先端分野の光計測に進出するPLC

アショク・バラクリシュナン、マット・ピアソン

PLCの設計、加工およびハイブリッド化の技術が進歩したことによって、レーザ、検出器、フェイズシフタなどのアクティブ部品や他の構成要素をPLCプラットフォーム上に直接集積できるようになった。

光計測器は一般に、光源、光信号処理用の各種光部品および光検出器から構成されている。従来の計測器の多くはバルク光学系を用いて作製されてきたため、小型化と高耐久化は非常に大きな挑戦であった。現在は平面光波回路（PLC）を使用することで、多数の光部品を1枚の光回路上に集積することが可能になり、計測器のサイズ、コスト、機能が改善されている。その結果、このような光チップに基づく光計測の応用が拡大している。

PLCの最初の応用の一つは、複数の光信号を異なる波長で伝送する光通信ネットワークの信号の合波と分波であった。アレイ導波路回折格子（AWG）デバイスは、性能仕様の改善とともに、バルク回折格子への置き換えが徐々に進行した。光スプリッタの多くはデバイスのサイズが同じで、このことがコスト上の利点になっている。しかしながら、1980年代から2000年代の初めまでの時期において、バルク光学系からPLCへの置き換えが実現したのは、このような簡単で安価なデバイスにおいてであった。とは言いながら、長い間にわたって、PLCの小型化の利点を十分に生かせるのは多重チャネルへの応用だとする仮説が通用してきたことは間違いない。

FTTHによる技術の進歩

2000年代の初めになると、PLCは分光法とファイバ・トゥ・ザ・ホーム（FTTH）の分野からいくつかの応用が生まれ、PCLの本来の応用は多重チャネルだとする従来の仮説を実証する機会が訪れた。例えば、FTTHチップは二つのチャネルしか利用しないが、光システムに対するフォトニックチップの革新的な効果が証明された。この場合の各チャネルは20～100nmの帯域幅があり、同じ導波路と光ファイバのなかを伝搬して双方向に動作する。このような要件を満たすために、高密度に実装されたPLCチップは波長分割多重器、レーザ、検出器およびその他の光部品が組込まれる。この応用は一見地味ではあったが、1枚のウエハから数百個、場合によっては数千個のデバイスが生産されるPLCは、競合するバルクデバイスに対して大幅なコストとサイズの低減を実現した。

PLCのなかに波長分割やパワー分割の機能を組込むことは難しくない。しかし、先端的な光計測の用途ではさまざまな機能が要求される。導波路の設計者は長い期間をかけて、$N\times M$スプリッタを含めた多数の重要な光部品を開発してきたが、これらのデバイスには、ウエハの工程変動に対して実質的に依存しない超低損失の後方反射ファイバ-導波路カプラを初めとして、パッシブデバイスの量産において必要になる機能と構造が付与されている。

アクティブ部品のアラインメント

アクティブ機能もすべての光計測にとって、重要になる。レーザのハイブリッド化はFTTHの開始とともに始まり、今では大量生産の工程においても非常に良好な光結合が実現されている。現在のレーザはPLC導波路とのパッシブ結合が可能になり、コンピュータビジョンとロボットを用いるレーザチップの完全自動組立技術を使用して、0.5dBに近い結合損失が得られている。この組立技術はレンズやアクティブアラインメントを必要としない。PLCウエハ加工プロセスの一部には、複雑だが再現性の高いフォトリソグラフィとエッチングの技術が確立され、ハイブリッド部品の高精度のアラインメントを可能にしている。

PLC回路のなかの光はガラス導波路に閉じ込められて水平方向に伝搬する。この光と検出器を結合することは常に厳しい挑戦であった。この問題は光の出口になるPLCチップの端部と光検出器とを突き合せ方式で結合することが簡単なアプローチになる。このアプローチはたしかに機能するが、アクティブアラインメントが必須となり、実装が難しく、光電流の取出しには複雑なワイヤボンディングが必要になる。そこで、われわれはPLC回路の内部にロバストなミラー構造をエッチングして作製する方法を考案した。この方法はミラー上のPLCに対して標準の表面受光検出器を集積する。光検出器の頭部には電気パッドを取付けて、標準のワイヤボンディング用に使用する。このようにしてアバランシェ光検出器と

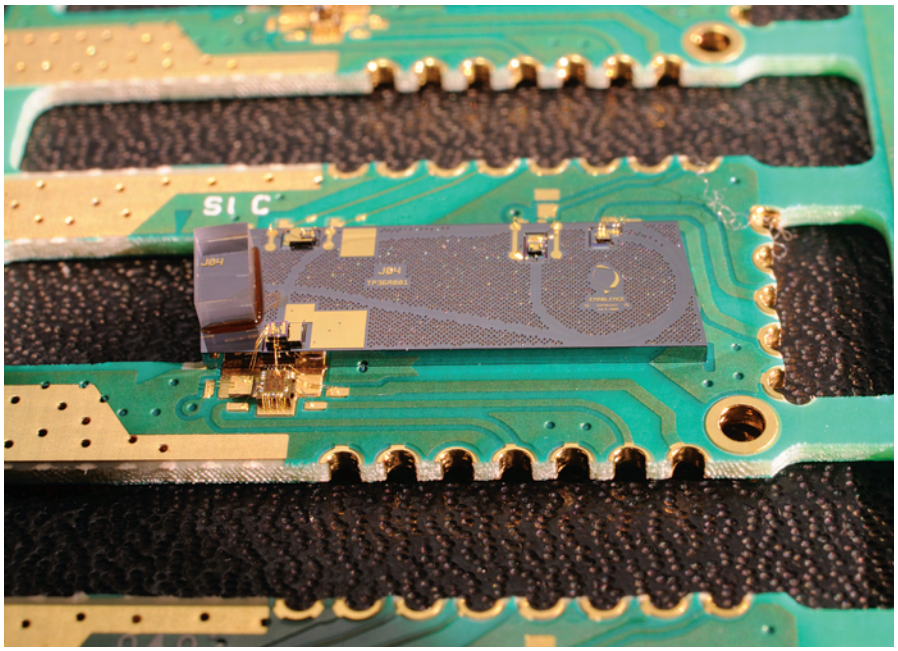


図1　短距離データリンク用のハイブリッドPLCは、DFBレーザ（チップの右上）、2種類の外部データ流を変調する二つの光検出器およびモニタ用の光検出器から構成されている。（資料提供：エネブランス･テクノロジーズ社）

PIN光検出器がPLCチップにハイブリッド化できるようにした。コンピュータビジョンとロボットによるチップの完全自動組立プロセスを用いることで、100%に近い歩留りと96%以上の抽出効率が得られている。

偏光ビームスプリッタや光アイソレータなどの応用に特化した機能もPLCのなかに組込むことができる。前者は注意深いプロセス制御が必要になるが、いずれもPLCを光学ベンチとして利用する。このように、PLCは標準的な光学試験器の構成に必要となる機能の大部分を非常に小さな形状因子に基づいて提供できる。

現在のところ、単一機能または同一機能の集団は、どのような機能と形状であっても、小さなPLCチップのなかに組込むことができる。このような場合の対応は難しいことではない。しかし、多様な機能を同一のPLC上に組込む場合は、それぞれの設計と作製が挑戦になる。このような場合は全部または多数の光計測器を1枚の光学チップ上に再現性よく作製しなければならない。それぞれの機能にはそれぞれに独自の設計上の制約と加工上の条件がある。完全に動作するシステム・オン・チップを実現するには、これらの問題のすべてを同時に解決しなければならない。

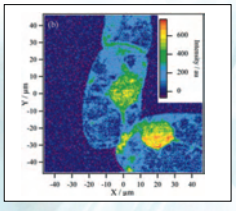
多数の要件を同時に満たすには

加工プロセスの変動に依存しないスプリッタを例にすると、その無依存性は導波路の精密な幾何学配置、応力を補償するトレードオフ機構、および隣接構造との精密な間隙などの条件を満

白色レーザー光源 LEUKOSシリーズ
Supercontinuum sources
可視域～近赤外タイプ、UVタイプ、近赤外タイプと帯域ラインアップも豊富！
LEUKOS Innovative Optical Systems

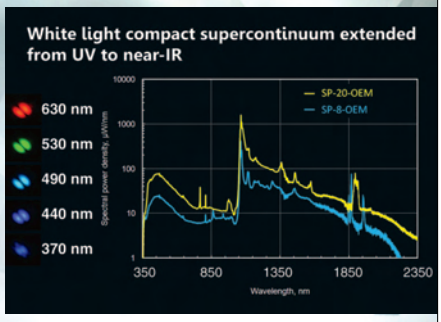
■ コンパクト設計でメンテナンスフリー
■ 320nm−2400nmまで白色発光
■ パルス幅＜1nsのパルス発振
■ シングルモードファイバー出射
■ アプリケーション例
CARS／高分解能イメージング
フローサイトメトリー／OCT／その他

ご要望に応じてカスタマイズも可能です。
詳細資料もございますので、
お気軽にお問い合わせ下さい。



Masanari Okuno, Hideaki Kano, Philippe Leproux, Vincent Couderc, and Hiro-o Hamaguchi, "Ultrabroadband multiplex CARS microspectroscopy and imaging using a subnanosecond supercontinuum light source in the deep near infrared", Optics Letters, 33 (9), 923-925 (2008).

LEUKOS-SPタイプ



■ LEUKOS-SPタイプ 発光スペクトル（代表値）

Leukos社日本総代理店
OPL 株式会社 オプトライン
本社 〒170-0013 東京都豊島区東池袋4-6-10 ルナ大住ビル4F
TEL：03-3981-4421　FAX：03-3989-9608
大阪営業所 〒532-0003 大阪市淀川区宮原5丁目1-28 新大阪八千代ビル別館3F
TEL：06-6398-6777　FAX：06-6398-6778
■お問い合わせは営業部へ
E-Mail（営業部宛）:opl@opto-line.co.jp
www.opto-line.co.jp

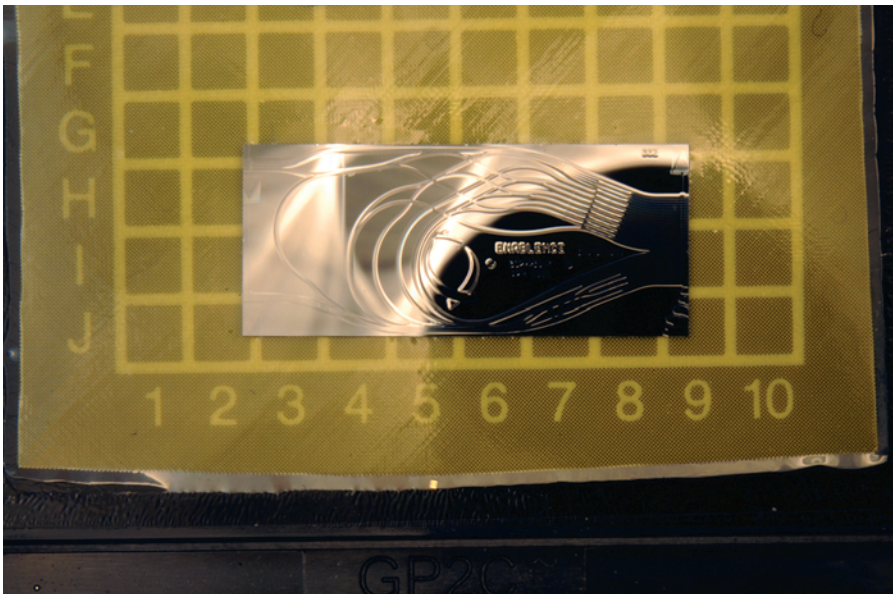


図2　バイオフォトニクス用に開発された特注の光回路は偏光ダイバーシティ検出の設計が採用されている。（資料提供：エネブランス･テクノロジーズ社）

たすことで実現される。波長スプリッタは、他の部品のエッチング要件とは関係なく、エッチング深さの精密制御が必要になる。アクティブ部品のハイブリッド化はメタライゼーション加工を必要とするが、このことは昇温の許容度、金属-シリカ壁の間隙、アラインメント標識、金属蒸着膜の厚み制御が必要になることを意味している。

この非常に複雑な条件を満たしたPLCの例としては、多数の特殊な軍事用途への応用を目的にして開発された無圧縮ビデオリンクの部品がある（**図1**）。この部品は光の一つの波長がPLC上の分布帰還形（DFB）レーザから発生し、最大2.5Gbpsの変調が加えられて、データと命令信号を遠隔のモジュールに向けて発信する。この部品には波長の異なる二つの光信号流が最大2.5Gbpsの変調速度で入射する。これらのデータ流は二つの異なるカメラから発信される。PLC上の検出器はデータを電気パルスに変調する。光検出器の近くにはトランスインピーダンス増幅器が配置され、ワイヤボンドインピーダンスが減少する。このチップの前ファセットには監視用の検出器も配置され、温度によるレーザパワーのドリフトを除去する。全体の光学層に埋め込まれた格子構造がチップ内部を伝搬する光の領域を決定する。このような光学構造をレーザと検出器のハイブリッド化と一緒に形成するには、光学配置、モデリング、作製、組立の間の強い連携が必要になる。

もう一つのPLCチップの例では、より古典的な導波路の設計に基づいて、偏光ダイバーシティ検出用に配置された四つの非常に高度な干渉計からなるバイオフォトニクス用のデバイスが作製されている（**図2**）。このPLCチップは本体の中に26もの入力／出力端があり、そのいくつかは双方向の機能を備えている。このチップは超低電力タップ、偏光回転部品、約20個の$N\times M$パワースプリッタ、および工作精度を監視するためのいくつかの試験回線から構成されている。

このチップの構成は複雑だが、サイズは9×20mm以下に収められている。それぞれの導波路の曲がりを注意深く計算し、曲げ損失と偏光効果を抑圧して、チップの一つの副次機能から次の副次機能への動作を最適なアプローチで可能にしている。導波路は大きな角度で合理的に交差するように設計されている。製品の全体サイズを小さくし、チップ上の不均一性を改善するには、コンパクトな信号転送が必要になる。導波路の間隙は最小になるように留意し、クロストークは十分に除去（導波路に応じて−70dBレベルの近くまで）しなければならない。このチップは構造が複雑なため、導波路を設計し、その設計をフォトリソグラフィのマスクに移すには、自動化されたコンピュータによる最適化手順が必要になる。

PLCはさまざまなバイオフォトニクスの用途にも利用できる。生化学反応は特定の化学物質に蛍光標識を付けて観察されることが多い。検体の存在は特定の波長の蛍光強度から明らかになる。石英ガラスは紫外にわずかに入った領域から赤外領域まで（0.3～2.0μm）の透明性が得られる。PLCチップにはファイバ結合レーザ励起光源を接続して、蛍光の分光学的な分離と検出を可能にするデバイスもある。このようなデバイスは利用が遅れているが、それは応用範囲があまりにも広く、それぞれの応用には異なる波長が必要になることによる。バイオフォトニクス用のPLCチップは応用技術の標準化によって、その普及が促進されるであろう。

著者紹介
アショク・バラクリシュナン（Ashok Balakrishnan）はカナダのエネブランス・テクノロジーズ社（Enablence Technologies Inc.）の製品開発担当ディレクタ、マット・ピアソン（Matt Pearson）は同社の技術担当バイスプレジデント。e-mail: matt.pearson@enablence.com

LFWJ