

## 審査の結果の要旨

氏名 秋山 了太

本論文は、「Magnetic and transport properties of Mn-doped magnetic semiconductors: Influence of structural homogeneity and inhomogeneity (Mn ドープ磁性半導体における磁性と伝導特性: 構造的均一性と不均一性の影響)」と題し、英文で書かれている。本論文では、に関する研究成果を記述しており、全5章から成る。

第1章は「Introduction」であり、スピントロニクス分野のこれまでの流れと、その中で磁性半導体が研究されるようになった背景を述べ、特に本研究で中心的に扱う GaAs に Mn をドープした GaAs:MnAs 微粒子系と Ge に Mn をドープした  $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$  を取り上げ、その概要を示している。そして、磁性半導体としてこれまで主に研究されてきた構造的に均一性の高い膜と、第二相の析出やドーパントの疎密によって構造的に不均一性を示す膜についてそれぞれの特徴を述べた上で、構造的均一系に加えて不均一系膜における物質科学的な観点からの物性探求、そしてデバイス応用の可能性について述べるという本論文の位置付けを示している。

第2章は「Transport and magnetism of the heterostructures containing zinc-blende MnAs ferromagnetic nanoparticles」であり、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  $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$  をアニールすることで得られる、閃亜鉛鉱型 MnAs 微粒子を含むヘテロ構造について、伝導特性を中心に物性評価を行なっている。GaAs:MnAs を含む本構造は、GaAs:MnAs 部が強磁性 MnAs 微粒子のために構造的に不均一となっており、微粒子系に特徴的な特性を示す。縦方向伝導の温度依存特性から低温域では非弾性コトンネルが支配的であり、昇温に従ってシークエンシャルトンネルが現れてくることを示している。そして非弾性コトンネルが低温で支配的になるに従って、磁気抵抗(MR)が増大してゆくことを示している。磁気抵抗の起源については、キャリアの伝導路に強磁性微粒子が一つしかないこと、MR の急峻な温度依存性と外部磁場方向依存性などから、トンネル異方性磁気抵抗効果(TAMR)が最有力であることを述べている。

第3章は「Structures, magnetic properties and magneto-transport of  $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$ 」であり、第2章では第二相である MnAs 微粒子の析出した系の示す特性を述べたのに対し、本章ではドーパントの Mn が不均一な分布を示す系における特性について述べている。作製した  $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$  薄膜を X 線回折、透過電子顕微鏡(TEM)、小角 X 線散乱(SAXS)、反射磁気円二色性 (MCD) 測定、磁化測定、電気伝導測定などを用いて、Mn ドープ濃度を軸として多角的な評価を行なっている。構造的には、 $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$  層はダイヤモンド型構造を保持しながら若干のアモルファス領域を含んでおり、第二相の析出は確認されず、また Mn 原子は  $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$  層全体に分布し、Mn ドープ濃度を増すほどに Mn リッチな領域の形状が変化してゆくことが示されている。磁気的には、強磁性相は単一磁気相由来であることが示され、 $x=0.14$  においては面直の磁気異方性が確認されたことが示されている。また面内電気伝導において 3.5K において比較的大きな 40%ほどの正の MR が観測され、抵抗の温度依存特性で観測された急峻な落ち込みの温度がブロッキング温度と一致し、ホッピング相関長の見積りが Mn リッチな領域間の距離に一致する。これらの実験結果から、Ge(111)基板上に成長した  $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$  層における強磁性がパーコレーションモデルで説明できることを示し、不均一な系における長距離強磁性の発現を示している。

第4章は「Magneto-transport in the epitaxial  $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x/\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y/\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$  or Co magnetic tunnel junctions (MTJs)」であり、 $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$  膜のデバイス応用の可能性を示している。強磁性アモルファスナノコラムを含有する  $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$  電極、 $\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y$  障壁、Co 電極の層を成長し、磁気トンネル接合(MTJ)構造を作成、磁気依存伝導を測定したところ、面内、面直の両方の磁場において磁気依存伝導が得られた。これは  $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$  をスピン注入・検出電極として用いることができる可能性を示している。

第5章は「Concluding remarks and outlook」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、GaAs:MnAs 含有ヘテロ構造、および  $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$  強磁性半導体の構造と磁性を詳細に評価したもので、前者においては強磁性微粒子系で初めてトンネル異方性磁気抵抗効果を観測、不均一系に現れるスピン依存伝導特性を明らかにし、後者においては Mn ドープ濃度の変化による Ge(111)基板上  $\text{Ge}_{1-x}\text{Mn}_x$  層の均一・不均一構造の制御、ヒステリシスを持つ大きな正の磁気抵抗効果、および不均一系における長距離強磁性の発現を示したもので、電子物性工学およびスピントロニクスの発展のため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。