

# TOSHIBA

Leading Innovation >>>

## 次世代MRAMにおける磁性材料

(株)東芝 岸

與田, 甲斐, 永瀬, 北川, 吉川, 西山, 大坊, 長嶺, 天野, 高橋, 中山, 下村,  
相川, 池川, 土田, 岩田, 浅尾  
\*湯浅, \*薬師寺, \*久保田, \*福島  
\*\*大兼, \*\*安藤, \*\*水上  
\*\*\*鈴木  
\*\*宮崎, \*安藤

(株)東芝

\*産総研, \*\*東北大, \*\*大阪大

# 内容

---

- MRAMとは
- スピン注入の原理
- 垂直磁化方式MRAM
- 課題
- まとめ

謝辞

本研究の一部はNEDOの委託により行われた

# MRAMとは

---

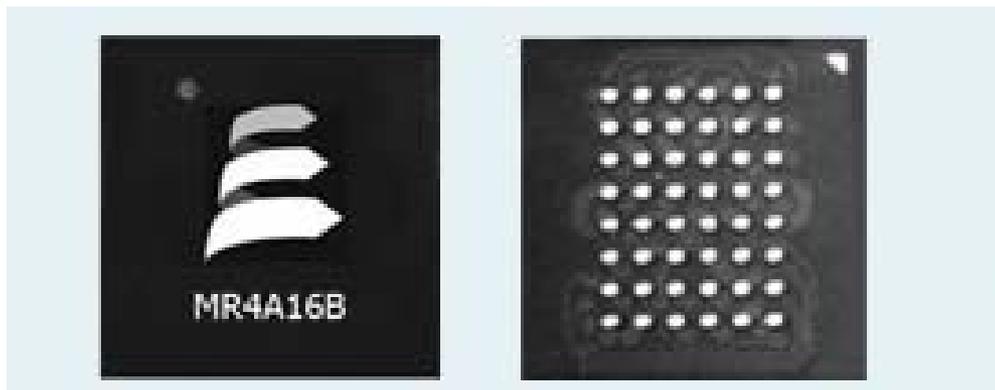
フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』

磁気抵抗メモリ(じきていこうメモリ、英:*Magnetoresistive Random Access Memory*)とは磁気を利用した記憶素子で、Magnetic Random Access Memory、MRAMとも呼ばれる。N-Sという磁力極性を利用した記憶媒体(磁気ディスク装置や磁気テープ装置など)ではなく、電子のスピンをメモリ素子として利用するスピントロニクスを採用している。

## 動作原理

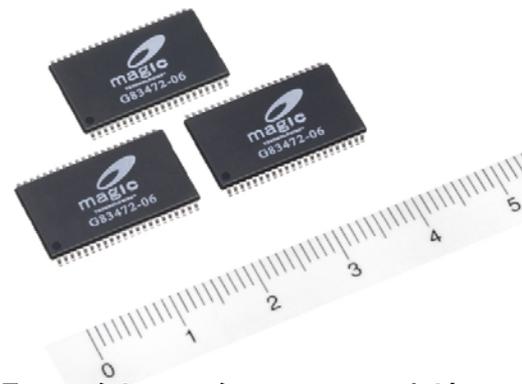
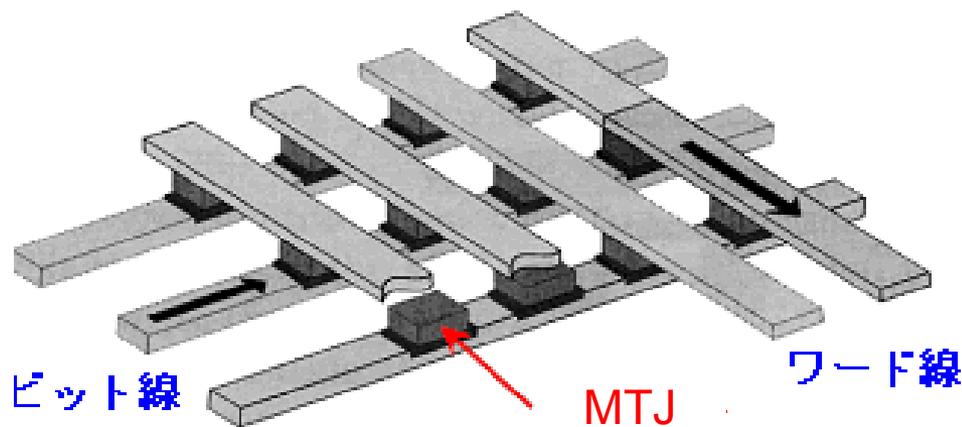
- 読み出し
  - TMR(Tunnel Magnetoresistance, トンネル磁気抵抗)効果
- 書き込み
  - 電流磁場方式
  - スピン注入方式

# MRAM構造



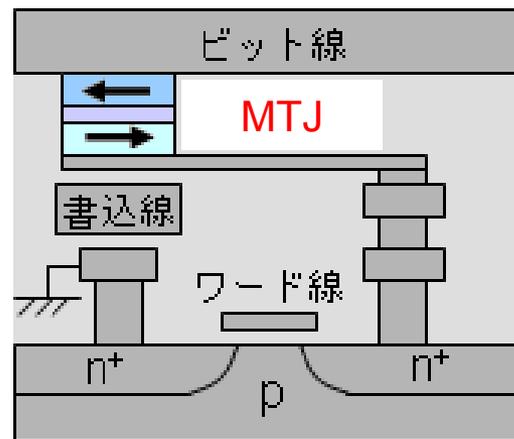
Everspin Technologies のWebより

## メモリアレイ



日経エレクトロニクス のWebより

## セル構造(断面図)



トランジスタ

# MRAMの特徴

---

- 不揮発

- 磁性体に記憶する ◎

- 高速

- 磁化反転は nsecオーダー ◎

- 大容量

- 超常磁性限界まで(10nm程度以下) ◎

- スケーラビリティ

- 電流磁場方式

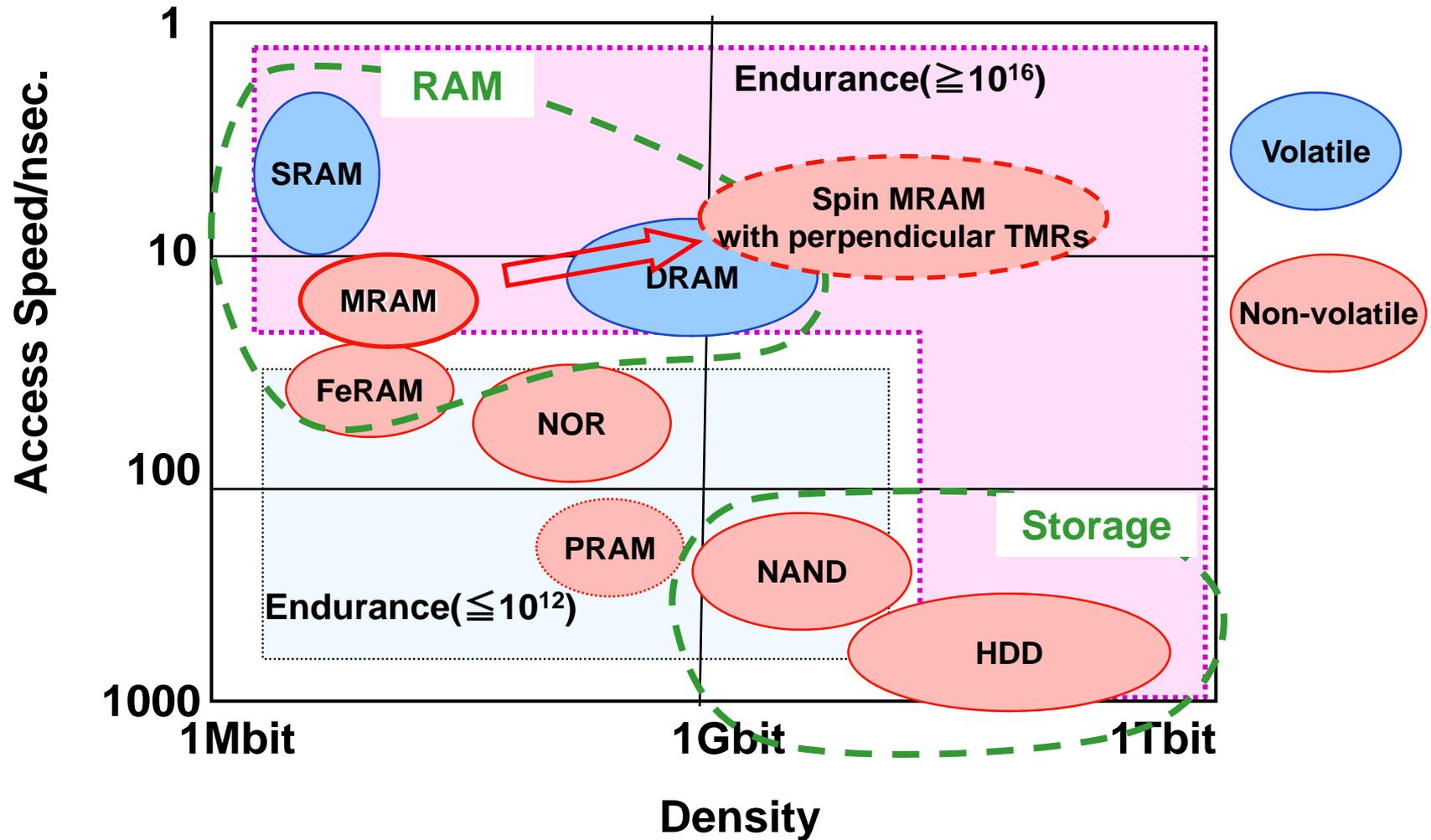
- 小さくなると反転電流増大 ✕

- スピン注入方式

- 原理的にサイズが小さくなると反転電流減少 ◎

⇒DRAMの置き換えが可能(+不揮発)

# 各種メモリ比較



# 内容

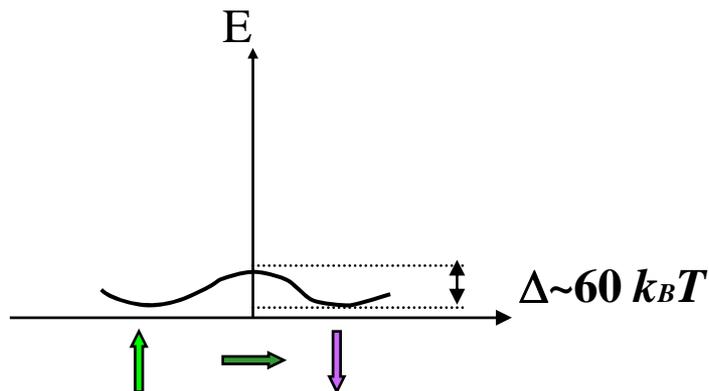
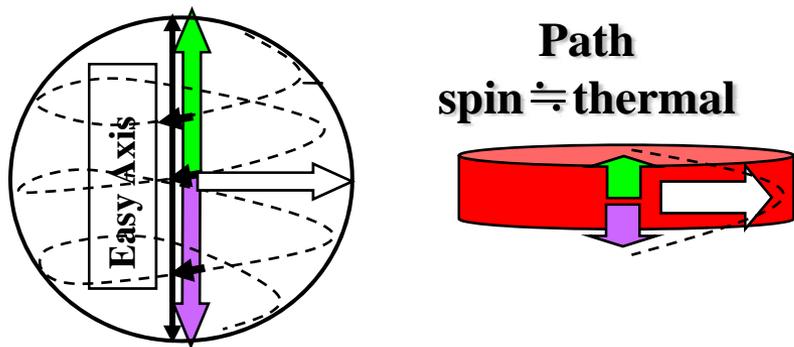
---

- MRAMとは
- **スピン注入の原理**
- 垂直磁化方式MRAM
- 課題
- まとめ

# 垂直方式 VS 面内方式

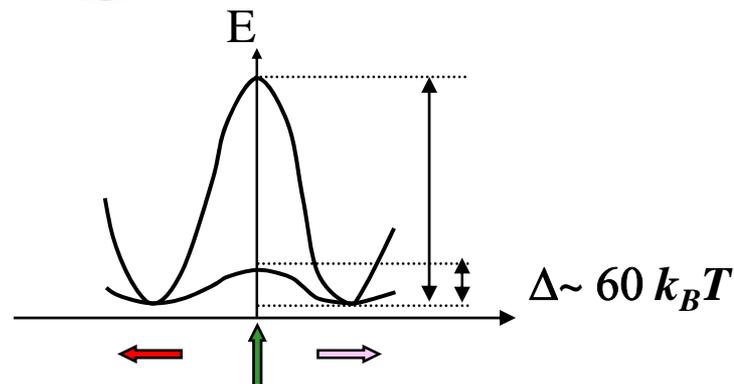
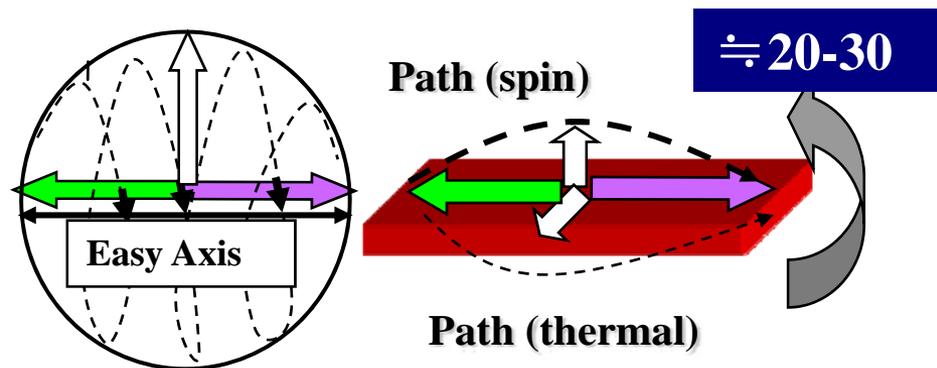
## Perpendicular

$$I_C^{APtoP} = \frac{e}{\hbar} \frac{\alpha}{g(0)} \times 2k_B T \Delta$$



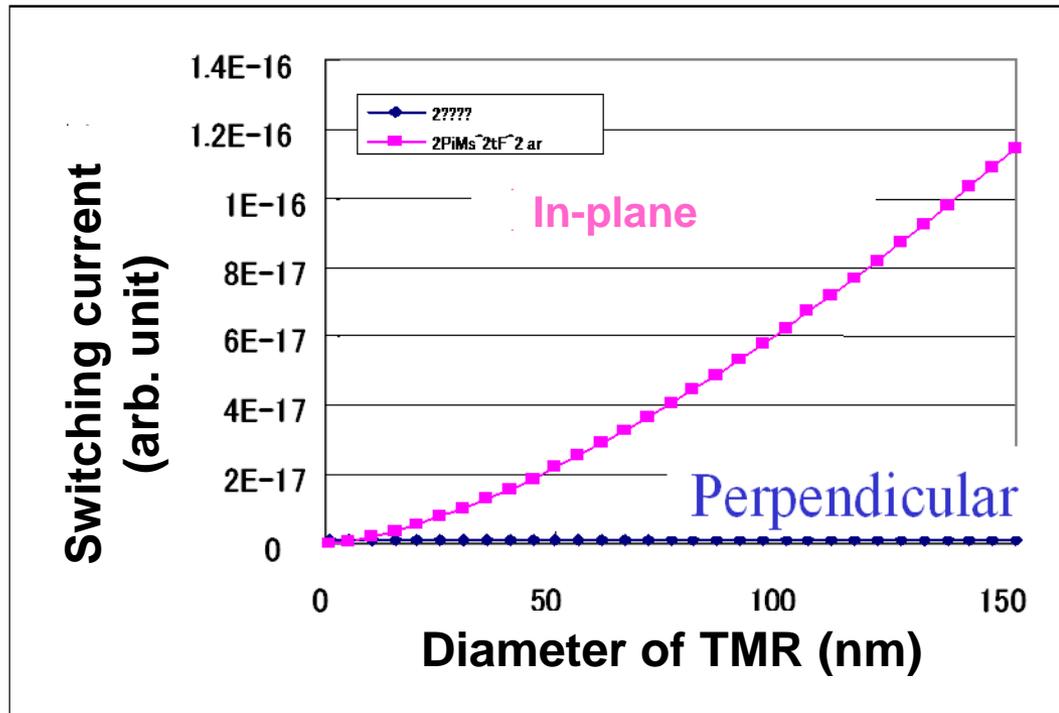
## In-plane

$$I_C^{APtoP} = \frac{e}{\hbar} \frac{\alpha}{g(0)} \times 2k_B T (\Delta + 2\pi M_s^2 V)$$



# シミュレーション(低電流書き込み)

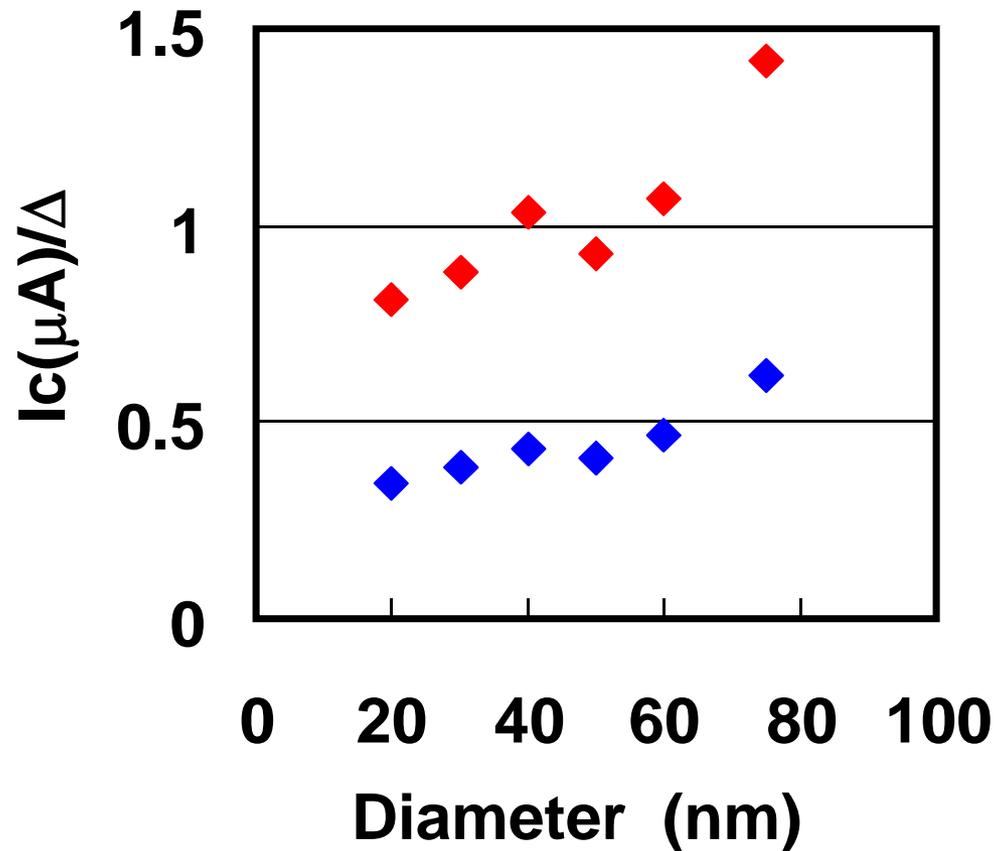
垂直磁化方式が低電流化に有利



H.Yoda, *et al.*, 7th IWFIPT (2007)

# シミュレーション(スケーラビリティ)

## 垂直方式におけるスケーラビリティの理論的証拠



T. Kai, et al., MMM 2008

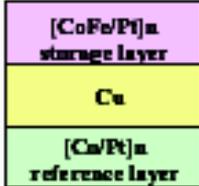
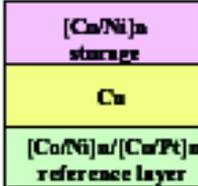
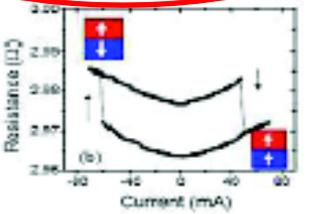
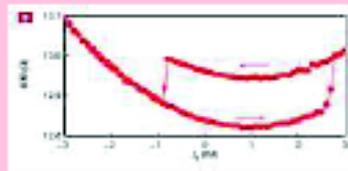
# 内容

---

- MRAMとは
- スピン注入の原理
- **垂直磁化方式MRAM**
- 課題
- まとめ

# 実験結果(GMR)

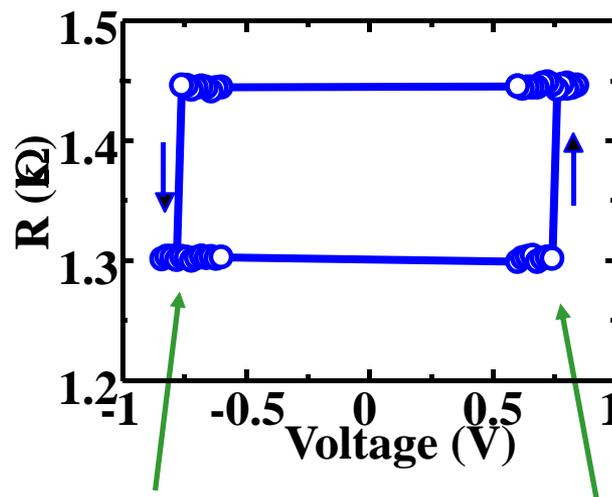
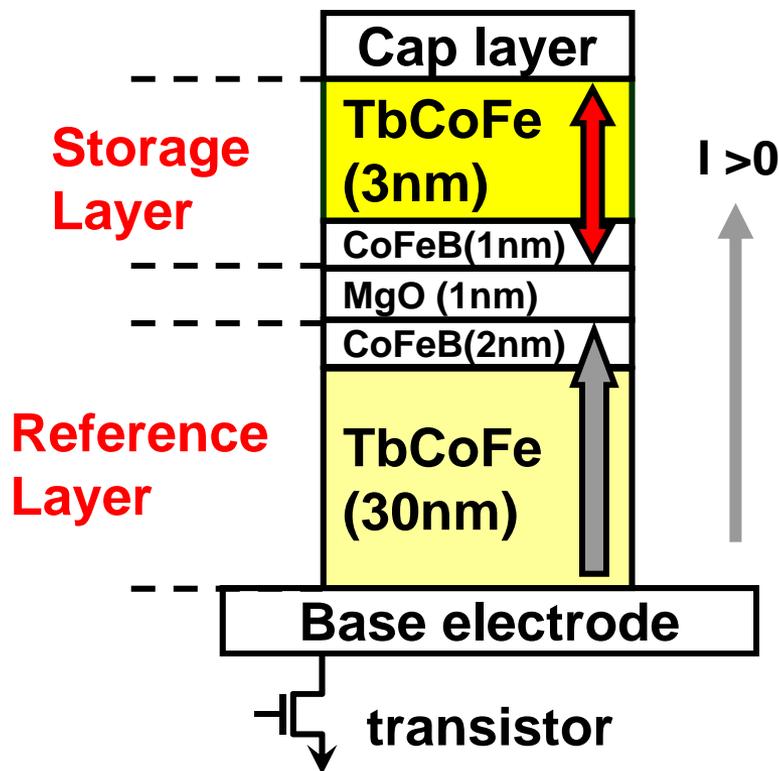
## History of perpendicular system, 1st Stage Demonstration of spin torque transfer switching

year	2006		
Element structure	<p>H. Meng et al., Prof. J.P. Wang Group</p> <p>● [CoFe/Pt]<sub>n</sub> GMR</p> 	<p>S. Mangin et al.</p> <p>● [Co/Ni]<sub>n</sub> GMR</p> 	<p>T. Seki et al., Prof. K. Takanashi Group</p> <p>● FePt GMR</p> 
Switching Current density	<p><math>J_{CAP-P} = 67 \text{ MA/cm}^2</math></p> 	<p><math>J_{CAP-P} = 26-45 \text{ MA/cm}^2</math></p> 	<p><math>J_{CAP-P} = 100 \text{ MA/cm}^2</math></p> 
MR	About 0.7%	About 1%	About 1%

垂直方式GMR系におけるスピン注入の実証  
(ただし反転電流が大きい)

# 実験結果(垂直方式MTJ-1)

## TbCoFeを用いたMTJ(Magnetic Tunnel Junction) におけるスピン注入の実証



$-3.5 \text{ MA/cm}^2$

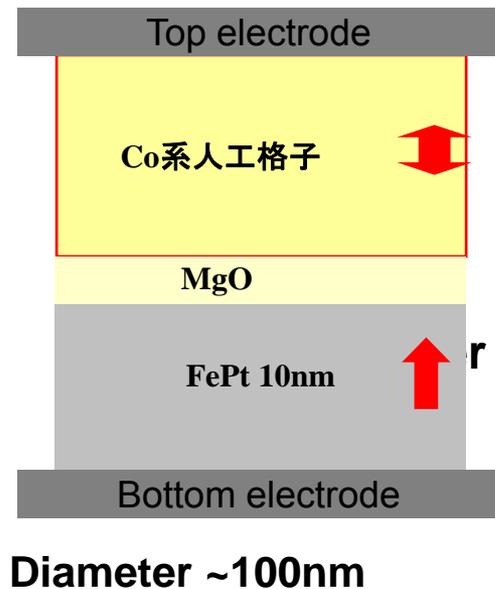
$+3.0 \text{ MA/cm}^2$

- Diameter 130 nm
- $RA=20 \text{ } \Omega \mu\text{m}^2$ ,  $MR=15 \%$
- $\Delta=100 \text{ } k_B T$

M.Nakayama, *et al.*, MMM(2007); JAP

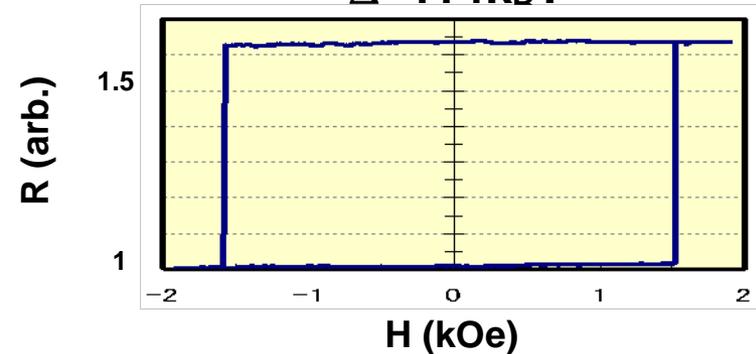
# 実験結果(垂直方式MTJ-1)

## 垂直方式におけるスピン注入反転電流の低減を実証

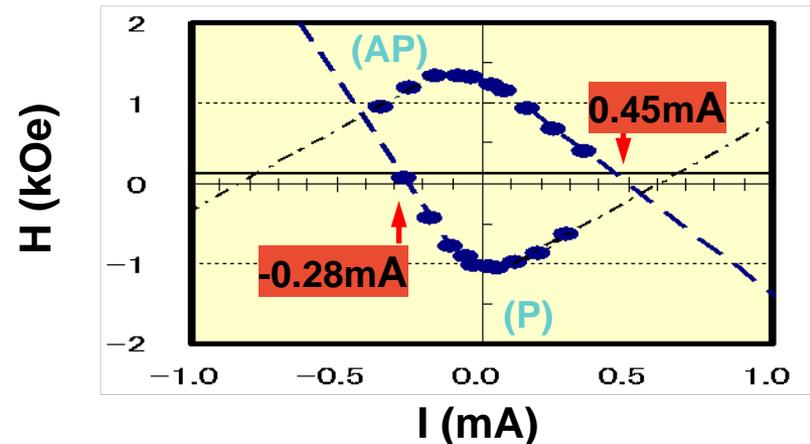


Retention energy

$$\Delta = 114 k_B T$$



$$J_{\text{CAP-P}} = 2.7 \text{ MA/cm}^2$$

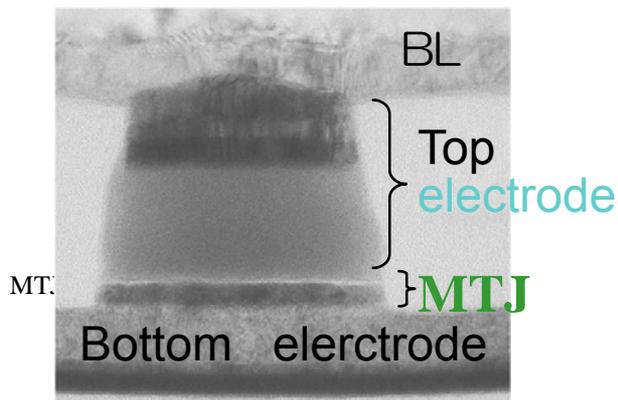


T.Nagase, K.Nishiyama, et al., APS 2008

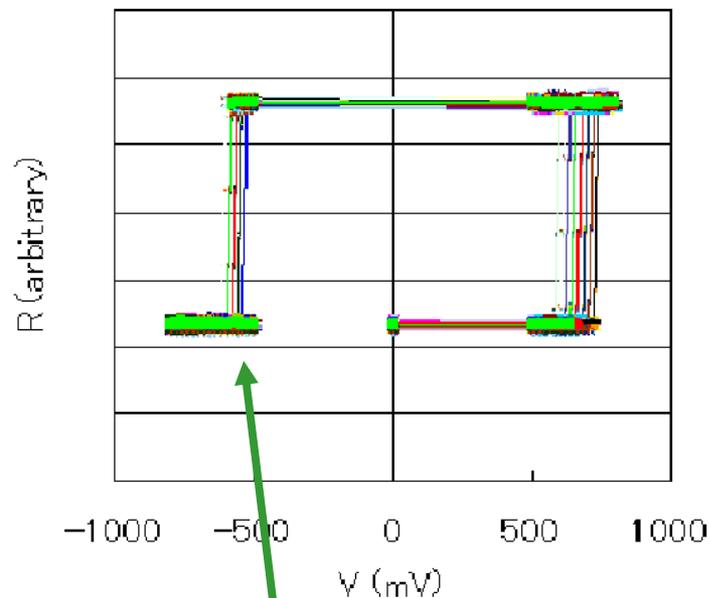
# 実験結果(垂直方式MTJ-3)

垂直方式におけるスピン注入反転電流低減のポテンシャルを実証

TEM image



Diameter 55 nm



$I_c(AP-P) \sim 49 \mu A$

# スピン注入反転効率

---

- 定義

- 反転電流

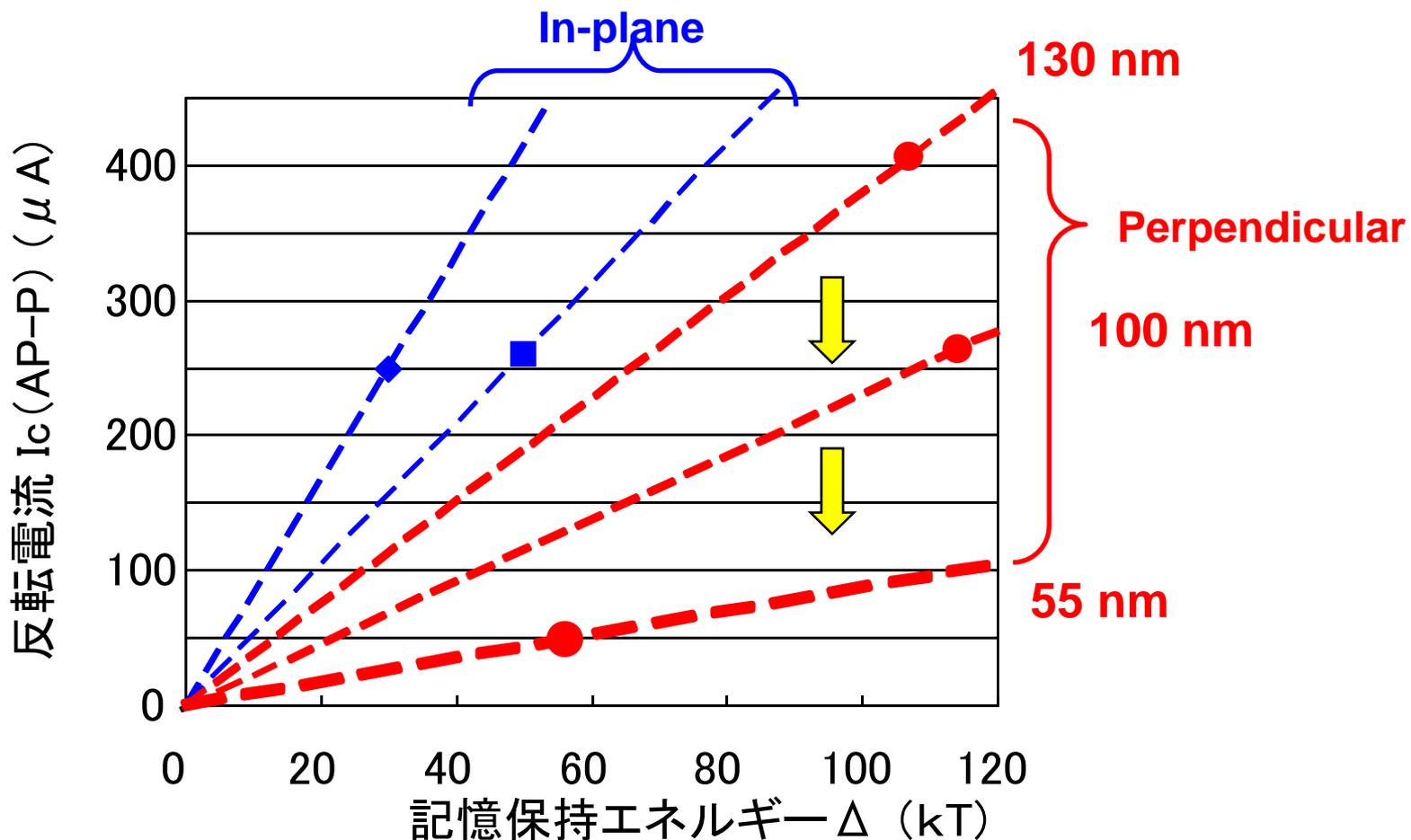
$$I_C^{APtoP} = \frac{e}{\hbar} \frac{\alpha}{g(0)} \times 2k_B T \Delta_{therm}$$

$$\text{反転効率: } I_C^{APtoP} / \Delta_{therm} \propto \frac{\alpha}{g(0)}$$

$\alpha$ : 減衰定数

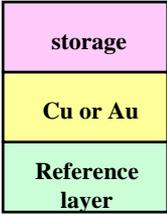
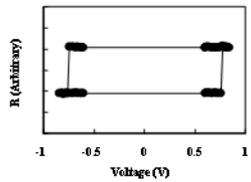
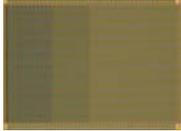
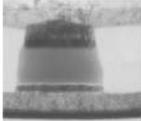
$g(\theta)$ : MRに依存した因子

# スピン注入反転効率



- 傾き = 反転効率  $I_c/\Delta$
- 垂直方式の効率が面内方式より高い

# 垂直方式スピン注入MRAMのまとめ

Conferences	Previous works	7 <sup>th</sup> IWFIPT	MMM2007	APS 2008	Intermag08 & ECS2008	IEDM 2008
MTJ structure	<ul style="list-style-type: none"> <li>GMR</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Spin transfer demonstration in perpendicular MTJs</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>TbCoFe TMR</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Artificial TMR</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>MTJ array</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>MTJ array</li> </ul> 
Switching Current or density	$J_{CAP-P} = 26-100 \text{ MA/cm}^2$		$J_{CAP-P} = 3.5 \text{ MA/cm}^2$	$J_{CAP-P} = 2.7 \text{ MA/cm}^2$	Array demonstration with 50nm MTJs	
Switching speed	No data				10 nsec	4 nsec