総論 スピントロニクスの現状と展望

田 中 雅 明^{1,2}

¹東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 ☎ 113-8656 東京都文京区本郷7丁目3-1

²東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構 ☎ 153-8505 東京都目黒区駒場4丁目6-1

(2010年12月6日受理)

Spintronics : Current Status and Future Prospects

Masaaki TANAKA^{1,2}

¹Department of Electrical Engineering & Information Systems, The University of Tokyo, Hongo, Tokyo 113-8656

²Institute for Nano Quantum Information Electronics, The University of Tokyo, Komaba, Tokyo 153-8505

(Received December 6, 2010)

By introducing spin degrees of freedom in materials and devices, we can create new functionalities. This article overviews the studies on the control of spins (creation, injection, accumulation, relaxation, transport, and detection) and relations of spin-related properties with magnetic, electrical, optical, and thermal properties. Developments of semiconductor-based materials with spin-related functions are reviewed. Future issues and prospects for device applications are also described.

KEYWORDS : spin, magnetoresistance, magnetic semiconductor, spin MOSFET, reconfigurable logic

1. は じ め に

電子は「電荷」とともに自転の角運動量に相当する「スピン」を持っている。「電荷」の蓄積や流れを制御することによって、トランジスタや集積回路をはじめとするさまざまなデバイスが生み出され、20世紀後半以降、エレクトロニクスや情報・通信技術の大発展をもたらした。一方、「スピン」は磁性の源であり、磁石は古くから使われてきたが、磁性と電子の伝導がかかわる巨大磁気抵抗効果など新しい物理現象の発見を契機に応用技術も発展し、20世紀末頃から「スピントロニクス」といわれる新しい分野が形成された。ここでは固体中の「スピン」の生成、蓄積、流れ（スピンの流れは「スピン流」とよばれる）を理解し制御することが中心的課題の一つになっている。この「スピントロニクス」の研究は、固体物理、材料科学、電子工学、磁気工学およびそれらをまたぐ諸領域において、今では世界的に大きな潮流となっている（スピントロニクスの最近の解説として

は、参考文献^{1~3)}も参照されたい)。

「スピントロニクス」の中でも強磁性金属とその多層膜をベースとした分野は、最も応用が進んでいる。巨大磁気抵抗効果 (GMR)⁴⁾ やトンネル磁気抵抗効果 (TMR)^{5,6)} を用いた磁気センサはハードディスク装置の磁気ヘッドとして広く使われており、記録密度の大容量化に貢献してきた。また、TMR素子を用いた磁気抵抗ランダムアクセスメモリ (MRAM) の開発が進み、近い将来の不揮発性固体メモリとして期待されている。このように金属をベースとしたスピントロニクスにおいては、厚さ数 nm の強磁性金属薄膜や多層膜、トンネル接合におけるスピン依存伝導現象、特に磁化が平行か反平行かで電気抵抗が大きく変わる磁気抵抗効果を用いたデバイスが開発され、すでに使われている。これらの GMR および TMR 素子は、基本的には二端子の受動デバイスであるが、これをトランジスタと組み合わせるなど三端子デバイスとして論理回路に応用しようとする研究も始まっている。

一方、半導体の分野においても、この十数年の間に、スピンの影響が顕著に現れる様々な新しい物質やヘテロ

構造・ナノ構造が作製され、その物性が研究されるとともに、エレクトロニクスへの応用可能性も検討されつつある。半導体の特徴は、i) キャリア制御により物性を大きく変えることができる、ii) 結晶成長やプロセス技術が高度に洗練されておりバンドエンジニアリングやデバイス設計ができる、iii) 電子デバイス・集積回路技術や光デバイス技術が確立している、という点にある。特に、トランジスタのように信号を増幅できる三端子の能動デバイスが作製でき、これをベースとした大規模で信頼性の高い情報処理システムを構築できるという点は、他の物質系にはない長所である。ここに「スピン」のもつ機能や自由度を融合させれば、新しいデバイスやエレクトロニクスを構築できるのではないかと、という期待が生じる。情報技術を支えてきたシリコン集積回路が過去30年以上にわたって辿ってきた微細化による高性能化のトレンドが、近く限界に到達することが予想され、新しい原理や機能を導入した次世代デバイスの研究開発が関心を集めている。スピントロニクスは“More than Moore”あるいは“Beyond CMOS”とよばれる将来技術の一つとしても期待されるようになってきた。

また、対象とする物質も、金属や半導体のみならず、強相関系を含む酸化物、グラフェンやカーボンナノチューブを含む有機物や分子にも広がっており、それらの物質系においても様々な興味深い現象が観察されている(詳細は本特集における解説を参照されたい)。

本稿は、編集委員会の依頼により、できるだけ俯瞰的な視点から、総論として現状と将来について述べるのが目的である。ただし、スピントロニクス分野は多岐にわたる物質や現象の基礎研究からその応用まで非常に幅が広く、急速に発展しつつあるので、紙面の制約と筆者の力量不足により、一断面をとらえたものにならざるを得ないことをご了承いただきたい。

2. スピンの生成、注入、蓄積、輸送、操作、検出

前節で述べたように、スピントロニクスの研究は、基礎から応用まで幅広く、両者が密接に関連しながら発展してきており、また、金属、半導体、酸化物、有機物も含めて横断的かつ多面的な広がりを見せている。その研究課題の状況を Fig. 1 に示す。様々な物質系において多くの物理現象を通してスピンの「生成」、「注入」、「蓄積」、「輸送」、「操作」、「検出」を行うことで、スピン自由度の活用に向けた研究が進められている。物質中のスピンには、電子や正孔がもつキャリアのスピン、磁性元素がもつ局在スピン、磁壁、原子核がもつ核スピン、円偏光状態の光がもつスピンなどがあり、それらの間に相

Fig. 1. (color online). Current status of the spintronics research.

互作用があることに注意しなければならない。また、最近注目されているスピンの流れ(スピン流)²⁾の制御も重要な課題である。

まず、スピンが揃った状態を「生成」するには、強磁性物質を作製する、非磁性物質に磁性不純物(磁性イオン)を添加する、強磁場を加える、スピン軌道相互作用の強い物質中に電流を流しスピンホール効果によってキャリアスピンの偏り(スピン偏極)を生成する、円偏光を照射してスピン偏極した電子と正孔を生成する、などの方法がある。ある物質にスピンを「注入」するには、強磁性体コンタクトからスピン偏極キャリアを電流注入する、円偏光を照射し拡散あるいはドリフト電流によりスピン偏極キャリアを注入するという方法がある。強磁性体/非磁性体界面あるいは強磁性体のナノ微粒子など異種物質界面付近にはスピン偏極キャリアが「蓄積」する、すなわち平衡濃度以上のスピンの局所的に存在することがしばしばある。このようなスピン蓄積はスピン緩和長あるいはスピン緩和時間に依存する。スピン偏極キャリアを「輸送」するには電界によるドリフトあるいは拡散を用いる。スピンの「操作」とは歳差運動によりスピンの向きを変える、スピンの向きを揃える、あるいは無秩序にする、などであるが、これには、磁場のほか、ゲート電界、円偏光を用いることができる。スピンの「検出」にはGMR、TMRなどの磁気抵抗効果、磁気光学効果、スピン偏極した電子・正孔対による発光の円偏光度を測る方法がある。このような個々のスピン関連現象を理解し制御することにより、新たな機能やデバイスの実現につなげることが目標である。

3. 磁化、電気、光、熱との関わり

磁気的特性、電気的特性、光学的特性、熱的特性など

を表す物理量は元来独立なものであるが、扱う物質がナノスケールになると互いに強く相関をもつようになり、相互に変換することができる。すなわち、一方によって他方を制御できる可能性が出てくる。この変換や制御の基礎になるのが、スピンあるいはスピン流である、という認識が近年深まってきた。物質中のスピン関連現象を制御するためには、スピン（スピン流）とその他のさまざまな物理量との相互作用を理解しなければならない（Fig. 2）。

スピン関連現象が磁気的特性（磁場や磁化）と深い関連があることは当然であるのでここでは述べない。スピンと電気的特性（電流や電圧）との関わりの代表例はGMR⁴⁾とTMR^{5,6)}であろう。Fig. 3に強磁性トンネル接合（MTJ）におけるTMRの原理を示す。MTJ素子では、磁化の状態を平行磁化と反平行磁化の間で変えることによって、トンネル抵抗を変えることができる。Fig. 3上図は、強磁性電極（FM1, FM2）と数 nm 程度の薄いトンネル障壁（barrier）からなる強磁性トンネル接合（MTJ）、Fig. 3下図にはFM1とFM2の平行磁化状態（左）および反平行磁化状態（右）における状態密度とキャリアのトンネルの様子を表す。 D はそれぞれのスピンバンドにおけるフェルミ準位での状態密度である。トンネルの際にスピンは反転しないならば、トンネル確率

Fig. 2. (color online). Relations of spin or spin currents with magnetic, electrical, optical, and thermal properties.

Fig. 3. (color online). Tunneling magnetoresistance (TMR) in magnetic tunnel junctions (MTJ).

は始状態と終状態の状態密度の積に比例するので、平行磁化状態では $D_{1+}D_{2+} + D_{1-}D_{2-}$ 、反平行磁化状態では $D_{1+}D_{2-} + D_{1-}D_{2+}$ に比例した量となり、両者でトンネル抵抗が異なる。平行磁化および反平行磁化におけるトンネル抵抗を R_P, R_{AP} とすると、通常は $R_P < R_{AP}$ となる。よって、磁化の状態を変えることによって、MTJ 素子のトンネル抵抗を変えることができる。すなわち、磁化を制御することにより、電気的特性を制御することができる。逆に、この素子において片方の電極からもう一方の電極へトンネル電流を流すことで、磁化を平行磁化と反平行磁化の間で変える、すなわち、電流によって磁化状態を制御することもできる。このような2枚の強磁性体間の電流はスピン偏極電流であり、強磁性体にスピン偏極したキャリアが注入されると、キャリアスピンの散乱されることによって失われた角運動量が、強磁性体中の局在磁気モーメントに対するトルクとして与えられ、磁化反転を引き起こす。このスピン注入磁化反転という現象は、1996年に理論的に予測され⁷⁾、2000年頃には金属強磁性体の微細構造で実験の実証⁸⁾が始まり、現在ではMRAMにおける書き込み技術として用いられている。

円偏光を光のスピンとみなせば、光と物質中のキャリアスピンや磁化との相互作用を、スピン角運動量のやりとりとして理解することができる。磁化が光に影響を与える現象としてファラデー効果やカー効果などの磁気光学効果は古くから知られており、光アイソレータなどの通信用デバイスとして実用化されている。最近では光がスピンおよび磁化に影響を与える現象が報告されている。強磁性半導体(In, Mn)Asにおいて、 T_C 付近（35 K 以下）において光照射によって正孔濃度を増やし、常磁性から強磁性へ転移させることができる⁹⁾（ゲート電圧をかけて電界効果によっても、同様に正孔濃度を増やし、常磁性から強磁性へ転移させることもできる¹⁰⁾）。GaAs系の強磁性半導体においては、Mnをデルタドープしたヘテロ構造を用いることにより、105 K という比較的高温において光照射またはゲート電界による常磁性-強磁性の転移あるいは磁化の変化が報告されている¹¹⁾。このように、電気的あるいは光学的手段を用いて磁性を制御できるのは、半導体ならではの特色であり、まだ動作温度が室温より低いという問題点はあるものの、半導体中のスピン秩序を制御し新たなデバイス機能を生み出す可能性も期待される。例えばGaMnAsにおいては、円偏光照射による保持力制御¹²⁾、磁化の増強¹³⁾や磁化回転¹⁴⁾などが観測されている。Fig. 4は $\text{Ga}_{0.989}\text{Mn}_{0.011}\text{As}$ 薄膜に右左円偏光 (σ^+, σ^-) を照射したときの異常ホール効果の変化 ΔR_{Hall} を示したものである。異常ホール効果は磁化に比例するので、この実験で

は光により磁化を増減させることができることを示している。

さらに、熱とスピンについても関わりがあることが最近の実験によって明らかになってきた。その代表例がスピントリック効果¹⁵⁾の発見であろう。金属など導電性の試料の両端に温度差をつけると電圧が生じる現象はゼーベック効果としてよく知られており、熱と電気を相互に変換する熱電素子に使われている。これと同様に、強磁性金属に温度勾配をつけると、スピンの流れが生じることが最近の実験で示され、スピントリック効果と呼ばれる (Fig. 5)。図に示すように NiFe などの強磁性金属の両端に温度差をつける。ここで磁化の向き (= 磁場の向き) は素子の面内にある。温度勾配により、電子スピンの向きに応じて試料の両端にそれぞれ逆向きをもつスピンが集まり、スピン圧 (スピン流を駆動する力) が生じる。このスピン圧は、薄い Pt 片でスピンホール効果の逆効果により電圧に変えられ、測定される。すなわち NiFe の上部に付けた Pt に注入されたスピン流はその

Fig. 4. Changes in the (a) the Hall resistance and (b) sheet resistance at 4.2 K under the illumination with σ^+ or σ^- circularly polarized light on a $\text{Ga}_{0.989}\text{Mn}_{0.011}\text{As}/\text{GaAs}$ sample with in-plane magnetic anisotropy.¹³⁾

Fig. 5. (color online). (a) Experiment of the spin Seebeck effect. (b) Voltage signals at the end of the Pt electrodes.¹⁵⁾

スピンの向きに応じて一方の端に振り分けられて起電力 (Fig. 5(a) の EMF) を生じ、電圧として検出される。このように強磁性金属に熱 (温度勾配) を加えることによってスピン流、スピン圧を生じさせることができる。このスピントリック効果は強磁性絶縁体 ($\text{LaY}_2\text{Fe}_3\text{O}_{12}$)¹⁶⁾ および強磁性半導体 (GaMnAs)¹⁷⁾ でも観測されている。

また、サブミクロンサイズの CuNi/Au 接合において巨大パルチエ効果が観測されている¹⁸⁾。パルチエ係数は 480 mV と見積もられ、これはバルク Au およびバルク CuNi のゼーベック係数から期待される値の 40 倍である。この理由はまだ明らかではないが、CuNi はナノスケールのコラム状グレインからなる不均一構造を持っており、このような構造ではスピンエントロピーが増大することが理論的に予測されている¹⁹⁾。

4. スピン関連機能をもつ半導体材料の進展

Fig. 1 に示すスピンに関連するさまざまな機能を実現するためには、適切な材料を選ぶ、または創ることが必要である。材料研究の中でもエレクトロニクスや情報処理デバイスの中核材料である半導体と整合性のよいスピン機能材料の開発が特に重要であると考えられ、これまでに多くの研究がなされている。半導体でありながらスピンに関連する物性や機能をもつ材料研究の発展の概略をまとめたものが Fig. 6 である。半導体で磁性をもつ材料は、EuS, EuSe, CdCr_2Se_4 などの磁性半導体に始まり、1960 年代から長く研究されてきた。1980 年代以降に、分子線エピタキシー (MBE) によって原子レベルで膜厚を制御された薄膜やヘテロ構造の成長が可能になり、多くの新しい薄膜、ヘテロ構造、ナノ構造が作製された。これらの材料系は、①磁性半導体または希薄磁性半導体 (強磁性を示す物質は強磁性半導体とも呼ばれる)、②強磁性金属と半導体からなるヘテロ構造、③強磁性金属微粒子を半導体結晶中に埋め込んだグラニュー構造、の 3 種に大別される。Fig. 6 の右にはこれらの材料に基づく様々なデバイスを記している。ここでは①の磁性半導体を中心にその発展の経緯を述べる。

磁性半導体として、80 年代以降に研究が盛んに行われたのは、II-VI 族の化合物半導体に Mn, Co, Fe などの遷移金属元素を添加させた混晶半導体であり、希薄磁性半導体 (DMS)²⁰⁾ とも呼ばれる。II-VI 族 DMS の代表的なものは CdMnTe であり、II-VI 族 DMS は一部の物質を除き強磁性にはなりにくく常磁性またはスピングラスであるが、室温で大きなファラデー効果を示し、ヘテロ構造やナノ構造も作製されている。1990 年代には CdMnTe や CdHgMnTe のバルク結晶を用いた $0.98 \mu\text{m}$ 帯用の光アイソレータが実用化された²¹⁾。一方、90 年代

Year	(Diluted) Magnetic Semiconductors	Ferromagnetic-metal/ Semiconductor Heterostructures	Magnetic Granular Materials	Devices
'60 ~ '70	Eu-X (X=S, Se) CdCr ₂ Se ₄ Ferromagnetism			
'80	II-VI DMS CdMnTe, ZnMnTe MBE Growth, Quantum Wells Giant Faraday Effect	MBE Growth Co/GaAs, Fe/GaAs Heterostructures of Dissimilar Materials		
'90	IV-VI PbSnMnTe III-V InMnAs, GaMnAs Carrier-induced Ferromagnetism Heterostructures AHE, GMR, TMR Spin Injection and Detection	MnAl/AlAs, MnGa/GaAs MnAs/GaAs, MnAs/Si MnSb/GaAs Control of Magnetic Anisotropy Anomalous Hall Effect (AHE)	GaAs:MnAs GaAs:MnSb Giant Magnetooptical Effects, GMR Magnetoresistive Switch	Spin FET Optical isolator Spin valve Tr Spin LED
'00~	ZnXO (X=Mn, Ni, Co) CdMnGeP ₂ , TiCoO ₂ (Ga,Mn)N, (ZnCr)Te (Ga,Cr)N (Ga,Fe)N Widegap, Oxide GeMn, GeFe Group IV Spinodal Decomposition	ZB-CrAs, ZB-CrSb, ZB-MnAs GMR, TMR Spin Injection and Detection Half-metals Spin Hall Effect (SHE) Fe _x Si/GaAs, Fe _x Si/Si Spin Motive Force Huge Magneto- resistance		Magnetic bipolar Tr Spin filter Tr Spin MOSFET Spin HCT Spin PD Waveguide-type optical isolator Circular polarization laser

Fig. 6. (color online). Development of semiconductor-based materials and devices with spin-related properties and functionalities.³⁾ Here FET stands for field-effect transistor, Tr transistor, LED light emitting diode, MOSFET metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, HCT hot carrier transistor, and PD photodiode. Important phenomena are also shown in squares, where MBE stands for molecular beam epitaxy, AHE anomalous Hall effect, GMR giant magnetoresistance, and TMR tunneling magnetoresistance.

半ば以降、非常に活発に研究が行われるようになったのは III-V 族の磁性半導体である。代表的な物質として (In, Mn)As²²⁾, (Ga, Mn)As²³⁾, (In, Ga, Mn)As²⁴⁾があり、低温 MBE 成長によって数~20% 程度の Mn 濃度を含む混晶が作製され、強い p 型の試料については低温で強磁性を示す。最初の III-V 族強磁性半導体 (In, Mn)As の強磁性転移温度 T_c は 7 K 程度であったが、現時点 (2010 年 12 月) で (In, Mn)As, (Ga, Mn)As, (In, Ga, Mn)As の T_c の最高値はそれぞれ 90 K²⁵⁾, 191 K²⁶⁾, 130 K²⁷⁾ まで上昇した。さらに 2000 年以降、ワイドギャップ半導体および酸化物半導体などにおいて、室温を超える高い T_c を示す物質が相次いで報告された。ただし、遷移金属を数 % 以上添加した物質においては、ナノスケールでの強磁性金属の析出物が存在する可能性があるため、多くの新物質について真に強磁性半導体であるのかどうか議論されている。最近になって一部の物質では強磁性半導体であることを示す信頼性ある実験結果が得られ始めており、今後の展開に期待したい。一方、シリコン

技術と整合性がよいと期待される IV 族ベースの磁性半導体としては、2002 年以降、GeMn²⁸⁾, GeCoMn²⁹⁾, GeFe³⁰⁾ の作製と強磁性が報告されている。2000 年以降に作製されたこれらの新物質における強磁性のメカニズムは、まだ十分に理解されていない。

強磁性金属と半導体から成るヘテロ構造については、強磁性を示す代表的な元素金属である Fe, Co のエピタキシャル薄膜を GaAs 半導体基板上に成長させる試みが 1980 年頃から始められた³¹⁾。1990 年代からは MBE 法によって MnAl/AlAs³²⁾, MnGa/GaAs³³⁾, MnAs/GaAs³⁴⁾, MnAs/Si³⁵⁾ など、 T_c が室温より高い Mn 化合物の強磁性金属を用いて、熱力学的に安定で急峻な界面をもつ強磁性金属と半導体から成るヘテロ構造が形成された。これらの構造は、エピタキシャル成長によって強磁性結晶の方位や磁気異方性が制御でき、異常ホール効果や磁気抵抗効果あるいはスピバルブ効果を利用した不揮発性メモリへの応用可能性が示された。最近では、強磁性金属から半導体へのスピン注入の実験や、スピントランジス

タ構造としての検討が行われている。

半導体を母体とするグラニュー材料は、磁性半導体 (Ga, Mn)As を 450°C 以上の高温で熱処理して形成されるもので、ナノスケールの強磁性金属 MnAs 微粒子が半導体 (GaAs) 中に埋め込まれた構造 (ここでは GaAs : MnAs と記す) であり、超常磁性を示す³⁶⁾。この種の材料は、室温で大きな磁気光学効果^{37, 38)}や磁気抵抗効果^{39, 40)}が観測されている。最近では、GaAs : MnAs を含む強磁性トンネル接合で明瞭な TMR が観測され、NiAs 型六方晶の MnAs 微粒子がスピン注入源あるいはスピン検出器として機能すること⁴¹⁾、スピン依存単電子伝導と非常に長いスピン緩和時間を示すこと⁴²⁾、また、閃亜鉛鉱型 MnAs 微粒子を含む磁気トンネル接合においては、スピン起電力と巨大な磁気抵抗効果を示す⁴³⁾など、様々な興味深いスピン関連現象が報告されている。

5. デバイス応用と将来展望

最後にデバイス応用と将来展望について触れておこう。スピンを用いることにより従来のエレクトロニクス・デバイスに加えることができる新たな機能をあげるとすれば、①不揮発性、②低消費電力、③書き換え可能な柔軟性、④光の非相反性、⑤スピンの量子性であろう。

不揮発性は強磁性のヒステリシスからくる性質であり、電源を切っても記憶が消えない不揮発性メモリとして、強磁性トンネル接合を用いた MRAM の開発が進んでいる。原理的には、磁化反転には劣化がないので、書き込み回数は無限大となり得る。高速大容量の不揮発性メモリができればすなわち低消費電力につながる。さらに、3 節で紹介した熱とスピンとの関わり方の研究 (“スピンカロリトロニクス”とも言われる) が将来の低消費電力デバイスの実現に貢献するかもしれない。

書き換え可能な柔軟性をもつ論理回路は、スピントランジスタを用いれば実現できる。スピントランジスタは、これまでにさまざまなタイプのデバイスが提案されている⁴⁴⁾。具体的な回路応用まで示されているものとして、スピン MOSFET⁴⁵⁾と再構成可能な論理回路の提案・解析⁴⁶⁾があり、少ない素子数で不揮発性ロジックが実現できる。スピン MOSFET の基本構造を Fig. 7 (a) に示す。基本構造は通常の Si-MOSFET と同様であるが、ソースおよびドレインには導電性の強磁性体を用い、ソース・ドレインと Si チャンネルとのコンタクトはショットキー接合とする。動作原理は TMR と同様のスピン依存伝導による。すなわちスピン偏極されたキャリアがソースからチャンネルに注入されスピンを保持したままドレインに到達すると、磁化が平行の場合にはソース・ドレイン間の抵抗が小さく、反平行の場合には抵抗が大きくな

Fig. 7. (color online). (a) Device structure of spin MOSFET,⁴⁵⁾ (b) its symbol,⁴⁶⁾ and expected output characteristics when the magnetization configuration of the ferromagnetic source and drain is (c) parallel and (d) antiparallel.

る。ソース・ドレインの強磁性材料としては、できるだけスピン偏極率の高い材料を用いることが望ましい。このデバイスは以下の特色をもつ：i) 基本的には MOSFET なので電圧利得、電力増幅作用がある。ii) ソース・ドレインの磁化状態 (平行磁化か反平行磁化か) によってドレイン電流 I_D を大きく変えることができる。すなわちトランジスタとしての出力電流 (駆動能力) やトランスコンダクタンス g_m を磁化状態という “第 4 の端子” によって大きく変化させることが可能である。iii) 強磁性体を用いるので、磁化状態は一度決めたら次に書き込むまで反転せず不揮発である。iv) 既存の Si 集積回路との整合性が良くシリコンテクノロジーで蓄積された微細加工技術や回路設計技術などの資産を使うことができる。Fig. 7 (b) に回路記号を示すが、これは「出力可変トランジスタ」という新しいデバイス概念を表したものである。Fig. 7 (c), (d) に平行磁化および反平行磁化の時の理想的な出力特性を示す。ソース・ドレインの磁化によってドレイン電流 I_D (駆動能力) が変化する。原理的にはチャンネルを n 型にも p 型にもすることができ、CMOS 回路構成も可能である。Spin MOSFET からなる論理回路は、少素子数と機能の不揮発性により低消費電力動作が期待できよう。関連のアプローチとして不揮発性メモリ素子を論理演算素子の中に組み込んだロジックインメモリをつくるという考え方⁴⁷⁾もある。最近、FeCo/MgO/FeCo からなる TMR 素子と Si-CMOS 回路を組み合わせることにより、ロジックインメモリとして不揮発性の全加算器が試作され、その動作が示された⁴⁸⁾。このような再構成可能な論理回路や不揮

発性論理回路の実現は、今後のスピントロニクスにおける重要な目標であろう。

光の非相反性とは、磁気光学効果からくる性質であり、光アイソレータはこの性質を利用している。In-GaAsP/InPの半導体アクティブ導波路と隣接する磁性層(FeあるいはMnAs)を用いた導波路型光アイソレータが試作されている⁴⁹⁾。これは従来のバルク磁性ガーネット結晶を用いた光アイソレータとは異なり、半導体レーザなどと集積化可能なデバイスとして期待される。このような一方向性能動光デバイスや集積化型磁気光学デバイスは、光集積回路で役立つだろう。また、面発光レーザ構造に円偏光または強磁性電極からスピン偏極キャリアを注入し、円偏光のレーザ発振が報告されている^{50,51)}。円偏光を検出するスピンフォトダイオードの提案と試作もなされている⁵²⁾。このような円偏光を扱う光デバイスができれば、画像処理、化学分析や製薬などの分野で役立つかもしれない。

さらに、やや遠い将来であろうが、スピンの量子性は、量子情報処理技術に役立つことが期待される⁵³⁾。1個の電子スピンは理想的な二準位系をつくる。電子スピンのみならず、非常にコヒーレンス時間が長い核スピンの利用も考えられており、電子スピンと核スピンの相互作用、フォトンと電子スピンとの相互作用も視野に入れた研究が展開されている。

以上述べたように、スピントロニクス分野では次々に新しい物質や現象が開拓・発見され、今後も意外性に富む研究が出現する可能性が高く、数ある学術・技術領域の中でも最も活力に満ちた分野の一つであるといえる。関連する領域も広く、基礎研究と応用が密接に関係しているという特色がある。また、日本の研究機関に所属する研究者達の活躍がめざましく、日本発の優れた仕事がこの分野の発展に大きく貢献している。この流れを生かして更なるブレイクスルーを生み出し、社会に貢献する技術に大きく育てたいものである。

文 献

- 1) Special Issue on Spintronics, IEEE Transactions on Electron Devices Vol. **54**, No. 5 (2007); I. Zutic, J. Fabian and S. Das Sarma: Rev Mod. Phys. **76**, 323 (2004).
- 2) 高梨弘毅: 応用物理 **77**, 255 (2008).
- 3) 田中雅明: 応用物理 **78**, 205 (2009).
- 4) M.N. Baibich, J.M. Bruto, A. Fert, F. Nguyen, van Dau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friederich and J. Chazelas: Phys. Rev. Lett. **61**, 2472 (1988); G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach and W. Zinn: Phys. Rev. B **39**, 4828 (1989); GMRの発見は2007年ノーベル物理学賞の対象になった。
- 5) M. Julliere: Phys. Lett. **54A**, 225 (1975); T. Miyazaki and N. Tezuka: Magn. Magn. Mat. **139**, L231 (1995); J.S. Moodera, L.R. Kinder, T.M. Wong and R. Meservey: Phys. Rev. Lett. **74**, 3273 (1995).
- 6) S. Yuasa, T. Nagahama, A. Fukushima, Y. Suzuki and K. Ando: Nature Mat. **3**, 868 (2004); S.S.P. Parkin, C. Kaiser, A. Panchula, P.M. Ricei, B. Hughes, M. Samant and S.-H. Yang: Nature Materials **3**, 862 (2004).
- 7) J.C. Slonczewski: J. Magn. Magn. Mater. **159**, L1 (1996); L. Berger: Phys. Rev. **B54**, 9353 (1996).
- 8) E.B. Myers, D.C. Ralph, J.A. Katine, R.N. Louie and R.A. Buhrman: Science **285**, 867 (1999); F.J. Albert, J.A. Katine, R.A. Buhrman and D.C. Ralph: Appl. Phys. Lett. **77**, 3809 (2000).
- 9) S. Koshihara, A. Oiwa, M. Hirasawa, S. Katsumoto, Y. Iye, C. Urano, H. Takagi and H. Munekata: Phys. Rev. Lett. **78**, 4617 (1997).
- 10) H. Ohno, D. Chiba, F. Matsukura, T. Ohmiya, E. Abe, T. Dietl, Y. Ohno and K. Ohtani: Nature **408**, 944 (2000).
- 11) A.M. Nazmul, S. Kobayashi, S. Sugahara and M. Tanaka: Jpn. J. Appl. Phys. **43**, L233 (2004).
- 12) A. Oiwa, T. Slupinski and H. Munekata: Appl. Phys. Lett. **78**, 518 (2001).
- 13) A. Oiwa, A. Mitsumori, R. Moriya, T. Slupinski and H. Munekata: Phys. Rev. Lett. **88**, 137202 (2002).
- 14) T. Kondo, K. Nomura, G. Koizumi and H. Munekata: physica status solidi (c) **3**, 4263 (2006).
- 15) K. Uchida, S. Takahashi, K. Harii, J. Ieda, W. Koshiba, K. Ando, S. Maekawa and E. Saitoh: Nature **455**, 778 (2008).
- 16) K. Uchida, J. Xiao, H. Adachi, J. Ohe, S. Takahashi, J. Ieda, T. Ota, Y. Kajiwara, H. Umezawa, H. Kawai, G.E.W. Bauer, S. Maekawa and E. Saitoh: Nature Materials **9**, 894 (2010).
- 17) C.M. Jaworski, J. Yang, S. Mack, D.D. Awschalom, J.P. Heremans and R.C. Myers: Nature Materials **9**, 898 (2010).
- 18) A. Sugihara, M. Kodzuka, K. Yakushiji, H. Kubota, S. Yuasa, A. Yamamoto, K. Ando, K. Takanashi, T. Ohkubo, K. Hono and A. Fukushima: Applied Physics Express **3**, 065204 (2010).
- 19) H. Katayama-Yoshida, T. Fukushima, V.A. Dinh and K. Sato: Jpn. J. Appl. Phys. **46**, L777 (2007); K. Sato, H. Katayama-Yoshida and P.H. Dedrichs: Jpn. J. Appl. Phys. **44**, L948 (2005).
- 20) J.K. Furdyna: J. Appl. Phys. **64**, R29 (1988).
- 21) K. Onodera, T. Matsumoto and M. Kimura: Electronics Lett. **30**, 1954 (1994); 小野寺晃一, 大場裕行, 木村昌行, 川村卓也, 長山幸雄: OPTRONICS No. **195**, 134 (1998).
- 22) H. Munekata, H. Ohno, S. von Molnar, A. Segmuller, L.L. Chang and L. Esaki: Phys. Rev. Lett. **63**, 1849 (1989); H. Ohno, H. Munekata, S. von Molnar and L.L. Chang: J. Appl. Phys. **69**, 6104 (1991); H. Munekata, H. Ohno, R.R. Ruf, R.J. Gambino and L.L. Chang: J. Cryst. Growth **111**, 1011 (1991); H. Ohno, H. Munekata, T.

- Penny, S. von Molnar and L.L. Chang : Phys. Rev. Lett. **68**, 2664 (1992).
- 23) H. Ohno, A. Shen, F. Matsukura, A. Oiwa, A. Endo, S. Katsumoto and H. Iye : Appl. Phys. Lett. **69**, 363 (1996) ; T. Hayashi, M. Tanaka, T. Nishinaga, H. Shimada, H. Tsuchiya and Y. Ootuka : J. Cryst. Growth **175/176**, 1063 (1997) ; A. Van Esch, L. Van Bockstal, J. De Boeck, G. Verbanck, A.S. van Steenberghe, P.J. Wellmann, B. Grietens, R.B.F. Herlach and G. Borghs : Phys. Rev. B **56**, 13103 (1997).
- 24) S. Ohya, Y. Higo, H. Shimizu, J.M. Sun and M. Tanaka : Jpn. J. Appl. Phys. **41**, L24 (2002) ; T. Slupinski, H. Munekata and A. Oiwa : Appl. Phys. Lett. **80**, 1592 (2002).
- 25) T. Schallenberg and H. Munekata : Appl. Phys. Lett. **89**, 042507 (2006).
- 26) L. Chen, S. Yan, P.F. Xu, J. Lu, W.Z. Wang, J.J. Deng, X. Qian, Y. Ji and J.H. Zhao : Appl. Phys. Lett. **95**, 182505 (2009).
- 27) S. Ohya, H. Kobayashi and M. Tanaka : Appl. Phys. Lett. **83**, 2175 (2003) ; *ibid* **83**, 4450 (2003).
- 28) Y.D. Park, A.T. Hanbicki, S.C. Erwin, C.S. Hellberg, J.M. Sullivan, J.E. Mattson, T.F. Ambrose, A. Wilson, G. Spanos and B.T. Jonker : Science **295**, 651 (2002).
- 29) F. Tsui, L. He, L. Ma, A. Tkachuk, Y.S. Chu, K. Nakajima and T. Chikyow : Phys. Rev. Lett. **91**, 177203 (2003).
- 30) Y. Shuto, M. Tanaka and S. Sugahara : J. Appl. Phys. **99**, 08D516 (2006).
- 31) J.R. Waldrop and R.W. Grant : Appl. Phys. Lett. **34**, 630 (1979) ; G.A. Prinz and J.J. Krebs : Appl. Phys. Lett. **39**, 397 (1981).
- 32) T. Sands, J.P. Harbison, M.L. Leadbeater, S.J. Allen, G.W. Hull, R. Ramesh and V.G. Keramidas : Appl. Phys. Lett. **57**, 2609 (1990).
- 33) M. Tanaka, J.P. Harbison, J. De Boeck, T. Sands, B. Philips, T.L. Cheeks and V.G. Keramidas : Appl. Phys. Lett. **62**, 1565 (1993).
- 34) M. Tanaka, J.P. Harbison, T. Sands, T.L. Cheeks, V.G. Keramidas and G.M. Rothberg : J. Vac. Sci. Technol. **B12**, 1091 (1994) ; M. Tanaka, J.P. Harbison, M.C. Park, Y.S. Park, T. Shin and G.M. Rothberg : Appl. Phys. Lett. **65**, 1964 (1994).
- 35) K. Akeura, M. Tanaka, M. Ueki and T. Nishinaga : Appl. Phys. Lett. **67**, 3349 (1995) ; K. Akeura, M. Tanaka, T. Nishinaga and J. De Boeck : J. Appl. Phys. **79**, 4957 (1996).
- 36) J. De Boeck, R. Oesterholt, A. Van Esch, H. Bender, C. Bruynseraede, C. Van Hoof and G. Borghs : Appl. Phys. Lett. **68**, 2744 (1996).
- 37) H. Akinaga, S. Miyanishi, K. Tanaka, W. Van Roy and K. Onodera : Appl. Phys. Lett. **76**, 97 (2000).
- 38) H. Shimizu, M. Miyamura and M. Tanaka : J. Vac. Sci. Technol. **B18**, 2063 (2000) ; M. Tanaka, H. Shimizu and M. Miyamura : J. Cryst. Growth **227-228**, 839 (2001).
- 39) H. Akinaga, M. Mizuguchi, K. Ono and M. Oshima : Appl. Phys. Lett. **76**, 357 (2000).
- 40) M. Yokoyama, T. Ogawa, A.M. Nazmul and M. Tanaka : J. Appl. Phys. **99**, 08D502 (2006).
- 41) P.N. Hai, M. Yokoyama, S. Ohya and M. Tanaka : Physica **E32**, 416 (2006) ; P.N. Hai, M. Yokoyama, S. Ohya and M. Tanaka : Appl. Phys. Lett. **89**, 242106 (2006).
- 42) P.N. Hai, S. Ohya and M. Tanaka : Nature Nanotechnology **5**, 593 (2010).
- 43) P.N. Hai, S. Ohya, M. Tanaka, S.E. Barnes and S. Maekawa : Nature **458**, 489 (2009).
- 44) 菅原 聡 : 電子情報通信学会誌 **88**, 541 (2005).
- 45) S. Sugahara and M. Tanaka : Appl. Phys. Lett. **84**, 2307 (2004) ; M. Tanaka and S. Sugahara : IEEE Transactions on Electron Devices **54**, 961 (2007).
- 46) T. Matsuno, S. Sugahara and M. Tanaka : Jpn. J. Appl. Phys. **43**, 6032 (2004) ; M. Tanaka and S. Sugahara : IEEE Transactions on Electron Devices **54**, 961 (2007).
- 47) 羽生貴弘 : 応用物理 **76**, 1388 (2007).
- 48) S. Matsunaga, J. Hayakawa, S. Ikeda, K. Miura, H. Hasegawa, T. Endoh, H. Ohno and T. Hanyu : Applied Physics Express **1**, 091301 (2008).
- 49) H. Shimizu and Y. Nakano : Jpn. J. Appl. Phys. **43**, L1561 (2004) ; T. Amemiya, H. Shimizu, Y. Nakano, P.N. Hai, M. Yokoyama and M. Tanaka : Appl. Phys. Lett. **89**, 021104 (2006) ; T. Amemiya, H. Shimizu, P.N. Hai, M. Yokoyama, M. Tanaka and Y. Nakano : Jpn. J. Appl. Phys. **46**, 205 (2007).
- 50) H. Ando, T. Sogawa and H. Gotoh : Appl. Phys. Lett. **73**, 566 (1998).
- 51) M. Holub, J. Shin, S. Chakrabarti and P. Bhattacharya : Appl. Phys. Lett. **87**, 091108 (2005).
- 52) T. Kondo, J. Hayafuji and H. Munekata : Jpn. J. Appl. Phys. **45**, L663 (2006).
- 53) たとえば, 伊藤公平 : 応用物理 **73**, 782 (2004) ; 応用物理 75 巻 11 号特集号における量子情報に関する各記事 (2006).