

## 審査の結果の要旨

氏名： レ デウック アイン (Le Duc Anh)

本論文は、「Properties and device applications of new Fe-based ferromagnetic semiconductor and heterostructures (新規 Fe ベース強磁性半導体およびそのヘテロ構造の物性とデバイス応用)」と題し、英文で書かれている。本論文では、n 型強磁性半導体(In,Fe)As のバンド構造と磁気物性の制御、そのデバイス応用可能性とともに、他の新規 Fe ベース強磁性半導体への展開についての研究成果を述べている。

第1章は「Introduction and the aims of this work」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状況を述べている。その中で、現在まで主に研究されてきた Mn ベース III-V 族強磁性半導体の問題点を述べ、それらの解決に向けて、n 型強磁性半導体(In,Fe)As を始め新規 Fe ベース強磁性半導体材料の展望と研究状況を述べ、本論文の位置づけと目的を示している。

第2章は「Properties of ultrathin (In,Fe)As heterostructures: Observation of quantum size effect and the control of ferromagnetism by wavefunction engineering」である。低温分子線エピタキシー (LT-MBE) 法によって GaAs(001)基板上に成長した InAs/(In,Fe)As/InAs 三層構造において、磁気円二色性測定 (MCD) により磁気特性を評価し、三層全体の膜厚が 40 nm 以下の試料では量子サイズ効果が起こることを観測し、(In,Fe)As の電子キャリアが伝導帯に存在して長いコヒーレンス長を持ち、その波動関数が両隣の InAs 層にも広がっていることを示している。また精密なウエットエッチング法で InAs/(In,Fe)As/InAs 三層構造を表面から削り量子井戸の電子波動関数を移動させることによって、量子井戸全体のキュリー温度を制御可能なことを示している。キュリー温度の変化を平均場 Zener モデルによって説明することができ、(In,Fe)As 量子井戸で見積もった大きな *s-d* 交換相互作用エネルギーについても論じている。

第3章は「Electrical control of ferromagnetism by wavefunction engineering in (In,Fe)As quantum wells」であり、AlSb バッファ層/GaAs 基板上に成長した InAs/(In,Fe)As/InAs 三層からなる量子井戸構造の波動関数を電気二重層トランジスタのゲート電圧で操作し、量子井戸全体の磁気特性を電氣的に制御可能であることを示している。磁気特性を電氣的手法で制御するために、磁性層内のキャリア濃度を変える従来の方法に比べて、キャリアの波動関数と(In,Fe)As 層との重なりを変えることによってキュリー温度を制御する本方法は、高い制御自由度を持つことを実証し、またサブピコ秒の高速動作および消費電力を  $10^{-4}$  ~  $10^{-6}$  倍に大幅に減少できる可能性があることを示している。

第4章は「Study on the band structure of (In,Fe)As by tunneling spectroscopy using Esaki diodes」であり、n-(In,Fe)As/p-InAs のスピネキサダイオード構造を作製し *I-V* 特性によって(In,Fe)As のバンド構造を調べている。キュリー温度が 45 ~ 65 K の(In,Fe)As 試料の伝導帯は低温で 40 ~ 50 meV 程度の自発スピン分裂エネルギーを有することを明らかにし、このスピン分裂が Fe 濃度、温度、外部磁場に依存すること示している。さらに大きい外部磁場で(In,Fe)As 膜の磁化を膜面内で回転し、トンネル異方性磁気抵抗(TAMR)効果を観察して、(In,Fe)As バンド構造の各成分(伝導帯、価電子帯、不純物帯)の磁気異方性と相対的なエネルギー位置関係を調べている。これらの結果に基づいて(In,Fe)As の強磁性機構と Fe ベース磁性半導体の磁気特性の異なるホスト材料に対する化学トレンドについて論じている。

第5章は、「Growth and characterization of insulating ferromagnetic semiconductor (Al,Fe)Sb」であり、新たな絶縁体的 Fe ベース強磁性半導体(Al,Fe)Sb の成長と物性を示している。LT-MBE 法によって GaAs(001)基板上に成長した(Al<sub>1-x</sub>,Fe<sub>x</sub>)Sb 薄膜(*x* = 0-14%)の結晶構造と物性を、種々の構造評価手法、磁気輸送測定、磁気円二色性測定、磁化測定によって明らかにしている。Fe 濃度 10%以下の試料では閃亜鉛型結晶構造を維持し、低温で絶縁体になってもキュリー温度 40K の真性強磁性半導体であることを示し、この材料の強磁性機構及び(In,Fe)As の強磁性機構との比較について論じている。

第6章は「Conclusions and future perspectives」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、新規 Fe ベース強磁性半導体 n 型(In,Fe)As について、超薄膜ヘテロ構造における量子サイズ効果、電界効果トランジスタ構造における磁気特性の電氣的な制御と波動関数工学を実験的に示し、スピネキサダイオード構造におけるトンネル分光によってバンド構造を明らかにするとともに、(In,Fe)As の電子誘起強磁性の起源と Fe ベース磁性半導体の磁性について異なるホスト材料に対する化学トレンドを議論し、さらに新しい絶縁体的 Fe ベース強磁性半導体(Al,Fe)Sb を作製しその基本物性を明らかにした。本論文で得られた研究成果と新しい知見は、スピントロニクス、固体物理学、および電子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。