

100 Gbit/s 小型コヒーレントレシーバ向け InP 系 90° ハイブリッド集積型受光素子

InP-based Photodetector Monolithically Integrated with 90° Hybrid
for 100 Gbit/s Compact Coherent Receivers

井上 尚子*

Naoko Inoue

勝山 智和

Tomokazu Katsuyama

八木 英樹

Hideki Yagi

米田 昌博

Yoshihiro Yoneda

増山 竜二

Ryuji Masuyama

小路 元

Hajime Shoji

100Gbit/s を超える大容量伝送システムとして、デジタルコヒーレント通信の導入が進められており、小型コヒーレントトランシーバの実現には、搭載されるレシーバ等の光部品の小型化が必須である。我々は、InP 系モノリシック集積要素技術を用いて、レシーバを構成する 90° ハイブリッドとフォトダイオードを集積した 90° ハイブリッド集積型受光素子を開発し、コヒーレント受信に要求される光電特性、および既存の通信用受光素子と遜色ない信頼性を達成した。さらには、この集積型受光素子を搭載した小型レシーバを開発し、高感度特性と良好な 128 Gbit/s の DP-QPSK 復調特性を確認した。これらの結果から、本開発の新しい集積型受光素子がコヒーレントレシーバの小型化に貢献するとともに、今後の光通信市場の活性化、発展に寄与するキーデバイスとなることを期待する。

Digital coherent transmission is a promising technology for the next generation 100 Gbit/s transmission systems, and the development of compact coherent receivers and other optical components is essential to realize smaller coherent transceivers. Using InP-based monolithic integration of a 90° hybrid and waveguide photodiodes (PDs), we have developed a photodetector that provides high responsivity and high reliability. The compact coherent receiver, employing these InP-based integration devices, achieved a high sensitivity and demodulation of 128 Gbit/s DP-QPSK modulated signals. These results reveal that the InP-based photodetector monolithically integrated with 90° hybrid will contribute to the realization of compact coherent receivers for 100 Gbit/s and beyond transmission systems.

キーワード：コヒーレントレシーバ、90° ハイブリッド、受光素子、バットジョイント、選択成長

1. 緒言

スマートフォンやタブレット PC の普及、データ容量の大きな映像配信の浸透、さらに映像配信では誰もが簡単に映像をアップロードするサービスも普及するなど、アプリケーションの高度化・多様化が進んでいる。それに伴い、通信トラフィック量も増大しており、この状況に対応できる超高速・大容量の信号伝送システムが要求されている。このような期待に応える光伝送システム技術として、導入が進められているのがデジタルコヒーレント光通信方式である。この方式は、コヒーレント検波による高感度受信、デジタル信号処理による位相雑音や偏波変動の補償が容易となるため、システムの安定性に優れ、次世代の 100 Gbit/s を超える光伝送システムにおいても重要な技術と考えられている⁽¹⁾。また、今後の幹線系からメトロ系への展開が予想され、伝送装置の小型化への要求が強い。コヒーレント光通信の機器仕様は業界団体の Optical Internetworking Forum (OIF)^{*1}により規格が制定されており⁽²⁾、CFP/CFP2^{*2}などの小型トランシーバに搭載されるレシーバなどの光部品の小型化が望まれている(図1)。

本報告では、InP 系モノリシック集積要素技術による高感度の 90° ハイブリッド^{*3}集積型受光素子の開発と、これ

を用いた小型コヒーレントレシーバについて紹介する。

OIF 準拠レシーバ



40×27 mm²

小型レシーバ



27×16 mm²

小型化

図1 コヒーレントレシーバのサイズ

2. コヒーレントレシーバの小型化

図2にコヒーレントレシーバの構成図を示す。偏波ビームスプリッター (PBS) と 90° ハイブリッドから構成される光信号処理部で4つの信号成分に分離され、続く後段のフォトダイオード (PD) とトランスインピーダンスアンプ (TIA) から構成される光電変換部で各信号成分を検出する。これらの構成は、偏波多重4値位相変調 (DP-QPSK)

方式⁴等に対応し、1パッケージに集積された形態が広く用いられている。

コヒーレントレシーバの小型化には、主要部品である90°ハイブリッドのサイズが大きなキーポイントとなる。表1に90°ハイブリッド技術のベンチマークを示す。現在、石英系のPlaner Lightwave Circuit (PLC) が広く使用されている⁽³⁾。技術的に成熟度が高い一方で、90°ハイブリッド面積が大きく、またPDとのモノリシック集積も難しいことから、レシーバの小型化への主な制限要素となっている。近年注目されているシリコン (Si) フォトニクスでは小型化が可能であるが、PDとのモノリシック集積も含めて製造技術が研究段階にあり、実用化に向けてはまだ検討すべきことが多い⁽⁴⁾。一方で半導体であるInP系MMI⁵では、既存の通信用光素子と材料系が同じであり、これらの光素子の製造技術を活用することができる。InP系導波路では、石英系よりもコア層とクラッド層の屈折率差が大きいいため、曲げ半径を小さくし、90°ハイブリッド面積の縮小に有利である。さらに、後段のPDと材料系が一致することから、モノリシック集積も可能となる。90°ハイブリッドとPDのモノリシック集積は、個別にモジュール実装した場合と比較して、90°ハイブリッド導波路とPDの光結合部の過剰損失を大幅に低減できるため、レシーバの小型化だけでなく高感度化にも有利である。これらの点から、InP系90°ハイブリッドは、コヒーレントレシーバの小型化に有力な候補であると考えられる。

そこで我々は、InP基板上に90°ハイブリッドと、その4つの出力導波路端にPDをモノリシック集積した受光素子

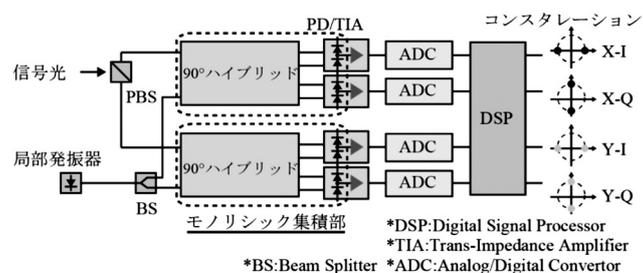


図2 コヒーレントレシーバの構成図

表1 90°ハイブリッド技術のベンチマーク

	石英系 PLC	InP系 MMI	Si フォトニクス
導波路構造	3 dB カプラ 	4x4 MMI 	Si 導波路 Si コア SiO ₂ クラッド Si 基板
素子サイズ	× 大	○ 小	◎ 微小
光学損失	○ 低	△ やや低	△ やや低
PD とのモノリシック集積	× 難	◎ 可能	△ 開発中 (Ge-PD)
製造性	◎ 良	◎ 良	△ 開発中

の開発を行い、これを用いてコヒーレントレシーバの小型化を行った。

3. InP系モノリシック集積のための要素技術

InP系90°ハイブリッド集積型受光素子を実現するために、モノリシック集積技術が必要となる。本章では、我々が保有する光集積用のエピ・プロセス要素技術について述べる。図3にその技術群を示す⁽⁵⁾。

- (1) ディープリッジ導波路⁶を形成するドライエッチング技術では、導波路幅の精密な制御とスムーズな曲げや分岐を形成する。この技術により、MMI設計寸法・形状を忠実に再現し、伝搬損失の低い導波路を実現することができる。
- (2) バットジョイント成長技術では、一部の領域を絶縁膜によりマスクしてエッチング除去し、組成や材料系の異なるコア層を再成長し、異種の導波路コアを一体結合する。この技術により、90°ハイブリッドMMI導波路のコア層とPD部の吸収層の一体結合を実現することができる。
- (3) 選択成長技術では、集積素子上の特定領域に選択的に再成長する。この技術により、ディープリッジ導波路とPD部の埋め込み導波路を一体接続し、損失や反射を最小に抑えた構造を実現することができる。
- (4) 埋め込み成長技術は、様々な曲げ角度をもつ導波路などの側壁に対して横方向に再成長できる。この技術により、凹凸のない埋め込み表面が得られ、電極形成を容易に実現することができる。

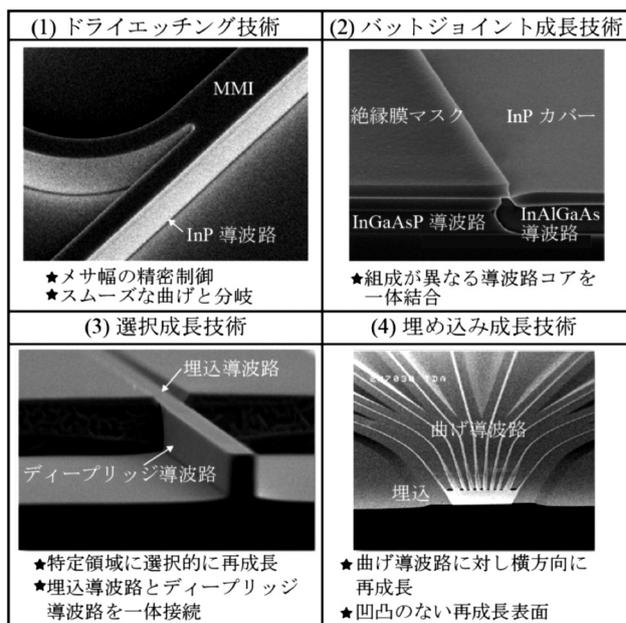


図3 InP系モノリシック集積要素技術

我々は、これらのInP系モノリシック集積要素技術を3インチウエハプロセスで実現しており、これらの技術を用いてInP系90°ハイブリッド集積型受光素子を製作した。

4. 素子設計と製作プロセス

図4にInP系90°ハイブリッド集積型受光素子の(a)光学顕微鏡写真、および(b)概要図を示す。素子サイズは4.0 mm×1.6 mmであり、石英系90°ハイブリッドと比較して1/10以下⁽³⁾と大幅に小さいサイズを実現した。受光素子は、GaInAsPコア導波路からなる90°ハイブリッド部と各出力導波路に集積されたInP/GaInAs系導波路型PDから構成される。90°ハイブリッドは素子の小型に有利なディーブリッジ導波路とし、2×4MMIと2×2MMIで構成される。この導波路設計は、出力導波路の交差が無いため過剰損失やクロストークが生じない特徴がある。また、PDは暗電流低減のために3章で述べた選択成長技術により埋め込み導波路構造とし、これと同時に90°ハイブリッド入力導波路部に対し、モジュール光学系との高い結合効率を得るため、スポットサイズコンバータ (SSC)^{*7}の集積を行っている⁽⁶⁾。

また、これを用いたレーザの製作においてはPDとTIAとの接続のためにキャパシタを併せて搭載する必要があり、これが小型化の障害となる。そこで部品点数の削減による省スペース化および組立コスト低減のために、集積受光素子にMetal-Insulator-Metal (MIM) で構成された

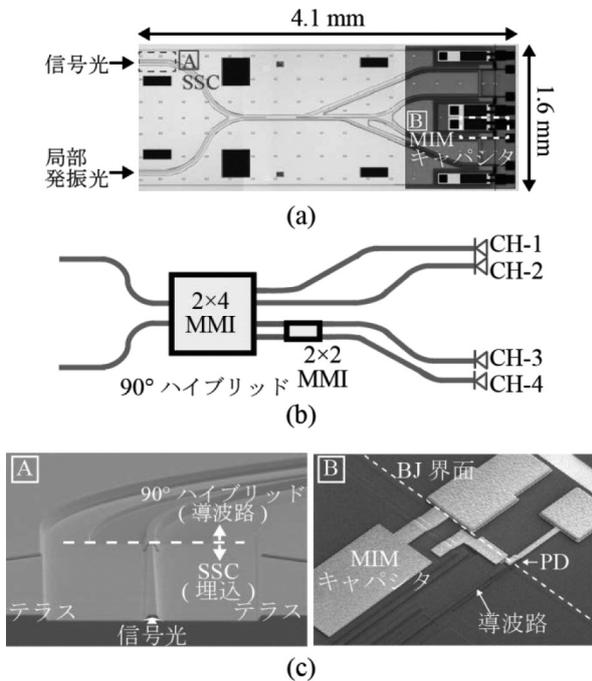


図4 InP系90°ハイブリッド集積型受光素子
(a) 素子写真、(b) 概要図、
(c) (a)の各部のSEM写真 [A]SSC部、[B]MIMキャパシタ部

キャパシタもモノリシック集積した。MIMキャパシタは、平坦な導波路エピ上に形成されており、その平坦性を利用して、±2%と面内均一性が良好な容量および100 V以上の絶縁耐圧が得られている⁽⁷⁾。

図5に製作プロセスを示す。3インチ半絶縁性InP基板上に有機金属気相成長法 (OMVPE) により、GaInAsPコア層を有する90°ハイブリッド導波路エピをバットジョイントプロセスにより一体結合し、続いてドライエッチングプロセスにより90°ハイブリッド部、PD部を構成するディーブリッジ導波路を一括形成した。3インチウエハ面内の導波路幅は、ドライエッチング技術を用いることにより、±0.05 μm以下の高い均一性を実現している。次に選択成長技術を用いて90°ハイブリッド入力導波路部とPD部の側壁に対してInP埋め込み再成長を行いSSC集積と埋め込み導波路PDの同時形成を行った。続いて、p側、n側電極配

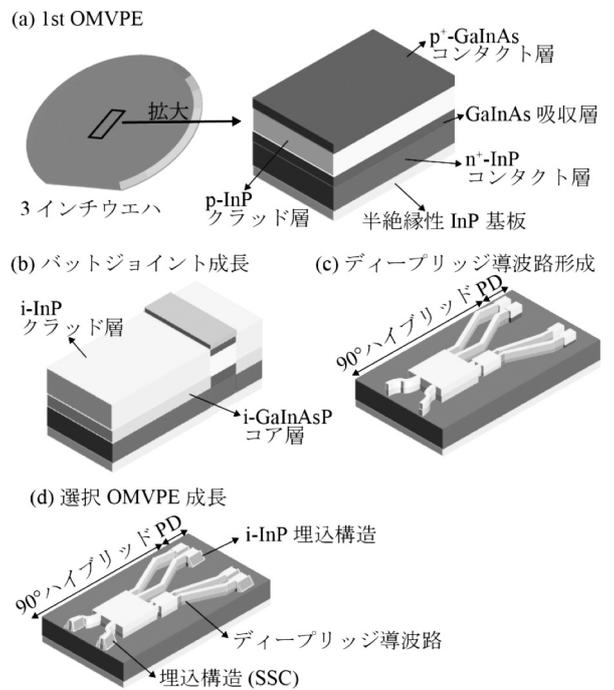


図5 製作プロセスフロー

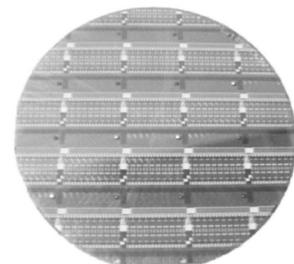


写真1 製作したInP系90°ハイブリッド集積型受光素子の3インチウエハの写真

線形成を行い、入力端面の反射防止膜コーティングを行った。写真1に3インチInP基板上に製作した90°ハイブリッド集積型受光素子の完成ウエハ写真を示す。

5. 素子特性評価結果

InP系90°ハイブリッド集積型受光素子の特性評価結果を示す⁽⁸⁾。図6に90°ハイブリッドMMIの各出力CHでの透過スペクトルを示す。Cバンド内、各CHで1 dB以下の波長依存性の小さい損失特性を達成した。また図7に作製された90°ハイブリッドのIn-phase出力とQuadrature出力との間の位相差ばらつきを示す。位相差の製作ばらつきは $\pm 3^\circ$ と小さく、90°ハイブリッドMMIを用いることで、位相を高精度に制御できていることを確認した。

図8に各CHにおける $\lambda = 1550$ nmでの受光感度を示す。90°ハイブリッド部の原理損失6 dB、および伝搬損失0.8 dBを含む。4CHの平均受光感度は0.14 A/Wと高い受光感度を示した。これは、バットジョイントプロセスによる90°ハイブリッド部およびPD部の高い結合効率が寄与している。

作製された集積受光素子の長期信頼性確認のため、高温通電試験を175°C、逆バイアス5 Vで行った。図9に試験前後で評価された25°C、逆バイアス1.6 V条件での各CHの

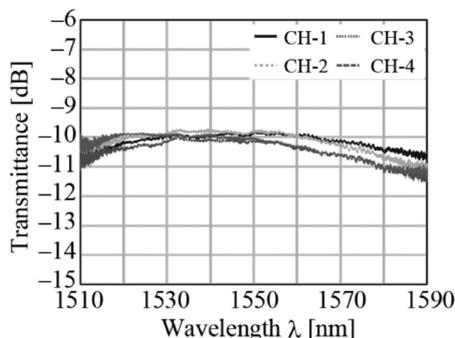


図6 90°ハイブリッドMMIの各出力CHでの透過スペクトル

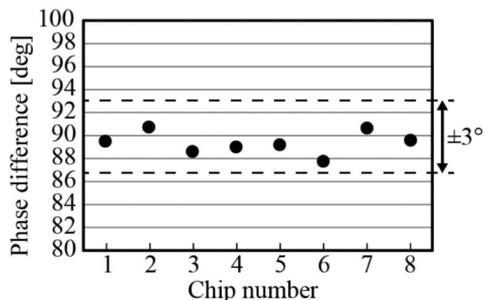


図7 90°ハイブリッドMMIのIn-phase出力とQuadrature出力間の位相差製作ばらつき

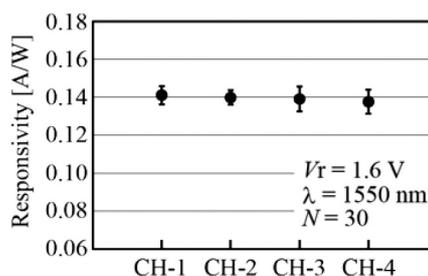


図8 90°ハイブリッド集積型受光素子の各PD出力CHにおける受光感度。Vr：逆バイアス、N：測定した素子数。エラーバーは標準偏差を示す。

PD暗電流挙動を示す。全CHで安定性した挙動が観測され、高温通電2000時間後においても、0.2 nA以下と低暗電流を維持しており、既存の通信用受光素子と遜色ない信頼性を確認した。

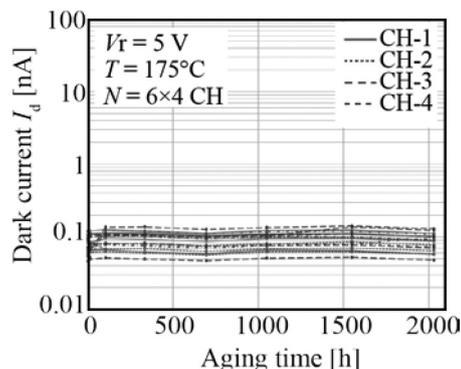


図9 高温通電試験における各CHのPD暗電流挙動

6. 小型コヒーレントレーザ

5章で述べたInP系90°ハイブリッド集積型受光素子を2つ搭載したOIF準拠の小型コヒーレントレーザの構成図を図10に示す⁽²⁾。モジュール光学系とのレンズ結合により、モードフィールド径1.8 μmの信号光が入射される。入射光はPBSによりTE/TMモードに分離され、TEモードは90°ハイブリッド集積型受光素子に入射している。また分離したTMモードは半波長板(HWP)によりTEモードに変換され、もう一方の90°ハイブリッド集積型受光素子へ入射している。図10(b)に作製された小型コヒーレントレーザの外観と、これに搭載された90°ハイブリッド集積型受光素子の写真を示す。パッケージサイズは、15 mm×26 mm×5.5 mmであり、InP系モノリシック集積素子を用いたことで、CFP/CFP2トランシーバに搭載可能な小型のコヒーレントレーザを実現することができた。

図11に作製された小型コヒーレントレーザの受光感度

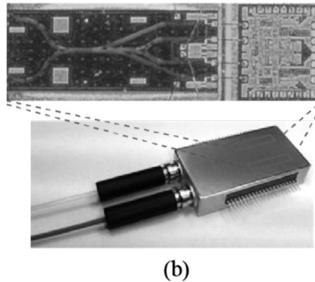
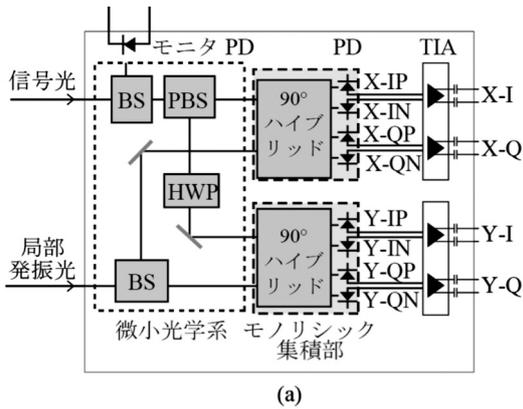


図10 小型コヒーレントレーバの (a) 概要図、(b) パッケージ写真および90°ハイブリッド集積型受光素子写真

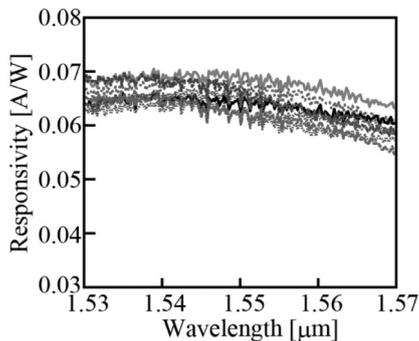


図11 小型コヒーレントレーバの感度特性 (8つのPDチャンネル出力を重ね書き)

特性を示す。測定は25°Cの環境下で行った。集積されたSSCとモジュール光学系との高結合効率から、PBSでの原理損失3 dBを含めたレーバモジュールの8つのPD出力CHの受光感度は、中心波長1.55 μmで0.064 A/W以上の高感度特性を達成した。また、全CHでのPD受光感度のばらつきは0.5 dBであり、高い均一性を示した。

図12に128 Gbit/s DP-QPSK信号を用いた伝送特性を示す。図12(a)のグラフではビット誤り率 (BER) の光信号雑音比 (OSNR) 依存性を、図12(b)ではOSNR=20 dBでのコンスタレーション^{※8}図形を示している。OSNRは0.1 nm帯域において、18.3 dB (@BER: 1×10⁻⁵) となり、明瞭なコンスタレーションが確認された。以上の結果

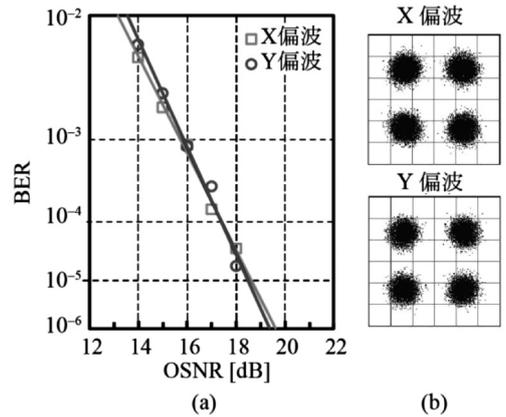


図12 128 Gbit/s 伝送特性 (a) BER と OSNR、(b) コンスタレーション (@OSNR = 20 dB)

から、90°ハイブリッド集積型受光素子を用いた小型コヒーレントレーバにおける128 Gbit/s DP-QPSK復調特性を実証した。

7. 結 言

InP系モノリシック集積要素技術を用いて、InP系90°ハイブリッド集積型受光素子を実現し、コヒーレント受信に要求される光電特性、および既存の通信用受光素子と遜色ない信頼性を確認した。さらには、この集積型受光素子を搭載した小型コヒーレントレーバを開発し、0.064A/Wの高感度特性と良好な128 Gbit/s DP-QPSK復調特性を確認した。これらの結果から、本開発の新しい集積型受光素子が、コヒーレントトランシーバの小型化に貢献するとともに、今後の光通信市場の活性化、発展に寄与するキーデバイスとなることを期待する。また、我々のInP系モノリシック集積要素技術が、さらなる高機能・多機能デバイス実現に向けて重要な役割を担うことを確信する。

用語集

※1 Optical Internetworking Forum (OIF)
光ネットワーク技術の業界団体で、標準化を行う機関。

※2 CFP/CFP2
100G Form-factor Pluggable。40/100 Gb/s通信機器に関するMSA (Multi Source Agreement) により定められたトランシーバの規格。

※3 90°ハイブリッド
コヒーレント受信器において、信号光と局部光を干渉させて同相成分と直行成分を出力する機能をもつ。

※4 多重4値位相変調 (DP-QPSK)

Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keyingの略。QPSKは90°ごとに位相をずらした4つの位相変調の組み合わせにより1度に2 bitずつの情報を伝送する通信方式。DP (Dual Polarization)-QPSKは、QPSK信号を2つの偏波にのせることで、計4 bitの情報を伝送する。

※5 MMI

Multimode Interferenceの略。導波路を伝搬する光を、合分波する導波路構造。

※6 ディープブリッジ導波路

凸型形状をもち、クラッド層で挟まれたコア層の両側を深くエッチングし、導波路の横方向を空気で強く閉じ込めた構造。

※7 スポットサイズコンバータ (SSC)

光のビーム径の大きさを変換する機能を持つ導波路構造。導波路と外部光学系の結合損失を低減するために集積する。

※8 コンスタレーション

信号空間ダイアグラム。複素平面上に光信号の位相と振幅の情報を複素平面上にプロットしたもの。

参考文献

- (1) S. Oda, T. Tanimura, T. Hoshida, C. Ohshima, H. Nakashima, Z. Tao and J. C. Rasmussen, "112 Gb/s DP-QPSK Transmission Using a Novel Nonlinear Compensator in Digital Coherent Receiver," OFC/NFOEC 2009, paper OThR6.
- (2) "Implementation Agreement for Integrated Dual Polarization Intradyne Coherent Receivers" (IA # OIF-DPC-RX-01.2), http://www.oiforum.com/public/documents/OIF_DPC_RX-01.2 (Nov. 14, 2013)
- (3) M. Itoh and Y. Kurata, "Heterogeneous Integration of InP PDs on Silica-based PLCs," in Proc. OFC/NFOEC 2013, paper OTh3H.4.
- (4) P. Dong, C. Xie, and L. Buhl, "Monolithic Coherent Receiver Based on 120-Degree Optical Hybrids on Silicon," OFC/NFOEC 2014, paper W11.5 (2014)
- (5) H. Yagi, N. Inoue, Y. Onishi, R. Masuyama, T. Katsuyama, T. Kikuchi, Y. Yoneda and H. Shoji, "High-Efficient InP-Based Balanced Photodiodes Integrated with 90° Hybrid MMI for Compact 100 Gb/s Coherent Receiver," OFC/NFOEC 2013, paper OW3J.5 (2013)
- (6) N. Inoue, H. Yagi, R. Masuyama, Y. Onishi, T. Kikuchi, T. Katsuyama, Y. Yoneda and H. Shoji, "Simultaneous Formation of Spot-Size Converters and Photodiode Waveguides to 90° Hybrid for Compact Coherent Receiver by Selective Regrowth," IPC 2013, pp. 1-2, paper ThE2.4 (2013)
- (7) R. Masuyama, H. Yagi, N. Inoue, Y. Onishi, T. Katsuyama, T. Kikuchi, Y. Yoneda and H. Shoji, "Monolithic Integration of InP-Based Waveguide Photodiodes with MIM Capacitors for Compact Coherent Receiver," IPRM 2013, paper MoD3-6 (2013)
- (8) H. Yagi, T. Kikuchi, N. Inoue, R. Masuyama, T. Katsuyama, K. Uesaka, Y. Yoneda and H. Shoji, "Highly Reliable InP-Based pin-Photodiode Array Monolithically Integrated with 90° Hybrid MMI Using Butt-Joint Regrowth," IPRM 2014, paper TuD3-2 (2014)

執筆者

井上 尚子*: 伝送デバイス研究所



八木 秀樹 : 伝送デバイス研究所 主査
博士 (工学)



増山 竜二 : 伝送デバイス研究所 主査



勝山 智和 : 伝送デバイス研究所 主席



米田 昌博 : 伝送デバイス研究所 グループ長



小路 元 : 伝送デバイス研究所 部長
博士 (工学)



*主執筆者