

論文の内容の要旨

論文題目 Fabrication and magneto-optical properties of semiconductor / magnetic hybrid structures and their application to magneto-optical devices
(和訳 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)

氏名 清水大雅

本論文は半導体 GaAs / 磁性体 Mn の複合構造について特に磁気光学効果に焦点を当てて研究を行ったものである。半導体と磁性体を融合させた研究、「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。我々は序論で「半導体スピンエレクトロニクス」の現状を概説し、この研究分野の目指すべき重要な方向の一つ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、デバイスの実現であると考え、半導体 / 磁性体複合構造の磁気光学効果に焦点を当てた。磁気光学効果の測定は半導体 / 磁性体複合構造のバンド構造を調べるのに強力な手段であるとともに、光アイソレータ等、磁気光学デバイスへの応用の観点からも重要であるからである。

はじめに我々は III-V 族ベース強磁性半導体(GaMn)As、及び、(GaMn)As / AlAs 超格子の磁気光学効果(磁気円二色性, Magnetic circular dichroism: MCD)を測定し、そのバンド構造について考察を行った。(GaMn)As と AlAs の極薄膜ヘテロ構造において、(GaMn)As の膜厚が 5nm 以下で MCD スペクトルの明確なブルーシフトを観測し、量子井戸状態が形成されることを明らかにした。さらに MCD の磁場依存性の測定から(GaMn)As の膜厚が 2nm 以上で強磁性秩序が形成されることを明らかにした。(GaMn)As において強磁性量子井戸状態が形成されることを観測したことは(GaMn)As ベースの量子効果デバイス、例えば共鳴トンネルダイオード構造を取り入れた強磁性トンネル接合デバイスの作製等、従来、磁性体のみ、半導体のみでは実現することが不可能であったデバイスの作製に道を拓くものである。

次に我々は半導体である GaAs 中に強磁性金属である MnAs のナノクラスターを埋め込ん

だ複合構造(以下、GaAs:MnAs)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調べた。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自己組織的に形成されるが、数 nm からなる[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することができることが明らかになった。また、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を見出し、MnAs ナノクラスターの形成に関わる 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% と高まることを磁化測定により明らかにした。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大きな磁気光学効果と高い透過率を同時に得られることがわかった。また長距離光通信に重要な波長である $1.55 \mu\text{m}$ 帯における透過率、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が明らかになった。また GaAs:MnAs の光学損失、磁気光学効果の起源について考察を行った。(GaMn)As は強磁性転移温度が最高 110K で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、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た。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た。

以上の半導体 / 磁性体複合構造の基本的な光学特性、磁気光学特性の評価を基に、光アイソレータへの応用のための 2 つのアプローチを試みた。現在光アイソレータにおけるファラデー回転子に用いられている材料は希土類置換鉄ガーネットや II-VI 族希薄磁性半導体の CdMnHgTe であるが、これらの材料はバルク材料であり、膜厚が 1mm 以上と厚く、III-V 族化合物半導体との整合性がよくないという問題点から III-V 族化合物半導体光電子デバイスとの集積化が困難である。III-V 族光電子デバイスと磁気光学デバイスの集積化のためには III-V 族ベースで、かつ薄膜で大きな磁気光学効果を示す材料が求められている。そこで我々は一つめのアプローチとして GaAs:MnAs を GaAs / AlAs の分布ブラッグ反射鏡 (Distributed Bragg Reflector: DBR) で挟み込んだ多層構造(1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ようと試みた。動作波長を $\lambda = 0.98 \mu\text{m}$ とし、膜厚 $139 \text{nm} (\lambda / 2n, n: \text{屈折率})$ の GaAs:MnAs を 10 周期の GaAs / AlAs DBR (膜厚 $\lambda / 4n$) で挟んだ図 1 のような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(図 2)に成功した。ま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。このこと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について議論し、デバイス応用のために重要な GaAs:MnAs の光学損失低減のための 3 つの取り組み、[GaAs:MnAs] / AlAs 超格子構造の導入、Si のカウンタードーピング、動作波

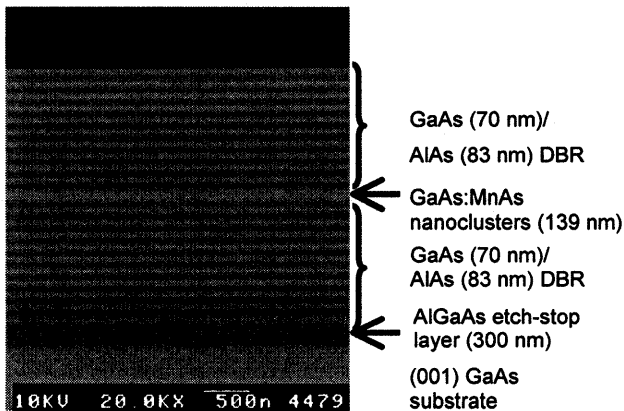
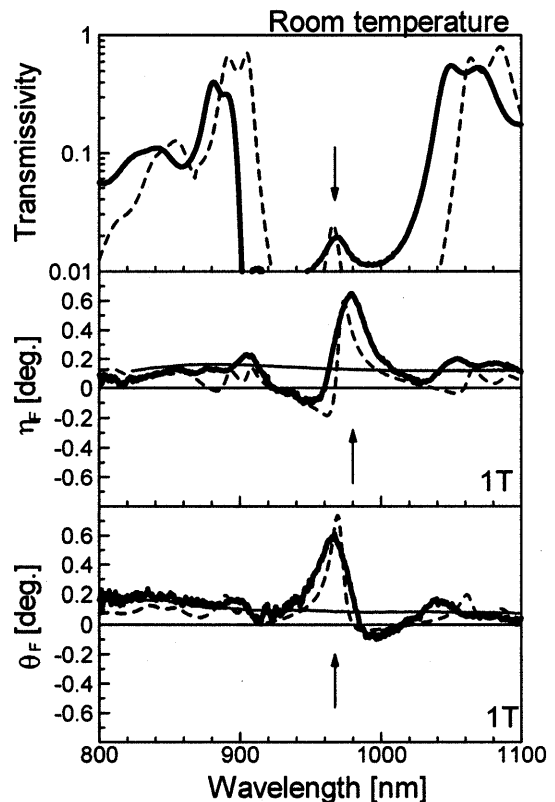


図 1. 1次元半導体ベース磁性フォトニック結晶 (10 [GaAs / AlAs] DBR / GaAs:MnAs / 10 [GaAs / AlAs] DBR)の断面走査性電子顕微鏡写真

図 2.(右) 1次元半導体ベース磁性フォトニック結晶 (図 1)の(a)透過率、(b)ファラデー楕円率 η_F 、(c)ファラデー回転角スペクトル θ_F (実線)。測定は室温で行い、磁気光学効果の測定は 1T の磁場下で行った。細線で 200nm 厚の単層の GaAs:MnAs の測定結果、点線で理論計算結果を示す。



長の長波長化について論じた。半導体 / 磁性体複合構造はエピタキシャル成長によって薄膜でしか得られず、 $10\mu\text{m}$ を超える厚膜を作製するのは困難である。そのため半導体ベース磁性フォトニック結晶というアプローチは半導体 / 磁性体複合構造を光アイソレータに応用するために有効な手段であると考えられる。

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の 2 つめのアプローチは MnAs クラスター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である。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。MnAs クラスターは図 1 に示したように GaAs / AlAs 等の非磁性のヘテロ構造との整合性に優れる。この特長を活かして MnAs クラスターを用いた導波路型光アイソレータの設計を行った。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が明らかになった。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た。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することができると考えられる。MnAs クラスター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

柔軟なデバイス構造の設計が可能になる点が本研究で提案した導波路型光アイソレータの特長であると考えられる。

「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、GaAs 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。磁気光学デバイスは半導体 / 磁性体複合構造を応用する有用で興味深いデバイスの一つである。半導体 / 磁性体複合構造の磁気光学効果を基にした 1 次元半導体ベース磁性フォトニック結晶、及び導波路型光アイソレータは半導体ベースの磁気光学デバイス実現のための有効な手法であり、本研究はデバイス実現のために、半導体 / 磁性体複合構造の基本的な磁気光学特性を評価したこと、及び、この評価を基にした 2 つのタイプのデバイス提案を行ったところに意義があると考えられる。