

クレジット:

UTokyo Online Education 学術俯瞰講義 2017 田中雅明

ライセンス:

利用者は、本講義資料を、教育的な目的に限ってページ単位で利用することができます。特に記載のない限り、本講義資料はページ単位でクリエイティブ・コモンズ 表示-非営利-改変禁止 ライセンスの下に提供されています。

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

本講義資料内には、東京大学が第三者より許諾を得て利用している画像等や、各種ライセンスによって提供されている画像等が含まれています。個々の画像等を本講義資料から切り離して利用することはできません。個々の画像等の利用については、それぞれの権利者の定めるところに従ってください。

学術俯瞰講義

物質のはじまりとはたらきーフェムト、ナノ、エクサの世界

物質科学の基礎と工学

Fundamentals of materials science and engineering

田中 雅明

東京大学 大学院工学系研究科

スピントロニクス学術連携研究教育センター長

電気系工学専攻、電気電子工学科 教授

<http://www.cryst.t.u-tokyo.ac.jp/>

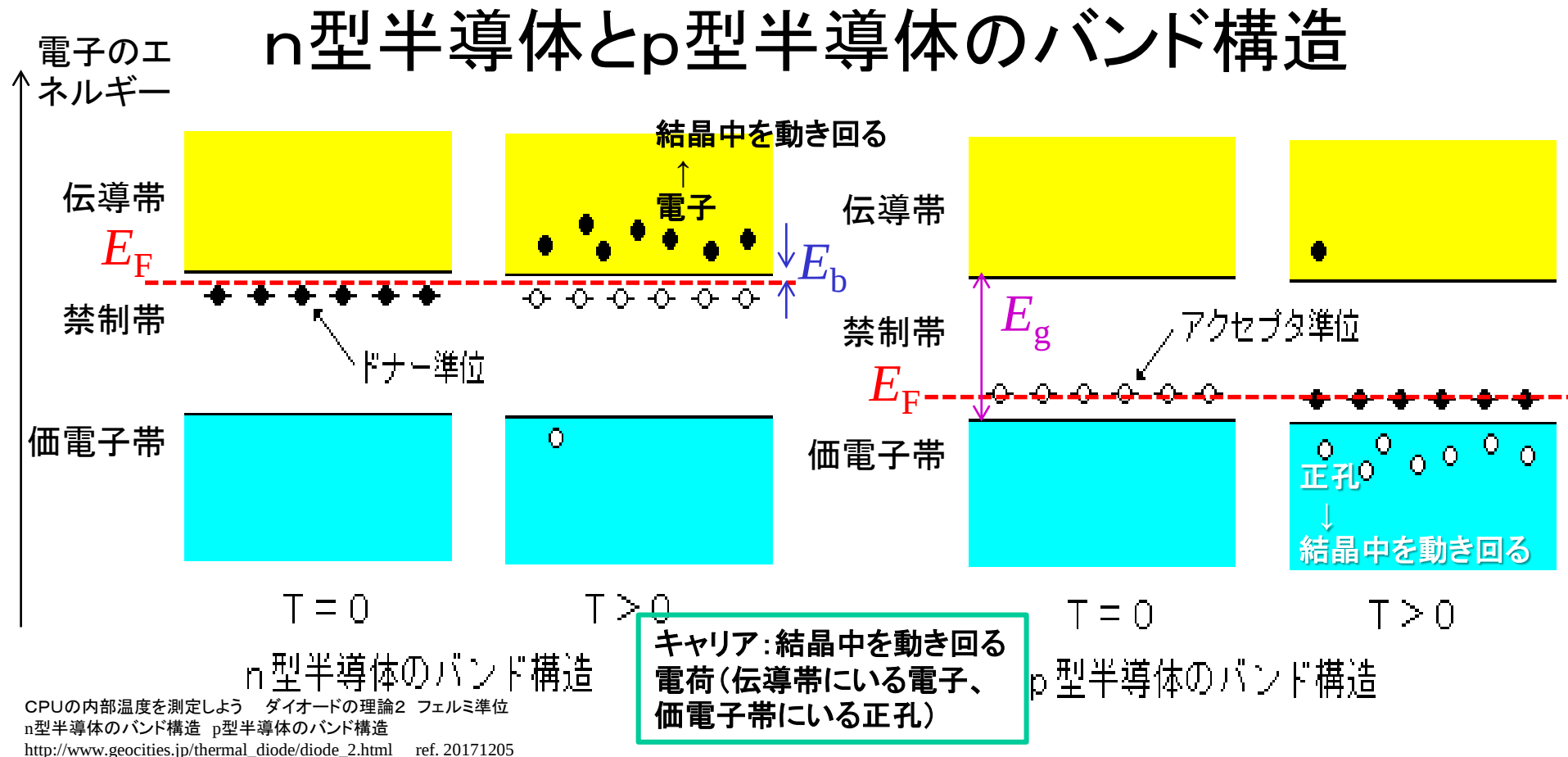
<http://www.csrn.t.u-tokyo.ac.jp/>

質問

- n型半導体、p型半導体、トランジスタの仕組みはわかったがどのように作っているのか？
- 10nmのトランジスタをどのように作るのか？ 研究レベルと量産では製法が異なるのか？
- トランジスタが信号を増幅できる仕組みは？それがどのように利用されているのか？
- 半導体中の電子の流れはバンドモデルで理解できるのか？ pn接合のバンド図はなぜこうなるのか？途中まで電子が詰まったバンドとは？電場がかかるとなぜ傾くのか？（バンドに関する類似の質問は複数あり）
- 金属で温度が上がると格子振動によって電子が散乱されて抵抗が大きくなるのはなぜか？
- なぜ、もとの半導体(Si)が純粋でないと不純物添加の効果がないのか？
- 微細なトランジスタに配線をつくるのはどうやっているのか？
- 禁制帯ができるのはなぜか？ ブラッグ反射が起こるとはどういうことか？
- 禁制帯に電子がいないのではなく居るけれどもエネルギーを持つことができないということか？ ドナ準位から電子が伝導帯に励起した後でドナ準位に正孔ができるはずだが正孔が流れないのはなぜか？
- バンドを求めるのに、2つの異なるモデル(異なる仮定から出発して)で同じ結果が得られるのはなぜか？
- NAND、NORとは？ どちらが主流か？
- LEDの発光波長が半導体の禁制帯幅 E_g で決まっているならば、太陽電池では太陽光のスペクトルのうち強い光を吸収するように工夫されているのか？
- なぜトランジスタや集積回路だけが急速な(指数関数的な)発展を遂げたのか？
- ムーアの法則はどのように導出されたのか？
- 量子やバイオを用いた情報処理とは？それらがSi MOSFETより優れたものになるのか？
- 原子・分子レベル以下にどのように小さくするのか？
- 他分野横断の学習はどれほど時間がかかるか？研究に携わるまでのハードルが高くなっている気がする。どのような教育が求められるか？

ほとんどは後期課程の内容
工学部電気電子・電子情報では2年生後期～3年生で学ぶ

n型半導体とp型半導体のバンド構造



- ドナ不純物(D)とアクセプター不純物(A)は水素原子に似ており($D \rightarrow D^+ + e^-$, $A \rightarrow A^- + h^+$)水素原子モデルで不純物準位(不純物原子のイオン化エネルギー)を計算できる。
- ドナー準位は伝導帯下端からわずかに($E_b = \text{数meV} \sim \text{数10 meV}$)下に、アクセプタ準位は価電子帯上端からわずかに($\text{数meV} \sim \text{数10 meV}$)上にある。
- このエネルギー差(束縛エネルギー E_b)より室温の熱エネルギー $k_B T = 26 \text{ meV}$ が大きいとか同等であれば、キャリアが結晶中に放出され、半導体はn型、p型になる。
- 一方、禁制帯幅 E_g が1 eV程度であれば(温度にすると10000 K程度)、室温の熱エネルギーより十分大きいので、価電子帯から伝導帯への電子の熱励起はきわめて少ない。

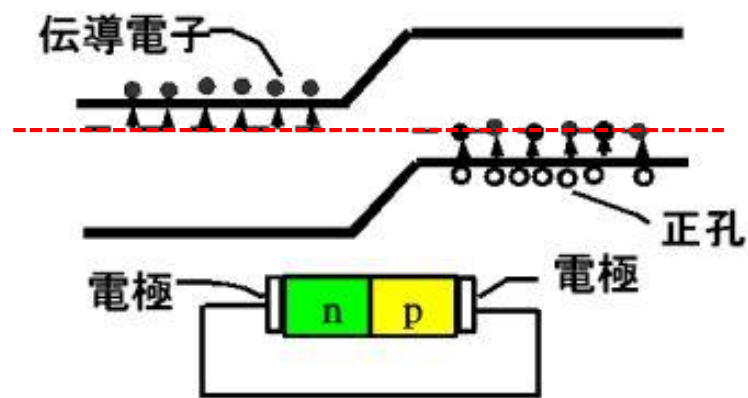
pn接合のバンド図

バイアス電圧 $V=0$ の時は、 E_F が一致するようにバンドプロファイル(ポテンシャルの形)が決まる

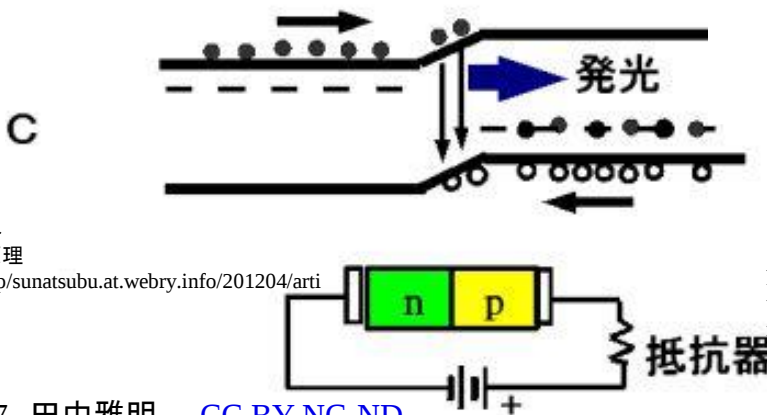
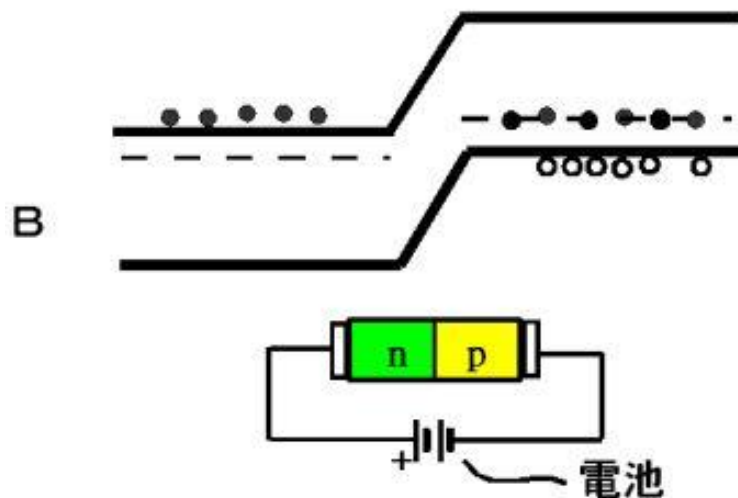
$V < 0$ 負バイアス
キャリア(電子、正孔)にとってポテンシャルの山が高くなるので電流は流れない

$V > 0$ 正バイアス
キャリア(電子、正孔)にとってポテンシャルの山が低くなり、電流は流れる

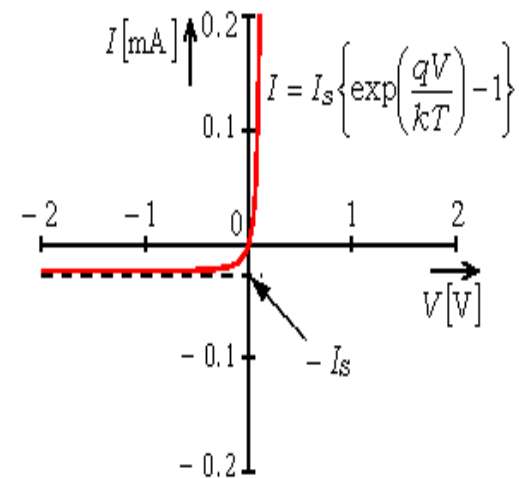
石くれと砂粒の世界
発光ダイオードの原理
http://s.webry.info/sp/sunatsubu.at.webry.info/201204/article_5.html
ref. 20171212



E_F : フェルミ準位

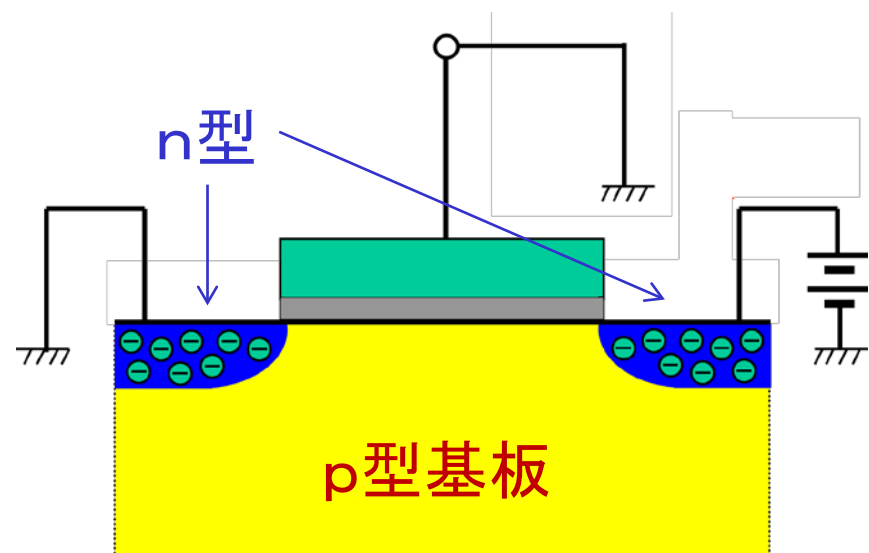
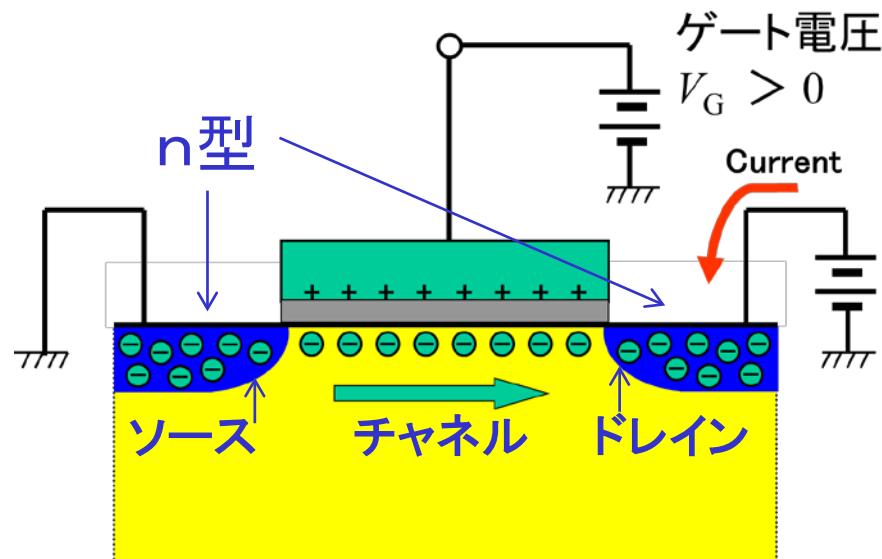


pn接合ダイオードの整流特性



この傘→ラジオなんですっ！東京高専 小池・阿津研による傘ラジオホームページ
Siダイオードに集光した場合と熱した場合
「ダイオードの電圧対電流特性は左図のような式で表されます。」
<http://www.kasaradio.com/ksrd09/TNCT/etc/SiDiDet/hikaku.html>
ref. 20171212

n型MOSFET: ソースとドレインがn型、電子がチャネルを流れる



オン状態

オフ状態

ゲート電圧のわずかな変化 → ソース-ドレイン電流の大きな変化

伝導帯

禁制帯

価電子帯

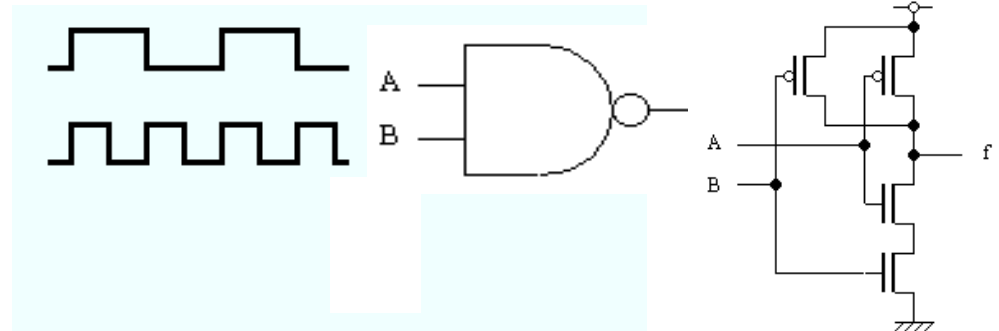
ソース チャネル ドレイン ソース チャネル ドレイン

p型MOSFET: ソースとドレインがp型、正孔がチャネルを流れる

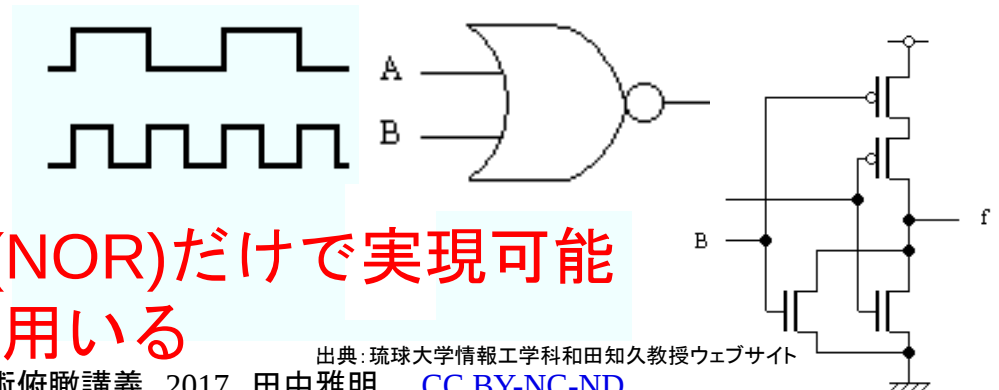
論理演算の例

AND			NAND			OR			NOR		
入力 A	入力 B	出力	入力 A	入力 B	出力	入力 A	入力 B	出力	入力 A	入力 B	出力
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0
1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0
1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0

■ NAND 回路
(ANDの出力を反転)



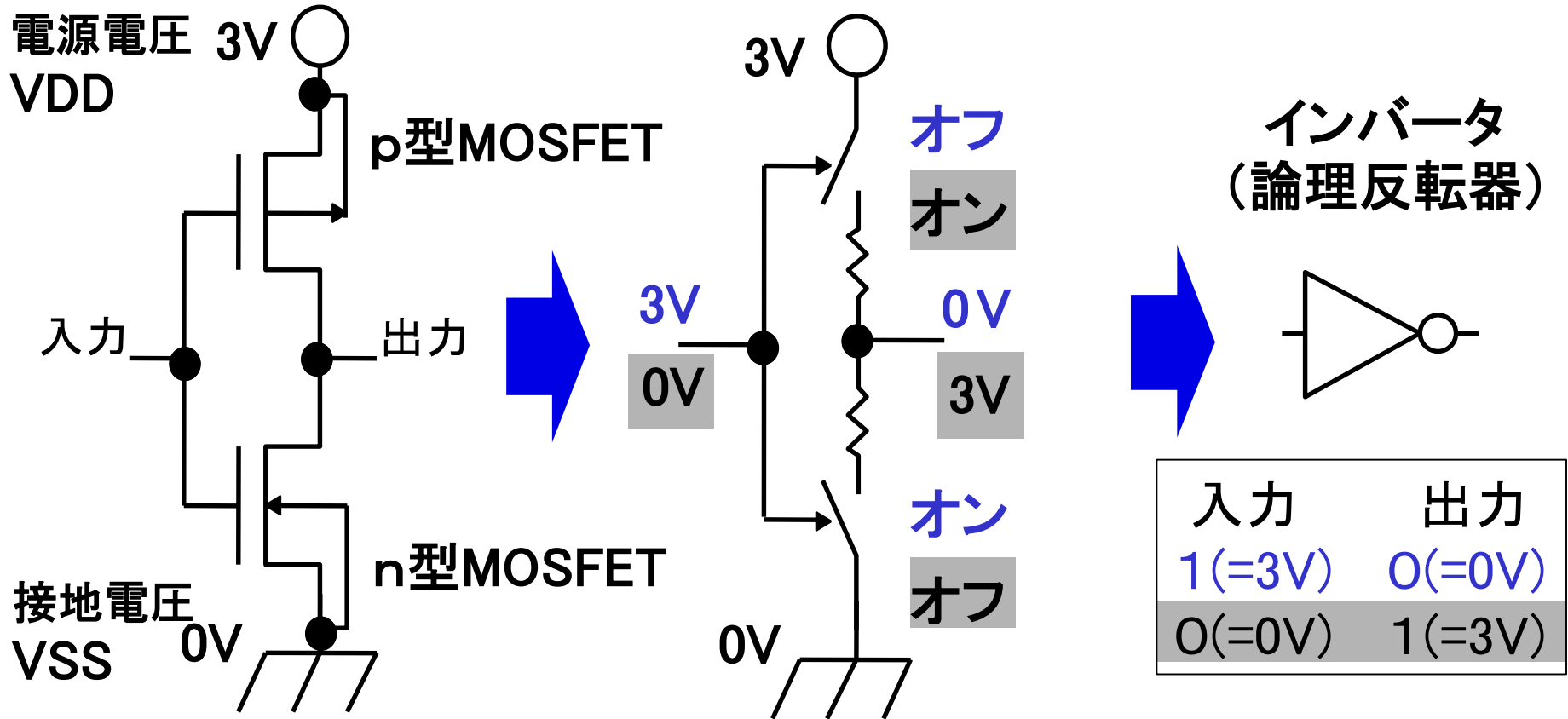
■ NOR 回路
(ORの出力を反転)



どんな論理回路でもNAND (NOR)だけで実現可能
トランジスタ (MOSFET) を用いる

集積回路の基本: CMOSインバータ

CMOS: Complementary MOS (相補型MOS)



集積回路のほとんどはCMOS回路である

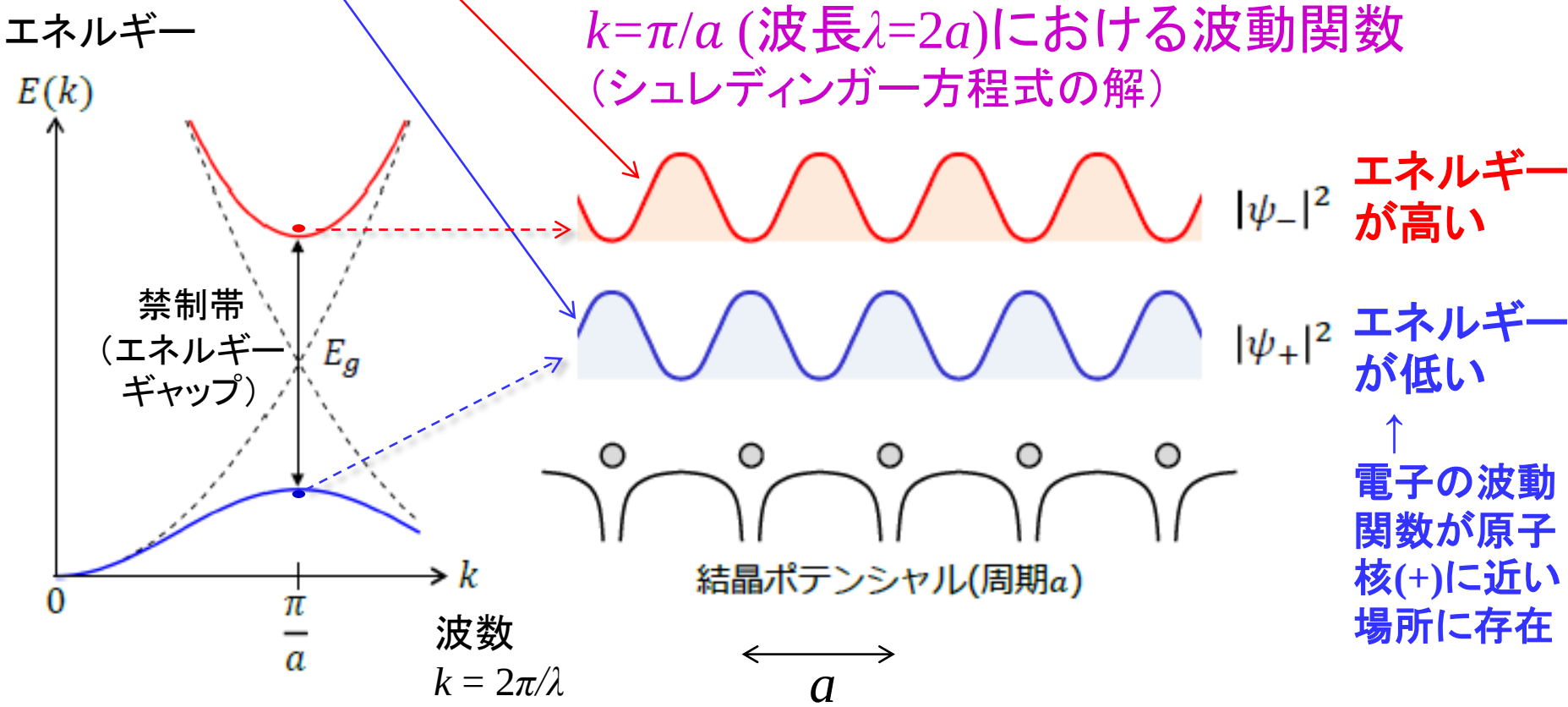
- ・直流電流のパスなし → 低消費電力
- ・動作マージン大

固体のバンド構造：周期的ポテンシャル中で禁制帯ができる理由

右向きと左向きの進行波が $k=\pi/a$ でブラッグ反射して定在波を形成

逆位相 $\psi_-(x) = e^{i\pi x/a} - e^{-i\pi x/a} = 2i\sin(\pi x/a)$ (← 反結合軌道)

同位相 $\psi_+(x) = e^{i\pi x/a} + e^{-i\pi x/a} = 2\cos(\pi x/a)$ (← 結合軌道)



物質科学の基礎と工学

Fundamentals of materials science and engineering

第7回 11月9日(木)

物質科学の基礎と現代社会

Fundamentals of materials science and modern society

第8回 11月15日(水)(補講日)

物質科学から工学へー半導体の爆発的発展と情報化社会ー

From materials science to engineering — Explosive developments of semiconductor technology and information society

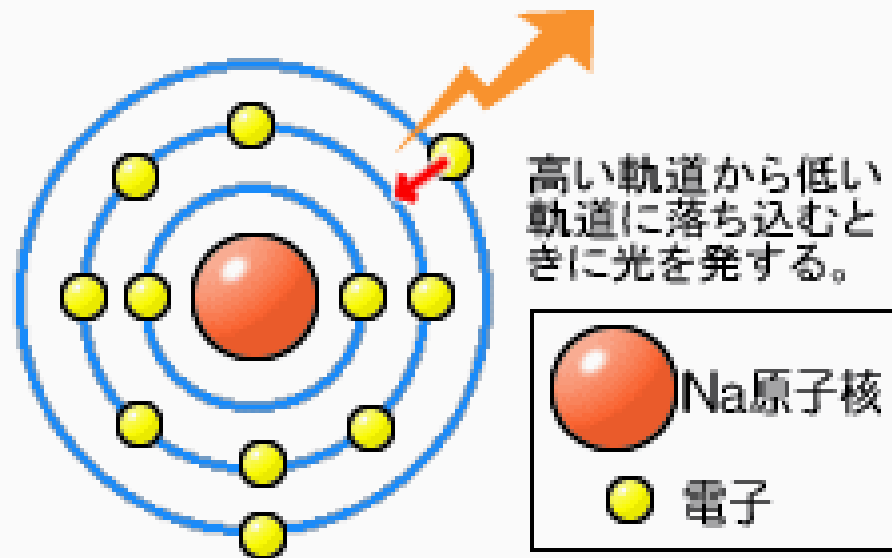
第9回 11月30日(木)

物質科学と先端研究の世界

Advanced research in materials science

物質の磁性とその応用

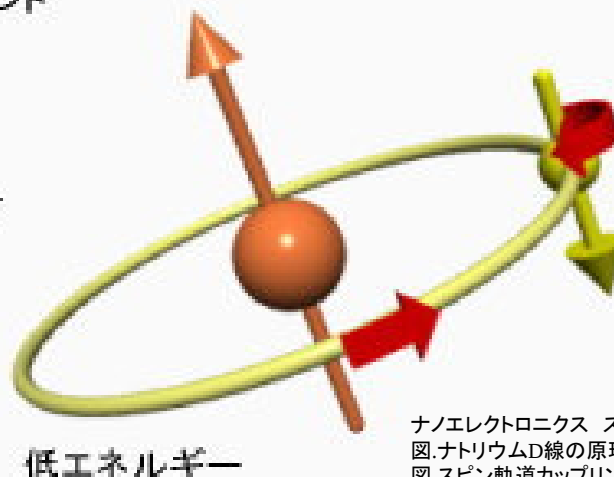
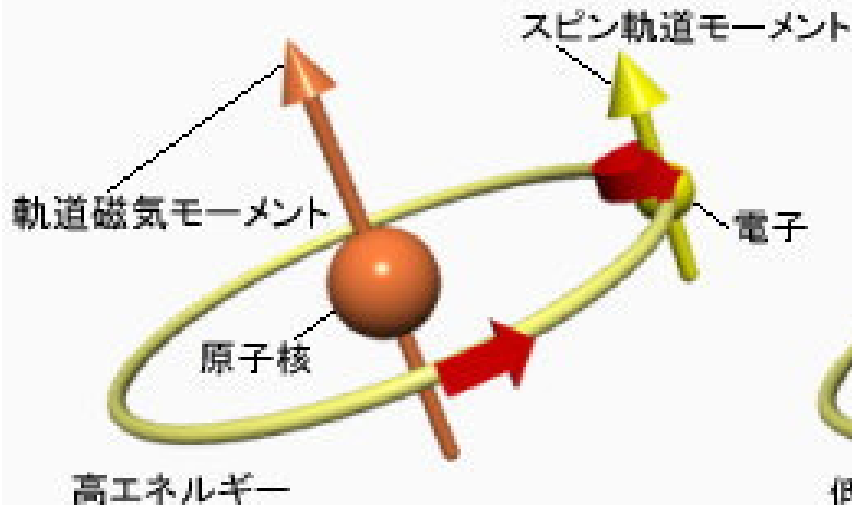
スピンの発見とスピン軌道相互作用



Na のD線にわずかな分裂があることが、光スペクトルの実験で観測された。

- 電子には**スピン角運動量**がある
- スピン角運動量は2値しかとらない： $\pm 1/2\hbar$ ($\hbar = h/2\pi$, h はプランク定数)
- スピン軌道相互作用によるエネルギー分裂がある

1925年 ウーレンベックとゴーズミット(ライデン大学の大学院生)は、まだ知られていない電子の自由度があると考え、電子は原子核の周りを公転している(軌道をもつ)だけではなく、電子自身が自転しているのではないかと(spinning electrons)、という仮説を立て、この自転に似た内部自由度を「スピン」と呼んだ。指導教員のエーレンフェストは「君たちは充分若いのでバカなことをしても許される」と論文発表を認めた。



原子の磁気モーメント

$$\begin{aligned} &\parallel \\ &\text{軌道磁気モーメント} \\ &+ \\ &\text{スピン磁気モーメント} \\ &+ \\ &(\text{スピン軌道相互作用}) \end{aligned}$$

ナノエレクトロニクス スピントロニクススピンとは？

図.ナトリウムD線の原理

図.スピン軌道カップリングによる影響

<http://www.s-graphics.co.jp/nanoelectronics/kaitai/spintronics/1.htm>
ref. 20171212

強磁性

ある物質が磁石(強磁性体)であるためには

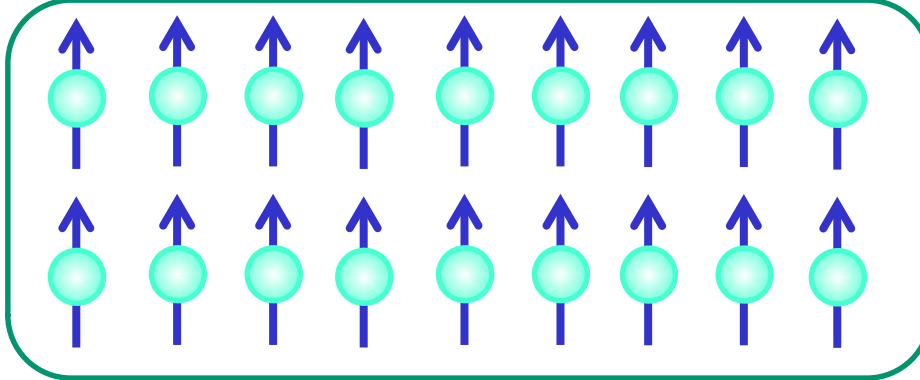
(1) 原子(あるいは分子)が磁気モーメント(ミクロの磁石)をもつ



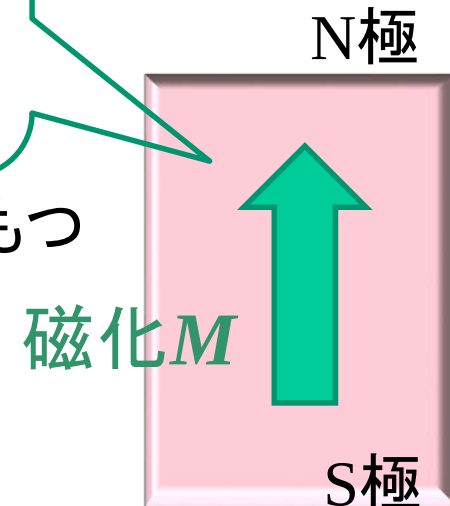
3d電子系(遷移金属) Fe, Co, Niなど

4f電子系(希土類) Gd

(2) それらの磁気モーメントが自発的に同じ向きにそろう



(3) マクロな試料が全体として磁化 M をもつ



遷移金属原子の電子配置

パウリの原理とフントの法則で決まる

エネルギー準位	K (n=1)	L (n=2)		M (n=3)			N (n=4)		
副準位	1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	...
収容可能電子数	2	2	6	2	6	10	2	6	...
原子番号、元素記号	原子番号=陽子数=総電子数								
1 H	1								
2 He	2								
3 Li	2	1							
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
24 Cr	2	2	6	2	6	5	1		
25 Mn	2	2	6	2	6	5	2		
26 Fe	2	2	6	2	6	6	2		
27 Co	2	2	6	2	6	7	2		
28 Ni	2	2	6	2	6	8	2		
29 Cu	2	2	6	2	6	10	1		
30 Zn	2	2	6	2	6	10	2		
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

ネオマグ株式会社 永久磁石(マグネット)の歴史と磁気科学の発展 パウリの排他律による電子配置例
http://www.neomag.jp/mag_navi/history/history_18.html
 ref. 20171212

d軌道はアップスピン電子5個とダウンスピン電子5個(計10個の電子)を収容可能であるが、まずアップスピン電子が5個入り、次にダウンスピン電子が入る(フント則)。例えばFe原子は3d電子を6個持つが、↑↑↑↑↑↓ となり、アップスピン4個分の磁気モーメントをもつ。

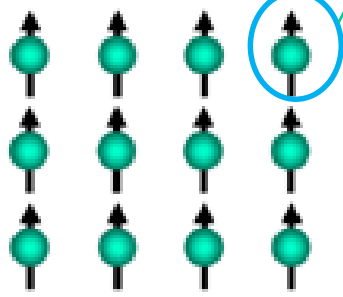
物質には様々な磁性の状態、磁性体がある

原子の磁気モーメント

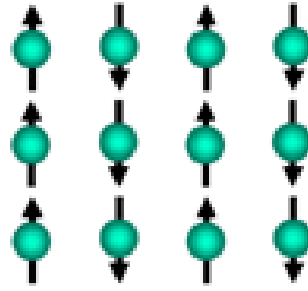
低温

相転移

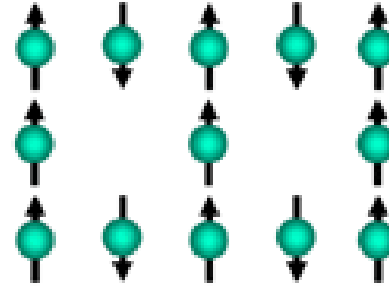
高温



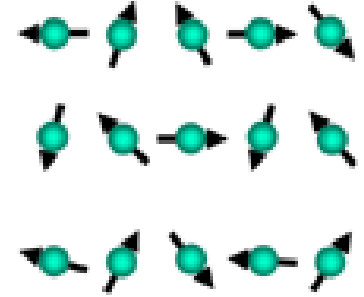
(a) 強磁性



(b) 反強磁性



(c) フェリ磁性



(d) 常磁性

スピンの量子力学的相互作用

磁性・スピントロニクス材料研究拠点 (CMSM)
磁性の種類
スピンの量子力学的相互作用
http://www.nims.go.jp/mmu/tutorials/magnetism_j.html
ref.20171212

これらの秩序をもった磁性は、高温になると常磁性（無秩序磁性）になる。強磁性 $\leftrightarrow$ 常磁性に転移する温度を**キュリー温度(T_C)**という

Photo by Christina.h.chen from Wikimedia Commons ref. 20171212
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Masato_Sagawa_March_3,_2014-.png
CC BY-SA 4.0

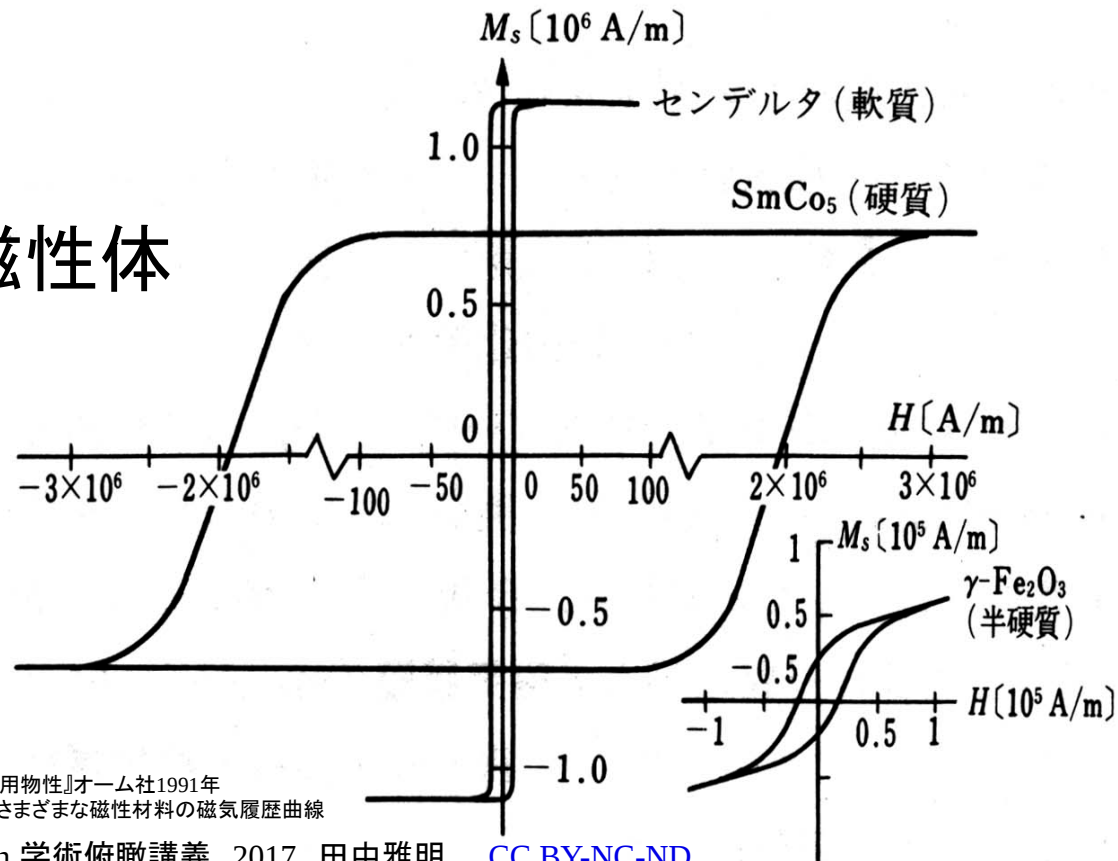
- Fe, Co, Ni, Gdは常温で強磁性の金属
- 化合物では無数の強磁性体（磁石）がある
- 最も強い強磁性体（磁石）は $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$
（モータ、発電機など多くの電気機器に利用） 佐川真人博士が開発



強磁性体の磁気ヒステリシスと応用

保磁力 H_C のちがいで用途が違う

- H_C 小: 軟質(ソフト)磁性体
 - 磁気ヘッド、変圧器鉄心、磁気シールド
- H_C 中: 半硬質磁性体
 - 磁気記録媒体
- H_C 大: 硬質(ハード)磁性体
 - 永久磁石



佐藤勝昭『応用物性』オーム社1991年
p208図5.10 さまざまな磁性材料の磁気履歴曲線

強磁性体の用途

- 磁気記録、光磁気記録
→ 情報技術(IT)
- 光アイソレータ
→ 光ファイバ通信
- 永久磁石
→ モータ、アクチュエータ
- 変圧器、インダクター用磁心

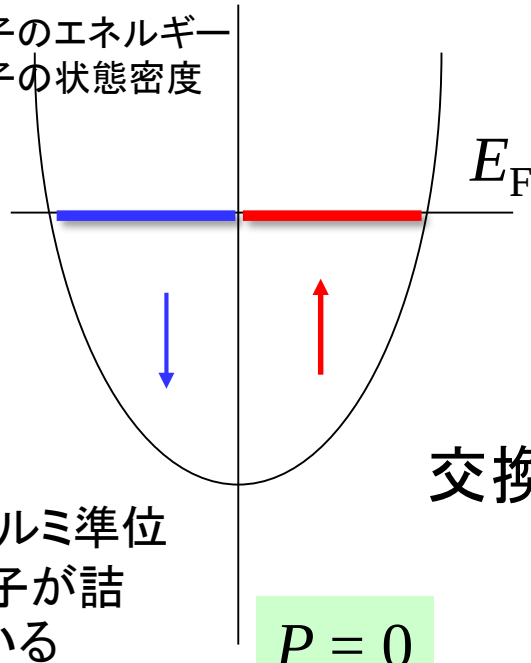
磁性とバンド構造(スピンの依存)

通常の金属、半導体

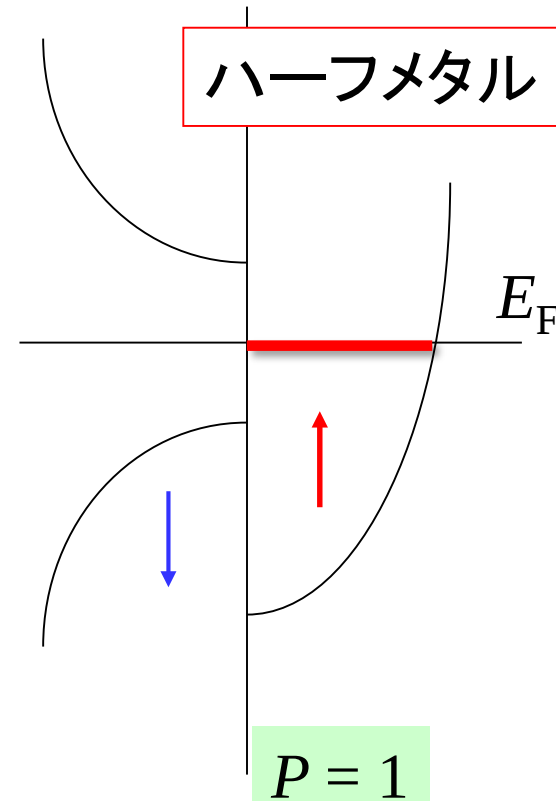
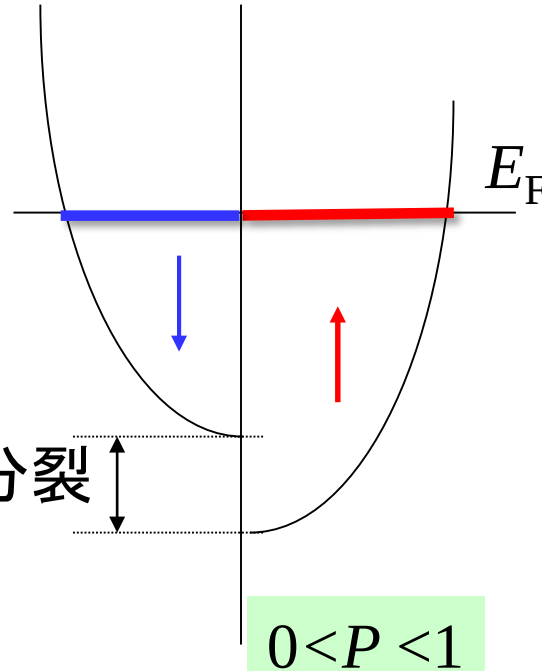
強磁性金属

ハーフメタル

縦軸: 電子のエネルギー
横軸: 電子の状態密度



交換分裂



E_F : フェルミ準位
まで電子が詰
まっている

フェルミ準位における $\uparrow$ スピン電子と $\downarrow$ スピン電子のアンバランス
スピン偏極率 $P = (n_{\uparrow} - n_{\downarrow}) / (n_{\uparrow} + n_{\downarrow})$ at $E = E_F$

ハーフメタルと考えられている物質

Heusler alloys (NiMnSb, PtMnSb), CrO_2 , Fe_3O_4 , LaSrMnO_3
InMnAs, GaMnAs, zb-CrAs, zb-MnAs, GeMn ...

電流とスピン流

電流 (charge current)

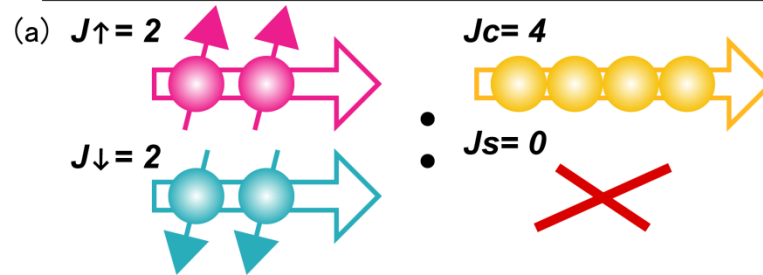
スピン流 (spin current)

$$J_C = J_{\uparrow} + J_{\downarrow}$$
$$J_S = J_{\uparrow} - J_{\downarrow}$$

$J_{\uparrow}$: ↑ スピン電子の流れ
 $J_{\downarrow}$: ↓ スピン電子の流れ

(a) 電流

電子の電荷のみが流れる
スピンは流れない

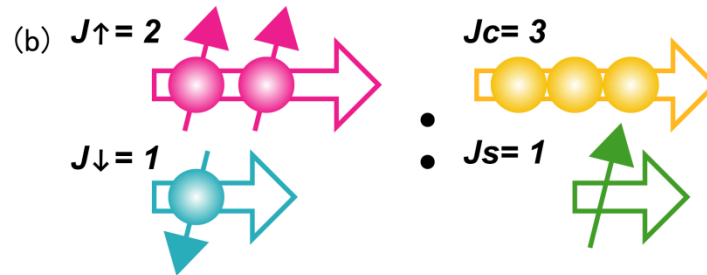


通常の金属や半導体
中を流れる電子の電流

→ エレクトロニクス
(Electronics)

(b) スピン偏極電流

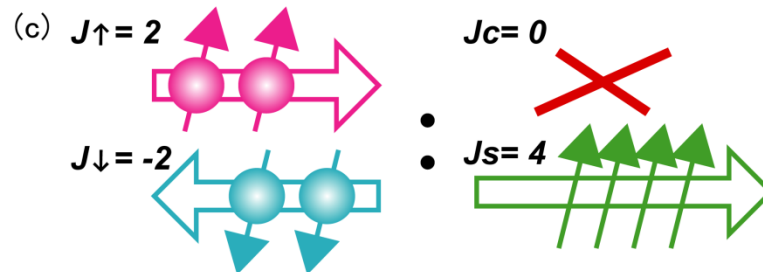
電荷とスピンが両方流れる
電流 + スピン流



スピンにアンバランスがある物質(例:
強磁性体)中を流れる電子の流れ

(c) 純スピン流

スピンのみが流れる
電流(電荷)は流れない



ある種のデバイス構造、特殊な物質の
表面や界面を流れる電子の流れ

消費電力がない(?)
→ 低消費電力デバイス

スピントロニクス
(Spintronics)

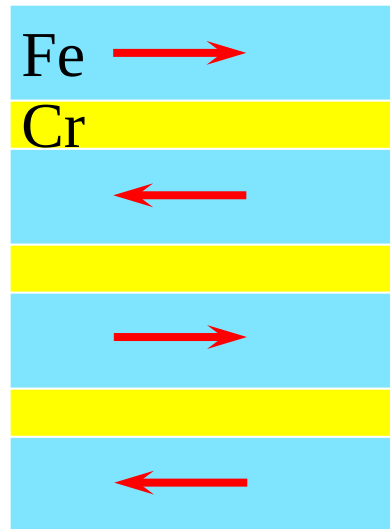
電流とスピン流の両方を利用

スピントロニクス

電荷とスピンの両方を活用した
物質の機能開発、
新しいエレクトロニクスと情報デバイス

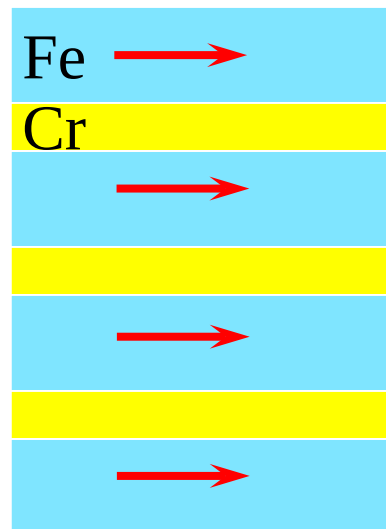
強磁性体/非磁性体からなる多層膜における 巨大磁気抵抗効果 (giant magneto-resistance, GMR)

Spin dependent scattering



$H = 0$

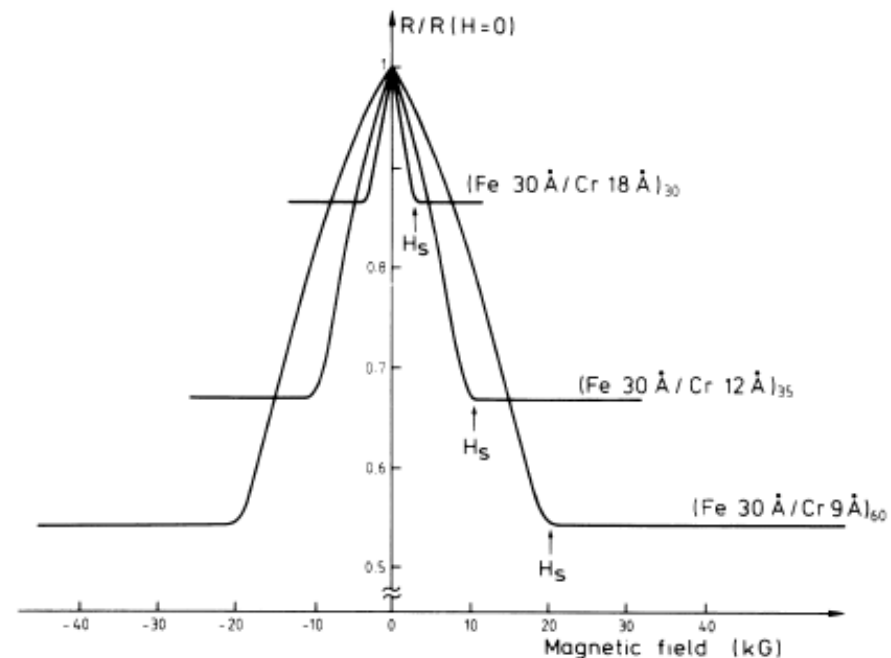
Anti-parallel
magnetization
 $\rightarrow$ High R



$H > 0$

Parallel
magnetization
 $\rightarrow$ Low R

MR ratio
 $R(H)/R(0)$



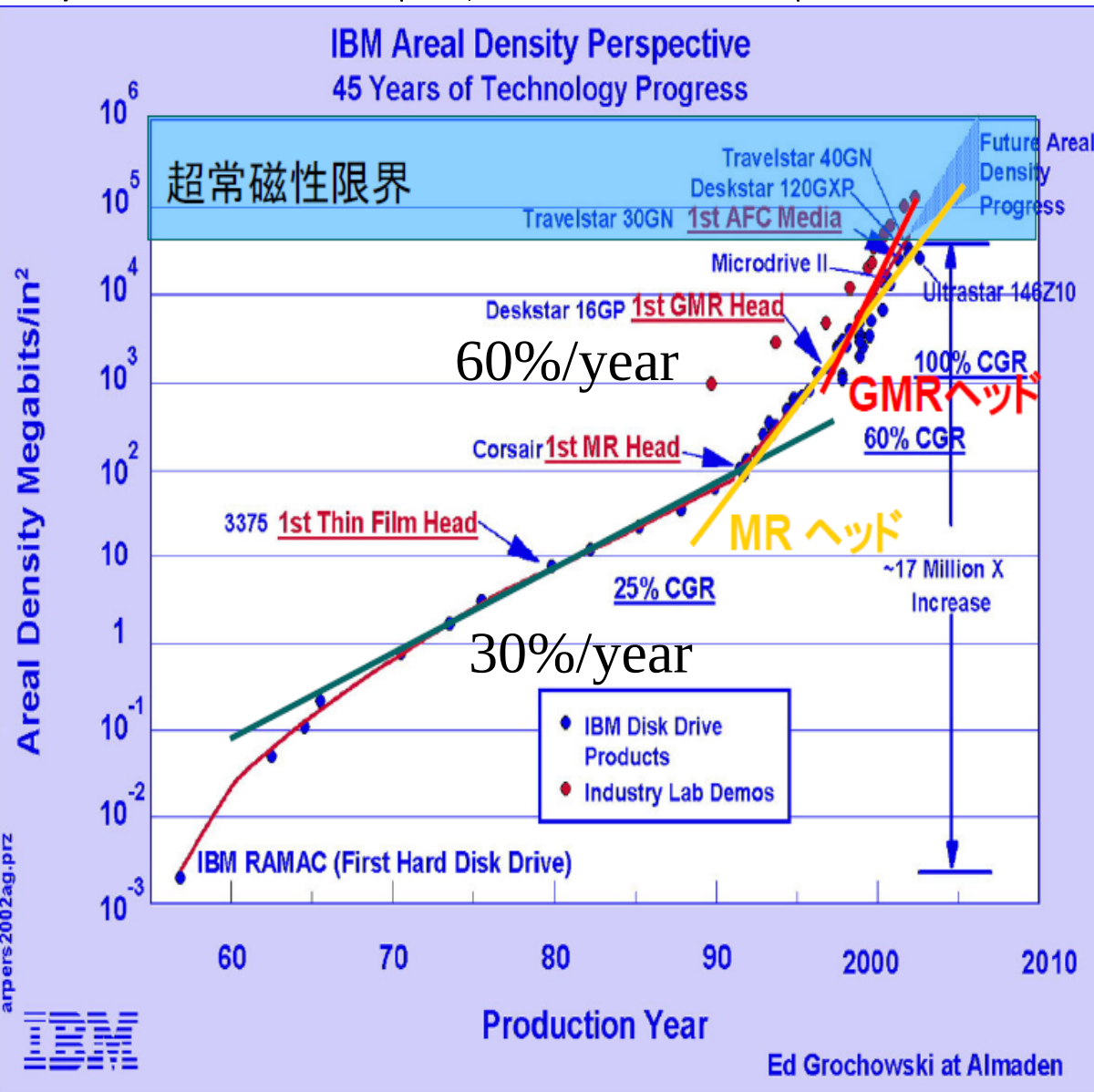
Magnetic field H (kOe)

M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, and J. Chazelas,
"Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices"
Phys. Rev. Lett. 61, 2472 – Published 21 November 1988
p. 2473 FIG. 3 Magnetoresistance of three Fe/Cr superlattices at 4.2 K.
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.61.2472>

ハードディスクにおける記録密度の向上

The **GMR** (giant magneto-resistance) head is a key technology

Courtesy of International Business Machines Corporation, © International Business Machines Corporation.



GMR Head

TMR Head

GMR Head (sensor)

Hard Disk Drive



UTokyo Online Education 学術俯瞰講義

2017 田中雅明 CC BY-NC-ND

GMR Head: the excellent magnetic field sensor

FM free layer
Non magnetic
FM fixed layer



ナノエレクトロニクス
スピントロニクス
- ハードディスクの成長を支えたGMR素子
HDDとGMRヘッドの構造・動作原理
<http://www.s-graphics.co.jp/nanoelectronics/kaitai/spintronics/2.htm>
ref. 20171212

Head moves across the magnetic domain of the media

→ The magnetization of the FM free layer flips (parallel $\Leftrightarrow$ anti-parallel)

→ The resistance changes due to the GMR effect, thus we can read out a tiny magnetization.

The GMR head is a key for the rapid growth of HDD recording density.

金属多層膜における巨大磁気抵抗効果

GMR (Giant Magneto-Resistance) in Ultrathin Magnetic Multilayers

thickness: a few nm

強磁性金属 (Co)

非磁性金属 (Cu)

強磁性金属 (NiFe)

平行磁化
Parallel magnetization

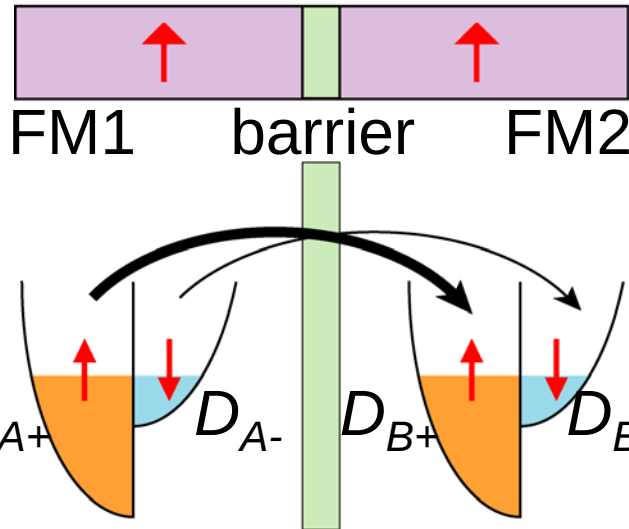
抵抗 R_p は小

反平行磁化
Anti-parallel magnetization

抵抗 R_{AP} は大

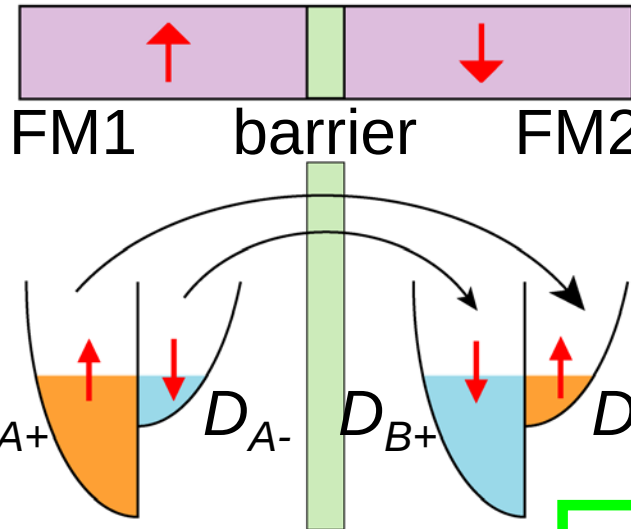
強磁性トンネル接合(MTJ)における トンネル磁気抵抗効果(TMR)

Parallel magnetization



FM1 barrier FM2

Anti-parallel magnetization



FM1 barrier FM2

・磁気センサー
・不揮発性メモリ
の基本原理

$R_P \rightarrow \text{low} \iff R_{AP} \rightarrow \text{high}$

Magnetic field

or

Spin current injection

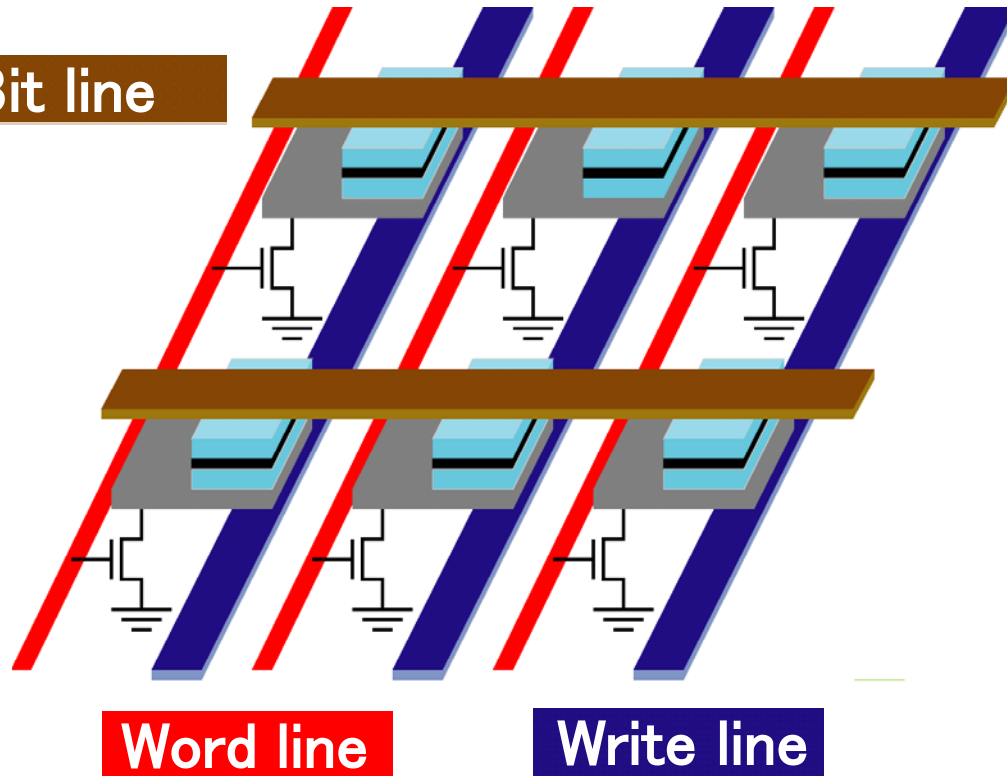
$$\text{TMR比} = \frac{R_{AP} - R_P}{R_P}$$

$$= \frac{2P_1P_2}{1 - P_1P_2}$$

P_1, P_2 : FM1 and FM2の
スピン偏極率
(spin polarization)

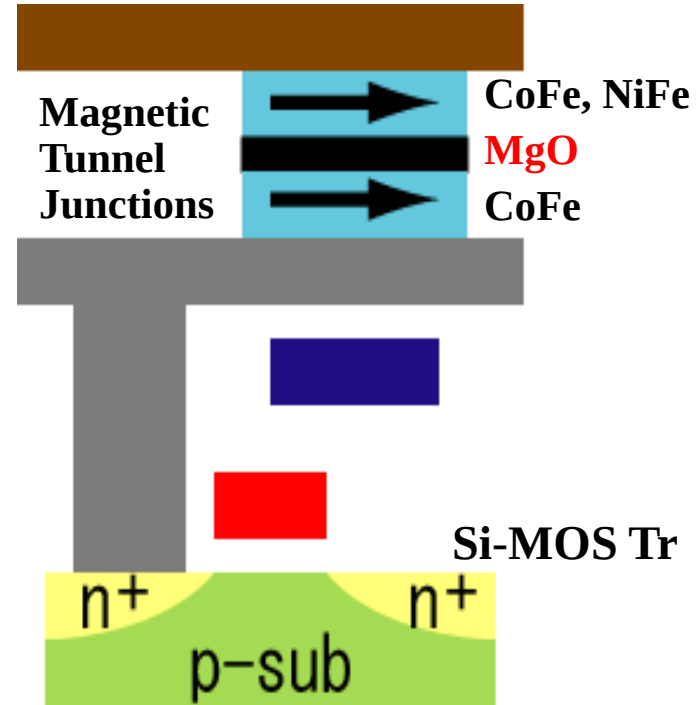
磁気(抵抗)ランダムアクセスメモリ(MRAM)

Bit line



Word line

Write line



= "0"

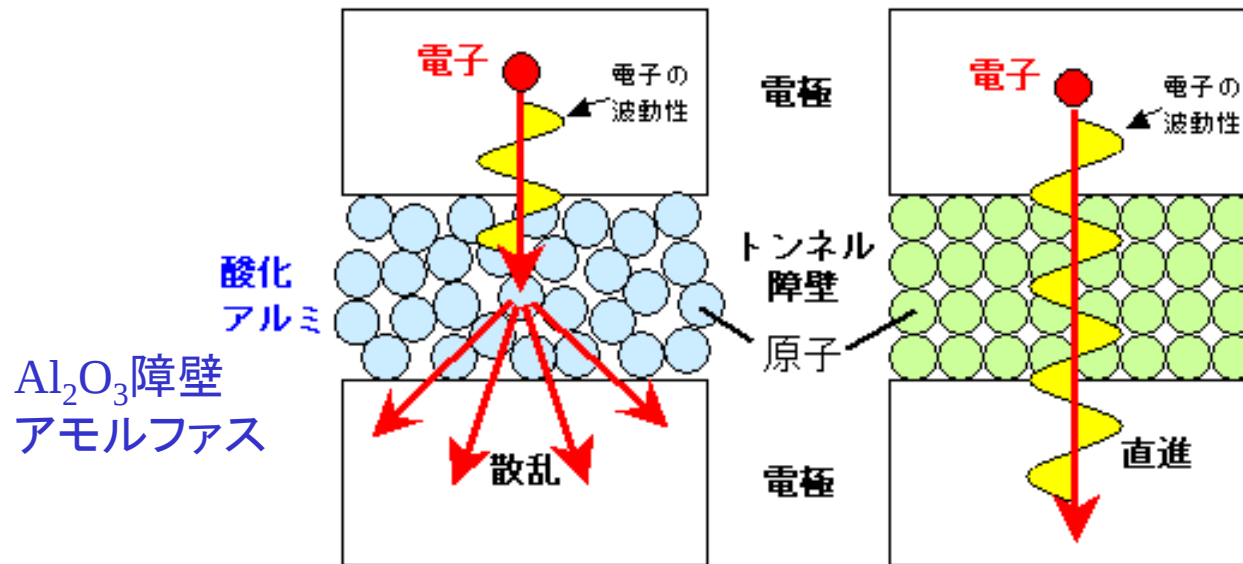


= "1"

4 Mb (2003), 16 Mb (2004)
4 Mb commercialized (2006)
64 Mb (2011), 4 Gb (2017)

Non-Volatile 不揮発
High Density 高密度
High Speed 高速
High Endurance 書込耐性
Soft error free 宇宙線耐性

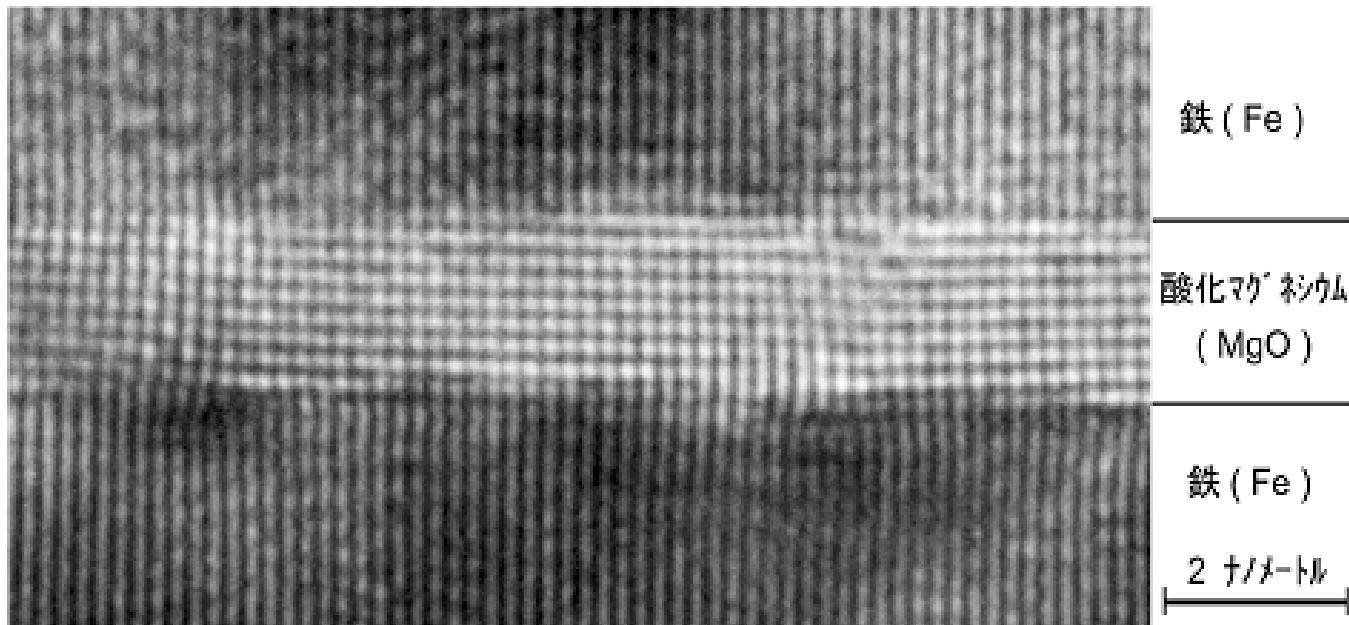
MgO単結晶障壁を用いたMTJ



Yuasa et al. AIST
Parkin et al. IBM
(2004)

酸化
マグネシウム
**MgO (001) 障壁
単結晶**

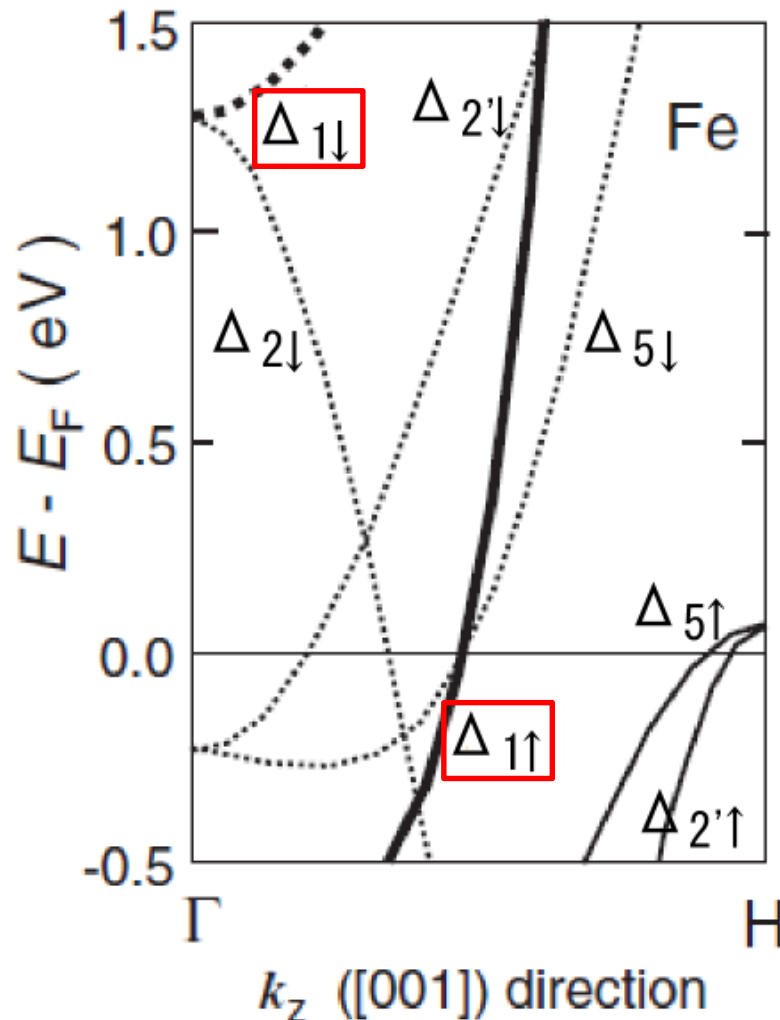
室温で300%以上のTMR



Feのバンド構造

Band structure of bcc(001) Fe

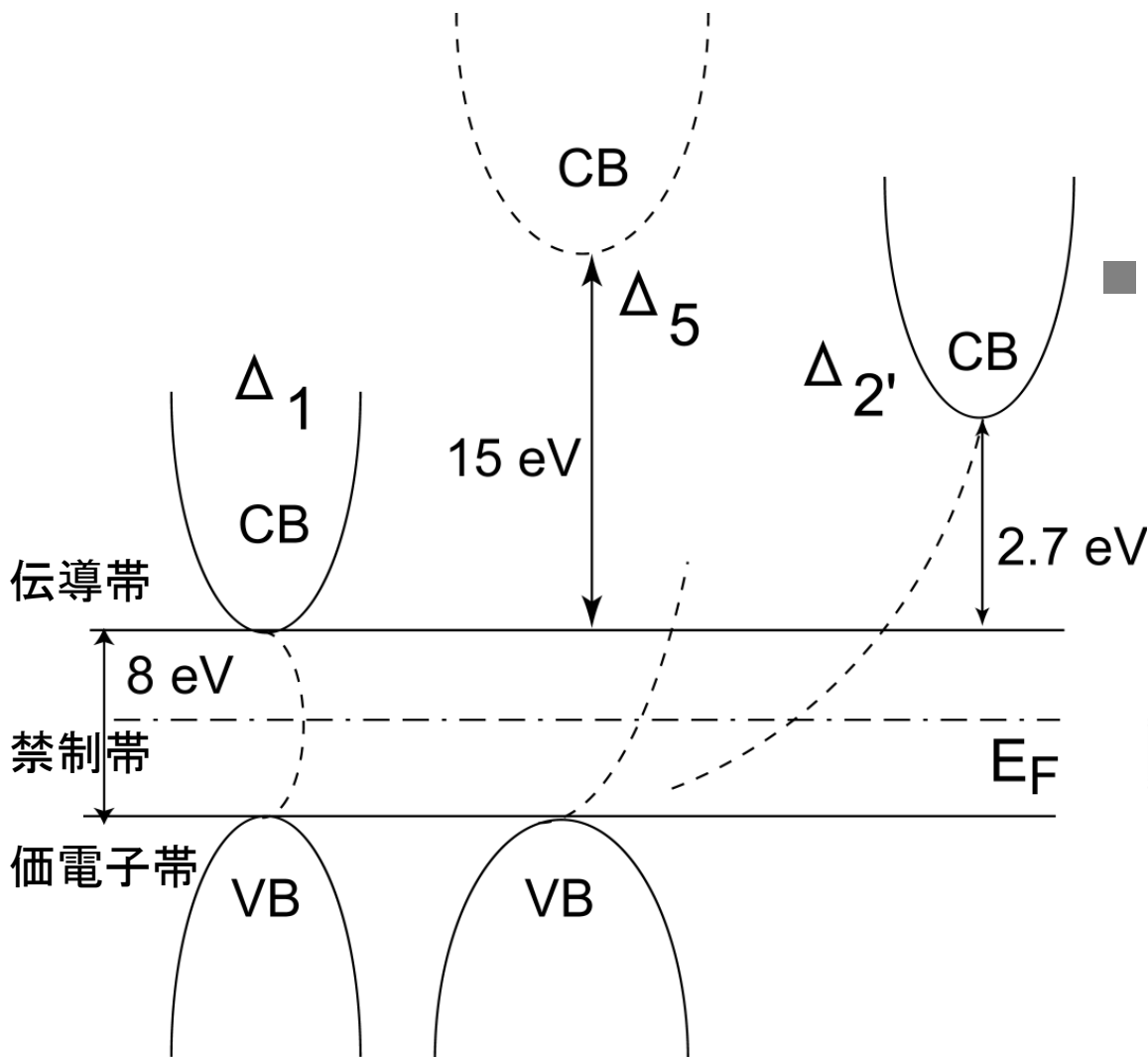
Shinji Yuasa et al. "High Tunnel Magnetoresistance at Room Temperature in Fully Epitaxial Fe/MgO/Fe Tunnel Junctions due to Coherent Spin-Polarized Tunneling"
Japanese Journal of Applied Physics 43 (2004) L588-L590
L588 Fig. 1. Band dispersion of Fe in [001] (-H) direction.
<http://iopscience.iop.org/article/10.1143/JJAP.43.L588/meta>



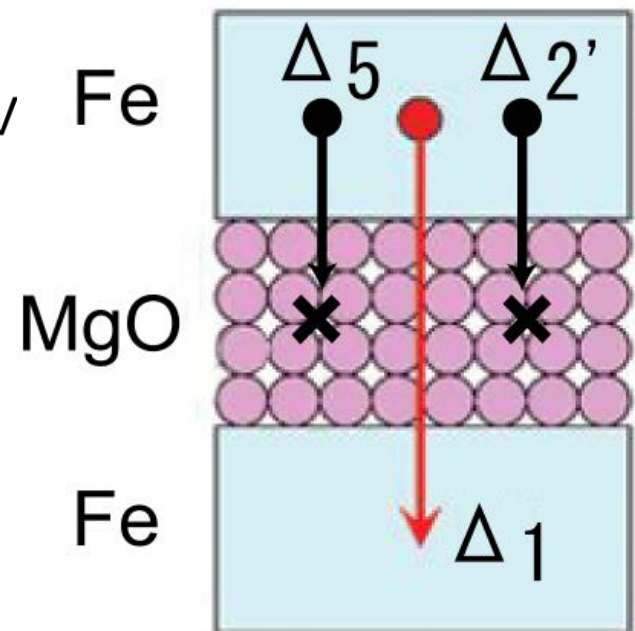
- フェルミ面には多くのバンドが横切っている
 - Feのスピンの偏極率はそれほど大きくない ($P \sim 40\%$)
 - **But Δ_1 is half-metallic !**
- $P = 100\%$**
-
- もし Δ_1 バンドの電子のみトンネルに寄与するならば大きな TMR が期待できる

MgOのバンド構造

Band structure of MgO



- Δ_1 電子にとってのトンネル障壁が最も低く、他のバンドの電子にとって障壁は高い
- Δ_1 電子のみトンネルしやすい



金属ベース・スピントロニクス

スピン依存伝導(GMR, TMR)を利用したスピントロニクス素子はすでに使われ役に立っている

GMR/TMR **センサ** → HDDの高密度・大容量化
不揮発性メモリ

GMR, TMRを用いたMRAM

TMRを用いたMRAMは、ユニバーサルな
不揮発性固体メモリとして期待されている

→ **モバイル、低消費電力デバイスとして需要が大きい**

課題： 書込み電流の低減(低消費電力化)、集積度、ばらつき
Hot topics: スピン流の物理、スピン注入磁化反転、磁壁移動のダイナミクス

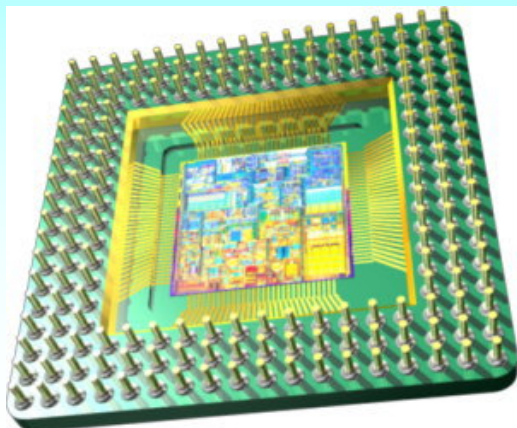
半導体＋スピン自由度

半導体スピントロニクス

半導体＋スピン → 半導体スピントロニクスの研究

半導体 デバイス

- ・ トランジスタ
- ・ 集積回路
- ・ LED、半導体レーザ
- ・ マイクロプロセッサ

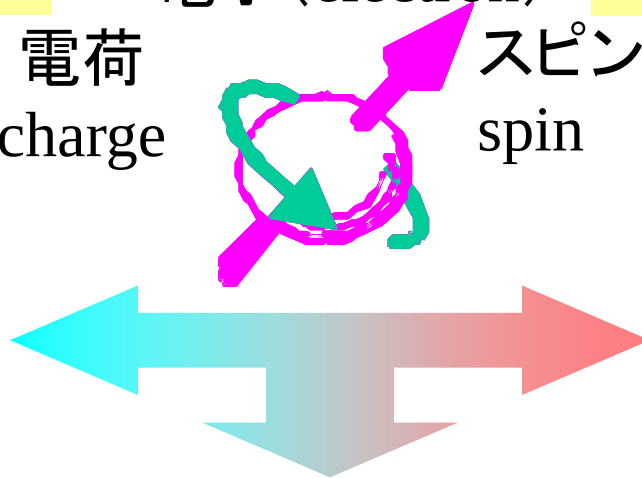


ナノエレクトロニクス フリー素材
マイクロプロセッサ ref.20171222
<http://www.s-graphics.co.jp/nanoelectronics/freestuffs/large/microprocessor.jpg>

期待される応用例

～30兆円

電子 (electron)
電荷 charge



～20兆円

磁性体

磁気デバイス

- ・ 不揮発性メモリ
- ・ ストอเรージ(HDD)
- ・ 磁気光学デバイス
光アイソレータ



ナノエレクトロニクス フリー素材
ハードディスクドライブ ref. 20171212
<http://www.s-graphics.co.jp/nanoelectronics/freestuff.htm>

電荷とスピンの両方
を用いることにより、
スピン自由度を利用
した新しいエレクト
ロニクスをつくる

半導体ベースの高密度高速不揮発性メモリ
再構成可能な論理回路 (reconfigurable logic)
集積化型磁気光学デバイス
スピン状態を用いた量子情報処理.

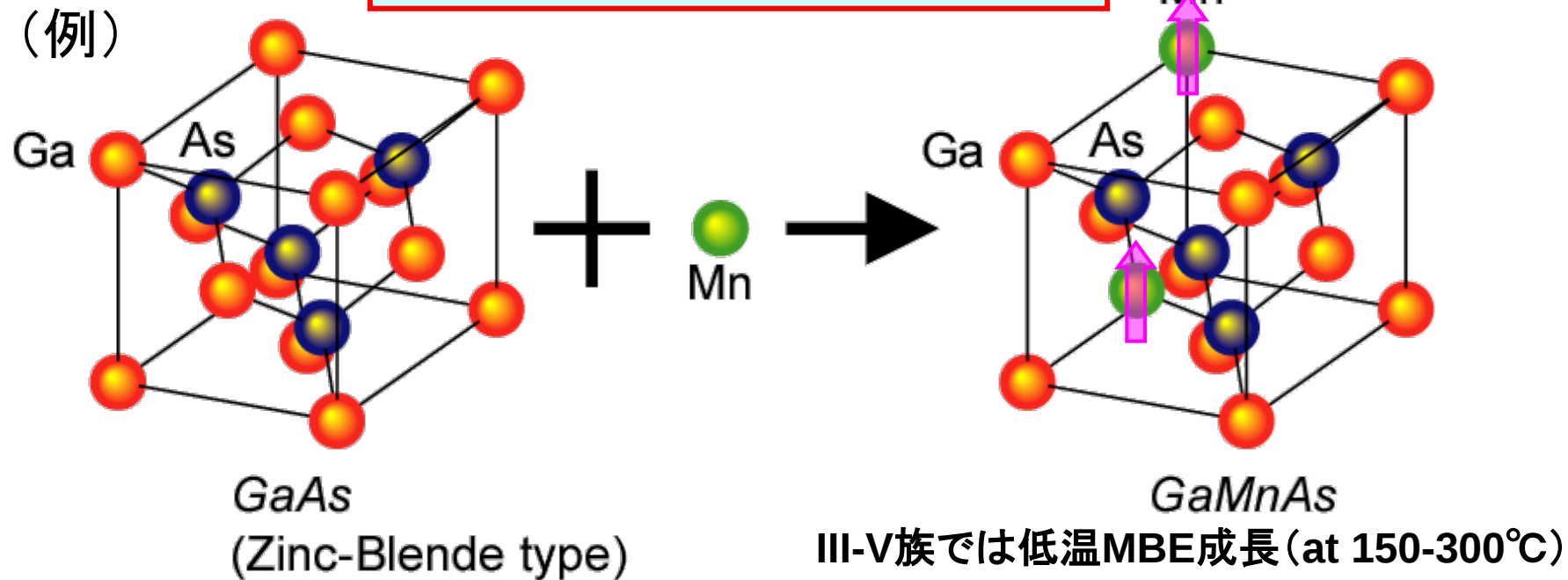
非磁性半導体に磁性元素を添加：強磁性混晶半導体

II-VI 族: (Cd,Mn)Te, (Zn,Mn)Te, (Zn,Cr)Te

III-V 族: (In,Mn)As, (Ga,Mn)As, (In,Ga,Mn)As, (In,Fe)As, (Ga,Fe)Sb

IV 族: GeMn, GeFe 室温強磁性領域 2016年 n型 2012年～ 室温強磁性 2016年

太字下線: われわれの研究対象



キャリア (正孔) 誘起の強磁性

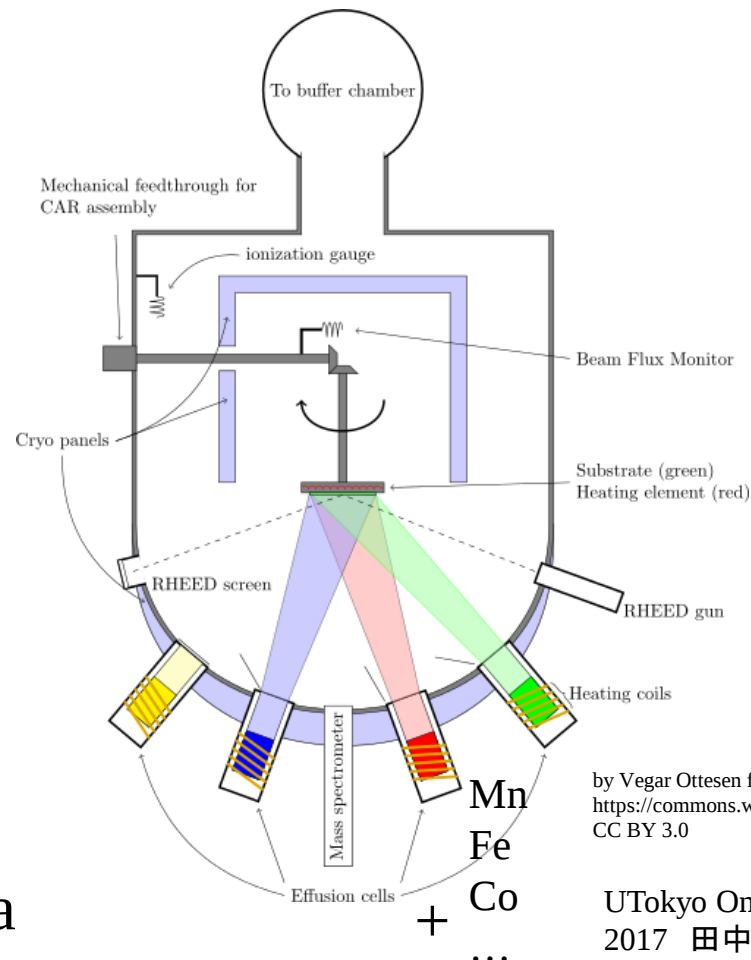
Mn: 局在スピン かつ アクセプタ

RKKY, p-d交換相互作用, 2重交換相互作用

UTokyo Online Education 学術俯瞰講義 2017 田中雅明 [CC BY-NC-ND](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

分子線エピタキシー (Molecular Beam Epitaxy, MBE)

- 超高真空中で基板上に原子を1層ずつ堆積させる結晶成長法
- 多くの人工物質、薄膜、ヘテロ構造、ナノ構造を作製できる
- 原子層単位での膜厚制御、組成の制御が可能
- 電子線回折(RHEED)により成長中のその場解析が可能

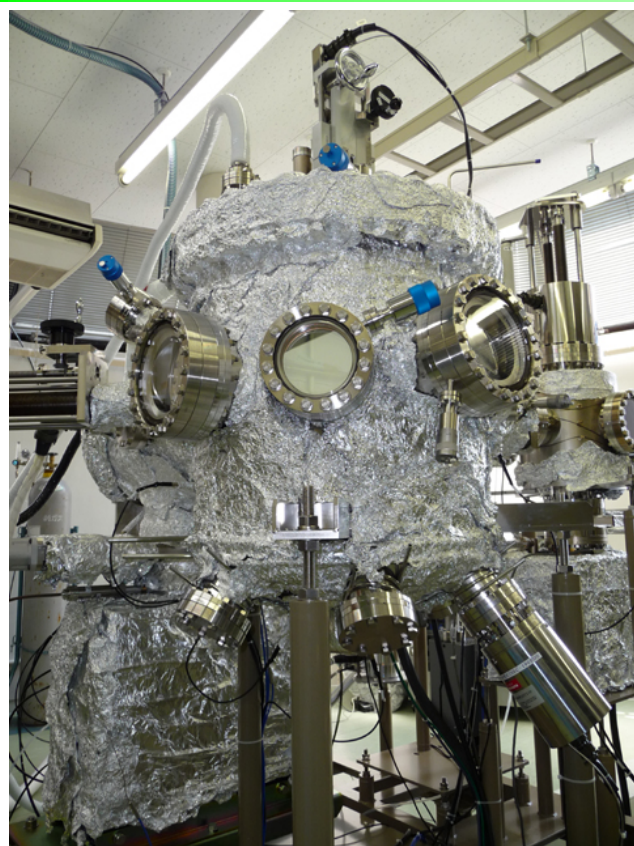


by Vegar Ottesen from Wikimedia Commons ref. 20171213
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MBE.svg>
CC BY 3.0

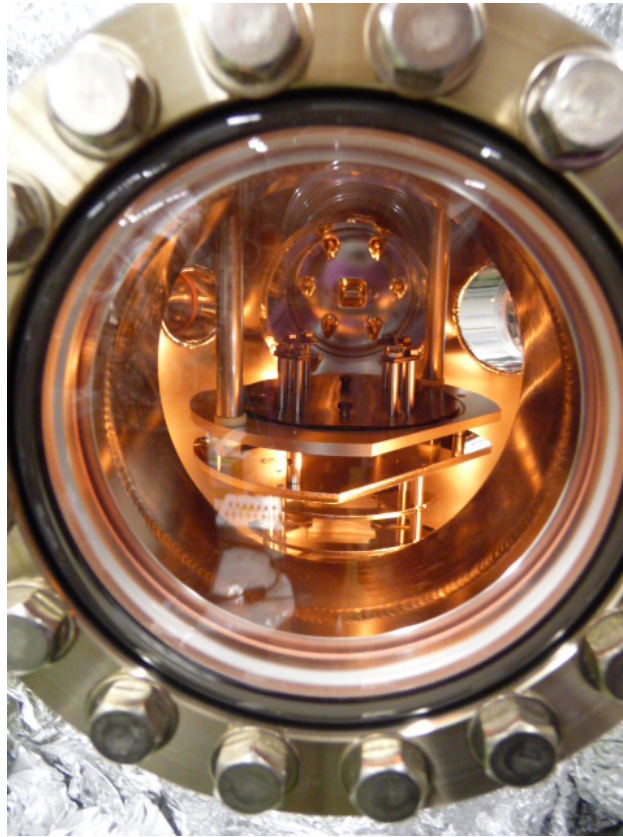
Base pressure
 10^{-11} Torr (10^{-9} Pa)

$$\begin{aligned} 1 \text{ atm} &= 0.760 \times 10^3 \text{ Torr} \\ &= 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Molecular Beam Epitaxy



Growth chamber



Sample holder



Control system

Tanaka-Ohya-Nakane Laboratory
University of Tokyo
<http://www.cryst.t.u-tokyo.ac.jp/>

0.5 ~ 1 million US dollars / one MBE system

UTokyo Online Education 学術俯瞰講義 2017 田中雅明 [CC BY-NC-ND](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

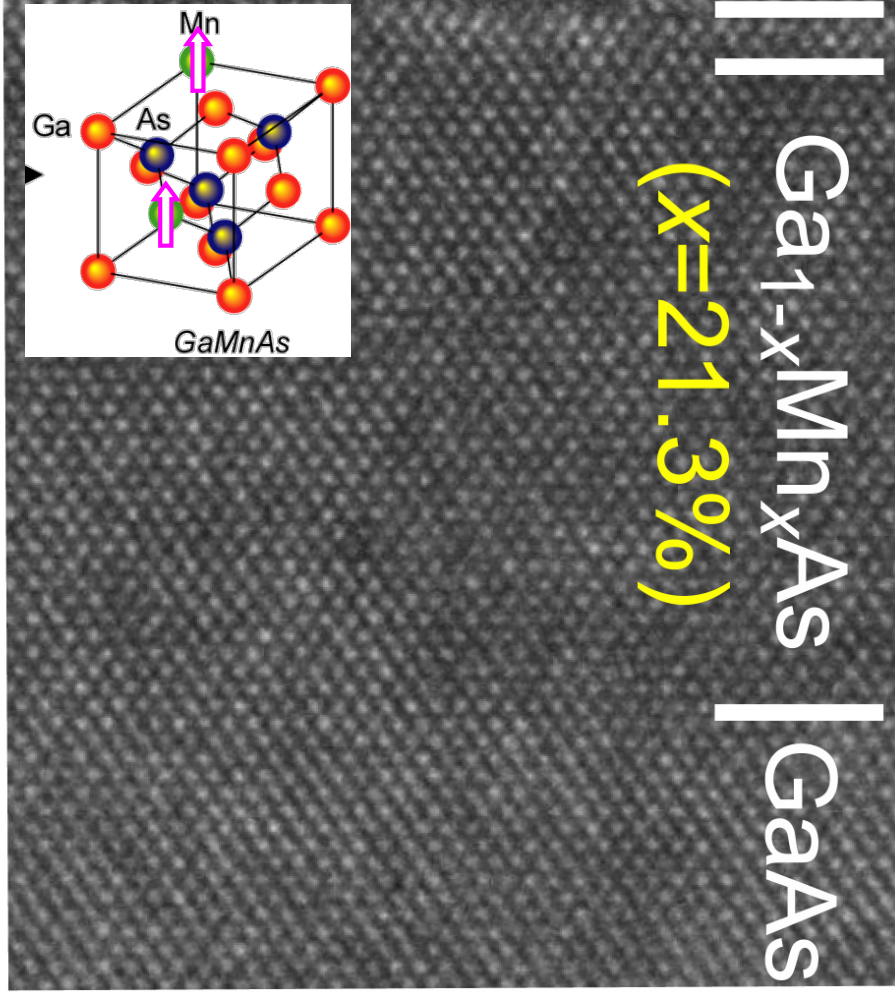
Heavily Mn-doped $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ ($x=12 - 21\%$)

10 nm-thick, annealed at 150-190°C



10 nm

S. Ohya, K. Ohno, M. Tanaka, APL(2007)

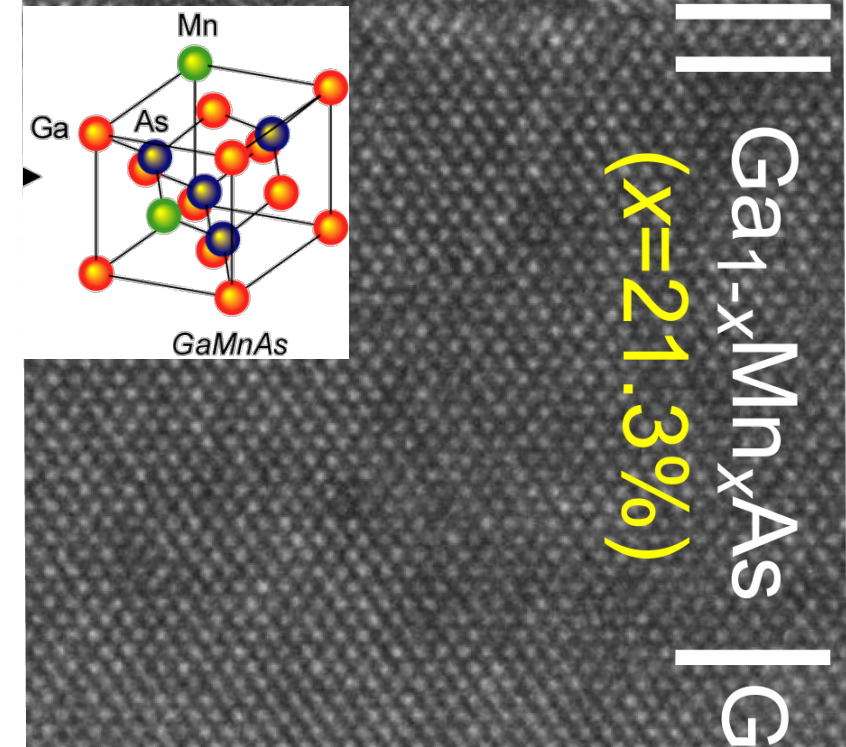
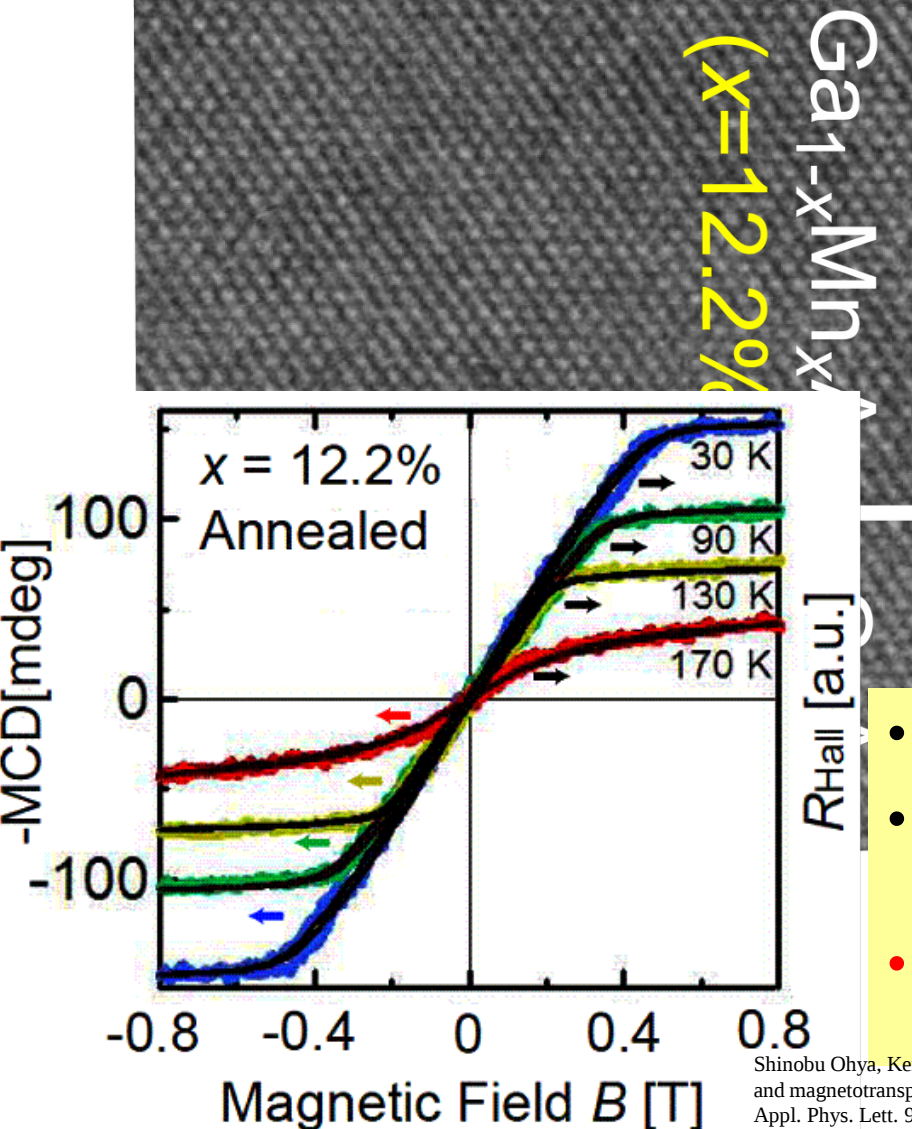


10 nm

Heavily Mn-doped $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ ($x=12 - 21\%$)

10 nm-thick, annealed at 150-190°C

S. Ohya, K. Ohno, M. Tanaka, APL(2007)



- 閃亜鉛鉱型結晶構造
- 磁気光学効果、ホール効果、磁化測定
→ **intrinsicな強磁性半導体**
- 低温長時間の空气中アニール → T_c は 172.5 K まで向上**

Shinobu Ohya, Kenichi Ohno, and Masaaki Tanaka "Magneto-optical and magnetotransport properties of heavily Mn-doped GaMnAs" Appl. Phys. Lett. 90, 112503 (2007); 112503-3 FIG. 2. <http://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.2713176>

III-V族ベース強磁性半導体の強磁性転移温度 T_C

(InAs, GaAs + Mn = 正孔誘起の強磁性を示す半導体)

InMnAs	$\sim 7 \text{ K}$	$\frac{300 \text{ K}}{T_C} = 43$	(1991, IBM)	* Our data
InMnAs	35 K		(1993, IBM)	
InMnAs	50 K		(2001, Tokyo Inst. Tech)	
GaMnAs	60 K		(1996, Tohoku Univ.)	
GaMnAs	55 - 60 K		(1996-7, Univ. of Tokyo)*	
GaMnAs	110 K		(1998, Tohoku Univ.)	
GaMnAs	140-150 K		(2002, Nottingham, Pennsylvania)	
GaMnAs	160 K		(2002, Tohoku Univ.)	
GaMnAs	173 K	$= 1.7$	(2004, Nottingham, 2007, Univ. Tokyo*)	
GaMnAs	200 K	$= 1.5$	(2010, Chinese Academy Science)	
InGaMnAs	$\sim 30 \text{ K}$		(2001, Univ. of Tokyo)*	
InGaMnAs	$\sim 110 \text{ K}$		(2001, Tokyo Inst. Tech)	
InGaMnAs	$\sim 130 \text{ K}$		(2003, Univ. of Tokyo)*	

Mn- δ -doped GaAs/p-AlGaAs

UTokyo Online Education	172 K	$= 1.7$	(2003, Univ. of Tokyo)*
学術俯瞰講義 2017			
田中雅明 CC BY-NC-ND	250 K	$= 1.2$	(2005, Univ. of Tokyo)*

III-V族、II-VI族、IV族ベースの 磁性半導体で高い T_c を得るためには...

- 適切な材料選択: ホストと磁性元素の組み合わせ
- 結晶の品質を良好に保つ(欠陥を減らす)
- 磁性元素(Mn, Fe...)の濃度を増やす
- 超薄膜、 δ -doping、スピノーダル分解...
- III-V族ではキャリア(正孔)濃度を増やす
- 適切な試料構造、ヘテロ構造など
- 成長後の低温アニール(→格子間Mnを減らす)

■
■
■

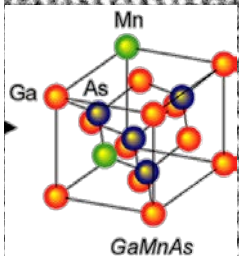
半導体+磁性・スピンの機能をもつ材料

本グループで
作製・研究実績

III-V族強磁性混晶
半導体・ヘテロ構造

p-type

GaMnAs
(Mn21%)



GaAs

PRL2010, Nat Phys.2011, Nat
Comm.2016, Nat Comm.2017

プロトタイプ強磁性半導体
様々な量子物性デバイス研究

IV族強磁性混晶半
導体・ヘテロ構造

p-type

GeFe
(Fe9.5%)

Ge

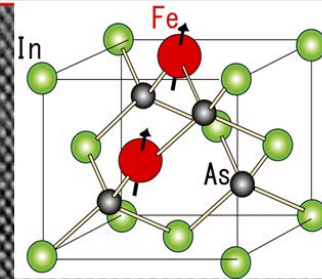
PRB2014, JAP2014, SR2016,
APEX2016, PRB2017

室温強磁性ドメインの
存在を発見 Sci Rep 2016

CMOSと整合性の良いIV族
で初めてトンネル磁気抵抗
効果を実現 APEX 2016

(Fe添加)狭ギャップ強磁性
半導体とヘテロ構造

$(\text{In}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{As}$
n-type



5 nm

APL2012, APR2014, PRB2015, PRB(R)2015,
APL2016(注目論文), Nat Comm.2016

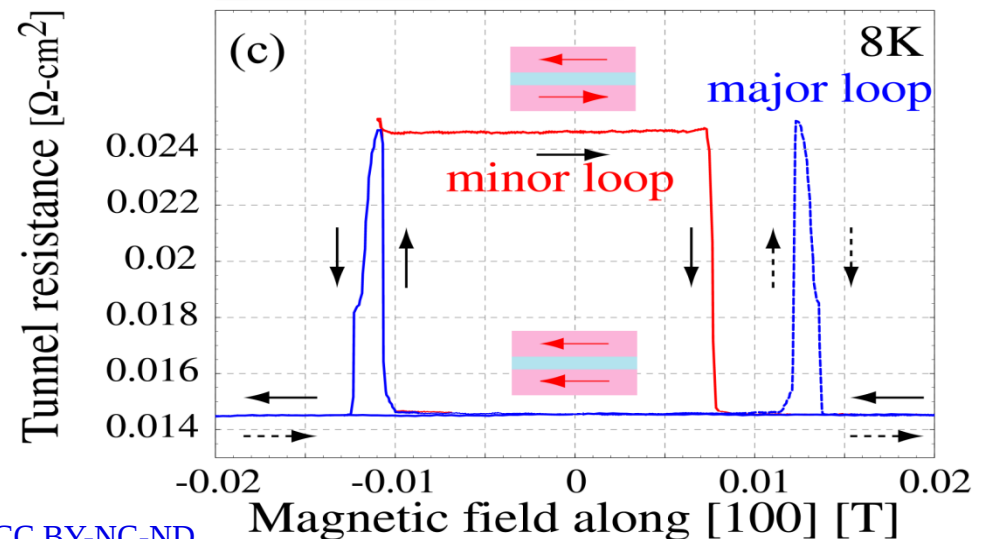
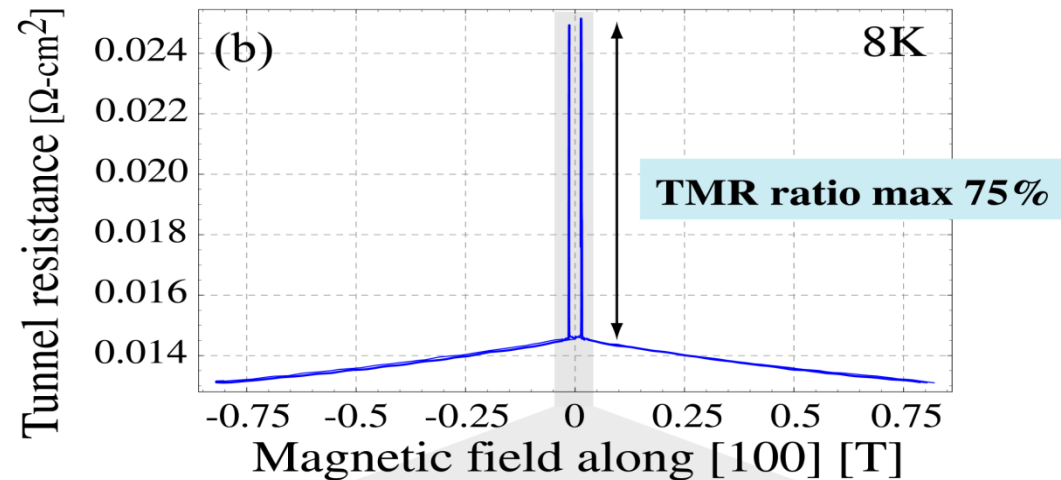
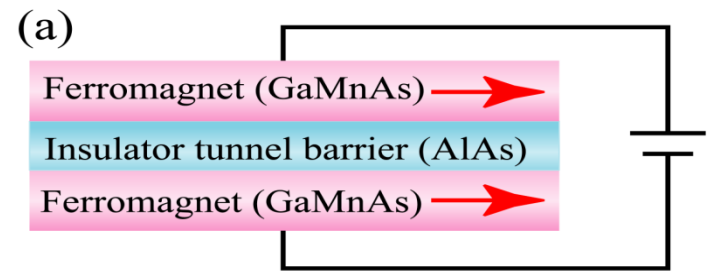
$(\text{In},\text{Fe})\text{As}$: n型キャリア誘起強磁性、
波動関数工学による電氣的磁性制御
p型(Ga,Fe)Sb、n型(In,Fe)Sb :
室温以上の高いキュリー温度を実現
($T_C=340\text{K}$) APL Feature Article

強磁性半導体ヘテロ接合 における大きなTMR

強磁性半導体ヘテロ構造により、最大75%の大きなトンネル磁気抵抗効果(TMR)を実現

Hayashi, Tanaka, JCG (1999);
M. Tanaka and Y. Higo,
Phys. Rev. Lett. (2001).

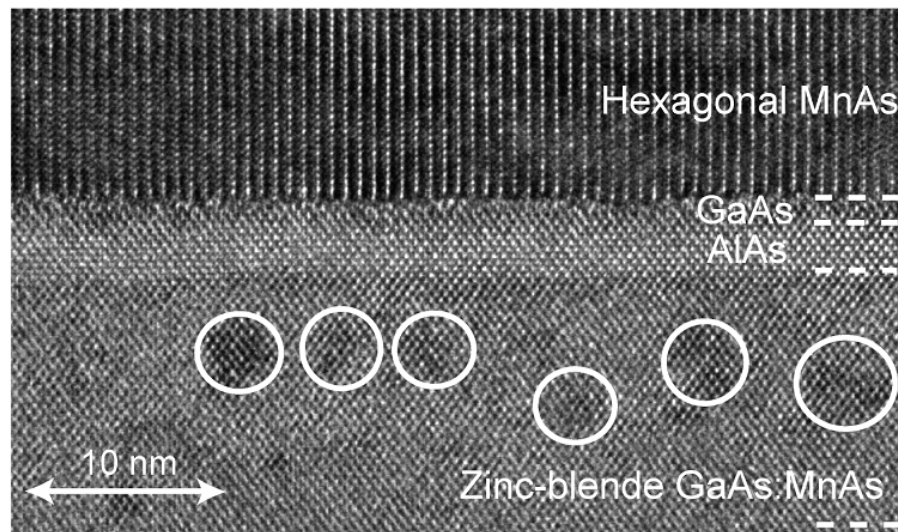
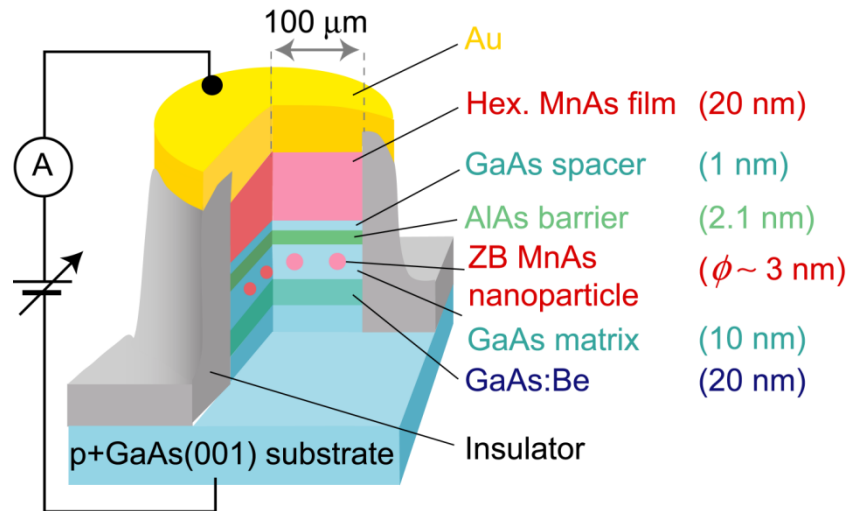
- エピタキシャル・単結晶
- 高いTMR比
- バンドエンジニアリング
- 半導体デバイスとの整合性が良い



M. Tanaka and Y. Higo, "Large Tunneling Magnetoresistance in GaMnAs /AlAs /GaMnAs Ferromagnetic Semiconductor Tunnel Junctions"
Phys. Rev. Lett. 87, 026602
026602-2 FIG. 1.(c), the magnetic field was applied along the 100 axis in the plane.
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.87.026602>

スピントロニクスの新展開: 静磁場による起電力(スピン起電力)の発見と超巨大磁気抵抗効果(>100,000%)の実現

閃亜鉛鉱型 MnAs 微粒子を含む磁気トンネル接合素子



Pham Nam Hai Shinobu Ohya, Masaaki Tanaka et al. "Electromotive force and huge magnetoresistance in magnetic tunnel junctions"

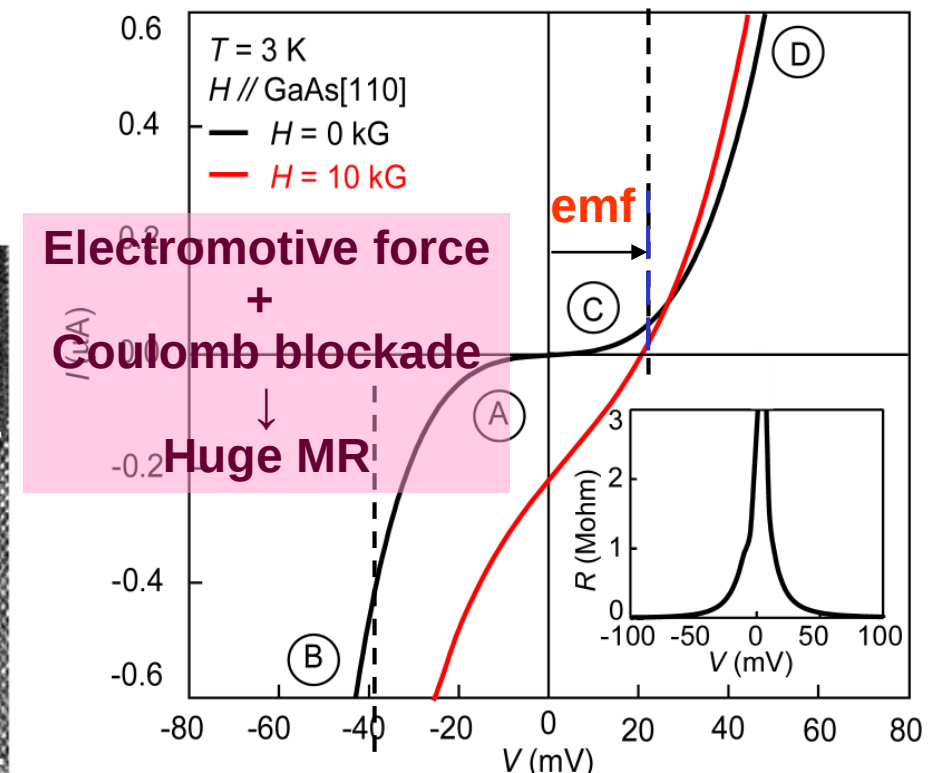
Nature 458, 489–492 (26 March 2009)

p. 489 Figure 1 Device structure.

p. 490 Figure 2 Transport characteristics of an MTJ. a, Current–voltage (I–V) characteristics of a 200-nm-diameter MTJ

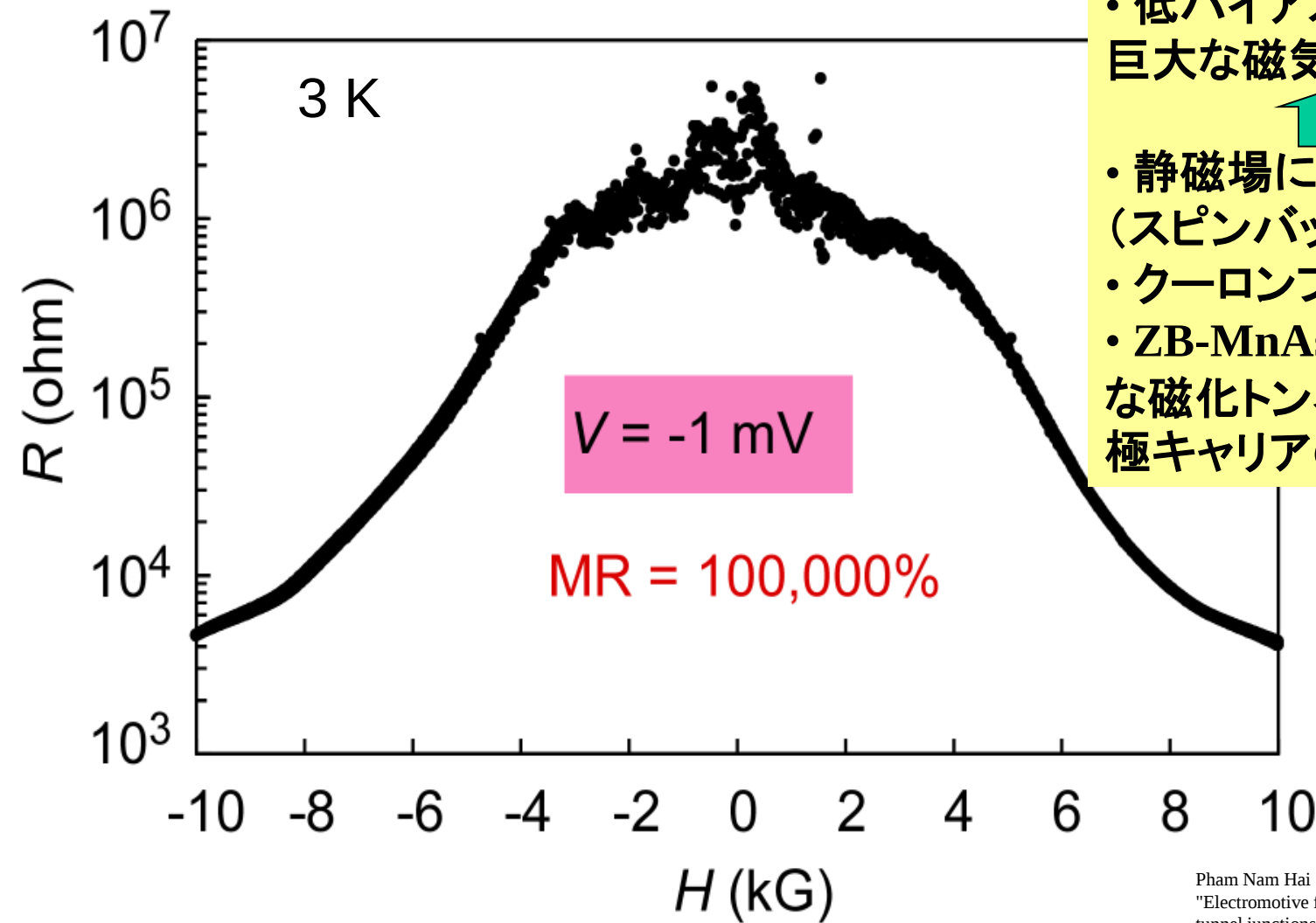
<https://www.nature.com/articles/nature07879>

I-V characteristics



P.N. Hai, S. Ohya, M. Tanaka et al., Nature 458, 489 (2009).

Huge Magnetoresistance ($\sim 100,000\%$)



• 低バイアス($V \rightarrow 0 \text{ mV}$)で
巨大な磁気抵抗



• 静磁場による起電力効果
(スピンバッテリー)

• クーロンブロッケード

• ZB-MnAs微粒子の巨視的
な磁化トンネリング+スピン偏
極キャリアのトンネリング

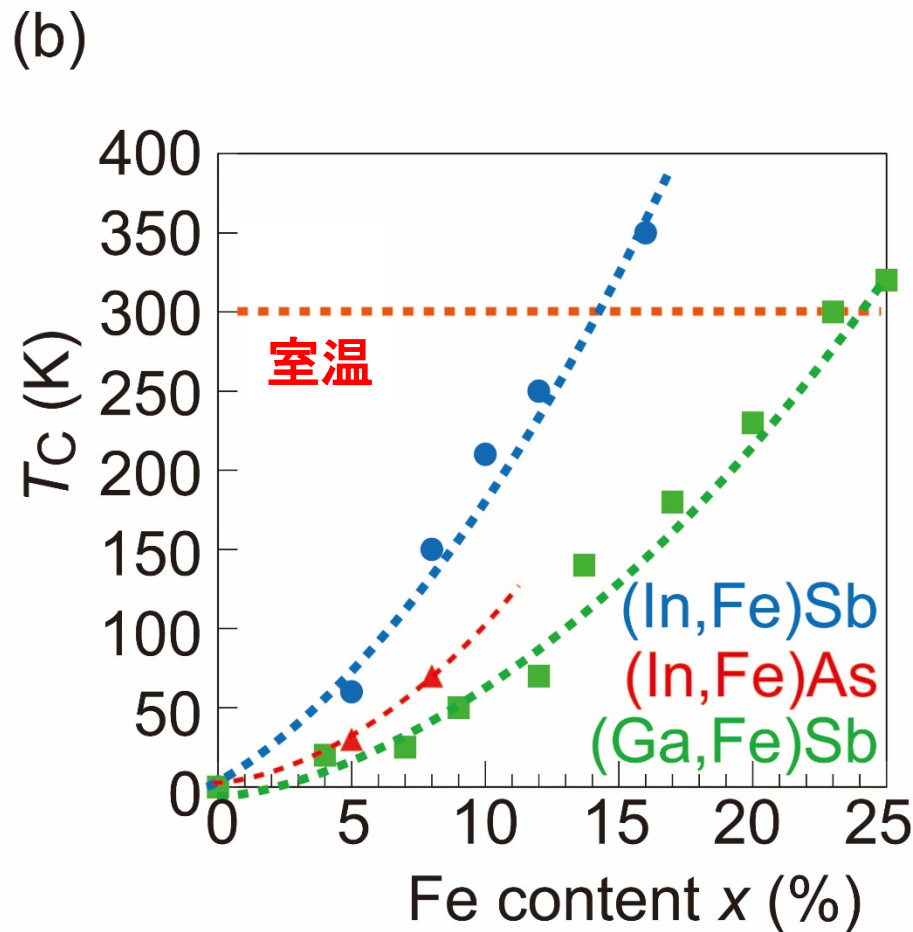
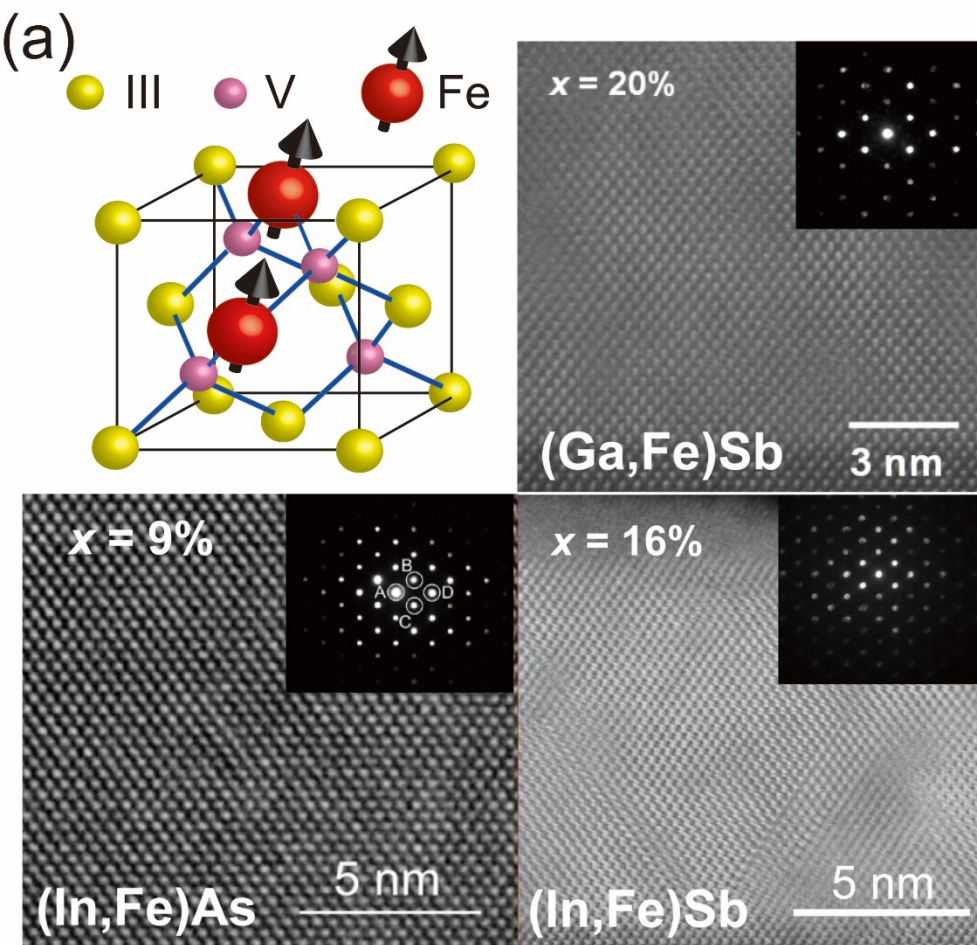
P.N. Hai et al.
Nature 458,
489 (2009).

Jullier model $\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{Hex-MnAs}} = 0.5 \\ P_{\text{ZB-MnAs}} = 1 \end{array} \right.$

$\longrightarrow \text{TMR}_{\text{Jullier}} = 200\% \ll \text{MR}_{(\text{exp})}$

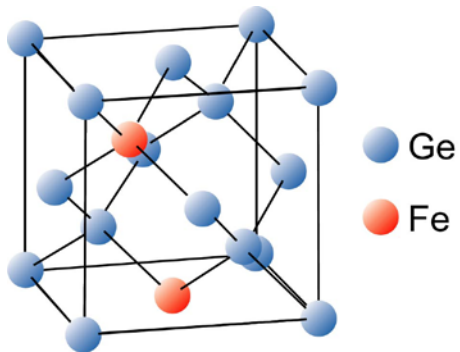
Pham Nam Hai Shinobu Ohya, Masaaki Tanaka et al.
"Electromotive force and huge magnetoresistance in magnetic
tunnel junctions"
Nature 458, 489–492 (26 March 2009)
p. 491 Figure 3 Huge magnetoresistance. b
<https://www.nature.com/articles/nature07879>

Feベース強磁性半導体: $(\text{III}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{V}$



- 閃亜鉛鉱型結晶構造
- 真性の強磁性混晶半導体
- バンド構造も閃亜鉛鉱型

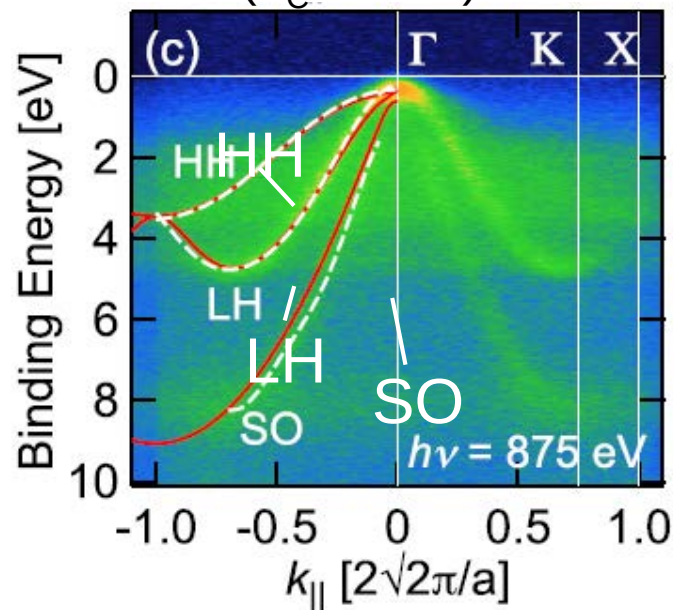
- 強磁性転移温度 T_C はFe濃度 x の増加とともに上昇 → 室温を超える
- InFeSb と InFeAs はn型
- GaFeAs はp型



IV族強磁性半導体 GeFe

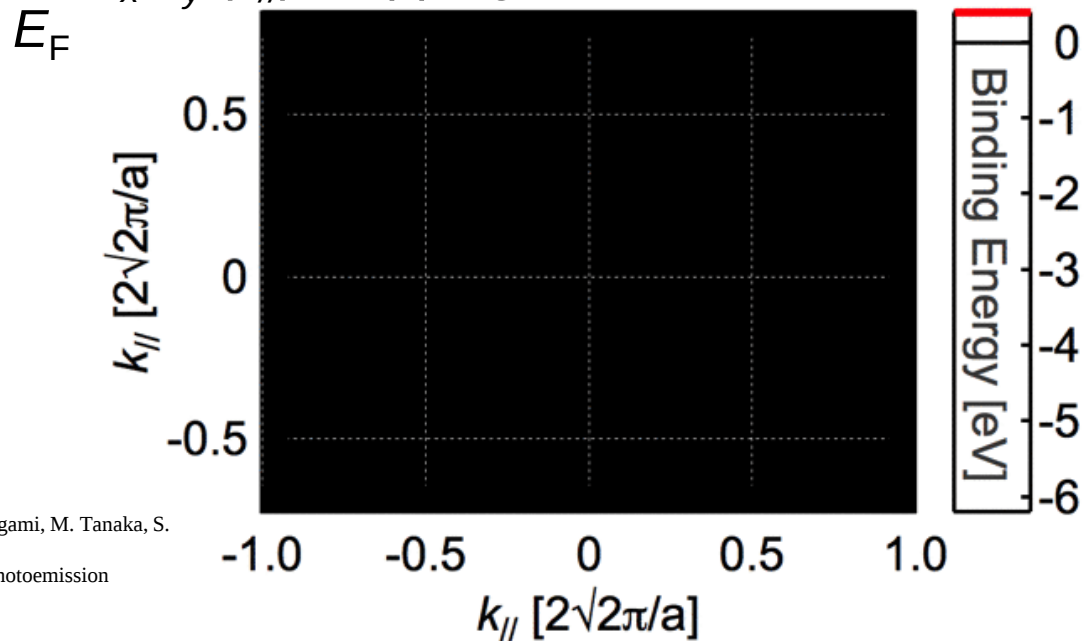
- 非磁性半導体GeにFeを数%～20%以上添加
- ダイヤモンド型結晶構造を維持した強磁性半導体
- T_C は最大210 K、局所的には室温強磁性領域もある
- 確立されたSi, Geデバイス技術と整合性が良い

Ge_{1-x}Fe_x (x=0.065) のバンド構造
($T_C=100$ K)



GeFe was grown by Y. K. Wakabayashi (Tanaka-Ohya Lab)
ARPES data were analyzed by S. Sakamoto (Fujimori Lab)

k_x - k_y ($k_{//}$) mapping Phys. Rev. B **95**, 075203 (2017).



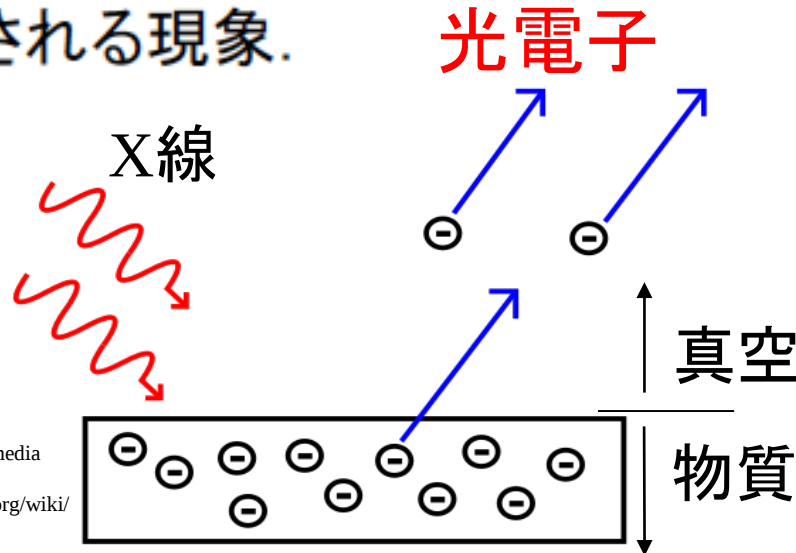
S. Sakamoto, Y. K. Wakabayashi, Y. Takeda, S.-i. Fujimori, H. Suzuki, Y. Ban, H. Yamagami, M. Tanaka, S. Ohya, and A. Fujimori,
"Origin of robust nanoscale ferromagnetism in Fe-doped Ge revealed by angle-resolved photoemission spectroscopy and first-principles calculation"
Phys. Rev. B **95** (2017), FIG. 2
<https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.95.075203>

- 価電子帯バンド構造は、非磁性半導体Geとほぼ同じである
- 価電子帯上端より約0.3 eV上の禁制帯中にフェルミ準位 E_F がある
→ 不純物帯伝導モデルが成り立つ、二重交換相互作用による強磁性か(?)

X線(放射光)による電子状態・化学状態の解析

光電効果

物質に光を照射すると電子が物質の表面から放出される現象.



by Wolfmankurd from Wikimedia Commons ref. 20171213
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photoelectric_effect.svg
CC BY-SA 3.0

H. R. Hertz (1851-1891)が発見.

A. Einsteinが「光量子仮説」によりこの現象を説明し、1921年にノーベル賞を受賞.



Photo from Wikipedia Commons

H. R. Hertz

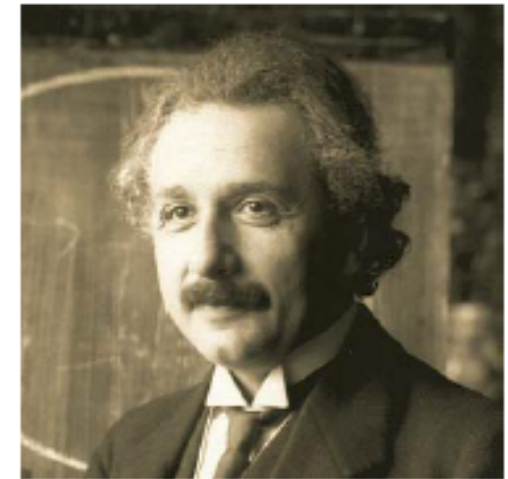


Photo from Wikipedia Commons

A. Einstein

物質を構成する電子を調べることが可能

入射光X線と放出される光電子のエネルギーと運動量を測ることに
よって、物質内部の電子のエネルギーと運動量(バンド構造)がわかる

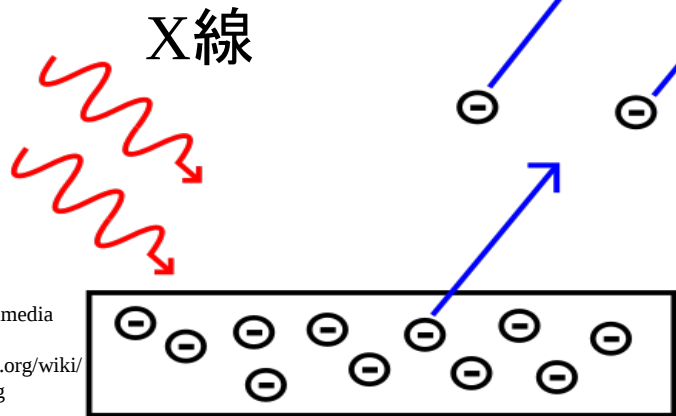
X線(放射光)による電子状態・化学状態の解析

光電効果

Photo by Koji101 from Wikimedia Commons ref. 20171212
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:SPRING-8.JPG>
CC BY 3.0

物質に光を照射すると電子が物質から放出される現象.

光電子



by Wolfmankurd from Wikimedia Commons ref. 20171213
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photoelectric_effect.svg
CC BY-SA 3.0



H. R. Hertz (1851-1891)が発見.

A. Einsteinが「光量子仮説」によりこの現象を説明し、1921年にノーベル賞を受賞.

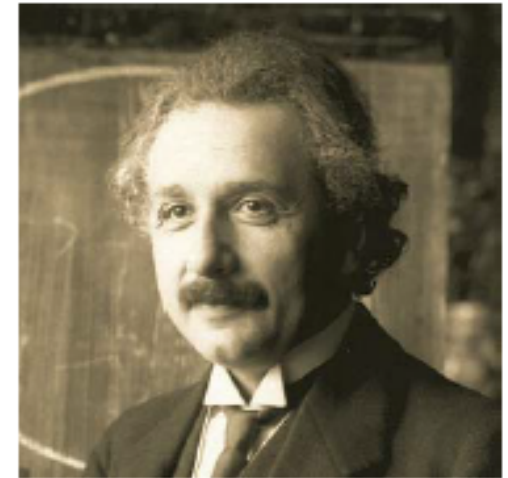


Photo from Wikipedia Commons

A. Einstein

物質を構成する電子を調べることが可能
入射光X線と放出される光電子のエネルギーと運動量を測ることによって、物質内部の電子のエネルギーと運動量(バンド構造)がわかる

強磁性半導体の機能

主にIII-V族ベースの強磁性半導体(InMnAs, GaMnAs)で実現

- さまざまなヘテロ構造による物性制御
- 歪みによる磁気異方性の制御
- GMR、スピンバルブ効果
- TMR、スピン依存共鳴トンネル効果
- 高いスピン偏極率(理想的にはハーフメタル)
- スピン注入磁化反転、電流駆動磁壁移動
- スピンLED
- スピンフォトダイオード
- キャリア(正孔)誘起強磁性
 - ゲート電圧による磁性制御
 - 光照射による磁性制御

三端子スピンデバイス: スピン依存伝導をもつトランジスタ

スピン依存伝導(TMR, GMR...)デバイス

強磁性金属、強磁性半導体、ハーフメタル

+

トランジスタ: スイッチ、増幅、回路設計...

シリコン、化合物半導体



スピン依存伝導をもつトランジスタ

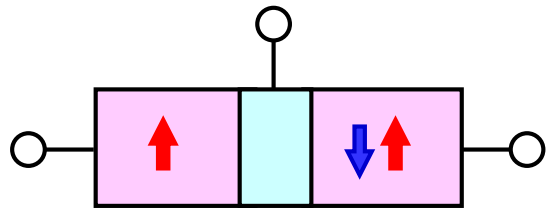
高密度不揮発性メモリ、再構成可能な論理回路

Logic in memory, Reconfigurable computing...

＜スピントロニクス研究のoutputの1つ＞

M. Tanaka and S. Sugahara, IEEE Trans. Electron Dev. Vol. 54, No.5, 961 (2007).
Invited paper, Special Issue on Semiconductor Spintronics

スピントランジスタ(概念)

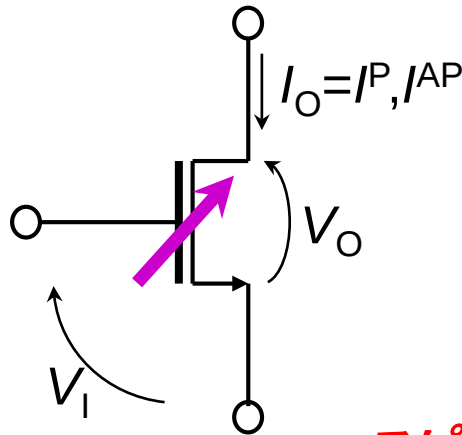


磁気抵抗素子 (GMR, TMR)

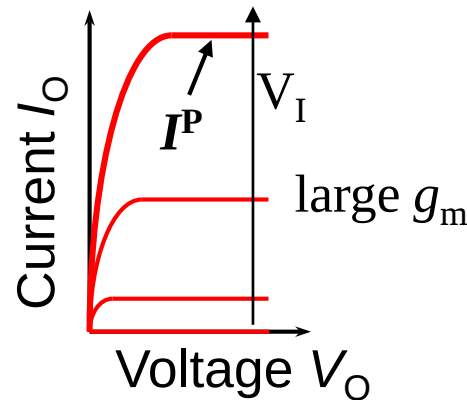
- 三端子、トランジスタ動作
- スピン依存伝導特性

大磁気電流(磁気抵抗)比 $\gamma_{MC} = (I^P - I^{AP}) / I^{AP}$

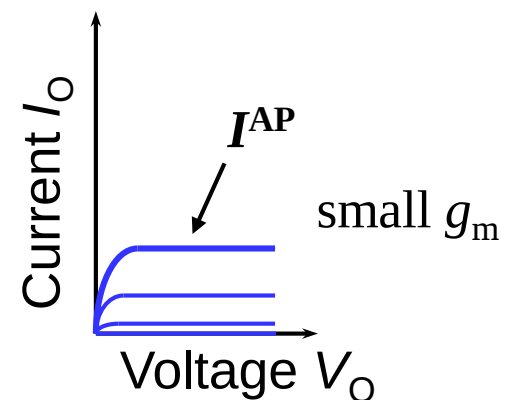
→ スピントランジスタ



平行磁化



反平行磁化

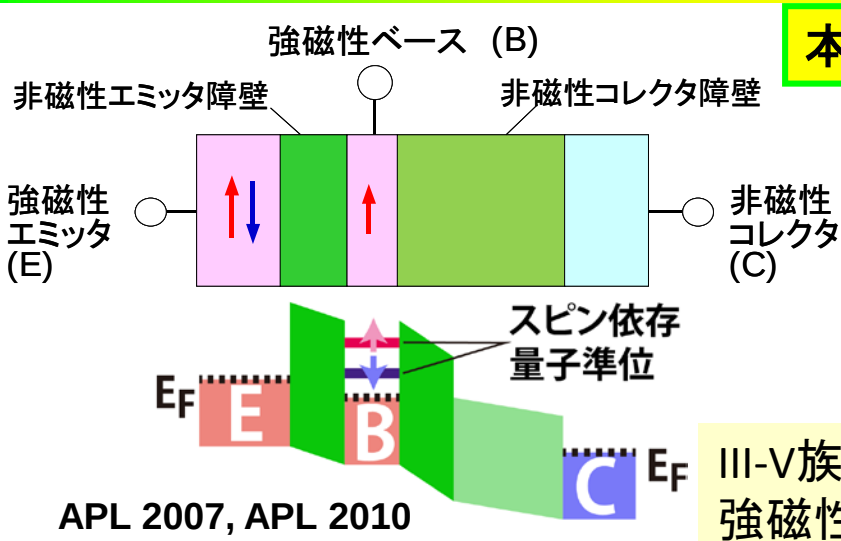


スピン(磁化)依存伝達(出力可変)特性をもつトランジスタ

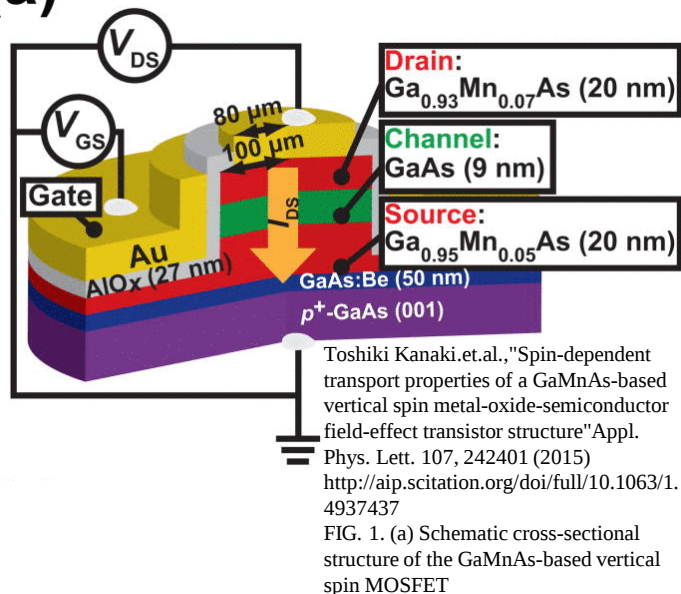
デバイス内部に含む2つの強磁性層の磁化の向き(平行磁化か反平行磁化か)によって、出力特性を不揮発的に変えることができる。

➡ **高密度不揮発性メモリ、ロジック(再構成可能論理回路)へ応用可能**

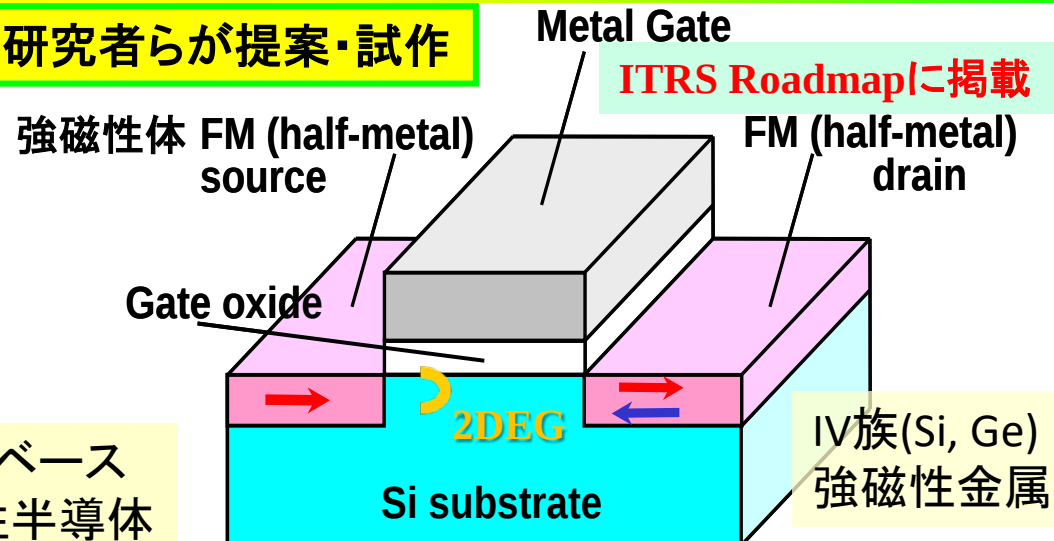
スピントランジスタの構造, 材料



(縦型)接合型スピントランジスタ
(a)



本研究者が提案・試作



(横型)スピンMOSFET

強磁性半導体ヘテロ構造を用いた縦型スピンMOSFET
を作製し、基本的動作を実証 (磁気電流比 $\gamma \sim 60\%$)

Appl. Phys. Lett. 107, 242401 (2015); Sci. Rep. 7, 5618 (2017).

さらなる高性能化が必要

← 量子効果を導入

• 磁気抵抗比 (磁気電流比 γ) を格段に向上 $>> 100\%$

← 量子井戸構造

• 高速・低消費電力の磁化制御 (磁化スイッチング)

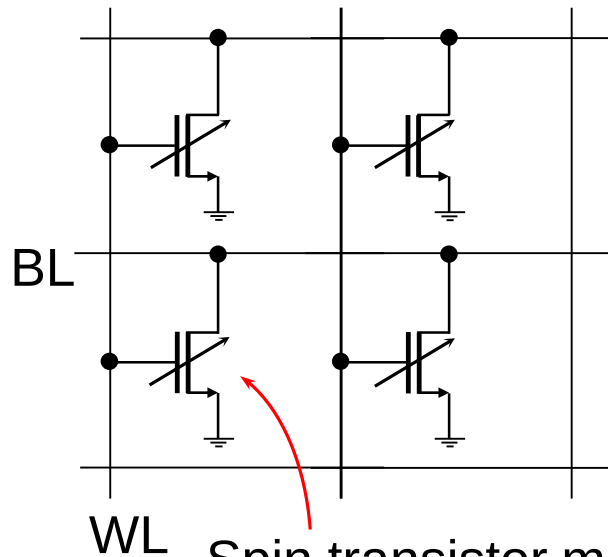
← 波動関数工学

スピントランジスタ: 集積回路への応用

Spin Transistors

- # Transistor operation + spin-dependent transport
(two or more transistors with different g_m)
- # New circuit architectures using spin-dependent output

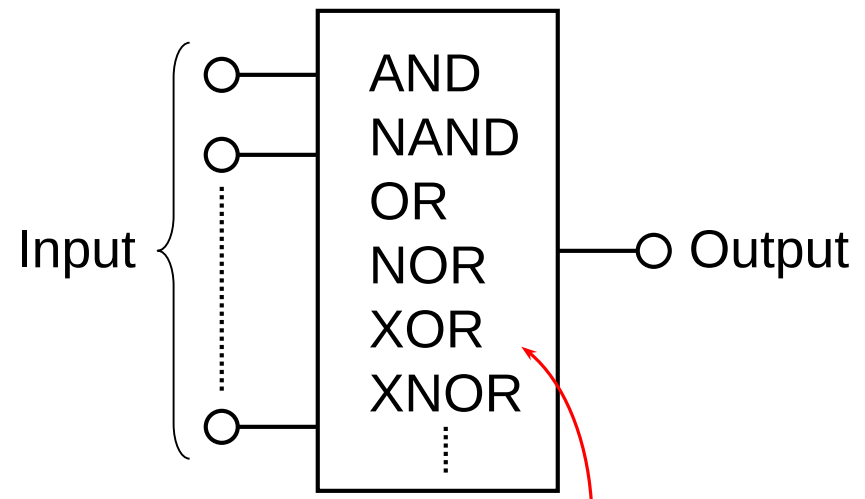
▪ MRAM



Spin transistor memory cell

M. Tanaka and S. Sugahara, "MOS-Based Spin Devices for Reconfigurable Logic"
IEEE Trans. Electron Dev. 54 (2007), 961-976 P. 967 Fig. 9. Nonvolatile memory cell using a single spin MOSFET
<http://ieeexplore.ieee.org/document/4160139/?reload=true>

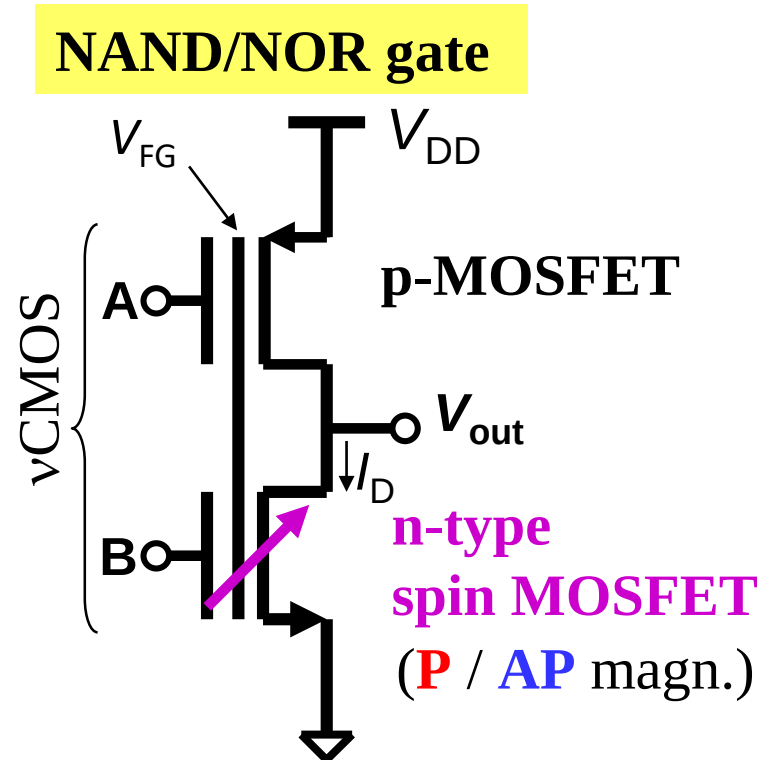
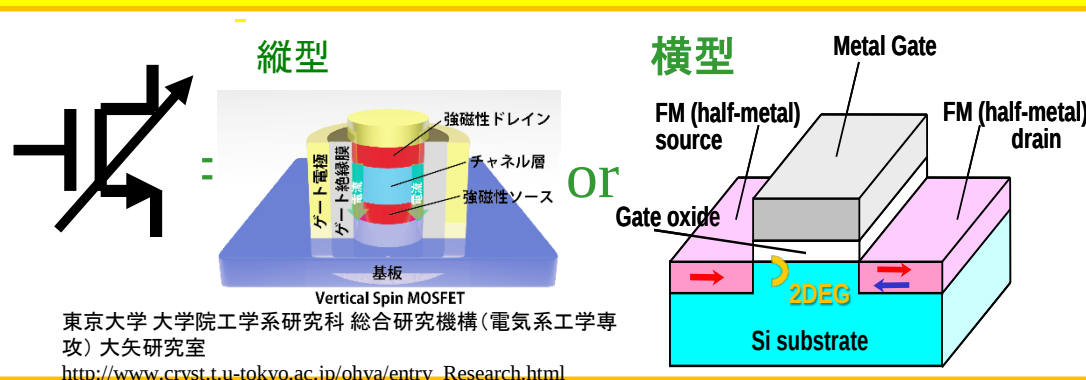
▪ Reconfigurable (reprogrammable) logic



Spin transistor logic

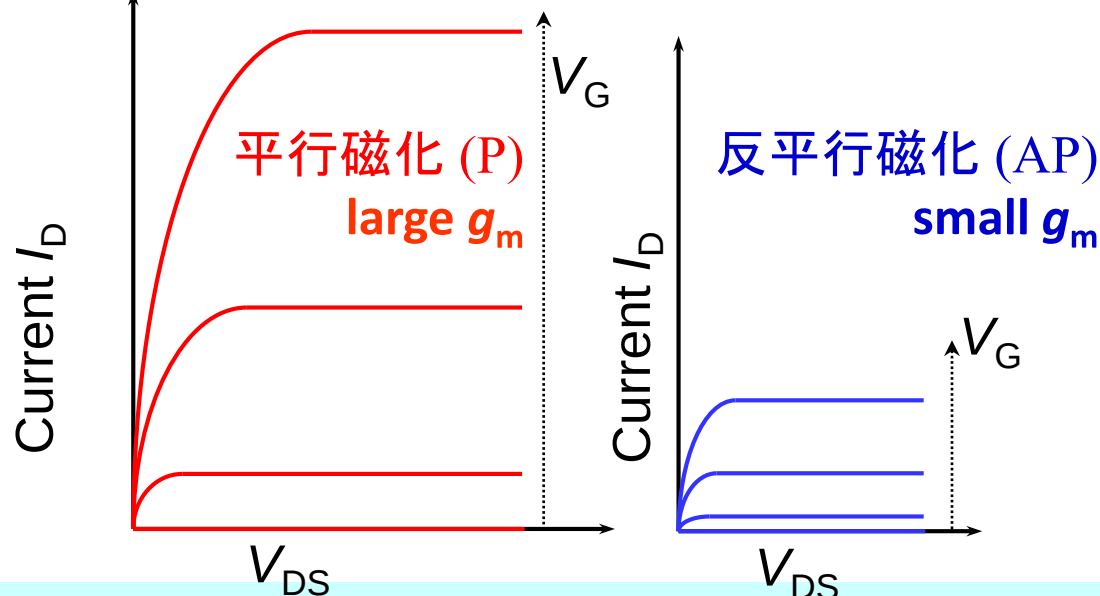
(応用例1) *Spin-MOSFET*を用いた再構成可能な論理回路

スピントランジスタでは、出力特性 (I_D , g_m) が**平行磁化**か**反平行磁化**かに依存し、変えることができる
= 出力可変トランジスタ



		V_{out}	
A	B	P	AP
0	0	1	1
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	0	0

NOR NAND 53

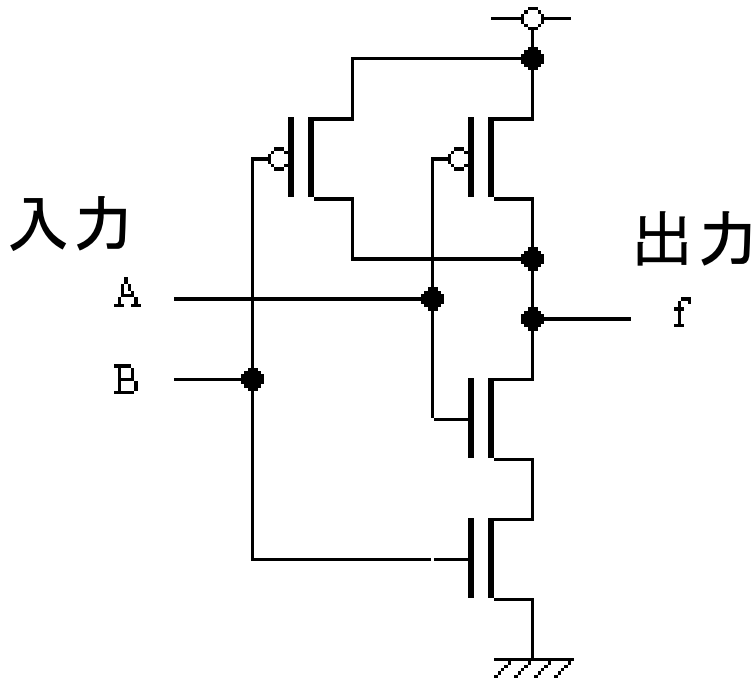
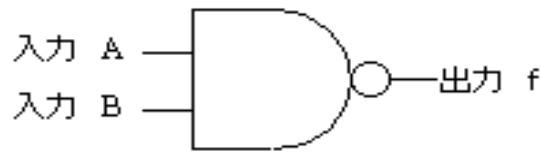


T. Matsuno, S. Sugahara, and M. Tanaka, JJAP. **43**, 6032 (2004).

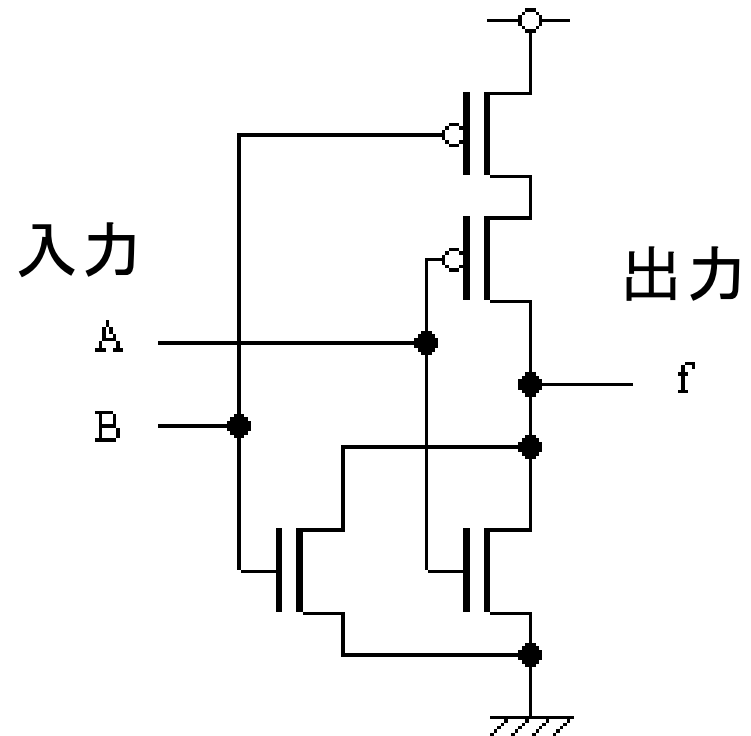
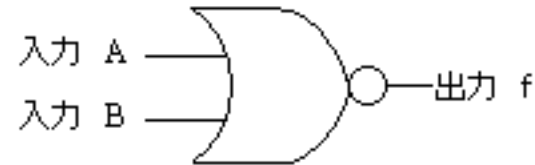
M. Tanaka and S. Sugahara (invited paper), IEEE TED **54**, 961 (2007).

通常のNAND, NORゲート

NAND



NOR

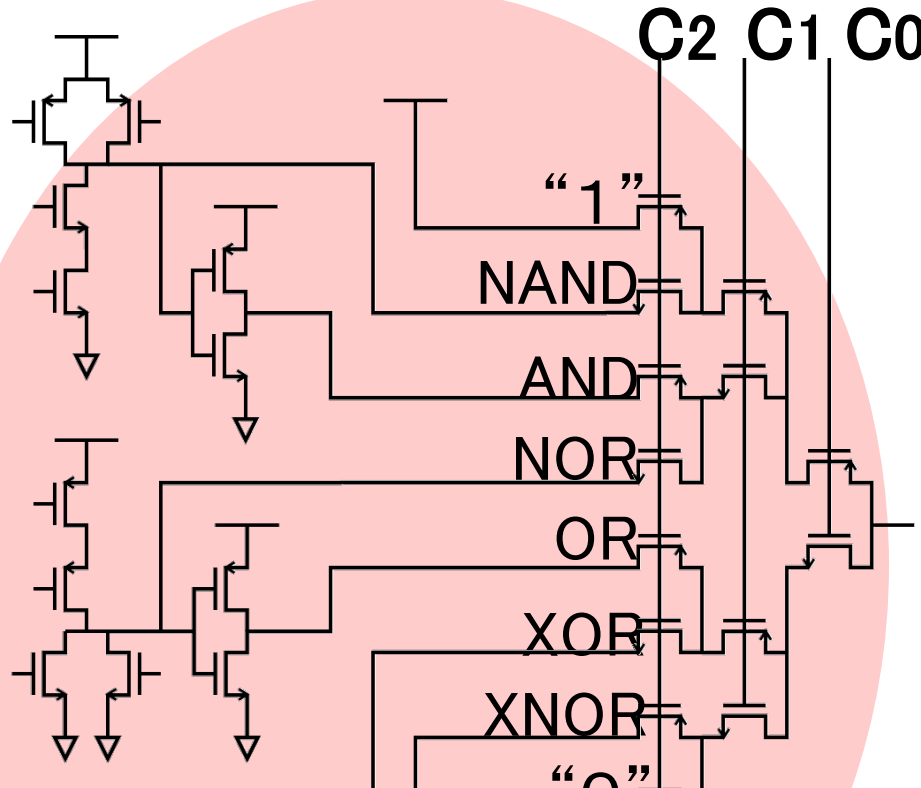


出典: 琉球大学情報工学科和田知久教授ウェブサイト
54

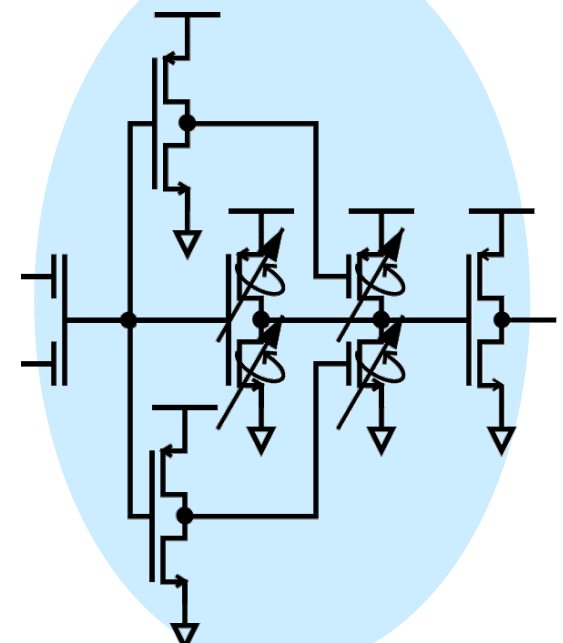
(応用例2) *Spin-MOSFET*を用いた再構成可能な論理回路

10Trですべての2入力対称関数*が再構成可能な論理回路を設計

* $f(A+B) = \text{AND, OR, XOR, NAND, NOR, XNOR, "all 0", "all 1"}$



T. Matsuno, S. Sugahara, and M. Tanaka, JJAP. **43**, 6032 (2004).
M. Tanaka and S. Sugahara (*invited*), IEEE TED **54**, 961 (2007).



低消費電力、高集積化にも貢献

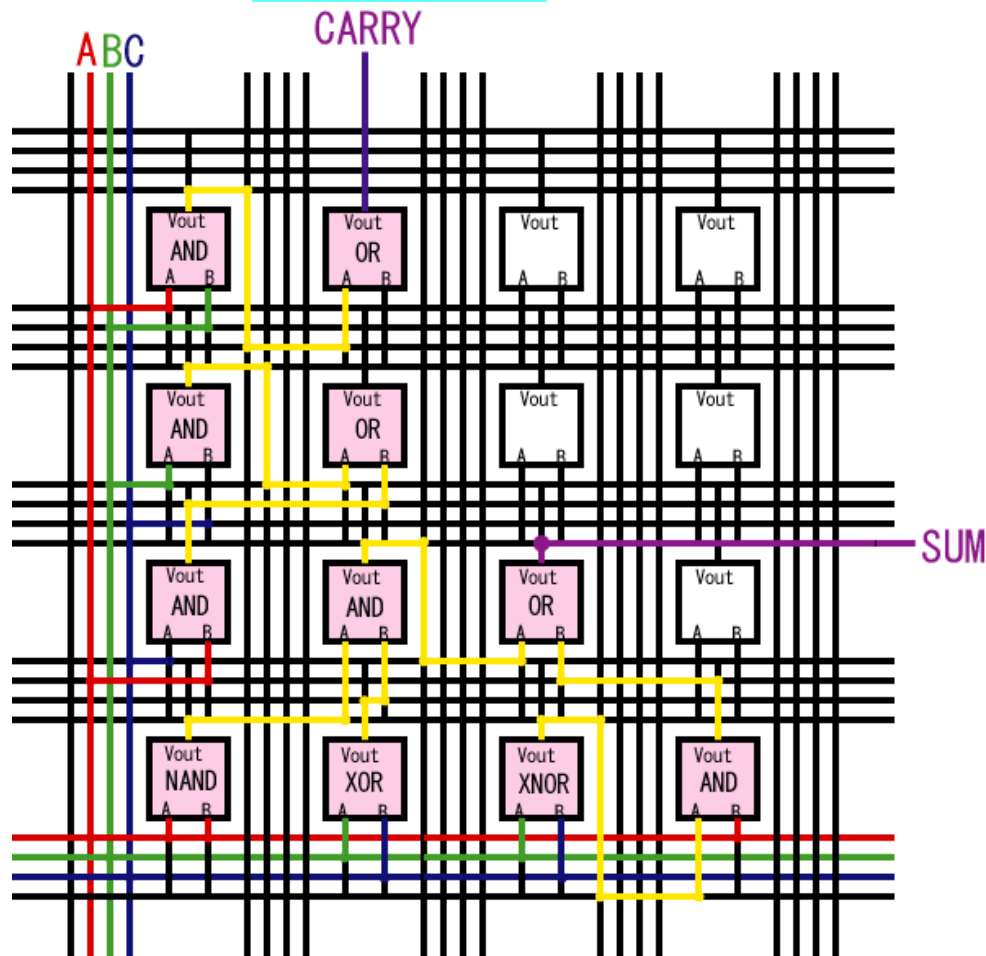
パワーゲーティングを使えば消費電力をさらに大幅に低減

34-40Tr
Conventional CMOS

10Tr
Spin-MOSFETs

回路の例

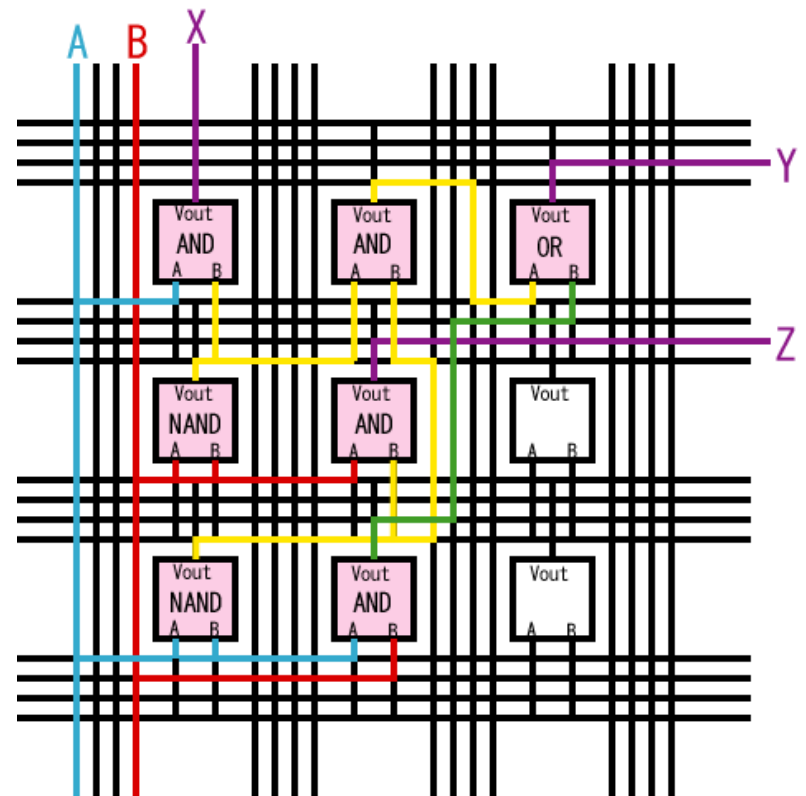
全加算器



$$\text{CARRY} = AB + BC + CA$$

$$\text{SUM} = A \oplus B \oplus C$$

比較回路



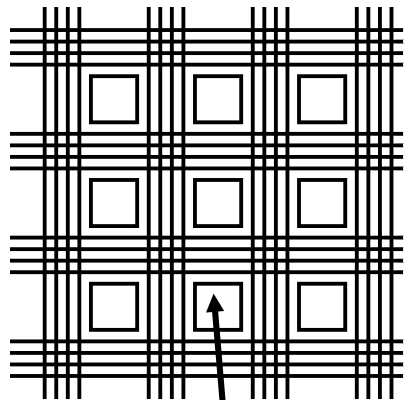
$$X = A\bar{B} \quad (A > B \text{ のとき "1"})$$

$$Y = AB + \bar{A}\bar{B} \quad (A = B \text{ のとき "1"})$$

$$Z = A\bar{A} \quad (A < B \text{ のとき "1"})$$

再構成可能な論理回路の応用

Photo by Hoenny from Wikimedia Commons ref.
20171213
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:%EC%95%8C%ED%85%8C%EB%9D%BC_%EC%82%AC%EC%9D%B4%ED%81%B4%EB%A1%A02_FPGA.jpg
CC BY-SA 3.0 **FPGA**



論理ブロック

Reconfigurable/Reprogramable logic devices

ユーザ側で機能を何度でもプログラムできるLSIチップ

再利用可能、納期が早い

- ・試作品
- ・多品種、少量の製品
- ・開発サイクルの短い製品の部品

● 論理ブロック部にスピンMOSFETを使う

▶ 従来のCMOS技術との整合性が良い

不揮発 → 外部メモリ不要

低消費電力

少素子数

省スペース

International Technology Road Map for Semiconductors (国際半導体技術ロードマップ): Emerging Research Devices

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました

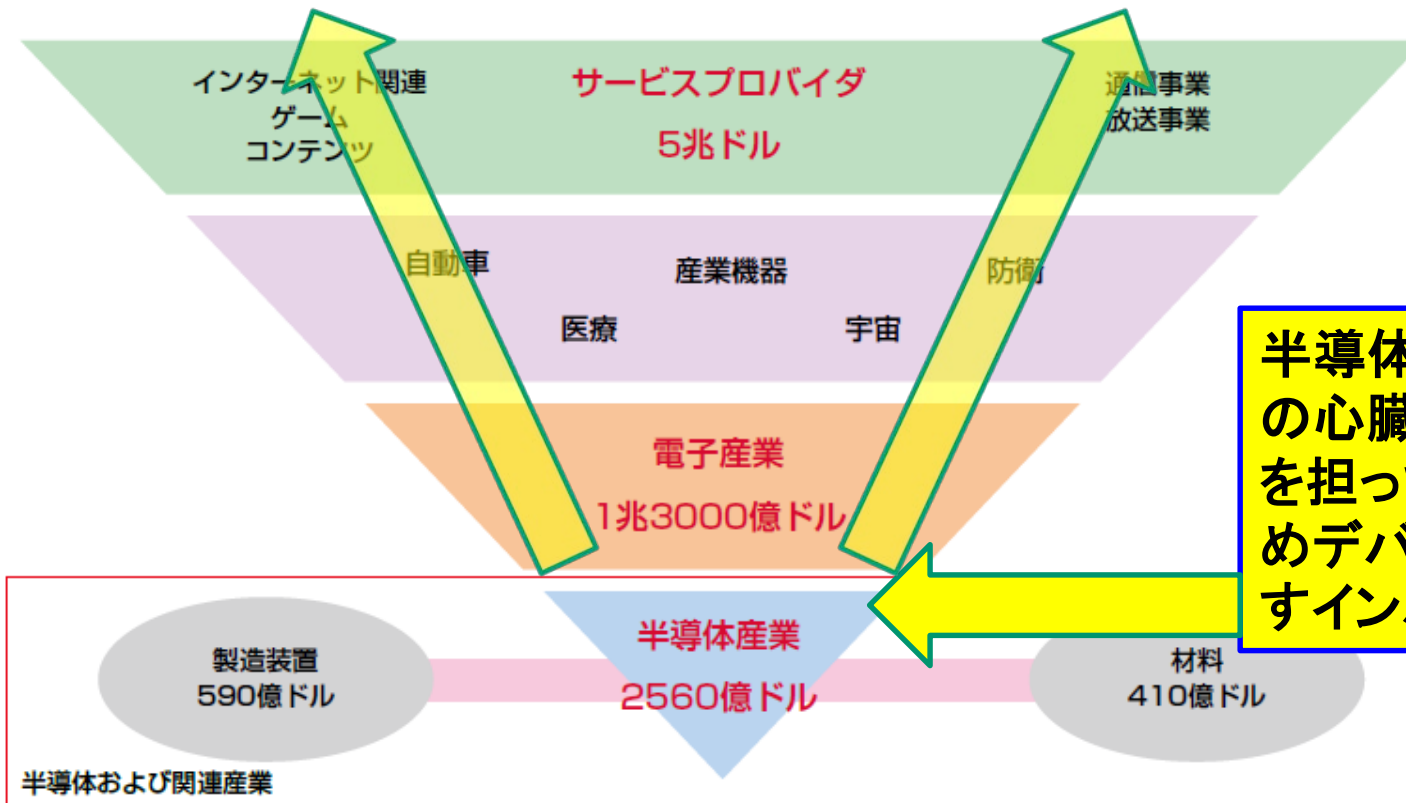
国際半導体技術ロードマップ

INTERNATIONAL TECHNOLOGY

ROADMAP FOR SEMICONDUCTORS

https://www.semiconductors.org/clientuploads/Research_Technology/ITRS/2005/ERD.pdf

Fig51



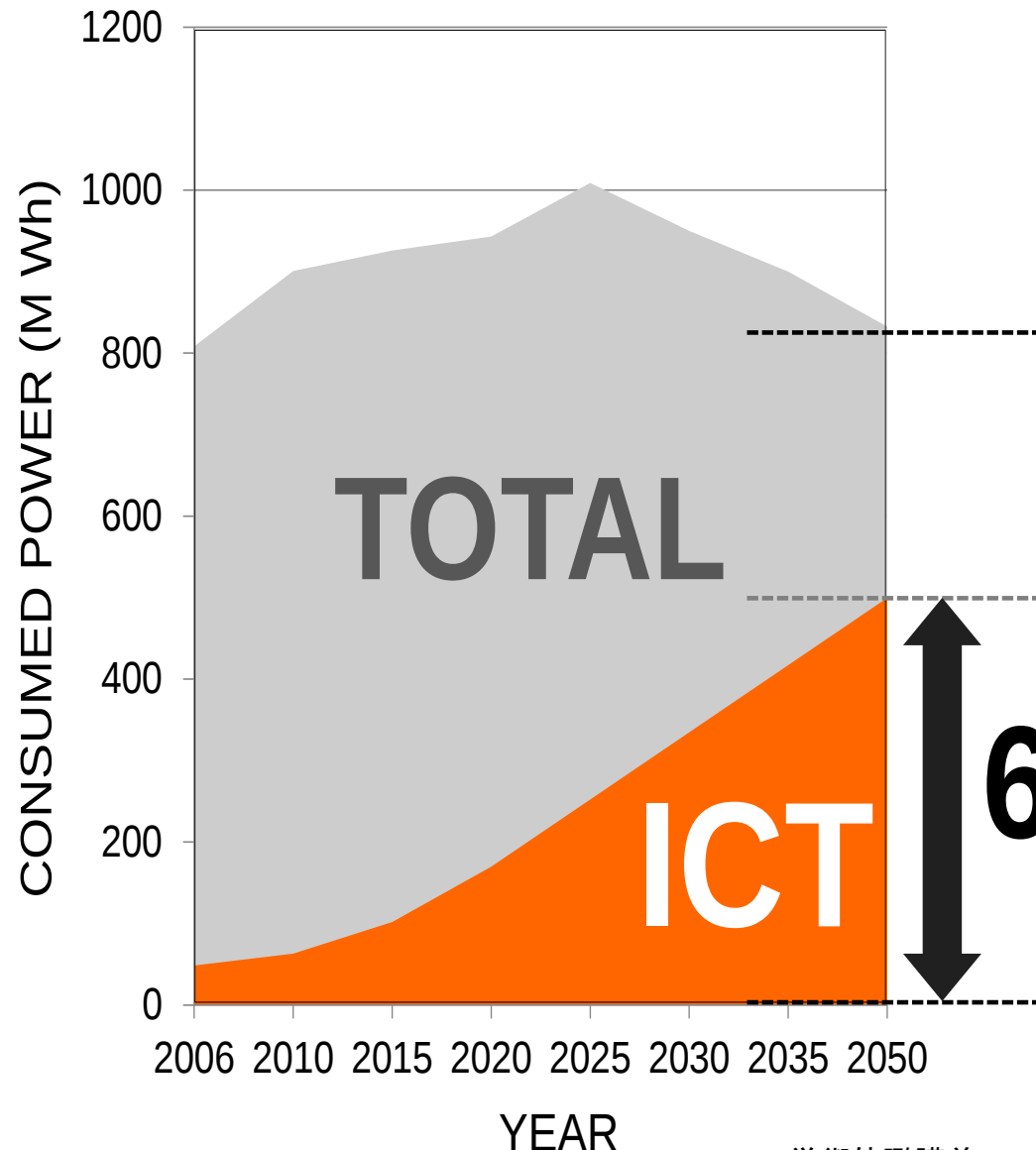
半導体産業はすべての産業の心臓部分となる知的財産を担っており、半導体をはじめデバイスの革新がもたらすインパクトは極めて大きい。

スピントロニクス
の
学術と技術が半導
体とエレクトロニク
スの革新に貢献

出典：F. Huang(WSC), Green IT International Symposium 2008 を基に作

JEITA/ICガイドブック①『よくわかる！半導体』
p. 8 半導体を支える産業
http://semicon.jeita.or.jp/book/docs/green_clean_semicon_1.pdf

急増する情報通信(ICT)機器の電力使用量 → 省エネルギーデバイスの必要性



- 現在、日本の情報通信(ICT)機器の電力使用量は、全電力使用量の6%程度
- 2030年に、**全電力量の約40%**
- 2050年に、**全電力量の約60%**に上ると予測される

スピントロニクスによる
省エネルギー・環境調和
型デバイスの必要性

出典: CEATEC JAPAN 2008 グリーンITシンポジウム
グリーンITイニシアティブの推進 資料より

今日のまとめ

■物質の磁性

- 原子の磁気モーメント
- 磁気モーメントが自発的にそろった状態が強磁性、高温になると常磁性になる
- 強磁性体(磁石)ではスピンによってバンド構造が分裂している
- 電子の流れ: 電流、スピン偏極電流、スピン流

■金属系スピントロニクス

- スピン依存伝導 (GMR, TMR) を利用したスピントロニクス素子はすでに使われ役に立っている
- GMR, TMR素子 → HDDのセンサ、不揮発性メモリ (MRAM)

■半導体スピントロニクス

- 半導体に磁性元素(Mn, Fe)を添加すると、条件がそろえば強磁性半導体になる。室温で強磁性を示す半導体も実現。
- トランジスタ+スピン依存伝導=スピントランジスタ → 柔軟な情報処理や低消費電力デバイスとして期待。

全体(3回分)のまとめ

物質の理解を3段階に分けて示した。

基本となる学問は量子力学(統計力学)、物性物理学、化学

- 1) 原子の構造と周期律、分子
- 2) 原子から固体へ→バンド構造 金属、絶縁体、半導体の違い
- 3) 相互作用がある場合 例: 磁性と強磁性体

工学的応用として最もインパクトがある半導体デバイス

- トランジスタと集積回路の爆発的発展が社会を大きく変えてきた
- ムーアの法則: 微細化による高性能化→ 技術革新の源泉の1つ
しかし微細化の限界後はまだ見えていない ← 様々な研究が進行中

先端的研究の例

- 磁性と半導体に関係が深いスピントロニクス
- 様々な分野にまたがる横断的領域で学術的にも広く深い
- 応用上も重要、ポストムーア時代のキーテクノロジーになる可能性

物質科学とその応用分野には、面白くかつ重要なテーマが多数ある！