

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 13129 号
------	---------------

氏 名 福田 雅大

論文題目

GeSn/GeSiSnへテロ構造の形成および光電特性の制御に関する研究
(Study on formation and control of optoelectronic property of GeSn/GeSiSn heterostructures)

論文審査担当者

主査	名古屋大学	教授	中塚 理
委員	名古屋大学	教授	松永 克志
委員	名古屋大学	教授	岸田 英夫
委員	名古屋大学	講師	黒澤 昌志

論文審査の結果の要旨

福田雅大君提出の論文「GeSn/GeSiSnヘテロ構造の形成および光電特性の制御に関する研究」は、光電融合デバイスとしてのIV族半導体レーザーの実現に向けて、GeSnおよびGeSiSn混晶半導体のエネルギーバンド構造を制御したGeSn/GeSiSnヘテロ構造の形成、およびその光電特性に関する研究をまとめたものである。本論文は、全6章より構成される。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的について述べている。

第2章では、GeSn/GeSiSnヘテロ構造の形成手法や結晶構造および光電特性の評価手法について記述している。

第3章では、GeSiSnクラッド層がヘテロ構造のエネルギーバンド構造およびフォトルミネッセンス(PL)特性に与える影響を調査した。GeSiSnおよびGeSn層の成長温度をそれぞれ200および150°Cと制御することで、幅広いSi組成のGeSiSn層を有するヘテロ構造を形成し、エネルギーバンド構造のSi組成依存性を調べた。その結果、Si組成の増加に伴いGeSiSn/GeSnヘテロ界面におけるエネルギーバンドオフセット量が増大し、特にSi組成50%とすると価電子帯および伝導帯端オフセット量が150および330meVと電子、正孔の閉じ込めに必要な十分大きな値となることを示した。さらに形成したヘテロ構造の光電特性を詳細に調査した。その結果、クラッド層をGeからSi組成23%のGeSiSnにすることで伝導帯端バンドオフセット量が増大し、効果的なキャリア閉じ込めが実現され、PL発光強度の増大が示された。一方で、より高Si組成のGeSiSn層をクラッド層として用いた場合、より高いバンドオフセット量を有するにもかかわらずGeSn層の結晶性の劣化により発光強度が減少することを見出した。これらの結果より、本構造の光電デバイス応用には、高バンドオフセット量と優れた結晶性の両立が重要であることが明確化された。

第4章では、発光効率の向上のためのヘテロ構造中GeSn層の歪緩和による直接遷移化に向け、下層のGeSiSnの歪緩和による大格子定数化を検討した。歪緩和の手法として仮想Ge基板およびBイオン注入Ge基板上への成長に着目し、ヘテロ構造を形成した。その結果、イオン注入Ge基板上への成長においてGeSn層の歪緩和がより促進されることを見出した。理論計算からGeSn層は直接遷移型であることが示唆され、イオン注入基板上への成長による歪緩和の有用性が実証された。さらに、形成したヘテロ構造の光電特性を調査した。その結果、歪緩和率が高いイオン注入Ge基板上へ形成したヘテロ構造からは鋭いPL発光ピークが観測され、理論計算の結果を考慮すると直接遷移由来のピークであることがわかった。一方、歪緩和に伴う結晶性の劣化によるPL発光強度の減少も顕在化し、結晶性改善が課題であることも示された。

第5章では、GeSnの高結晶性と直接遷移の両立に向け、歪緩和に依らない直接遷移化を検討した。第1の手法として歪GeSnの高Sn組成化に着目し、ヘテロ構造を形成した。その結果、Sn組成の増大に伴い結晶性の劣化が顕著になり、PL発光強度の減少が明らかとなった。そこで第2の手法としてGeSnへの高濃度n型ドーピングによる擬似的な直接遷移化に注目した。n型ドーパントとしてSbを用いて n^+ -GeSnを形成し、光電特性を詳細に調査した結果、Sb濃度の増大に伴いPL発光強度が増大することを実証した。この結果は、発光効率の増大には伝導帯の電子濃度増加が効果的であることを示している。また、発光強度の測定温度依存性からキャリア遷移過程の同定を行った。その結果、Sb濃度 10^{20}cm^{-3} において擬似的な直接遷移化が示唆された。さらに、 n^+ -GeSnを用いたヘテロ構造を形成し、エネルギーバンド構造と光学特性の関係を詳細に調査した。その結果、 n^+ -GeSn/GeSiSn界面において価電子帯端における n^+ -GeSnからGeSiSnへの正孔のトンネル伝導によって、発光が消失する可能性が推測された。正孔の閉じ込めを実現すべく、クラッド層としてn-SiGeを用いた結果、発光強度が顕著に増加した。この結果から、n-SiGe層を用いてバンド構造を適切に制御することで n^+ -GeSn層への効果的なキャリア閉じ込めを実現できることが示された。

第6章は本研究の総括であり、本研究で得られた結論および今後の展望が述べられている。

本研究は、GeSnおよびGeSiSn混晶のエネルギーバンド構造を制御したGeSn/GeSiSnヘテロ構造の形成とその結晶学的、光学的物性を詳細に調べたものである。その結果から、半導体ヘテロ構造においてエネルギーバンド構造と結晶性の相関性を考慮した適切な設計と制御が必要であることを実証しており、工業上、学術上寄与するところが極めて大きい。よって、本論文の提出者である福田雅大君は、博士(工学)の学位を受けるに十分な資格があるものと判定した。