

第213回有機エレクトロニクス材料研究会2015.11.26
「スピントロニクス材料・デバイスの最前線」

スピントロニクスと材料

佐藤勝昭

東京農工大学名誉教授

科学技術振興機構

はじめに

- JST-CREST「分子技術」領域の山下チームの「単分子量子磁石」の試みに代表されるように、最近、有機化学とスピントロニクスの距離が狭まってきたように思える。今回の研究会でも境誠司氏による「分子スピントロニクス」の講演が企画されている。
- この講演では、その前座として、スピントロニクス研究の歴史的経緯を紹介し、スピントロニクスとは何か、スピントロニクスにはどのような材料が用いられるか、それは材料のどのような性質が活かされるのかについて概説したい。

スピントロニクスとは何か

- 半導体集積回路に代表されるエレクトロニクスにおいては、電子の電荷の輸送と制御に重点を置いて研究開発が進められてきた。
- 一方、ハードディスクに代表される磁気ストレージにおいては、電子のスピン磁気モーメントのみが用いられてきた。
- 電子がもつ電荷とスピンの2つの性質によってもたらされる新しい機能を用いるエレクトロニクスの分野を「スピントロニクス」と呼ぶ。

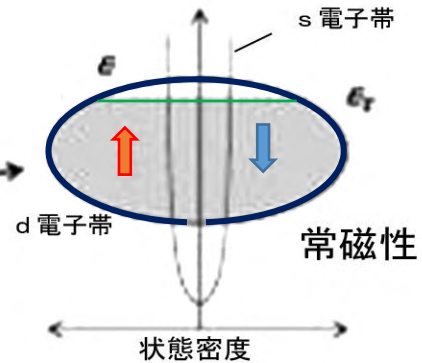
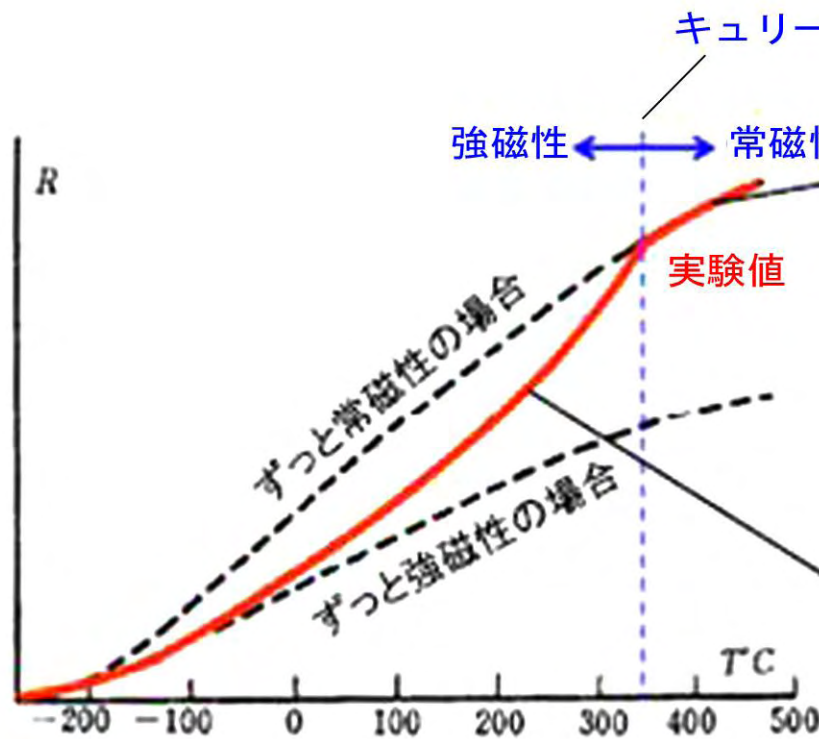
スピントロニクスと材料： CONTENTS

1. 電気輸送と磁気
2. 磁性半導体
3. スピンFET
4. GMR, TMRの登場
 - a. GMRの発見
 - b. TMRの発見
 - c. MgO-TMR
5. スピン移行トルク(STT)
6. スピン流
7. 材料からみたスピントロニクス

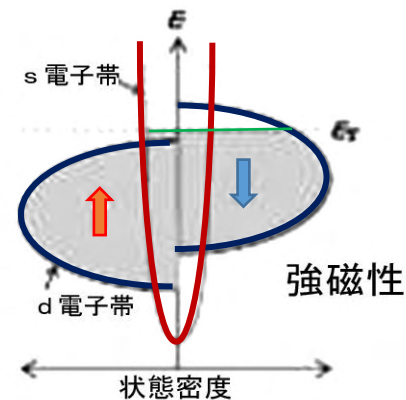
1. 電気輸送と磁気

- パーマロイなど強磁性体のAMR(異方性磁気抵抗効果)や異常ホール効果も1950年代から知られていた。
 - R.Karplus and J.M. Luttinger: Phys. Rev. 95 (1954) 1154
- Niの T_c 直下での抵抗の温度係数の増大: スピン2流体モデルとスピン散乱で説明されていた。
 - A. Fert and I.A. Campbell: Phys. Rev. Lett. 21 (1968) 1190.
- 磁性半導体 $CdCr_2Se_4$ やEuOにおいて T_c 付近ではスピンの揺らぎによる散乱が電気抵抗の増大をもたらすこと、磁界を加えると揺らぎが抑えられて電気抵抗が下がることがわかっていた。
 - C. Haas: Phys. Rev. 168, 531–538 (1968)
- しかし、そのころの認識では、これらは「作りつけ」の効果であって、人間が制御できるとは考えていなかった。

スピン依存散乱 ～Niの電気抵抗率の温度依存性～



上向きスピン電子、下向きスピン電子
ともにs状態→d状態の散乱が可能
このため強磁性状態より高抵抗



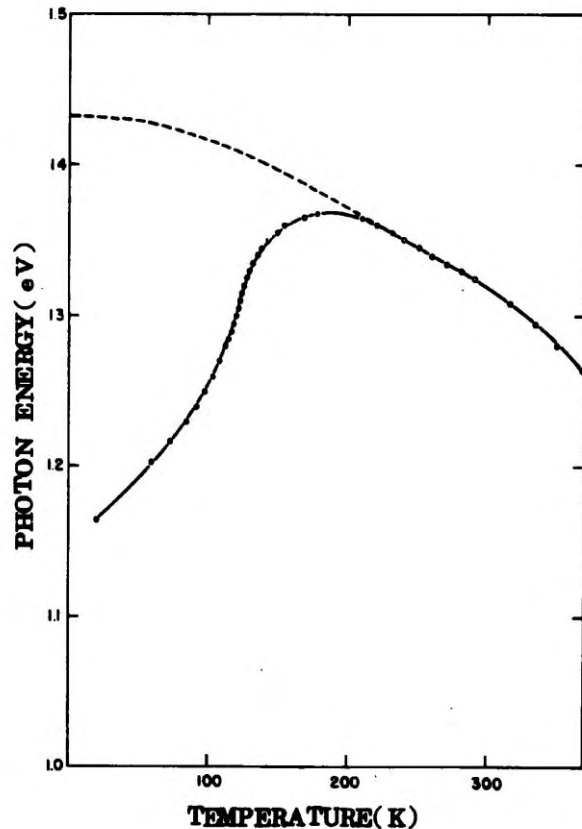
下向きスピン電子のみ
s状態→d状態への散乱
が可能なので低抵抗

2. 磁性半導体

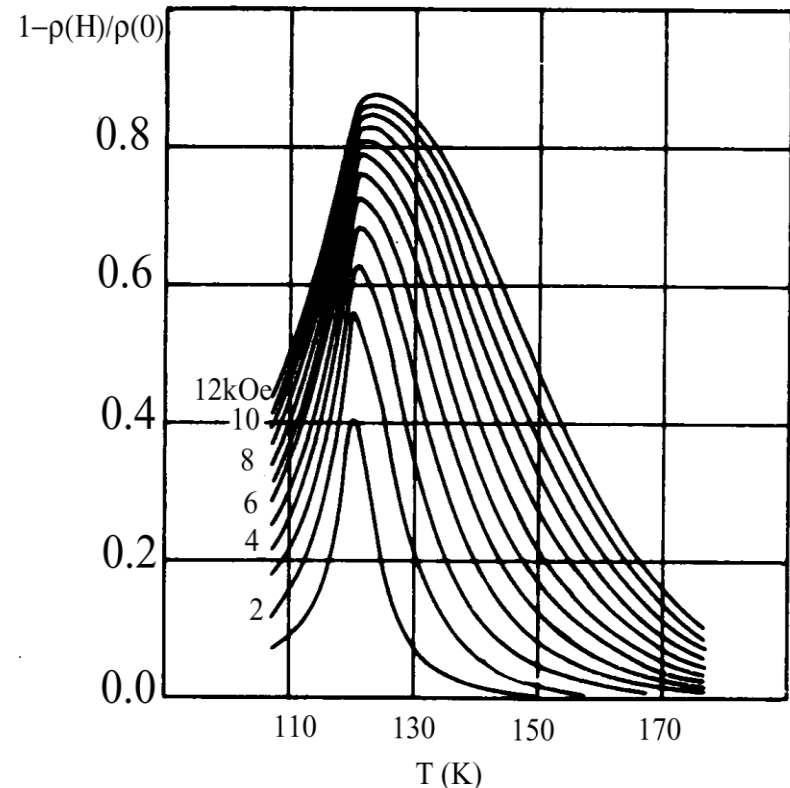
- 第1世代 カルコゲナイドスピネル(CdCr_2Se_4 etc.)、ユーロピウムカルコゲナイド(EuS etc.)
「負の磁気抵抗効果」や「光学吸収端の磁氣的赤色移行」など局在スピンの相互作用の物性。キュリー温度の低さと、試料作製の困難さから実用的なデバイスには繋がらなかった。
- 第2世代 II-VI族系希薄磁性半導体(CdMnTe etc.)
「光学吸収端付近に大きな磁気光学効果」。光アイソレータ材料として研究された。
- 第3世代 III-V族系希薄磁性半導体(GaAs:Mn etc)や酸化物希薄磁性半導体($\text{TiO}_2:\text{Co}$ etc)において、磁性の電氣的制御に成功。(キュリー温度の低さや、低温成長に起因する結晶性の悪さが実用を阻んでいる)

磁性半導体CdCr₂Se₄の物性

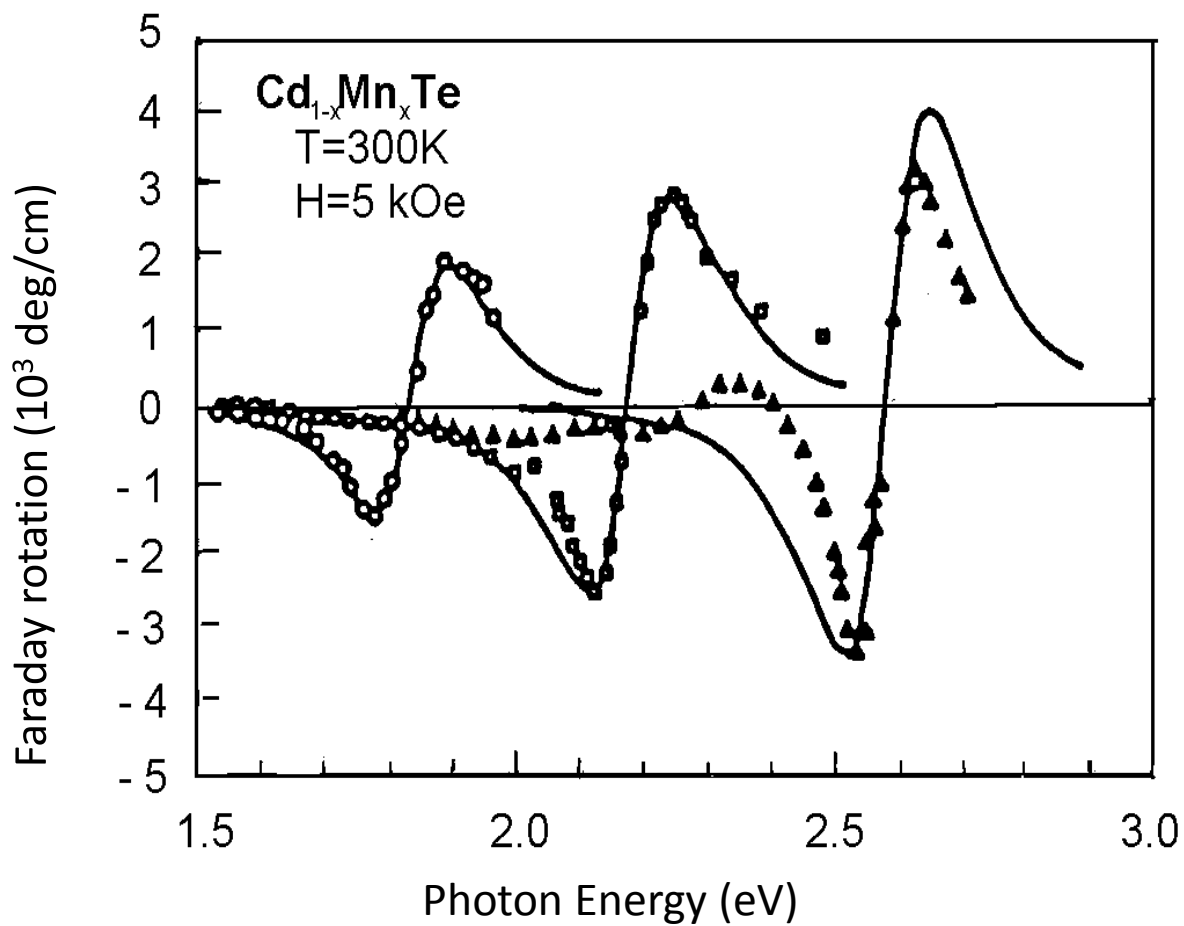
- 光学吸収端の磁気赤色移行



- キュリー温度付近での負の磁気抵抗効果



$\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ のファラデー回転スペクトル



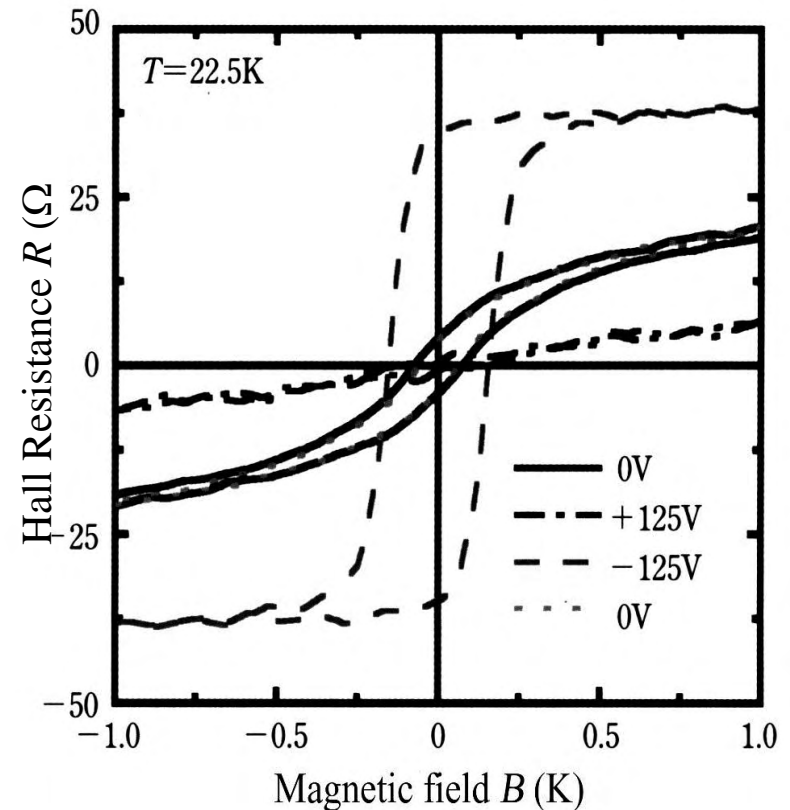
磁性半導体による磁性の電気制御

- 1991年、Munekata, Ohnoらは低温MBE成長によってInAsに大量のMnを添加することによってキャリア誘起強磁性を発現することに成功した[i]。
- Ohnoは1996年にGaAs:Mnにおいてキュリー温度(T_c)が120Kの強磁性を発見しました[iii]。 T_c は、結晶成長技術の進展によってどんどん高くなり、 δ -ドーピングによって250Kにまで高くなっている[iiii]。
- 特筆すべきは、磁性半導体をLED構造へのスピン注入電極として用い、発光の円偏光性が制御できることがOhnoグループとAwschalomのグループの共同研究によって明らかにされたり[iv]、InMnAsの磁性がキャリア誘起であるために、FET構造を作ることによって、キャリア密度を制御し、そのキュリー温度、ひいては磁化をゲート電圧で制御できたりすることである[v]。
- **ここでもコイルを使わずに電氣的に磁性を制御できることが実証されている。** 金属系と同様のトンネル接合が磁性半導体でもできている。Tanakaらは磁性半導体を用いてTMR素子を作ること成功している[vi]。そして、磁性半導体の場合、 10^5 A/cm²台の低い電流密度で磁壁を動かせることが確認されている[vii]。

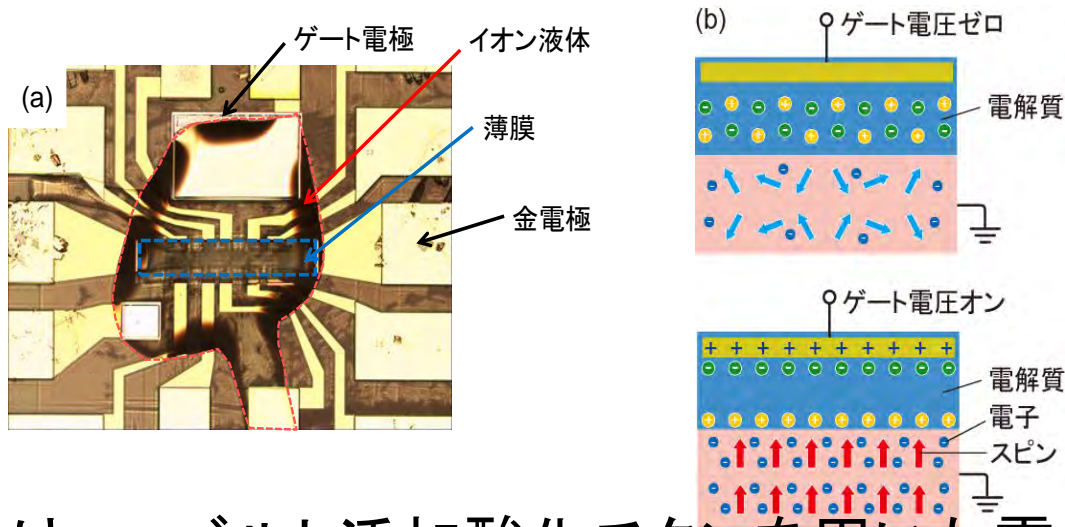
- [i] H. Munekata, H. Ohno, S. von Molnar, A. Segmüller, L.L. Chang, L. Esaki: Phys. Rev. Lett. 63 (1989) 1849.
- [iii] H. Ohno, A. Shen, F. Matsukura, A. Oiwa, A. Endo, S. Katsumoto, Y. Iye: Appl. Phys. Lett. 69 (1996) 363.
- [iiii] A. M. Nazmul, T. Amemiya, Y. Shuto, S. Sugahara, M. Tanaka: Phys. Rev. Lett. 95 (2005) 17201.
- [iv] Y. Ohno, D.K. Young, B. Beschoten, F. Matsukura, H. Ohno and D.D. Awschalom, Nature **402** (1999) 790.
- [v] H. Ohno, D. Chiba, F. Matsukura, T. Omiya, E. Abe, T. Dietl, Y. Ohno, K. Ohtani: Nature 408 (2000) 944.
- [vi] M. Tanaka and Y. Higo: Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 026602.
- [vii] 千葉大地, 北智洋, 山ノ内路彦, 松倉文礼, 大野英男: 日本応用磁気学会第145回研究会資料「スピン流駆動デバイスの最前線」(2006.1)p.7.

InMnAsの磁化を電界制御

- 希薄磁性半導体においては、キャリアが媒体となって磁性が生じています。
- 外部ゲートに電界を加えることによって、キャリア濃度を制御することができれば、キュリー温度が変えられ、電界によって磁気特性が制御できるはずです。
- OhnoらはIII-V族系磁性半導体 $\text{In}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ において、磁気特性の電界制御に成功しました。(22.5K)

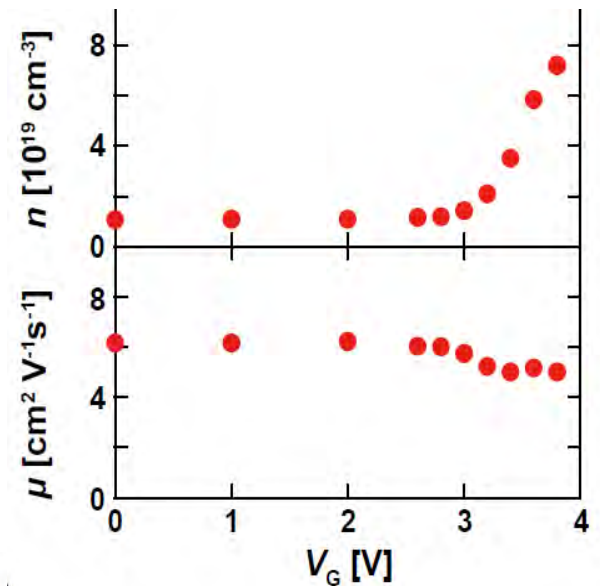
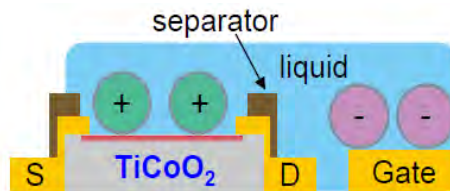
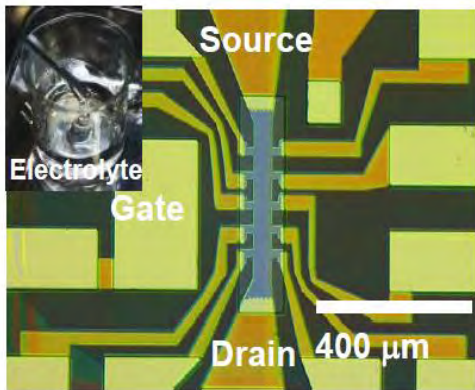


さきがけ福村研究者: 室温で電圧による磁性半導体の磁気制御に成功

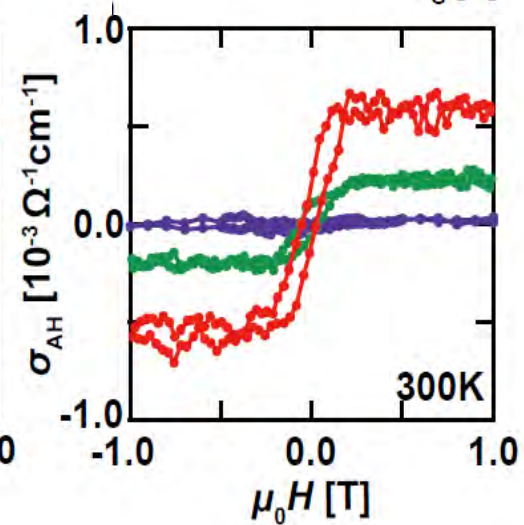
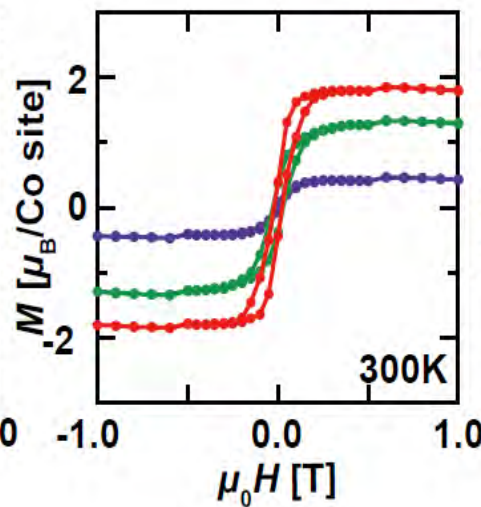
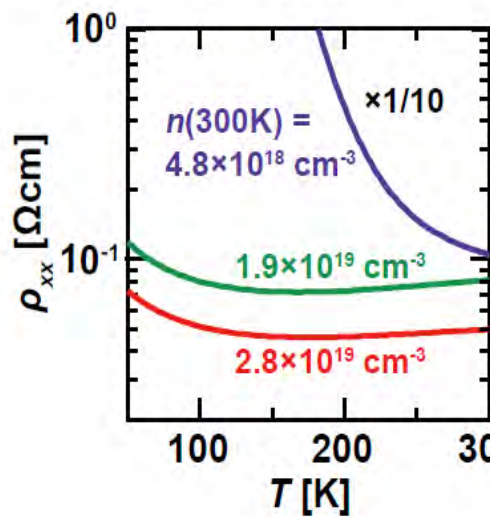


- 福村らは、コバルト添加酸化チタンを用いた電界トランジスタ構造を作製し、室温において強磁性がゲート電圧で誘起されることを見出しました。彼らはイオン液体をゲート絶縁体として用いることにより、わずかな電圧でチャンネルに強い電界を印加することに成功しました。
- Y.Yamada, K. Ueno, T. Fukumura, H.T. Yuan, H. Shimotani, Y. Iwasa, I. Gu, S. Tsukimoto, Y. Ikuhara, M. Kawasaki: Science 332, 1065 (2011).

ゲート電圧によるTiO₂:Co の磁性制御

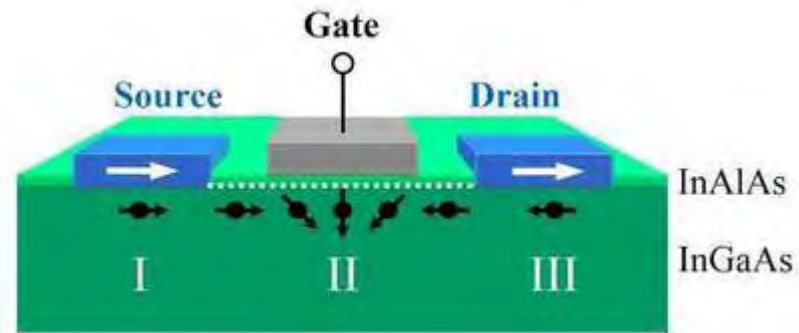


Ti_{0.90}Co_{0.10}O_{2-δ} PM insulator → FM metal

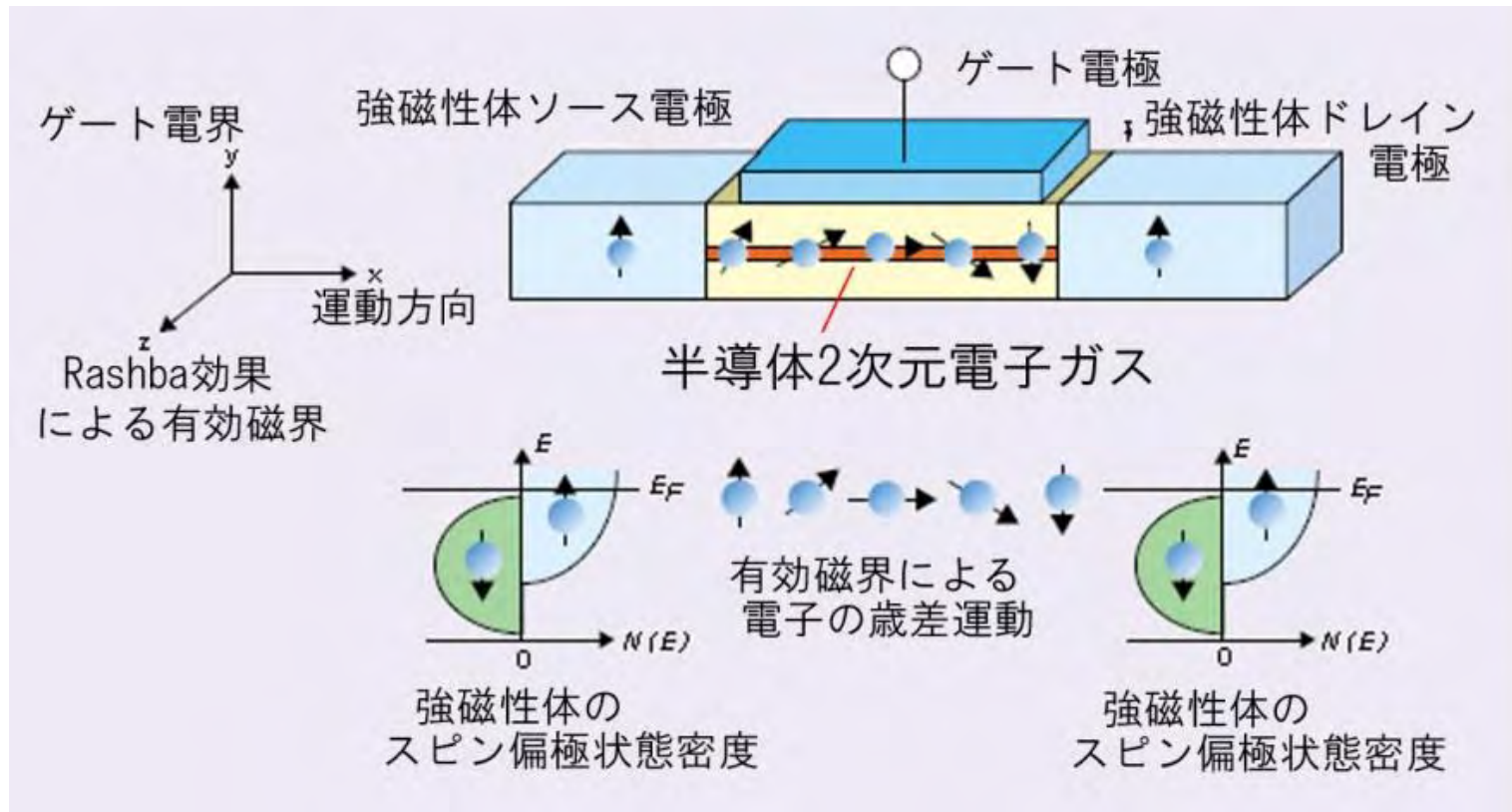


3. スピンFET

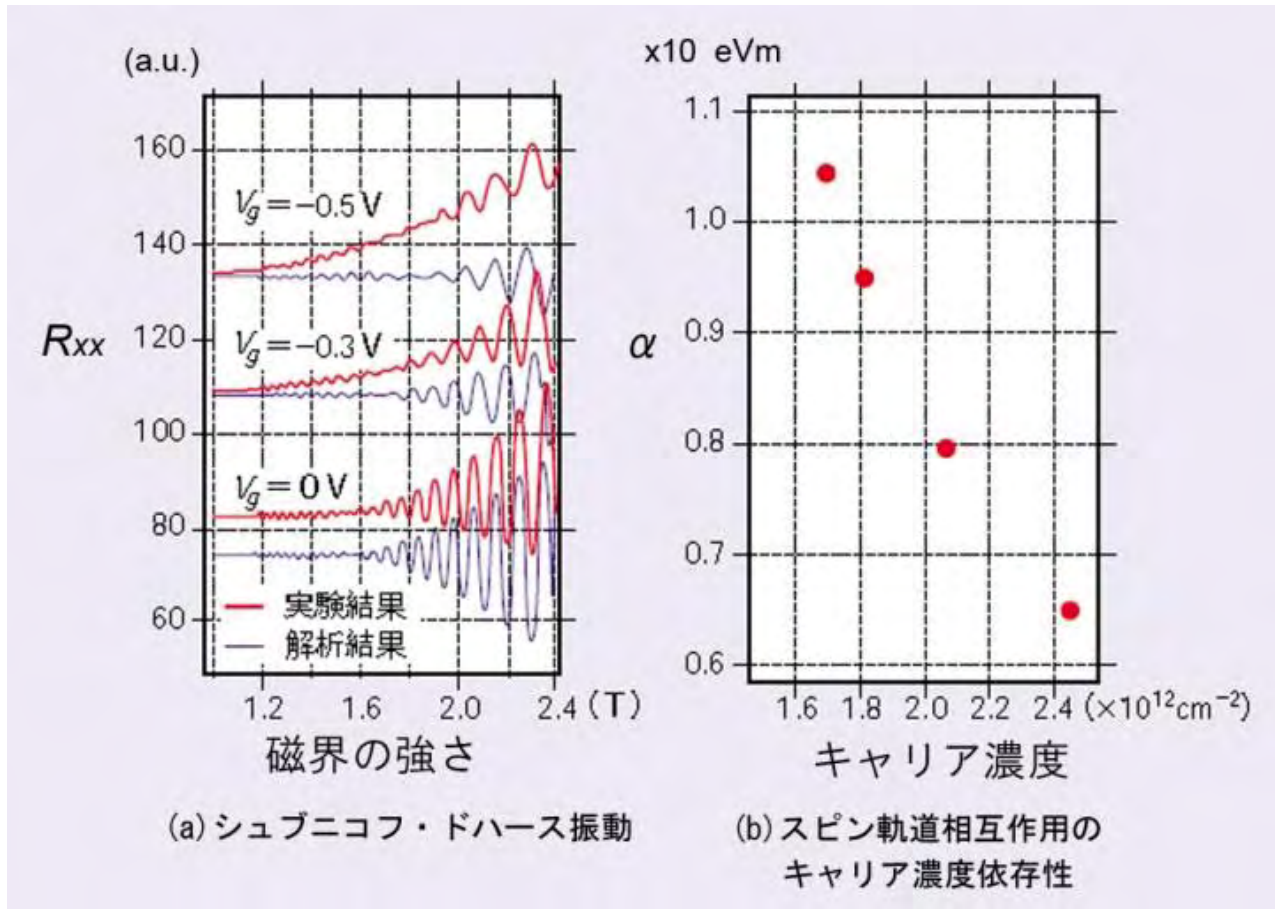
- 1990年代に、半導体ヘテロ構造界面における2次元電子ガスを用いたスピンFETが提案された。
- ここでは、強磁性金属電極からのスピン注入、ラッシュバ効果を用いたスピン軌道相互作用のゲート電界制御などの新しい概念が持ち込まれた。
- 各要素技術の基礎研究は進んだが、提案通りのスピンFETは実現していない。



スピンFETの概念図



スピン軌道相互作用 α のゲート電圧制御



4. GMR, TMRの登場

- a. スピントロニクスへのイノベーションは、1988年Fertら、Grünbergらの磁性金属/非磁性金属ハイブリッド構造における巨大磁気抵抗効果(GMR)によって開かれた。数年のうちにGMRは、IBMのグループによりスピンバルブとしてハードディスクの高密度化に貢献した。これにより、人類はコイルを用いずに効率よく磁気情報を電気信号に変換する手段を得たのである。
- b. 引き続き、Miyazakiらにより室温におけるトンネル磁気抵抗効果(TMR)が見出され、新たな不揮発性メモリ素子MRAMを生むきっかけとなる。
- c. さらに、TMRは、MgOをトンネル障壁に採用するYuasaらおよびParkinらの研究によって大幅な改善が得られ大きく進展した。MgOバリアTMR素子はHDDの磁気ヘッド用のセンサーのほとんどに使われている。
- d. さらに超高密度HDDヘッドのためにCPP-GMRが研究されている。

(a) 巨大磁気抵抗効果(GMR)



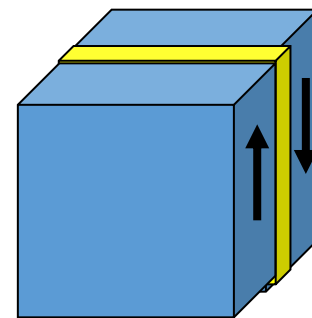
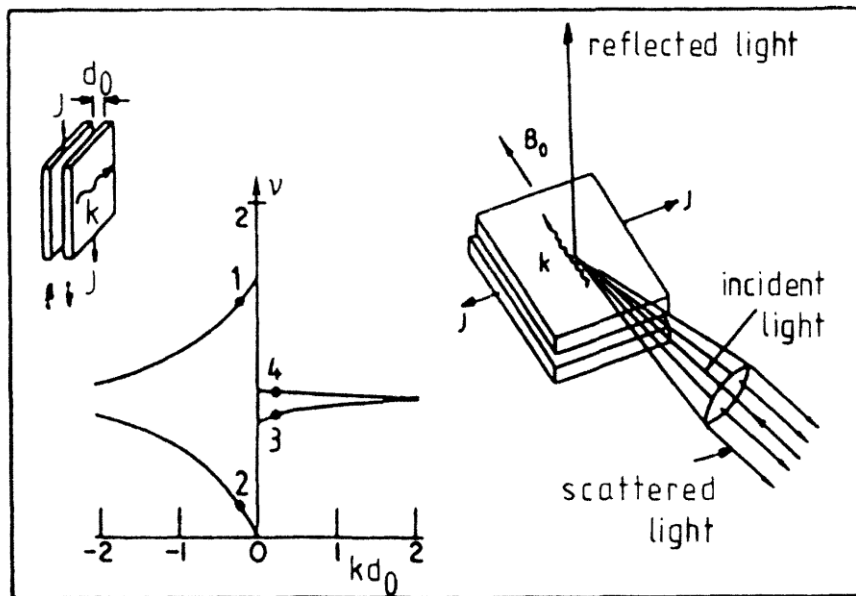
アルベール・フェール博士



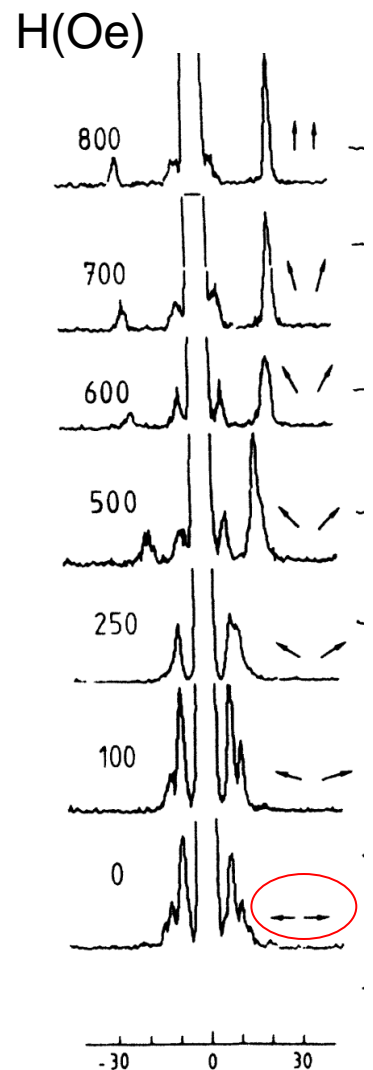
ペーター・グリュンベルク博士

ナノサイエンスと磁性電子の出会い

- 1986年ドイツのグリーンベルグのグループは、Fe/Cr(8 Å)/Feの構造において、Feの2層の磁化が途中の非磁性金属を通して反強磁性的に結合していることを光散乱法を使って発見した。

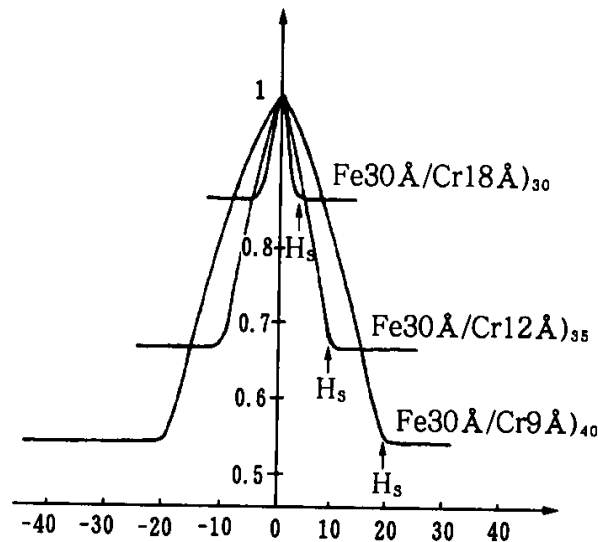
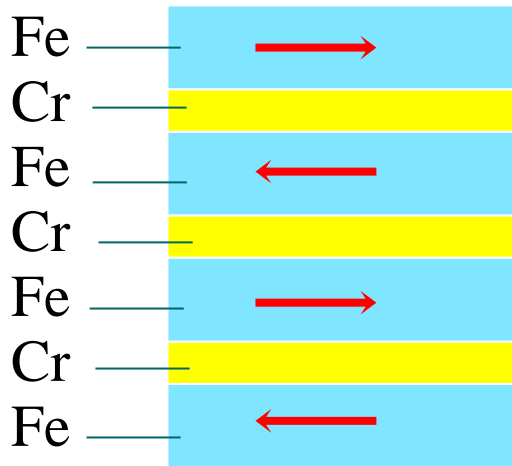


P. Grünberg, R. Schreiber and Y. Pang: Phys. Rev. Lett. 57 (1986) 2442



巨大磁気抵抗効果(GMR)の発見(1)

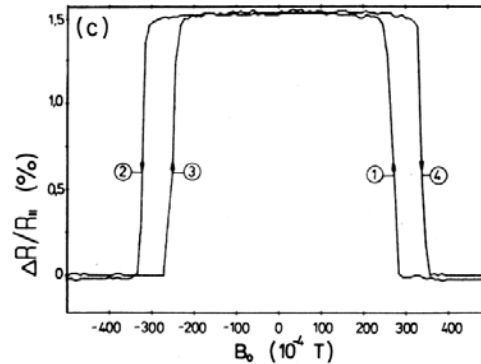
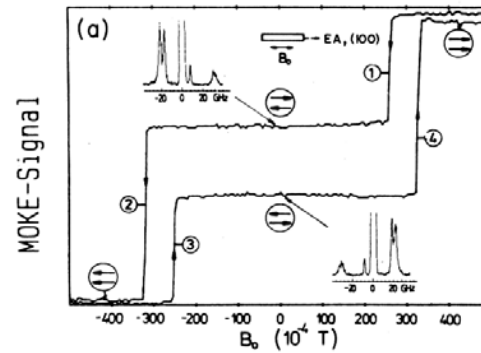
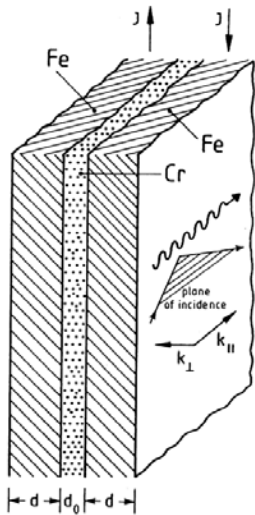
- フランスのフェールは、Fe/Cr/Fe₃層膜での反平行結合の実験結果を受けて、磁界印加で電気抵抗が低下するはずと確信。
- 1988年、Fe/Cr人工格子において電気抵抗値の50%もの大きな抵抗変化を発見し巨大抵抗効果GMRと名付けた。



M.N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friedrich, J. Chazelas: Phys. Rev. Lett. 61 (1988) 2472.

巨大磁気抵抗効果(GMR)の発見(2)

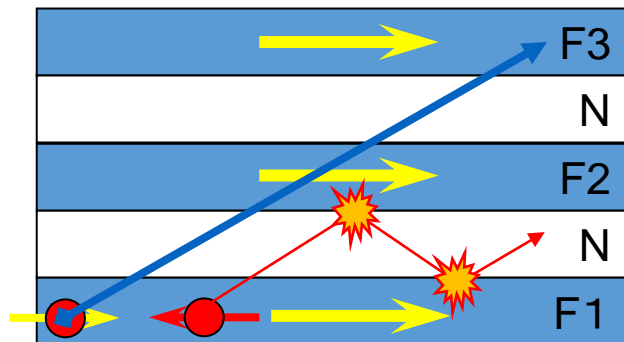
- 同じ時期、グリーンベルグのグループもFe-Cr-Feの3層膜で磁界印加による電気抵抗の低下を発見したが、その大きさは1.5%という小さなものであった。



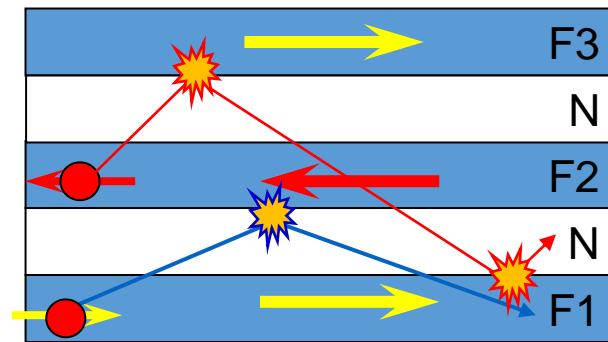
G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbad, W. Zinn: Phys. Rev. B 39 (1989) 4828.

巨大磁気抵抗効果GMRの原理

- フェールはGMRについて次のように説明した。
- 強磁性体(F)/非磁性金属(N)/強磁性(F)/・・・の構造を考える。F層同士の磁化が平行なら多数スピン電子は散乱を受けず、少数スピン電子のみ散乱するので低抵抗である。隣り合うF層の磁化が反平行だとどちらのスピンを持つ電子も散乱を受けるので高抵抗である。



磁化が平行→低抵抗のパスあり

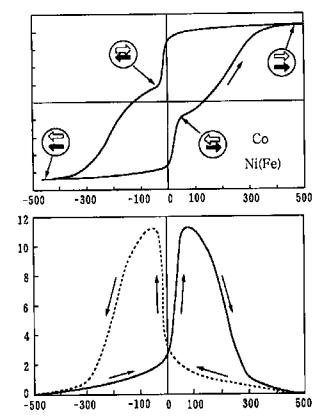
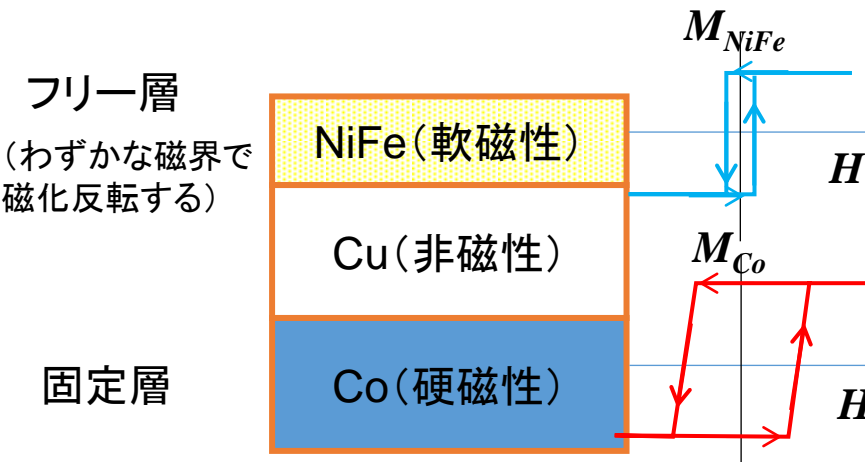
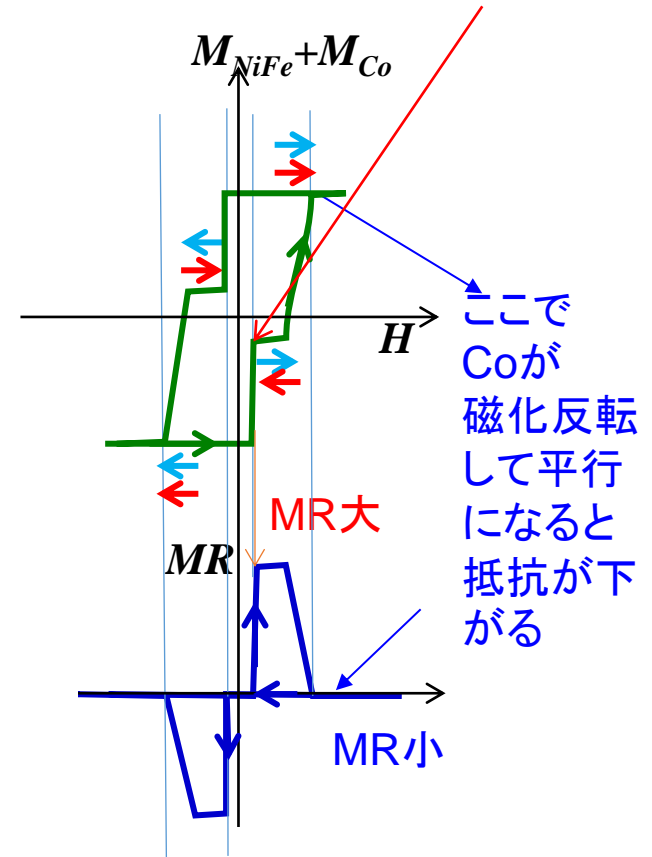


磁化が反平行→どちらのパスも高抵抗

非結合系でも保磁力が異なればGMRが出る

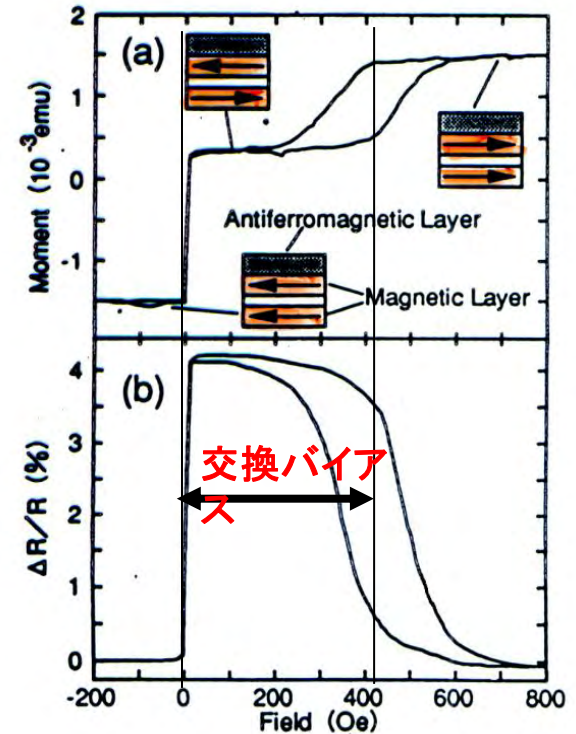
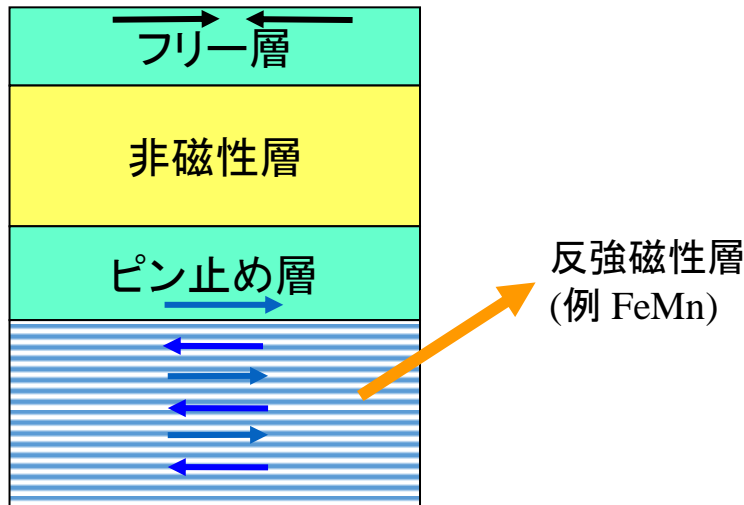
- 新庄らは、1990年、ソフト磁性体とハード磁性体との3層構造を作れば、弱い磁界でも反平行状態を作ることができ、大きな磁気抵抗効果が得られることを見いだした。

ここでNiFeは磁化反転するがCoは反転しないので反平行→抵抗高い。



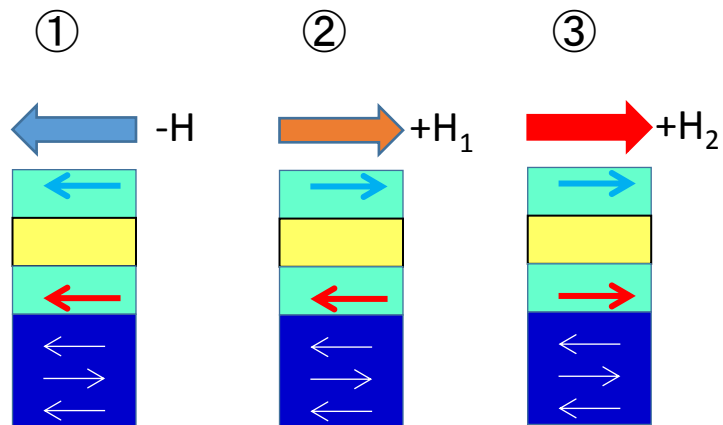
スピンバルブ

- IBMのParkinらは、非磁性層を挟む二つの磁性層に同じパーマロイを用いながら、片方だけに反強磁性体をつけることで、ピン留め層としたNiFe/Cu/NiFe/FeMnの非結合型サンドイッチ構造をつくりスピンバルブと名付けた。
- 反強磁性体と強磁性体の交換結合による交換バイアスを用いることにより、わずかな磁界でフリー層が反転する高感度なセンサーが実現した。

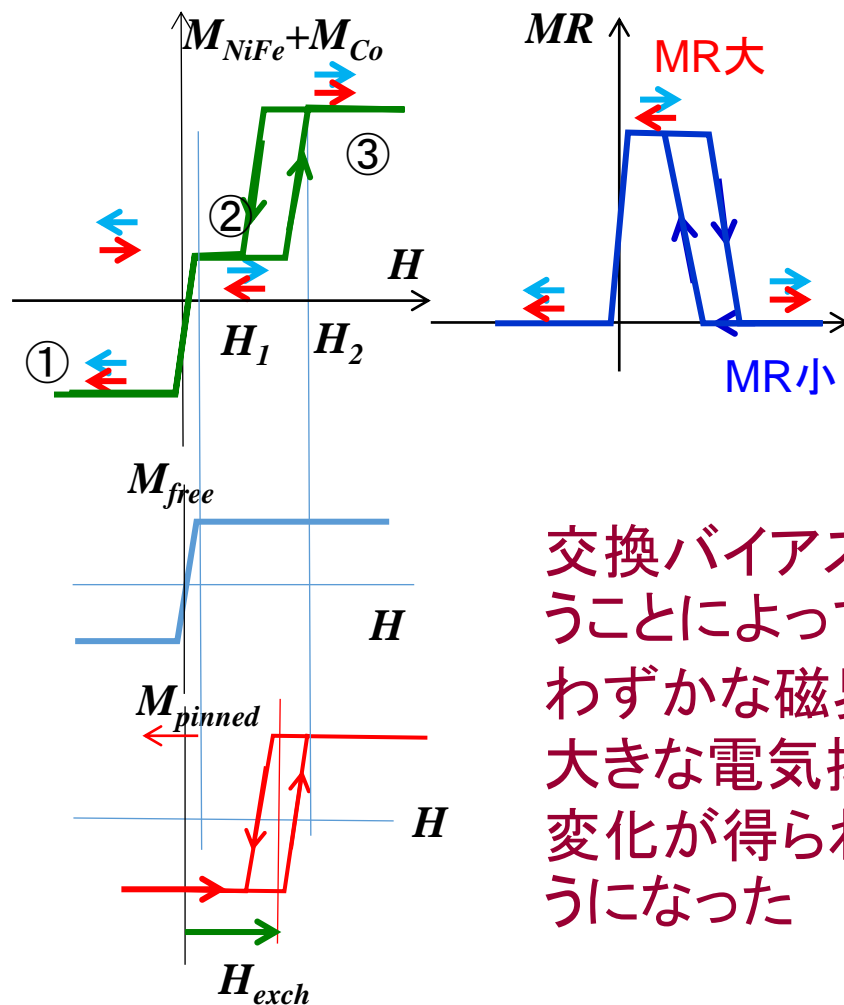


S. S. P. Parkin, Z. G. Li and David J. Smith: Appl. Phys. Lett. 58 (1991) 2710.

スピンバルブのキモは交換バイアス

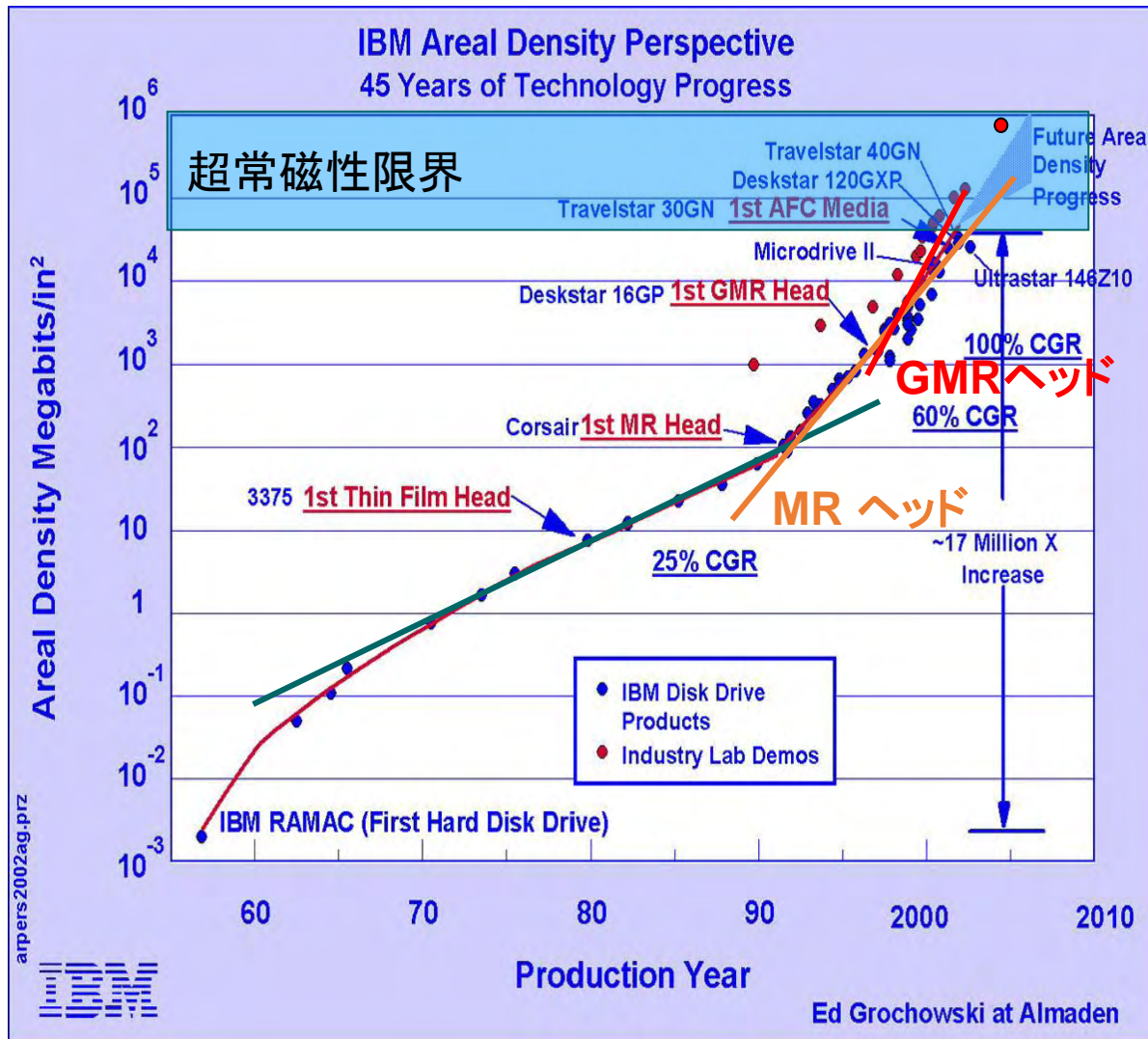


交換バイアスとは、強磁性体が反強磁性体と界面で交換結合しているために見かけ上働く磁界のこと。



交換バイアスを使うことによってわずかな磁界で大きな電気抵抗変化が得られるようになった

スピバルブがハードディスクを変えた



Spin Valveの導入によって、微細な磁区から生じるわずかな磁束の検出が可能になり、HDDの高密度化が非常に加速された。

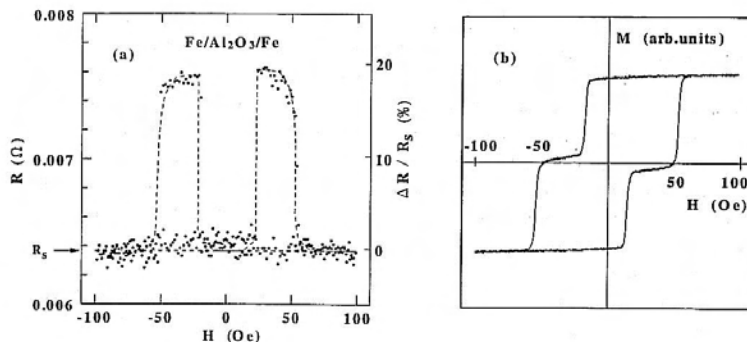


左から、湯浅新治さん、宮嶋昭宣さん

(b)トンネル磁気抵抗効果(TMR)

トンネル磁気抵抗効果の発見

- 磁性と伝導の関係にさらなるブレークスルーをもたらしたのは、Miyazakiによる1995年の磁気トンネル接合(MTJ)における室温での大きなトンネル磁気抵抗効果(TMR)の発見で、TMR比[1]は18%におよんだ[2]。

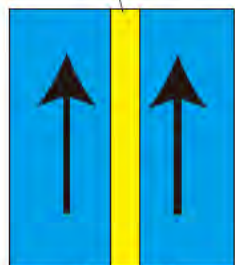


Magnetoresistance via magnetic tunneling (a) and corresponding magnetic hysteresis curve (b) in an $\text{Fe}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}$ junction at room temperature.

[1] TMR比は、向かい合う2つの磁性層の磁化の向きが磁化の向きが平行のときの抵抗 $R_{\uparrow\uparrow}$ と反平行のときの抵抗 $R_{\uparrow\downarrow}$ との差を平行の抵抗で割った百分比で表されます。 $\text{TMR}(\%) = (R_{\uparrow\uparrow} - R_{\uparrow\downarrow}) / R_{\uparrow\uparrow} \times 100$
[2] T. Miyazaki, N. Tezuka: J. Magn. Magn. Mater. 139 (1995) L231.

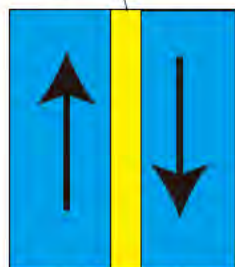
TMR(トンネル磁気抵抗効果)の原理

絶縁層
強磁性電極 1 強磁性電極 2

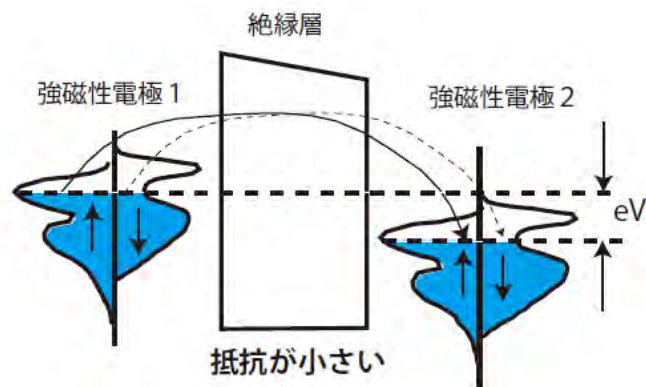


スピ平行

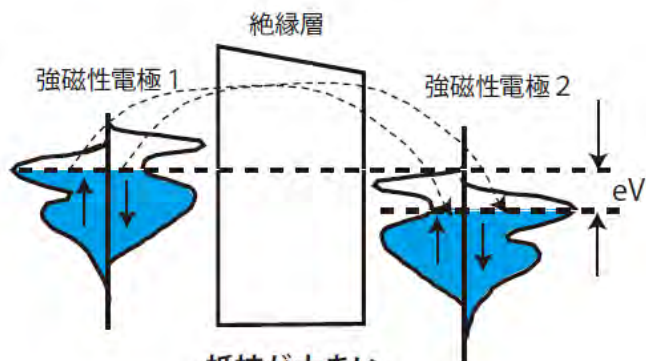
絶縁層
強磁性電極 1 強磁性電極 2



スピ反平行



抵抗が小さい

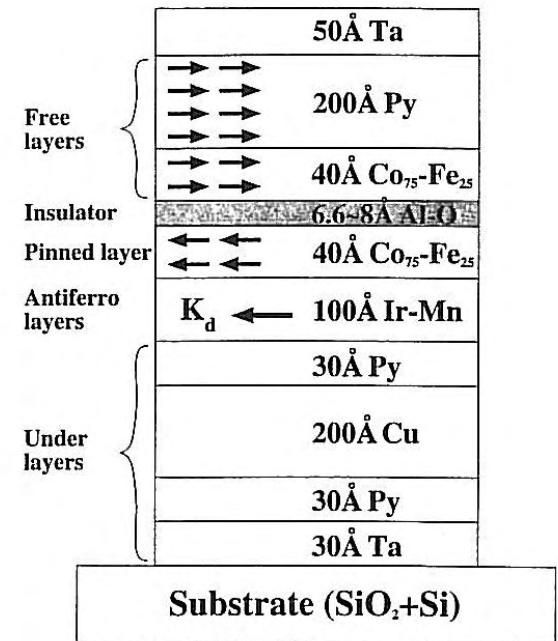


抵抗が大きい

- TMRは磁性体のバンド構造を使って説明される。
- フェルミ面における状態密度が上向きスピンと下向きスピンとで異なる。
- 両電極のスピが平行だと、状態密度の大きな状態間の電子移動により低抵抗になる。
- 反平行だと、大きな状態と小さな状態の間の移動なので高抵抗になる。

磁気トンネル素子(MTJ)とMRAM

- MTJとは2枚の強磁性体層で極めて薄い絶縁物を挟んだトンネル接合で、磁化が平行と反平行とで電気抵抗が大きく異なる現象である。
- スピン偏極トンネリング自体は、1980年代から知られていたおり[i]、磁性層間のトンネルについて先駆的な研究[iii]も行われていたが、トンネル障壁層の制御が難しく、再現性のよいデータが得られていなかったのです。
- Miyazakiら[iii]は成膜技術を改良して、平坦でピンホールの少ない良質のAl-O絶縁層の作製に成功したことがブレークスルーとなった。この発見を機にTMRは、世界の注目するところとなり、直ちに固体磁気メモリ(MRAM)および高感度磁気ヘッドの実用化をめざす研究開発が進められた。



Schematic cross section of spin-valve-type junction.

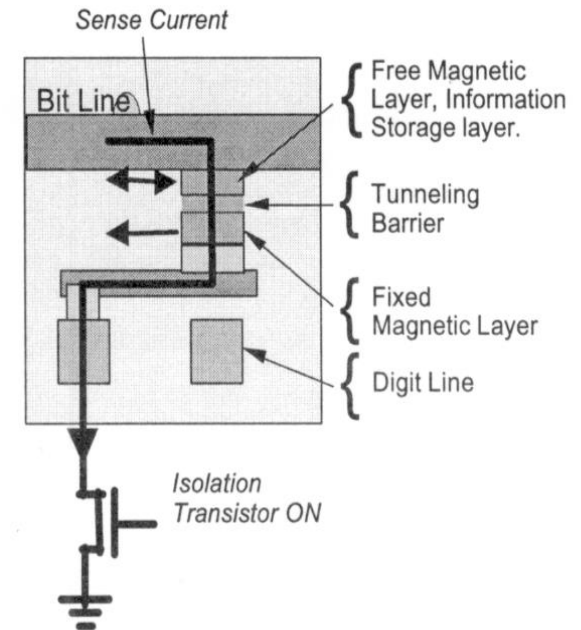
[i] R. Meservey, P.M. Tedrow, P. Flulde: Phys. Rev. Lett. 25 (1980) 1270.

[ii] S. Maekawa, U. Gäßfert: IEEE Trans. Magn. MAG-18 (1982) 707.

[iii] T. Miyazaki, N. Tezuka: J. Magn. Magn. Mater. 139 (1995) L231

MRAM(磁気ランダムアクセスメモリ)

- 記憶素子に磁性体を用いた不揮発性メモリの一種である。
- MTJとCMOSが組み合わされた構造となっている。
- 直交する2つの書き込み線に電流を流し、得られた磁界が反転磁界 H_K を超えると、磁気状態を書き換えることができる。しかし、電流で磁界を発生している限りは高集積化が難しいという欠点がある。
- MRAMは、アドレスアクセスタイムが10ns台、サイクルタイムが20ns台とDRAMの5倍程度でSRAM並み高速な読み書きが可能である。また、フラッシュメモリの10分の1程度の低消費電力、高集積性が可能などの長所があり、SRAM(高速アクセス性)、DRAM(高集積性)、フラッシュメモリ(不揮発性)のすべての機能をカバーする「ユニバーサルメモリ」としての応用が期待されている。
- このため、FeRAM(強誘電体メモリ)、OUM(カルコゲナイド合金による相変化記録メモリ)とともに、「ユニバーサルメモリ」としての応用が期待されています。



MRAM と他のメモリとの比較

	SRAM	DRAM	Flash	FRAM	MRAM
読出速度	高速	中速	中速	中速	中高速
書込速度	高速	中速	低速	中速	中高速
不揮発性	なし	なし	あり	あり	あり
リフレッシュ	不要	要	不要	不要	不要
セルサイズ	大	小	小	中	小
低電圧化	可	限	不可	限	可

(c)MgOノバリアTMR

MgO単結晶バリアの採用でブレークスルー

•2004年、TMRは革命的なブレークスルーを迎える。Yuasaらはそれまで用いられてきたアモルファスAl-Oに代えてMgO単結晶層をトンネル障壁に用いることで、200%におよぶ大きなTMR比を実現した。

•その後もTMRは図1のように伸び続け、最近では**600%**に達している。

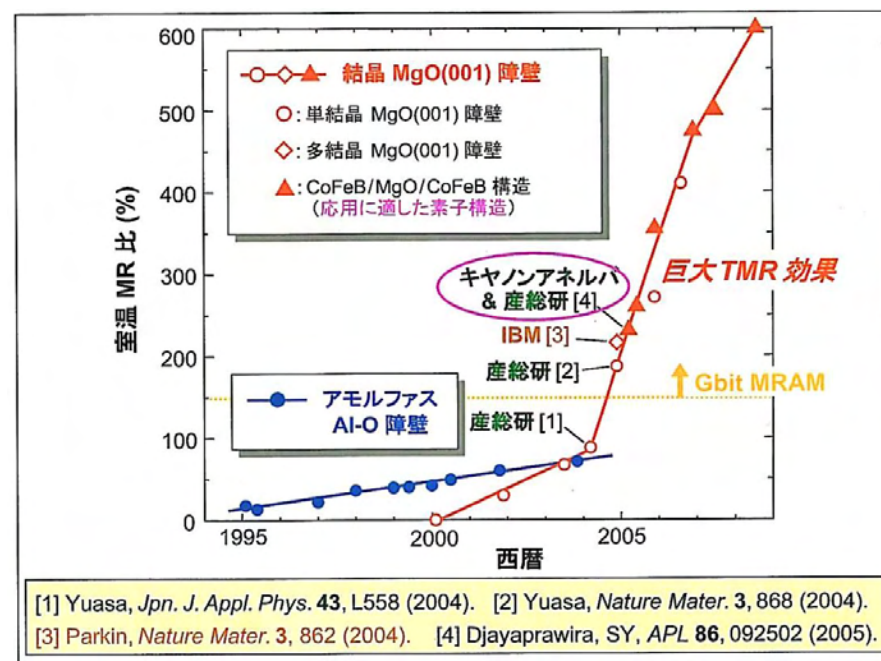


図1. トンネル磁気抵抗効果の進展のグラフ
[産総研資料2011による]

散漫散乱トンネルとコヒーレント・トンネル

• 通常、トンネルする際スピンは保存され、散漫トンネルの場合 TMR は一般に強磁性電極のスピン分極率 P ($i=1, 2$) を用いて次のような Jullier の式で表される。[1]

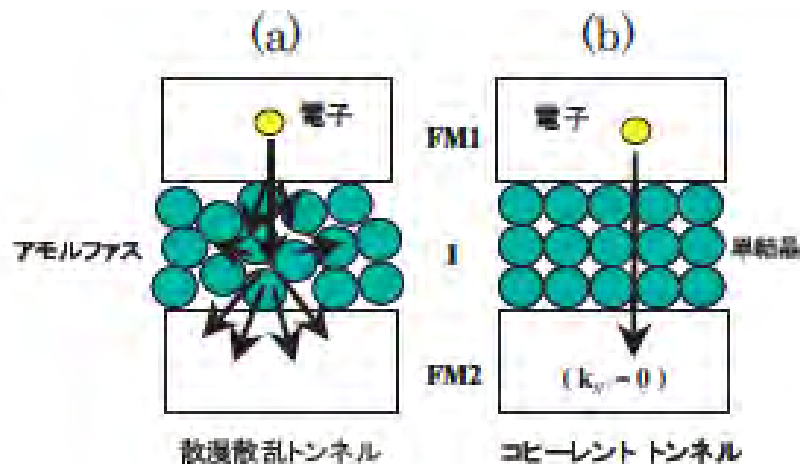
$$\bullet \text{TMR} = 2P_1P_2 / (1 - P_1P_2)$$

• MTJ におけるスピン分極率は磁性体固有のものではなく界面電子状態と関係し、バリア材料や界面性状に依存する。

• コヒーレントトンネルではエネルギーのほかに運動量が保存されるため、MR は電極のバンド構造を反映し、磁化が平行のときはトンネルできるが反平行のときはトンネルできない。そのため、1000% という巨大 TMR が理論的に予測された。[2]

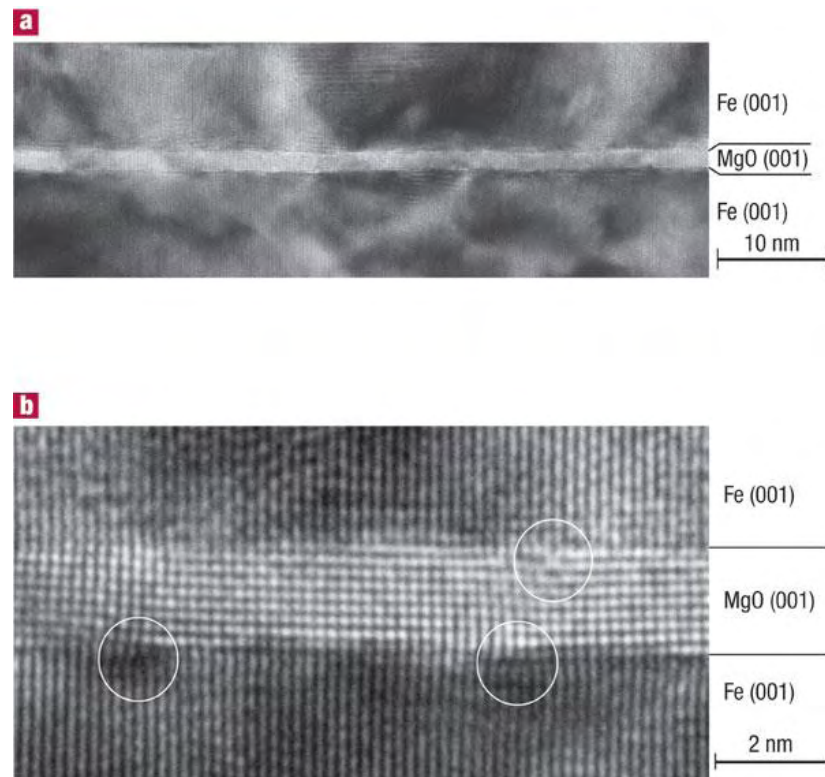
[1] M. Jullier, Phys. Lett. 54A, 225 (1975).

[2] W. H. Butler et al., Phys. Rev. B 63 (2001) 054416, J. Mathon and A. Umeski, Phys. Rev. B 63 (2001) 220403R



Fe/MgO/Fe構造のTEM像

- 理論の予測を受けて多くの研究機関が挑戦したが、成功しなかった。
- YuasaらはFe(001)/MgO(001)/Fe(001)のエピタキシャル成長に成功し、トンネル層の乱れがほとんどない構造を得た。また、界面でのFe酸化層も見られていない。
- 結晶性のよいMgOの成膜技術の確立があって初めてブレークスルーが得られた。まさに結晶工学の成果と言えるだろう。



Nature Materials **3**, 868–871 (2004)

Yuasaのこの結果は、JSTさきがけ神谷領域(ナノと物性)の第2期(2002-2005)における課題「超Gbit-MRAMのための単結晶TMR素子の開発」の成果である。

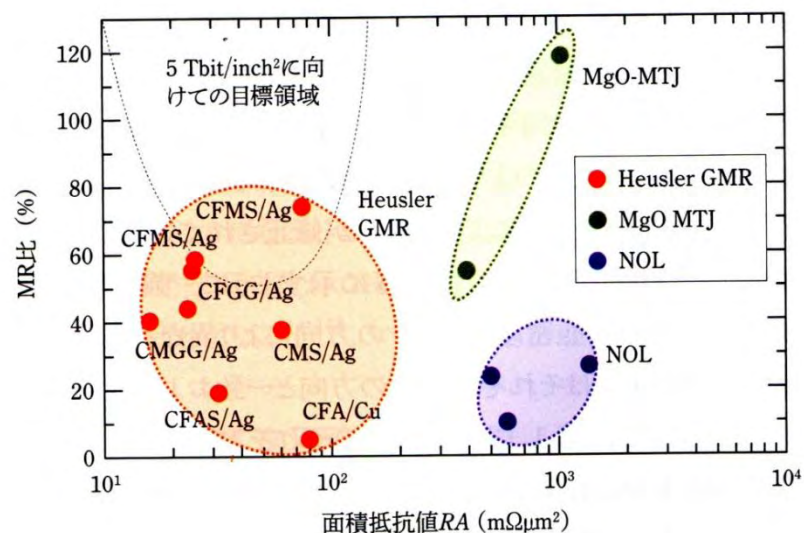
CoFeB/MgO/CoFeBスパッタにより産業化

- MgO-MTJ素子の産業応用は、下部強磁性電極にアモルファスCoFeB合金を用いると、その上に高品質の配向性多結晶MgO(001)トンネル障壁層を室温で成長できることを発見したことで大きく進展した。
- この成長様式によるCoFeB/MgO/CoFeB構造のMTJ素子は任意の下部層の上に室温成膜で作製でき、巨大TMR効果を示し、大面積ウエハ上の均一性や歩留まり、量産プロセス適合性、生産効率などもよいことが明らかになった。
- なお、CoFeB/MgO/CoFeB構造のMTJ素子で巨大TMR効果が出現する機構として、アモルファスCoFeB層がポスト・アニールの過程でMgO(001)層と格子整合の良いbcc(001)構造に結晶化する“固相エピタキシー”の結晶化機構/が関係していることが明らかにされた。
- 現在、このCoFeB/MgO/CoFeB構造のMTJ素子は、スピントロニクス基礎と応用の両面で主流技術となっています。

(d) CPP-GMR素子とハーフメタル

超高密度HDDヘッド用CPP-GMRヘッド

- デバイスの微細化とともに高抵抗化し限界が...
- GMR素子は低抵抗ですが、MR比が低いという問題があった。
- スピン偏極率の高い電極を使ったCPP-GMRが今後の主流になると予想される。
- ハーフメタル系の材料が探索されている。

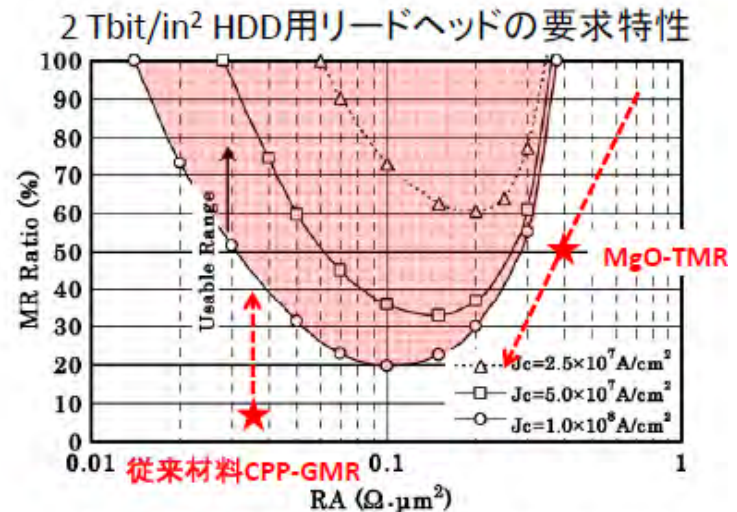
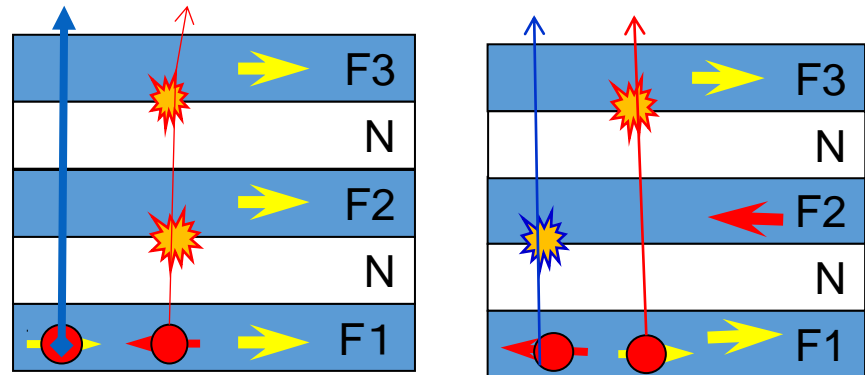


磁気抵抗比 (GMR および TMR) と面積抵抗値 RA の関係。

CPP-GMR

(電流を層に垂直に流す配置での巨大磁気抵抗効果)

- 電流を層に垂直に流すので、磁気抵抗効果が顕著になる。
- 低抵抗なので高周波特性がよく、MgO-TMRヘッドの次世代読み出しヘッドとして期待される。

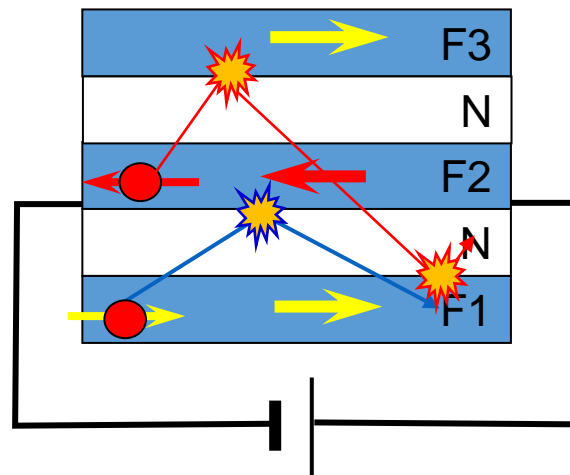
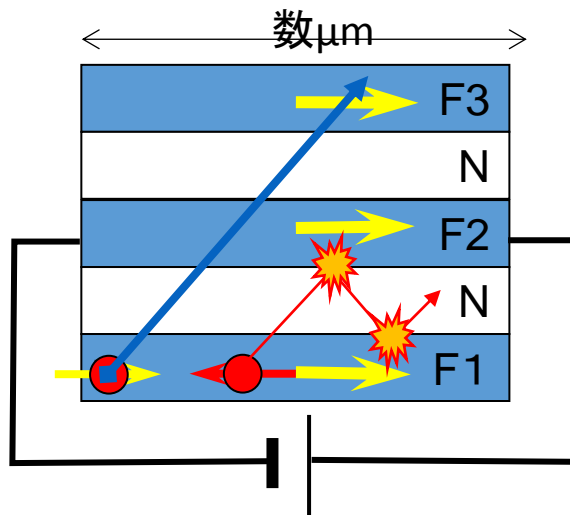


CIP GMR と CPP GMRの比較

CIP GMR

電流を長手方向に流すので抵抗が高い

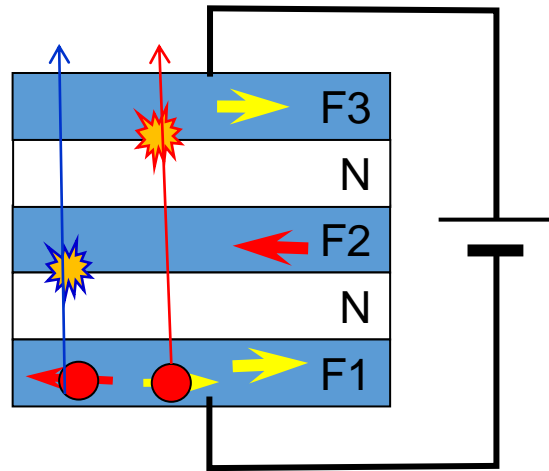
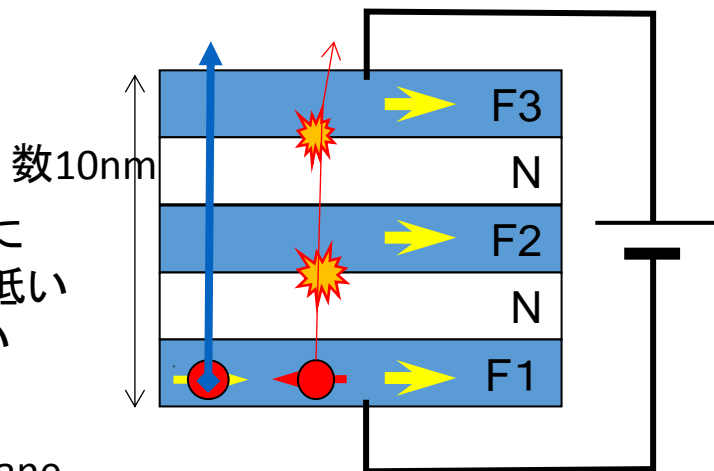
CIP=Current in-plane



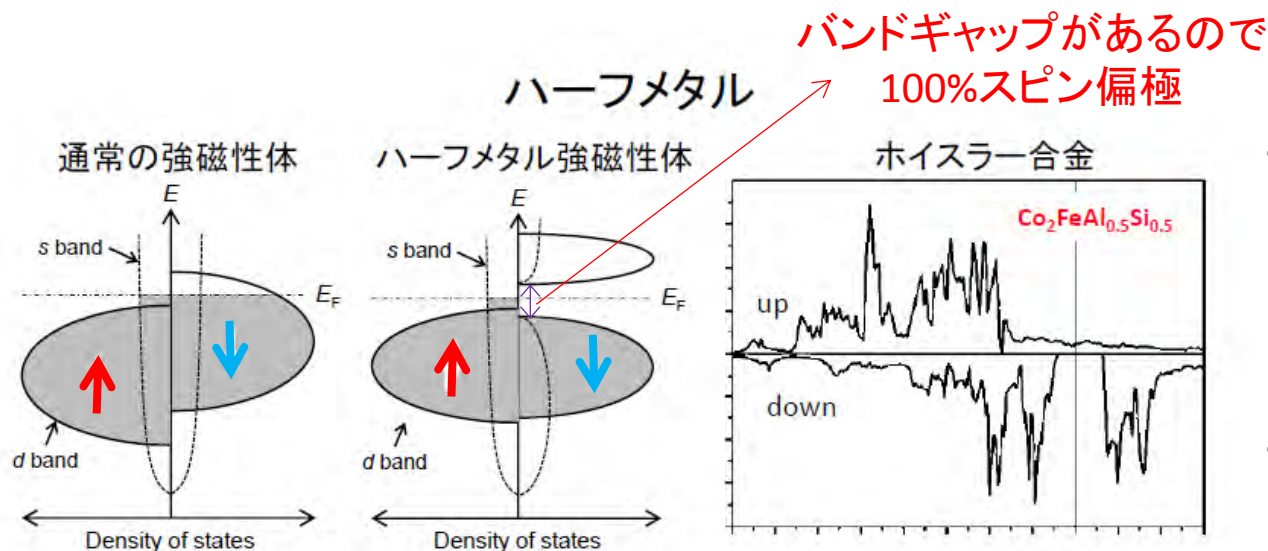
CPP GMR

電流を面直方向に流すので抵抗が低い
ピンホールに弱い

CPP=Current perpendicular to plane



ハーフメタル電極の採用



1983年 ハーフホイスラー合金NiMnSb
において理論的に予言

CrO_2 , LaSrMnO , Co_2MnSi の低温での
ハーフメタル性が実験的に示されている。

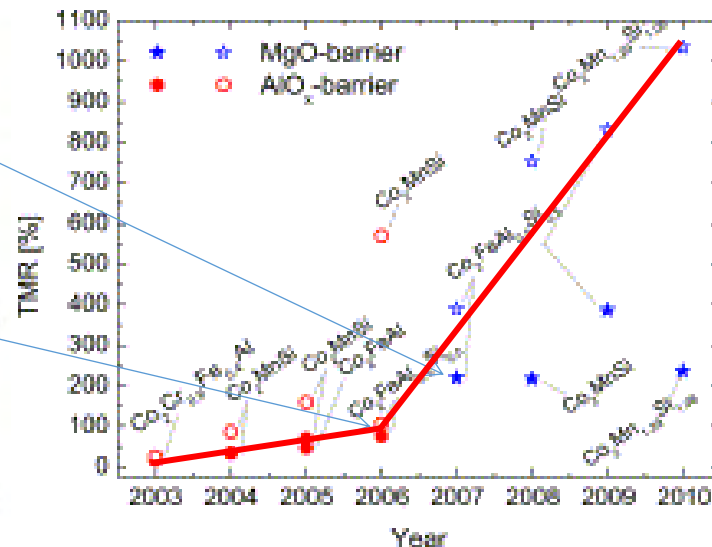
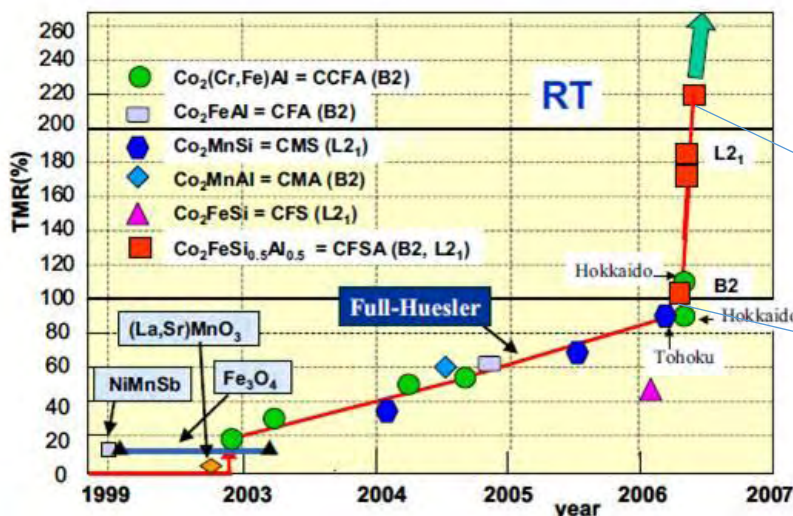
フェルミレベル近傍
アップスピン: s-like
ダウンスピン: 状態無し
↓
高いスピン分極率
理想的には, $P=1$

- ハーフメタルとは、↑スピンに対しては金属、↓スピンに対しては半導体のようなバンド構造をもつ物質である。
- フェルミ準位においては、100%スピン偏極していることが特徴。
- TMR用ハーフメタルとしては、ホイスラー合金が最適候補とされている。

ハーフメタル: 1方向のスピンのみが電気伝導に寄与する金属

フルホイスラー合金とTMR

- ホイスラー合金をTMR電極として用いる試みは、数多く行われた。実際に高いTMRが得られるようになったのは精密な結晶構造制御が行われるようになった2006年頃からである。今ではMgO絶縁層を用いて1000%を超えるTMRが報告されている。

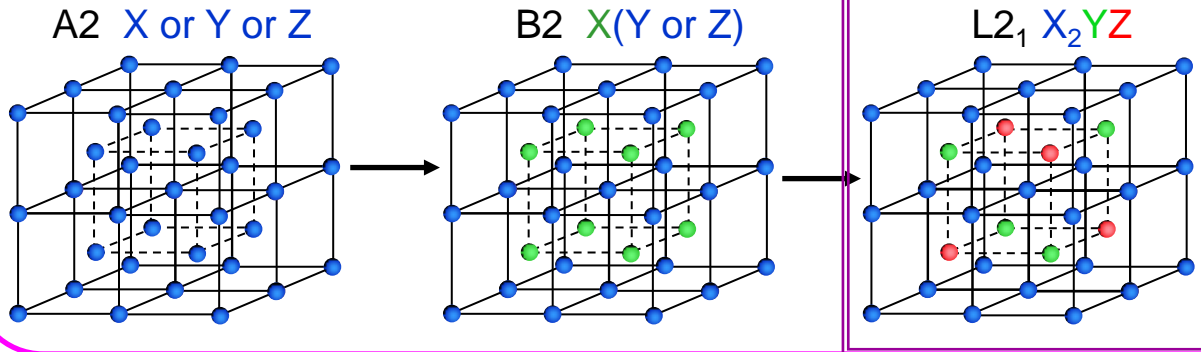


Tanja Graf, Claudia Felser, Stuart Parkin:
 Simple rules for the understanding of Heusler compounds;
 Progress in Solid State Chemistry 39 [1] (2011) 1–50

高橋有紀子研究者 CMGGで74%の高偏極率達成

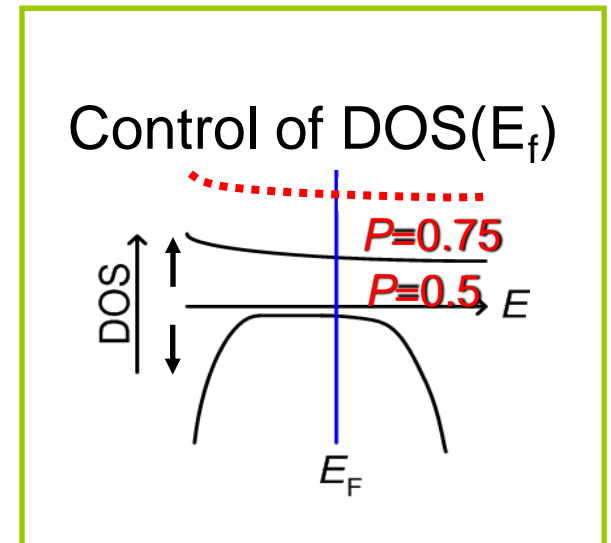
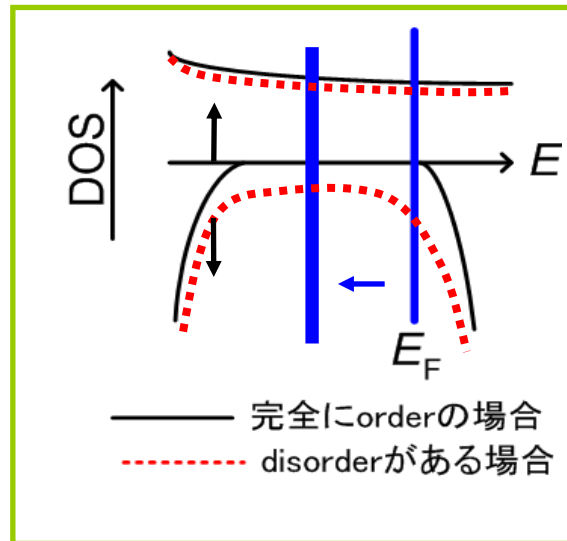
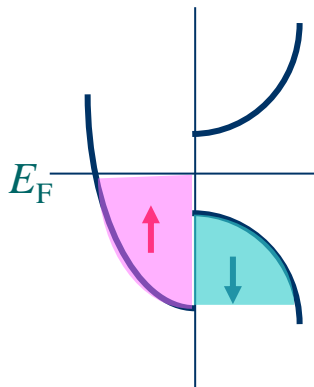
【さきがけ佐藤領域】

Co based Heusler alloy、 X_2YZ



L2₁構造だと T_cが高く、
偏極率Pは理想的には
100%となる
YとZの無秩序が起きると
B₂構造となりPが低下

How to search?



PCARS法で測定したハーフメタルの スピン偏極度

- 高橋研究者は32種類のフルホイスラー合金についてPCAR法でスピン偏極度を評価し、CoMnGeGa合金がP=74%という大きな値を示すことを明らかにした。またP=68%のCFGGを用いて129%のCPP-GMRを達成した。

Metals and binary	P	Ref.
Fe	46	
Co	45	
FeCo	50	
Co ₇₅ Fe ₂₅	58	
B2-FeCo	60	
[Co/Pd] _n	60	

Ternary alloys	P	Ref.
Co ₂ MnSi	56	
Co ₂ MnGe	58	
Co ₂ MnSn	60	
Co ₂ MnAl	60	
Co ₂ MnGa	60	
Co ₂ CrAl	62	
Co ₂ FeAl	59	
Co ₂ FeSi	60	
Co ₂ FeGa	58	
Co ₂ CrGa	61	
Co ₂ TiSn	57	
Co ₂ VAI	48	
Fe ₂ VAI	56	

Quaternary alloys	P	Ref.
Co ₂ Mn(Ge _{0.75} Ga _{0.25})	74	
Co ₂ Mn(Ga _{0.5} Sn _{0.5})	72	
Co ₂ Fe(Si _{0.75} Ge _{0.25})	70	
Co ₂ FeGa _{0.5} Ge _{0.5}	68	
Co ₂ (Cr _{0.02} Fe _{0.98})Ga	67	
Co ₂ MnGeSn	67	
Co ₂ (Mn _{0.95} Fe _{0.05})Sn	65	
(CoFe) ₂ MnGe	65	
Co ₂ (Mn _{0.5} Fe _{0.5})Ga	65	
Co ₂ (Cr _{0.02} Fe _{0.98})Si	65	
Co ₂ MnTiSn	64	
Co ₂ MnAl _{0.5} Sn _{0.5}	63	
Co ₂ MnGa _x Si _{1-x}	63	
Co ₂ FeAlGa	63	
Co ₂ MnSiGe	63	
Co ₂ (Mn _{0.5} Fe _{0.5})Si	61	
Co ₂ Mn(Al _{0.5} Si _{0.5})	60	
Co ₂ FeGa _{0.5} Si _{0.5}	60	
Co ₂ Fe(Al _{0.5} Si _{0.5})	60	

5. スピン移行トルク(STT)

- GMR, TMRに次ぐ革新的展開は、スピン移行トルク(STT)を用いた磁化反転現象の理論的予言, と実験的検証によりもたらされた。
- スピンの角運動量を強磁性電極に受け渡す現象を直接利用するSTT-MRAMは、磁界発生用の電流線が不要であるため、DRAMをしのぐ高密度集積も可能となり、ついにサンプル出荷にまで至った。
- ついに人類は、コイルなしに電気信号を磁気情報へ変換する道を手にしたのである。
- STTはさらにスピントルク発振子(STO)という超小型発振子や、スピントルクダイオード(STD)など、高周波スピントロニクス分野を切り開いた。
- STTでは電流を流すのでジュール熱の発生を免れない。電流の代わりに電圧を用いて磁気を制御する道もひらかれつつある。

スピン注入磁化反転の提案と実現

- 1996年、新たなスピントロニクス分野としてスピン注入磁化反転のアイデアがSlonczewski[i]およびBergerら[iii]によって提案され、実験的に検証された[iiii]。
- 強磁性電極FM1からスピン偏極した電流を、傾いた磁化をもつ対極強磁性電極FM2に注入すると、注入された電子のスピンの向きがFM2の向きに傾けられるときの反作用として、スピン角運動量のトルクが対極電極の磁化にトランスファーされて、それがきっかけで磁化反転をもたらすと考えられる。

- [i] J. Slonczewski: J. Magn. Magn. Mater. 159 (1996) L1.
- [iii] L. Berger: Phys. Rev. B 54 (1996) 9353.
- [iiii] E. B. Myers, D. C. Ralph, J. A. Katine, R. N. Louie, R. A. Buhrman: Science 285 (2000) 865.

$$\frac{d\mathbf{M}_2}{dt} = \gamma \mathbf{M}_2 \times \mathbf{H}_{eff} + \alpha \mathbf{m}_2 \times \frac{d\mathbf{M}_2}{dt} - g(\theta) \frac{\hbar I_e}{2e} \mathbf{m}_2 \times (\mathbf{m}_2 \times \mathbf{m}_1)$$

電子のスピンの強磁性体の磁化によって傾けられると反作用で磁化を傾ける

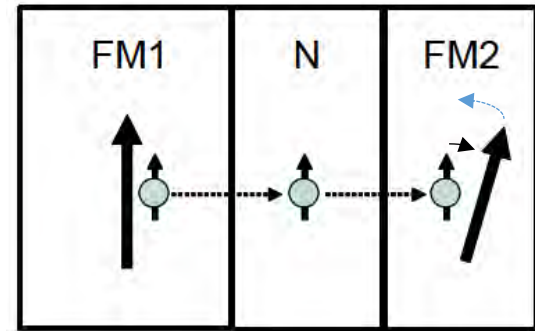


図7 スピン注入磁化反転の概念図

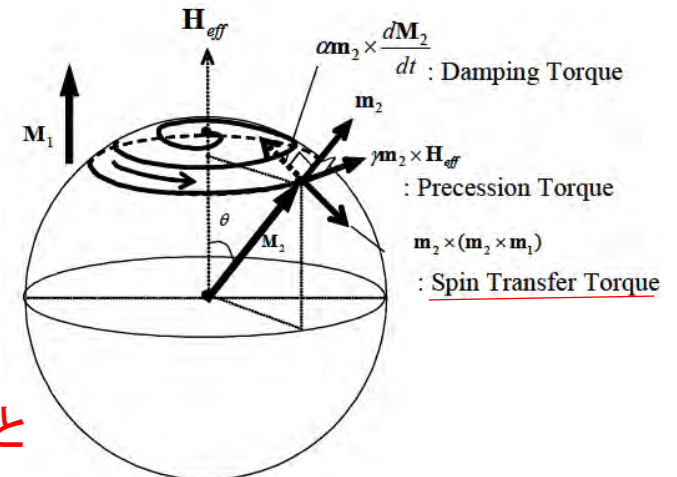
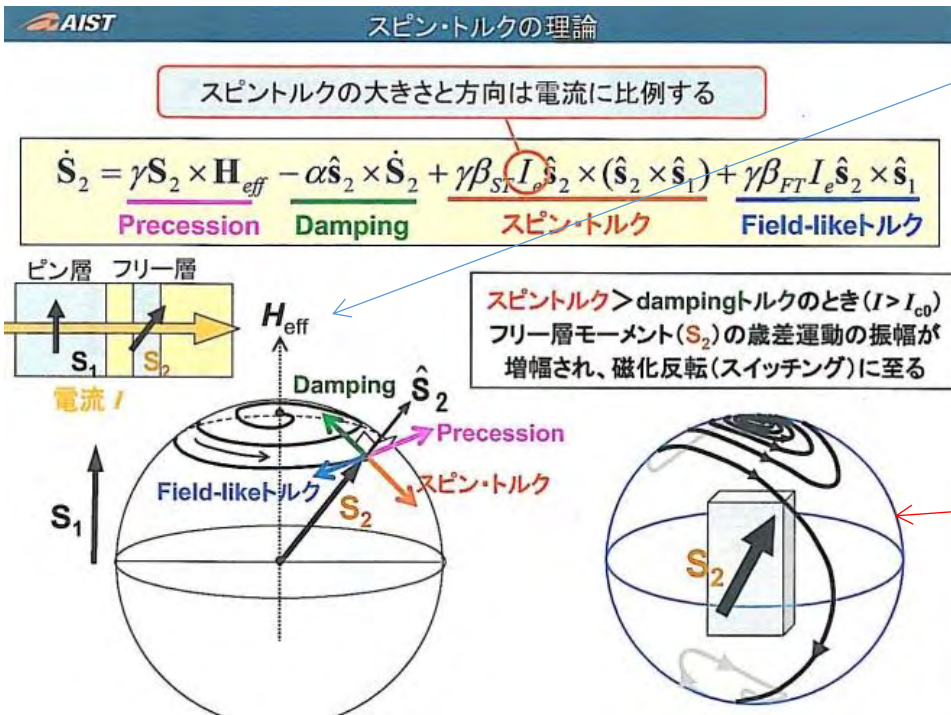


図8 スピン注入磁化反転のダイナミクス

スピン移行トルク(STT)の理論



- 電流注入でスピン移行トルクが発生。
- 外部磁界のもとでは、歳差運動が継続的に起きて、スピントルク発振子 (STO) となる。
- 外部磁界がないとき、ダンピングとトルクが適切な関係をもつと、磁化反転を起こす。
- わずかなスピン移行トルクでも反転できる。

磁気モーメントに磁界を加えると味噌すり運動をしながら磁界方向に倒れる

スピン注入磁化反転の実例

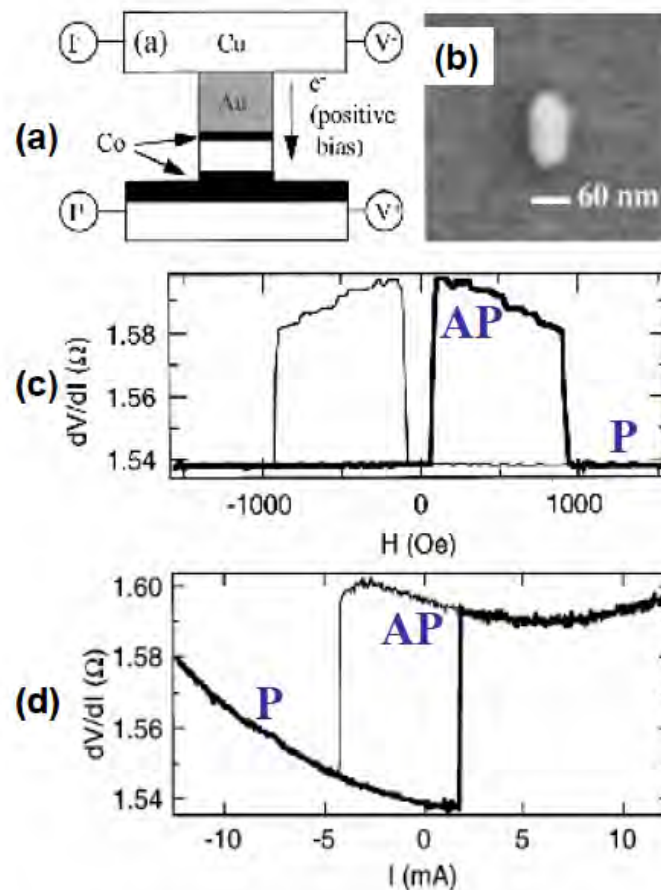
•スピン注入磁化反転を実現するための代表的な素子は図 (a) のような非常に小さな断面 ($60\text{nm} \times 130\text{nm}$) を持つ柱状素子である。素子は2層の強磁性層(Co)とそれを隔てる非磁性層(Cu)から構成される。

•この素子において膜面に垂直に電流を流して電気抵抗の**磁場依存性**を測定した結果が図(c)です。二つのCo層の磁化の平行(P)・反平行(AP)に応じて明瞭な抵抗変化が得られている。

•図 (d)は外部磁界なしの状態で測定した電気抵抗の測定電流依存性です。+2mA程度で磁化が平行配置から反平行配置にスイッチする様子が**電気抵抗ジャンプ**として現れている。

•この状態は電流をゼロにしても安定であり、-4mA程度で再び平行配置へ戻る。すなわち、正の電流で反平行配置を、負の電流で平行配置を実現できる。

•サブナノ秒で磁化反転ができることから、磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)の新しい書き込み方式として期待され、既に、スピン注入書き込みを利用したSTT-MRAMの試作もなされており、サンプル出荷されている。



す

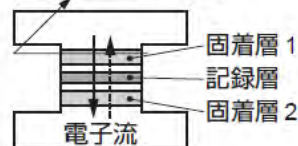
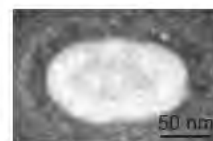
図9 スピン注入磁化反転の実験例[40]

F.J. Albert et al., Appl. Phys. Lett. 77(2000) 3809.

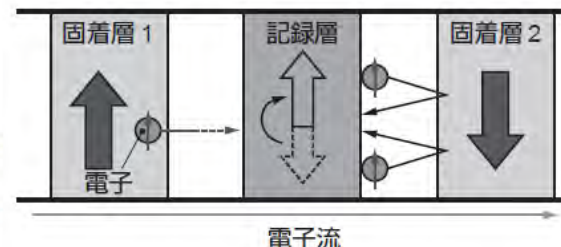
スピン注入磁化反転のメリット

スピン偏極した電流を流すことによって、磁気記録する

- スピン注入磁化反転は、反転電流は素子面積に比例し、素子面積が小さいほど低電力化が可能になる。
- 素子寸法が $0.2\mu\text{m}$ 以下になると、電流磁界書き込みよりも書き込み電流が小さくなる。



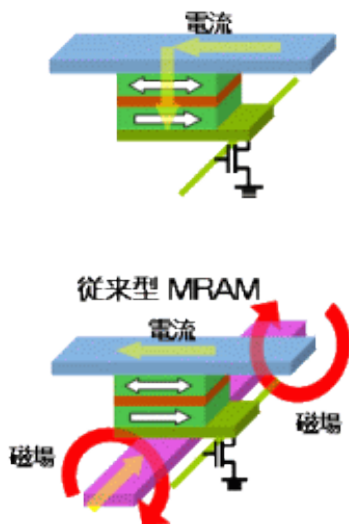
(a) 素子構造と素子断面の走査型電子顕微鏡 (SEM) 像



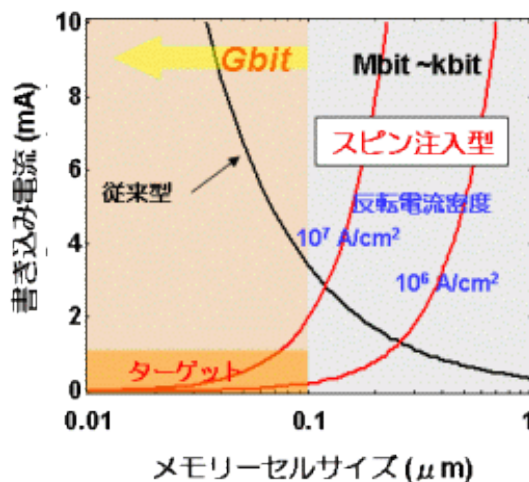
(b) スイッチングメカニズム

中村他: 東芝レビュー Vol.61 No.2 (2006)

スピン注入型 MRAM



メモリーセルサイズと書き込み電流の関係

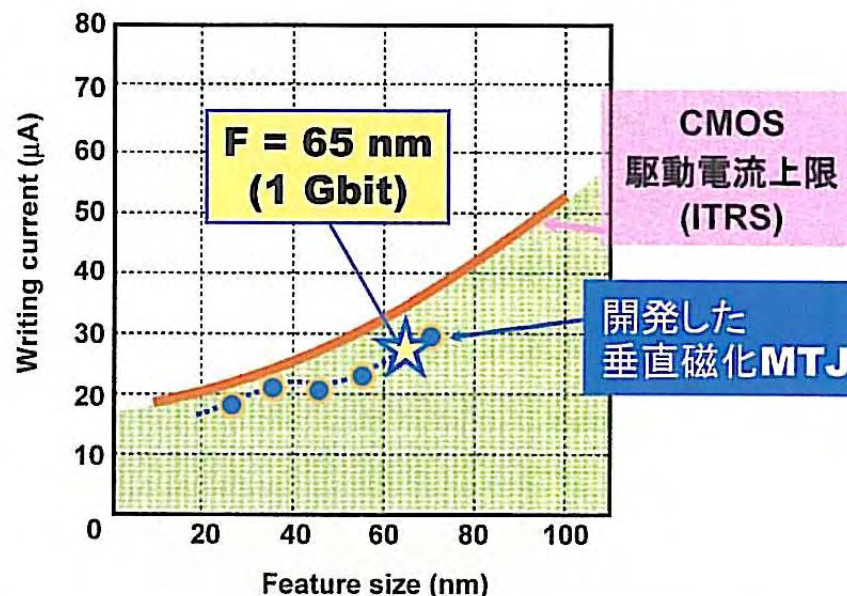
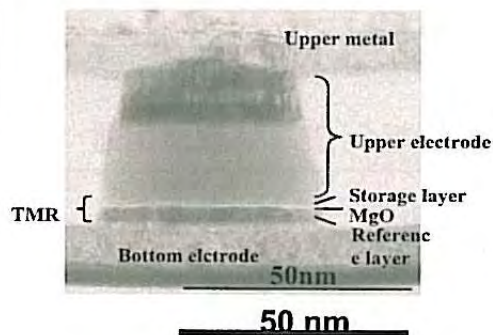


ここまで来たスピン注入磁化反転技術

垂直磁化MTJの開発: 第1世代(東芝)

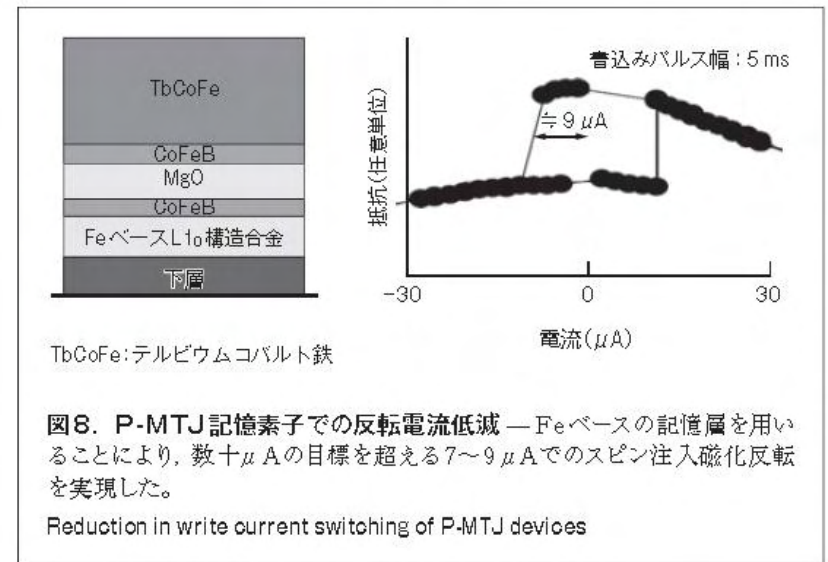
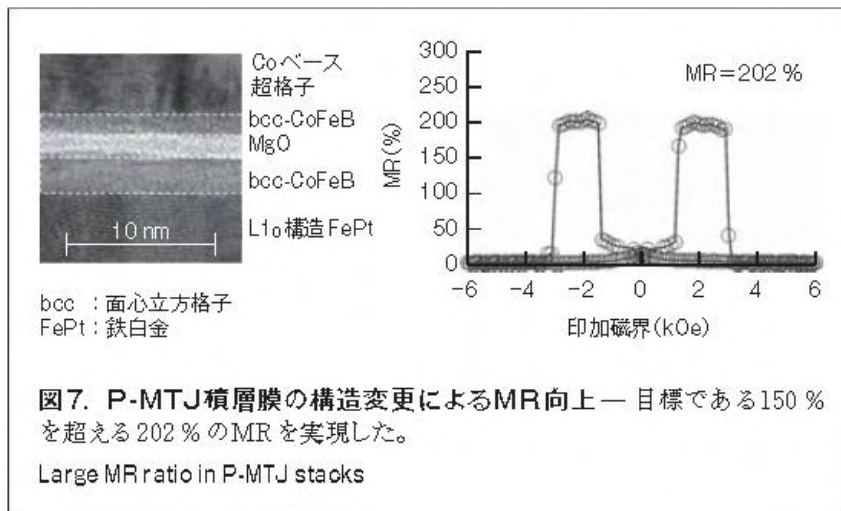
IEDM 2008(岸, 薬師寺, 他)

50nmサイズ垂直磁化MTJ素子
1 kbit CMOS集積回路における評価



開発した垂直磁化MTJにより1 Gbit対応可能な書込電流を達成
(同時に、 $50k_B T$ 以上の記録保持と10ns以下の高速書込も達成)

P-MTJ記憶素子のブレークスルー



- 與田博明(東芝): 垂直磁化方式のMTJ記憶素子を用いたSTT-MRAM; 東芝レビュー2011/09による

STO(スピントルク発振器)

- スピン注入磁化反転を起こす素子において外部磁界で磁化反転を阻止すると、歳差運動が一定振幅で起きる。
- 素子の抵抗はGMR効果を通じて、歳差運動の振動数で振動するので一定電流を流すと、素子の電圧がこの振動数で変化する。これが、スピントルク発振器(STO)である。
- S.I.Kiselev et al., Nature 425 (2003) 380.

シンプルな構造で高周波の発振器を作ることが出来る。

スピントルク発振器：最初の報告

2003年 Cornell大学
Kiselev et al. Nature 2003

金属多層膜素子

MR (%)

H (kOe)

磁気抵抗(MR)比が小さい

発振出力(arb)

周波数 (GHz)

3 mA

2.4 mA

1.7 mA

特徴

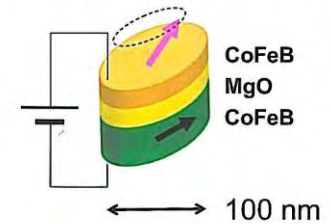
- ・ マイクロ波の自励発振
共振器、フィルター回路不要
- ・ サブミクロン、基板を選ばない
小型、低コスト
- ・ 周波数可変 (電流, 磁界)
1素子で複数の帯域をカバー

課題

- ・ 出力の増大: pW→μW
金属多層膜素子
磁気抵抗比 < 1%
- ・ 半値幅制御→Q値の増大

MgOトンネル接合(MTJ)素子

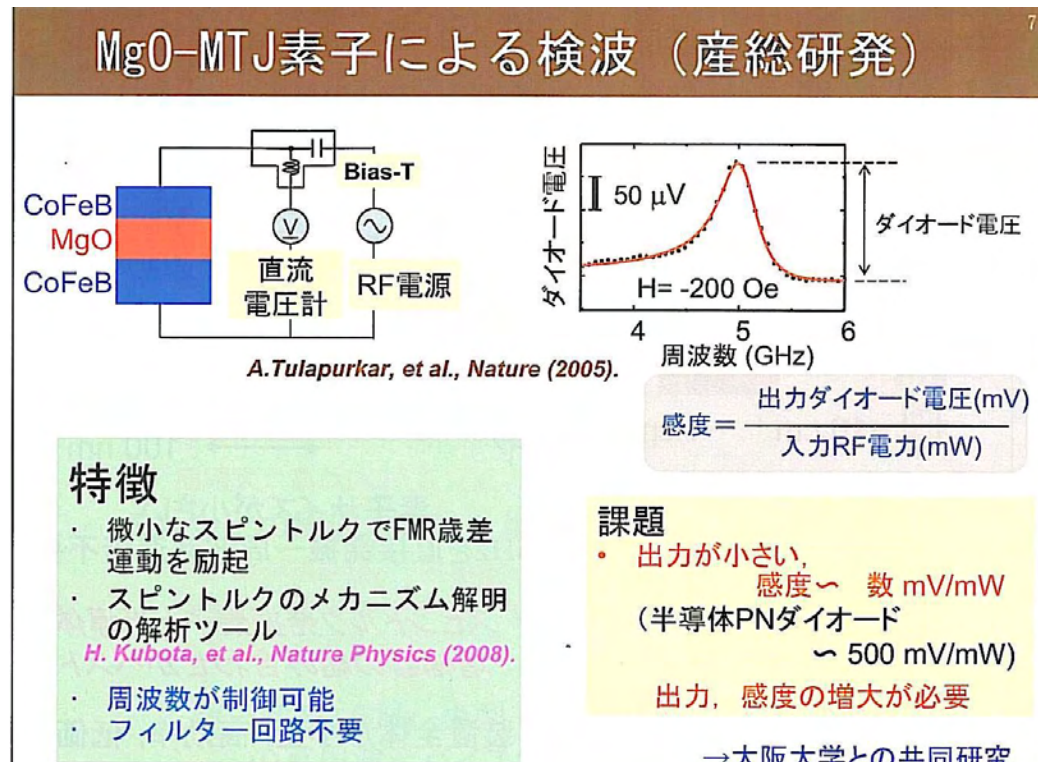
産総研の開発動向 →



素子サイズが小さい
GHzを直接発振→周波数通倍不要

STD(スピントルクダイオード)

- 産総研グループは、スピントルクダイオード素子に高周波電流を流すと、抵抗がその周波数で変化するのを発見。
- この整流作用をスピントルクダイオード効果と名付けた。
- 単純な素子でマイクロ波の検波ができるので応用上注目される。
- A.A.Tulapurkar et al., Nature 438 (2005) 339.



トンネル接合に高周波を加えると直流電圧が出る

コイルによらず電流を磁気に変換

- 当初はGMR素子によって 10^7 - 10^8 A/cm²という大電流密度を必要としたので実用は無理であろうと言われていたが、現在ではMgO-TMR素子を用いて 10^6 A/cm²台の実用可能な電流密度にまで低減することができた^[i]。
- これまではMRAMの記録のためには電流を流してそれが作る磁界で磁化反転をして記録していたので電力消費が集積化のネックであったが、スピン移行トルクを使うとMTJ素子に電流を流すことによって磁化反転できるので、高集積化が可能になる。
- かくして、ついに**人類は、コイルによらずに、電気を磁気に変換することに成功したのだ。**

[i] 久保田均, 福島章雄, 大谷祐一, 湯浅新治, 安藤功児, 前原大樹, 恒川孝二, D. Djayaprawira, 渡辺直樹, 鈴木義茂: 日本応用磁気学会第145回研究会資料「スピン流駆動デバイスの最前線」(2006.1)p.43

スピン移行トルクによる磁壁移動

•Yamaguchiらはスピン移行トルク効果によって伝導電子スピンのトルクが磁壁にされ、容易に磁壁移動が起きることを実験的に検証した。

•電流方向を反転すると移動方向が反転することが、温度ではなくスピン流によることを示している。

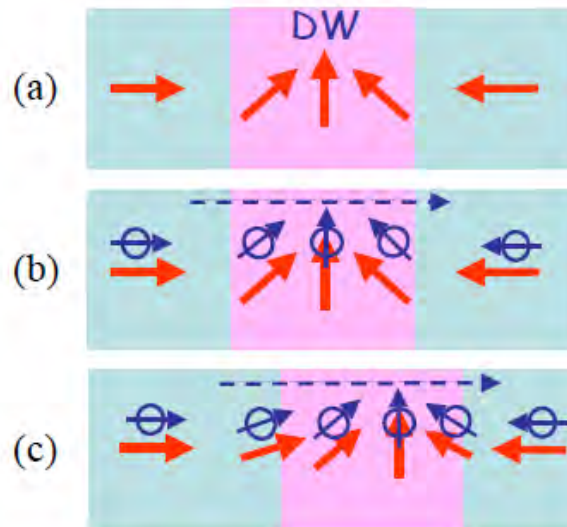


図 5 スピントランスファー効果による磁壁の電流駆動の説明図

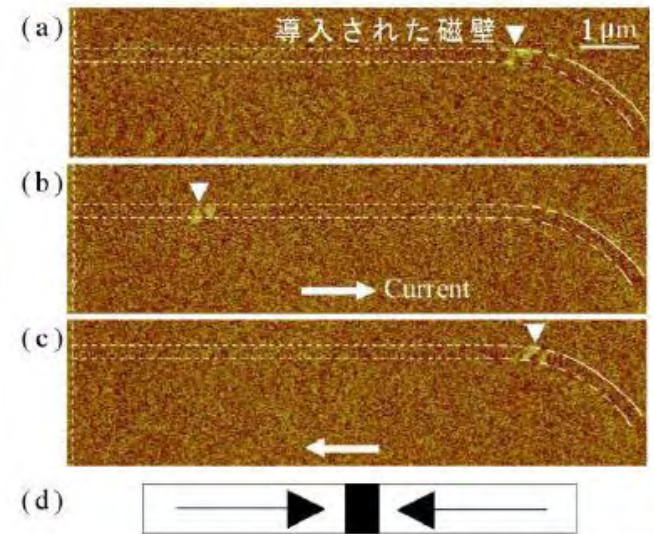


図 6 磁気力顕微鏡による電流駆動磁壁移動の観察結果

A. Yamaguchi, T. Ono, S. Nasu, K. Miyake, K. Mibu, and T. Shinjo, Phys. Rev. Lett., 92 (2004) 077205.

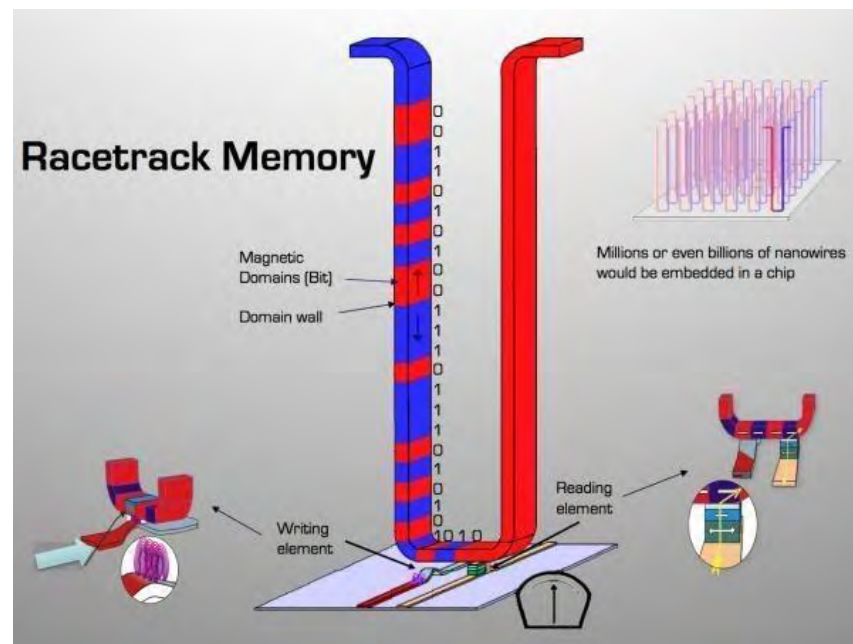
小野輝男:スピントロニクス入門セミナーテキスト(2011.12.16)

磁壁:磁区と磁区の境目、低電流でもスピン移行トルクで移動

Race track memory

- スピントランスファーによる磁壁移動の現象が注目されるきっかけとなったのは、IBMのParkinによるRace-track Memoryと名付けられた3次元メモリーの提案である。
- Race-track Memoryでは、一つの磁性細線中に多数の磁壁を導入し、これらを電流パルスで前後に移動させることで情報を伝達する。
- また、NECは、トンネル磁気抵抗素子を用いた磁気メモリーの情報書き込みに電流駆動磁壁移動を利用することで、スタティックランダムアクセスメモリ(Static Random Access Memory: SRAM)代替可能な高速メモリーが実現できるとしている。

S. S. P. Parkin, U.S. Patent 6,834,005 (2003); S. S. P. Parkin et al., Science 320 (2008) 190.

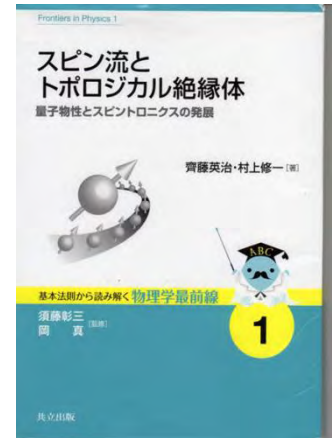


TECH.BLORGE

Racetrack memory is 100,000 times faster while using 300 times less energy, November 17, 2010

磁性細線に磁壁を導入し電流を流して動かして磁気記録する

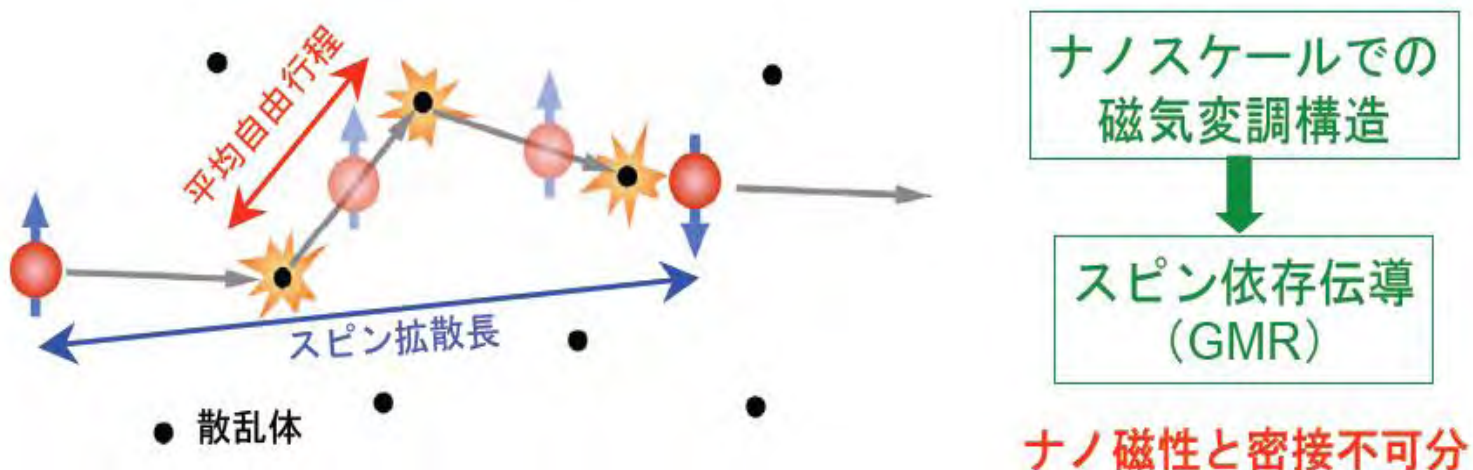
6. スピン流



- これまで、スピンの流れは電荷の流れに付随するものであったが、電荷の流れを伴わない**純粹のスピン流**の存在が理論予測され、ここ10年ほどの間に実験的に検証された。純粹スピン流を用いれば、ジュール熱を伴わずに情報を伝送できるので、集積回路の高密度化・微細化による金属配線によるエネルギー散逸の問題を解決できるものと期待されている。
- **スピン流の発生と検出**には、スピンホール効果、逆スピンホール効果の理論と実験的検証が大きく寄与した。
- さらに、熱スピン流による**スピンゼーベック効果**の発見、磁性絶縁体における**スピン波の運ぶスピン流**、さらには、スピン波とフォノンの相互作用、トポロジカル絶縁体など、スピントロニクスのベースとなる学理は大きく飛躍しつつある。

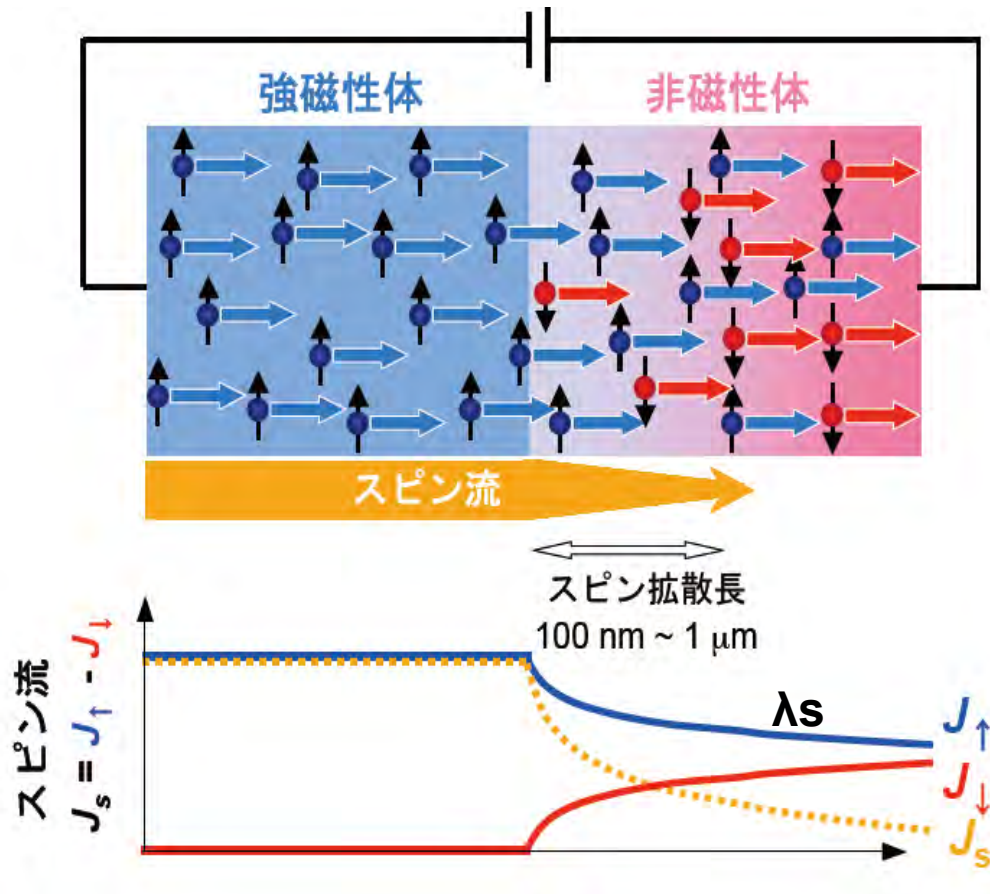
大きなトピックス:「スピン流」

- 電荷の流れとしての電流は、平均自由行程(1-10nm)で表される散乱を受けますが、スピンの流れは電子の不純物やフォノンとの衝突の際にあまり散乱を受けないためスピン拡散長は平均自由行程よりかなり長く、強磁性金属で5-10nm、非磁性金属では100nm-1 μ mもあります。
- 非磁性の誘電体ではmmに達するものもあります。



図は東北大高梨弘毅先生のご厚意による

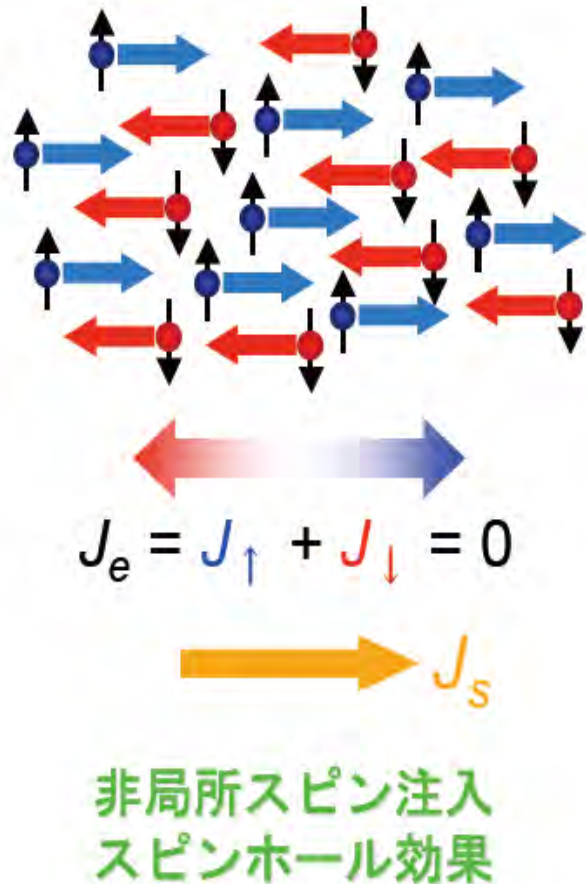
(1) 電流を伴うスピン流



- 非磁性体の中では本来↑スピンと↓スピンの電子の数は等しいのです。
- 強磁性体から↑スピンをもつ電子が非磁性体への移動すると、界面からスピン拡散長 λ_s 離れたところまでは↑スピンの数と↓スピンの数がアンバランスな状態が生じます。
- このことをスピン注入が起きているといいます。

図は東北大高梨弘毅先生のご厚意による

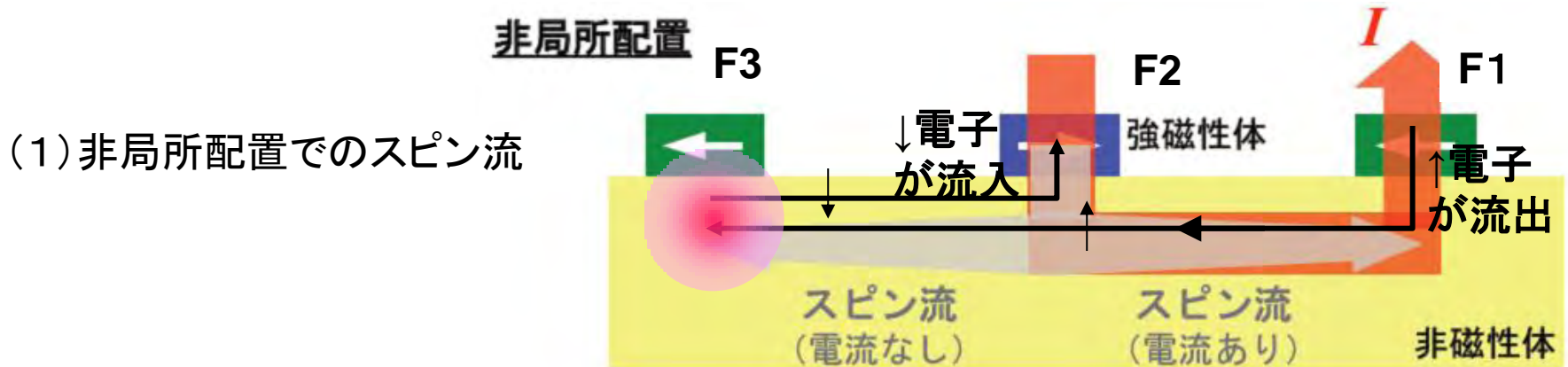
(2) 電流を伴わないスピンの流



- ↑スピンの電子が右方向に進み↓スピンの電子が左方向に進むとすれば、電荷の流れとしての電流は流れません。
- 一方、スピンだけを見ると、↑スピンは右側に、↓スピンは左側に流れますから、 $J_{\uparrow} - J_{\downarrow}$ で定義されるスピン流は右に向かって流れるのです。

図は東北大高梨弘毅先生のご厚意による

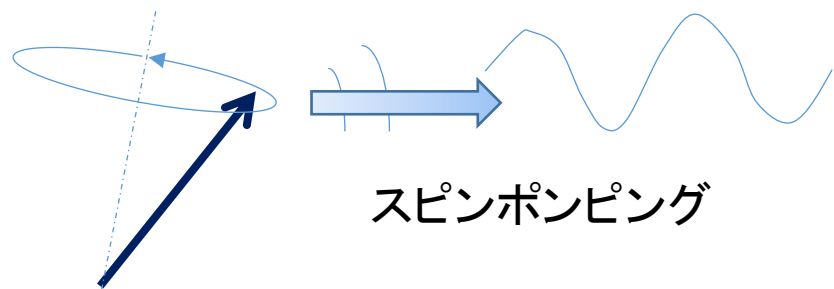
スピン流を作る



- 非磁性体に、3つの強磁性電極をつけて、F2の磁化はF1に反平行、F3の磁化はF1に平行とする。
- このとき、F2からF1に電流を流すと、F1から非磁性体に注入された \uparrow スピン電子はF2にははいれないのでF2・F3間に流れ出す。
- それでもF2からF1に電流を流さねばならないので、F2・F3間から \downarrow スピン電子が流れ込む。この結果、F2・F3間には正味の電流は流れないにもかかわらず、スピン流($J_{\uparrow} - J_{\downarrow}$)は左に流れる。
- この結果、F3付近には**スピンの蓄積**が起きる。

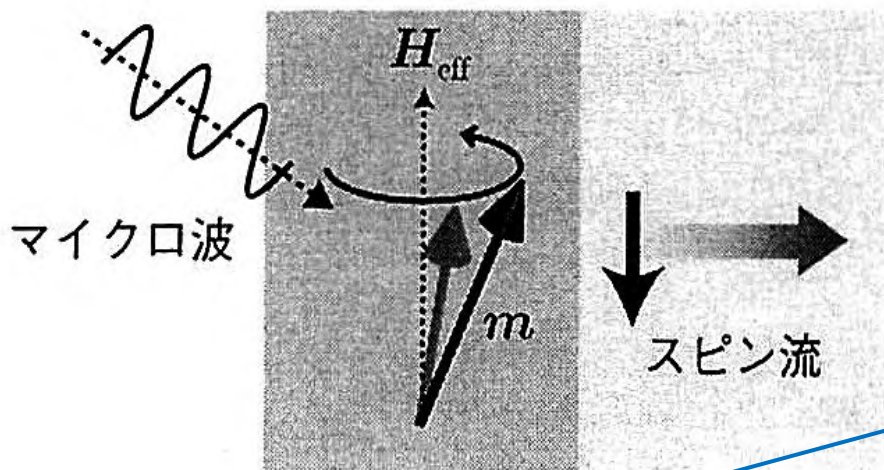
東北大高梨弘毅先生の作られた図に書き加えました。

スピン流を作る



強磁性体

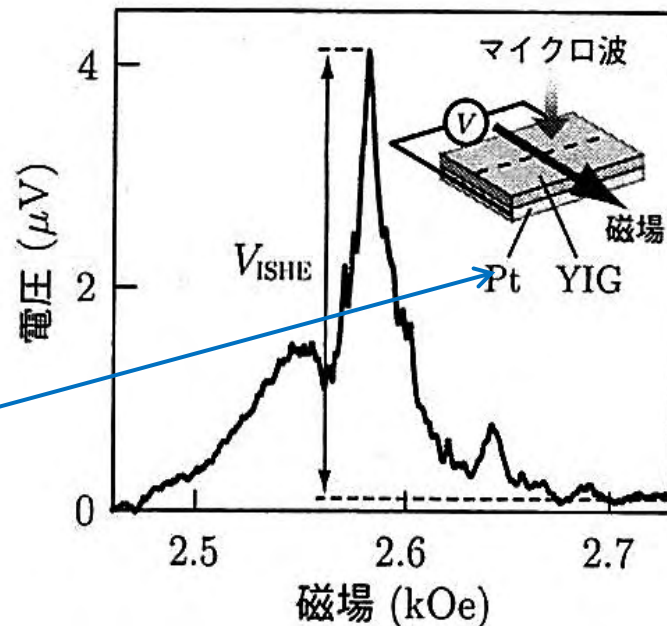
導体



(2) スピンプンピング

- 伝導電子から強磁性体へスピン角運動量が受け渡されることによりスピン移行トルクが生じ、磁化の運動が生じることの逆効果である。
- 強磁性体の磁化の空間的に変動があると、隣接する導体にスピン流が生じる。

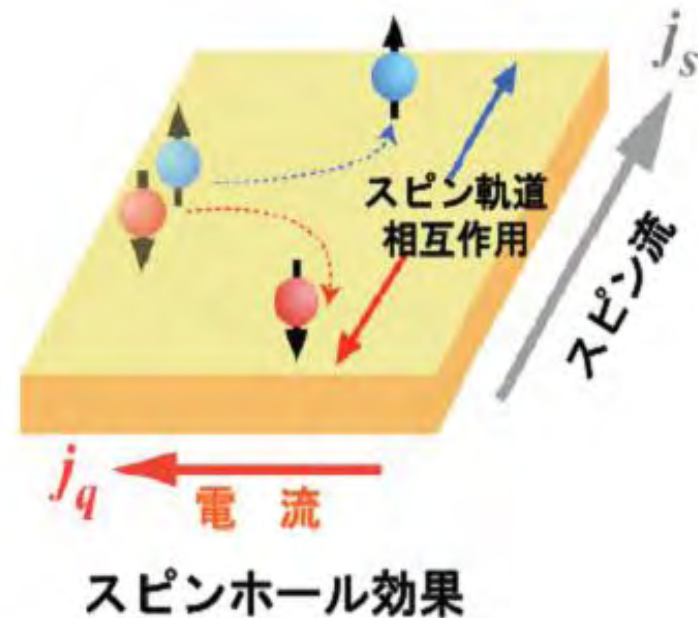
YIGからスピンプンピングでPtに生じたスピン流を後述の逆スピンホール効果で電圧に変換



スピン流をつくる

(3) スピンホール効果

- スピン流の性質を端的に表しているのがスピンホール効果である。
- 普通のホール効果は磁界下に置かれたキャリアがローレンツ力で電流に垂直な方向に曲げられる効果であるが、スピンホール効果では、電流が流れるだけで、スピン軌道相互作用の効果によって、 \uparrow スピンと \downarrow スピンの左右に分離され、電流 j_q と垂直方向にスピン流 j_s を生じる。



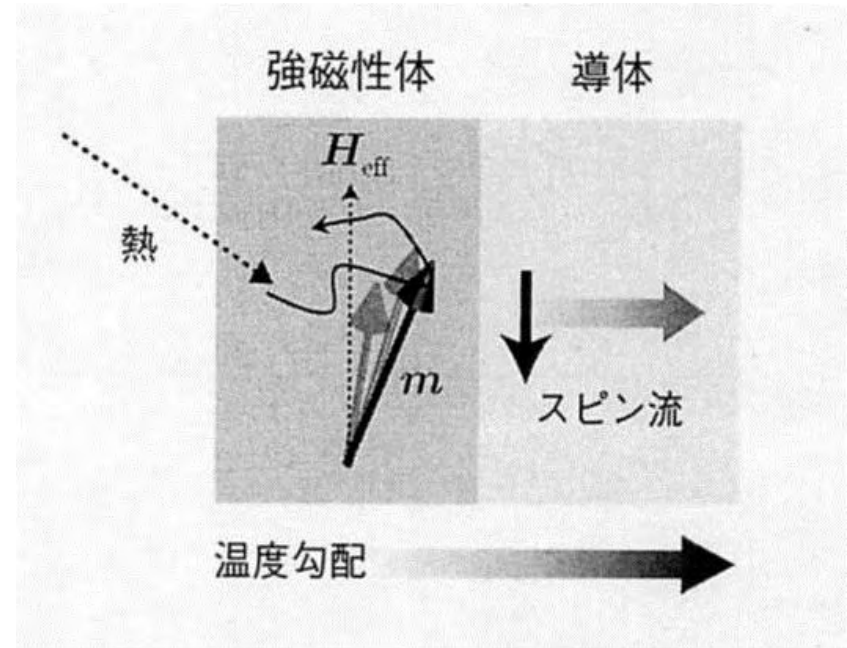
S. Murakami, N. Nagaosa, S.C. Zhang: Science 301 (2003) 1348.

図は東北大高梨弘毅先生のご厚意による

スピン流をつくる

(4) 熱スピン流

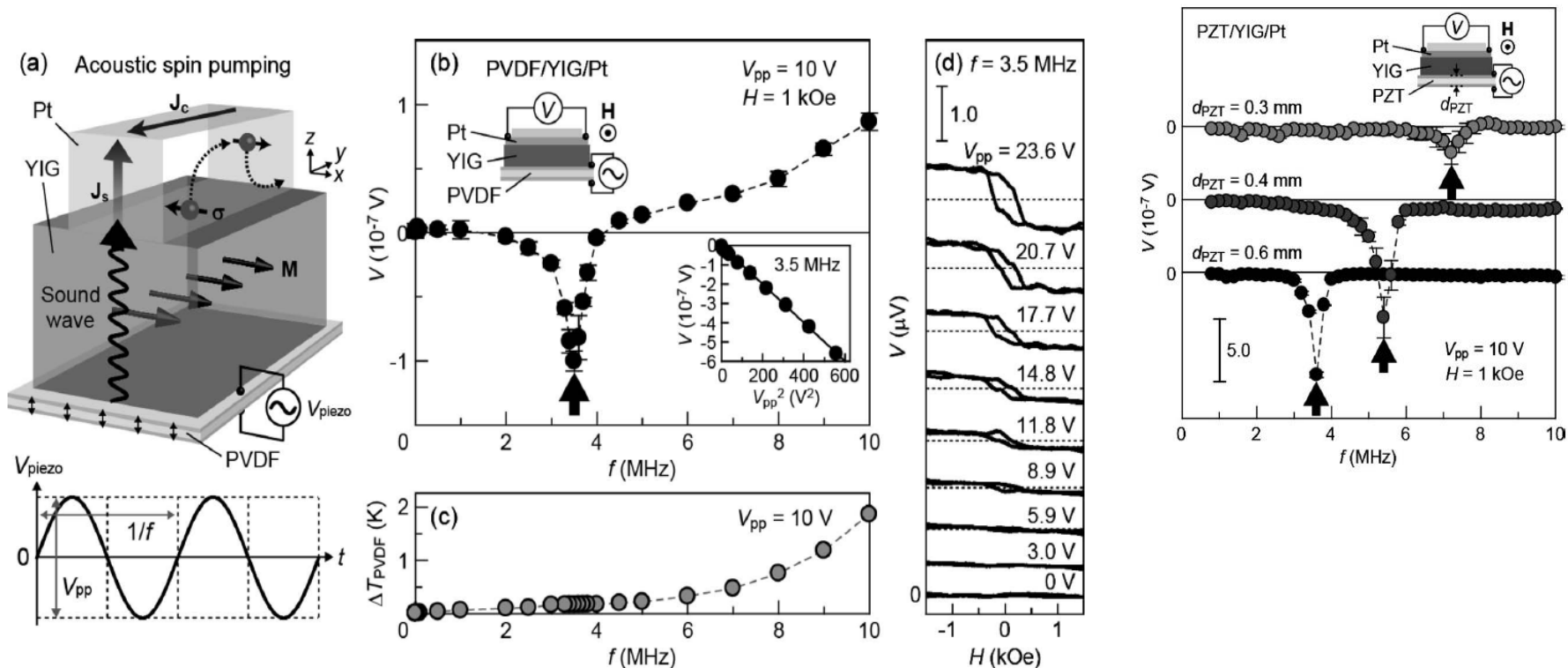
- スピンポンピングは熱を利用しても駆動できる。温度勾配からスピン流が生成できる。
- 強磁性体において熱揺らぎがあっても、磁界の周りの歳差運動の回転方向は変わらないので角運動量の移行がおきる。
- 強磁性体と非磁性導体が等温であれば、磁性体からのスピンポンピングと非磁性体からのスピンポンピングが平衡しているが、温度勾配があると、有限のスピン流が導体中を流れる。



このスピン流を後述の「逆スピンホール効果」で電圧に変換すれば温度勾配に応じた電圧を得る。これがスピンゼーベック効果である。

スピン流を作る

(5) 音響スピンプンピング



温度勾配を付ける代わりに、磁性絶縁体に音波を注入することでもマグノン有効温度を変調でき、スピン圧を生成可能

K. Uchida, H. Adachi, T. An, T. Ota, M. Toda, B. Hillebrands, S. Maekawa, and E. Saitoh: Nature Mater., 10,737 (2011).

スピン流をつくる

(6) 熱と音響の利用

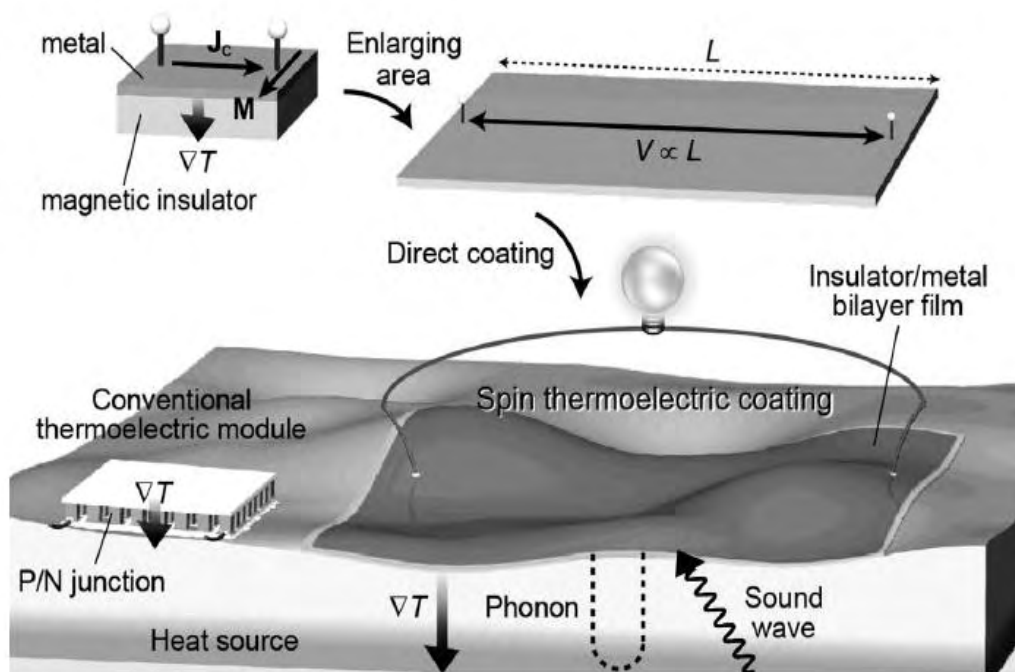


Fig. 6 Conceptual illustration of voltage generator based on SSE and ASP.

スピンゼーベック効果や音響スピンポンピングに基づくスピン流生成は、既存のエネルギー利用技術とは全く異なる原理に基づくものであり、

- (1) 絶縁体からもスピン圧・電圧を生成可能
- (2) 熱・音波を単一デバイス構造において同時利用可能
- (3) シンプルな二層構造であるので、大面積化・積層構造化が容易で低コストなどの希有な特性を有する。

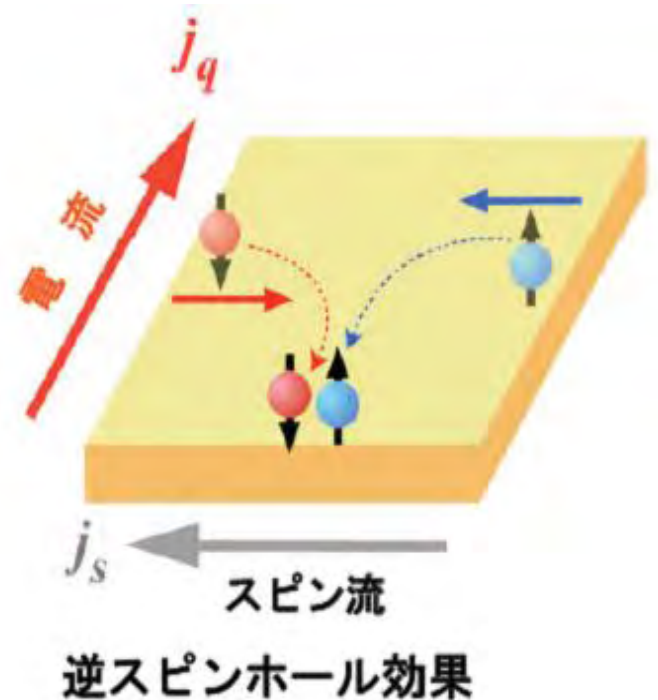
このような新規性を活かしたスピン流発電を実現するための要素技術として、2012年にNEC社とわれわれは共同で、塗布プロセスにより作製したスピンゼーベック素子の動作実証実験を報告している

A. Kirihara, K. Uchida, Y. Kajiwara, M. Ishida, Y. Nakamura, T. Manako, E. Saitoh, and S. Yorozu: Nature Mater., 11, 686 (2012).

スピン流を観る

逆スピンホール効果

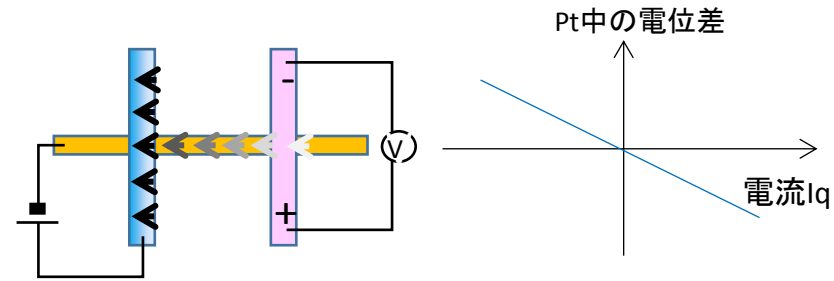
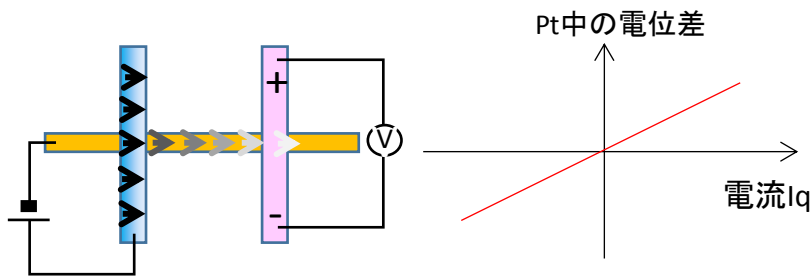
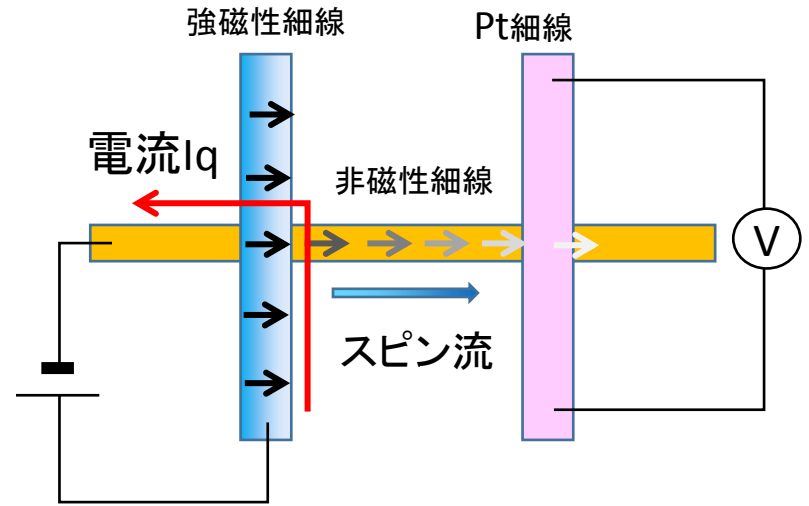
- スピンホール効果と逆にスピン流 j_s を流すと、垂直方向に電流 j_q が流れる効果がある。
- スピン軌道相互作用の効果で \uparrow スピンは左に、 \downarrow スピンは右に曲げられます。その結果、スピン流 j_s と垂直方向に電流 j_q が生じる。



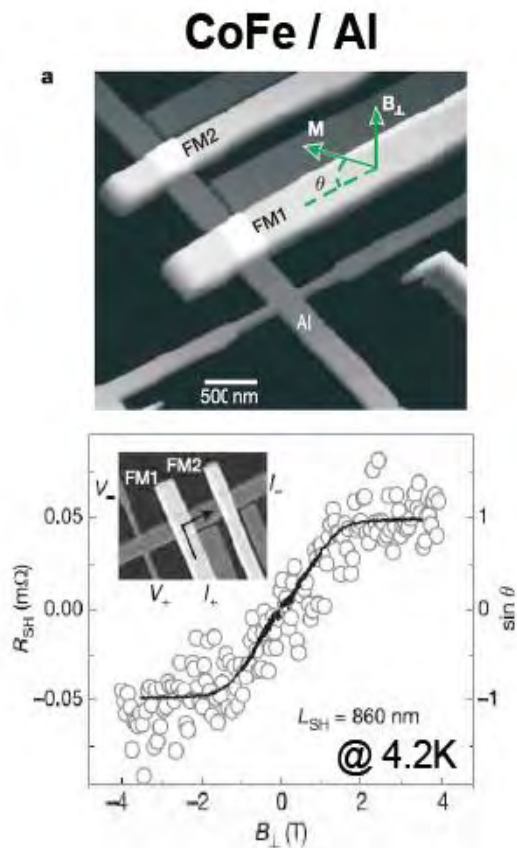
図は東北大高梨弘毅先生のご厚意による

逆スピンホール効果の実験

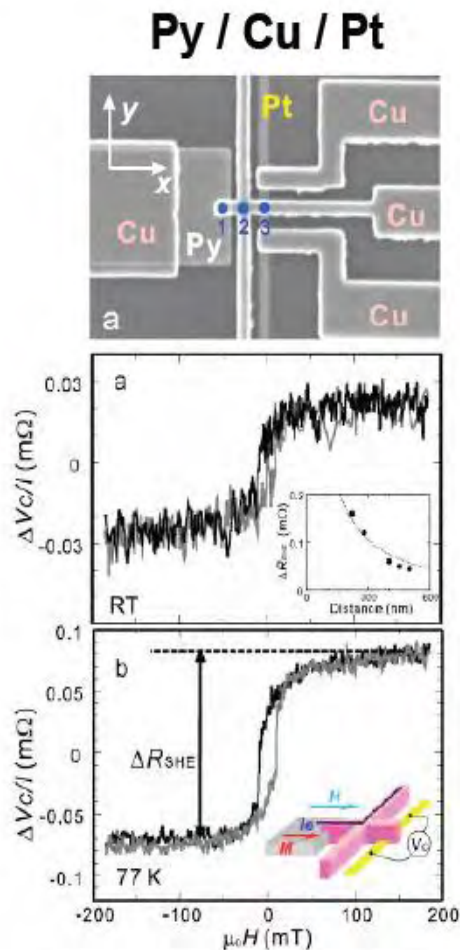
- 非局所配置において、電流を赤矢印のように強磁性細線から非磁性金属に流すと、スピンの蓄積がスピン流となって非磁性金属中を拡散する。
- スピン流がPt細線に達すると、Ptにスピン流が注入される。Pt内に入ったスピン流は、逆スピンホール効果によってスピン流と垂直方向の電流に変換され、Ptの両端に電圧が生じる。
- 強磁性体の磁化方向を反転すると、スピンホール電圧も反転する。



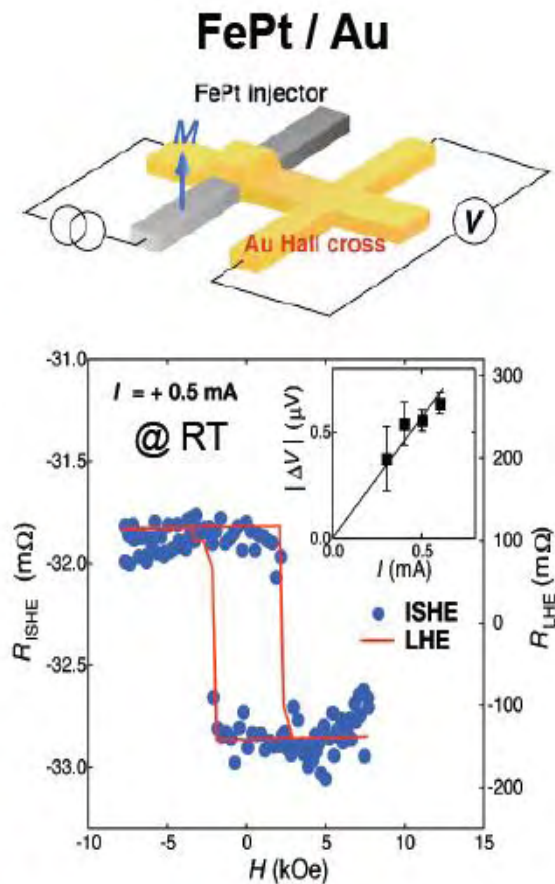
スピンホール効果・逆スピンホール効果の実験



S. O. Valenzuela, M. Tinkham,
Nature 442, 176 (2006).



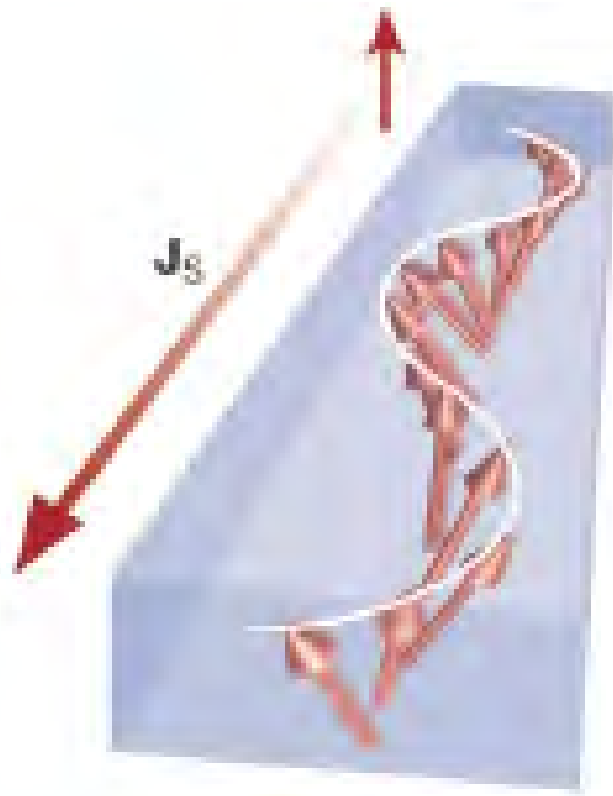
T. Kimura *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*,
98, 156601 (2007).



$$\alpha_H \sim 0.1$$

T. Seki *et al.*, 14P-C-11

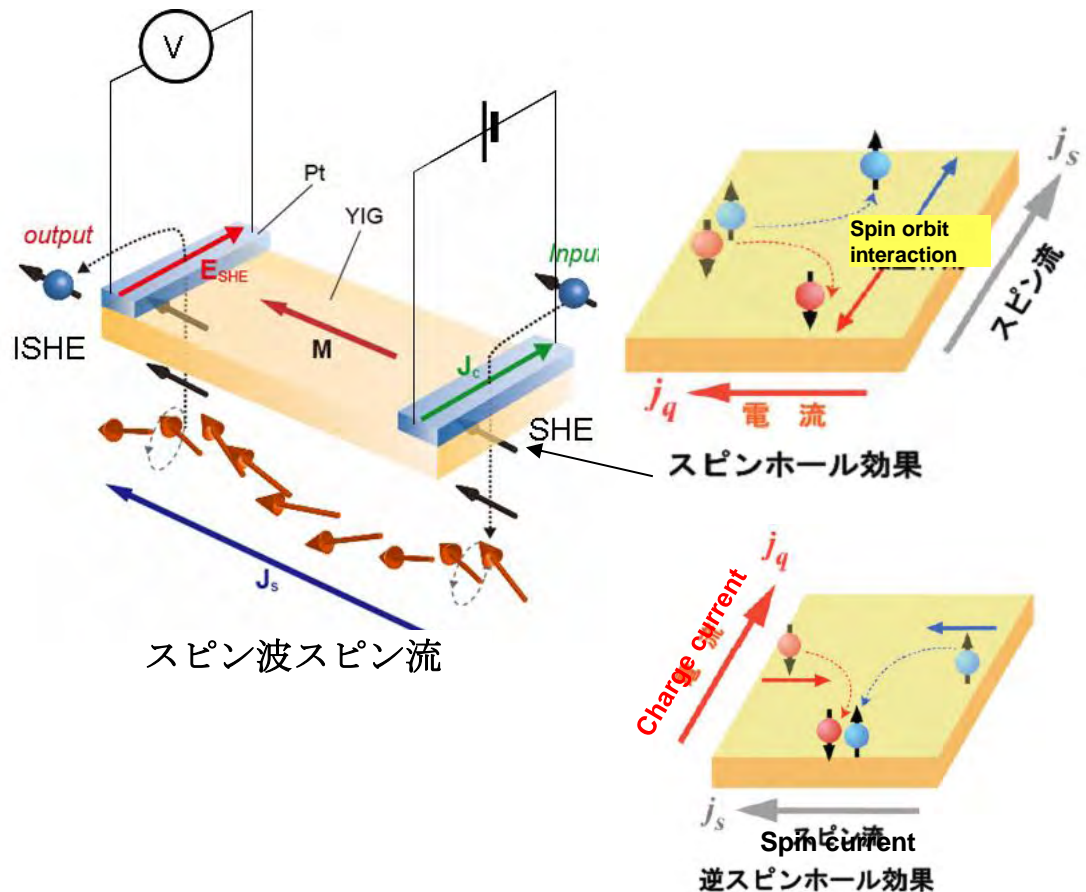
スピン波スピン流



スピン波とは磁性体中の磁化の波であり、ある種のスピン波はスピン流(スピン角運動量の流れ)を運ぶことができる。

絶縁体が電気を通す？

白金電極に電流を流すと垂直方向にスピン流が発生、これが磁性絶縁体のスピン波を誘起、スピン波が伝搬して対抗電極にスピン流を起し、逆スピンホール効果で電流に変換



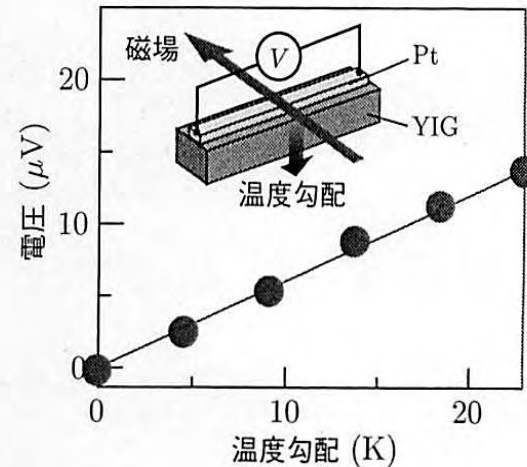
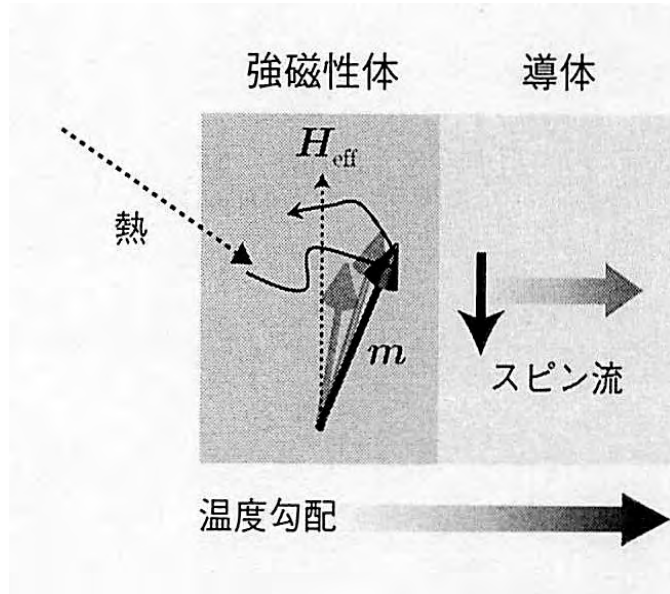
Y.Kajiwara et al., Nature 464 262 (2010)

スピнкаロリトロニクス

乱雑な一方向の運動を取り出す

スピンの非相反性を使って乱雑な運動を整流する

スピンゼーベック効果



磁性体に白金電極を取り付け、膜面に垂直に温度勾配をつけながら白金薄膜に生じる電圧を測定。

スピンゼーベック効果で白金にスピン流が注入され次いで逆スピンホール効果によって電圧に変換される。

スピナーベック効果の機構

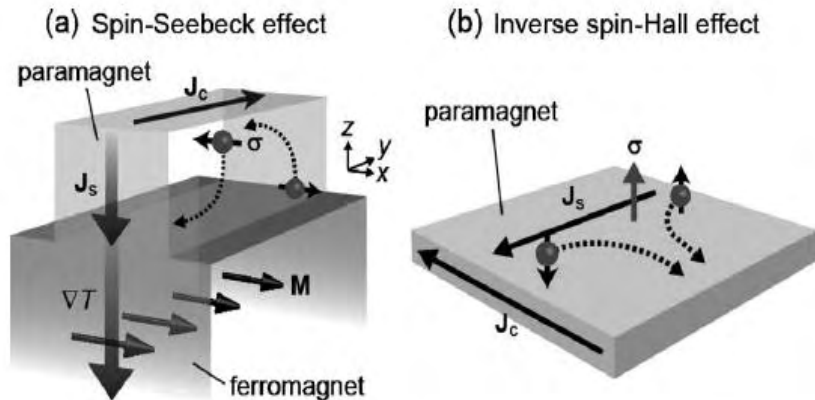
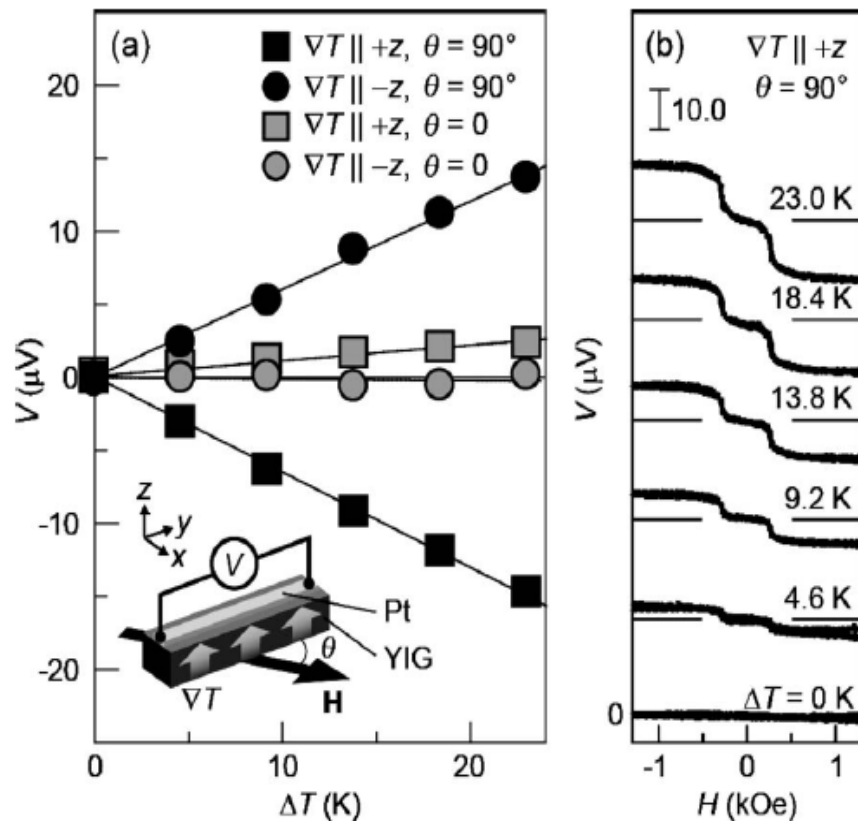
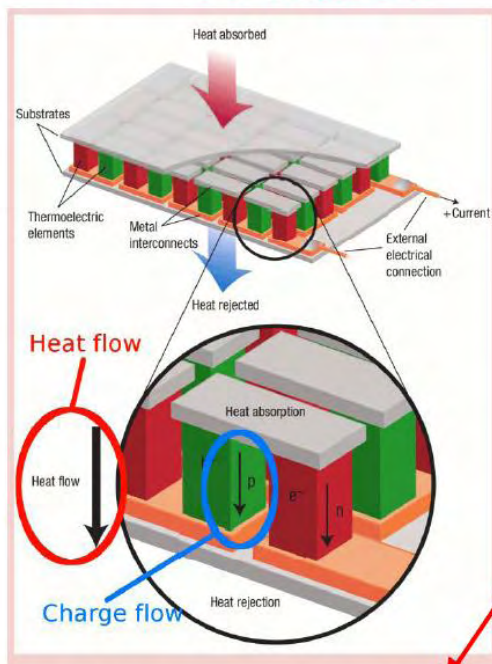


Fig. 1(a)に模式的に示したような強磁性体/常磁性体接合構造に温度勾配を付けた状況を考える。スピナーベック効果が発現すれば、強磁性層に生じたスピン圧によって常磁性層にスピン流が誘起される。このスピン流の起源は、強磁性中の局在スピン(マグノン)系と常磁性体中の伝導電子系との間に誘起される熱的非平衡性である



通常のゼーベック熱電素子の課題

ゼーベック熱電素子



熱流と電流が平行に、
同じ部分を通れる

性能指数

$$Z = S^2 \sigma / \kappa$$

[S: 熱電能
σ: 電気伝導率
κ: 熱伝導率
T: 温度]

通常トレードオフ

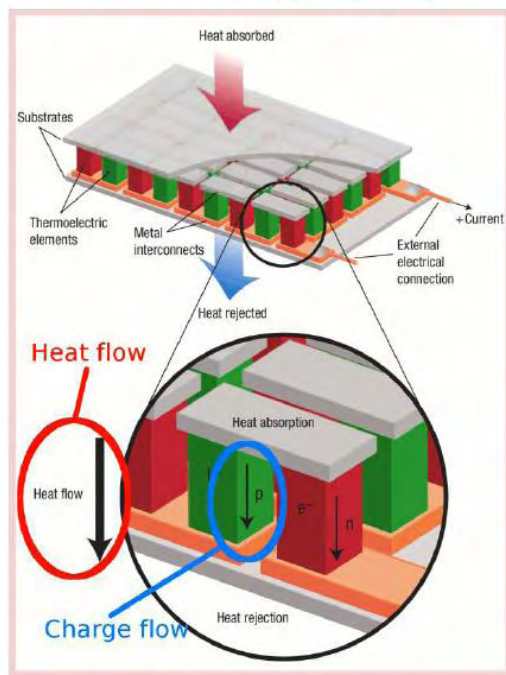
実用化には $ZT >$ が必須

Zは同じ物質の熱伝導率と
電気伝導率によって決まる

Wiedemann-Franz則 (σ / κ が一定)
による原理的な効率が存在

ゼーベック素子とスピンゼーベック素子の比較

ゼーベック熱電素子

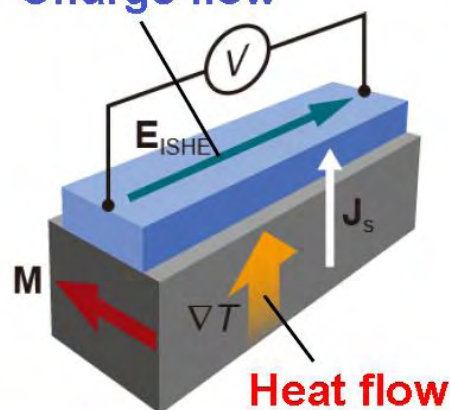


熱流と電流が平行に、同じ部分を流れる

スピンゼーベック熱電素子

スピンゼーベック効果を用いれば、シンプルな試料構造を用いて、絶縁体を含む様々な物質からの熱電変換が可能に！

Charge flow



性能指数：

$$Z_S = S_S^2 \sigma_{Pt} / \kappa_{YIG}$$

金属層の
電気伝導率

絶縁体層の熱伝導率

独立に設計可能！

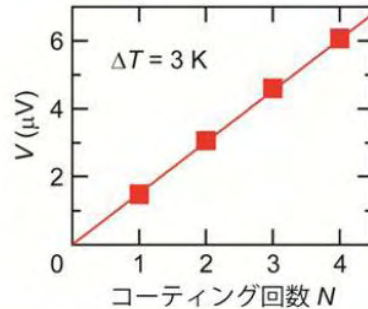
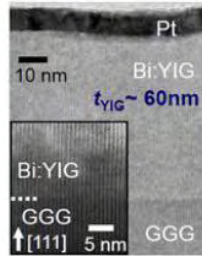
スピンを使うので熱流と電流が直交し、異なる部分を流れる

スピナーベック効果の実用化

MOD法を用いた熱電コーティング

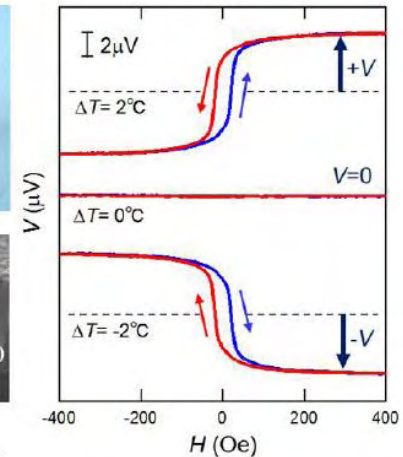
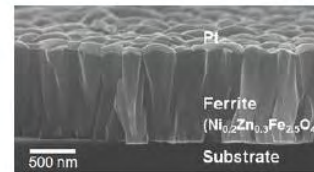
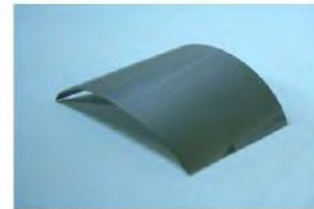
溶液を塗布して焼結させるだけで
スピナーベック素子を作製可能

- ① スピンコート ② 焼結 ③ スパッタリング



フレキシブル基板へのスピナーベック素子実装

フェライトめっき法を用いた
磁性絶縁体薄膜の作製



フレキシブルなポリイミド
フィルム上に作製したスピ
ナーベック素子

スピンと光

スピンの注入・蓄積の光学的観測

- 非磁性体へのスピンの注入を光学的に観測することは、磁性半導体電極から注入されたスピン偏極電子のもたらす発光の円二色性について行われ[i]、さらには、非磁性体に注入されたスピンの空間的な分布を磁気光学効果によりイメージングする試みも行われている[iii]。
- 最近、FePt/MgO/GaAsの接合構造においてスピン注入現象を発光の円偏光度によって捉えることが真砂らによって行われた[iiii]。このことについては、5番目の講演において詳細な報告がある。

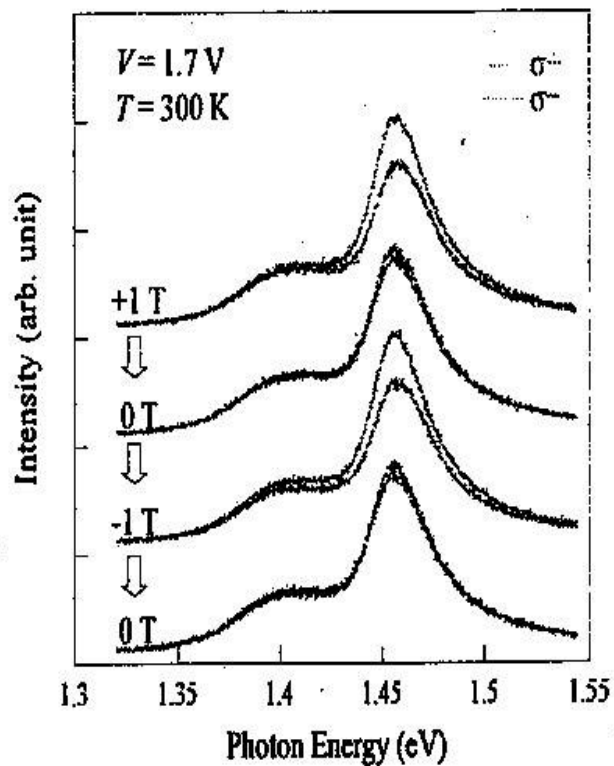
[i] Y. Ohno, D. K. Young, B. Beschoten, F. Matsukura, H. Ohno, D. D. Awschalom: Nature 402, 790 (1999).

[ii] Y. K. Kato, R. C. Myers, A. C. Gossard, and D. D. Awschalom: Phys. Rev. Lett. 93, 176601 (2004)

[iii] A. Sinsarp, T. Manago, F. Takano, H Akinaga: J. Nonlinear Opt. Phys. Mater., 17, 105 (2008).

スピンLEDのスピン注入特性

- 真砂氏は、FePt/MgO/LED構造を作製し、円偏光度の磁場依存性を測定した。
- ゼロ磁場でも1.5%の円偏光度が観測される。



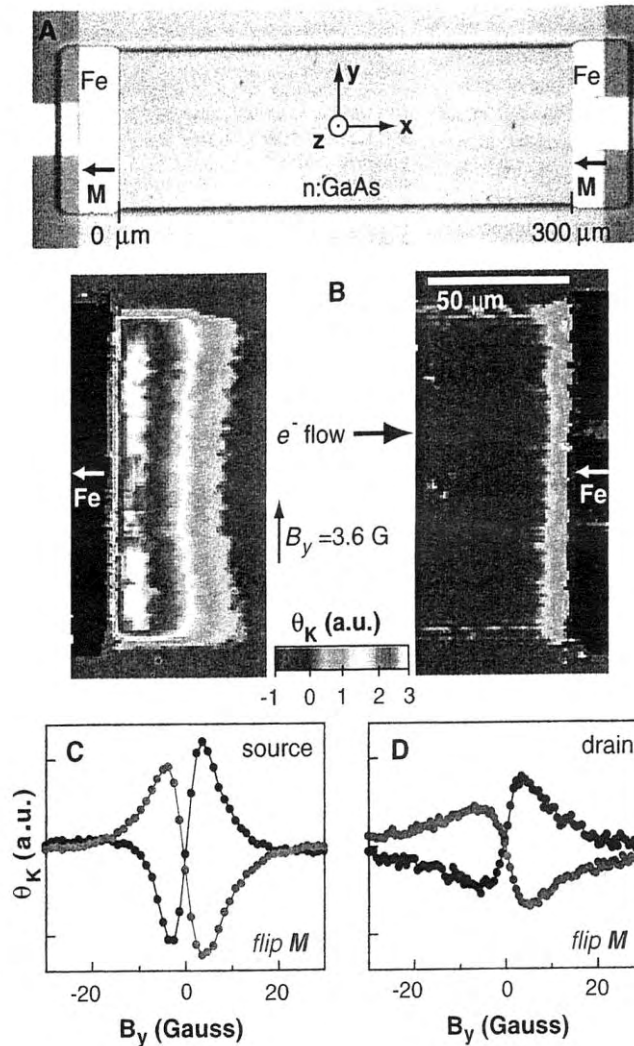
A. Sinsarp, T. Manago, F. Takano, H Akinaga:
J. Nonlinear Opt. Phys. Mater., 17, 105 (2008).

ELスペクトルの磁場依存

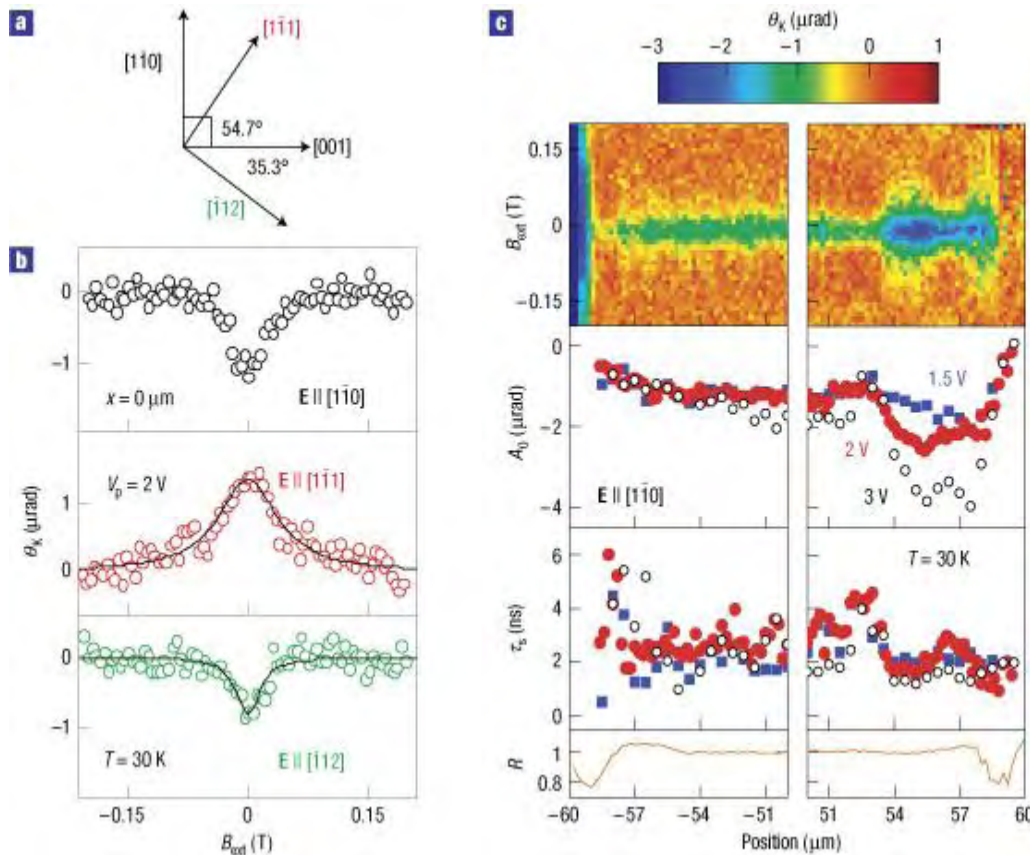
スピン注入の磁気光学的評価

- Crookerらは、Fe/GaAs/Fe ラテラル構造において、Fe→GaAsのスピン注入が起きていることを磁気光学的に検証した。

S. A. Crooker et al.: Imaging Spin Transport in Lateral Ferromagnet/Semiconductor Structures; *Science* Vol. 309. no. 5744, pp. 2191 - 2195 (2005)



スピンホール効果のカー効果によるイメージング



a, Relative orientations of crystal directions in the (110) plane. **b**, Kerr rotation (open circles) and fits (lines) as a function of B_{ext} for $E \parallel [1\bar{1}0]$ (black), $E \parallel [1\bar{1}1]$ (red) and $E \parallel [112]$ (green) at the centre of the channel. **c**, B_{ext} scans as a function of position near the edges of the channel of a device fabricated along with $w=118 \text{ nm}$ and $l=310 \text{ nm}$ for $V_p=2 \text{ V}$. Amplitude A_0 , spin-coherence time τ_s and reflectivity R are plotted for $V_p=1.5 \text{ V}$ (blue filled squares), 2 V (red filled circles) and 3 V (black open circles).

[Spatial imaging of the spin Hall effect and current-induced polarization in two-dimensional electron gases](#)

V. Sih, R. C. Myers, Y. K. Kato, W. H. Lau, A. C. Gossard and D. D. Awschalom **Nature Physics** 1, 31 - 35 (2005)

スピン注入磁化反転の磁気光学観察

- NHK技研の青島らは、 Co_2FeSi ハーフメタル電極を用いたCPP-GMR素子を作製し、電流誘起磁化反転を縦磁気光学効果を用いて観測することに成功した。(1)
- 垂直磁化膜GdFeCoを用いたCPP構造において、より大きな磁気光学信号を得ている。

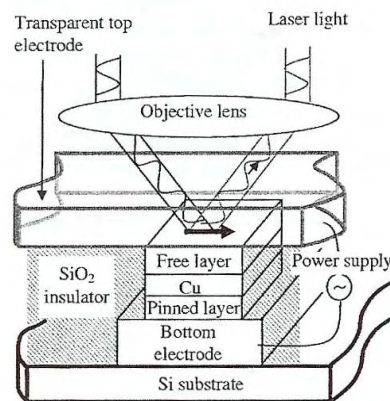


FIG. 1. Schematic illustration of spin-valve device with transparent electrode, and experimental setup. The plain arrow in the free layer indicates the direction of the magnetization. The device includes the bottom electrode of $[\text{Ta}(3)/\text{Cu}(50)/\text{Ta}(3)/\text{Cu}(50)/\text{Ru}(5)]$, the pinned layer of $[\text{Ru}(5)/\text{Cu}(20)/\text{Ir}_{22}\text{Mn}_{78}(10)/\text{Co}_{60}\text{Fe}_{34}(5)/\text{Ru}(0.9)/\text{Co}_{60}\text{Fe}_{34}\text{Co}_2\text{FeSi}(10)]$, an intermediate layer of $\text{Cu}(6)$, and the free layer with pinning of $[\text{Co}_2\text{FeSi}(6)/\text{Cu}(3)/\text{Ru}(3)]$, all in nanometers.

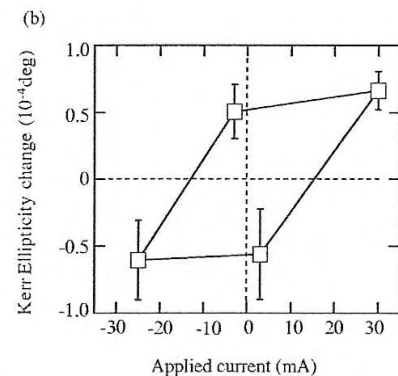


FIG. 4. (a) STS' and the (b) Kerr ellipticity characteristics for three spin-valve elements. Open circles in (a) indicate resistance as a function of the applied current of ± 30 mA with an increment of 2 mA. (b) The changes are defined as $[\eta_K - (-\eta_K)]$ in Kerr ellipticity for various applied currents of -3 , -25 , $+3$, and $+30$ mA. Kerr measurements are synchronized with resistance measurements [solid squares in (a)]. Averaged values over 60 points at each four different currents are plotted with error bars of standard deviation.

(1) K. Aoshima et al.: Spin transfer switching in current-perpendicular-to-plane spin valve observed by magneto-optical Kerr effect using visible light
 Appl. Phys. Lett. 91, 052507 (2007);

磁気特性の電界制御

- 磁化方向の制御には
(a) 外部磁界による
(b) スピン偏極電流注入
があるが、いずれも高密度
の電流が必要
- 最近注目されるのが
(c) 電界による磁化方向の
スイッチングである。
- 電界によりキャリア密度を
制御し、交換相互作用を制
御、あるいは、磁気異方性
を制御する。

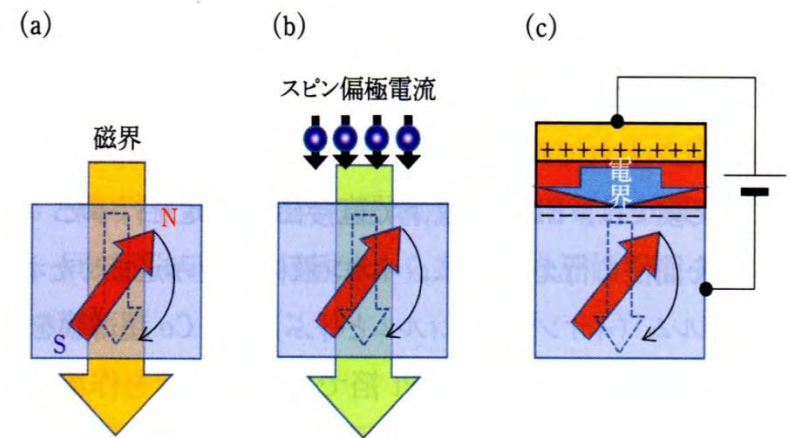
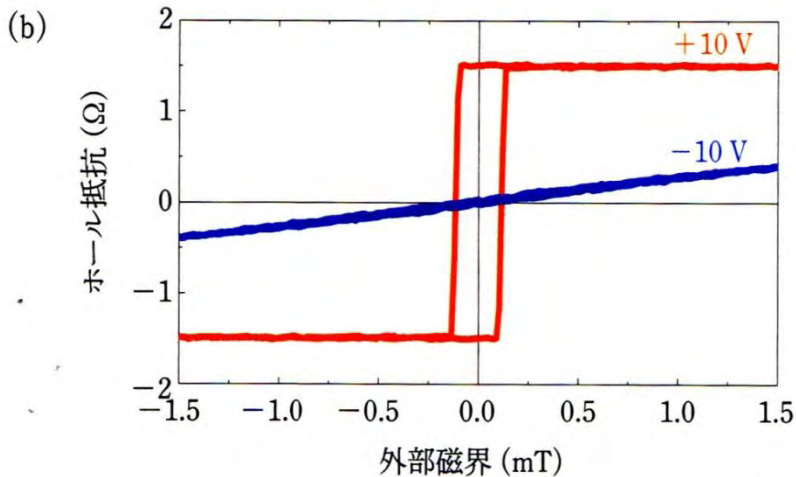
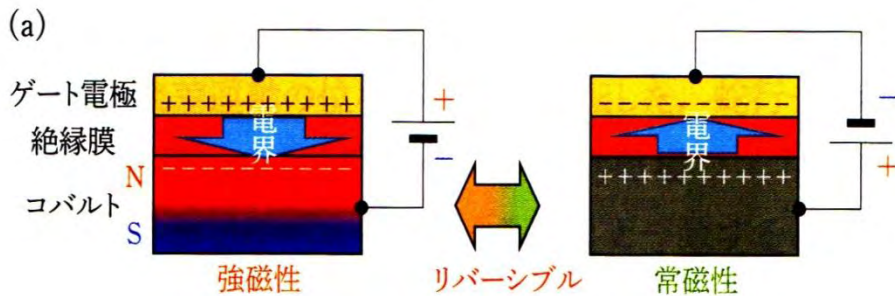


図1 (a)磁界、(b)スピン偏極電流、(c)電界による磁化反転の概念図。

電界制御強磁性・常磁性転移



- コバルト超薄膜
- 絶縁膜を挟んだコンデンサ構造
- 室温において電界の極性を反転するだけで強磁性が常磁性に転移する。
- T_c が12Kほど低下する
- 電子密度の変化による

トポロジカル絶縁体

- 2次元トポロジカル絶縁体

Bi超薄膜, CdTe/HgTe/CdTe量子井戸

- 3次元トポロジカル絶縁体

$\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ 合金、 Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3

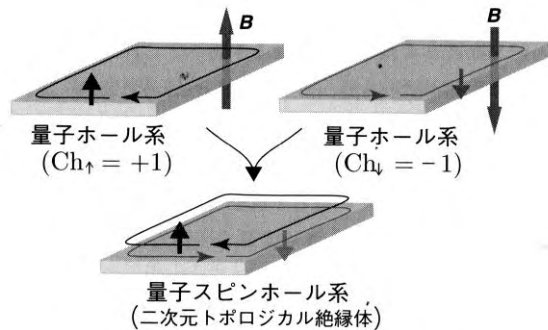
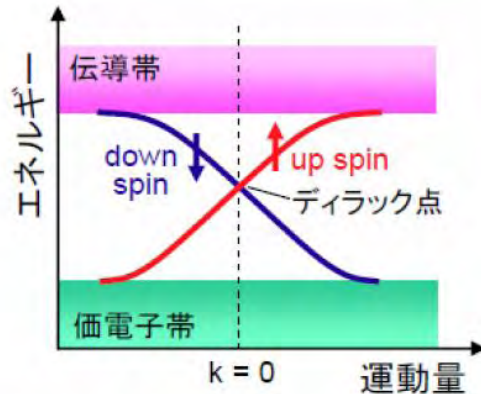
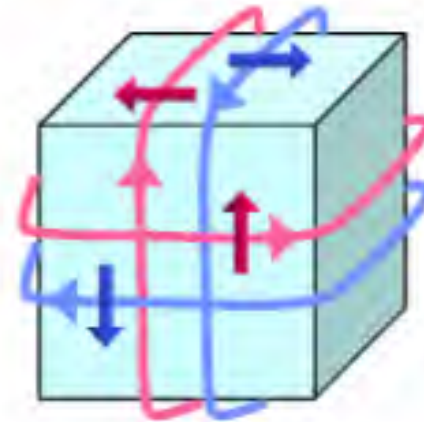


図 7.3 量子ホール系二つの重ね合わせとして量子スピンホール系を構成する



トポロジカル絶縁体の " エッジ " に現れるディラック電子系のエネルギー分散とスピン偏極



7.材料からみたスピントロニクス

スピン軌道相互作用から見た材料

- スピン軌道相互作用の大きな材料

例: Hf, Ta, W, Ir, Pt, Au, Pb, Bi

スピン拡散長が短い

→スピン流回路に不適

スピンホール効果・逆スピンホール効果が大きい

→スピンゼーベック電極

磁気異方性が大きい

トポロジカル絶縁体になりやすい

- スピン軌道相互作用の小さな材料

例: C系: Graphene, CNT

スピン拡散長が長い

→スピン流回路に適す

スピン偏極率から見た材料

・強磁性金属

・ハーフメタル

	PCAR	STS	文献値
Fe	0.48	0.42±0.02 [24,25,26]	0.43±0.03 [9]
Co	0.48	0.40±0.02 [24,25,26]	0.45±0.02 [9]
Fe ₅₀ Co ₅₀	0.50	0.50 [27]	

表1 PCAR 法により測定された様々な強磁性材料の分極率。

Composition	P	ref
Co ₂ MnSi	0.50-0.55	[28]
	0.56	[29]
	0.54	[30]
Co ₂ MnGe	0.55-0.60	[28]
Co ₂ FeGa	0.59	[31]
Co ₂ FeSi	0.49	[32]
Co ₂ MnSn	0.60	[33]
Co ₂ MnAl	0.56	[33]
Co ₂ FnAl	0.56	[34]
Co ₂ CrAl	0.62	[34]
Co ₂ VAl	0.48	[34]
Co ₂ Cr _{0.4} Fe _{0.6} Al	0.56	[35]
Co ₂ Cr _{0.6} Fe _{0.4} Al	0.54	[34]
Co ₂ MnAl _{0.5} Sn _{0.5}	0.63	[33]
Co ₂ Cr _x Fe _{1-x} Si	0.65	[36]
Co ₂ Mn _{0.95} Fe _{0.05} Sn	0.65	[37]
Co ₂ FeAl _{0.5} Si _{0.5}	0.60	[38]
Co ₂ Cr _{0.5} V _{0.5} Al	0.50	[34]
Co ₂ V _{0.67} Fe _{0.33} Al	0.54	[34]

表1 代表的な高スピン偏極（ハーフメタル）磁性材料の諸特性

Material	<i>T_c</i> (K)	<i>M</i> (μ_B /formula)	<i>P</i> (%)
NiMnSb	~ 730 (~ 700)	3.9 (4.0)	58 (99)
Fe ₃ O ₄	~ 860	4.1 (4.0)	-
CrO ₂	~ 390	2.0 (2.0)	90 ~ 96
La ₁₇ Sr _{0.3} MnO ₃	~ 380	3.5 (-)	78 ~ 83
Ga _{0.98} Mn _{0.02} As	< 160	- (4.0)	85 (92)
ZB-CrAs	- (> 1,000)	3.0 (3.0)	- (> 99)

T_c: 磁気転移温度, *M*: 飽和磁化 (GaMnAs は Mn 原子当り), *P*: スピン偏極率。
 ただし、() 内は理論値を示し、*P*の理論値はスピン軌道相互作用を考慮したときの値。
 出典は本文で引用した文献参照。

表2 PCAR 法により測定された様々な Co 基ホイスラー合金。網掛け部分は著者らのグループによる測定

MR素子から見たスピントロニクス材料

• 磁気抵抗素子 (磁気→電気)

- CIP-GMR 磁性体/非磁性体/磁性体/反強磁性体
 - 磁性体 : NiFe、CoFe
 - 非磁性体 : Cr, Cu
- CPP-GMR
 - 磁性体 : ホイスラー合金; $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Al}, \text{Si})$, $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}, \text{Ge})$, etc.
 - 非磁性体 : Cu
- TMR 磁性体/絶縁体/磁性体/反強磁性体
 - 磁性体 : Fe, CoFeB, FePt, ホイスラー合金
 - 絶縁体 : Al_2O_3 , MgO
- 反強磁性体 :
 - IrMn, FeMn, SAF(合成反強磁性体) CoFe/Ru/CoFe

STTから見たスピントロニクス材料

- スピン注入磁化反転素子：電流→磁気
 - CPP-GMR Co/Cu/Co
 - TMR CoFeB/MgO/CoFeB, CoFeB/MgO/CoFeB/L10FePt, TbCoFe/CoFeB/MgO/CoFeB/L10FePt
- スピントルク発振子・スピントルクダイオード
 - CPP-GMR Co/Cu/Co
 - TMR CoFeB/MgO/CoFeB
- スピン波スピン流
 - $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG)

スピン流から見たスピントロニクス材料

- スピン流デバイス

- スピンホール効果 Al/Pt, FePt/Au

- スピン注入

- 磁性体 : Fe, Fe₃Si, FeNi , YIG

- 非磁性体 GaAs, Si, Graphene, Al, Cu

- スピンゼーベック効果

- FeNi/Pt

- YIG/Pt

- Ni_{0.2}Zn_{0.3}Fe_{2.5}O₄

スピントロニクス応用

- HDDヘッド→3D recording
- スピンMRAM→Universal memory
- スピンMOSFET→Normally off computer
- レーストラックメモリー
- 磁界センサー→Magnetic cardiograph
- スピントルク発振素子→Mobile communication
- スピントルクダイオード→Mobile communication
- スピンゼーベック素子→Energy harvesting

JST S-イノベ「スピン流」

課題名	PM	開発リーダー
		研究リーダー
3次元磁気記録新ストレージアーキテクチャのための技術開発	○	佐藤 利江 株式会社東芝 研究開発センター フロンティアリサーチラボラトリー 室長
		久保田 均 独立行政法人産業技術総合研究所 ナノスピントロニクス研究センター 金属スピントロニクス研究チーム 研究チーム長
トンネル磁気抵抗素子を用いた心磁図および脳磁図と核磁気共鳴像の室温同時測定装置の開発		西川 卓男 コニカミノルタオプト株式会社 LC事業推進室 マネージャー
	○	安藤 康夫 東北大学大学院 工学研究科応用物理学専攻 教授

3次元磁気記録新ストレージアーキテクチャのための技術開発

- 記録ビットの極微化によって高密度化の限界に直面している磁気記録のブレークスルーを目指し、新原理に基づく3次元磁気記録技術の開発を行います。具体的には、スピントルク発振素子を用いた新機能素子であるスピントルク発振素子が記録媒体中に誘起する磁気共鳴現象を利用して、多層磁気媒体への選択的記録・再生を行います。この技術により、磁気記録の飛躍的な高密度化を可能とし、新原理に基づいた超大容量ストレージを実現します。

トンネル磁気抵抗素子を用いた心磁図および脳磁図と核磁気共鳴像の室温同時測定装置の開発

- 生体からの微小磁場検出装置の開発を行います。従来のSQUIDによる生体磁気計測では、液体ヘリウム容器が障害となりセンサーを生体に密着できませんでした。
- 本研究では、室温で動作する**多数のトンネル磁気抵抗素子**を鎧帷子状に配置し胸・頭部の皮膚に密着させて**心磁図・脳磁図を得ることができる装置**を開発します。これにより、近接計測による空間分解能を格段に向上できるため、安価で実用的な医療機器として飛躍的普及が期待できます。

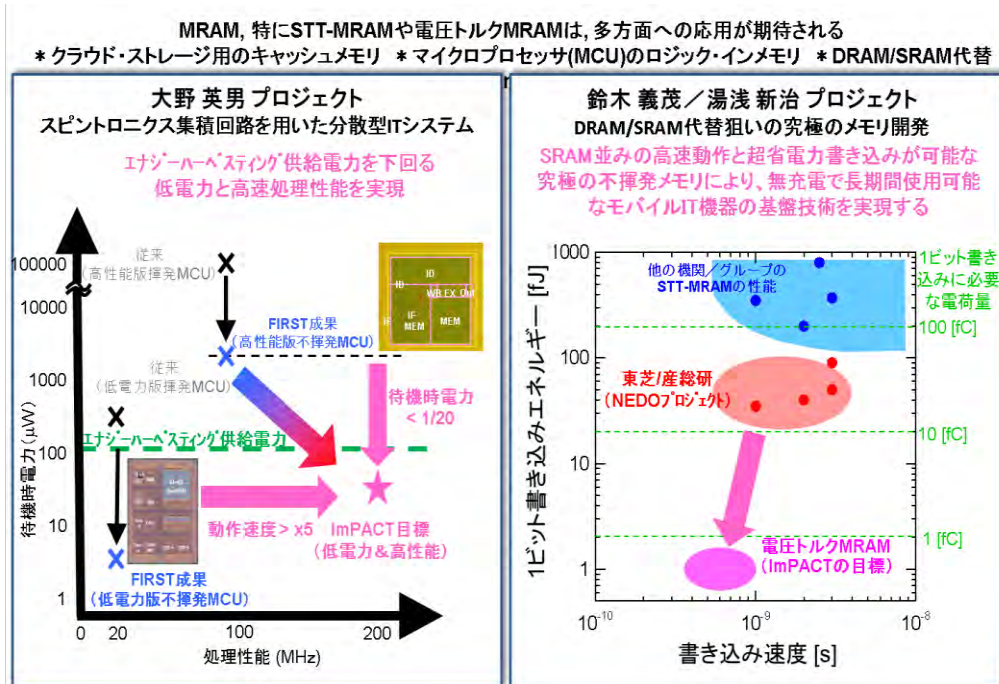
無充電で長期間使用できる究極のエコIT機器の実現

ImPACT

PM:佐橋政司



- 現在のコンピュータエレクトロニクスは、演算処理部も含めたメモリ階層のすべてが揮発性であり、電源オフで記憶情報が失われてしまうため、情報保持には電力を供給する必要があります。そのため待機電力、動作電力ともに大きく頻りに電力供給(充電)を行なう必要があります。本プログラムでは、すべての階層で、不揮発性をベースとする最先端のスピントロニクス物理を駆使して、電圧で情報を記憶させるspinメモリなどのspin素子の開発に挑み、IT機器の電力使用量を劇的に減らし、充電ストレスのないエコ社会を実現します。



スピントロニクスと化学

スピン化学

- 2つのラジカルからできたラジカル対は、エネルギー尺度では無視できるような弱い磁界の作用によって反応効率が変わる*。
- 基底状態では、反応で一重項(反平行スピン)が実現するが、ラジカルでは反応に三重項(平行スピン)が関わる。
- 反応がスピンの依存する。

*坂口喜生:
「スピン化学—化学結合論再入門」
裳華房2005

- 磁性体から有機物へのスピン注入は、グラフェンで実証されている。
- スピンが注入された状態は、ラジカルと同じと考えられる。
- 従って、スピン注入を用いて化学反応を制御することは、原理的に可能。
- ここでは、問題提起に留める。ぜひチャレンジされたい。

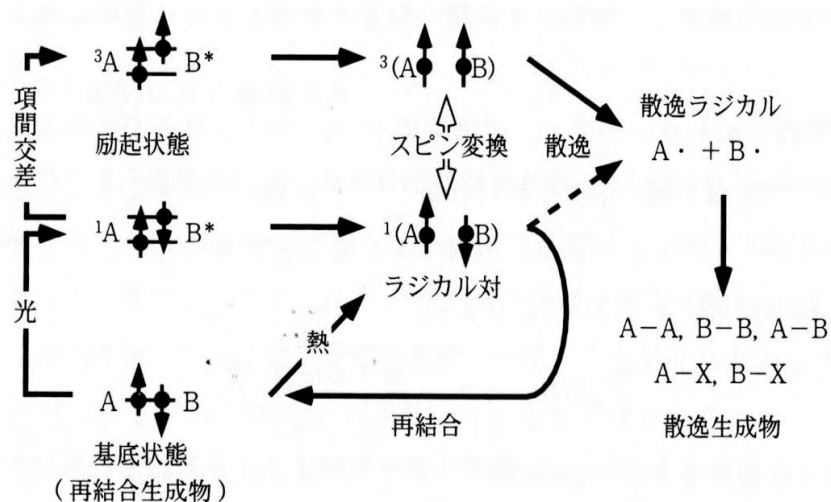
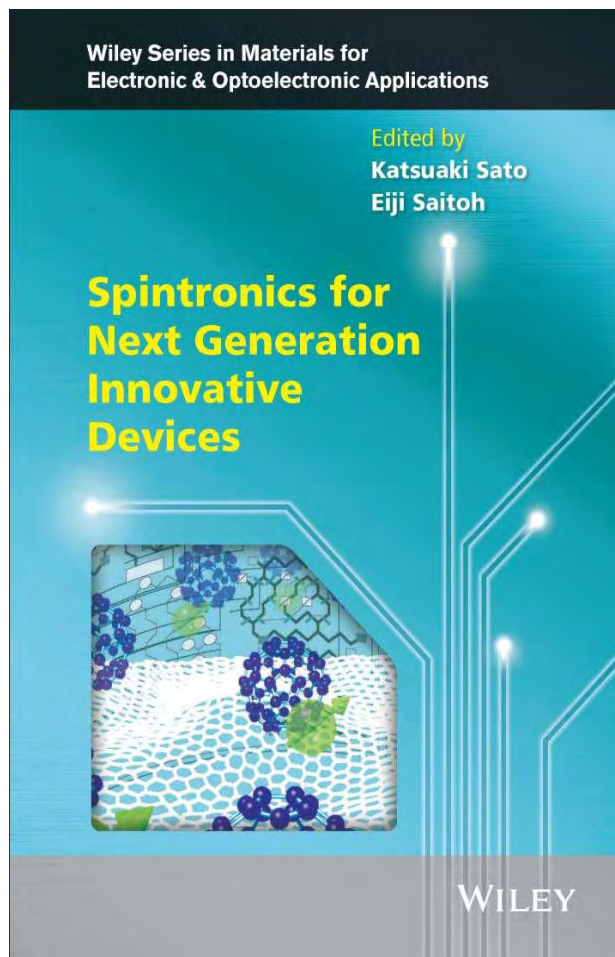


図 3・10 ラジカル対生成を含んだラジカル対機構

K.Sato and E.Saitoh eds. Spintronics for Next Generation Innovative Devices



- John Wileyから2015年6月刊行
- さきがけ「次世代デバイス」領域のスピン트로ニクス研究者による研究成果を解説

熱い視線を浴びる発展途上分野

- スピン注入、スピン蓄積、スピン緩和などスピン流の制御は、CMOSに代表されるSiのデバイスが限界を迎えつつあるいま、それに代わる新しい革新的次世代デバイス技術の芽として熱い視線を浴びている。
- スピン科学は、ナノという舞台を得て、大きく育ちつつある。Nagaosaは、強磁性体における異常ホール効果をベリー一位相という量子論の深淵のコンセプトで説明し、彼は固体の中に宇宙論が成立すると述べている^[ii]。
- この分野は進歩が速すぎて一時も目が離せない。理論と実験がかみ合って、さらに新しい世界が開かれる予感を感じる。
- 材料・化学からの新しいアプローチを期待したい。

^[ii] 永長直人: 固体物理41 (2006) 877, 同42 (2007) 1, 同42 (2007) 487.