

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 清水 大雅

本論文は「Fabrication and Magneto-optical Properties of Semiconductor / Magnetic Hybrid Structures and Their Application to Magneto-Optical Devices」(半導体・磁性体複合構造の作製、磁気光学特性、及び磁気光学デバイスへの応用)と題し、英文で書かれている。本論文は、半導体/磁性体複合構造の磁気光学物性とその応用を中心に包括的な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、位置付け、目的を示している。半導体と磁性体(スピン)の機能を融合させエレクトロニクスに生かそうとする研究、「半導体スピンエレクトロニクス」は近年注目を集め、進展が著しい研究分野であるが、筆者は、この研究分野が目指すべき方向は、半導体単独もしくは磁性体単独では得ることが困難な機能とデバイスの実現であり、本論文の目的は、III-V族化合物半導体とMnを含む磁性体から成る複合構造を作製し、その物性を磁気光学効果を中心に明らかにし、さらに磁気光学デバイスへの応用を示すことである、としている。

第2章は「Epitaxial growth, magnetic and magneto-optical properties of (GaMn)As and its quantum heterostructures」((GaMn)Asとその量子ヘテロ構造のエピタキシャル成長、磁性、磁気光学特性)と題し、III-V族ベース強磁性半導体(GaMn)As薄膜とその量子ヘテロ構造、特に(GaMn)As/AlAs超格子について、それらの磁気光学効果を磁気円二色性(Magnetic circular dichroism: MCD)を測定することによって明らかにし、そのバンド構造について考察している。(GaMn)AsとAlAsから成る極薄膜ヘテロ構造(数nm周期の超格子)においては、(GaMn)Asの膜厚が5nm以下で透過MCDスペクトルのブルーシフトにより、量子井戸状態が形成されることを明瞭に観測し、さらにMCDの磁場依存性から(GaMn)Asの膜厚が2nm以上では強磁性秩序が形成されることを明らかにしている。このように、(GaMn)As超薄膜において強磁性量子井戸状態の形成を観測したことは、(GaMn)Asベースの量子効果デバイス、例えば強磁性共鳴トンネル接合デバイスの作製等、従来磁性体あるいは半導体単独では実現することが不可能であったデバイスの実現につながるものであるとしている。

第3章は「Fabrication, structural, optical and magneto-optical properties of MnAs nanoclusters embedded in a GaAs matrix」(GaAs中に埋め込まれたMnAsナノクラスター構造の作製、構造、光物性および磁気光学特性)と題し、半導体GaAs中に強磁性金属MnAsのナノクラスターを埋め込んだ複合構造(以下、GaAs:MnAsと称す)の作製を行い、その構造評価、磁気特性、光学特性、磁気光学特性について記述している。まず、MnAsナノクラスターは(GaMn)Asを熱処理する際に相分離によってGaAs中に自己組織的に形成されること、形成されたGaAs:MnAsは単結晶でIII-V族ヘテロ構造と整合性が良いことなどを示している。さらに、数nm周期の[GaAs:MnAs]/AlAs超格子構造の導入によってMnAsクラスターのサイズを制御できること、GaAs:MnAsの磁化及び磁気光学効果が(GaMn)As成長中のSiのドーピングによって増強されること、MnAsナノクラスターの形成に寄与するMnイオンの割合が $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のSiのドーピングによって77%から99%と高まることを明らかにしている。磁気光学デバイスへの応用のためには大きな磁気光学効果を得ると同時に高い透過率を得る必要があるが、[GaAs:MnAs]/AlAs超格子構造の導入によってこれらを同時に得られること、また長距離光通信に重要な波長 $1.55 \mu\text{m}$ 帯における透過率と磁気光学効果を測定し、GaAsバンド端波長である $0.87 \mu\text{m}$ 付近と比較して透過率が上昇することを示し、GaAs:MnAsの光学損失と磁気光学効果の起源について考察を行っている。(GaMn)Asは低温において強磁性を示し室温では常磁性を示す混晶半導体、GaAs:MnAsは室温で超常磁性を示す強磁性金属と半導体の複合構造であるが、本章の最後では、この2つの材料の室温における光吸収測定、磁気光学測定の結果を比較し、双方の利害得失について論じ、室温における磁気光学デバイスへの応用という観点からは、(GaMn)AsよりもGaAs:MnAsの方が有利であると結論付けている。

第4章は「Enhancement of the magneto-optical effect in multilayer structures composed of the semiconductor/magnetic hybrid structure GaAs:MnAs and GaAs/AlAs DBR」(半導体/磁性体複合構造GaAs:MnAsとGaAs/AlAs分布ブラッグ反射鏡から成る多層構造における磁気光学効果の増大)と題し、前章までの半導体/磁性体複合構造の基本物性の評価を基に、光アイソレータ応用を視野に入れた多層

膜における磁気光学効果の研究成果を述べている。現在、光アイソレータのファラデー回転子に用いられている材料はバルク材料であり、III-V 族化合物半導体との整合性が悪いという問題点から III-V 族半導体光電子デバイスとの集積化は困難である。磁気光学デバイスのモノリシック集積化のためには、III-V 族ベースの薄膜でかつ大きな磁気光学効果を示す材料が求められる。本章では GaAs:MnAs を GaAs/AlAs 周期構造から成る分布ブラッグ反射鏡(DBR)で挟み込んだ多層構造(一次元半導体ベース磁性フォトニック結晶)を作製し、光の多重反射を利用して薄膜で大きな磁気光学効果を得ることに成功した。動作波長を $\lambda = 0.98\mu\text{m}$ とし、膜厚 $139\text{nm}(\lambda/2n, n:$ 屈折率)の GaAs:MnAs を 10 周期の GaAs/AlAs DBR (膜厚 $\lambda/4n$)で挟んだ多層構造において、単層の GaAs:MnAs に比べて 7 倍の磁気光学効果の増大を室温で観測した。この多層膜の磁気光学効果は GaAs:MnAs の超常磁性を反映して 0.1~0.2T の低磁場で飽和する特性を示すが、この低磁場動作は光アイソレータの小型化に寄与すると考えられる。さらに、多層構造の磁気光学特性を理論的に解析し、光アイソレータへの応用に必要な 45° のファラデー回転角の実現に必要な条件を明らかにしている。さらに、実用デバイスに向けて最大の課題である GaAs:MnAs の光学損失低減のために、1) [GaAs:MnAs]/AlAs 超格子構造の導入、2) Si のカウンタードーピング、3) 動作波長の長波長化、の 3 つの試みを行いある程度の有効性を示している。最後に、この半導体/磁性体複合構造は、エピタキシャル成長で作製される薄膜をベースとしており $10\mu\text{m}$ を超える厚膜やバルクとは異なる磁気光学材料であるため、本章で述べた多層膜を利用した半導体ベース磁性フォトニック結晶というアプローチが磁気光学デバイス応用のための有効な手段であると結論している。

第 5 章は「Design of semiconductor-waveguide-type optical isolators using the non-reciprocal refractive index change in the magneto-optical waveguides having MnAs clusters」(MnAs クラスタを含む磁気光学導波路の非相反屈折率変化を利用した半導体導波路型光アイソレータ)と題し、半導体/磁性体複合構造を用いた光アイソレータへの応用として、MnAs クラスタの横磁気カー効果を用いた損失補償型の導波路型光アイソレータの提案と解析を行っている。損失補償型の導波路型光アイソレータは磁気光学層を含む半導体光増幅器における磁気光学効果による非相反な損失/利得を利用したものである。GaAs/AlAs など非磁性 III-V 族ヘテロ構造との整合性に優れるという MnAs クラスタ構造の特長を活かして、MnAs クラスタを含む磁気光学導波路の非相反屈折率変化を利用した光アイソレータの設計を行い、Maxwell 方程式による解析の結果、TM モード光に対して 120dB/cm の消光比が得られることを明らかにしている。また従来の損失補償型の導波路型光アイソレータでは TE モードに対して動作しないことが問題の一つになっていたが、本研究では TE モード光に対してもアイソレータ動作が実現可能なデバイス構造を提案し、理論計算により TE モード光に対して 36dB/cm の消光比が得られることを明らかにし、TE モードと TM モードに対して同時にアイソレータ動作を実現することにより、偏波無依存型の導波路型光アイソレータを実現できると予測している。本章の最後に、MnAs クラスタは良質な半導体ヘテロ構造の再成長が可能であることから、より柔軟な磁気光学デバイス構造の設計が可能であることを指摘し、本研究で提案した導波路型光アイソレータの特長を挙げている。

第 6 章は「Concluding Remarks」(結論)であり、本論文全体の成果を総括するとともに、その意義を述べている。「半導体スピニエレクトロニクス」の研究はまだ歴史が浅いため、III-V 族ベースの半導体/磁性体複合構造では実用デバイスへ応用された例はない。本研究で対象とした半導体/磁性体複合構造の磁気光学効果を利用した一次元半導体ベース磁性フォトニック結晶および導波路型光アイソレータは、半導体をベースとした磁気光学デバイス実現のための有効な手法であり、本研究は、半導体/磁性体複合構造の基本的な磁気光学特性を明らかにし磁気光学デバイス応用への指針を示したこと、その知見を基にデバイス提案・解析を行ったところに意義があるとしている。

以上のように、本論文は、半導体/磁性体複合構造という新しい材料の作製法を開発し、その磁気光学効果を中心とする物性を明らかにした。さらに、半導体/磁性体複合構造を含む多層膜を設計・試作し磁気光学デバイス応用の指針を示し、導波路型光アイソレータの提案・解析を行ったものであり、電子工学、材料工学、デバイス工学上、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。