

2021年 5月14日

豊橋技術科学大学長 殿

電気・電子情報工学 専攻
学位審査委員会
委員長 石川 靖彦

論文審査及び最終試験の結果報告

このことについて、博士学位論文審査を実施し、下記の結果を得ましたので報告いたします。

学位申請者	Piedra Lorenzana Jose Alberto		学籍番号	第 179201 号
申請学位	博士 (工学)	専攻名	大学院工学研究科博士後期課程 電気・電子情報工学 専攻	
博士学位論文名	Phosphide based-type II stacked quantum dot arrays enhancing carrier spatial separation for multi-junction III-V/Si photovoltaic application (III-V/Si多接合太陽電池用キャリア空間分離促進型リン系type-II 積層量子ドット)			
論文審査の期間	2021年 1月 14日 ~ 2021年 5月 10日			
公開審査会の日	2021年 4月28日	最終試験の実施日	2021年 4月28日	
論文審査の結果*	合格		最終試験の結果*	合格
審査委員会(学位規程第6条)				
学位申請者にかかる博士学位論文について、論文審査、公開審査会及び最終試験を行い、別紙論文内容の要旨及び審査結果の要旨のとおり確認したので、学位審査委員会に報告します。				
委員長	石川 靖彦			
委員	伊崎 昌伸		関口 寛人	
	若原 昭浩			印
		印		印

※論文審査の結果及び最終試験の結果は「合格」又は「不合格」の評語で記入すること。

論文内容の要旨

世界的に広く普及している Si 太陽電池をボトムセルに用いる積層型太陽電池の高効率化において、トップセルとして用いられる希釈窒化物半導体のキャリア拡散長の向上と再結合損失の低減が求められている。この後者の問題解決の為、本論文では、光吸収層中に光励起された電子・正孔を空間的に分離する積層量子ドット構造の導入を提案するとともに、その構造を結晶成長技術により実現する可能性について検討を行っている。

本論文は全 6 章から構成されている。第 1 章では、太陽電池研究の動向をまとめるとともに、当該研究の目標と位置づけを示している。第 2 章では、結晶成長及び異種接合成長の素過程に関する理論的背景、ならびに Si と格子整合する InP/GaAsPN 積層量子ドット構造に対するバンド構造の解析結果を述べている。第 3 章では、作製した試料の構造評価技術を概説している。第 4 章では第 2 章で提案された構造の実現に向けて、分子線エピタキシー法による自己形成 InP 量子ドットを均一に埋め込むための基礎データとして、GaP 上での Ga 原子の表面拡散長の温度依存性を実験的に調査している。表面拡散長の面内方位依存性が低温において交差する現象を見出したことを述べている。第 5 章では、InP/GaP 量子ドットの形成条件を実験的に検討した結果を述べている。従来の InAs 系量子ドットと異なり、低 V/III 比の条件で均一かつ構造欠陥の無い InP 量子ドットが得られること、ならびに 2 段階埋め込み成長により量子ドットの高さを制御し、均一な積層量子ドット構造を実現したことを述べている。さらに、InP(GaA)PN 積層量子ドット構造実現のための、結晶成長条件の指針について述べている。第 6 章は、論文全体を総括するとともに、今後の課題と展望を述べている。

審査結果の要旨

従来の太陽電池では、赤外域の有効利用のため、量子ドットならびに希釈窒化物半導体による中間バンド構造を用いる方法が検討されてきた。これらの太陽電池では、光吸収により発生した電子と正孔が同じ空間的位置に存在するため、電子・正孔の再結合による光電流の損失を無視できない本質的な問題があった。本研究では、従来の半導体技術では、ほとんど注目されてこなかったタイプ II のバンド配列を、光励起により発生した電子・正孔の空間的分離に積極的に利用することで、再結合損失を大幅に低減可能な構造を提案している。

提案構造の実現に向けて、Si 基板上に積層可能な GaPN 系半導体を母材、InP を自己形成量子ドットの候補として取り上げ、分子線エピタキシー法における両者の結晶成長特性を調べるとともに、Ga 原子の表面拡散長の面内方位依存性が低温領域において交差することを見出している。さらに、InP 量子ドットの形成過程を詳細に調べた結果、P 系の化合物半導体においては、レーザ応用で広く検討されてきた As 系の自己形成量子ドットと異なり、低成長速度かつ低 V/III 比の条件において、欠陥のない均一なサイズの量子ドットが得られることを明らかにしている。

加えて、InP/GaPN の積層量子ドット形成に対して、埋め込み層を 2 段階で形成する 2 段階埋め込み法を提案し、構造欠陥の大幅な抑制に成功している。積層の各段階で InP ドット形成に要する時間を実測した結果、In 原子の表面偏析により InP ドット表面における In 供給量が上層ほど過多になること、2 段階埋め込み法では偏析した In が成長中断時に再蒸発することで供給量が制御され、これが欠陥発生抑制に寄与することを明らかにしている。

これらの知見の多くは、従来の As 系量子ドットの報告例とは正反対の現象であり、結晶成長素過程の理解を深める視点から学術的に重要な知見を与えるものである。また、太陽電池の高効率化の観点からも、光吸収層内部にキャリアの再結合を抑制する構造を内蔵した素子実現の道を拓くものであり、工学的にも高く評価できる。

以上により、本論文は博士（工学）の学位に相当すると判断した。

(各要旨は 1 ページ以上可)