

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 11471 号
------	---------------

氏 名 浅野 孝典

論文題目

GeSn系IV族半導体のエピタキシャル成長と結晶欠陥の制御
(Control of epitaxial growth and defects of GeSn-related group-IV semiconductors)

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	齋藤 晃
委員	名古屋大学	教授	宮崎 誠一

論文審査の結果の要旨

浅野孝典君提出の論文「GeSn系IV族半導体のエピタキシャル成長と結晶欠陥の制御」は、Ge系電界効果トランジスタにおける歪技術およびIV族半導体混晶によるバンド構造制御に向けた、 $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ および $\text{Ge}_{1-x-y}\text{Si}_x\text{Sn}_y$ 混晶薄膜のエピタキシャル成長ならびに、結晶性、歪および欠陥構造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、Ge(Si)Sn層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。また、結晶性の評価手法および歪構造やSn組成の定量評価方法について説明している。

第3章では、高Sn組成かつ高品質な結晶性を有するGeSn層の形成指針の構築に向けて、GeSn層の結晶性のSn組成および基板面方位 (Ge(001)、Ge(110)、およびGe(111)) への依存性を詳細に解明した。Sn組成増大に伴うGeSn層の結晶性の低下や表面ラフニング、および基板面方位に依存して発生する欠陥構造を明らかにした。Ge(110)およびGe(111)上に低温成長したGe層中には双晶や積層欠陥が形成されるが、1%程度のSnの導入によって欠陥形成が抑制され、エピタキシャル成長が促進されることを見出している。欠陥形成し易いGe(110)基板において、歪構造と欠陥構造との関係を明らかにし、GeSn層の転位制御手法を示した。また、GeSn層の歪緩和の制御のために歪エネルギーの制御の重要性を実証した。

第4章では、高いSn組成と結晶性を両立したGeSn層の形成に向けて、水素をサーファクタントとして成長中に導入したエピタキシャル成長を詳細に調査した。水素の導入によって、GeSn層の三次元島成長を抑制し、表面平坦性を維持した二次元的な成長を実現した。その結果、比較的高Sn組成 (5.0%) かつ厚い膜厚の (150 nm) の圧縮歪GeSn層における、結晶の均一性改善を実証した。化学的に不活性な窒素分子やヘリウムを導入した場合には結晶性の向上は観察されず、結晶成長への水素特有の効果を確認している。また、GeSnを用いた金属-酸化物-半導体 (MOS) キャパシタの容量-電圧 (C-V) 特性の測定によって、GeSn層の電気的特性についても評価しており、水素の導入によって、非ドープGeSn (Sn: 5%) 層中のイオン化アクセプタ濃度の1桁程度の低減を見出している。これは空孔欠陥の低減に由来すると推測しており、デバイス応用上重要な知見である。

第5章では、様々なSiおよびSn組成のGeSiSn層をGe(001)基板上に形成し、結晶性および表面形態へSn組成、歪構造、および成長温度が及ぼす影響を詳細に解明した。比較的小さな伸長歪 (0.2%) の条件においても、 $\text{Ge}_{0.67}\text{Si}_{0.27}\text{Sn}_{0.06}$ 層中における面内方向の周期的な組成ゆらぎが存在することを明らかにした。このような結晶の不均一性は、成長温度の増大により改善されないことも示している。一方、圧縮歪 (0.3%) の状況下において成長した $\text{Ge}_{0.67}\text{Si}_{0.24}\text{Sn}_{0.09}$ 層は、伸長歪の場合と比較して、均一性が向上することを見出している。

第6章では、GeSnの素子応用に向けて、GeSnエピタキシャル層中の結晶欠陥とその電気的特性をMOSキャパシタのC-V特性を用いて評価している。低温 (150° C) において成長した非ドープのエピタキシャルGeおよびGeSn層中に形成される欠陥への成長雰囲気、Sn組成、および熱処理の影響を明らかにした。窒素およびヘリウム雰囲気においてエピタキシャル成長したGeSn (Sn: ~5%) 層中には、多量のアクセプタ準位の欠陥が形成される一方、水素 (H_2) 雰囲気中においては、欠陥密度の小さいGeSn層を形成できることを実証した。また、6%のSnの導入は、欠陥密度を1桁程度増大させることを明らかにした。成長後の熱処理についても検討しており、欠陥形成と消滅に対する熱処理温度の影響を明らかにした。

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

本研究は、Ge基板上に成長したGeSn薄膜の結晶性、歪、および欠陥等の結晶構造をX線回折、透過電子顕微鏡を用いて詳細に調べ、また薄膜の電気的特性をMOSキャパシタのC-V測定から調べたものである。その結果、GeSn層の成長条件と結晶性および電気特性との系統的な関係を明らかにしている。さらに、本材料系のデバイス応用へ向けて、サーファクタントの導入や歪の制御による結晶性の改善を実証しており、工業上、学術上寄与するところが極めて大きい。よって、本論文提出者浅野孝典君は、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。