

## 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	芝 和宏 (しば かずひろ)
○学位の種類	博士 (工学)
○授与番号	乙 第 502 号
○授与年月日	2011 年 7 月 15 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	任意多層構造受光素子に適用可能な転送行列設計手法と それを用いた高速受光素子の開発・実用化に関する研究
○審査委員	(主査) 笠原 健一 (立命館大学理工学部教授) 左貝 潤一 (立命館大学理工学部教授) 森本 朗裕 (立命館大学理工学部教授)

### <論文の内容の要旨>

本論文は光通信用受光素子の高速化に向けた理論的考察および実験的検証について行った研究をまとめたものである。受光素子の高速化には素子容量とキャリア走行時間低減が設計指針となり前者は受光領域極小化、空乏層厚膜化により実現され、一方で空乏層厚膜化はキャリア走行時間増加を招くため、両者の関係を定量的に把握した設計が重要となる。キャリア走行時間を求めるには発生キャリアの振る舞いを理論解析に反映させる必要があり、SAM-APD では吸収層で発生したキャリアが増倍層を走行し、増倍イオン化で発生した 2 次、3 次キャリアが再度吸収層を走行するので、これらの過程を取り込む必要がある。従来の計算方法は各層間の境界条件のもと電流連続に関する連立方程式から求めた電子電流密度、ホール電流密度を空乏層全領域で積分、平均化して求めていた。この場合、層構造が複雑になるに従って計算量が大幅に増加し、実際の構造には適用できないという問題があった。本論文では境界条件を転送行列計算に取り込む手法を提案し SAM-APD、さらには容量低減層など機能層を有した任意多層構造受光素子を効率的かつ精度良く設計する手法を確立した。吸収過程と増倍過程を同時に扱う一般的な転送行列を導き出すことにより複雑な素子構造や、広い動作範囲への対応を可能にした。

次に上記設計手法を用い、①25Gbps 光インターコネクション用 PIN 受光素子、②43Gbps-DPSK 用 PIN 受光素子、③10Gbps アクセスネットワーク用 APD、④100G イーサ用 25Gbps 導波路型 APD の実現に向けた研究を行った。①では容量低減層導入を提案し、マルチ・モードファイバに対応した大受光径で高速・広帯域な特性を両立させることができた。②で

は耐高光入力特性を得るための装荷型構造導入を提案し、高感度で高速な特性を両立させることができた。③では p 型濃度勾配吸収層および量産性に優れたメサ型構造を提案し、GB 積 120GHz を実現した。④では APD の高速化に向けての最適な構造としてイオン化率比に優れた薄膜 InAlAs 増倍層、p 型濃度勾配吸収層、導波路型構造を提案し、25Gbps で動作可能な APD を実現した。これらは何れも優れた特性であり、実現的なレベルにある。

#### <論文審査の結果の要旨>

光通信と一口に言っても実際には長距離の幹線系から短距離のインターコネクションまで様々な形態があり、求められる性能も異なる。本論文はこのような多様な要求に応えるために必要な受光素子の設計理論の構築とそれに基づいた高速、高性能受光素子の開発・実用化に関する研究であり、以下の諸点において高く評価できる。

1. 吸収過程と増倍過程を同時に扱うことができ、更には容量低減層など機能層を有した任意多層構造受光素子を効率的かつ精度良く設計するために境界条件を転送行列計算に取り込む受光素子の設計手法を提案した。従来の方法では構造が複雑となるに伴い、計算が煩雑となり実際的でなかった。本手法によって多様化した受光素子の設計が可能となり、高速、高性能受光素子の開発が可能となった。

2. 本転送行列設計手法を用いて、今後の光通信ネットワークの「キーデバイス」となる高速受光素子の研究を行い、優れた特性を実現した。①25Gbps 光インターコネクション用 PIN 受光素子では走行の速い電子のみが走行する容量低減層導入を提案し、大受光径化 (25  $\mu$  m) と広帯域化 (20GHz) の両立を実現した。②43Gbps-DPSK 用 PIN 受光素子では耐高光入力特性に優れた装荷型構造導入を提案し、吸収層厚、受光領域長の最適化によって 3dB 帯域 50GHz、受光感度 0.9A/W を実現した。③10Gbps アクセスネットワーク用 APD では低コストメサ型構造の実用化に挑み、最大 3db 帯域 11GHz、GB 積 120GHz を実現した。④100G イーサ用 25Gbps 導波路型 APD ではイオン化率比に優れた薄膜 InAlAs 増倍層、p 型濃度勾配吸収層、導波路型構造が高速化に最適な組み合わせであることを提案し、増倍率 7 まで 25Gbps で動作可能な APD を実現した。

本論文の審査に関して、2011 年 5 月 6 日 (金) 15 時 00 分～16 時 00 分、電子システム系演習室において公聴会を開催し、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 芝和宏に対する口頭試問を行った。各審査委員より転送行列の適用範囲やデバイス構造と特性、更には今後の受光素子の方向性など広範囲にわたる質問がなされたが、何れの質問に対しても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の結果を踏まえ、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、学力確認のために専門科目 3 科目 (応用数学、半導体物理、量子工学) 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が確認された。

以上の諸点を総合し、本学学位規程第 18 条第 2 項に基づき本論文提出者に対し、「博士（工学 立命館大学）」の学位を授与することを適当と判断した。