

平成 21 年 5 月 31 日現在

研究種目： 基盤研究(A)  
 研究期間： 2005 ~ 2008 年  
 課題番号： 17206002  
 研究課題名 (和文) 円偏光受光・発光スピントロニクス半導体素子の基礎研究  
 研究課題名 (英文) Investigation of circularly-polarized-light receivers and emitters  
 研究代表者  
 宗片 比呂夫 (Munekata Hiro)  
 東京工業大学・大学院理工学研科・教授  
 研究者番号： 60270922

## 研究成果の概要：

円偏光度の電気的検出機能を備えた半導体ヘテロ構造フォトダイオードの作製と評価、磁場印加不要な環境で円偏光を発する機能を備えた端面型スピン発光ダイオードの作製と評価、および、磁化の光誘起才差運動の実験的機構解明に関する成果を述べる。いずれの成果も、光とスピンを用いて初めて創出可能な新機能「スピントロニクス」の大事な芽である。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005 年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2006 年度	14,600,000	4,380,000	18,980,000
2007 年度	8,600,000	2,580,000	11,180,000
2008 年度	8,200,000	2,460,000	10,660,000
総計	38,000,000	11,400,000	49,400,000

## 研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 応用物理学・工学基礎 応用物性・結晶工学

キーワード： 円偏光、スピン、フォトダイオード、発光ダイオード、磁化才差運動

## 1. 研究開始当初の背景

申請者は、スピン依存光物性と光とを組み合わせて初めて達成される光機能の創造(シーズ)をめざす傍ら、電子工学、化学、生物、情報分野の研究者と交流を重ねてスピン光機能のニーズ探索を調査していた。結果、「スピンによる光の偏光制御」が将来性豊かな未踏研究領域で、新しい応用が多く含まれる意義深いテーマであるとの認識に到達した。2003 年から円偏光受光素子と円偏光発光素子の研究を開始したが、特定領域「半導体ナノスピントロニクス(2002~2005 年度)」終了後も研究を継続する必要性が高いので本申請を行い採択された。

電子材料・デバイス研究が中心の国内外のスピントロニクスあるいはスピンエレクト

ロニクス研究に対し、円偏光受光・発光素子という光機能を研究目標に掲げて実施する研究は、国内外で皆無な状況であった。

研究開始当初に研究中のテーマと状況は以下の通りであった。

(a)  $n\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/p\text{-In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  ヘテロ構造で円偏光依存光起電力を示す実験データが得られ始めていたが[1]、再現性が充分でない、理論値と食い違うなどの状況にあった。

(b) GaAs-Fe 複合構造の室温光磁化が  $\text{Fe}_3\text{Ga}_4$  のメタ磁性に起因することが解明された[2]。

(c) GaAs-(Ga,Mn)As 結合量子構造の作製と評価で円偏光発光制御の研究を開始した。

(d) (Ga,Mn)As で磁化の光誘起才差運動が発見された[3]。

## 2. 研究の目的

項目1で述べた背景と研究の状況を踏まえ、以下を研究目的に設定した。

- (1) スピン依存 p-n 空乏層を理論的、実験的に研究し、円偏光度に応じて光電流・電圧が変化する受光デバイスを試作する。
- (2) 強磁性半導体、非磁性半導体、ならびに関連の積層構造の発光過程を研究し、円偏光発光を特徴とする発光デバイスを試作する。
- (3) 光キャリア寿命が制御された良質な (Ga,Mn)As 薄膜および関連の積層構造の作製法を研究し、光励起による磁化ダイナミクスの多様性を学術的に整理しつつ、磁化の高速応答性を追究する。

## 3. 研究の方法

項目2で述べた研究目的を遂行すべく、A、B 2つの研究グループを設ける体制とした。各グループの研究タスクを以下に記す。

### A. デバイスグループ

- デバイス設計

試作デバイスの特性をスピン輸送に関する既存理論に基づきモデル化する研究。

- 試料作製

既設の分子線エピタキシー装置 RIBER-1 で実験用の高品質試料の作製法を研究。

- デバイス加工

実験用デバイスへの微細加工の方法を研究。

- 特性評価

既設の偏光分光光学台で受光および発光特性評価のための実験を実施しデータを研究。

- 参加人員 (合計数)

博士号教職員 2 名、大学院学生 6 名

### B. 物性グループ

- ターゲット設定

既存研究を分析して真に新規性の高いスピン関連現象を想定する研究。

- 試料作製

既設の分子線エピタキシー装置 RIBER-2 で実験用の高品質試料の作製法を研究。

- 超高速分光実験

既設の超高速分光光学台で光励起強磁性半導体中のスピンおよび磁化ダイナミクスに関する信頼性の高い実験データ取得法を研究し、得られたデータの新規性を追究。

- 参加人員 (合計数)

博士号職員 3 名、大学院学生 6 名

## 4. 研究成果

### (1) はじめに：円偏光の検出と発光

光はその進行方向に対して右まわり・左まわりの角運動量を持っている。光の角運動量は、光励起で生成された電子・正孔キャリア対に移される。円偏光励起で III-V 族化合物半導体中に生成されるキャリアとスピン偏極との関係を図1左に示す[4]。スピン依存光学遷移とスピン依存キャリア輸送を組み合

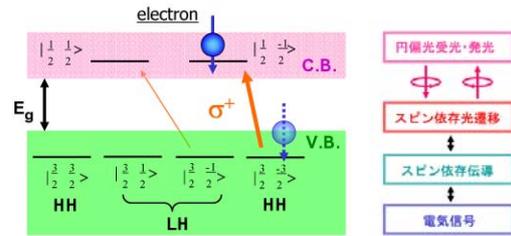


図1：(左) 閃亜鉛鋳型半導体における選択則とスピン偏極キャリアの関係。光の進行方向  $k$  に対して右回りの円偏光  $\sigma^+$  で  $\Delta J = +1$ 。  $k$  と反平行の重い正孔スピンの軽い正孔スピンよりも3倍高い確率で伝導帯に励起される。(右) 円偏光受光、発光素子の物理過程ブロックダイアグラム。

わせると、円偏光度を直接検出できる機能を有する受光素子と円偏光を発する機能を備えた発光素子が創出可能であり、ブロックダイアグラムで示すと図1右のようになる。大事なことは、①発光-受光素子ともに集積可能であること、②発光素子の偏光度が電気的に高速で変調可能であること、③受光素子も高速応答性が確保されていること、の3点である。これらを満たす素子構成が構築できると、円偏光の新しい使い道が拓けると期待される[成果⑬]。光学異性体の検出・分離[5]、磁性体メディアへの全光書き込み用光源[6]、量子暗号通信[7]への応用が考えられる。

### (2) スピンプォトダイオード

円偏光度を直接電気信号に変換できる物理現象として着目したのがスピン起電力であった。これは、研究開始当初においては理論的概念にすぎなかった[8]。

p-n 接合を用いた素子は、通常、磁場を印加しないで駆動させる。この時、電気化学的ポテンシャル  $\mu$  は上向き、下向きスピンに対して同じであり、電気信号の出力は光の偏光状態に依存しない。しかし、p、n どちらか片側の半導体領域の  $\mu$  が、スピンの向きに対して大きく異なる場合には、空乏領域での拡散電位は、図2右に示すようにスピンの向きで異なることになる。円偏光照射で n 側に生成した非平衡なスピン偏極キャリアが、図2右

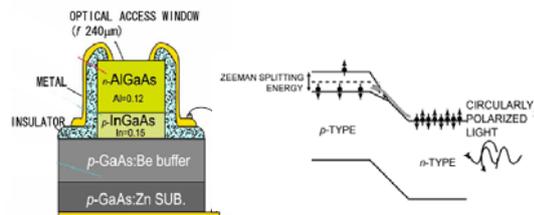


図2：(右) スピンの向きに依存した拡散電位を有する空乏層。このような状況は g 因子の異なる半導体材料で p-n 接合を形成し、外部磁場を接合に印加すれば実現可能。(左) 実際に作製した受光デバイスの断面概念図。

に示した奇妙な空乏領域を経て p 側に少数キャリアとして拡散注入されると、光照射時の電流-電圧特性は、円偏光の偏光に応じて変化すると期待される。

そのような特性が期待できる p-n 接合として、g 因子の大きく異なる半導体を組み合わせて p-n 接合を作製し (図 2 左)、その構造に磁場を印加して図 2 右のバンド端プロフィールに近い状況を実現して実験を行なってみた。実際の素子は、 $n\text{-Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$  ( $g = 0$ ) /  $p\text{-In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  ( $g = -1.2$ ) という構造で、 $p\text{-GaAs}(001)$  上に分子線エピタキシャル法で作製した。p 層と n 層の伝導帯の g 因子の差は 1.2。この試料をフォトダイオードに加工して実験を行ったところ、4K ではあるが、印加磁場  $\mu_0 H = 3\text{T}$  において右回り・左回り円偏光に対する起電力差に基づく電流約 50nA が出た (図 3)。世界に先駆けてスピン起電力を得た実験であった [成果⑥⑦]。

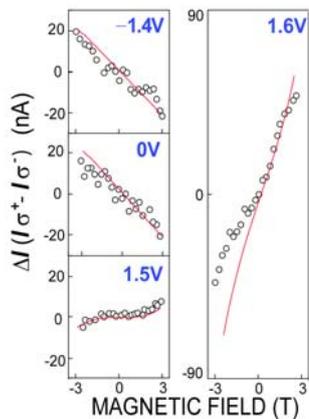


図 3: 円偏光切替に伴う光誘起電流。逆およびゼロバイアスでは、磁場印加に伴う磁気円二色による電流が支配的であるが、順方向では、予想どおりスピン起電力効果を捉えることが出来た。実線はスピン分極率  $P = 0.7\%$  とした時の理論曲線。

この実験に用いた試料の場合、p 層側の伝導帯のゼーマン分裂は 1 meV にも満たない。にもかかわらず nA レベルの円偏光依存電流が得られたのである (図 3)。これは、順方向バイアス下で流れる順方向電流の中の円偏光依存成分を取り出しているからである。円偏光照射によって n 側領域の多数キャリアに生じたわずかのスピン分極を、フェルミ分布則の非線形性を利用して検出しているのである。通常フォトダイオードとは逆の使い方となっていることにご留意いただきたい。モデル計算で得られるスピン分極率 ( $P \sim 0.7\%$ ) が定常的光励起の値 (30%程度) より随分低い点、77 K をめざした実験の実施が今後進めるべき課題である。

### (3) 端面型スピン発光素子の試作

GaAs-(Ga,Mn)As 結合量子構造の発光特性はデバイス化に不向きであることが研究を

進めるにつれて明らかになった [成果⑩]。そこで、半導体に注入されたキャリアのスピン偏極度を円偏光度に変換して検出する測定器との位置づけで研究されてきたスピン発光ダイオード (spin-LED) [9] に研究ターゲットを変更した。従来型 spin-LED の多くは、面内に磁化容易軸を持つ強磁金属薄膜と面直スピン軸が基底状態となる量子井戸発光層とを組み合わせた構造で研究が進められてきた (図 4a)。そのため、外部から磁場を印加して、強磁金属薄膜の磁化 (スピン軸) を強制的に面直に揃えて注入していた。本課題でも、従来型 spin-LED 構造を用いてスピン注入用強磁性薄膜を GaAs-LED 上に形成する研究を行い、強磁性化合物 MnSb が代表的強磁性金属 Fe よりも GaAs 上への形成が容易で安定であることを明らかにした。図 4c、d に本課題で作製した MnSb-spin-LED の断面概略図と MnSb 電極周辺から得られた赤外エレクトロルミネッセンス (EL) 画像を示す。ところで、実際のデバイスに適用可能な品質の MnSb 層が形成可能であることは東大との共同研究で試作した導波路型ハイブリッド光アイソレータで明確化した [成果⑪]。

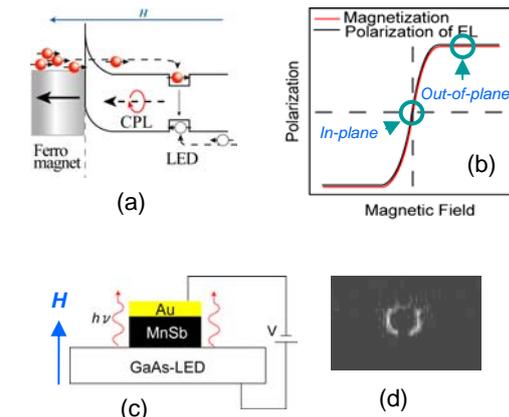


図 4: (a) 従来型 spin-LED の原理の概念図。面直方向に外部磁場を印加する必要があった。(b) 円偏光度の外部磁場依存性。(c) 本課題で作製した従来型 spin-LED の断面構造概略図。(d) 電極周辺部からの実際の赤外 EL 発光画像。

Spin-LED を発展させて光技術と結びつけるには、① 外部磁場を印加することなく円偏光エレクトロルミネッセンス (EL) が得られること、② 外部磁場を使わずに円偏光 EL の向きが切り替えられること、の 2 点が重要と考え研究を進めた。

項目①に関する従来型 spin-LED の問題点は、スピン注入電極の残留磁化方向  $M$  と発光層の固有スピン軸  $s$  とが直交していることにある。そこで MnSb の面内磁気異方性はそのままにして、GaAs 発光層厚を 150 nm と厚くして面直と面内のスピン軸がともに基底状態をとるバルクの状態を試料中に盛り込むこととした。この場合、 $M$  は常に面内容易軸方

向にあるので、円偏光はストライプレーザーと同様、端面から取り出されることになる(図 5a)。1 台目の分子線エピタキシー装置(MBE)で AlGaAs/GaAs DH 構造を、2 台目の MBE で MnSb を形成して作製した試料を大気中で壁開して端面発光型 spin-LED とし、LED に対して順バイアスを印加して得られた端面 EL の画像を図 5b に示す。EL スペクトルは、バンド端発光 (~1.51 eV、半値全幅 20 meV) が支配的であることを示し、作製した試料が実験用として十分に良質であることを示していた。EL ピーク波長 (821nm) における円偏光度の外部磁場依存性を、面内磁化曲線とともに図 5c に示す。円偏光度のスイッチング磁場が磁化反転磁場と一致し、かつ、外部磁場ゼロでも円偏光が有限の値であることがわかる。すなわち、項目①「残留磁化状態でのスピン注入による円偏光発光」が本課題によって達成できた[成果④]。この現象は、他研究機関においても達成されていることを付記する[10]。

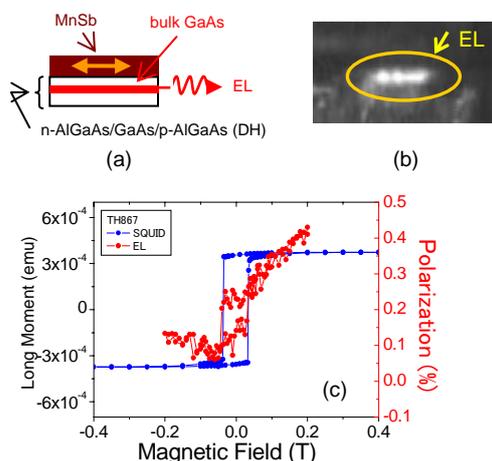


図 5: (a) 端面発光 spin-LED の概念図。(b) p-n 接合に対して順方向バイアスで発光中の素子の画像。試料温度約 4K。(c) 円偏光度の外部磁場依存性 (赤線) と MnSb 磁化曲線 (青色)。磁場印加方向は MnSb 磁化容易軸に平行 (面内)。

本申請が世界に先駆けて提唱している極めて独創性の高い研究項目②は、2つの端面型 spin-LED を組み合わせて最初の原理実験を行った。実験のポイントは磁化反転磁場が異なる 2つの spin-LED を用意することである。それぞれのデバイスは、図 6 右上に示すように、異なる磁場で磁化反転するので、着磁過程を注意深く制御してやることで、それぞれのデバイスのスピン注入電極の磁化を反平行配置にできることが期待される。その状態を保ったまま素子に印加する順方向バイアスを電氣的に切替えてやることで、円偏光度の符号を電氣的に切替えることが期待される。実際の実験は、特性が同一の2つのデバイスを傾斜角の異なる試料台 (30°と 45°)

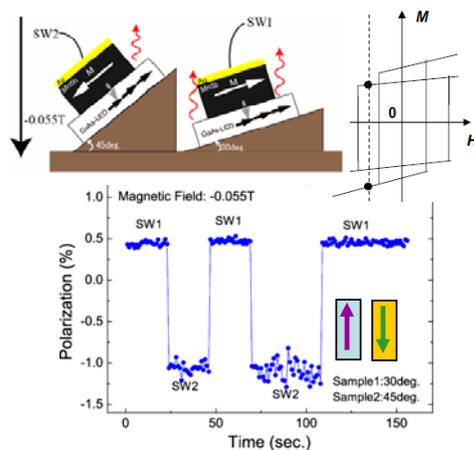


図 6: (左上) 異なる傾斜台上に隣接実装した2つの MnSb-GaAs spin-LED の概略図。(右上) 保持力の異なる2つの強磁性体電極の磁化ヒステリシス曲線。破線の値の外部磁場を印加すると反平行磁化配置が実現できる。(下) 反平行磁化配置の状態にある2つの spin-LED を電氣的に切替えて得られる円偏光スイッチデータ。波長 820nm ( $h\nu = 1.512$  eV)。外部磁場 550 Oe。測定温度 4 K。

に隣接実装する方法で行った。この場合、2つの素子に印加した外部磁場が同じ大きさであっても、試料の面内方向の磁場成分は傾斜角に依存して異なるので、磁化反転に必要な外部磁場は両者間で異なる。実際に実験を行った結果得られた円偏光電氣的切替の実験データを図 6 下に示す[成果⑤]。この実験では、素子の電氣的切り替えは手動スイッチで行っているため、実験の時間スケールが特筆して短いというわけではないが、手動スイッチを交流回路に置き換えれば、従来の光弾性変調器による円偏光切替の速度 (約 100 KHz [11]) を大きく上回る円偏光スイッチが可能となる。

この実験は、低温環境で、外部磁場の助けを借りており、また、円偏光の符号切替に伴って発光位置が変化してしまうなど、まだ幾つかの問題点がある。今後、マイクロ磁気工学を駆使して、残留磁化が反平行な電極の作り込む研究や、室温円偏光[12]の再現に向けた研究などが重要課題となろう。

#### (4) 磁化の光誘起才差運動

強磁性半導体を光励起すると、光強度と偏光に依存して、多様な磁化の変化、例えば円偏光励起による面直磁化[13]、強い光励起による超高速消磁[成果⑥]、さらに、弱い光励起による磁化の才差運動[3]、が現れる。これらの現象は、電子系の励起に伴うスピン系の多様な応答であり、(i) 正孔を介したスピン交換相互作用 (ii) スピン-軌道相互作用、(iii) スピンフリップ散乱、(iv) 光とスピン系の間の角運動量交換、などの機構が働いて

いる。見方を変えると、これらの現象は偏光の検出や高速変調への応用が期待されるのである。したがって、本申請において強磁性半導体の物性研究を積極的に進めた。結果、(In,Mn)As/GaSb ヘテロ構造[成果②④⑤⑧]および(Ga,Mn)As バルク薄膜[成果③]において直流、テラヘルツ、光の各波長領域で興味深い実験的成果を得ることができた。本報告書では、それらの中で今後の波及効果が最も大きいと期待される光励起による磁化の才差運動の成果に絞って述べる。「才差運動」は、磁化やスピントルクが働いて生じる運動形態であって、磁性に関する従来の物理的枠組みと本課題で得られた新知見とを摺り合わせる接点と位置づけられる。

光によるスピン自由度へのアクセスの研究で伝統的に取り上げられてきた物質の多くは絶縁体で、光励起状態の軌道はどちらかといえば局在性が強く、それゆえ、その励起寿命は比較的長い(ナノからマイクロ秒)。一方で、最近のフェムト秒超短パルス光による光励起実験では、円偏光パルスによる強磁性金属合金薄膜への光磁気書き込み実験[6]に代表されるように、励起寿命が短い非局在準位(1ps以下)を経由した光誘起現象が扱えるようになってきている。数10フェムトからナノ秒は、光励起で電子系に付与された過剰エネルギーが格子との相互作用で緩和する過程の時間領域でもあるので、電子系の過剰エネルギーは格子系とともにスピン系にも分配される。光パルス励起で起こる磁化の才差運動も電子系の過剰エネルギーの一部がスピン系に移行して起こる非熱的な現象であることが本課題で実施した実験で明らかになった。

図7に、この現象を明確に捉えたデータを示す[成果③]。実験はTi:Sapphireレーザーを光源とする全光ポンプ・プローブ法で行い、

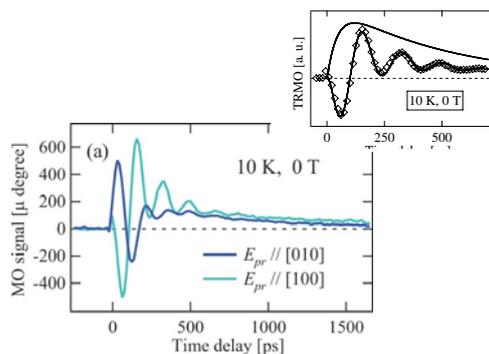


図7: 2つの異なる偏光面で計測した10Kにおける時間分解磁気光学プロフィール。計測パルスの偏光面は、 $E_{pr} // [010]$  では磁化とほぼ平行、 $E_{pr} // [100]$  では磁化とほぼ垂直。外部磁場は印加していない。右上挿入図は、実験データと有効磁場の傾き関数理論曲線。

磁化方向の変化を磁気光学信号変化、すなわち、試料からの反射光偏光面の回転角として検出した。励起光パルスの光子エネルギー、強度、パルス幅は、それぞれ、1.569 eV、 $3.4 \mu\text{J}/\text{cm}^2/\text{pulse}$ 、170 fsで、検出パルス光の強度は励起パルスの10分の1に設定した。測定時のクライオスタット温度は10 Kで、実験を開始前に磁化容易軸方向に外部磁場2000 Oeを印加して試料を着磁し、実験中は外部磁場を印加しなかった。(Ga,Mn)As試料のMn組成、ホール濃度、キュリー温度はそれぞれ $x \sim 0.02$ 、 $p \sim 1.8 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 、 $T_c \sim 45 \text{K}$ であり、分子線エピタキシー法でGaAs(001)基板上に作製した。

励起後200 psまでの振動の振幅は大きく、その後比較的小さな振幅が約1 nsまで継続する。また、指数関数的に単調減少する(数100psの時定数)成分も背景に認められる。特徴的なこととして、磁気光学シグナルの位相がプローブ光偏光面に依存して変化することが挙げられる。これは、磁気光学シグナルが面直磁化成分による極カー効果だけでなく、面内磁化の方向に鋭敏な磁気線二色性の寄与が極めて大きいためである。振動周波数が強磁性共鳴実験で得られている共鳴周波数[成果⑨]に極めて近いことから、磁気光学シグナルの振動が磁化の才差運動に起因するものであることが確定された。

才差運動の励起波長依存性と時間スライス磁気ヒステリシス曲線を系統的に調べた結果、観測された光励起才差運動は(Ga,Mn)As薄膜やGaAs基板に吸収された光で発生した熱に起因した現象でないことが明らかとなった。トルクの源となる有効磁場の変化の様子を、磁気ジャイロ理論に基づくモデルによって解析した結果、図7に示すように、有効磁場が励起直後から数10psまでの時間領域で平衡位置から徐々に逸脱し、その後、数100psかけて平衡へと戻っていくことが明らかとなった。

光照射で発現する磁化の才差運動が、価電子帯の励起と緩和によって引き起こされたものであるならば、電子状態を高速に制御する光技術を応用すると、磁化の才差運動を自由に制御できる道が拓けると期待される。電子系の励起を経由した磁化のコヒーレント操作は、光バッファメモリー、超高速スピントロニクス、さらに、量子情報処理にとって大変意義深い。そのためには磁化の振動周波数や振動減衰時間をもっと大幅に制御する道を開拓する必要がある[成果⑩]。室温実現に向け、メタ磁性体(例:  $\text{Fe}_3\text{Ga}_4$ の光磁化[2])を含む新材料の探索も進める必要がある。

#### 参考文献:

- [1] J. Hayafuji, *et al.*, *Inst. Phys. Conf. Ser.* **184**, 127-130 (2005).
- [2] A.T.M.K. Jamil, *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **44**, 1248 (2005).

- [3] A. Oiwa, *et al.*, J. Supercond. Nov. Magn. **18**, 9 (2005).
- [4] M. I. Dyakonov and V. I. Perel, in *Optical Orientation*, eds. F. Meier and B. P. Zakharchenya, (North-Holland, Amsterdam, 1984).
- [5] <http://www.isl.titech.ac.jp/~munelab/>
- [6] C.D. Stanciu, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 207401 (2007).
- [7] 小坂英男, 固体物理 **39**, 106 (2004).
- [8] I.Zutic, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **88**, 66603 (2002).
- [9] B.T. Jonker, Proceedings of the IEEE **91**, 727 (2003).
- [10] O.M.J. van't Erve, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **89**, 072505 (2006); A. Sinsarp, *et al.*, J. Supercond. Nov. Mag. **20**, 405 (2007).
- [11] <http://www.hindspem.com/>
- [12] 室温での最大値  $P = 47\%$ ; X. Jiang, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **94**, 056601 (2005).
- [13] A. Oiwa, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **88**, 137202 (2002).

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文 (全て査読有)] (計 13 件)

- ① T. Amemiya, Y. Ogawa, H. Shimizu, H. Munekata, and Y. Nakano, "Semiconductor Waveguide Optical Isolator Incorporating Ferromagnetic Epitaxial MnSb for Temperature Operation", Appl. Phys. Express **1**, 022002 1-3 (2008).
- ② H. Nose, T. Schallenberg, and H. Munekata, "Dependence of layer thickness on magnetism and electrical conduction in ferromagnetic (In,Mn)As/GaSb heterostructures", Springer Proceedings in Physics **119**, 23-26 (2008).
- ③ Y. Hashimoto, S. Kobayashi, and H. Munekata, "Photoinduced Precession of Magnetization in Ferromagnetic (Ga,Mn)As", Phys. Rev. Lett. **100**, 067202 1-4 (2008).
- ④ S. Lee and A. Trionfi, T. Schallenberg, H. Munekata, and D. Natelson, "Mesoscopic conductance effects in InMnAs structures", Appl. Phys. Lett. **90**, 032105 1-3 (2007).
- ⑤ H. Zhan, J. Deibel, J. Laib, C. Sun, J. Kono, and D.M. Mittleman, and H. Munekata, "Temperature dependence of terahertz emission from InMnAs", Appl. Phys. Lett. **90**, 012103 1-3 (2007).
- ⑥ T. Kondo, J. Hayafuji, and H. Munekata, "Investigation of spin voltaic effect in a p-n heterojunction", Jpn. J. Appl. Phys. **45**, L663-L665 (2006).
- ⑦ J. Hayafuji, T. Kondo, and H. Munekata, "Consideration and detection of spin-dependent transport across semiconductor heterojunction", physica status solidi c **3**, 4196-4199 (2006).T.
- ⑧ Schallenberg and H. Munekata, "Preparation of ferromagnetic (In,Mn)As with a high Curie temperature of 90 K", Appl. Phys. Lett. **89**, 042507 1-3 (2006).
- ⑨ Y. H. Matsuda, A. Oiwa, K. Tanaka, H. Munekata, "Ferromagnetic resonance study of magnetization relaxation in GaMnAs", Physica B **376-377**, 668-671 (2006).
- ⑩ 宗片比呂夫、大岩顕、"光による電荷・スピン注入に基づく磁化の制御"、まぐね (応用磁気学会誌) **1**, 100-107 (2006).

- ⑪ K. Tanaka and H. Munekata, "Investigation of photoluminescence in GaAs quantum well coupled with a ferromagnetic semiconductor layer of (Ga,Mn)As", Physica E **29**, 570-573 (2005).
- ⑫ J. Wang, C. Sun, J. Kono, A. Oiwa, H. Munekata, L. Cywinski, and L. J. Sham, "Ultrafast Quenching of Ferromagnetism in InMnAs Induced by Intense Laser Irradiation", Phys. Rev. Lett. **95**, 167401 1-4 (2005).
- ⑬ 宗片比呂夫、"スピン素子：偏光を情報処理に活用"、日経マイクロエレクトロニクス 2005 年 8 月号、p.58-59.

[学会発表] (計 94 件 ; (内数)は基調・招待)

- 1) 2008 年度：国際会議 10(2) 国内会議 14(2)
- 2) 2007 年度：国際会議 11(5) 国内会議 14(2)
- 3) 2006 年度：国際会議 12(3) 国内会議 14(1)
- 4) 2005 年度：国際会議 10(2) 国内会議 9

論文化作業中の重要な成果発表

- ① W. Terui and H. Munekata, "Observation of Out-of-Plane Spin Injection from MnSb/GaAs spin-LED", The 2008 Intern'l Conf. on Solid State Devices and Materials (Sept. 25th, 2008, Tsukuba), Extended Abstract p.662-663.
- ② 照井亘瑠,半那拓, 宗片比呂夫, "MnSb-GaAs Spin-LED の作製と評価", 第 56 回応物関係連合講演会 (筑波大, 2009 年 4 月 1 日), 1p-Q-4.

[図書] (計 2 件)

- ① H. Munekata, Oxford Sci. Publications, Oxford, "Concepts in Spin Electronics (edited by S. Maekawa)", 2006, 398 pages (p.1-p.42).
- ② 宗片比呂夫、シーエムシー出版、"スピントロニクスの基礎と最前線 (猪俣浩一郎監修)", 2005 年、330 ページ(pp.79-92).

[産業財産権]

- 出願状況 (計 2 件)
- ① 名称:p-i-n 型円偏光変調発光半導体素子およびレーザ素子  
発明者: 田中健一郎、宗片比呂夫  
権利者: 東京工業大学  
種類: 世界知的所有権出願  
番号: PCT-JP2006-301702  
出願日: 2006 年 1 月 26 日  
国内外の別: 国外

[その他]

発表論文全データはホームページ参照  
<http://www.isl.titech.ac.jp/~munelab/>

## 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
宗片 比呂夫 (Munekata Hiro)  
東京工業大学・大学院理工学研科・教授  
研究者番号: 60270922
- (2) 研究分担者  
なし
- (3) 連携研究者  
なし