

「量子効果等の物理現象」
平成 8 年度採択研究代表者

岡 泰夫

(東北大学多元物質科学研究所 教授)

「ナノ構造磁性半導体の巨大磁気光学機能の創出」

1. 研究実施の概要

磁性半導体は、磁性イオンを含む混晶半導体である。本研究は、II-VI族半導体をベースとした磁性半導体のナノメートル・スケールの構造における電子系に対する量子閉じ込め効果と磁気光学特性・機能性を開拓することを目的としている。このため、 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 、 $Cd_{1-x}Mn_xSe$ 、 $Zn_{1-x}Mn_xSe$ などをベースとした磁性半導体の量子井戸、量子細線、量子ドットを作製した。これらのナノ構造に生じる磁性イオンと相互作用する電子や励起子の超高速スピンドイナミクス、磁気光学効果を解明し、この結果よりナノ構造磁性半導体の新しい巨大磁気光学機能について研究した。

2. 研究実施の内容

本研究プロジェクト発足以来、磁性半導体ナノ構造の形成、構造評価、磁気光学特性評価について、研究基盤となる研究機器を設置し、磁性半導体量子構造作製と巨大磁気光学効果を研究した。ナノ構造形成は、分子線エピタキシー (MBE)、リソグラフィー極微細加工、自己組織化法により行い、II-VI族磁性半導体の量子井戸、量子細線、量子ドットを作製している。これらのナノ構造の形状、結晶格子状態をX線回折や電子顕微鏡・原子間力顕微鏡によって評価し、この知見をもとに、ナノ構造の電子状態と光学特性を超高速時間分解分光により調べ、電子と磁性イオンの磁氣的相互作用とその磁気光学的ダイナミクスを明らかにしている。また、磁性半導体ナノ構造の新しい機能性と外場による制御を研究している。本年度に得られた主な成果を次に示す。

1) 磁性半導体量子井戸

$CdTe/Cd_{1-x}Mn_xTe$ 、 $Cd_{1-x}Mn_xTe/Cd_{1-y}Mg_yTe$ 、 $Cd_{1-x}Mn_xTe/ZnTe$ 、 $Cd_{1-x}Mn_xSe/Zn_{1-y}Cd_ySe$ などの磁性半導体量子井戸が、MBE法により作製された。本年度は、特に、「2重量子井戸」、「スピン超格子」の系統的な作製を重点的に行った。2重量子井戸における「励起子スピントネル」、「励起子スピン輸送」に関して、新たな結果が得られた。図1は、 $CdTe/Cd_{1-x}Mn_xTe$ 系の2重量子井戸における励起子スピン輸送・注入の結果である。 $Cd_{1-x}Mn_xTe$ 磁性量子井戸で生成してスピン分極した励起子が、 $CdTe$ 非磁性量子井戸で、高いスピン分極を保ったまま、発光

する過程を捕らえたものであり、電子・正孔のスピンの情報が輸送されていることを示している。「スピン超格子」は、非磁性層と磁性層からなる超格子で、ゼロ磁場下においてはエネルギーギャップ・エネルギーが同一で、外部磁場が印加されると磁性層のエネルギーギャップが大きくなゼーマン分裂を起こし、上向きと下向きの電子スピンの状態が空間的に分離される超格子である。MBE法により $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}/\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$ スピン超格子の作製を行い、その磁気光学特性を研究した。これらの結果は、電子スピンの関与する「スピンエレクトロニクス」に関連しており、今後さらに研究の展開を行う。

2) 磁性半導体量子細線

20nm線幅の描画性能をもつ電子線リ

ソグラフィ装置を用いて、 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ 、 $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Mn}_y\text{Se}$ などの磁性半導体量子細線の作製に成功した。図2は、GaAs基板のメサ上に形成させた磁性半導体多重量子井戸とその上部の量子細線を示す。この方法などにより、磁性半導体を用いた量子細線としては最も細い20nmの幅の細線が形成できた。この量子細線の励起子発光は、細線の幅が狭まると高エネルギーシフトし、また細線の長さ方向に直線偏光しており、量子細線の1次元性量子閉じ込め効果に由来している。細線幅20nm、厚さ10nmの $\text{Zn}_{0.69}\text{Cd}_{0.23}\text{Mn}_{0.08}\text{Se}$ 量子細線にFaraday配置で磁場を6T印加すると、32meVのゼーマンシフトを示し、量子細線内の磁性イオンの影響を強く受けた磁気光学効果が現れることが分かった。これより励起子の大きさに迫る量子細線の形成が可能になったことが確認できた。

3) 磁性半導体量子ドット

磁性半導体量子ドットは、0次元電子状態に磁気的な相互作用が働く系である。MBE装置を用いて、自己組織化により $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ および $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ の量子ドットを作製した。 $\text{Cd}_{0.97}\text{Mn}_{0.03}\text{Se}$ 量子ドットでは、発光強度の磁場による顕著な増大が見られ、これは磁性半導体系の量子ドット構造に特有の現象である。ドットからの励起子発光は、0Tでは励起子発光寿命は20psと短く、7Tの強磁場下では100ps以上に増大した。このような量子ドットにおける発光の磁場依存性は、励起子ボア半径が磁場により収縮し、Mnドーピングによって生じたドット表面の非

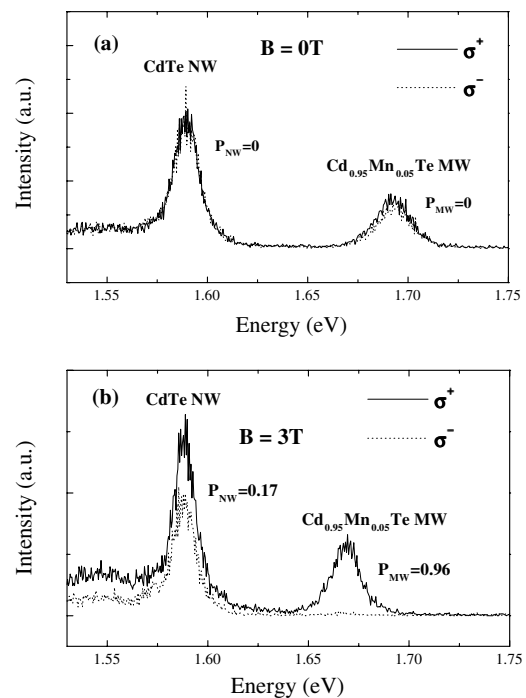


図1 . CdTe/ $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 系 2 重量子井戸におけるスピン注入と発光

発光捕獲中心に、励起子がトラップされる確率が減少するために起こる。また、ドット径の小さい $Cd_{1-x}Mn_xSe$ 量子ドットや $Zn_{1-x}Mn_xSe$ 量子ドットでは、ゼロ磁場でMn発光が観測され、高磁場でMn発光が抑制されることから、ドット内での励起子からMnイオンへのオーグエ過程が、磁場により抑制されるためと同定できる。

以上、磁性半導体ナノ構造として、二次元量子井戸、量子細線、量子ドットを系統立てて作製し、量子閉じ込め効果、励起子磁気ポーラロンの形成、スピン輸送過程、ナノ構造に起因する磁気光学特性に関する新たな知見を得た。この分野では、半導体へのスピン注入やスピン輸送などを用いた「スピントロニクス」、半導体の電子スピン状態を用いた「量子コンピューティング」など、新技術開発に関する活発な議論が行われている。このような次世代の「ナノサイエンス、ナノテクノロジー」に向けて、量子井戸、量子細線、量子ドットを組み合わせた任意の形状の磁性半導体量子ナノ構造の成長技術や磁気光学機能性の開発、電気伝導性制御などが重要な課題となる。

3. 主な研究成果の発表（論文発表）

R. Pittini, J. X. Shen, M. C. Debnath, I. Souma, M. Takahashi and Y. Oka, *Transient Behavior of the Excitonic Magnetic Polarons in $Cd_{1-x}Mn_xTe$ Epilayers*, J. Appl. Phys. 87, 6454-6456(2000)

M. C. Debnath, J. X. Shen, E. Shirado, I. Souma, T. Sato, R. Pittini and Y. Oka, *Spin-Flip Rate of Excitonic Magnetic Polarons in $Cd_{1-x}Mn_xTe/Cd_{1-y}Mg_yTe$ Quantum Wells*, J. Appl. Phys. 87, 6457-6459(2000)

N. Takahashi, K. Takabayashi, I. Souma, J. X. Shen and Y. Oka, *Magneto-Luminescence in Quantum Dots and Quantum Wires of II-VI Diluted Magnetic Semiconductors*, J. Appl. Phys. 87, 6469-6471(2000)

N. Takahashi, K. Takabayashi, E. Shirado, I. Souma, J. X. Shen and Y. Oka, *Fabrication and Optical Study of Quantum Dots, Quantum Wires and Quantum Wells of II-VI Diluted Magnetic Semiconductors*, J. Crystal Growth. 214/215, 183-

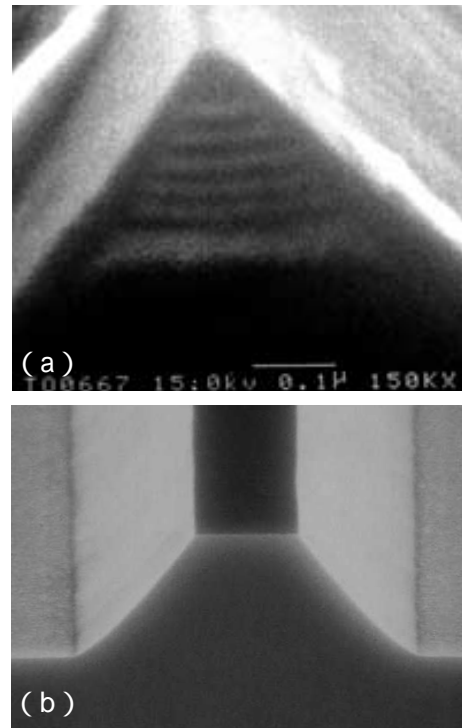


図2 . GaAsメサ基板の上に形成した ZnSe/ $Zn_{1-x}Mn_xSe$ 量子細線 (a) とメサ加工をしたGaAs基板 (b)

186(2000)

M. C. Debnath, J. X. Shen, E. Shirado, I. Souma, T. Sato, R. Pittini and Y. Oka, *Recombination Dynamics of Excitons in Cd_{1-x}Mn_xTe Epilayers and Quantum Wells by Time Resolved Photoluminescence*, J. Crystal Growth. 214/215, 797-800 (2000)

R. Pittini, J. X. Shen, M. Takahashi and Y. Oka, *Coexistence of Excitons and Free Carriers in Cd_{1-x}Mn_xTe/ZnTe Multiple Quantum Wells*, J. Crystal Growth. 214/215, 801-805(2000)

Y. Oka, N. Takahashi, K. Takabayashi, E. Shirado, I. Souma, R. Pittini, J. X. Shen, *Exciton Dynamics in Quantum Nanostructures of II-VI Diluted Magnetic Semiconductors*, Phys. stat. sol(b)221, 495-498(2000)

R. Pittini, J. X. Shen, M. Takahashi and Y. Oka, *Influence of the Magnetic Polaron Formation on the Exciton Kinetics in Cd_{1-x}Mn_xTe/ZnTe Multiple Quantum Wells*, Phys. stat. sol(b)221, 355-358(2000)

J. X. Shen, R. Pittini, Y. Oka, *Superlinear Photoluminescence Intensity Observed in Pump-Probe Experiments in GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs Heterojunctions*, Phys. stat. sol. (b)221, 545-548(2000)

Yasuo Oka, Kazumasa Takabayashi, Nobuhiro Takahashi, Eiji Shirado, Jinxi Shen, Izuru Souma, *Magneto-optical properties of nanostructures diluted magnetic semiconductors*, Proc. SPIE Vol. 4086, 62-67(2000)

Z. H. Chen, T. Saitou, K. Shibata, T. Sato, N. Takahashi and Y. Oka, *Magneto-optical studies of ZnSe/Zn_{1-x}Mn_xSe quantum wires*, Proc. SPIE Vol. 4086, 203-206 (2000)

A. Murayama, K. Hyomi and C. M. Falco, *Brillouin study of long-wavelength spin-waves in quasimonatomic Co films with uniaxial perpendicular magnetic anisotropy*, Phys. Rev. B 61, 8984-8992(2000)

A. Murayama, K. Hyomi, J. Eickmann and C. M. Falco, *Effects of misfit strain due to epitaxial growth on interface perpendicular magnetic anisotropy in ultrathin Co/Au/Cu(111)films*, J. Appl. Phys. 87, 6107-6109(2000)

A. Murayama, K. Hyomi, and C. M. Falco, *Large enhancement of elastic light scattering due to random fluctuations of the magnetization*, J. Appl. Phys. 87, 5505-5507(2000)

A. Kikitsu, A. Murayama, K. Hyomi and C. M. Falco, *Micro-magnetic study of CoPt-SiO₂ granular films by the spin-wave Brillouin scattering*, J. Appl. Phys. 87, 6944-6946(2000)