

論文審査の結果の要旨および担当者

| | |
|------|---------------|
| 報告番号 | ※ 甲 第 12303 号 |
|------|---------------|

氏 名 鈴木 陽洋

論文題目

金属/Ge界面の電子物性と電気伝導特性制御
(Control of electronic and electrical conduction properties at
metal/Ge interfaces)

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 | 宮崎 誠一 |
| 委員 | 名古屋大学 | 教授 | 浅野 秀文 |
| 委員 | 名古屋大学 | 教授 | 財満 鎮明 |

論文審査の結果の要旨

鈴木陽洋君提出の論文「金属/Ge界面の電子物性と電気伝導特性制御」は、ゲルマニウム (Ge) チャンネル電界効果トランジスタにおける金属/Ge接合のコンタクト抵抗率低減に向けて、金属/Geコンタクトの電子物性と電気伝導特性にIV族混晶中間層が及ぼす影響を系統的に明らかにしている。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、ゲルマニウム錫 ($\text{Ge}_{1-y}\text{Sn}_y$) 及びシリコンゲルマニウム錫 ($\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x-y}\text{Sn}_y$) エピタキシャル層の形成手法、及びショットキーダイオードの作製技術について詳述している。また、ダイオードの電気的特性の評価手法、及び極薄結晶層の結晶構造評価の手法について詳しく説明している。

第3章では、金属/Ge界面への金属的 $\text{Ge}_{1-y}\text{Sn}_y$ 中間層の挿入が、その電気伝導特性に及ぼす影響について詳細に述べている。まず、Ge(001)基板上に50°Cの低温堆積により形成した、膜厚3nmの高Sn組成 ($y > 20\%$) $\text{Ge}_{1-y}\text{Sn}_y$ エピタキシャル層の結晶構造のSn組成依存性を明らかにしている。その結果、最大69%の格子置換位置Sn組成を有し、かつSn析出のない $\text{Ge}_{1-y}\text{Sn}_y$ エピタキシャル層の形成を実証している。本結果は、Ge基板上への固溶限界を超える高Sn組成 $\text{Ge}_{1-y}\text{Sn}_y$ エピタキシャル層成長において、堆積温度の低減と膜厚制御による歪エネルギーの低減が重要であることを示した有意義な成果である。さらに、本結果に基づき、幅広いSn組成 ($20\% \leq y \leq 69\%$) を有する様々な $\text{Ge}_{1-y}\text{Sn}_y$ エピタキシャル層を中間層とした金属/ $\text{Ge}_{1-y}\text{Sn}_y$ /n-Ge(001)ショットキーダイオードの電流密度-電圧 (J - V) 特性から、界面のショットキー障壁高さ (SBH) を定量的に明確化している。その結果、 $\text{Ge}_{1-y}\text{Sn}_y$ が金属化するSn組成の領域 ($30\% \leq y \leq 100\%$) において、Sn組成の増大に伴いSBHが0.5eVまで低下する傾向が見出した。また、理論計算より予測された金属的 $\text{Ge}_{1-y}\text{Sn}_y$ の仕事関数に対し、SBHは 0.38 ± 0.08 の傾きで依存することが示された。多結晶Sn/n-GeコンタクトのSBHが、金属的 $\text{Ge}_{1-y}\text{Sn}_y$ エピタキシャル層/n-Geコンタクトよりも低いことを考慮すると、金属的 $\text{Ge}_{1-y}\text{Sn}_y$ /Geコンタクトにおけるフェルミレベルピニング (FLP) の緩和は、界面における欠陥密度の低減のみでは説明するのは難しい。金属的 $\text{Ge}_{1-y}\text{Sn}_y$ は、Al、Au等の典型的金属とは異なり、フェルミ準位付近の電子の状態密度が小さく、Geへ染み出す電子の量が少ないためと考察している。その結果、FLPが緩和され、SBHが低下したと結論づけた。本結果は、Geに対するコンタクト材料として、電子状態密度が小さい電極材料が有用であることを示す重要な知見である。

第4章では、金属/n-GeコンタクトのSBHの更なる低減に向けて、Geと格子不整合が小さい $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x-y}\text{Sn}_y$ 中間層の挿入に着目し、その検討結果を報告している。Ge(001)基板上に様々なSi及びSn組成を有する $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x-y}\text{Sn}_y$ エピタキシャル層を形成し、Geとの格子不整合を定量的に明らかにした。その結果、Snに対するSiの組成比が小さい $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x-y}\text{Sn}_y$ エピタキシャル層の場合、Geとの格子不整合は比較的小さいのに対し、Si組成比が大きい場合は、格子不整合も増大する傾向を見出した。これは、Siの弾性係数がGe、Snよりも大きいためと考察している。様々な組成の $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x-y}\text{Sn}_y$ /Ge中間層を挿入した、金属/ $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x-y}\text{Sn}_y$ /n-GeコンタクトのSBHは、 $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x-y}\text{Sn}_y$ /Geヘテロ界面の格子不整合が小さいほど低下することを見出した。また、仕事関数の異なる様々な金属電極を有するショットキーダイオードのSBHを系統的に評価した結果、 $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x-y}\text{Sn}_y$ /Geヘテロ界面の格子不整合が小さいほど、FLPの度合いが弱まることを示し、ヘテロ界面の欠陥密度の低減がFLPの緩和に有効であることを実証した。また、 $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x-y}\text{Sn}_y$ /Geヘテロ界面の格子不整合が同程度の試料間では、SBHが0.3eV程度異なることを見出し、 $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x-y}\text{Sn}_y$ の組成によって電荷中性準位が異なることに起因すると推測している。

第5章は本研究の総括であり、本研究により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、金属/Geコンタクトの電子物性と電気伝導特性に対するIV族混晶中間層の影響を系統的な試料作製と分析に基づいて、定量的かつ詳細に解明し、IV族混晶中間層による金属/Ge界面SBHの制御技術に向けた指針を明確化した。本技術から得られた成果は、次世代の超々大規模集積回路やナノエレクトロニクス工学の進展に貢献する重要な知見であり、工業上、学術上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鈴木陽洋君は、博士 (工学) の学位を受けるに十分な資格があると判定した。