

氏名	まきた き く お 牧 田 紀 久 夫
授与学位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成10年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻
学位論文題目	光通信用高性能受光素子の研究
指導教官	東北大学教授 伊藤 弘昌
論文審査委員	主査 東北大学教授 伊藤 弘昌 東北大学教授 水野 皓司 東北大学教授 大野 英男

## 論 文 内 容 要 旨

光ファイバー通信は、その高速・大容量特性により現在の情報伝達網の中心をなしている。海底通信網或いは大都市間伝送等の基幹幹線系、さらにはインターネットや LAN 等の急速な拡大に伴う加入者系など、来るべき21世紀の情報産業の根幹となっている。光ファイバー通信方式は、発光素子・光ファイバー・受光素子の三要素を主体として、その性能向上に発展が支えられきた。発光素子である半導体レーザーは、1960年 GaAs 系での発振を契機とし、1970年ダブルヘテロ構造の採用による室温連続発振により初めて実用光源として認知され、実用レベルにあった Si 受光素子と共に 1970年代の光ファイバー通信黎明期を支えた。その後、伝送路である光ファイバーの進展により、すなわち石英ガラスファイバーのグレーテッドインデックス型の採用および原料高純度化により波長 1~1.5  $\mu\text{m}$  帯が極低損失領域となり、InGaAsP 系化合物半導体材料を用いた 1  $\mu\text{m}$  帯半導体レーザーおよび受光素子の開発と整合して、1980年代以降の光通信進展を支えた。さらに、シングルモードファイバーの実現およびデバイス高速化により伝送速度は増大し、現在では Gb/s 以上での大容量化が実現されるに至っている。

この様な背景において、光通信用受光素子としては InGaAsP 系化合物半導体材料を用いた素子が実用に供せられているが、より大容量の情報伝達を必要とする将来の光通信システムのためには現在よりもさらに高速応答・低雑音化が必須である。本論文では、特にイオン化衝突分離による内部増幅効果を有したアバランシェフォトダイオード (APD: Avalanche photodiode) に注目し、超格子構造におけるバンド不連続を介したイオン化率比人工制御を基本原理とする InAlGaAs 超格子 APD を次世代の高感度通信用受光素子として位置付け、結晶成長技術構築・デバイス試作を行った。この結果、素子構造最適化のもと 10Gb/s までの光通信システム搭載に十分な実用特性を実証した。

本論文の各章の要点および主要な結論を以下に述べる。

第2章では、半導体受光素子のデバイス、材料技術について論じ、~10Gb/s までの通信用素子としては内部利得効果を有するアバランシェフォトダイオードが最適であり、さらにその高性能化にはイオン化率比を制御する新たなデバイス展開が重要である事を認識した。この観点より、超格子構造におけるバンド不連続を介し電子イオン化率を誇張した、イオン化率比人工制御を特徴とする InAlGaAs 系超格子 APD を、次世代高速・大容量光通信用受光素子として

提案した。

第3章では、まず InAlGaAs 系超格子 APD 基本実証すべく構築した有機金属気相成長 (MOVPE) 法について論じ、MOVPE 法 InAlGaAs 結晶において、特徴的であった酸素が介在したディープトナールレベルを同定、実効 As 圧増加による高純度化傾向を把握した。また超格子品質を簡易に判断できる単一量子井戸構造 (Single quantum well) の 2K フォトルミネッセンス評価法を提案した。その結果、本論文で実現された InGaAs/InAlAs 超格子構造ではその界面急峻性は 1 原子層程度の揺らぎである事かつ InAlAs 層中のディープレベルを介したバンドフリッピング効果も抑制されている事が判った。さらに本章では構築した MOVPE 法により、光吸収層と増倍層を分離した実用構造である SAM (Separated absorption and multiplication) 型 InGaAs/InAlAs 超格子 APD 素子の基本試作を行った。この結果、最大増倍率 30 倍以上の実用特性を実現したが、しかしながら受信感度劣化を生じる  $\sim \mu\text{A}$  オーク过剩暗電流の発生、および MOVPE 法特有の p 型ドープント:Zn の自己拡散問題による応答劣化の問題点が明らかになった。これらの問題点に対しては、第 4、5 章の解決を図った。

また本章では、超格子 APD の基本原理検証のため、InGaAs/InAlAs 超格子構造におけるイオン化率の理論検討および検証実験を行った。検証実験は、MOVPE 法により InGaAs/InAlAs 超格子構造 PIN 型ダイオードを作製、純粹光キャリア注入法によりイオン化率を確定した。これより、本超格子材料において電子イオン化率増大現象を観測、最大イオン化率比  $\alpha/\beta \sim 15$  を得た。

第4章では、第3章において問題点として抽出された暗電流抑制のために、InAlGaAs/InAlAs 四元井戸型超格子 APD の提案・試作を行った。InAlGaAs ワイドギャップ井戸構造によりトンネル電流成分が抑圧され、従来の InGaAs/InAlAs 三元井戸型超格子 APD に比較し、1/10 以下の低暗電流化を実証した。本構造の優位性は、超格子増倍層の異なる素子で比較実験を行い、その暗電流およびブレークダウン電圧の温度特性より、四元井戸型構造のみがトンネル電流の影響が小さくかつ良好なアバランシェ降伏に基づいている事から検証された。また超格子 APD の降伏電圧の温度依存性は従来のバルク APD に 1/3 程度に小さく、通常のバルク APD における電界加速によるエネルギー獲得過程とは相違した、超格子 APD の特有のバンド不連続エネルギー獲得によるイオン化過程の傍証であると理解された。

第5章では、第3章において p 型ドープニング急峻による InAlGaAs 超格子 APD 高性能化のために構築した、ガスソース分子線結晶成長 (GS-MBE) 法 (装置概要を図 1 に示す) について論じた。GS-MBE 法による InAlGaAs 結晶は、成長温度および V/III 比により異なった表面最配列構造を呈し、As 圧に依存して CuPt 型・TP 型の自然超格子を形成する事を観測した。InGaAs/InAlAs 超格子構造に対しては、2KPL 法 (第3章において確立された評価法) および TEM 観察より良好な結晶品質を確証した。さらに InP/InAlAs タイプ II 超格子構造の作製・評価を通し、その光電流スペクトルより超格子 APD を構成する InAlAs/InP/InGaAs 系のバンド構造を明らかにした。これより InGaAs/InAlAs 超格子構

造において、伝導帯不連続量 $\Delta E_c \sim 0.55\text{eV}$ 、価電子帯不連続量 $\Delta E_v \sim 0.125\text{eV}$ を確定し、超格子 APD 原理にとって重要なバンド不連続に関する結論を得た。

また本章では、光通信用波長帯材料として新たに InGaAsP/InAlGaAs 超格子構造の提案を行い、その組成組み合わせによりタイプ I ~ II 超格子構造のバンド不連続自在制御が可能な系で有る事を予測した。さらに V 族原子の表面吸着・脱離による InGaAsP 結晶の安定成長条件メカニズムを明らかにし、高制御 GS-MBE 技術の総括として InGaAsP/InAlGaAs 超格子構造の自在成長を実証した。

第 6 章では、InAlGaAs 四元井戸型超格子 APD 素子高性能化のためにシミュレーション技術を構築、特に 10Gb/s システム適用に注視した素子構造の設計指針を明らかにした。これより、10Gb/s 素子では薄膜制御性と共に nm オーダの p 型ドープ急峻制御が重要である事を示した。以上のもと、第 4、5 章の技術構築および本設計指針に従い、ガソース分子線結晶成長法により 10Gb/s システム用 InAlGaAs 四元井戸型超格子 APD (図 2 参照) の試作を行った。得られた素子は、Be 自己拡散が抑圧された最適素子電界分布のもと、利得帯域積幅 $\sim 150\text{GHz}$ 、増倍暗電流 $\sim 6\text{nA}$ の最高特性を実現、システム適用に十分な特性を実証した。受信感度実験においては、10Gb/s 伝送速度において $-29.4\text{dBm}$ が達成され、10Gb/s 用 APD として最高値である。

また、本章では結論として InAlGaAs 四元井戸型超格子 APD の高速限界について検討し、高速特性は超格子増倍層薄膜化による GB 積とトンネル暗電流のトレードオフから決定される事を明らかにした。これにより、超格子増倍層厚  $0.16\ \mu\text{m}$ のもと実現限界は 20Gb/s システム適用素子で、その最小受光感度  $P_{\min} \sim -24.4\text{dBm}$ が予測された。

以上、本論文によって開発された InAlGaAs 四元井戸型超格子 APD は、初期的には有機金属気相成長法により作製され、純粋光キャリア注入実験等により  $\alpha/\beta$  変化率比が増大する現象が観測された。その後、過剰暗電流抑圧のために InAlGaAs/InAlAs 四元井戸構造の提案を行い、さらに精密電界強度分布実現のためにガソース分子線結晶成長法を構築し、10Gb/s までの実用特性を兼ね備えた素子を実現された。図 3 には開発された InAlGaAs 四元井戸型超格子 APD の適用域を示しており、横軸に年代軸と対応させたシステム伝送速度、縦軸には受信感度を示している。これより 1990 年台まで光通信の主流であった長距離幹線系には、受信器として InGaAs-APD 或いは高感度システムであるファイバープンプ方式が貢献してきた。しかしながら、今後都市間伝送に代表される中・近距離幹線系システム或いは加入者系高速化が進展すると予測され、その場合ファイバープンプ方式は装置が大型な事さらにはコストの面より実用的では無い。これに対し、本論文で開発された超格子 APD を用いた受信器は、半導体素子のみで構成かつ 10Gb/s までの高速応答に可能な小型受信器としての特徴があり、低コスト・量産性に優位性を有している。すなわち、実現された InAlGaAs 四元井戸型超格子 APD は、より高速化が加速される光化情報時代において、特に小型半導体受信器として中・近距離幹線系或いは高速アクセス系への適用が予測される。

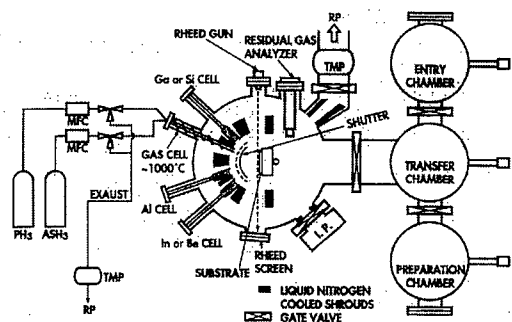


図1 ガス分子線結晶成長装置

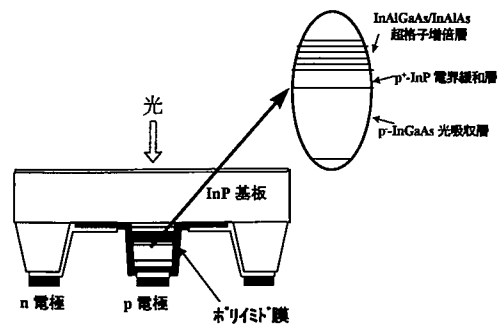


図2 InAlGaAs 四元井戸型超格子 APD

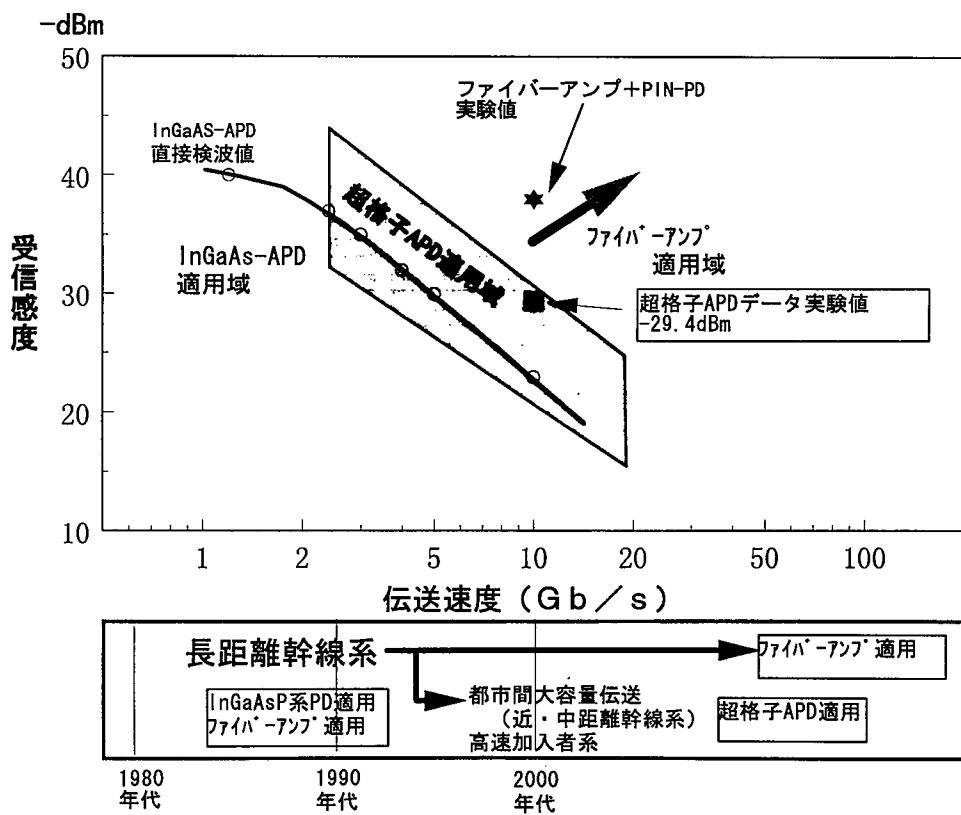


図3 本論文で開発された InAlGaAs 四元井戸型超格子 APD の位置付け

## 審査結果の要旨

光ファイバー通信はその高速・大容量特性により現代の情報伝達網の中心をなしている。本論文は、光通信システムの基本構成デバイスであるアバランシェフォトダイオード (APD) において、超格子構造におけるバンド不連続を利用したイオン化率比の人工制御を基本原理とする InAlGaAs 超格子 APD の素子設計、結晶成長技術構築ならびに試作と評価を行い、次世代光通信用受光素子として実用に十分な性能を有することを示した研究成果をまとめたもので、全文7章より成る。

第1章は序論である。

第2章は、光通信用半導体受光素子の概要について考察し、次世代高速・大容量光通信用受光素子として、超格子構造中のバンド不連続を利用したイオン化率比の人工制御を基本原理とする InAlGaAs 系超格子 APD が有用である事を明らかにした。

第3章は、有機金属気相成長 (MOVPE) 法による、InAlGaAs 系超格子の結晶成長およびそれを用いた APD について述べている。MOVPE 法 InAlGaAs 成長においては、酸素が介在したディープトナールに注目して高純度化条件を把握し、良好な界面品質を有する InGaAs/InAlAs 超格子構造を実現した。さらにイオン化率比の測定を行い、電子のイオン化率増大現象 (イオン化率比  $\alpha/\beta \sim 15$ ) を観測した。また光吸収層と増倍層を分離した実用構造 (SAM 型) APD の試作を行い、過剰暗電流の発生および MOVPE 法特有の p 型ドーピング材料 Zn の自己拡散問題の存在を明らかにした。これらに対しては、第4、5章で解決を計っている。

第4章では、暗電流抑制のために InAlGaAs/InAlAs 四元井戸構造を有する超格子 APD の提案と検証を行った。本構造では、ワイドギャップ井戸構造によりトンネル電流成分が抑圧され、良好なアバランシェ降伏形態を示し、従来の InGaAs/InAlAs 三元井戸構造に比較し 1/10 以下の低暗電流化を実現した。これは重要な成果である。

第5章では、p 型ドーピングの精密制御を目的として構築したガズソース分子線結晶成長 (GS-MBE) 法について述べている。GS-MBE 法による InAlGaAs 成長においては、自然超格子の形成を観測すると共に、ホルミットレスおよび透過電子顕微鏡像の測定により、ドーピングおよび構造が精密に制御された良好な結晶品質を確認した。さらに、InGaAs/InAlAs 系の伝導帯不連続量  $\Delta E_c \sim 0.55\text{eV}$ 、価電子帯不連続量  $\Delta E_v \sim 0.125\text{eV}$  を決定し、超格子 APD の動作原理にとって重要なバンド不連続に関する結論を得た。これは重要な結果である。

第6章では、GS-MBE 法による 10Gb/s システム用 InAlGaAs/InAlAs 四元井戸型超格子 APD の試作とその動作について述べている。シミュレーションによる最適素子構造および Be を用いた自己拡散抑圧による最適素子電界分布のもと、利得帯域幅積  $\sim 150\text{GHz}$ 、増倍暗電流  $\sim 6\text{nA}$  の、10Gb/s 用 APD として最高感度 ( $-29.4\text{dBm}$ ) を実現した。これらは重要な成果である。

第7章は、結論である。

以上本論文は、InAlGaAs 系超格子 APD の次世代光通信用受光素子としての問題点を明らかにし、低暗電流特性を有する四元井戸層構造を提案し、素子内の精密ドーピング制御を可能とするプロセス技術を構築し、受信感度および帯域共に優れた実用特性を兼ね備えた素子を実現したもので、電子デバイス工学および光エレクトロニクス発展に資するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。