



ERLサイエンスワークショップ
2009年7月9~11日, 高エネルギー加速器研究機構

スピントロニクス材料の現状と課題

—スピン流の創出と制御—

東北大学・金属材料研究所

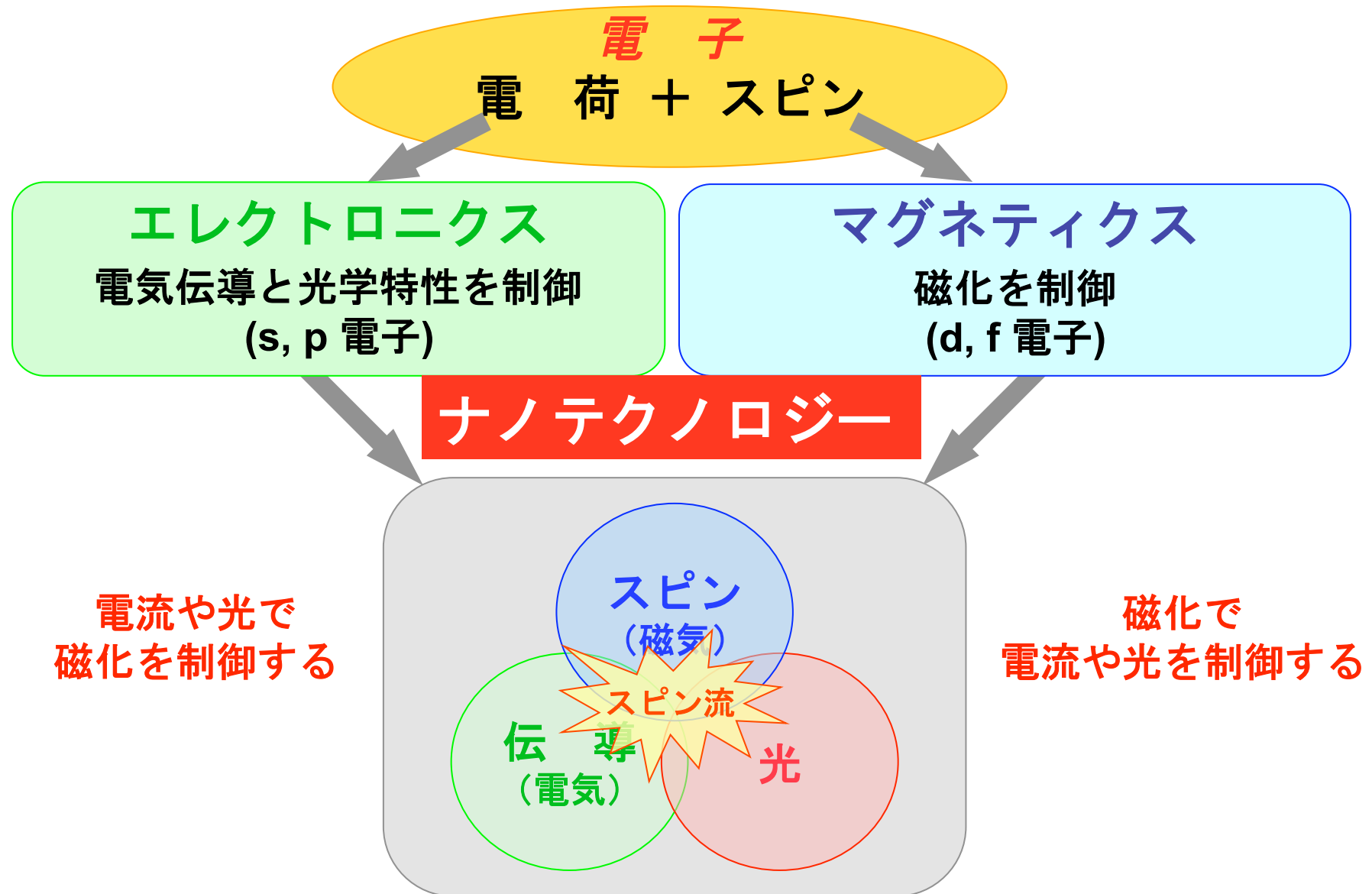
高 梨 弘 毅



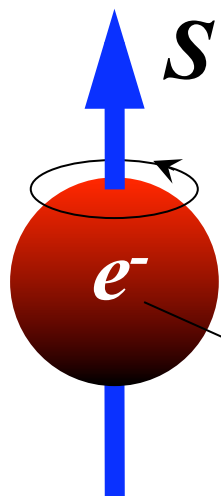
発表構成

1. イントロダクション
 - スピントロニクスとは何か
 - ナノ磁性との関係
 - スピン流との関係
2. 歴史的経緯
3. 現状－課題－展望
 - スピン偏極
 - スピン注入
 - スピン緩和
 - スピン流と電流
4. 放射光への期待／まとめ

スピントロニクスとは？



なぜナノスケールか

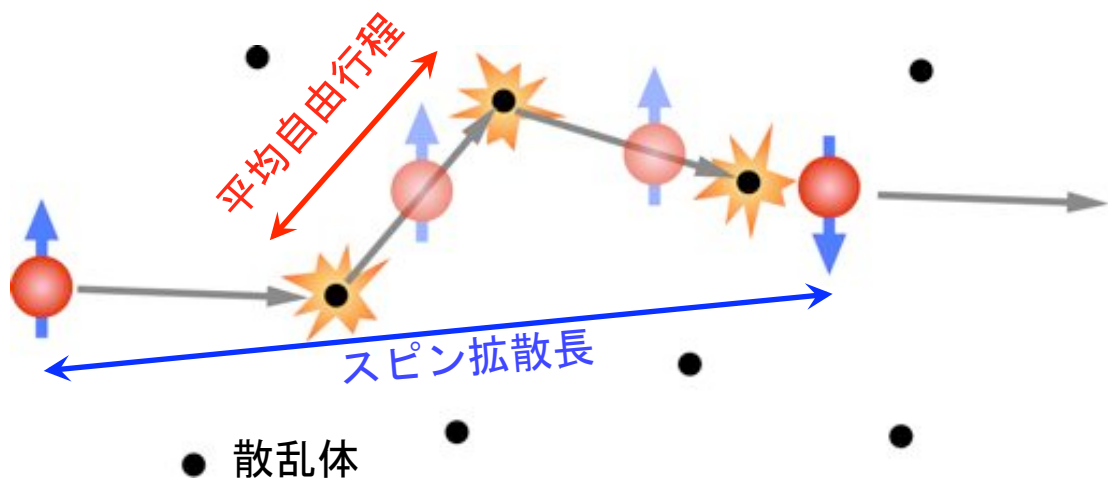


S — スピン \longrightarrow **スピンの流** $J_s = J_{\uparrow} - J_{\downarrow}$

スピン拡散長: $l_{sf} = 1 \sim 10 \text{ nm}$ (強磁性金属)
 $100 \sim 1000 \text{ nm}$ (非磁性金属)

電荷 \longrightarrow 電流 $J_e = J_{\uparrow} + J_{\downarrow}$

平均自由行程: $l_F = 1 \sim 10 \text{ nm}$ (金属薄膜)



ナノスケールでの
磁気変調構造

スピン依存伝導

ナノ磁性と密接不可分

スピントロニクス分野

物 理

<原 理>

スピン依存伝導
スピン緩和・拡散
スピントランスファー
スピン軌道相互作用
表面・界面磁性
交換結合・磁気異方性
キャリア誘起強磁性

<現 象>

巨大磁気抵抗効果 (GMR)
トンネル磁気抵抗効果 (TMR)
スピン注入・蓄積
磁化反転・ダイナミクス
磁壁移動
スピンホール効果
光誘起磁化

デバイス

GMR / TMRヘッド
磁気センサー
磁気メモリ (MRAM)
スピントランジスタ
高周波素子
円偏光素子
スピン熱素子

材 料

<物 質>

高スピン偏極物質
高磁気異方性物質
強磁性半導体
分子・ナノカーボン系

<微小構造>

人工格子 (ヘテロ構造)
スピンバルブ
細線・ドット
ナノ粒子

ハードディスクドライブ

3.5インチハードディスク



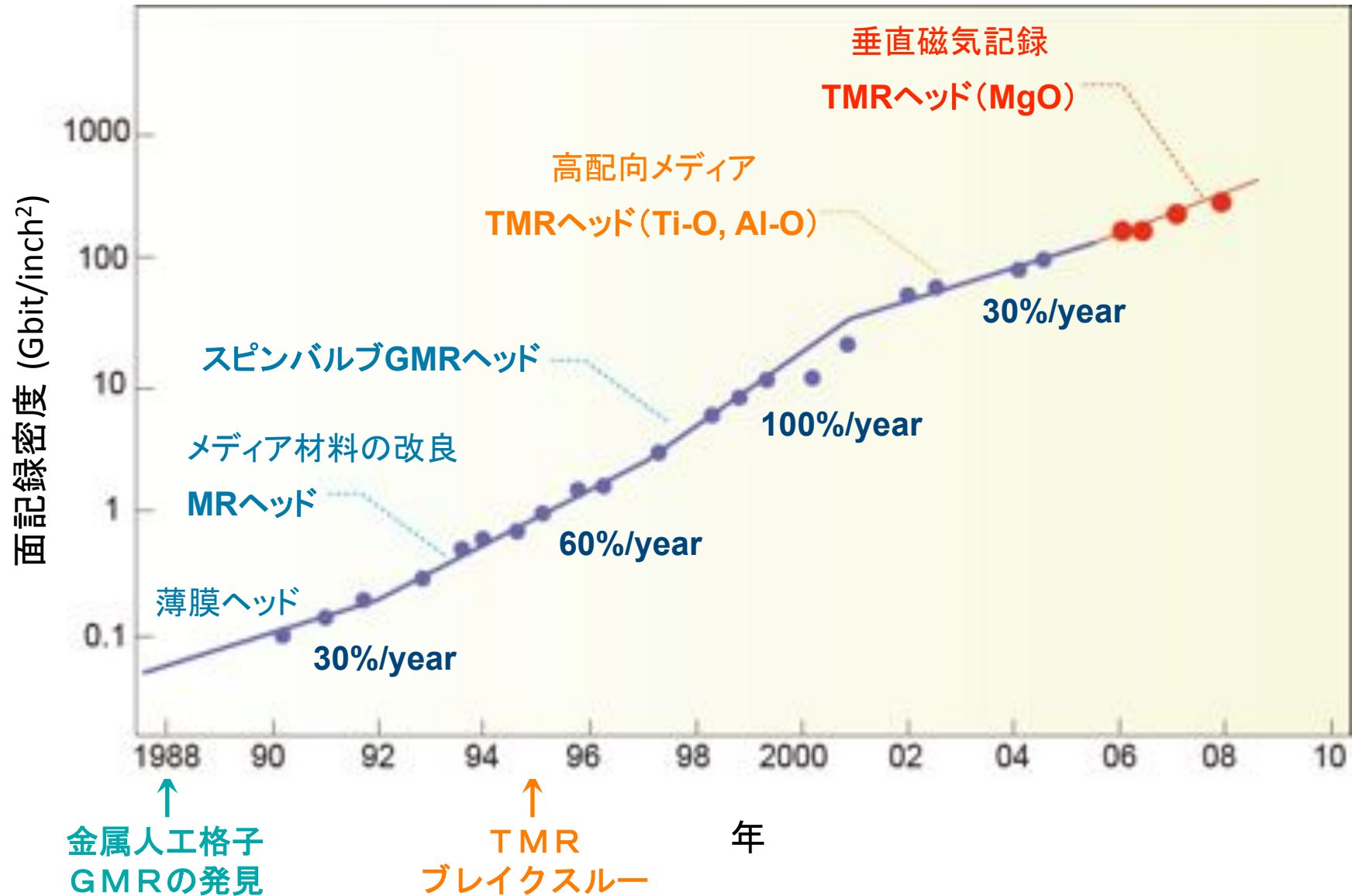
媒体（メディア）：
このディスクの中に磁化（N極S極）の
配列として情報がぎっしり詰まっている。

100 Gb（ギガビット）/inch² 以上

→ 1 bit 当たり100 nm 四方以下

ヘッド：
GMR or TMRを利用して情報を
読み出す。

ハードディスク面記録密度の変遷



2007年 ノーベル物理学賞

Albert Fert
(France)

Peter Grünberg
(Germany)

**巨大磁気抵抗効果
(GMR) の発見**



**HDD 記録密度の飛躍的向上
The first major application
of nanotechnology**

スピントロニクス の発展

Giant Magnetoresistance (GMR)
磁化が平行状態と反平行状態とで
電気抵抗が大きく変化する。
(スピン依存伝導)

スピンバルブGMRヘッドの原理

Nobel week, December 2007



ノーベル賞講演にて 12月8日



授賞式にて
12月10日



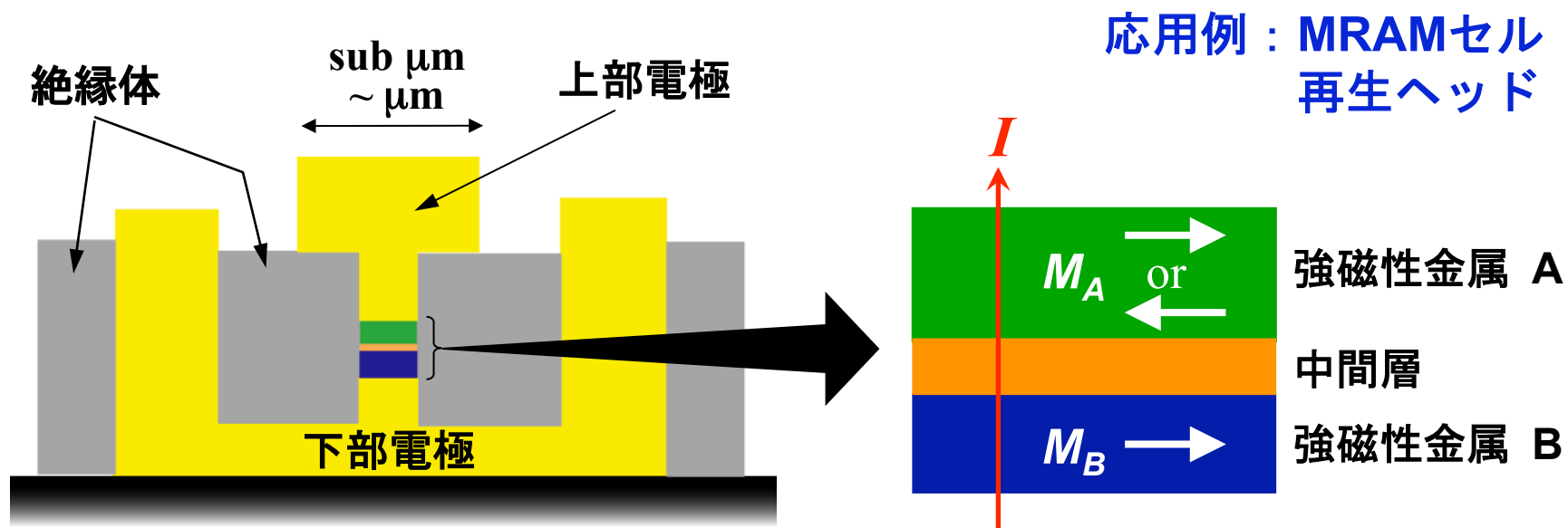
スウェーデンロイヤルアカデミーによるレセプションにて 12月7日



晩餐会にて
12月10日

基本的なデバイス構造 (1)

CPP (Current-Perpendicular-to-Plane: 膜面垂直通電) 型



中間層 = 絶縁体 : トンネル磁気抵抗効果 (TMR)

金属 : 巨大磁気抵抗効果 (CPP-GMR)

磁気抵抗効果 (MR) の大きさ : $\frac{\Delta R}{R} \propto P_A \cdot P_B$

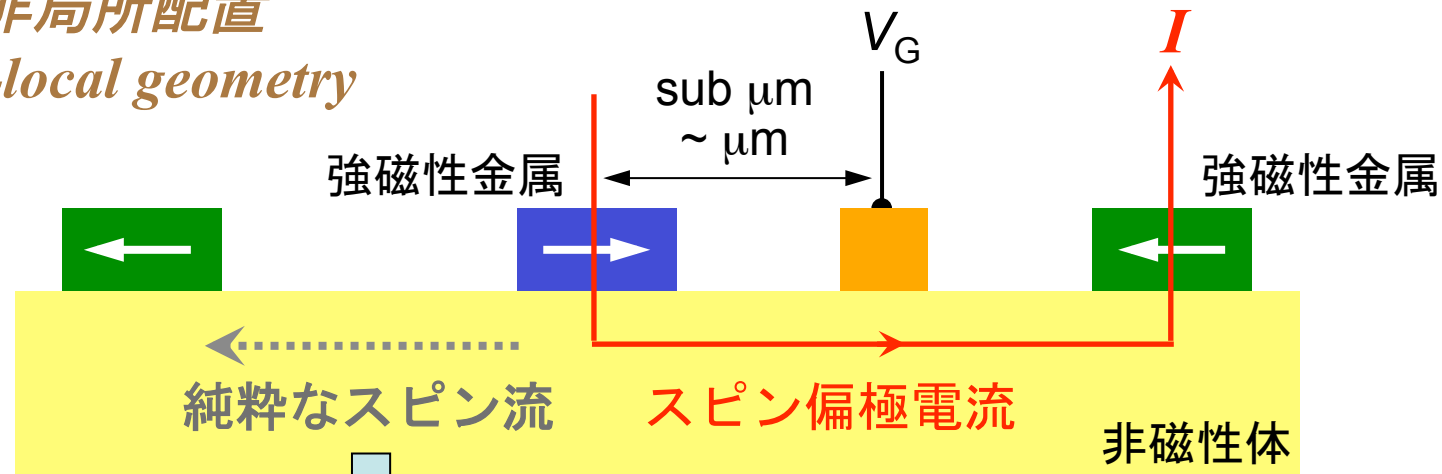
$P_{A(B)}$: スピン偏極率

基本的なデバイス構造 (2)

Lateral structure (面内構造) 型

応用例：スピントランジスタ

非局所配置
Non-local geometry



スピンの注入

スピンの緩和 (拡散)

$$J_e = J_{\uparrow} + J_{\downarrow} = 0$$

$$J_s = J_{\uparrow} - J_{\downarrow} \neq 0$$

スピントロニクスデバイスの特性を決める 重要な基本概念

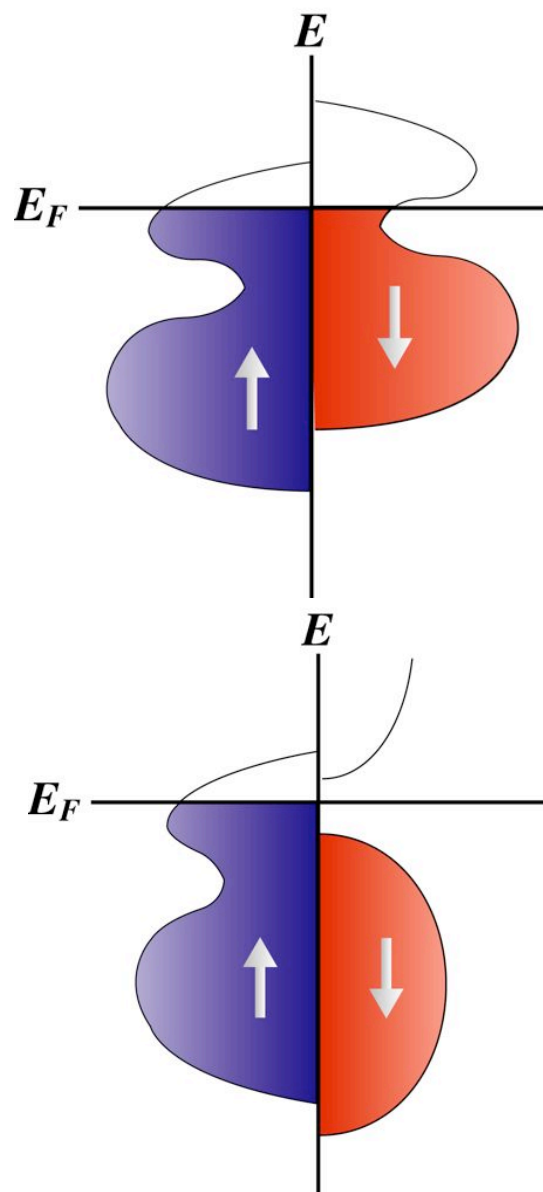
スピン偏極 (*Spin polarization*)

スピン注入 (*Spin injection*)

スピン緩和 (*Spin relaxation*)

いかにして効率良くスピン流を生成し、
長距離までスピン流を流すか。

高スピン偏極材料



飽和磁化 : $M_s \propto N_{\uparrow} - N_{\downarrow}$

伝導電子の**スピン偏極率**

$$P = \frac{D_{\uparrow}(E_F) - D_{\downarrow}(E_F)}{D_{\uparrow}(E_F) + D_{\downarrow}(E_F)}$$

強磁性 3d 遷移金属 のスピン偏極率	Fe: +0.40
	Co: +0.35
	Ni: +0.23

ハーフメタル; $P = 1$

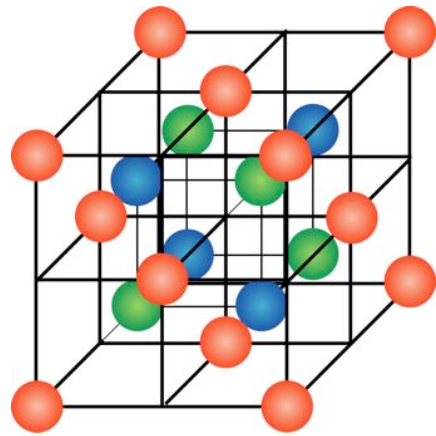
ホイスラー合金

NiMnSb, Co₂MnSi, Co₂MnAl, etc.

遷移金属酸化物

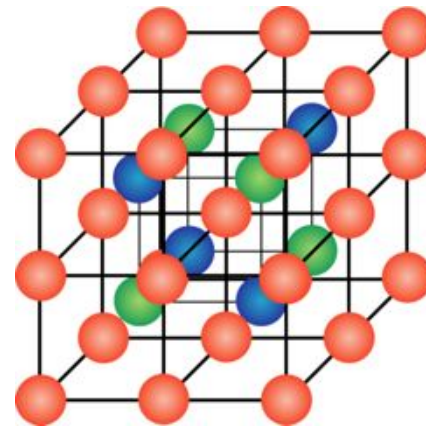
CrO₂, Fe₃O₄, LSMO, etc.

ハーフメタル：ホイスラー合金



half-Heusler
XYZ
(NiMnSb etc.)

C1_b structure

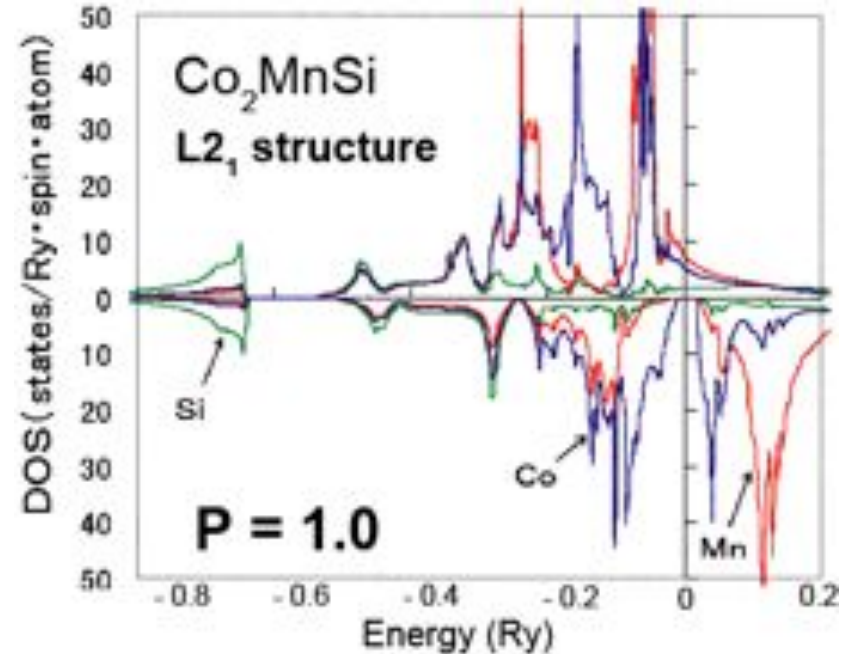


full-Heusler
X₂YZ
(Co₂MnSi, Co₂MnGe etc.)

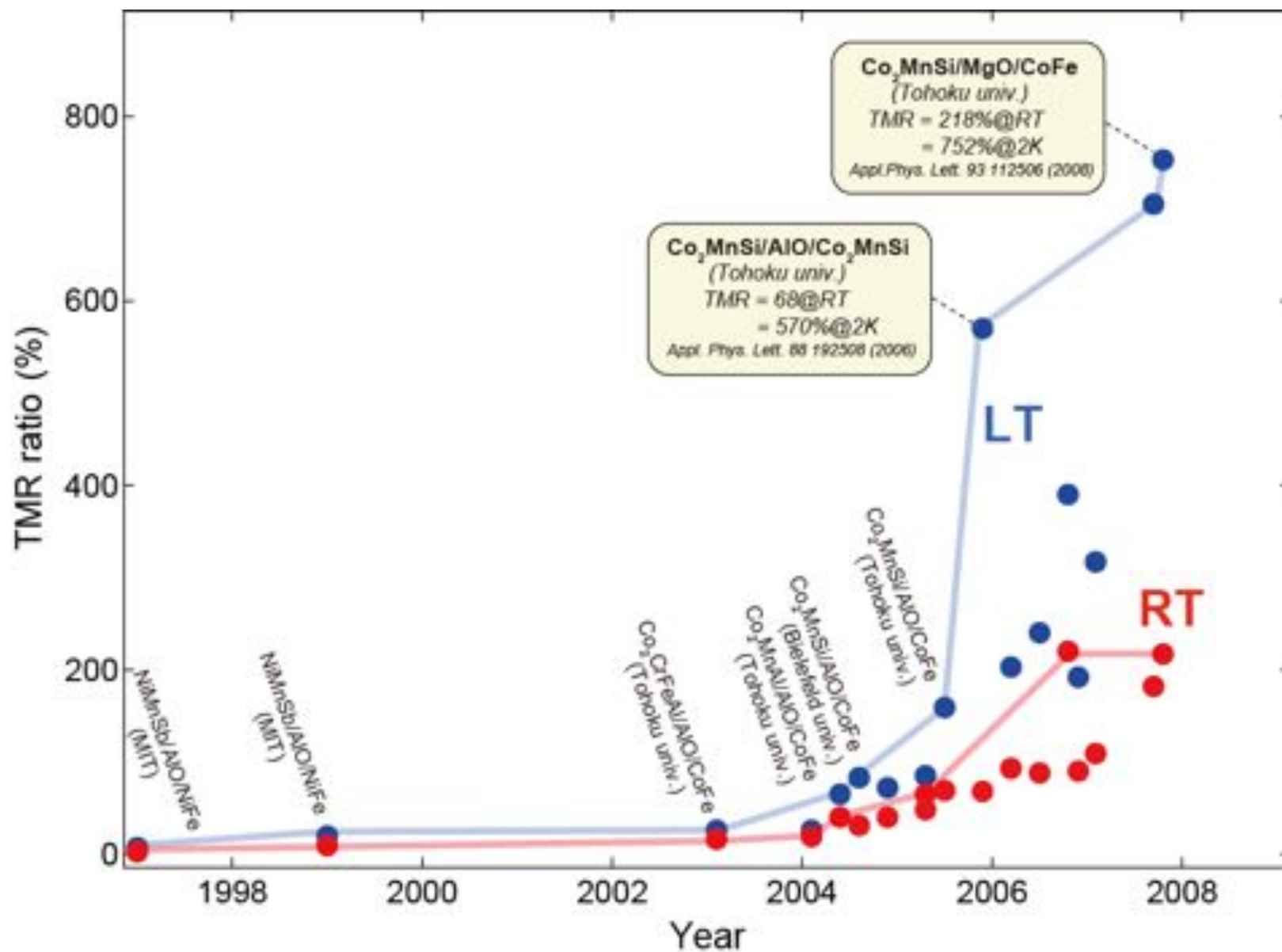
L2₁ structure

Co₂MnSi (CMS)

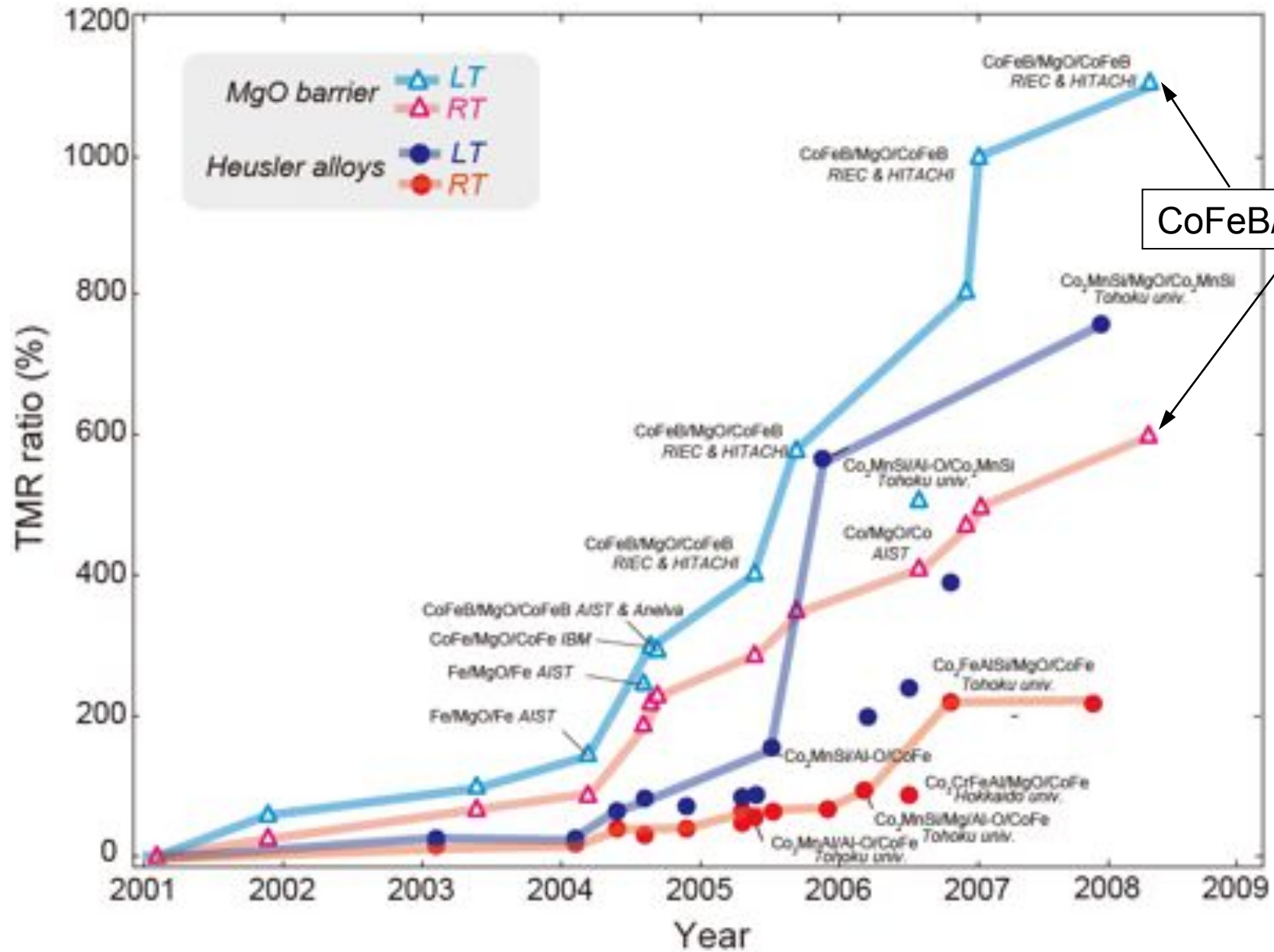
- Half-metallic energy gap : 400 – 600 meV
- High T_c ($\sim 985\text{K}$)
- Highly ordered L2₁-structure is easily obtained.



ホイスラー TMR の発展

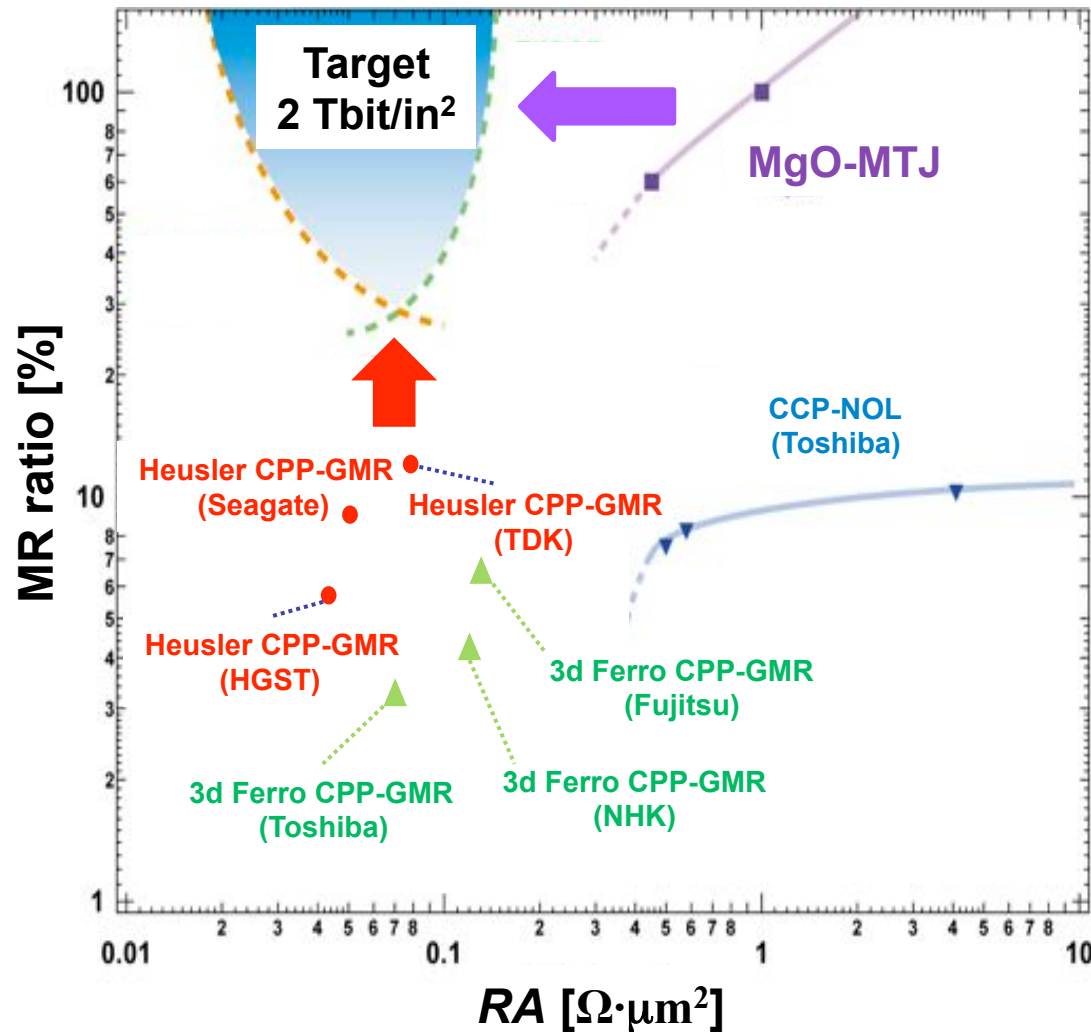


ホイスラー-TMRとMgO-TMR



CoFeB/MgO

低抵抗化とTMR



低抵抗化に伴うTMRの減少
 スピン注入効率の減少
 (本質的)



ハーフメタル
 ホイスラー合金への期待

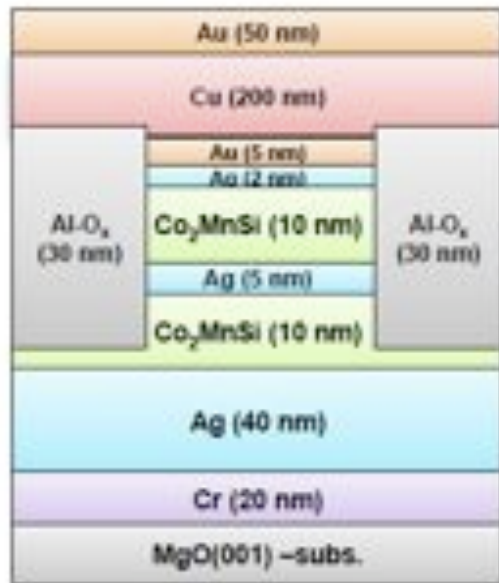
TMR

CPP-GMR

スピン注入源

単位面積当たりの抵抗値 (RA) と
 抵抗変化率 (MR ratio) の関係

Co₂MnSi/Ag/Co₂MnSi fully-epitaxial CPP-GMR device



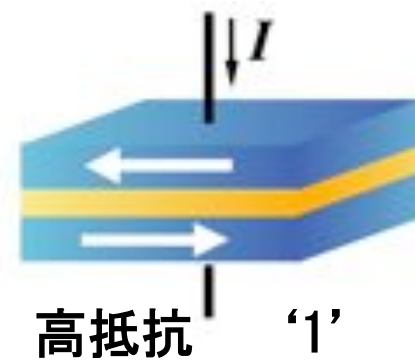
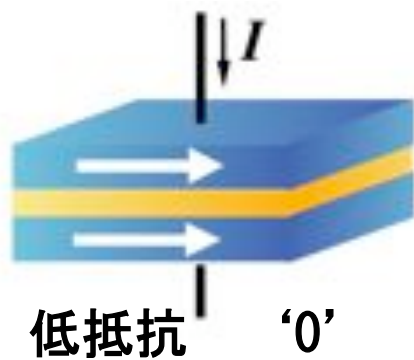
- ◆ The highest MR ratio (**28.8%@RT**) is the best record in all of the reports to date.

Fully-epitaxial growth in CMS/Ag/CMS

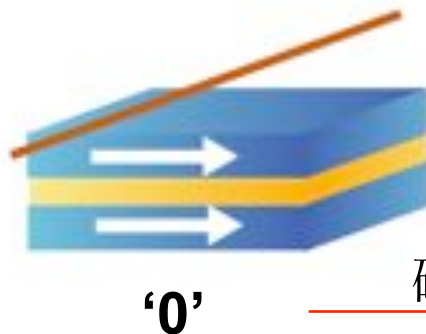
Iwase *et al.*, *Appl. Phys. Express*, 2, 063003 (2009).

磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM) の仕組み

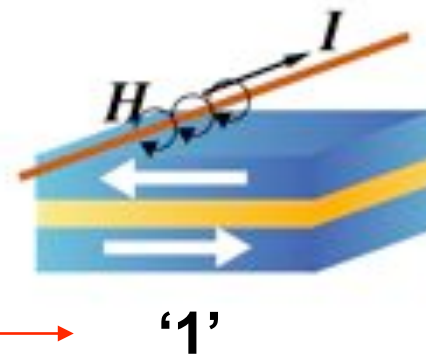
読み出し



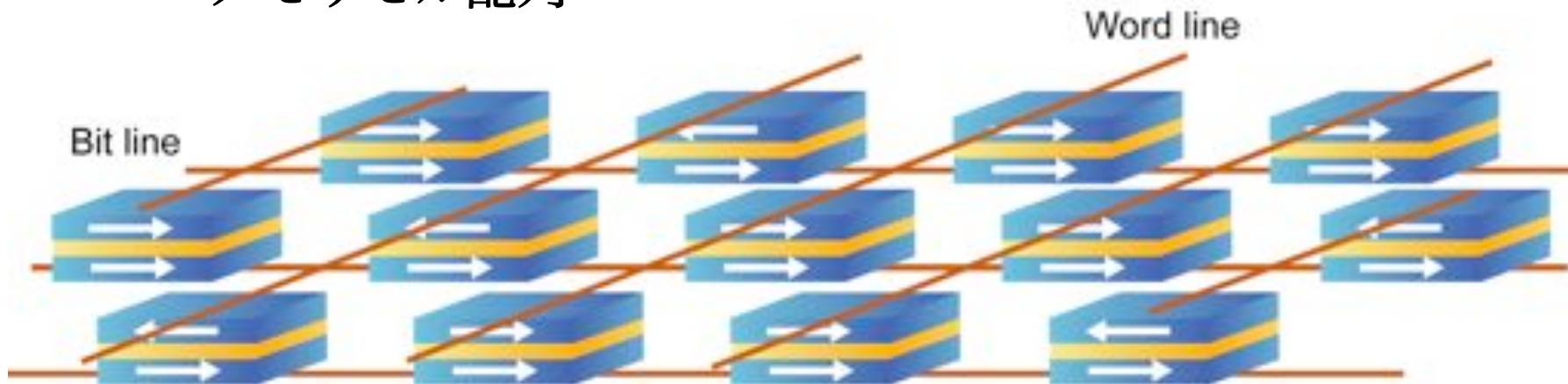
書き込み



磁化反転



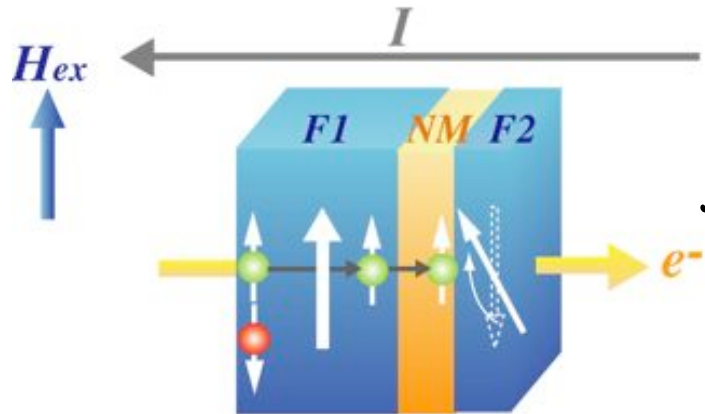
メモリセル配列



MRAMの主要課題

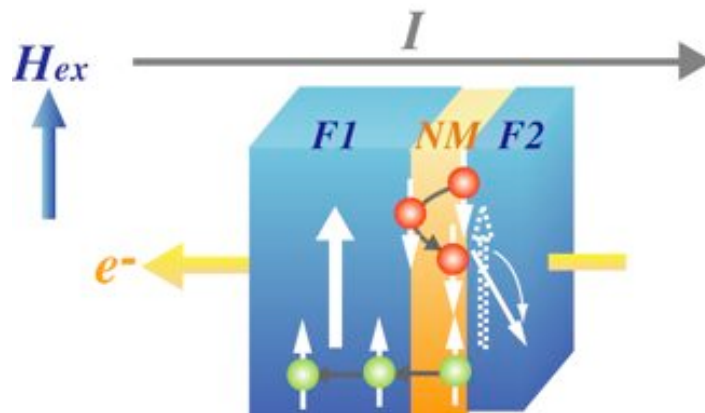
1. 書き込み電流の低減 → スピン注入磁化反転
2. 特性バラツキ対策：MTJ素子の均一性
 - 抵抗およびTMRの均一性
 - 書き込み電流の均一性
3. ギガビット級の大容量化
 - 低電流書き込み
 - 熱揺らぎの抑制
 - CMOSフリー

スピン流による磁化制御（スピン注入磁化反転）



AP → P

$$J_c^{AP \rightarrow P} = +\alpha e \gamma M_S d [-H_{ext} + (H_{ani} + 2\pi M_S)] / \mu_B g(\pi)$$



P → AP

$$J_c^{P \rightarrow AP} = -\alpha e \gamma M_S d [H_{ext} + (H_{ani} + 2\pi M_S)] / \mu_B g(0)$$

$$g(\theta) = [-4 + (P^{-1/2} + P^{1/2})^3 (3 + \hat{s}_1 \cdot \hat{s}_2) / 4]^{-1}$$

α : Damping parameter

H_{ex} : External magnetic field

γ : Gyromagnetic ratio

H_{ani} : Anisotropy field

M_S : Saturation magnetization

P : Spin polarization factor

d : Layer thickness

垂直磁化 TMR / CPP-GMR

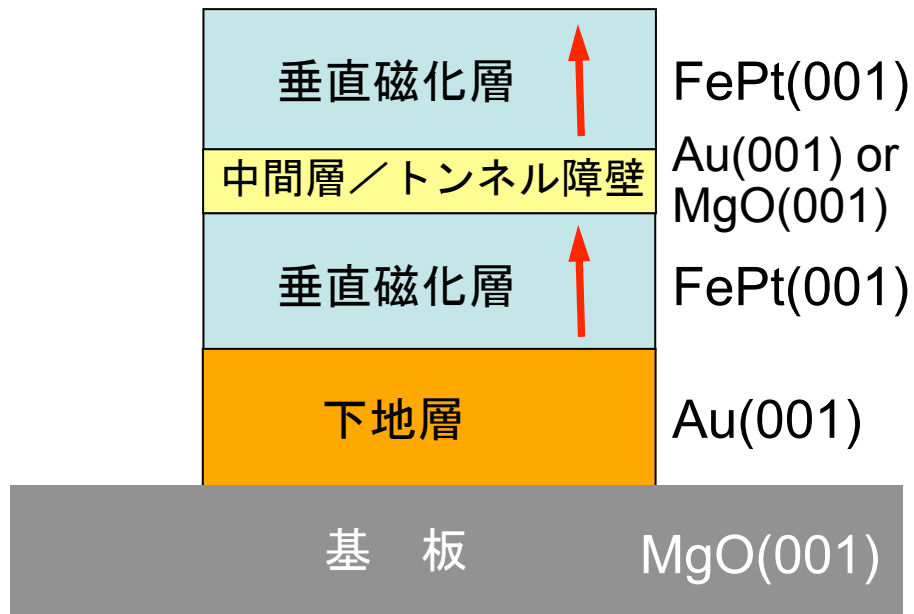
垂直磁化の有利性

高磁気異方性→磁化の安定性

負の形状磁気異方性→スピン注入磁化反転が容易

アスペクト比無制限

→ 高集積化



Fully epitaxial

スピン流と磁化ダイナミクス

Current-induced domain wall motion

Current-induced vortex core motion

(A. Yamaguchi *et al.*, PRL 92 (2004) 077205.)

**MFM observation of domain wall movement
by spin polarized current in a permalloy
nanowire without external magnetic field**

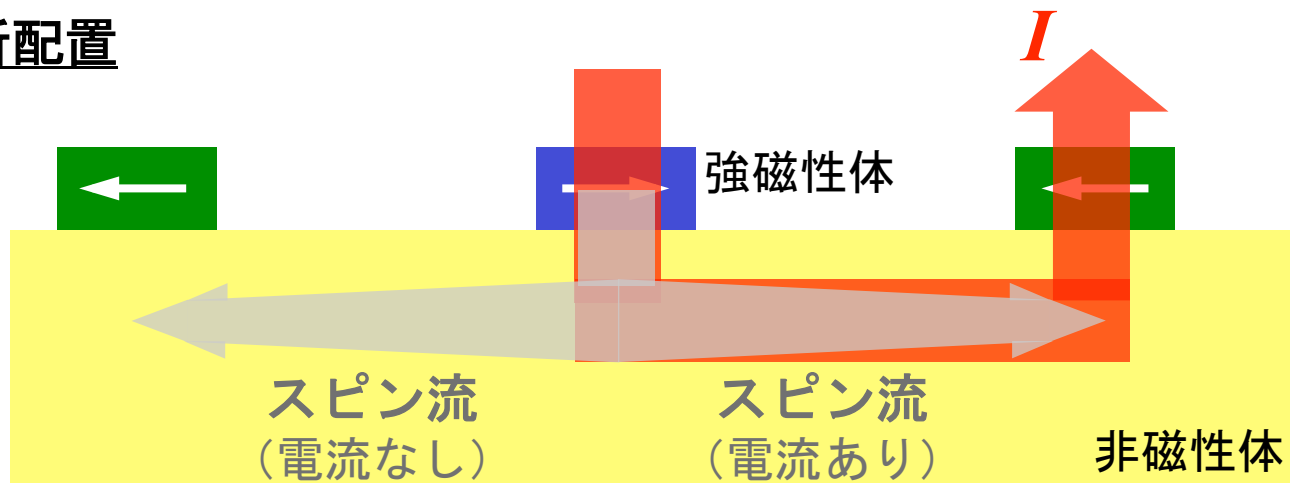
Spin-transfer effect

(S. Kasai *et al.*, PRL 101 (2008) 237203.)

***Time-resolved M-TXM* observation of
vortex core motion driven by ac current
in a permalloy disk**

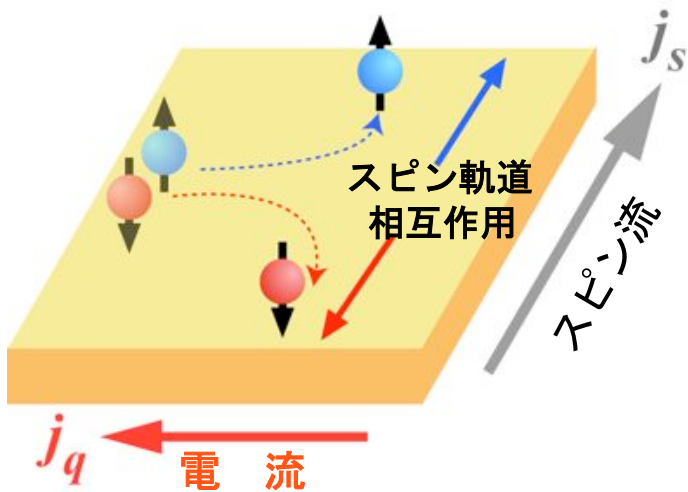
スピン流と電流

非局所配置

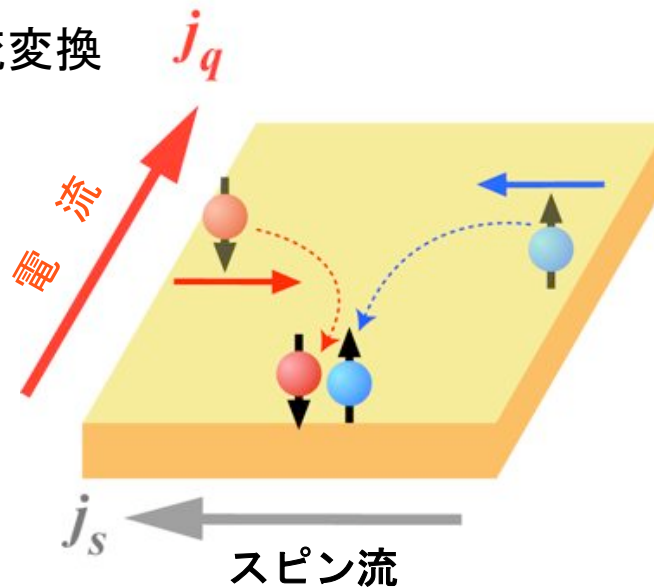


スピンホール効果

電流 \leftrightarrow スピン流変換

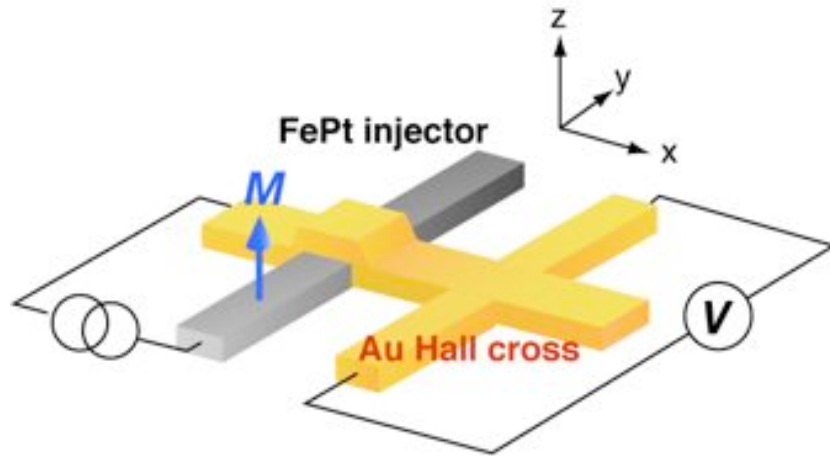


正スピンホール効果



逆スピンホール効果

垂直磁化FePt/Au系における巨大スピンホール効果



Spin Hall angle ~ 0.1

**Electrical detection of giant spin
Hall effect at room temperature**

T. Seki *et al.*, Nature Materials, 7 (2008) 125.

科研費特定領域研究「スピン流の創出と制御」

(2007~2010年度)

創出

物性

機能制御

A01
スピン源の
探索・創製

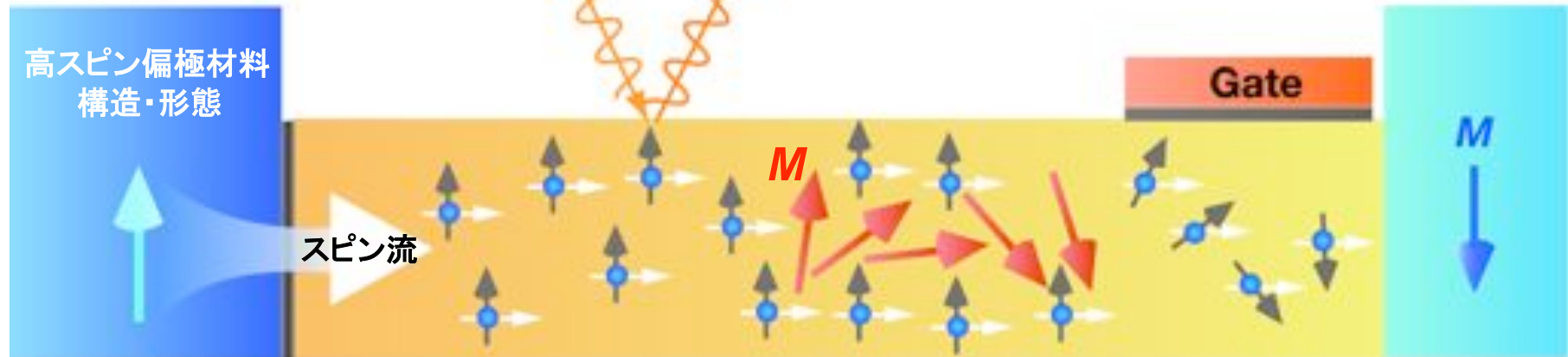
高梨 (東北大)
黒田 (筑波大)
白井 (東北大)
高橋 (物材機構)
藤森 (東大)
山本 (北大)

A03
スピン流と
光物性

大野 (東北大)
安藤 (東北大)
永長 (東大)
宗片 (東工大)

A05
スピン流の
機能と制御

田中 (東大)
清水 (東大)
鈴木 (阪大)
仲谷 (電通大)
吉田 (阪大)



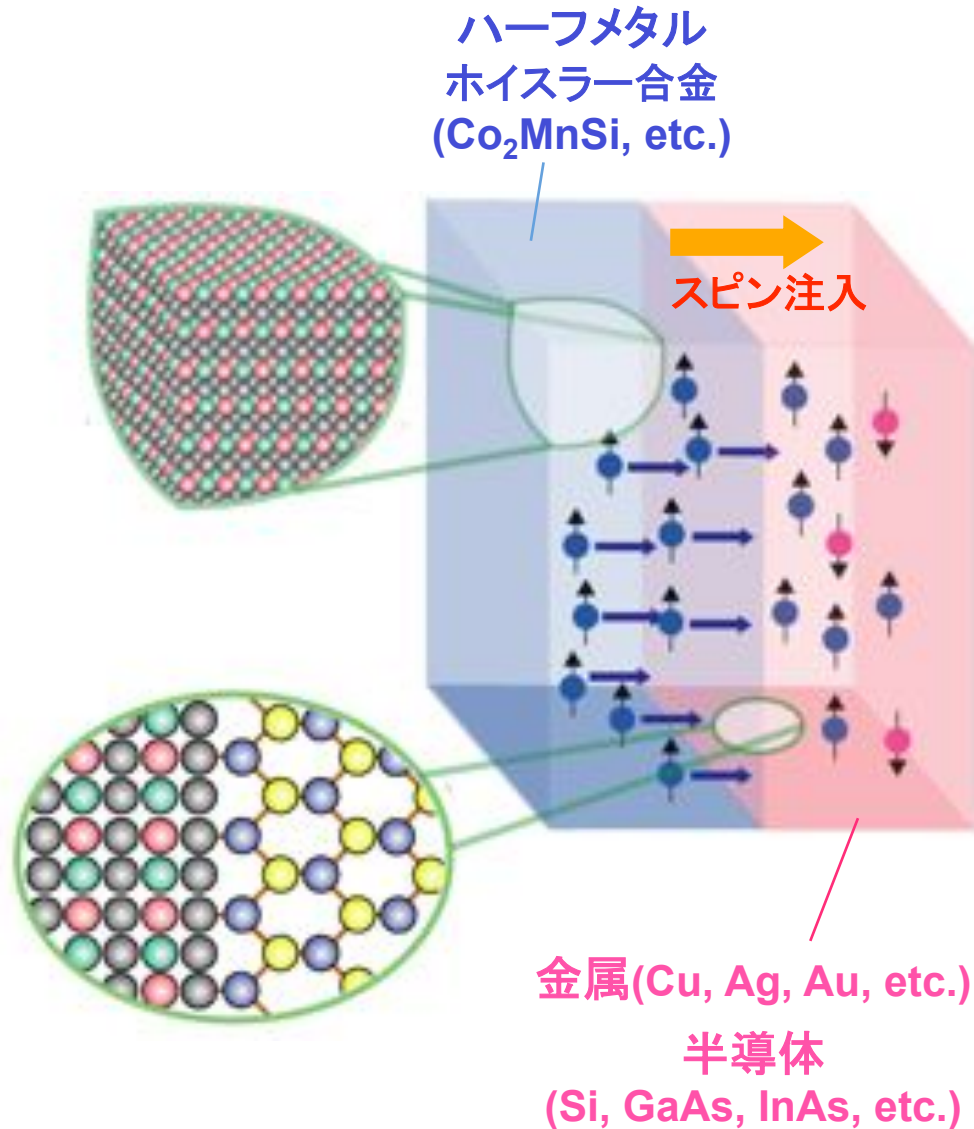
A02
スピン流と
ナノヘテロ構造

大谷 (東大)
秋永 (産総研)
井上 (名大)
新田 (東北大)

A04
スピン流と
電子物性

小野 (京大)
勝本 (東大)
齊藤 (慶大)
多々良 (首都大)
前川 (東北大)

放射光への期待 (1)



- ・ 室温における完全スピン偏極の実現
- ・ スピン流の高効率抽出

- ・ 高スピン偏極材料の電子状態
half-metallicity の検証
- ・ 界面での構造およびスピン状態
元素選択性
原子レベルでの評価

放射光への期待 (2)

スピン流回路の
要素技術の確立

スピン流に関わるダイナミクスの解明
感度 / 時間分解能 < ns / 位置分解能 ~ nm

