

## 博士論文要旨

論文題名：

### InAlAs 系超格子アバランシェフォトダイオードにおける 衝突イオン化率のモンテカルロ解析と 高速・高感度化に関する研究

わたなべ いさお  
氏名 渡邊 功

本論文は、増倍層に InAlAs 系超格子層を導入した光通信用アバランシェフォトダイオード (APD) に関する理論的考察、及び、実験的検証により構成される。増倍層に半導体超格子を導入して衝突イオン化率を人工的に制御し、バルク半導体よりも高速・高感度な特性を実現するという超格子 APD の基本概念は、1980 年代初頭に GaAs 系超格子で提案・検証されている。本研究では、これを長距離光通信に用いられる InP 系 InAlAs/InAl (Ga)As 超格子を用いて初めて実用化した。そのために、増倍特性の理論解析や基本特性の実証、高信頼化のための新構造の提案や特性検証を行った。

論文ではまず、はじめに、本研究で APD 増倍層に適用する半導体超格子構造の衝突イオン化現象について、モンテカルロ法による理論的考察を行った。理論検討に必要な物性パラメーターを得るため、超格子の障壁層として用いる半導体であるバルク InAlAs の衝突イオン化率の電界強度依存性を実験的に精度の高い値として初めて導出した。この実験をもとにモンテカルロ法を用いて、それまで不明な点の多かった衝突イオン化率の超格子構造依存性やホットキャリア挙動の解析を行った。その結果、超格子中の衝突イオン化率比は井戸層が 20 nm 程度に薄い場合に主に正孔のイオン化率抑制により増大することを明らかにし、また、矩形障壁超格子とグレーデッド障壁超格子、Sawtooth 型超格子のイオン化率比の違い等を明らかにした。

次に、従来の InAlAs/InGaAs 3 元井戸超格子 APD の暗電流が大きいという課題を解決するために、井戸層におけるトンネル暗電流を低減できる InAlGaAs 4 元井戸型超格子 APD を新規に提案し、素子設計シミュレーションを行った。その結果、超格子 APD の高周波応答の層構造依存性・ヘテロ電界強度依存性等を明らかにし、10 Gbps 用素子として従来の InP 増倍層 APD よりも最適電界強度範囲が拡大できることを示した。これをもとに、メサ構造 APD 素子を作製・評価し、高速・高感度化に必要な設計指針である増倍暗電流や利得帯域幅積 (GB 積) の超格子構造依存性を明らかにするとともに、GB 積 100 GHz を超える高速特性、InP 増倍層 APD に対して 10 Gbps において 2 dB の受信感度改善、降伏電圧や GB 積の温度依存性が小さい特長、等の InAlGaAs 4 元超格子 APD の基本特性を初めて確認した。

最後に、高速応答特性と素子実用化に必要な高い信頼性を両立するために、従来の拡散接合型プレーナ構造素子と異なり、pn 接合位置/増倍層厚と内部電界強度分布の制御を結晶成長により高精度に実現し、かつ表面リーク暗電流の経時的安定性の高い新規のプレーナ構造超格子 APD を提案し、ガードリング設計と特性検証を行った。その結果、10 Gbps における受信感度 -28.0 dBm の高感度特性と素子寿命  $1.0 \times 10^6$  時間以上の高信頼性を有する 10 Gbps 用プレーナ構造 InAlAs 系超格子 APD を初めて実現した。