

東北大学多元物質科学研究所 教授

岡 泰夫

「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、磁性半導体のナノメートル・スケール構造における電子系に対する量子閉じ込め効果と巨大磁気光学特性・機能性を創出することを目的としている。このため、磁性イオンを含む磁性半導体の次元性を十分に制御したナノ構造（量子ドット、量子細線、量子井戸、超格子）を設計・作成し、このナノ構造において発現する巨大磁気光学機能の開拓を行った。物質としては、II-VI族磁性半導体をベースとし、これらの低次元量子構造を設計し、エピタキシー法とリソグラフィ極微細加工により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作製した。得られた磁性半導体ナノ構造の中で磁性イオンと相互作用をする電子や励起子の超高速スピンドYNAMICSと、その結果発現する巨大磁気光学効果を明らかにし、次元性制御によって生じる新しい量子磁気光学機能を開拓した。

研究体制は、東北大学多元物質科学研究所・岡研究室のメンバーを主体とした「ナノ構造形成グループ」、「ナノ構造評価グループ」および「国内、海外の共同研究者」により構成された。

平成8年に開始された本研究は、CREST研究の趣旨に沿って、磁性半導体ナノ構造形成、構造評価、磁気光学特性計測の各研究分野について、基盤となる大型実験装置を重点的に購入し設置した。これらの装置の調整、整備をすませ、「ナノ構造形成グループ」は、分子線エピタキシー（MBE）法と電子線リソグラフィ極微細加工により磁性半導体ナノ構造の作製を行った。その結果、二次元量子井戸、量子細線、量子ドットを作製し、原子オーダーで制御された種々の磁性半導体ナノ構造を得た。「ナノ構造評価グループ」は、X線回折、電子顕微鏡、原子間力顕微鏡などによるこれらの磁性半導体ナノ構造の結晶性、形状について研究し、また超高速レーザー分光による電子状態、励起子と磁性イオンの相互作用とそのダイナミクスの研究を行い、新規な巨大磁気光学特性の起因を明らかにした。さらに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追求し、その応用性について研究した。

1) 磁性半導体量子ドットの創製と巨大磁気光学機能の開発

磁性半導体量子ドットは、0次元電子状態に磁気的な交換相互作用が働く系である。この系では、強い0次元の量子閉じ込め効果による光放射過程の増大が期待でき、ドット内での電子スピンと磁性イオンスピンの相互作用の外部磁場による制御が可能となると考えられる。このためその磁気光学特性の応用性に興味を持たれる。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 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ 量子ドットおよび $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ マトリクス中の CdSe 量子ドットを作製することに成功した。磁場をドット成長方向に印加すると、 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ 、 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ 量子ドットでは、発光強度の磁場による顕著な増大現象が見られた。非磁性 CdSe 量子ドットでは、このような磁場による発光強度の増大は見られず、磁性半導体系量子ドットに特有の現象である。励起子発光の時間変化を測定すると、

$\text{Cd}_{0.97}\text{Mn}_{0.03}\text{Se}$ 量子ドットでは、0Tにおいて励起子発光寿命は20ps程度であり、CdSe量子ドットや $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ 単一量子井戸の励起子発光寿命(200~700ps)と比べると非常に短い値になっている。磁場を加えると $\text{Cd}_{0.97}\text{Mn}_{0.03}\text{Se}$ 量子ドットの発光寿命は5倍以上増大した。

$\text{Cd}_{0.97}\text{Mn}_{0.03}\text{Se}$ の直径4-6nmの(粒径の小さい)量子ドットでは、ドット内における励起子からのオージェ過程によりMnイオンが励起され、Mn発光が観測される。このため励起子寿命は短くなっている。このオージェ過程は磁場により抑制されるため、励起子発光強度の増大と寿命の増加が起きることが明らかになった。 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ 量子ドットの励起子発光寿命の減少は、ドット界面にMnによる非発光捕獲中心が生じ、ここに励起子が捕獲されることによっても起きる。粒径が、励起子サイズよりも少し大きな量子ドットにおいては、磁場の増加に伴い励起子ボーア半径が収縮し、ドット表面での非発光確率が減少することにより励起子発光寿命は増大する。これらの著しい巨大磁気光学効果をもつ磁性半導体量子ドットの作製技法の確立と新しい機能性の開発が行えた。

2) 磁性半導体量子細線の創製と巨大磁気光学機能の開発

次世代の超高密度集積回路や量子干渉素子の作製には、極めて細い導線を用いる必要がある。すなわち、1次元的な電子状態をもつ量子細線が重要な役割を果たす。磁性半導体量子細線は、電子スピンの1次元特性を反映した電氣的・光学的特性を示すことが期待され、新しいスピンエレクトロニクス素材を提供する。本研究では、MBE法と電子ビームリソグラフィ法を用いて、2種類の磁性半導体量子細線を作製した。第1は、MBE法で作製した2次元量子井戸に細線描画を行い、化学エッチングにより量子細線を作製する方法であり、第2は、基板のGaAsにリソグラフィ法によりメサ構造加工を行い、このメサ上にMBE法により磁性半導体層を成長させ、量子細線を形成させる方法である。これらの方法により、 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ 、 $\text{Zn}_{1-x-y}\text{Cd}_x\text{Mn}_y\text{Se}$ などを用いて、世界的に最も細い20nmの幅の磁性半導体量子細線の作製に成功した。 $\text{Cd}_{0.90}\text{Mn}_{0.10}\text{Se}$ や $\text{Zn}_{0.69}\text{Cd}_{0.23}\text{Mn}_{0.08}\text{Se}$ 量子細線にFaraday配置で磁場を印加すると、それらの励起子発光は巨大ゼーマンシフトを示し、磁性イオンの影響を強く受けた量子細線励起子の巨大磁気光学特性が発現していることが確認できた。細線幅を20nmまで狭くすると、量子細線中の励起子は高エネルギーシフトし、またその発光が細線の長さ方向に直線偏光してくることが観測され、1次元量子閉じ込め効果に由来した特長を示す。線幅の減少にともないゼーマンシフト量は減少し、励起子と磁性イオンの交換相互作用が、細線幅に依存していることが測定された。メサ上の量子細線形成では、[1-10]方向のGaAsメサ上に、 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ 量子細線を形成させた。この方法で作製した細線は、化学エッチングによる加工損傷を受けていないため強い励起子発光を示し、高効率発光特性をもつ磁性半導体量子細線が得られた。これらの細線作製技術の開発により、励起子の大きさに迫る磁性半導体量子細線の形成に成功し、1次元巨大磁気光学機能性が確認できた。

3) 磁性半導体量子井戸の創製と磁気光学機能性の開発

磁性半導体 2 次元量子井戸は、MBE 法により構造の精密制御が行える系である。この研究では、 $\text{CdTe}/\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 、 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}/\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$ 、 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}/\text{ZnTe}$ および $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}/\text{Zn}_{1-y}\text{Cd}_y\text{Se}$ 系の「2 重量子井戸」、「スピン分離量子井戸」の系統的な作製を行った。これらの系の格子整合条件を十分に考慮して、良好な巨大磁気光学特性を示す量子井戸の作製技術を新たに開発した。その結果、 $\text{CdTe}/\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 系の 2 重量子井戸において「励起子スピントネル」および「励起子スピン輸送・注入」の実現に成功し、そのトンネル過程とスピン注入過程の機構解明を行った。 $\text{CdTe}/\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 系の 2 重量子井戸における励起子スピン輸送・注入では、 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 磁性量子井戸で生成されスピン分極した励起子が、 CdTe 非磁性量子井戸に高いスピン分極を保ったまま注入され、正孔のスピン緩和を経て発光する過程が捕らえられた。

「スピン分離量子井戸」は、磁性層と非磁性層からなる量子井戸で、外部磁場が印加されると、上向きと下向きの電子スピンの状態が二つの層に別々に分離される系である。この量子井戸では、電子スピン配置の空間的な制御を行うことができる。 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}/\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$ 系および $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}/\text{ZnTe}$ 系スピン量子井戸の作製を行い、その円偏光磁気光学特性を研究した。 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}/\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$ 量子井戸は、Mn および Mg の濃度をコントロールすることにより、 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 層と $\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$ 層のエネルギーギャップを同一にすることが可能である。磁場を加えると、 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 層の電子・正孔準位が大きなゼーマン分裂を起し、上向きと下向きの電子正孔スピンの状態が $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 井戸層と $\text{Cd}_{1-y}\text{Mg}_y\text{Te}$ 障壁層に空間的に分離されることが円偏光発光スペクトルより確認された。また、 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}/\text{ZnTe}$ 量子井戸では、磁場の大きさにより電子正孔の上向きと下向きスピン状態を、 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 層と ZnTe 層で入れ替えることができることを示した。これらの結果は、電子正孔スピンの空間的制御を実現したものであり、スピントランジスタなどの「スピンエレクトロニクス素子」への大きな可能性を持っている。

磁性半導体ナノ構造の磁場下の超高速電子現象は、その磁気光学的応用性と密接に関連している。この超高速電子現象を解明するために、磁場の下で磁性半導体ナノ構造を波長可変フェムト秒レーザーパルスで励起し、その後起きる励起子発光の時間変化を、ストリークカメラを用いて精密に計測する「超高速時間分解発光測定システム」を構築した。このシステムにより、磁性半導体の量子井戸、量子細線、量子ドットからの励起子発光の詳細な研究が可能になった。その結果、量子井戸における励起子の磁気ポーラロン形成、量子井戸揺らぎによる励起子局在過程、LO フォノンを伴った磁気ポーラロン形成などの詳細が明らかになった。また、量子ドットでの磁場による励起子発光寿命の増大、量子細線における励起子発光特性についても、時間分解発光分光の結果より、その原因を明らかにすることができた。発光の時間分解分光よりさらに時間分解能の高い超高速分光として、ポンププローブ過渡吸収分光システムが構築された。この分光では、200fs の時間分解能の分光測定ができる。これより、磁性半導体量子井戸における熱い電子正孔の緩和、励起子

磁気ポーラロン形成の初期過程、磁性イオンの光による整列などに関するフェムト秒ダイナミクスが新たに解明された。

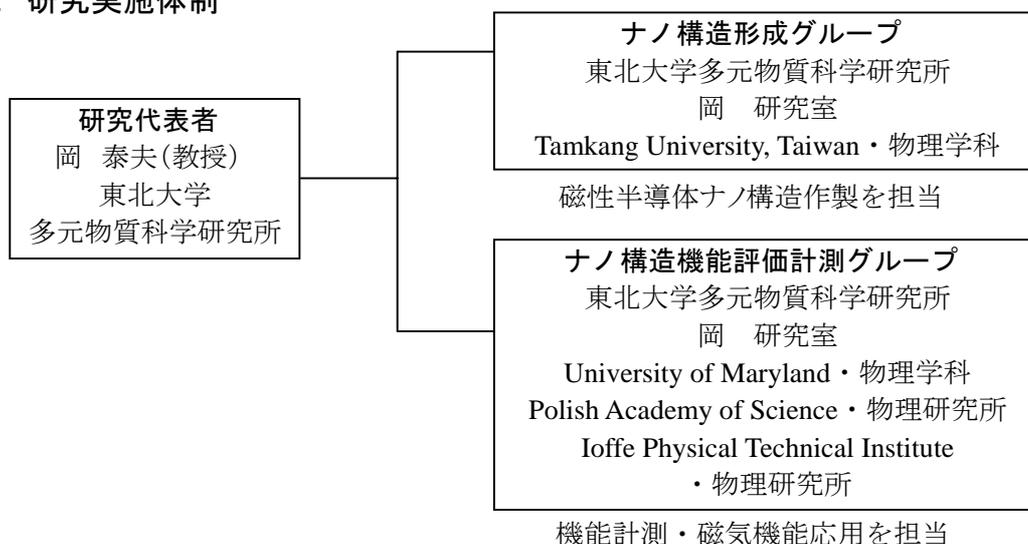
2. 研究構想

本研究は、磁性イオンを含む磁性半導体の次元性を十分に制御したナノ構造(量子ドット、量子細線、量子井戸、超格子)を設計・作成し、このナノ構造によりはじめて発現される巨大磁気光学機能を創出することを目的とした。このため $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 、 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ などをベースとした磁性半導体の低次元量子構造を設計し、分子線エピタキシー法と電子ビーム超微細加工によりサイズの的にも形状的にも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の成長を目指した。

得られる高品位の磁性半導体ナノ構造において、磁性イオンとの相互作用により起きる電子や励起子のフェムト秒領域 ($\sim 10^{-13}$ 秒) の超高速スピンドイナミクス、非線形磁気光学効果、レーザー発振現象を明らかにし、次元性制御によって生じる新しい巨大量子磁気光学機能の開拓を行うことを目標とした。またこの成果を用いて、「ナノ構造巨大磁気光学デバイス」の基礎を確立することを目指した。

本研究の特徴は、サイズの的にも形状的にも原子レベルで十分に制御された磁性半導体ナノ構造の創製技術を開発することにある。この技術が確立することにより、ナノ構造の次元を系統的に変化させてその物性を研究し、新しい機能性を開拓することが可能となる。磁性半導体のエピタキシー成長においては、原子、分子レベルでの表面プロセスを明らかにし、この知見に基づいてエピタキシー成長過程を制御する。作製した2次元量子井戸構造に超微細加工をほどこして、1次元および2次元の量子構造を作製する。これらの次元性を制御した斬新な磁性半導体ナノ構造について、超高速分光や非線形過渡分光実験を行い、磁性イオンとの交換相互作用によって起きる磁気光学効果と電子緩和現象の解明をして、磁性半導体ナノ構造の基礎的特性を明らかにする。この知見を元にして、半導体と磁性体が関与する新しい低次元量子物性の開拓とその応用に道を開く。研究代表者の磁性半導体の研究が、 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 系を用いた新しい光通信用の光アイソレーターの実用化に結び付いた実績を活かして、磁性半導体を用いたナノ構造磁気光学デバイスへの応用を計る。

3. 研究実施体制



4. ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
平成 11 年 4 月 7 日	平成 11 年度第 1 回 「CREST 岡チーム」 打合せ会議	東北大学 多元物質科 学研究所	15 人	各担当者が平成 10 年度におけるプロジェ クト課題の進行状況の報告を行い、平成 11 年度の研究方針を定めた。
平成 11 年 8 月 2 日	平成 11 年度第 2 回 「CREST 岡チーム」 打合せ会議	東北大学 多元物質科 学研究所	18 人	平成 11 年度の課題の進行状況について、 各研究者が報告を行い、今後の研究につ いて討論した。
平成 11 年 10 月 21-22 日	CREST「ナノ構造磁性 半導体の巨大磁気 光学機能の創出」 第 1 回研究会	東北大学 多元物質科 学研究所	24 人	プロジェクト研究の成果について、各担 当者が発表を行い、今後の研究方針を定 めた。
平成 12 年 1 月 17 日	平成 11 年度第 1 回 「CREST 岡チーム」 打合せ会議	東北大学 多元物質科 学研究所	17 人	平成 11 年度のプロジェクト課題につい て、各研究者が研究進展状況とまとめの 報告を行い、今後の問題を討論した。
平成 12 年 10 月 16-17 日	CREST「ナノ構造磁性 半導体の巨大磁気 光学機能の創出」 第 2 回研究会	東北大学 多元物質科 学研究所	26 人	各担当者が平成 12 年度のプロジェクト課 題研究の成果発表を行った。
平成 13 年 1 月 15 日	平成 13 年度第 1 回 「CREST 岡チーム」 打合せ会議	東北大学 多元物質科 学研究所	19 人	平成 12 年度のプロジェクト課題につい て、各研究者が研究進展状況とまとめの 報告を行い、今後の課題について討論し た。

5. 主な研究成果

(1) 原著論文等

1. J.Y. Jen, T. Tsutsumi, I. Souma, Y. Oka, J.R. Anderson and M. Gorska, *Stimulated Blue Emission Processes in Zn_{1-x}Cd_xSe/ZnSe Multi-Quantum Wells*, Appl. Surface Science 92, 547-551 (1996).
2. J.R. Anderson, M. Gorska, Y. Oka, J.Y. Jen, I. Mogi and Z. Golacki, *Magnetization studies of Sn_{1-x}Eu_xTe*, Physica B216, 307-309 (1996).
3. H. Okamoto, T. Hisatsugu, M. Takahashi and Y. Oka, *Magnetic Tuning of Carrier Tunneling Processes in the Cd_{1-x}Mn_xTe/ZnTe Asymmetric Double Quantum Wells*, The Physics of Semiconductors (World Scientific) Vol.3, 2239-2242 (1996).
4. K. Yanata and Y. Oka, *Exciton Luminescence and the Dynamics in Cd_{1-x}Mn_xSe Quantum Dots*, The Physics of Semiconductors (World Scientific) Vol.2, 1477-1480 (1996).
5. Y. Oka and K. Yanata, *Excitonic Properties of Nanostructure Semimagnetic Semiconductors*, J. Luminescence 70, 35-47 (1996).
6. M. Gorska, J. R. Anderson, J.L. Peng, Y. Oka, J.Y. Jen, I. Mogi, D. Ravot and Z. Golacki, *Concentration Dependence of the Exchange Interaction in Pb_{1-x}Eu_xTe*, Phys. Rev. B55, 4400-4404 (1997).
7. Y. Oka, *Exciton States and Exchange Interactions in Diluted Magnetic Nanostructures*, Proc. of Japanese-Polish Symposium on Diluted Magnetic Semiconductors, p30-33 (1997).
8. J.N. Zeng, I. Souma, Y. Amamiya, Y. Oka, *Ultrafast Tunneling Processes of Excitons and Carriers in Zn_{1-x}Cd_xSe/ZnSe Asymmetric Double Quantum Wells*, Technical Digest of CREO/Pacific Rim'97, ThE3, p128 (1997).
9. Y. Oka, *Excitonic Properties and Dynamics in Non-Magnetic and Diluted Magnetic II-VI Semiconductor Nanostructures*, Nonlinear Optics 18 (2-4), 207-214 (1997).
10. M.C. Debnath, J.N. Zeng, I. Souma and Y. Oka, *Exciton Recombinations and Stimulated Emissions in Zn_{1-x}Cd_xSe/ZnSe Quantum Wells*, Nonlinear Optics 18 (2-4), 219-222 (1997).
11. Y. Oka, *Excitonic Effects in Cd_{1-x}Mn_xSe Quantum Dots and Cd_{1-x}Mn_xTe/ZnTe Quantum Wells*, Phys. Stat. Sol. (b) 202, 795-804 (1997).
12. Y. Oka, K. Matsui, S. Takano, T. Hisatsugu, H. Okamoto, M. Takahashi, *Ultrafast Dynamics of Excitons in Cd_{1-x}Mn_xTe/ZnTe (x=0-0.2) Quantum Wells*, High Magnetic Fields in the Physics of Semiconductors II (World Scientific 1997) p553-556.
13. J.-Y. Jen Y. Oka, J. Anderson, M. Gorska and I. Mogi, *Magnetic Field Induced Exciton Confinement in Heavily Doped GaAs/Al_{1-x}Ga_xAs Quantum Wells*, High Magnetic Fields in the Physics of Semiconductors II (World Scientific 1997) p705-708.
14. Y. Oka, H. Okamoto, S. Takano, K. Egawa, K. Matsui, K. Yanata and M. Takahashi, *Magneto-Optical Properties and Exciton Dynamics in Nanostructure Diluted Magnetic Semiconductors: Cd_{1-x}Mn_xSe QDs and Zn_{1-x}Cd_xSe/ZnSe Quantum Wells*, J. Surface Analysis 3, 524-528 (1997).
15. J.N. Zeng, M.C. Debnath, I. Souma and Y. Oka, *Exciton Dynamics and Carrier Tunneling Processes in Zn_{1-x}Cd_xSe/ZnSe Asymmetric Double Quantum Wells*, J. Surface Analysis 3, 529-532 (1997).
16. H. Okamoto, K. Egawa, M. Takahashi and Y. Oka, *Dynamics of Exciton Magnetic Polaron in the Cd_{1-x}Mn_xTe/ZnTe Quantum Wells*, J. Luminescence 76/77, 211-213 (1998).

17. J.X. Shen, Y. Oka, W. Ossau, F. Fischer, A. Waag, G. Landwehr, *Difference of Self-Energy Corrections for Charged and Uncharged States in Degenerate Two Dimensional Systems*, Physica B249/251, 589-593 (1998).
18. 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).
19. Y. Oka, *Excitonic Effects in Diluted Magnetic Semiconductor Nanostructures*, Physics of the Solid State 40, 778-780 (1998).
20. Y. Oka, S. Takano, K. Egawa, K. Matsui, H. Okamoto, K. Yanata and M. Takahashi, *Magneto-Optical Properties and Exciton Dynamics in $Cd_{1-x}Mn_xSe$ Quantum Dots and $Cd_{1-x}Mn_xTe/ZnTe$ Quantum Wells*, Institute of Physics. Conf. Ser. No152, 503-506 (1998).
21. 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).
22. 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*, Proc. 3rd Int. Conf. on Excitonic Processes in Condensed Matter (Boston 1998) We 995.
23. K. Egawa, T. Ohtuki, M. Takahashi, J.X. Shen, H. Okamoto and Y. Oka, *Ultrafast Exciton Dynamics in $Cd_{1-x}Mn_xTe/ZnTe$ Quantum Wells*, The Physics of Semiconductors, (World Scientific, 1998) Tu3-A9.
24. J.X. Shen, Y. Oka, C.Y. Hu, W. Ossau and G. Landwehr, *Dynamics of Photo-Excited Carriers in Modulation doped GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs Heterojunctions*, The Physics of Semiconductors, (World Scientific, 1998) Th-P45.
25. M.C. Debnath, I. Souma, E. Shirado, H. Mitsu, T. Sato, J.X. Shen and Y. Oka, *Dynamics of Photo-Excited Carriers in MBE Grown Semimagnetic Epilayers in Magnetic Fields*, Superlattices, Microstructures (1998).
26. 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.
27. J.X. Shen, Y. Oka, W. Ossau, G. Landwehr, K.J. Friedland, R. Hey, K. Ploog and G. Weinmann, *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).
28. R. Pittini, H. Mitsu, M. Takahashi, J.X. Shen and Y. Oka, *Time Resolved Magneto-Optical Experiments in $Cd_{1-x}Mn_xTe/ZnTe$ Multiple Quantum Wells*, J. Appl. Phys. 85, 5938-5340 (1999).
29. M.C. Debnath, I. Souma, E. Shirado, H. Mitsu, T. Sato, J.X. Shen and Y. Oka, *Dynamics of Photoexcited Carriers in Molecular Beam Epitaxy Grown Semimagnetic Epilayers in Magnetic Fields*, J. Appl. Phys. 85, 5941-5943 (1999).
30. J.X. Shen, Y. Oka, W. Ossau, F. Fischer, A. Waag and G. Landwehr, *Enlarged Paramagnetism by Electron-Electron Exchange Interactions in n-type Modulation Doped $Cd_{1-x}Mn_xTe/Cd_{1-x-y}Mn_xMg_yTe$ Single Quantum Wells*, J. Appl. Phys. 85, 5947-5949 (1999).

31. 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).
32. Y. Oka, J.X. Shen, K. Takabayashi, N. Takahashi, H. Mitsu, I. Souma and R. Pittini, *Dynamics of Excitonic Magnetic Polarons in Nanostructure Diluted Magnetic Semiconductors*, *J. Luminescence* 83/84, 83-89 (1999).
33. 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).
34. M.C. Debnath, I. Souma, E. Shirado, T. Sato, J.X. Shen, 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).
35. 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) pp101-112.
36. J.X. Shen, R. Pittini and Y. Oka, *Asymmetric Luminescence Line Shape and Exciton Energy Relaxation in Zn_{1-x-y}Mg_xCd_ySe Epilayers*, *Appl. Phys. Lett.* 75, 3494-3496 (1999).
37. Y. Ono, S. Shamoto, K. Sato, T. Kamiya, T. Sato, Y. Oka, Y. Yamaguchi, K. Ohoyama, Y. Morii, T. Kajitani, *Short-Range Spin Order and Magnetic Excitations in Diluted Magnetic Semiconductor Zn_{0.568}Mn_{0.432}Te*, *J. Phys. Chem. Solids* 60, 1253-1255 (1999).
38. Shucheng Chu, Tetsuhiro Saisho, Kazuo Fujimura, Shingo Sakakibara, Fumiyasu Tanoue, Kenei Ishino, Akihiro Ishida, Hiroshi Harima, Yasuo Oka, Katsumi Takahiro, Yefan Chen, Takafumi Yao, and Hiroshi Fujiyasu, *Growth and Characterization of Hot-Wall Epitaxial InGaN Films Using Mixed (Ga+In) Source*, *J. Appl. Phys.* 38, 4973-4979 (1999).
39. H. Mitsu, K. Egawa, M.C. Debnath, J.X. Shen and Y. Oka, *Observation of Excitonic Magnetic Polaron Formation in the Cd_{1-x}Mn_xTe Quantum Wells by Selectively Excited Ultrafast Time-Resolved Luminescence and Absorption Spectroscopies*, *The Electrochemical Society Inc.* 204-209 (1999).
40. 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*, *The Electrochemical Society Inc.* 210-215 (1999).
41. J.X. Shen, R. Pittini, Y. Oka and W. Ossau, *Exciton Dynamics in Modulation Doped Heterojunctions*, *The Electrochemical Society Inc.* 234-239 (1999).
42. 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.* B59, 8093-8104 (1999).
43. 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).
44. 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).
45. M.C. Debnath, I. Souma, E. Shirado, T. Sato, J.X. Shen, 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).
46. 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).
 47. 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).
 48. 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).
 49. 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, 183-186 (2000).
 50. 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).
 51. 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).
 52. 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).
 53. 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).
 54. 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).
 55. 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).
 56. 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).
 57. M.C. Debnath, R. Pittini, J.X. Shen and Y. Oka, *Molecular beam epitaxy growth and magneto-optical study of Cd_{1-x}Mn_xTe epilayers and quantum wells*, Recent Res. Devel. Applied Phys. 3, 109-126 (2000).
 58. J.X. Shen, R. Pittini, S. Kai, W. Ossau and Y. Oka, *Superlinear photoluminescence of vertical transport of photo-excited carriers in modulation doped heterojunctions*, SPIE-Int. Soc. Opt. Eng. Proceedings of Spie-the International Society for Optical Engineering, vol.3940, 38-52 (2000).
 59. M. Nogaku, J.X. Shen, R. Pittini, T. Sato and Y. Oka, *Transient-level crossing of free and bound excitonic magnetic polarons in Cd_{1-x}Mn_xTe single crystals*, Phys. Rev. B63, 153314-1-4 (2001).

60. K. Kayanuma, E. Shirado, M.C. Debnath, I. Souma, J.X. Shen, S. Permogorov and Y. Oka, *Spin transport of excitons in asymmetric double quantum wells of $Cd_{1-x}Mn_xTe$* , Proc. 25th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors, eds. N. Miura and T. Ando (Springer, 2001) pp.491-492.
61. J.X. Shen, R. Pittini and Y. Oka, *Superlinear photoluminescence in GaAs/(GaAl)As heterojunctions*, Proc. 25th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors, eds. N. Miura and T. Ando (Springer, 2001) pp.563-564.
62. R. Pittini, J.X. Shen, M. Takahashi and Y. Oka, *Magnetic polaron dynamics at high excitation densities in $Cd_{1-x}Mn_xTe/ZnTe$ multiple quantum wells*, Proc. 25th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors, eds. N. Miura and T. Ando (Springer, 2001) pp.629-630.
63. M.C. Debnath, J.X. Shen, I. Souma, M. Takahashi, T. Sato, R. Pittini and Y. Oka, *Radiative recombination and spin relaxation of excitons in $Cd_{1-x}Mn_xTe$ quantum wells*, Proc. 25th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors, eds. N. Miura and T. Ando (Springer, 2001) pp.639-640.
64. S. Permogorov, Y. Oka, R. Pittini, J.X. Shen, K. Kayanuma, A. Reznisky, L. Tennishev and S. Verbin, *Direct study of spin relaxation processes in ZnCdSe/ZnSe 2D systems through time resolved measurements of polarized exciton emission*, Proc. 25th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors, eds. N. Miura and T. Ando (Springer, 2001) pp.643-644.
65. T. Saitou, N. Takahashi, H. Ikada, K. Shibata, T. Sato, Z. Chen, I. Souma and Y. Oka, *Magneto-optical properties of diluted-magnetic-semiconductor quantum wires*, Proc. 25th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors, eds. N. Miura and T. Ando (Springer, 2001) pp.1123-1124.
66. K. Shibata, K. Takabayashi, I. Souma, J.X. Shen, K. Yanata and Y. Oka, *Exciton recombination processes in $Cd_{1-x}Mn_xSe/ZnSe$ and $CdSe/Zn_{1-x}Mn_xSe$ quantum dots under magnetic fields*, Proc. 25th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors, eds. N. Miura and T. Ando (Springer, 2001) pp.1137-1138.
67. Z.H. Chen, T. Saitou, K. Shibata, T. Sato and Y. Oka, *Magnetic field induced type I to type II transition in $ZnSe/Zn_{1-x}Mn_xSe$ quantum wires*, Proc. 25th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors, eds. N. Miura and T. Ando (Springer, 2001) pp.1187-1188.
68. Y. Oka, K. Shibata, T. Saitou, H. Ikada, K. Kayanuma, I. Souma, M.C. Debnath, Z. Chen, *Quantum Dots, Wires and Wells of II-VI Diluted Magnetic Semiconductors and their Magneto-Optical Properties*, Proc. 6th International Symposium on Advanced Physical Fields, 115-119 (2001).
69. Z.H. Chen, M.C. Debnath, K. Shibata, T. Saitou, T. Sato and Y. Oka, *Modification of exchange interaction parameters by wire width in $Cd_{0.95}Mn_{0.05}Te/Cd_{0.90}Mg_{0.10}Te$ quantum wires*, J. Appl. Phys. 89, 6701-6703 (2001).
70. K. Kayanuma, E. Shirado, M.C. Debnath, I. Souma, Z. Chen, Y. Oka, *Spin transport dynamics of excitons in $CdTe/Cd_{1-x}Mn_xTe$ quantum wells*, J. Appl. Phys. 89, 7278-7280 (2001).
71. M. Nogaku, R. Pittini, T. Sato, J.X. Shen, Y. Oka, *Formation Dynamics of Free Excitonic Magnetic Polarons in $Cd_{1-x}Mn_xTe$* , J. Appl. Phys. 89, 7287-7289 (2001).
72. F.Y. Tsai, C.P. Lee, O. Voskoboynikov, H.H. Cheng, J.X. Shen and Y. Oka, *Time-resolved photoluminescence study of InGaAs/GaAs quantum wells on (111)B GaAs substrates under*

- magnetic fields, *J. Appl. Phys.* 89, 7875-7878 (2001).
73. K. Kayanuma, E. Shirado, M.C. Debnath, I. Souma, S. Permogorov and Y. Oka, *Tunneling of spin polarized excitons in double quantum wells of Cd_{1-x}Mn_xTe and CdTe*, *Physica E10*, 295-299 (2001).
 74. M.C. Debnath, J.X. Shen, I. Souma, M. Takahashi, T. Sato, R. Pittini, Z.H. Chen and Y. Oka, *Excitonic spin states and radiative recombinations in Cd_{1-x}Mn_xTe/Cd_{1-y}Mg_yTe spin superlattices*, *Physica E10*, 310-314 (2001).
 75. Y. Oka, S. Permogorov, R. Pittini, J.X. Shen, K. Kayanuma, A. Reznisky, L. Tennishev and S. Verbin, *Spin relaxation times of exciton states in ZnCdSe/ZnSe low-dimensional heterostructures*, *Physica E10*, 315-319 (2001).
 76. M. Nogaku, J.X. Shen, R. Pittini, T. Sato and Y. Oka, *Transient-level crossing of free and bound excitonic magnetic polarons in Cd_{1-x}Mn_xTe*, *Physica E10*, 320-325 (2001).
 77. R. Pittini, J.X. Shen, M. Takahashi and Y. Oka, *Ultrafast magnetic polaron dynamics in Cd_{1-x}Mn_xTe/ZnTe multiple quantum wells*, *Physica E10*, 326-330 (2001).
 78. J.X. Shen, R. Pittini, M. Debnath, I. Souma and Y. Oka, *Magnetic versus non-magnetic localization in Cd_{1-x}Mn_xTe epilayer*, *Physica E10*, 348-352 (2001).
 79. K. Shibata, K. Takabayashi, I. Souma, J.X. Shen, K. Yanata and Y. Oka, *Magneto-luminescence in Cd_{1-x}Mn_xSe/ZnSe and CdSe/Zn_{1-y}Mn_ySe quantum dots and quantum wells*, *Physica E10*, 358-361 (2001).
 80. H. Ikada, T. Saitou, N. Takahashi, K. Shibata, T. Sato, Z. Chen, I. Souma and Y. Oka, *Fabrication and excitonic properties of Zn_{0.69}Cd_{0.23}Mn_{0.08}Se/ZnSe quantum wires*, *Physica E10*, 373-377 (2001).
 81. M. C. Debnath, I. Souma, M. Takahashi, T. Sato, R. Pittini, F. Sato, M. Tanaka and Y. Oka, *Excitonic properties of Cd_{1-x}Mn_xTe quantum wells grown by molecular beam epitaxy*, *J. Crystal Growth*. 229, 109-113 (2001).
 82. 岡 泰夫、ナノコンポジットによる新機能付与ースピンエレクトロニクス (半導体と磁性体の複合薄膜、希薄磁性半導体) ー、ナノマテリアルの最新技術 (シーエムシー) 編集 : 小泉他編、195-200 (2001)。
 83. K. Kayanuma, S. Shirotori, M.C. Debnath, Z. Chen, I. Souma and Y. Oka, *Spin Dynamics of Excitons in CdTe-Cd_{1-x}Mn_xTe Double Quantum Wells*, *Proc. The 10th International Conference on Narrow Gap Semiconductors and Related Small Energy Phenomena (NGS10)*, IPAP-Conf. Series 2, pp.282-284 (2001).
 84. Z.H. Chen, T. Saitou, H. Ikada, M.C. Debnath, K. Shibata, T. Sato and Y. Oka, *Magnetic Polaron Dynamics of Cd_{1-x}Mn_xTe/Cd_{1-y}Mg_yTe Mesa-Shaped Quantum Wires in Magnetic Fields*, *Proc. The 10th International Conference on Narrow Gap Semiconductors and Related Small Energy Phenomena (NGS10)*, IPAP-Conf. Series 2, pp.285-288 (2001).
 85. Y. Oka, K. Shibata, T. Saitou, H. Ikada, K. Kayanuma, I. Souma, M.C. Debnath, Z. Chen, and A. Murayama, *Fabrication and Magneto-Optical Study of Diluted Magnetic Semiconductor Nanostructures*, *Ternary and Multinary Compounds in the 21st Century IPAP Books 1*, pp. 307-311 (2001).
 86. K. Shibata, E. Nakayama, I. Souma, A. Murayama and Y. Oka, *Exciton recombination processes in Cd_{1-x}Mn_xSe/ZnSe quantum dots under magnetic fields*, *Phys. Stat. Sol. (b)* 229, 473-476 (2002).

87. M.C. Debnath, Z.H. Chen, I. Souma, K. Sato, A. Murayama and Y. Oka, *Spin-dependent carrier confinements and radiative recombinations in $Zn_{1-x}Mn_xTe/Zn_{1-y}Mg_yTe$ spin superlattices*, Phys. Stat. Sol. (b) 229, 695-699 (2002).
88. K. Kayanuma, M.C. Debnath, I. Souma, Z. Chen, A. Murayama and Y. Oka, *Exciton spin injection in $CdTe/Cd_{1-x}Mn_xTe$ double quantum wells*, Phys. Stat. Sol. (b) 229, 761-764 (2002).
89. A.V. Scherbakov, D.R. Yakovlev, A.V. Akimov, W. Ossau, L.W. Molenkamp, T. Wojtowicz, G. Karczewski, J. Kossut, J. Cibert, S. Tatarenko, Y. Oka, I. Souma, *Spin-Lattice Relaxation Study in Semimagnetic Quantum Wells and Quantum Dots*, Phys. Stat. Sol. (b) 229, 723-726 (2002).
90. L. Chen, H. Falk, P.J. Klar, W. Heimbrodt, F. Brieler, M. Froba, H.-A. Krug von Nidda, A. Loidl, Z. Chen and Y. Oka, *Modification of the Magnetic and Electronic Properties of Ordered Arrays of (II, Mn)VI Quantum Wires Due to Reduced Lateral Dimensions*, Phys. Stat. Sol. (b) 229, 31-34 (2002).
91. K. Hyomi, A. Murayama, U. Hiller, Y. Oka, and C.M. Falco, *Surface Magnetic Anisotropy of Co(0001) and Effects of Ultrathin Cu-Overlayers Studied by In-Situ Spin-Wave Brillouin Light Scattering*, Appl. Phys. Lett. 80, 282-284 (2001).
92. A. Murayama, U. Hiller, K. Hyomi, Y. Oka and C.M. Falco, *In-situ spin-wave Brillouin light scattering for the study of Co surfaces*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, in print.
93. K. Hyomi, A. Murayama, Y. Oka and C.M. Falco, *Effects of perpendicular magnetic anisotropy on a large enhancement of elastic light scattering in ultrathin Co films*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, in print.
94. K. Hyomi, A. Murayama, Y. Oka, S. Kondoh and C.M. Falco, *MBE growth of ultrathin Co films on a Si(111) surface with ultrathin buffer layers*, J. Crystal Growth, in print.
95. K. Hyomi, A. Murayama, Y. Oka, and C. M. Falco, *Misfit strain and magnetic anisotropies in ultrathin Co films hetero-epitaxially grown on Au/Cu/Si(111)*, J. Crystal Growth, in print.

(2) 特許出願（国内 2件）

岡泰夫、村山明宏、磁気光学素子、特願 2001-187021、2001年6月20日

岡泰夫、村山明宏、白鳥聡志、磁気光学素子、特願 2001-187022、2001年6月20日

(3) 受賞、新聞報道等

なし