

アバランシェフォトダイオードを用いた400ギガビットイーサネット用高感度受信モジュール

次世代のイーサネットの規格である400ギガビットイーサネットの伝送距離拡大に向けてアバランシェフォトダイオード（APD）を用いた光受信モジュールの開発を進めています。本稿では、400ギガビットイーサネットにて採用されたPAM4方式に対するAPDへの適用性、および作製した受信モジュールの受信特性について紹介します。

なかにし やすひこ おおの てついちろう

中西 泰彦 / 大野 哲一郎

よしまつ としひで さんじょう ひろあき

吉松 俊英 / 三条 広明

NTTデバイスイノベーションセンタ

400ギガビットイーサネットの動向およびアバランシェフォトダイオードへのニーズ

近年のデータセンタ内およびデータセンタ間のトラフィックの増加に対応

するため、IEEE（Institute of Electrical and Electronics Engineers）では100ギガビットイーサネットに引き続き、次世代の規格として400ギガビットイーサネットの標準化に向けた議論

を進めています⁽¹⁾。光ファイバを利用した400ギガビットイーサネットにおける各伝送距離のビットレートおよび変調方式を表に示します。400ギガビットイーサネットにおける特徴としては、光変調方式として初めてNRZ（Non Return Zero）方式以外を採用したことです。図1に示すように従来のNRZ方式では、0、1の信号のみで構成されているのに対し、多値変調方式の1つであるPAM4（4-level Pulse Amplitude Modulation）方式では、0、1、2、3の4値で構成されます。このことから同じシンボルレート^{*1}において、NRZ方式に対しPAM4方式では、2倍の情報を送ることが可能となります。

現在議論されている400ギガビットイーサネットの伝送距離は10 kmまでとなっていますが、モバイルバックホールやビル間通信用途として伝送距離の拡大についての検討がされています⁽²⁾。伝送距離の拡大のためには、送信器から受信器間のパワーバジェット

表 400ギガビットイーサネットにおけるビットレートおよび変調方式

	400GBASE-SR16	400GBASE-DR4	400GBASE-FR8	400GBASE-LR8
距離	100 m	500 m	2 km	10 km
媒体	マルチモードファイバ	シングルモードファイバ	シングルモードファイバ	シングルモードファイバ
チャンネル数 多重方法	16チャンネル パラレル	4チャンネル パラレル	8チャンネル 波長多重	8チャンネル 波長多重
ビットレート	26.5625 Gbit/s	106.25 Gbit/s	53.125 Gbit/s	53.125 Gbit/s
変調方式	NRZ	PAM4	PAM4	PAM4

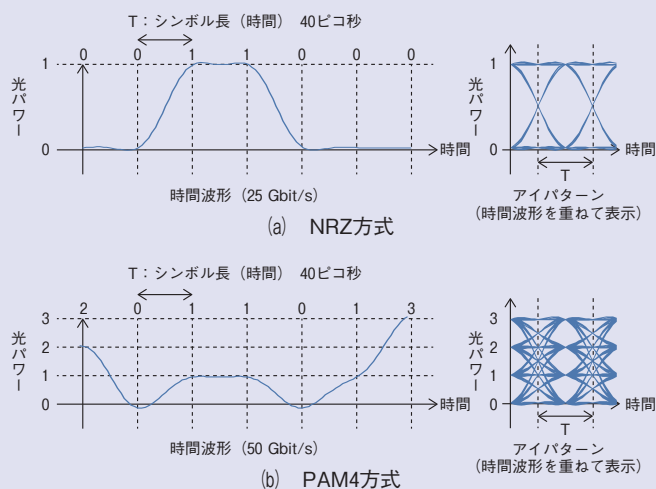


図1 光変調方式の比較

*1 シンボルレート：1秒当りの変調回数、単位は baud（ボー）。1回の変調で送出される信号をシンボルと呼び、1シンボル当りの情報量（NRZ信号なら1ビット、PAM4信号なら2ビット）とシンボルレートの積がビットレート（単位 bit/s）となります。

を拡大する必要がある、この有力な方法としてアバランシェフォトダイオード (APD: Avalanche Photodiode) を受信器に使用し受信感度を向上させる方法があります。APDは内部利得により高い受信感度を得ることができるだけでなく、小型で低消費電力な受信器を構成できることから、その適用が期待されています⁽³⁾。

APDのPAM4信号受信に向けた課題

フォトダイオードは光を電流に変換するものであり、その効率を受光感度と呼びます。また、フォトダイオードに入力した変調されていない(直流の)光信号のパワーと、フォトダイオードから出力される出力電流との関係を、直流入出力特性と呼びます。APDでは受光感度に入力光パワー依存性があり、入力光パワーが強くなるにつれて受光感度が下がる傾向があるため、この直流入出力特性は非線形性を持つことになります。この非線形な直流入出力特性がAPDから出力される信号に転写されると波形品質が劣化することが懸念されます。前述のように400ギガビットイーサネットでは、変調信号に多値変調方式であるPAM4方式を採用しています。多値信号の受信においては、従来のNRZ信号に比べ、受信器に高い線形性が求められることから、APDを用いた400ギガビットイーサネット用光モジュールを実現するためにはPAM4信号に対する適用性を確認する必要があります。

一般的なフォトダイオードであるpinフォトダイオード (pin-PD) と今回私たちが使用したAPDの直流入出力特性を図2に示します。図の破線は線形に動作すると仮定したときのAPDの入出力特性を示しており、入

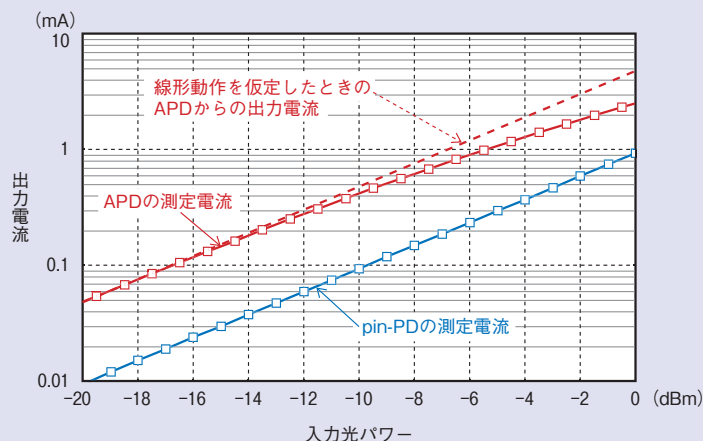
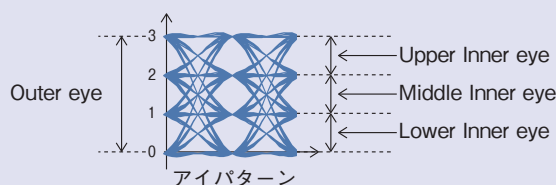
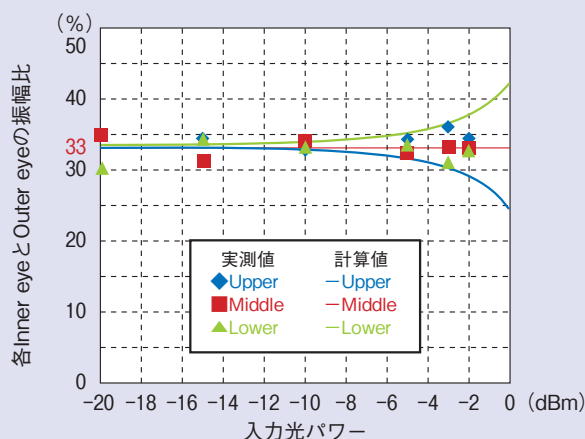


図2 pin-PDおよびAPDの直流入出力特性



(a) PAM4信号のInner eyeとOuter eye



(b) Inner eye/Outer eyeの振幅比と入力光パワーの関係

図3 出力されるPAM4信号波形への影響

力光パワーが強い領域において実線で示された実際のAPDの入出力特性との間に乖離が生じていることが確認できます。この入出力特性の非線形性はAPD内部の発熱および空間電荷効果^{*2}によるものと考えられており、その影響により出力電流が低下することになります。一方pin-PDでは、入力光パ

ワーが上昇するに伴い直線的に出力電流が観測され、非線形性は確認されま

*2 空間電荷効果：半導体の空乏領域に蓄積した空間電荷によって、空乏層内の本来の電界強度が打ち消される現象です。フォトダイオードにおいては、入力光パワーが強く、出力電流が大きいくほど顕著に発生します。APDにおいて空間電荷効果が発生すると、増倍領域の電界強度が低下するために増倍率が下がり、出力電流が抑制されます。

せん。

次に、この非線形な直流入出力特性の出力されるPAM4信号への影響を調べます。図3(a)のPAM4信号のアイパターンの図に示すように、PAM4信号は4値で構成されるため、上部(Upper)、中部(Middle)、下部(Lower)の3つのInner eyeが観測されます。理想的なPAM4信号では、個々のInner eyeの振幅は全体の振幅(Outer eye)の3分の1であり、線形性の高いシステムの場合、受信後と同じ振幅比となります。そこで、APDと線形TIA(Trans Impedance Amplifier)を実装した光モジュールにPAM4信号

を入力しその出力波形の振幅比を調べました。観測した各Inner eyeとOuter eyeの振幅比と入力光パワーの関係を図3(b)に示します。実線は、図2の非線形な入出力特性から計算された振幅比、プロットした点は実験にて得られた振幅比になります。なお計算ではMiddle Inner eyeを一定としたときのUpper Inner eye, Lower Inner eyeの変化をプロットしており、その振幅比は入力光パワーが強くなるにつれて振幅比33%から乖離していきます。一方実験値では、-2 dBmと強い入力光パワーにおいても振幅比はおよそ33%であり、入力光パワーに依存した顕著

な変化は見られません。この予想外の結果に対する説明は、詳細な検討の結果を待たなければなりませんが、入力された光が変調されているかいないかの違いにより、非線形性の出方が異なるのではないかと推測しています。本実験の範囲においては非線形な直流入出力特性がPAM4信号の受信特性へ及ぼす影響は少ないことが明らかになりました。

4チャンネルAPD-ROSAの構成

試作した4チャンネルのPAM4信号の入力に対応した200 Gbit/s APD-ROSA(Receiver Optical Sub-Assembly)の構成ならびに外観写真を図4に示します。モジュールは波長多重した光信号を分波するPLC(Planar Lightwave Circuit)型波長分離素子、4チャンネルアレイ型APDおよび線形TIAによって構成されています。400 Gbit/sの受信には本モジュールが2つ必要であり、CFP8と呼ばれるトランシーバへの収容をめざし、幅6.7 mm、長さ17.5 mm、高さ5.8 mmの小型パッケージに実装しています。実装にあたり、部品点数の削減ならびに小型化のための技術として、PLC型波長分離素子とマイクロレンズアレイの集積実装技術やAPDとキャリアのフリップチップ実装技術を活用しています⁽⁴⁾。

4チャンネルAPD-ROSAの受信特性

入力する信号に28 Gbaud PAM4信号を用いて、作製した4チャンネルAPD-ROSAの受信特性を評価しました。評価系の概要を図5に示します。送信系は波長可変光源とLN変調器を組み合わせた構成としており、パルスパターン発生器から出力されるNRZ信号を強度合成し得られた電氣的な

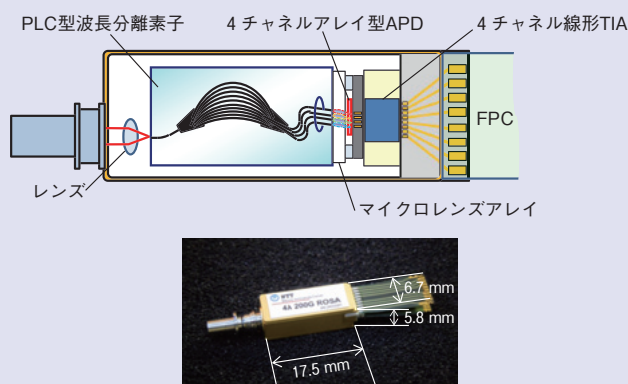


図4 200G APD-ROSAの構成および外観

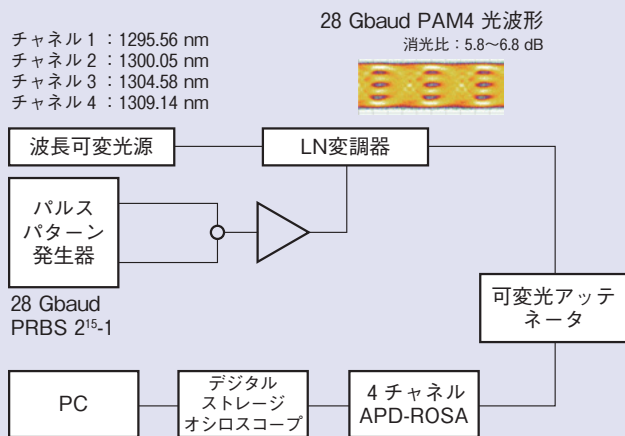
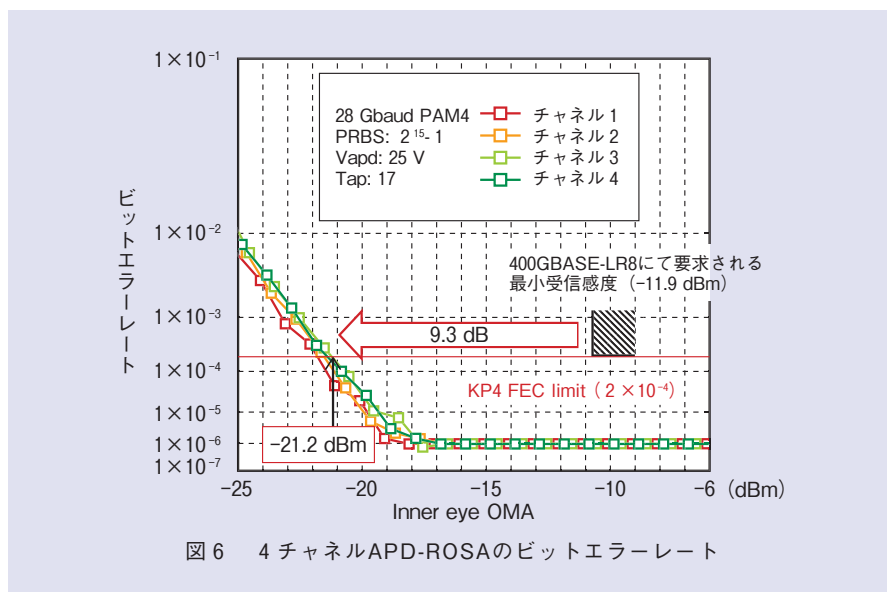


図5 28 Gbaud PAM4受信の実験構成

PAM4信号でLN変調器を駆動して28 Gbaud PAM4光信号を生成しています。光信号の消光比は5.8~6.8 dBです。光信号は、可変光アッテネータを介して4チャンネルAPD-ROSAに入力され、電気信号に変換されます。APD-ROSAの出力信号は、デジタルストレージオシロスコープによって記録され、PCでのオフライン処理にて復調し、ビットエラーレートを算出します。オフライン処理では、タップ数17のフィードフォワードイコライザによる適応等化処理を行っています。ビットエラーレートの評価は各チャンネルの信号の単独入力の下で実施し、クロストークの影響は含まれていない状態で評価しています。

各チャンネルのビットエラーレートを図6に示します。なお、 1×10^{-6} にプロットされている点は、オシロスコープに蓄積されたデータ長の中でエラーフリーであったことを示しています。ビットエラーレート 2×10^{-4} における最小の受信感度は、Inner eye OMA (Optical Modulation Amplitude)^{*3} において-21.2 dBmになります。400 GBASE-LR8 (伝送距離10 kmの規格) にて要求される最小受信感度-11.9 dBm に対し9.3 dBの余裕があることを確認しました。このことは送信系に手を付けることなく本APD-ROSAを用いる



ことのみで伝送距離を約30 kmまで拡大できる可能性を有していることを示しています。

NTTデバイスイノベーションセンタでは、この成果を2015年7月のOECC (OptoElectronics and Communications Conference) 国際会議にてポストデッドラインペーパー^{*4}として発表しています⁽⁵⁾。

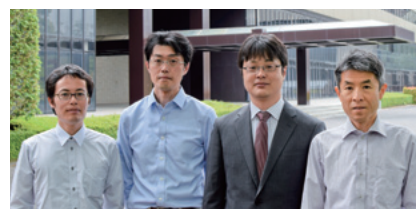
今後の展開

光モジュールのさらなる小型化のため波長分離素子、APD、TIAなどの各デバイスの集積化技術の技術改良を進めるとともに、400 Gbit/sを超えるサービスに対応していくため各デバイスおよびモジュールのさらなる広帯域化を進め、将来の1テラ級伝送サービスを支える高感度受信光モジュールの実現をめざします。

参考文献

- (1) <http://www.ieee802.org/3/bs/>
- (2) http://www.ieee802.org/3/ad_hoc/ngrates/
- (3) F. Nakajima, M. Nada, and T. Yoshimatsu: "High-sensitivity Avalanche Photodiode and Receiver Optical Subassembly Technology for 100-Gbit/s Ethernet," NTT Technical Review, Vol.13, No.10, Oct. 2015.
- (4) Y. Doi, M. Oguma, M. Ito, I. Ogawa, T. Yoshimatsu, T. Ohno, E. Yoshida, and H. Takahashi: "Compact ROSA for 100-Gb/s (4

- ×25 Gb/s) Ethernet with a PLC-based AWG Demultiplexer," Proc. of OFC 2013, NW1J.5, Anaheim, CA, U.S.A., March 2013.
- (5) Y. Nakanishi, T. Ohno, T. Yoshimatsu, Y. Doi, F. Nakajima, Y. Muramoto, and H. Sanjoh: "4×28 Gbaud PAM4 Integrated ROSA with High-Sensitivity APD," Proc. of OECC 2015, PDP3C.4, Shanghai, China, June-July 2015.



(左から) 吉松 俊英/ 三条 広明/
中西 泰彦/ 大野 哲一郎

400ギガビットイーサネットではクライアント系光通信においてもデジタル信号処理やFECによる誤り訂正が導入されようとしており、技術のパラダイムシフトが生じつつあります。そういった環境においてこそNTTデバイスイノベーションセンタが有する技術力にて光通信のさらなる発展に貢献する良い機会ですので、全力で研究開発に取り組んでいきます。

◆問い合わせ先

NTTデバイスイノベーションセンタ
企画担当
TEL 046-240-2403
FAX 046-270-3703
E-mail dic-kensui@lab.ntt.co.jp

*3 OMA: NRZ方式におけるOMAは信号“1”と信号“0”の平均パワーの差になります。PAM4方式におけるOMAはOuter eye OMAとInner eye OMAの2種類があります。Outer eye OMAは信号“3”と信号“0”の平均パワーの差になります。Inner eye OMAはPAM4信号の内側にあるアイパターンごとに定義され、信号“3”と信号“2”、信号“2”と信号“1”、信号“1”と信号“0”のそれぞれの光パワーの差になり、理想的なPAM4信号では各Inner eye OMAは等しい値になります。

*4 ポストデッドラインペーパー: 一般論文投稿の締め切り後に受け付けられる最新研究成果に関する投稿論文で、高く評価されたもの。