

## 論文の内容の要旨

論文題目 垂直入射型アバランシェフォトダイオードの高速高感度化に向けた素子設計  
およびその光通信応用に関する研究

氏 名 名田 允洋

近年のモバイルネットワークやクラウドネットワークの普及、およびそれらのネットワークを利用したデジタルコンテンツの高度化に伴い、データセンタ内外等の近～中距離におけるネットワークトラフィックが顕著に増加している。これら近～中距離のネットワーク容量の拡大を目的として、これまで米国の The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE)では、1 伝送媒体あたり 100 Gbit/s までの伝送容量を保障する 100 Gbit/s イーサネット(100GbE)が標準化されており、更なるデータセンタ内外のネットワークの大容量化に向け、200Gbit/s イーサネットや 400Gbit/s イーサネットが議論されている。いずれにおいても、データセンタにおける伝送装置の高密度集約、および大容量化に伴う顕著な消費電力の増大を避ける為、これらのイーサネットの光トランシーバへの要求条件としては、小型、低消費電力であることが大前提となる。

100GbE においては、伝送距離 2 km から最大 40 km までを、シングルモードファイバ(SMF)を用い、1 レーンあたり 25Gbit/s、LAN-WDM 波長を用いた 4 レーンの構成により、1 ファイバあたり 100 Gbit/s の伝送容量を保障している。伝送距離 2 km や 10 km であれば、100GbE のトランシーバ構成としては、Electro-absorption modulator (EAM)を集積した分布帰還型レーザ(EML)または直接変調レーザ(DML)を送信器として、PIN 型フォトダイオード(PIN-PD)を受信器として用いればよいが、伝送距離を 40 km まで保障することを考えると、PIN-PD の受光感度は不十分である。そこで、受信器に半導体光アンプ(SOA)を集積することにより、信号光が PIN-PD に入射する手前で、信号光を増幅することが考えられる。しかし SOA は、通常の実信器を構成する PIN-PD、および Trans-impedance amplifier (TIA)と比較しても大きな消費電力を有するため、光トランシーバの小型、低消費電力化が困難になる。

また、超 100GbE においては、光トランシーバの小型低消費電力化の観点から、単純に 25Gbit/s のレーンレートを適用し、レーン数を拡大するアプローチは困難であり、1 レーンあたりのビットレートの拡大が要求される。1 レーンあたりのビットレートが拡大した場合、送信器の消光比の劣化や変調速度の劣化、受光器の受信感度の劣化、更には光ファイバ内における分散の影響による信号品質の劣化により、1 レーンあたり 25Gbit/s を採用した 100GbE と比較して、顕著な伝送距離の縮減が予測される。この為、たとえば 10 km の伝送距離を確保するためにおいても、デジタルコヒーレント方式等の直接検波に依らない検波方式の採用や、SOA やファイバアンプなどの光増幅の技術が必要とされる可能性がある。しかし、これらの方式や光増幅器の採用は、100GbE までの単純な光トランシーバと比較して大規模な電気信号処理や光増幅の集積が必要

とされ、光トランシーバの小型低消費電力化が困難になる。

アバランシェフォトダイオード (Avalanche photodiode; APD) は、素子そのものが増幅作用を有するため、PIN-PD と比較して高感度での光受信が可能な受光素子である。PIN-PD においては、半導体光吸収層において入射する光子を電子に変換するため、その量子効率 $100\%$ が限度であるが、APD においては半導体光吸収層において光電変換されたキャリアを素子内で増倍するため、 $100\%$ を超える量子効率が可能になる。更には、APD は素子のサイズは一般的な PIN-PD と同等のサイズで作製することが可能であり、また消費電力も、送信器におけるレーザーダイオードやドライバ、受信器における TIA 等と比較すると、無視できる程度に小さい。これらの優れた特徴から、APD は  $100\text{G}$  および超  $100\text{G}$  次世代光通信システムにおいて適用が期待されるキーデバイスである。しかし、APD はこれまで、実用デバイスとしては  $10\text{Gbit/s}$  の動作速度までしか実現されておらず、 $100\text{G}$  級、超  $100\text{G}$  級光システムに適用するためには、作製プロセスの再現性やモジュールへの実装時のトレランスを確保したまま、飛躍的に高速性を向上させる必要がある。また、APD は PIN-PD と比較して  $30\text{V}$  程度の高い電圧が必要となるため、信頼性を保障出来得る素子構造が必要である。

本論文では、 $100\text{G}$  級、および超  $100\text{G}$  級光通信システムへの適用により、同システムにおける伝送装置の飛躍的な高密度集約化および低消費電力化を実現することを目的とした、高速、高感度 APD の設計手法、デバイスの特性、および同 APD を用いた光受信器による伝送特性について議論する。

第 2 章では上述の研究背景についてより詳細に述べる。世界全体の通信トラヒックの動向について述べるとともに、取り組むべき社会課題である、トラヒックの局在箇所について整理する。近年の通信トラヒックの大部分が、データセンタ内、およびデータセンタまでの通信網やデータセンタ間等の近～中距離に集中していることを述べ、更に今後もその傾向は顕著になっていくことを明らかにし、近～中距離の光通信の大容量化および経済化が社会課題となっており、その解の必要性を述べる。その上で、光通信における光レシーバの役割と課題について述べ、本論文の目的となる APD の目標性能や、設計に向けた要求条件を整理する。

第 3 章では、基本的な APD の動作原理や特性の制限要因について述べ、目的とする特性を有する APD の実現に向けた設計性のある要素について議論する。APD における動作速度を決定する、キャリアの輸送機構について整理し、また PIN-PD とは大きく異なる、APD 特有の要素である「インパクトイオン化」現象および APD の利得と動作帯域のトレードオフの関係について詳細に述べ、高速高利得性を有する APD を実現するための増倍層設計の設計要素について述べる。また、APD の素子やモジュールの作製手法、それらの評価手法について述べる。

第 4 章では、目的とする APD の特性を得るための素子設計上のアプローチを整理し、実際に作製する APD の素子構造を提案する。一般的な APD の素子構造として、キャリアの輸送方向

および信号光の入射方向がともに基板と垂直となる構造の「垂直入射型」と、キャリアの輸送方向と信号光の入射方向が互いに垂直となる構造の「導波路型」が挙げられるが、キャリアの移動距離と信号光が吸収層を通過する距離を独立に設計できる導波路型が原理的には高速高感度特性を得る上では有利である。一方で、導波路型は微細な導波路プロセスが必要であり、またモジュールに実装する上でも、微細な導波路に入射光を結合する必要があり、ウエハプロセス、モジュール実装の両面から、作製トレランスが小さい。垂直入射型はその両面で有利であるが、感度と動作帯域のトレードオフがより顕著である。第4章では、上述のトレードオフを克服し、垂直入射型を採用しながらも高速高感度動作を可能とする「ハイブリッド光吸収層」を提案し、最適設計を行う。また、ハイブリッド光吸収層を適用し、APDの素子作製プロセスを更に簡易化し、動作信頼性も担保する「反転型構造」を提案し、その設計について議論する。

第5章では、第4章において提案、設計した反転型APDを実際に試作し、その特徴的な動作特性について議論する。提案する反転型APDは、半導体層構造の最上部に位置するn型コンタクト層によって形成されるメサの面積で動作領域が決定され、以下の半導体層をどのような面積に加工しても動作領域には影響しないことを実験的に示す。この結果は、提案する反転型APDが、動作状態においては素子の側面に電界が発生していないことを示唆しており、APDの動作信頼性を担保するうえで有利に働いていることを述べる。

第6章では、目的とする100G級光通信システム、および超100G級光通信システムへの適用に向けて、半導体層の層構成や素子構造を最適設計し、25Gbit/s、および50Gbit/sにおける高感度動作を可能とする特性が得られていることを実験的に示す。反転型構造を適用することで、25Gbit/s動作、および50Gbit/s動作それぞれに向け、半導体層の最上部に位置するn型コンタクト層の面積の変更、およびAPDの層厚を変更するのみの軽微な最適化により、所望する帯域と感度が得られていることを示す。第6章で述べる結果により、反転型APDが、設計性の高い構造であることを示すと同時に、100G級、および超100G級光通信システムにおける光レシーバの高感度化に有望な素子であることを示す。

第7章では、第6章で述べたAPDを光レシーバへと実装し、伝送実験を行った結果を述べる。25Gbit/sにおいては光アンプを用いず40kmのエラーフリー動作を実現し、さらに4チャンネルAPDを小型集積した光レシーバにおいても40km以上のエラーフリー伝送を実証する。1レシーバでのスループットは100Gbit/sであり、この結果は本APDの100GbEへの高い適用性を示している。また将来の大規模低消費電力スイッチとして有望である100G級光電融合型パケットルータの実現に向け、25Gbit/sバースト信号に対しても高い感度でのエラーフリー動作を実証する。更に、超100G級システムに向けて50Gbit/s動作が可能な光レシーバを作製し、実際に50Gbit/s光信号に対して20kmのエラーフリー伝送が可能な高感度動作を実証する。

第 8 章は結論である。本研究のまとめとして、提案した APD が高速、高感度性、動作信頼性、素子やモジュールの作製の容易性の観点から有望であること、および目的とした 100G 級、超 100G 級光通信システムを小型低消費電力で実現できることを述べ、さらに今後の展望として多値変調への適用性と更なる高速高感度化の指針について述べる。