総 説

スピントロニクス形成と発展

宮崎 照宣^{☆1,2}, 大兼 幹彦^{☆2}, 桜庭 裕弥^{☆2,3}, 渡邊 大輔^{☆2}, Resul Yilgin^{☆2},
佐久間昭正^{☆2}, 安藤 康夫^{☆2}, 久保田 均^{☆4}

^{☆1} 東北大学原子分子材料科学高等研究機構 (WPI), 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-04, ハッチェリースクエア.

^{☆2} 東北大学大学院工学研究科, 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05.

^{☆3} 東北大学金属材料研究所, 〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1.

^{☆4} 産業技術総合研究所, 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1.

Formation and Developments of Spintronics Research Field

Terunobu Miyazaki^{☆1,2}, Mikihiro Oogane^{☆2}, Yuuya Sakuraba^{☆2,3}, Daisuke Watanabe^{☆2}, Resul Yilgin^{☆1},
Akimasa Sakuma^{☆2}, Yasuo Ando^{☆2} and Hitoshi Kubota^{☆4}

^{☆1} WPI Advanced Institute for Materials Research Tohoku University, Hatchery Square,
6-6-04 Aramaki Aza-Aoba Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan.

^{☆2} School of Engineering, Tohoku University, 6-6-05 Aoba Aramaki Aza, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan.

^{☆3} Institute for Materials Research, Tohoku University, 2-1-1 Katahira Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan.

^{☆4} Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan.

Received September 18, 2007

SYNOPSIS

History about the research of magnetoresistance effect was reviewed. Also, we looked back on the research trends in the past when both giant magnetoresistance of Fe/Cr multi layered films and large tunnel magnetoresistance at room temperature were found.

Special emphasis was placed on the recent developments of huge TMR ratio for both MgO barrier tunnel junctions and Heusler alloy electrode tunnel junctions which contribute further to the development of spinelectronic research fields. Principle and importance of spin-transfer torque were also explained.

KEY WORDS

Spintronics, giant magnetoresistance effect, tunnel magnetoresistance, MgO barrier, Heusler alloys, spin-polarization, spin-transfer torque

1 緒 言

金属人工格子の巨大磁気抵抗効果^{1,2)}ならびに強磁性トンネル接合における室温での巨大トンネル磁気抵抗効果^{3,4)}の発見がトリガとなり、「スピントロニクス」と称する研究分野が過去20年間の間に形成され、着実に発展してきた⁵⁾。ここでは磁気抵抗効果研究の歴史について先ず説明する。ついで上記の二つの大きな発見の当時の研究の様子を振り返る。最後に特に最近の研究発展に大きく貢献した成果のいくつかについて記述したい。

2 磁気抵抗効果研究の歴史⁵⁾

電磁気学を習うと磁気抵抗(magnetic resistance)という言葉が出てくる。これはFig.1に示すように電気回路に対応して、磁気回路を考え、起磁力(nI , I は磁気回路を取り巻くコイルの

電流, n はコイルの巻き数)を磁束 Φ (回路の断面積 S と磁束密度 B の積)で割った値である。この場合の磁気抵抗は磁路の長さに比例し、回路を構成する磁性体の透磁率 μ とその断面積 S の積に反比例する。

これに対して、外部から磁界を印加すると物質の電気抵抗が変化する現象を総称して磁気抵抗効果(magnetoresistance effect)と呼んでいる。磁気抵抗効果に関する研究は非常に古く、電磁気学におけるMaxwell方程式が完成した数年後の1857年(William Thomson, Proc. Roy. Soc., 8(1857)546.)までさかのぼる。この論文はFeとNiの今で言う異方性磁気抵抗効果の研究である。その後1960年頃までに3d遷移金属・合金の異方性磁気抵抗効果(anisotropic magnetoresistance effect: 略してAMR効果)の研究が⁶⁾、1960年から1970年にかけてはAMR効果を解釈するためのtwo current modelに立脚した議論⁷⁾

Fig.1 Electric resistance and magnetic resistance.

および磁性半導体の巨大磁気抵抗効果⁸⁾の研究が行われた。金属人工格子の巨大磁気抵抗効果 (Giant magnetoresistance effect: 略してGMR効果, 以降GMR) という言葉が一般に知られるようになったが, それよりも約20年程前にGMRは用いられていた。

3 金属人工格子のGMR効果ならびに巨大TMR効果

大きな研究成果は何もないところにぱっと生まれるはずがなく, 関連したいくつかの研究の中から生まれるのが一般的である。GMR効果も巨大TMR効果もまさにそのようにして生まれたものである。ここではそれぞれが報告された当時の関連研究について述べる。

3.1 GMR効果報告の項

1985年頃, 当時の磁性薄膜研究は金属人工格子, 多層膜を対象に, 基礎的な観点からは界面における磁気モーメントの増大, 層間相互作用, 界面磁気異方性 (垂直磁気異方性の原因), 磁気光学効果の増大, 応用的な観点からは新しい磁気-光学材料, ソフトな磁性材料の開発を目指したものであった。人工格子という言葉は多くの研究者に魅力を与え, 新しい機能の創製が期待された。特にNi/Cu人工格子でNiの磁気モーメントが大幅に増大すると言う報告は多くの磁性薄膜研究者を人工格子の研究に駆り立てた。しかしながらこの報告はその後誤りであることが分かり, 一部では「人工格子の研究では新しいものが生まれないのでは」とささやかれ始めていた。このような状況の中で1988年にドイツのGrünbergのグループとフランスのFertのグループから金属人工格子(Fe/Cr)の巨大磁気抵抗効果の報告がなされた。前者は薄い非磁性物質を強磁性薄膜で挟んだ強磁性二層構造の層間相互作用の研究から, 磁気抵抗効果の増大を発見した。層間には反強磁性的相互作用が働くが, 相互作用とGMR効果とは直接関係ないことが後で分かった。一方後者のFertは昔から磁気抵抗効果の研究を行ってきた人物でありFe/Cr多層膜研究に至ったのは学生時代のFe-Crの磁気抵抗効果の研究が発端となっているということである。いずれにしてもこのグループの報告がその後の磁性薄膜研究の流れを作ることになる。研究の歴史を

Fig.2 Magnetoresistance curve (a) and magnetic hysteresis loop (b) for Fe/Al₂O₃/Fe tunnel junction.

更に詳しく知りたい方は文献⁹⁻¹¹⁾を参照していただきたい。

3.2 TMR効果報告の項

筆者は1990年に4年生の卒業研修のテーマとして取り上げ, トンネル磁気抵抗 (TMR) 効果の研究をスタートした。TMR効果の先駆的研究はJulliereであり1975年に既に報告され, その後数グループの研究者が実験していたが, 室温ではほとんどその効果が観察されなかった。我々が研究を始める前の15年間の報告についてはすでにまとめて報告しているのでそれを参照していただきたい¹²⁾。その後筆者ら³⁾およびMIT⁴⁾のグループから室温でも10%以上のTMR比が報告されたことにより, 次第にこの分野の研究が注目されることとなる。特にスピンバルブタイプのトンネル接合が報告されるとGMRの研究の進展と同様に応用を意図した研究が次第に多くなり, なかでも超高密度ハードディスクドライブ(HDD)および固体磁気メモリ(MRAM)を念頭に置いた研究が増えていった^{13,14)}。この辺の研究の進展についても既に解説しているのでそれを参照していただきたい¹⁵⁾。Fig.2には筆者らのFe/Al-O/Fe接合のM-R曲線とそれに対応した磁化曲線を示す。両者を対応して見ると両Fe層の磁化が平行のとき抵抗が小さく, 反平行のとき抵抗が大きいことが分かる。即ち, 磁化の向きにより電流をコントロールしていることになる。Fig.3にはこの現象論的説明として良く用いられるJulliereのモデルを示してある。このモデルによるとTMR比は,

$$\frac{2P_1P_2}{1-P_1P_2} \quad (P_{1(2)} \text{は強磁性1(2)層の分極率を示す})$$

で与えられ, 実験結果を比較的良く説明している。

Fig.3 Density of states of upward spin (↑) electrons and downward spin (↓) electrons in (a) parallel state and (b) anti-parallel state of the magnetization of the magnetic layer. Each of a_1 or a_3 is existence probability of electrons in the Fermi level.

4 スピントロニクスの形成

金属人工格子の巨大磁気抵抗効果の発見および室温でのトンネル磁気抵抗効果の発見がトリガとなり、磁性研究分野において従来型の磁性体プロパの研究ではなく、磁性研究に伝導の寄与を積極的に取り入れた研究がクローズアップされた。一方、半導体の研究分野でも既存の半導体デバイスの限界を打破すべく、磁性半導体の研究に見られるように、スピンの重要性が認識され、この分野で得意としてきた微細加工技術を生かした、新しいデバイスの研究が注目された。

スピントロニクス (Spin electronics, also called spintronics, magnetoelectronics or magnetronics) とは電子の持つスピンと電荷の双方に着目し、最新の加工技術を用いて微細化することにより、機能を最大限に引き出し、新しいデバイスを創製しようとするものである。概念図を Fig.4 に示す。この分野の研究はここ 20 年程度の歴史と考えて良い。WTEC (World Technology Evaluation Center) は NSF を援助を受け、この分野の研究のレビューと米国、日本、西欧に於ける研究活動の調査報告¹⁶⁾を 2000 年代になって行っている。我が国では 21 の研究グループがこれについてインタビューを受けている。この報告書によるとスピントロニクスはやや広くとらえられ以下のように記述されている。

It covers materials, fabrication and characterization of magnetic structures, magnetism and spin control in magnetic nanostructures, magneto-optical properties of semiconductorors, and magnetoelectronics and devices.

ややもすると金属系のスピントロニクス、半導体系のスピントロニクスと区別されがちであるが、目的とするところは同じで、時間スケールが若干異なるだけである。

5 スピントロニクスの進展

GMR 効果の報告、室温での巨大 TMR 効果の発見により高密度 HDD 用磁気ヘッド並びに MRAM をはじめとする種々の

Fig.4 Concept chart of spintronics.

電子機器への応用が期待され、関連の分野の研究を活性化させた。しかしながら、出力電圧を見た場合、TMR (GMR) 変化率の向上は飽和状態にあり、スピントロニクス分野の更なる発展には TMR 素子のブレイクスルーが望まれていた。

5.1 MgO 障壁巨大トンネル磁気抵抗効果の発見

Al-O はアモルファスであるため、いわゆるインコヒーレントトンネル伝導のため TMR 効果の更なる向上は期待できなかった。これに対してトンネル障壁として MgO を用いた Fe (001)/MgO(001)/Fe(001) 構造の巨大トンネル接合 (MTJ) では理論計算の結果^{17,18)}1000% 以上の高い TMR 効果が期待されることが報告された。このような中で MgO をトンネル障壁とするトンネル接合の作製が試みられたが、なかなかうまくいかず、室温での TMR 比の値は Al-O のそれを大きく上回ることにはなかった。

2004 年に湯浅らは分子線エピタキシー (MBE) 法を用いてエピタキシャル Fe(001)/MgO(001)/Fe(001) MTJ 素子を作製し、初めてアモルファス Al-O 障壁を越える室温 TMR を実現した^{19,20)}。当時の TMR の値は室温で 180%、20 K で 245% であった。一方、Parkin らは²¹⁾ (001) 結晶面が優先配向した多結晶 CoFe/MgO/CoFe MTJ 素子をスパッタ法で作製し、室温で 220% の TMR 比を得た。その後多くのグループでこの MgO をトンネル障壁とする MTJ 素子が研究され、TMR 比の値は室温で 500%、5 K では 1000% 以上の値が報告²²⁾されるとともに、HDD 用の磁気ヘッドならびに大容量 MRAM の開発が進められている。

5.2 ホイスラー電極巨大トンネル磁気抵抗効果

ホイスラー合金とは 1905 年 Heusler により発見された合金で、非磁性元素のみからなる Cu_2MnAl 合金が強磁性を示すことから興味をもたれた。この合金は X_2YZ (フルホイスラー) および XYZ (ハーフホイスラー) 組成を中心とする合金で、最初は磁性元素を含まなかったが $\text{X} = \text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni}$ に代表されるように、後に磁性元素を含む多くのホイスラー合金も報告され

ている。

その後ホイスラー合金は磁性材料として話題にほとんどのばらなかった。3節で記述したようにTMR比は電極物質のスピンの分極率に依存し、しかも分極率1(完全にスピン偏極)ではTMR比は無限大となる。このような物質はハーフメタルと呼ばれ、フェルミエネルギー近傍において片方のスピンバンドにのみエネルギーギャップを有する強磁性材料である。多くのホイスラー合金がハーフメタル的なバンド構造を有することから、室温巨大TMR効果の報告以降、MTJの電極材料としてホイスラー合金が注目されることとなった。しかしながら、MgO障壁MTJの巨大TMR効果の報告以前は良質な試料が得られなかったためあまり注目されなかったが、最近の素子作製技術の進歩により、界面の原子配列が制御されることに伴って、比較的大きなTMR比のホイスラー合金電極MTJが報告されるようになった²³⁻²⁶⁾。Fig.5に一例としてCo₂MnSi/Al-O/Co₂MnSi MTJのTMR比の温度依存性を示す。M-R曲線は挿入図に示す。CoFe電極を(片側および両面)用いた場合の結果も併せて示してある。Julliereの式から見積もったスピンの分極率は89%(下部)、83%(上部)であった。界面状態を制御することにより、分極率がほぼ1のMTJも得られている。

実際にハーフメタルになっているかどうか、およびFig.5の急激なTMR比の温度依存性を明らかにするため、上述の場合の dI/dV - V 特性を測定した結果をFig.6に示す。図からダウンスピンバンドのエネルギーギャップは350-400 meVと見積もられ、バンド計算の400-600 meVに近い値である。また、フェルミ面からダウンスピンバンドの伝導帯までのエネルギー(図(b)の δ_{CB})は10-20 meVと非常に小さく、これがTMR比の急激な温度変化の原因と考えられる。

5.3 スピントランスファートルク^{27,28)}

3.2節で説明したようにトンネル磁気抵抗効果(GMR効果についても同じである)は磁化の向きにより電流をコントロー

ルしている。逆に、電流により磁化の向きを変化させるのがスピントランスファートルクである。GMR効果の場合磁化の相対角度により、スピン分極した電流が変化するように、このスピントランスファートルクを起こさせるためにスピン分極した電流が必要となる。この物理の直感的イメージは、力学に於けるニュートンの第3法則「作用と反作用の法則」に「磁気抵抗効果とスピントランスファー効果(トルク)」が対応していると思えばよい(Fig.8)。

スピントランスファートルクをもう少し詳しく説明するため、強磁性(F1)/非磁性(N)/強磁性(F2)の接合を考える(Fig.9)。接合の両端に電圧を加え電流が右から左に、電子は左から右に流れる。電極の電子のスピン角運動量を S_1, S_2 とする。左の電極からF1層に入った伝導電子のスピン S は S_1 によりスピン偏極し、 S_1 の方向にそろおう。このスピン偏極したスピン S がF2層に入ると S_2 との相互作用により、 S の角運動量が変化し、この変化分が S_2 に移動し、結果として S_2 はトルクを受ける。 S_2 の受けるトルクの向きは S_2 と伝導電子のスピン S の単位ベクトルを用いて表されるが、 S の向きは S_1 により決まるため、結果的に S_1 と S_2 により表される。

興味があることは電流の向きにより、このトルクは S_2 の運動を減衰させる方向と、スピンを反転させる方向に働く。Slonczewskiの計算によると、スピンの反転の条件は

$$\alpha M_s V H_{eff} < g \frac{\hbar}{2} \frac{I}{e}$$

で与えられる。ここでの α, M_s, V, H_{eff} はF2のそれぞれ才差運動の制動の程度を表すダンピング定数、飽和磁化、体積、有効磁界を表す。 g はスピントランスファー効率係数でスピン分極率の関数である。 $\hbar/2, I, e$ はそれぞれスピン1ヶの角運動量、電流および素電荷である。

Fig.5 MR curves for epitaxial Fe(001)/MgO(001)/Fe(001) tunnel junction.

Fig.6 Temperature dependence of TMR ratio for the Co₂MnSi/Al-O/Co₂MnSi MTJ. Data for the Co₂MnSi/Al-O/Co₇₅Fe₂₅ and Co₇₅Fe₂₅/Al-O/Co₇₅Fe₂₅ MTJ's are shown for comparison. TMR curves at the corresponding temperature are shown in the inset.

Fig.7 (a) Dependence of tunnel conductance on bias voltage (dI/dV - V) for a MTJ. (b) Schematic of normalized TMR ratio on bias voltage for a MTJ with $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{Al-O}/\text{Co}_2\text{MnSi}$ structure. Inset shows the dependence of normalized TMR ratio on bias voltage. (b) Schematic of electron tunneling process at finite bias voltage for the junction for both parallel and anti-parallel configurations.

Fig.8 Relationship between TMR (GMR) effects and spin-transfer effect.

Fig.9 Schematic explanation of spin-transfer effect for Ferro(F1)/Non-magnetic/Ferro(F2) junction. Large arrow crossed from left to right shows spin current. Small arrows with sphere show the spins of conduction electrons. White arrows S_1 and S_2 are spins for F1 and F2, respectively.

この物理を用いて、磁気メモリの磁化をコントロールする研究が精力的にすすめられている。高密度(>Gbits)のメモリに於いてはセルサイズが100 nm以下と小さくなるため、従来の磁界反転方式だと大きな電流を必要とするが、このスピントランスファートルクを用いた磁化反転技術だと、逆にセルサイズの減少に伴って、小さな電流で反転が可能となるからである。当初はGMR接合について実験が報告されていたが²⁹⁻³¹⁾、最近ではTMR接合についての報告が主流となっている。スピントランスファー磁化反転を用いた磁気メモリは特にスピンRAMと呼ばれ、要求されるスピン注入電流は $5 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ で、かつ $E/k_B T > 60$ の熱的安定性が保証されることである。Table 1

Table 1 Summarized results for critical current density (J_{c0}) and thermal stability ($\Delta = E/k_B T$).

Group	Barrier	J_{c0} (MA/cm ²)	TMR (%)	RA ($\Omega\mu\text{m}^2$)	Δ	M_s (CoFeB) (emu/cc)	Ref.
Sony	Al-O	6.4	30	14	28	(NiFe)	32
AIST	MgO	12	100	3	—	1200	33
Grandis	Al-O	2.2	25	10	42	1000	34
Grandis	MgO	2	150	50	~30	800	35
AIST	MgO	10	140	4	40	1100	36
Sony	MgO	2	160	20	30	—	37
RIEC	MgO	8.6	90	5	67	(SynF)	38
Grandis	dual-MgO	1.0	70	100	(~50)	800	39
Tohoku	MgO	6.7	110	7	33	1300	40

$$\Delta = E/k_B T$$

SynF : Synthetic ferrimagnetic structure

には最近の臨界電流密度 J_{c0} (熱による効果を除いた値) とセルの熱安定性の実験結果を示した³²⁻⁴⁰⁾。両者を十分に満足した接合は今のところ報告されておらず、今後の更なる進展に期待する。

スピントランスファートルク以外にも興味ある現象が報告されつつあるが、紙面の都合により割愛する。

謝 辞

最後に、我々の研究は多くの助成を受けて行われてきたが、最近のホイスラー電極 TMR およびスピン注入磁化反転の研究は主に文部科学省の IT プログラム RR2002 および科学研究費補助金、総務省の戦略的情報通信研究開発制度の助成により行われた。

文 献

- 1) G.Binasch, P.Grünberg, F.Saurenbach and W.Zinn: "Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange", *Phys. Rev. Lett.*, **39**(1989)4828-4830.
- 2) M.N.Baibich, J.M.Broto, A.Fert, F.Nguyen Van Dau, F.Petroff, P.Eitenne, G.Greuzet, A.Friederich and J.Chazelas: "Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices", *Phys. Rev. Lett.*, **61**(1988)2472-2475.
- 3) T.Miyazaki and N.Tezuka: "Giant magnetic tunneling effect in Fe/Al₂O₃/Fe junction", *J. Magn. Magn. Mater.*, **139**(1995) L231-L234.
- 4) J.S.Moodera, L.R.Kider, T.M.Wong and R.Meservy: "Large Magnetoresistance at Room Temperature in Ferromagnetic Thin Film Tunnel Junctions", *Phys. Rev. Lett.*, **74**(1995)3273-3276.
- 5) T.Miyazaki: *Spintronics*, Nikkan Kogyo Shimbunsha, (2007) P.69.
- 6) T.R.Mcguire and R.I.Potter: "Anisotropic Magnetoresistance in Ferromagnetic 3d Alloys", *IEEE Trans. Mag.*, **4**(1975)1018-1038.
- 7) I.A.Campbell, A.Fert and O.Jaoul: "The spontaneous resistivity anisotropy in Ni-based alloys", *J. Phys. C*, **1**(1970)S95-S101.
- 8) S.Von Molnar and S.Methfessel: "Giant Negative Magnetoresistance in Ferromagnetic Eu_{1-x}Gd_xSe", *J. Appl. Phys.*, **38**(1967)959-964.
- 9) S.D.Bader: "Thin film magnetism", *Proceedings of the IEEE*, **78**(1990)909-922.
- 10) T.Shinjo: "Interface magnetism", *Surface science reports*, **12** (1991)51-98.
- 11) P.Grünberg: "Layerd Magnetic Structures: History, Highlights, Applications", *Physics Today*, (2001)31-37.
- 12) T.Miyazaki: "Spin tunneling Magnetoresistive Effect", *J. Magn. Soc. Jpn.*, **20**(1996)896-904.
- 13) M.Sato and K.Kobayashi: "Spin-Valve-Like Properties of Ferromagnetic Tunnel junctions", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36**(1997) L200-L201.
- 14) W.J.Gallagher, S.S.P.Parkin, Y.Lu, X.P.Bian, A.Marley, K.P.Roche, R.A.Altman, S.A.Rishton, C.Jahnes, T.M.Shaw and G.Xiao: "Microstructured magnetic tunnel junctions", *J. Appl. Phys.*, **81**(1997)3741-3746.
- 15) T.Miyazaki: "Review of the Development of Spin Tunnel Junctions and Future Problems", *J. Magn. Soc. Jpn.*, **25**(2001) 471-477.
- 16) WTEC Panel Report on Spin Electronics, (2003).
- 17) J.Mathon and A.Umerski: "Theory of tunneling magnetoresistance of an epitaxial Fe/MgO/Fe(001) junction", *Phys. Rev. B*, **63**(2001)220403-1-4.
- 18) W.H.Butler, H.-G.Zhang, T.C.Schulthess and J.M.Maclaren: "Spin-dependent tunneling conductance of Fe/MgO/Fe sandwiches", *Phys. Rev. B*, **63**(2001)054416-1-12.
- 19) S.Yuasa, A.Fukushima, T.Nagahama, K.Ando and Y.Suzuki: "High Tunnel Magnetoresistance at Room Temperature in Fully Epitaxial Fe/MgO/Fe Tunnel Junctions due to Coherent Spin-Polarized Tunneling", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43**(2004)L588-L590.
- 20) S.Yuasa, T.Nagahama, A.Fukushima, Y.Suzuki and K.Ando: "Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions", *Nature Materials*, **3** (2004)868-871.
- 21) S.S.P.Parkin, C.Kaiser, A.Panchula, P.M.Rice, B.Hughes, M.Samant and S.-H.Yang: "Giant tunneling magnetoresistance at room temperature with MgO (100) tunnel barriers", *Nature Materials*, **3**(2004)862-867.
- 22) S.Ikeda, J.Hayakawa, Y.M.Lee, R.Sasaki, T.Meguro, F.Matsukura and H.Ohno: "Dependence of Tunnel Magnetoresistance in MgO Based Magnetic Tunnel Junctions on Ar Pressure during MgO Sputtering", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44**(2005)L1442-L1445.
- 23) Y.Sakuraba, M.Hattori, M.Oogane, Y.Ando, A.Sakuma and T.Miyazaki: "Giant tunneling magnetoresistance in Co₂MnSi/Al-O/Co₂MnSi magnetic tunnel junctions", *Appl. Phys. Lett.*, **88**(2006)19208-1-3.
- 24) Y.Sakuraba, T.Miyakoshi, M.Oogane, Y.Ando, A.Sakuma and T.Miyazaki: "Direct observation of half-metallic energy gap in Co₂MnSi by tunneling conductance spectroscopy", *Appl. Phys. Lett.*, **89**(2006)052508-1-3.
- 25) N.Tezuka, N.Ikeda, S.Sugimoto and K.Inomata: "175% tunnel magnetoresistance at room temperature and high thermal stability using Co₂FeAl_{0.5}Si_{0.5} full-Heusler alloy electrodes", *Appl. Phys. Lett.*, **89**(2006)252508-1-3.
- 26) T.Ishikawa, T.Marukame, H.Kijima, K.I.Matsuda, T.Uemura, M.Arita and M.Yamamoto: "Spin-dependent tunneling characteristics of fully epitaxial magnetic tunneling junctions with a full-Heusler alloy Co₂MnSi thin film and a MgO tunnel

- barrier", *Appl. Phys. Lett.*, **89**(2006)192505-1-3.
- 27) J.C.Slonczewski: "Current-driven excitation of magnetic multilayers", *J. Magn. Magn. Mater.*, **159**(1996)L1-L7.
 - 28) L.Berger: "Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current", *Phys. Rev. B*, **54**(1996)9353-9358.
 - 29) M.Tsoi, A.G.M.Jansen, J.Bass, W.-C.Chiang, M.Seck, V.Tsoi and P.Wyder: "Excitation of a Magnetic Multilayer by an Electric Current", *Phys. Rev. Lett.*, **80**(1998)4281-4284.
 - 30) E.B.Mayers, D.C.Ralph, J.A.Katine, R.N.Louie and R.A.Buhrman: "Current-Induced Switching of Domains in Magnetic Multilayer Devices", *Science*, **285**(1999)867-870.
 - 31) J.A.Katine, F.J.Albert, R.A.Buhrman, E.B.Mayers and D.C.Ralph: "Current-Driven Magnetization Reversal and Spin-Wave Excitations in Co/Cu/Co Pillars", *Phys. Rev. Lett.*, **84**(2000)3149-3152.
 - 32) Y.Higo, K.Yamane, K.Ohba, H.Narisawa, K.Bessho, M.Hosomi and H.Kano: "Thermal activation effect on spin transfer switching in magnetic tunnel junctions", *Appl. Phys. Lett.*, **87**(2005)082502-1-3.
 - 33) H.Kubota, A.Fukushima, Y.Ootani, S.Yuasa, K.Ando, H.Maehara, K.Tsunekawa, D.D.Djayaprawira, N.Watanabe and Y.Suzuki: "Evaluation of Spin-Transfer Switching in CoFeB/MgO/CoFeB Magnetic Tunnel Junctions", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40**(2005)L1237-L1240.
 - 34) Y.Huai, M.Pakala, Z.Diao and Y.Ding: "Spin-transfer switching current distribution and reduction in magnetic tunneling junction-based structures", *IEEE Trans. Magn.*, **40**(2005)2621-2626.
 - 35) Z.Diao, D.Apalkov, M.Pakala and Y.Ding: "Spin transfer switching and spin polarization in magnetic tunnel junctions with MgO and AlOx barriers", *Appl. Phys. Lett.*, **87**(2005)232502-1-3.
 - 36) H.Kubota, A.Fukushima, Y.Ootani, S.Yuasa, K.Ando, H.Maehara, K.Tsunekawa, D.D.Djayaprawira, N.Watanabe and Y.Suzuki: "Dependence of spin-transfer switching current on free layer thickness in Co-Fe-B/MgO/Co-Fe-B magnetic tunnel junctions", *Appl. Phys. Lett.*, **89**(2006)132505-1-3.
 - 37) T.Yamamoto, M.Hosomi, H.Yamagishi, K.Bessho, Y.Higo, K.Yamane, H.Yamada, M.Shiji, H.Yamagishi, C.Fukumoto, H.Nagao and H.Kano: "Spin transfer magnetization switching memory", *J. Magn. Soc. J.*, **148**(2006)31-36.
 - 38) J.Hayakawa, S.Ikeda, Y.M.Lee, R.Sasaki, T.Meguro, F.Matsukura, H.Takahashi and H.Ohno: "Current-Induced Magnetization Switching in MgO Barrier Based Magnetic Tunnel junctions with CoFeB/Ru/CoFeB Synthetic Ferrimagnetic Free Layer", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45**(2006)L1057-1060.
 - 39) Z.Diao, A.Panchula, Y.Ding, M.Pakala, S.Wang, Z.Li, D.Apalkov, H.Nagai, A.Drinskii, S.Lien, C.Wanf, E.Chen and Y.Huai: "Spin transfer in dual MgO magnetic tunnel junctions", *Appl. Phys. Lett.*, **90**(2007)132508-1-3.
 - 40) D.Watanabe, et al.: unpublished.