

単一走行キャリア・フォトダイオードとその応用

伊藤 弘

Uni-Traveling-Carrier Photodiodes and Their Applications

Hiroshi ITO

The uni-traveling-carrier photodiode (UTC-PD) is a novel photodiode that utilizes only electrons as the active carriers. This unique feature is the key to achieving excellent high-speed and high-output characteristics simultaneously. To date, a record 3-dB bandwidth of 310 GHz and a very high output peak current of 184 mA with a 3-dB bandwidth of 65 GHz have been achieved. The superior capability of the UTC-PD for generating very-large high-bit-rate electrical signals can eliminate speed-limiting electrical amplifiers, resulting in wider bandwidth, better sensitivity, and simpler configuration of O/E interfaces. Several promising applications, such as a photo-receiver operating at up to 160 Gbit/s, DEMUX of up to 320 Gbit/s and full-rate wavelength conversion at 100 Gbit/s by a novel optical gate integrating the UTC-PD and an electroabsorption modulator, and operations at 100 GHz by an OEIC integrating a UTC-PD and InP-based HBTs, have already been demonstrated.

Key words: photodiode, high-speed, high-output-current, photoreceiver, optical signal processing

光通信システムの広帯域化に向けた研究開発の進展は目覚ましく、伝送速度としてはすでに1波長当たり1 Tbit/sにまで達している¹⁾。一方で、実用レベルではようやく1波長当たり10 Gbit/sが現実的なものとなり、40 Gbit/sはこれからという状況にとどまっている。伝送速度の向上を促す要因のうち、既存のシステムに対するコストメリットの提供は大きなポイントであり、そのためにはシステム構成の簡易化や工業ベースの素子作製技術確立などが重要である。また、エンドユーザー領域（例えばPC）では当然電気技術が用いられることから、光と電気技術の適正な棲み分けや、簡易で低コストな「光・電気インターフェース技術」の確立もまた重要である。

光・電気インターフェースのうち、「光→電気変換デバイス」としてはフォトダイオードが広く用いられている。フォトダイオードの重要な性能指標は、帯域、効率、出力などであるが、従来型の「pin接合型フォトダイオード (pin-PD)」では、素子構造や素子内のキャリア輸送に

起因する性能指標間のトレードオフ²⁾が存在し、例えば広帯域性と高出力性を同時に実現することが難しいという問題があった。したがって、電気側の初段に高速で高感度な増幅器を必要とし、構成の簡易化や伝送速度向上に対する制約要因となっていた。

このような課題を解決するため、筆者らは高速性と高出力性を同時に実現できる新しい動作モードのフォトダイオード、「単一走行キャリア・フォトダイオード」(uni-traveling-carrier photodiode: UTC-PD)³⁾を開発した。本稿では、単一走行キャリア・フォトダイオードの動作、基本特性について概説するとともに、いくつかの応用について、これまでに得られた結果を紹介する。

1. 単一走行キャリア・フォトダイオード (UTC-PD) の動作モードと基本特性

1.1 UTC-PDの動作モード

図1にUTC-PDのバンド図(a)と、比較のために従来

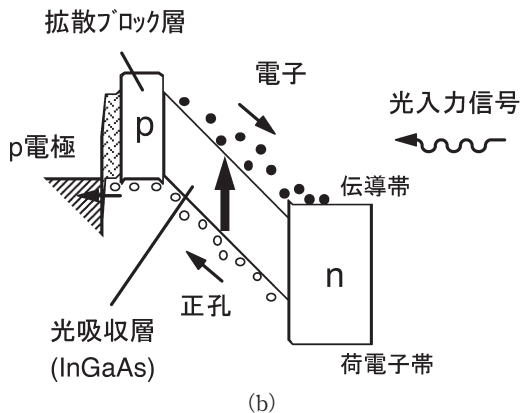
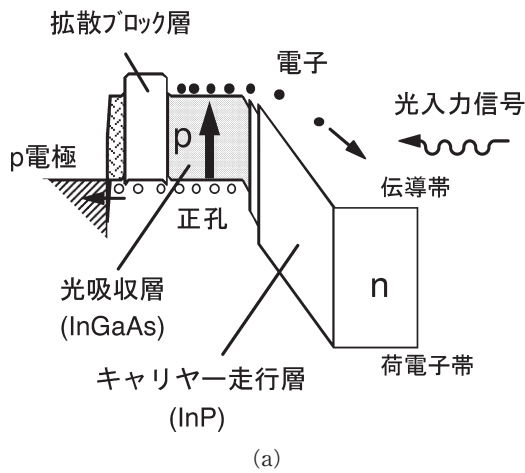


図1 (a) 単一走行キャリアー・フォトダイオード (UTC-PD) のバンド図, (b) 従来型の pin-PD のバンド図.

型の pin-PD のバンド図 (b) を示す。UTC-PD は p 型にドーパされた狭バンドギャップの光吸収層と、アンドープ、もしくは低濃度に n 型ドーパされた広バンドギャップのキャリアー走行層とで構成される。光信号入力により発生したキャリアーのうち正孔は多数キャリアーであるため、電子の移動に伴う電荷不均一に対して集团的に誘電緩和時間で応答する。したがって、正孔の輸送は素子の応答速度を決める要因とはならず、UTC-PD の応答速度は、吸収層内の電子拡散時間とキャリアー走行層内の電子ドリフト時間によって決まる。InGaAs 中の少数キャリアー移動度は III-V 族化合物半導体の中では特異的に高いため、拡散速度を高く保つように吸収層厚を設計することが可能であり、一方 InP キャリヤー走行層内では電子速度オーバーシュート効果⁴⁾が十分に働くので、電子の走行速度は正孔のそれに比べ 1 桁程度高くすることができる。したがって、ドリフト速度の遅い正孔の輸送が動作速度を支配する pin-PD に比べ、同等の受光効率を保ちながら動作速度を数倍高くすることができる。

このような動作モードの違いは、飽和出力に関しても利

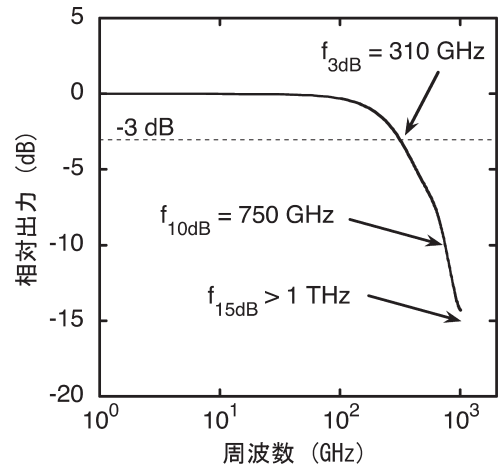


図2 高速型 UTC-PD の帯域特性.

点となる。フォトダイオードにおける出力飽和は、空乏層中に存在する平均電荷によるバンドの曲がり (空間電荷効果) により発生するが、pin-PD では発生した両キャリアーのうち速度の遅い正孔の蓄積がその主要因となっていた⁵⁾。一方、UTC-PD では空乏層中を走行するキャリアーが電子のみであるため、正孔との走行速度比程度に空間電荷効果が発生しにくく、したがって飽和出力電流値も同様に高くなる。UTC-PD の素子動作上の特徴は、このように「速度の遅い正孔」の影響を排除し、電子のみを活性なキャリアーとして用いるようにしたことにある。これにより、高速性と高出力特性を同時に実現することができる。

上記以外にも、UTC-PD 構造では、電子速度オーバーシュートが比較的低い電界で生じる⁶⁾ことから、pin-PD よりも低いバイアス電圧 (もしくは無バイアス) でも高速動作を実現できること、「吸収層」と空乏層である「キャリアー走行層」とが物理的に分離されていることにより、接合容量の増大を招くことなく光吸収層を十分薄くして素子の超高速化が図れること、などのメリットもある。

1.2 基本特性

図2に、吸収層厚 30 nm の UTC-PD の光パルス応答のフーリエ変換から求めた、周波数特性を示す⁷⁾。3 dB 帯域として 310 GHz が得られており、これは 1.55 μm 帯で動作するフォトダイオードとしてはこれまでの最高値であると同時に、pin-PD のトップデータと比べ 3 倍程度高い値である。さらに図2から、10 dB 帯域は 750 GHz、15 dB 帯域は 1 THz 以上に達しており、必ずしも高い出力を必要としない応用については、1 THz 程度の周波数領域まで UTC-PD が適用可能⁸⁾といえる。また、このような超高速動作が低バイアス電圧 (-0.5 V) で実現されていることや、ピーク電流として 8 mA と比較的高い値が得られ

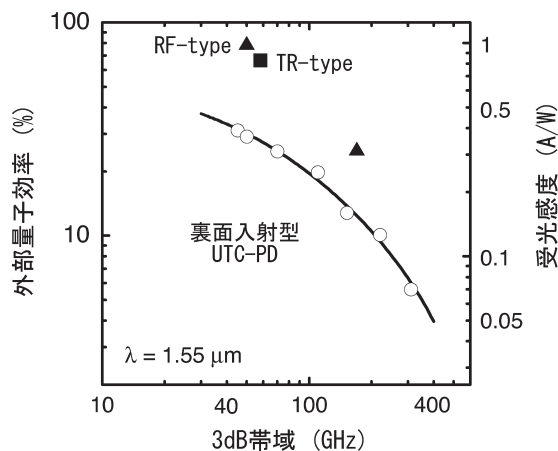


図3 UTC-PDにおける帯域と効率の関係。

ているのも UTC-PD の特徴である。さらに、素子構造を適宜設計することにより、例えば 3 dB 帯域 185 GHz でピーク電流 30 mA⁹⁾、3 dB 帯域 65 GHz ではピーク電流 184 mA⁹⁾ という高い値も得られている。高出力電圧動作の観点からは、例えば負荷抵抗を 50 Ω とした場合に、3 dB 帯域 40 GHz でピーク電圧 6 V という結果も得られている¹⁰⁾。このほかにも、0 V バイアス状態におけるパルス応答で、半値幅 1.22 ps、3 dB 帯域 230 GHz、ピーク電流 6.8 mA という値も得られている⁹⁾。UTC-PD の飽和出力が高いという特徴は、光サージ耐性や信頼性の面でも優位であり、低（無）バイアス電圧動作という特徴は、低消費電力化、高信頼化、構成簡易化などの面でやはり優位性を発揮するものと考えられる。

UTC-PD の効率は、pin-PD と同様に光吸収層厚で決定される。図 3 に、裏面垂直入射型 UTC-PD の効率と帯域の関係を示す⁹⁾。一般に素子帯域を向上させるためには吸収層厚を薄くする必要があるので、図 3 に示すように効率と帯域はトレードオフの関係にある。これに対し、さらなる効率向上のための素子構造として、導波路型 UTC-PD¹¹⁾、屈折型 UTC-PD¹²⁾、全反射型 UTC-PD¹⁰⁾ などの構造もすでに実現されている。導波路型構造は pin-PD でも多用されており、高効率化の点ではすぐれた構造であるが、素子端面に電流が集中することから高出力化に関しては一定の制約がある。一方、屈折型 UTC-PD (RF-type) および全反射型 UTC-PD (TR-type) は、基本的な構成は面型 UTC-PD であり、吸収層に対し斜めに信号光を入射させることにより実効吸収長を増大させるというアイデアを用いているため、高出力特性は犠牲にならない。図 3 にあわせてプロットされているように、これらの構造を採用することで、垂直入射型に比べ 2~3 倍程度の効率向上が実現できる。例えば、屈折型 UTC-PD を用いた場合において、平

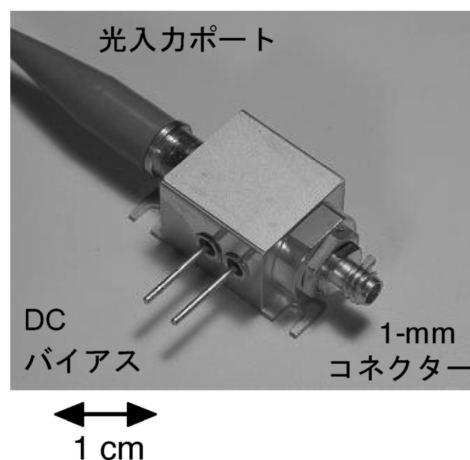


図4 1 mm コネクタ出力型 UTC-PD モジュールの写真。

均光電流 20 mA で 3 dB 帯域 50 GHz 以上、効率 1.0 A/W などのすぐれた特性が得られている¹³⁾。

2. 単一走行キャリア・フォトダイオードの応用

2.1 広帯域受光器

UTC-PD の主要な応用のひとつは、広帯域光通信システムにおける光受信器である。もしフォトダイオードの高い出力でデジタル回路を直接駆動する構成が可能になれば、大幅な性能向上が難しくなりつつある電気増幅器にかえて、より広帯域なファイバーアンプにその機能を担わせることで、受信器のさらなる広帯域化が図れる¹⁴⁾。また同時に、システムの簡易化や高感度化も実現できる。次世代の通信システムとして現在開発が行われている 40 Gbit/s 応用に関しては、UTC-PD は素子特性、信頼性、実装技術などの必要な項目はすでに確立されており、商品となっている。実験的には、50 Gbit/s RZ 信号を用いた 1 V 出力エラーフリー動作（最小受信感度は、ビット誤り率 (bit error rate: BER) 10^{-9} 時で -28 dBm 程度）が実証されている¹⁵⁾。また、40 Gbit/s 伝送において、光ファイバー増幅器と UTC-PD の組み合わせを用いることにより、従来の pin-PD と電気増幅器を用いた場合よりもすぐれた受信感度が得られることも報告されている¹⁵⁾。

さらに高い伝送速度の受光器を実現するためには、素子技術の改良だけでなく実装技術の高度化が必要である。通常使われている高速型のフォトダイオードモジュールは、同軸型の電気信号出力ポートを有するが、高速応用でよく用いられる「V コネクタ」とよばれるものでもメーカー保証帯域は 65 GHz までであり、これ以上の速度の広帯域信号を扱うためには、新たな構成のモジュール開発が必要となる。そこで筆者らは、UTC-PD の高速性を生かすため、図 4 に示すような 1 mm コネクタ (W コネクタ

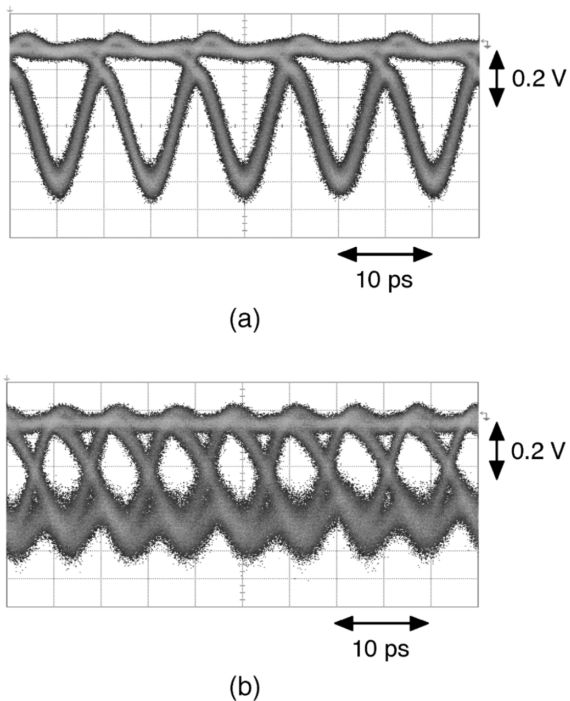


図5 (a) UTC-PDモジュールのアイパターン (@100 Gbit/s), (b) UTC-PDモジュールのアイパターン (@160 Gbit/s).

ーとよばれる製品もある) とよばれる同軸型コネクタ (帯域 110 GHz) を用いたバタフライ型モジュールを開発した¹⁶⁾. 図5 (a) および (b) に、作製したモジュールで受信した 100 Gbit/s および 160 Gbit/s の擬似ランダム RZ 信号を、帯域 80 GHz のサンプリングオシロスコープで観測した結果を示す¹⁷⁾. 100 Gbit/s では位相遅れの少ない明瞭なアイ開口が確認されており、さらに UTC-PD の特徴を生かし出力として 0.5 V と高い値が得られている. この出力はまだ線形領域にあり、最大出力として 0.8 V 以上も確認している¹⁷⁾. このモジュールを用いれば後段のデジタル回路を直接駆動することが可能であり、従来構成で速度を制限していた電気増幅器を排除することでシステムの高速度化が可能になる. 160 Gbit/s ではアイパターンの劣化がみられるが、これは素子自身の特性、1 mm コネクタの特性、およびサンプリングオシロスコープの特性がそれぞれ影響している. それでもアイ開口 0.3 V が得られており、素子およびモジュール構造をさらに最適化すれば、160 Gbit/s までの伝送速度では UTC-PD による電気回路の直接駆動はすでに実現可能なレベルにあるといえる.

2.2 光ゲート素子

上述の考え方を適用し、高速・高出力なフォトダイオードで他のデバイスを直接駆動することができれば、速度制限となる電気増幅器を排し、より高速で簡易な構成の集積化機能素子を実現することができる. 例えば、UTC-PD の

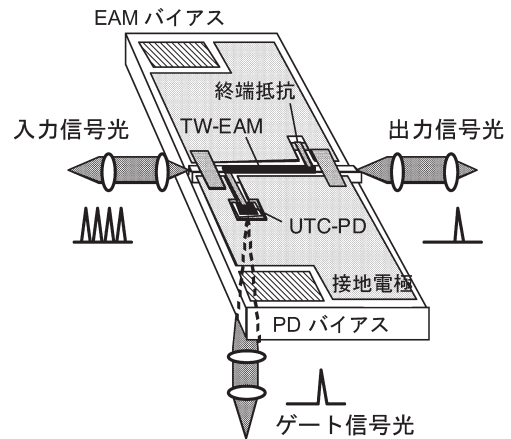


図6 PD-EAM の概念図.

高電圧出力で高速な光変調器を直接駆動する形態により、高速で簡易な構成の光制御による光ゲート機能を実現できる. すでに、UTC-PD と電界吸収型光変調器 (electroabsorption modulator: EAM) とのモジュール間接続によりそのような機能が実現されている¹⁸⁾ が、このアイデアをさらに発展させ、モジュール間接続による帯域制限やインピーダンス整合などの問題を解決するため、筆者らは UTC-PD と進行波電極電界吸収型光変調器 (traveling-wave EAM: TW-EAM) とをモノリシック集積化した光ゲート素子 (PD-EAM) を提案した¹⁹⁾. 図6 に、PD-EAM の素子構造を示す. UTC-PD、TW-EAM、終端抵抗、バイアス容量 (2 個) が 1 チップ内にモノリシックに集積化されている. ここで重要なことは、集積化により電気信号の帯域劣化を抑制できただけでなく、PD-EAM には外部との高速電気信号インターフェースが存在しないことから、インピーダンス整合に関する制約が大幅に緩和されている点である. 通常用いられる構造の TW-EAM の特性インピーダンスは、構造上の種々の制約から 50 Ω よりもかなり低い値 (例えば 20 Ω 程度) となることが多いが、PD-EAM 内では伝送線路の特性インピーダンスと終端抵抗値を任意に選べるため、素子内部での電気反射の問題を容易に回避できる. 作製した素子 (特性インピーダンス: 15 Ω) の光ゲート動作を評価した結果、最小ゲート開口時間として 2.3 ps、消光比 14 dB が得られた¹⁹⁾. また、4 連光パルス打ち抜き実験も行った結果、500 Gbit/s に相当する 2 ps 間隔のパルスを消光比 9 dB 以上で分離することにも成功している²⁰⁾. さらに、擬似ランダム (PRBS) 信号を用いた DEMUX 実験も行った. 図7 に、320 Gbit/s 信号に対する 1:32 DEMUX 時におけるビット誤り率の受信パワー依存性を、160 Gbit/s 1:16 DEMUX の結果とともに示す²¹⁾. いずれの場合も BER < 10⁻⁹ のエラーフリー動作が実現されており、

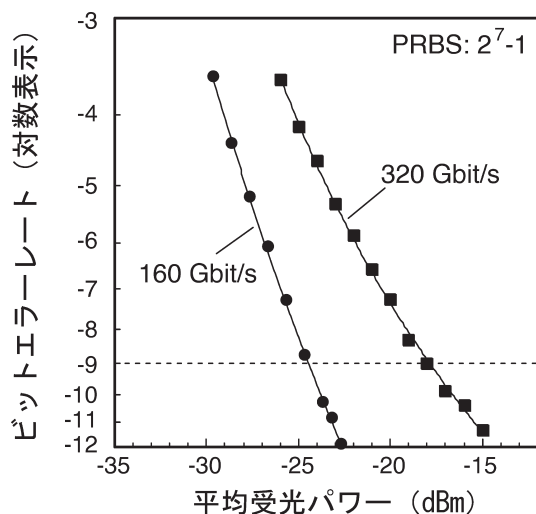


図7 PD-EAMを用いた160 Gbit/s (1:16) および320 Gbit/s (1:32) DEMUX動作におけるBER特性。

DEMUX系を含めた最小受信感度として320 Gbit/sで-18 dBm (@BER=10⁻⁹)を実現した(消光比14 dB以上)。これらの結果は、電気-光変換を用いるいわゆる「EOデバイス」を構成要素として用いた光ゲート素子の特性としては、報告されている最高値である。

EOデバイスは、小型、低消費電力などの特徴があり実用性が高いことに加え、PD-EAMは、電極接続の選択により光透過型(ノーマリーオフ型)と光吸収型(ノーマリーオン型)を同一ウェハ上に作り分けることも可能であり、さらなる集積化による高機能化の可能性も有している。また、具体的な応用としては、上述したDEMUX動作に加え、MUX、リタイミング、波長変換、光サンプリング、などさまざまな用途が考えられ、将来の超高速光信号処理における基本機能単位素子として重要な役割を果たすことが期待される。その一例として、100 Gbit/sフルレート波長変換についても検討を行った²²⁾。図8(a)に出力波長を固定して入力波長を変化させた場合のBER特性、図8(b)に入力波長を固定して出力波長を変化させた場合のBER特性を、それぞれ示す。100 Gbit/sフルレート動作時においても、波長変換用のPD-EAMを介さない場合のBER特性(リファレンス)に対して、平均受光パワーのペナルティー2 dB以内で、入力波長範囲25 nm、出力波長範囲20 nmの任意波長間のエラーフリー波長変換動作が実現されている。これらの結果も、「EOデバイス」を構成要素として用いた光ゲート素子の特性としては、報告されている最高値である。

2.3 その他の集積化素子

UTC-PDはまた、各種半導体電子デバイスとの集積化にも適している。これまでに、共鳴トンネルダイオードと

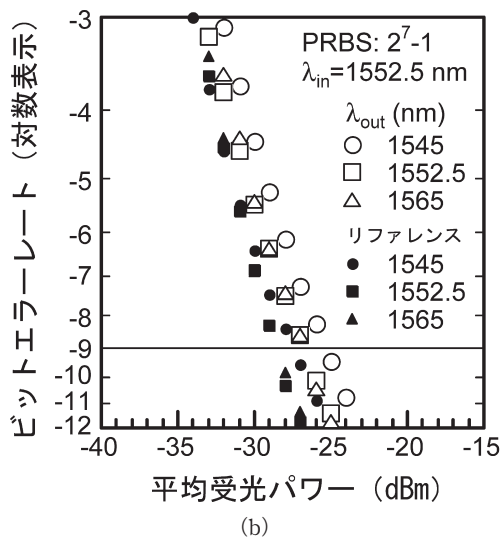
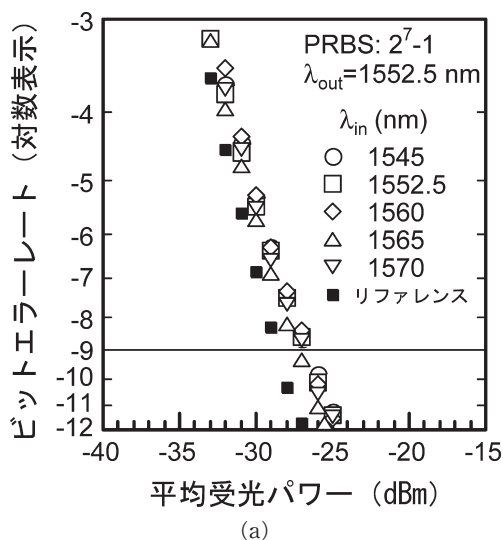


図8 (a) PD-EAMを用いた100 Gbit/s波長変換動作におけるBER特性(入力波長を変化)、(b) PD-EAMを用いた100 Gbit/s波長変換動作におけるBER特性(出力波長を変化)。

のモノリシック集積化による80 Gbit/s D-FF回路²³⁾、HEMTとのモノリシック集積化による75 GHz光クロック分周回路²⁴⁾、HBTとのモノリシック集積化による100 GHz光クロック分周回路²⁵⁾などが実現されている。受光素子としてのUTC-PDは、上述のように160 Gbit/s、あるいはそれを上回る伝送速度までの応用に適用可能な特性が実現されているが、100 Gbit/sを超える伝送速度領域ではコネクタ接続という手法の適用が必ずしも最適ではなくなる可能性もあるため、今後はこのような電子デバイスとのモノリシック集積化の方向性もますます重要になるものと考えられる。

単一走行キャリア・フォトダイオード(UTC-PD)の動作モード、基本特性、およびいくつかの応用について報

告した。UTC-PD は、走行速度の速い電子のみを活性なキャリアーとして用いるユニークな動作モードを有し、この特徴により高速特性、高出力特性、および低電圧動作を同時に実現できる。これまでに、長波長帯 PD としての最高値である 3 dB 帯域 310 GHz、ピーク出力電流 184 mA (帯域 65 GHz)、効率 1.0 A/W (帯域 50 GHz 以上)、などのすぐれた結果が実現されており、40 Gbit/s 級の応用に関してはずでに実用レベルに達している。この UTC-PD の高い飽和出力を効果的に用いることで、電気増幅器を光ファイバーアンプで置き換えたかたちの「光・電気インターフェース」が実現でき、扱うことのできる信号帯域を大幅に拡大できる。応用例としては、受光器としての 100 Gbit/s RZ 信号受信動作 (出力 0.8 V 以上) および 160 Gbit/s RZ 信号受信動作、TW-EAM との集積化による光ゲート素子 (PD-EAM) を用いた 320 Gbit/s 擬似ランダム信号に対する DEMUX エラーフリー動作、100 Gbit/s フルレート擬似ランダム信号に対するエラーフリー波長変換動作、OEIC の 100 Gbit/s 動作、などがすでに実証されている。このような、光素子と電気素子の特徴を相補的に融合させた「光・電子融合デバイス」の概念をさらに発展させることで、次々世代の 100~160 Gbit/s 級超高速光電気信号処理システムを現実的な形態の素子で実現させることができるものと期待される。

本研究を遂行するにあたりご協力いただいた、NTT フォトニクス研究所、および NTT 未来ねっと研究所の関係各位に感謝いたします。

文 献

- 1) M. Nakazawa, T. Yamamoto and K. R. Tamura: "1.28 Tbit/s-70 km OTDM transmission using third- and fourth-order simultaneous dispersion compensation with a phase modulator," *Electron. Lett.*, **36** (2000) 2027-2029.
- 2) K. Kato, S. Hata, K. Kawano and A. Kozen: "Design of ultrawide-band, high-sensitivity p-i-n photodetectors," *IEICE Trans. Electron.*, **E76-C** (1993) 214-221.
- 3) T. Ishibashi, N. Shimizu, S. Kodama, H. Ito, T. Nagatsuma and T. Furuta: "Uni-traveling-carrier photodiodes," *Tech. Dig. Ultrafast Electronics and Optoelectronics (1997 OSA Spring Topical Meeting)* (1997) pp. 166-168.
- 4) T. Ishibashi: "High speed heterostructure devices," *Semiconductors and Semimetals*, Vol. 41, Chap. 5 (Academic Press, San Diego, 1994) pp. 332-333.
- 5) T. Furuta, H. Ito and T. Ishibashi: "Photocurrent dynamics of uni-traveling-carrier and conventional pin-photodiodes," *Inst. Phys. Conf. Ser.*, No. 166 (2000) pp. 419-422.
- 6) B. Jalali and S. J. Pearton: *InP HBTs: Growth, Processing and Applications* (Artech House, Boston, 1995) p. 93.
- 7) H. Ito, T. Furuta, S. Kodama and T. Ishibashi: "InP/InGaAs uni-travelling-carrier photodiode with a 310 GHz bandwidth," *Electron. Lett.*, **36** (2000) 1809-1810.
- 8) H. Ito, F. Nakajima, T. Furuta, K. Yoshino, Y. Hirota and T. Ishibashi: "Photonic terahertz-wave generation using an antenna-integrated uni-travelling-carrier photodiode," *Electron. Lett.*, **39** (2003) 1828-1829.
- 9) H. Ito, T. Furuta and T. Ishibashi: "High-speed and high-output uni-traveling-carrier photodiodes," *IEICE Trans. Electron.*, **E84-C** (2001) 1448-1454.
- 10) H. Ito, T. Furuta, S. Kodama and T. Ishibashi: "High-efficiency unitraveling-carrier photodiode with an integrated total-reflection mirror," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **18** (2000) 384-387.
- 11) Y. Muramoto, K. Kato, M. Mitsuhara, O. Nakajima, Y. Matsuoka, N. Shimizu and T. Ishibashi: "High-output voltage, high speed, high efficiency uni-traveling-carrier waveguide photodiode," *Electron. Lett.*, **34** (1998) 122-123.
- 12) H. Fukano, Y. Muramoto, K. Takahata and Y. Matsuoka: "High-efficiency edge-illuminated uni-traveling-carrier-structure refracting-facet photodiode," *Electron. Lett.*, **35** (1999) 1664-1665.
- 13) Y. Muramoto, H. Fukano, T. Furuta and Y. Matsuoka: "A polarization-independent high-efficiency refracting-facet uni-traveling-carrier photodiode with a bandwidth over 50 GHz," *Proc. 26th European Conf. on Optical Communication*, Vol. 2 (2000) pp. 109-110.
- 14) K. Hagimoto, Y. Miyamoto, T. Kataoka, H. Ichino and O. Nakajima: "Twenty-Gbit/s signal transmission using simple high-sensitivity optical receiver," *Tech. Dig. Optical Fiber Communication Conference* (1992) p. 48.
- 15) Y. Miyamoto, M. Yoneyama, T. Otsuji, K. Yonenaga and N. Shimizu: "40-Gbit/s TDM transmission technologies based on High-Speed ICs," *IEEE J. Solid-State Circuits*, **34** (1999) 1246-1253.
- 16) Y. Muramoto, Y. Hirota, K. Yoshino, H. Ito and T. Ishibashi: "A uni-travelling-carrier photodiode module with a bandwidth of 80 GHz," *Electron. Lett.*, **39** (2003) 1851-1852.
- 17) Y. Muramoto, K. Yoshino, S. Kodama, Y. Hirota, H. Ito and T. Ishibashi: "100- and 160-Gbit/s operations of uni-traveling-carrier photodiode module," *Electron. Lett.*, **40** (2004) 378-380.
- 18) M. Yoneyama, Y. Miyamoto, K. Hagimoto, N. Shimizu, T. Ishibashi and K. Wakita: "40 Gbit/s optical gate using optical modulator driven by uni-traveling-carrier photodiode," *Electron. Lett.*, **34** (1998) 1607-1609.
- 19) S. Kodama, T. Ito, K. Tsuzuki, N. Watanabe, S. Kondo, H. Ito and T. Ishibashi: "2.3 picoseconds optical gate monolithically integrating photodiode and electroabsorption modulator (PD-EAM)," *Electron. Lett.*, **37** (2001) 1185-1186.
- 20) S. Kodama, T. Yoshimatsu and H. Ito: "500-Gbit/s optical gate monolithically integrating a photodiode and electroabsorption modulator (PD-EAM)," *Electron. Lett.*, **40** (2004) 555-557.
- 21) S. Kodama, T. Yoshimatsu and H. Ito: "320-Gbit/s error-free demultiplexing by using an ultrafast optical gate monolithically integrating a photodiode and electroabsorption modulator," *Electron. Lett.*, **39** (2003) 1269-1270.
- 22) T. Yoshimatsu, S. Kodama, K. Yoshino and H. Ito: "100-Gbit/s error-free wavelength conversion using PD-EAM optical gate," *Proc. 30th European Conference on Optical Communication*, Vol. 2 (2004) pp. 242-245.
- 23) K. Sano, K. Murata, T. Otsuji, T. Akeyoshi, N. Shimizu and E. Sano: "80 Gbit/s optoelectronic delayed flip-flop circuit using resonant tunneling diodes and uni-traveling-carrier photodiode," *Electron. Lett.*, **35** (1999) 1376-1377.
- 24) K. Sano, K. Murata, H. Matsuzaki, H. Kitabayashi, T. Akeyoshi, H. Ito, T. Enoki and H. Sugahara: "75-GHz

optical clock divide-by-two OEIC using InP HEMTs and uni-traveling-carrier photodiode," *Extended Abst. International Conference on Solid State Devices and Materials* (2003) pp. 902-903.

- 25) N. Kashio, K. Kurishima, K. Sano, M. Ida, N. Watanabe, H. Fukuyama, H. Sugahara and T. Enoki: "100-GHz opto-

electronic integrated circuits using InP HBTs and a UTC-PD," *Proc. Int. Conf. on Indium Phosphide and Related Materials*, ThA-1-4 (2005).

(2005年8月4日受理)