

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 アーサン・モハम्मド・ナズムル

本論文は「Epitaxial Growth and Properties of Ferromagnetic MnAs Thin Films on Semiconductors and Mn  $\delta$ -doped GaAs Based Heterostructures」(半導体基板上の強磁性 MnAs 薄膜および Mn デルタドープ GaAs をベースとしたヘテロ構造のエピタキシャル成長と物性)と題し、英文で書かれている。本論文は、半導体基板上にエピタキシャル成長した強磁性 MnAs 薄膜と Mn デルタドープ GaAs を含むヘテロ構造に関する研究成果を記述しており、全6章から成る。

第1章は「Introduction (序論)」であり、本研究の背景を解説し、半導体をベースとする材料及びヘテロ構造中にスピンに起因する機能を導入するという観点から、III-V 族半導体をベースとした新しい磁性材料やヘテロ構造、特に、1) MnAs/GaAs 等の強磁性金属/半導体ヘテロ構造、及び2) InMnAs や GaMnAs 等の希薄磁性半導体などの研究が行われてきたが、これらの問題点を指摘するとともに、本論文の目的と構成を述べている。

第2章は、「Magneto-optical properties of ferromagnetic MnAs thin films on Si and GaAs (Si 及び GaAs 半導体基板上に成長した強磁性金属 MnAs 薄膜の磁気光学特性)」と題し、Si(001), Si(111)及び GaAs(001), GaAs(111)B 基板上に成長した MnAs 薄膜の磁気光学スペクトルを測定することによって、電子構造を実験的に明らかにした結果を述べている。MnAs は室温以上 (313K) の強磁性転移温度を持つ NiAs 型六方晶の強磁性金属であるが、Si(001), Si(111), GaAs(001), GaAs(111)B 基板上に分子線エピタキシー(MBE)で成長した(1100), (1101)及び(0001)の成長面方位を持つ MnAs 単結晶薄膜の反射磁気円二色性(MCD)スペクトルを測定した結果、MCDの強度・スペクトル形状ともに MnAs の成長方位に大きく依存することを見出し、この結果は MnAs 薄膜の結晶磁気異方性のために生ずると説明している。また、MCDは MnAs エピタキシャル膜の結晶性に依存して顕著に変化し、GaAs 基板上に成長した MnAs の結晶性は Si 基板上に成長したものより優れているために、MCD が強く観測されたとしている。MnAs の電子構造に関してはいくつかのモデルが存在するが、本研究で得られた MCD スペクトルは Goodenough が提案したイオンモデルに良く一致していることを示し、さらに、フルポテンシャル線形マフィンティン軌道法(FLMTO)を用いたカー楕円率の計算結果にも非常に良く一致することを示した。すなわち MnAs 薄膜の電子構造に対しても理論モデルを実証する実験結果を与えている。

第3章は、「Epitaxial growth and magnetic properties of MnAs/Si(111) Heterostructures (MnAs/Si(111)ヘテロ構造のエピタキシャル成長と磁気特性)」と題し、Si(111)半導体基板上に成長した MnAs 薄膜の初期成長過程および膜質やモフォロジと磁氣的性質の関係について調べた結果を述べている。強磁性金属/半導体構造においては、平坦な表面及び急峻なヘテロ界面を得ることが重要な課題となっており、強磁性トンネル接合などのデバイス作製には原子的に平坦な界面を得ることが必要とされる。また、Si 基板上の強磁性 MnAs 薄膜に関する研究は既存の半導体デバイス及び回路技術と互換性を保ち今後の新しいスピンエレクトロニクスデバイス作製及び応用に寄与すると期待できる。本章で採用した Si(111)表面と MnAs(0001)面の原子配置はその対称性が類似していること、互いの面間の格子ミスマッチが3%と小さいことから、良質なエピタキシャル成長が促進されることを指摘している。Si(111)基板上に MnAs 薄膜を成長する際、成長条件として  $As_4/Mn$  のフラックス比と基板温度  $T_s$  を変えながら系統的に調べたところ、MnAs 薄膜の成長モードは  $As_4/Mn$  比と  $T_s$  が低い方が成長モードが2次元的になり原子的に平坦な表面が得られること、 $As_4/Mn$  比と  $T_s$  を上げてゆくと成長モードは3次元的で MnAs はドット構造になり磁気特性が変化し磁気異方性が生じることを示した。このように、成長条件を制御することによってある程度所望の磁気特性(保持力及び飽和磁化)が得られることは将来のスピンエレクトロニクスデバイス作製に自由度を与える、としている。

第4章は、「Epitaxial growth and properties of Mn- $\delta$ -doped GaAs (GaAs 中に Mn を  $\delta$  ドープした薄膜のエピタキシャル成長と物性)」と題し、GaAs 中に Mn を  $\delta$  ドープした構造の成長、構造評価、

電気伝導特性について記述している。 $\delta$ ドーピングの特長は、局所的により高密度の不純物を添加することができること、さらに高密度のキャリア生成が可能であることである。低温 MBE で成長される III-V 族ベースの磁性半導体材料 InMnAs や GaMnAs 等では磁性イオンである Mn の濃度を上げることができれば高い磁性転移温度が得られると理論上予測されているが、一般に III-V 族半導体中では Mn の固溶限界は低く、低温 MBE を用いたとしても Mn 濃度を 10%以上上げることは困難である。本章では、MBE 成長における  $\delta$ ドーピングによって Mn の固溶限界に関係なく高濃度の Mn を GaAs 中に添加することができることを明らかにしている。まず、この Mn  $\delta$ ドーブ構造の構造評価を二次イオン質量分析(SIMS)及び透過電子分析装置(TEM)によって行い、Mn 原子をモノレイヤー以下の濃度で  $\delta$ ドーブした場合、Mn 原子は原子レベルで急峻なプロファイルで局在し、この構造は成長温度 300°Cまで安定に保たれること、成長温度 400°Cでは表面偏析によって Mn の分布は GaAs 層中に若干広がるが 70%以上の Mn が  $\delta$ ドーブ層に存在し、この場合でも準  $\delta$ ドーブ構造が実現できていることを示している。Mn を  $\delta$ ドーブした GaAs 薄膜の伝導特性は、成長温度 (200 - 500°C) に大きく依存し、200 - 400°Cでは成長温度を上げれば抵抗率は下がるが 500°Cでは抵抗率は再び上がる。すべての試料は低温では高い抵抗を示し、最も抵抗率の低かった 400°Cで成長したサンプルでも正孔濃度が低いため、明瞭な強磁性秩序は現れないことを述べている。

第5章は、「The effect of selective doping on Mn  $\delta$ -doped GaAs (Mn  $\delta$ ドーブ GaAs における変調ドーピングの効果)」と題し、Mn を  $\delta$ ドーブした GaAs 層の下に Be をドーブした AlGaAs 層を挿入していわゆる変調ドーブ構造を作製し、二次元正孔ガス(2DHG)を Mn- $\delta$ ドーブ層に導入して磁気輸送特性を調べている。この構造では Mn の  $\delta$ ドーブ層からだけではなく Be をドーブした p 型 AlGaAs から正孔が供給される。単層の Mn を  $\delta$ ドーブした GaAs 薄膜では正孔濃度が少なく強磁性的な磁性秩序を示さないのに対し、変調ドーピングにより p 型 AlGaAs から正孔を供給することによってホール効果に明瞭な強磁性秩序が現れることを見出し、これは Mn の  $\delta$ -ドーブ層近傍に発生した 2DHG が遍歴的に Mn イオンと強い交換相互作用を生じ Mn-Mn 間に強磁性的な磁性秩序が現れたためであると説明している。また、この構造の強磁性転移温度は Mn- $\delta$ ドーブ層と GaAs/p-AlGaAs 界面間の  $\delta$ -ドーブ GaAs 層の膜厚 ( $d_s$ ) に大きく存在し、 $d_s=3\text{nm}$  では最大の強磁性転移温度 (70K) を観測したが、これは  $d_s=3\text{nm}$  では Mn 原子と 2DHG 波動関数の重なりが最も大きいからであると説明している。さらに、この構造に低温アニールを行うことによって強磁性転移温度が上昇し、320°Cのアニールによって 160K の強磁性転移温度を観測している。この値は最もよく研究されている III-V 族磁性半導体 GaMnAs の最高値 110K を大きく上回り、現在報告されている II-VI 族及び III-V 族磁性半導体の中では最も高い強磁性転移温度である。本章では、このように Mn を  $\delta$ ドーブすることによって局所的に高濃度の Mn を添加しさらにその近傍に変調ドーピングにより p-AlGaAs から正孔を供給することにより、GaAs をベースとした半導体ヘテロ構造において高い強磁性転移温度を実現した。

第6章は「Conclusions (結論)」であり、本論文全体の研究成果をまとめて要約するとともにその意義を述べている。

以上これを要するに、本論文は、半導体基板上的強磁性 MnAs 薄膜の成長過程、膜構造と磁気特性の関係、磁気光学スペクトルと電子構造を明らかにし、さらに、Mn を  $\delta$ ドーブした GaAs の微視的構造を詳細に調べ、p 型変調ドーブ構造を作製し二次元正孔ガス(2DHG)を Mn- $\delta$ ドーブ層に導入することによって半導体ベースの材料としては高い強磁性転移温度を得たものであり、電子工学、材料工学上、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。