

# Spintronika teraz i tu

**Tomasz Dietl**

*Instytut Fizyki PAN  
Instytut Fizyki Teoretycznej UW*

**współpraca:**

*Maciej Sawicki et al.; Jacek Majewski et al. – Warszawa*

*Alberta Bonanni et al. – Linz*

*Hideo Ohno et al. – Sendai*

*Dieter Weiss et al. – Regensburg*

*Shinji Kuroda et al. – Tsukuba*

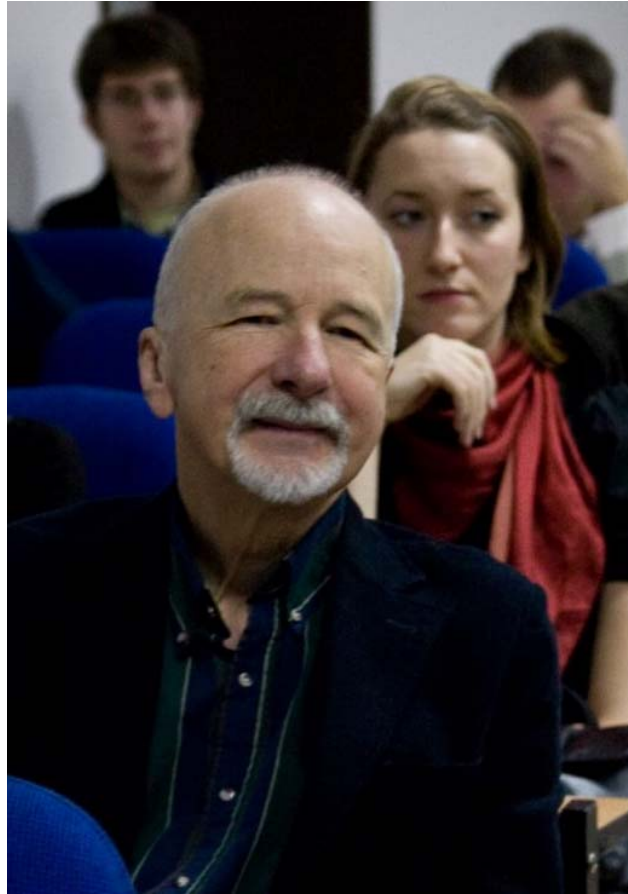
*Joel Cibert et al. – Grenoble*

*Bryan Gallagher et al. – Nottingham*

*Laurens Molenkamp et al. – Wuerzburg*

**projekty:** *FunDMS – ERC Advanced Grant*  
**sieć KE:** *SemiSpinNet Maria Curie action*  
*Fundacja Humboldta*





**Jan Gaj (1943-2011)**

GIANT EXCITON FARADAY ROTATION IN  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  MIXED CRYSTALS

J.A. Gaj

Institute of Experimental Physics, Warsaw University, Warsaw, Poland

and

R.R. Gałazka

Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland

and

M. Nawrocki

Institute of Experimental Physics, Warsaw University, Warsaw, Poland

*(Received 21 June 1977 by M. Balkanski)*

PHYSICAL REVIEW B 83, 094421 (2011)

**Effects of  $s$ ,  $p$ - $d$  and  $s$ - $p$  exchange interactions probed  
by exciton magnetospectroscopy in  $(\text{Ga},\text{Mn})\text{N}$** J. Suffczyński,<sup>1</sup> A. Grois,<sup>2</sup> W. Pacuski,<sup>1</sup> A. Golnik,<sup>1</sup> J. A. Gaj,<sup>1,\*</sup> A. Navarro-Quezada,<sup>2</sup>  
B. Faina,<sup>2</sup> T. Devillers,<sup>2</sup> and A. Bonanni<sup>2</sup><sup>1</sup>*Institute of Experimental Physics, Faculty of Physics, University of Warsaw, ul. Hoża 69, PL-00-681 Warszawa, Poland*<sup>2</sup>*Institut für Halbleiter- und Festkörperphysik, Johannes Kepler University, Altenbergerstr. 69, A-4040 Linz, Austria**(Received 22 November 2010; published 23 March 2011)*

**Jan Gaj**

*Instytut Fizyki Doświadczalnej  
Uniwersytet Warszawski  
Warszawa*

**Półprzewodniki półmagnetyczne  
– przygoda mojego życia (naukowego)\***

**Semimagnetic semiconductors  
– the adventure of my (scientific) life**

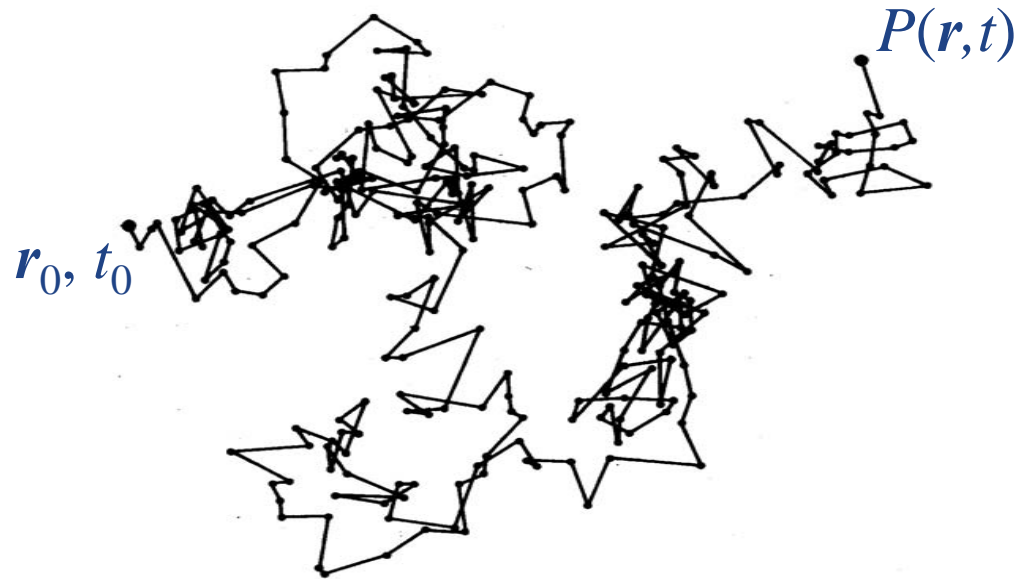
**\*Referat wygłoszony na XXXII Zjeździe Fizyków Polskich w Krakowie we wrześniu 1993 r.**

*Postępy Fizyki* **45**, 125 (1994)

# Marian Smoluchowski (1872-1917)

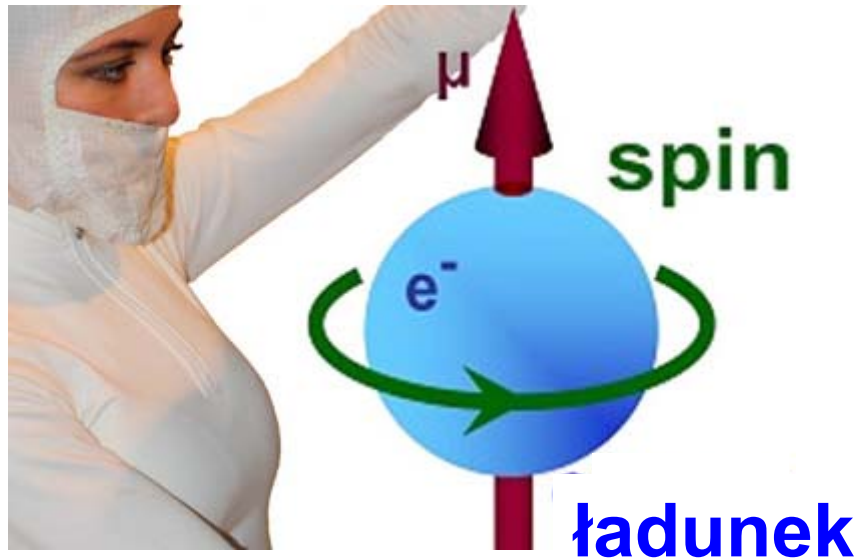


# Przemiana metal-izolator Andersona-Motta



- modyfikacja równania dyfuzji Smoluchowskiego przez kwantowe interferencje:
- fal rozproszonych
  - amplitud oddziaływania między elektronami

# Spintronika



Elektronika = manipulowanie ładunkami i prądami

Spintronika = manipulowanie namagnesowaniem  
i prądami spinowymi  
manipulowanie pojedynczymi spinami  
(informatyka kwantowa)

# Spintronika teraz i tu

kto panuje nad materiałami,  
panuje nad technologią

*Tadahiro Sekimoto, prezes Nippon Electric Corporation*

1. Tlenki:



2. Półprzewodniki półmagnetyczne

jednorodne

nanokompozyty

spintronika



# Technologie informacyjno-komunikacyjne

informacja dostępna  
w każdym miejscu  
i o każdym czasie



informacja w pełni  
zdigitalizowana

Google™



banki danych  
szafy twardych dysków

# Rewolucja informatyczna → rewolucje polityczne

1987 r.



PC/AT 8 MHz; 16 MB RAM; 20 MB HDD  
50 milionów PCtów w USA

1989 r.



50 MHz,  $<1 \mu\text{m}$ ,  $10^6$  tranzystorów

Tu

.... rosnące opóźnienie technologiczne....

# Rewolucja informatyczna → rewolucje polityczne

2011 r.



centrum danych Facebooka w Oregonie

# Rewolucja informatyczna

synergia nowych aplikacji z  
wykładniczym wzrostem efektywności

przetwarzania  
przesyłania  
wytwarzania  
przechowywania

informacji

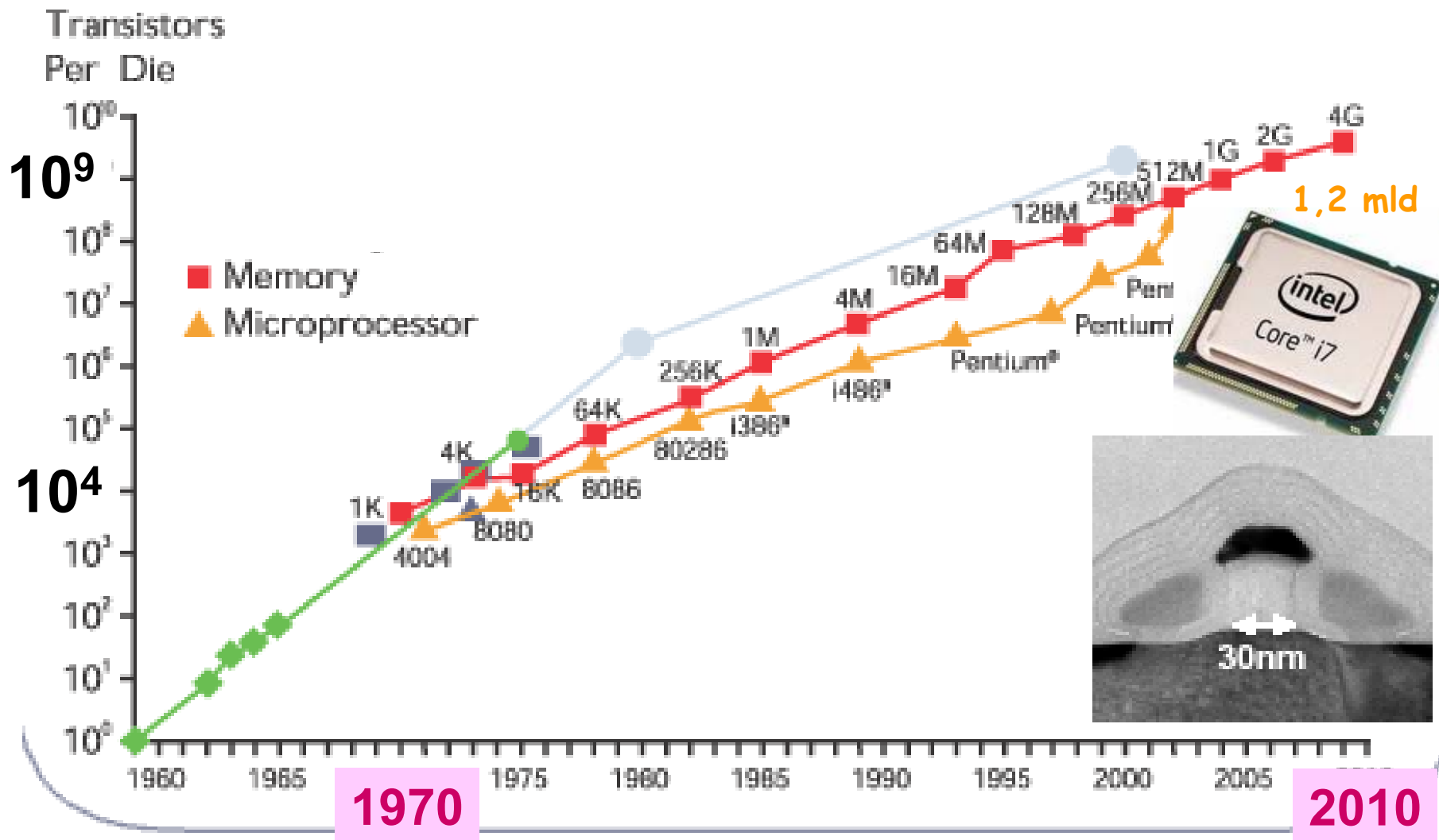
*prawo Moora (Intel)*

# Nanostrukturyzacja

# Liczba tranzystorów w kości

## Integrated-Circuit Complexity

source: Intel Corporation



# Nanostrukturyzacja

*zmniejsza:*

- cenę
- wagę

cena jednego tranzystora mniejsza od ceny druku jednej litery w książce

# Nanostrukturyzacja

*zmniejsza:*

- cenę
- wagę

*zwiększa:*

- pojemność
- prędkość

fizyka:

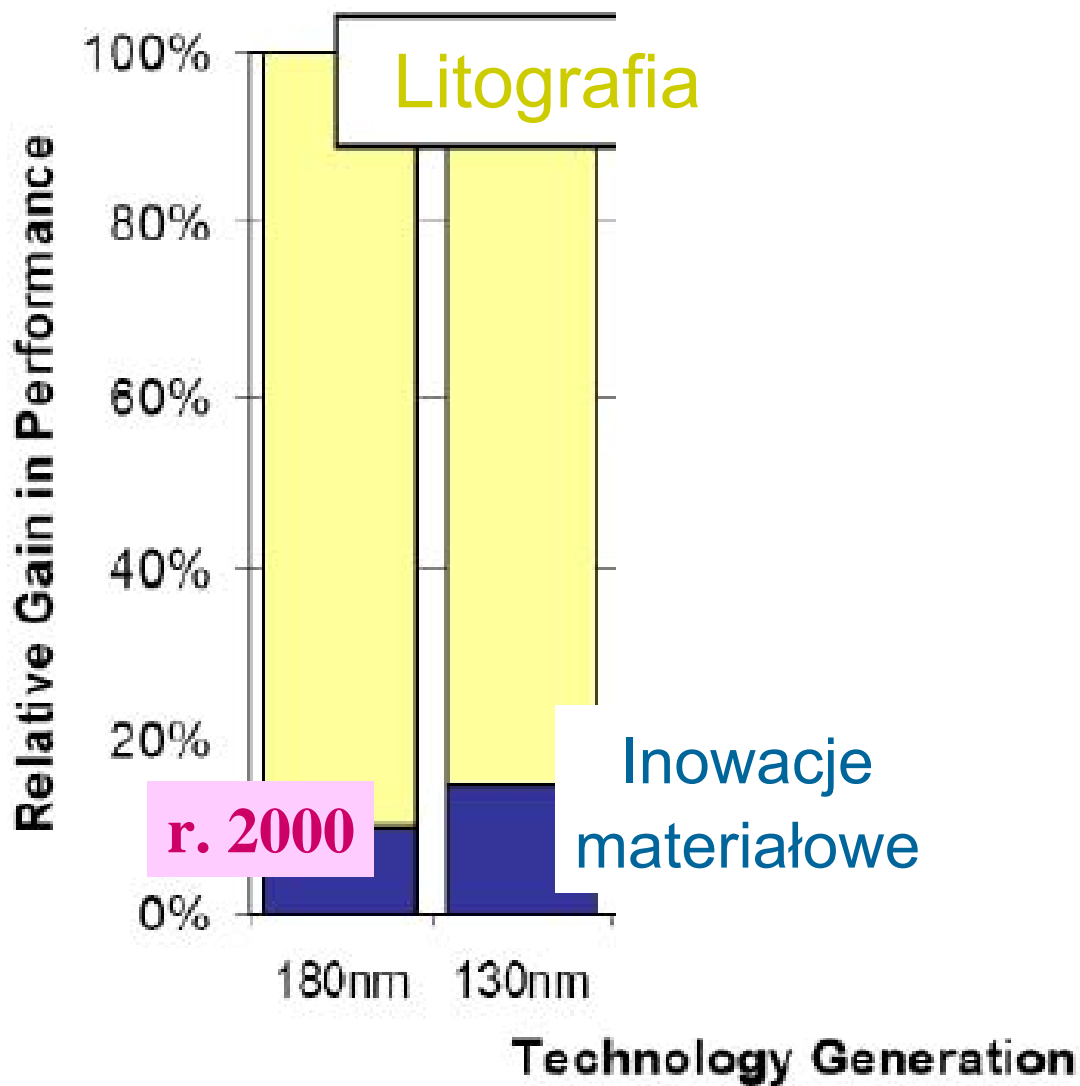
$$\tau = (CR)^{1/2}$$

rozwój dzięki postępowi w litografii

foto- → electro- → głęboki uv

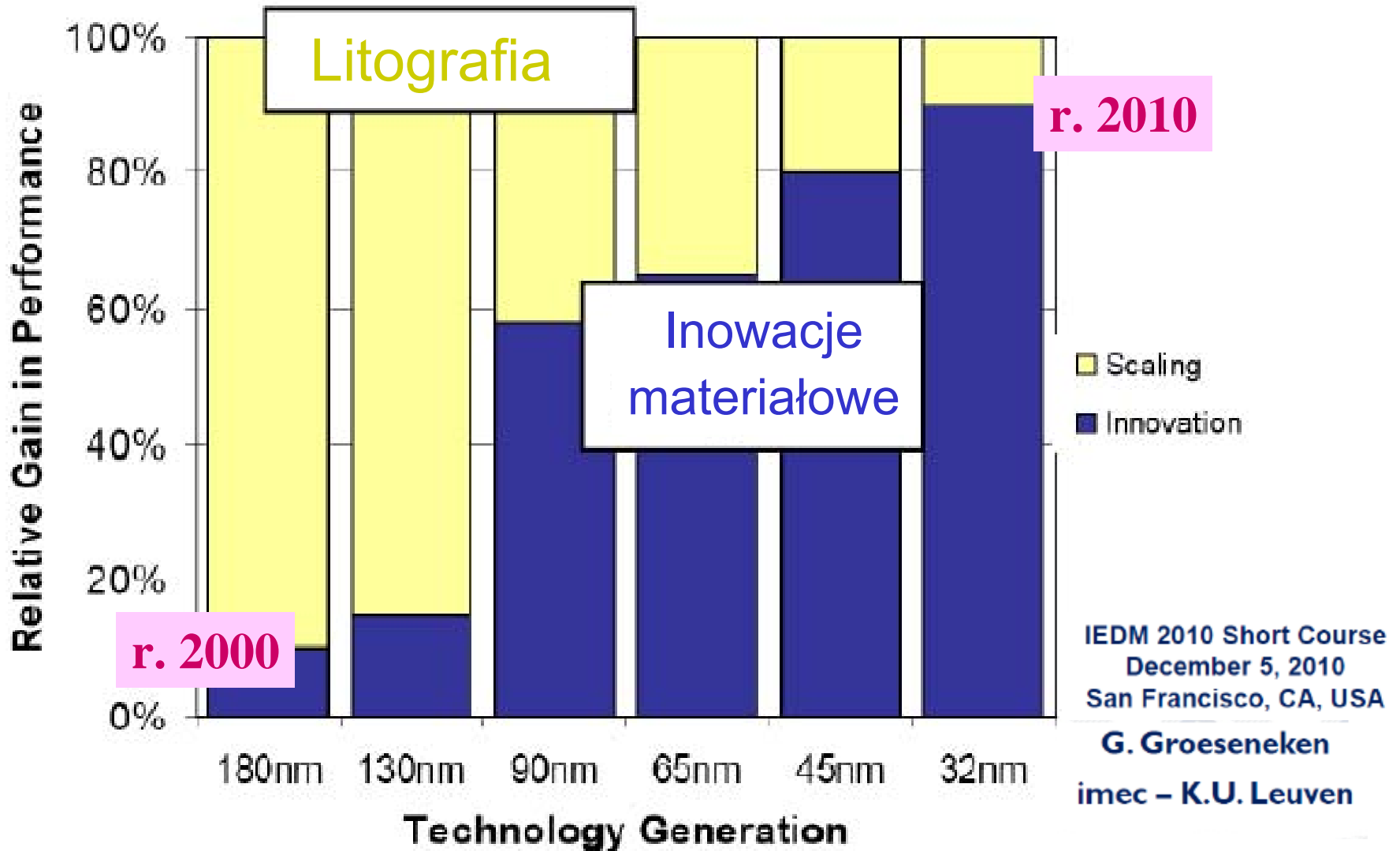


# Wkład litografii/nowych materiałów do wydajności



Source – INTEL, IBM

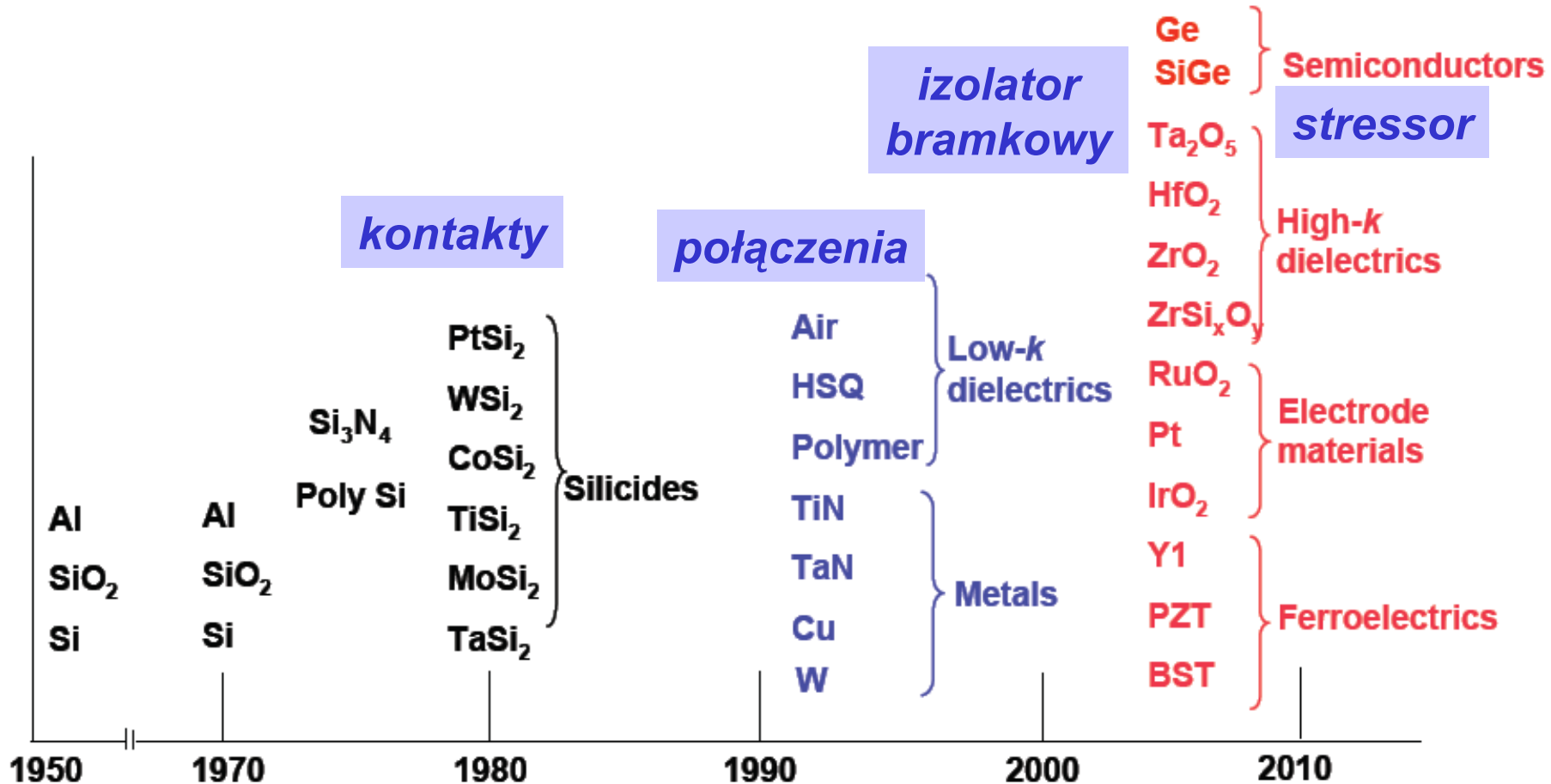
# Wkład nowych materiałów do wydajności



IEDM 2010 Short Course  
December 5, 2010  
San Francisco, CA, USA  
G. Groeseneken  
imec – K.U. Leuven

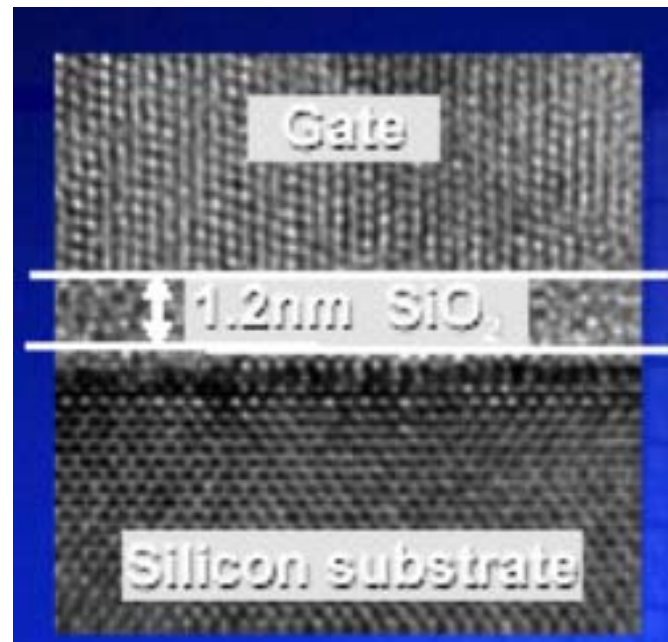
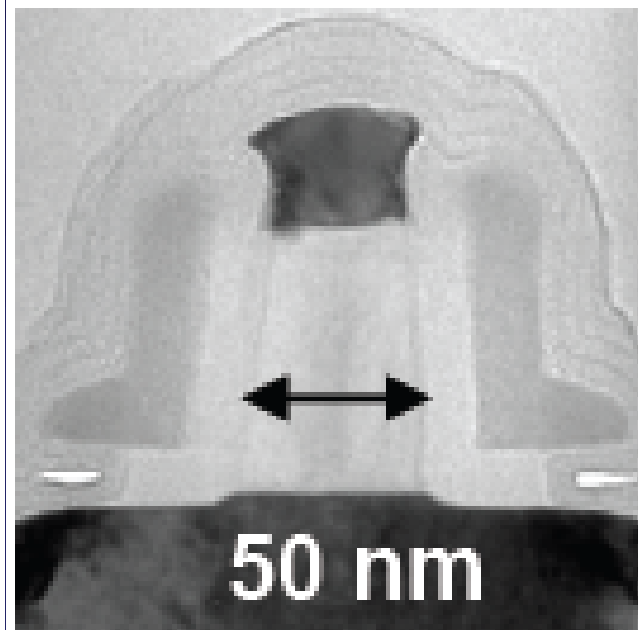
Source – INTEL, IBM

# Nowe materiały w technologii „krzemowej”



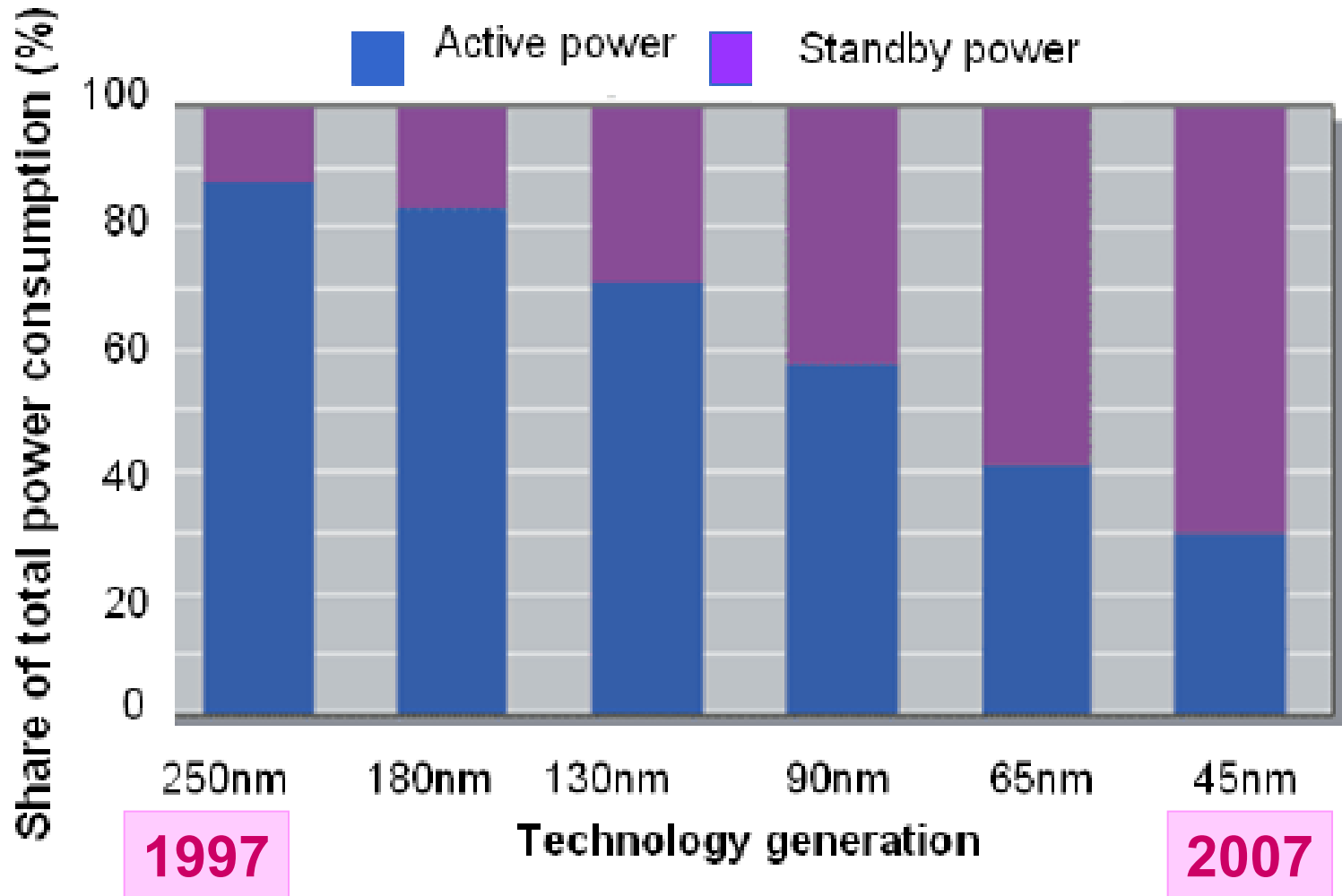
Prawo Moore'a dzięki nowym materiałom  
SiO<sub>2</sub> i Si powinny (i są) zastępowane

# Tranzystor MOSFET



ok. 50% mocy – ciepło Joula  
prądu tunelowego przez bramkę

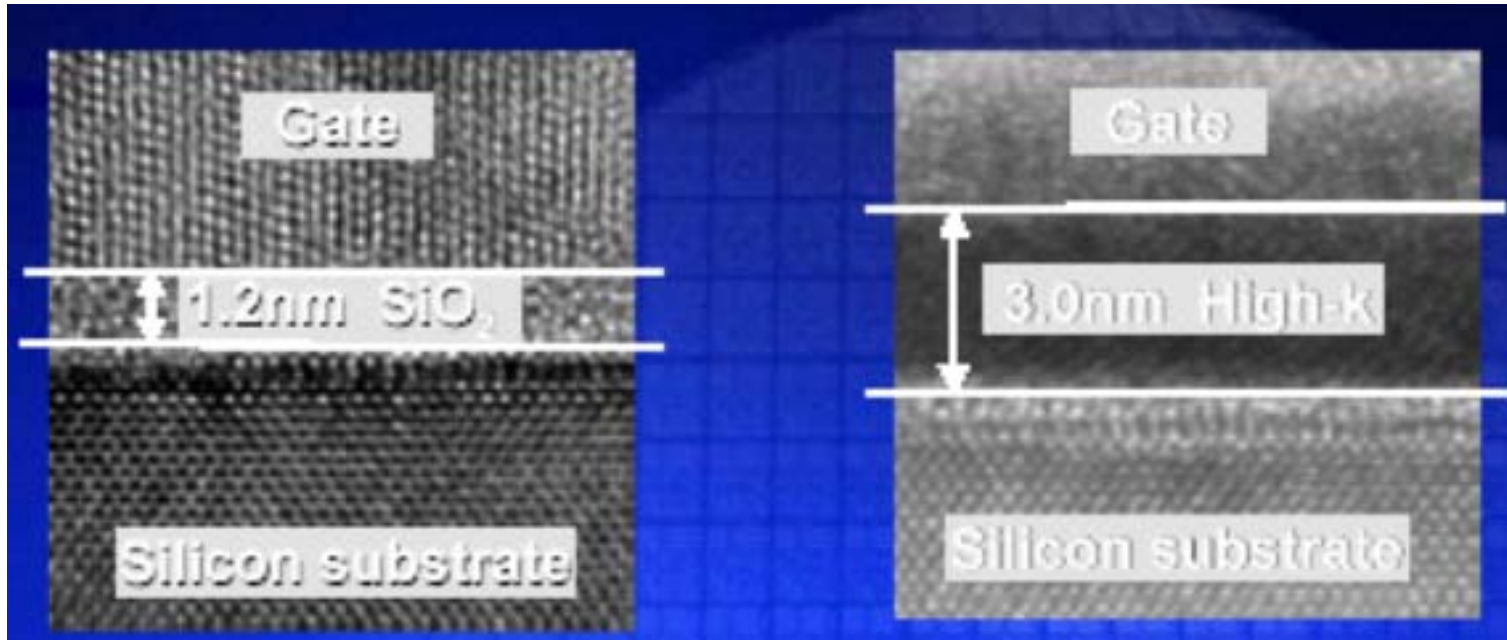
# Zużycie mocy



fizyka:

tunelowanie kwantowe





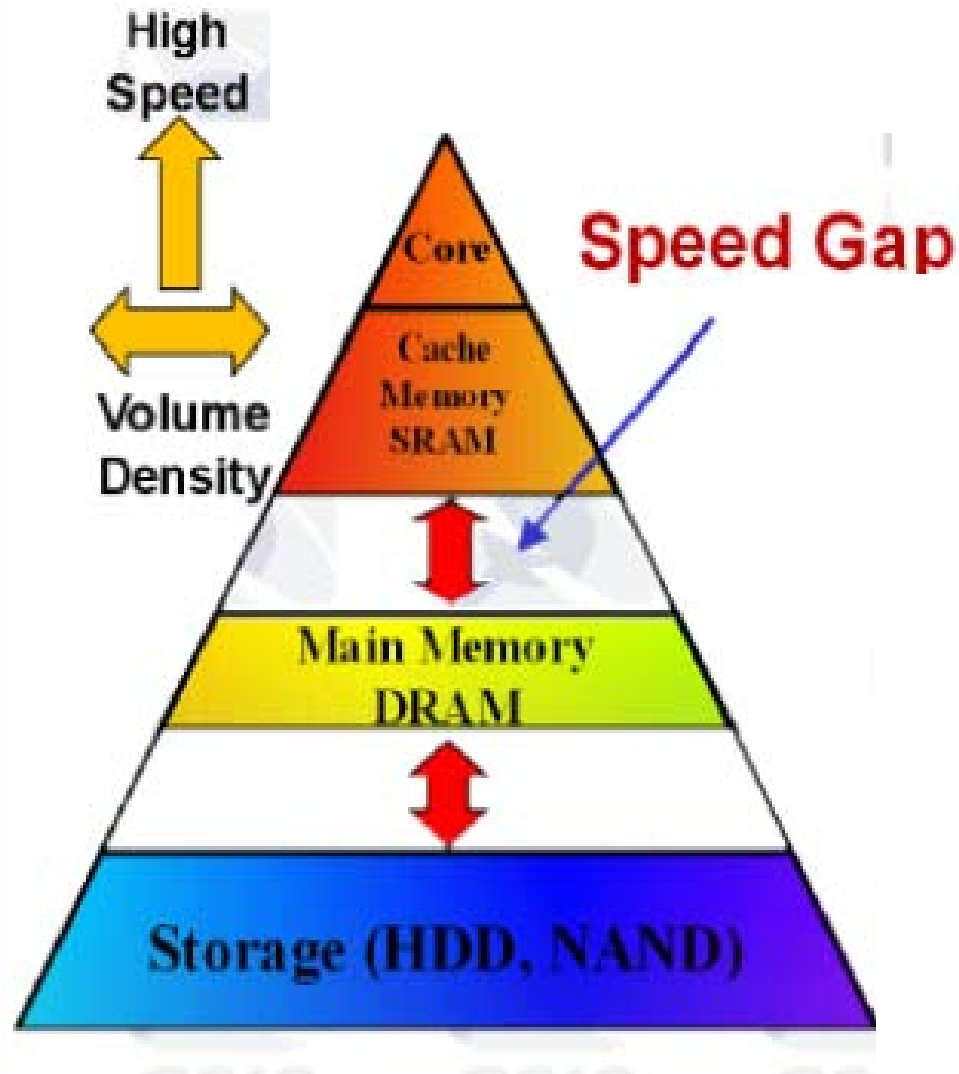
ok. 50% mocy – ciepło Joula  
prądu tunelowego przez bramkę

stała dielektryczna  $\kappa = 3.9$

## fizyka

- stała dielektryczna  $\kappa > 10$
- taka sama pojemność
- $10^4$  mniejszy prąd tunelowania

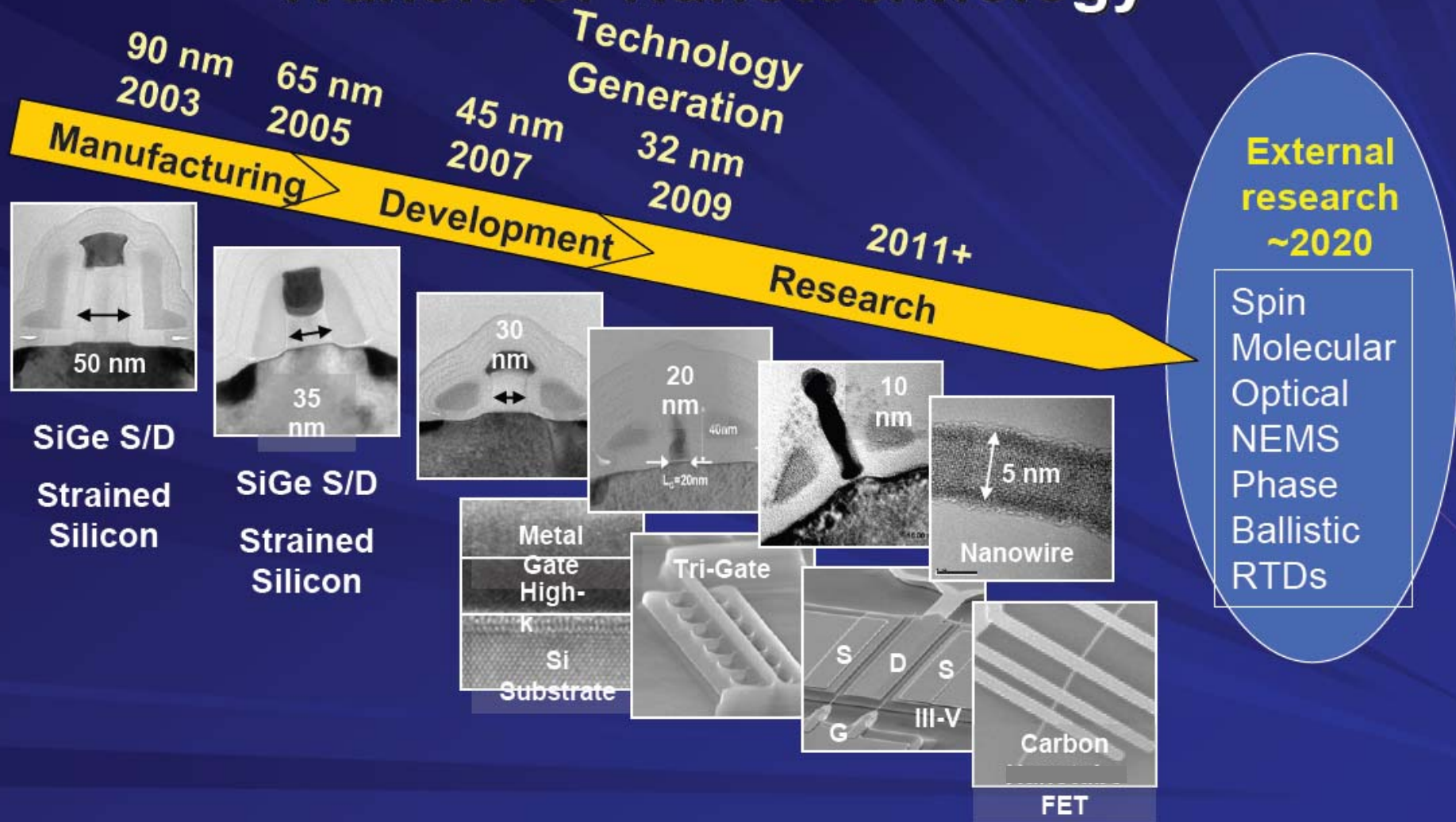
# Rzeczywista prędkość



potrzebna zmiana architektury i zasad działania



# More of Moore challenges: Disruption of Transistor Nanotechnology



Source: Intel

Future options subject to change

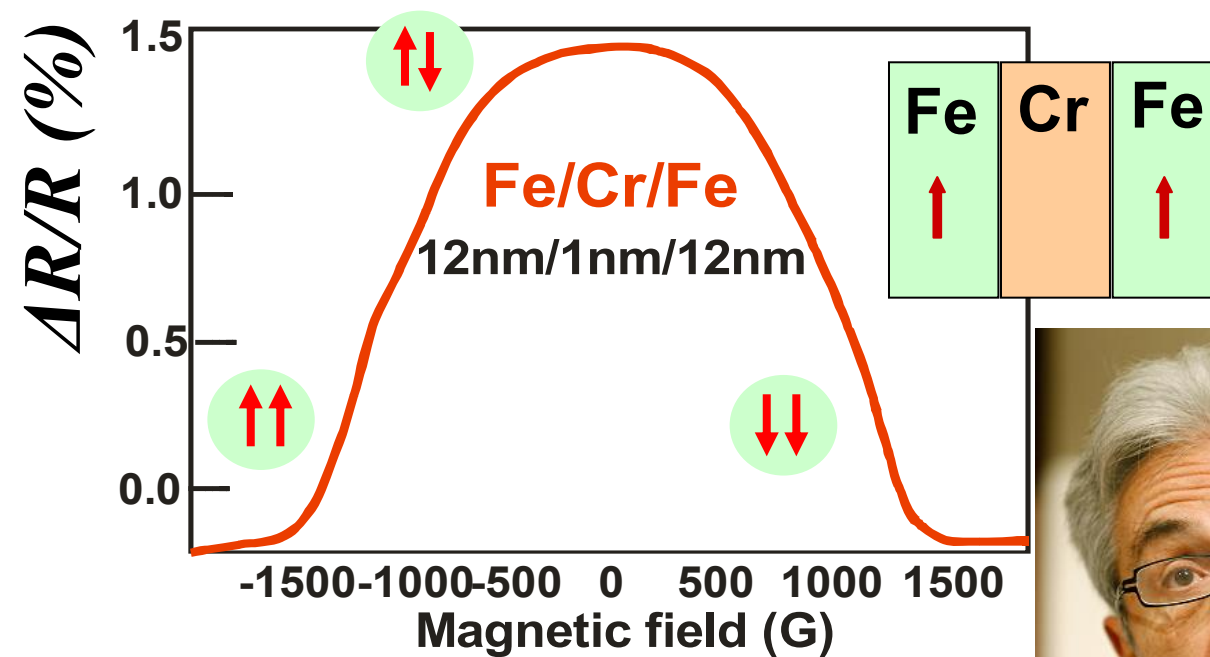
# Spintronika



przechowywanie informacji



# Gigantyczny magnetoopór (GMR)



*G. Binasch, P. Grünberg et al. PRB'89*

Nobel 2007 r.  
Odkrycie 1988/89 r.



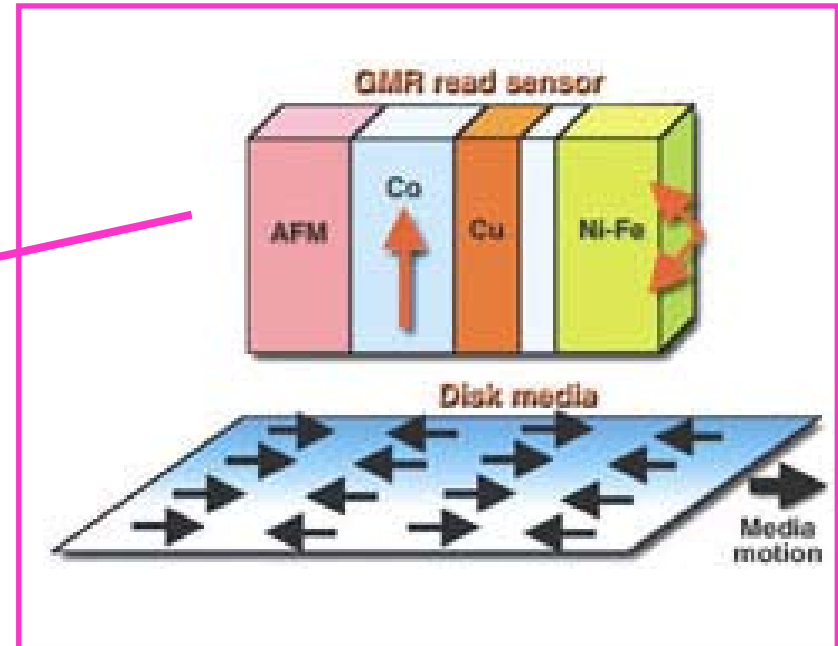
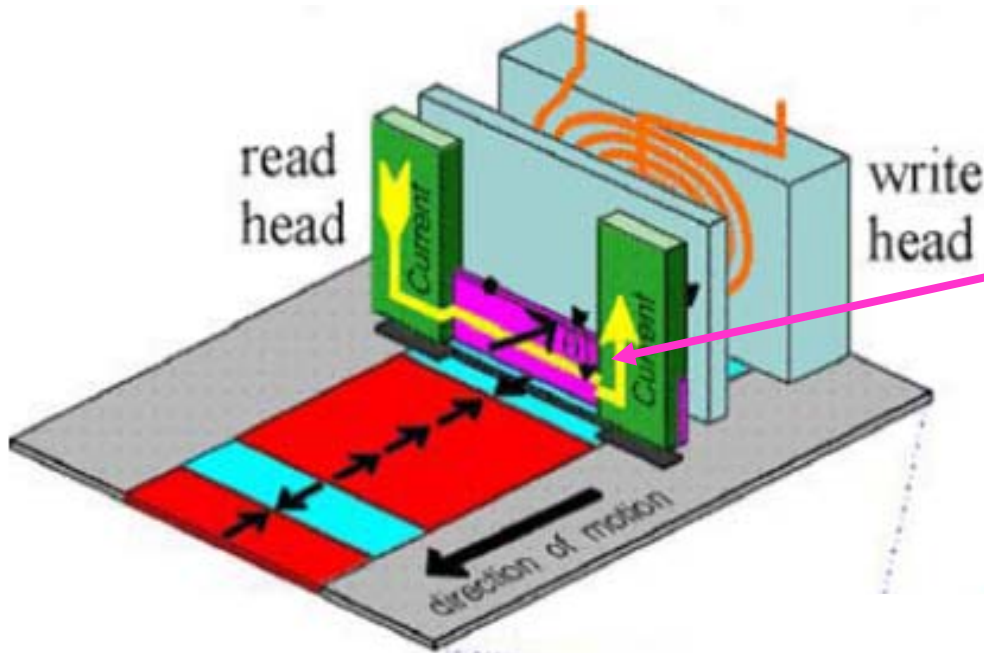
A. Fert



P. Gruenberg

# Struktury GMR do odczytu dysków twardych

## GMR read sensor

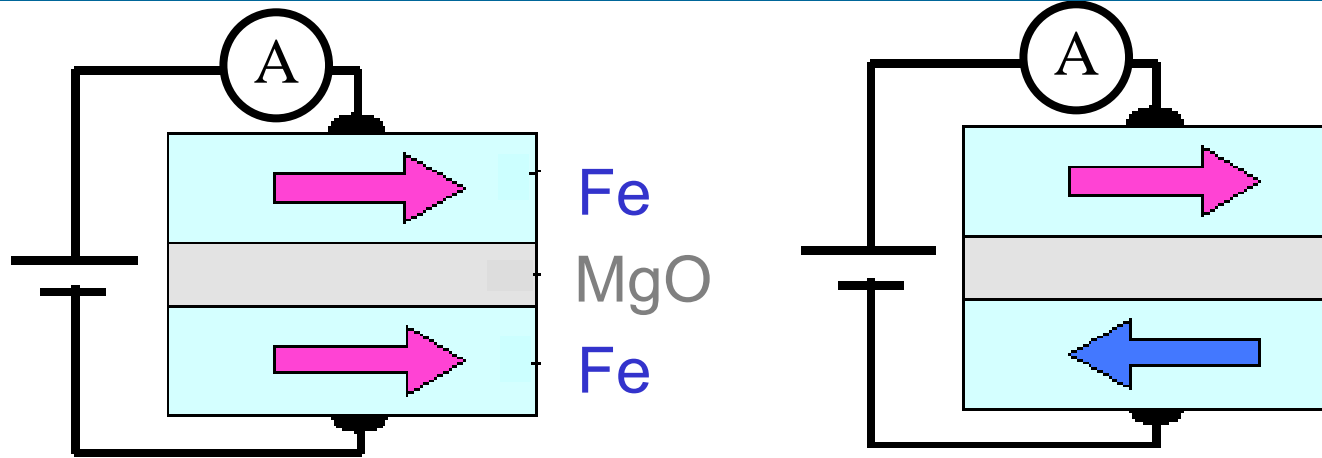


przełączanie namagnesowania  
polem magnetycznym

$$(R_{\uparrow\downarrow} - R_{\uparrow\uparrow}) / R_{\uparrow\uparrow} = 20\%$$

MgO

# Teoria *ab initio* (LSDA) prądu tunelowego



*W. H. Butler et al. (Oak Ridge) PRB'2001*

Spin-dependent tunneling conductance of Fe|MgO|Fe sandwiches

*J. Mathon and A. Umerski (London) PRB'2001*

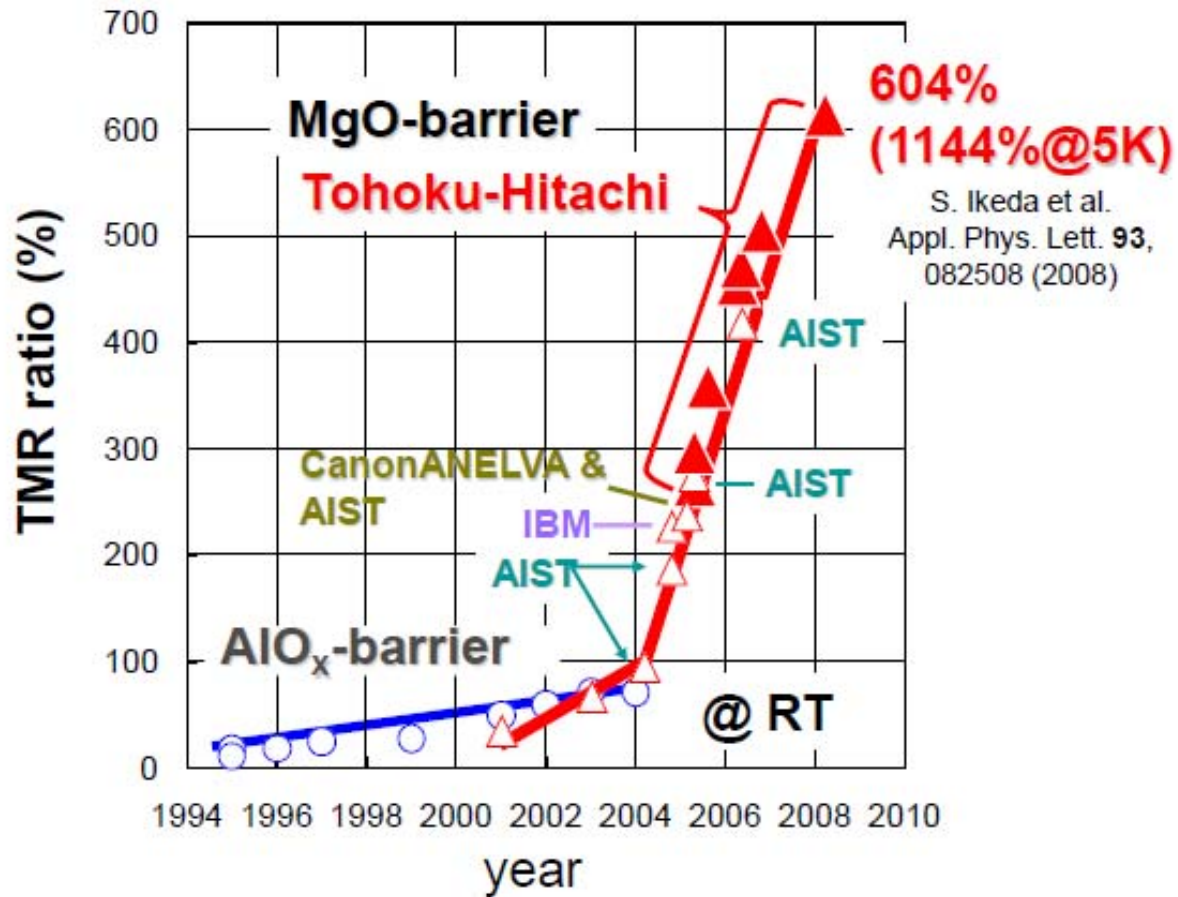
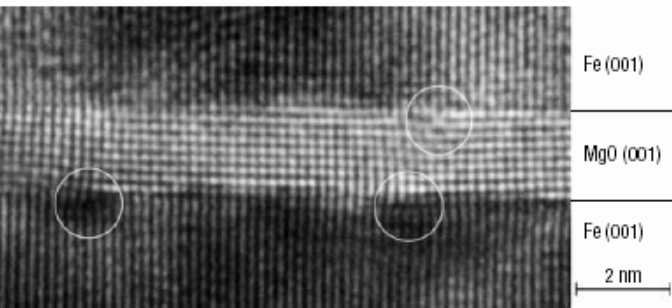
Theory of tunneling magnetoresistance of an epitaxial Fe/MgO/Fe(001) junction

$$(R_{\uparrow\downarrow} - R_{\uparrow\uparrow}) / R_{\uparrow\uparrow} \cong 1200\% \gg 2P_{\text{Fe}}^2 / (1 - P_{\text{Fe}}^2)$$

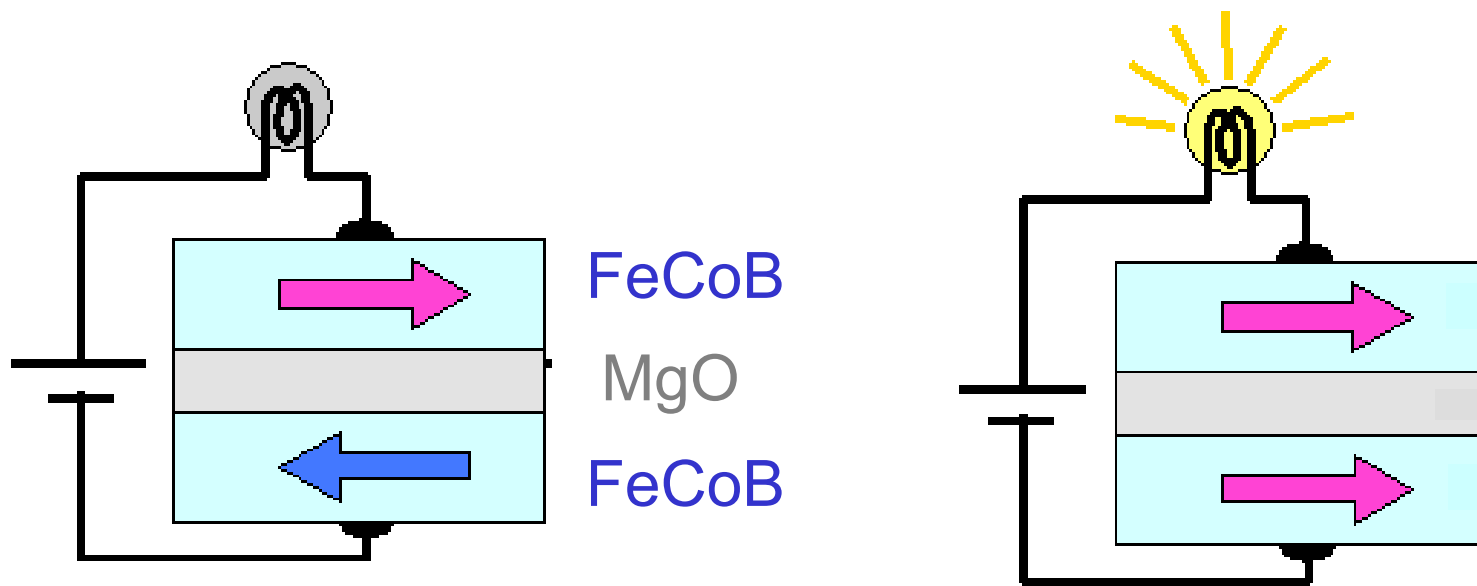
fizyka:

masa nośników ze spinem mniejszościowym b. duża w MgO

# Wyniki doświadczalne



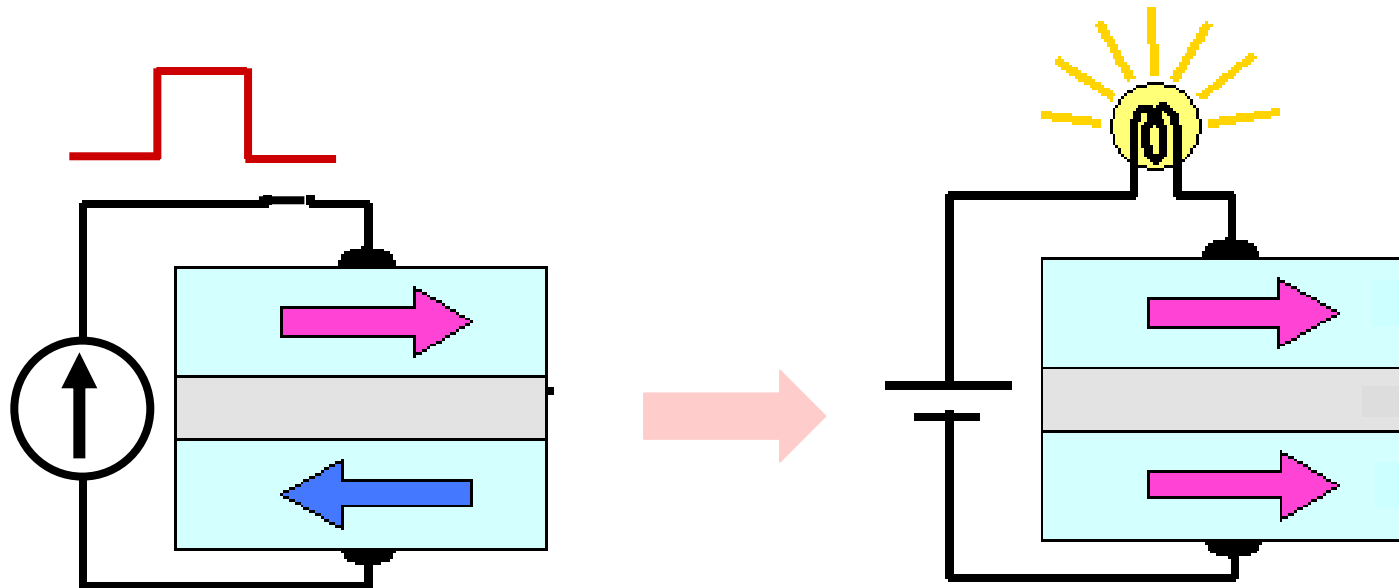
# Magnetoopór tunelowy



- TMR - czujnik pola magnetycznego (jak GMR)
- komórka pamięci
  - przełącznik ( $R_{\uparrow\downarrow} \cong 7R_{\uparrow\uparrow}$ )

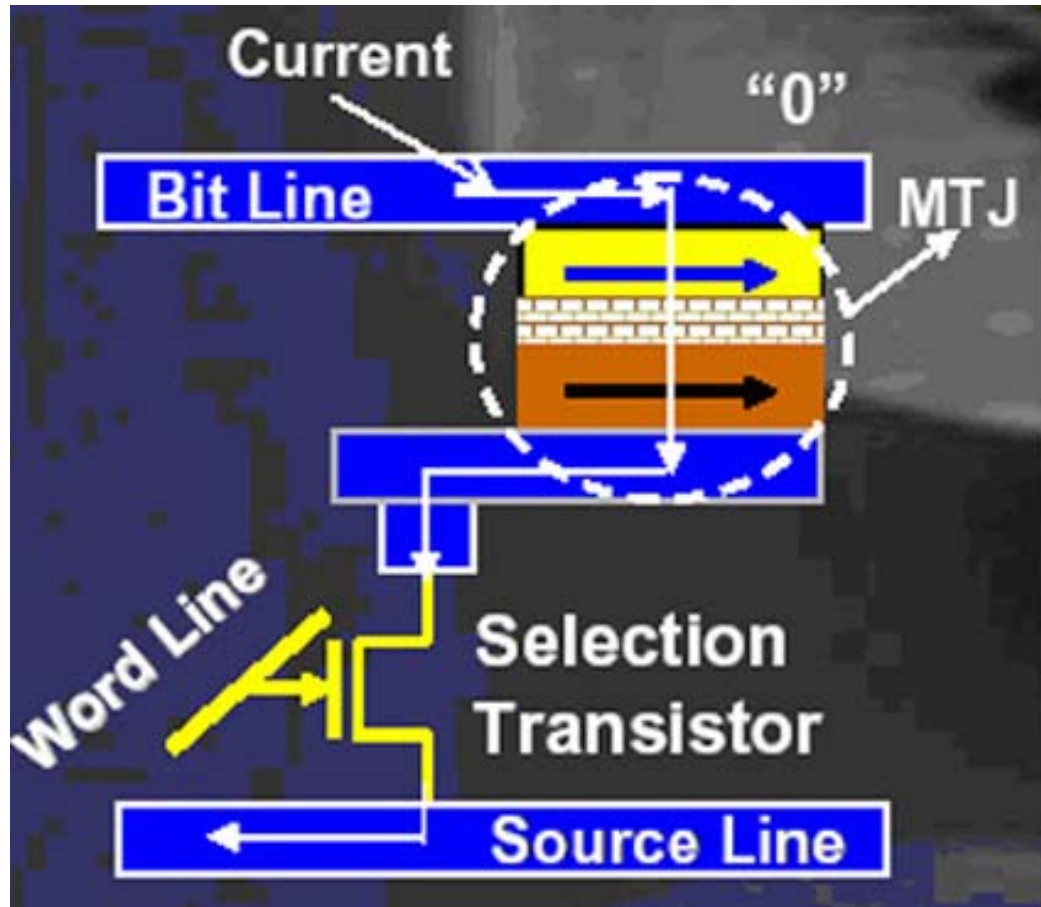


# Przełączanie namagnesowania prądem



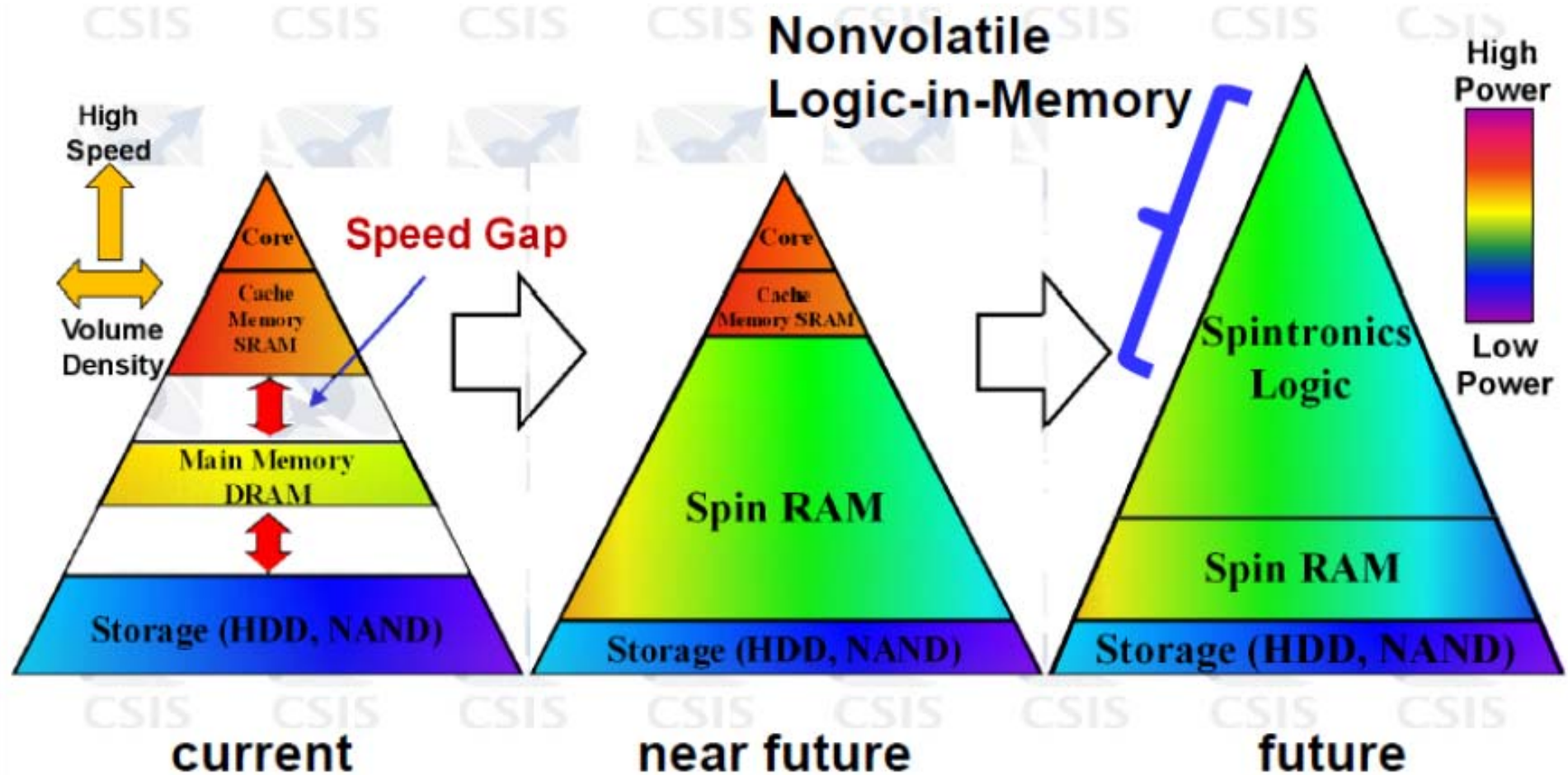
fizyka:  $ds/dt$  wytwarza moment siły, który obraca namagnesowanie

# Universalna pamięć – STT MRAM



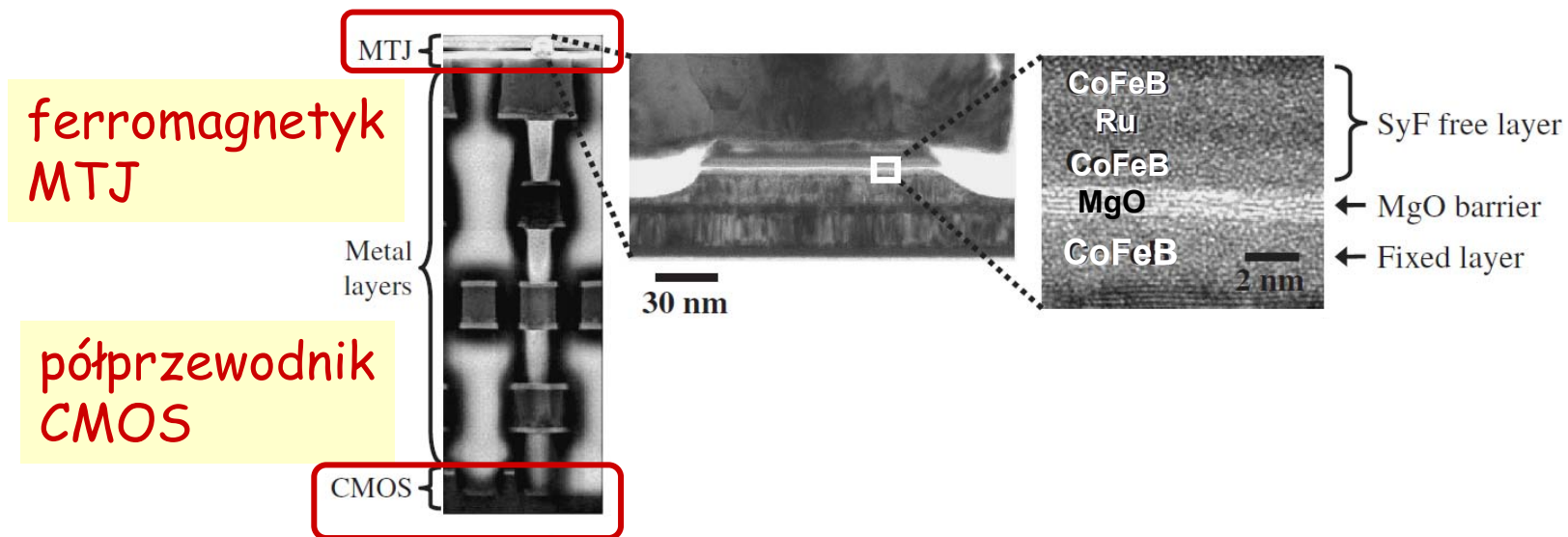
- skalowalna
- trwała (> 10 lat)
- niezawodna
- szybka (ns)
- odporna na promieniowanie

# Oczekiwania związane ze spintroniką

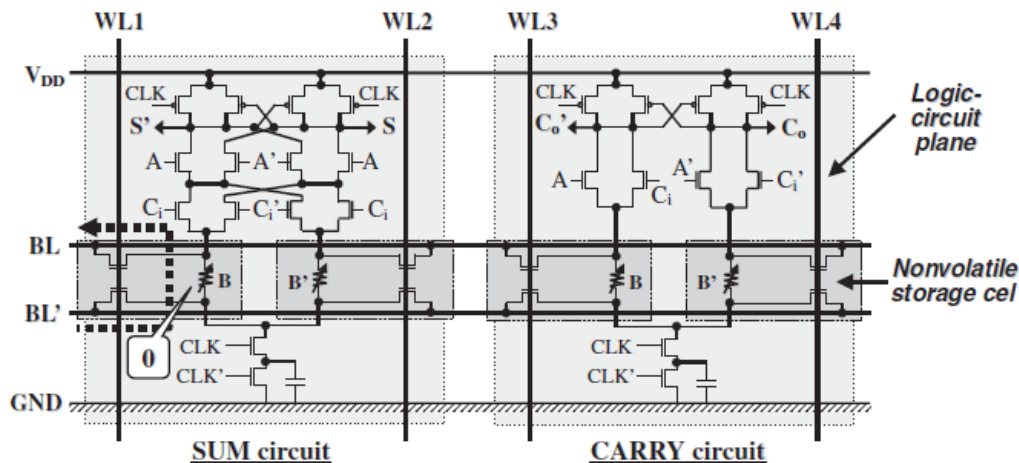


Magnetic tunnel junction based memory elements to counter **dynamic** and **static** power, and **interconnection delay**

# Logika z rozproszoną pamięcią

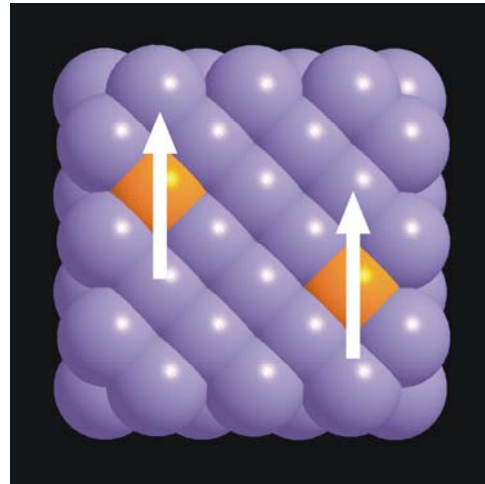


4 MTJs + 32 MOSs



sumator:  
zużycie mocy 4x  
mniejsze

# Półprzewodniki ferromagnetyczne *materiały wielofunkcyjne*



# Półprzewodniki półmagnetyczne

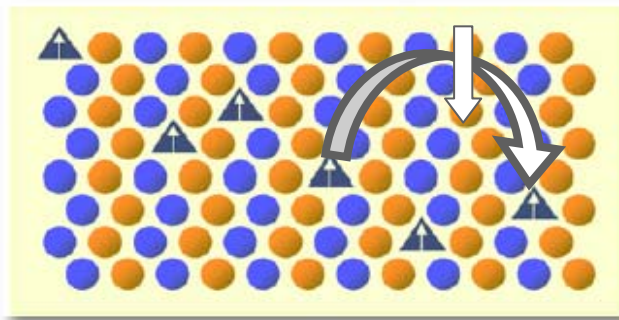
standardowe półprzewodniki, np. GaAs,  
z domieszkami magnetycznymi np. Mn

# Domieszkowanie na typ p → ferromagnetyzm

*T. Story et al. [Warsawa] PRL'86,*

*H. Ohno et al. [IBM, Tohoku] PRL'02, APL'06,*

*TD, Y. Merle d'Aubine [Grenoble, Warsaw] PRB'97, PRL'97*



dziury w paśmie walencyjnym  
przenoszą sprzężenie ferro w  
półprzewodnikach półmagnetycznych

źródło dziur w różnych półprzewodnikach z Mn:

(II,Mn)VI: akceptory, np., N

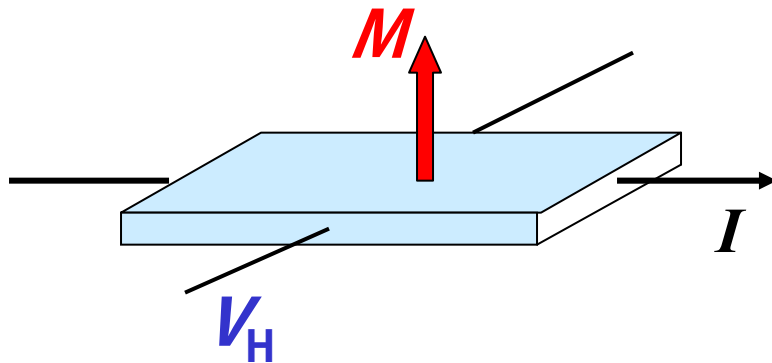
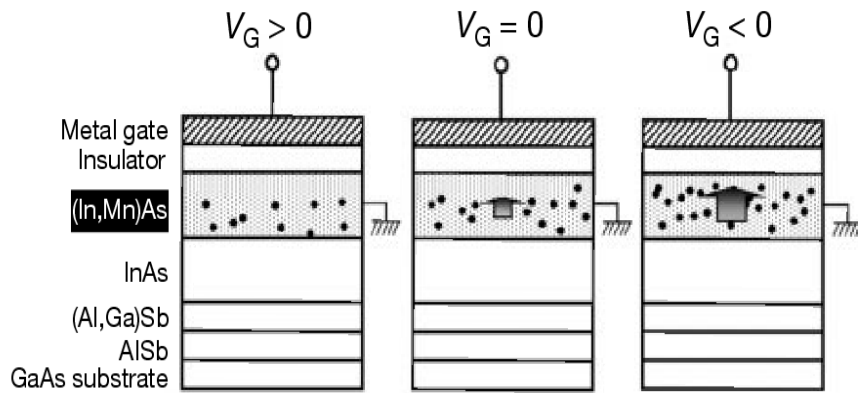
(III,Mn)V : Mn

(Ga,Mn)As – modelowy ferromagnetyk  $T_C$  do ~ 190 K

manipulowanie namagnesowaniem:

domieszkowanie, naprężenia, światło, pole elektryczne, ...

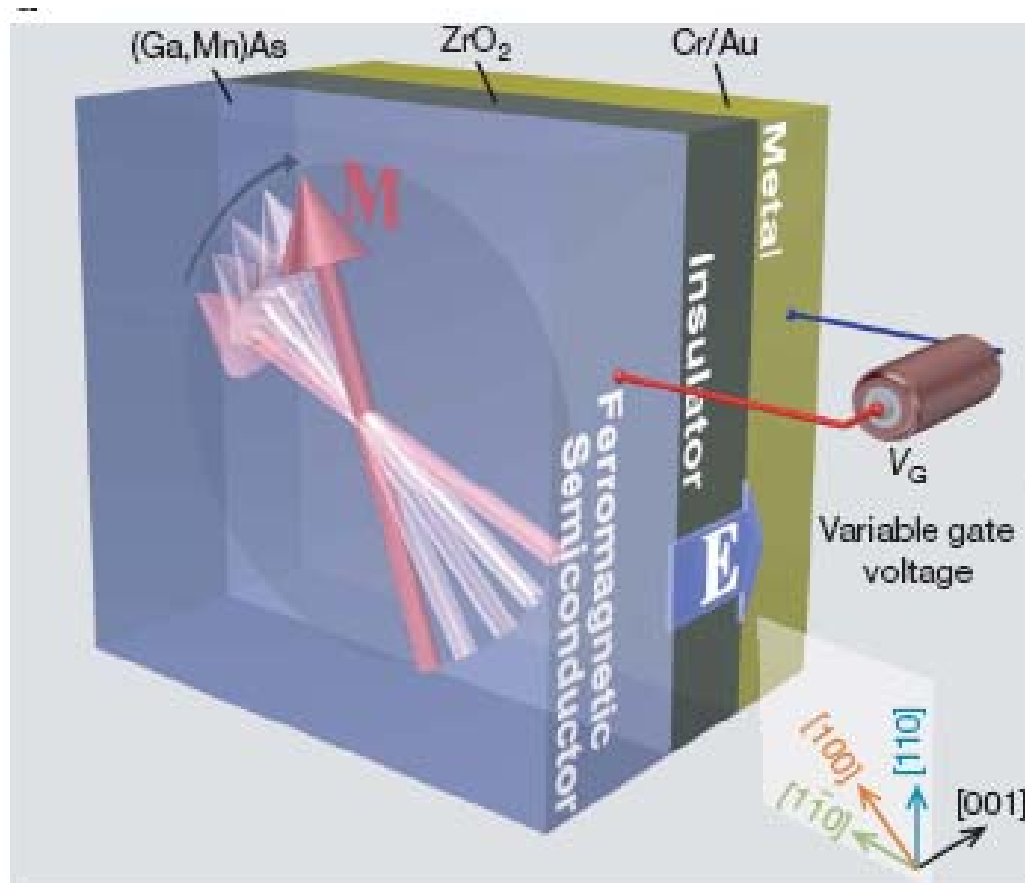
# Kontrolowanie uporządkowania magnetycznego polem elektrycznym (ferro-FET) (In,Mn)As



*H. Ohno et al. [Tohoku, Warsaw] Nature '00*



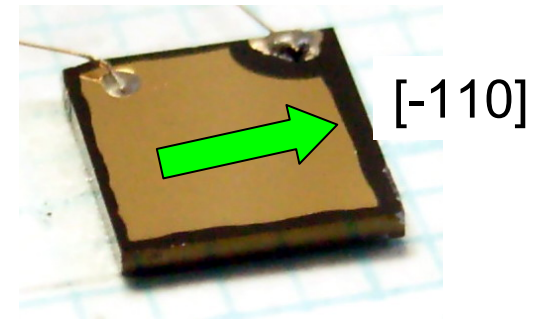
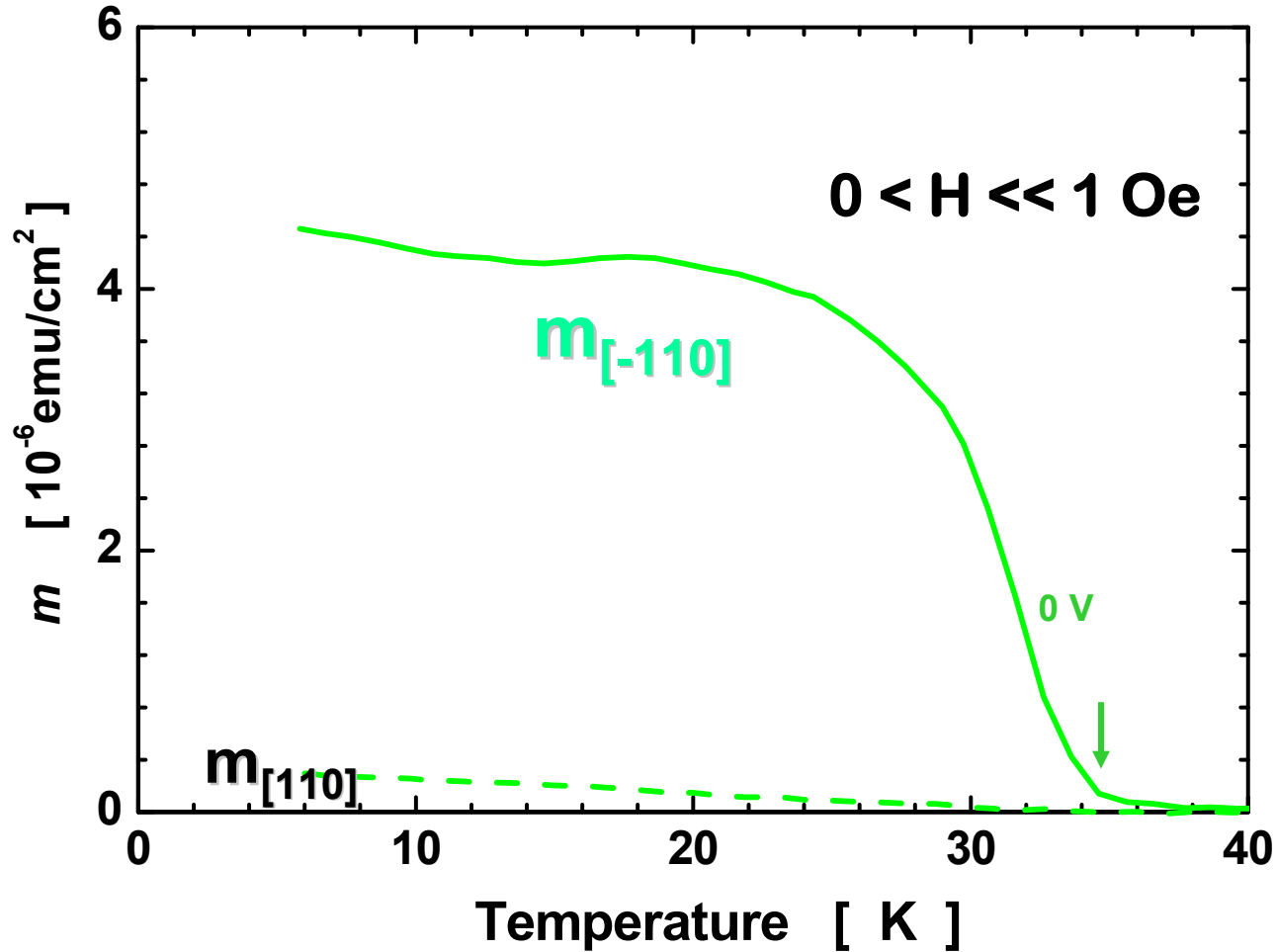
# Kontrolowanie kierunku namagnesowania



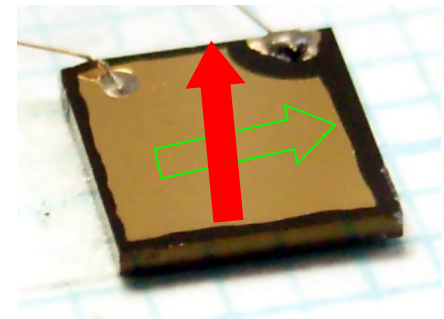
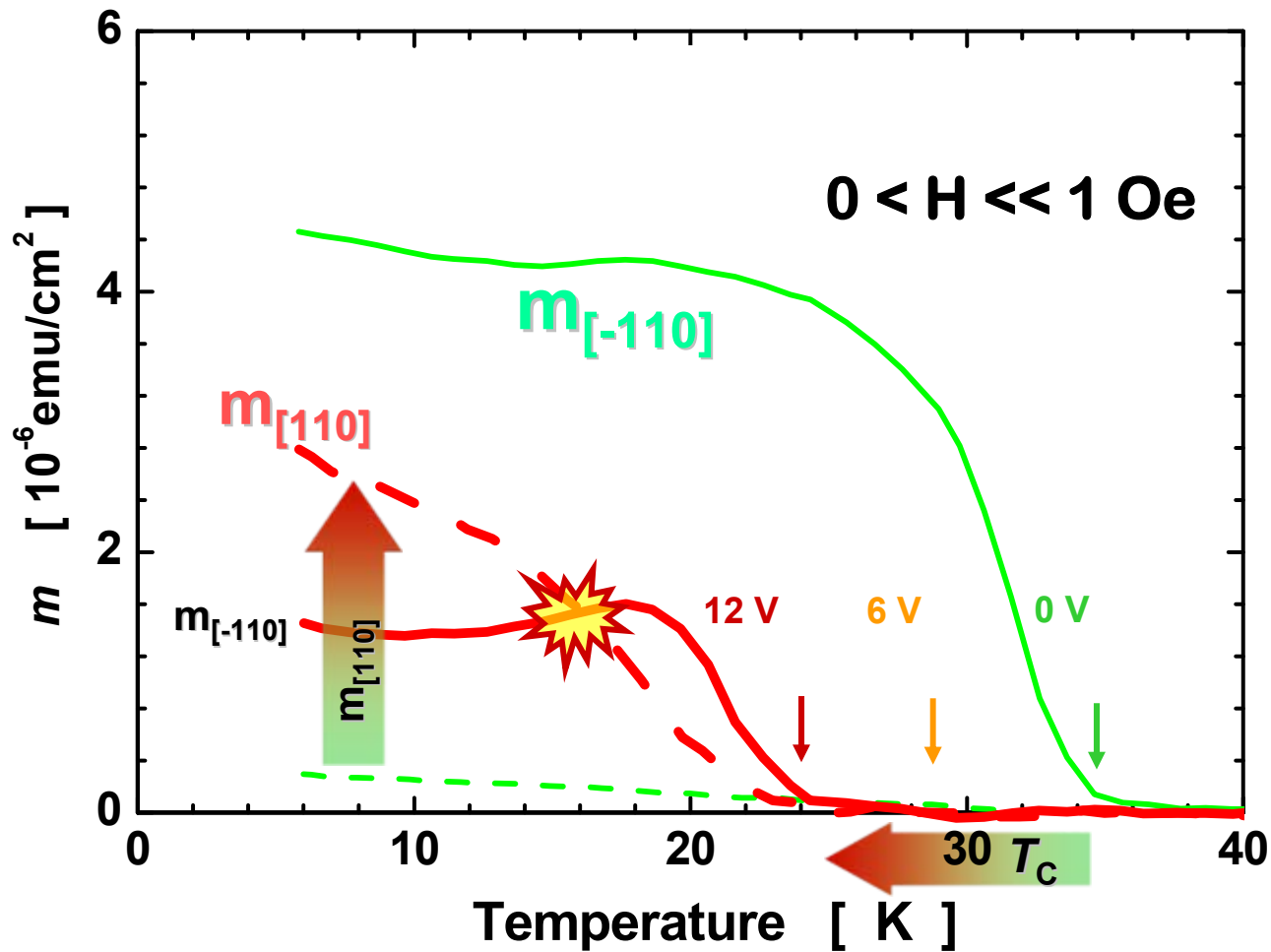
przełączanie  
namagnesowania  
napięciem  
→ małą mocą

*D. Chiba et al. [Tohoku, Warsaw] Nature'09*

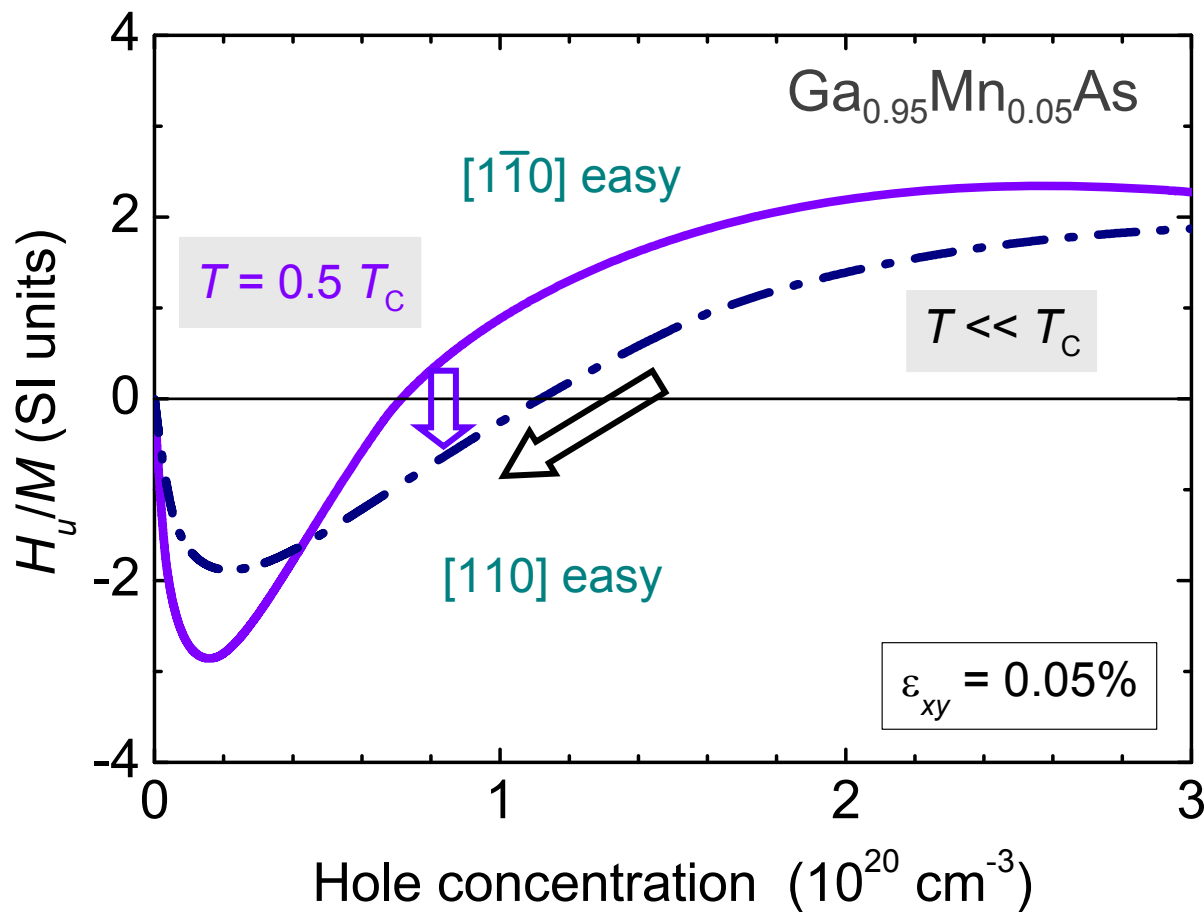
# Oś łatwa [-110]



# Spinowa przemiana reorientacyjna



# Anizotropia płaszczyznowa – teoria



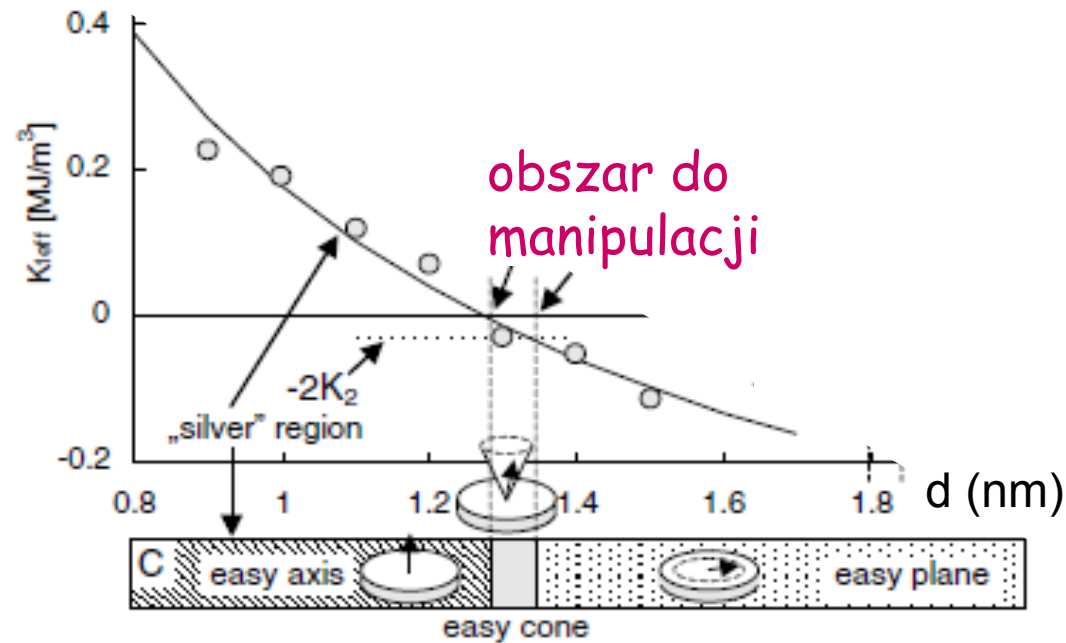
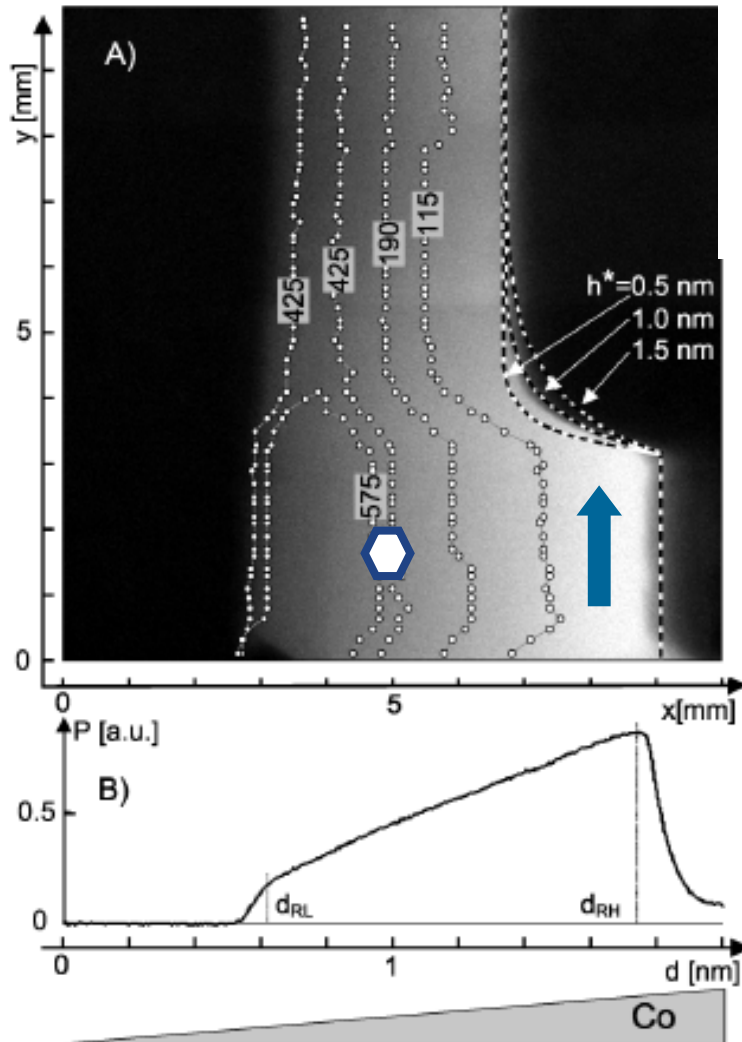
fizyka:

depopulacja podpasm  
pasma walencyjnego  
o różnym kierunku  $L$   
 $L$  wpływa na  $s$   
(spin orbita)

W. Stefanowicz, ... [Warsaw, Regensburg] PRB'10  
J. Zemen et al. [Prague], PRB'09  
M. Sawicki, ... [Warsaw, Nottingham], PRB'05

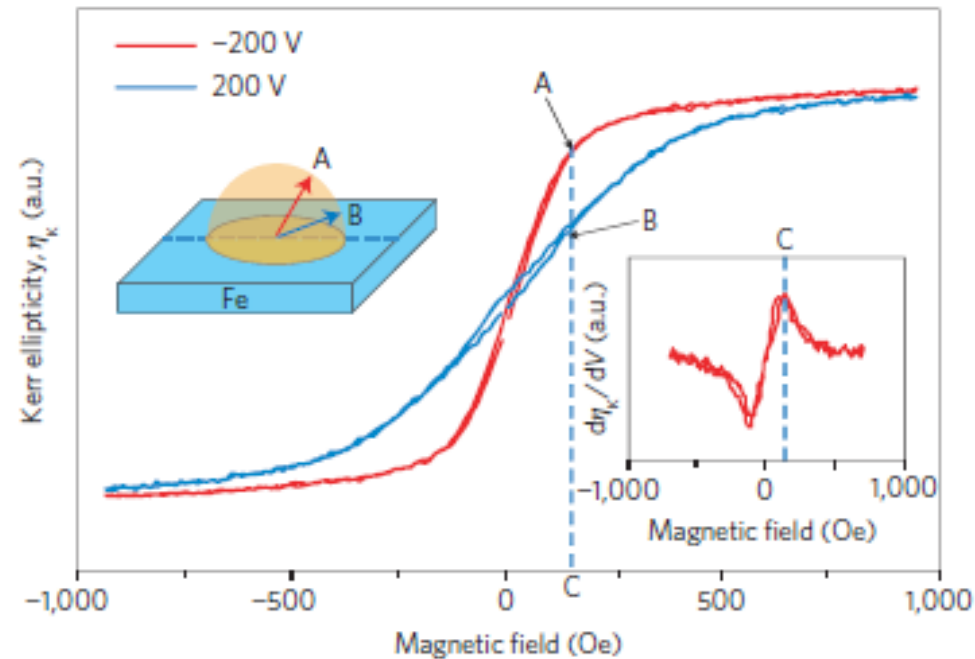
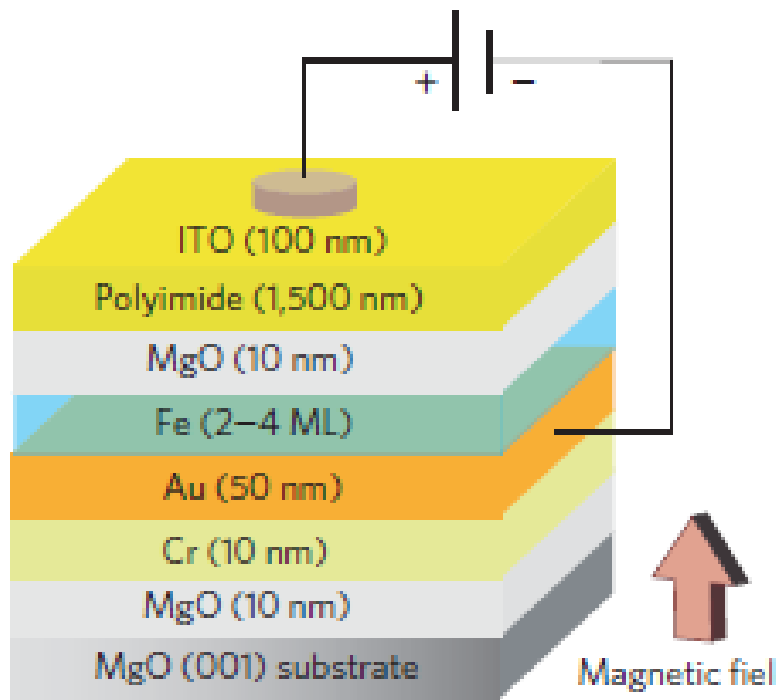
# Transfer do metalicznych ferromagnetyków

# Anizotropia magnetyczna w Au/Co/Ag



A. Kisielewski et al. [Białystok, Warsaw] PRL. '02

# Efekt polowy w Fe w 300 K



# Zastąpienie litografii przez samoorganizację

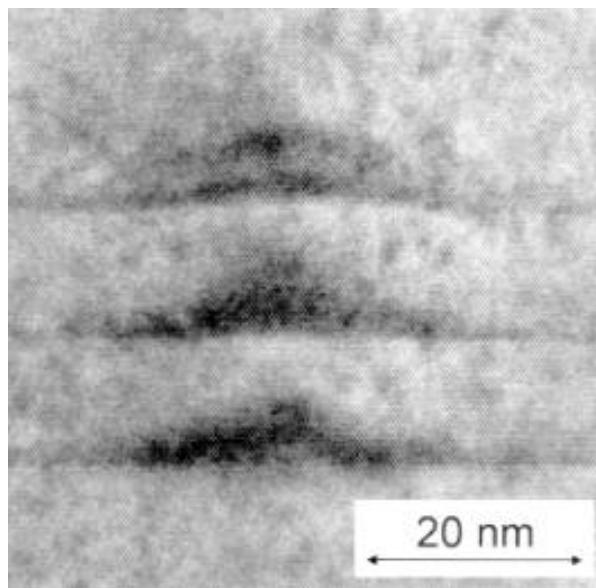
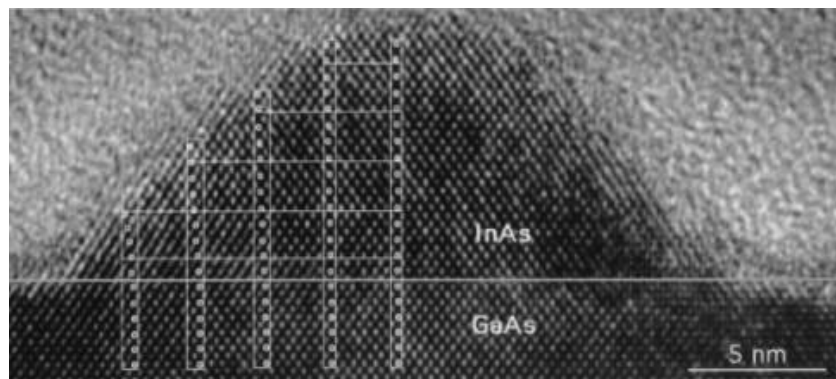
**top-down → bottom up**

nanokompozyty o kontrolowanej budowie  
z dokładnością atomową

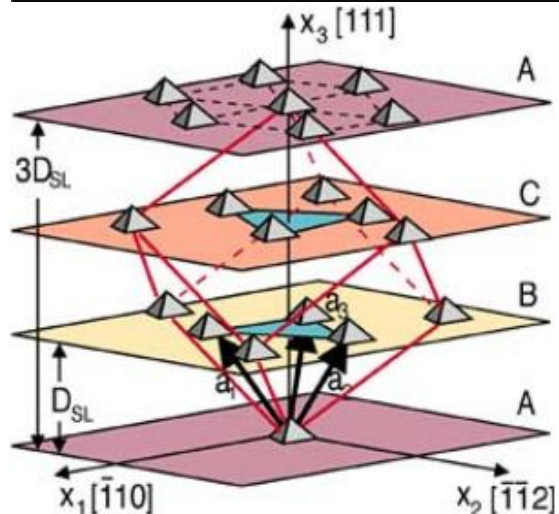
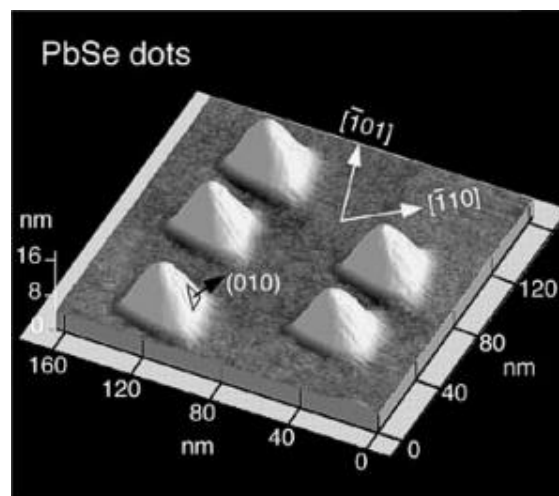


# Samorosnące kropki kwantowe w stopach półprzewodnikowych

## InAs w GaAs



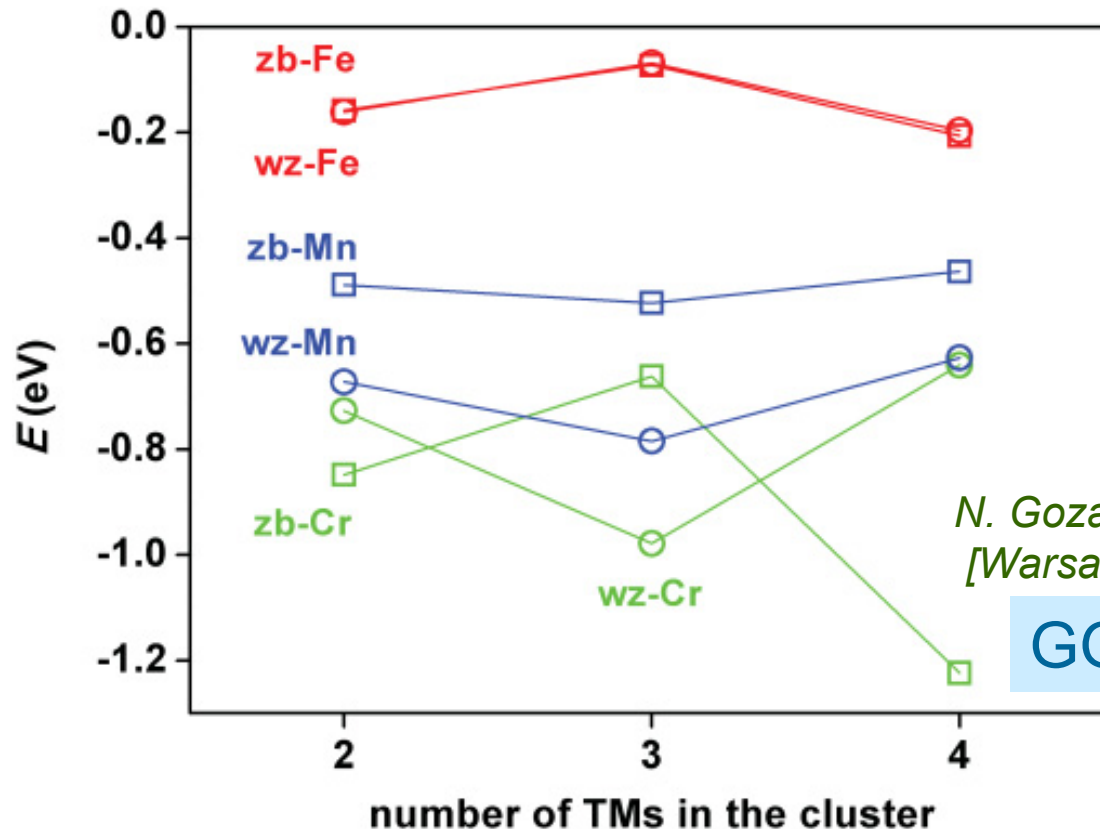
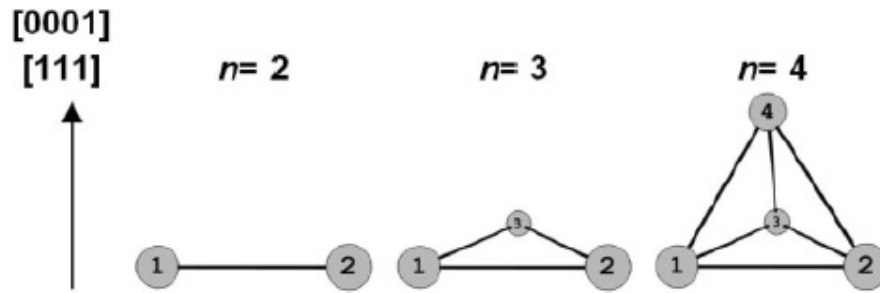
## PbSe w (Pb,Eu)Te



*Springholz et al.  
(Linz) Science '98*

chemiczna separacja faz kontrolowana przez naprężenia

# Energia agregacji kationów magnetycznych w GaN



fizyka:

dodatkowy wkład do energii wiązań chemicznych od orbitali d

*N. Gozalez Szwacki et al. [Warsaw] PRB'11*

GGA+U

*K. Sato et al., RMP'10*

# Do synchrotronu

**ESRF**



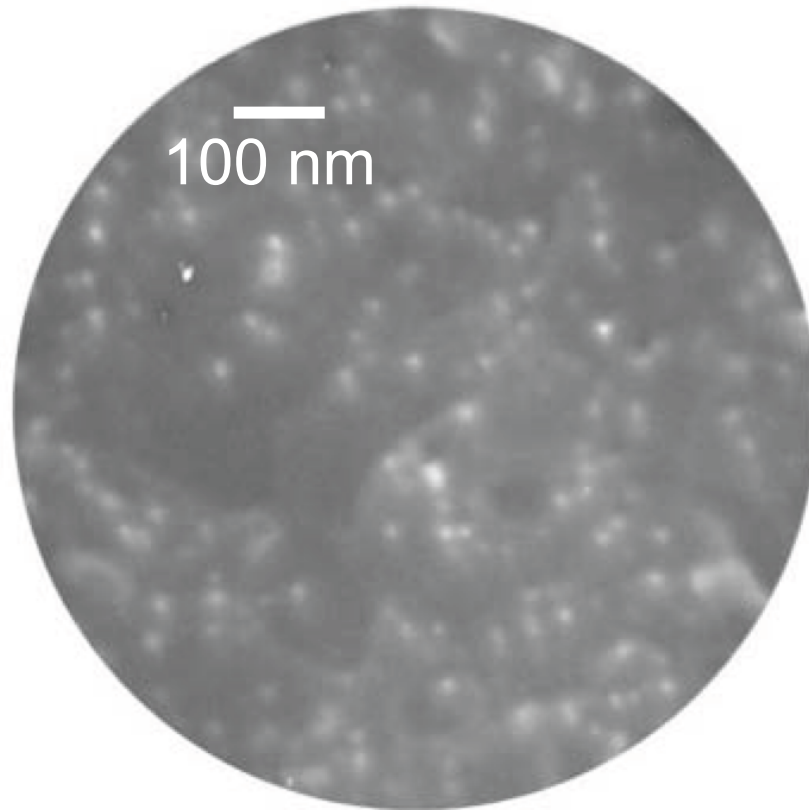
**Elettra**



**MaxLab**



# (Ga,Fe)N - XPEEN

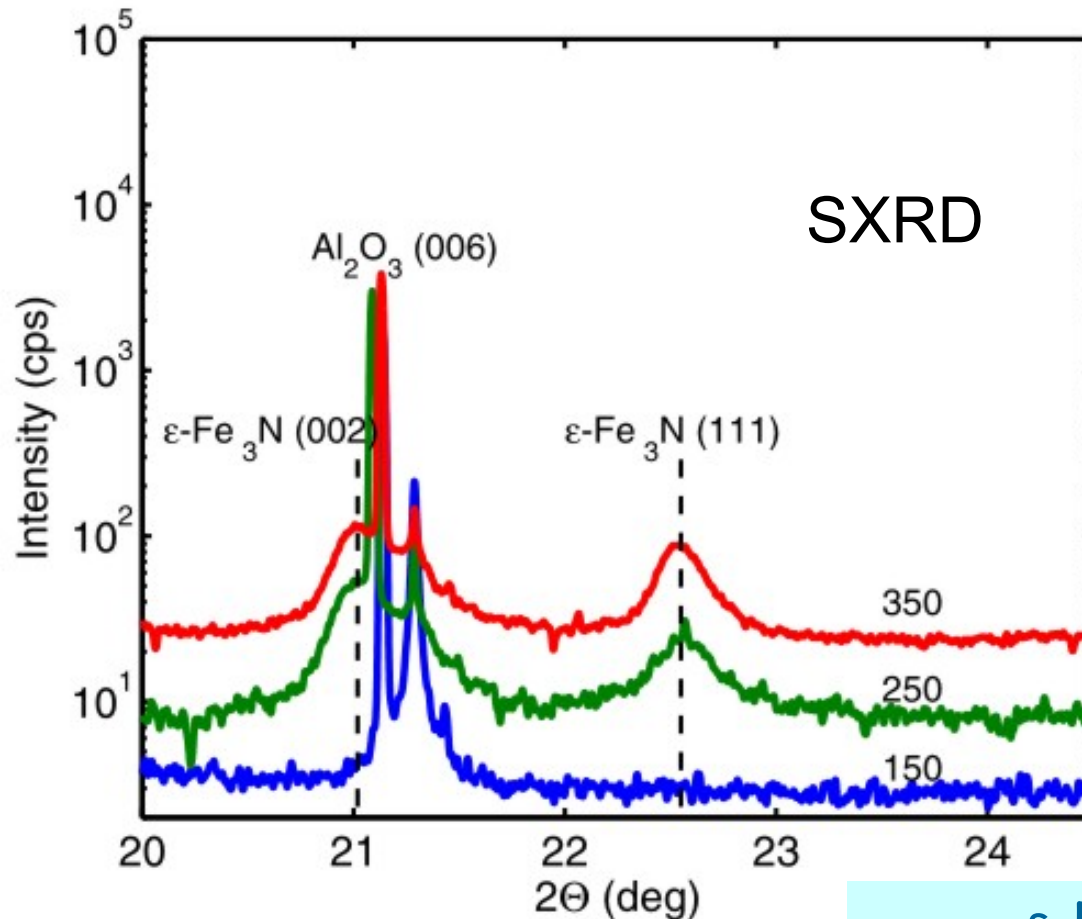


agregacja Fe

*I. Kowalik et al. [Warsaw, Linz, Trieste]*

# Dyfrakcja rentgenowska (Ga,Fe)N

krystalograficzna separacja faz

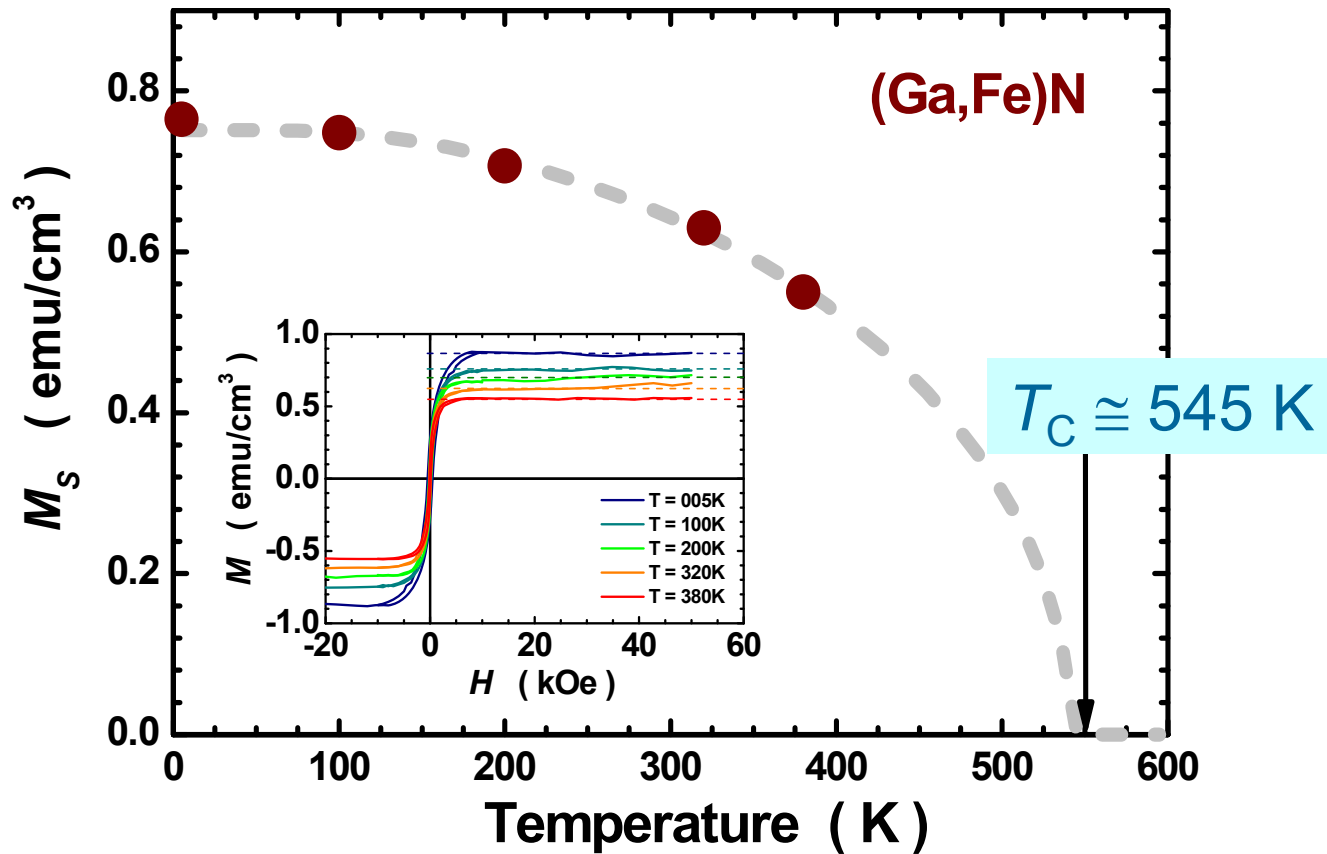


A. Bonanni et al., [Linz, Warsaw], PRL'08

nanokompozyt

$\epsilon-Fe_3N$   
 $T_C = 575 K$

# Spontaniczne namagnesowanie (Ga,Fe)N, $x < 1\%$

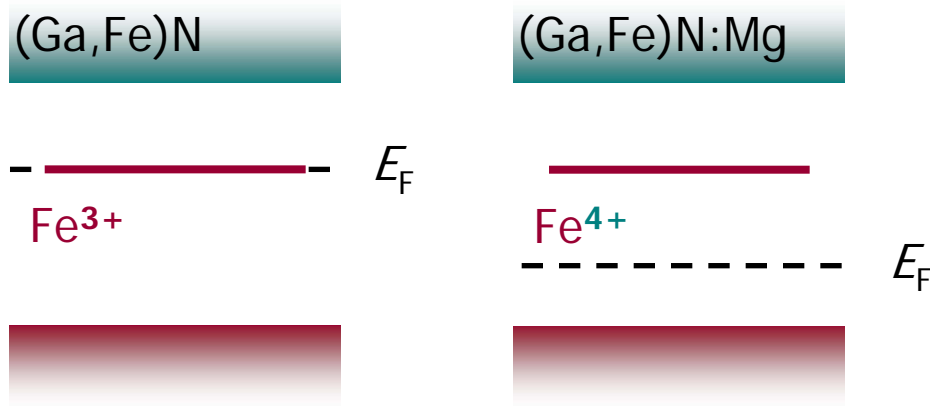


A. Bonanni ,..., [Linz, Warsaw] PRB'07, PRL'08

A. Navaro-Quezada ,..., [Linz, Warsaw] PRB'2010

# Kontrolowanie agregacji przez ko-domieszkowanie

orbitale  $d$  w przerwie energetycznej



zmiana wartościowości  
→ wpływ na agregację

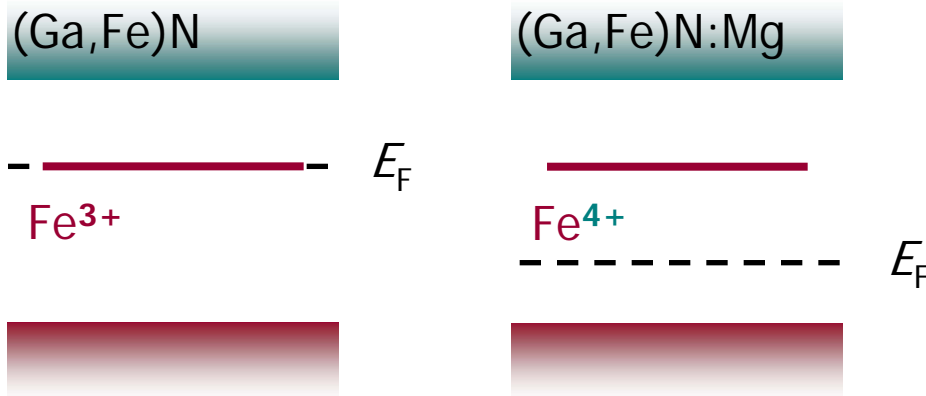
*T. D. Nature Mat. '06*

*S. Kuroda et al. [Tsukuba, Warsaw]*

*Nature Mat. '07 (Zn,Cr)Te:N,I*

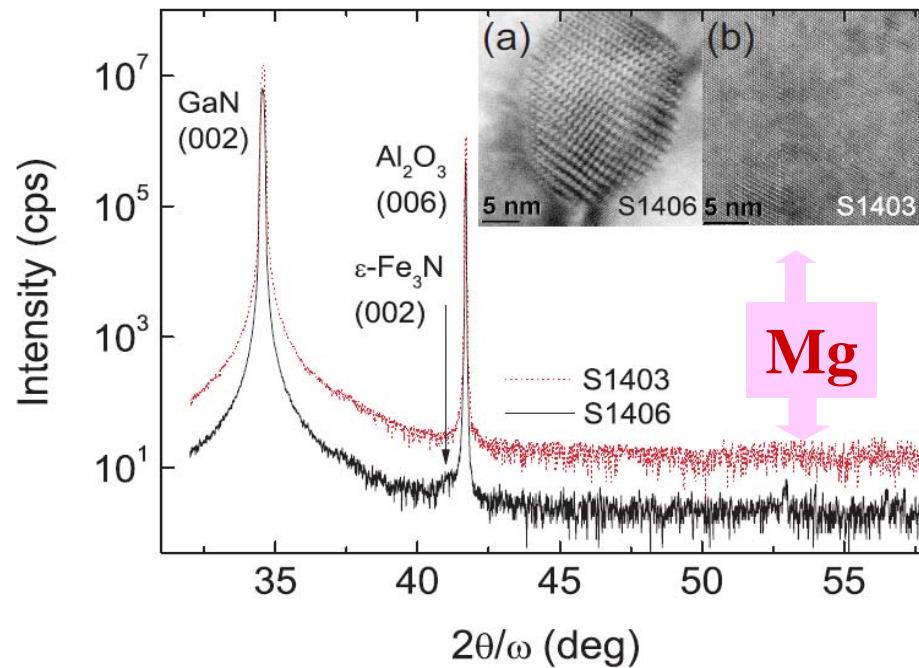
# Kontrolowanie agregacji przez ko-domieszkowanie

orbitale  $d$  w przerwie energetycznej



zmiana wartościowości  
→ wpływ na agregację

*T. D. Nature Mat.'06*

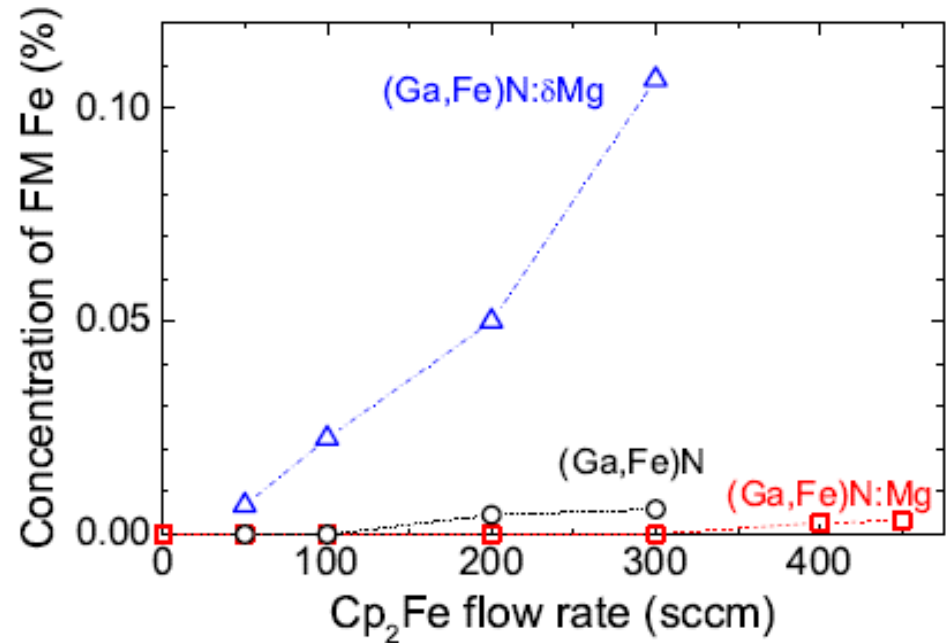
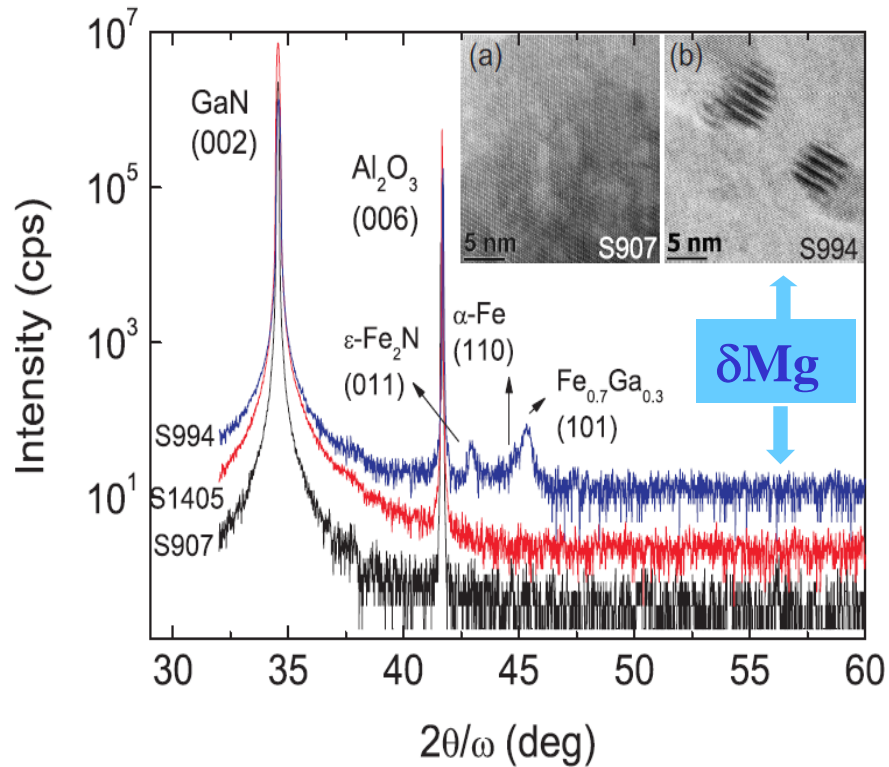


(Ga,Fe)N:Mg

*A. Navaro-Quezada et al.*  
*[Linz, Warsaw] arXiv'11*

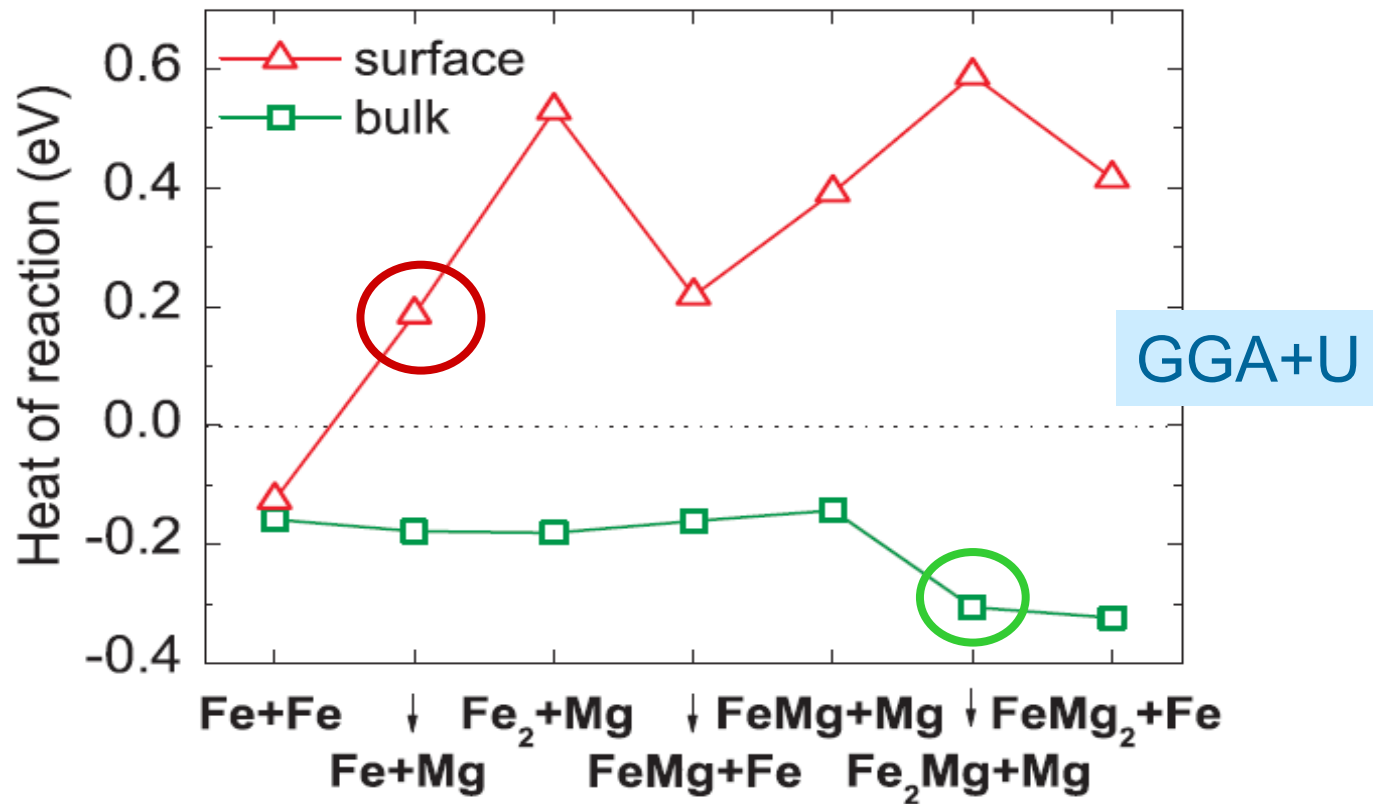


# Wpływ ko-domieszkowania Mg typu $\delta$



*A. Navaro-Quezada et al.  
[Linz, Warsaw] arXiv'11*

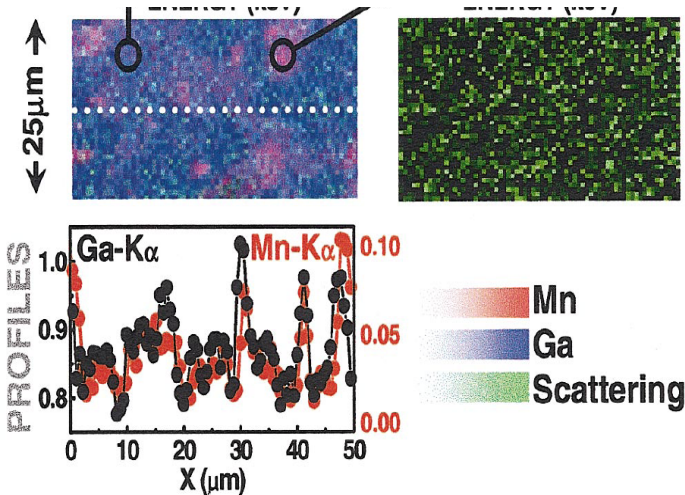
# Kontrolowanie agrecji przez ko-domieszkowanie



*A. Navaro-Quezada et al.,  
[Linz, Warsaw] arXiv'11*

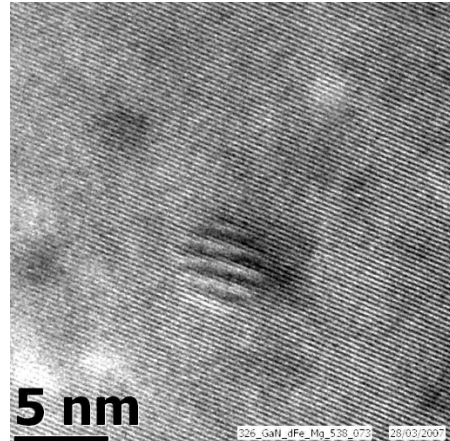
# Separacja faz w półprzewodnikach półmagnetycznych

## (Ga,Mn)N



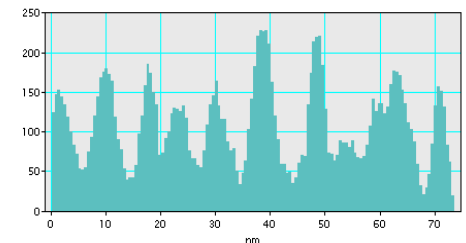
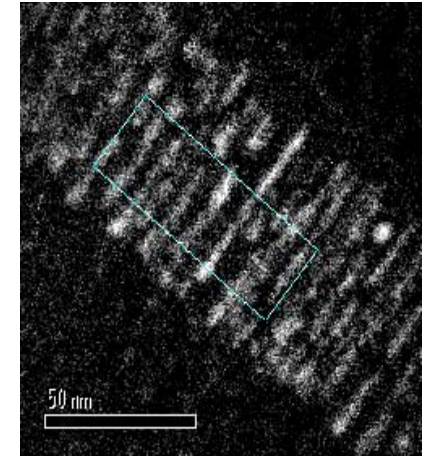
Martínez-Criado, et al.  
(Grenoble) APL '05

## (Ga,Fe)N



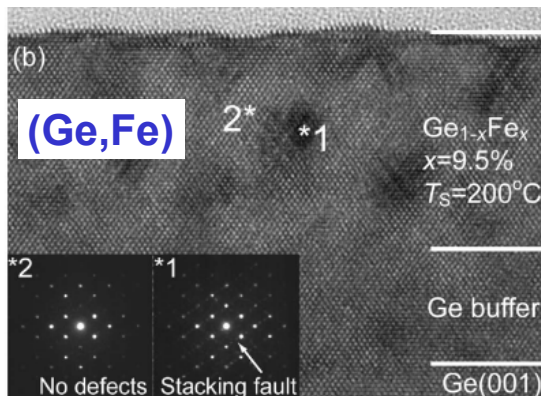
Bonanni (Linz/Warsaw)  
PRB'07

## (Ge,Mn)



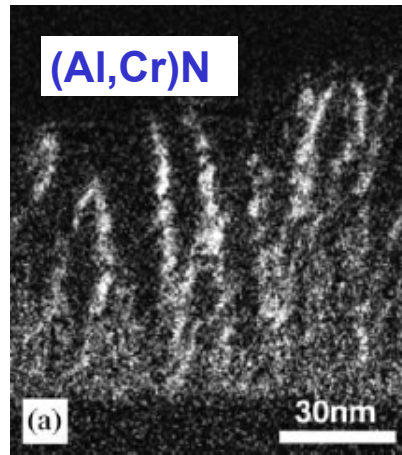
AHE enhanced

Jamet et al. (Grenoble)  
Nature Mat. '06



Shuto et al. (Tokyo) APL '07

## (Al,Cr)N

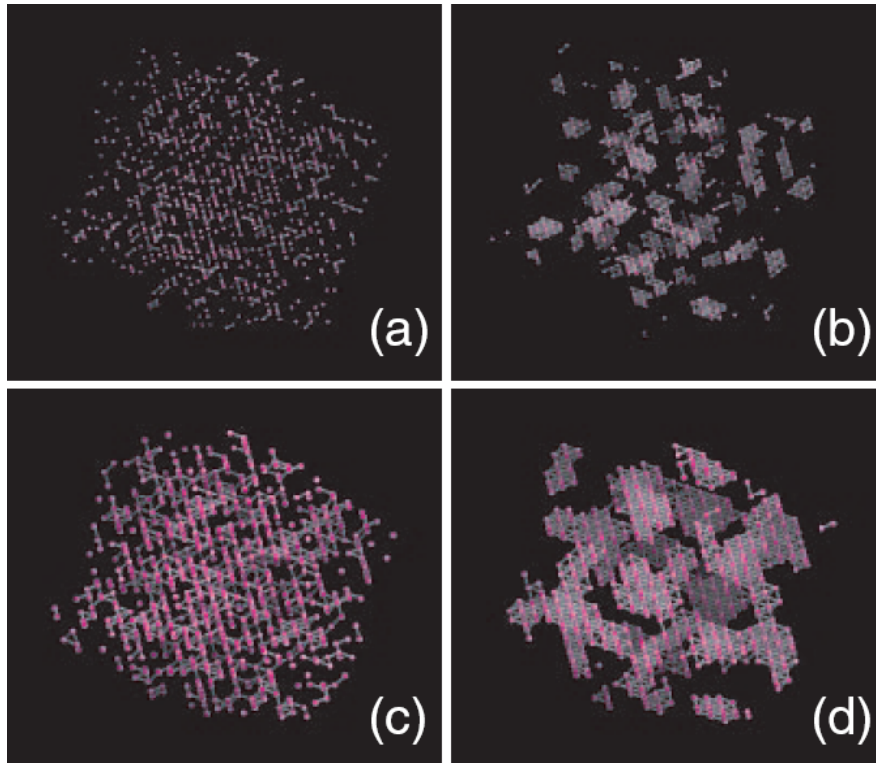


Guo et al. (Arizona)  
JMMM'06

Nanomagnesy w postaci  
kropek lub kolumn

# Sepracja faz z symulacji Monte Carlo

agregacja kationów magnetycznych

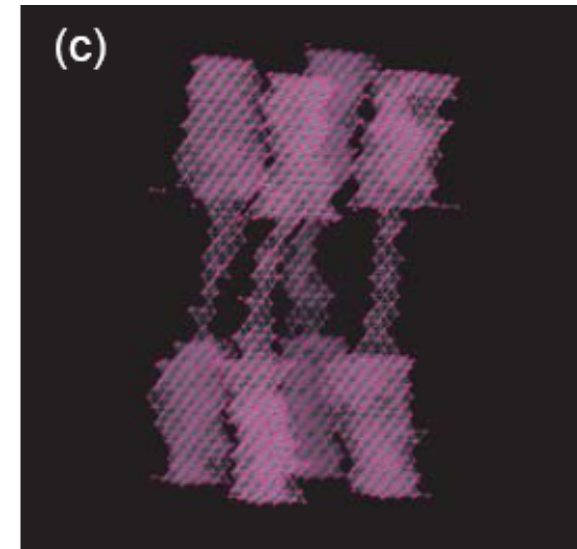
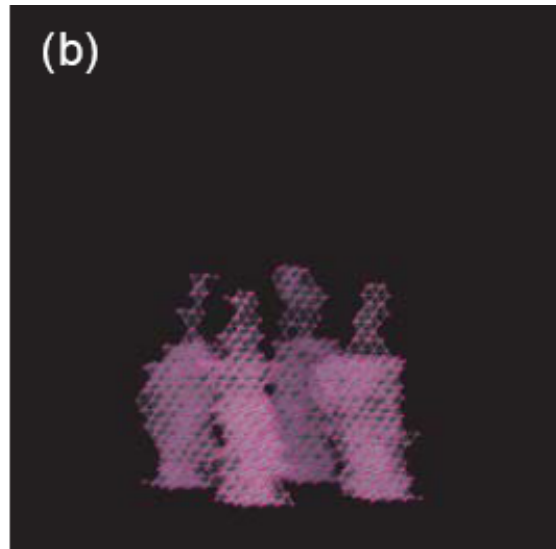
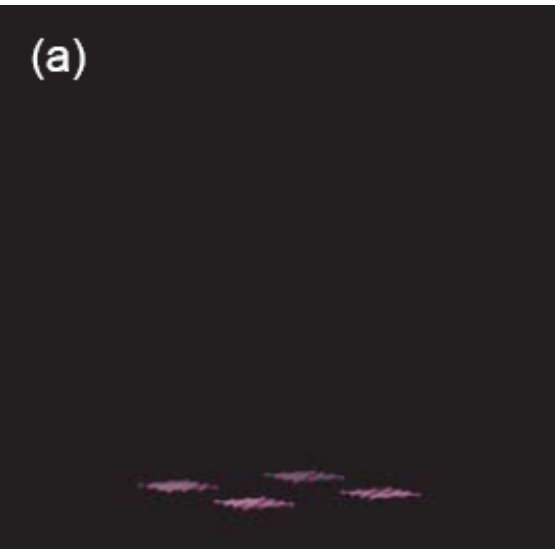


wzrost kolumnowy



*K. Sato et al. (Osaka) JJAP'05,pps'07*

# Metallic nanocolumns in semiconductors possible electronic devices: array of SETs



*T. Fukushima et al. [Osaka] phys.stat.sol.(c)'06*

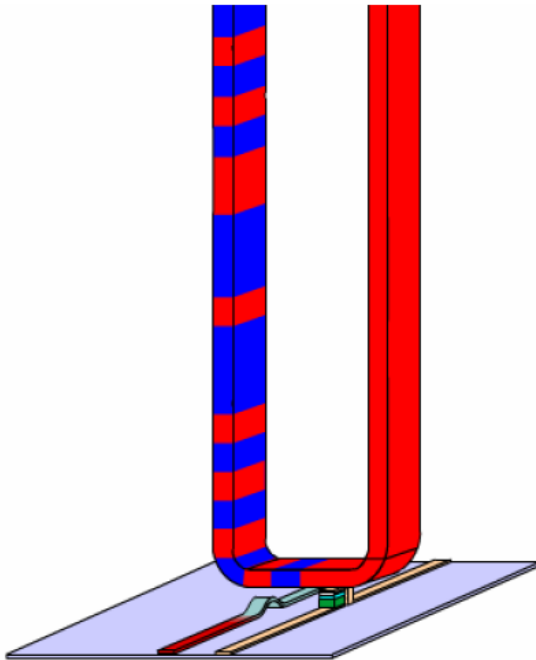
to be demonstrated...

# Self-organised nanomagnets in semiconductors

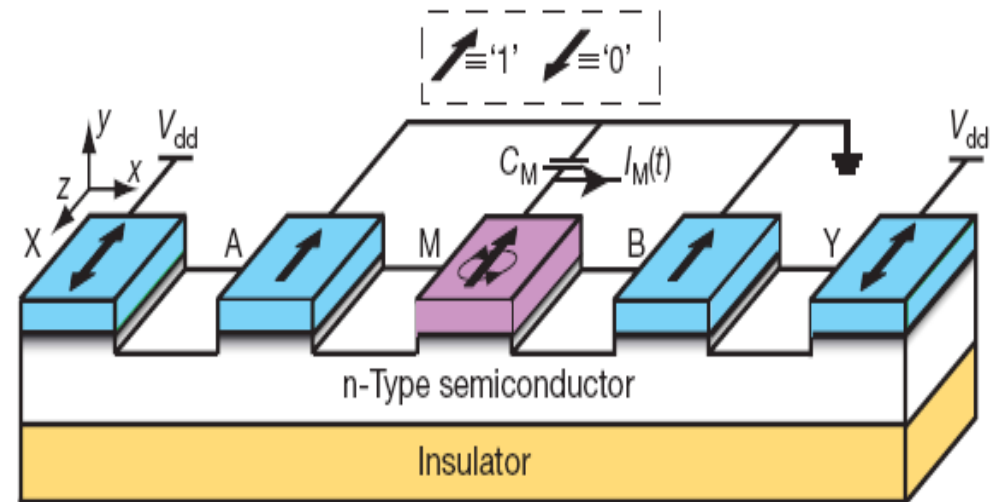
*media for:*

race track memory?

logic gates?



*Parkin et al. (IBM) SPINTECH'05*



*Dery et al. (UCSD) Nature'07*

magneto-optical devices?

metallization? .... ?

# Podsumowanie

# Uwagi podsumowujące

elektronika

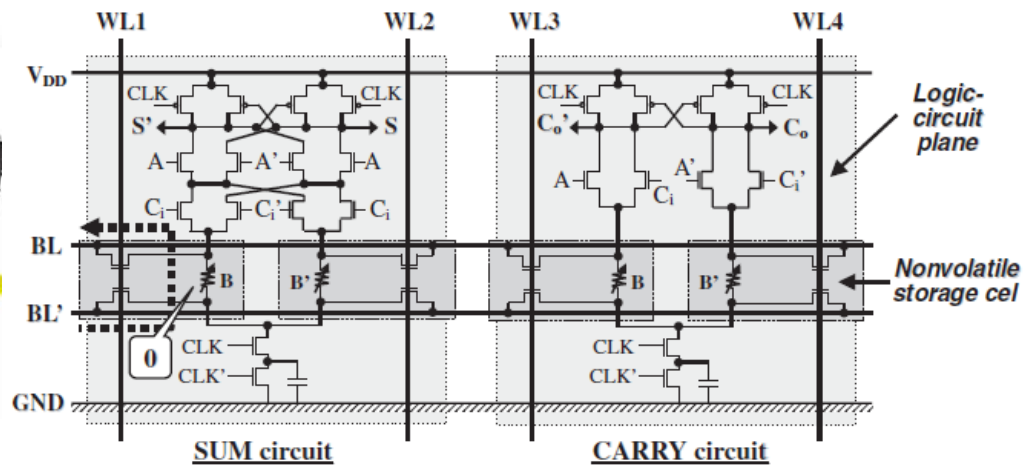
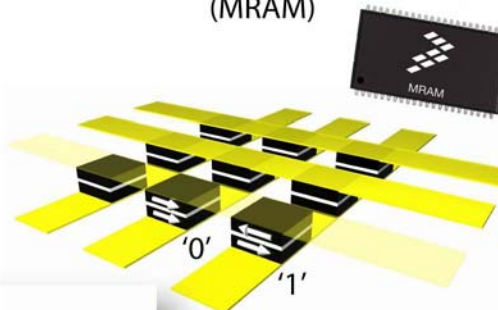


czy spintronika?

Hard Disk Drive (HDD)



Magnetic Random Access Memory (MRAM)

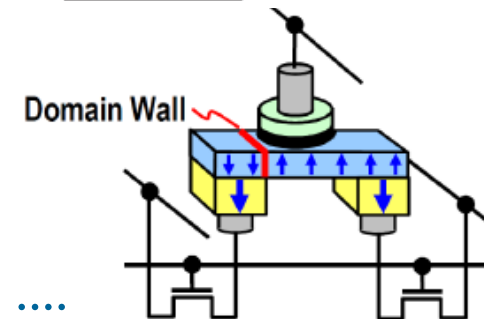


w spintronikę inwestują:

NEC, Toshiba,....

Samsung,...

Crocus (Grenoble) + Rusnano (300 mln. \$ maj 2011 r.). ...





# Podsumowanie

1965 - 2005 r.  
postęp dzięki litografii

2005 - ??  
postęp dzięki nowym materiałom i litografii

??  
litografia → uporządkowane nanokompozyty ??

Koniec