の欠点は、間接バンドギャップである。このため、シリコンは効率的に光を生成できないのでレーザ向けではない。実用的には、発光III-V半導体が、通常はInP基板であるが、これらがシリコン基板にフリップチップボンディングされ、シリコンは集積光ハイブリッドになる。

集積フォトニクスは、InPベースも可能である。これは $1000 \sim 2500\text{nm}$ で透明であり、重要なファイバウイン

ドゥをカバーする。InPは直接バンドギャップであり、またIII-V半導体は、その上に成長させてレーザ、ディテクタ、その他のコンポーネントを作ることができる。InPは、高性能送信機や受信機に商用利用されているが、産業基盤はシリコンと比べると著しく小さく、コストは高くなる。

二酸化ケイ素(SiO_2)と一部の他のガラスも魅力的である。 $300 \sim 2500\text{nm}$ で透明であり、導波路におけるその減衰は、ほとんどの他の導波路材料の dB/cm よりも著しく低い。しかし、 SiO_2 の屈折率は1.45であるので、シリコンや他の高屈折率半導体のように光を強く閉じ込めることができない。また、レーザ、変調器、あるいはディテクタの作製にも使えない。

窒化シリコン(Si_3N_4)は、比較的新しいが、 $400 \sim 2350\text{nm}$ の範囲で透明であり、その範囲で屈折率は2付近である。それは通常シリカに堆積された薄膜であり、クラッドとして使える。蘭クイックス社(Quix)は、集積光量子プロセッサを開発しており、同社によると、そのシリカクラッド導波路は、 $0.001 \sim 0.1\text{dB/cm}$ である。スイスの

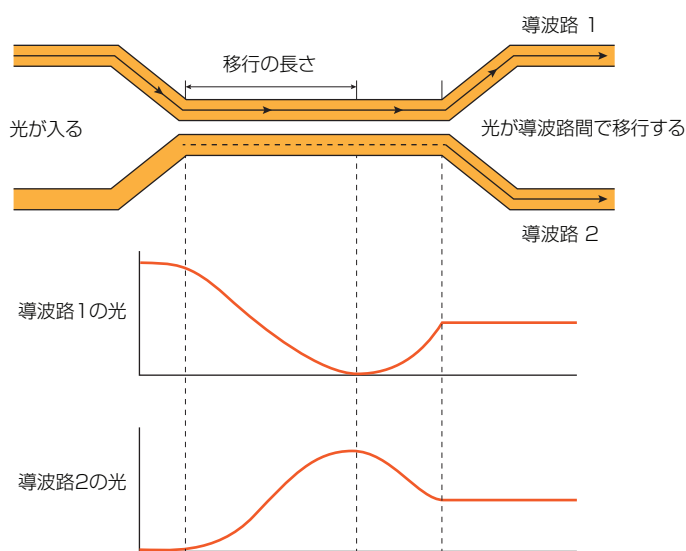


図3 2つのエバネッセント結合導波路間で光が移行する。

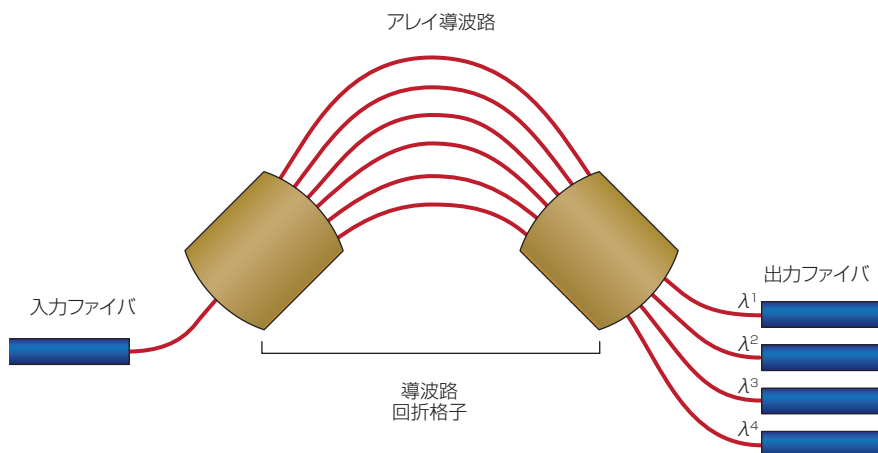


図4 アレイ導波路回折格子は、波長分割多重で信号分離のための分波器として広く利用されている。

Ligentec社は、Si₃N₄コンポーネントを統合している。これにはスパイラル、フィルタ、リング共振器、マッハツェンダ(MZ)干渉計、ヒータが含まれる。同社によると、その導波路は、2～3μm帯で使える。

ポリマー光導波路は、何年も前から出回っており、Laser Focus World誌は、2000年にそれらが集積オプティクスとともにどのように使えるかについて記事を掲載した。「モスキート法」というプロセスでは、クラッド層は基板に

液体で適用され、次に高屈折率材料がクラッド層に注入される。さらにその複合物は、UV光で硬化されて円形コアを形成する。そのプロセスは、マルチモードとシングルモードコアを造ることができ、それらは平行製造により多チャンネル導波路の形成が可能である。

全く知られていない材料から集積フォトリソで求められるすべての機能が得られるので、新しい材料の探求は続く。原子層堆積は、シリカまたはシリコンにアルミナ(Al₂O₃)の導波路を

形成できる、損失は紫と金UVで3dB/cm、その帯域では他の導波路よりも1ケタ少ない。傾斜Si_{1-x}Ge_x基板で造られた導波路のシリコンゲルマン(Si_{0.2}Ge_{0.8})MZ干渉計は、3μm帯で消光比が10dB以上であることを証明した。硫化モリブデン(MoS₂)のフォトディテクタ、グラフェンのような平面材料であり、窒化シリコンチップに集積されている。

集積光デバイス

平面導波路の組み合わせにより、多くの機能を持たせることができる。単純なYカプラは、2つの導波路等角分岐の間で光を等しく分ける(図2)。導波路は、多くの目的に使えるようにMZ干渉計を形成するように構成できる。

エバネッセント波結合は、2つの近接平行導波路の間で光を転送できる(図3)。エバネッセント結合は、漸進的効果であり、その効力は2つの導波路間の間隔に依存する。光は、一方の導波路から他方へ徐々に漏れる。導波路が十分に長い距離で平行のままであれば、光はすべて他方へ漏出する。さらに、漏出して元に戻りだす。そのようなカプラは、導波路を加熱して2つの平行ガイド間で光が漏れる速さを変えるなど、動作条件を変えることで光スイッチにできる。

アレイ導波路回折格子

多くの導波路を結合することで複雑な効果を出せる。高密度波長分割多重(DWDM)で伝送信号の分割は、アレイ導波路回折格子(AWG)で行う。これは、ヒット商品になった最初の平面導波路の1つである。

図4に示したように、分割される入力信号は、広い混合領域に広がり、そこで信号は多くの平行導波路に結合す

る。すべての導波路で、そのおのおのが信号を集める。隣接導波路の長さが増加量 Δ だけ違うので、これが2つの隣接導波路を通過する光を位相シフト $n\Delta/\lambda$ により遅らす。ここでは n は屈折率、 λ は波長である。光が導波路から出るとき、回折が屈折が第2混合領域を通して光を広げ、波長を別々の出力導波路に分ける。2つの混合領域をつなぐ導波路の実際の本数は信号の波長数よりも多い。例えば、64光チャンネルを分割するAWGは、混合領域を結合する232平行導波路を含んでいる。

アレイ導波路回折格子は、光スイッチで光チャンネルの追加やドロップ、あるいは入出力ファイバで波長の再配置など、その他の方法でも利用可能である。早期バージョンの中には、プラスチック製のものもあったが、今では主要タイプは、シリカ・オン・シリコンである。これはパッシブである。またInPは、アクティブでスイッチや他のコンポーネントを組み込める。しかしシリカと比べると、減衰、結合損失、クロストークが高い。

リング共振器

最も重要な平面導波路構成の1つがリング共振器である。最もシンプルな形状は、直線導波路に近接された円形導波路である(図5)。左の直線導波路は、入出力として機能する。直線導波路とリング導波路とが最も近いところで直線導波路のエバネッセント波が光をリングに移行させる。どの程度の光が結合するかは、導波路間の距離、その構造、導波路サイズ及びその材料の屈折率など細部に依存する。光は、全反射でリング導波路にトラップされる。ただし、他の導波路がエバネッセント波に十分近いところでは、他の導波路に漏れ出す。

共振は、リング内の波長で起こる。そこでは波の整数がリングの円周に等しい。そのため、リング共振器はフィルタとして使える。どの波長を付加的リング、また/あるいは直線導波路に移転させるかを選択する。選択された波長は熱光学効果または電気光学効果で調整可能である。リング共振器で可能なスイッチングの全域と他の機能

は、ここでは範囲外であるが、代表例は、簡素なリング共振器の非線形効果は、光スイッチングに使える。

導波路オプティクスで波長変換に非線形オプティクスを利用することは、大きな関心を生み出しているが、多くのアプリケーションで、効率改善が必要である。精力的な研究は、4波混合(FWM)などの三次効果であるが、二次非線形性に注目している人々もいる。これは、あるパワーレベルでは、効率がよい。最近の研究は、窒化シリコン導波路の全光ポーリングが広帯域チューナブル二次高調波を生成することを示した。

展望

集積フォトニクスがどこまで来たかを理解するには、フォトニック集積回路の周波数コム生成の成功デモンストレーションを考えてみればよい。周波数コムは、超短パルスを一連の等間隔連続光のスペクトルラインに変換する最新フォトニクスの力を示すエレガントな例である。最初、それらの背後の技術は非常に複雑に見えたが、数年前に、マイクロコムで魅力的な提案が出てきた。

最初は、そのような提案は、周波数とパワーの両方の複雑な変調が必要だった。今年早期に、米カリフォルニア大サンタバーバラ校のジョン・バワーズ氏(John Bowers)をリーダーとする大きなグループ、米カリフォルニア工科大のケリー・バハラ氏(Kelly Vahala)、それにスイス連邦工科大ローザンヌ校トビアス・キッペンベルク氏(Tobias Kippenberg)が、いわゆる「集積ターンキーソリトンマイクロコム」を実証した。このデバイスは、極めて強力で複雑な技術が、センシングや計測などのアプリケーションですぐに使えるようにするための大きな前進である。導波路オプティクスは、成熟しつつある。

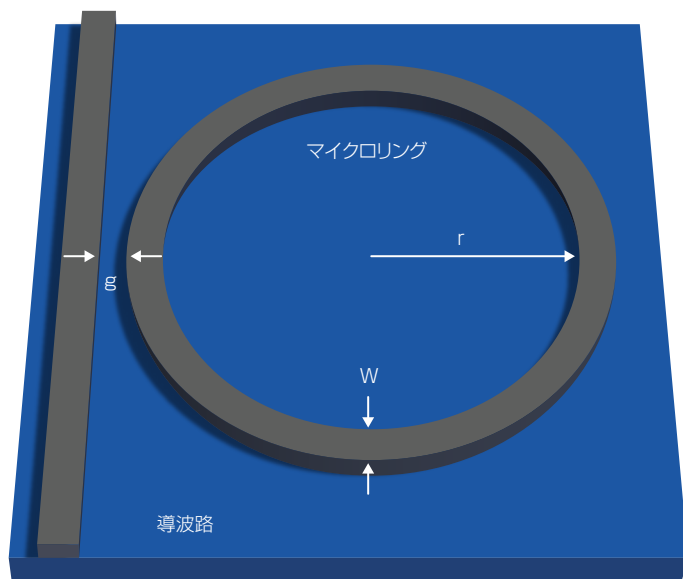


図5 簡素なリング共振器。光移転は、リング半径 r 、導波路幅 W 、及びガイド間のギャップ g に依存する。