

## 審査の結果の要旨

氏名 藤井 宏昌

本論文は，“Design, Growth, and Characterization of InGaAs/GaAsP Superlattice for High Efficiency Ge-based Multi-junction Solar Cells”（高効率Geベース多接合太陽電池に向けたInGaAs/GaAsP超格子の設計・評価および結晶成長に関する研究）と題し，III-V族化合物半導体を用いた多接合太陽電池の電流整合改善による高効率化を目指した超格子挿入ミドルセルについて，キャリア輸送現象の評価・超格子構造の設計および微傾斜基板上の結晶成長技術確立への取り組みをまとめたものであり，英文8章から構成される。

第1章は序論であり，高効率太陽電池とくに多接合太陽電池の必要性，および本研究の対象であるInGaAs/GaAsP歪み補償超格子セルに関する課題と本研究の目的を述べている。

第2章では，太陽電池の基本原理や超格子における光吸収・キャリア輸送といった，本研究に関連する物理学的理論をまとめている。

第3章では，有機金属気相成長法（MOVPE）をはじめ，本研究にて行った実験手法の概論およびその実験系について述べている。

第4章では，太陽電池のキャリア輸送を解析する指標としてキャリア収集効率（Carrier Collection Efficiency: CCE）を定義し，超格子セル内部のキャリアダイナミクスを評価した。照射波長と印加電圧を変えながらCCEを測定することで，特にセル動作時において各領域で励起されたキャリアの輸送効率を詳細に調べることができる。これを用いて，結晶成長時のp型バックグラウンドドープを補償して超格子内の電界を一様にするのが高効率キャリア輸送に極めて有効であることを明らかにした。さらに，実用化に向けて深い量子井戸を多層挿入した場合に顕在化するキャリア輸送上の課題を明らかにした。

第5章では，効率的な光吸収とキャリア収集を同時に達成し，かつ高品質な結晶成長を可能にするstepped-tunnel超格子（STSL）を考案し，その有効性を実験的に実証した。提案する構造は，高In組成を用いて薄くしたInGaAs井戸層，厚さ3nm以下のGaAsP障壁層，そして両層の間に挿入する厚さ数nmのGaAs中間層から構成され，InGaAs井戸層で生成したキャリアを高次準位に熱的に励起をした後，トンネルによって効率的に輸送するという独自の発想をもとに設計している。特にキャリア輸送に最も影響するGaAsP障壁層に関しては，その

構造が前述の CCE に及ぼす影響を体系的に明らかにした。構造最適化の結果、バンドギャップ 1.23 eV の超格子 100 層を用いて大幅なセル特性の向上を達成した。

第 6 章では、前章にて設計した超格子構造を Ge ベースの多接合セルに応用することを目指し、微傾斜基板上への結晶成長技術を確立している。微傾斜基板上の超格子成長中に発生するステップバンチングを抑制するための比較的低温での MOVPE にあたり、Ga ソースとして広く用いられる TMGa の代わりに TEGa を用いることで、高品質な超格子の成長に成功した。表面拡散の促進により低温での成長安定性を向上させ、TMGa では困難であった GaAsP の薄層化を可能にした。同時に、炭素取り込みを大幅に抑制し、補償ドーピング無しで高効率なキャリア輸送を達成した。

第 7 章では、第 5 章で設計した構造を、第 6 章で確立した技術で成長することで、微傾斜基板上の超格子太陽電池を実装している。とくに、ステップバンチングもたらす層厚の波状変調が太陽電池特性に与える影響を詳細に解明した。成長温度上昇により、波状の InGaAs 層の面内被覆率が低下して光吸収が減少する一方、結晶性向上および GaAsP 障壁層の薄い領域を通じたトンネル輸送によりキャリア収集が効率化した。これらの知見に最適化した成長温度で、バンドギャップ 1.21 eV の超格子 100 層を微傾斜基板上の N-on-P セルに導入し、3 接合セルの電流整合に最適な電流密度 17 mA/cm<sup>2</sup> を得ることに成功した。

第 7 章は結論であり、上記の取り組みを総括した。

以上のように、本論文は、量子構造太陽電池におけるキャリア収集に関する新規な解析法に基づき、InGaAs/GaAsP ステップ超格子構造を考案・最適化し、さらに TEGa を用いた微傾斜基板への低温有機金属気相成長法により 3 接合太陽電池への超格子の実装と電流整合による高効率化を可能にしたものであり、電気電子工学に貢献するところが多大である。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。