

## 審査の結果の要旨

氏名 伴 芳祐

本論文は、「IV 族強磁性半導体  $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ における キャリア濃度の制御、磁性、バンド描像」と題し、全 5 章より成り、日本語で書かれている。本論文では、IV 族強磁性半導体  $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$  におけるホウ素 (B) 添加によるキャリア (正孔) 濃度と電気伝導率の制御、磁気物性、およびバンド構造の描像と強磁性機構についての研究成果を述べている。

第 1 章は「序論」であり、スピントロニクスと強磁性半導体に関する研究の背景と研究目的を述べている。その中で、現在まで主に研究されてきた III-V 族強磁性半導体および IV 族強磁性半導体 ( $\text{GeMn}$ ,  $\text{GeFe}$ ) の研究の経緯と問題点を述べている。その中で、Si 技術と整合性が良く真性の IV 族強磁性半導体である  $\text{GeFe}$  に注目し、本論文の研究対象としての位置づけと研究目的を示している。

第 2 章は「ホウ素(B)ドーピングによる低 Fe 濃度  $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$  ( $x = 1.0, 2.3\%$ )の正孔濃度制御」であり、 $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$  ( $x=1.0\%$ ,  $2.3\%$ )にアクセプターとして B 添加を行い、正孔濃度を  $10^{18}\text{cm}^{-3}$  から  $10^{20}\text{cm}^{-3}$  まで 2 桁程度、絶縁体 (半導体) 的伝導から金属的伝導に至るまで変えることに成功し、その範囲では有意な磁性やキュリー温度の変化が見られないことを示した。この結果は、後の章でキャリア誘起強磁性の観点での強磁性の起源の検証に利用される基礎的知見を与えるものである。

第 3 章は「 $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$ におけるホッピング伝導とバンド描像」であり、 $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$  ( $x = 1.0 \sim 14.0\%$ , B 添加濃度  $y = 0$  (アンドープ),  $4.4 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ ) について、電気伝導特性を系統的に測定し、それを解析することにより、 $x$  と  $y$  に依存するバンド描像を提示した。また、抵抗率の温度依存性の ES-VRH モデルによる解析や正孔濃度  $p$  の測定結果から、不純物バンドをホッピング伝導する描像を示した。またこの描像は  $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$  の異常ホール効果および正孔移動度の測定と解析の結果とも整合することを明らかにした。

第 4 章は「光キャリアによる  $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$  のキャリア誘起強磁性の検証」であり、レーザー照射により  $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$  ( $x = 14.0\%$ )に光キャリアを生成し、抵抗率や磁気特性を測定することで、キャリア誘起強磁性の観点から強磁性の起源を検証した。照射時の  $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$  ( $x = 14.0\%$ )の抵抗率の温度依存性を ES-VRH モデルでの解析し、試料表面においてホールが蓄積し Fe 不純物バンド伝導から価電子帯伝導へ変わるバンド描像を示した。この描像に基づき、Fe 不純物バンドの正孔が媒介する二重交換相互作用が  $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$  の強磁性の起源であると同定した。本章の照射実験の結果は、第 3 章のバンドと正孔伝導の描像と整合するものであることを示している。

第 5 章は、「結論と展望」であり、本論文で得られた結果のまとめと今後の展望を述べている。

以上これを要するに、本論文は、現在のエレクトロニクスデバイスと整合性が良い IV 族ベースの強磁性半導体である  $\text{Ge}_{1-x}\text{Fe}_x$  を研究対象とし、ホウ素 (B) の添加、Fe 濃度の変化、および照射などによってキャリア (正孔) 濃度と電気伝導率を制御し、様々な試料について伝導特性と磁気物性を詳細に測定することによって、正孔の伝導機構とバンド描像を明らかにし、強磁性機構についての知見を与えたものであって、スピントロニクス材料および電子材料工学の発展に寄与するところが少なくない。よって本論文は、博士 (工学) の学位請求論文として合格と認められる。