

審査の結果の要旨

氏名 中村 徹哉

本論文は、「内部発光効率解析に基づく宇宙用 III-V 族太陽電池の高性能化に関する研究」と題し、III-V 化合物多接合太陽電池における各サブセルの動作状態、特に最大電力出力点におけるキャリアダイナミクスを定量的に調べ、損失の発生領域とその要因を明らかにし宇宙用太陽電池の変換効率の向上を図る研究成果について述べたものであり、全7章から構成されている。

第1章は序論であり、本論文の要旨が述べられている。

第2章は本研究の背景と目的を詳しく解説している。太陽電池の理論最大効率を与える Shockley-Queisser モデル、半導体材料中における外部・内部発光限界について、各モデルの仮定を整理し、これらの理論最大値と現状の太陽電池の変換効率の差（損失）の要因を実験的かつ定量的に得るための課題に関し述べている。特にエレクトロルミネッセンス（EL）強度および外部量子効率（EQE）の定量計測の重要性と本研究で用いた実験的手法について論じている。

第3章では、本研究で世界最高水準の宇宙用3接合太陽電池に対して行ったEL強度およびEQEの定量計測による外部発光限界からの損失の定量化について論じている。また内部発光限界からの損失と比較を行い、非発光再結合損失と光学的な損失、およびその割合を明らかにしている。さらに実験で得られた内部発光効率を再結合レートの式から導出したABモデルを用いて解析し、非発光再結合損失が空乏領域の非発光再結合中心密度に依存していることを明らかにしている。

第4章では、宇宙用太陽電池のキャリア寿命の放射線照射効果について評価している。第3章で提案したABモデルを応用して放射線照射前後の空乏領域と中性領域のキャリア寿命を求め比較することで、宇宙用3接合太陽電池における主要な出力低下要因である電圧劣化について領域ごとに影響を調べている。また先行研究で報告されている放射線により形成される欠陥種との比較解析を行った結果、3接合太陽電池の中で電圧劣化の大半を占めるGaAsミドルセルでは、空乏領域と中性領域で非発光再結合中心として電氣的に活性化している放射線欠陥種が異なり、またそれらの欠陥種のキャリア寿命損傷係数は中性領域の方が空乏領域よりも1000倍以上大きいとしている。

第5章では、前章で得られた結果を基に空乏領域の非発光再結合損失を低減させる2つの方法について議論している。具体的に、空乏領域に多重量子井戸（MQW）構造を

挿入する方法と第二に pn 接合をヘテロ接合化する方法について論じている。まず MQW 構造では、キャリアを量子構造の局所領域に閉じ込める効果を用い、実効的な非発光再結合損失を低減できることを示している。次のヘテロ pn 接合構造では、空乏領域の一部を真性キャリア密度の低いワイドバンドギャップ材料内に形成することで、空乏領域における実効的なショックレー・リード・ホール再結合レートを低減できることを明らかにしている。いずれの手法も従来にない新規構造として損失低減による高性能化が期待できる。

第 6 章では、宇宙用太陽電池において寿命末期の変換効率を向上させるための太陽電池構造の指針について論じている。

第 7 章は結論であって、本研究で得られた成果を総括するとともに、将来展望について述べている。

本論文の特筆すべき研究成果として、EL 強度および EQE の定量計測による外部発光限界からの損失の定量化と内部発光限界からの損失と比較を行い、非発光再結合損失と光学的な損失、およびその割合を明らかにしたこと、また再結合レートの式から導出した AB モデルを用いて解析し、非発光再結合損失が空乏領域の非発光再結合中心密度に依存していることをクリアに示したこと、3 接合太陽電池の中で電圧劣化の大半を占める GaAs ミドルセルでは、空乏領域と中性領域で非発光再結合中心として電氣的に活性化している放射線欠陥種が異なり、またそれらの欠陥種のキャリア寿命損傷係数は中性領域と空乏領域で大きく差があることを示したこと、さらに今後検討の余地は残しているものの、多重量子井戸 (MQW) 構造を挿入する方法、pn 接合をヘテロ接合化した構造等により低欠陥密度化を図り高効率化が可能であることを示すことができた点、などが挙げられる。

以上のように、本論文は、小型かつ軽量であることが求められるだけでなく、初期の高い変換効率に加え、放射線耐性を高める必要がある宇宙用 III-V 化合物多接合太陽電池に対し、各サブセルの動作状態、特に最大電力出力点におけるキャリアダイナミクスを定量的に調べ、損失の発生領域とその要因を明らかにし宇宙用太陽電池の変換効率の向上を目指した内容であり、先端学際工学、特に太陽光発電分野、放射線耐性を高めた宇宙用太陽電池、計測評価技術分野に貢献するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (工学) の学位請求論文として合格と認められる。