

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 13130 号
------	---------------

氏 名 JEON Jihee

論文題目

Study on Heavily n -type Doping for Ge and $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ Epitaxial Layers

(Geおよび $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ エピタキシャル層への高濃度 n 型ドーピング技術に関する研究)

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	白石 賢二
委員	名古屋大学	講師	黒澤 昌志
委員	名古屋大学	教授	宮崎 誠一

論文審査の結果の要旨

JEON Jihee君提出の論文「Study on Heavily *n*-type Doping for Ge and Ge_{1-x}Sn_x Epitaxial Layers (GeおよびGe_{1-x}Sn_xエピタキシャル層への高濃度*n*型ドーピング技術に関する研究)」は、次世代の高性能トランジスタの実現に向けて、高濃度アンチモンドーピング (Sb) ゲルマニウム錫エピタキシャル層の結晶成長とその結晶物性および電気的特性の相関を解明し、その制御技術を議論した報告である。本論文は6章からなり、各章の概要は以下の通りである。

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、本研究における試料作製、測定評価方法に関する説明を行っている。はじめに高濃度にSbドーピングGeSn層の分子線エピタキシー (MBE) 法による結晶成長について、MBE法の原理とエピタキシャル層成長の詳細な試料作製条件を述べながら説明している。次に、ニッケル (Ni) 層堆積やNiスタノジャーマニド電極形成法について、作製条件を述べ、コンタクト抵抗率を測定するための円形伝送線路モデル (CLTM) について説明している。さらに高濃度SbドーピングGeSn層の結晶構造、電気的性質および化学結合状態の分析手法について、測定原理および評価のための理論を説明している。

第3章では、in-situ Sbドーピングを用いた高Sb濃度GeおよびGeSn層のエピタキシャル成長の実施について述べ、その結晶構造および電子物性の分析結果を議論している。高濃度Sbドーピングを実現するために、150°Cの比較的低温の非熱平衡条件下においてin-situ Sbドーピングエピタキシャル成長を実施することにより、平衡固溶限界を超える高濃度SbドーピングGeおよびGeSnエピタキシャル層の成長を実証したのは重要な成果である。Sn組成6%で疑似格子整合 (pseudomorphic) 的に成長させたGeSn層の結晶構造をX線回折法により詳細に評価している。その結果、Sb組成の増加によって、GeおよびGeSnエピタキシャル層の結晶性が顕著に改善されることを示している。加えて、Hall効果測定によって電子濃度と電子移動度の相関を評価した結果、高濃度Sbドーピングにも関わらず電子移動度の向上を見出している。これは、Sbのサーファクタント効果によるエピタキシャル層の結晶性改善と、高*n*型ドーピングによるΓ点を含むマルチバレイ伝導が効果的に寄与したものと議論している。

第4章では、高濃度SbドーピングGeおよびGeSnエピタキシャル層の結晶学的、電気的な熱安定性を調べ、議論している。結晶構造の観点から、400°Cの熱処理後もSbドーピングGeSn層が圧縮歪を維持する一方、Sbの顕著な偏析および析出を抑制することを見出した。しかし、電気的特性およびSbの化学結合状態の評価からは、電子濃度および電気的に活性化しているSb濃度が400°Cの熱処理後にSbの平衡固溶限界程度にまで減少することを示した。

第5章では、金属/SbドーピングGeSn接合の結晶学的、電気的特性を種々のドーピング条件において調べ、それらのコンタクト抵抗率を検証している。最も高い電子濃度を実現したSbドーピングGeおよびGeSn試料において、 $10^{-9} \Omega \cdot \text{cm}^2$ という世界最高水準の超低コンタクト抵抗率を実証したのは重要な成果である。また、コンタクト抵抗率低減の理由として、界面鏡像効果によるSBHの低減などについて定量的に議論している。

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。

以上のように本論文では、低温MBE成長を駆使して作製した超高濃度SbドーピングGeおよびGeSnエピタキシャル層について、その結晶物性および電気的特性を系統的に評価し、金属/高濃度ドーピング*n*型Ge界面の結晶性、電気的特性の制御について論じている。その結果として本論文では、平衡固溶限界を超える高電子濃度GeSnエピタキシャル層の形成および*n*型Geに対する超低コンタクト抵抗率を実証しており、その成果、技術は工学の発展に寄与するところが大きいと判断できる。よって、本論文の提出者であるJEON Jihee君は博士 (工学) の学位を受けるに十分な資格があると判断した。