

## 論文の内容の要旨及び論文審査の結果の要旨の公表

学位規則第 8 条に基づき、論文の内容の要旨及び論文審査の結果の要旨を公表する。

○氏名	渡邊 功 (わたなべ いさお)
○学位の種類	博士 (工学)
○授与番号	乙 第 537 号
○授与年月日	2015 年 3 月 6 日
○学位授与の要件	本学学位規程第 18 条第 2 項 学位規則第 4 条第 2 項
○学位論文の題名	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
○審査委員	(主査) 笠原 健一 (立命館大学理工学部教授) 沼居 貴陽 (立命館大学理工学部教授) 瀧口 浩一 (立命館大学理工学部教授)

### <論文の内容の要旨>

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と実験的検証から成る。増倍層に半導体超格子を用い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・検証された。しかしながら実際の用途が見込まれる光通信用の1.5 $\mu\text{m}$ 帯域では実用に供せられるものは実現されていなかった。学位論文では超格子構造を用いない従来型InP増倍層APDの限界を示した後、InAlAs超格子における増倍特性の理論解析や高性能な新構造InAlAs/InAl(Ga)As超格子APDの提案や実現について述べている。

論文ではまず、超格子の障壁層として用いる InAlAs の衝突イオン化率の電界強度依存性を実験的に高い精度で初めて求めた。そして、この値をもとにモンテカルロ法を用いて、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、これまで不明な点の多かった電子と正孔のイオン化率比のバリア層や井戸層の影響を明確に示した。更に矩形障壁超格子やグレーデッド障壁超格子、鋸歯型超格子のイオン化率比の違い等も理論的に解明した。次に、増倍暗電流の低減を図るために増倍層を更に InAlGaAs 4 元井戸型超格子とした APD を新規に提案した。その結果、100 GHz を超える高速特性や受信感度改善に加えて、降伏電圧や GB 積の温度依存性が小さくなるといった InAlGaAs 4 元超格子 APD の優れた基本特性を示した。さらに実用化に必要な高い信頼性を得るための新ガードリング構造によって 10 Gbps で -28.0 dBm とした高感度な受信特性を実現し、 $10^6$  時間以上の高寿命・高信頼性を有するプレーナ構造

InAlAs 系超格子 APD を初めて実現した。

<論文審査の結果の要旨>

本論文に記載された内容は InAlAs/InAl(Ga)As 超格子 APD の実現とその光通信応用に途を開く成果であり、以下の点で優れている。

- ① 本研究開始時点では InAlAs 系超格子の中の衝突イオン化率の詳細は不明であったが、これを理論的に明らかにした。そのために不純物を含まない高品質 InAlAs 結晶を用いてバルク中でのイオン化率を実験的に高い精度で求めた
- ② これを基にバンドパラメータ ( $\Delta E_{\Gamma L}$ 、 $\Delta E_{\Gamma X}$ ) を考慮し、アロイ散乱や有極性光学フォノン散乱等を含めたモンテカルロ解析を行い、衝突イオン化率の構造依存性やホットキャリア挙動を明らかにした。その結果、バリア層が厚く、井戸層が薄いほどイオン化率比は大きくなり、また超格子中の衝突イオン化率比は井戸層が 20 nm 程度と薄い場合には主に正孔のイオン化率抑制によって増大することを明らかにした。また、矩形障壁超格子とグレーデッド障壁超格子、鋸歯型超格子のイオン化率比の違いを理論的に示した。
- ③ 増倍暗電流の低減を図るために増倍層を InAlAs から更に InAlGaAs 4 元井戸型超格子層とした APD を新規に提案し、増倍暗電流が 100nA 以下、GB 積 120GHz といった従来の InP-APD の 80GHz を凌駕する優れた特性を実証した。

さらに実用化に必要な高信頼性を得るためのプレーナ構造を提案した。エッジ増倍抑制の新規ガードリングでは表面はワイドギャップ半導体からなり、GB 積 110GHz に加えて、素子寿命  $10^6$  時間 (85°C) を実現した。

本論文の審査に関して、2015 年 2 月 2 日(月)18 時 00 分～19 時 15 分、ウエストウイング 4 階電子システム系会議室において公聴会を開催し、学位申請者による論文要旨の説明の後、審査委員は学位申請者渡邊功に対して約 30 分間にわたり口頭試問を行った。各審査委員および公聴会参加者より、新規プレーナ構造での表面リーク電流抑制のメカニズム、ガードリングに Ti を採用した理由、各種のキャリア散乱の中でアロイ散乱が占める割合とそれが APD に及ぼす影響、超格子 APD の受信感度が従来構造に比べて温度依存性が小さくなる理由などの質問がなされた。いずれの質問に対しても学位申請者の回答は適切なものであった。よって、以上の論文審査と公聴会での口頭試問結果を踏まえ、本論文は博士の学位に値する論文であると判断した。

<試験または学力確認の結果の要旨>

本学学位規程第 24 条の 3 に基づき、学位申請者に対して学力確認のために専門科目(量子力学、光エレクトロニクス、電子回路)および外国語(英語)の試験を行った。試験結果を主査、副査で検討した結果、本学大学院博士課程後期課程修了者と同等以上の学力を有することを確認した。

以上の諸点を総合し、本学学位規程第 18 条第 2 項に基づき、学位申請者に対し、「博士(工学 立命館大学)」の学位を授与することが適当であると判断する。