

〔解説〕

スピントロニクス の 展開

Perspective of Spintronics

安藤 功 児
K. ANDO

Spin and charge are two fundamental attributes of electrons. A new field of electronics called spintronics uses spin to control electrons to develop new functional devices such as non-volatile computer memory, highly sensitive magnetic sensors, integrated optical devices as well as logic devices which use up- and down-spins. Background and some expected applications of spintronics are discussed.

§ 1 はじめに

電子の自転運動であるスピンを利用する新しい機能材料・機能デバイスの研究が急速な広がりを見せてつある¹⁾。電子は電荷とスピンの二つの自由度を持っており、このうち電荷の自由度がもたらす電気伝導や光学特性はトランジスタやレーザなどの機能の実現に利用されている。一方スピンの集団は磁化として利用され、ハードディスクなどの磁気記録に利用されている。このように現在のエレクトロニクスにおいては、電荷とスピンの自由度はそれぞれ全く別々に利用されているに過ぎない。もし電子レベルにおける電荷とスピンの結合を利用することが出来れば、電荷がもたらす電氣的・光学的機能と、スピンがもたらす磁氣的機能とを結合させた新しい機能材料や機能デバイスが可能になると期待される (Fig.1)。このような目論見による研究自体はすでに長い歴史をもっているが、従来その成果は基礎物理学的なものにとどまり応用への道筋が見えなかった。しかしごく最近になって、高度に進んだ新材料合成技術とナノスケールサイズの微細構造作製技術の適用がこの分野の工学としての可能性を大きく拓きつつある。強磁性金属人工格子の電気伝導率が磁場で大きく変わる巨大磁気抵抗 (GMR) 効果がハードディスクの高密度化と低価格化を可能にし、現象の発見後 10 年を経ずしてハードディスク産業の勢力図を大きく変化させつつあるのはその好例である。また半導体の光学機能と磁性スピンの強く結合した希薄磁性半導体の開発は、高度光通信システムに不可欠な高性能光アイソレータを初めて可能とした。これらの実用例を契機として、スピン機能を利用する新しい

タイプのメモリや既存の半導体デバイスでは実現できない機能を持つデバイスを生み出そうとする試みが盛んになってきた。工学的な意味で萌芽期に在るこの研究領域はスピントロニクスやスピンエレクトロニクスと呼ばれ、半導体デバイス技術と整合性の良い新材料・新デバイスの開発を中心として、新現象・新材料・新機能探索の基礎的な研究から具体的な応用までのスペクトルの広い研究が同時並行的に進行している。現時点では、携帯機器用の低消費電力不揮発メモリ、高感度磁界センサ、光集積回路などへの応用が有望視されている。より長期的にはDRAMを超える超高集積メモリや、スピン自由度を活用した動作原理に基づく革新的な電子・光機能デバイスの実現が期待されている。以下にこの分野の研究の背景・現状・課題について簡単に紹介する。

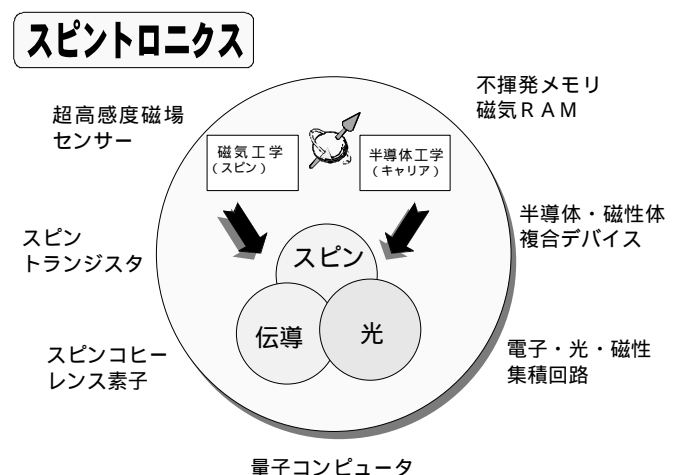


Fig.1 Concept of spintronics and possible applications.

KEY WORDS : spin, memory, functional devices

§ 2 背景

エレクトロニクスにスピンの機能を取りこもうとする試みは意外と古くから行われてきた²⁾。1950年代の(La, Ca)MnO₃などの酸化物ペロブスカイト結晶そして1960年代のEuX(X=O, S, Se)やCdCr₂Se₄などの磁性半導体が大きなブームとなったのは、その電気伝導度が磁性によって数桁も大きく変化する現象が見出されたためである。外部磁場を印加することにより電気伝導度が5桁以上も変化する巨大磁気抵抗効果も既に見出されていた³⁾。しかしこれらの物質はSiやGaAsなどのエレクトロニクスに利用されている通常の半導体とは全く異なる物質系であるため、既存の半導体エレクトロニクスとの整合性や良質な試料の作製が困難であった。また動作温度が室温以下などの問題点も抱えていた。そのため、物理学的には多くの成果を残したものの、工学的に見るべき結果を出すことなく研究は終了していった。この反省から、半導体エレクトロニクスに利用されている通常の半導体をベースとしてスピン機能を取りこもうとする試みが70年代半ばに始まり、希薄磁性半導体⁴⁾と呼ばれる物質群が生み出された。Cd_{1-x}Mn_xTeに代表される希薄磁性半導体はII-VI族半導体の陽イオンの一部を磁性イオンで置換したものであり、母体半導体と共通する結晶構造やバンド構造などの基本物性を保持した上で、そのキャリアの挙動に磁性スピンの影響を与える点が最大の特徴である。通常の半導体と共通した結晶構造を持つため、半導体基板上へのヘテロエピ成長や量子井戸構造の作製が可能となり、半導体エレクトロニクスのバンドギャップエンジニアリングの手法を用いた材料設計が可能となった。すでにそのキャリアとスピンとの間の相互作用がもたらす巨大な磁気光学効果は超高速光通信のキーデバイスである光アイソレータ⁵⁾として実用化されており、その特異な物性の有用性が実証されつつある。

このような半導体をベースとするスピン機能の研究の流れに並行して、磁性体の代表である強磁性金属系のスピン依存伝導の研究においても近年目覚ましい進展が見られた。80年代後半にFeなどの強磁性金属とCrなどの非磁性金属とをナノスケールオーダーで積層した強磁性金属人工格子において、その電気伝導度が磁場で倍も変化する現象(巨大磁気抵抗効果, GMR効果)が見出された⁶⁻⁸⁾。GMR効果自体は前述のように更に大きな効果が既に40年以前も前に見出されていたものの、この現象が良質な薄膜成長が容易、室温以上で使用可能、かつ弱い磁場で動作可能という特長を有する強磁性金属材料系で見出されたことの工学的な意義には決定的なものがあつた。強磁

性金属人工格子の成功はナノスケール微細構造作製技術の直接的な成果といえる。室温において、磁場センサーの性能として重要な磁場感度が1[Oe]あたり2%程度の抵抗変化という非常に高い値が実現されている。このGMR磁場センサーの超高感度特性は磁気記録密度の向上による磁気記録単位の微小化にともなう磁気情報読み出しの困難を打ち破るブレークスルーとなり、近年の急激なハードディスクの大容量化と低価格化を支えるキーテクノロジーとなっている。強磁性金属人工格子におけるGMR効果の発見と実用化は、スピン依存伝導現象全般への強い関心を生み出し、近年のスピンエレクトロニクス研究の大きな盛り上がりの契機となった。

以上のような工学的な成功例を得て、スピン機能を用いたデバイスの研究が盛んに行われるようになった。希薄磁性半導体では良質な量子井戸構造を利用して光で直接磁性スピンの挙動を制御^{9,10)}するなどの、将来の光機能デバイスにつながる技術が出始めている。最近GaAsなどのIII-V族半導体をベースとする希薄磁性半導体^{11,12)}の合成も可能になってきており、今後光デバイスや高速電子デバイスにつながる可能性が期待されている。GaAsなどの非磁性半導体においてさえ、ナノ構造化の手法を用いることにより、従来顕わには観測されなかったキャリアのスピンの効果が見え出しており、超高速光変調器などへの応用¹³⁾が検討されている。強磁性金属系の物質においては強磁性金属で絶縁体超薄膜を挟んだトンネル素子構造が開発され、スピン依存トンネル効果による更に大きな磁気抵抗(TMR)効果が見出されている^{14,15)}。このTMR効果は次に述べる不揮発性磁気メモリへの応用が最も期待されている。また従来別々に進展してきた半導体系と金属系のスピン機能の研究が一体化してスピンの機能を有する新しい論理デバイスへと発展していく可能性も検討されている¹⁶⁾。このようにスピン機能を用いる多様な新材料や新機能デバイスの研究が行われているが、それぞれについて詳しく述べることは本稿の範囲を超える。以下にはその代表的なものに限ってもう少し詳しく述べる。

§ 3 磁気RAMメモリ

磁気RAM(MRAM)メモリ¹⁷⁻¹⁹⁾はスピンエレクトロニクスの中で最も実用化に近いと考えられているデバイスである。Fig.2にその主要部の動作原理を模式的に示す。強磁性金属からなる2枚の電極で薄い絶縁膜を挟みトンネル素子とする。磁気特性を調整することにより下部の強磁性電極の磁化を一方に固定する。一方上部電極に用いられる強磁性電極の磁化は外部からの書き込み用磁場によ

磁気RAM (MRAM)

不揮発、高速動作、超高密度、低消費電力、耐環境

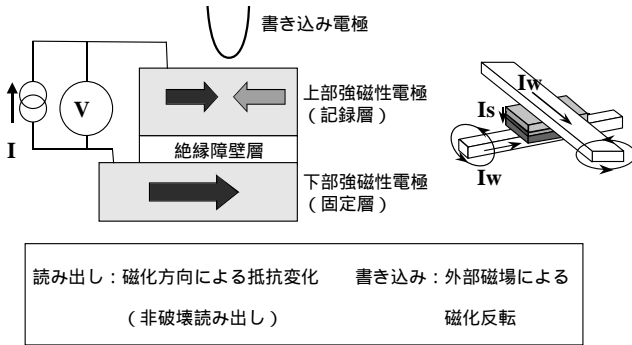


Fig.2 Magnetic random access memory (MRAM). An information bit is written in a upper magnetic layers as one of two possible directions of the magnetization by using external magnetic field. Read out of the information uses a tunnel magneto-resistance (TMR) effect between the storage layer and a lower magnetic layer with fixed direction of the magnetization which is separated by an insulating barrier. The resistance change between the parallel and anti-parallel magnetization directions can be more than 40%

り、右または左のどちらかの向きを取ることができるように設計する。強磁性電極間のトンネル抵抗の値は、両電極の磁化の相対的な向きに依存し、平行であるときに低く、反平行であるときに高いことが知られている⁶⁻⁸⁾。その変化分(TMR比)は室温で40%程度の大きな値も報告されている²⁰⁾。よって上部電極の磁化の方向を1および0に対応させ、その値を電気抵抗から非破壊的に読み出すことができる。上部電極の磁化の方向は、ヒステリシス効果のために外部磁界を切っても保持されるため、不揮発性メモリとして機能する。

Table1にDRAM等の種々のメモリ素子との比較を示す。MRAMは磁性体の最大の特長である不揮発性を有している。データ保持時間はHDDなどと同じくほとんど無限大である。待機のための消費電力が不要のため携帯用機器のメモリとしても有望と考えられている。磁化の反転に要する時間は数ns以下なので、原理的には非常な高速動作が期待できる。金属中の高い電子密度によりメモリセルの極限的な微小化も可能で、原理的にはDRAMを超える集積度も可能と考えられる。ソフトエラーにも強く、強誘電体メモリに見られる疲労効果が無いこともメリットとしてあげられる。このような多くの魅力を秘めたメモリであるが、実際に素子として実用化するために解決すべき課題も多い。消費電力量に関係する書き込み用磁場強度の低減、信号レベルを向上するためのTMR比の更なる向上、絶縁体バリア層の高品質化によるトンネル抵抗値の低減化、最適なセル構成方式の開発、半導体素子

との混成プロセスの開発などである。

§ 4 半導体・磁性体複合デバイス

最近の発達した薄膜成長技術により、種々の高品質磁性薄膜を半導体基板上にエピタキシャル成長することが可能になってきた。これにより磁性体でなければ実現できない機能を、半導体集積回路に一体的に集積化することが可能となろう。その一例に磁気光学デバイスと半導体光回路の集積化がある。高度な光システムではレーザーや光アンプの個数以上に多くの磁気光学デバイスが使用されている。価格も高く半導体光回路との一体集積化も困難である磁気光学デバイスは、将来の光システムの発展の制限要素ともなりかねない。そのため、最近半導体基板上へのエピタキシャルが可能で、磁性イオンを多量に含むため大きな磁気光学効果を示す希薄磁性半導体といわれる物質群が注目され、すでにGaAs基板上への希薄磁性半導体光導波路の実証²¹⁾が行われている。将来的には導波路の強い光閉じ込め効果と非線形磁気光学効果の組み合わせによる高速偏光制御デバイスへの応用も期待される。またInAs中の2次元電子ガスの高移動度と磁性体からの漏洩磁場の組み合わせ²²⁾による高感度磁場センサーなども検討されている。

Table 1 Comparison of MRAM expected features with other memories.

MRAM - 競合メモリとの比較 -

	MRAM	DRAM	FLASH	FRAM
不揮発性		×		
アクセス時間	300ns(現状) 2ns(2002)	40 ~ 60ns	1ms	100ns
書き込み/消去回数	>10 ¹⁵	>10 ¹⁵	10 ⁶	10 ¹³
セルサイズ	L _{min} ~ 0.2μm	L ~ μm	L ~ μm	L _{min} ~ 1μm
消費電力	<10mW	100-300mW	10-100mW	>10mW
ソフトエラー耐性		×		

(DARPA資料をもとに作成)

§ 5 キャリアとスピンの強い結合を用いる新機能デバイス

急速に発展している新技術分野であるスピントロニクスの研究では、実用デバイスの具体化とともに、新材料や新機能の開拓の重要性も見逃すことは出来ない。このことはGMR効果が物性的な興味的基础研究の中で見出さ

れてからわずか十年で、ハードディスク産業の勢力図を一変させたことから明らかである。そのため、従来の電子デバイスの概念を超える革新的なデバイス動作原理を実現しようとする研究が盛んに行われている。2次元電子ガスのスピン状態を利用して電流変調を行うスピンFET²³⁾、非磁性金属を強磁性金属で挟む構造を利用した三端子デバイスであるスピントランジスタ²⁴⁾、スピンに依存するクーロンブロック素子²⁵⁾、半導体中のスピン偏極キャリアを利用するスピニコヒーレントデバイス^{9,10,13)}、そして更にはスピンを用いる量子コンピュータの提案^{26,27)}などのさまざまな検討が行われている。いずれも低温での実験が多いなど基礎的な研究レベルにあるが、2次元電子ガスのスピンの挙動をゲート電圧で制御した報告²⁸⁾などに見られるように、従来は提案レベルであったものが最近の高度な薄膜成長技術や微細加工技術を利用することによって次々と実現されており、今後の発展が期待される。実際の素子構造の作製や、動作温度の向上などを解決する必要がある。

スピンとキャリアの相互作用を利用するためには、強い相互作用を有する新材料を開発していくことも重要である。磁性イオンを含む半導体の電子状態に関する理論計算から強磁性半導体や非常に強いスピン・キャリア相互作用の存在が予言され注目されている。実験的にもMBEの非熱平衡的な成長条件により従来のII-VI族に限らずIII-V族をベースとする希薄磁性半導体^{11,12)}が見出されるなど最近の進歩は速い。室温で動作する新材料の実現が望まれる。

§ 6 国内外の研究動向

スピントロニクスへの関心は近年世界的に高まっており、スピントネル磁気抵抗効果、MRAM素子、半導体・強磁性体ハイブリッド、希薄磁性半導体、スピントランジスタなどを対象とした多くのプロジェクトが開始されている。ヨーロッパではECファンドやドイツ国家プロジェクトのもとでシーメンス、フィリップスなどがMRAM素子、Si・強磁性体複合構造によるスピン偏極トランジスタ、ホットエレクトロン能動磁気センサによる自動車用センサ、磁気光学的にプログラム可能なゲートアレーなどの開発が行われている。この分野で世界のトップを走る米国ではDARPAプロジェクトの下でIBM, Motorola, HoneywellなどがMRAM素子の試作を行っている。また次世代のスピン依存電子・光子の研究も企業・大学・国立研の厚い研究者層によって活発に進められており、Naval Research Laboratoryからはスピントランジスタという野心的な概念も発表されている。日本では、「微小領

域の磁性と伝導」および「スピン制御半導体」の2件の科研費特定領域研究が組織され基礎的な面では高度な成果を出してきた。しかしデバイス化の観点からの研究は、東芝などによるMRAMの試作¹⁸⁾なども始まっているものの、欧米に比べ組織的な研究体制が弱い。

§ 7 おわりに

スピントロニクスの研究分野は、現在次々と新しい材料系やデバイス構造の提案を生みつつけているダイナミックな研究分野である。当面の具体的なターゲットとしては不揮発性メモリであるMRAMや高感度磁界センサ、半導体光子と磁気光学素子の一体化などがあげられる。しかしそれに止まらず、スピン・キャリア相互作用という新しい概念を導入するスピントロニクス技術は、その豊富な物理現象と半導体と磁性の持つ相補的な性質故に、半導体デバイス技術と磁性体デバイス技術の融合によって半導体や磁性体だけでは不可能な今までにない新しい応用分野を切り開いていく可能性を秘めている(Fig.3)。現在用いられている既存デバイスの微細化と高集積化という単純な手法の限界をこえる、21世紀の電子産業を支える革新的な電子デバイスの実現を可能にしていくものとして今後の進展が大いに期待される。

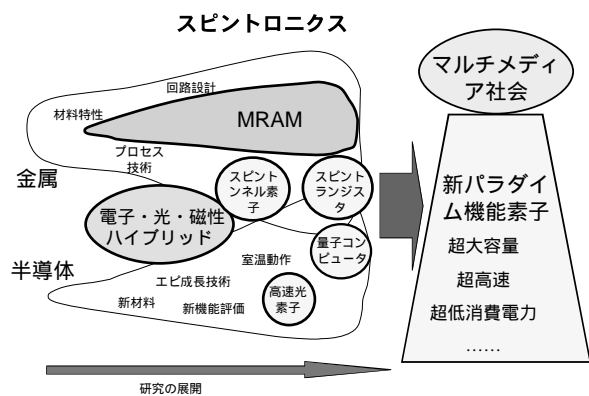


Fig.3 Expected spintronics devices.

参考文献

- 1) 一般向けの解説記事としては例えば R. Matthews : New Scientist 28-Feb-1998, 24-28.
- 2) S. Methefessel : IBM J. Res. Develop. May 1970, 207-213.
- 3) S. von Molnar and S. Methefessel : J. Appl. Phys. 38 (1967) 959.

- 4) J.K.Furdyna: J.Appl.Phys., 64 (1988) R29.
- 5) K.Onodera, T.Masumoto, M.Kimura: Electron.Lett., 30 (1994) 1954.
- 6) M.N.Baibich, J.M.Broto, A.Fert, F. Nguyen Van Dau, F.Petroff, P.Etienne, G.Creuzet, A.Friederich, and J.Chazelas : Phys.Rev.Lett. 62 (1988) 2472.
- 7) P.Grunberg, R.Schreiber, Y.Pang, M.B.Brodsky, and H.Sowers : Phys.Rev.Lett. 57 (1986) 2442.
- 8) G.Binash, P.Grunberg, F.Saurenbach, and W.Zinn: Phys.Rev. B 39 (1989) 4828.
- 9) S.A.Crooker, J.J.Baumberg, F.Flack, N.Samarth, and D.D.Awschalom : Phys. Rev. Lett. 77 (1996) 2814.
- 10) R.Akimoto, K.Ando, F.Sasaki, S.Kobayashi, and T.Tani : Phys.Rev. B 57 (1998) 7208.
- 11) H.Munekata, H.Ohno, S.von Molnar, Armin Segmuller, L.L.Chang, and L.Esaki : Phys.Rev.Lett. 63 (1989) 1849.
- 12) H.Ohno, A.Shen, F.Matsukura, A.Oiwa, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye : Appl.Phys.Lett. 69 (1996) 363.
- 13) A.Takeuchi, O.Wada, and Y.Nishikawa : Appl.Phys.Lett. 70 (1997) 1131.
- 14) T.Miyazaki and N.Teizuka: J.Magn.Magn.Mater. 139 (1995) L231.
- 15) J.S.Moodera, L.R.Kinder, T.M.Wong and R. Moservey : Phys.Rev.Lett. 74 (1995) 3273.
- 16) G.Prinz : Science 250 (1990) 1092.
- 17) J.M.Daughton : J.Appl.Phys. 81 (1997) 3758.
- 18) 斎藤好昭, 猪俣浩一郎 : 第22回日本応用磁気学会 学術講演会概要集 57 (1998).
- 19) S.Tehrani, J.M.Slaughter, E.Chen, M.Durlam, J.Shi, and M.DeHerrera : to be appeared in Proc. of Intermag 99 (1999).
- 20) S.S.P.Parkin et al. : presented at the 43rd. Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Florida, Miami (1998).
- 21) W.Zaets, K.Watanabe, and K.Ando : Appl.Phys.Lett. 70 (1997) 2508.
- 22) M.Johnson, B.R.Bennett, M.J.Yang, M.M.Miller, and B.V.Shanabrook : Appl.Phys. Lett. 71 (1997) 974.
- 23) S.Datta and B.Das : Appl.Phys.Lett. 56 (1990) 665.
- 24) M.Johnson : Science 260 (1993) 320.
- 25) K.Ono, H.Shimada, S.Kobayashi, and Y.Ootuka: Jpn.J.Appl.Phys. 35 (1996) 2369.
- 26) D.DiVincenzo : CB-10, Abstracts of the 43rd. Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Florida, Miami (1998).
- 27) F.Yamaguchi and Y.Yamamoto : Appl.Phys. A, to be published.
- 28) J.Nitta, T.Akazaki, H.Takayanagi, and T.Enoki, Phys.Rev.Lett. 78 (1997) 133
(1999. 3. 5受付)

