

スピントロニクスの現状と 次世代デバイスへの展望

鈴木義茂

大阪大学基礎工学研究科
物質創成専攻物性物理工学領域

1. 磁石と磁気記録

磁石の歴史

古代



マグネタイト(Fe_3O_4)が小アジアのマグネシア地方で産出
磁石は「賢者の石」と呼ばれることもある鉱物だった

磁気記録の発展



Poulsen の最初の磁気録音機
Telegraphone, 1898
ドラムにワイヤーが巻いてある(らしい?)



Sony Walkman portable audio cassette player
in 1979.
In the 20-year history of the Walkman devices,
100 million units were sold in the U.S.
creating a \$1 billion industry.



1959, Toshiba Helical scan VTR



Card reader from Kimaldi

磁気記録の発展(コンピューターII)

1956 24inch Hard disk x 50disks=5MB



Head assembly of ST412 Drive (10MB drive)



14 inch disk cartridge:10 ME

AT 4.3GB, disk drive

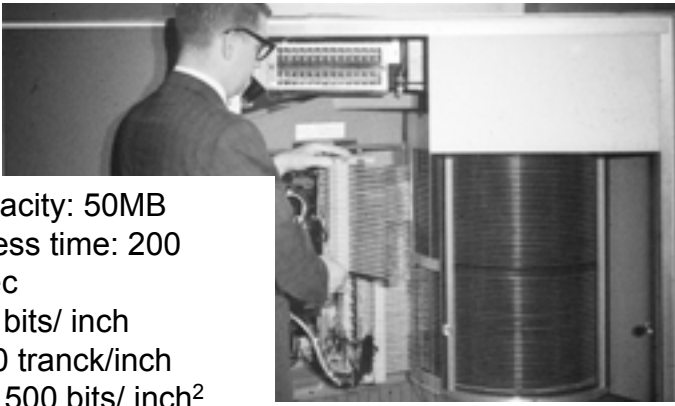
ST412 10MB full height drive

1975 8-inch floppy disk (800k)



From left to right in the front row: An 8 inch drive, a 5 inch full height drive, a 5 inch half height drive and a 3 inch 1.44 MB drive.

1962 IBM 24 inch drive 1301

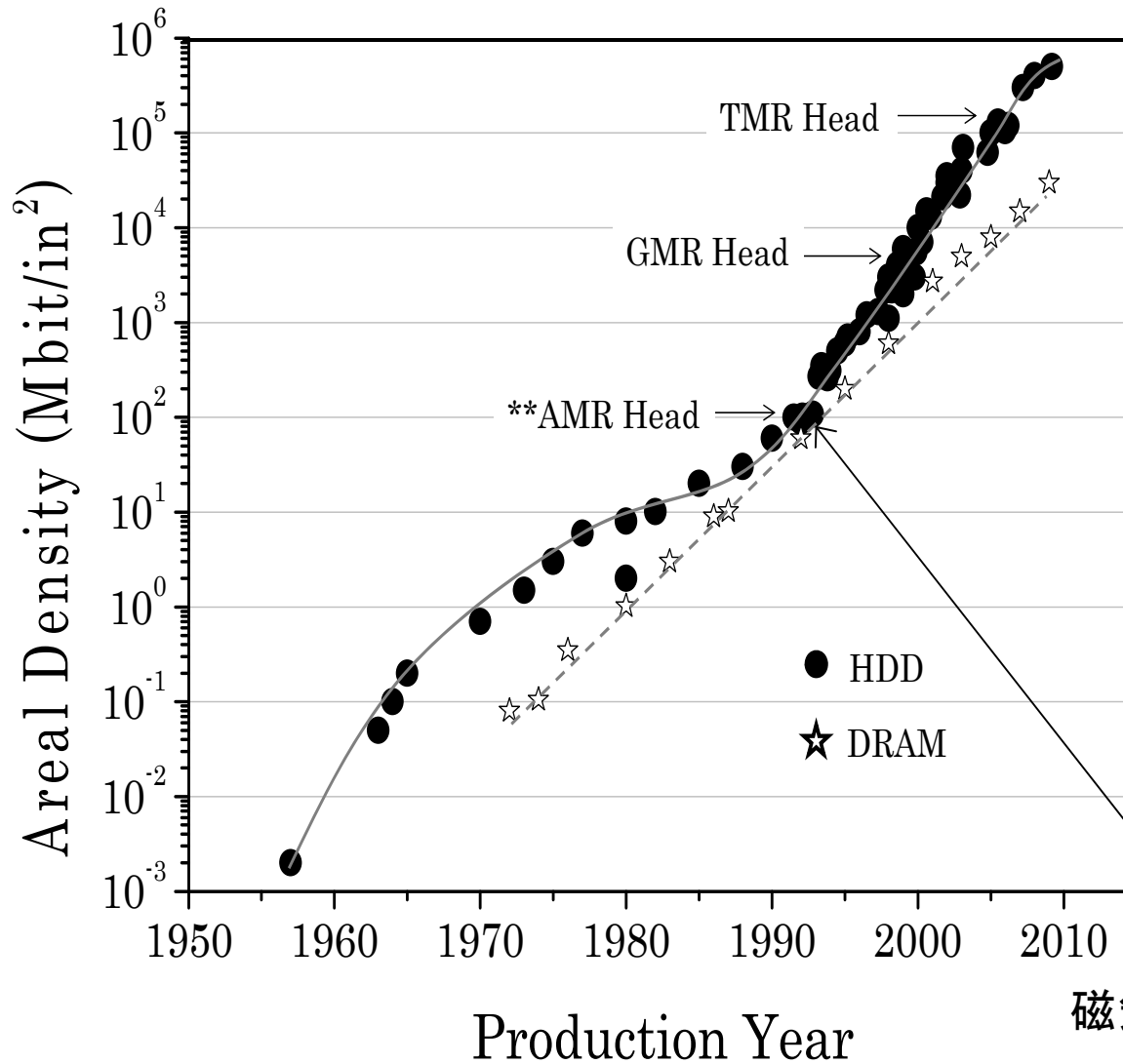


Capacity: 50MB
 access time: 200 msec
 535 bits/ inch
 x 50 tranck/inch
 =26,500 bits/ inch²

<http://nistory.sandiego.edu/gen/recording/mag/p0.h>

<http://www.arcula.demon.co.uk/perf3.htm>

磁気記録の発展



磁気抵抗ヘッドの導入

ハード磁気ディスク(HDD)とDRAMの記録密度の変遷

巨大磁気抵抗効果を使った超高感度磁気ピックアップ

1988年パリ南大学のA. Fert等はFeとCr
 からなる 磁性多層膜において巨大磁気
 抵抗効果を発見
 →スピントロニクスの創始！



28, Oct., 1998,
 Japan IBM
 announced 3.5
 inch HDD (Hard
 disk drive) using
 GMR head.
<http://pc.watch.impress.co.jp/docs/article/981028/ibm.htm>

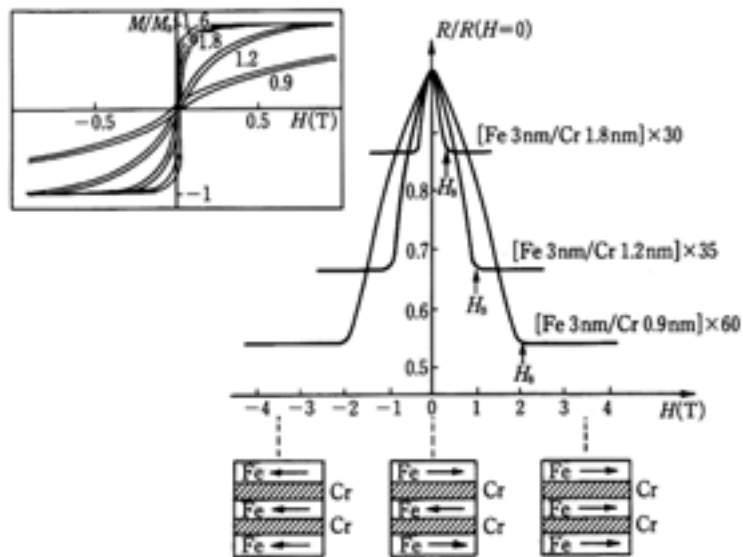
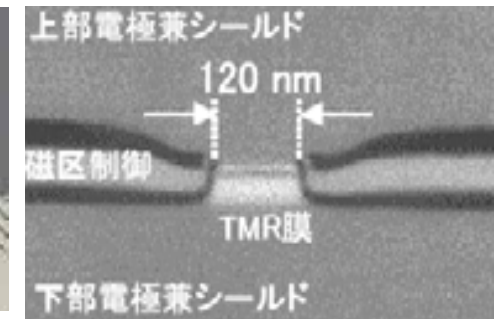


図 30 Fe/Cr 人工格子の電気抵抗の磁場依存性(挿入図は磁化曲線)⁶²⁾

新庄輝也著 「人工格子入門」
 内田老鶴圃, 2002より引用



<http://pc.watch.impress.co.jp/docs/2004/0309/alps.htm>



<http://www.hqrd.hitachi.co.jp/crl/nrd/02nrd5-1.pdf>



The Nobel Prize in Physics 2007

日本国際賞 April, 2007

"for the discovery of Giant Magnetoresistance"



Photo: U. Montan

Albert Fert

1/2 of the prize

France

Université Paris-Sud;
Unité Mixte de Physique
CNRS/THALES
Orsay, France



Photo: U. Montan

Peter Grünberg

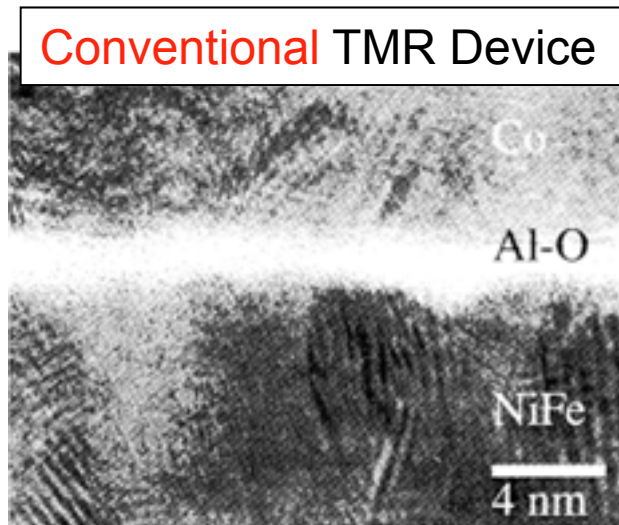
1/2 of the prize

Germany

Forschungszentrum Jülich
Jülich, Germany

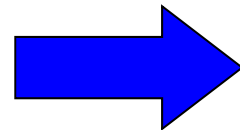


Challenge to single-crystal TMR

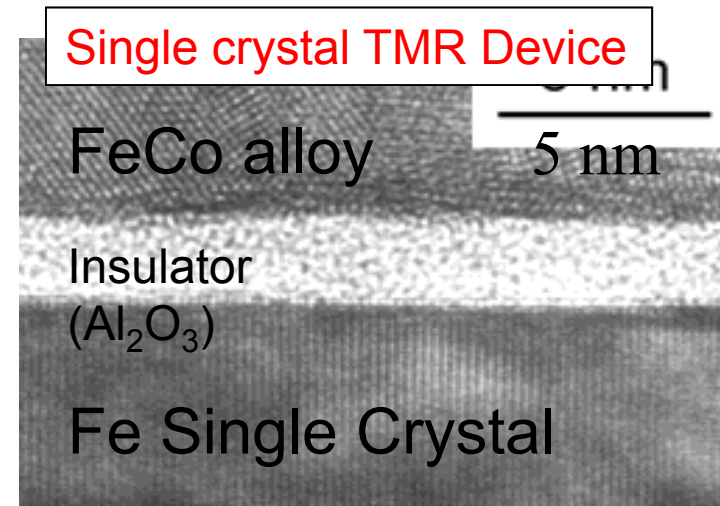


After A. C. C. Yu, et al., *JJAP* 40, 5058 (2001)

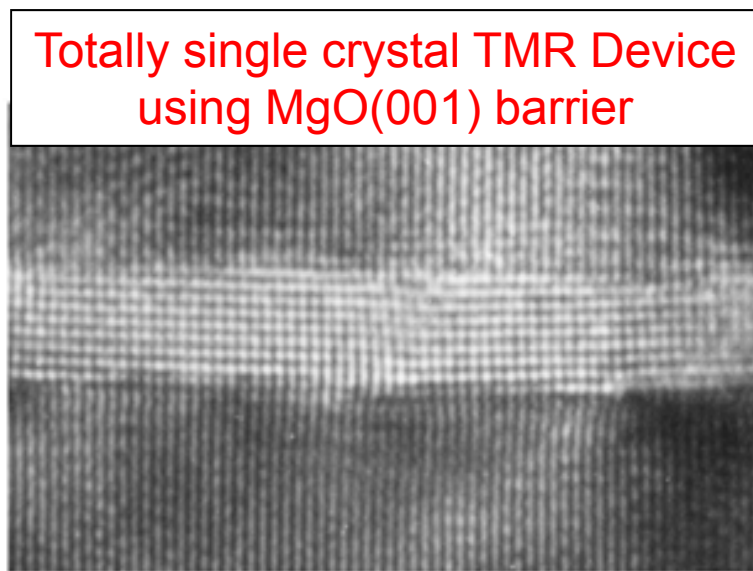
(⁰⁰-⁰⁴)



2nm
↕



S. Yuasa, Y. Suzuki et al., *Europhys. Lett.*, **52**(2000)344.

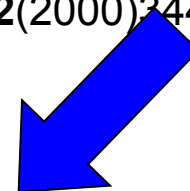


F_i Fe(001)

M₁ MgO(001)

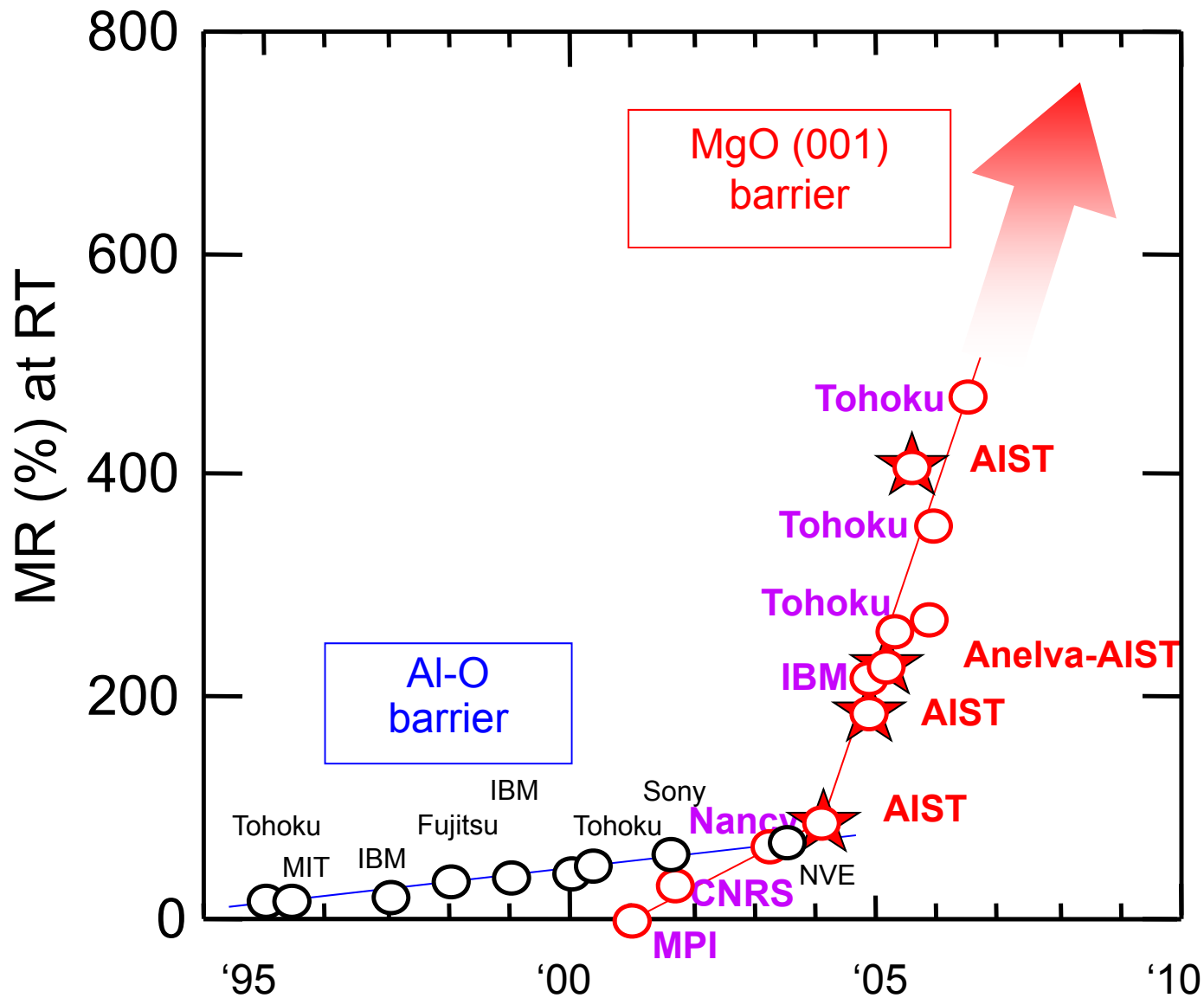
F_f Fe(001)

2 nm



S. Yuasa, Y. Suzuki et al: *Nature Materials* **3**, 868 (2004).
Cross-sectional transmission micro-scope images of Tunneling Junctions

室温におけるトンネル磁気抵抗効果の進歩



磁気記録の発展(家電)

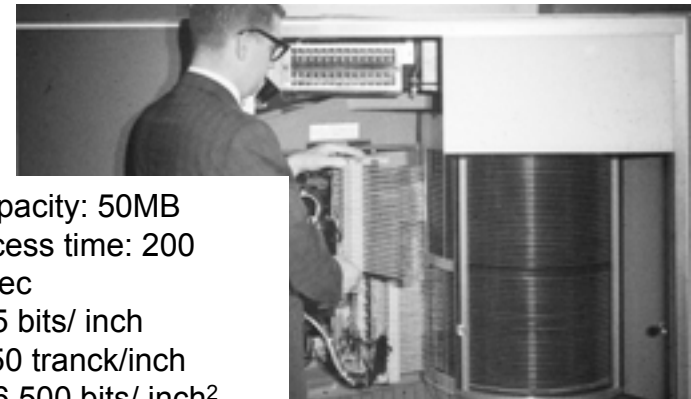
2011 Video recorder with 5 T bite Hard disk



東芝
5TB HDD/2チューナー(+地デジ6チューナー)搭載
3D対応ブルーレイレコーダー
TOSHIBA REGZA
レグザブルーレイ
DBR-M190

10万台分

1962 IBM 24 inch drive 1301

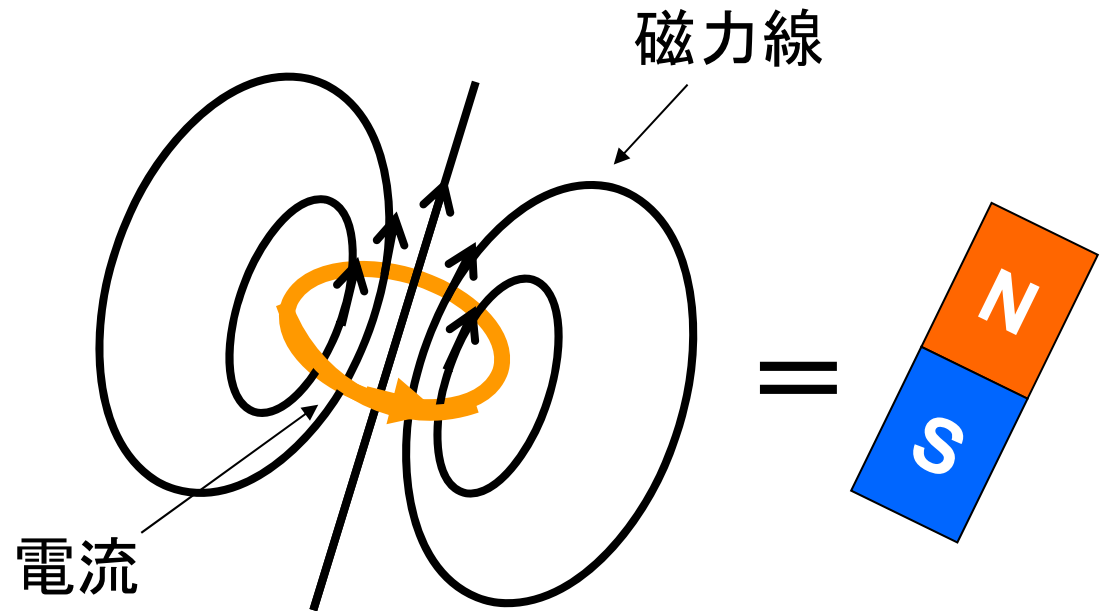


Capacity: 50MB
access time: 200
msec
535 bits/ inch
× 50 tranck/inch
=26.500 bits/ inch²

2. 小さな磁石の不思議な世界 磁石は流れる(スピン流)

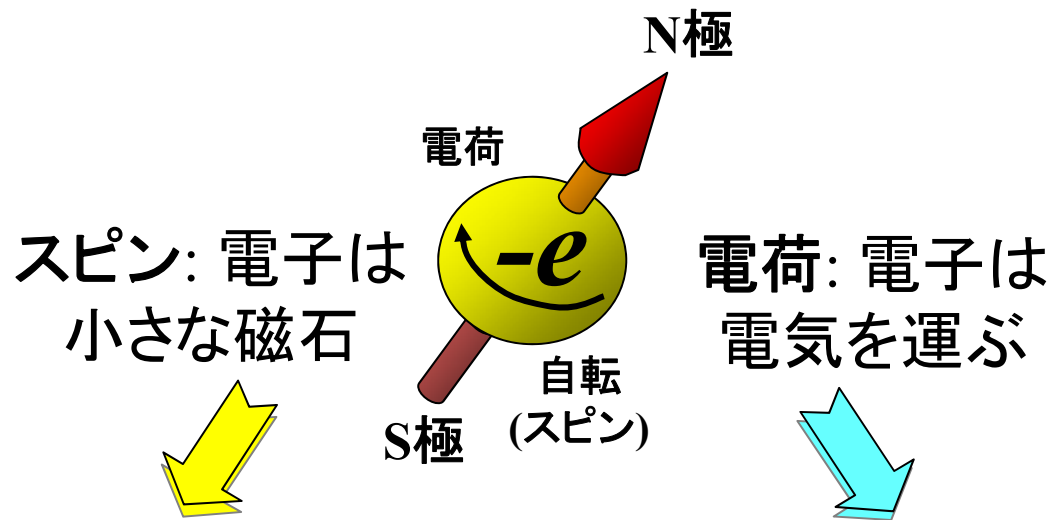
電子の自転とスピン

スピン: 電子は
小さな永久磁石



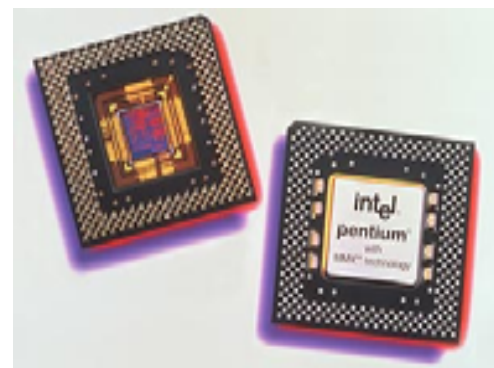
電子の自転はコイルを
流れる電流とおなじ等価

スピン → 自転 → 磁石
(角運動量)



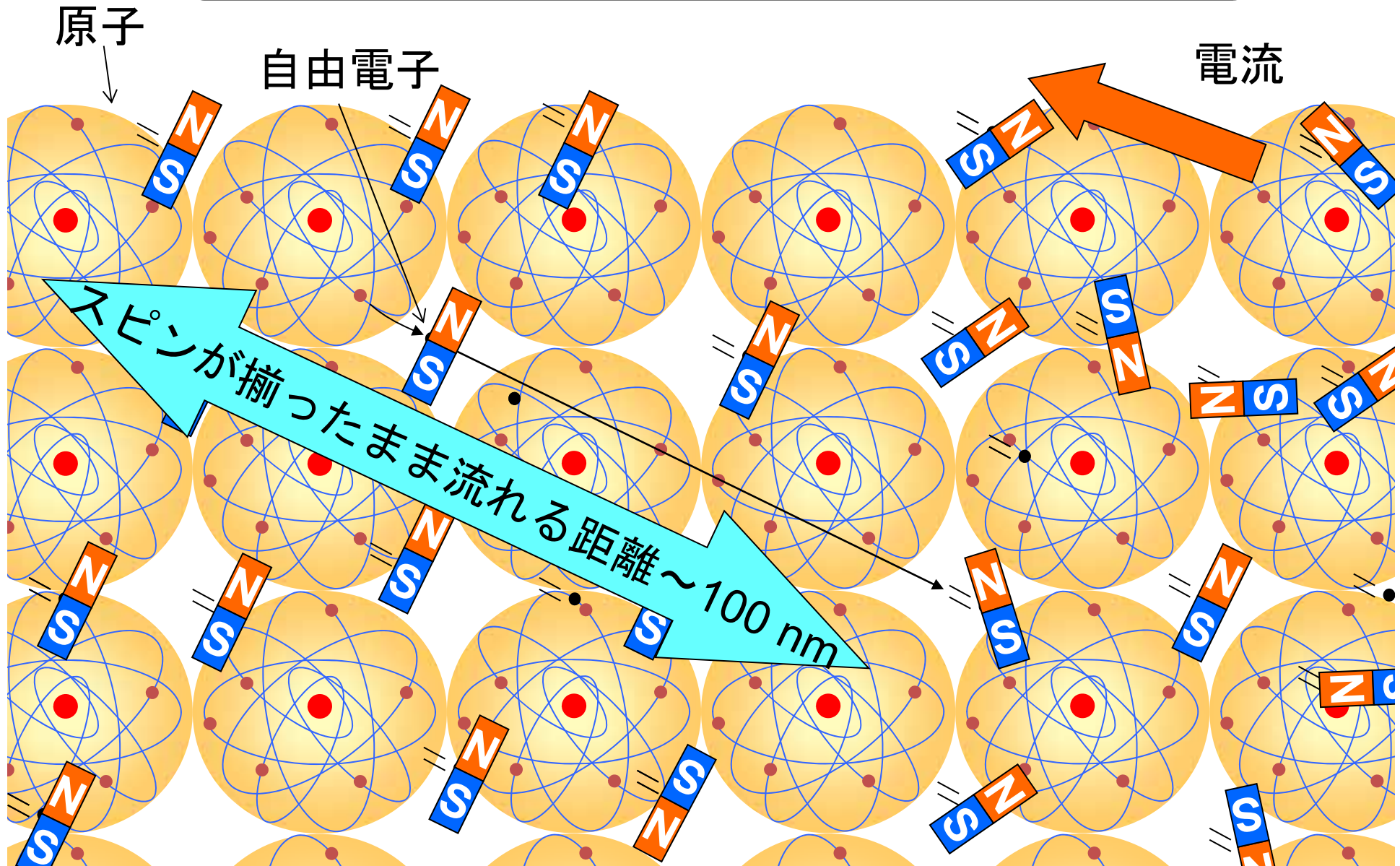
磁気工学 (スピン)

半導体工学 (電荷)

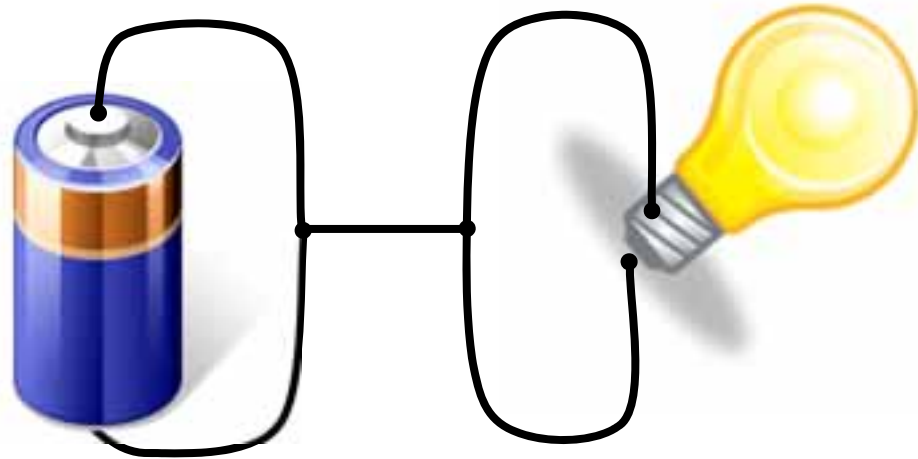


スピントロニクス

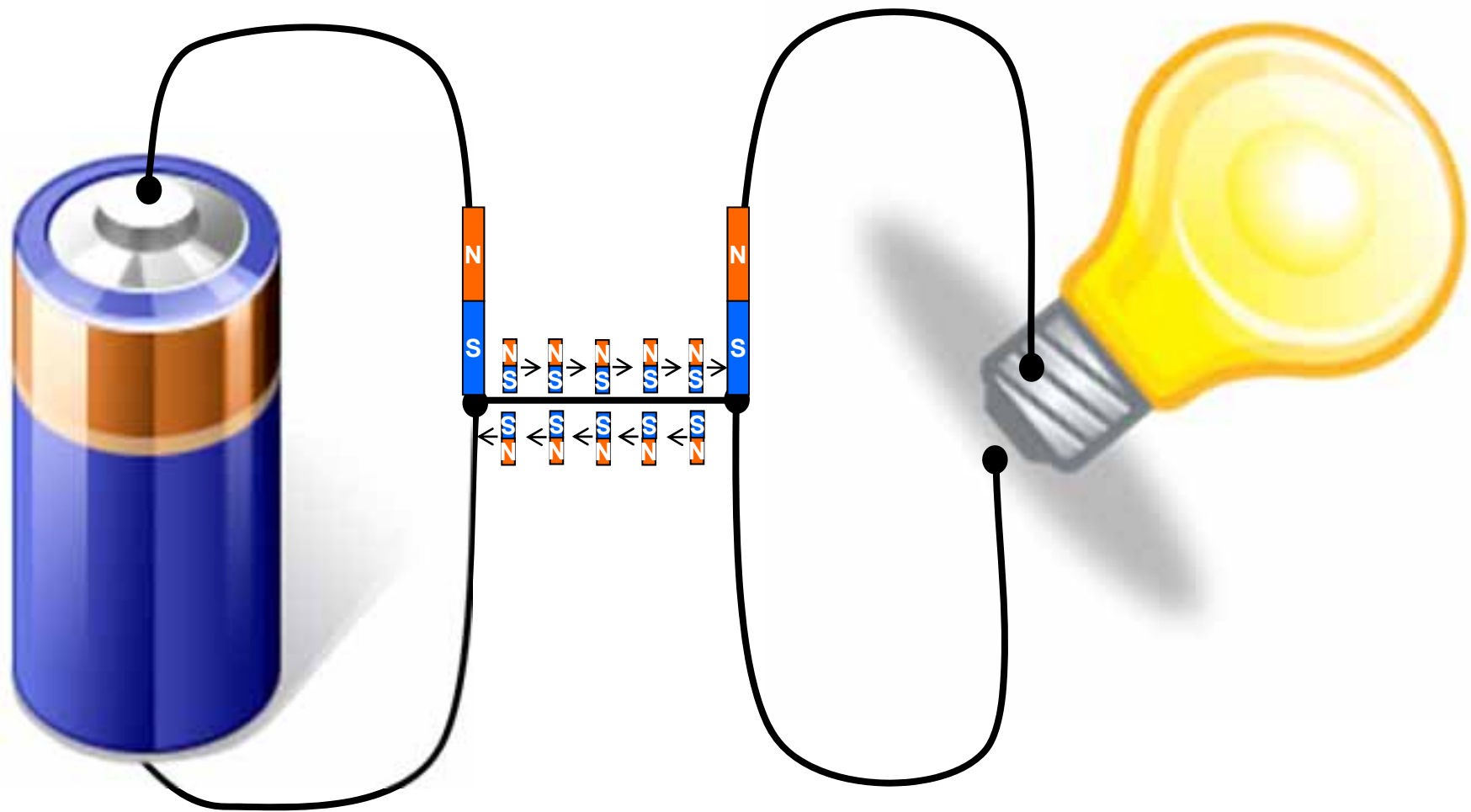
自由電子とスピン流 (スピン拡散長)



非局所伝導



非局所伝導



3. グリーンITの必要性

急増する IT 機器のエネルギー消費

The New York Times

Business Day Technology

Google Details, and Defends, Its Use of Electricity



A Google data center in Hamina, Finland, is housed in a former paper mill.

By JAMES GLANZ

Published: September 8, 2011

[Google](#) disclosed Thursday that it continuously uses enough electricity to power 200,000 homes, but it says that in doing so, it also makes the planet greener.

RECOMMEND

TWITTER

LINKEDIN

Every time a person runs a Google search, watches a YouTube video or sends a message through Gmail, the company's data centers full of computers use electricity. Those data centers around the world continuously draw almost 260 million watts — about a quarter of the output of a nuclear power plant.

Up to now, the company has kept statistics about its energy use secret. Industry analysts speculate it was because the information was embarrassing and would also give competitors a clue to how Google runs its operations.

While the electricity figures may seem large, the company asserts that the world is a greener place because people use less energy as a result of the billions of operations carried out in Google data centers. Google says people should consider things like the amount of gasoline saved when someone conducts a Google search rather than, say, drives to the library. "They look big in the small context," Urs Hoelzle, Google's senior vice president for technical infrastructure, said in an interview.

Google says that people conduct over a billion searches a day and numerous other downloads and queries. But when it calculates that average energy consumption on the level of a typical user the amount is small, about 180 watt-hours a month, or the equivalent of running a 60-watt light bulb for three hours. The overall electricity figure includes all

COMMENTS

SIGN IN TO E-MAIL

PRINT

REPRINTS

SHARE

From
ALEXANDER PAYNE
Director of
SIDEWAY



Enlarge This Image

Google

Google says the cooling system at its Hamina, Finland, site uses seawater and is energy efficient.



Paul Sakuma/Associated Press

Urs Hoelzle, a Google senior vice president, said context mattered in energy statistics.

ハードディスク（HDD）は膨大なエネルギーを消費している

パソコンの消費電力の約10%は HDD

データセンターは、全米の総電力の約2% を消費



データセンターは、
HDDの巨大な集合体

ストレージの消費電力を削減するには？

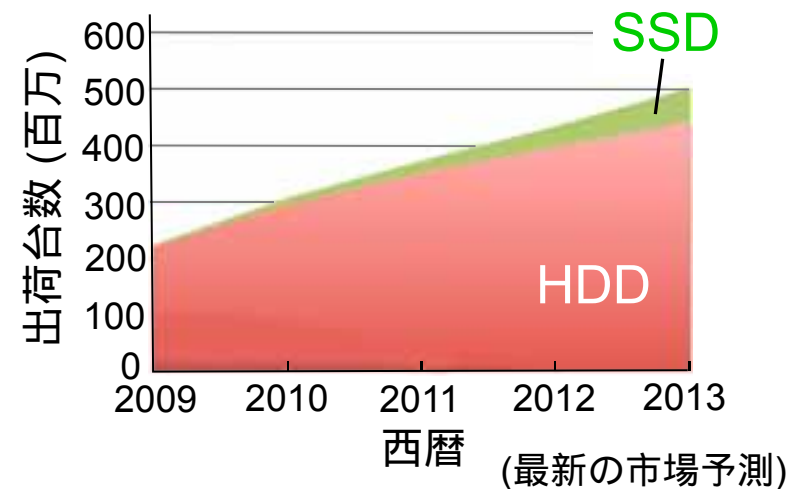
(1) HDD を 固体ストレージ（SSD）で置き換える

しかし、SSDはビット単価が高いことが難点。
今後も当面は HDDがストレージの主流。

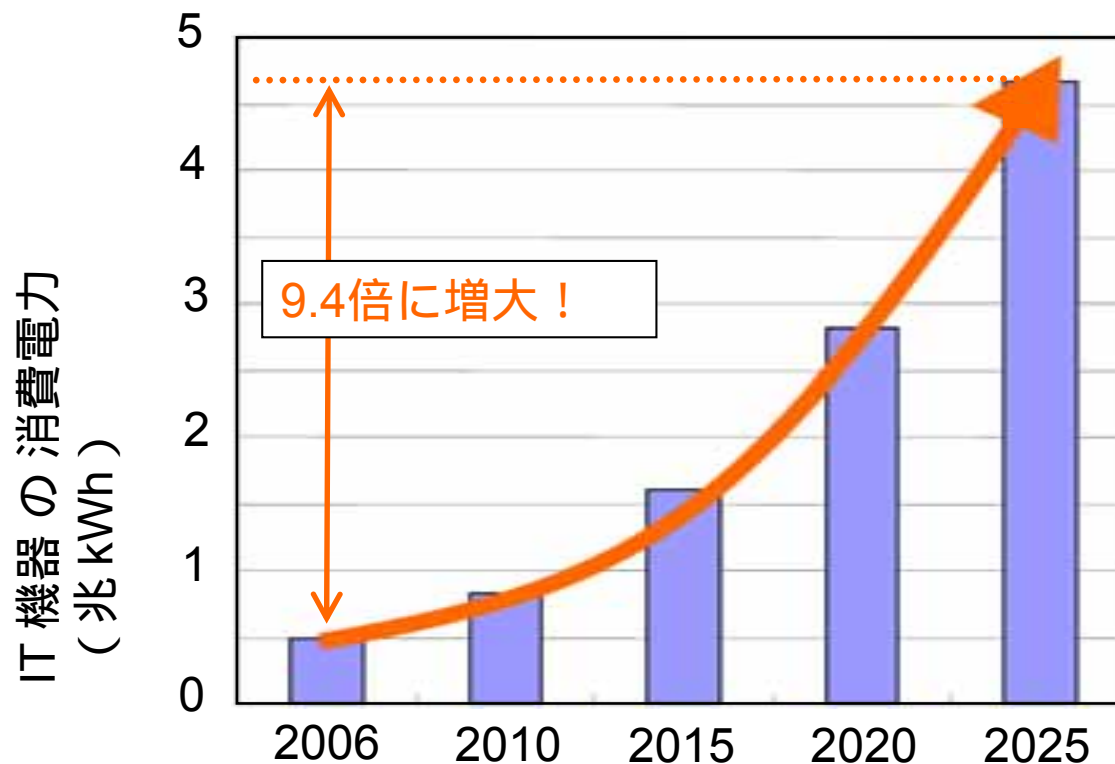
(2) 3.5インチHDD を 2.5インチHDDで置き換える

2.5インチHDDの消費電力は、3.5インチHDDに比べて僅か **5分の1**

2.5インチHDDを主流デバイスにするには、HDDの **高記録密度化**が不可欠



急増する IT 機器のエネルギー消費



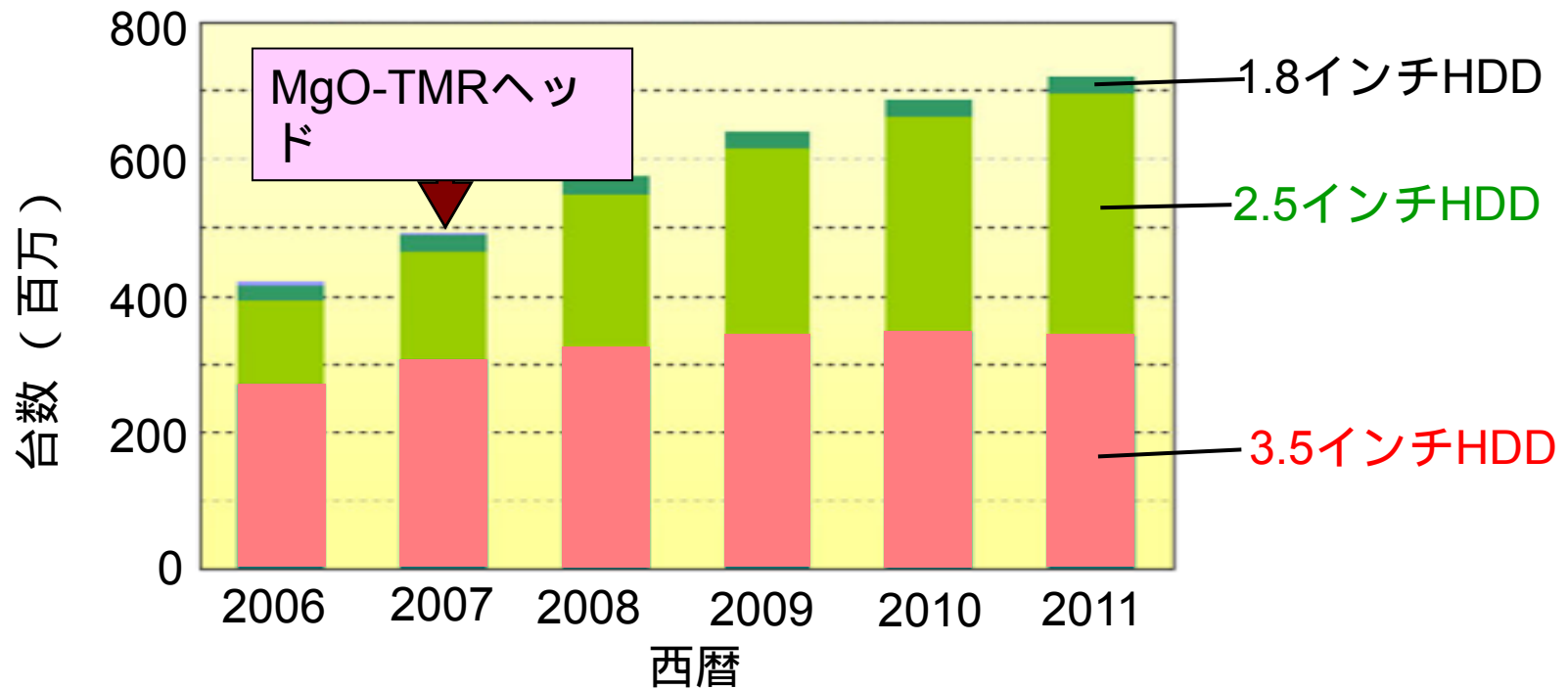
(経産省2008)

世界のIT機器の総消費電力は、2025年には 4.6兆kWh に達すると予想される。これは、**全世界の電力消費量の15%** (地球上の総エネルギー消費の**6%**) に相当する。

IT機器の低消費電力化 (グリーンIT) が極めて重要

産総研 湯浅新治博士作成

3.5インチHDD から 2.5インチHDD への転換が進行中



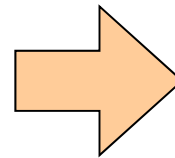
MgO-TMRヘッドと垂直磁気記録のお陰でHDDが高記録密度化した結果、**2.5インチHDD**で大半の用途をカバーできるようになった

➡ ストレージ・デバイスの消費電力を **5分の1** に削減できる

4. 高速不揮発性メモリと グリーンIT

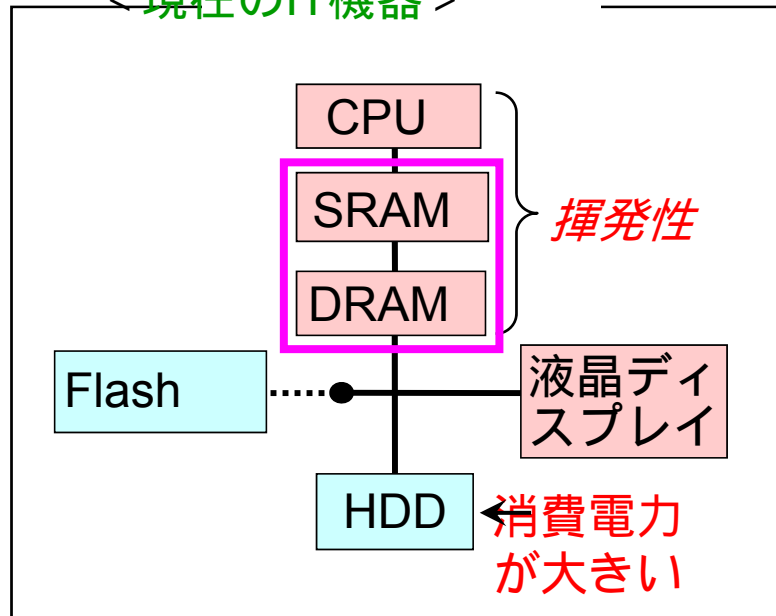
揮発性から不揮発性へのパラダイム・シフト

現在のエレクトロニクスは
“**揮発性**”



不揮発エレクトロニクス

<現在のIT機器>



<将来実現すべきIT機器>

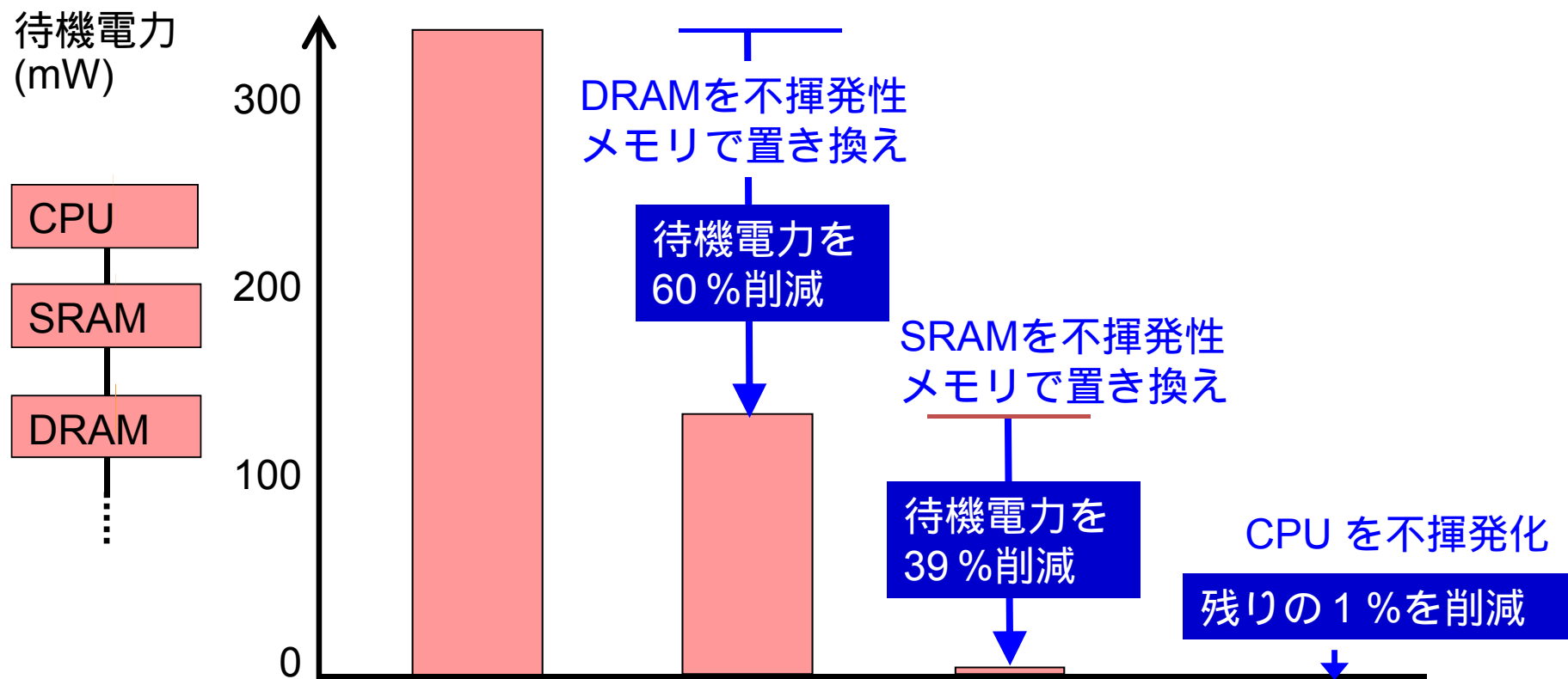
<問題点>

コンピュータなどのIT機器は、
入力待ち（**待機時間**）が非常に長い。
（例）ワープロや表計算では**99%**が待機時間
しかし、IT機器が**揮発性**であるため、仕事を
していない待機中でも電源を切れない。



コンピュータの待機電力の内訳

(モバイル・パソコン & パワー・ゲーティングCPUの場合)



DRAM や SRAM を不揮発性メモリで置換えるには、

大容量、高速動作、高い信頼性（書換え回数 無制限）
を兼ね備えた **不揮発性メモリ** が不可欠

5. 磁石は流れる

—スピン流磁化反転—

磁化(反転)の方法

古代

磁石は天然の鉱物
(賢者の石)

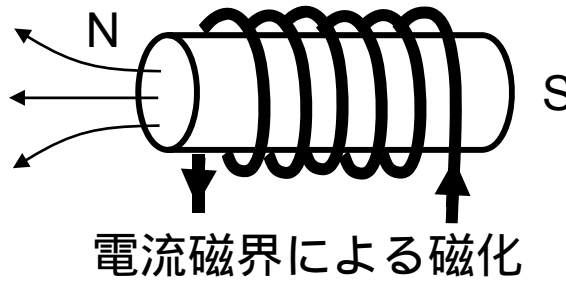


Magnesiaのポスターを指差す
P. Grünberg博士

近代

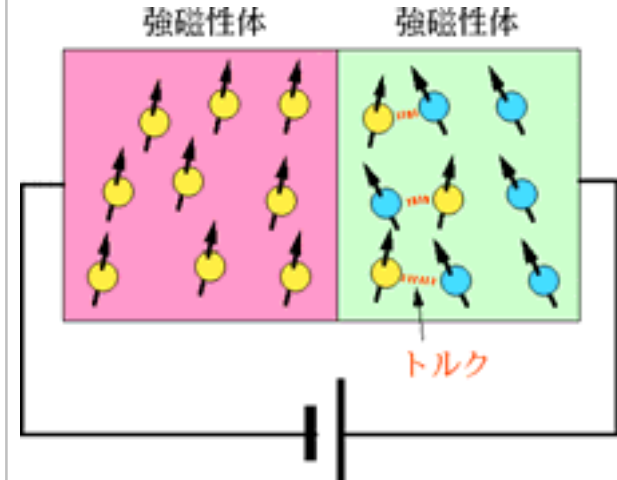


1819 H. C. Ørsted

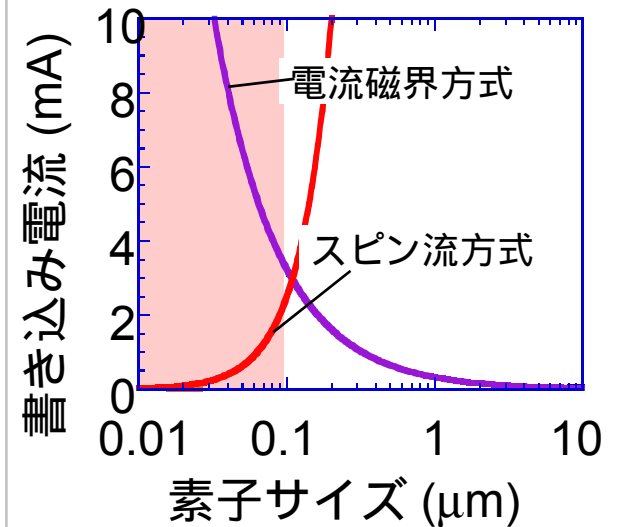


電流磁界による磁化

21世紀



スピン流による磁化反転



スピン流磁化反転の例

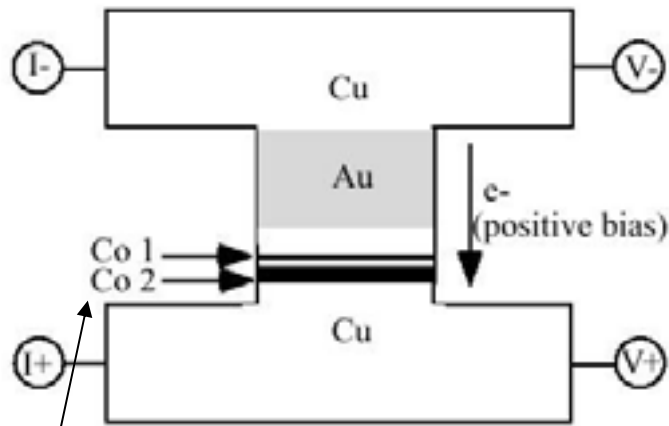
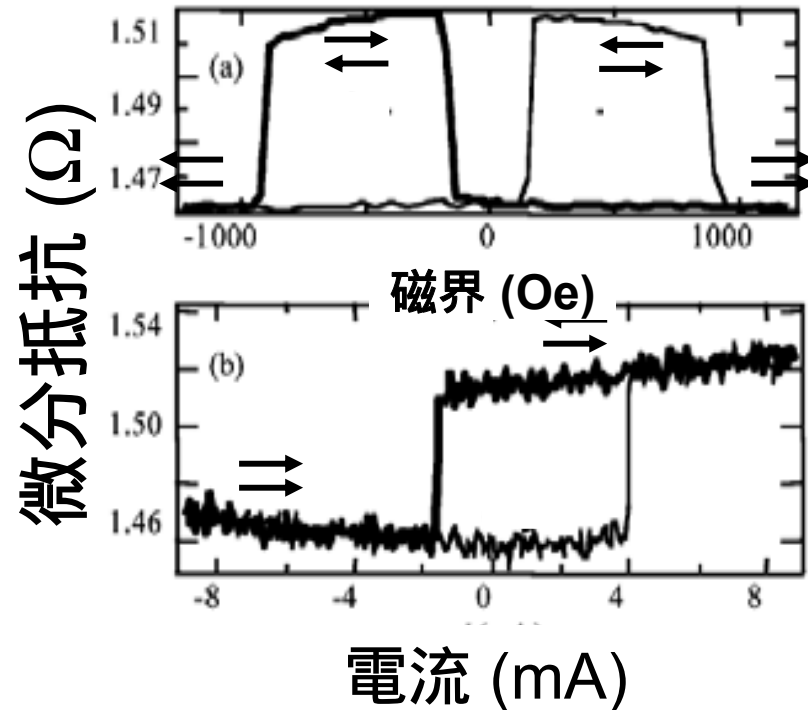


FIG. 1. Schematic of pillar device with Co (dark) layers separated by a 60 Å Cu (light) layer. At positive bias, electrons flow from the thin (1) to the thick (2) Co layer.

素子断面 $60 \times 180 \text{ nm}^2$

巨大磁気抵抗効果を示す磁性多層膜を
ナノピラーに加工

Albert et al.,
PhysRevLett.89(2002)226802

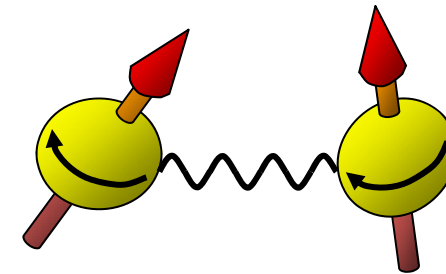
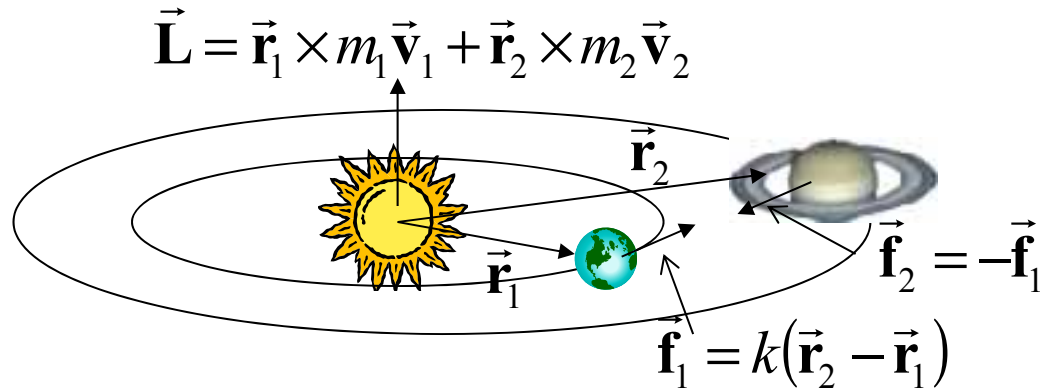


臨界電流 = $4 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$

1mm² の電線に,
400,000 A !!



全角運動量の保存

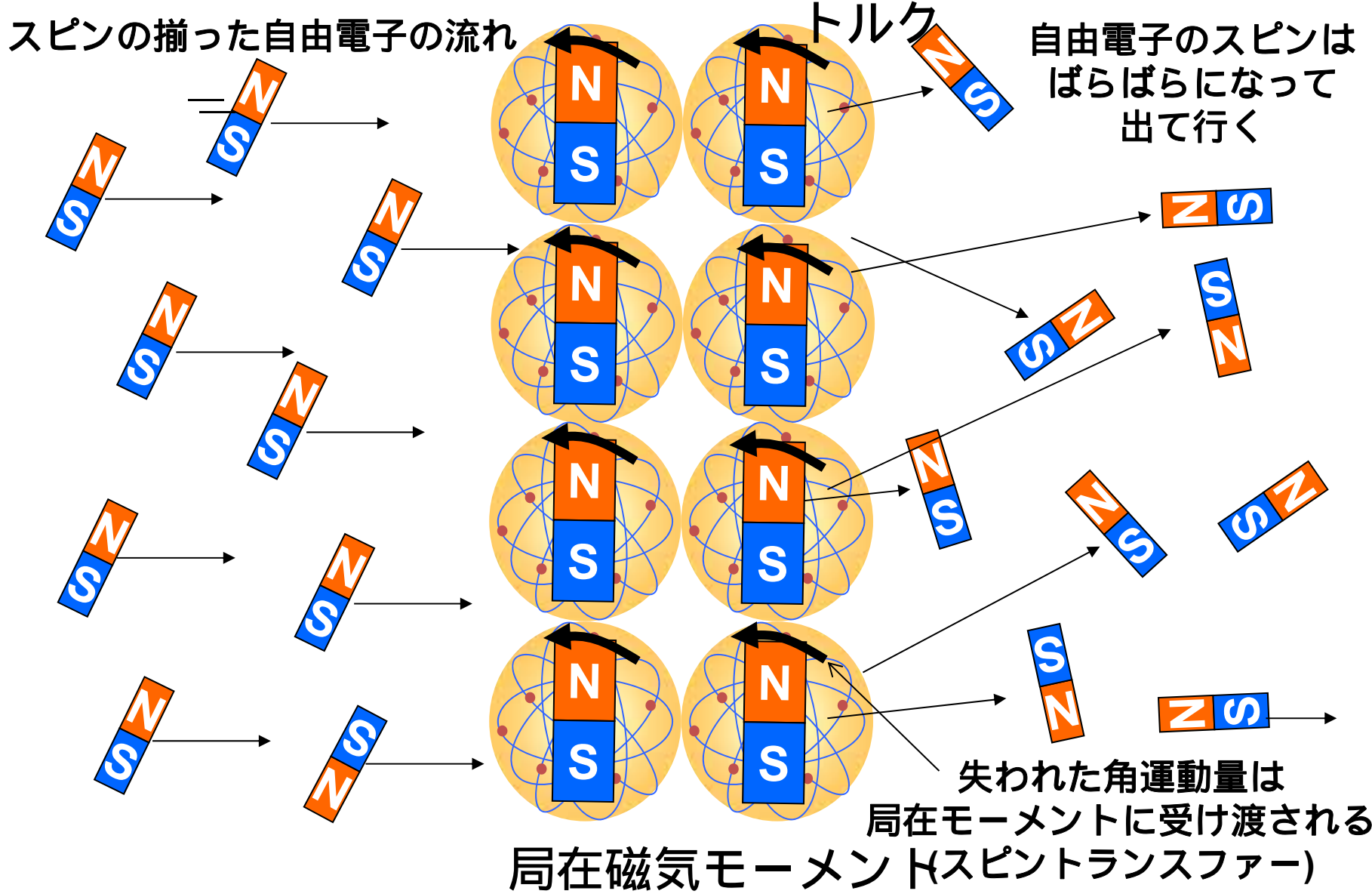


$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{r}_1 \times k(\vec{r}_2 - \vec{r}_1) + \vec{r}_2 \times k(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) = 0$$

地球と土星の間に引力が働くと、それぞれの角運動量は変化するが全角運動量は保存する。
従って、地球と土星の間で角運動量のトランスファーがおこる。

電子スピンでも相互作用が働くとそれぞれの角運動量は変化するが全角運動量は保存する。
この場合も、二つのスピン間で角運動量のトランスファーが生じる。

伝導する自由電子から局在する
磁気モーメントへのスピン角運動量のトランスファー



Molecular Beam Epitaxy chamber

Sample introduction Chamber Titanium getter pump
 Sample manipulator Ion Pump

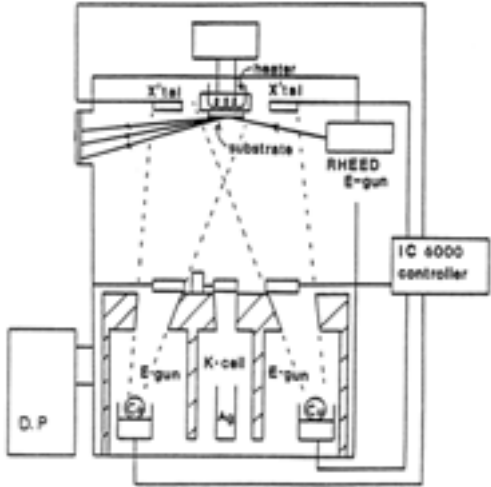
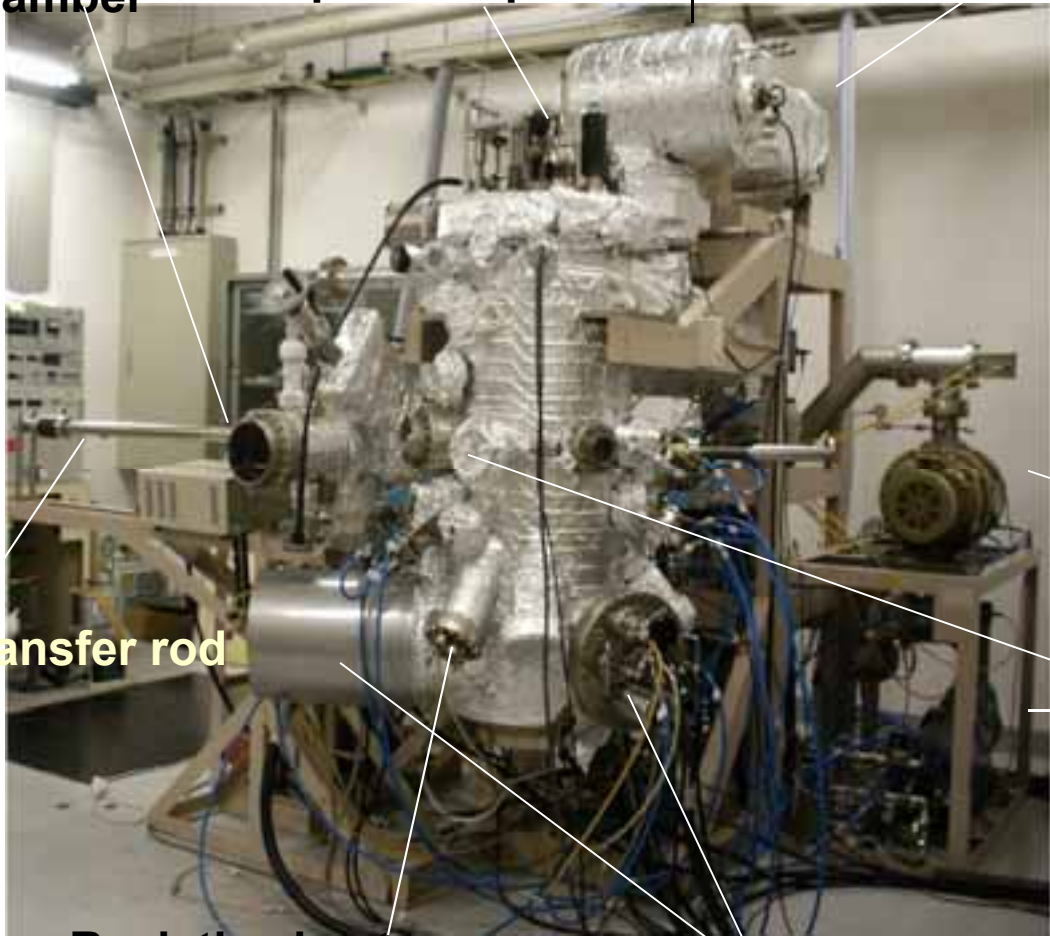
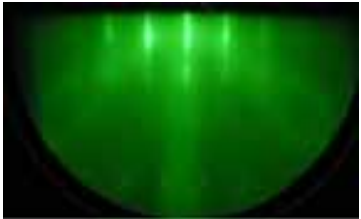


図 3.1 超高真空蒸着装置の概略図

Mechanical booster pump

Oil rotary pump

RHEED SCREEN

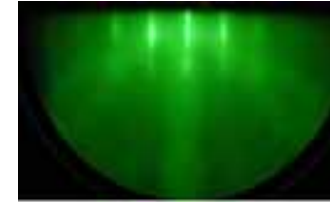


Sample transfer rod

Resistive heater evaporator (K-cell)

Electron-beam evaporator

RHEED強度振動



高速電子線回折

RHEED (Reflective High Energy Electron Diffraction)

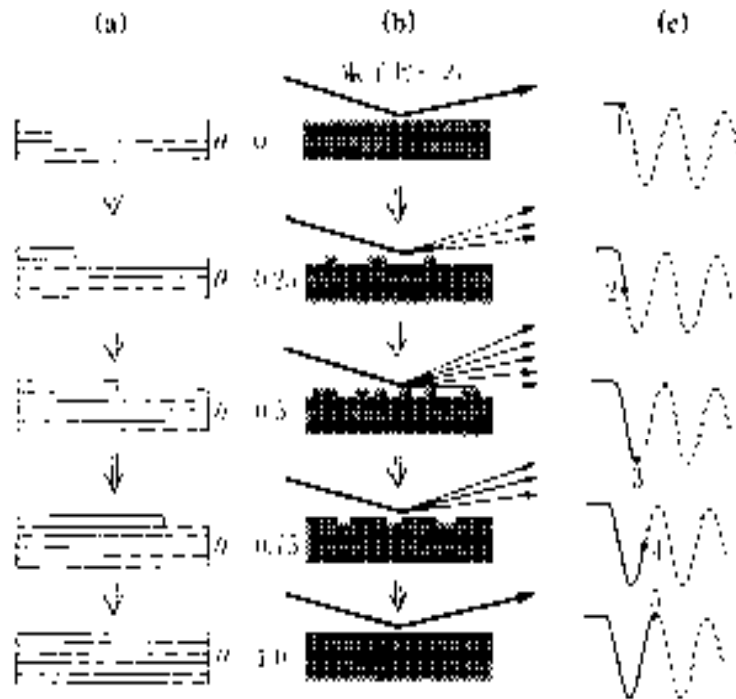


図5 スピンドル成長膜の構造と、RHEED強度振動の関係
 (a) 完全な層状成長 (h : 最表面原子層の占有数)
 (b) 通常のスピンドル成長における表面構造
 (c) (b) に対しての RHEED 信号強度

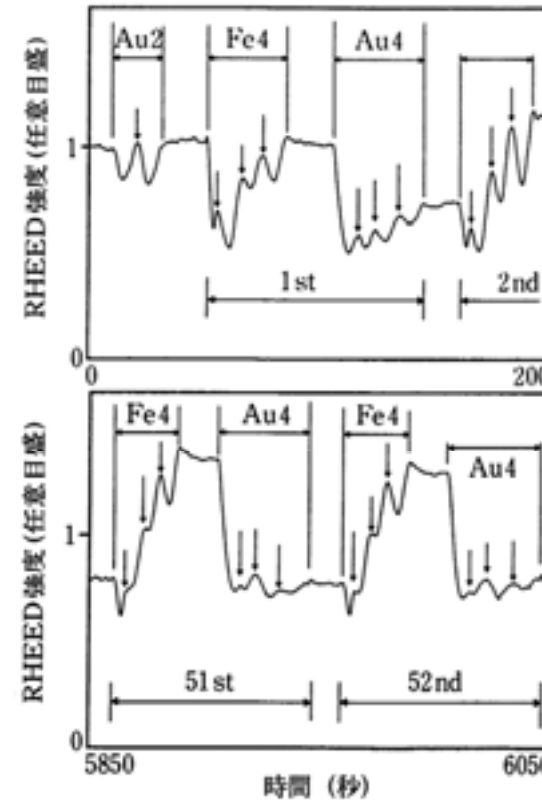
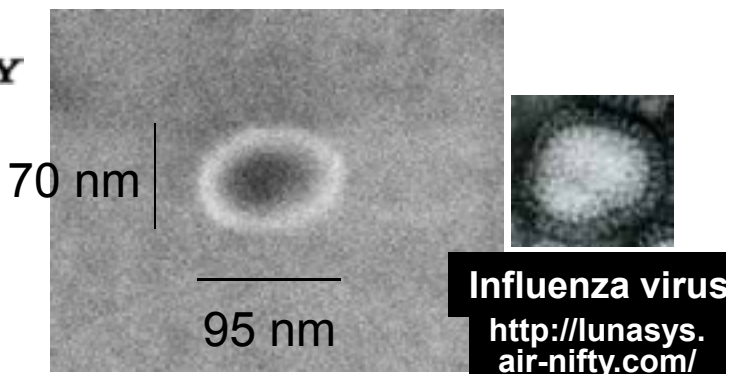


図6 Fe/Au 人工格子作製中の RHEED 強度の振動 (52 回膜作製を繰り返した後も原子層ごとの強度振動が観測されている)¹⁹⁾

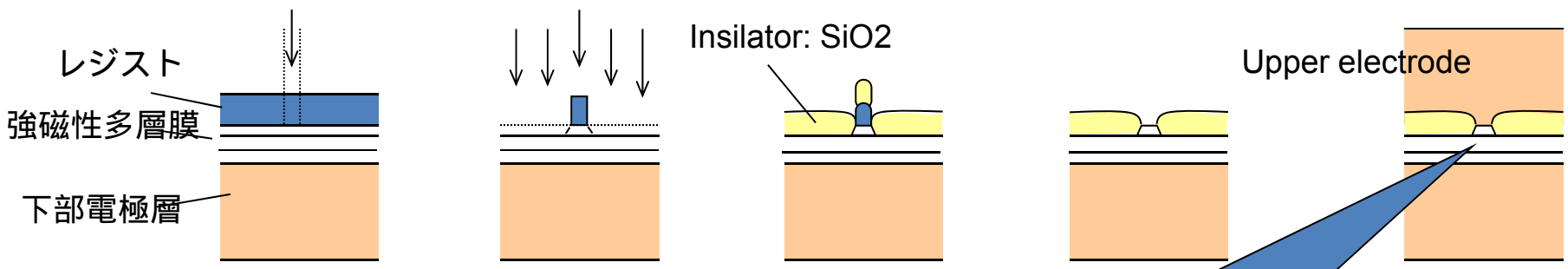
電子線描画による 強磁性多層膜ナノピラーの作製例

SONY



電子線描画後のレジストマスクの走査型電子顕微鏡像

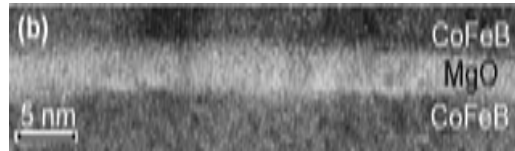
- (1)
電子線描画
- (2)
イオンミリング
- (3)
層間絶縁層形成
- (4)
リフトオフ
- (5)
上部電極形成



原子層制御された
強磁性多層膜



スピンド流素子の作製工程 (産総研つくば・キャノンアネルバ)

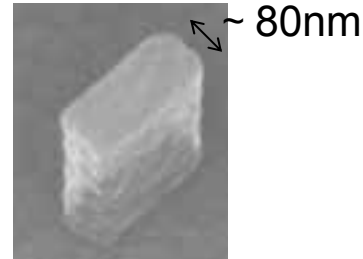


トンネル磁気抵抗膜の断面透過電子顕微鏡像

トンネル磁気抵抗膜の成長

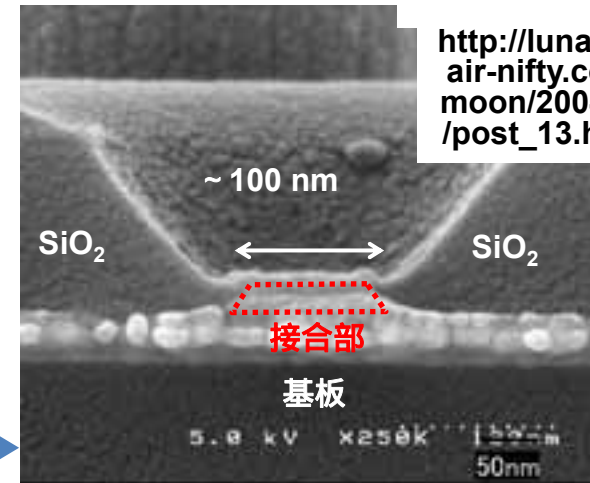
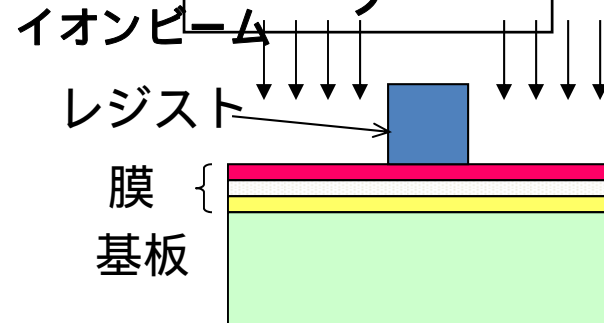


Canon ANELVA C-7100
スパッタ製膜装置



レジストの電子顕微鏡像

微細加工
電子線描画
イオンミリング

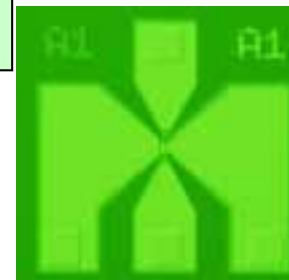


http://lunasys.air-nifty.com/moon/2004/01/post_13.html

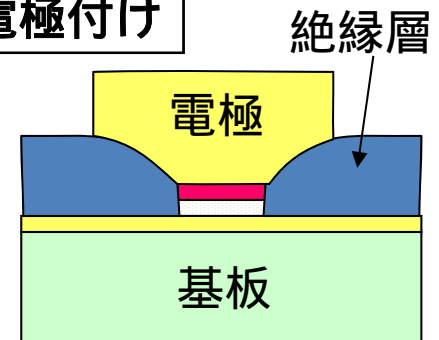
絶縁層形成後の素子断面の電子顕微鏡像

絶縁層形成

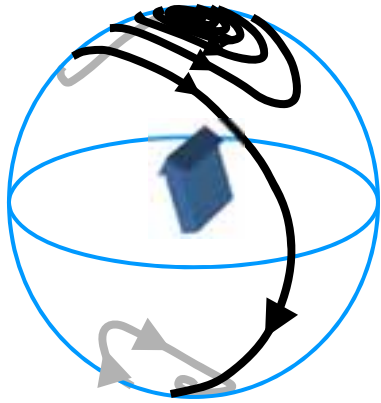
電極付け



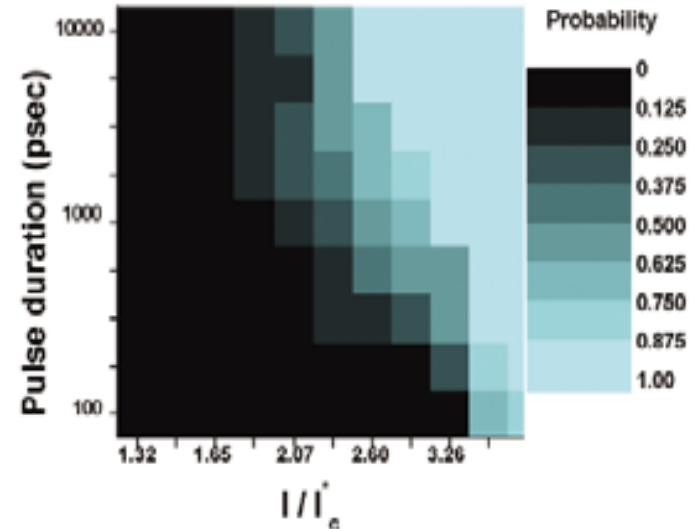
電極の微鏡像



超高速スピン注入磁化反転の実現と新しい機能



歳差運動の増幅と
磁化の反転



阪大グループ・産総研チームの成果

トンネル素子の量子サイズ効果(産総研)

巨大トンネル磁気抵抗効果の実現(産総研)

室温高速(200psec)スピン注入磁化反転

(産総研、ソニー、パリ南大)

スピントルクダイオード効果(産総研)

負性微分抵抗と増幅作用(産総研)

高出力高周波発振

スピントルクの解明

室温固体素子における電圧磁化制御

電流磁場型スピントランジスタ

電圧高速双方向磁化反転

電圧磁気共鳴

S. Yuasa, Y. S. et al, Science 2002.

S. Yuasa, Y. S., et al., Nature Mat. 2004.

A. Tulapurkar, Y. S., et al. Appl. Phys. Lett., 2005.

A. Tulapurkar, Y. S. et al., Nature 2005.

A. Deac, Y. S. et al., Nature Materials 2008

H. Kubota, Y. S. et al, Nature Physics 2008

T. Maruyama, Y. S., et al., Nature Nanotech 2009

K. Konishi, Y. S., et al, APEX 2010

Y. Shiota, Y. S., et al., Nature Mat. 2012

T. Nozaki, Y. S., et al., Nature Phys. 2012

東芝がGビット級のスピントランジスタ型MRAMの基盤技術を確立、書き込み電流の低減とMR比の向上を両立

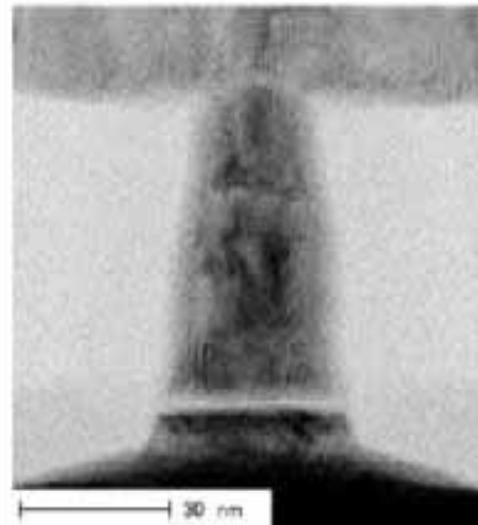
2011/07/04 21:00

大下 淳一＝日経エレクトロニクス



東芝は、Gビット級のスピントランジスタ型MRAM (STT-MRAM: spin torque transfer MRAM) を実現するための基盤技術となる、垂直磁化方式の特性の優れたMTJ (磁性トンネル接合) 素子を開発した。データ書き込み電力を決める書き換え電流密度を従来比1/6の $5 \times 10^5 \text{ Acm}^{-2}$ に低減したことに加えて、データ読み出し余裕度を決めるMR (磁気抵抗) 比を従来の15%から200%へ大幅に改善した。

東芝は「今回の成果をベースに、従来の要素技術開発から製品開発へ踏み出す」(同社 研究開発センター デバイスプロセス開発センター 技監の與田博明氏)としており、Gビット級のSTT-MRAMを今後3～4年以内に製品化したい考えだ。書き換えや読み出しの頻度が高いランダム・アクセス・デ



東芝が開発したMTJ素子の断面写真
[クリックすると拡大した画像が開きます]



富田博之君 (博士前期課程3年) が、IEEE EDS Kansai Chapter MSFK Award (Student Award) を受賞

今回の成果の一部は、2010年度末にプロジェクトが終了したNEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構) の委託事業「スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト」において、東芝が、産業技術総合研究所、東北大学、大阪大学、電気通信大学との共同研究を通じて開発したものだ。

日経テックオン

<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20110630/193009/>

6. 電圧による磁化の制御 スピントロニクス版のCMOS版?

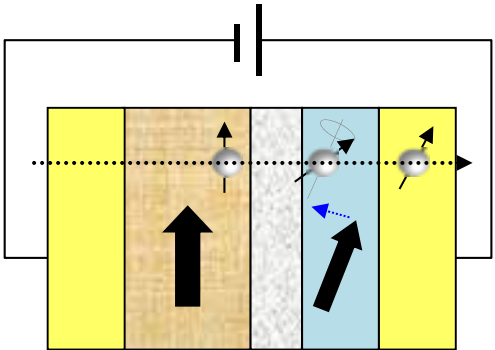
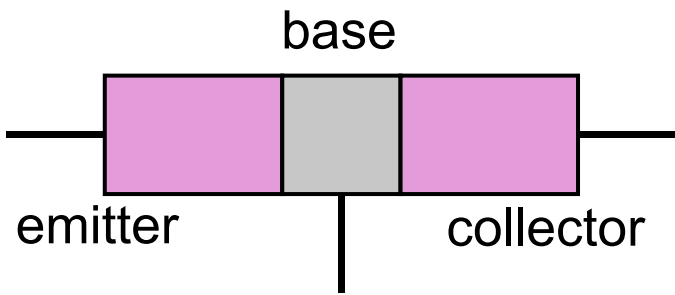

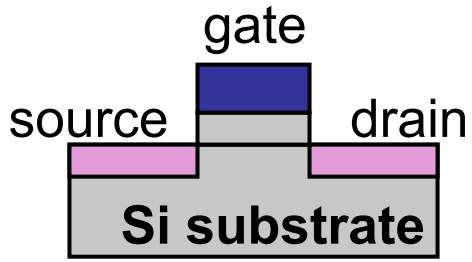
Introduction

In the practical applications, it is important to operate the devices with **low power consumption**.

Current-base



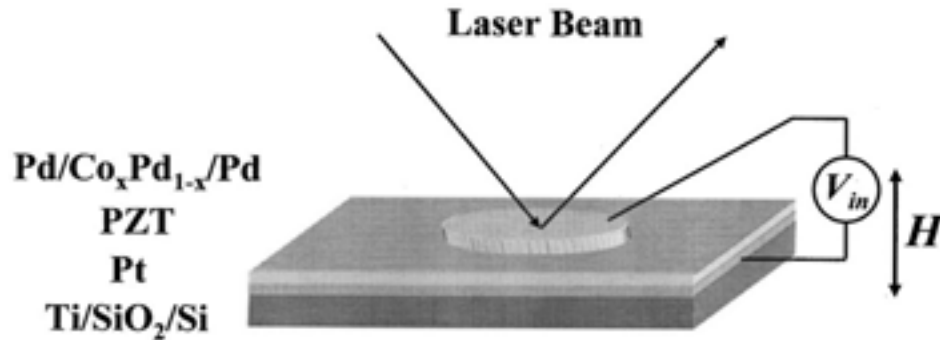
Electric field-base

<u>Spintronic devices</u>	<u>Semiconductor devices</u>
 <p>Spin-Transfer Torque</p>	 <p>Bipolar Transistor</p>
	 <p>Field-Effect Transistor</p>

Several approaches 1

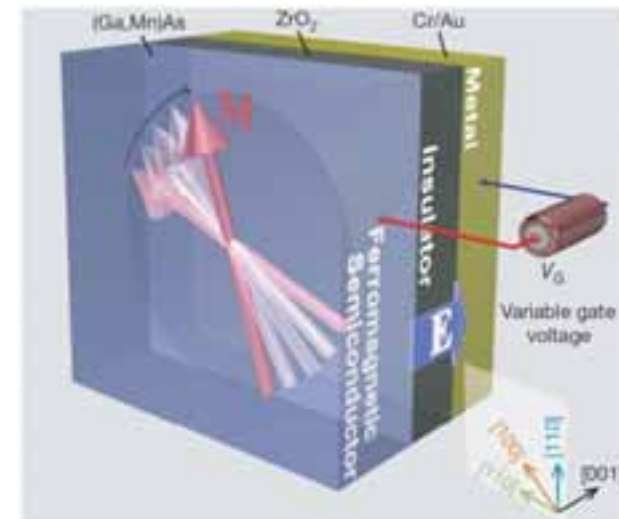
Hybrids with piezoelectric materials

J. -M. Lee *et al.* *APL* **82**, 2458 (2007)



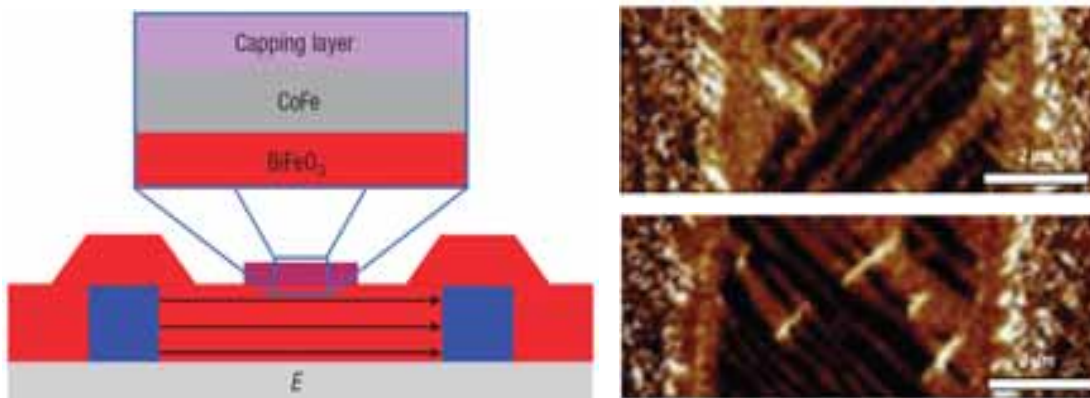
Ferromagnetic semiconductor

D. Chiba *et al.* *Nature* **455**, 515 (2009)



Magnetolectric Multiferroic materials

Y. -H. Chu *et al.* *Nature Mat.* **7**, 478 (2008)



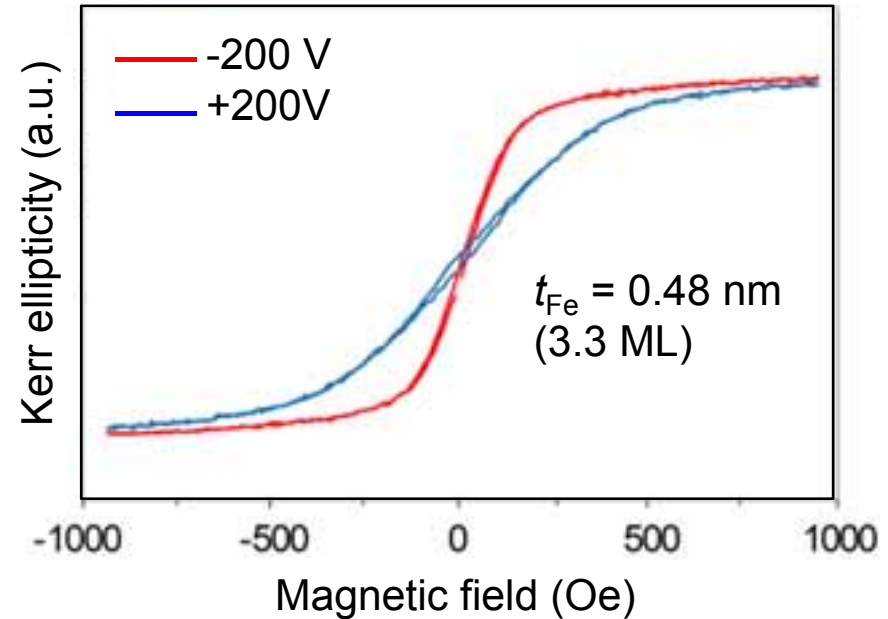
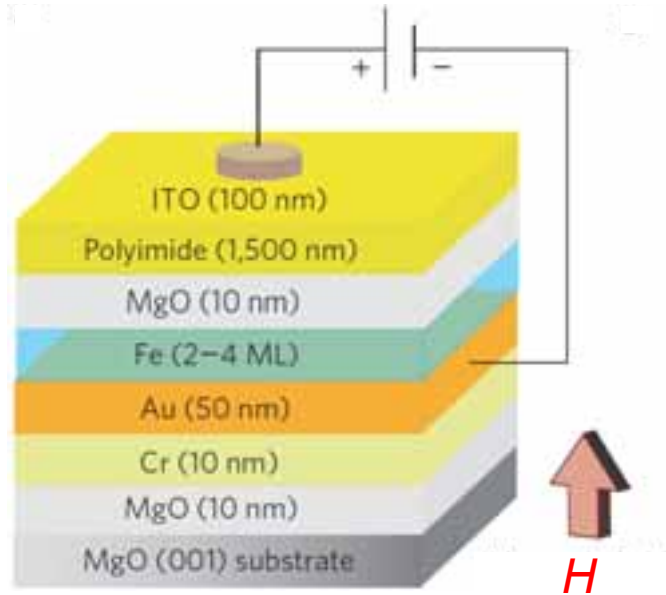
Problem for practical devices

- Mechanical distortion
- Low temperature
- Complicated material

Several approaches 2

Magnetic anisotropy change in ferromagnetic metal

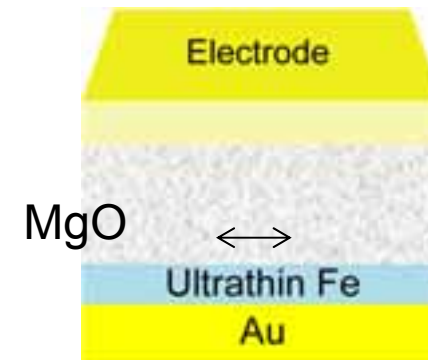
T. Maruyama, [Y. Shiota](#) et. al., *Nature Nanotech.* **4**, 158 (2009)



Electron filling of 3d orbitals at the surface of magnetic layer is changed by the voltage application.

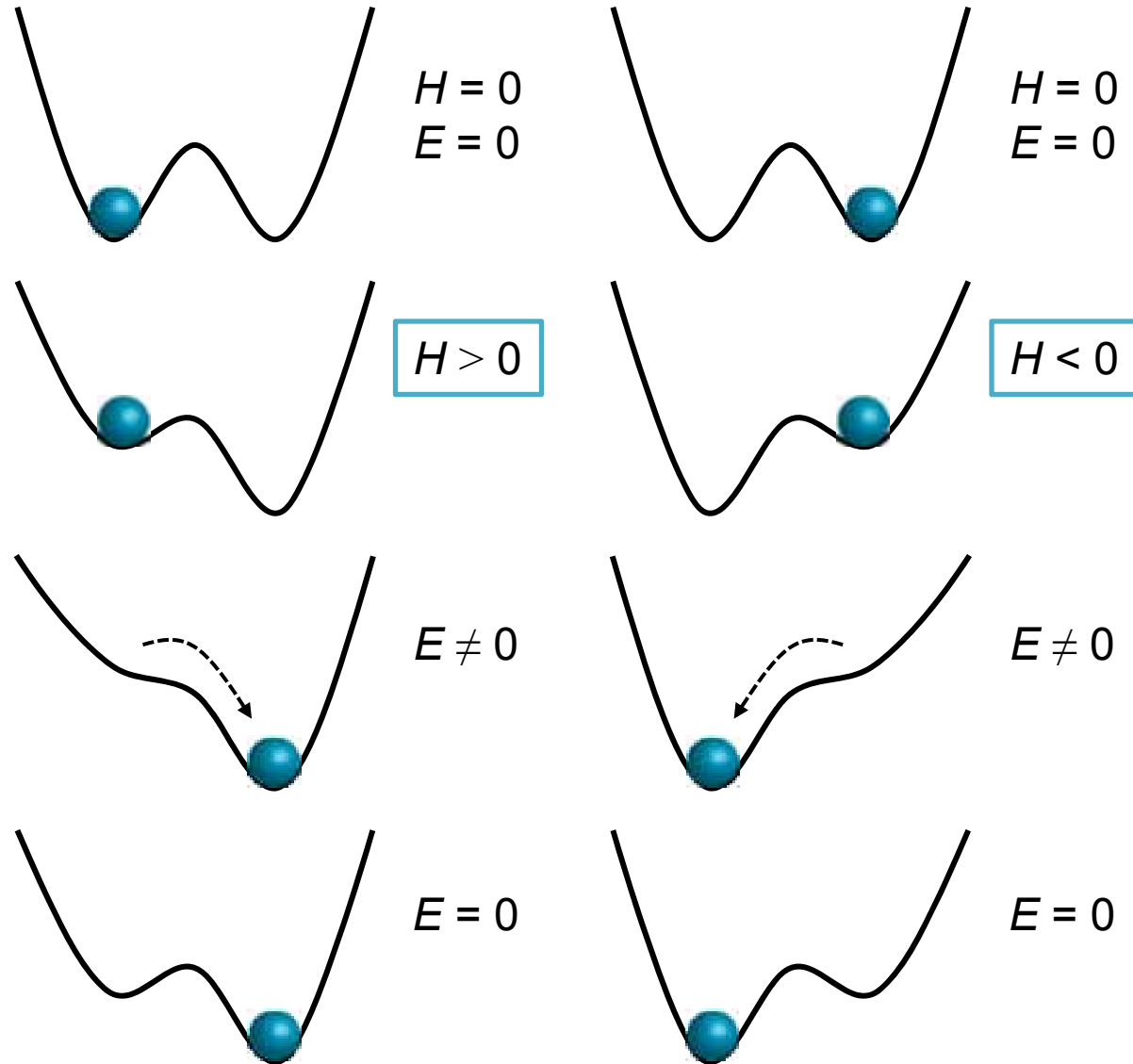


Magnetic anisotropy change



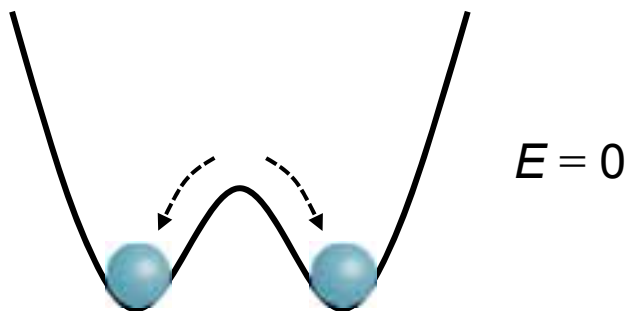
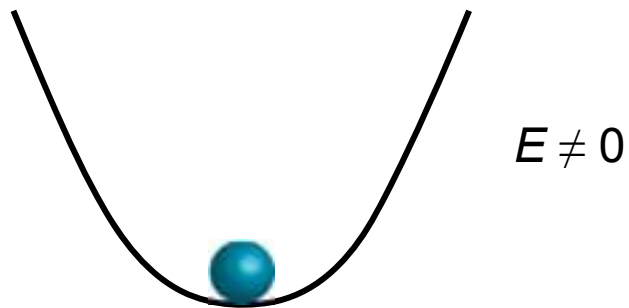
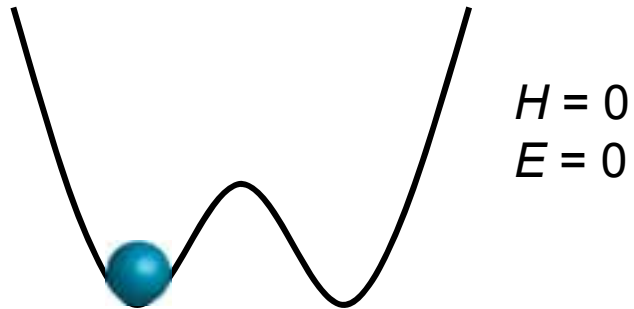
How can we switch the magnetization by electric field?

Field-assisted switching

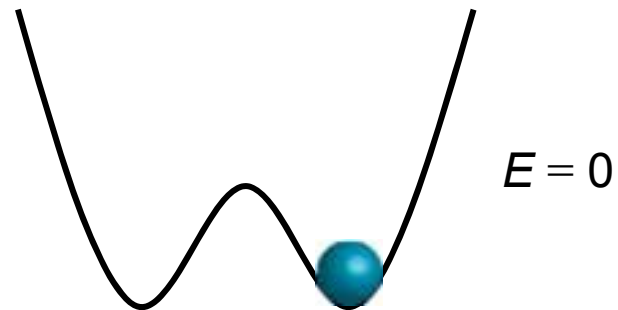
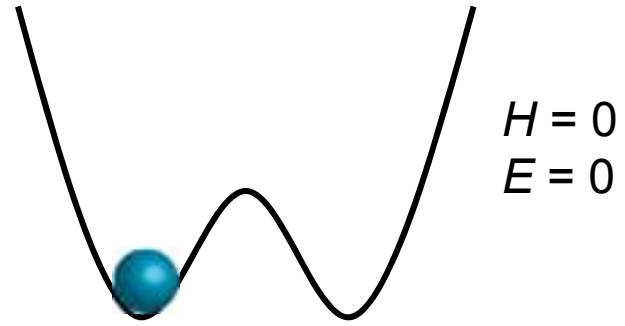


How can we switch the magnetization by electric field?

Quasi-static switching



Dynamic switching



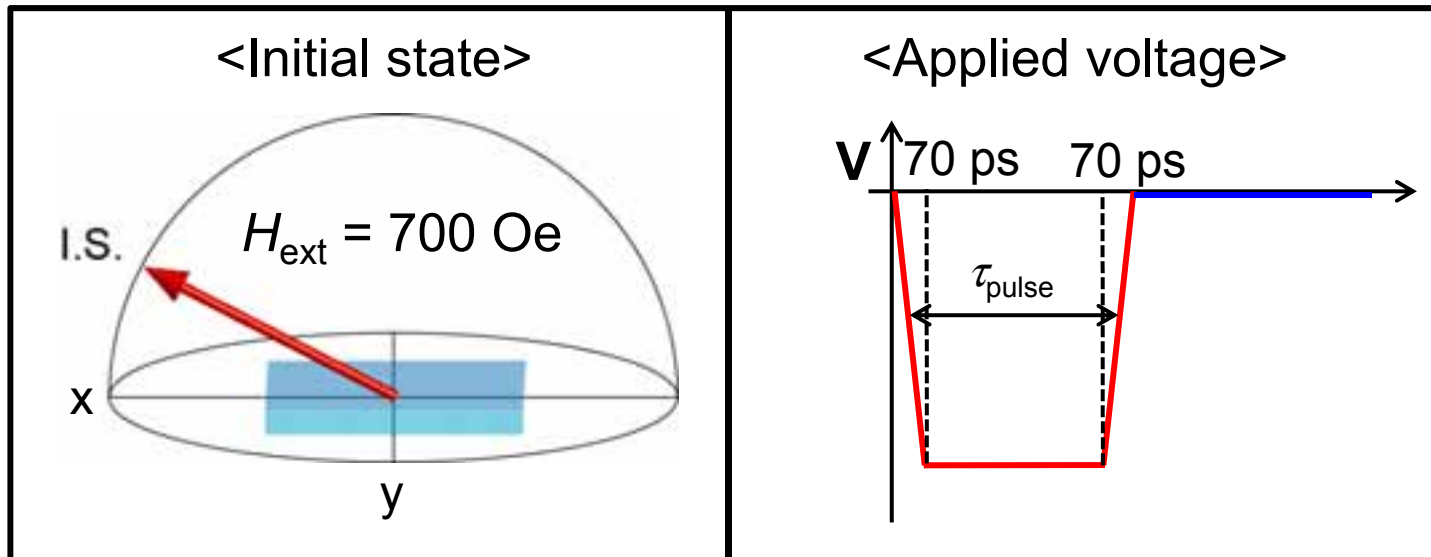
LLG equation

$$\frac{d\mathbf{m}}{dt} = \gamma \mathbf{m} \times \mathbf{H}_{eff}(V) - \alpha \mathbf{m} \times \frac{d\mathbf{m}}{dt} \quad (\mathbf{H}_{eff} = -\nabla E_{mag} + \mathbf{H}_{Thermal})$$

Magnetic energy : $E_{mag} = \frac{1}{2} (H_c y^2 + H_{s,perp}(V) z^2) - \mathbf{m} \cdot (\mathbf{H}_{ext} + \mathbf{H}_{dipole})$

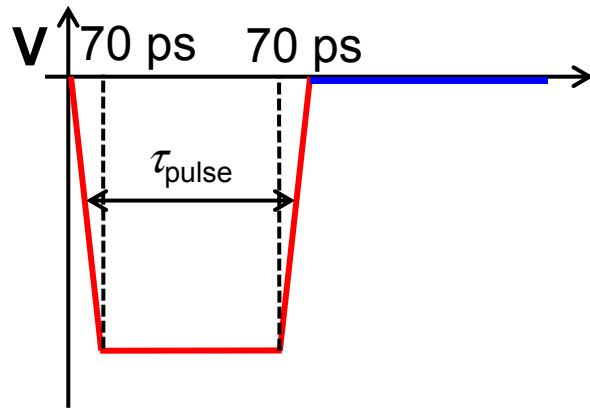
$$H_{s,perp}(0 \text{ V/nm}) = 1400 \text{ Oe}$$

$$H_{s,perp}(-1 \text{ V/nm}) = 600 \text{ Oe}$$

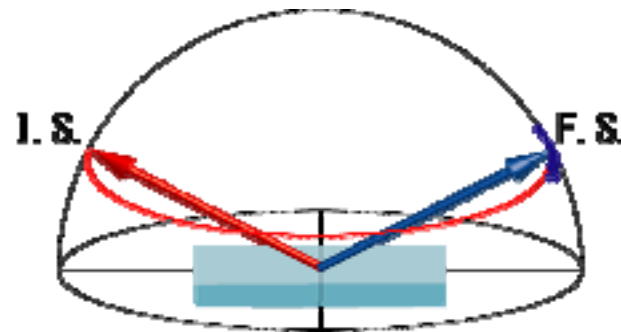


< Calculated trajectories >

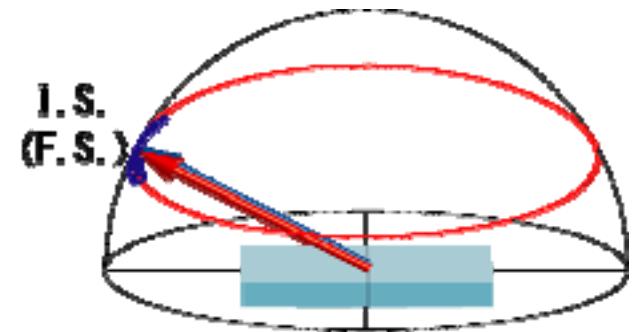
$$H_{\text{ext}} = 700 \text{ Oe}, T = 0 \text{ K}$$



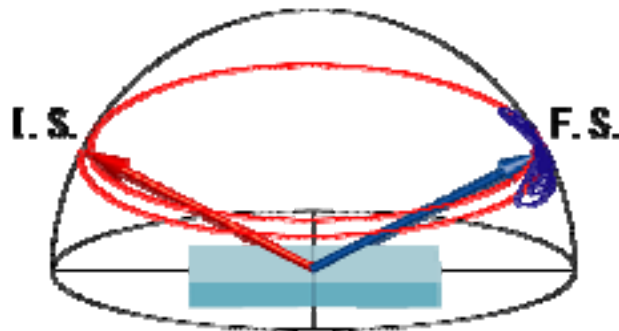
$$\tau_{\text{pulse}} = 0.4 \text{ ns}$$



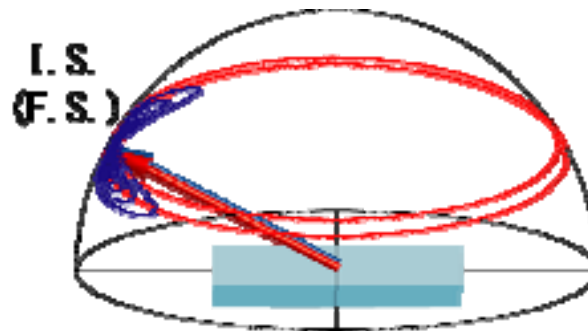
$$\tau_{\text{pulse}} = 0.8 \text{ ns}$$



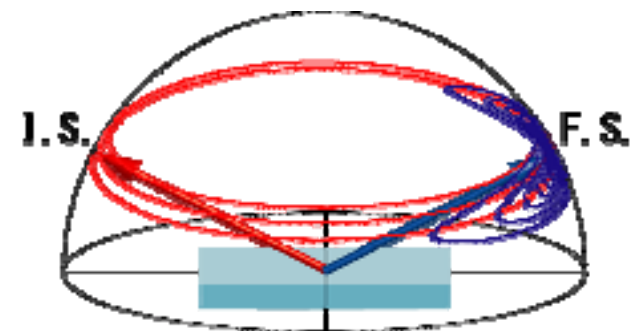
$$\tau_{\text{pulse}} = 1.3 \text{ ns}$$



$$\tau_{\text{pulse}} = 1.8 \text{ ns}$$



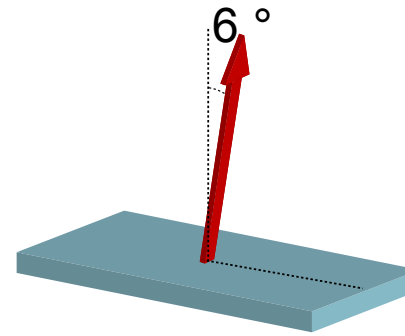
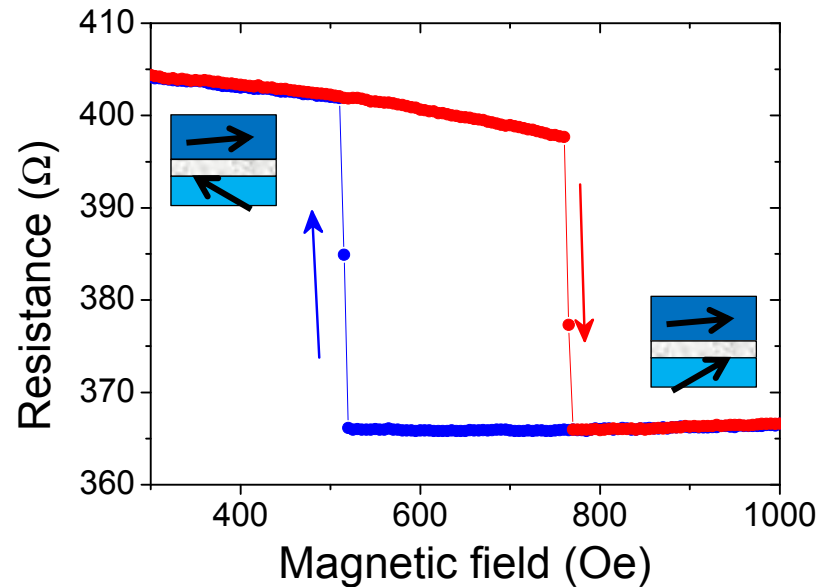
$$\tau_{\text{pulse}} = 2.3 \text{ ns}$$



Switching probabilities

- oscillate depending on τ_{pulse} .
- become smaller for longer τ_{pulse} .

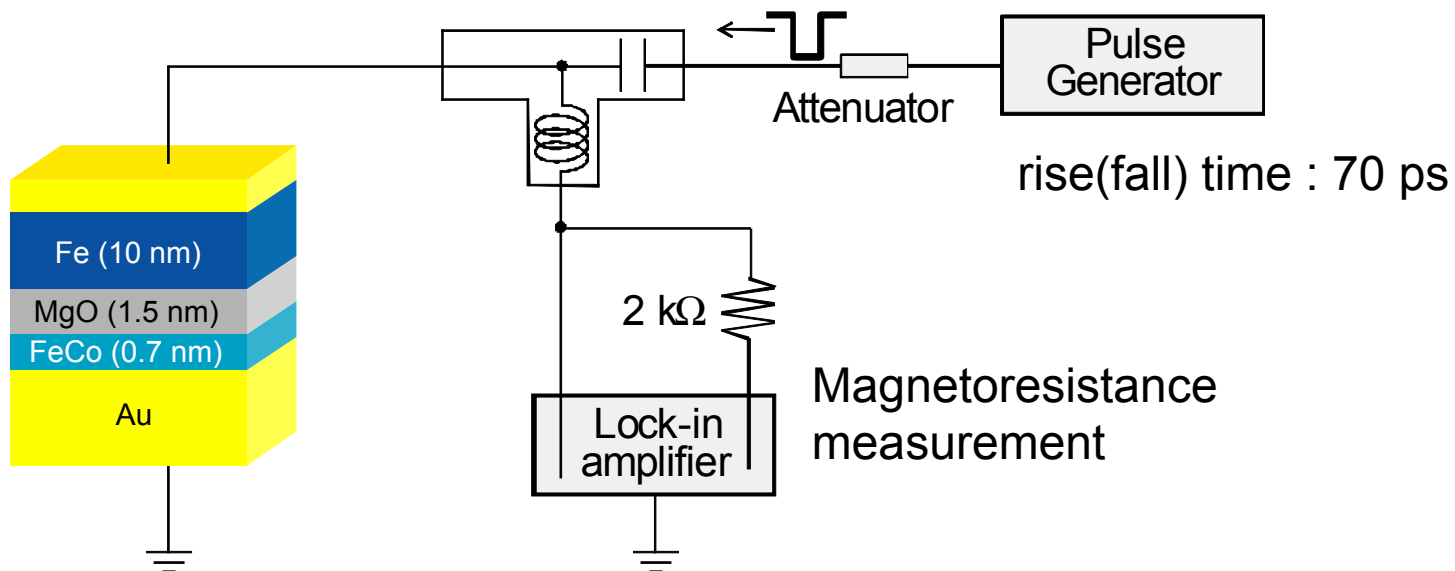
TMR curve under tilted (6°) magnetic field



By tilting the magnetic field,

- Cancel the dipole field
- Apply perpendicular magnetic field

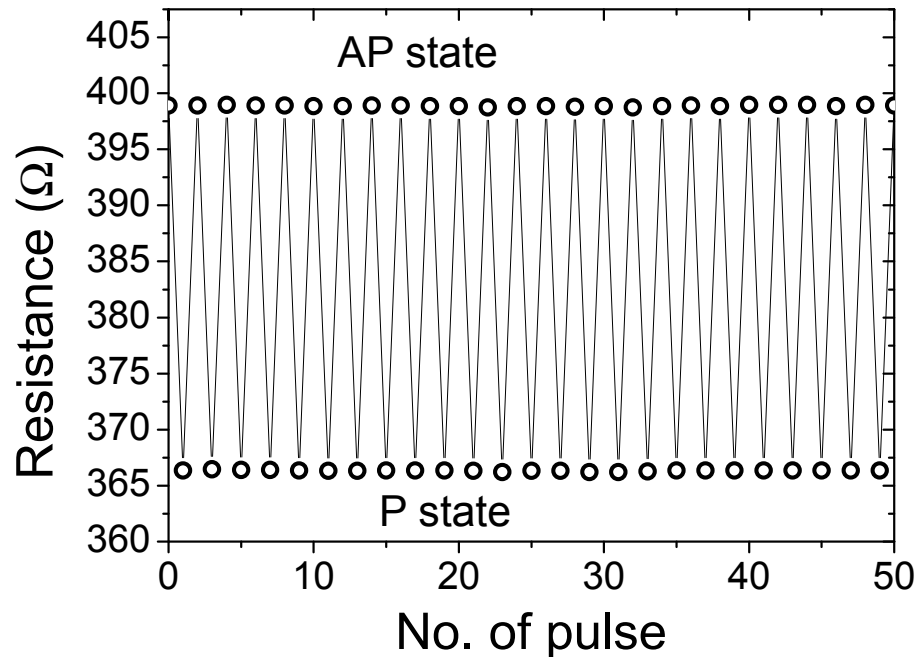
Experimental set-up



Results

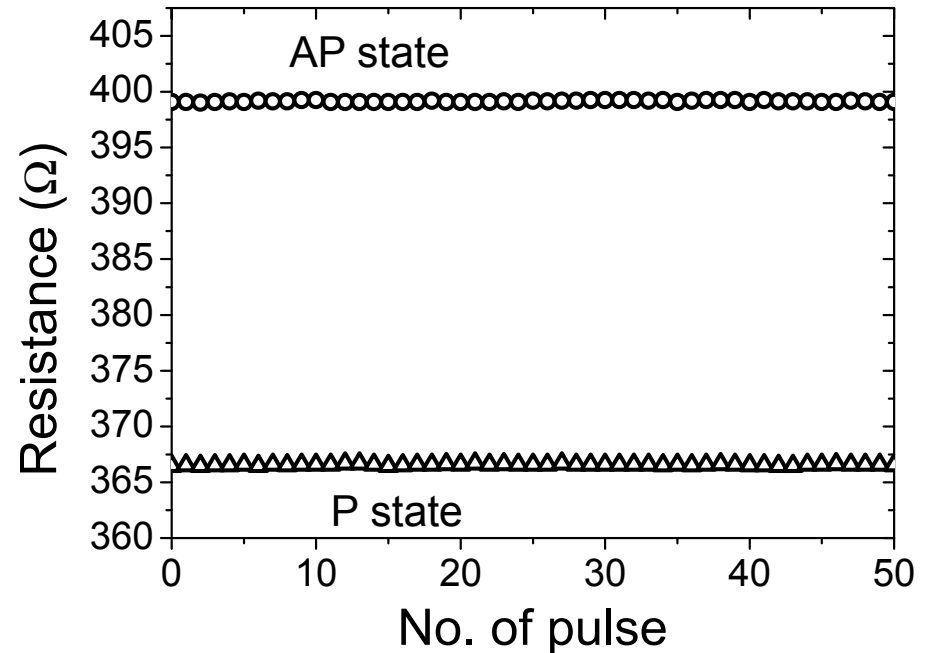
$$H_{\text{ext}} = 700 \text{ Oe}, \tau_{\text{pulse}} = 0.55 \text{ ns}$$

-1.0 V/nm



Toggle switching between P and AP magnetization state

+1.0 V/nm



No magnetization switching

Only **negative** pulse voltage excites the dynamic switching due to the induction of perpendicular magnetic anisotropy.

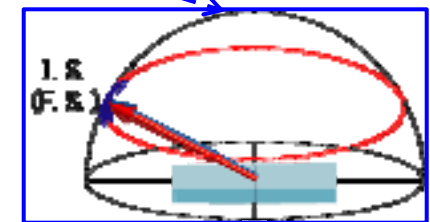
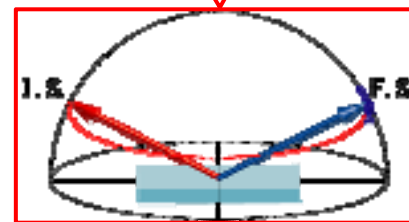
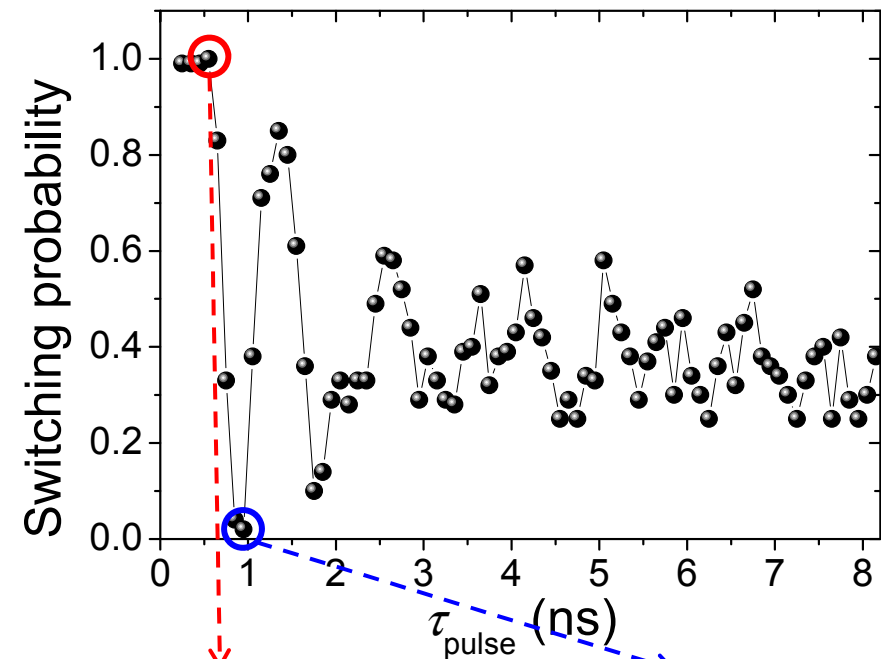
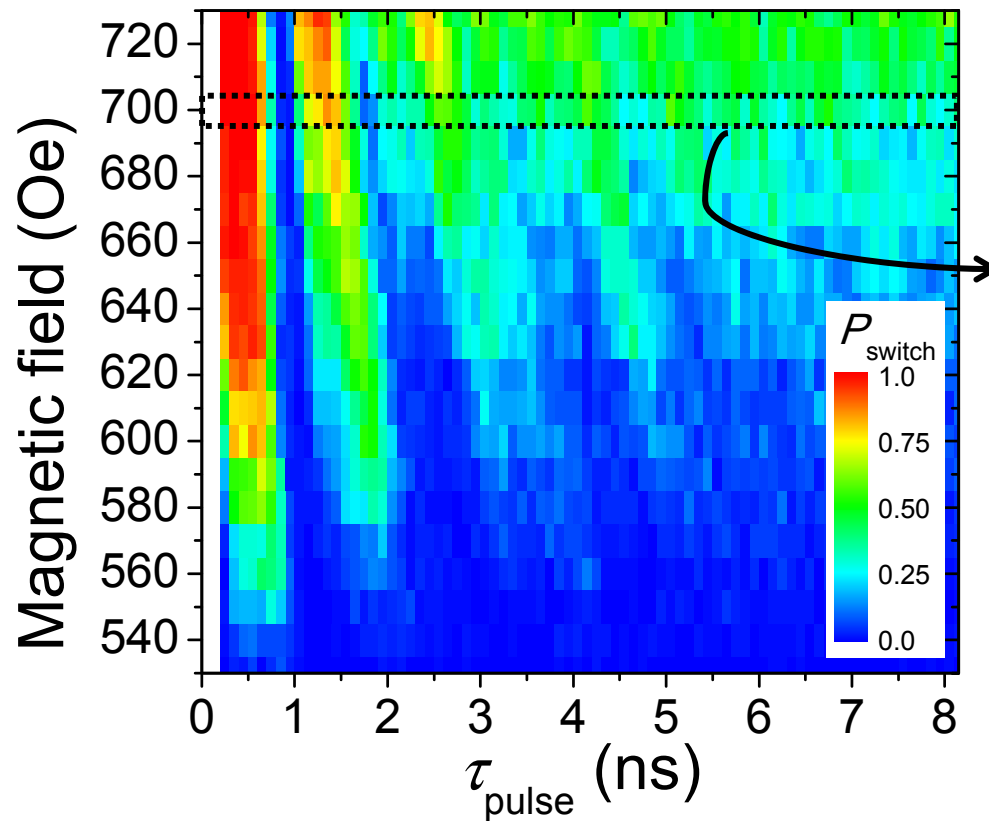
Results

AP P

(Magnetization was always initialized to AP state before pulse voltage application)

-1.0 V/nm

$H_{\text{ext}} = 700 \text{ Oe}$



P_{sw} shows the clear oscillation depending on τ_{pulse} .

Power consumption

$$Power = I_{leakage}Vt + CV^2$$

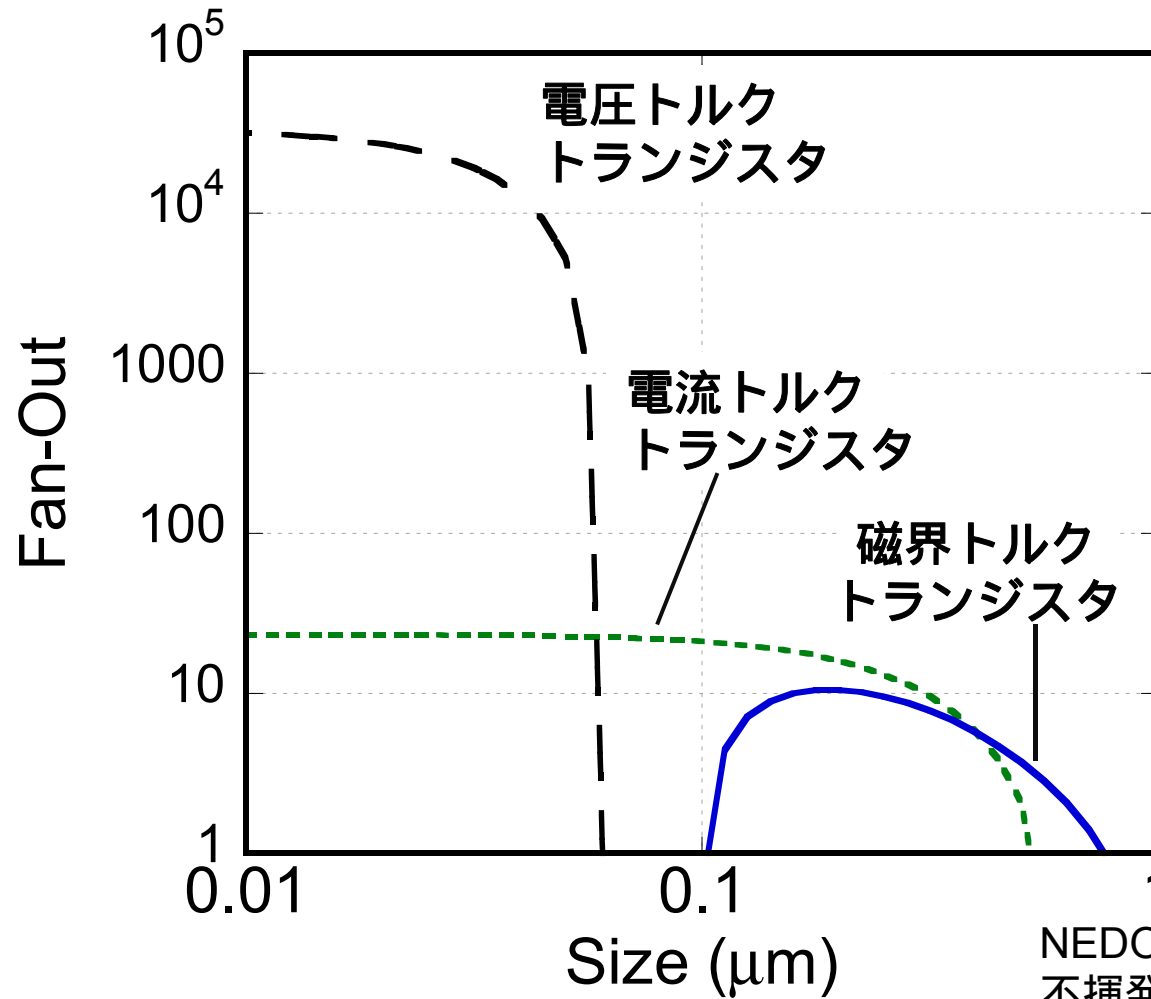
	Our device (200 × 800 nm ²)	UCLA. ^[1] (?)	Ideal device (ϕ30 nm)	STT-MRAM ^[2] (ϕ30 nm)
$I_{leakage}Vt$	260 [fJ]		0 [fJ]	
CV^2	50 [fJ]		~ 0.05 [fJ]	
Total	310 [fJ]	1/10 of STT		
Total (ϕ30 nm)	1.4 [fJ]		~ 0.05 [fJ]	90 [fJ]

[1] J. G. Alzata et al., IEDM2012

[2] Toshiba Co., IEDM2012

When the switching was done only thorough the electric field effect, writing energy consumes only **sub-fJ**.

スピントルクトランジスタのFan-outのスケーリング



NEDOスピントロニクス
不揮発性機能プロジェクト
事後評価資料(June, 2011)より
阪大 鈴木義茂

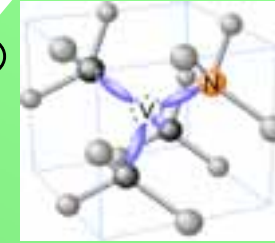
スピントロニクス の発展



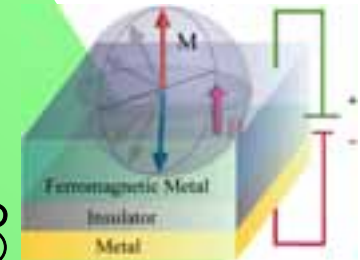
1998 GMRヘッドの実用化 (日米)



2003 M-RAMのサンプル出荷 (米)



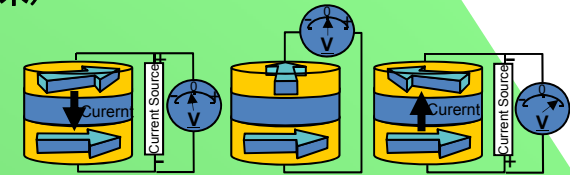
2008 ダイヤモンドの
室温多Q-bit (独・日)



2009 室温電圧印加磁化反転(阪大)



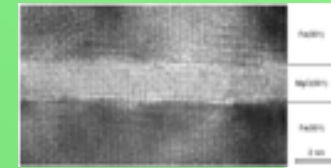
Prof. H. Ohno (Japan)
1999 ~ 半導体へのスピン注入
磁性の電界による制御



2005 スピントルクダイオード
(産総研・阪大)

2004 スピントルク磁壁駆動 (阪大)

2003 スピントランスファー
自励発振 (米)



2004 MgOバリア単結晶トンネル素子の
コヒーレント磁気抵抗効果 (産総研)



Prof. A. Fert (France)
1988 巨大磁気抵抗(GMR)効果の発見



Prof. T. Miyazaki (東北大)
1995 トンネル磁気抵抗効果(TMR)の発見

1998 ~ スピン注入磁化反転(米)

2001 TMRの量子井戸振動(産総研)



1980 「人工格子造語」
1985 層間交換結合の発見
Prof. T. Shinjo (京大)

Prof. P. Grünberg (Germany)

1991 III-V族強磁性半導体の発見(IBM)

1992 磁気光学効果の
量子井戸振動(産総研)