

希薄磁性半導体の光機能

Optical Properties of Diluted Magnetic Semiconductors

安藤功兒 電子技術総合研究所

K. Ando, Electrotechnical Laboratory

Recent topics related to the magneto-optical properties of diluted magnetic semiconductors (DMS) are discussed. The topics include the integration of a $Cd_{1-x}Mn_xTe$ magneto-optical waveguide on a GaAs substrate, ultra-fast optical control of the Mn^{2+} moment by photo-injected carriers, and magneto-optical properties of new DMS, such as Ni- and Cr-based II–VI DMS and Mn-based III–V DMS.

Key words: $Cd_{1-x}Mn_xTe$, diluted magnetic semiconductors, magneto-optics, optical waveguide, ultra-fast magneto-optical effects

1. はじめに

希薄磁性半導体^{11,2)} (Diluted Magnetic Semiconductor) または半磁性半導体 (Semimagnetic Semiconductor) は CdTe, ZnTe, ZnSe などの閃亜鉛鉱型またはウルツ鉱型の 結晶構造をもつ II-VI 族半導体を母体として,その陽イオ ンの一部を遷移金属イオンで置換したものである.ユーロ ピウムカルコゲナイド³⁾ などの磁性半導体と同じく,半導 体キャリアと磁性スピンとの強い相互作用による特異な物 性と,これを利用した新しい機能デバイスの可能性に興味 がもたれている.希薄磁性半導体の特徴として (a) 結晶の 質が良い,(b) 広い範囲で混晶をつくる,(c) GaAs などの 各種基板上にエピタキシャル成長が可能,(d) 量子井戸な どのヘテロ構造ができるなどが挙げられる.巨大磁気光学 効果などの特異な物性を,母体の非磁性半導体のバンド構 造をもとに厳密に議論することが可能となっている.

希薄磁性半導体の研究は80年代前半のバルク結晶の物 性解明,80年代後半から90年代前半にかけての量子閉じ 込め構造におけるスピン依存物性の研究という二つの盛り 上がりの時期を経て,現在は具体的な応用が検討されるよ うになっている.Cd₁、Mn_xTeやCd₁、,_yHg_yMn_xTeの巨 大磁気光学効果を利用したバルク型光アイソレータ^{41,51}の 実用化は,磁性半導体および希薄磁性半導体の研究の歴史 を通じて初めて実用的なデバイスに結びついた例である. これらの物質群の研究が単なる物性的な興味の段階を脱 し,斬新な機能デバイスに結びついていく可能性は今後ま すます高まっていくものと期待される.また最近は薄膜作 製技術を利用してバルク状では得られない新しい希薄磁性 半導体を合成しようとする試みも行われている. 本稿では、希薄磁性半導体のスピン・キャリア相互作用 を利用して実現される新しい光機能を例示するとともに、 新材料探索の現状と課題を、筆者らのグループが行ってい る磁気光学的な研究の立場から紹介したい.

2. 希薄磁性半導体の磁気光学効果

Fig. 1 は Cd₁ Mn_xTe の室温におけるファラデー回転 スペクトルの一例である⁶⁾. 室温において Cd_{1 x}Mn_xTe は 常磁性であるため、5Kガウスの磁場をかけている.非常 に大きなファラデー回転角は希薄磁性半導体が実用的な磁 気光学材料になりうることを示している.希薄磁性半導体 の磁気光学効果ではバンドギャップにおける光学遷移が磁 性イオンの磁化とキャリアスピンの相互作用によって大き なゼーマン分裂を起こすために発生する. そのため磁気光 学効果は希薄磁性半導体のバンドギャップ付近において大 きくなる. このことは同時に光吸収も大きくなることを意 味している.応用のためには磁気光学効果の大きさではな く単位光吸収当たりの磁気光学効果として定義される磁気 光学性能指数が重要である. Cd1 xMnxTeおよび Cd_{1 x},Hg_yMn_xTeのバルク結晶の磁気光学性能指数を文 献のデータから推定したものを Fig. 2 に示す^{5), 6), 8)}. 比較 のために代表的な磁気光学材料である、フェリ磁性ガー ネット酸化物の Y₃Fe₅O₁₂ (YIG) などの磁気光学性能指数 も併せて示す⁹⁾. 図から光吸収が大きく磁性ガーネットが 使用できない波長1ミクロン以下の近赤外から可視の波 長領域で、希薄磁性半導体が大きな性能指数をもつことが わかる.希薄磁性半導体のバンドギャップは組成により変 化させることができ、連続的にゼロにまで減少させること



Fig. 1 Faraday rotation of a $Cd_{1-x}Mn_xTe$ film as a function of the wavelength.⁶⁾



Fig. 2 Magneto-optical figure-of-merit of Cd_{1-x} - Mn_xTe and $Cd_{1-x-y}Hg_yMn_xTe$ bulk crystals for H = 5 kG at room temperature, estimated from published data.^{5), 6), 8)} The data for Fe, Co, and YIG are from Bongers.⁹⁾

が可能であるため、1 ミクロン以上の長波長域でも同様に 高い性能指数が期待できる¹⁰⁾.希薄磁性半導体が磁気光学 材料として有望であることは研究の初期から指摘されてい た^{8),11)}が、実際にデバイスとして実用化されるようになっ たのは良質で大きな単結晶を成長する技術が確立した最近 のことである^{4),5)}.特に Cd_{1-x-y}Hg_yMn_xTe を用いた光アイ ソレータは、Er ドープ光ファイバーを用いた光増幅器の 励起波長である 0.98 μ m で使用できるため重要な光部品 となっている⁴⁾.

3. Cd_{1-x}Mn_xTe 希薄磁性半導体光導波路

近年、光アイソレータ^{12),13)}などの磁気光学デバイスを 半導体光回路と一体的に集積化する技術に興味がもたれる ようになった. これは光通信・光情報処理の進展に伴って より信頼性の高い低コストな光デバイスを作製する必要性 が高まってきたためである. 代表的な磁気光学材料である 磁性ガーネット結晶は半導体基板上への直接成長が不可能 である. そのため直接的なボンディング法を用いたガー ネット薄膜と半導体基板との貼合せ法14,15)や,強磁性金 属薄膜を装荷した半導体光増幅器16)などのいくつかの手 法が模索されている.希薄磁性半導体は優れた磁気光学材 料であるばかりでなく、 GaAs などの半導体基板上に直接 エピタキシャル成長が可能であるという特長も有してい る. これにより半導体光デバイスと光アイソレータなどの 磁気光学デバイスを一体的に集積化した光集積回路が可能 となるはずである. 最近, Cd_{1-x}Mn_xTe 薄膜を用いて GaAs 基板上に光導波路を作製することが実現されてい Z^{6), 17)}

分子線エピタキシー法によってサファイア基板および



Fig. 3 Schematic diagram of one-prism *m*-line spectroscopy.



Fig. 4 *m-lines* patterns of double-layer $Cd_{1-x}Mn_{x-1}$ Te waveguides on (a) sapphire and (b) GaAs substrates.¹⁷⁾

GaAs 基板上に Cd1-xMnxTe の良質な単結晶薄膜を成長さ せた. Fig. 3 は光導波モードの評価装置の模式図である. 高い屈折率を有する GaP プリズムと薄膜とを密着させ, その接合点に向けて入射角度を広げたレーザ光を照射す る. 薄膜中の導波モードに対応した入射角をもつレーザー 光は薄膜中に進行し薄膜面からの反射光には現れない. よって各導波モードに対応した暗線 (m-line) が反射パター ンに現れるはずである. 波長 1150 nm のレーザ光を用い て観測した反射パターンを Fig. 4 に示す. いずれも 1.5 μm の厚みの Cd_{1-x}Mn_xTe (x = 0.45) 薄膜を同じ厚みの $Cd_{1-x}Mn_xTe$ (x=0.55) 薄膜の上にヘテロ・エピタキシャ ル成長させた構造である. Cd1-xMnxTeの屈折率17)はMn 濃度 x とともに減少するため、上層の $Cd_{1-x}Mn_xTe$ (x =0.45) は下層の Cd_{1-x}Mn_xTe (x=0.55) より高い屈折率を もっている. Cd_{1-x}Mn_xTeよりも低い屈折率をもつサファ イア基板上に成長させた場合には、導波モードに対応する

日本応用磁気学会誌 Vol. 23, No. 2, 1999



Fig. 5 Streak of guided laser light in a $Cd_{1-x}Mn_xTe$ waveguide on a GaAs substrate.⁶⁾

暗線が多数見られる. Fig. 4(a)の右側に見られる4本の暗 線は二層の Cd_{1-x}Mn_xTe 薄膜を突き抜けて進行する導波 モードであり、残りの左端の暗線は最上層の Cd1 *Mn*Te 薄膜中のみを伝播する導波モードである. GaAs 基板上に 成長させた場合には二層の Cd1-x Mnx Te を突き抜けて導 波するモードは観測されない.GaAs 基板は Cd1 "Mn_xTe よりも高い屈性率と大きな光吸収係数をもつため, GaAs 基板に到達したレーザ光は吸収されてしまい導波モードが 存在できない. このことは GaAs 基板上に直接成長させた Cd_{1-x}Mn_xTe 薄膜を光導波路として用いることはできない ということを示している.しかし図に示すように、わずか に低い屈折率をもつ異なる組成の Cd1 xMnxTe 層をバッ ファー層として用いれば,最上層のCd1 xMnxTeを光導波 路として用いることが可能となる. Fig. 5 は波長 780 nm のレーザー光が、GaAs 基板上の Cd₁ _xMn_xTe 光導波路中 を伝播する状態を観察した例である.

光デバイスで中心的な役割を担う化合物半導体の基板上 に磁気光学光導波路を集積化することが可能になり,将来 の高機能で高い信頼性をもつ光集積回路の実現に向けて道 が開けた.ただし,現在 633 nm の波長における磁気光学 性能指数は 9°/dB (H=5 kG) 程度とバルクの値に比べて 2桁ほど小さな値にとどまっている⁶⁾.これは Cd₁ _xMn_xTe と GaAs 基板との間の 12% もの大きな格子定数の違いに より発生する欠陥のためと考えられる.ZnTe バッファー 層の挿入⁶⁾や,格子整合の良い基板の使用などによりさら に光学損失の低減を行う努力がなされている.

4. 光による磁気モーメントの制御

希薄磁性半導体における磁性スピンとキャリアスピンの 間の大きな交換相互作用(sp-d 交換相互作用)を利用すれ ば,通常の磁気光学効果の逆プロセスとして、光励起でス ピン偏極したキャリアを希薄磁性半導体中に注入すること により磁性スピンの運動を直接的に制御することができる はずである. Crooker ら¹⁸⁾は(Zn, Cd, Mn) Se/ZnSe 系量 子井戸構造において、光励起による電子スピンおよび





Fig. 6 Configuration of the time-resolved magneto-optical Kerr rotation measurement. Single or double pulses are used for pumping.²⁰⁾



Fig. 7 Time-resolved Kerr rotation induced by (a) a single σ^+ pump pulse, and (b) double σ^+ pump pulses at separation times of 12 ps and 18 ps at 5 K and 3 T.²⁰⁾

Mn²⁺ スピンのラーモア歳差運動の観測に成功した. 秋本 ら^{19,20)} は、この手法をさらに進め Mn²⁺ スピンのラーモ ア歳差運動の増幅および停止ができることをフェムト秒光 パルスを用いた光誘起磁気カー効果を用いて実証した.

Fig. 6 は実験の模式図である²⁰⁾. 試料は励起子の低次元 化により光吸収ピークを先鋭化した CdTe/Cd₁ _xMn_xTe 多重量子井戸である. 外部磁場を試料面内で光の進行方向 と垂直の方向にかける(ホークト配置). 200 fs の幅の円 偏光超短光パルスで試料を強く励起し,試料中に電子およ びホールを発生させる. これらのキャリアのスピンは円偏 光の選択則($\Delta mz = \pm 1$)により,励起光の進行方向に沿っ て偏極している. 目的に応じ単一または 2 連の光パルス励 起を行う. 試料の中には,電子,ホール,そして Mn²⁺の 3 種類のスピンが存在するが,そのスピンの y 軸方向の成 分を,強度の弱い直線偏光の光パルスをプローブとして用 い磁気光学カー効果により検出する. 励起光に対するプ ローブ光の遅延時間を連続的に変化させることにより,各 スピンの挙動を調べることができる. Fig. 7(a) は σ^+ の偏 光をもつ単一の光パルスで励起した場合のカー回転角を示





す²⁰⁾. 周期の異なる 2 種類の振動が見られる. 励起直後に は電子およびホールのスピンは光の進行方向にそろってい る. その後電子のスピンは外部磁場の周りに ω_{el} の周波数 でラーモア歳差運動を始める (Fig. 8). これが Fig. 7(a) に おける 20 ps 以下の励起直後に見られる振動に対応する. 量子井戸中では重いホールと軽いホールのエネルギー縮退 が破れるため、ホールのスピンは回転運動を行うことがで きないので観測にはかからない. 一方,数百 ps 以上の長 期にわたって続く長周期の振動は Mn^{2+} モーメントが外 部磁場の周りを周波数 ω_{Mn} でラーモア歳差運動をするこ とに対応している. ホールのスピンが強い p-d 交換相互作 用を介して Mn^{2+} モーメントに垂直方向の有効磁場を与 えるために、 Mn^{2+} モーメントが z 軸方向から傾いて歳差 運動が開始される. 有効磁場は数ガウス程度で、 Mn^{2+} モーメントの傾きは数 100μ ラジアン程度である¹⁹⁾.

Fig. 7(b) は間隔を置いて 2 個の σ^+ 偏光光パルスで励起 した場合の磁気カー効果の時間変化を示している²⁰⁾. 第 1 励起パルスと第 2 励起パルスの時間間隔が 12 ps である ときには Mn^{2+} モーメントの歳差運動の振幅は、単一パル ス励起の場合 (Fig. 7(a)) に比べ大きくなっている. 12 ps の時間間隔はちょうど Mn^{2+} の歳差運動の 1 周期に対応 している. 1 周期の回転の後に同位相の有効磁場が加えら れるために Mn^{2+} モーメントの傾きが大きくなったもの である. 一方、励起パルスの間隔を歳差運動周期の 1.5 倍 である 18 ps としたときには、 Mn^{2+} の歳差運動は完全に 停止させられていることがわかる. これは半周期回転した ところで有効磁場が逆位相に加えられたためである.

これらの効果は現状では低温でしか観測されず,また $Mn^{2+} モ - メ \gamma トの傾き角度も応用には十分と言えないが、この実験は希薄磁性半導体のsp-d 交換相互作用を利用して磁気モーメントを直接かつ高速に制御できる可能性を示すものである。このようなフェムト秒超短光パルスを用いて希薄磁性半導体の新しい機能を探る研究は、ほかにも各種試みられており、例えばCdTe/Cd_{1-x}Mn_xTe量子井戸やHg_{1-x}Mn_xTeにおいて、レーザ光の強度に依存して$

ファラデー回転角が10度程度も変化する非線形ファラ デー回転が報告されている^{21,22}. 高速応答する半導体キャ リアと磁性スピンとの間の強い相互作用を利用するこれら の光機能は将来メモリー,高速光-光スイッチなどに利用 されよう.

5. 新しい希薄磁性半導体を求めて

希薄磁性半導体材料としては,従来もっぱら Mn²⁺, Fe²⁺, Co²⁺ イオンを含む II-VI 族半導体が研究対象とされ てきた. その他の遷移金属を含む II-VI 族希薄磁性半導体 の電子状態は理論的に調べられてきた^{23)~25)} が,試料の作 製が困難なため実験的な研究は最近まで行われていなかっ た. 一方, MBE 成長などの各種薄膜成長法においてはバ ルク結晶としては合成できない物質が合成される例は多く 知られている. 仮想物質として長い間理論計算の対象でし かなかった閃亜鉛鉱型結晶構造の MnTe²⁶⁾ や MnSe^{27),28)} が MBE 法でいとも簡単に合成されたのはその好例であ る. そのため,薄膜作製技術を用いて新しい希薄磁性半導 体を合成しようとする試みがなされるようになった.

5.1 遷移金属イオンの打ち込みによる希薄磁性半導体 の合成

イオン打ち込みによる新しい希薄磁性半導体の合成法が 開発されている29. この方法の特徴は、既存の方法では合 成できない新しい希薄磁性半導体を生み出す可能性を秘め ている点にある. イオンを打ち込むという荒っぽい手法で 希薄磁性半導体が合成可能であることを, すでに素性がよ く知られている Zn_{1-x}Co_xTe を例にして示す²⁹⁾. サファイ ア基板上に成長させた ZnTe 薄膜に、Coイオンを 200 keV のエネルギーで加速して 1×10¹⁵ Co/cm² の面密度で 打ち込んだ. イオン打ち込み層の厚みは表面から約100 nm であるので、1×10²¹ Co/cc と大量の Co を打ち込ん だことになる. Fig.9 は試料を 500℃ で1分間熱処理した 状態の磁気円二色性 (MCD) スペクトルである²⁹⁾. MCD は 磁気光学効果の一種で、そのスペクトルはバンド構造の各 臨界点におけるゼーマン分裂を反映している. Co イオン を打ち込む前の ZnTe の MCD は Fig.9 の信号レベルに比 べて無視できるほど小さい.この MCD 強度の大幅な増大 は、Coの磁気モーメントによって半導体バンドが大きく ゼーマン分裂することを示している. $E_0, E_0 + \Delta_0, E_1, E_1 +$ ⊿」の遷移における MCD スペクトルのパターンは MBE 成長により得られる Zn1-xMnxTe 薄膜のそれと全く同じ であり、その符号はホールのスピンと Coのスピンが反強 磁性的に結合していることを示している.また 1.5 eV 付 近の構造は Ta対称性をもつサイトに Co²⁺ イオンがある 場合に特徴的な d-d* 遷移^{29)~31)} であり Co²⁺ が Zn²⁺ を置 換したことを示す. その MCD 強度から打ち込んだ Coイ オンの少なくとも 70% イオンが, ZnTeの Zn イオンを置 換していることがわかった. このように、イオン打ち込み

日本応用磁気学会誌 Vol. 23, No. 2, 1999



Fig. 9 MCD spectrum of ZnTe: Co $(1 \times 10^{16} \text{ Co}/\text{cm}^2)$. The magnified part shows the structure of the d-d* intra-ionic transitions.²⁹⁾

法は,希薄磁性半導体の合成に有力な手段である.この手法により III-V 族希薄半導体 $Ga_{1-x}Mn_xAs$ も合成されており³²⁾,また半導体中に強磁性微粒子をエピタキシャル成長させる手段³³⁾としての発展可能性ももつ.

5.2 Ni 系 II-VI 族希薄磁性半導体

Mn²⁺, Fe²⁺, Co²⁺ を含む II-VI 族希薄磁性半導体におい てはホールのスピンと遷移金属イオンのスピンの結合は反 強磁性的であり、その結合定数は単位体積当たり1eV程 度である¹⁾. その強さはユーロピュームカルコゲナイドに おける相互作用に比べて1桁程度も大きい.一方,溝川 ら²⁵⁾ は Ni²⁺ 系希薄磁性半導体においてはさらに大きな反 強磁性的な p-d 交換相互作用が出現する可能性を理論的 に指摘し注目されている.しかし Ni 系の希薄磁性半導体 はバルク状では合成されず, MBE 法によっても合成でき ていない. 最近, 上記のイオン打ち込み法を適用すること により、ようやく合成が可能になった²⁹⁾. Fig. 10 は Ni を 均一に 3×10²⁰ Ni/cc の濃度で打ち込み 300℃ で1分間 熱処理した試料のバンドギャップにおけるゼーマン分裂を 示す. 分裂の符号から Ni のスピンとホールが反強磁性的 に結合していることがわかった. これは理論計算25)による 予想と一致した. ただし, Ni²⁺の基底状態が非磁性²³⁾であ ることと、Niイオンの濃度が数%程度と低いため、p-d交 換相互作用の大きさの定量的な評価はまだ行われていな い.

5.2 Cr 系 II-VI 族希薄磁性半導体

Cr イオンも II-VI 族半導体中への導入がむずかしかっ たが,近年ブリッジマン法^{34)~36)} や MBE 法³⁷⁾ により合成 可能となった.バルクで約 0.5%,薄膜で 8% 程度の濃度 の試料が得られる.その磁気光学効果の測定から,p-d 交 換相互作用は II-VI 族希薄磁性半導体では唯一強磁性的で あることがわかっている^{34),37)}.また Blinowski ら³⁸⁾ は Cr 系希薄磁性半導体の Cr イオン間の超交換相互作用が強磁



Fig. 10 Zeeman splitting of Ni implanted ZnTe film with 3×10^{20} Ni/cc after annealing at 300°C for 1 min. A part of the spectrum is magnified for clarity.

性的になることを理論的に指摘している. 従来反強磁性的 な磁気秩序しか見られなかった II-VI 族希薄磁性半導体に おいて強磁性の出現が期待される系である. その実現のた めには, さらに高濃度の Cr 置換を実現する手法の開発が 必要である.

5.3 III-V 族希薄磁性半導体

MBE における思い切った低温での成長条件下で III-V 族半導体に Mn を多量にドープした新しい希薄性半導体 が合成されている.低温で強磁性を示すため注目されてい る.Munekata G^{39} による $In_{1-x}Mn_xAs$, Ohno G^{40} による $Ga_{1-x}Mn_xAs$ である.磁気光学効果の増大^{41,42} など光学的 な観点からも興味がもたれる.また II-VI 族と同じく Fe など,Mn 以外の遷移金属を入れる試みも始まっている. なお III-V 族希薄磁性半導体に関しては別途解説が予定さ れているので,詳しくはそちらを参照されたい.

6. ま と め

II-VI 族を中心に希薄磁性半導体研究の現状を磁気光学 効果の観点から紹介した. 優れた結晶品質, MBE による ヘテロ構造の作製などによって,多様なスピン依存物性が 見られるとともに,光アイソレータなどの具体的な応用も 始まっている.希薄磁性半導体では,混晶によりバンド ギャップや格子定数をチューニングするいわゆるバンド ギャップ・エンジニアリングが可能であるため,スピンと キャリアの間の相互作用の利用と結びつけることによりス ピン・エレクトロニクスとでも呼ぶべき新しい研究分野と 応用を拓くものと期待される.

謝 辞本稿で紹介した研究結果は,秋本良一,Wadim Zaets,田上尚男,渡邉一弘,千葉淳弘の各氏との共同研究 によるものである.

参考文献

- 1) J. K. Furdyna: J. Appl. Phys., 64, R29 (1988).
- J. K. Furdyna and J. Kossut (Volume ed.): Semiconductors and Semimetals, Vol. 25, treatise ed. by R. K. Willardson and A. C. Beer (Academic, Boston, MA, 1988).
- P. Wacter: Handbook on the Physics and Chemistry of Rareearths, Vol. 2, ed. by K. A. Gschneidner, Jr. and L. R. Eyring (North-Holland, 1979).
- K. Onodera, T. Masumoto, and M. Kimura: *Electron. Lett.*, **30**, 1954 (1994).
- 5) K. Onodera and H. Ohba: Crsyt. Res. Technol., 31, 29 (1996).
- K. Ando, W. Zaets, and K. Watanabe: High-Density Magnetic Recording and Integrated Magneto-Optics: Materials and Devices, Vol. 517 (Materials Research Society, Pittsburg, PA, 1998).
- J. A. Gaj: Semiconductors and Semimetals, Vol. 25, Chapter 7, treatise ed. by R. K. Willardson and A. C. Beer; volume ed. by J. K. Furdyna and J. Kossut (Academic, Boston, MA, 1988).
- A. E. Turner, R. L. Gunshor, and S. Datta: *Appl. Opt.*, 22, 3152 (1983).
- 9) P. F. Bongers: IEEE Trans. Magn., 5, 472 (1969).
- 10) J. F. Dillon, Jr., J. K. Furdyna, U. Debska, and A. Mycielski: J. Appl. Phys., 67, 4917 (1990).
- T. Koyanagi and K. Matsubara: J. Appl. Phys., 61, 3020 (1987).
- 12) K. Ando: SPIE, 1126, 58 (1989).
- 13) K. Ando, T. Okoshi, and N. Koshizuka: *Appl. Phys. Lett.*, 53, 4 (1988).
- 14) H. Yokoi, T. Mizumoto, K. Maru, and Y. Naito: *Electron. Lett.*, **31**, 1612 (1995)
- 15) M. Levy, R. M. Osgood, A. Kumar, and H. Bakhru: *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 2617 (1997).
- 16) J. M. Hammer, J. H. Abeles, and D. J. Channin: *IEEE Pho*ton. Technol. Lett., 9, 631 (1997).
- W. Zaets, K. Watanabe, and K. Ando: *Appl. Phys. Lett.*, 70, 2508 (1997).
- 18) S. A. Crooker, J. J. Baumberg, F. Flack, N. Samarth, and D. D. Awschalom: *Phys. Rev. Lett.*, **77**, 2814 (1996).
- 19) R. Akimoto, K. Ando, F. Sasaki, S. Kobayashi, and T. Tani: *Phys. Rev. B*, 57, 7208 (1998).
- 20) R. Akimoto, K. Ando, F. Sasaki, S. Kobayashi, and T. Tani: J. Appl. Phys., 84, 6318 (1998).
- C. Buss, R. Pankoke, P. Leisching, J. Cibert, R. Frey, and C. Flytzanis: *Phys. Rev. Lett.*, **76**, 4123 (1997).
- 22) G. Ghislotti, C. Masseroni, A. Zappetini, M. Martinelli, and A. Mycielski: *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 3417 (1998).
- 23) A.K. Bhattacharjee: Phys. Rev. B, 46, 5266 (1992).
- 24) J. Blinowski and P. Kacman: Phys. Rev. B, 46, 12298 (1992).
- 25) T. Mizokawa and A. Fujimori: Phys. Rev. B, 56, 6669 (1997).

- 26) S. M. Durbin, J. Han, O. Sungki, M. Kobayashi, D. R. Menke, R. L. Gunshor, Q. Fu, N. Pelekanos, A. V. Nurmikko, D. Li, J. Gonsalves, and N. Otsuka: *Appl. Phys. Lett.*, **55**, 2087 (1989).
- 27) L. A. Kolodziejski, R. L. Gunshor, N. Otsuka, B. P. Gu, Y. Hefetz, and A. V. Nurmikko: *Appl. Phys. Lett.*, 48, 1482 (1986).
- 28) K. Ando and K. Takahashi: Proc. 23rd Int. Conf., Physics of Semiconductors, Berlin, 1996, p. 457, ed. by M. Scheffler and R. Zimmermann (World Scientific, Singapore, 1996).
- 29) K. Ando, A. Chiba, and H. Tanoue: J. Appl. Phys., 83, 6545 (1998).
- 30) S. V. Mel'nichuk, A. I. Savchuk, and D. N. Trifonenko: *Phys. Solid State*, **38**, 731 (1996) [*Fiz. Tverd. Tela* (*St. Petersburg*), **38**, 1320 (1996)].
- A. Ehlert, J. Dreyhsig, and H.-E. Gumlich: *Mater. Sci.* Forum, 182–184, 635 (1995).
- 32) 安藤, 田上: unpublished.
- 33) K. Ando, A. Chiba, and H. Tanoue: Appl. Phys. Lett., 73, 387 (1998).
- 34) W. Mac, Nguyen The Khoi, A. Twardowski, J. A. Gaj, and M. Demianiuk: *Phys. Rev. Lett.*, **71**, 2327 (1993).
- 35) W. Mac, A. Twardowski, P. T. J. Eggenkamp, H. J. M. Swagten, Y. Shapira, and M. Demianiuk: *Phys. Rev. B*, 50, 14144 (1994).
- 36) W. Mac, A. Twardowski, and M. Demianiuk: *Phys. Rev.* B, 54, 5528 (1996).
- 37) K. Ando and A. Twardowski: Proc. 23rd Int. Conf., Physics of Semiconductors, Berlin, 1996, p. 285, ed. by M. Scheffler and R. Zimmermann (World Scientific, Singapore, 1996).
- 38) J. Blinowski, P. Kacman, and J. A. Majewski: *Phys. Rev.* B, 53, 9524 (1996).
- H. Munekata, H. Ohno, S. von Molnar, Armin Segmuller, L. L. Chang, and L. Esaki: *Phys. Rev. Lett.*, 63, 1849 (1989).
- 40) H. Ohno, A. Shen, F. Matsukura, A. Oiwa, A. Endo, S. Katsumoto, and Y. Iye: *Appl. Phys. Lett.*, 69, 363 (1996).
- T. Kuroiwa, T. Yasuda, F. Matsukura, A. Shen, Y. Ohno, Y. Segawa, and H. Ohno: *Electron. Lett.*, 34, 190 (1998).
- 42) K. Ando, T. Hayashi, M. Tanaka, and A. Twardowski: J. Appl. Phys., 83, 6548 (1998).

(1998年10月21日受理)



安藤功兒 あんどう こうじ 昭48 名古屋大学理学部物理学科卒,昭 50 東京工業大学大学院理工学研究科物 理情報工学専攻修士課程修了,同年 電子

技術総合研究所入所,スピン機能材料ラボ リーダとして,現在に至る. 専門 磁気光学・磁性半導体 (工博)

日本応用磁気学会誌 Vol. 23, No. 2, 1999