

「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

(東北大学科学計測研究所 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

本研究は、磁性イオンを含む磁性半導体のナノ構造を設計・作成し、次元性を十分に制御したナノ構造により発現される巨大磁気光学機能を創出することを目的とする。このため $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 、 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ 、 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ などをベースとした磁性半導体の量子井戸、量子細線、量子ドットを設計し、分子線エピタキシー法と電子線ビーム超微細加工により作製し、原子レベルで制御された高い結晶性を持つ磁性半導体ナノ構造を得た。

これらの磁性半導体ナノ構造について、磁性イオンと相互作用をして起きる電子や励起子の超高速スピンドYNAMICS、巨大磁気光学効果、レーザー発振現象を解明し、これに基づいて次元性制御によって生じる巨大磁気光学機能を開拓しており、「ナノ構造巨大磁気光学デバイス」の基礎を確立する。

2. 研究実施の内容

磁性イオンを含む半導体（磁性半導体）は、磁性電子と半導体バンド電子の交換相互作用によって、極めて大きな磁気光学的特性を示す。 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 、 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ などの半導体は、このような性質を示す代表的な物質である。磁性半導体の結晶をナノスケール化して、量子力学的な閉じ込め作用が働く電子状態の構造（ナノ構造）を作ると、この物質の磁気光学特性はさらに増強・制御されたものとなり、将来のマイクロ磁気光学デバイス、光メモリーなどへの応用にも大きな可能性をもつと考えられる。われわれは、 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ の量子ドットをはじめて作成し、この系の0次元性に起因する特異な磁気ポーラロン効果を明らかにした。また、新しいナノ構造磁性半導体の作製とその磁気光学的性質を研究しており、原子レベルで制御された0、1、2次元磁性半導体ナノ構造の創製とその磁気光物性の解明を推進し、磁性イオンが能動的に関与する磁性半導体ナノ構造の新機能性と応用を開拓している。

1) 磁性半導体のエピタキシー成長は、既存の分子線エピタキシー装置(MBE装置)と、本研究プロジェクトにより購入した MBE 装置の 2 台を用いて、 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$

系と $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ 系の二次元量子井戸の成長を行っている。これにより、井戸幅が 10 - 300 Å、磁性イオンの濃度 $x=0.05 - 0.25$ の単一量子井戸、多重量子井戸、非対称二重量子井戸などが作製できている。これらの磁性半導体量子井戸試料について、量子井戸中の磁性イオンと電子・正孔との交換相互作用、励起子磁気ポーラロンの形成過程、暗い励起子 (dark exciton) の挙動、二重量子井戸における障壁層を通るキャリアのトンネル過程などを詳細に調べている。その結果、井戸構造による巨大磁気光学効果の制御、超高速磁気ポーラロン形成、キャリアトンネル過程について明らかにできた。

2) 磁性半導体の量子ドットの作製は、自己組織化により行っている。形成する量子ドットのサイズを精密に制御するためには、成長原子層厚を精密に制御する必要がある。この目的のため、「原子層エピタキシー成長」を採用して、平坦な 5 分子層を成長させ、その後、基板温度を上昇させて、 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ 量子ドットを自己形成させた。量子ドットの形成は、反射高速電子回折パターンが、ストリークなものからスポット状に変化することを観測して確認した。

量子ドットからの発光は 2.3 - 2.4 eV 付近にあり、直径 5 - 10 nm の量子閉じ込め効果を受けている。その磁場による低エネルギーシフトより、磁性イオンの影響を受けた大きなゼーマン効果になっていることが確認できた。この量子ドットの発光は、励起光強度により変化し、ドット内での磁性イオンの分布に依存していると考えられる。巨大磁気光学効果を示す量子ドットの形成が実現できた。

3) エピタキシー法により作成した二次元量子井戸に対して、本研究プロジェクトにより購入した「電子ビーム描画装置」を用いて細線描画を行い、ウエット・エッチングにより極微細線加工を行い、「 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ 系磁性半導体量子細線」を作成することに成功した。作製された細線の幅は、26 - 300 nm である。26 nm の線幅の磁性半導体細線は、これまで報告されたうちで世界で最も細い細線である。これらの細線からの励起子発光は明瞭に見られ、その発光は細線方向に平行に偏光している。この偏光特性は、細線内での 1 次元電子運動の効果を反映していると考えられる。この発光の偏光特性は、細線に垂直な磁場を加えると、偏光度が低下し、磁場による電子・正孔のサイクロトロン運動の影響を受けていることが分かった。磁性半導体量子細線は、量子光アイソレーターなどへの応用が可能である。

平成 10 年度には、0、1、2 次元の磁性半導体のナノ構造を原子オーダーで制御して作成することが可能になった。これらのナノ構造について、電子状態の量子閉じ込め効果、巨大磁気光学効果、超高速電子緩和現象について特色ある新しい知見を得ることができ、磁性半導体ナノ構造の磁気光学機能性の創出が行えた。今後、リソグラフィ法による量子ドット列、量子ドットと細線の結合などのさらに新しいナノ構造磁性半導体の創製を行い、「ナノ構造巨大磁気光学デバイス」への応用

性を確立する。

3. 主な研究成果の発表 (論文発表)

- J.X. Shen, Y. Oka, W. Ossau, F. Fisher, A. Waag, and G. Landwehr
Difference of Self-Energy Corrections for Charged and Uncharged States
in Degenerate Two Dimensional Systems
Physica B **249/251**, 589-593 (1998)
- Y. Oka, K. Yanata, S. Takano, K. Egawa, K. Matsui, M. Takahashi, and H.
Okamoto
Exciton Dynamics in Diluted Magnetic II-VI Semiconductor Nanostructures
J. Crystal Growth **184/185**, 926-930 (1998)
- Y. Oka, K. Yanata, H. Okamoto, M. Takahashi, J.X. Shen, K. Egawa, S.
Takano,
and K. Matsui
Giant Magneto-Optical Effects in Diluted Magnetic Semiconductor
Nanostructures
Solid State Electronics **42**, 1267-1271 (1998)
- J.X. Shen, Y. Oka, W. Ossau, G. Landwehr, K.-J. Friedland, R. Hey, K. Ploog,
and G. Weimann
Vertical Transport of Photo-Excited Carriers for Excitonic Recombinations in
Modulation Doped GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs Heterojunctions,
Solid State Commun. **106**, 495-499 (1998)
- J.R. Anderson, M. Gorska, J.Y. Jen, J. Kossut, Y. Oka, and M. Sakai
Exciton Confinement in III-V Quantum-Well Structures: Role of Magnetic
Fields
Novel Materials Design and Properties, eds B.K. Rao and S.N. Behera,
(Nova Science Publishers Inc., 1998) pp.161-174
- Y. Oka, H. Okamoto, K. Yanata, and M. Takahashi
Nanostructure Semimagnetic Semiconductors (Chapter 10)
Mesoscopic Materials and Clusters (Kodansha/Springer, Eds. T. Arai et al.
1999)
pp. 101-112
- J.X. Shen, Y. Oka, H.H. Cheng, F.Y. Tsai, C.P. Lee
Exciton Relaxation in Ga_{1-x}In_xAs/GaAs Self-Organized Quantum Dots
Superlattices and Microstructures **25**, 131-136 (1999)
- M.C. Debnath, I. Souma, E. Shirado, T. Sato, J.X. Shen, and Y. Oka

- Excitonic Magnetic Polaron Dynamics of MBE Grown CdTe/ Cd_{1-x}Mn_xTe,
Cd_{1-x}Mn_xTe /Cd_{1-y}Mg_yTe Single Quantum Wells in Magnetic Fields
Superlattices and Microstructures 25, 383-388 (1999)
- H. Mitsu, K. Egawa, M.C. Debnath, J.X. Shen, Y. Oka
Observation of Excitonic Magnetic Polaron Formation in Cd_{1-x}Mn_xTe Quantum
Wells by Selectively Excited Ultrafast Time-Resolved Luminescence and
Absorption Spectroscopies
Excitonic Processes in Condensed Matter, EXCON '98 (The Electrochemical
Society Inc. 1999) 204-209
- R. Pittini, H. Mitsu, M. Takahashi, J.X. Shen, and Y. Oka
Optical and Magneto-Optical Transient Absorption Measurements in
Cd_{1-x}Mn_xTe/ZnTe and Cd_{1-x}Zn_xTe/ZnTe Multiquantum Wells
Excitonic Processes in Condensed Matter, EXCON '98 (The Electrochemical
Society Inc. 1999) 210-215
- R. Pittini, H. Mitsu, M. Takahashi, J.X. Shen, and Y. Oka
Exciton Dynamics in Modulation Doped Heterojunctions
Excitonic Processes in Condensed Matter, EXCON '98 (The Electrochemical
Society Inc. 1999) 234-239
- J.X. Shen, Y. Oka, C.Y. Hu, W. Ossau, G. Landwehr, K-J. Friedland, R. Hey,
K. Ploog, and G. Weimann
Photoluminescence in Modulation-doped GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs Heterojunctions
Phys. Rev. B 59, 8093-8104 (1999)
- 岡 泰夫
II-VI 族半導体量子井戸の作製と光物性 (半導体結晶成長, 第 6 章)
コナナ社, 1999 (共著) pp.121-142
- R. Pittini, H. Mitsu, M. Takahashi, J.X. Shen, Y. Oka
Time Resolved Magneto-Optical Spectroscopy in Cd_{1-x}Mn_xTe/ZnTe
Multiquantum Wells
J. Appl. Phys. 85, 5938-5340 (1999)
- M.C. Debnath, I. Souma, E. Shirado, H. Mitsu, T. Sato, J.X. Shen, and Y. Oka
Dynamics of Photoexcited Carriers in MBE grown Semimagnetic Epilayers in
Magnetic Fields
J. Appl. Phys. 85, 5941-5943 (1999)
- J.X. Shen, Y. Oka, W. Ossau, F. Fisher, A. Waag, and G. Landwehr
Enlarged Paramagnetism by Electron-Electron Exchange Interactions in n-

type Modulation Doped (CdMn)Te/(CdMnMg)Te Single Quantum Wells

J. Appl. Phys. **85**, 5947-5949 (1999)

○F.Y. Tsai, C.P. Lee, J.X. Shen, Y. Oka, and H.H. Cheng

Time-resolved Photoluminescence Study of InGaAs/GaAs Quantum Wells
on (111)B GaAs Substrates

Microelectronics Journal **30**, 367-371 (1999)