

物理システム工学科3年次

物性工学概論

第火曜1限0031教室

第14回 スピンエレクトロニクスと材料[3]

磁気記録、磁気抵抗効果、MRAM

副学長

佐藤勝昭

第13回で学んだこと

- 磁性の起源：電子の軌道角運動量とスピン
- 磁気ヒステリシスの起源：磁区
- 磁気記録の原理

[復習]

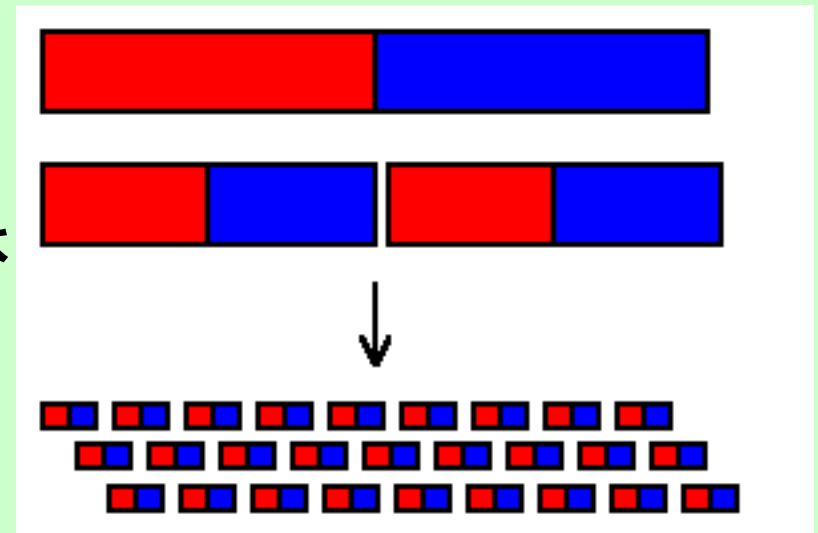
磁性の起源

- 磁石をどんどん小さくすると
- 磁極は必ずペアで現れる
- 究極のミニ磁石→原子磁気モーメント
- 磁気モーメントの起源：角運動量
 - 軌道角運動量
 - スピン角運動量
- 磁気をそろえ合う力

[復習]

磁石を切るとどうなる

- 磁石は分割しても小さな磁石ができるだけ。
- 両端に現れる磁極の大きさ(単位Wb/cm²)は小さくしても変わらない。
- N極のみ、S極のみを単独で取り出せない。

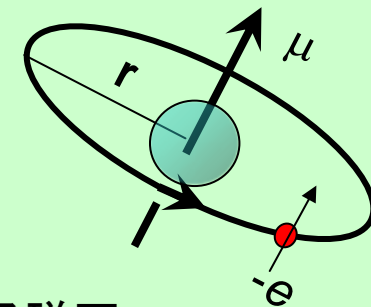
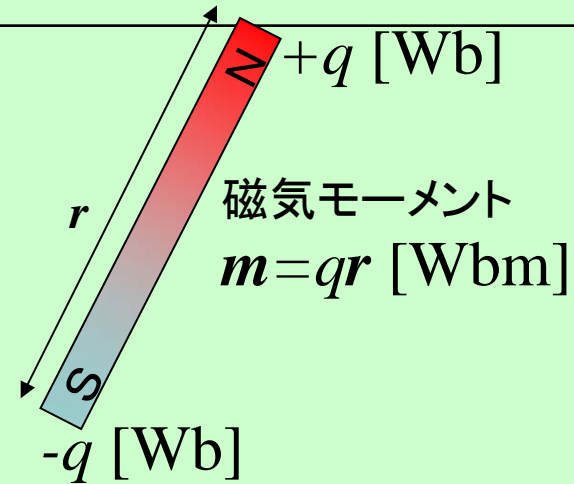


岡山大のHPより
(<http://www.magnet.okayama-u.ac.jp/magword/domain/>)

[復習]

究極の磁石：原子磁気モーメント

- さらにどんどん分割して
原子のレベルに達しても
磁極はペアで現れる
- この究極のペアにおける
磁極の大きさと間隔の積を
磁気モーメントとよぶ
- 原子においては、電子の軌道運動による電流と電子の
スピンによって磁気モーメント
が生じる。

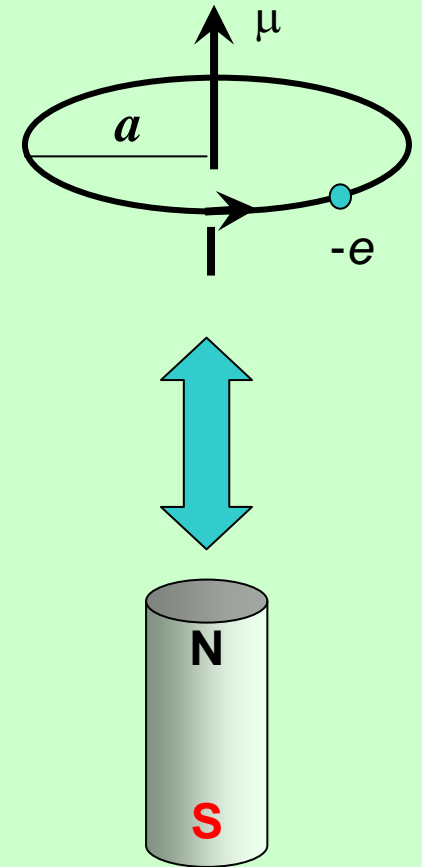


原子磁石

[復習]

環状電流と磁気モーメント

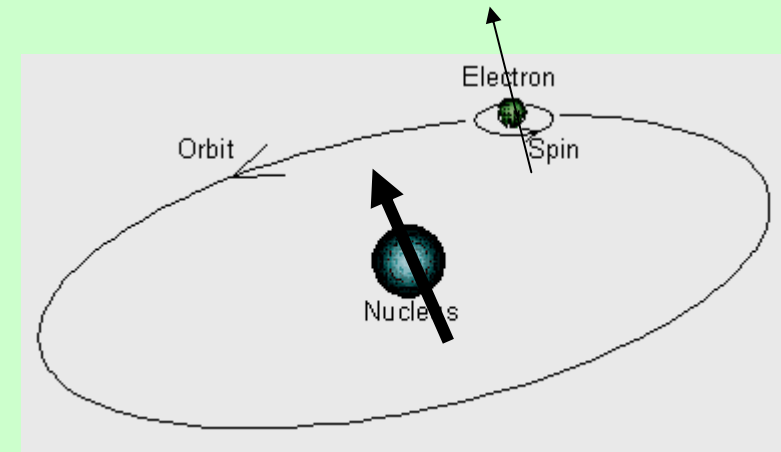
- 電子の周回運動は環状電流をもたらす。
- $-e$ [C]の電荷が半径 a [m]の円周上を線速度 v [m/s]で周回しているとすると、
→ 1周の時間は $2\pi a/v$ [s]
→ 電流は $i = -ev/2\pi a$ [A]。
- 磁気モーメントは、電流値 i に円の面積 $S = \pi a^2$ をかけることにより求められ、
 $\mu = iS = -eav/2$ となる。
- 一方、角運動量は $\Gamma = mav$ であるから、これを使うと磁気モーメントは
 $\mu = -(e/2m)\Gamma$ となる。



[復習]

軌道角運動量の量子的扱い

- 量子論によると角運動量は \hbar を単位とするとびとびの値をとり、電子軌道の角運動量は $\Gamma_l = \hbar L$ である。 L は整数値をとる
- $\mu = -(e/2m)\Gamma$ に代入すると軌道磁気モーメントは次式となる。
- $\mu_l = -(e\hbar/2m)L = -\mu_B L$



ボア磁子 $\mu_B = e\hbar/2m = 9.27 \times 10^{-24} [\text{J/T}]$
単位: $[\text{J/T}] = [\text{Wb}^2/\text{m}] / [\text{Wb}/\text{m}^2] = [\text{Wb} \cdot \text{m}]$

[復習]

もう一つの角運動量: スピン

- 電子スピン量子数 s の大きさは $1/2$
- 量子化軸方向の成分 s_z は $\pm 1/2$ の2値をとる。
- スピン角運動量は \hbar を単位として $\Gamma_s = \hbar s$ となる。
- スピン磁気モーメントは $\mu_s = -(e/m)\Gamma_s$ と表される。
- 従って、 $\mu_s = -(e\hbar/m)s = -2\mu_B s$
- 実際には上式の係数は、2より少し大きな値 g (自由電子の場合 $g = 2.0023$) をもつので、 $\mu_s = -g\mu_B s$ と表される。

[復習]

主量子数と軌道角運動量量子数

- 主量子数 n
- 軌道角運動量量子数 $l=n-1, \dots, 0$

| n | l | m | | | | | | | 軌道 | 縮重度 |
|-----|-----|-----|---|---|---|----|----|----|----|-----|
| 1 | 0 | | | | 0 | | | | 1s | 2 |
| 2 | 0 | | | | 0 | | | | 2s | 2 |
| | 1 | | | 1 | 0 | -1 | | | 2p | 6 |
| 3 | 0 | | | | 0 | | | | 3s | 2 |
| | 1 | | | 1 | 0 | -1 | | | 3p | 6 |
| | 2 | | 2 | 1 | 0 | -1 | -2 | | 3d | 10 |
| 4 | 0 | | | | 0 | | | | 4s | 2 |
| | 1 | | | 1 | 0 | -1 | | | 4p | 6 |
| | 2 | | 2 | 1 | 0 | -1 | -2 | | 4d | 10 |
| | 3 | 3 | 2 | 1 | 0 | -1 | -2 | -3 | 4f | 14 |

3d遷移金属

4f希土類金属

[原子分子物理] 元素の周期表

Periodic Table of the Elements

3d遷移金属

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1A | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | |
| 1 | H | | | | | | | | | | | | | | | | He | |
| 2 | Li | Be | | | | | | | | | | B | C | N | O | F | Ne | |
| 3 | Na | Mg | | | | | | | | | | Al | Si | P | S | Cl | Ar | |
| 4 | K | Ca | Sc | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr |
| 5 | Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I | Xe |
| 6 | Cs | Ba | * La | Hf | Ta | W | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn |
| 7 | Fr | Ra | + Ac | Rf | Ha | Sg | Ns | Hs | Mt | 110 | 111 | 112 | 113 | | | | | |

* Lanthanide Series

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 |
| Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |

+ Actinide Series

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 |
| Th | Pa | U | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm | Md | No | Lr |

希土類金属

[復習]フントの規則

複数の電子をもつ原子の L, S を決める規則

- 原子が基底状態にあるときの L, S を決める規則
 1. 原子内の同一の状態(n, l, m_l, m_s で指定される状態)には1個の電子しか占有できない。(Pauli排他律)
 2. 基底状態では、可能な限り大きな S と、可能な限り大きな L を作るように、 s と l を配置する。(Hundの規則1)
 3. 上の条件が満たされないときは、 S の値を大きくすることを優先する。(Hundの規則2)
 4. 基底状態の全角運動量 J は、less than halfでは $J=|L-S|$ 、more than halfでは $J=L+S$ をとる。

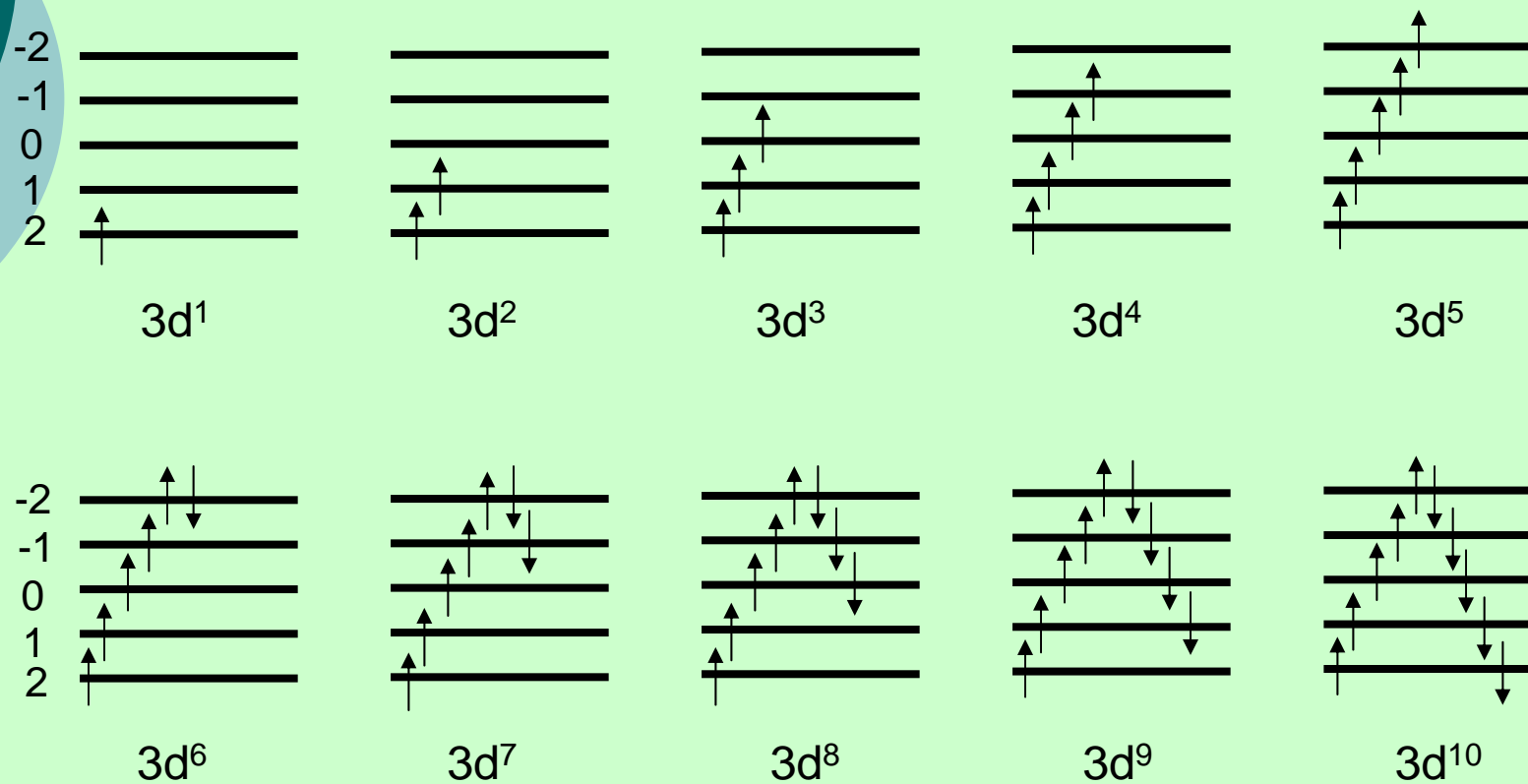
[復習]

多重項の表現

- 左肩の数字 $2S+1$ (スピン多重度)
 - $S=0, 1/2, 1, 3/2, 2, 5/2$ に対応して、1, 2, 3, 4, 5, 6
 - 読み方singlet, doublet, triplet, quartet, quintet, sextet
- 中心の文字 L に相当する記号
 - $L=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$ に対応してS, P, D, F, G, H, I...
- 右下の数字 J_z
- 例: $\text{Mn}^{2+}(3d^5)$ $S=5/2$ ($2S+1=6$), $L=0$ (→記号: S)
 ${}^6\text{S}_{5/2}$

[復習]

遷移金属イオンの電子配置



[復習]

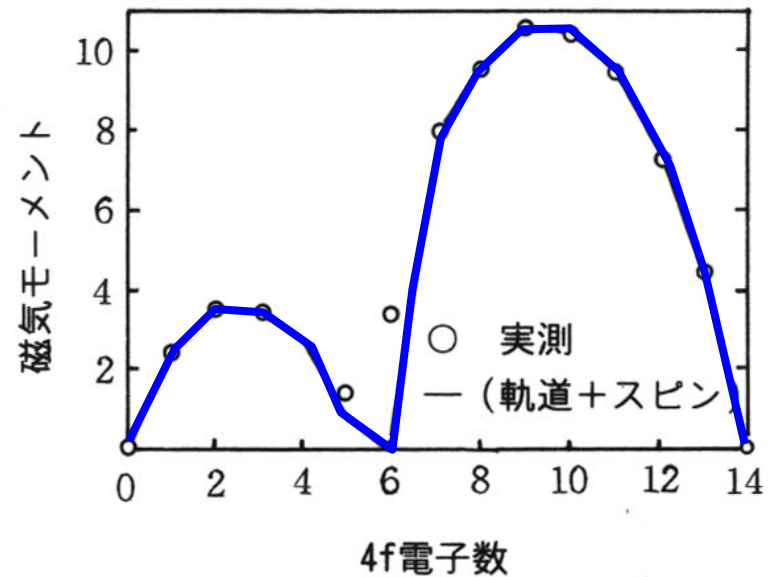
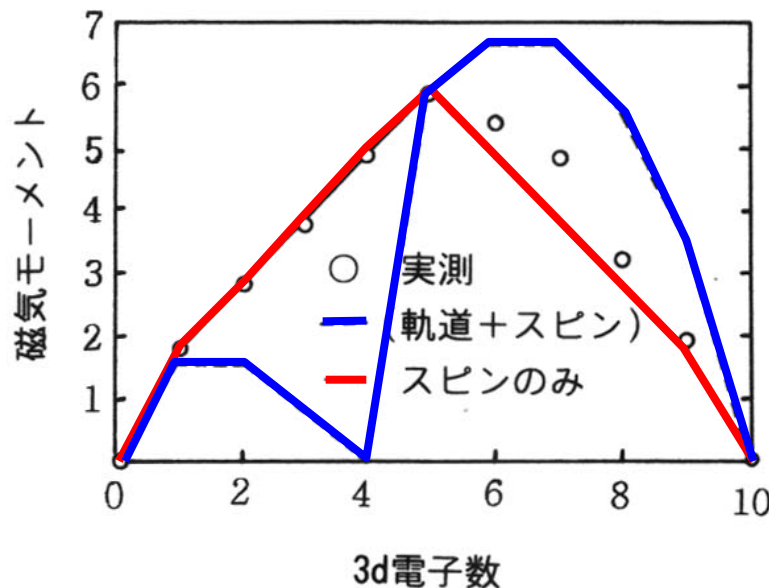
3価遷移金属イオンのL,S,Jを求め多重項の表現を記せ

| イオン | 電子配置 | L | S | J | 多重項 |
|------------------|---------------------|---|---|---|-----|
| Ti ³⁺ | [Ar]3d ¹ | | | | |
| V ³⁺ | [Ar]3d ² | | | | |
| Cr ³⁺ | [Ar]3d ³ | | | | |
| Mn ³⁺ | [Ar]3d ⁴ | | | | |
| Fe ³⁺ | [Ar]3d ⁵ | | | | |
| Co ³⁺ | [Ar]3d ⁶ | | | | |
| Ni ³⁺ | [Ar]3d ⁷ | | | | |

[復習]

軌道角運動量とスピン角運動量の寄与

- 3d遷移イオン: 磁気モーメントの実験値: **スピンのみの値**に一致 (軌道角運動量の消滅)
- 4f希土類イオン: 磁気モーメントの実験値: **全角運動量**による値と一致



3dおよび4f電子の磁気モーメント (参考図書 22) 参照

[復習]

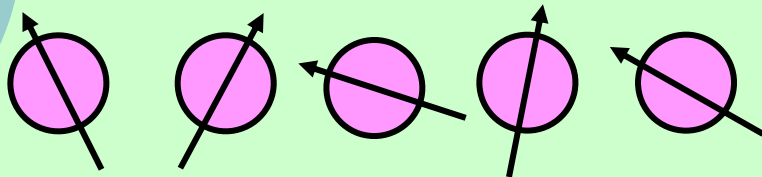
強磁性:なぜ自発磁化をもつのか

- これまで原子が磁気モーメントをもつことを述べた
- それでは、強磁性体ではなぜ原子の磁気モーメントの向きがそろっているのか。
- また、なぜ強磁性体はキュリー温度以上になると磁気秩序を失い、常磁性になるのか。

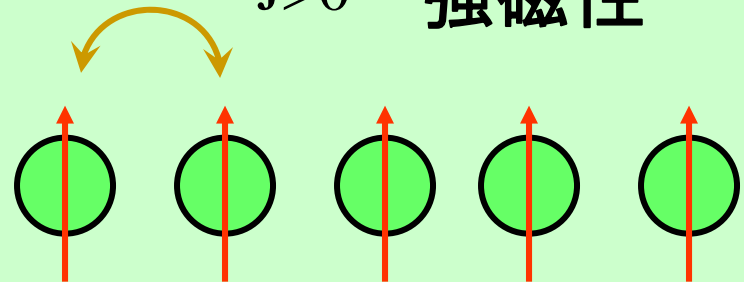
[復習]なぜ原子の磁気モーメントがそろっているのか

(1) 局在磁性モデル

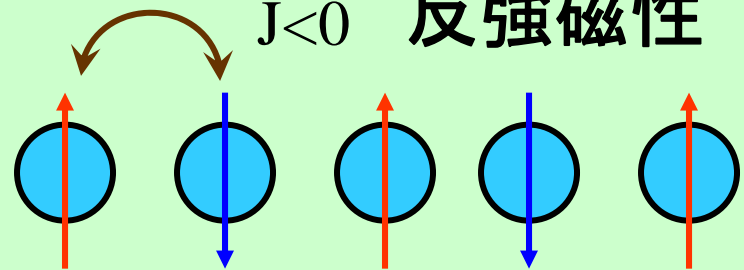
常磁性



$J > 0$ 強磁性



$J < 0$ 反強磁性



交換相互作用

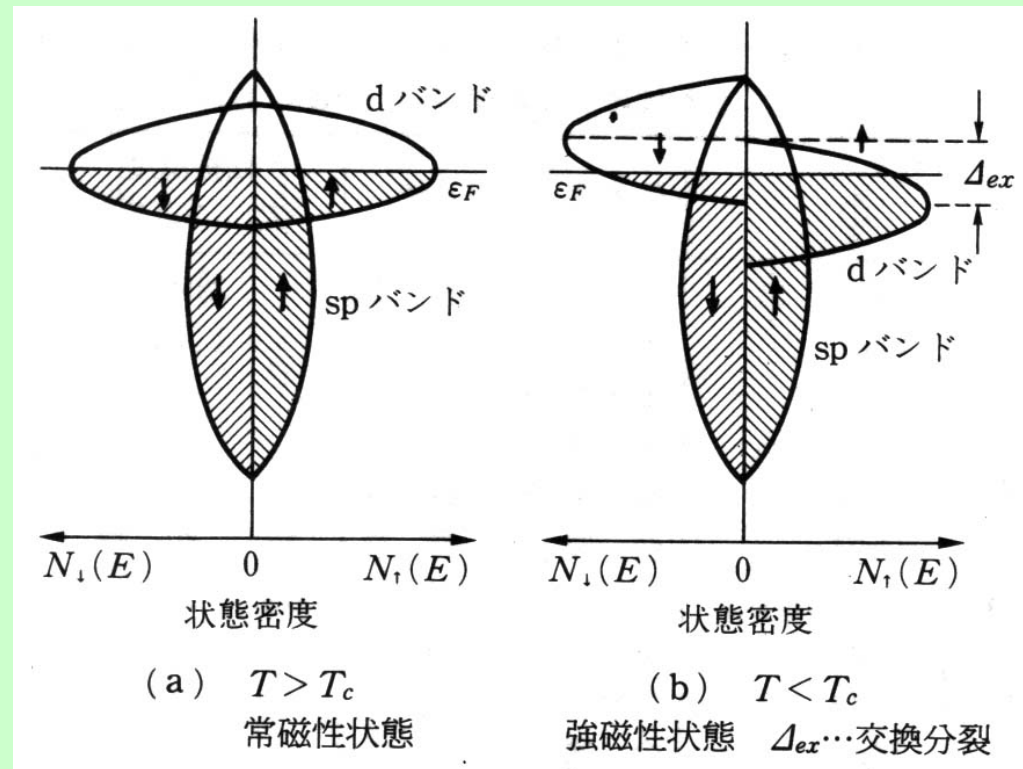
$$H = -JS_1S_2$$

[復習]なぜ原子の磁気モーメントがそろっているのか

(2) 遍歴電子磁性モデル(バンドモデル)

多数(\uparrow)スピンのバンドと少数(\downarrow)スピンのバンドが電子間の直接交換相互作用のために分裂し、熱平衡においてはフェルミエネルギーをそろえるため \downarrow スピンバンドから \uparrow スピンバンドへと電子が移動し、**両スピンバンドの占有数に差が生じて強磁性が生じる。**

- 磁気モーメント M は、 $M = (n\uparrow - n\downarrow)\mu_B$ で表される。このため原子あたりの磁気モーメントは非整数となる。



非磁性半導体との比較

[復習]

なぜ T_c 以上で自発磁化がなくなるのか

- 磁気モーメントをバラバラにしようとする熱擾乱の作用が、磁気モーメントをそろえようとする交換相互作用に打ち勝つと、磁気秩序が失われ常磁性になる。
- 磁気秩序がなくなる温度を、強磁性体ではキュリー温度とよび T_c と記述する。反強磁性体ではネール温度とよび T_N と記述する。

[復習]

磁気ヒステリシスの起源

- 磁区の形成: **なぜ初磁化状態では磁化がないのか**
- [参考] 磁極と反磁界
- [参考] 静磁エネルギー
- [参考] 磁気異方性
- 磁区の種類
- 保磁力

[復習]なぜ初磁化状態では磁化がないのか： 磁区(magnetic domain)

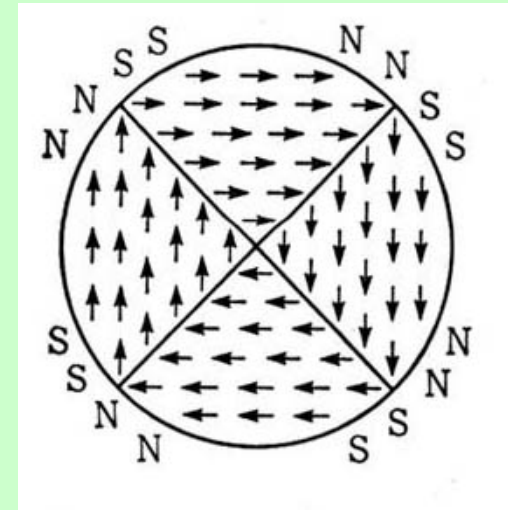
- 磁化が特定の方向を向くとすると、N極からS極に向かって磁力線が生じます。この磁力線は考えている試料の外を通っているだけでなく、磁性体の内部も貫いています。この磁力線を**反磁界**といいます。反磁界の向きは、磁化の向きとは反対向きなので、磁化は回転する**静磁力を受けて不安定**となります。
- 磁化の方向が逆方向の縞状の**磁区**と呼ばれる領域に分かれるならば、反磁界がうち消し合って静磁エネルギーが低下して安定するのです

[復習]なぜ初磁化状態では磁化がないのか：

円板磁性体の磁区構造

全体が磁区に分かれることにより、全体の磁化がなくなっている。これが初磁化状態である。

- 磁区の内部では磁化は任意の方向をランダムに向いている訳ではない。
- 磁化は、結晶の方位と無関係な方向を向くことはできない。磁性体には**磁気異方性**という性質があり、磁化が特定の結晶軸方位(たとえばFeでは[001]方向および等価な方向)を向く性質がある。



(近角：強磁性体の物理)

•[001]容易軸では図のように(001)面内では[100][010][-100][$0-10$]の4つの方向を向くので90°磁壁になる。

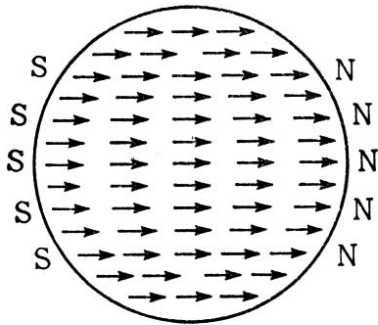
[復習]なぜ初磁化状態では磁化がないのか さまざまな磁区構造

単磁区

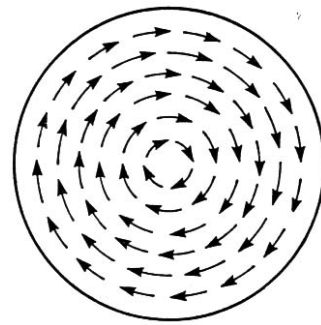
ボルテックス

環流磁区

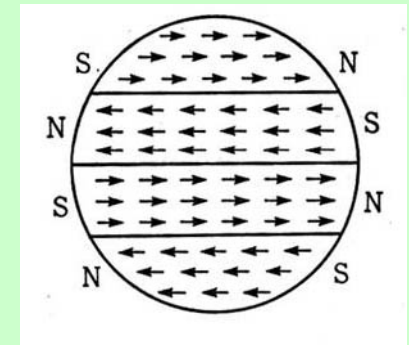
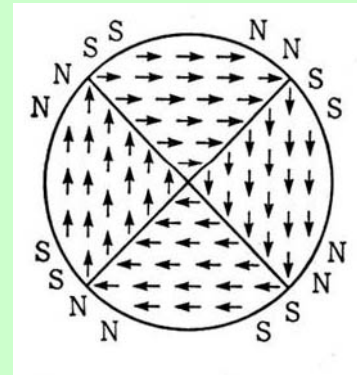
縞状磁区



一様に磁化
した円板



磁極を作らない
スピンの分布



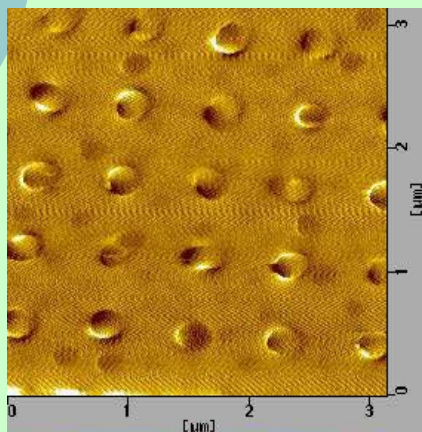
磁極が生
じ静磁エネ
ルギーが
上がる

静磁エネル
ギーは下がる
が交換エネル
ギーが増加

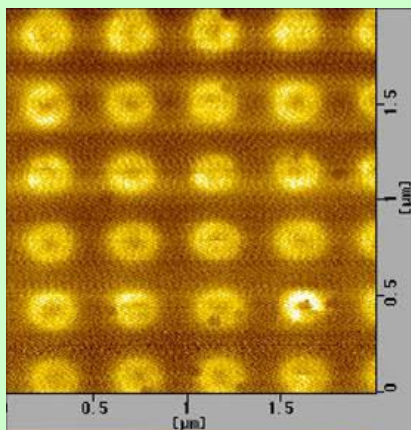
磁区と磁区の境界に磁壁
エネルギーを貯えている

[復習]なぜ初磁化状態では磁化がないのか 磁気力顕微鏡で観察した磁区

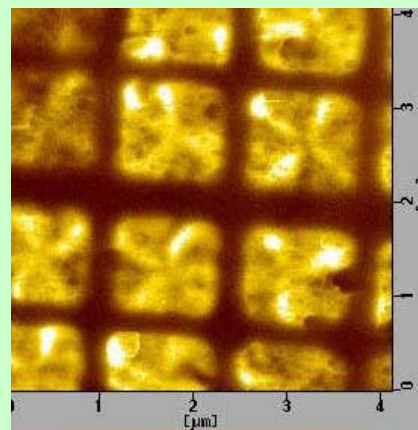
単磁区



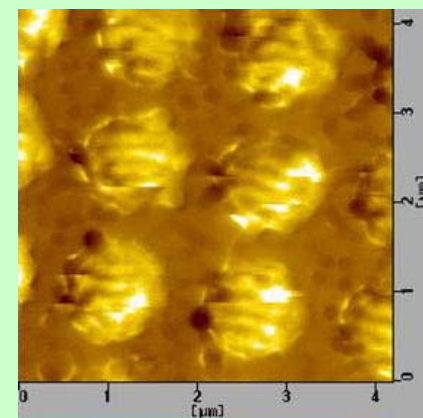
ボルテックス



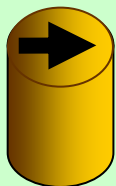
環流磁区



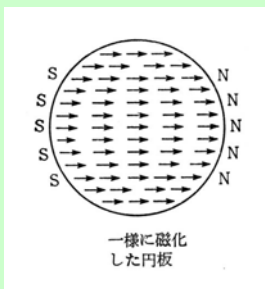
縞状磁区



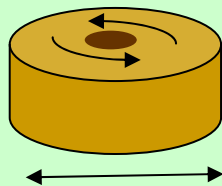
磁化あり



100nm



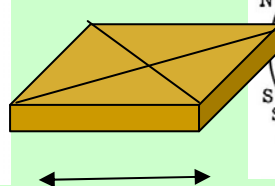
磁化なし



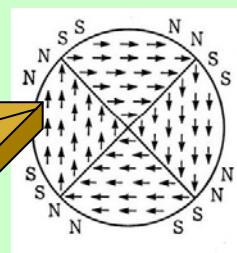
300nm



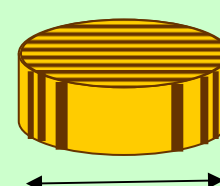
磁化なし



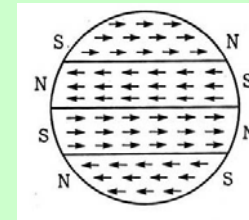
1200nm



磁化なし

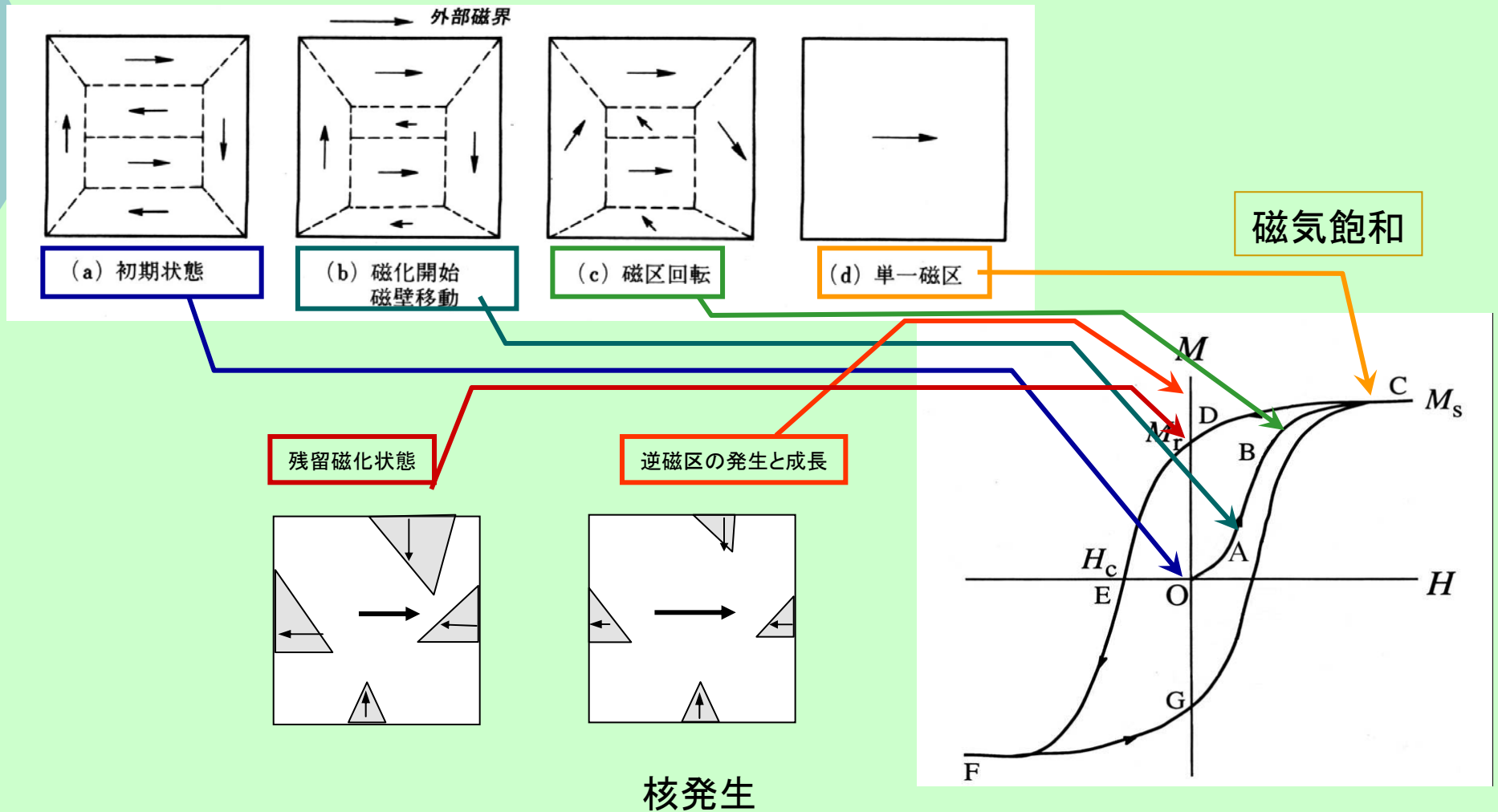


1000nm



[復習]

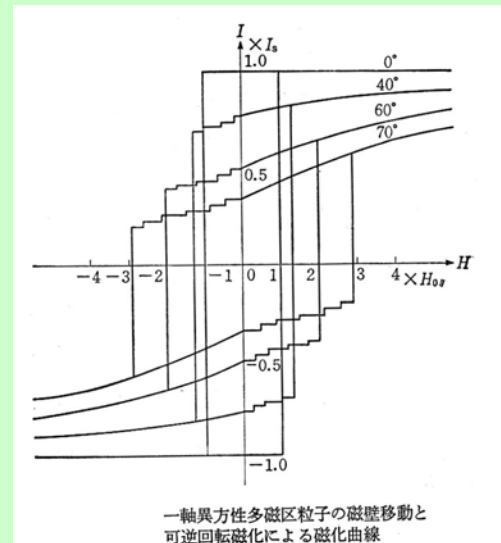
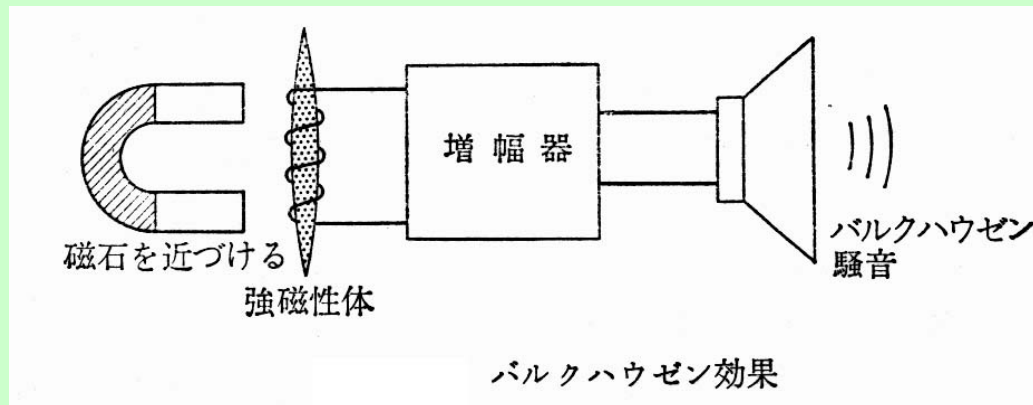
ヒステリシスと磁区



[復習]うんちく

磁区概念の歴史

- 磁区の考え: Weissが提唱
 - P. Weiss: J. Phys. 6, 661 (1907)
- バルクハウゼンノイズ:
 - 巨視的磁化が多くの細かい不連続磁化から成立
 - H. Barkhausen: Phys. Z. 20, 401 (1919)



磁気記録(magnetic recording)

- 磁気テープと磁気ディスク
- 記録媒体と磁気記録ヘッド
- 高密度化を支えるMR素子
- 光磁気記録
- ハイブリッド磁気記録
- 固体磁気メモリ(MRAM)

磁気テープと磁気ディスク

○ 磁気テープ:

- シーケンシャルアクセス: アクセス時間遅い、転送速度遅い
- 大容量: 大容量のコンピュータ用バックアップテープ「LTO Ultrium 2 (200GB)」(マクセル)、1/2インチデジタルビデオテープ「S-AIT(非圧縮500GB, 圧縮1300GB)」(ソニー)
- VTR: ヘリカルスキャン(ヘッド・媒体間相対速度を増大)

○ 磁気ディスク:

- ランダムアクセス: アクセス時間短い、転送速度速い
 - ヘッドを軽量化してシーク時間減少
- グラニューラー媒体(微粒子化)で高密度化:
- ヘッド・媒体間隙の大幅減少
- 垂直磁気記録でさらに高密度に

磁気記録媒体

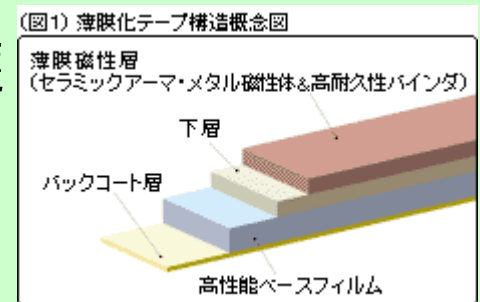
○ 磁気テープ: プラスチックベースに磁性体を堆積

● 塗布型:

- 酸化鉄: Co被着 $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$
- 2酸化クロム: CrO_2
- メタル: 磁性金属(純鉄など)微粒子

● 蒸着型:

- コバルト蒸着;
DLC(ダイヤモンド状カーボン)で保護

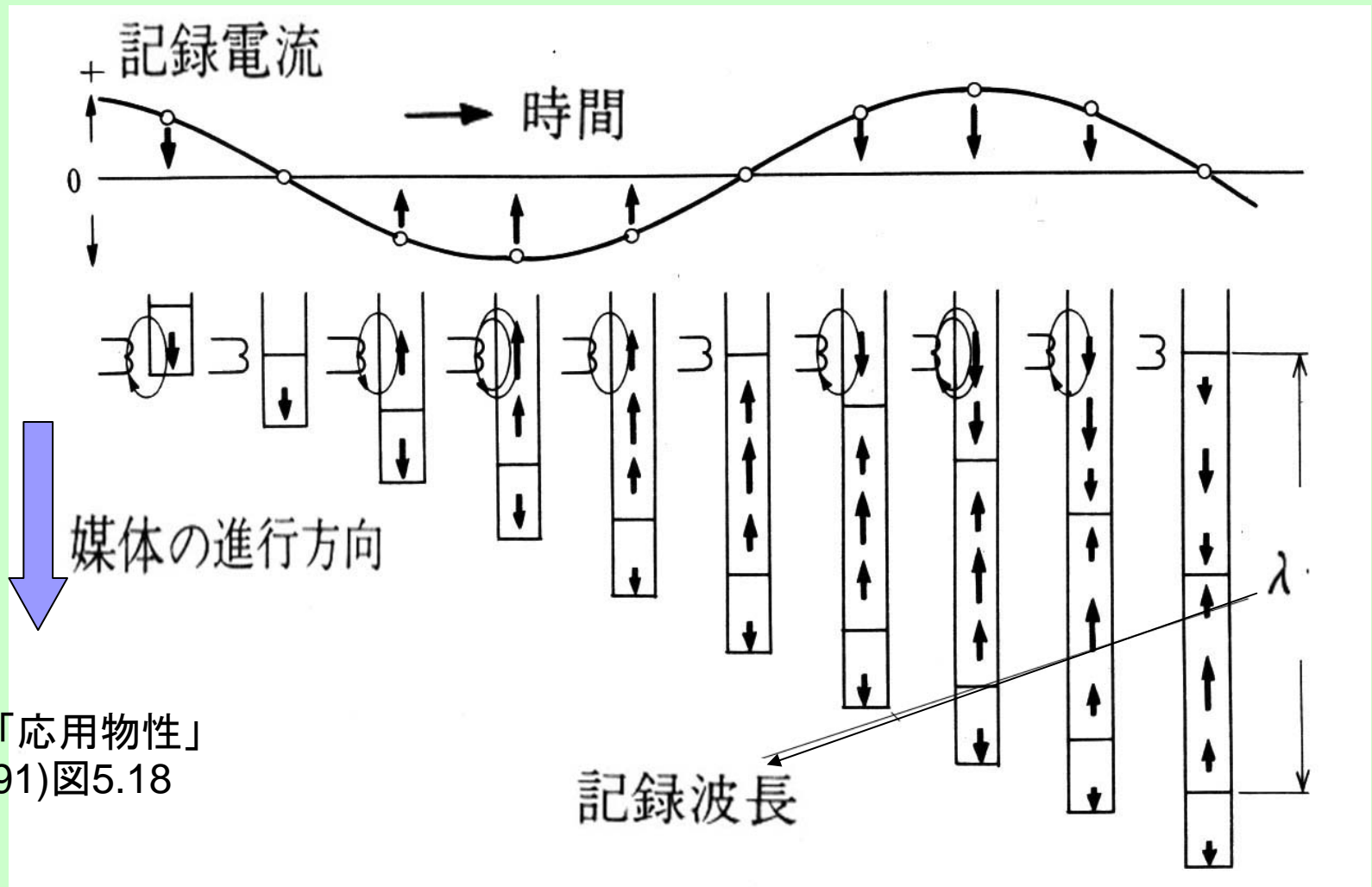


磁気記録媒体

○ ハードディスク

- プラッター基板材料: アルミ円盤、ガラス
- 磁気媒体材料: CoCr系材料が使われる。最近の高密度媒体は、超常磁性減磁を防ぐため、RuなどをはさんだSAF(人工反強磁性)という構造がとられる。
- 表面保護層: DLC(ダイヤモンド状カーボン)を用いる
- 潤滑剤: 磁気ヘッドとの摩擦を防ぐためライナーという潤滑剤が塗布されている

磁気記録過程



佐藤勝昭編著「応用物性」
(オーム社, 1991)図5.18

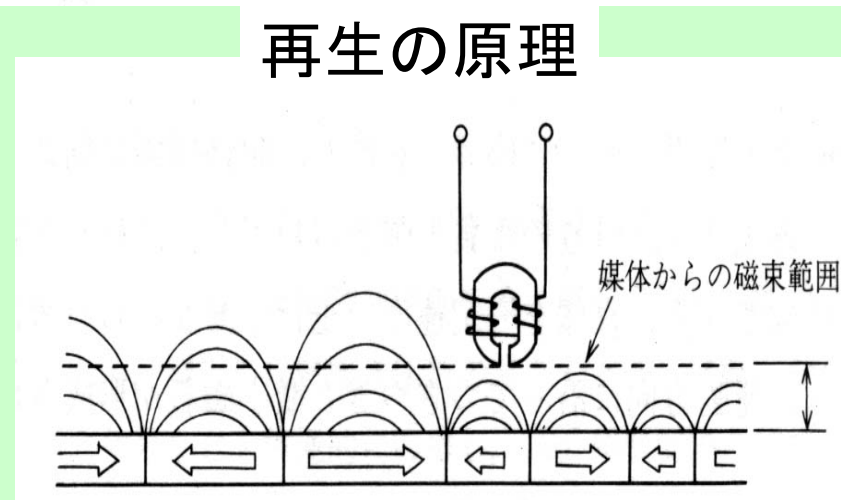
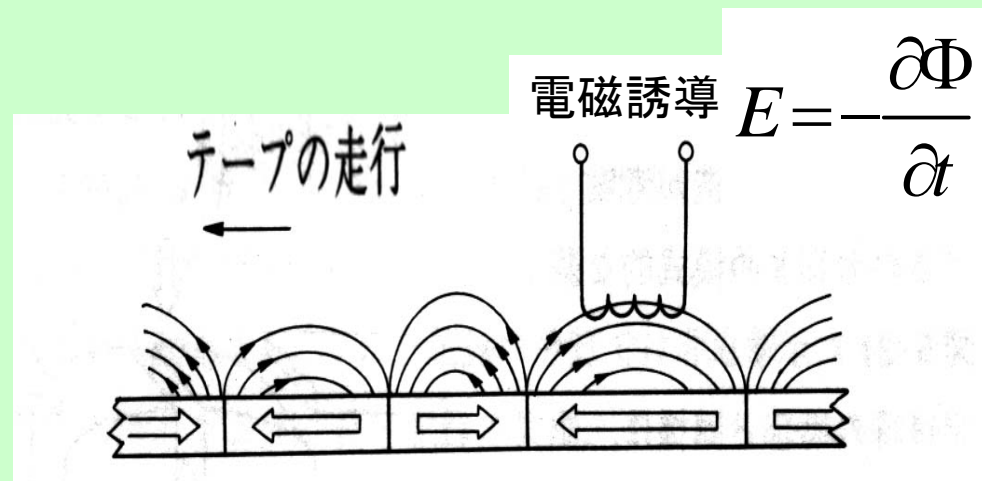
記録波長

- 媒体に近接して配置した磁気ヘッドのコイルに信号電流を流し、信号に対応した強さと向きをもつ磁束を発生し、媒体に加える。
- 媒体は、ヘッドからの磁束を受けて磁化され、信号に対応する残留磁化の向きと強度をもつ磁区が形成される。
- 記録波長 λ (信号1周期に対応する媒体上の長さ)
- $\lambda = v/f$ (v :媒体と磁気ヘッドの相対速度, f :信号周波数)
- 記録減磁: 高周波信号になると、媒体が十分に動かないうちに磁界の向きが反対になり、十分に記録できなくなる現象

磁気記録の再生原理(1)

誘導型ヘッド

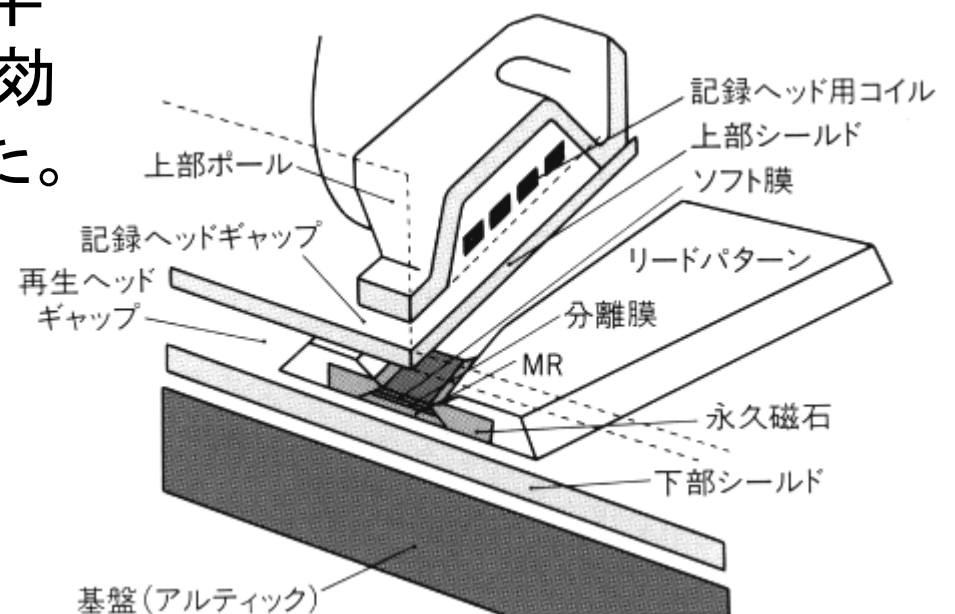
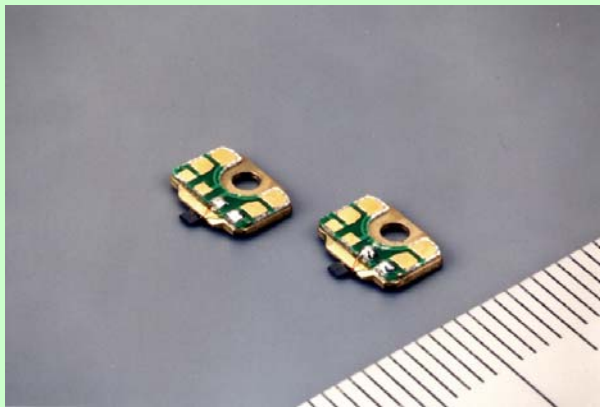
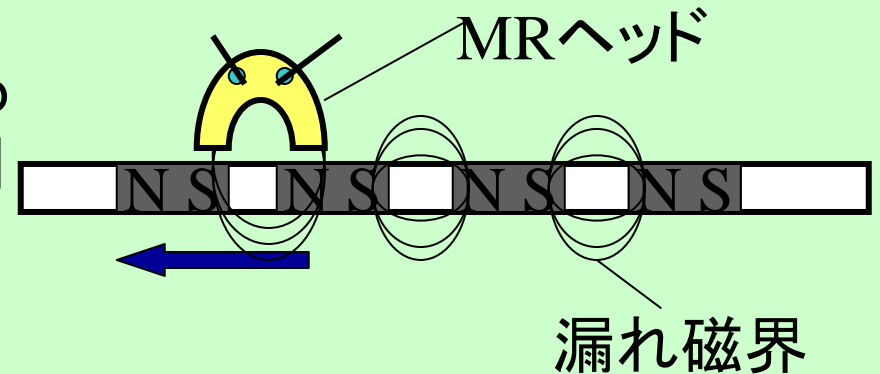
- **電磁誘導現象**
コイルを通る磁束 Φ が変化するとき、磁束の時間微分に比例した電圧 E がコイルに発生する。
- 出力は微分波形となる
- 再生電圧は、記録波長(媒体上の信号1周期に対応する長さ)と媒体・ヘッドの相対速度の積に比例



磁気記録の再生原理(2)

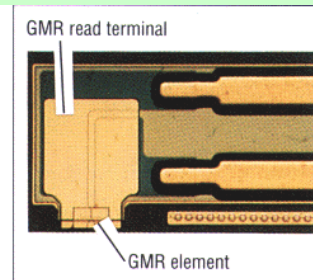
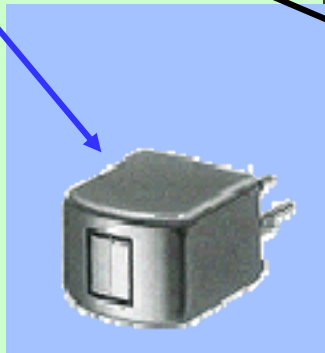
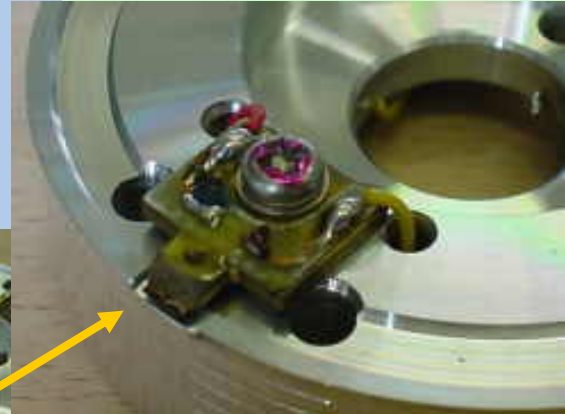
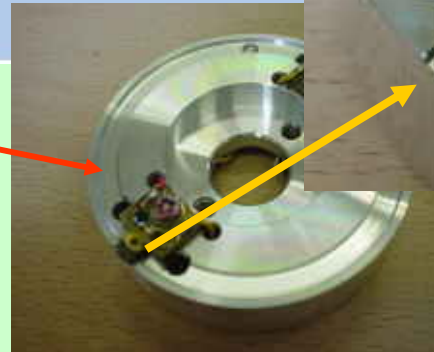
MR(磁気抵抗)ヘッド

- 媒体から洩れ出す磁束により磁性体の電気抵抗が変化する現象(MR:磁気抵抗効果)を用いて、電圧に変えて読み出す。
- 当初AMR(異方性磁気抵抗効果)が用いられたが90年代半ばからGMR(巨大磁気抵抗効果)が用いられるようになった。

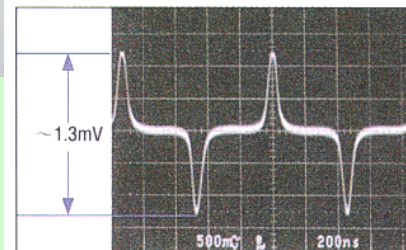


磁気ヘッド

- オーディオカセット用
- ビデオカセット用
- ハードディスク用
- 磁気カード、紙幣用

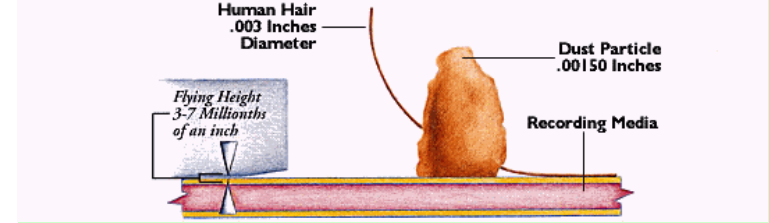
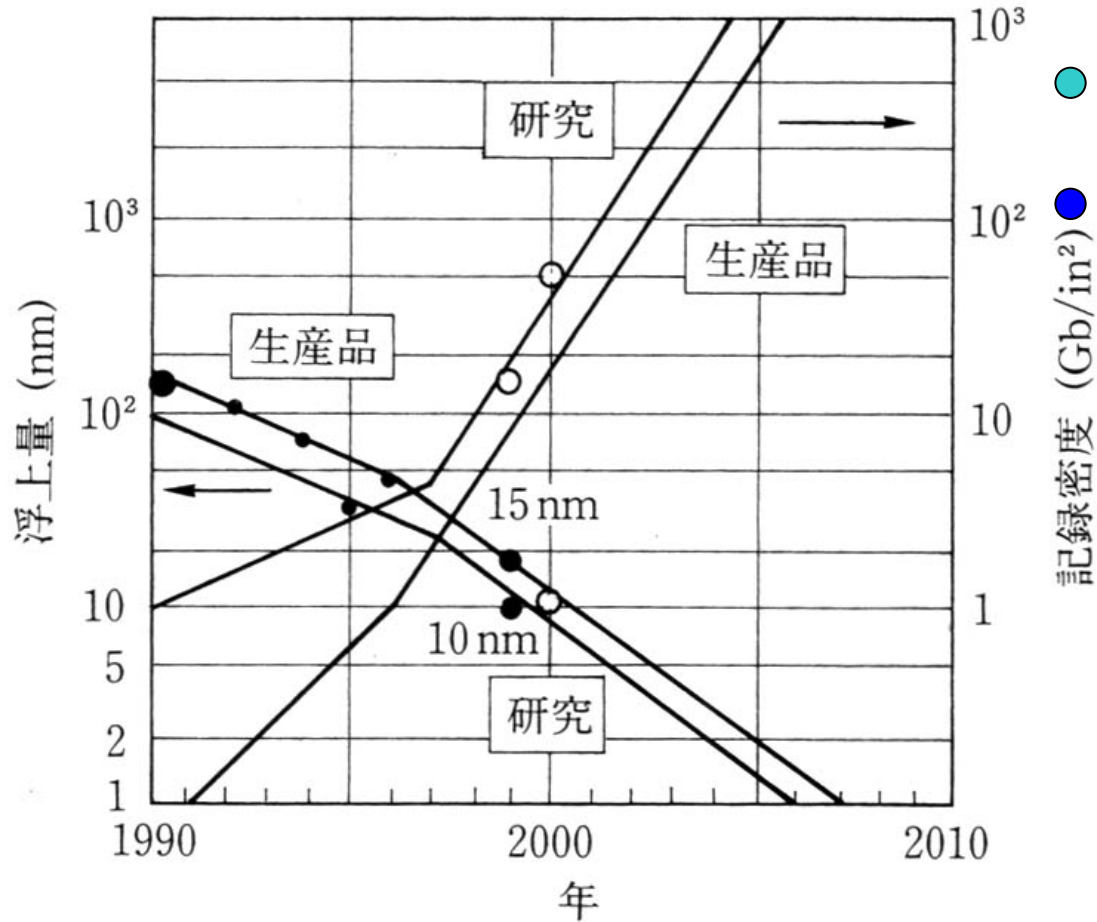


Giant magnetoresistive read element



Read-back waveform

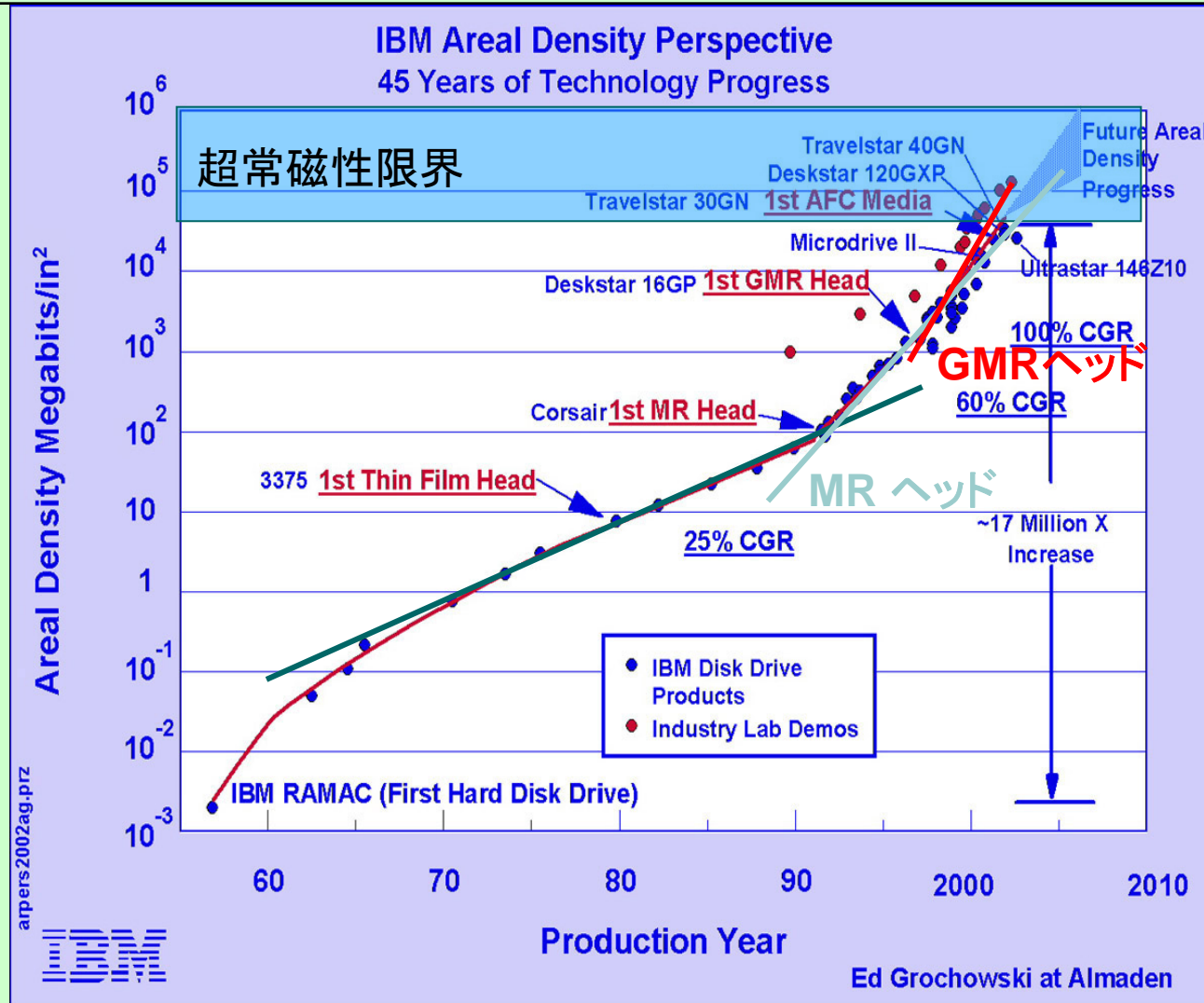
記録密度とヘッド浮上量



HDの記録密度の状況

- HDの記録密度は、1992年にMRヘッドの導入によりそれまでの年率25%の増加率(10年で10倍)から年率60%(10年で100倍)の増加率に転じ、1997年からは、GMRヘッドの登場によって年率100%(10年で1000倍)の増加率となっている。
- **超常磁性限界**は、40Gb/in²とされていたが、AFC(反強磁性結合)媒体の登場で、これをクリアし、実験室レベルの面記録密度は2003年時点ですでに150 Gb/in²に達し、2004年には200 Gb/in²に達すると見込まれる。

ハードディスクのトラック密度、面記録密度の変遷



HDの記録密度の状況

- HDの記録密度は、1992年にMRヘッドの導入によりそれまでの年率25%の増加率(10年で10倍)から年率60%(10年で100倍)の増加率に転じ、1997年からは、GMRヘッドの登場によって年率100%(10年で1000倍)の増加率となっている。
- **超常磁性限界**は、40Gb/in²とされていたが、AFC(反強磁性結合)媒体の登場で、これをクリアし、実験室レベルの面記録密度は2003年時点ですでに150 Gb/in²に達し、2004年内には200 Gb/in²に達する。

ハードディスクの記録密度に限界が

- 1970年から1990年にかけての記録密度の増加は10年で10倍の伸び率であったが、1990年代になると10年で100倍という驚異的な伸び率で増大した。これは再生用磁気ヘッドの進展によるところが大きい。その後も記録媒体のイノベーションにより、実験室レベルでは100Gb/in²を超えるにいたった。
- しかし、2000年を過ぎた頃からこの伸び方にブレーキがかかってきた。これは、後述するように磁性体の微細化による超常磁性限界が見え始めていることが原因とされる。

垂直磁気記録

- 従来の磁気記録は記録された磁化が媒体の面内にあるので、面内磁気記録と呼ばれる。長手記録とも呼ばれる。高密度になると、1つの磁区の磁化が隣り合う磁区の磁化を減磁するように働く。
- これに対し、垂直磁気記録では、隣り合う反平行の磁化は互いに強めあうので、記録が安定。

1.8型磁気ディスクで業界最大容量の80GBを実現(東芝)

- 新製品は、垂直磁気記録方式を採用することで、世界最高の面記録密度206メガビット/平方ミリメートル(133ギガビット/平方インチ)を実現し、当社従来機種に比べ記憶容量を33%向上*4しています。新製品には新しく開発された垂直記録用ヘッドとディスクを採用しており、垂直記録の性能を十分に引き出すためのヘッド・ディスク統合設計技術を開発することで、安定した高密度記録を実現しています。



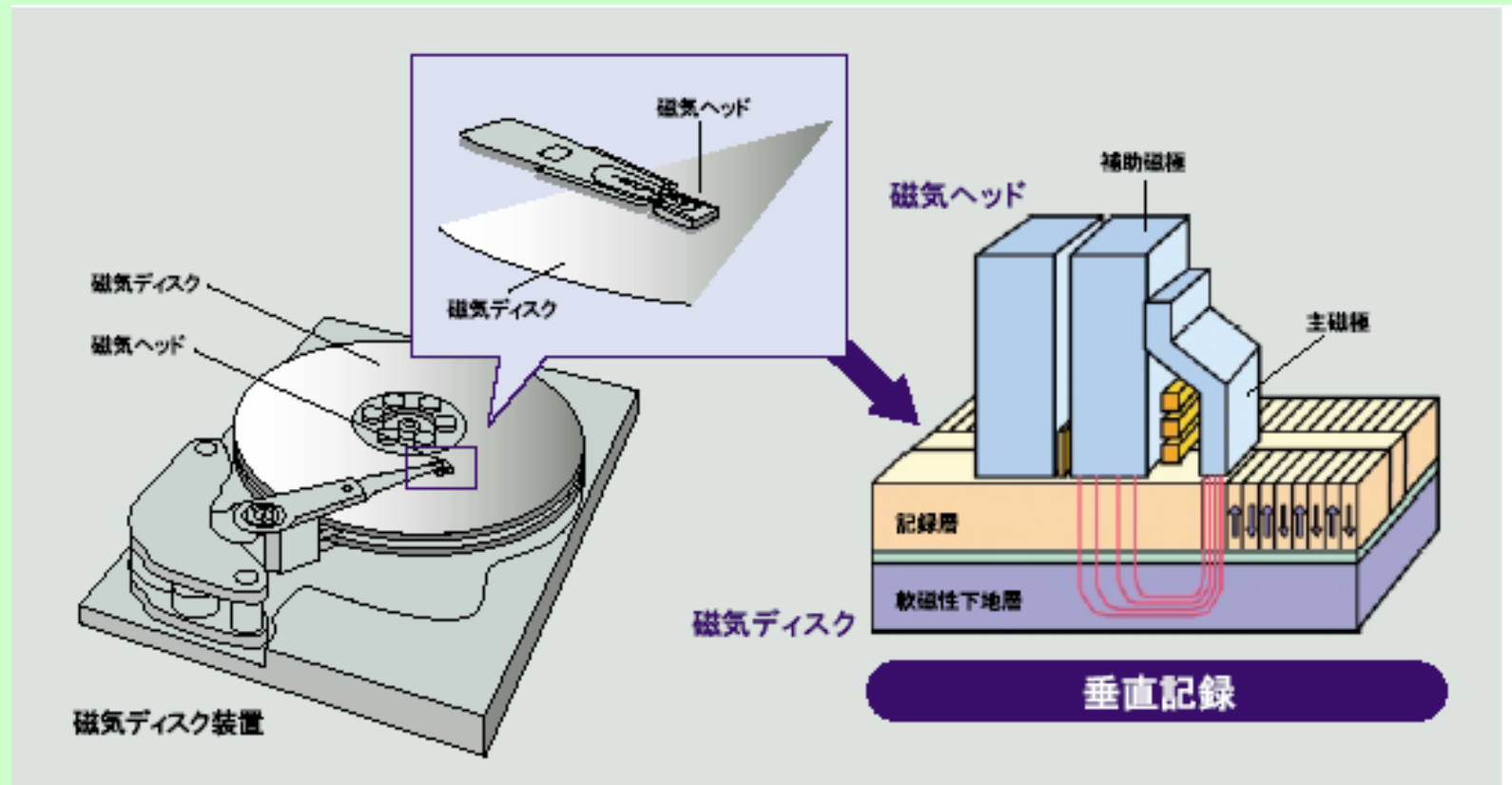
http://www.toshiba.co.jp/about/press/2004_12/pr_j1401.htm

シーゲイト、垂直磁気記録の2.5インチ 160GB HDDを出荷 2006年1月25日

- Momentus 5400.3は業界初となる垂直磁気記録方式を採用した2.5インチHDD。同方式の採用により記録密度は132Gbit/平方インチに達し、従来の水平記録製品「Momentus 5400.2」の92Gbit/平方インチから約45%向上した。
- 回転速度は5400rpm、キャッシュ容量は8MB。容量は40/60/80/100/120/160GBの6種類が用意される。シークタイムは12.5msで、実効転送速度は44MB/sec。耐衝撃性は非動作時900G、動作時350G。騒音レベルはアイドル時23dB、パフォーマンスシーク時29dB。

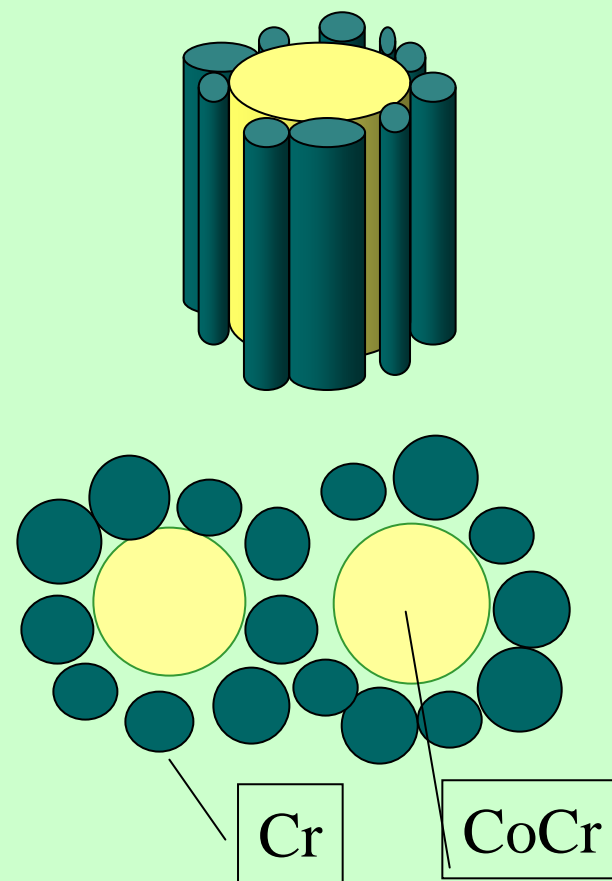
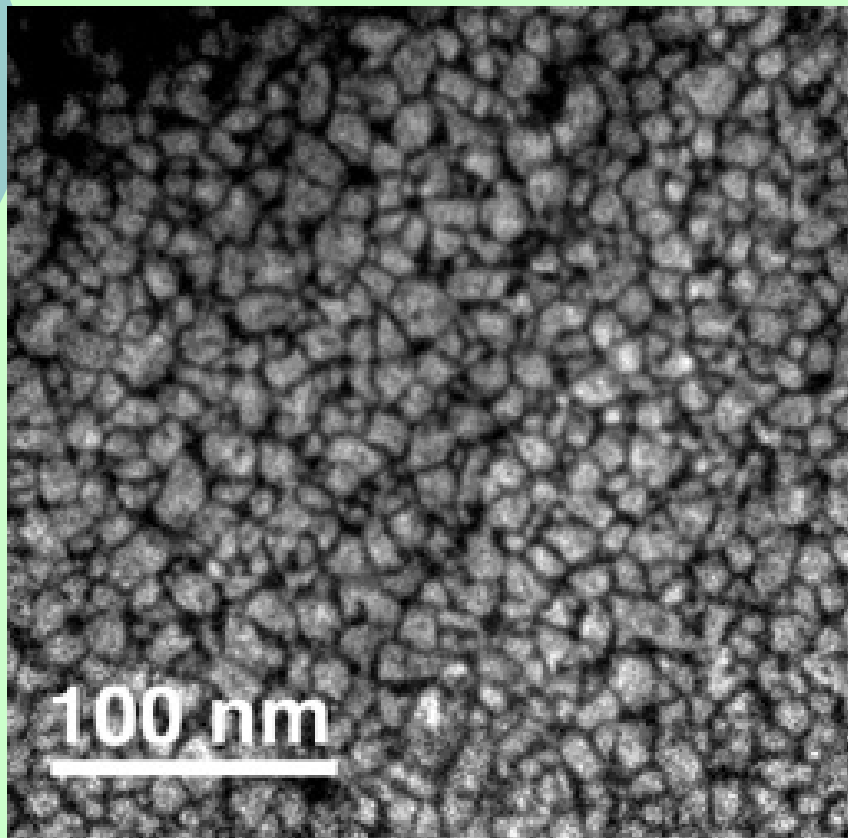


垂直磁気記録媒体における記録



http://www.hqrd.hitachi.co.jp/rd/topics_pdf/hitac2002_10.pdf

CoCrTa媒体のCo元素面内分布

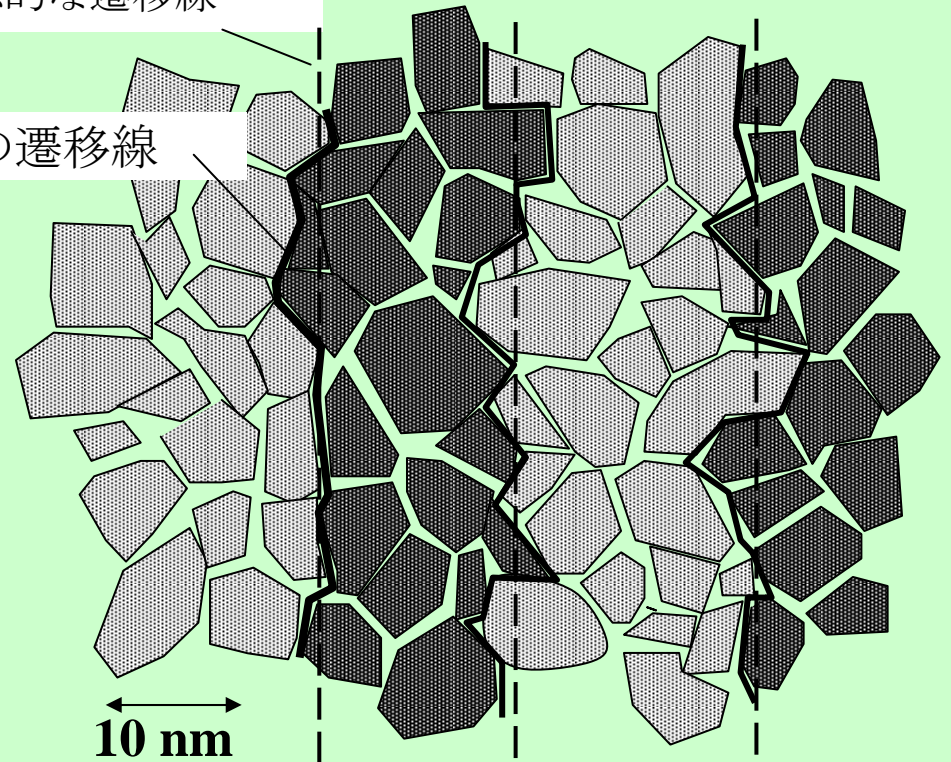


多結晶記録媒体の記録磁区と磁壁

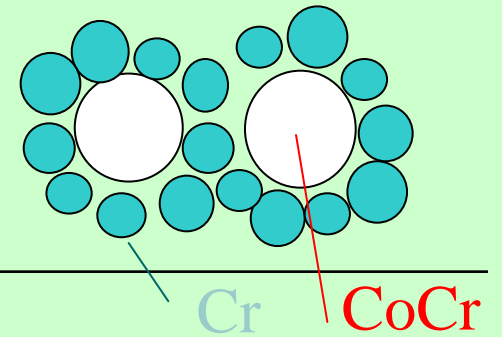
- 現在使われているハードディスク媒体は図に示すように直径数nmのCoCr系強磁性合金の結晶粒が、粒界に偏析したCr粒に囲まれ、互いに分離した多結晶媒体となっている。
- 微粒子のサイズが小さくなっていくと、磁気ヘッドによって記録された直後は、記録磁区内のすべての粒子の磁化が記録磁界の方向に向いているが、時間とともに各粒の磁化がバラバラな方向に向いていき、記録された情報が保てないという現象が起きてくる。

理想的な遷移線

実際の遷移線



超常磁性限界



- 現在使われているハードディスク媒体はCoCrPtBなどCoCr系の多結晶媒体である。強磁性のCoCr合金の結晶粒が偏析したCr粒に囲まれ、互いに分離した膜構造になっている。
- 磁気ヘッドによって記録された直後は、磁化が記録磁界の方向に向いているが、微粒子のサイズが小さくその異方性磁気エネルギー K_uV (K_u は単位体積あたりの磁気異方性エネルギー、 V は粒子の体積)が小さくなると、磁化が熱揺らぎ kT によってランダムに配向しようとして減磁するという現象が起きる。これを超常磁性限界と呼んでいる。

熱揺らぎによる減磁現象

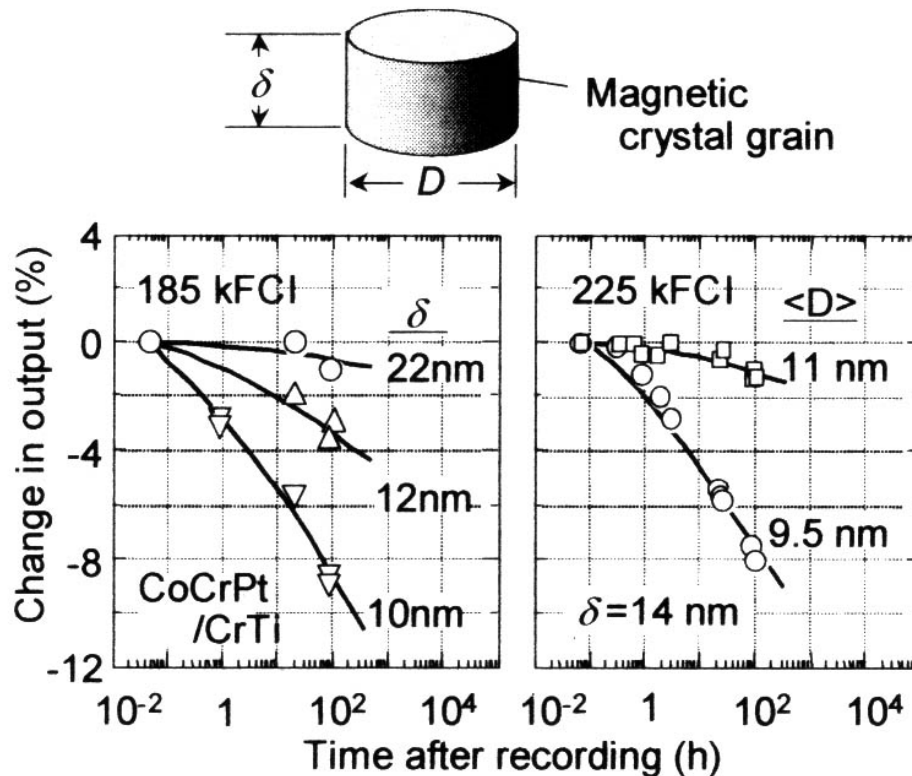


図 11 熱揺らぎによる面内磁気記録媒体の出力減衰

- 実際、20 Gb/in²の記録媒体では、その平均の粒径は10 nm程度となり、各結晶粒は磁氣的に独立に挙動し、記録された情報が保てない。
 - 細江讓：日本応用磁気学会サマースクール27テキストp.97(2003)

熱減磁と活性化体積

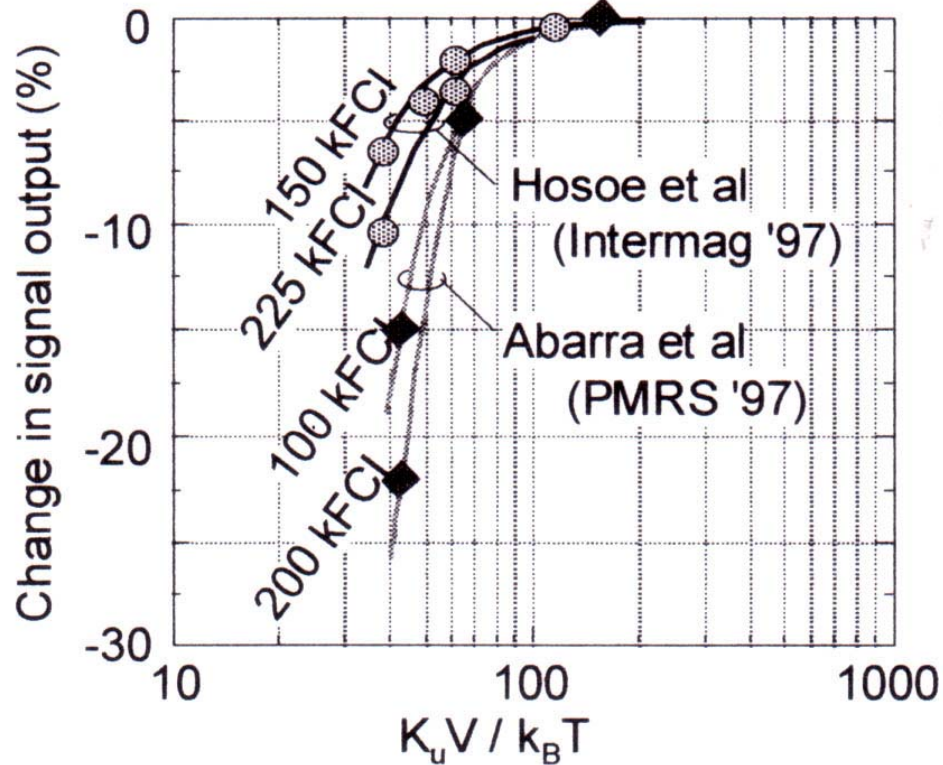


図 12 熱減磁の $K_u V / k_B T$ 依存性

- $\eta = K_u V / k_B T > 60$ でないと熱減磁が心配
- 細江譲: MSJサマースクール27テキスト p.97(2003)

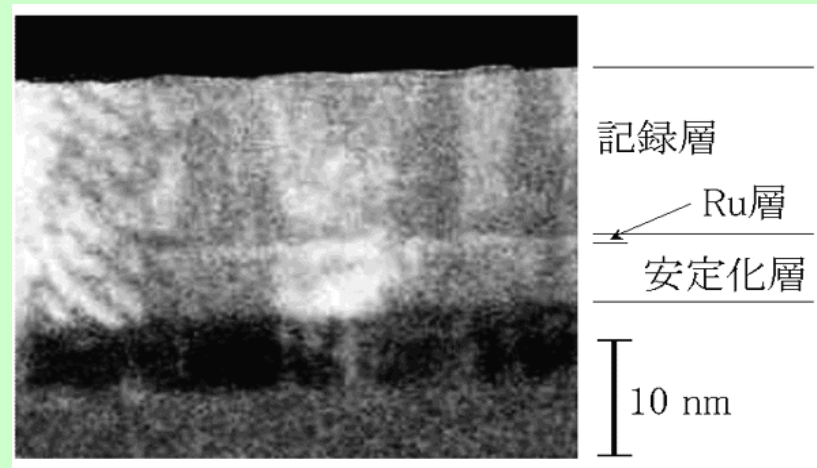
熱的安定条件

- ハードディスクの寿命の範囲でデータが安定であるための最低条件は、 $\eta = KuV/kT > 60$ とされている。
- 面記録密度 D とすると、粒径 d は $D^{1/2}$ に比例するが、記録される粒子の体積 V はほぼ d^3 に比例するので V は D の増大とともに $D^{3/2}$ に比例して減少する。
- この減少を補うだけ、磁気異方性 Ku を増大できれば、超常磁性限界を伸ばすことができる。単磁区の微粒子を仮定し、磁化反転が磁化回転によるとすると、保磁力 H_c は $H_c = 2Ku/M_s$ と書かれるから $D^{3/2}$ 以上の伸びで保磁力を増大すれば救済できるはずである[1]。
- しかし、 H_c が大きすぎると、通常の磁気ヘッドでは記録できなくなってしまう。これを救うのがハイブリッド記録である。

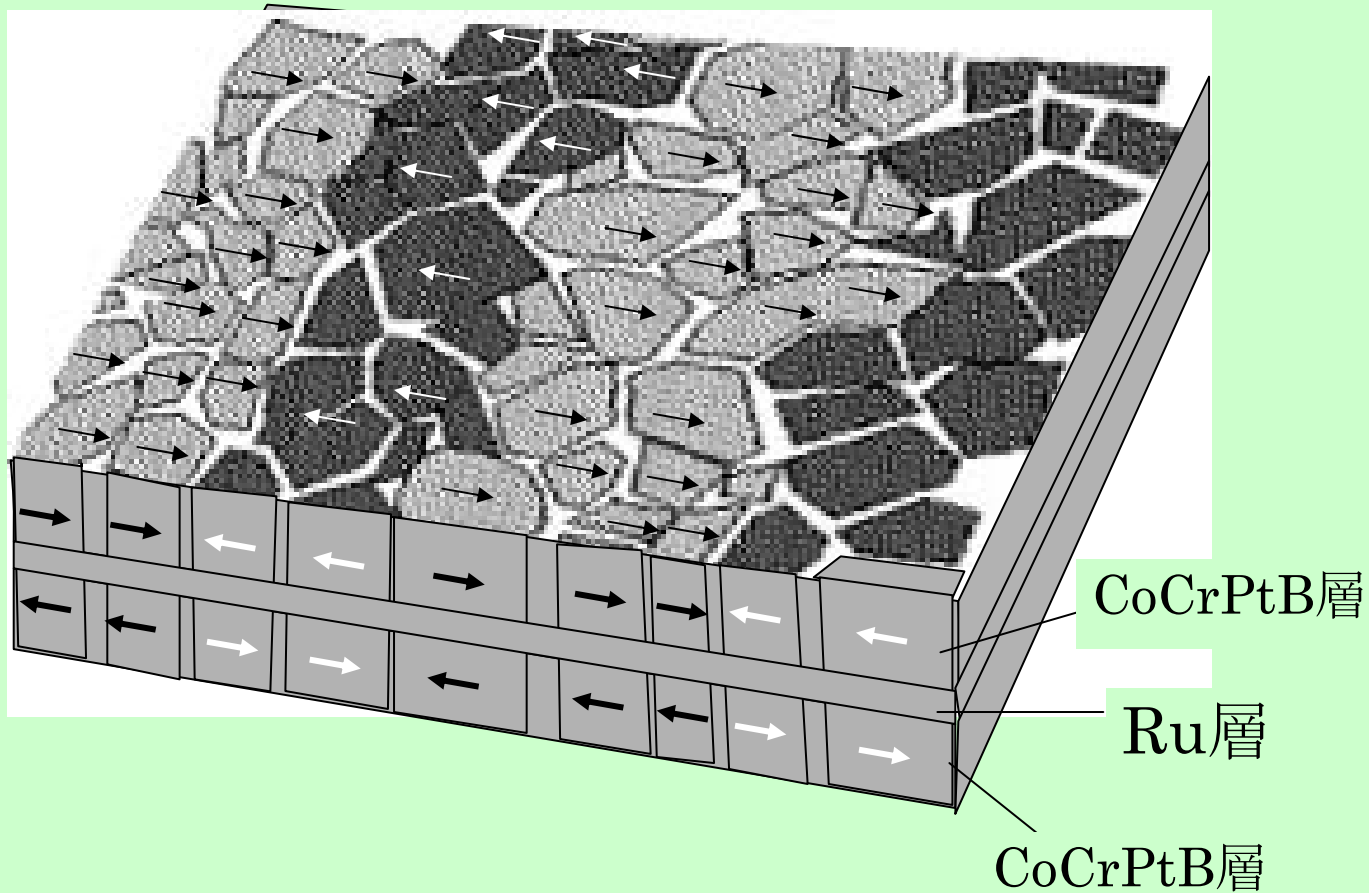
[1] T.W. McDaniel and W.A. Challener: *Proc. MORIS2002*, Trans Magn. Soc. Jpn. 2 (2002) 316.

AFC(反強磁性結合)媒体

- AFC媒体
(antiferromagnetically coupled media)というのは、Ruの超薄膜を介して反強磁性的に結合させた媒体のことで、交換結合によって見掛けのVを増大させて、安定化を図るものである。
- 富士通ではSF (synthetic ferromagnet) 媒体と称する強磁性結合媒体を用いて超常磁性限界の延伸を図っている。



反強磁性結合(AFC)媒体の模式図



AFC媒体、SF媒体では、交換結合で見かけのVを増大

超常磁性限界はどこまで伸ばせられるか

- このような方法によって超常磁性限界の到来を多少遅らせることはできても、せいぜい500Gbits/in²迄であろうと考えられている。
- 保磁力を大きくすれば安定性が向上することは確実であるが、磁気ヘッドで書き込めなくなってしまう。ヘッドの飽和磁束密度には限界があるし、ヘッドの寸法の縮小にも限界がある。現行の磁気ヘッドは理論限界の1/2程度のところにまで到達しており、改善の余地はほとんど残されていない。

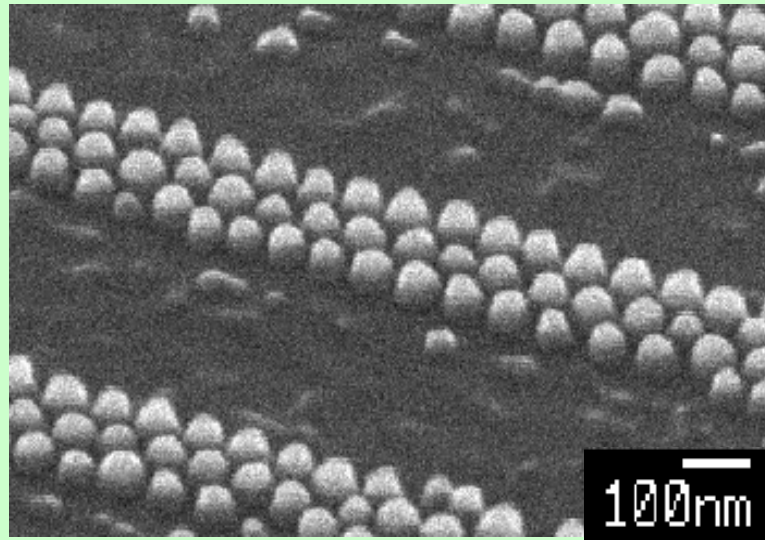
超常磁性の克服

- 保磁力の大きな媒体にどのようにして記録するのかという課題への1つの回答が、パターンドメディアを用いた垂直磁気記録技術であるが、もう1つの回答が熱磁気記録である。
- パターンド・メディア
 - 物理的に孤立した粒子が規則的に配列
- 熱アシスト記録(光・磁気ハイブリッド記録)
 - 記録時に温度を上昇させて H_c を下げ記録。室温では H_c が増大して熱的に安定になる。

熱アシスト記録材料

- 熱磁気記録に用いられる媒体としては、従来からHDDに用いられてきたCoCr系のグラニューラー媒体を利用する方法と、MO媒体として使われてきたアモルファス希土類遷移金属合金媒体を用いる方法が考えられる。また、短波長MO材料として検討されたPt/Co多層膜媒体を用いることも検討されている。いずれにせよ、室温付近で大きな H_c を示し、温度上昇とともに通常の磁気ヘッドで記録できる程度に H_c が減少する媒体が望ましい。

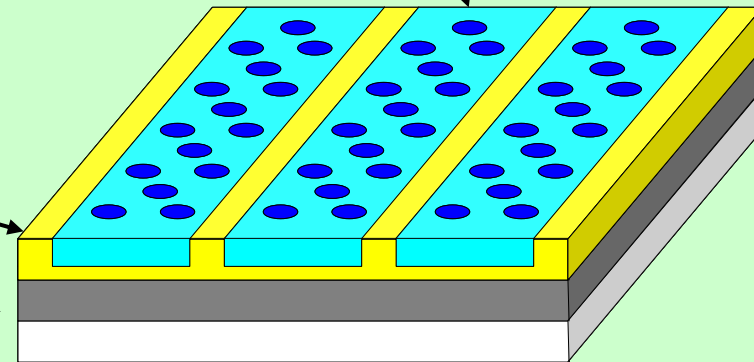
ナノインプリントと自己組織化を利用した パターンドメディア



80nm-pitch, 40nm ϕ

resist groove
by imprinting

CoCrPt layer



喜々津氏(東芝)のご好意による

磁気と電気伝導

- ホール効果
- 磁気抵抗効果

磁気抵抗効果MR(magnetoresistance)

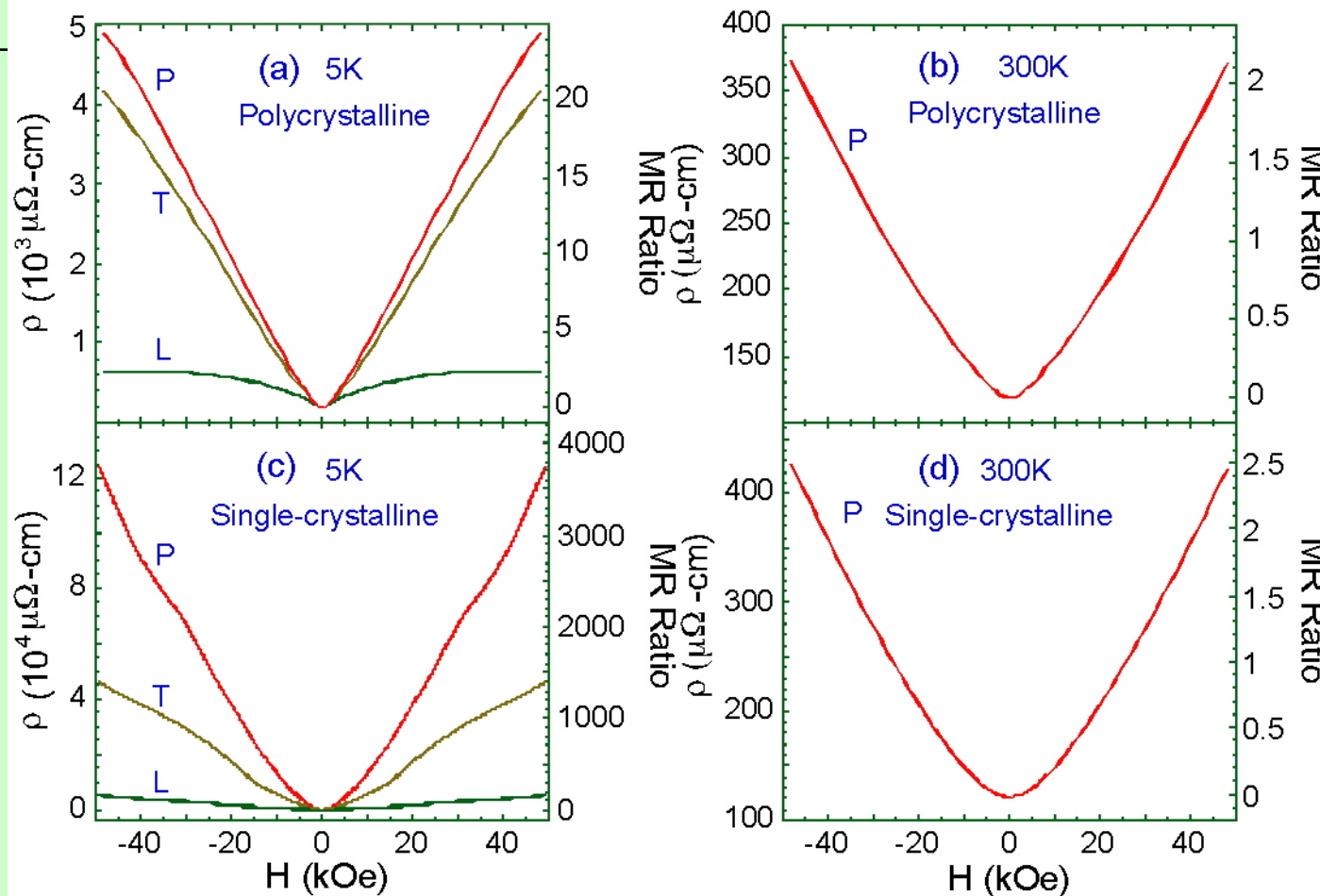
- 半導体・半金属における正のMR:ローレンツ力
- 磁性半導体に見られる負のMR:スピン無秩序散乱
- 強磁性体の異方性磁気抵抗AMR
- 磁性体/非磁性体/磁性体構造の巨大磁気抵抗GMR
- 磁性体/絶縁層/磁性体構造のトンネル磁気抵抗TMR
- 強相関系酸化物の巨大磁気抵抗CMR

半導体・半金属のMR

- $\Delta\rho = \rho(B) - \rho(0)$
- 磁気抵抗効果 $MR = \Delta\rho / \rho(0) = M_t B^2$
ここに M_t は横磁気抵抗係数
- 磁界の2乗に比例する正の磁気抵抗
- ホール効果と同じようにLorentz力によって電子の軌道が曲げられることの2次の効果である。
- 電子の散乱までの平均自由時間 τ に異方性があると $\langle \tau^2 \rangle \neq \langle \tau \rangle^2$ になり、磁気抵抗効果が生じる。

ビスマスの巨大な正の磁気抵抗効果

http://medusa.pha.jhu.edu/Research/Bi_SC.html

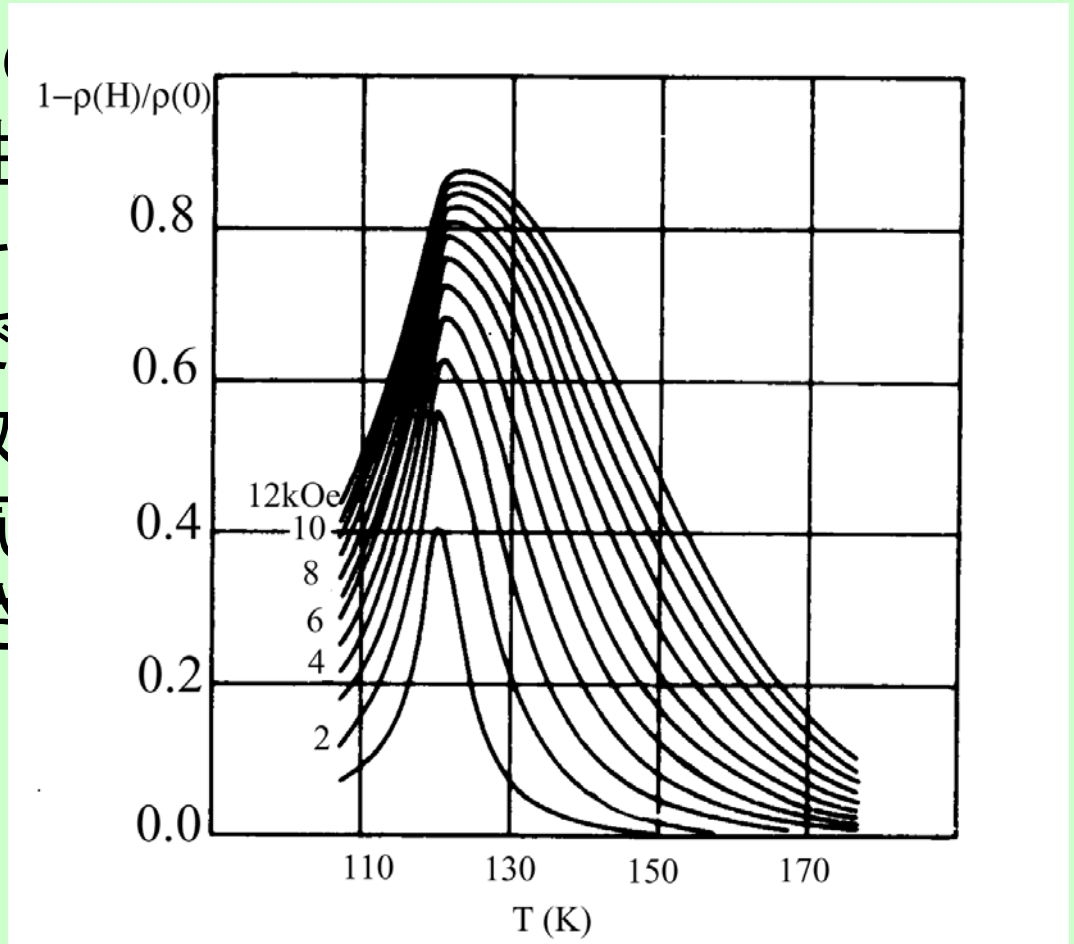


Very Large Magnetoresistance and Field Sensing Characteristics of Electrodeposited Single-Crystal Bismuth Thin Films

F. Y. Yang, Kai Liu, Kimin Hong, D. H. Reich, P. C. Searson, and C. L. Chien (John Hopkins Univ.)

磁性半導体の負の巨大磁気抵抗効果

- CdCr_2Se_4 などの第1世代の磁性半導体では、キリー温度付近でスピン無秩序散による巨大磁気抵抗効果が報告されている。



強磁性体の異方性磁気抵抗効果(AMR)

- 上向き及び下向きスピンバンドとスピン依存散乱の見地から解釈される
- 抵抗率テンソルは次の形に書ける。

$$[\rho_{ij}] = \begin{bmatrix} \rho_{\perp}(B) & -\rho_H(B) & 0 \\ \rho_H(B) & \rho_{\perp}(B) & 0 \\ 0 & 0 & \rho_{//}(B) \end{bmatrix}$$

- この形は、次式に対応する。ここに J は電流ベクトル、 α は磁化 M の向きを表す単位ベクトルである。

$$E = \rho_{\perp}(B)J + [\rho_{//}(B) - \rho_{\perp}(B)][\alpha \cdot J]\alpha + \rho_H(B)\alpha \times J$$

異常ホール効果と異方性磁気抵抗効果

$$\rho_{\perp}(\mathbf{E}) = \rho_{\perp} + \rho_{\perp}^{(0)}(\mathbf{B})$$

$$\rho_{//}(\mathbf{E}) = \rho_{//} + \rho_{//}^{(0)}(\mathbf{B})$$

$$\rho_H(\mathbf{E}) = \rho_H + \rho_H^{(0)}(\mathbf{B})$$

第1項: 磁化 M にのみよる項; 異常項

第2項: 実効磁束密度 B に依存する項; 正常項

- $\rho_{//}$ は、電流が磁化に平行である場合の抵抗率の $B \rightarrow 0$ 外挿値。 ρ_{\perp} は、電流が磁化に垂直である場合の抵抗率の $B \rightarrow 0$ 外挿値。 ρ_H は異常ホール抵抗率である。
- 一般に $\rho_{//} \neq \rho_{\perp}$ である。これは、抵抗が磁化 M と電流 J の相対的な向きに依存していることを示している。

AMRの説明

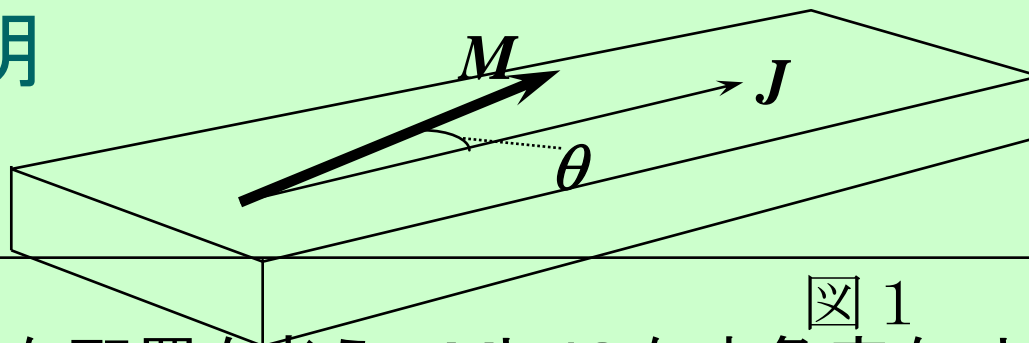
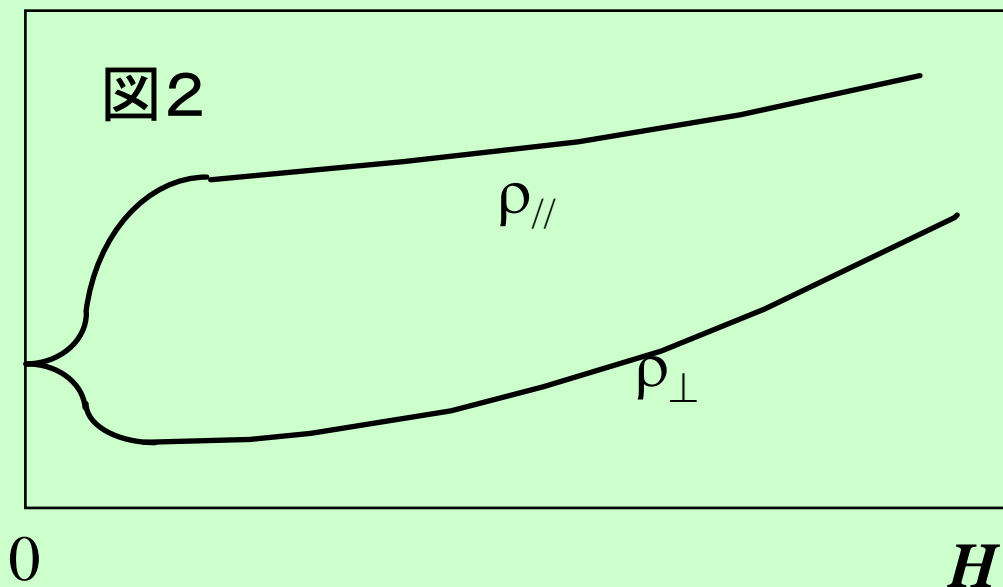


図1

- 図1に示すような配置を考え、 M と J のなす角度を θ とすると、MR比を求めると



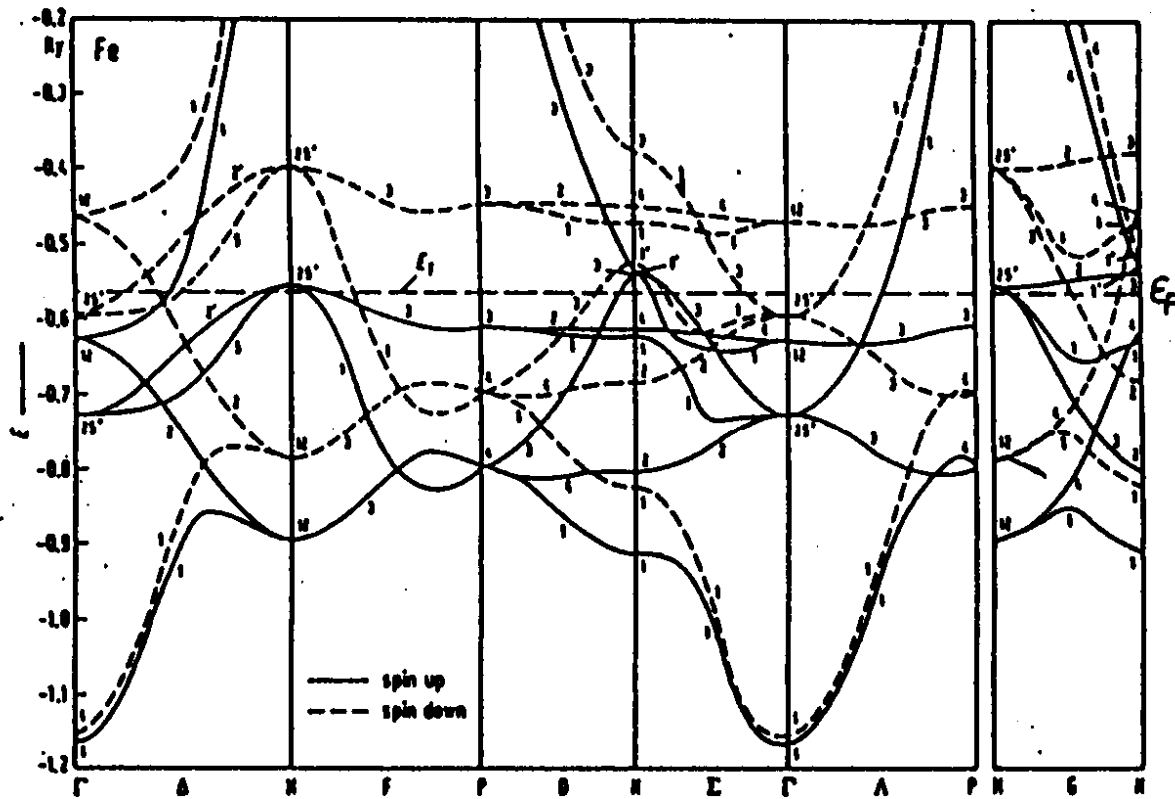
$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\rho_{//} - \rho_{\perp}}{\frac{1}{3}\rho_{//} + \frac{2}{3}\rho_{\perp}}$$

磁気抵抗比の符号は正負どちらも取りうる。大きさは2-3%程度である。

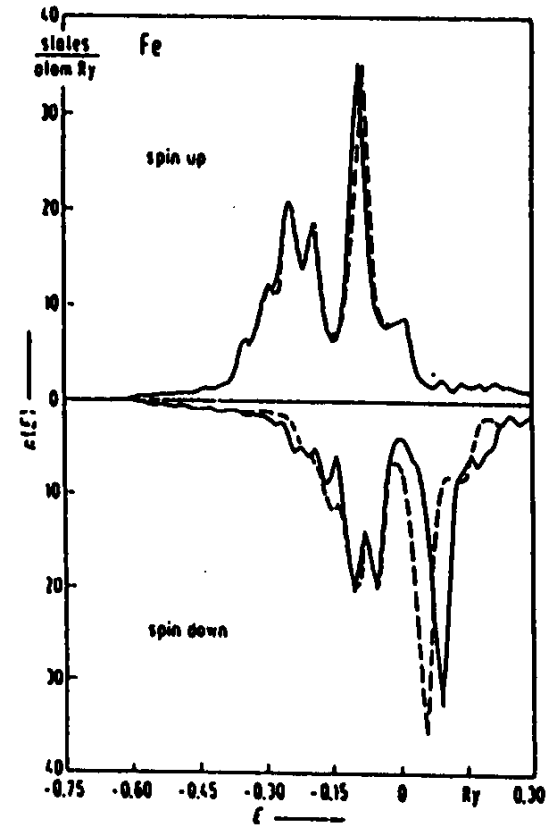
2流体電流モデル(two current model)

- スピン依存の散乱ポテンシャルを考え、電流は↑スピンと↓スピンの伝導電子[1]によってそれぞれ独立に運ばれると考える。散乱によってs電子がd電子帯に遷移するが、↑スピンd電子帯と↓スピンd電子帯では空の状態密度が異なるため、s電子はスピンの向きに応じて異なった散乱確率を感じるようになる。
- [1] 全磁化と平行な磁気モーメントを持つ電子(多数スピンバンドの電子)を↑で表し、反平行なもの(少数スピンバンドの電子)を↓で表す。

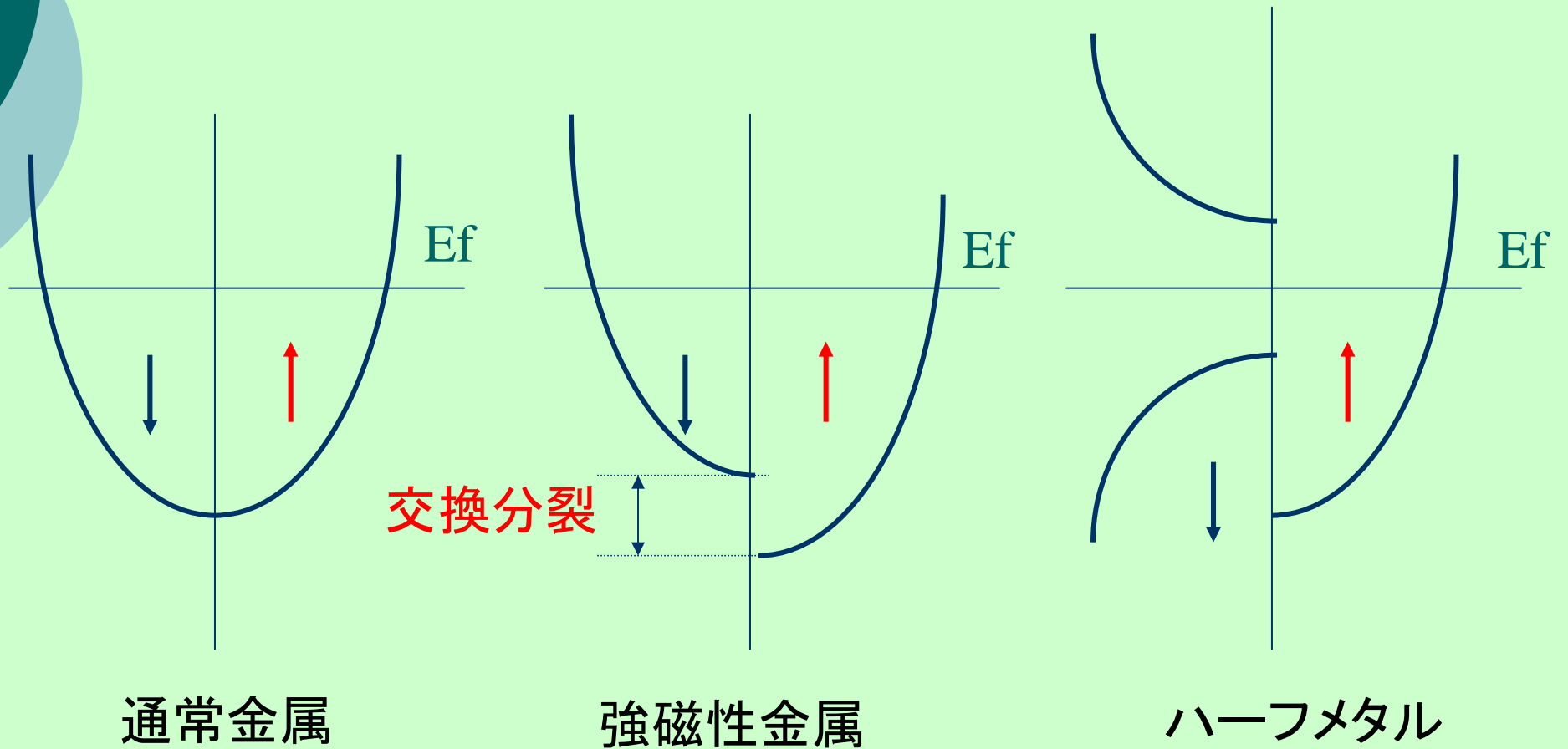
Feのスピンの偏極バンド構造



(b) Feのバンドダイヤグラム[2]



バンドと磁性



スピン軌道相互作用とAMR

- ↑スピンに対する抵抗率を ρ_{\uparrow} 、↓スピンに対する抵抗率を ρ_{\downarrow} とすると、全体の抵抗率は $\Delta\rho/\rho = \rho_{\uparrow}\rho_{\downarrow}/(\rho_{\uparrow} + \rho_{\downarrow})$ で表される。
- いま、単純な2流体モデルを考え、スピン軌道相互作用を用いて、異方性磁気抵抗効果を説明することが行われている。
- これによれば、異方性磁気抵抗比は、
$$\Delta\rho/\rho = (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp})/\rho = \gamma(\rho_{\uparrow}/\rho_{\downarrow} - 1)$$
と表される。ここに γ はスピン軌道相互作用係数である。単純遷移金属、遷移金属合金における実験結果の多くはこの式で説明できる。

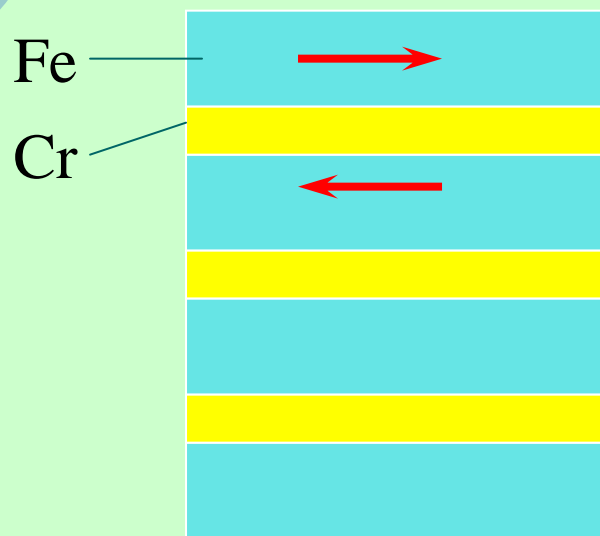
巨大磁気抵抗効果(GMR)

- 1988年にFertらのグループは、Fe/Crなど磁性金属／非磁性金属の人工格子において、大きな磁気抵抗比をもつ磁気抵抗効果を発見した。Baibichらが報告する磁化と磁気抵抗効果の対応 [\[i\]](#)によれば、Crの層厚を変化することによって磁気飽和の様子が変わるが、磁気飽和のしにくい試料において低温で50%におよぶ大きな磁気抵抗比 $R(H)/R(H=0)$ が見られている。室温でもこの比は16%におよび、巨大磁気抵抗効果(GMR=giant magnetoresistance)と名付けた。その後、同様のGMRは、Co/Cuのほか多くの磁性／非磁性金属人工格子、グラニューラ薄膜などで発見された。

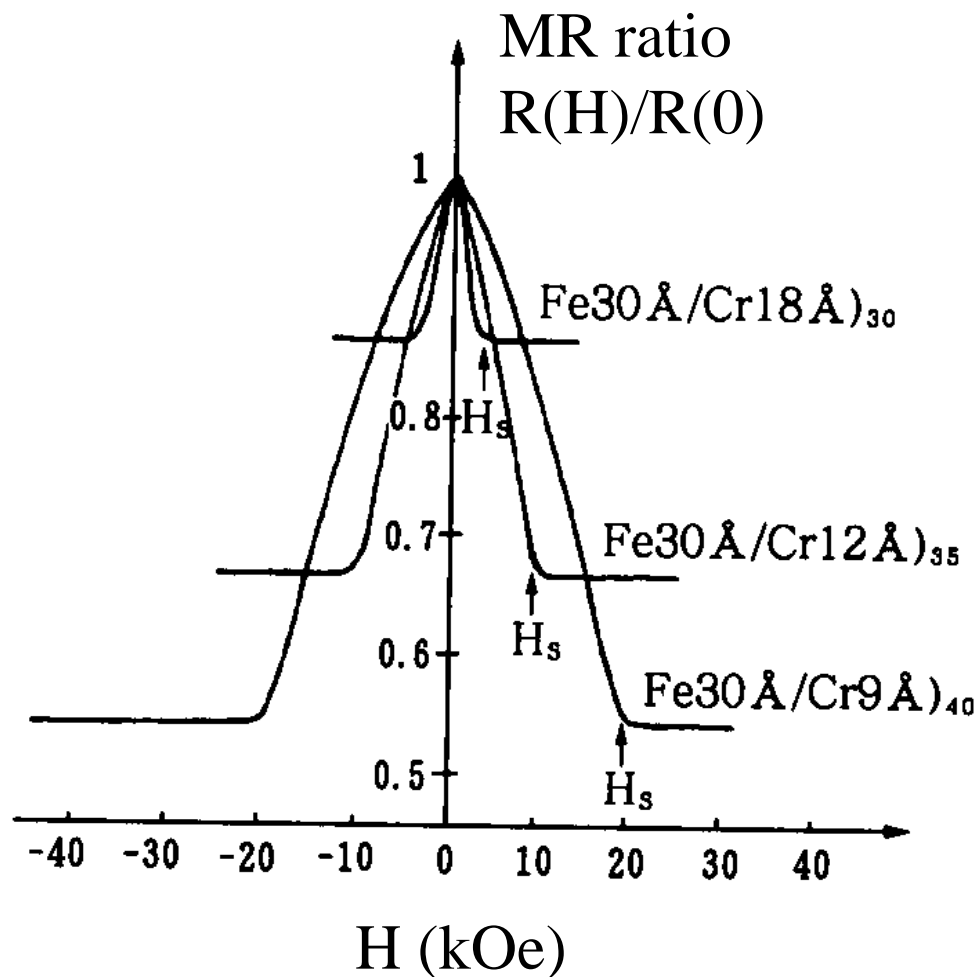
[\[i\]](#) M.N. Baibich, J.M. Broto, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuset, A. Friederich and J. Chazelas: Phys. Rev. 62 (1988) 2472.

層間結合系の巨大磁気抵抗効果 (GMR)

○ スピン依存散乱



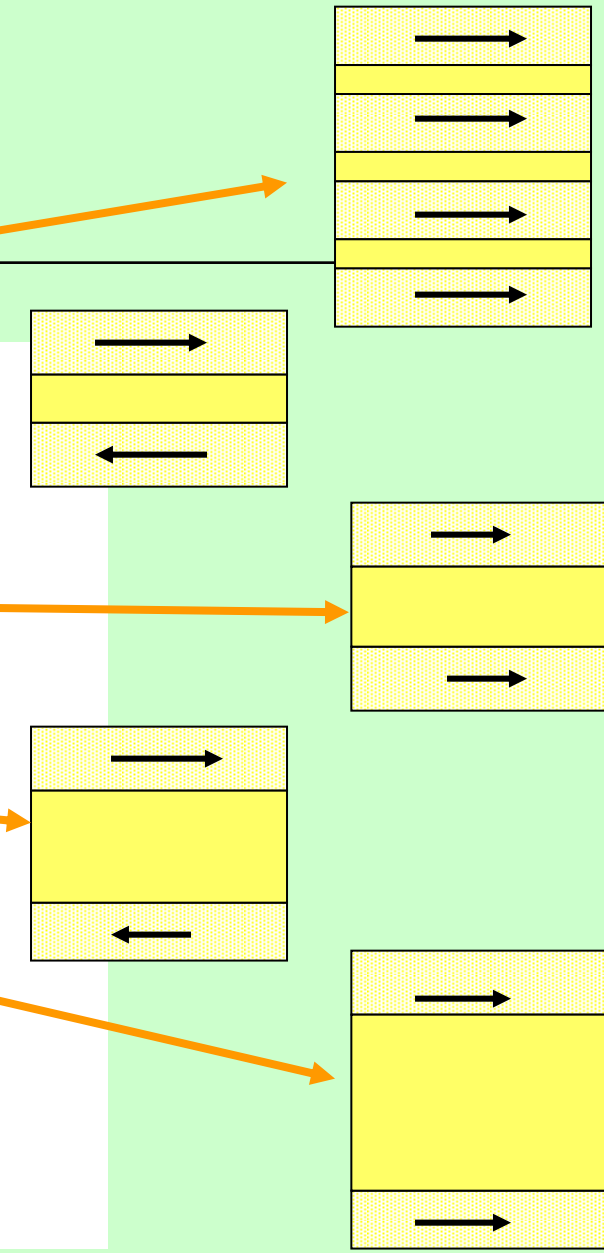
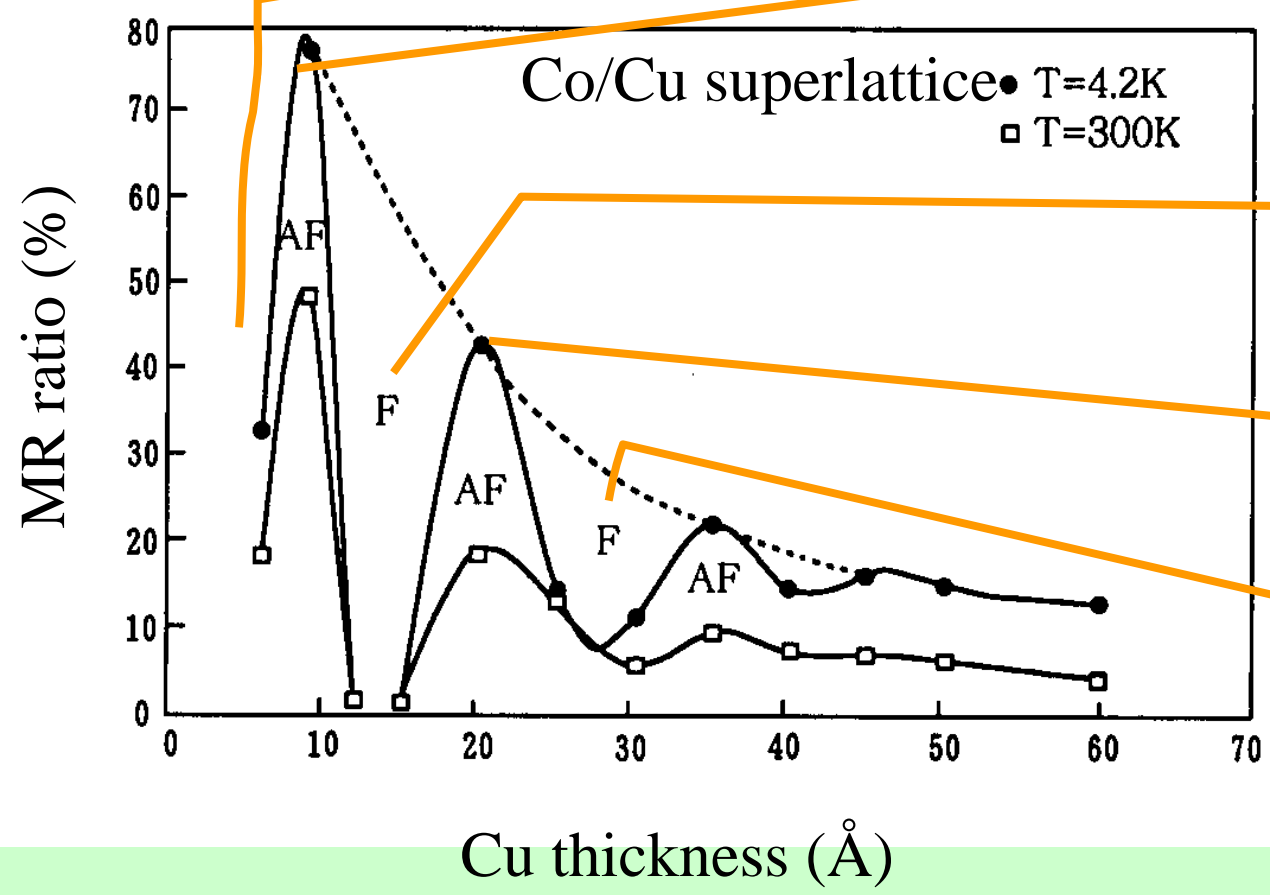
Baibich et al.: PRL 62 (88) 2472



GMRとAMRの違い

- GMRが異方性磁気抵抗効果 (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点である。このような点は、スピン軌道相互作用のみでは説明できない。

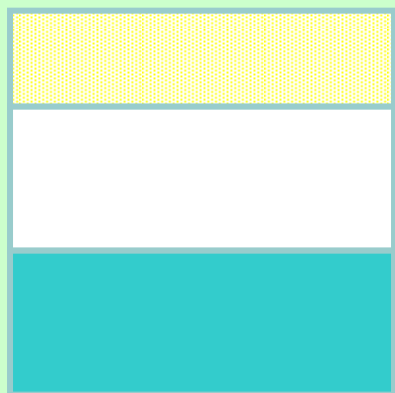
GMR 振動と層間結合



非結合系のGMR

- ソフト磁性体とハード磁性体との3層構造

自由



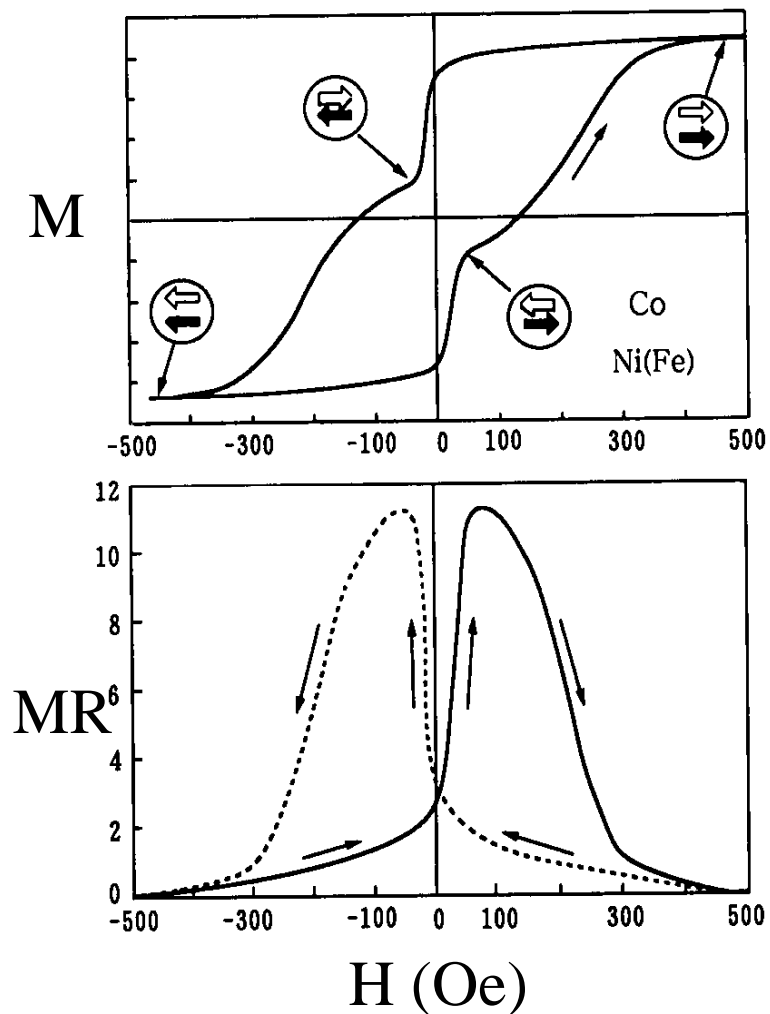
NiFe

Cu

固定

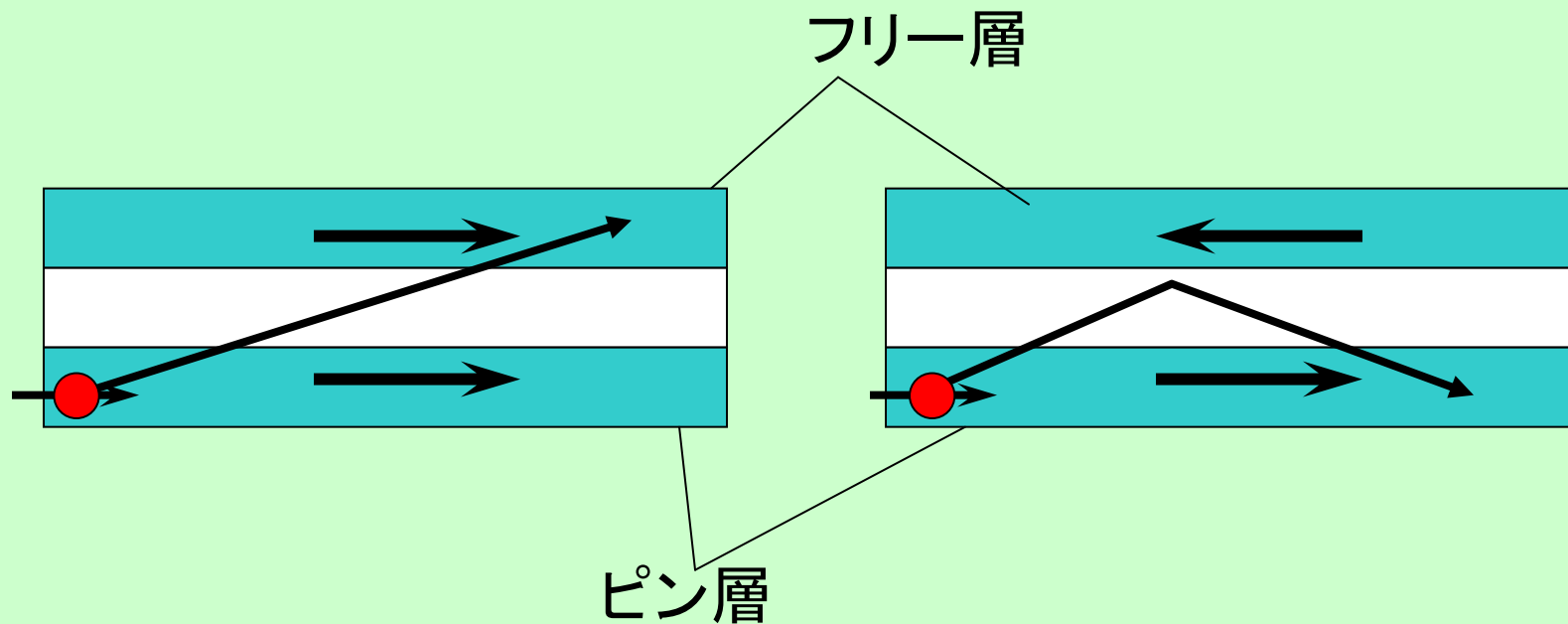
Co

Shinjo et al.: JPSJ 59 (90) 3061

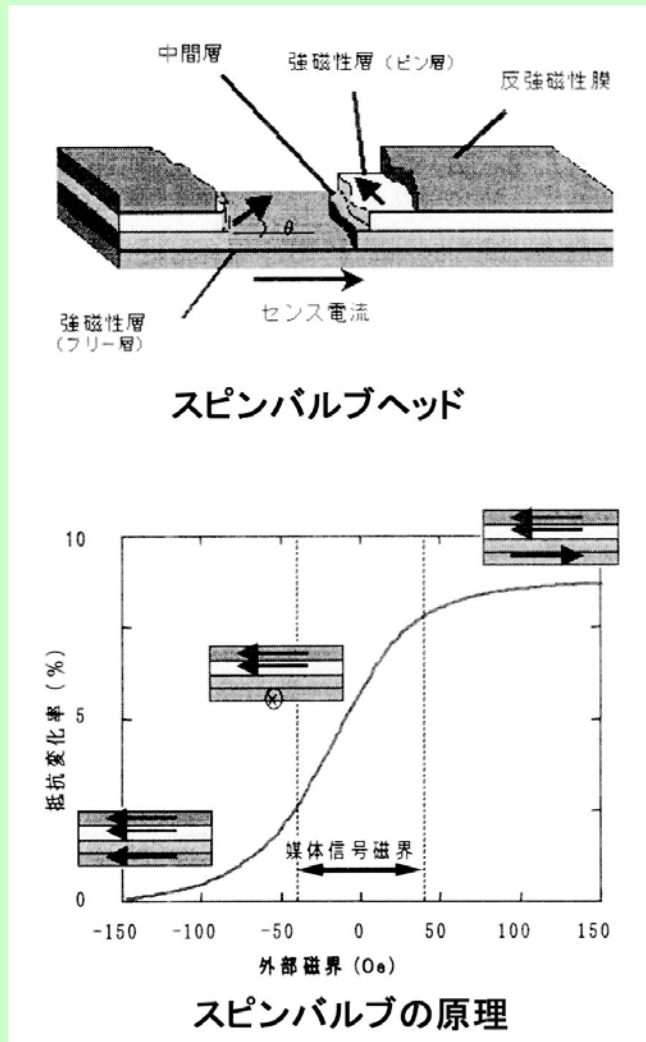


GMR(巨大磁気抵抗効果)素子

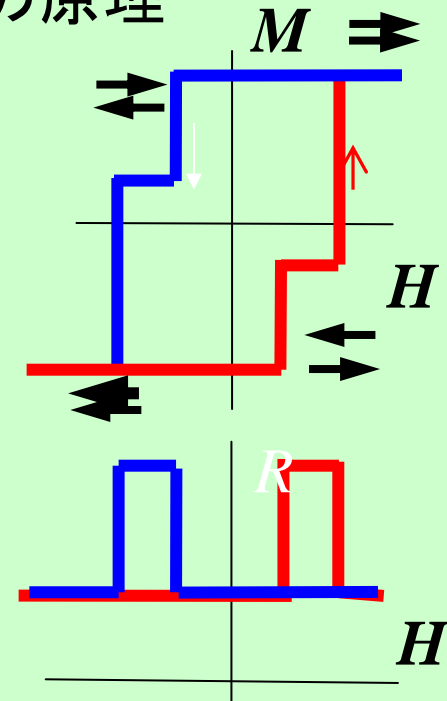
- 強磁性体(F1)/非磁性金属(N)/強磁性(F2)多層膜
- F1, F2平行なら抵抗小。反平行なら抵抗大。



磁化曲線とGMR



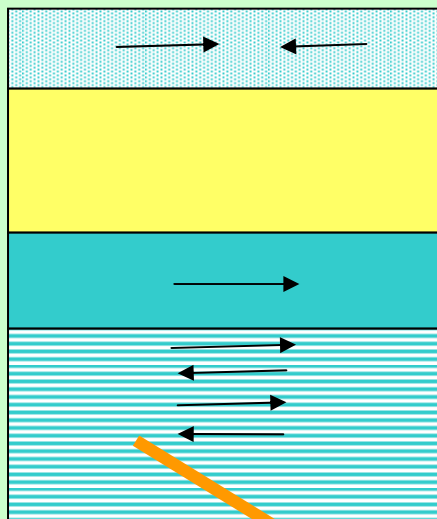
GMR(SV)ヘッドの原理



- F1とF2の保磁力が異なれば反平行スピンの時に抵抗が高くなる。

スピンバルブ

- NiFe(free)/Cu/NiFe(pinned)/AF(FeMn)の非結合型サンドイッチ構造



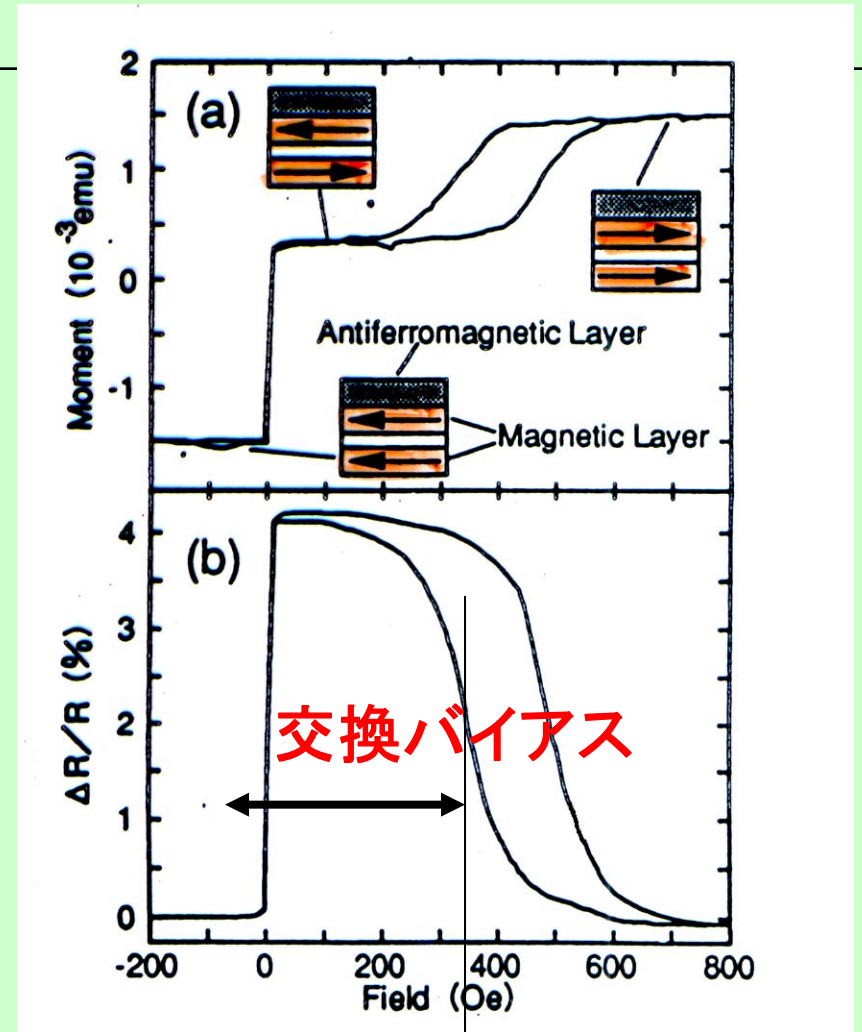
フリー層

非磁性層

ピン止め層

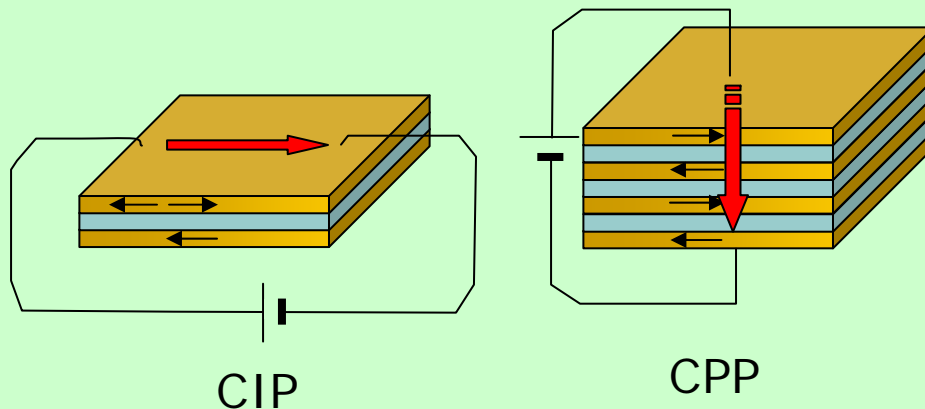
反強磁性層
(例 FeMn)

最近はSAFに置き換え



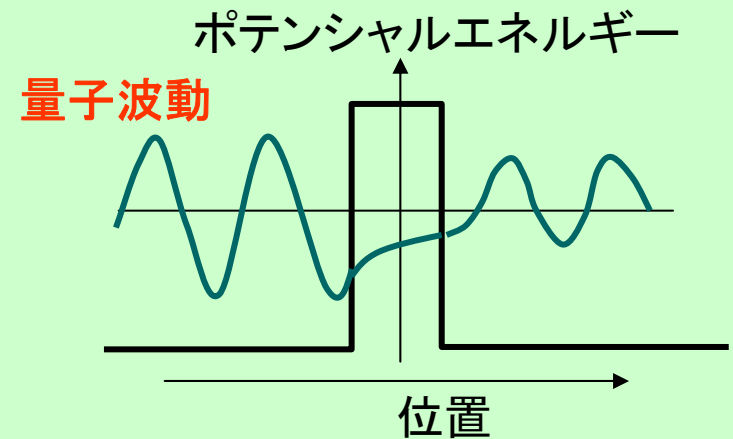
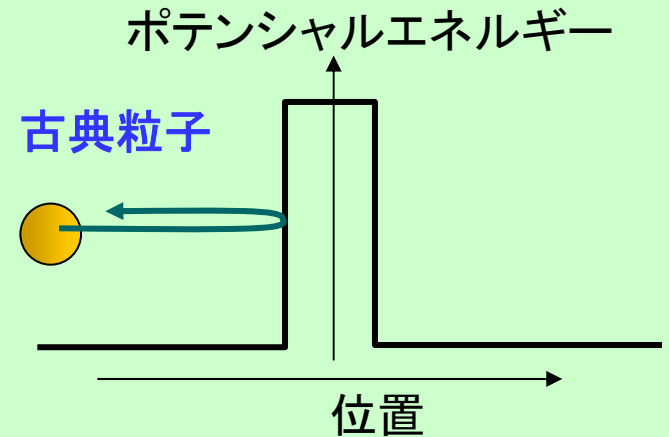
GMRの分類

- CIP(current in plane)型
 - 微細化が困難、抵抗が低すぎる。MR比が小さい。
- CPP(current perpendicular to plane)型
 - 微細加工により細い円柱状に加工可能
 - 抵抗を適当な大きさに調整出来る。MR比大きい。



トンネル効果を知っていますか

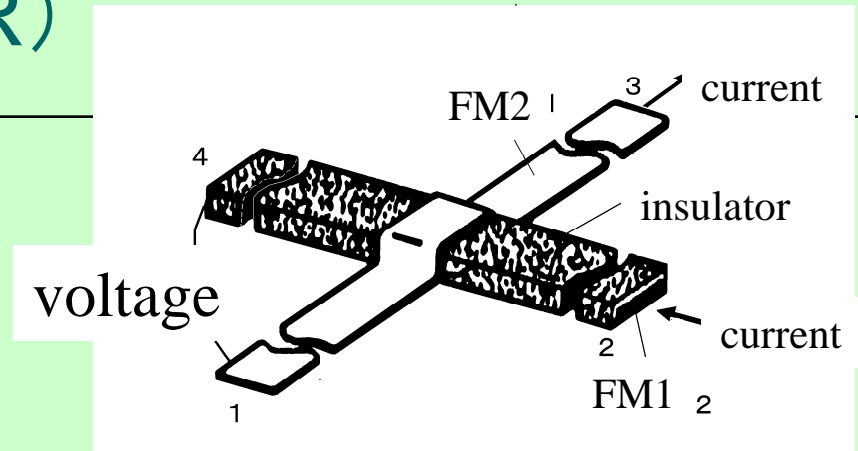
- トンネル効果は、量子力学が成立する世界でのみ成立する効果です。
- 量子の波動は、ポテンシャル障壁の中では、振動せず減衰するが、境界面で振動する波動に接続します。
- この効果は、トンネルダイオード、STM(走査型トンネル顕微鏡)に利用されます。
- MTJではスピンを考慮します。



トンネル磁気抵抗効果(TMR)

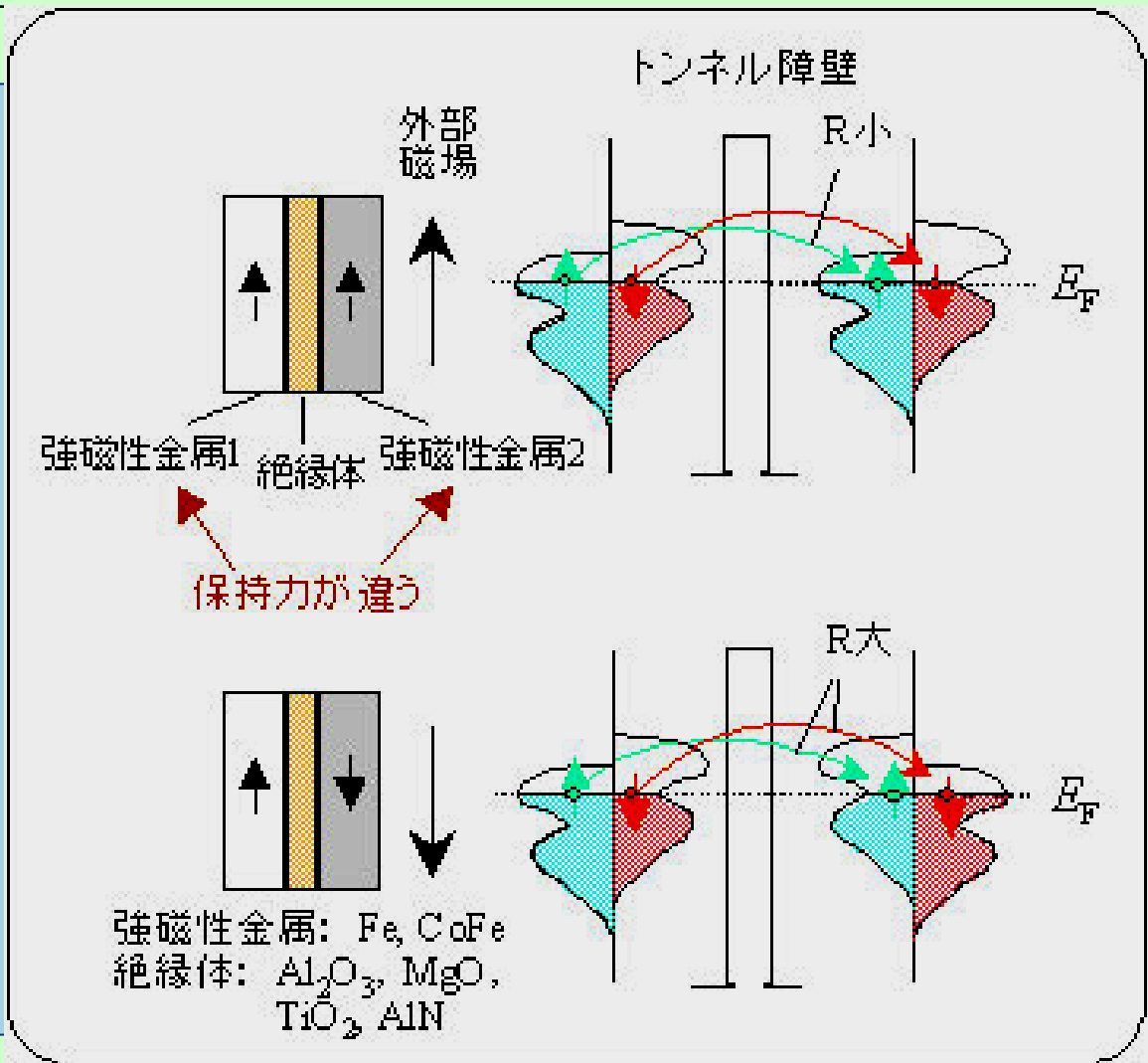
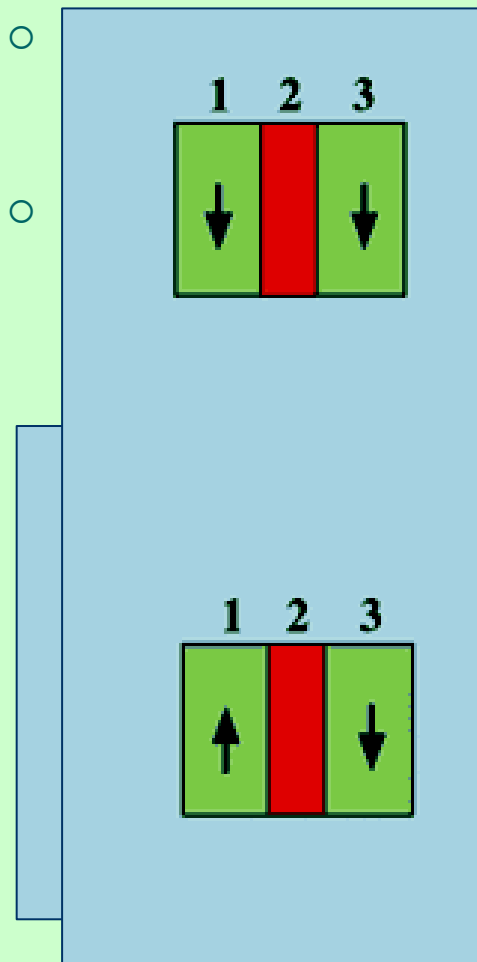
- スピン依存トンネル効果によって生じる。
- 磁気トンネル接合(MTJ)[2つの強磁性電極で極めて薄い絶縁層をサンドイッチした接合]を流れるトンネル電流は、両電極のスピンの相対角に依存する。
- GMRに比べ接合の抵抗が高いため、小電流で動作することが可能。
- MRAMに適している。

スピン依存トンネル効果とトンネル磁気抵抗効果 (TMR)

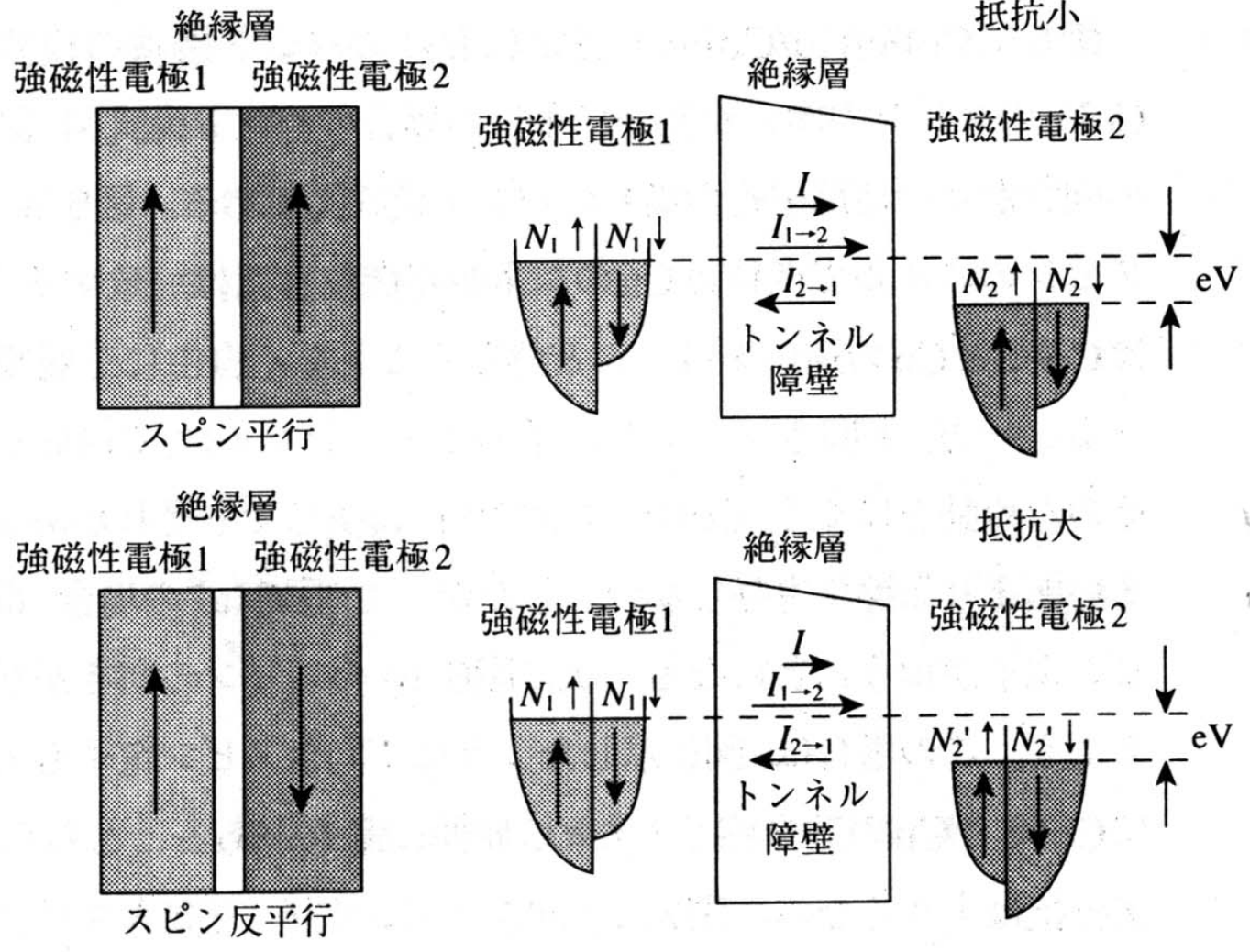


- 強磁性体/絶縁体/強磁性体構造磁気トンネル接合 (MTJ)
- M. Julliere: Phys. Lett. **54A**, 225 (1975)
- S. Maekawa and V. Gafvert: IEEE Trans Magn. **MAG-18**, 707 (1982)
- Y. Suezawa and Y. Gondo: Proc. ISPMM., Sendai, 1987 (World Scientific, 1987) p.303
- J.C. Slonchevsky: Phys. Rev. **B39**, 6995 (1989)
- T. Miyazaki, N. Tezuka: JMMM **109**, 79 (1995)

トンネル磁気抵抗効果(TMR)



トンネル磁気抵抗効果(TMR)

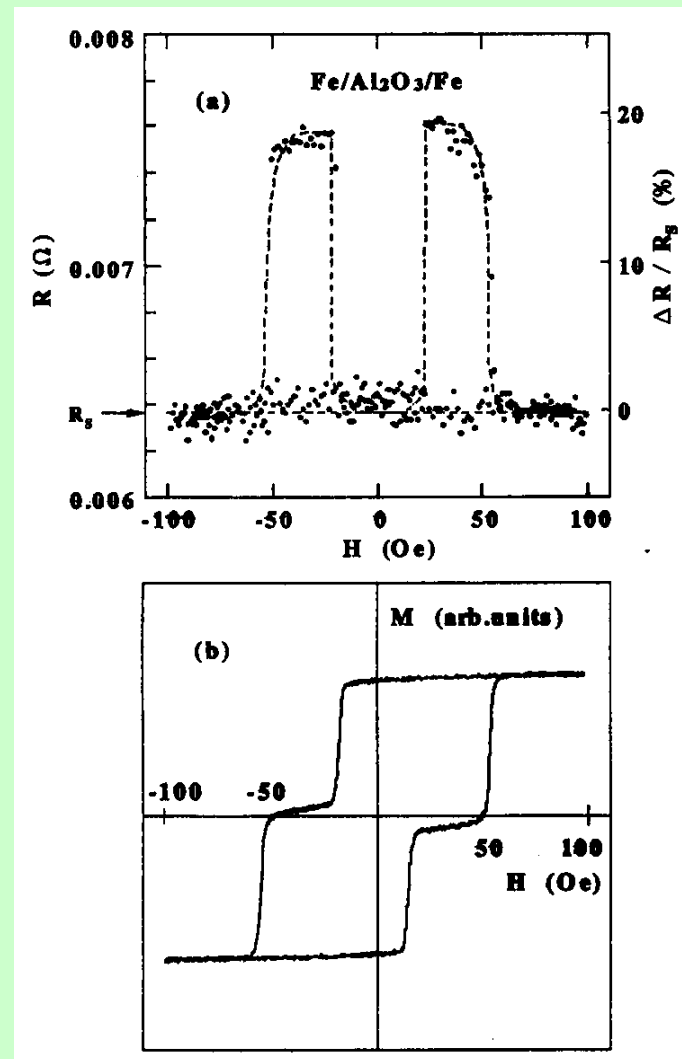


TMRデバイス

- 絶縁体の作製技術が鍵を握っている。
→ 最近大幅に改善

- TMR ratio as large as 45% was reported. (Parkin: Intermag 99)

- Bias dependence of TMR has been much improved by double tunnel junction. (Inomata: JJAP 36, L1380 (1997))



絶縁層の工夫

- 湯浅(産総研)らは、磁性体/絶縁体/磁性体のトンネル接合構造において、絶縁体としてMgO結晶を用いることによってトンネルの際の波動関数の対称性が保たれることを実証し、200%に上る高いMR比を得た。

MgO絶縁層を用いたMTJ

- 産総研の湯浅らは、MTJの絶縁層として非晶質Al₂O₃に代えてMgO結晶を用いることによって波動関数の接続性が改善され巨大MRが得られるというButlerの理論予想に従いFe/MgO/Fe構造を作製した。

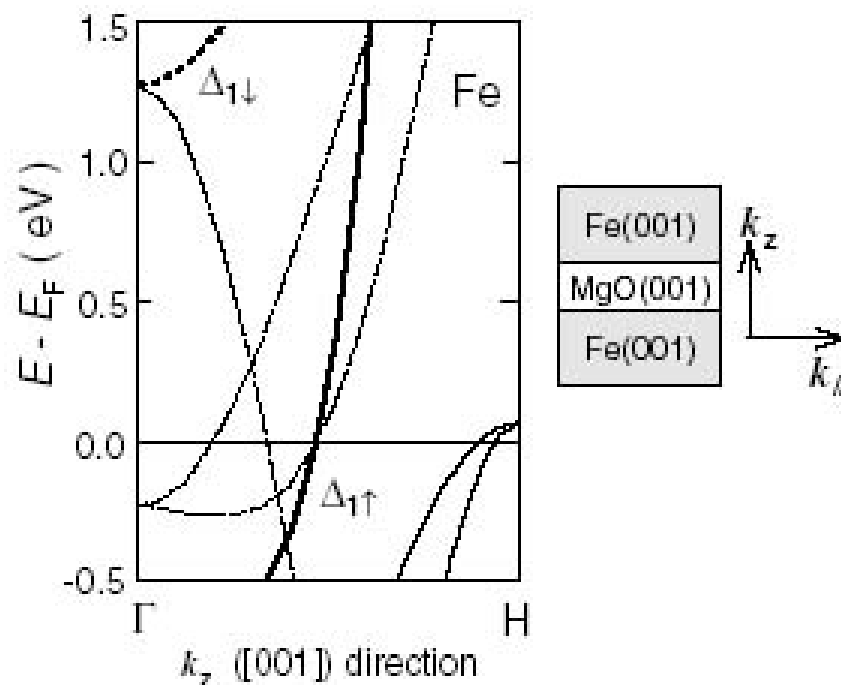


Fig. 1. Band dispersion of Fe in [001] (Γ -H) direction. Solid and dotted lines represent majority-spin and minority-spin sub-bands, respectively. The thick solid and dotted lines represent majority-spin and minority-spin Δ_1 bands, respectively.

Fe/MgO/FeMTJに見られるGMR

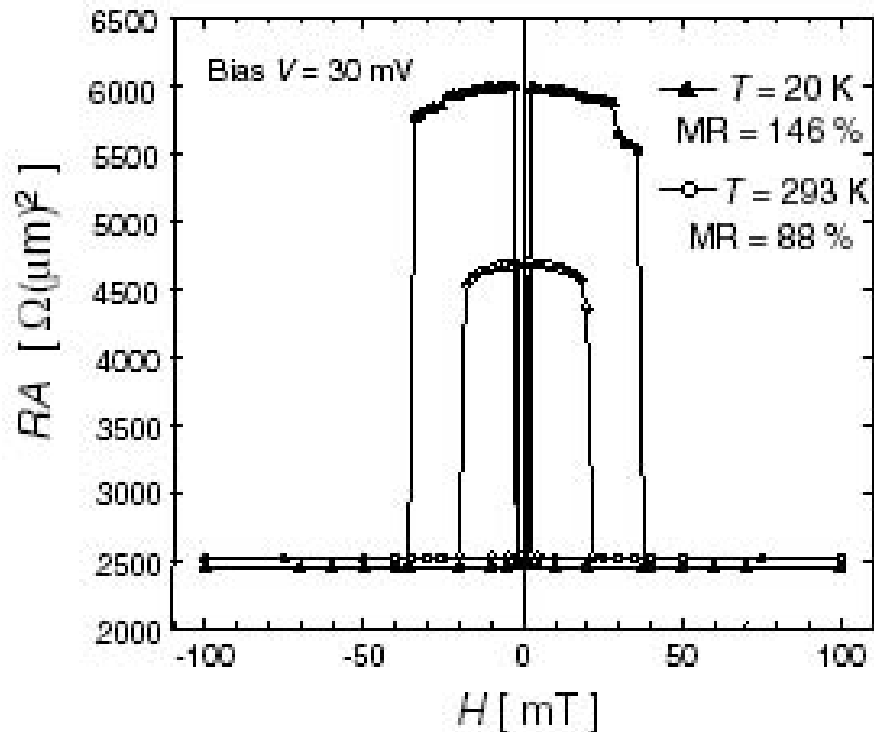


Fig. 3. Magneto-resistance curves for Fe(001)/MgO(001)(20 Å)/Fe(001) MTJ at $T = 293$ and 20 K. The MR ratios were 88% and 146%, respectively.

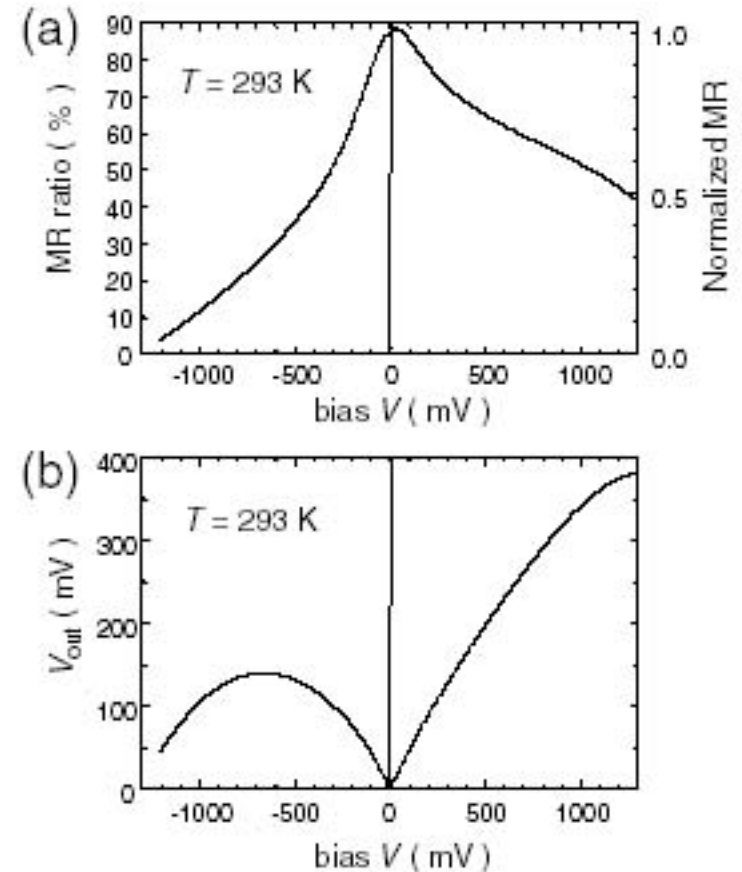
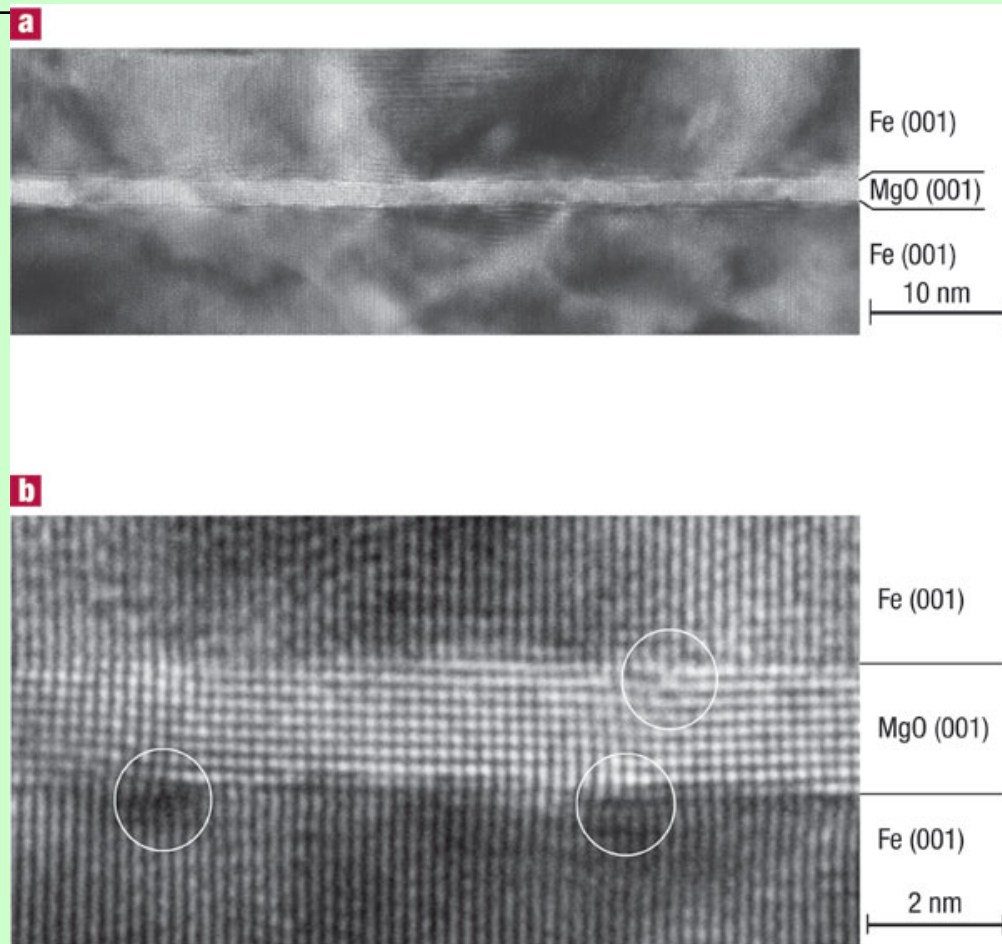


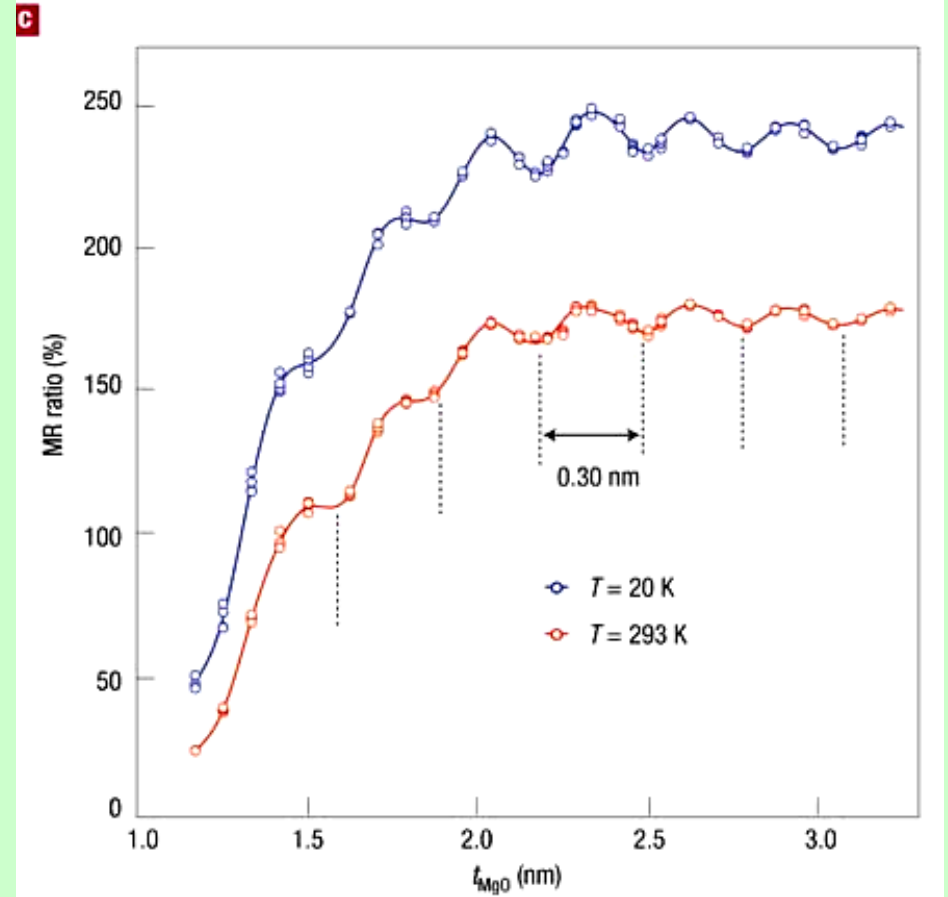
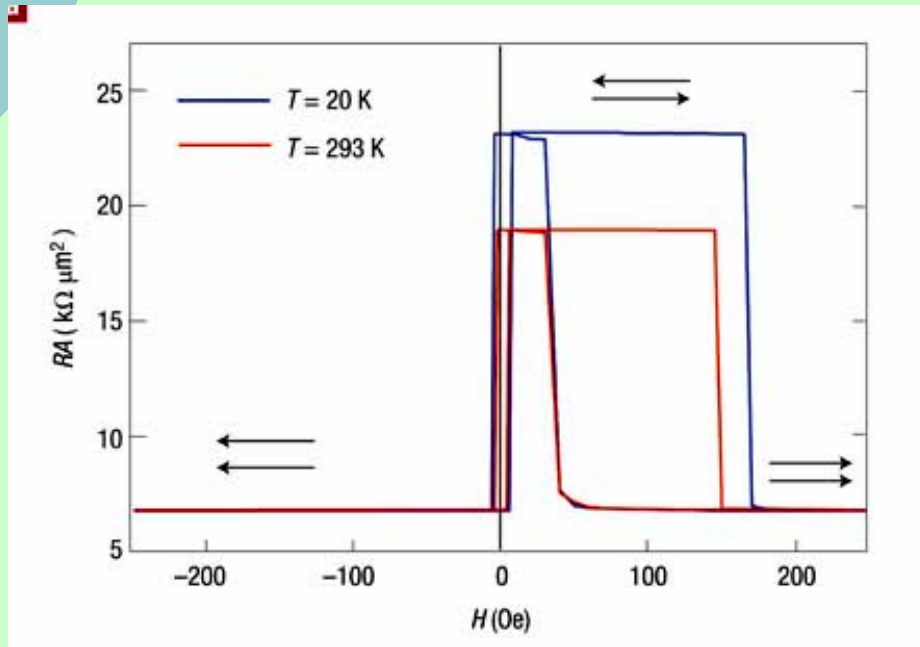
Fig. 4. (a) Bias-voltage (V) dependence of MR ratio for Fe(001)/MgO(001)(20 Å)/Fe(001) MTJ at room temperature. Direction of bias voltage is defined with respect to upper electrode. The $V_{1/2}$ (bias voltage where MR ratio reaches half the zero-bias value) was 1250 and 390 mV for positive and negative bias directions, respectively. (b) Output voltage (V_{out}) of MTJ, defined as bias $V \times (R_{up} - R_p)/R_{up}$, as a function of bias V . Maximum V_{out} was 380 mV.

Fe/MgO/Fe構造のTEM像

- Fe(001)/MgO(001)/Fe(001)がエピタキシャルに成長しており、トンネル層の乱れがほとんどない構造を得ている。また、界面でのFe酸化層も見られていない。



室温で180%ものMR比



スピン偏極率の向上

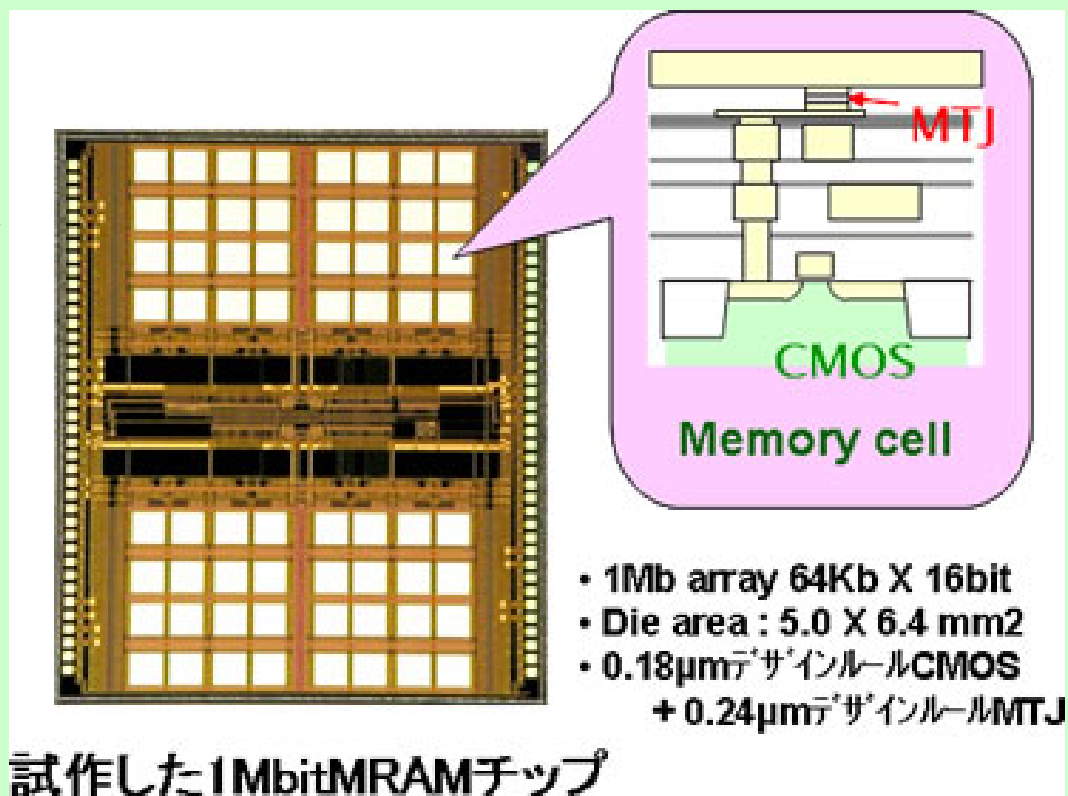
- スピントネル接合においては、強磁性このため、FeRAM(強誘電体メモリ)、OUM(カルコゲニド合金による相変化記録メモリ)とともに、SRAM(高速アクセス性)、DRAM(高集積性)、フラッシュメモリ(不揮発性)のすべての機能をカバーする「ユニバーサルメモリ」としての応用が期待されている。のスピン偏極率が高いほど、MR比が高くなるので、ハーフメタルが求められている。
- ハーフメタルとして、ホイスラー合金が有望視されている。東北大猪俣らは Co_2CrAl を用い、高いMR比を得ることに成功した

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
- MTJとCMOSが組み合わされた構造
- 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。
- 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、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。

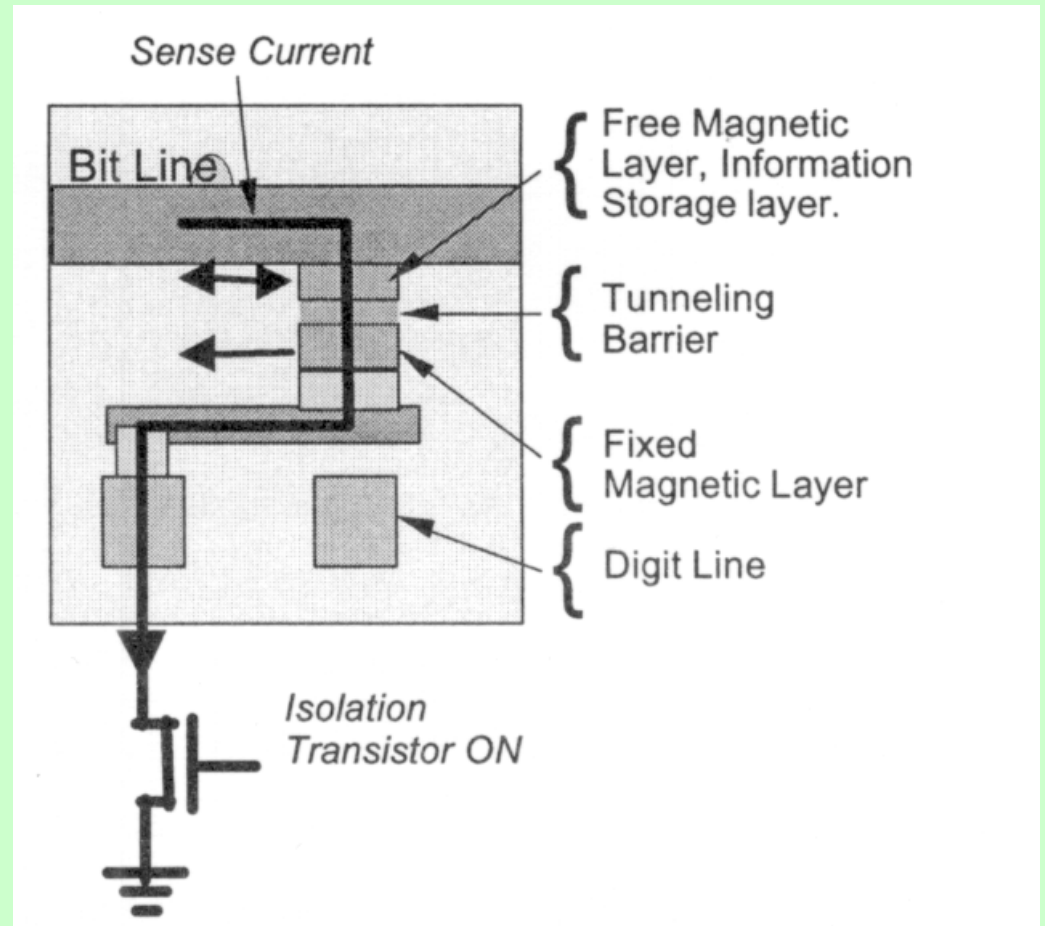
MRAMにおける配線

- NECは、セルサイズ $6.5 \mu\text{m}^2$ の1Mbit MRAMを試作し、アクセス時間70ナノ秒を実現した。高速・大容量不揮発RAMとして様々な応用が期待されている。



TMRを用いたMRAM

- ビット線とワード線
でアクセス
- 固定層に電流の
作る磁界で記録
- トンネル磁気抵抗
効果で読出し
- 構造がシンプル



MRAMの回路図

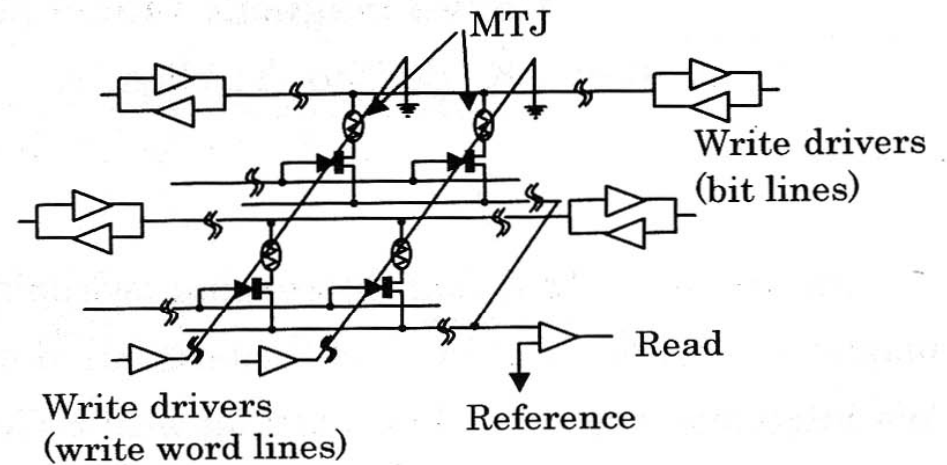
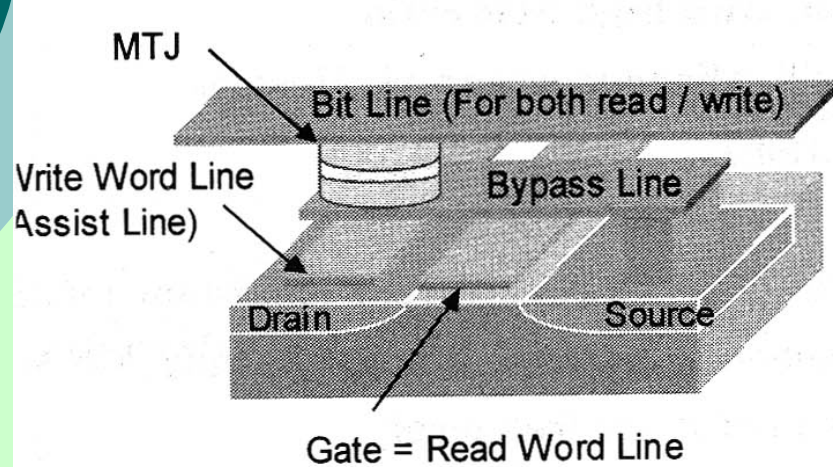


Fig. 1 Schematic of 1T1J type MRAM

- 鹿野他: 第126回日本応用磁気学会研究会資料p.3-10

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 |
| | | | | | |

MRAM新聞記事

- 米国フリースケール社
 - 販売開始
 - 記録容量4Mbit
 - ネットワーク機器・プリンタ
- NEC
 - 5年以内に実用化
 - 書き込み電流2mA以下に

日本経済新聞 (夕刊) 7/14 2C

【シリコンバレー】長所を併せ持つ「次世代」MRAMの高機能化が中晩△米フリースケールメモリ」として、東芝 進めば、電源を入れるとル・セミコンダクタは十 やソニーなども開発を進 日、新型メモリ「MR ンなどが開発可能とされ AM (磁性記録式) 同時書 き込み読み出しメモリ (I) の販売を始めた」と 発表した。MRAMの商 用化は初めてという。電 源を切っても情報が消え ず、記録速度が速いのが 特長。日米の半導体各社 が開発を競っており、商 用化ではフリースケール が先だ。

同社はMRAMの大量 生産を開始。記録容量は 四(が)百(万)で、 ネットワーク機器やアリ ンターなどでの利用を見 込む。MRAMは、現行 のフラッシュメモリや DRAM (記憶保持動作 が必要な同時書き込み読 み出しメモリ) などの

「MRAM」初の商用化

新型メモリ
スケール プリンターなど向け

MRAMの高機能化が 進めば、電源を入れると 即座に利用できるパンコ ンなどが開発可能とされ ている。

NEC、LSI用次世代メモリ

NECは、大規模集積の実現にメドをつけた。回路(LSI)への組み込みに適したMRAM (磁性記録式) 同時書き込み読み出しメモリ) を開発した。配線の構造な どを工夫して、高速動作

NECは、大規模集積の実現にメドをつけた。回路(LSI)への組み込みに適したMRAM (磁性記録式) 同時書き込み読み出しメモリ) を開発した。配線の構造な どを工夫して、高速動作

NECは、大規模集積の実現にメドをつけた。回路(LSI)への組み込みに適したMRAM (磁性記録式) 同時書き込み読み出しメモリ) を開発した。配線の構造な どを工夫して、高速動作

る。ただ、記録容量が小 さい、コストがかさむな 今後の本格普及に向け だ。

り速くすることができな かった。 NECはほかの保存デ ータに影響を与えない配 線やLSIの立体構造を 考案。これによって、書 き込み速度を三倍以上 速められるメドをつけ た。書き込み電流も従来 の三分の一の二ミリア以下 になり、電力の消費を抑 えられる。

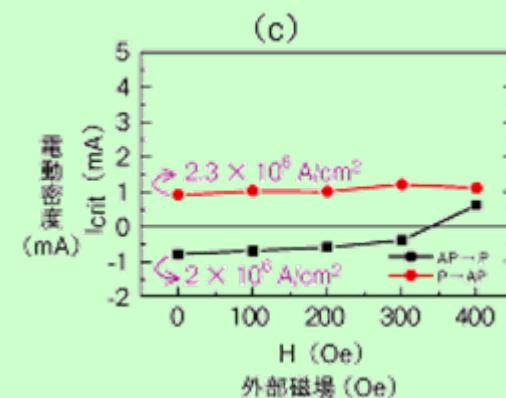
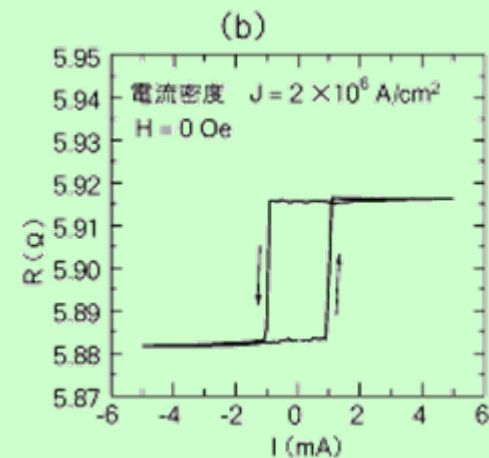
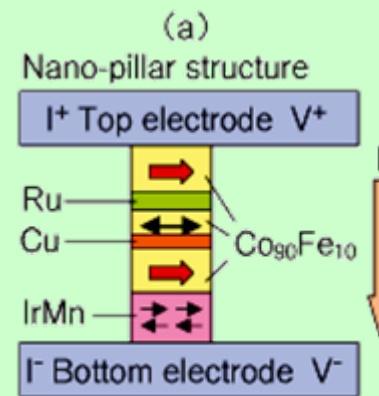
実際にMRAMを組み 込んだLSIを試作して 技術を確認。SRAM(記 憶保持動作が不要な同時 書き込み読み出しメモリ)と同程度の動作速度 が実現できる見込み。自 動車や携帯機器での実用 化が期待されている。

電流注入磁化反転

- MRAMでは、bit線とword線に電流を流し、交点での磁界が磁性体の反転磁界を超えるとときに、記録が行われるため超高密度化困難である。
- スピン偏極電流注入によるスピントルクの発生をもちいることにより低電流密度での磁化反転が可能なことがわかってきた。
- 今のところ注入電流密度は 10^6A/cm^2 必要なので、アドレス用のトランジスタ(MOS-FET)に流せる最大電流値(0.1mA)を超えてしまうという大きな課題が残されている。

スピン注入磁化反転

- 猪俣ら(東北大)の研究グループは、IrMn/Co₉₀Fe₁₀/Cu/Co₉₀Fe₁₀/Ru/Co₉₀Fe₁₀素子(図1)を作成し、動作を確認した。この素子に直接電流を流したところ(スピン注入)、電流の方向によって中央のCo₉₀Fe₁₀合金層のスピンの向きが反転し、磁化が反転することが観測された(図2)。



スピントロニクスのおわりに

- 電子の持つ電荷とスピンをうまく利用しようというのがスピントロニクスである。
- 磁気記録、MRAMでは、スピントロニクスの成果が実用化されている。
- 磁気記録では、垂直磁気記録が実用化するとともに、さらに高密度を目指し、超常磁性限界の壁を破るために熱アシスト磁気記録が注目される。
- MRAMは、MgO絶縁層、ハーフメタル強磁性電極、スピン注入磁化反転などの先端技術が開発され、ユニバーサルメモリ実現が近づいている。

期末テストの予告

- 磁性の起源
 - 電子軌道と磁気モーメント
 - 3d遷移金属、4f希土類金属
 - 軌道とスピン
- 磁気ヒステリシスの起源
 - 飽和磁化、残留磁化、保磁力
 - 磁区ができるわけ
 - 反磁界
 - ヒステリシスの形状と磁気応用
- 磁気記録
 - 磁気記録の原理
 - ハードディスクと物理学
 - 磁気抵抗効果
 - MRAM
- 光磁気記録
 - MO、MDの記録原理
 - MO、MDの再生原理
- 光アイソレータ

最終回の問題

- 磁気記録の成長を支えてきたものは何か。