

論文の内容の要旨及び論文審査の結果の要旨の公表

学位規則第 8 条に基づき、論文の内容の要旨及び論文審査の結果の要旨を公表する。

○氏名	廣庭 大輔 (ひろにわ だいすけ)
○学位の種類	博士 (工学)
○授与番号	乙 第 536 号
○授与年月日	2015 年 3 月 6 日
○学位授与の要件	本学学位規程第 18 条第 2 項 学位規則第 4 条第 2 項
○学位論文の題名	Cu₂ZnSn(S,Se)₄ 太陽電池セルの高品質ヘテロ接合形成に関する 研究
○審査委員	(主査) 高倉 秀行 (立命館大学理工学部教授) 福井 正博 (立命館大学理工学部教授) 峯元 高志 (立命館大学理工学部准教授)

<論文の内容の要旨>

現在主流である結晶シリコンに次ぐ太陽電池材料として、化合物半導体薄膜である Cu(In,Ga)(S,Se)₂ [CIGSSe]が注目されており商業生産が本格化している。一方、CIGSSe に含まれるレアメタルであるインジウムの価格高騰が懸念されている。そこで、レアメタルを含まない、即ち、地殻に豊富に含まれる元素から構成される新材料である Cu₂ZnSn(S,Se)₄ [CZTSSe]に大きな期待が寄せられている。本論文は、CZTSSe 薄膜太陽電池の高効率化に関する研究である。

本論文ではまず、先行している CIGSSe と新材料である CZTSSe の物性、デバイス動作の比較を行った。その結果、CZTSSe ではヘテロ接合界面における欠陥の影響が大きく、開放電圧が CIGSSe と比較して低い値に留まっている可能性が示唆された。

次に理論的な検討として、CZTSSe の詳細な物性値を文献および実験結果から得ることで、CZTSSe 薄膜太陽電池のデバイスシミュレーションによる高効率化設計を行った。あわせて、実験的な検討として、CZTSSe 薄膜への表面処理とアニール処理の検討を行い、CZTSSe のバルク品質を向上できることを、フォトルミネッセンス法やホール効果測定などの詳細な半導体物性評価によって明らかにした。

続いて、従来用いられてきた CdS バッファに代えて、(Zn,Mg)O と従来よりも薄い CdS バッファを積層させたハイブリッドバッファ層を開発することで高品質ヘテロ接合の形成を試みた。その結果、従来と同程度の高効率デバイスの作製に成功した。

最終的に上記の高効率化技術を適用することで世界最高水準の変換効率である 11.5%を達

成した。

<論文審査の結果の要旨>

本論文は、地殻に豊富に存在する元素から構成される新材料である $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S,Se})_4$ [CZTSSe]を光吸収層に用いた薄膜太陽電池の高効率化に関する研究である。先行して実用化されている $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ と新材料である CZTSSe との物性・デバイス動作の相違を明確にし、高効率化の課題を明らかにした上で、デバイスシミュレーションを用いた最適化設計ならびに実験的な高効率デバイス作製プロセスの研究を行った。本論文は、以下の2点について特に評価できる。

(1) 溶液による表面処理および低温域 ($\sim 300^\circ\text{C}$) のアニール処理が CZTSSe 薄膜の品質改善に重要であることを、詳細な半導体物性評価 (フォトルミネッセンス法, ホール効果測定など) を通じて明らかにした。さらに、デバイス作製と評価を通じて、これら物性値と太陽電池性能の関係を定量的に世界で初めて明らかにした点が大いに評価できる。

(2) CZTSSe 薄膜太陽電池において、デバイス性能を左右するヘテロ接合界面品質をフォトルミネッセンス法によって定量的に評価できることを世界で初めて明らかにした。また、 $(\text{Zn,Mg})\text{O}$ と薄い CdS 層を合わせたハイブリッドバッファ層を提案し、上記の評価方法を積極的に活用することで、最適な成長条件を明らかにし、高効率デバイスの作製に成功した点が高く評価できる。

また、今回開発した上記の高効率化手法を用いて CZTSSe 薄膜太陽電池を作製し、世界最高水準の変換効率である 11.5%を達成した点も評価できる。

本論文の審査に関して、2015年2月2日(月)13時00分~14時40分ウエストウイング4階電子システム系院生研修室において公聴会を開催し、学位申請者による論文要旨の説明の後、審査委員は学位申請者廣庭大輔に対する口頭試問を行った。各審査委員および公聴会参加者より、世界最高効率のデバイスと本研究のデバイスとの半導体物性・素子構造的な相違、本研究で開発した高効率化プロセスのメカニズム、本研究で用いた太陽電池作製法の優位性、実用化を考えた場合に解決すべき課題、などの質問がなされたが、いずれの質問に対しても学位申請者の回答は適切なものであった。よって、以上の論文審査と公聴会での口頭試問結果を踏まえ、本論文は博士の学位に値する論文であると判断した。

<試験または学力確認の結果の要旨>

本学学位規程第24条の3に基づき、学位申請者に対して学力確認のために専門科目_(数学、電気回路、半導体)および外国語(英語)の試験を行った。試験結果を主査、副査で検討した結果、本学大学院博士課程後期課程修了者と同等以上の学力を有することが確認された。

以上の諸点を総合し、本学学位規程第18条第2項に基づき、学位申請者に対し、「博士(工学 立命館大学)」の学位を授与することが適当であると判断する。