

## 研究課題別評価

### 1 研究課題名:半導体をベースとした磁気光学結晶の開発とデバイス応用

### 2 研究者氏名:田中 雅明

ポスドク研究員:アーサン M. ナズムル(研究期間 平成 14 年 4 月～平成 16 年 11 月)

ポスドク研究員:小川 智之(研究期間 平成 14 年 4 月～平成 15 年 9 月)

### 3 研究のねらい

光エレクトロニクスや高速電子デバイスの主材料である III-V 族化合物半導体をベースとした磁気光学結晶(半導体磁気光学結晶)を開発し、その作製技術を確立し、光物性・磁気光学物性を制御することによって、未来の高度情報通信・光ネットワークシステムに役立つ新機能デバイスを試作することを目的として研究を行った。研究対象とする物質系は、

GaAs 等の化合物半導体中に MnAs 等の強磁性金属ナノ・クラスターが埋め込まれた半導体 / 磁性金属ナノクラスター材料とそのヘテロ構造・多層膜

GaMnAs や InGaMnAs 等の III-V 族ベースの磁性混晶半導体、磁性元素のデルタドーピングとその量子ヘテロ構造

強磁性金属(MnAs) / III-V 族化合物半導体から成るハイブリッドヘテロ構造

いずれも本研究者らが分子線エビタキシー(MBE)を用いて作製し研究開発中の新物質である。本研究では、 の物質系を主に( は補足的に)用いて、従来の非磁性半導体では不可能であった、ファラデー効果やカー効果など、光の非相反性をもたらす巨大な磁気光学効果をもつ「半導体磁気光学結晶」を実現し、エビタキシャル成長とバンドエンジニアリング、光波エンジニアリングの手法をフルに活用することによってその物性機能を設計・制御することを目指した。

### 4 研究成果:

#### 要旨

III-V 族化合物半導体をベースとした半導体磁気光学結晶を作製し、その物性を制御することにより、従来の非磁性半導体が持ち得なかった大きな磁気光学効果をはじめとするスピン依存物性を実現した。 GaAs 等の化合物半導体中に MnAs 等の強磁性金属ナノ・クラスターが埋め込まれた半導体 / 磁性金属ナノクラスター材料およびそのヘテロ構造・多層膜をエビタキシャル成長によって作製し、バンド/光波エンジニアリングを用いることによって、室温かつ所望の波長で大きな磁気光学効果(ファラデー効果およびカー効果)を得た。III-V:MnAs ナノクラスター材料の磁気光学物性に基づいた半導体導波路型光アイソレータを提案し、その動作を解析した。 III-V 族化合物半導体中に磁性元素を添加し、デルタドーピング、変調ドーピング、量子ヘテロ構造エンジニアリングを駆使することによって、III-V 族磁性半導体ではこれまでにない高い強磁性転移温度を実現した。また、キャリア誘起強磁性を利用して、電界および光照射によって 100 K 以上の高温領域で強磁性秩序が制御できることを示した。 強磁性体 / 非磁性体から成るいくつかのエビタキシャルヘテロ構造を形成し、スピンバルブ効果やトンネル磁気抵抗効果など大きなスピン依存伝導特性を得た。またその光照射応答を観測した。上記 ～ のさまざまなスピン依存物性をもつ素子(プロトタイプデバイス)を試作し、その機能を実証した。

以下、主な研究成果の要点を項目別に述べる。

#### 4 - 1 GaAs中にMnAsナノクラスターを埋め込んだGaAs:MnAsナノクラスター材料の形成技術の確立、大きな室温磁気光学効果、異常ホール効果の評価とその光照射効果

##### 1) GaAs中にMnAsナノクラスターを埋め込んだGaAs:MnAsナノクラスター材料をさまざまな条件

で形成し、MnAs微粒子のサイズ、密度、均一性などをある程度制御できることを示した。またIII-V族半導体ヘテロ構造ともきわめて整合性が良いことを示した(図1参照)。

- 2) MnAs微粒子サイズが10nm以下では室温では超常磁性、10nm以上では強磁性的振る舞いを示すことを明らかにした。
- 3) 超常磁性を示す試料についてはそのブロッキング温度を約70K程度と見積もった。
- 4) 室温で大きな磁気光学効果(ファラデー回転角0.4 - 0.8 deg/  $\mu\text{m}$ )を得た。
- 5) ドーピングによりp型伝導性を持たせると大きな異常ホール効果を示すことがわかった。
- 6) 光照射により磁気光学効果(カー楕円率, MCD)および異常ホール効果が大きく変化することを見出した。
- 7) 光照射の効果はブロッキング温度以下で顕著に現れることを示した。

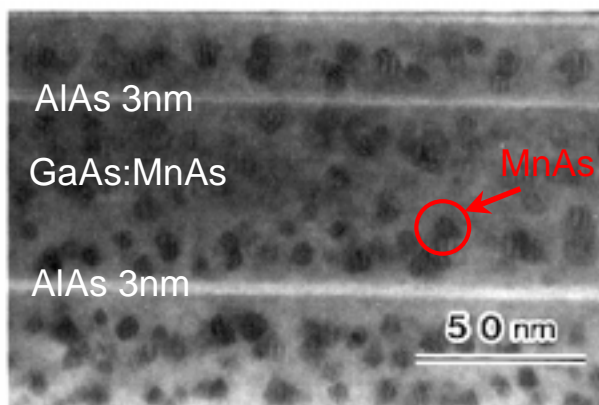


図1(a) GaAs 中に MnAs ナノクラスターを埋め込んだ GaAs:MnAs 薄膜と AlAs とのヘテロ構造の断面を透過型電子顕微鏡(TEM)で観察した例。赤丸が強磁性 MnAs の微粒子で直径は数 ~ 10nm 程度。すべて単結晶でまったく転位は見られない。大きな磁気光学効果や異常ホール効果を示す。

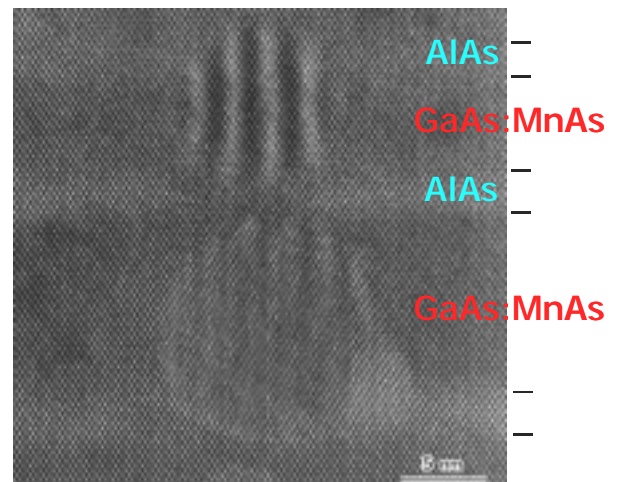


図1(b) GaAs:MnAs / AlAs ヘテロ構造の断面 TEM 格子像。MnAs ナノクラスター(直径 7nm, 10nm)が中央にある。GaAs, AlAs, MnAs のどの領域にも転位は見られず単結晶である。

#### 4 - 2 GaAs:MnAsナノクラスターとGaAs/AlAs多層DBR反射膜を組み合わせた多層膜の形成、および室温における大きな磁気光学効果の実現

- 1) GaAs:MnAsナノクラスターとGaAs/AlAs多層膜分布ブラッグ反射鏡(DBR)を組み合わせた多層膜を形成し、上下のDBRの層数を等しくする(図2(a))と、所望の波長(この場合0.98  $\mu\text{m}$ 帯とした)の光がGaAs:MnAs磁性層に閉じこめられ(光の局在)、透過で磁気光学効果がきわめて大きくなることを示した。室温でのファラデー回転角は、単位膜厚換算で4 deg/  $\mu\text{m}$ にも達した。

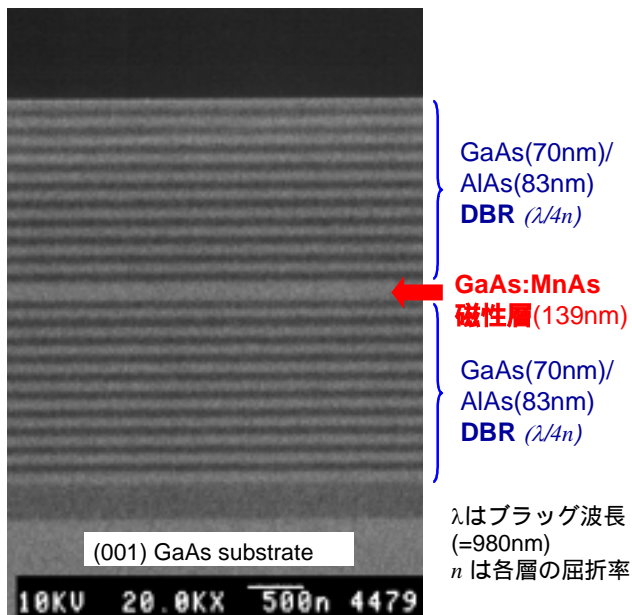


図2(a) (001) GaAs 基板上に成長した GaAs-AIAs DBR / GaAs:MnAs ナノクラスター / GaAs-AIAs DBR 多層膜構造の断面 SEM 像。磁性層にブラッグ波長の光を閉じこめ、室温で大きなファラデー効果が得られた。

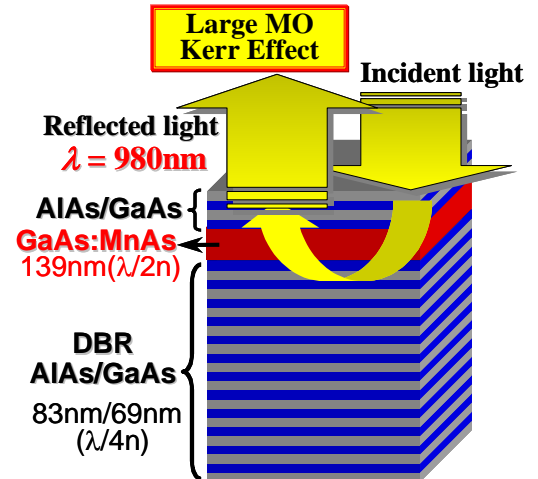


図2(b) GaAs:MnAs ナノクラスターと GaAs/AIAs 多層膜分布ブラッグ反射鏡(DBR)を組み合わせた多層膜。室温で 1500mdeg を越える非常に大きな磁気光学カー効果(Magneto-Optical Kerr Effect)を得た。

- 2) GaAs:MnAsナノクラスターとGaAs/AIAs多層膜分布ブラッグ反射鏡(DBR)を組み合わせた多層膜を形成し、上下のDBRの層数を変えることにより、反射配置でも室温できわめて大きな磁気光学効果(カー効果)が得られることを示した。室温で最大 1540mdegのカー回転角を得た(図2(b)の構造)。1)2)の結果はともに、半導体ベースの材料として室温で得られた磁気光学効果の値としては最高記録である。
- 3) トランスファーマトリクス法を用いた理論計算により、1)および2)の半導体磁気光学結晶について、その磁気光学効果の大きさとスペクトルを求め、実験結果をよく再現した。これにより、適切な多層構造を設計することができるようになった。
- 4) 理論と実験との詳細な比較検討により、光アイソレータ等の磁気光学デバイスを作製し動作させるためには、GaAs:MnAsナノクラスター材料の光損失を低減させることが不可欠であることを明らかにした。

#### 4 - 3 InP基板上にモノリシック集積化可能な半導体導波路型光アイソレータ

- 1) III-V:MnAsクラスターを用いた半導体導波路型光アイソレータの提案、解析を行った。図3にInP基板上の導波路型光アイソレータ(波長1.55 μm、TMモード光)の構造を示す。InAlAs:MnAs磁性層を含むプレーナ導波路にTMモード光が入射すると、伝搬方向(+z/-z)によって伝搬損失が異なるという現象(非相反損失/利得変化)を利用し、偏光子なしで導波路型の光アイソレータが実現できる。TMモードに対しては119dB/cm以上の消光比を理論計算により予測した。

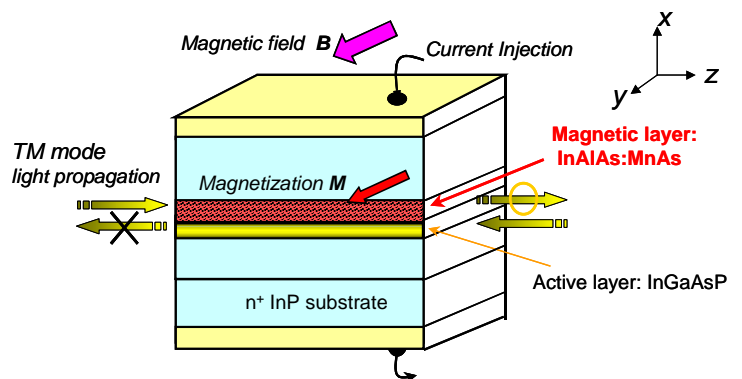


図3 InP 基板上の半導体導波路型光アイソレータ

- 2) さらにTEモード対応の導波路型光アイソレータの提案解析を行った(図4)。磁性層であるInAlAs:MnAs層をリッジ導波路の側壁と上部に配置した構造となっている。また磁性層をリッジ導波路の上部に置くことによりTMモードに対しても光アイソレータ動作を実現することができ、偏波無依存型の光アイソレータを実現することができる。この導波路型光アイソレータの非相反損失/利得変化を、等価屈折率法による電磁界分布の計算と摂動法によって求めた。リッジ導波路の幅 $d$ を小さくするにつれてTEモードに対するアイソレーションが大きくなることがわかった。InGaAsPコア層厚 $a$ が $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 、ガイド層厚 $h$ が $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 、導波路の幅 $d$ が $1.1\text{ }\mu\text{m}$ の時、波長 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ のTEモードに対する消光比は $36\text{dB/cm}$ となった。この時、前進波の損失を補償するのに必要な利得は $730\text{cm}^{-1}$ 、 $30\text{dB}$ のアイソレーションを得るのに必要なデバイス長は $8.3\text{mm}$ と求められた。

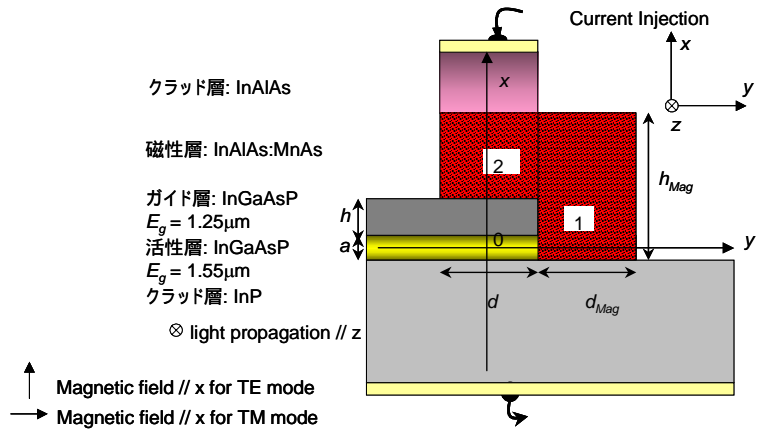


図4 InP 基板上の半導体導波路型光アイソレータ  
(波長  $1.55\text{ }\mu\text{m}$ , TE モード光)

#### 4 - 4 新しいIII-V族ベース・四元混晶強磁性半導体(InGaMn)Asの成長、磁性、磁気光学効果

- 1) 光通信に使われる $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 帯の禁制帯幅をもち、光通信用半導体デバイスに使われるInP半導体基板に格子整合する新しい磁性半導体薄膜材料の創製と物性制御に取り組み、4元混晶のIII-V族ベース磁性半導体(InGaMn)Asを初めてMBE成長することに成功し、強磁性半導体であることを見出した(図5)。
- 2) 磁気光学効果、磁気輸送、磁化特性などによって、強磁性を示すこと、その強磁性転移温度は成長条件に強く依存すること、系統的にInを変えることにより、禁制帯幅や格子定数を制御できることを示した。
- 3) 強磁性転移温度以下では、他のIII-V族磁性半導体よりも大きな、非常に強い磁気光学効果(反射カー楕円率が禁制帯幅付近で $400\text{mdeg}$ 以上)を示した。
- 4) Mnの濃度を20%以上に高め、成長条件を最適化することにより、強磁性転移温度が $130\text{ K}$ に達することを示した。この値は、液体窒素温度を優に越えており、InMnAsの強磁性転移温度の最高値 $50\text{ K}$ の2.6倍に達している。

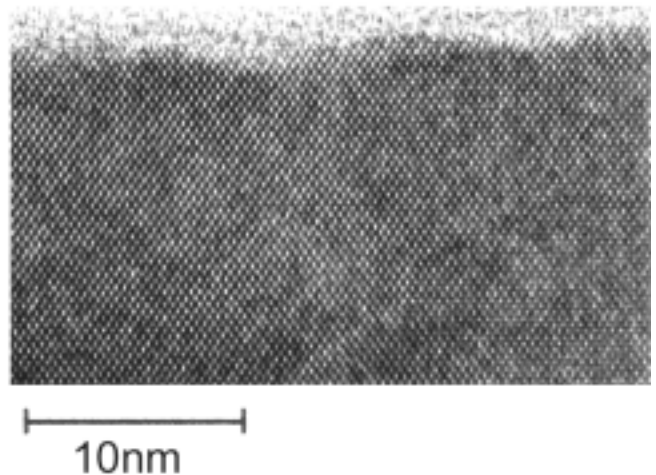


図5 InP 基板上にエピタキシャル成長した $[(\text{In}_{0.44}\text{Ga}_{0.56})_{1-x}\text{Mn}_x]\text{As}$ の断面TEM格子像。Mn組成 $x$ は $0.21$ とした。転位やクラスターがない均一な混晶半導体が形成されている。強磁性と大きな磁気光学効果を示し、InPに格子整合し $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 帯の禁制帯幅をもつ新しい4元混晶の強磁性半導体が得られた。

#### 4 - 5 MnデルタドープGaAs/p型AlGaAs 選択ドープヘテロ構造における高い強磁性転移温度



( $T_c = 172\text{ K}$  および  $192\text{ K}$ )、電界および光による強磁性秩序の制御

- 1) 磁性元素(Mn)をデルタドーピングしたGaAs(図6)のMBE成長と構造評価を行い、転位やクラスターの形成が起こらず閃亜鉛鉱型結晶構造を保ったまま、急峻なデルタドーピングが達成できる条件を見出した。これによってGaAs中に局所的に高い濃度の局在スピンを添加することができるようになった。

- 2) さらにMn-doped GaAs / Be-doped AlGaAsから成るp型選択ドーピングヘテロ構造を形成し、その磁気輸送特性(異常ホール効果)によって磁性を調べた結果、2次元正孔ガス(2DHG)の波動関数とデルタドーピングMn層が重なる時に明瞭な強磁性秩序が現れることを見出した(図7)。

- 3) 形成条件を改善することにより、上記ヘテロ構造の強磁性転移温度が  $172\text{ K}$  まで高くなることを示した。これまでIII-V族強磁性半導体で報告されたキュリー温度(従来は

$110\text{ K}$ 程度が最高)を大きく上回る値である。2003年8月以降、成長パラメータと構造パラメータを吟味することにより、さらに高い強磁性転移温度  $192\text{ K}$  を観測した。この値は、III-V族強磁性半導体の転移温度としては最高記録である。

- 4) 正孔濃度(Mnデルタドーピングチャンネル中の2DHG濃度)と強磁性転移温度の関係を明らかにし、正孔誘起の強磁性であることを明らかにした。

- 5) Mn-doped GaAs / Be-doped AlGaAsからなるヘテロ構造の表面にゲート電極を形成して、電界効果トランジスタを作製し、ゲート電圧によってMnをドーピングした2次元正孔ガスチャンネルのキャリア濃度を変化させることにより、 $115\text{ K}$ という高温領域において、強磁性 常磁性の相転移を起こさせることに成功した(図8)。GaAs系半導体において、温度一定のまま磁場を用いることなく電気的手法のみを用いて強磁性 常磁性の相転移を起こさせることに成功したのはこれが初めてである。

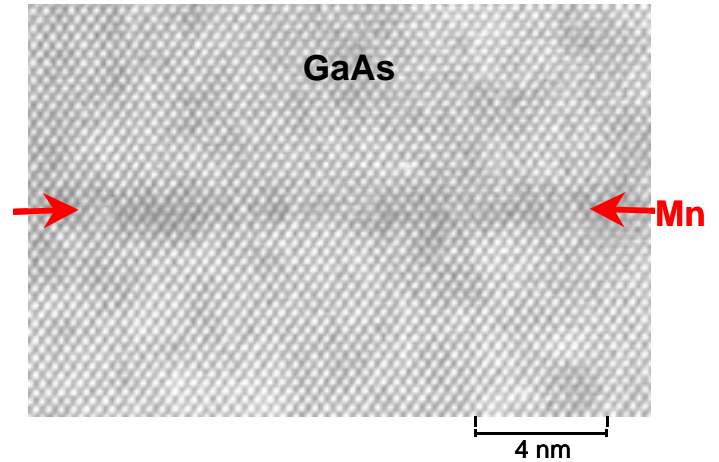


図6 GaAs 中に磁性元素 Mn を 0.4 原子層だけデルタドーピング(シートドーピングともいう)した構造の断面 TEM 格子像。

- 6) さらに正孔誘起の強磁性という性質を用いて、円偏光照射による磁性制御にも成功した。GaAsの禁制帯幅以上の光子エネルギーをもつ円偏光を照射すると、フォトキャリアが生成され正孔濃度が増大するため、磁化が増大する現象を100K程度の温度領域で観測した(図9)。これにより、光照射による磁性制御の可能性を示した。

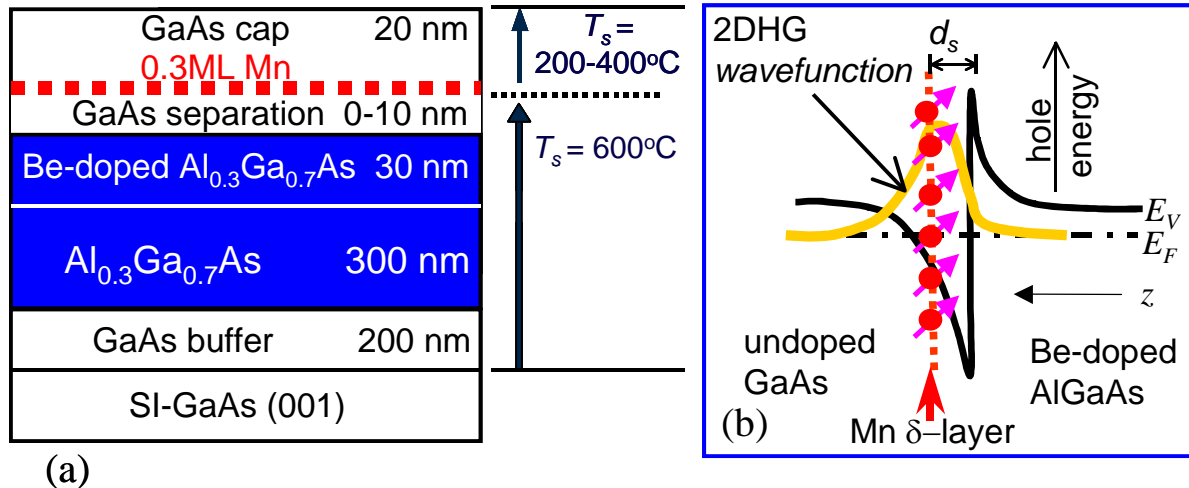


図7 (a) Mn デルタドーブ GaAs 層を2次元正孔ガスチャネル層に含む GaAs / Be-doped AlGaAs から成る p 型変調ドーブヘテロ構造。Ts は MBE 成長温度。(b) ヘテロ構造のバンドプロファイル。ここでは正孔のエネルギーを上向きにとった。z は成長方向、 $E_V$  は価電子帯の端、 $E_F$  はフェルミエネルギーを表す。局所的に高い濃度をもつ Mn 局在スピント、選択ドーブヘテロ構造によって形成される2次元正孔ガスの波動関数が重なるときに、強磁性が安定化する。

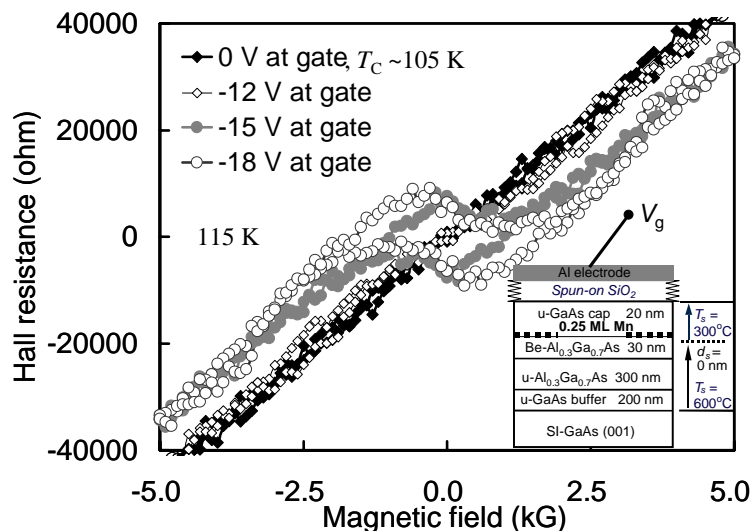


図8 挿入図のヘテロ構造試料 ( $d_s=0\text{nm}$ ) の表面に  $\text{SiO}_2$  絶縁層を介して Al ゲート電極を付けた電界効果トランジスタ(FET)におけるホール効果。ゲート電圧  $V_g$  によって Mn デルタドーブ層をもつチャネルの正孔濃度を変化させ、磁性秩序を制御するためのデバイスである。115K において、ホール抵抗の磁場依存性をさまざまなゲート電圧  $V_g$  でプロットした結果を示す。この温度領域では、異常ホール効果が支配的であるため、図の縦軸のホール抵抗は垂直方向の磁化に比例する。強磁性転移温度  $T_C$  は  $V_g=0\text{V}$  において 105 K。ゲート電圧  $V_g$  を 0 V から -18 V まで変化させると、ホール抵抗ループは直線からヒステリシスへ変化した。 $V_g=0\sim-12\text{V}$  ではチャネル正孔濃度が低いため常磁性であるが、 $V_g=-15\sim-18\text{V}$  ではチャネル正孔濃度が増加するため強磁性となる。常磁性から強磁性への相転移は可逆的であり、温度を変えずにゲート電圧の変化のみによって繰返し転移を起こさせることができる。

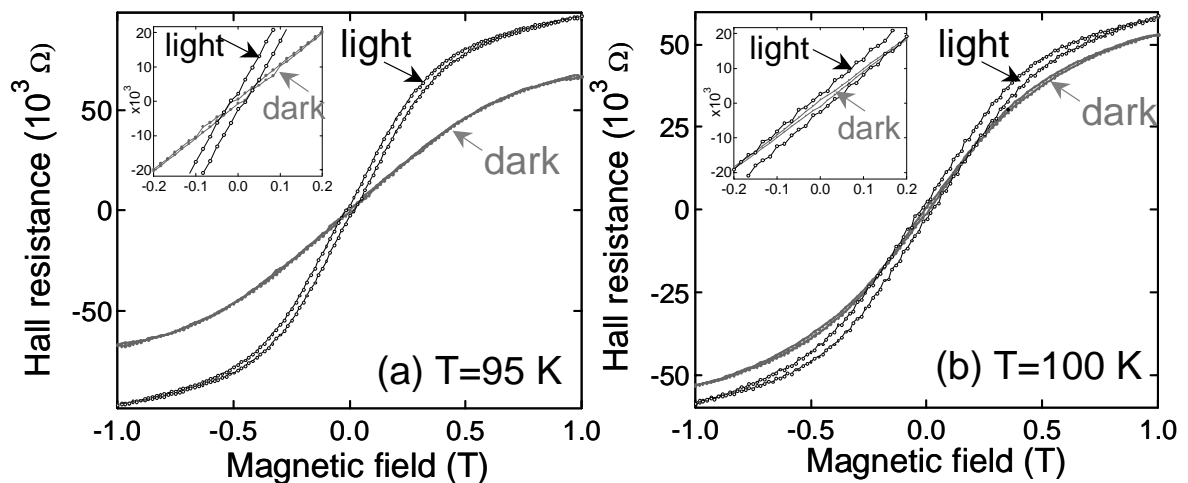


図9 同様のヘテロ構造試料 ( $d_s=0\text{nm}$ ) に対する光照射の効果ホール効果で測定した結果。このヘテロ構造では、光照射によって生成された電子は内部電界によって表面側に逃げるが、正孔はヘテロ界面の三角ポテンシャル内にある Mn デルタドーピングチャンネル層に蓄積されるようになっており強磁性への寄与することができる。試料の  $T_c$  は、光照射なし (dark) において 105 K、測定温度は (a) 95 K および (b) 100 K、照射光の波長は 632.8 nm、強度は  $8\text{ mW/cm}^2$  である。測定温度は  $T_c$  以下であるので、ホール抵抗は試料の磁化にほぼ比例する。従って図の縦軸は磁化に比例する。光を照射させるとホール抵抗 (磁化) の絶対値が増大し、ヒステリシスループの保持力と残留ホール抵抗 (残留磁化) もわずかではあるが増加していることから、強磁性秩序が強まったことがわかる。光照射なしの暗状態での正孔濃度  $p$  は  $1.7 \times 10^{12}\text{ cm}^{-2}$  であるが、光照射によって 95K では  $3.0 \times 10^{12}\text{ cm}^{-2}$  に増え、1 T の磁場において磁化が 45% 増えた。この変化もやはり可逆的であり、光照射を止めると元の暗状態に戻る。この実験により、GaAs 系磁性半導体材料においても、光によって磁化を制御する機能を実現できることがわかった。

#### 4 - 6 エピタキシャル強磁性ヘテロ接合における大きなトンネル磁気抵抗効果の実現

- 1) すべて半導体からなる GaMnAs/AlAs/GaMnAs 単一障壁のヘテロ構造を用いて強磁性トンネル接合を形成し、低温 (8 K) ではあるが最大 75 % の大きなトンネル磁気抵抗効果 (TMR) を観測した。これにより、半導体のみで不揮発性磁気メモリの原理的動作を示した。
- 2) GaMnAs のフェルミ面におけるスピン分極率が少なくとも 50% 以上と大きな値であることを示した。
- 3) TMR の障壁膜厚依存性により、スピン偏極したキャリアが半導体障壁をトンネルする際には、界面に平行方向の結晶運動量を保存することを明らかにした。
- 4) 強磁性金属 (MnAs) と III-V 族半導体からなるエピタキシャル MnAs/AlAs/MnAs 強磁性トンネル接合を形成し、最大 36 % のトンネル磁気抵抗効果を観測した。これにより、半導体基板上にすべて単結晶から成る TMR デバイス、不揮発性メモリ実現の可能性が開けた。

#### 5 自己評価:

前章で示した下線部分は特に重要な基礎研究成果であり、どれもさらに継続して研究を進めるべきであると考えている。本研究で特に成果として強調すべき点は、GaAs 等の化合物半導体中に MnAs 等の強磁性金属ナノクラスターが埋め込まれた半導体 / 磁性金属ナノクラスター材料およびそのヘテロ構造・多層膜を作製し、バンド / 光波エンジニアリングを用いることによって、室温かつ所望の波長で大きな磁気光学効果 (ファラデー効果およびカー効果) を実現し、その材料の形成法とデバイス設計論を示したこと、III-V 族化合物半導体中に磁性元素を添加し、デルタドーピング、変調ドーピング、量子ヘテロ構造エンジニアリングを駆使することによって、III-V 族

磁性半導体ではこれまでにない高い強磁性転移温度を実現したこと、また、キャリア誘起強磁性を利用して、電界および光照射によって100 K以上の高温領域で強磁性秩序が制御できることを示したことである。実用デバイスに至るには、 $\lambda$ については光損失を減らすこと、 $\lambda$ については強磁性転移温度をさらに上げ室温を越えること、が今後の課題である。幸い発展・継続研究(SORST)の機会をいただいたので、今後は次の課題について研究をさらに深め、発展させてゆく予定である。

- GaAs:MnAs系を始めさまざまなホスト半導体:MnAsナノクラスター材料およびその多層膜における大きな磁気光学効果の実現し、それらの半導体磁気光学結晶による波長範囲と設計自由度を大幅に拡大すること
- GaAs:MnAsナノクラスターにおける光物性・磁気光学現象の解明。特に大きな磁気光学効果と大きな光損失の起源の解明し、光損失低減方法を探索すること。
- 光損失があっても利用できる導波路型磁気光学デバイスの設計・解析・試作すること。
- 4元混晶強磁性半導体におけるさらなる転移温度  $T_c$  の高温化、大きな磁気光学効果の高温化を実現すること。
- 磁性元素のデルタドーピングとバンドエンジニアリングを駆使した強磁性半導体ヘテロ構造におけるさらなる強磁性転移温度  $T_c$  の高温化を実現すること。目標は室温(300K)以上。
- 「波動関数スピン工学」研究の開始。波動関数を制御することによりスピン秩序や磁性、磁気輸送特性、磁気光学効果を変化させ、新デバイスの概念を創出すること。

本研究の将来展望としては次のようなことが考えられる。

半導体エレクトロニクスにおいては全く使われていないスピン自由度を、半導体ベースの材料において積極的に活用できるようになれば、工学的応用と基礎科学両面にわたる広い範囲での成果が期待される。将来の高速光ネットワーク・光通信システムに要求される集積化型磁気光学デバイスの実現をはじめ、光アイソレータ、サーキュレータ、波長可変発光素子、光スイッチなどの実現が期待できる。そうすれば、ギガビット級以上の通信速度をもつ高速インターネット回線を各家庭にまで供給することが可能になる。また、超高密度・高速の不揮発性メモリ、再構成可能な論理回路、作製した後で再設計可能な”やわらかいハードウェア”をもつリコンフィギュラブルコンピュータなど、情報の記録や情報処理技術においても革新的な半導体デバイスやシステムが実現でき、没落しつつある日本の半導体産業を再生させることができる可能性がある。ここ数年で急速に勃興しつつある「スピンエレクトロニクス」分野における方向性を定め、半導体エレクトロニクスや情報処理技術との融合という新しい分野を開拓することもできるであろう。

本研究はポスドク参加型として行ったものであるが、研究の遂行にあたり2人のポスドク(グループメンバー)が非常に大きな貢献してくれた。うち1人は研究期間の途中で他の国立大学助手として採用され転出したが、これは本人にとっては栄転であり快く送り出したが、本研究にとっては痛手となった。しかし、もう1人は最後まで本研究に貢献してくれた。2人のポスドク以外にも、博士課程大学院生が毎年1 - 2名、研究補助者として加わってくれたことが大きな助けになった。やはり研究は発想やテーマの筋の良さとともに、若手の良質な人材が最も大切であることを実感した。その意味で本研究のようにポスドクや博士課程の大学院生を雇用できる制度は、若手スタッフの不足する大学にとってたいへんありがたいものであり大きな効果があった。

## 6 研究総括の見解:

現代の光エレクトロニクスの主材料である - 族化合物半導体デバイスに馴染む磁性体を用いて、ファラデー効果や光カー効果などの光非相反性を示す「半導体磁気光学結晶系」の作製を目指した研究であった。田中氏が用いた物質系は、GaAs 半導体に強磁性 MnAs ナノクラスターを埋め込んだ薄膜を用いて、大きなファラデー回転や異常ホール効果など非相反効果を示すことを発見した。MnAs 薄膜を GaAs/AlAs 多層膜分布ブラッグ反射鏡で挟んで、磁気電気効果を強め



る研究を行った。更に、InP 基板上に上記のモノリシック集積化したアイソレーターの提案と設計を行いデバイス動作の指針を示した。

第二の物質系としていた四元混晶強磁性半導体 (InGaMn)As を成長させ、その磁性と磁気光学効果を測定し、強い磁気光学効果を観測している。第三は、Mn をデルタドーブした GaAs/p-AlGaAs ヘテロ構造を作製し、臨界温度 172K や 192K の強磁性を発現させてきた。

この様に田中氏は、着実な成果を挙げつつ室温で強磁性を示し、かつ光吸収係数の小さい磁性半導体の探索を目指している。まだ実用に供する磁気光学材料の実現には至っていないが、発展・継続研究 (SORST) でその実現に肉迫することを願っている。

## 7 主な論文等:

### < 論文 >

- 1) S. Ohya, H. Shimizu, Y. Higo, J. M. Sun and M. Tanaka, "Growth and properties of quaternary alloy magnetic semiconductor (InGaMn)As", Jpn. J. Appl. Phys. **41**, L24-L27 (2002).
- 2) A.M. Nazmul, S. Sugahara, and M. Tanaka, "Transport Properties of Mn delta-doped GaAs and the effect of selective doping", Appl. Phys. Lett. **80**, pp.3120-3122 (2002).
- 3) M. Tanaka, <Invited paper> "Semiconductor-Based Magnetic Heterostructures for Spin Electronics", *Proc. of the 2002 Asia-Pacific Workshop on Fundamental and Application of Advanced Semiconductor Devices (AWAD2002)*, pp.271-276, paper **ED2002-172**, SDM2002-122, Sapporo, Japan, July 2002.
- 4) M. Tanaka <Invited paper>, "Ferromagnet (MnAs) / III-V Semiconductor Hybrid Structures", Special Issue on Semiconductor Spintronics, Semiconductor Science and Technology **17**, No.4, pp. 327-341 (2002).
- 5) H. Shimizu and M. Tanaka, "Quantum size effect and ferromagnetic ordering in ultrathin GaMnAs/AlAs heterostructures", J. Appl. Phys. **91**, pp.7487-7489 (2002).
- 6) M. Tanaka and Y. Higo <Invited paper>, "Tunneling magnetoresistance in GaMnAs/AlAs/GaMnAs ferromagnetic semiconductor heterostructures", Physica E **13**, pp.495-503 (2002).
- 7) H. Shimizu and M. Tanaka, "Magneto-optical properties of a Si-doped GaAs:MnAs based magneto-photonic crystal operating at 1.55 micron", Physica E **13**, pp.597-601 (2002).
- 8) H. Shimizu and M. Tanaka, "Design of semiconductor-waveguide-type optical isolators using the non-reciprocal loss/gain in the magneto-optical waveguides having MnAs nanoclusters", Appl. Phys. Lett. **81**, pp.5246-5248 (2002).
- 9) 清水大雅、田中雅明 "III-V族半導体中に形成されたMnAsナノクラスター構造の磁気光学効果と半導体導波路型光アイソレータへの応用"、電気学会マグネティックス研究会資料 **MAG-02-30**, pp.11-15, 東北大学電気通信研究所、2002年3月14日-15日。
- 10) アーサン M. ナズムル、菅原聡、田中雅明、"MnデルタドーブGaAsをベースとした半導体ヘテロ構造の物性と高い強磁性転移温度 ( ~ 170K )"、電気学会マグネティックス研究会資料 **MAG-02-31**, pp.17-21, 東北大学電気通信研究所、2002年3月14日-15日。
- 11) H. Shimizu and M. Tanaka, "Design of semiconductor-waveguide-type optical isolators using the non-reciprocal loss/gain in the magneto-optical waveguides having MnAs nanoclusters", Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology, Volume **7**, Issue 1, January 6, 2003. <http://www.vjnano.org/>
- 12) G. Mahieu, P. Condette, B. Grandier, J.P. Nys, G. Allan, D. Stievenard, Ph. Evert, H. Shimizu and M. Tanaka, "Compensation Mechanisms in Low-temperature Grown GaMnAs Investigated by Scanning Tunneling Microscopy", Appl. Phys. Lett. **82**, pp.712-714 (2003).

- 13) S. Sugahara and M. Tanaka, "Epitaxial Growth and Magnetic Properties of MnAs/AlAs/MnAs Magnetic Tunnel Junctions on Exact (111)B GaAs Substrates: the Effect of a Ultrathin GaAs Buffer Layer", J. Cryst. Growth **251**, pp.317-322 (2003).
- 14) A. M. Nazmul, S. Sugahara, and M. Tanaka, "Structural and Transport Properties of Mn-delta-doped GaAs", J. Cryst. Growth **251**, pp.303-310 (2003).
- 15) M. Tanaka <Invited paper> "Spin-polarized Tunneling in Fully Epitaxial Semiconductor-based Magnetic Tunnel Junctions", Journal of Superconductivity; Incorporating Novel Magnetism **16**, pp.241-248 (2003).
- 16) S. Ohya, H. Yamaguchi, and M. Tanaka, "Properties of Quaternary Alloy Magnetic Semiconductor (InGaMn)As Grown on InP", Journal of Superconductivity; Incorporating Novel Magnetism **16**, pp.139-142 (2003).
- 17) A. M. Nazmul, S. Sugahara, and M. Tanaka, "Ferromagnetism and High Curie Temperature in Semiconductor Heterostructures with Mn-delta-doped GaAs and p-type Selective Doping", Phys. Rev. **B67**, pp.241308(R) 1-4 (2003).
- 18) A. M. Nazmul, S. Sugahara, and M. Tanaka, "Transport Properties and High Curie Temperature (172 K) of Mn-delta-doped GaAs with Selective p-type Doping", *Physics of Semiconductors 2002, Proceedings of the 26th International Conference on The Physics of Semiconductors* (ICPS26, Edinburgh, UK, July 29 - August 2, 2002), Institute of Physics Conference Series Number 171 (IoP, Bristol, UK), Edited by A. R. Long, J. H. Davies, paper E4.2.
- 19) K. Ueda, H. Shimizu, and M. Tanaka, "Magneto-Optical Kerr Effect of Semiconductor-based Multilayer Structures Containing a GaAs:MnAs Granular Thin Film", Jpn. J. Appl. Phys. **42**, L914-L917 (2003).
- 20) S. Ohya, H. Kobayashi, and M. Tanaka, "Magnetic properties of heavily Mn-doped quaternary alloy magnetic semiconductor (InGaMn)As grown on InP", Appl. Phys. Lett. **83**, pp.2175-2177 (2003).
- 21) A. M. Nazmul, S. Kobayashi, S. Sugahara and M. Tanaka, "Electrical and optical control of ferromagnetism in III-V semiconductor heterostructures at high temperature ( 100 K)", Jpn. J. Appl. Phys. **43**, pp.L233 - L236 (2004).
- 22) A. M. Nazmul, S. Kobayashi, S. Sugahara, and M. Tanaka, "Control of Ferromagnetism in Mn Delta-doped GaAs-based Heterostructures", Physica **E21**, pp.937-942 (2004).
- 23) S. Ohya, H. Kobayashi, and M. Tanaka, "Magnetic Properties and Curie Temperature ( 130K) of Heavily Mn-doped Quaternary Alloy Ferromagnetic Semiconductor (InGaMn)As Grown on InP", Physica **E21**, pp.975-977 (2004).
- 24) R. Nakane, S. Sugahara, and M. Tanaka, "Epitaxial growth and magnetic properties of MnAs/NiAs/MnAs spin-valve trilayers on GaAs(001) substrates", Physica **E21**, pp.991-995 (2004).
- 25) T. Ogawa, Y. Shuto, K. Ueda, and M. Tanaka, "Photo-induced anomalous Hall effect in GaAs:MnAs granular films", Physica **E21**, pp.1041-1045 (2004).
- 26) O. Rader, C. Pampuch, A. M. Shikin, W. Gudat, J. Okabayashi, T. Mizokawa, A. Fujimori, T. Hayashi, M. Tanaka, A. Tanaka, A. Kimura, "Resonant photoemission of Ga1-xMnxAs at the Mn L edge", Phys. Rev. **B69**, pp. 075202/1-7 (2004).
- 27) R. Nakane, S. Sugahara and M. Tanaka, "Effect of post-growth annealing on the morphology and magnetic properties of MnAs thin films grown on GaAs(001) substrates", J. Appl. Phys. **95**, pp.6558-6561 (2004).
- 28) M. Yokoyama, H. Yamaguchi, T. Ogawa, and M. Tanaka, "Zinc-Blende-type MnAs nanoclusters embedded in GaAs", J. Appl. Phys., to be published.

- 29) M. Tanaka <Invited paper>, "Spintronics: Recent Progress and Tomorrow's Challenges", J. Crystal Growth, to be published.
- 30) R. Nakane, J. Kondo, M. W. Yuan, S. Sugahara, and M. Tanaka, "Growth and magnetic properties of epitaxial metallic MnAs/NiAs/MnAs heterostructures grown on exact GaAs(111)B substrates", J. Crystal Growth, to be published.
- 31) A. M. Nazmul, T. Amemiya, Y. Shuto, S. Sugahara, and M. Tanaka, "High Temperature Ferromagnetism in GaAs-based Heterostructures with Mn delta Doping", submitted.
- 32) S. Ohya, P.-N. Hai, and M. Tanaka, "Tunneling magnetoresistance in GaMnAs / AlAs / InGaAs / AlAs / GaMnAs double-barrier magnetic tunnel junctions", submitted.

< 解説論文・解説記事、著書など >

- 1) 田中雅明 「スピントロニクス 半導体と磁性体の一体化に挑む 原子レベルのものづくりで新領域」、Science and Technology Journal, 2002年5月号, pp.22-23.
- 2) 田中雅明 「強磁性半導体ヘテロ接合におけるトンネル磁気抵抗」 固体物理 Vol.37 (11), pp. 853-860 (2002).
- 3) M. Tanaka, "A New Spin on Semiconductors -New Technology-", Look Japan Vol.48, pp.28-29, December 2002. *University of Tokyo associate professor Tanaka Masaaki describes the revolutionary advances his lab has made in spin electronics research.*
- 4) 田中雅明、アーサンナズムル、菅原聡、「磁性元素を含むIII-V族半導体ヘテロ接合：磁気輸送特性と強磁性制御」、マテリアルインテグレーション2003年9月号(特集：スピントロニクス) Vol. 16, No.9, pp.5-10 (2003).
- 5) 田中雅明 「半導体スピントロニクス」 応用物理学会スピントロニクス研究会入門セミナーテキスト pp.51-58, 2003年12月19日.
- 6) 田中雅明 「MnデルタドーブGaAsを含む強磁性半導体ヘテロ構造：Tcの上昇と磁性制御」 日本応用磁気学会誌、Vol. 28 No.2, pp. 66-71 (2004).
- 7) 田中雅明 「半導体スピントロニクス - 現状と展望」 応用物理 73巻 第4号 基礎講座 <スピントロニクス> pp.508-517 (2004).
- 8) 田中雅明 「第15章 半導体をベースとしたヘテロ構造 - 強磁性転移温度と磁性制御 - 」 『スピントロニクスの基礎と最前線』 pp.184-198, シーエムシー出版 2004年6月発行.
- 9) 田中雅明 「スピントロニクス半導体の開発」 化学工業 56巻3号, pp.6-13[pp.174-181] (2005年3月号).
- 10) 田中雅明 「半導体スピントロニクス」、『ナノマテリアルハンドブック』第5章第5節 エヌティーエス 2004年11月発行予定.
- 11) 田中雅明 「磁性半導体材料」、『電子材料ハンドブック』5.6.4節 朝倉書店(印刷中).

< 新聞、雑誌、マスコミ記事など >

- 1) 日本工業新聞 (2002年1月1日掲載) "創意の種子で、科学技術創造立国へ" 新春座談会 尾身大臣 vs. 先端技術大賞受賞者 尾身幸次、田中雅明、増田幸一郎、小西史一
- 2) "夢に向かって - 'さきがけ研究21'研究者に聞く 半導体と磁性体を一体化 東京大学工学系研究科 田中雅明助教授"、化学工業日報 20000号記念特集号 2002年11月18日掲載.
- 3) Scientific American, pp.30-31, March 2003, "Getting Warmer, MAGNETIC SEMICONDUCTORS REACH HIGHER TEMPERATURES". In late 2002 Masaaki Tanaka and his co-workers at the University of Tokyo reported that applying a relatively simple annealing process to manganese-doped gallium arsenide boosted its maximum working temperature (known as the Curie temperature) as high as 172 kelvins. That is still far below room temperature, but the result constitutes "a genuine milestone," according to spintronics

expert David D. Awschalom of the University of California at Santa Barbara.

- 4) ますますホット、磁性半導体:これまでは極低温でしか働かなかったが、日本の研究チームなどが目覚ましい改善を成し遂げた 日経サイエンス、2003年5月号 p16.
- 5) 日経サイエンス、2003年7月号 ひらめきの瞬間(21世紀の担い手たち) No.55 整列! スピントロニクス 田中雅明 東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻助教授  
[http://www.nitto.co.jp/company/culture/ad/science/science\\_55/](http://www.nitto.co.jp/company/culture/ad/science/science_55/)
- 6) 172Kで強磁性示す 東大、半導体構造作製に成功 新たなデバイスへ道 日刊工業新聞 2003年10月16日 (33面)
- 7) 零下101度でも「強磁性」 東大、高速半導体使い実現 日経産業新聞 2003年10月24日 (6面)

< 国際会議・国際シンポジウム 招待講演 >

- 1) M. Tanaka , "Spin-dependent Transport and Tunneling in III-V Based Magnetic Heterostructures", The 8th IUMRS International Conference on Electronic Materials (IUMRS-ICEM2002), Xi-an, China, June 10-14, 2002.
- 2) M. Tanaka , "Semiconductor-Based Magnetic Heterostructures for Spin Electronics", 2002 Asia-Pacific Workshop on Fundamental and Application of Advanced Semiconductor Devices (AWAD-2002), July 1-3, 2002 Hokkaido University, Sapporo, Japan
- 3) M. Tanaka , "Spin-polarized Tunneling in Fully Epitaxial Semiconductor-based Magnetic Tunnel Junctions", 2nd International Conference on the Physics and Application of Spin-related Phenomena in Semiconductors (PAPSPS 2002), paper L1, Wuerzburg, Germany, July 23-26, 2002.
- 4) M. Tanaka , "High Ferromagnetic Transition Temperature (172K) in Mn-delta-doped GaAs Heterostructures with p-type Selective Doping", 10th International Advanced Heterostructure Workshop, the Big Island of Hawaii, December 1-6, 2002.
- 5) M. Tanaka , "Spin tunneling and magnetotransport in GaMnAs-based heterostructures", Annual American Physical Society (APS) March Meeting 2003, paper S7.004, Austin, USA, March 3-7, 2003.
- 6) M. Tanaka , "Ferromagnetic heterostructures for spin-electronics", Sweden-Japan Nanotechnology Colloquium, Lund, Sweden, March 16-18, 2003.
- 7) M. Tanaka , "Nanotechnology research in Japan", After-session seminar, Sweden-Japan Nanotechnology Colloquium, Lund, Sweden, March 16-18, 2003.
- 8) M. Tanaka , "Spin tunneling and transport in ferromagnetic III-V heterostructures", 32nd International School on the Physics of Semiconducting Compounds, Ustron-Jaszowiec, Poland, May 31-June 6, 2003.
- 9) M. Tanaka, S. Sugahara, and A.M. Nazmul , "Ferromagnetic Heterostructures based on Semiconductors", 2003 Summer Conference of the Korean Magnetism Society and Japan-Korea Symposium on Spintronics and its Applications, July 19-21, 2003, Hanwha Resort at Haewoondae Beach, Busan, Korea.
- 10) M. Tanaka , "Ferromagnetic heterostructures for semiconductor spintronics", Japan-US Workshop on Frontiers of Nanoscale Science and Technology, Komaba, University of Tokyo, July 10-12, 2003.
- 11) M. Tanaka and A.M. Nazmul , "Control of ferromagnetic order and high Curie temperature in Mn-delta-doped i-HEMT structures", Spintech II, International Conference and School on Semiconductor Spintronics and Quantum Information Technology, Crowne Plaza Hotel, Brugge, Belgium August 4-8, 2003.

- 12) M. Tanaka , "Ferromagnetic heterostructures for semiconductor spintronics", International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS-2003), San Diego, August 25-27, 2003.
- 13) M. Tanaka , "Control of ferromagnetic order in selectively p-doped GaMnAs-based heterostructures", Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM), 'Core area 8 Quantum Nanostructure Devices and Physics', Tokyo, September 16-18, 2003.
- 14) M. Tanaka , "Ferromagnetic Semiconductor Heterostructures for Spintronics", The Fourth Korea-Japan Workshop on Strongly Correlated Systems on Spectroscopy of Correlated Materials and their Nano-Structures, Iizuna-Kogen, Nagano, Japan, September 24-26, 2003.
- 15) M. Tanaka <Plenary talk>, "Epitaxial ferromagnetic heterostructures based on semiconductors: growth, properties, and applications", Plenary sessions on 'The Future of Spintronics' in the 50th American Vacuum Society (AVS) Annual Symposium, Baltimore, November 2-7, 2003.
- 16) M. Tanaka , "Ferromagnetic semiconductor heterostructures", International Workshop on Nano-Scale Magnetoelectronics, Nagoya, 25-27 November, 2003
- 17) A. M. Nazmul, T. Amemiya, S. Sugahara, and M. Tanaka, "Ferromagnetism in Semiconductor-based Heterostructures", International Conference on Physics for Understanding and Applications, Auditorium BUET, Dhaka, Bangladesh, 22 - 24 February, 2004.
- 18) M. Tanaka , "Ferromagnetic heterostructures for spintronics", International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics 2004 (MS+S2004), NTT Basic Research Laboratories Atsugi, Kanagawa, March 1-4, 2004.
- 19) M. Tanaka , "Control of ferromagnetic order in semiconductor heterostructures with Mn delta doping", MRS Spring Meeting 2004, San Francisco, April 12-16, 2004.
- 20) M. Tanaka , "Nanospintronics Design and Realization", International Conference on Nanospintronics Design and Realization (ICNDR), 24-28 May, 2004.
- 21) M. Tanaka <Plenary talk>, "Spintronics: Recent Progress and Tomorrow's Challenges", International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2004), Edinburgh, UK, August 22 - 27, 2004.
- 22) M. Tanaka , M. Tanaka, S. Sugahara, and A. M. Nazmul, "Magnetic Semiconductors and Heterostructures for Spin Electronics", The First Asia Forum on Magnetism, Okinawa Convention Center, Ginowan, Okinawa, Japan, September 21-24, 2004.
- 23) M. Tanaka and S. Sugahara, "Spin-polarised metal-oxide-semiconductor field-effect transistor and reconfigurable logic design", 7th Oxford-Kobe Materials Seminar on Spintronic Materials and Technology, Kobe Institute, September 2-4, (2004).
- 24) M. Tanaka, "Spintronics Materials and Devices", International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM-2004), Rump Session B 'Challenges of Spintronics: from basic physics to nanoscale devices', Tokyo, September 15-17, 2004.
- 25) M. Tanaka, "Ferromagnetic Semiconductor Heterostructures for Spintronics", Advanced Heterostructure Workshop, the Big Island of Hawaii, December 5-10, 2004.
- 26) M. Tanaka, "Ferromagnetic Semiconductor Heterostructures and Devices for Spintronics", Spintronics tutorial session at the American Physical Society March Meeting, Los Angeles, March 20-25, 2005.
- 27) M. Tanaka, "Heterojunction Engineering of Semiconductor Ferromagnetism", American Physical Society March Meeting, Los Angeles, March 20-25, 2005.
- 28) M. Tanaka and S. Sugahara, "Spin devices for integrated circuits", International Magnetism Conference (Intermag 2005), Nagoya Congress Center, April 4-8, 2005.



- 29) M. Tanaka, "Ferromagnetic heterostructures for spintronics", 8th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces, and Nanostructures (ACSIN-8) and 13th International Conference on Thin Films (ICTF-13), Stockholm, Sweden, June 19-23, 2005.

< 国際会議発表 (招待講演以外) > 58件

< 国内学会・研究会等 招待講演 >

- 1) 田中雅明, "半導体スピントロニクスの可能性", 日本学術振興会「物質科学とシステムデザイン」「量子スピントロニクス」「有機分子エレクトロニクス」分科会合同委員会、国際高等研究所、京都府木津町、2002年6月21日-22日.
- 2) 田中雅明, "エピタキシャル強磁性半導体ヘテロ接合におけるスピン依存伝導とトンネル磁気抵抗効果", 日本物理学会2002年秋季大会シンポジウム「強磁性体/半導体ヘテロ接合・界面における電子輸送」、7pWA-4, 中部大学、2002年9月6日-9日.
- 3) 田中雅明、肥後豊、菅原聡, "半導体をベースとしたエピタキシャル強磁性ヘテロ構造におけるトンネル磁気抵抗効果とその応用可能性", 第26回日本応用磁気学会学術講演会シンポジウムS2「超高密度磁気記録におけるヘッドの進展」、19pB-7, 東京農工大学、2002年9月17日-20日.
- 4) 田中雅明, "強磁性半導体ヘテロ接合におけるスピン依存伝導", 日本学術振興会162委員会第32回研究会「スピントロニクス材料の研究開発動向」、長岡技術科学大学、2002年10月25日-26日.
- 5) 田中雅明, "スピン機能半導体材料とその応用 - 半導体スピントロニクスへの展開 - ", レーザーアライアンスシンポジウム、東京大学、2002年12月18日.
- 6) 田中雅明, "スピントロニクス研究の現状と展望", 第1回ナノテクノロジー総合シンポジウム、東京有明、2003年2月3日~2月4日.
- 7) 田中雅明, "半導体スピントロニクスの現状と展望", 日本学術振興会「未踏ナノデバイステクノロジー」第151委員会「シリコン超集積化システム」第165委員会合同研究会、伊東、2003年2月28日-3月1日.
- 8) 田中雅明, "強磁性半導体ヘテロ構造", 電気学会ナノスケール磁性構造体調査専門委員会「スピントロニクスの現状」、東京有楽町、2003年3月25日.
- 9) 田中雅明、アーサン・ナズムル, "MnデルタドーピングGaAsとそのヘテロ構造における強磁性", 2003年春季第50回応用物理学関連連合講演会シンポジウム「スピン物性の制御はどこまで可能になったか?」、28p-ZH-6, 神奈川大学、2003年3月27日-30日.
- 10) M. Tanaka, "Spintronics, our research environment and future", Sweden-Japan Workshop on Research Environment and Career, Nikko, April 8-9, 2003.
- 11) 菅原聡、田中雅明, "半導体スピントロニクスの最前線", 日本学術振興会 薄膜第131委員会研究会、東北大学、2003年6月20日.
- 12) 田中雅明, "強磁性半導体ヘテロ構造・複合構造の電気伝導とその応用", 応用物理学会スピントロニクス研究会入門セミナー、東京・機械振興会館、2003年12月19日.
- 13) 田中雅明 「半導体スピントロニクス研究の現状と展望」大阪大学21世紀COE講演会、大阪大学基礎工学研究科、2004年1月29日
- 14) 田中雅明 「スピントロニクス研究の現状と展望」、名古屋大学大学院工学研究科特別セミナー「スピントロニクス」、2004年2月19-20日.
- 15) 田中雅明 「ナノスピントロニクスの将来の一方向」ナノスピントロニクスのデザインと創製委員会、国際高等研究所、京都、2004年2月21日.
- 16) 田中雅明, "III-V族半導体ヘテロ構造における磁性制御: Mnデルタドーピングとp型選択ドーピング", 日本物理学会第59回年次大会 シンポジウム「ナノスケール構造を利用した物質創

製 - 材料種の枠を超えて」, 29pXH-4, 九州大学箱崎キャンパス, 2004年3月29日午後.

- 17) 田中雅明, "半導体スピントロニクス の現状と将来展望", 2004年春季第51回応用物理学関連連合講演会シンポジウム「飛躍する磁性体デバイスの作製プロセスの現状と課題」, 30p-YA-3, 東京工科大学, 八王子, 2004年3月30日午後.
- 18) 田中雅明, "半導体スピントロニクス材料とその応用", 金属学会セミナー, 東京・商工会館, 2004年6月25日.
- 19) 田中雅明, "半導体スピントロニクス", 未踏科学技術協会主催サイエンスサマー道場「半導体ナノサイエンスとその応用」長野市飯綱高原ホテルアルカディア, 2004年8月17-19日.
- 20) 田中雅明, "半導体スピントロニクス - 材料物性からデバイス・回路設計へ", 日本学術振興会第8回「物質科学とシステムデザイン - 次世代エレクトロニクスの構築に向けて - 」に関する研究開発専門委員会全体会議, 国際高等研究所, 2004年9月24日-25日.
- 21) 田中雅明, "スピントロニクス の現状と展望", 第2回東京大学レーザアライアンス・シンポジウム, 東京大学本郷キャンパス, 2004年11月9日.

< 国内学会・研究会等 一般講演 > 75件

< 本研究期間中に受けた賞 >

- (1) 丸文研究奨励賞(丸文研究交流財団) 2002年3月 受賞者 田中雅明  
「半導体スピントロニクスに向けた複合エピタキシャルヘテロ構造の創製」に関する研究業績に対して。( [http://www.marubun.co.jp/zaidan/h13\\_tanaka.jsp](http://www.marubun.co.jp/zaidan/h13_tanaka.jsp) および [http://www.marubun.co.jp/zaidan/pdf/h13\\_tanaka.pdf](http://www.marubun.co.jp/zaidan/pdf/h13_tanaka.pdf) )
- (2) 応用物理学会講演奨励賞 2003年3月 受賞者 アーサン M. ナズムル(グループメンバー)  
2002年秋季第63回応用物理学会(2002年9月)における発表:アーサン M. ナズムル, 田中雅明 "MnデルタドーブGaAsをベースとしたヘテロ構造における高い強磁性転移温度(～172K)" に対して。
- (3) 日本IBM科学賞 <エレクトロニクス分野> 2003年11月 受賞者 田中雅明  
『磁性体/半導体ヘテロ構造のエピタキシャル成長とスピントロニクスへの展開』に関する研究業績に対して。  
(<http://www-6.ibm.com/jp/company/society/science/p17th/tanaka.shtml> および <http://www.ibm.com/news/jp/2003/11/11061.html> )