



800Gbit/s コヒーレント通信向け InP系光ミキサ集積受光素子

InP-based Photodiodes Integrated with Optical Mixer for 800 Gbit/s Coherent Transmission

沖本 拓也*
Takuya Okimoto

海老原 幸司
Koji Ebihara

山崎 功一郎
Kouichiro Yamazaki

岡本 悟
Satoru Okamoto

八木 英樹
Hideki Yagi

米田 昌博
Yoshihiro Yoneda

インターネットトラフィックの急激な増大に伴って光コヒーレント通信の伝送容量は800Gbit/sに達しようとしている。コヒーレントレシーバに搭載する受光素子に対しても、100GBaudに対応可能な広帯域、局発光の消費電力を低減するための高受光感度、実装部品・工数削減のための多機能集積が求められている。我々は、800Gbit/s コヒーレントレシーバへ搭載可能な広帯域・高感度InP系光ミキサ集積受光素子と、コヒーレントレシーバの小型・低コスト化を可能とする多機能集積受光素子を開発したので、その成果を報告する。

Due to the rapid growth of internet traffic, the transmission capacity of optical coherent communication is about to reach 800 Gbit/s. Photodetectors for coherent receivers are required to have three key features: wide frequency bandwidth to support 100 GBaud operations, high responsivity to mitigate the power consumption of local oscillators, and multifunctional integration to reduce footprint and cost. We have developed a wide-bandwidth and high-sensitivity InP-based optical mixer-integrated photodetector that can be installed in an 800 Gbit/s coherent receiver, and a multifunctional integrated photodetector that enables the downsizing and cost reduction of coherent receivers.

キーワード：800Gbps、コヒーレントレシーバ、IC-TROSA、90°ハイブリッド、InPモノリシック集積

1. 緒言

高精細映像の伝送が可能な5Gサービスの開始、場所に制限されないテレワークの浸透など、インターネットを介した大容量データ通信を基盤とする社会の変容が進行しつつある。これを支える光ファイバ通信技術における最大の課題は、増大し続けるネットワークトラフィック容量の需要にいかに対応するかである。

位相変調方式を用いるデジタルコヒーレント通信は大容量・長距離通信に適していることから、光海底ケーブルなどで大都市間を結ぶ幹線系や都市間を結ぶメトロ系、さらにはデータセンタ間通信（DCI）に至るまで幅広く用いられている。2021年現在、400Gbit/s コヒーレント伝送システムの市場導入が進んでいるが、市場のさらなる要求に応じて伝送容量が800Gbit/sに達するコヒーレント伝送方式の標準化検討も既に開始されている⁽¹⁾。

800Gbit/s 伝送に対応するコヒーレント光受信器であるコヒーレントレシーバを実現するためには、シンボルレート的高速化、消費電力の低減、モジュールの小型・低コスト化の3つが不可欠である。コヒーレントレシーバに搭載する受光素子についても、100GBaudに達する高シンボルレートに対応する広周波数応答帯域はもちろん、消費電力増大につながるローカル光の負荷低減のための高受光感度、実装部品・工数削減のための多機能集積が強く求められる。

当社は、400Gbit/s コヒーレントレシーバ⁽²⁾とそれに搭

載するInP系光ミキサ集積受光素子⁽³⁾を開発し、良好な特性を得ている。今回、800Gbit/s コヒーレントレシーバに搭載可能な広周波数応答帯域・高受光感度特性を持つInP系光ミキサ集積受光素子と、モジュール小型・低コスト化に寄与する多機能集積受光素子を開発したので、その結果を報告する。

2. コヒーレントレシーバの構成

コヒーレントレシーバの外観を写真1に示す。パッケージの大きさは12.0×22.7×4.5mmであり、OIF^{*1}のMicro-ICR Type1規格⁽⁴⁾に準拠している。

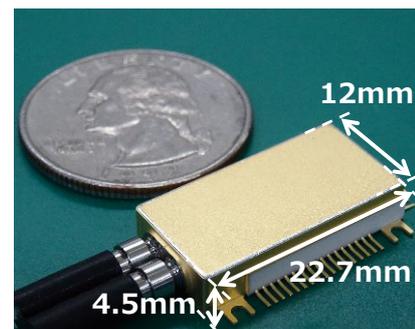


写真1 コヒーレントレシーバ外観

コヒーレント通信では、4値位相変調 (QPSK)^{*2}などの方式で位相変調された光信号をX・Yの2偏波で多重した方式が用いられている。この信号を偏波成分ごとに分離し、光の位相信号を電圧信号に復号するのがコヒーレントレシーバの機能である。

図1にコヒーレントレシーバの内部構成を示す。まず、入力された信号光は偏波ビームスプリッタ (PBS) でX・Yの偏波成分ごとに分岐される。このとき、Y偏波成分は半波長板 (HWP) でX偏波に変換される。2つの信号はビームスプリッタ (BS) によって一部がモニタフォトダイオード (MPD) に入射された後、残りの光信号は可変光減衰器 (VOA) を通してパワーが調整される。その後、それぞれに対応する90°ハイブリッド光ミキサ^{*3}に入力され、別経路から90°ハイブリッド光ミキサに入力された局発光 (local oscillator) と干渉させることで位相信号を強度信号に変換し、信号成分ごとに4つのチャンネルに対応するフォトダイオード (PD) に入力される。このとき、PDの受光感度が高いほど局発光のパワーを低減できるためコヒーレントレシーバの低消費電力化につながる。PDで電流信号に変換された信号はトランスインピーダンスアンプ (TIA) で電圧信号に変換・増幅されたのちレシーバから出力される。

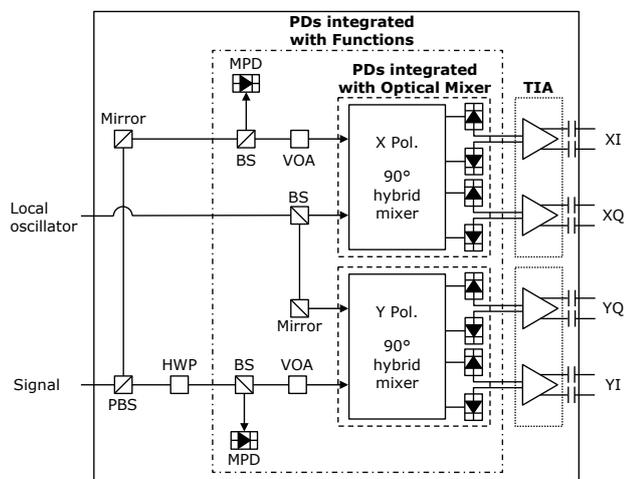


図1 コヒーレントレシーバ内部構成

コヒーレントレシーバの性能指標である周波数応答帯域・受光感度は、搭載した受光素子の性能に大きく左右される。当社は、広帯域動作・高受光感度・モジュール小型化の観点から、InP系材料を用いた導波路型受光素子をコヒーレントレシーバに搭載してきた。

図2に一般的に用いられる面入射型受光素子と、当社が作製する導波路型受光素子の概略図を示す。受光素子の周波数応答帯域・受光感度は、それぞれキャリア走行長 (carrier transit length) ・吸収長 (absorption length) に制約さ

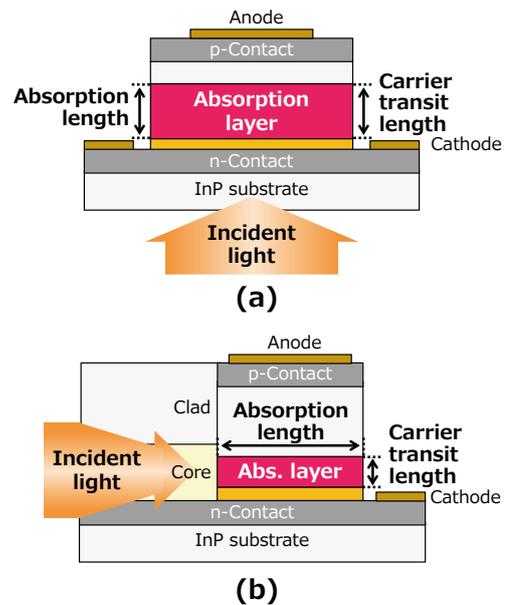


図2 (a) 面入射型受光素子および (b) 導波路型受光素子の構造概略図

れる。キャリア走行長が短いほど生成したキャリアをすばやく引き抜けるため、周波数応答帯域は向上する。一方、吸収長が長いほどより多くの光を吸収してキャリアを生成できるため、受光感度は向上する。図2(a)に示す通り、面入射型受光素子は吸収層 (absorption layer) に対して垂直に光が入射する構造を持つため、キャリア走行長と吸収長が一致する。このため、周波数応答帯域と受光感度の間に原理的なトレードオフが存在する。一方、図2(b)に示す通り導波路型は吸収層に対して水平に光が入射する構造を持つため、キャリア走行長と吸収長を独立に制御できる。つまり、電気容量増大による周波数応答帯域の劣化が生じない範囲内で吸収層を薄く・長く設計することで、キャリア走行長を短く維持したまま吸収長を伸ばして、広帯域と高受光感度の両立が可能となる。

さらに、導波路型受光素子は当社が保有するInP系モノリシック集積技術を用いて、光ミキサを含むさまざまな導波路デバイスと一体集積することが可能なため、コヒーレントレシーバの実装部品削減・フットプリント低減によるモジュールの小型・低コスト化に大きく寄与することができる。同時に、当社ではバットジョイント再成長技術⁽⁵⁾を用いて90°ハイブリッド光ミキサの出力導波路コアと導波路型受光素子の吸収層が直接接続した構造を形成しており、これによって高い光結合効率によるさらなる高受光感度を図っている。

3. 800Gbit/s向け集積受光素子の設計

90°ハイブリッド光ミキサを集積した受光素子の外観を写真2に、構成図を図3に示す。集積受光素子は大きさ1.6×4.1mm、厚み0.1mmの微小なチップであり、この中に

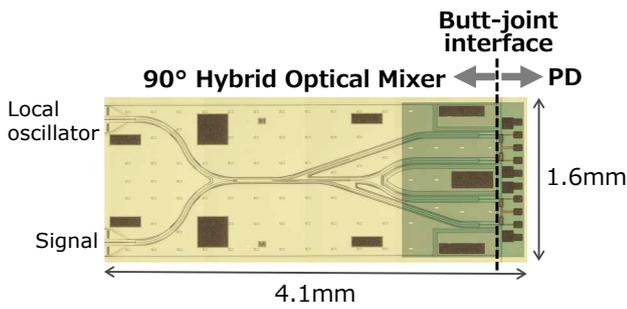


写真2 光ミキサ集積受光素子の外観

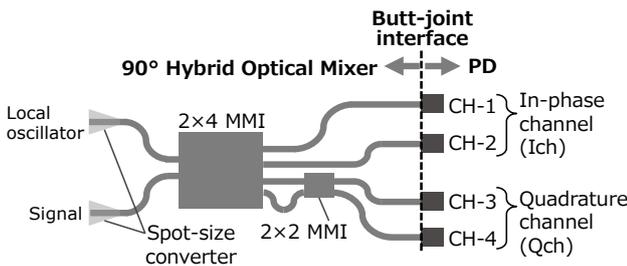


図3 光ミキサ集積受光素子の構成図

90°ハイブリッド光ミキサと4つのチャネルに対応するPDがバットジョイント再成長技術を用いて一体集積されている。

90°ハイブリッド光ミキサは屈折率の高いGaInAsP材料のコアを持ったInP系光導波路であり、2×4 MMI^{*4}、45°位相シフタ、2×2 MMIの3つの組み合わせで構成されている。光ミキサの入射ポートにはスポットサイズコンバータ (SSC)^{*5}が集積されているため、コヒーレントレーザー組立時の実装トランスを確保すると同時に、レンズと光ミキサの高い結合効率を確保できる。

図4に90°ハイブリッド光ミキサとPDの接続界面における断面図を示す。800Gbit/sコヒーレントレーザーに搭載

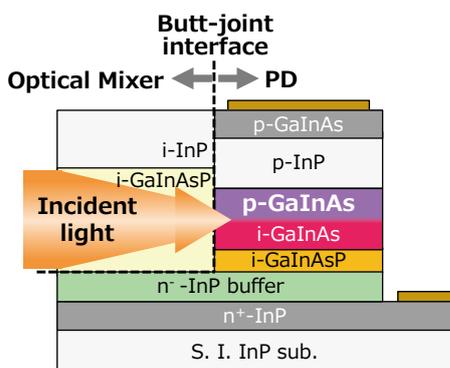


図4 800Gbit/s向け光ミキサ集積受光素子の断面図

可能な広帯域かつ高受光感度な集積受光素子を実現するため、当社では3つの構造を導入している。1つ目は、PD側の吸収層と光ミキサ側のコア層の直下に共通して配置された低濃度n型InPバッファ層⁽³⁾である。PD側においては空乏層を広げることで電気容量を低減して広帯域化に寄与する一方、光ミキサ側においてはコアと高濃度のn型InPコンタクト層を分離することで自由キャリア吸収^{*6}を抑制して受光感度の低下を防いでいる。2つ目は、吸収層と低濃度n型InPバッファ層の間に挿入されたi型GaInAsPバッファ層⁽⁶⁾である。800Gbit/sに対応可能な広帯域動作を実現するためにはキャリア走行長を短くするために吸収層をコア層よりも薄く設計する必要があるが、バットジョイント再成長界面での光強度分布の不整合による光結合効率の低下が懸念される。そこで、当社ではi型GaInAsPバッファ層を用いてコア層と吸収層の中心位置を高さ方向で一致させることでバットジョイント再成長界面での光強度分布の不整合を解消し、800Gbit/sに求められる薄い吸収層でありながら高い受光感度を達成している。3つ目は、p型GaInAs吸収層とi型GaInAs吸収層を組み合わせた2段吸収層構造である。p型にドーピングされたGaInAs吸収層はi型に比べてキャリアの発生量は若干低下するが、多数キャリアであるホールの走行を考慮する必要がなくなる。そのため、吸収層の総厚を変えることなく実効的なホールの走行長の短縮が可能となり、高感度を維持したままさらなる広帯域化を実現している。

4. 800Gbit/s向け集積受光素子の評価結果

当社が作製した800Gbit/s向け集積受光素子の評価結果を示す⁽⁷⁾。図5は、素子に集積した4つのPDの光・電気変換時の周波数応答特性である。低濃度n型InPバッファ層による電気容量の低減、2段吸収層構造によるホール走行長の短縮により、4つすべてのチャネルでシンボルレート100GBaudに対応可能な65GHz以上の3dB応答帯域を達成している。図6にCバンド波長帯における4チャネルの受

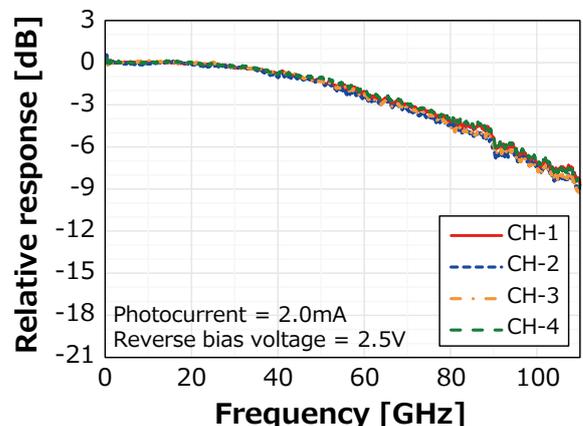


図5 光ミキサ集積受光素子の周波数応答

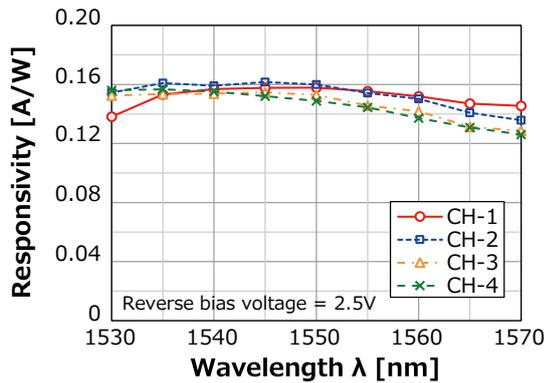


図6 光ミキサ集積受光素子の受光感度

光感度スペクトルを示す。この受光感度には、SSCにおける光結合損、90°ハイブリッド光ミキサにおける4分岐の原理損および導波路での過剰損、バットジョイント再成長界面における光結合損が含まれている。SSC集積による高光結合効率、低濃度n型InPバッファ層導入による90°ハイブリッド光ミキサ導波路内での光損失低減、i型GaInAsPバッファ層の導入によるバットジョイント再成長界面における高い光結合効率を反映し、Cバンドの中心である1550nm波長において4チャンネル平均受光感度として0.155A/Wを達成している。

以上の結果から、前章で詳述した3つの構造の導入による、800Gbit/s対応に求められる広帯域動作と高受光感度を両立したInP系光ミキサ集積受光素子を実証した。

5. 多機能集積受光素子

当社では、コヒーレントレーバのモジュールの小型化・低コスト化に向けて、これまで個別の部品として実装されてきた各部品の機能を、InP系モノリシック集積技術を用いて一素子に集積した多機能集積素子を作製した⁽⁷⁾。

写真3に作製した素子の外観を示す。大きさ4.1×2.6mmのチップ上に、19個もの機能が一体集積されている。前章で紹介した素子では1素子あたりに90°ハイブリッド光ミ

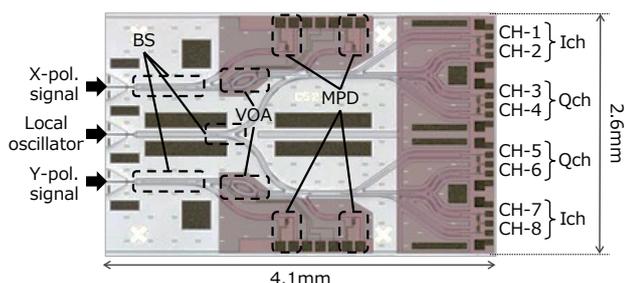


写真3 多機能集積受光素子の外観

キサが1個、PDが4個のみ集積されていたため、モジュールには2つの偏波成分それぞれに対応する2素子を実装する必要があった。一方、本素子では1素子内に2つの90°ハイブリッド光ミキサと8つのPDが集積されているため、モジュールに実装するのは1素子のみでよい。さらに、これまで個別の部品として実装してきたMPD2個、VOA2個、BS3個を集積しているため、実装部品点数の削減による部材および実装コスト低減とモジュールの小型化に大きく寄与する。VOAはマッハ・ツェンダー干渉計構造を採用し、導波路上にヒータを形成して熱光学効果を用いることで駆動しており、最大消光比は-28dB、その時の消費電力は68mWである。

作製した多機能集積受光素子の8チャンネルに対応するPDの逆バイアスIV特性を図7に、受光感度のチャンネル偏差の波長依存性を図8に示す。当社が保有するInP系モノリシック集積技術により、8チャンネルでほぼ完全に一致したIV特性とCバンド全域で±0.3dB以下の受光感度のチャンネル間偏差を確認しており、前章の集積受光素子と遜色ない特性を持った完成度の高い多機能集積受光素子を実現している。

本素子はコヒーレントレーバの小型化・低コスト化に効果的であることはもちろんだが、さらに小型化・低コスト化が求められる送受信一体型モジュールであるIC-TROSA^{*7}への搭載にも有効な素子であると言える。

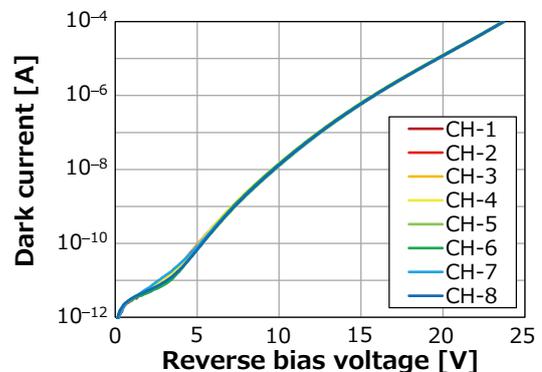


図7 多機能集積受光素子の逆バイアスIV特性

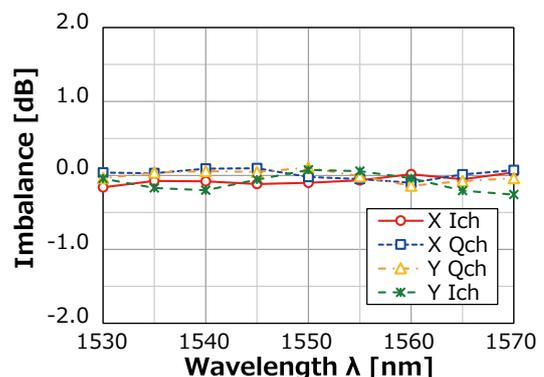


図8 多機能集積受光素子の受光感度チャンネル間偏差

6. 結 言

90°ハイブリッド光ミキサと導波路型受光素子を一体集積したInP系受光素子において、3つの構造を導入することでシンボルレート100GBaudに対応可能な高周波数応答帯域と局発光低減に寄与する高受光感度の両立に成功した。さらに、InP系モノリシック集積技術を用いて19個もの機能を4.1×2.6mmのチップ上に一体集積した多機能集積受光素子を実証した。本素子は800Gbit/sコヒーレントレシーバに求められる高周波数応答帯域・高受光感度を満たすと同時にモジュールの小型・低コスト化にも寄与するものであり、未来の社会を支える大容量光通信ネットワークの実現に大きく貢献するものと確信する。

用語集

※1 OIF

The Optical Internetworking Forum : 光ネットワーク技術に関する業界団体で、標準化を行う機関。

※2 4値位相変調 (QPSK)

Quadrature Phase Shift Keying : 90°間隔でシフトさせた4位相に2ビットのデータを割り当てる位相変調方式。各ビットは位相によってIn-phaseとQuadratureに分けられる。

※3 90°ハイブリッド光ミキサ

コヒーレントレシーバにおいて、信号光と局発光を干渉させて同相成分と直交成分を出力する機構。

※4 MMI

Multi-Mode Interference : 導波路内で生じる多モード干渉を利用して光を分配する導波路構造。

※5 スポットサイズコンバータ (SSC)

Spot-Size Converter: 光のビーム径を変換する機能を持つ導波路構造。

※6 自由キャリア吸収

金属や高濃度にドーピングされた半導体で生じる光の吸収。光ミキサ内で発生すると光信号の損失になるため受光感度の低下を招く。

※7 IC-TROSA

Integrated Coherent Transmit-Receive Optical Sub-assembly : 受信だけでなく送信の機能も一体となったコヒーレント通信用モジュール。

参考文献

- (1) L. Wilkinson, "OIF Launches 800G Coherent and Co-Packaging Framework IA Projects, Elects New Board Members/Positions, Officers and Working Group Chairs" (2020)
- (2) M. Takechi, Y. Tateiwa, M. Kurokawa, Y. Fujimura, H. Yagi, and Y. Yoneda, "64 GBaud High-bandwidth Micro Intradyne Coherent Receiver Using High-efficiency and High-speed InP-based Photodetector Integrated with 90° Hybrid," in Proceedings of OFC2017, Th1A.2 (2017)
- (3) H. Yagi, T. Okimoto, N. Inoue, K. Ebihara, K. Sakurai, M. Kurokawa, S. Okamoto, K. Horino, T. Takeuchi, K. Yamazaki, M. Ekawa, M. Takechi, and Y. Yoneda, "InP-Based Photodetectors Monolithically Integrated with 90° Hybrid toward Over 400Gb/s Coherent Transmission Systems," IEICE Trans. Electron., Vol. E102, C, no. 4, pp. 347-356 (2019)
- (4) "Implementation Agreement for Micro Intradyne Coherent Receivers," IA # OIF-DPC-MRX-02.0 (2017)
- (5) 井上尚子、八木英樹、増山竜二、勝山智和、米田昌博、小路元、「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」、SEIテクニカルレビュー第185号 (2014)
- (6) T. Okimoto, H. Yagi, S. Okamoto, K. Sakurai, K. Ebihara, K. Yamazaki, Y. Nishimoto, K. Horino, T. Takeuchi, Y. Yamasaki, M. Ekawa, and Y. Yoneda, "High-efficient InP-based waveguide photodiodes monolithically integrated with 90° hybrid towards next-generation coherent transmission systems," IPRM 2018, paper Fr3A8-5 (2018)
- (7) T. Okimoto, H. Yagi, K. Ebihara, K. Yamazaki, S. Okamoto, Y. Ohkura, K. Horino, K. Ashizawa, M. Ekawa, and Y. Yoneda, "InP-based PIC integrated with Butt-joint Coupled Waveguide p-i-n PDs for 100GBaud Coherent Networks," in Proceedings of OFC2021, F2C.6 (2021)

執 筆 者

沖本 拓也* : 伝送デバイス研究所



海老原幸司 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)



山崎功一朗 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)



岡本 悟 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)



八木 英樹 : 伝送デバイス研究所 主席
博士 (工学)



米田 昌博 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
主幹



* 主執筆者