

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 11473 号
------	---------------

氏 名 山羽 隆

論 文 題 目

IV族三元混晶薄膜の結晶成長および電子物性制御に関する研究

(Study on crystal growth and control of electronic property of group-IV semiconductor ternary alloy layers)

論文審査担当者

主査	名古屋大学	教授	財満 鎮明
委員	名古屋大学	准教授	中塚 理
委員	名古屋大学	教授	宇佐美 徳隆
委員	名古屋大学	教授	鳥本 司

論文審査の結果の要旨

山羽隆君提出の論文「IV族三元混晶薄膜の結晶成長および電子物性制御に関する研究」は、電子および光学デバイス応用に向けた様々なIV族半導体混晶薄膜の結晶成長、およびその結晶構造および電子物性の制御に関する研究をまとめたものであり、全7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、本研究で用いた結晶成長の形成手法をはじめとする試料作製技術について記述している。

第3章では、Ge基板上に格子整合した高Sn組成 $Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$ 薄膜のエピタキシャル成長を試み、さらに様々な組成の低歪 $Ge_{1-x-y}Si_xSn_y/Ge$ ヘテロ接合におけるエネルギーバンド構造を明らかにした。薄膜中の歪量低減により、平衡固溶限を超える15%の高Sn組成 $Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$ 層においても、高い結晶性を維持できることを明らかにしている。また、 $Ge_{1-x}Sn_x$ と比べ、 $Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$ は高い熱処理耐性を有することを見出している。混晶中の原子配列にも着目し、 $Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$ 中のSn原子がGeと優先的に結合することを示唆する結果を得ている。さらに光学特性評価から、Sn組成3~15%のGeと格子整合した $Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$ 層のバンドギャップを0.86~1.15 eVと評価し、組成制御によりバンドギャップの変調が可能であることを明らかにした。さらに、価電子帯オフセットの評価と合わせ、Sn組成8~15%という広い領域において、 $3k_B T$ を超える価電子帯および伝導帯オフセットの存在を実証した。これらの結果は、従来のSiプロセスと親和性の高い無歪IV族半導体ヘテロ接合のtype-Iエネルギーバンド構造を初めて実験的に示した重要な知見である。

第4章では、 $Ge_{1-x-y}Sn_xC_y$ および $Si_{1-x-y}Sn_xC_y$ 三元混晶薄膜の成長を行い、格子置換位置C組成およびそのエネルギーバンド構造へSn導入が与える影響を明らかにした。 $Ge_{1-x-y}Sn_xC_y$ 層について、Sn導入によって、格子置換位置C組成を効果的に向上できることを見出した。C組成の増大について、Sn-C結合の優先的な形成という観点から議論を行った。さらに、 $Ge_{1-x-y}Sn_xC_y$ 層のエネルギーバンド構造の評価から、C導入によるエネルギーバンドギャップ増大の効果を示した。また、 $Si_{1-x-y}Sn_xC_y$ 層について、Sn導入による $Si_{1-y}C_y$ の結晶化温度の低減、および結晶性向上を見出した。さらに、Sn組成増加に伴う格子置換位置C組成の増大を実証した。また、光学特性評価によって、C導入による E_1 の遷移エネルギーの増加を明らかにした。これらの結果から、C導入によるバンドギャップの増大およびSn導入による格子置換位置C組成の増大化を示しており、SnおよびCを導入したワイドギャップIV族半導体三元混晶の可能性を見出した。

第5章では、絶縁膜上における多結晶 $Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$ 層の固相成長法による結晶成長を行い、Sn導入により結晶成長へ与える影響およびその電気的特性を解明した。Sn導入によるアモルファス $Si_{1-x}Ge_x$ の結晶化の促進を見出した。Sn組成10%の場合、多くのSnが析出しており、欠陥密度も増加する一方で、Sn組成2%の場合、Sn組成0%の場合と比べて、Sn析出のない結晶化、および多結晶層の結晶粒径の増大を示した。また、Sn導入による結晶粒径増大に伴い、 $Si_{1-x}Ge_x$ 層の正孔移動度が $30 \text{ cm}^2/V\text{-s}$ から $Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$ 層の $74 \text{ cm}^2/V\text{-s}$ まで向上することを実証した。これらの結果から、多結晶 $Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$ が三次元集積デバイス応用に期待できる材料であることを示した。

第6章では、高品質な完全歪緩和のバルク $Si_{1-x}Ge_x$ として、Traveling Liquidus Zone (TLZ) 法により作製された $Si_{1-x}Ge_x$ 基板に着目し、 $Si_{1-x}Ge_x$ 基板の結晶構造を評価し、歪Ge層の成長を試みた。TLZ法による $Si_{1-x}Ge_x$ 成長において、SiおよびGe基板同様に高い結晶性を有することを示した。また、 $Si_{1-x}Ge_x$ 基板に対して、アルカリ性および酸性溶液を用いた洗浄、および真空中における 710°C の熱処理による表面清浄化の有効性を示した。その結果、 $Si_{1-x}Ge_x$ 基板の清浄表面を得て、圧縮歪量1.3%を有する歪Ge層の成長を実現した。これらの結果より、歪Ge層の形成に向けて、TLZ法を用いた高品質な $Si_{1-x}Ge_x$ 基板のストレッチャー応用の可能性を見出した。

第7章は、本研究の総括であり、各章のまとめ、および今後の展望について述べている。

本研究は、IV族混晶半導体のエピタキシャル成長および多結晶成長を行い、そのエネルギーバンド構造やキャリア移動度などの電子物性を評価し、その各元素の組成依存性を明らかにした。IV族半導体は、MOSFETや太陽電池の主要な材料となり得る。従来のSiプロセスと高い親和性を有するIV族半導体のみを用いた多機能集積回路実現の可能性につながる多数の成果を見出しており、工業上、学術上寄与するところが極めて大きい。よって、本論文提出者山羽隆君は、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。