

別紙1 (博士論文の審査結果の要旨)

専攻名 システム創成科学専攻

氏名 張 孝彰

透明導電膜は太陽電池内の光励起キャリアの効率的な収集に必要な構成要素の一つであり、高い変換効率を達成するためにはより幅広い波長範囲の光を透過できる透明導電膜が必要とされている。しかしながら、従来の透明導電膜材料は高い電子濃度と低い移動度に起因する強い自由キャリア吸収とプラズマ反射の影響を受け、波長 $1\mu\text{m}$ を超える赤外領域における透過率が低く、課題が残されている。本研究で着目した酸化カドミウム(CdO)系材料は本質的に高い移動度を示すことから、赤外透過率の高い低抵抗薄膜を得ることが可能であり新しい透明導電膜の有力候補と考えられる。バンドギャップ拡大のため、ZnO と混晶化した $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{O}$ (ZnCdO)が報告されているが、Cd 組成によって結晶構造が CdO の岩塩構造から ZnO のウルツ鉱構造へと変化することなどの影響により、既存の透明導電膜材料に匹敵するバンドギャップは実現されておらず、さらなる研究が必要とされている。本論文では、分子線エピタキシー法により ZnCdO の薄膜成長を行い、下地の結晶基板が成長膜の組成、結晶構造、光学特性などに与える影響を明らかにすることでバンドギャップ拡大についての指針を示している。また、ZnCdO における Al ドーピング効果を明らかにするとともに、岩塩構造 ZnCdO において従来よりも大きな光学バンドギャップを実現している。

本論文は、第1章から第6章で構成されている。

第1章では、本研究の背景、目的及び内容を概説している。

第2章では、本研究で用いられた薄膜成長方法及び各種評価方法を述べている。

第3章では、分子線エピタキシー法を用いてサファイア基板上に基板温度を変化させて ZnCdO 薄膜

の成長を行うことで、ZnCdO 成長に適した基板温度を明らかにしている。また、Cd 供給量比を変えて ZnCdO 薄膜を成長することで、薄膜の Cd 組成 x と結晶構造、光学特性、電気特性など基礎物性との関係を明らかにしている。本章では Cd 組成 $x=0.6$ において、光学バンドギャップ 3.0 eV を有する岩塩構造 ZnCdO を得ている。

第4章では、結晶性の改善とバンドギャップの増加を目的として、下地基板に岩塩構造 MgO(100)基板を用いて、様々な Cd 組成を有する ZnCdO 薄膜の成長を行い、その特性を明らかにしている。MgO 基板上では、岩塩構造 ZnCdO が Cd 組成 $x \geq 0.59$ の範囲で単結晶成長することを明らかにするとともに、光学バンドギャップ 3.08 eV の岩塩構造 ZnCdO を得ている。

第5章では、MgO 基板上への岩塩構造 ZnCdO 成長時に Al を添加することで、ZnCdO の結晶性、電気特性、光学特性への Al ドーピング効果を調べている。Al 供給量の増加により ZnCdO の電子濃度が増加すること、Al 濃度 7.8% において $1.5 \times 10^{21}\text{ cm}^{-3}$ の高い電子濃度が得られることを明らかにしている。Cd 組成を変化させた Al ドープ ZnCdO を成長することで、Al がウルツ鉱構造および岩塩構造 ZnCdO に対して効率的なドナーであることを示している。高い電子濃度が得られた結果、Cd 組成 $x=0.7$ において、光学バンドギャップ 3.45 eV 、抵抗率 $1 \times 10^4\ \Omega\text{-cm}$ 、かつ波長 $2\ \mu\text{m}$ までの範囲で高い透過率を有する岩塩構造 ZnCdO を実現している。

第6章では、本研究で得られた成果についてまとめられている。

以上のように、本論文の研究内容は工学的に貴重な知見を多く含み、工学の進展に寄与するところが大きいと認められる。また、これまで、3編の査読付論文が国際的に著名な学術論文誌に掲載され、高く評価されている。令和4年2月8日に実施した学位論文公聴会においても種々の質問がなされ、いずれも著者の説明により質問者の理解が得られた。以

上の審査結果に基づき、本論文は博士（工学）の学位を授与するに値すると判断され、審査委員全員一致で合格と判定した。