

# 磁性工学特論050526

## 第6回 磁気と電気伝導

佐藤勝昭

## 復習コーナー(第5回の問題)

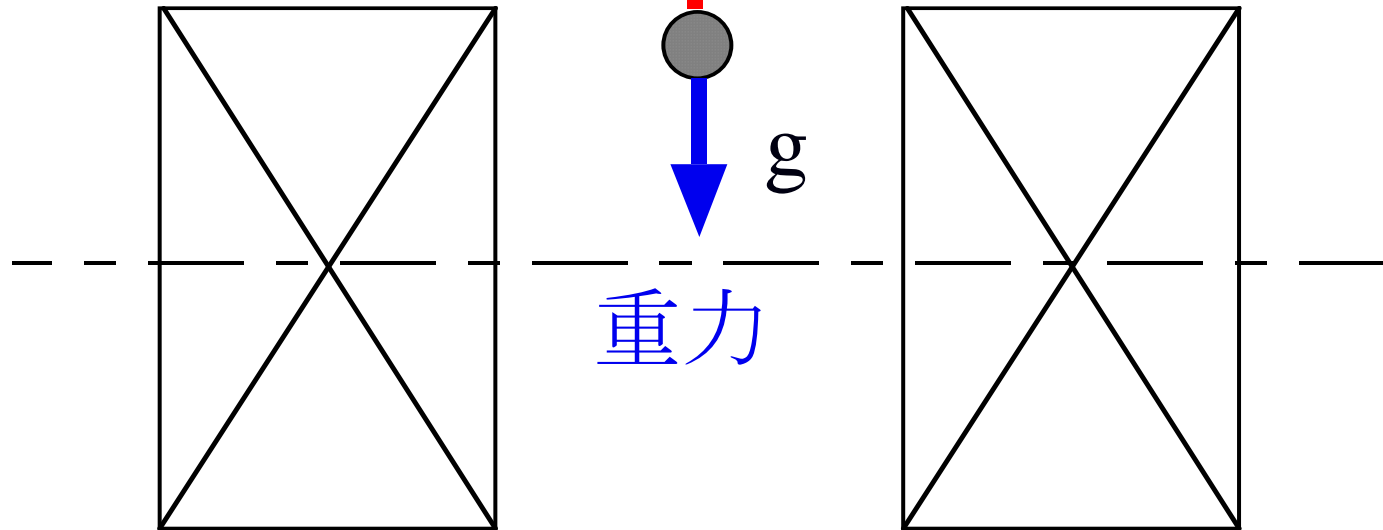
- 反磁性体は磁界の変化を妨げるように逆向きの磁化を生じる。それではなぜ強い静磁界のもとで反磁性体を浮かせることができるのか
- 単位質量あたりの反磁性磁化率を $\chi = -\chi_d$ とする。
- 磁化 $M$ が磁界 $B$ の中にある時のポテンシャルエネルギーは $E = -M \cdot B$ であるから、力は $E$ の距離微分 $F = -MdB/dz$ で与えられる。 $M = -\chi_d B$ であるから単位質量あたりの力は $F = \chi_d (B/\mu_0) dB/dz$
- 従って $g = \chi_d (B/\mu_0) dB/dz$ のとき釣り合う。
- すなわち磁界の勾配があると上向きの力が働いて重力とつり合い、浮上する。

# 反磁性物質の磁場浮上

磁気浮上状態の基礎物性も重要

磁気力

$$(1/\mu_0)\chi B(dB/dz)$$



重力

g

ハイブリッドマグネット

反磁性物質に働く磁気力が重力と釣り合うほど大きくなると物質は浮上する

# 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)

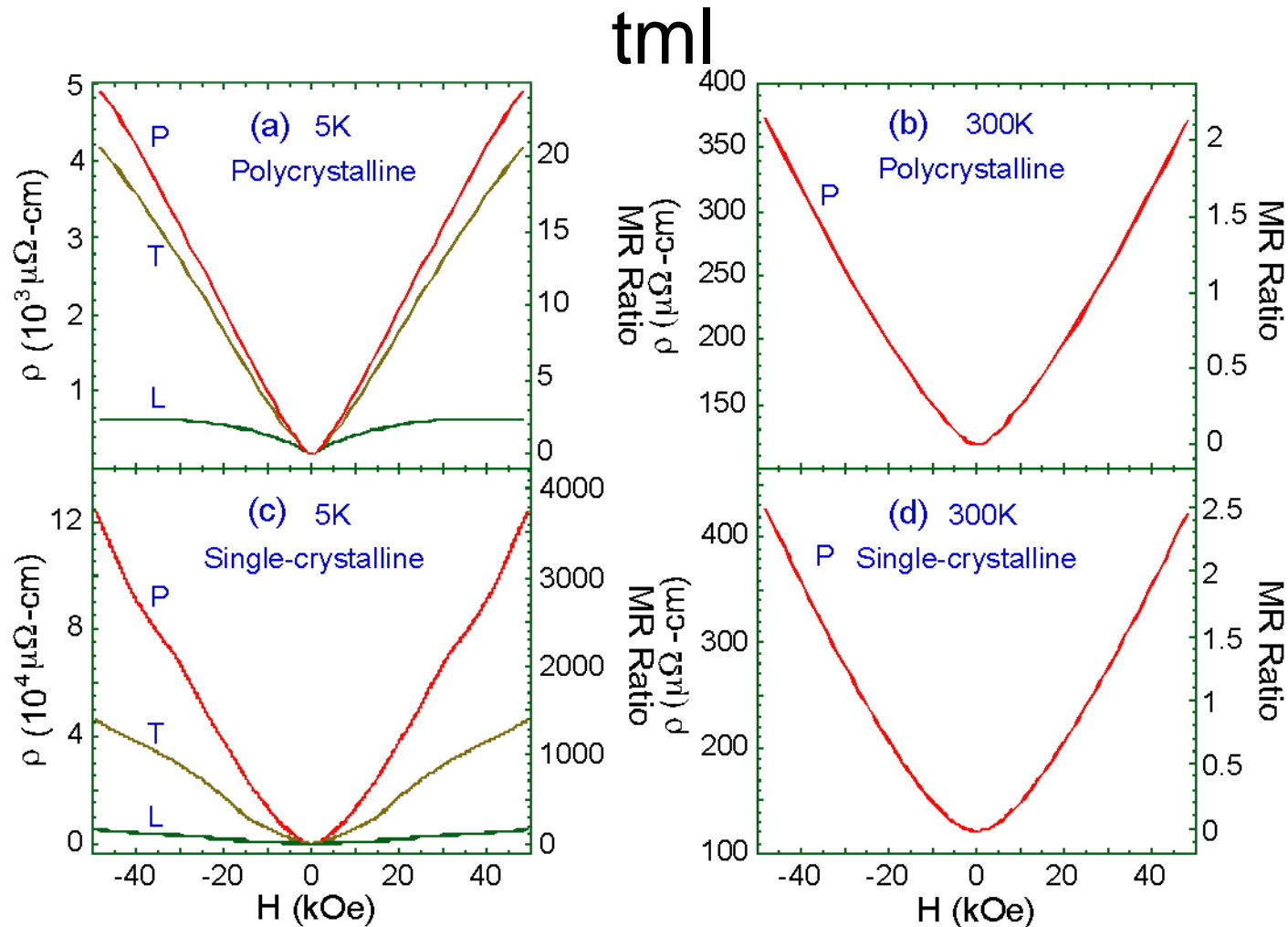
- 半導体・半金属における正のMR:ローレンツ力
- 磁性半導体に見られる負のMR:スピン無秩序散乱
- 強磁性体の異方性磁気抵抗AMR
- 磁性体/非磁性体/磁性体構造の巨大磁気抵抗GMR
- 磁性体/絶縁層/磁性体構造のトンネル磁気抵抗TMR
- 強相関系酸化物の巨大磁気抵抗CMR

# 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  $\tau$  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.h](http://medusa.pha.jhu.edu/Research/Bi_SC.html)

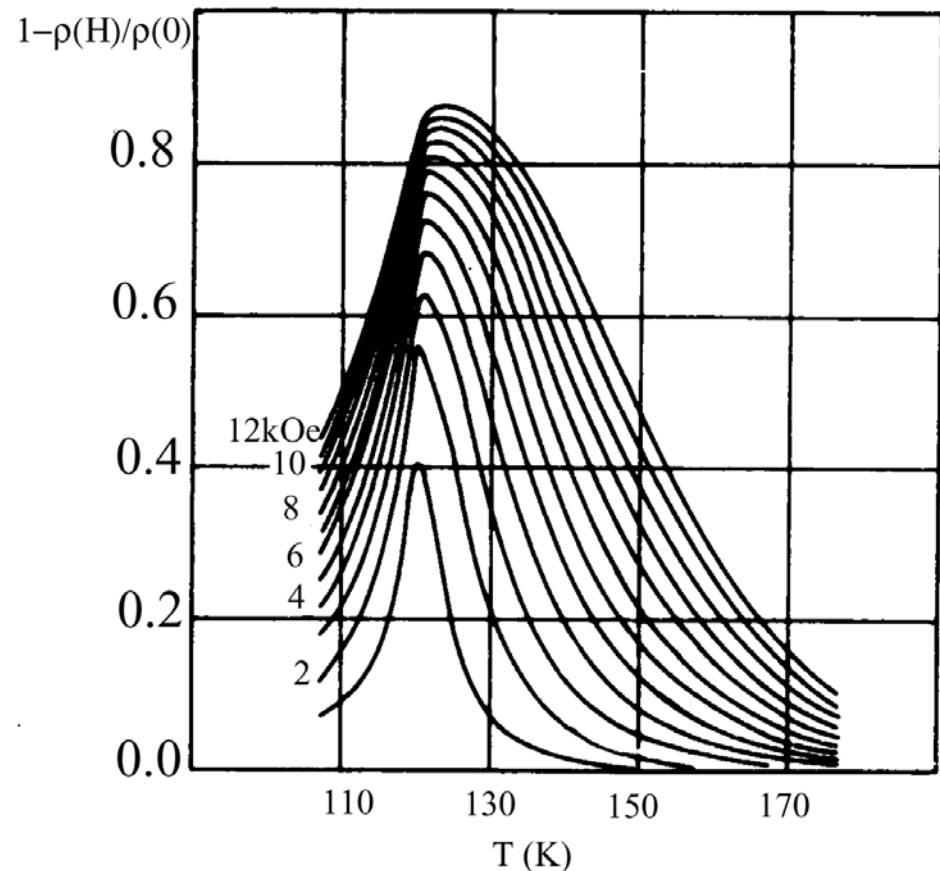


## Very Large Magnetoresistance and Field Sensing Characteristics of Electrodeposited Single-Crystal Bismuth Thin Films

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

- $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$ などの第1世代の磁性半導体では、キュリー温度付近で、スピン無秩序散乱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、 $a$ 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

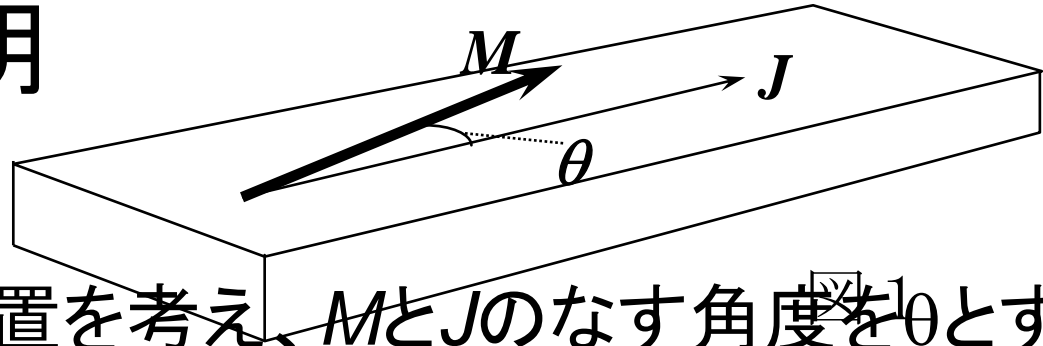
$$\begin{aligned}\rho_{\perp}(\mathbf{E}) &= \rho_{\perp} + \rho_{\perp}^{(0)}(\mathbf{B}) \\ \rho_{//}(\mathbf{E}) &= \rho_{//} + \rho_{//}^{(0)}(\mathbf{B}) \\ \rho_H(\mathbf{E}) &= \rho_H + \rho_H^{(0)}(\mathbf{B})\end{aligned}$$

第1項: 磁化 $M$ にのみよる項; 異常項

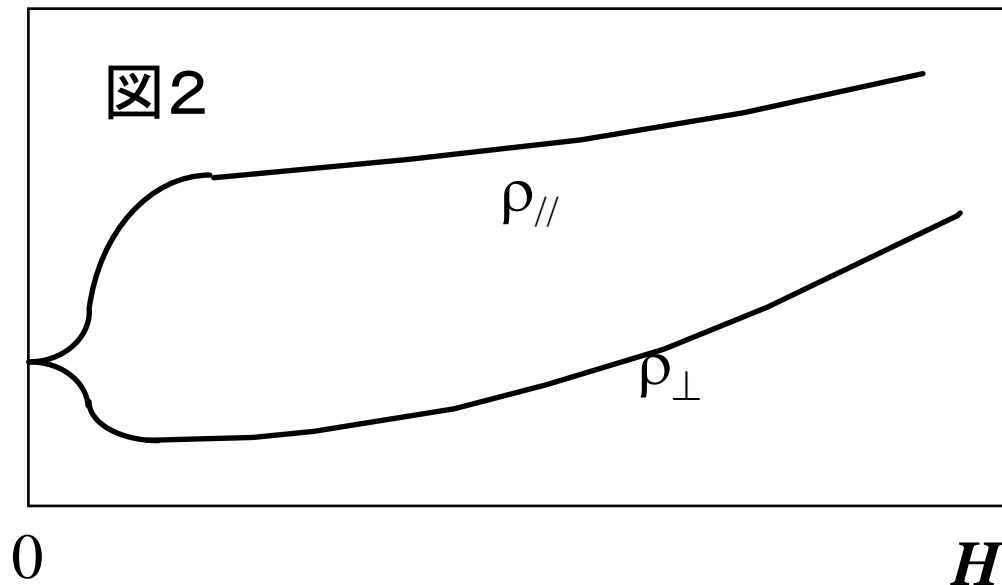
第2項: 実効磁束密度 $B$ に依存する項; 正常項

- $\rho_{//}$ 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。 $\rho_{\perp}$ 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。 $\rho_H$ 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に示すような配置を考え、 $M$ と $J$ のなす角度を $\theta$ とすると、MR比を求めると



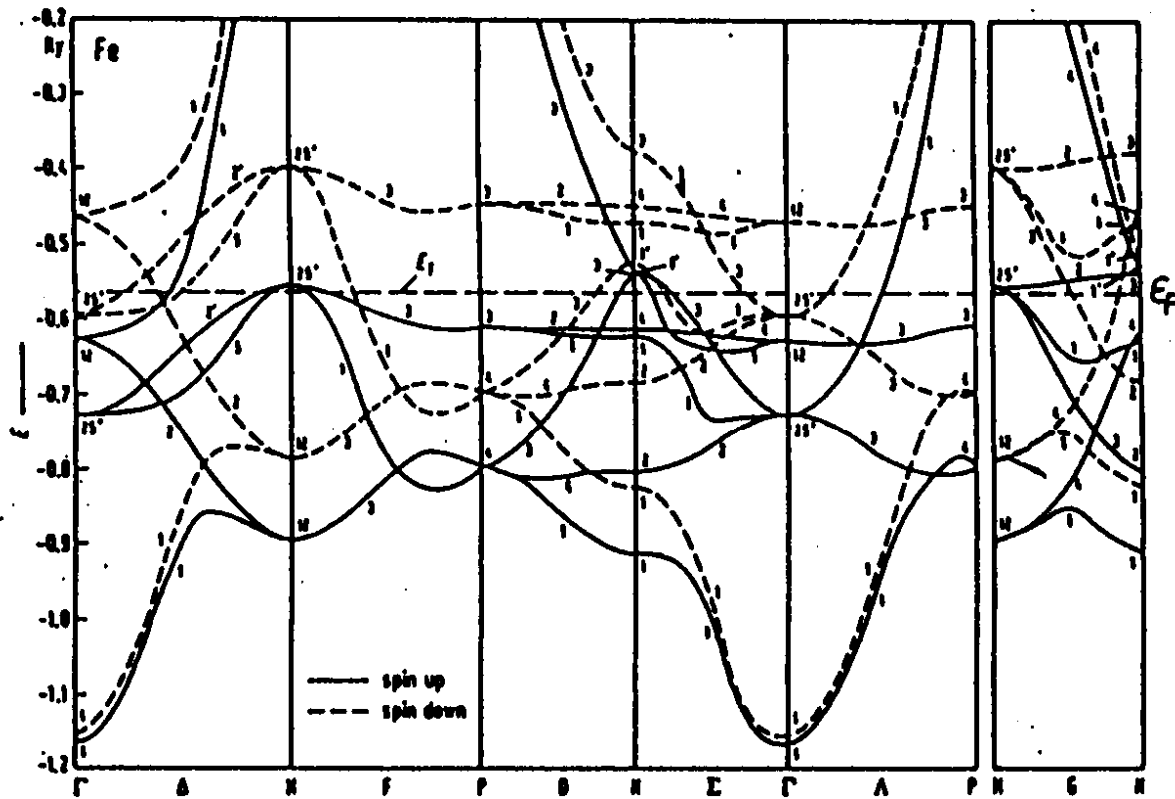
$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\rho_{//} - \rho_{\perp}}{\frac{1}{3}\rho_{//} + \frac{2}{3}\rho_{\perp}}$$

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。

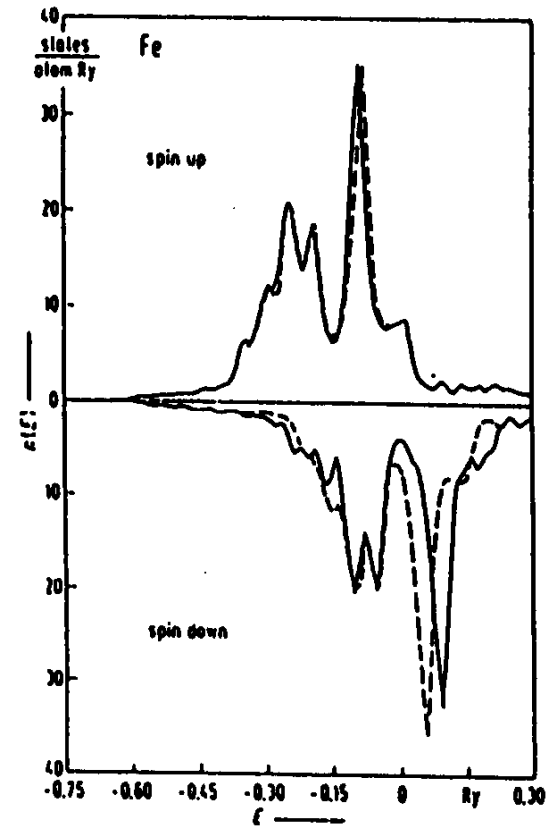
## 2流体電流モデル(two current model)

- スピン依存の散乱ポテンシャルを考え、電流は $\uparrow$ スピンと $\downarrow$ 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、 $\uparrow$ スピンd電子帯と $\downarrow$ 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ことになる。
- [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 $\uparrow$ で表し、反平行なもの(少数スピンバンドの電子)を $\downarrow$ 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、↓スピンに対する抵抗率をとすると、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  $\gamma$  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)

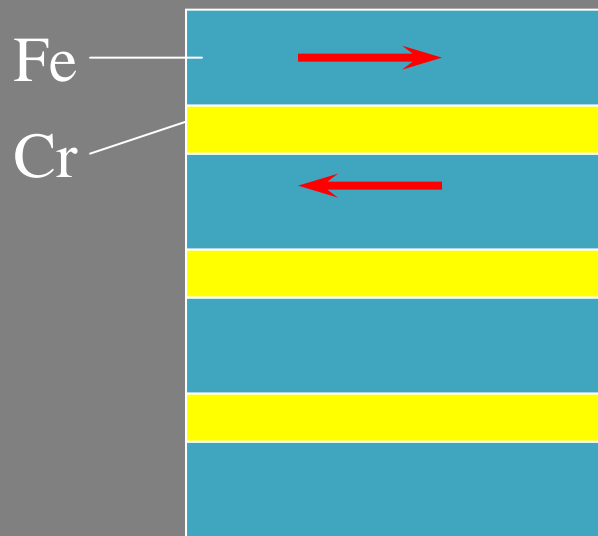
- 1988年にFertらのグループは、Fe/Crなど磁性金属／非磁性金属の人工格子において、大きな磁気抵抗比をもつ磁気抵抗効果を発見した。Baibichらが報告する磁化と磁気抵抗効果の対応 [\[ii\]](#)によれば、Crの層厚を変化することによって磁気飽和の様子が変化するが、磁気飽和のしにくい試料において低温で50%におよぶ大きな磁気抵抗比 $R(H)/R(H=0)$ が見られている。室温でもこの比は16%におよび、巨大磁気抵抗効果(GMR=giant magnetoresistance)と名付けた。この後、同様のGMRは、Co/Cuのほか多くの磁性／非磁性金属人工格子、グラニューラ薄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

[\[ii\]](#) 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.

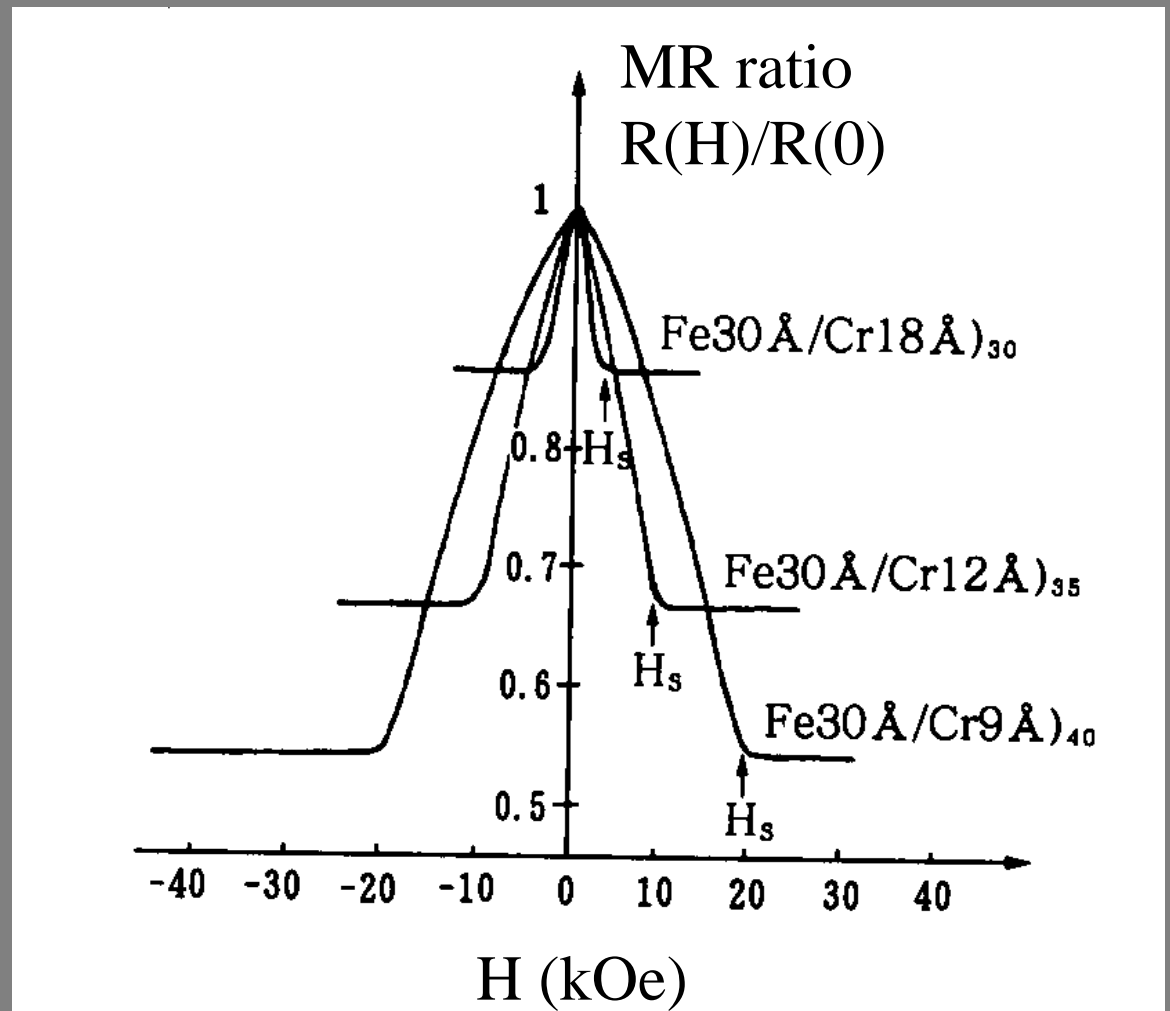


# 層間結合系の巨大磁気抵抗効果 ( GMR )

- スピン依存散乱



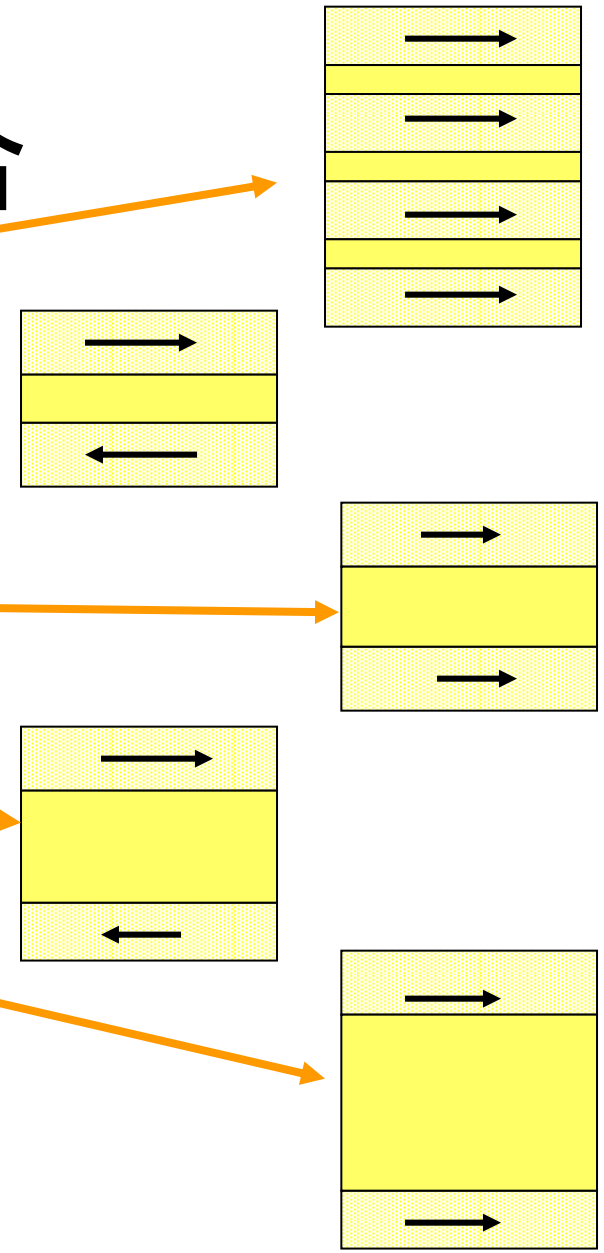
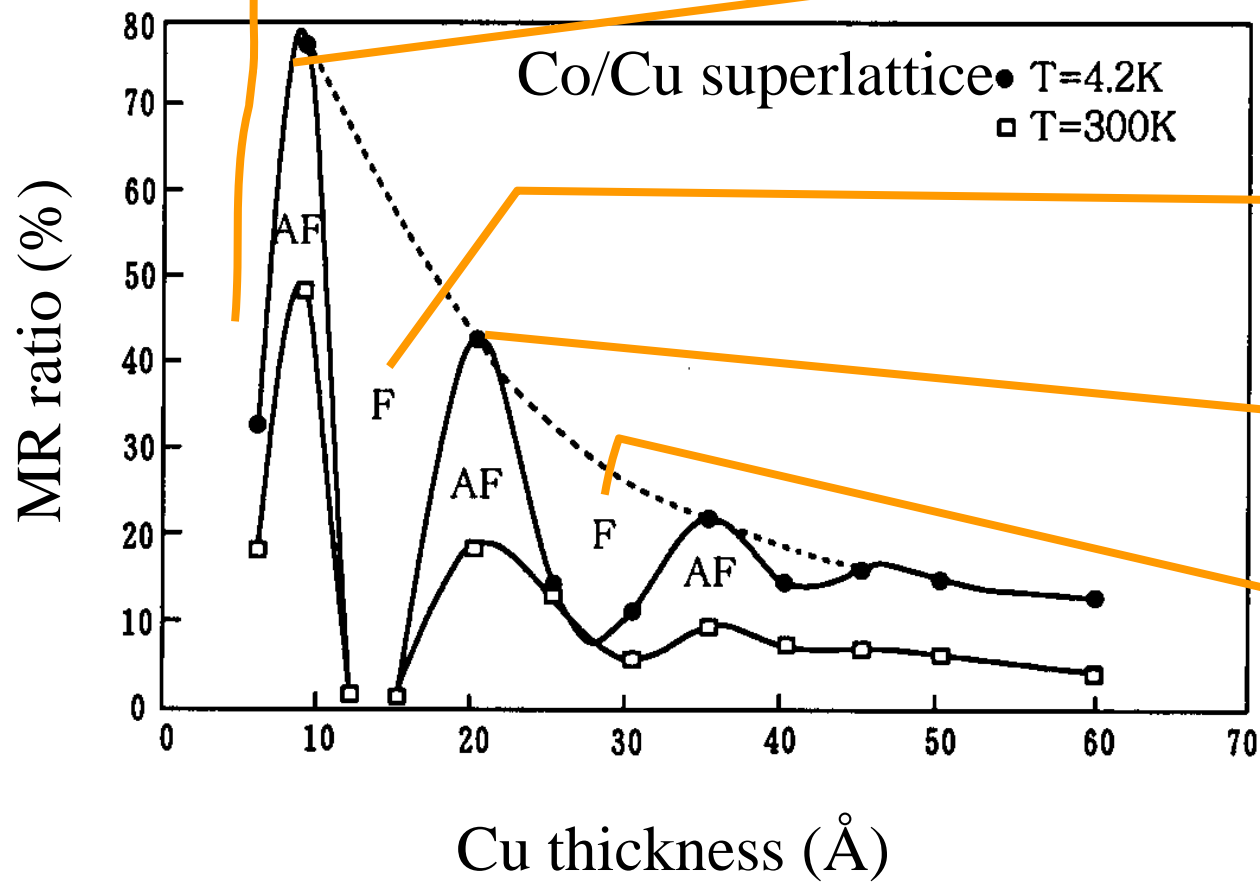
Baibich et al.: PRL 62 (88) 2472



# 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。

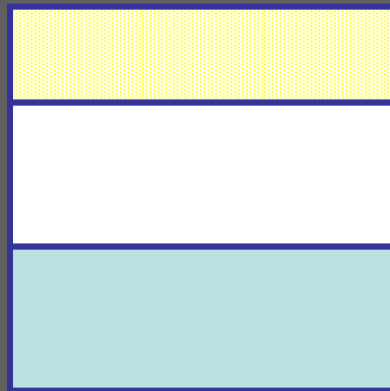
# GMR 振動と層間結合



# 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



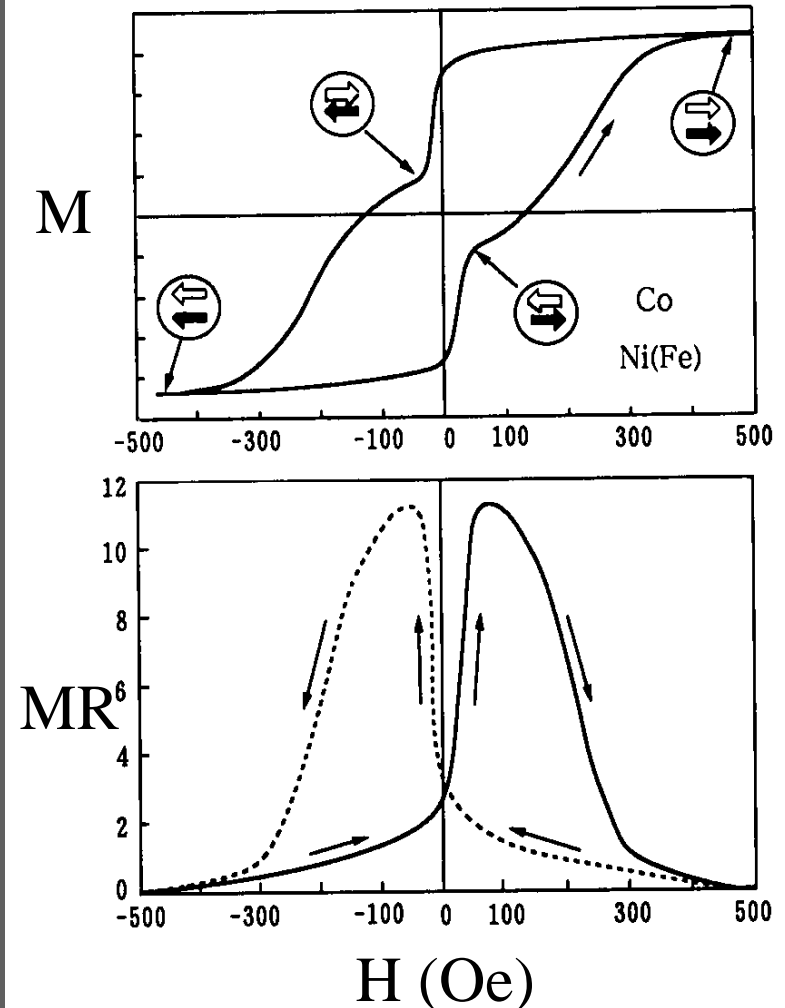
NiFe

Cu

固定

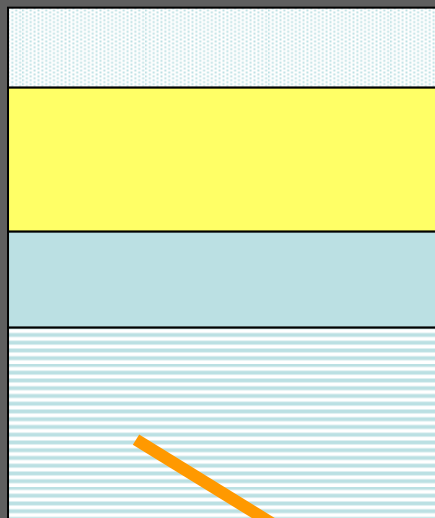
Co

Shinjo et al.: JPSJ 59 (90) 3061



# 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



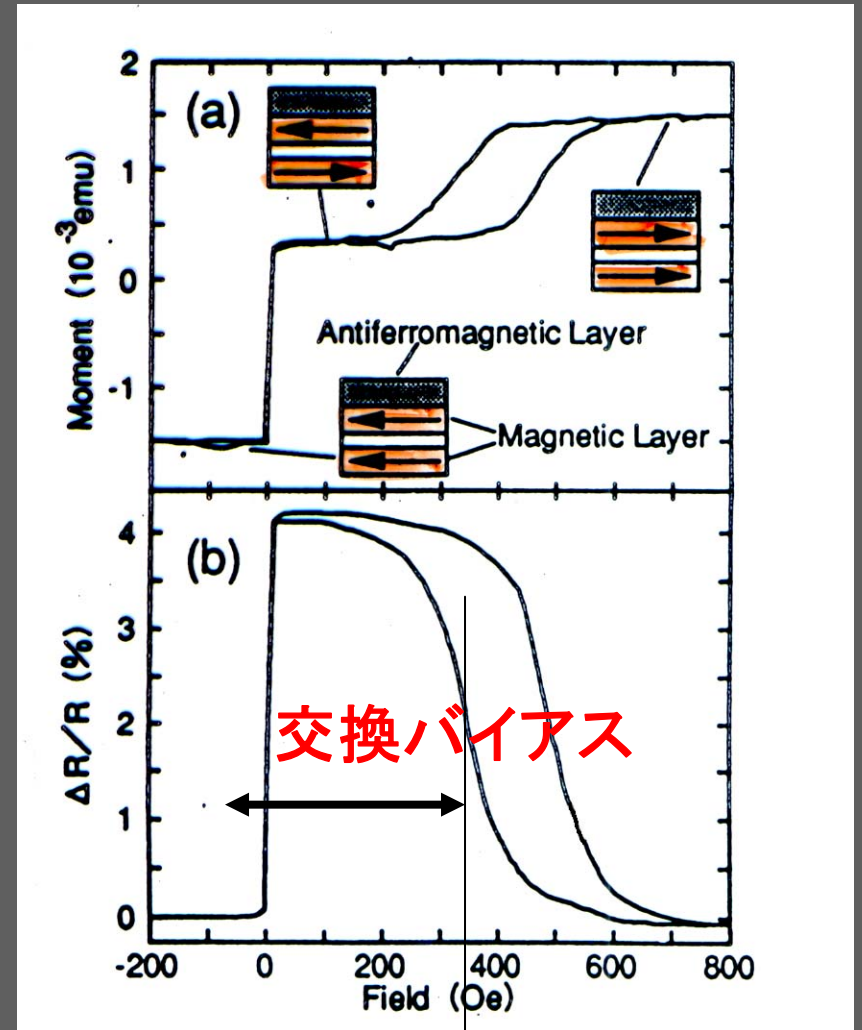
NiFe free

Cu

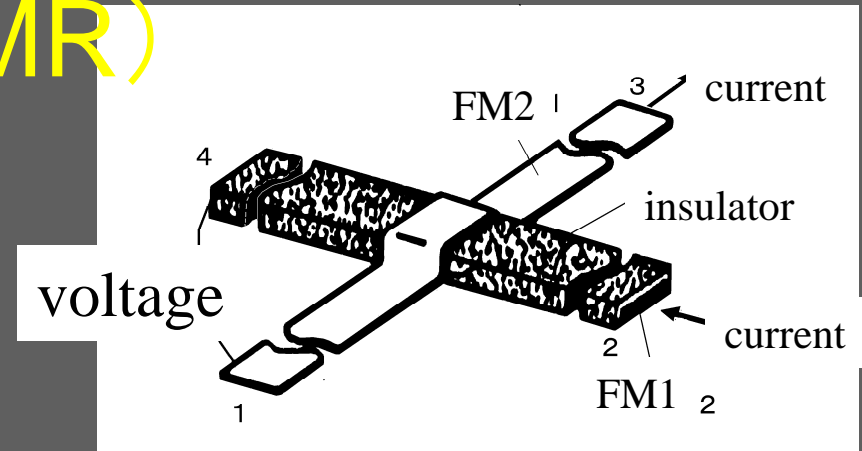
NiFe pinned

AF layer  
(e.g. FeMn)

最近はSAFに置き換え

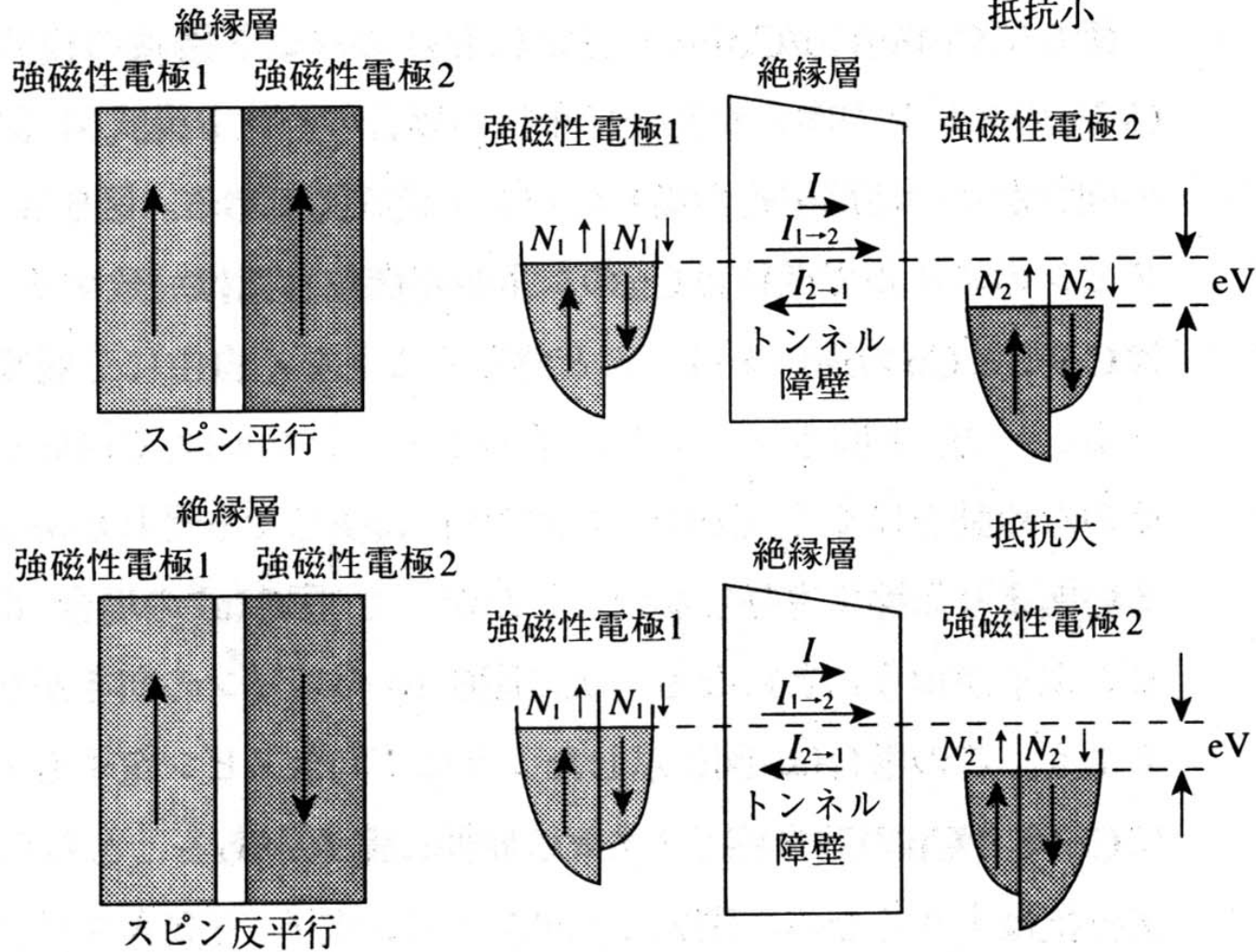


# スピン依存トンネル効果とトンネル磁気抵抗効果 (TMR)



- 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)

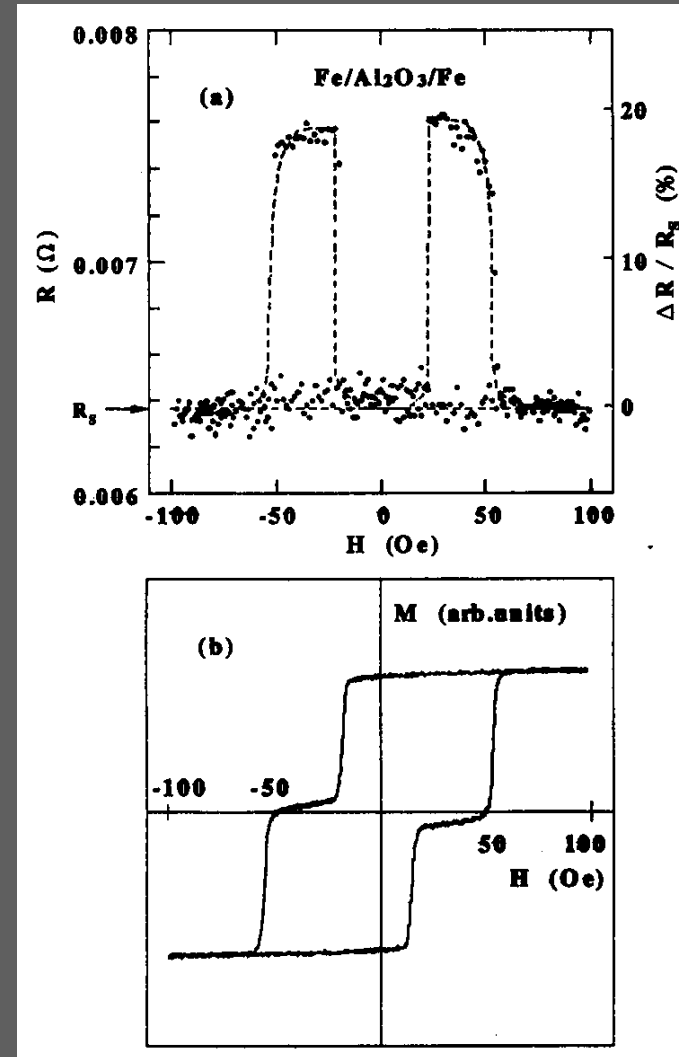


# TMRデバイス

- 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))





# 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Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>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。

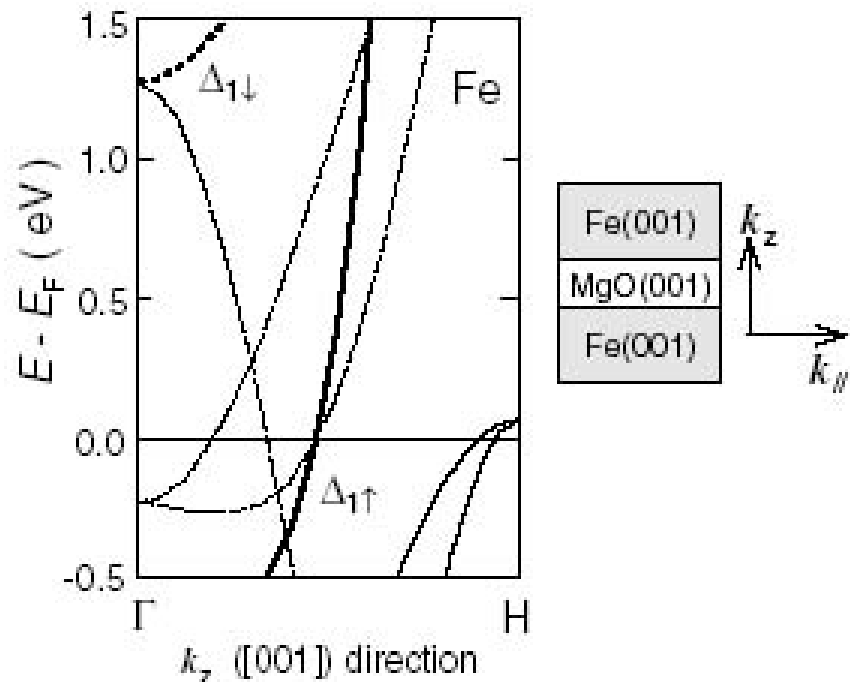


Fig. 1. Band dispersion of Fe in [001] ( $\Gamma$ -H) direction. Solid and dotted lines represent majority-spin and minority-spin sub-bands, respectively. The thick solid and dotted lines represent majority-spin and minority-spin  $\Delta_1$  bands, respectively.

# Fe/MgO/FeMTJに見られるGMR

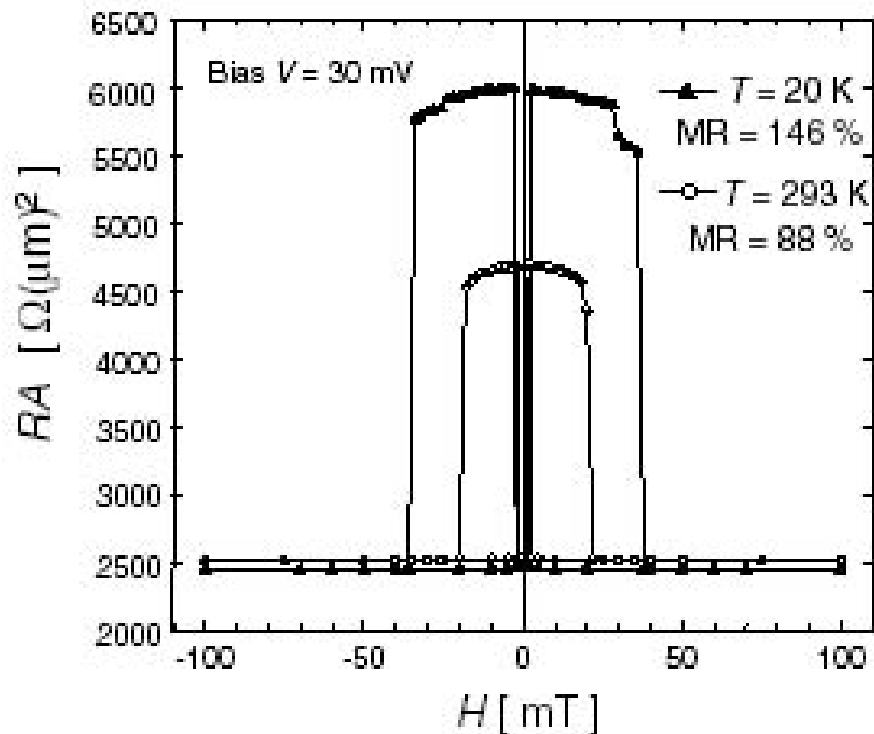


Fig. 3. Magnetoresistance curves for Fe(001)/MgO(001)(20 Å)/Fe(001) MTJ at  $T = 293$  and 20 K. The MR ratios were 88% and 146%, respectively.

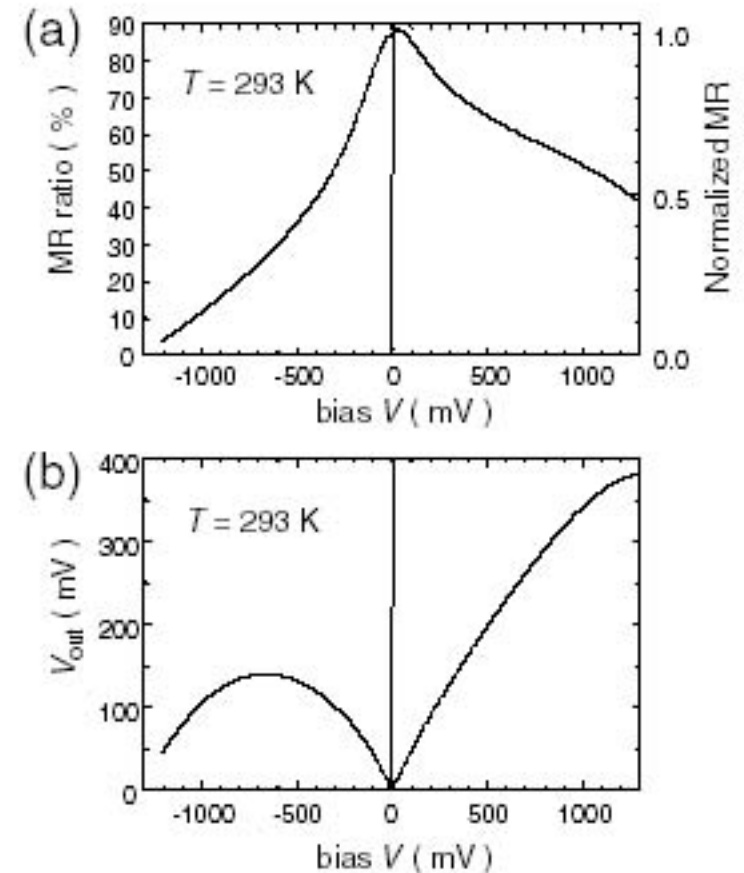
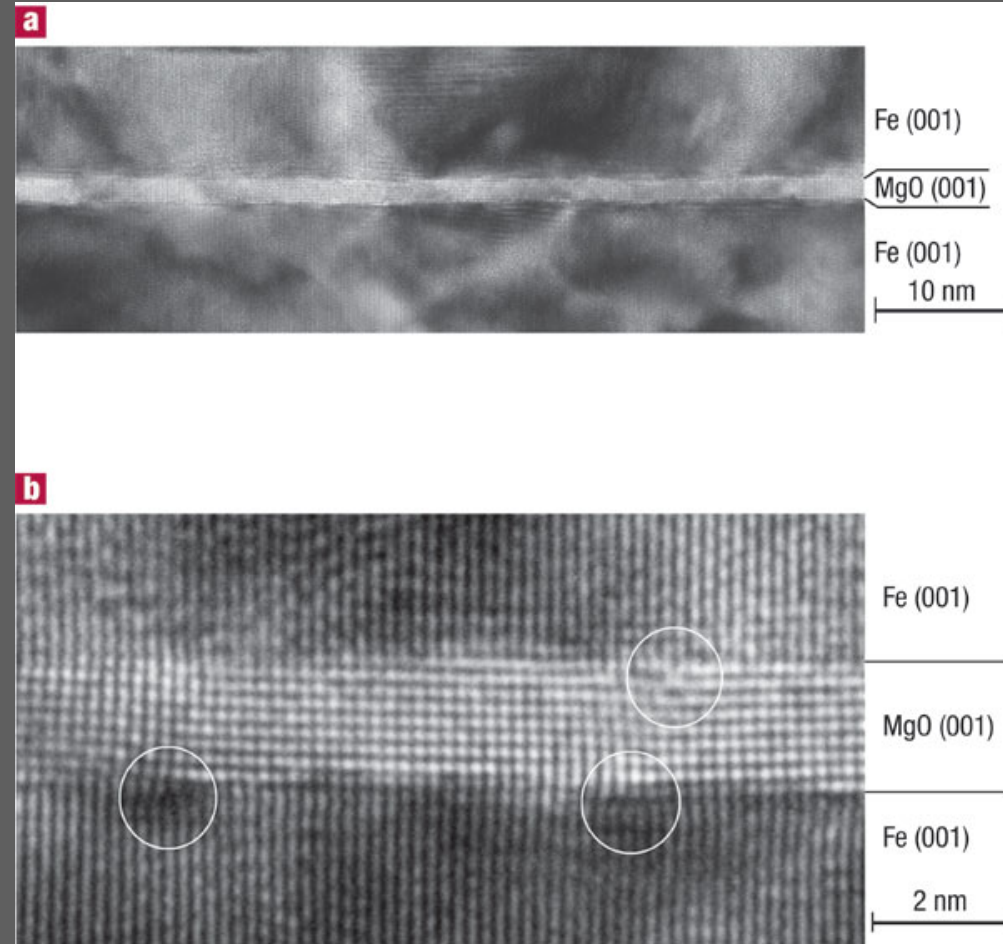


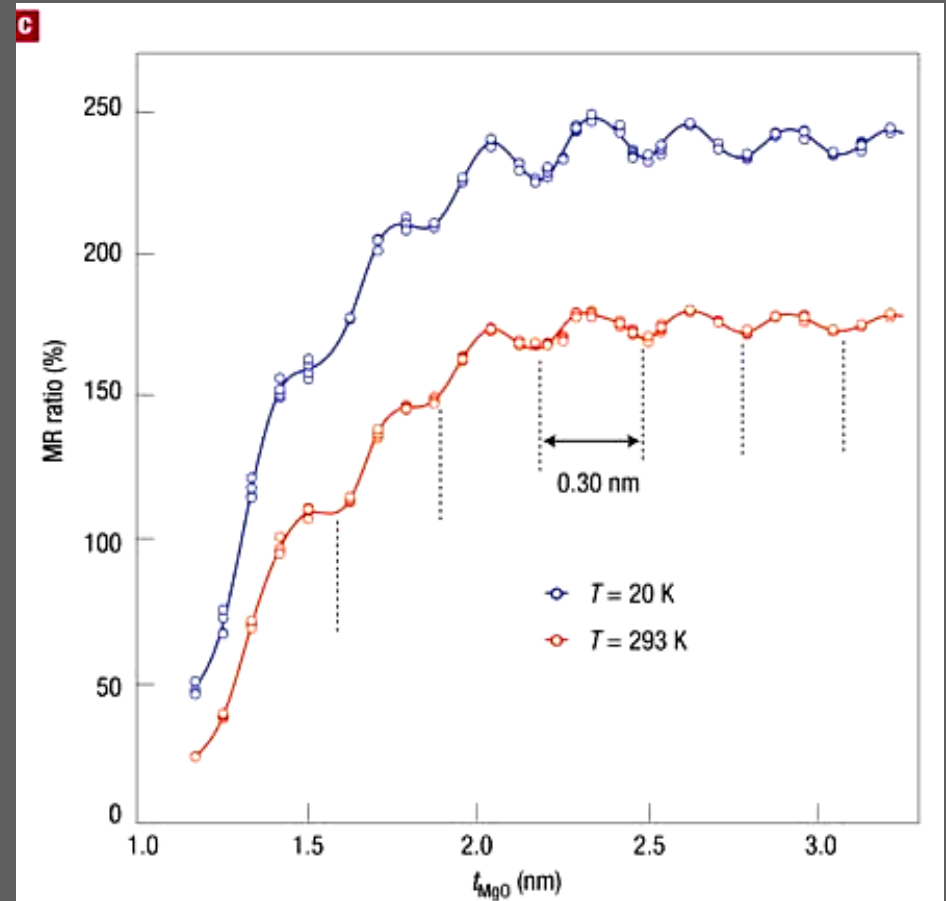
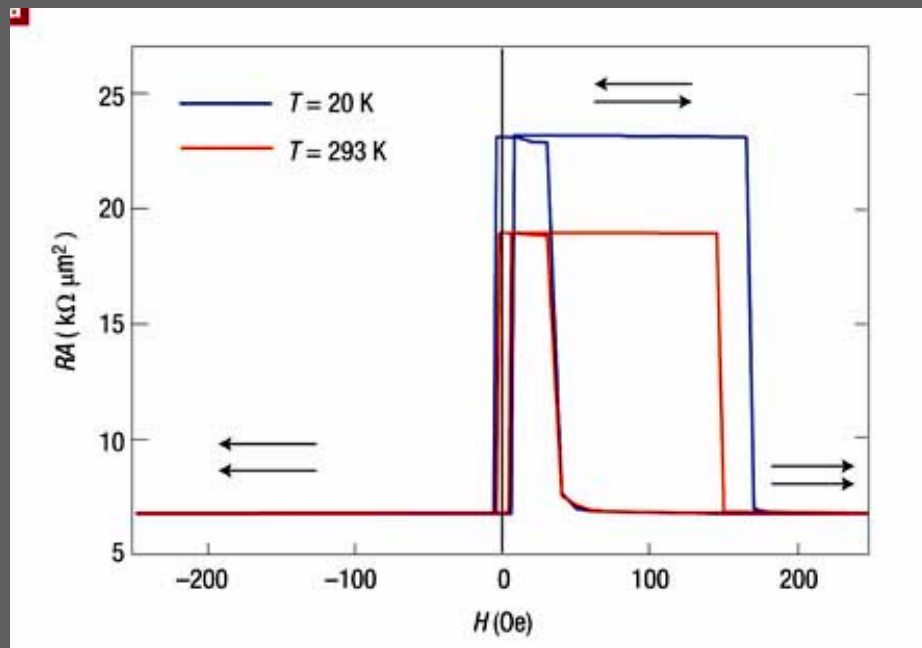
Fig. 4. (a) Bias-voltage ( $V$ ) dependence of MR ratio for Fe(001)/MgO(001)(20 Å)/Fe(001) MTJ at room temperature. Direction of bias voltage is defined with respect to upper electrode. The  $V_{1/2}$  (bias voltage where MR ratio reaches half the zero-bias value) was 1250 and 390 mV for positive and 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。

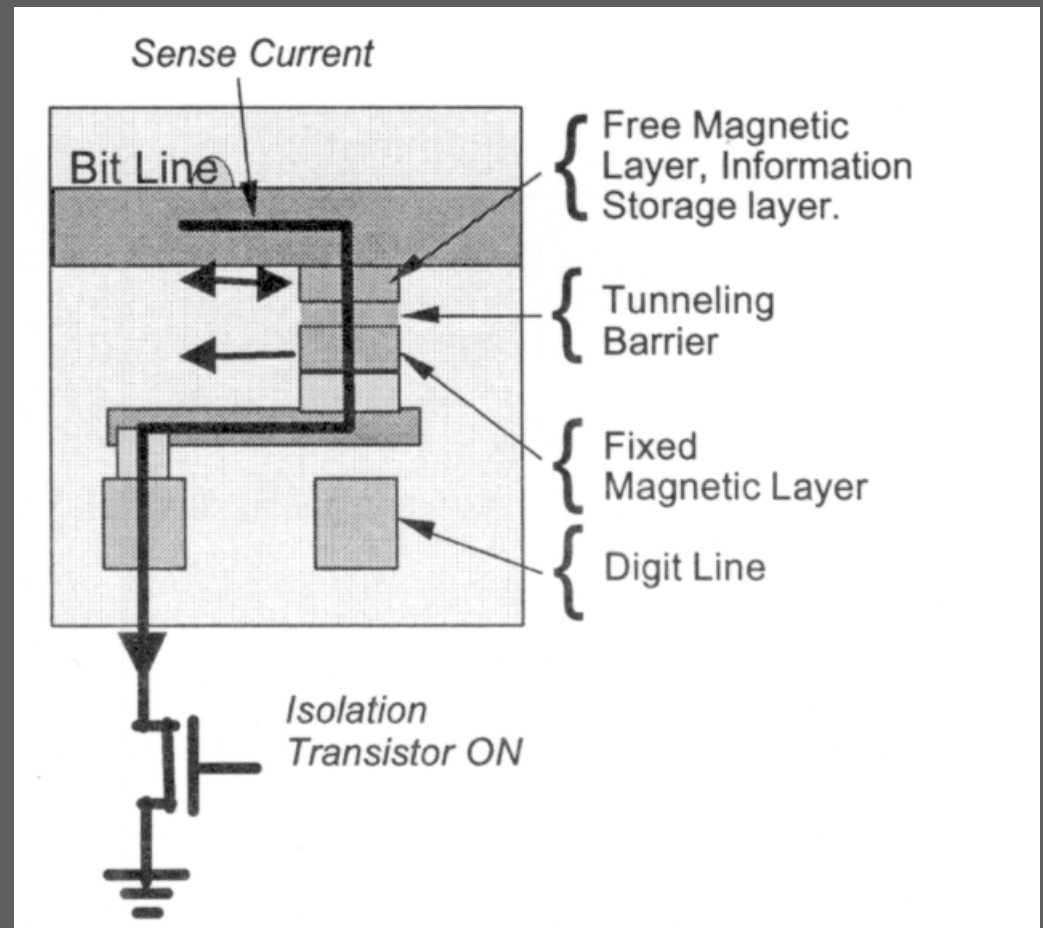


# 室温で180%ものMR比



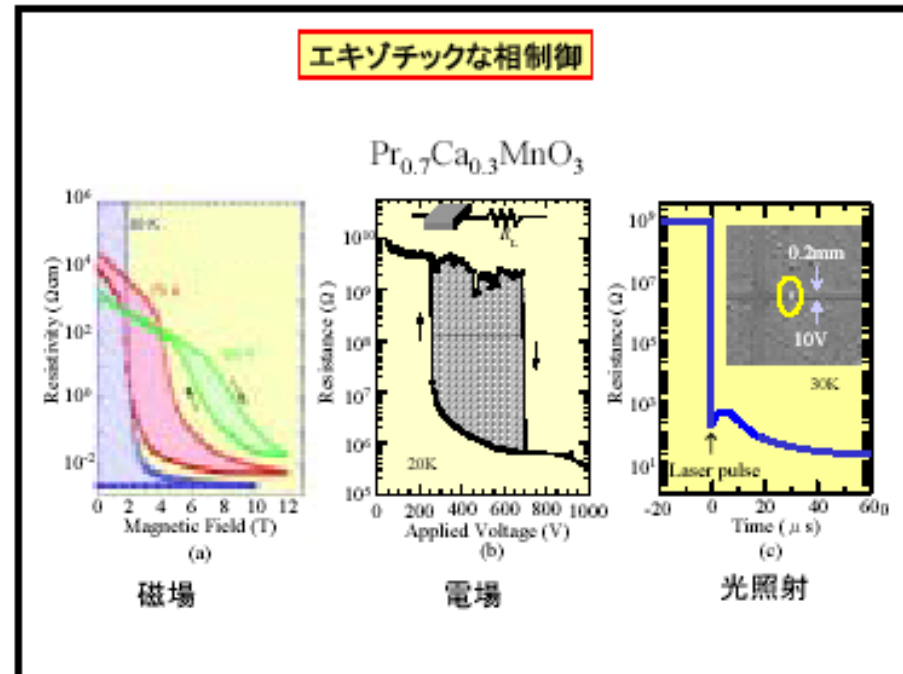
# TMRを用いたMRAM

- 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



# CMR (colossal magnetoresistance )

- 強相関電子系に見られる大きな磁気抵抗効果
- 例： $\text{Pr}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$
- 磁気誘起の金属・絶縁物転移と考えられる。
- 何桁にも及ぶ電気抵抗の変化が見られる。



# CMR効果

巨大磁気抵抗

