

氏名	しみず なおふみ 清水 直 文
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	論工博第3802号
学位授与の日付	平成16年5月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	Ⅲ-V族化合物半導体ヘテロ接合構造中のキャリア輸送現象に関する光学的・電気的研究
論文調査委員	(主査) 教授 藤本 孝 教授 藤田 静雄 教授 立花 明知

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、Ⅲ-V族化合物半導体ヘテロ接合におけるキャリア輸送現象を明らかにすることを目的に、ダイオード構造に対して行った光学的・電気的研究の成果をまとめたものであって、7章からなっている。

第1章は序論であり、本研究の目的・位置付けについて論じている。

第2章では、GaAs/AlGaAs 結合量子井戸にキャリアを光励起した際の基底準位間の電子トンネリング機構について調べている。励起子-電子準位の共鳴電界に近い電界でトンネリングレートが最大値を取ることを見出した。それは電子は励起子準位を介してトンネリングしていることを意味する。トンネル前後の電子エネルギーの差は界面凹凸による電子準位の広がりとは一致した。得られたトンネリングレートは不純物散乱よりもむしろ界面凹凸散乱から定量的に説明できることを明らかにし、後者がレートを律速していることを示した。トンネリングレートの温度依存性は、井戸内での励起子・自由電子分布比の温度依存性の違いに起因することを示した。

第3章では、共鳴トンネルダイオード(RTD)を対象として、二重障壁内の擬束縛準位への電子の滞在を小信号等価回路中に電荷充放電として取り入れた。その結果、二重障壁内に電荷が蓄積する効果を容量として記述できること、その充放電の効果が容量-電圧特性におけるピークとして現れること、容量ピークの積分値から二重障壁内の電子滞在時間を求めるのが可能であることを明らかにした。さらにInP基板上に $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{AlAs}$  RTDを試作して、小信号解析を行い、上記モデルを実験的に検証した。このようにして得た二重障壁内での電子滞在時間は350~580 fsであり、これは二重障壁透過確率の半値全幅の計算値からもとめられた電子寿命と良い一致を見た。

第4章では新たなRTDスイッチング時間評価法を提案している。フォトダイオードによる光電変換で発生した電気パルスでRTDを駆動に用いる本EOサンプリング法は、ジッタの発生源となる同期回路が不要で高時間分解能を実現できること、フォトダイオードの応答速度を選ぶことでオーバードライブの問題を回避できること、正弦波駆動に比べてRTDにかかる負荷が軽くなることなどの特徴を有し、従来方法では不可能だった高電流密度を有するRTDのスイッチング時間を測定することが可能となった。本評価法を用いて、構造を変えた7種類の $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{AlAs}$  RTDのピーク-バレー間のスイッチング時間を系統的に調べている。その結果、障壁が薄くなるに従いスイッチング時間は短くなり、障壁1.1 nmの素子で最短の値1.4 psを得た。3章で確立した電流源と容量からなるRTD等価回路モデルによるピーク-バレー間のスイッチングの過渡応答は実験値と比較的良好一致を見た。特に、二重障壁での電子充放電の効果を容量として取り入れた場合、計算値と実験値の差は50%以内であった。この結果は、RTDのピーク-バレー間のスイッチング時間が素子のCR時定数で制限されていることを示している。

第5章では、化合物半導体ヘテロ接合ダイオード構造を持った新たな光検出器「単一走行キャリアフォトダイオード(UTC-PD)」について、その高速・高飽和出力特性を、実際に素子を試作・評価することで実証している。また、3dB帯域の素子構造依存性から光吸収層での電子拡散係数を求めている。得られた値は従来考えられていた計算値より2倍程度大きく、それは所望の帯域のUTC-PDを設計する場合、より厚い吸収層が適用できることを示す。さらに、入射光強度の増

加とともに 3dB 帯域が伸びる現象について、光吸収層内部での電流連続の式をもとに検討し、これが正孔電流によって引き起こされるセルフバイアス効果であることを示した。UTC-PD の出力飽和現象を定量的に評価し、それがコレクタ層内電子による空間電荷効果によってバイアス電圧が遮蔽されるためであると説明した。

第 6 章では、UTC-PD の 1.55-1.7  $\mu\text{m}$  の光に対する量子効率と高周波特性について、ファイバ中で発生するスーパコンティニウム光を用いて評価している。光吸収層の p 濃度が  $2.5 \times 10^{17}$  及び  $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  の素子では、波長 1.55~1.6  $\mu\text{m}$  の光に対して効率は一定であり、それより長波長側で低下し、波長 1.7  $\mu\text{m}$  付近では 1.55  $\mu\text{m}$  の時の 1/4 程度であった。この低下は入力光のエネルギーが  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  のバンドギャップに接近することによる吸収係数の低下に起因しているとした。光吸収層の p 濃度が  $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  の素子では、1.6  $\mu\text{m}$  より長波長側でも効率の急激な低下は見られず、波長 1.7  $\mu\text{m}$  付近での効率は 1.55  $\mu\text{m}$  におけるその約 40% に留まった。この p 濃度の素子について長波長側での応答速度を調べ、その低下はないことを確認した。このことは、高濃度ドーピングによるバンドギャップシュリンクが長波長側の感度強化に寄与していることを示唆する。本章で求めた光吸収層での吸収係数と 5 章で求めた光吸収層での電子拡散係数を用いて裏面光入射型 UTC-PD についてシミュレーションを行い、3dB 帯域と量子効率の関係を明らかにした。

第 7 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、III-V 族化合物半導体ヘテロ接合におけるキャリア輸送現象を明らかにすることを目的に、ダイオード構造に対して行った光学的・電気的研究の成果をまとめたものであり、得られた主な成果・知見は次のとおりである。

- 1) GaAs/AlGaAs 結合量子井戸構造における光励起された電子の基底準位間トンネリングが励起子準位を介したものであること、そのレートは界面凹凸散乱によるサブバンド間散乱で説明できること、トンネリングレートの温度依存性は、井戸内での励起子・自由電子の分布比の温度依存性の違いによることを示した。
- 2) 共鳴トンネルダイオード (RTD) における二重障壁内の擬束縛準位への電子の滞在は等価回路上で容量として記述できること、その充放電の効果が容量一電圧特性でピークとして現れること、容量ピークの積分値から二重障壁内の電子滞在時間が求められることを明らかにした。また実験により得た二重障壁内での電子滞在時間 (350~580 fs) が二重障壁透過確率の半値全幅の計算値からもとめた電子寿命と良い一致を見ること、 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{AlAs}$  RTD のスイッチング時間 (1.4~6.0 ps) が素子の CR 時定数とほぼ一致することを示した。
- 3) 単一走行キャリア・フォトダイオード (UTC-PD) の 3dB 帯域 ( $f_{3\text{dB}}$ ) から求めた光吸収層での電子拡散係数が従来示されていた計算値より 2 倍程度大きいこと、入射光強度の増加とともに UTC-PD の  $f_{3\text{dB}}$  が伸びていく現象が正孔電流によって引き起こされるセルフバイアス効果によるものであること、UTC-PD の出力飽和がキャリア走行層内の空間電荷効果によるバイアス電圧の遮蔽により説明できることを明らかにした。また、p 濃度が  $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  の UTC-PD において長波長側で感度劣化が見られないことを見出し、これが高濃度ドーピングによる光吸収層のバンドギャップシュリンクによるものであることを示した。また、裏面光入射型 UTC-PD の  $f_{3\text{dB}}$  と量子効率の関係を明らかにした。

以上、本論文は III-V 族化合物半導体ヘテロ接合におけるキャリア輸送現象を光学的・電気的手法により明らかにしたものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 16 年 3 月 9 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。