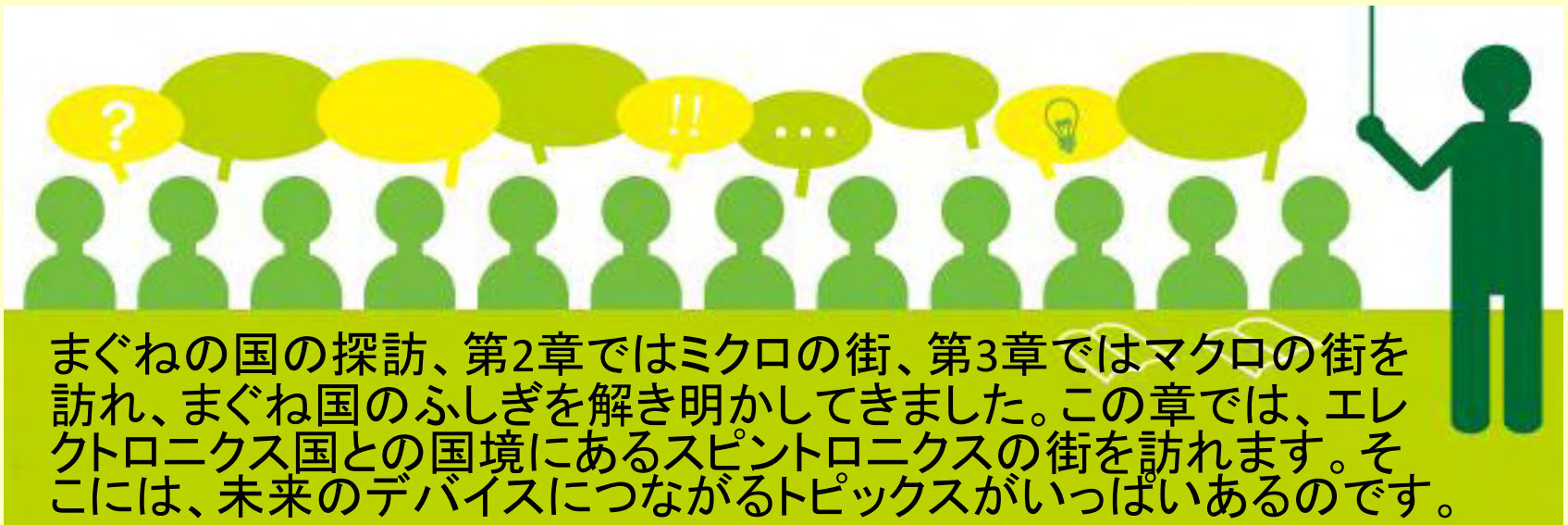


セミナー

第4章 まぐねの国の新しい街



まぐねの国の探訪、第2章ではミクロの街、第3章ではマクロの街を訪れ、まぐね国のふしぎを解き明かしてきました。この章では、エレクトロニクス国との国境にあるスピントロニクスの街を訪れます。そこには、未来のデバイスにつながるトピックスがいっぱいあるのです。

第4章の内容

- スピントロニクス^oの街
 - 4.1. 巨大磁気抵抗効果GMR^oってなに？
 - 4.2 トンネル磁気抵抗効果(TMR)
 - 4.3 「スピントラ^oンスファートルク」がMRAM^oを変える

スピントロニクスの街

- この街の住民は、エレクトロニクス国とまぐね国の2重国籍を持っていて、「電荷」と「スピン」という2つの顔をもって暮らしています。このため、電荷の動きによる電気伝導現象とスピンのもつ磁性とが絡み合っ「スピントロニクス」という新しい概念をつくりあげました。この街では、巨大磁気抵抗効果(GMR)、トンネル磁気抵抗効果(TMR)、スピントランスファートルクなど、磁気だけを考えてきたこれまでの街にはない新しい事象が見つかりました。またこれらの新しい事象を用いたデバイスが育ち初めています。
- 「スピントロニクス」の街が生み出した巨大磁気抵抗(GMR)素子の登場によって、それまで磁気を読み出しにコイルをつかっていたハードディスクは一気に高密度になりました。この結果、まぐね国の特産物であった磁気テープはほとんど姿を見せなくなりました。また、この街からあたらしい不揮発性メモリMRAMという特産物も生み出されました。さあ、この街を歩くためのガイドブックを提供しましょう。

4.1 巨大磁気抵抗効果GMRってなに？

- 江崎によって拓かれた半導体超格子をはじめとするナノテクノロジーは、半導体における2次元電子ガス、量子閉じこめ、バンド構造の変調など半導体ナノサイエンスを切りひらき、HEMT, MQW レーザなど新しい応用分野を拓きました。
- しかし、まぐねの国にナノテクノロジーはなかなか進出してきませんでした。どうしてでしょうか？半導体においては、電子を波として見たときの波長が数十nmのオーダーなので、比較的大きなサイズの構造でも量子サイズ効果が現れましたが、磁性体の3d電子はnm程度の広がりしか持たないため、当時の成膜技術や加工技術では、顕著な効果が現れなかったのです。まぐねの国にナノテクノロジーがやってきたのは、nm以下の精密な制御が可能になった80年代半ばになってからでした。
- グリュンベルグらは、ブリルアン散乱という光技術を使ってFe/Cr/Feからなる3層膜の研究を行い、1986年に、Crを介して2つのFeの層のspin磁気モーメントが互いに逆方向を向く、すなわち、Fe層間に反強磁性結合が存在することを見いだしました。その際、spinが平行と反平行では電気抵抗に差があることを報告しました。

巨大磁気抵抗効果(GMR)の発見

- グリュンベルグらの実験を受けて、フェールらは、磁界を印加して反平行スピンを平行にしてやれば電気抵抗が低下するはずと確信し、Fe/Cr人工格子において、図4.1に示すように、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と名付けました。1988年のことです。
- 同じ時期、グリュ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ましたが、その大きさは1.5%という小さなものでした。
- この後、同様のGMRは、Co/Cuのほか多くの磁性/非磁性金属人工格子、グラニューラー薄膜などで発見されました。

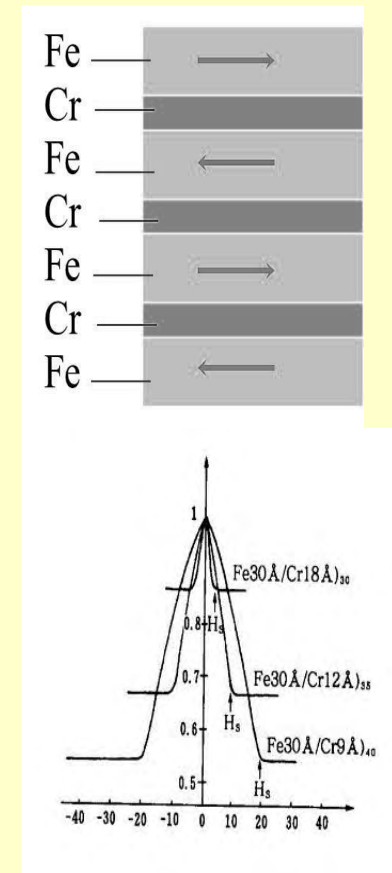


図4.1 Fe/Cr人工格子とGMR

GMRとAMRのちがい

- GMRが発見される前から、磁性体の電気抵抗が磁化と電流の相対角に依存する異方性磁気抵抗効果 (AMR) が知られていましたが、AMRの抵抗変化は極めて小さなものでした。GMRがAMRと異なる点は、(1)磁気抵抗比が桁違いに大きい、(2)抵抗測定の際の電流と磁界の相対角度に依存しない、(3)抵抗は常に磁界とともに減少する、という3点です。

2流体モデル

- 磁性／非磁性金属人工格子におけるGMRの起源を説明する方法として、「2流体電流モデル」を使います。このモデルでは、「↑スピン電子の流れと↓スピン電子の流れを考え、2つの流れが別々に伝導に寄与し、スピンの向きを変えるような散乱はなく、2つの伝導径路で散乱確率が異なる」と考えるのです。

GMRを2流体モデルで説明する

- (a)のように磁性層どうしが強磁性に結合した系では、すべての層の磁気モーメントが平行なので、F1における多数スピン(白丸: ↑スピン)電子は散乱を伴うことなしにF2層, F3層を通過できますが、F1の磁化と反平行な少数スピン(灰色: ↓スピン)電子はF2層、F3層で強い散乱を受け、平均自由行程が短く、抵抗率が高くなります。多数スピン電子の電流経路と少数スピン電子の電流経路は並列結合になっているので、全体としての抵抗 r_p は抵抗の低い径路で決まり、低抵抗率となるのです。
- これに対して、(b)のように層間が反強磁性に結合した系では、F1における多数スピン電子(灰色)はF2層で散乱され、少数スピン電子(白色)はF3層で散乱され、どちらの経路も、弱い散乱と強い散乱を交互に受け、抵抗は高くなります。
- 従って、はじめ(b)の反平行配置であった人工格子に磁界をかけて(a)の平行配置にすると抵抗が下がるのです。

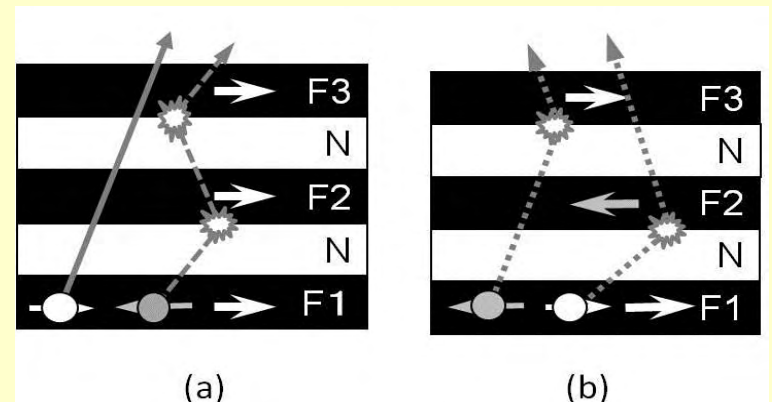
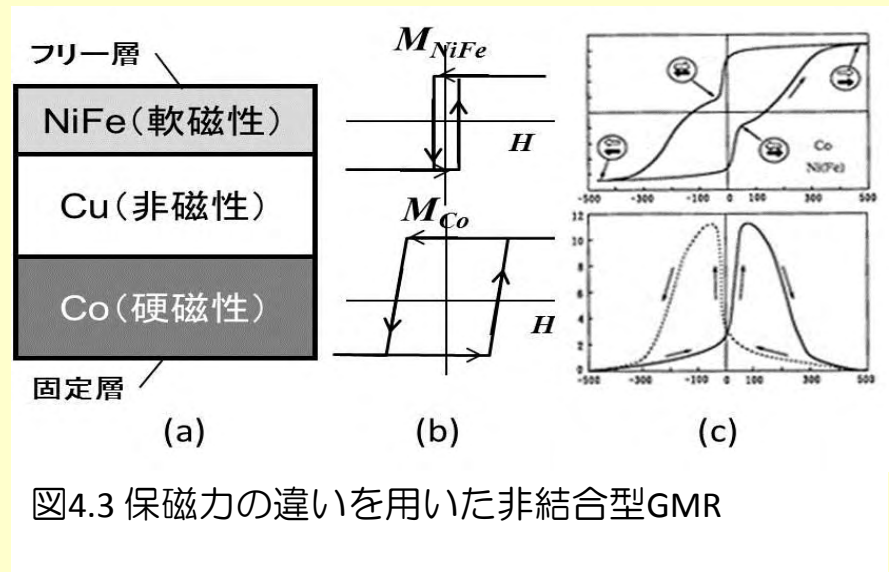


図4.2 CPP-GMRの説明図 (a) 強磁性層の磁化がすべて平行の場合 (b) 隣り合う強磁性層の磁化が反平行の場合。

保磁力の違いを用いたGMR

- 新庄らは、層間に反強磁性結合がなくても、保磁力の差によって反平行磁化状態が作りだせれば大きなMR比が得られることに着目し、図4.3に示すようなソフト磁性体/非磁性体/ハード磁性体人工格子 ([Co(30 Å)/Cu(50Å)/NiFe(30Å)/Cu(50 Å)] × 15) において室温で9.9%のGMRを報告し、非結合型GMRと名付けました。



スピバルブ: GMRを実用レベルに高めた技術

- IBMはGMRをハードディスクの読み出し用磁気ヘッドとして実用化することを目ざし、反強磁性体による交換バイアスを使ったGMR素子を開発、「スピバルブ」と名付けました。

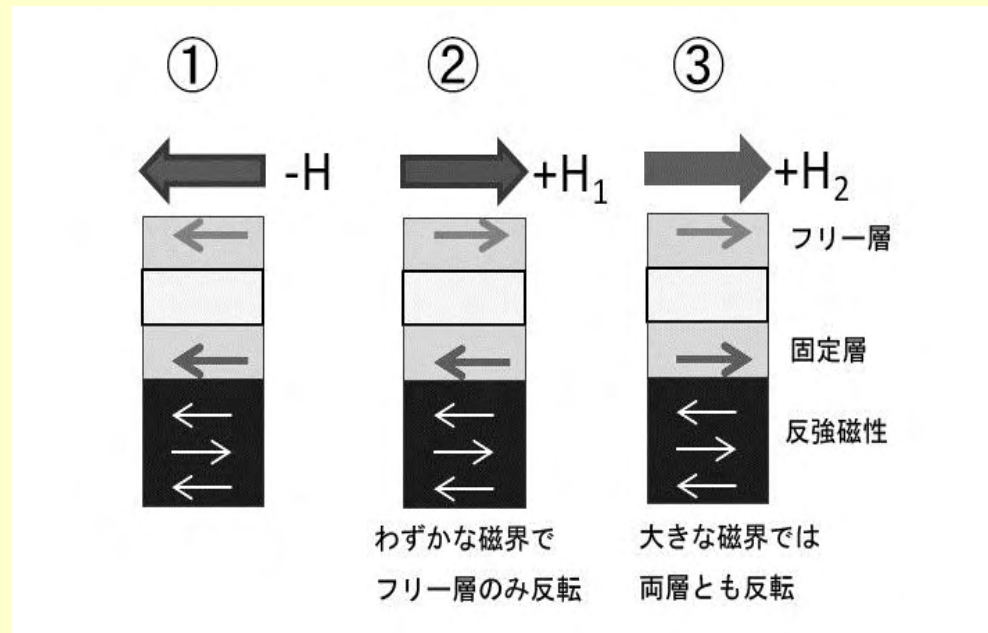


図4.4 (a)スピバルブ構造

交換バイアス

- 図4.4(b)の左下にフリー層の磁化曲線と固定層の磁化曲線が別々に描いてあります。フリー層の磁化曲線の中心は磁界ゼロにありますが、固定層の磁化曲線の中心は H_{exch} (交換バイアス)だけゼロからずれたところにあります。この交換バイアスを与えているのが、図4.4(a)で黒く描いた反強磁性体の働きなのです。
- 2つの層の磁化をあわせた磁化曲線は、図(b)の左上のようになります。フリー層と固定層の磁化は、領域①では平行、領域②では反平行、領域③では再び平行になり、磁気抵抗効果MRは図(b)の右に示すように領域②で大きく、領域①、③で小さいのですが、固定層の磁化曲線のシフトのおかげで、ゼロ磁界の付近でMRが急峻に立ち上がり、感度のよいセンサーになります。これがスピンバルブの原理です。

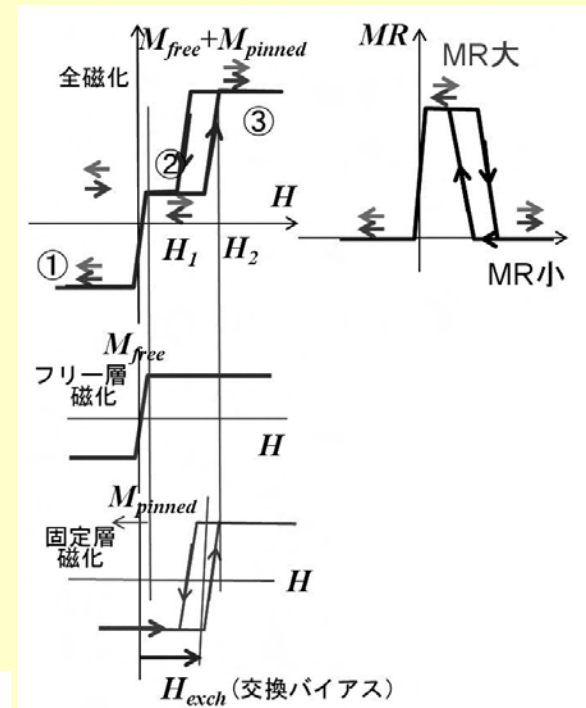


図4.4 (b)スピンバルブの磁化曲線・MR曲線

固定層のヒステリシスの中心が H_{exch} だけシフトしているので弱い磁界でフリー層のみ反転しMRの大きな変化をもたらす。

酸化したCo微粒子における交換バイアス

表面酸化したCo微粒子においてCoと反強磁性体CoOの交換結合によって、図4.5に示すように、ヒステリシスループが全体として左側にずれるという実験結果がW.H. Meiklejohnらによって1957年に報告されています。

(「強磁性体の物理」下巻の第5章 § 13(d))
「もしこのように+-の向きに対して非対称な磁性が室温で実現されるようになれば、磁化を常に一方向に向けることができ、応用上にも重要な意味をもつであろう。」と予言されており、いまさらながら近角先生の慧眼に感心させられます。また、このような古い実験結果をデバイスに適用したIBMの底力にも敬意を表します。

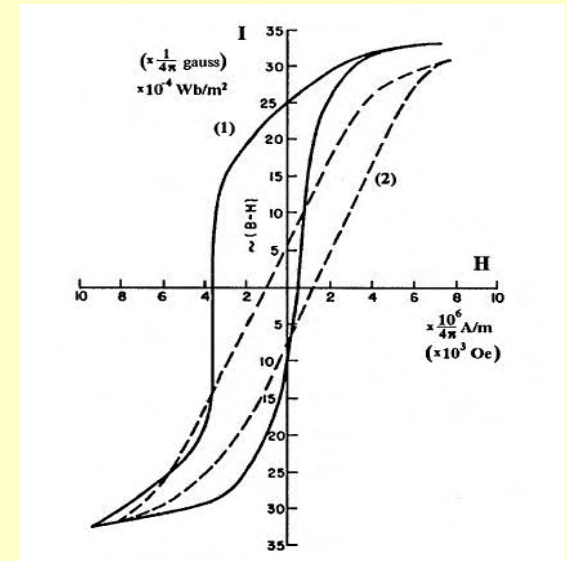


図4.5 部分的に酸化されたCo微粒子(10-100 nm)の77Kにおけるヒステリシスループ。曲線(1)は10kOeの磁界中で冷却後測定したもの、点線(2)は磁界を印加せずに冷却したもの⁷⁾

Q4.1: 交換バイアスの大きさはどのように決まるか？

- 図4.6は交換バイアス構造における理想界面です。反強磁性側の界面のスピンは打ち消されることなく強磁性層側のスピんと強磁性的に並びます。
- この構造で計算した界面の交換結合のエネルギーは実際に観測されるものより2桁も大きいのです。言い替えば、実際の界面では何らかの理由で交換結合が弱くなっているのです。
- この原因として、実際の界面では、図4.7に示すように界面の乱れ、結晶粒界、転位など結晶性の乱れが存在し、界面エネルギーが低下しているものと考えられています。今後の研究課題です。

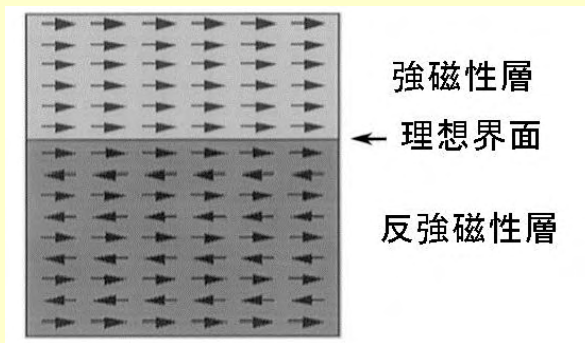


図4.6強磁性/反強磁性接合の理想的な界面

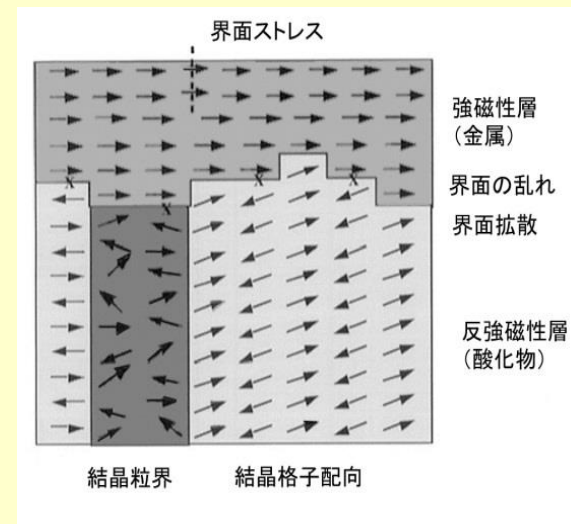


図4.7強磁性/反強磁性界面の実際

4.2 トンネル磁気抵抗効果(TMR)

- トンネル効果とは、非常に薄い絶縁体層を2つの金属電極ではさんだトンネル接合において、電子が絶縁体のもつポテンシャル障壁を通り抜けるという量子的な現象です。
- ここで、金属電極としてFeのような強磁性体を用いると、トンネル電流は、2つの強磁性電極のスピンの向きが平行であれば流れやすいが、反平行なら流れにくいという性質を示します。
- 磁界を印加して反平行のスピンを平行にしてやれば、抵抗が下がります。この現象をトンネル磁気抵抗効果(TMR)と呼びます。

成膜技術の進歩が室温でのTMRをもたらした

- 1995年、宮崎らは、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結果、室温において18%に達する大きなMR比が得られ、世界的に注目を集めることとなります。
- 図4.8は絶縁層としてAl₂O₃を用い、強磁性体としてFeを用いたトンネル接合における(a)磁気抵抗曲線と(b)磁化曲線を示しています。
- 図(b)に見られる段差のある磁化曲線は、異なる保磁力を持つ2つの強磁性電極の磁化曲線が重なっていることを表しています。磁界が15~50 Oeの間では、2つの強磁性電極の磁化が反平行になり、これに対応して電気抵抗が大きく増大しているようすが図(a)に示されています。TMRはこの発見を機にMRAMおよび高感度磁気ヘッドへと応用が展開しました。

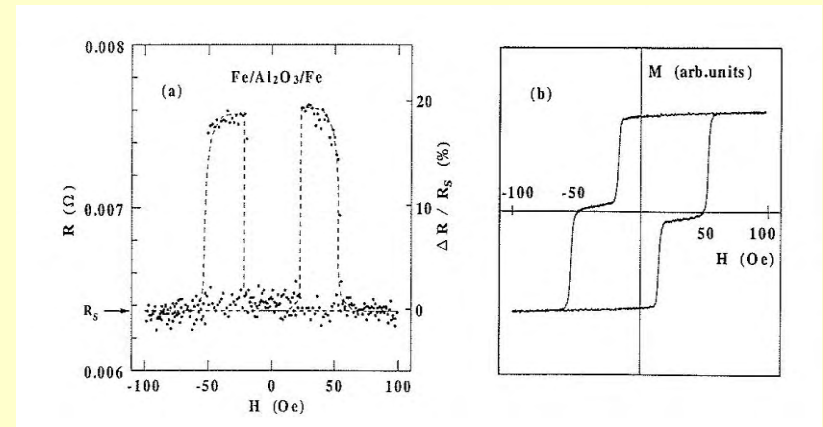


図4.8 Fe/Al₂O₃/Feトンネル接合における磁気抵抗効果
(a)トンネル電気抵抗の磁界依存性
(b)対応する磁化曲線

TMRはなぜ起きる？

- ジュリエールは、図4.9の左図のような磁気トンネル接合(MTJ)において、強磁性電極1から絶縁層を介して強磁性電極2へトンネルするときの導電率を、スピン偏極バンド構造を用いた2流体モデルを使って説明しました。
- TMR比は、両電極のスピン偏極度にものみ依存し、
$$\text{TMR比} = (R_{AP} - R_P) / R_P = \frac{\sigma_P - \sigma_{AP}}{\sigma_{AP}} = \frac{2P_1P_2}{1 - P_1P_2}$$
で与えられます。
- ここに P_1, P_2 は、強磁性電極1および強磁性電極2のスピン偏極度です。

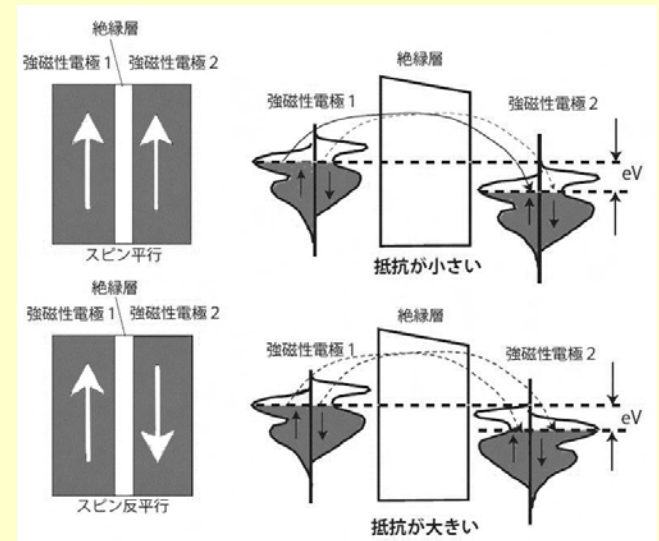


図4.9 スピン依存トンネル伝導のバンドモデルによる説明

MgO単結晶バリアの採用でTMR革命が起きた

- 2001年、バトラーらおよびメーソンらは、トンネル障壁層として単結晶MgOを用いれば1000%という巨大TMR比が生じるであろうと理論的に予測しました。
- これを受けて多くの研究機関で実証実験がおこなわれました。ついに、2004年、TMRは革命的なブレークスルーを迎えます。湯浅ら、および、パーキンらは、独立に、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比が出現することを実証しました。
- その後もTMRは図4.10のように伸び続け、最近では600%に達しています。現在、市場に出ているハードディスクはすべてMgO障壁のTMR素子を用いています。

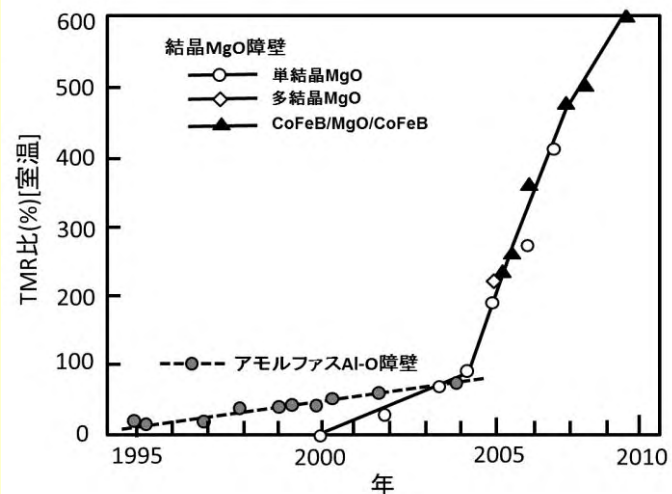


図4.10. 室温におけるTMR比の変遷。2004年MgO障壁の登場で革命を迎えた。

Q4.3: Al_2O_3 を MgO に変えたただけなのになぜそんなに大きな革新が起きたのですか？

- アモルファスでは波数の保存が起きませんが、結晶だと波数が保存されトンネルの際のスピンの選択性が明確になるのです。
- Al_2O_3 は非晶質(アモルファス)です。電子が図4.11(a)のように非晶質をトンネルするときには散漫散乱を受け、波数(運動量)は保存されません。これに対して(b)に示す結晶性の MgO では散乱が起きず、コヒーレントに(位相をそろえて)トンネルすることができます
- $\text{Fe}/\text{MgO}(001)/\text{Fe}$ では Fe の(001)方向のsp電子の Δ_1 バンドがトンネルに寄与しますが、フェルミ面のところで見ると、多数スピンバンドには Δ_1 バンドが存在しますが、少数スピンバンドにはバンドが存在しません。したがって、磁化が平行のときはトンネルできますが、反平行のときはトンネルできないので、巨大TMRが理論的に予測されたのです。

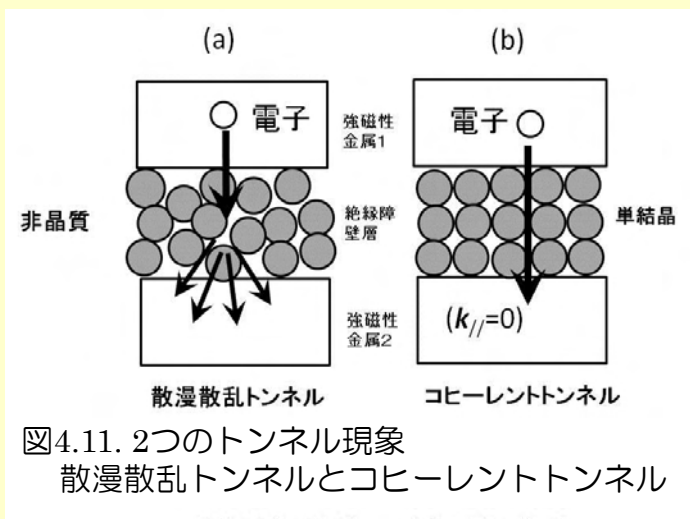


図4.11. 2つのトンネル現象
散漫散乱トンネルとコヒーレントトンネル

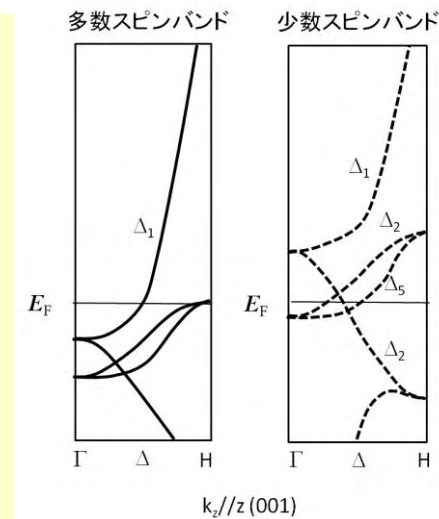


図4.12 Feのバンド構造の $k_z/(001)$ 方向の分散曲線

MRAMの記録

- MRAMではビット線、ワード線の2つの線に電流を流して、その電流がつくる磁界を利用してフリー層の磁化を反転させますが、ワード線に流す電流が作る磁界はTMR素子の磁化容易方向、ビット線の磁界は磁化困難方向に印加されます。合成した磁界が臨界磁界を超えれば磁化反転が起きるのです。
- このときの臨界磁界を決めるのが、図4.14に示す臨界磁界曲線(アステロイド曲線)です。横軸は磁界の磁化容易方向の成分 $H_{//}$ 、縦軸は磁化困難方向の成分 H_{\perp} です。この曲線は、次式で表されます。

$$H_{//}^2 + H_{\perp}^2 = H_K^2$$

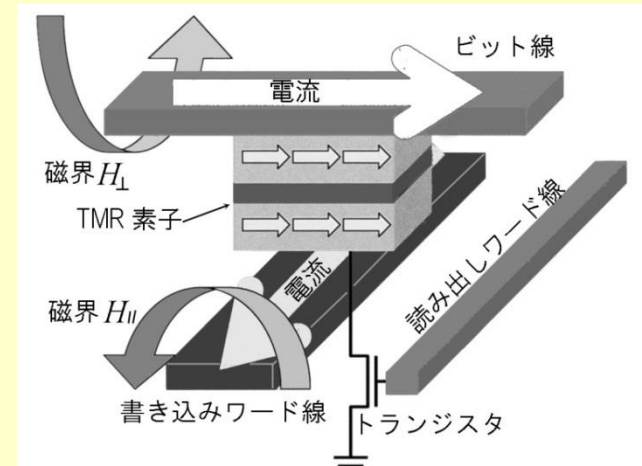


図4.13 MRAMの模式図

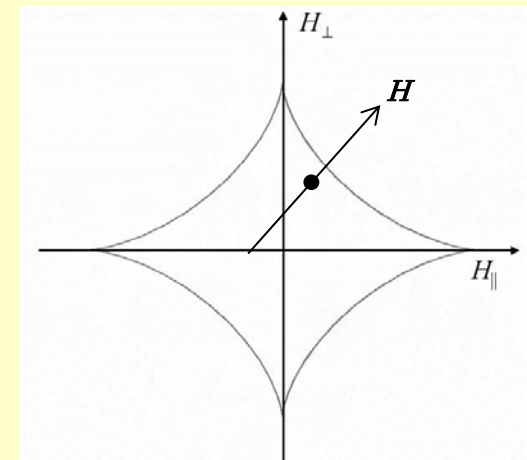


図4.14 磁化反転の臨界磁界曲線

MRAMの読み出し

- 読み出しの方法：
TMRは、MRAMに記録された磁気情報を読み出すときに使われます。
図4.15(a)のようにTMR素子のフリー層と固定層の磁化が平行だと抵抗が低いので読み出しのトランジスタのゲートを開けたときに電流が流れますが、(b)のように反平行だと抵抗が高いため、ゲートを開けたときに電流が流れません。これによって、1か0かを判断するのです。

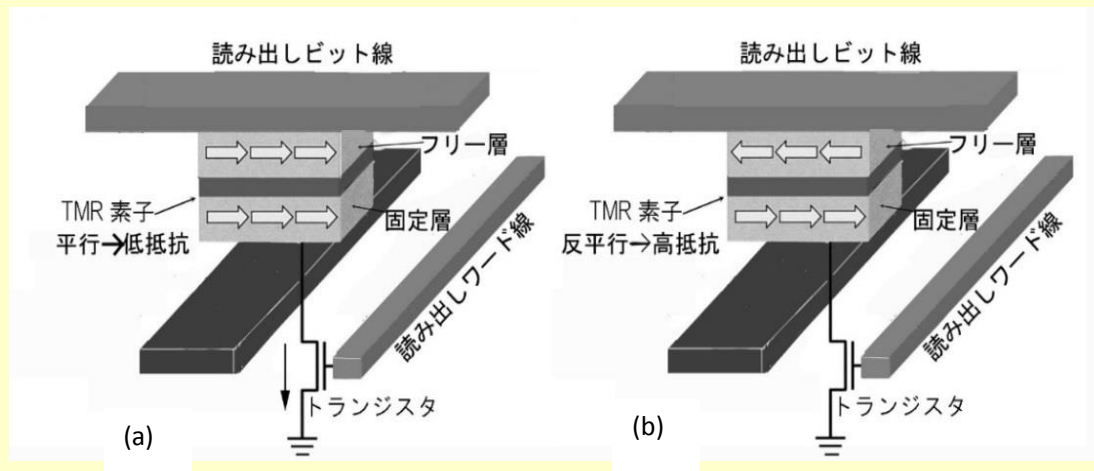


図4.15 MRAMの読み出しフリー層と固定層の磁化が(a)平行 (b)反平行

4.3 「スピントランスファートルク」が MRAMを変える

- 強磁性電極から非磁性体へ電子が流れだすとき、その電子はスピン偏極しています。
- スピンは角運動量ですから、これを第2の強磁性電極の磁気モーメントに移してやれば、それを回転させることができます。
- 実際には、伝導電子のスピンは、第2の強磁性電極の磁気モーメントに平行になるよう向きを変えますが、その反作用によって磁気モーメントが傾けられるのです。

スピン注入磁化反転の提案と実証

- 1996年、新たなスピントロニクス概念であるスピン注入磁化反転のアイデアが理論的にスロンチエスキーおよびベルジェらによって提案されました。
- 図4.16に示すように、強磁性電極FM1からスピン偏極した電子を、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はFM2の向きと平行になるよう傾けられますが、その反作用として、電子のスピン角運動量が対極電極の磁化を傾けるようなトルク(これをスピントランスファートルクと呼びます)が働き、それがきっかけで磁化反転をもたらすというのです。
- 提案を受けて、多くの研究者がこの効果の実現に取り組み、2000年になって、マイヤースらは、実験的にこれを確認しました。

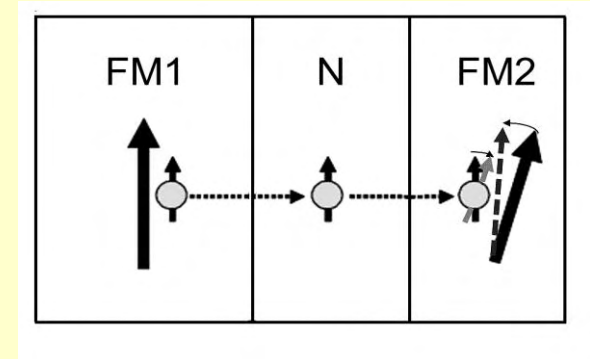


図4.16 スピン偏極した電子が対極の磁化FM2の方向に傾けられるとき、そのトルクをFM2に渡す。

スピン注入磁化反転の実際例

- スピン注入磁化反転を実現するための素子は図4.17 (a)のような非常に小さな断面(60nm × 130nm)を持つ柱状の素子です。素子は強磁性層(Co) 2層とそれを隔てる非磁性層(Cu) からなるCPP-GMR構造です。
- この素子の電気抵抗の磁界依存性が図4.18(c)に示されています。
- 図4.17(d)は外部磁界をゼロにして、電流を変化させたとき、電気抵抗が電流によって変化する様子を示しています。+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ます。
- 開発当初は $10^8\text{A}/\text{cm}^2$ 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ましたが、現在では垂直磁化をもつ強磁性電極をもつMgO-TMR素子を用いて実用可能な電流密度にまで低減することができるようになりました。
- スピントランスポールを使うと、MTJ素子に電流を流すことによって磁化反転でき、微細化した場合には電流密度も小さくなるので、高集積化することが可能になりました。

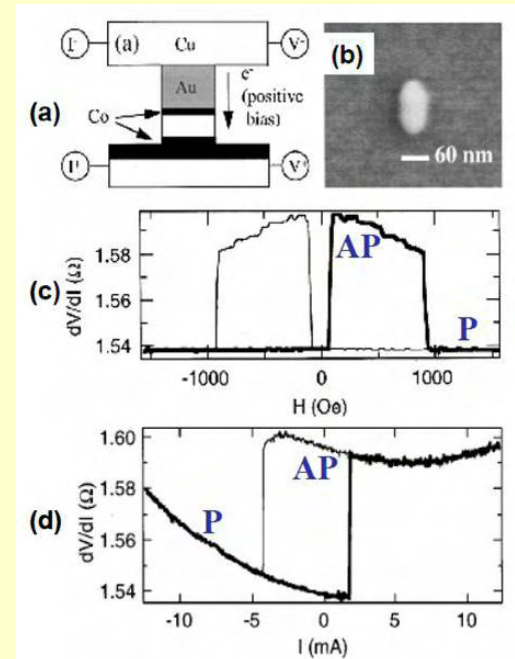


図4.17 スピン注入磁化反転²⁵⁾

Q4.4: 伝導電子のもつわずかなスピントルクだけで、なぜ相手の磁性体の磁気モーメントを反転できるのですか

- 磁気モーメントが歳差運動をする力を使うから可能なのです。
- 図4.18に示すように、磁性体の磁気モーメント M は、外部磁界 H_{eff} を加えるとその外積 $M \times H_{\text{eff}}$ で表されるトルクを受けて歳差運動を始めますが、 $M \times dM/dt$ に比例するダンピングトルクを受けて回転しながら次第に磁界方向に傾いていきます。このようなスピンの動的な振る舞いはランダウ・リフシッツ・ギルバート (LLG) 方程式によってよく説明できます。
- もし、この磁気モーメントが、ダンピングトルクを丁度打ち消すような方向のスピントランスファートルクを伝導電子スピンから受け取ると、歳差運動はいつまでも続きます。
- スピントランスファートルクがさらに大きくなると歳差運動が増幅され、ついには反転してしまうのです。このように歳差運動の助けを借りて反転するので少ない電流での磁化反転が可能なのです

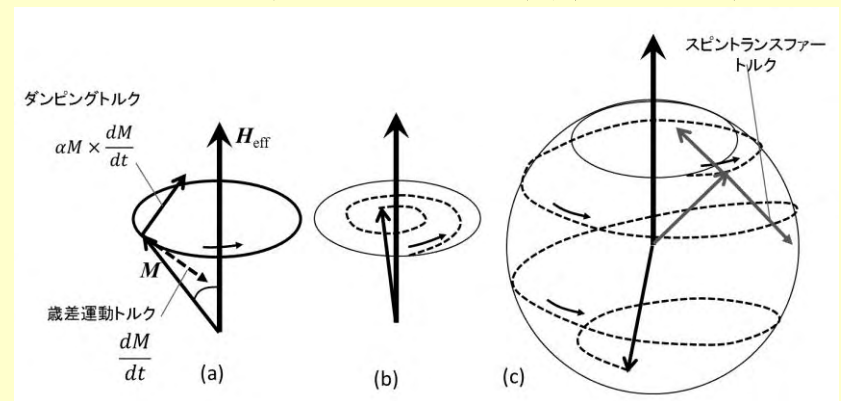


図4.18 スピン注入磁化反転の動的解析

磁壁は少ない電流密度で動かせる

- 図4.19(a)に示すような磁壁をもつ磁性細線を考えます。磁区は、磁壁を隔てて左側が右向き、右側は左向きです。
- 磁壁を横切って細線の右から左に電流を流したとします。電子は(b)に点線で示すように左から右に移動しますが、磁壁を横切るとき電子のスピンは磁気モーメントと交換相互作用をしてモーメントに沿って回転します。
- このとき、電子のスピンの角運動量は磁気モーメントに吸収されます。その結果、磁気モーメントは回転し、図(c)のように磁壁が右の方に移ります。
- 山口らはスピントランスファー効果によって伝導電子スピンのトルクが磁壁に渡されることにより容易に磁壁移動が起きることを実験的に検証しました。図4.21に示すように、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ます。

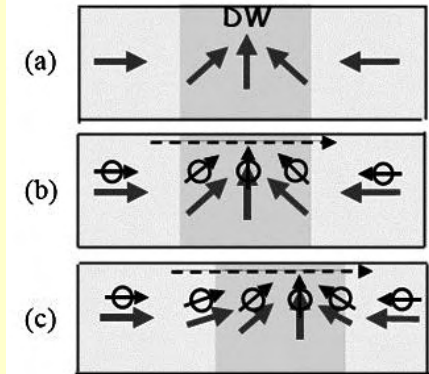


図4.19 スピントランスファー効果による磁壁の電流駆動の説明²⁷⁾

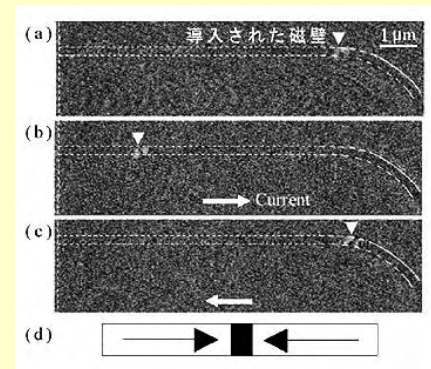


図4.20 MFMによる電流駆動磁壁移動の観察結果

4.4 第4章の終わりに： スピントロニクスが未来をひらく

- スピントロニクスの街を大急ぎで通り抜けながら、基礎となることから学びました。
- 巨大磁気抵抗効果(GMR)、トンネル磁気抵抗効果(TMR)の出現により、磁気→電気の変換からコイルが消え、スピン注入磁化反転により電気→磁気の変換からもコイルが消えようとしています。
- ここでは触れませんでしたでしたが、スピントロニクスは「スピン流」という新しい概念を得て、大きく飛躍しようとしています。まぐねの国の未来につながる新しいトレンドから目が離せません。