

AGH



Model dyspersji barier energetycznych aktywowanego termicznie procesu przełączania magnetyzacji w układach cienkich warstw z magnetyczną anizotropią prostopadłą

Maciej Czapkiewicz

Katedra Elektroniki, WIEiT, AGH



- Zastosowanie anizotropii prostopadłej (Perpendicular Magnetic Anisotropy PMA) w spintronice
- Proces przemagnesowania cienkich warstw z PMA
- Anomalie przemagnesowania w układach wielowarstwowych $[\text{Pt/Co}]_N/\text{IrMn}$
- Model dyspersji barier energetycznych termicznie aktywowanego procesu przemagnesowania
- Zastosowanie modelu do analizy jakości cienkich warstw ferromagnetycznych

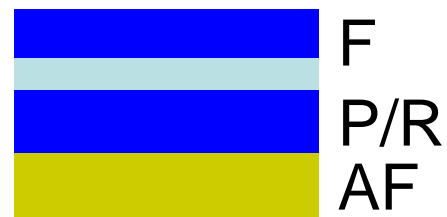


Elektronika spinowa:
użycie prądu spinowego zamiast ładunkowego.

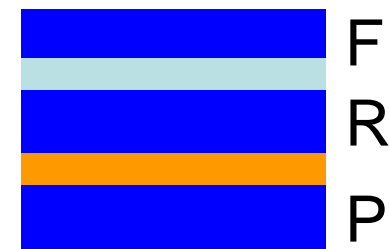
Polaryzacja spinowa →
transfer momentu pędu (zapis),
spinowo-zależne przewodnictwo (odczyt),
dodatnie sprzężenie zwrotne (oscylacje)



PSV



SV

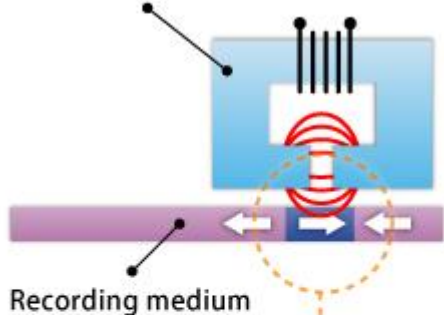


SAF-SV



Horizontal recording method

Ring-shaped recording head



Closeup

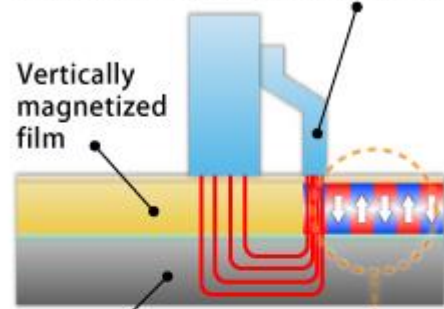


Data are recorded horizontally.

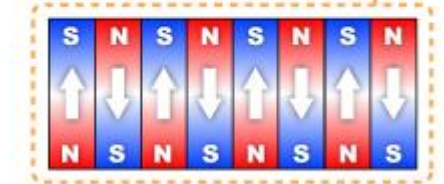
In horizontal recording, magnetic poles of different bits face each other and weaken the signals, so high density cannot be achieved.

Perpendicular recording method

Single-pole magnetic recording head

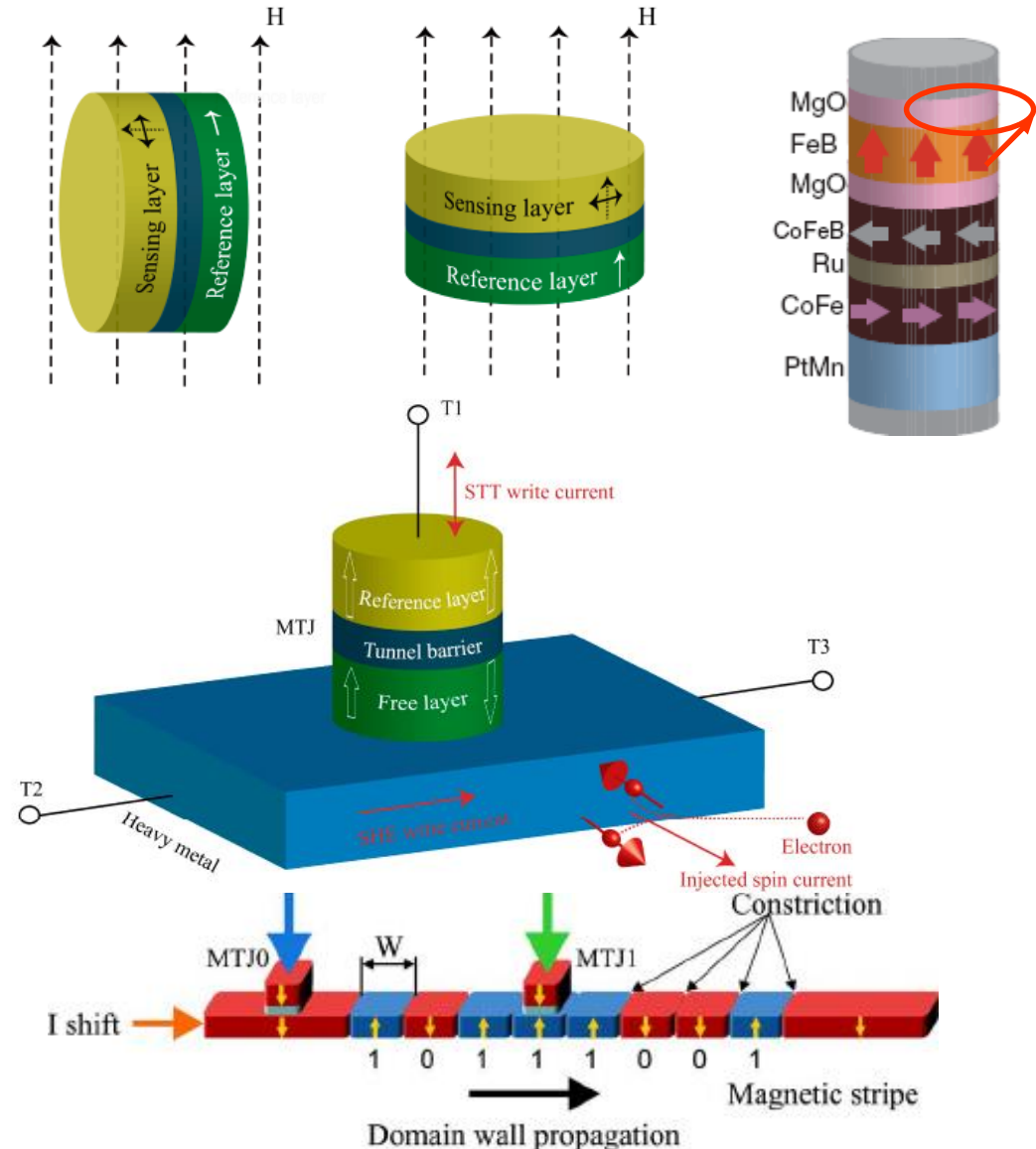


Closeup



Data are recorded vertically

Adjacent magnetic poles can strengthen each other, achieving strong retention even at high density.

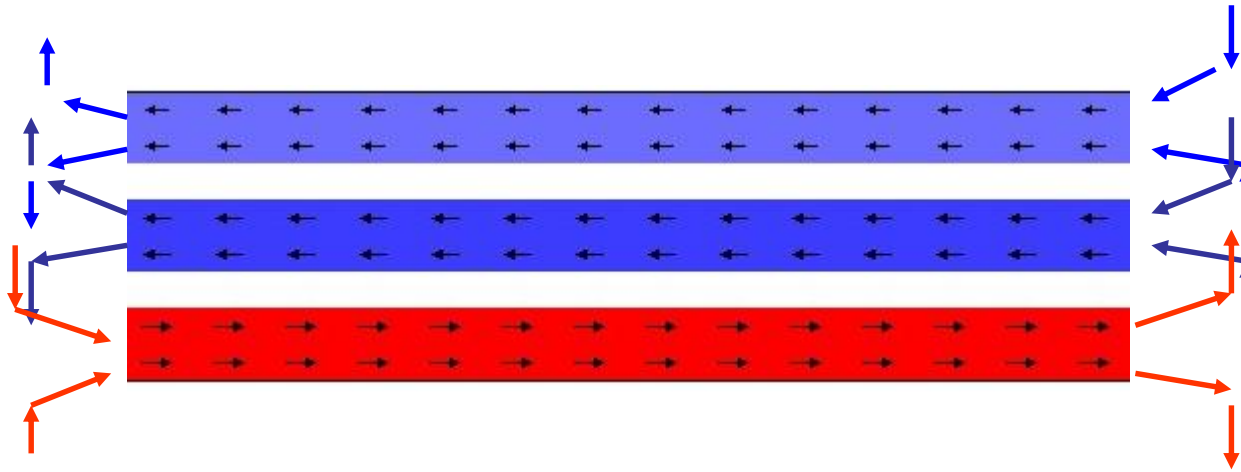


M. Wang et. al., *Micromachines* 2015, 6, 1023-1045

H. P. Trinh et. al., *Circuits and Systems I, IEEE Transactions on* 60(6):1469-1477 (2013)

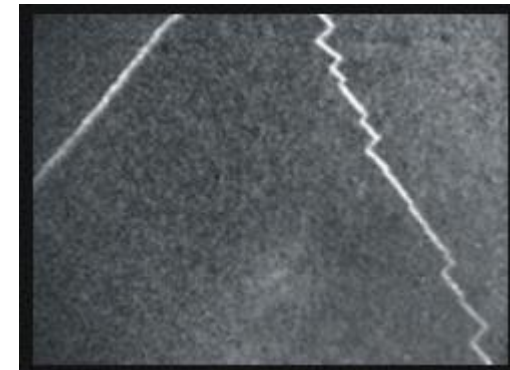
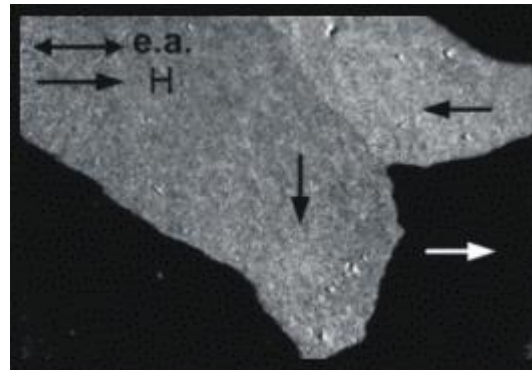
S. Tamaru et. al., *Applied Physics Express* 7, 063005 (2014)

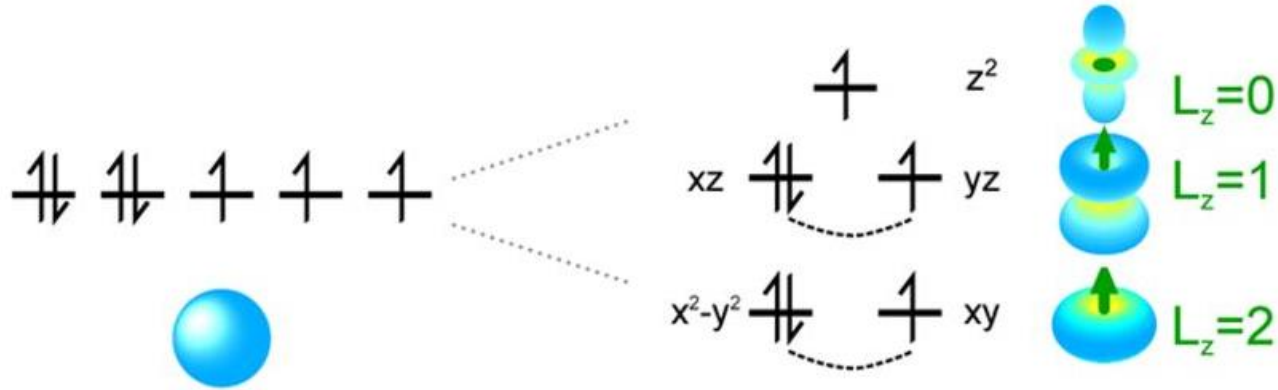
Dlaczego anizotropia prostopadła?



Anizotropia w płaszczyźnie warstwy:

- Oddziaływanie dipolowe
- Złożona struktura domenowa, szczególnie w strukturach ze sprzężeniem międzywarstwowym



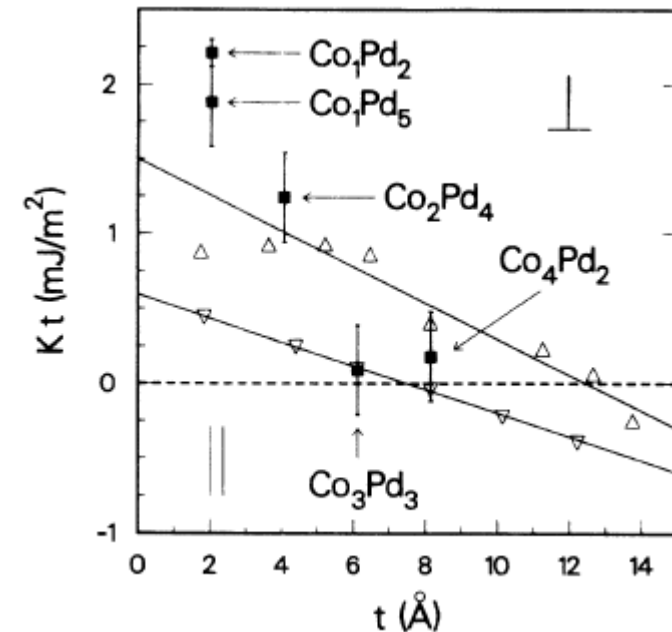


Złamanie symetrii, oddziaływanie spinowo-orbitalne, hybrydyzacja, naprężenia...

Efekt powierzchniowy:

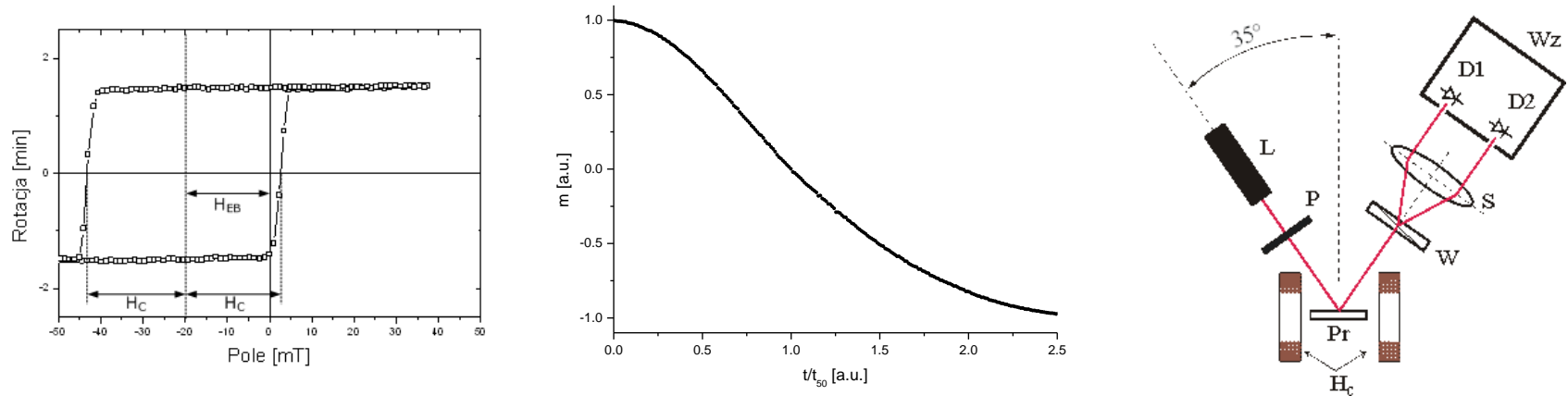
$$K \cdot t = 2K_s - K_v \cdot t$$

→ widoczny w cienkich układach wielowarstwowych, np. Co/Pt, Co/Pd, CoFeB/MgO

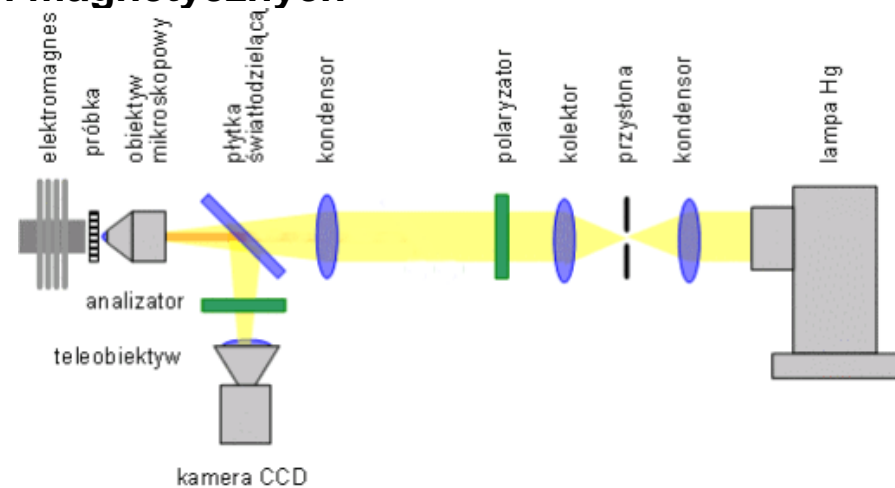




- Magnetometr MOKE: skręcenie kąta Kerra w funkcji pola magnetycznego lub czasu

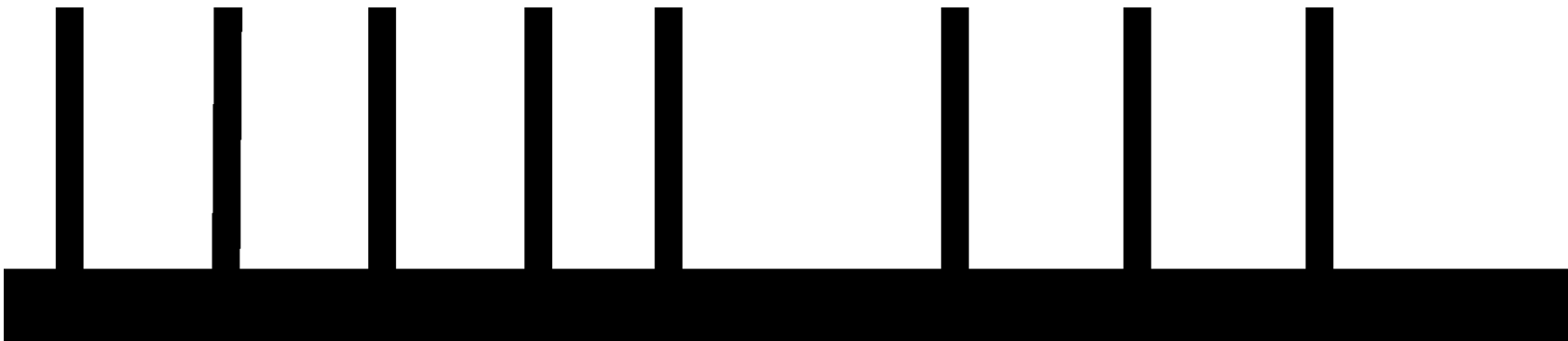
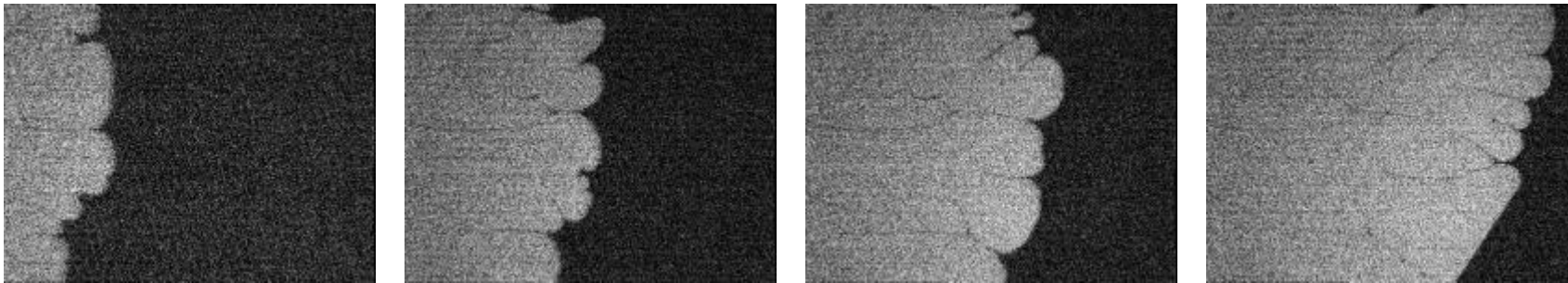
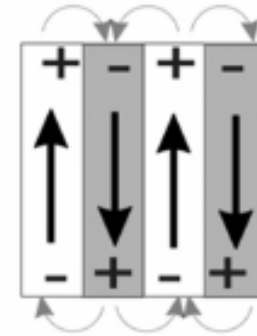


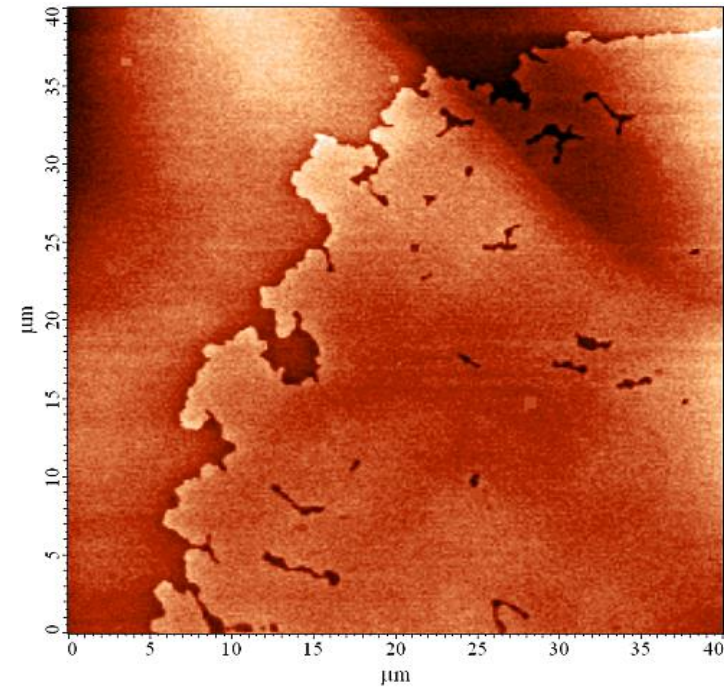
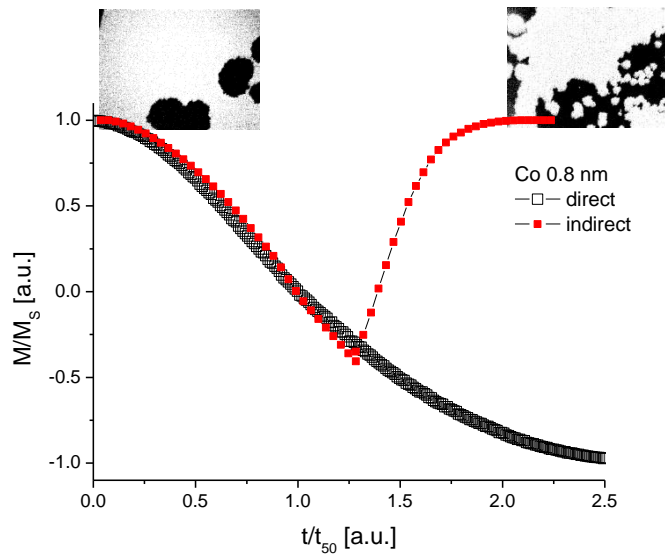
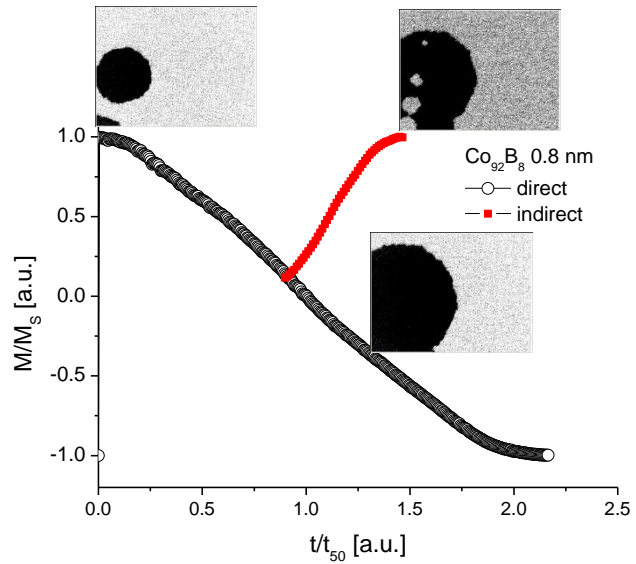
- Mikroskop MOKE: obserwacja domen magnetycznych





- Oddziaływanie tylko z sąsiednimi obszarami
- Brak kolektywnego przełączania magnetyzacji wymuszonego polem rozproszonym
- W pobliżu pola H_K – możliwość lokalnego przełączania wskutek termicznej aktywacji
- Istotny wpływ niejednorodności na gęstość nukleacji/sposób propagacji domen





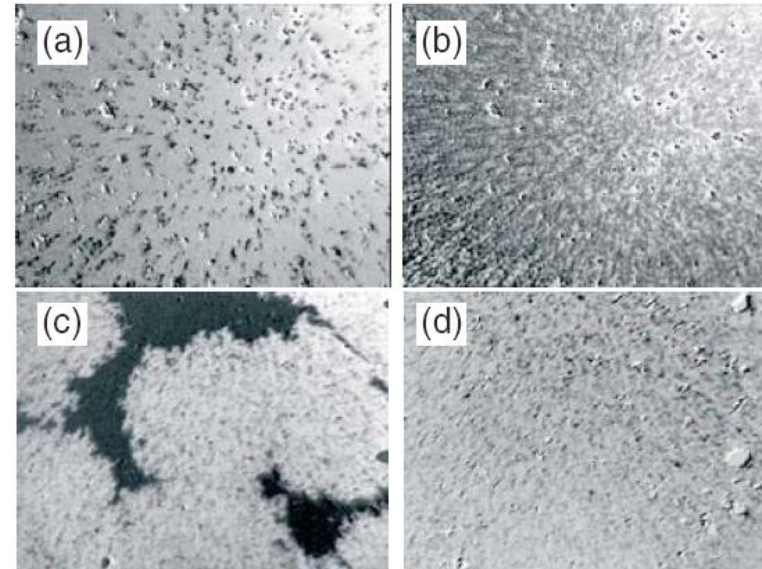
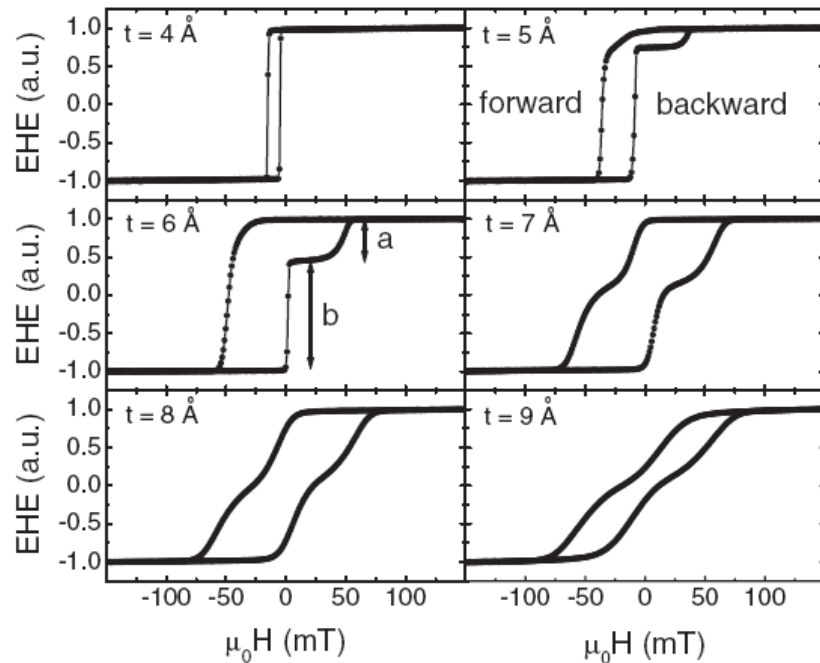
Asymetria w układach $[\text{Co/Pt}]_n/\text{IrMn}$



Układ supersieć $[\text{Co/Pt}]_n$ i antyferromagnetyk IrMn

Zamiast klasycznego efektu Exchange-Bias (przesunięcie pętli):

- dodatkowe pola przełączania
- różnice w strukturze domenowej w zależności od kierunku przełączania

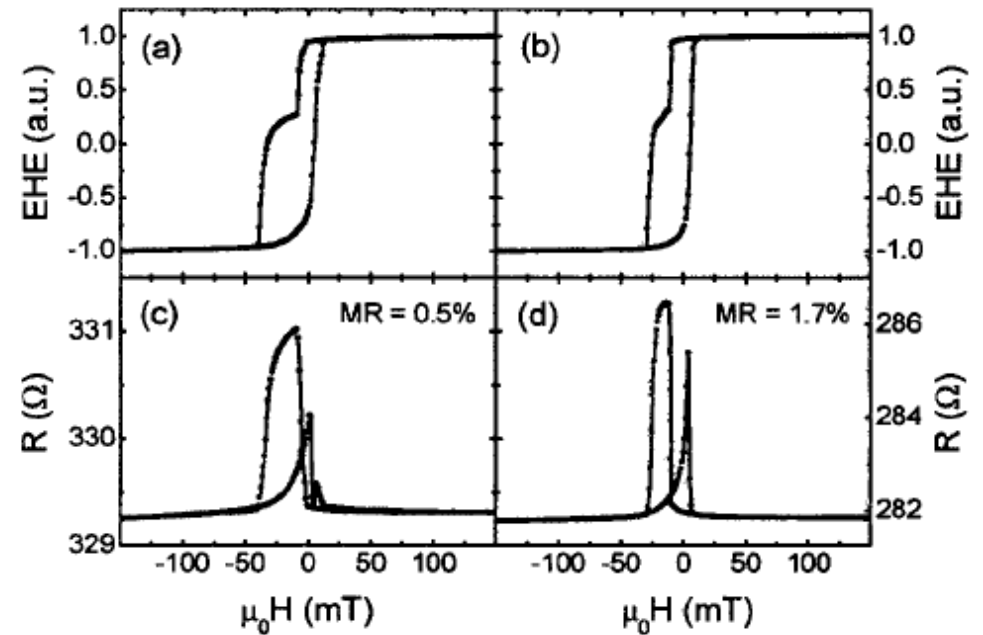
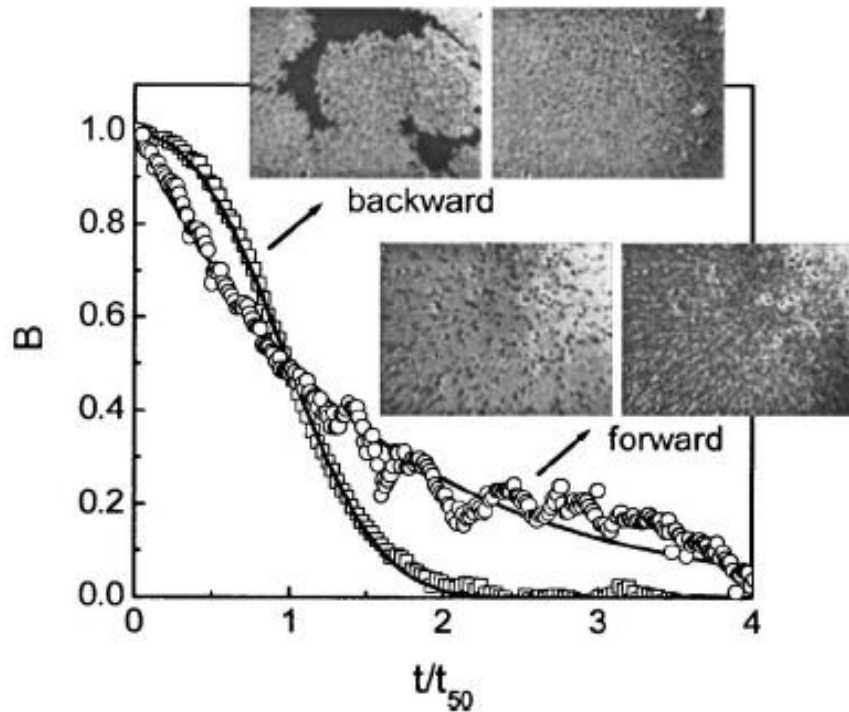


S. van Dijken, M. Czapkiewicz et.al, *phys. Stat. sol. (b)* 243, 169 (2006)

Asymetria w układach $[\text{Co/Pt}]_n/\text{IrMn}$



Asymetria widziana również w kształcie relaksacji magnetyzacji i w pętli magnetorezystancji:

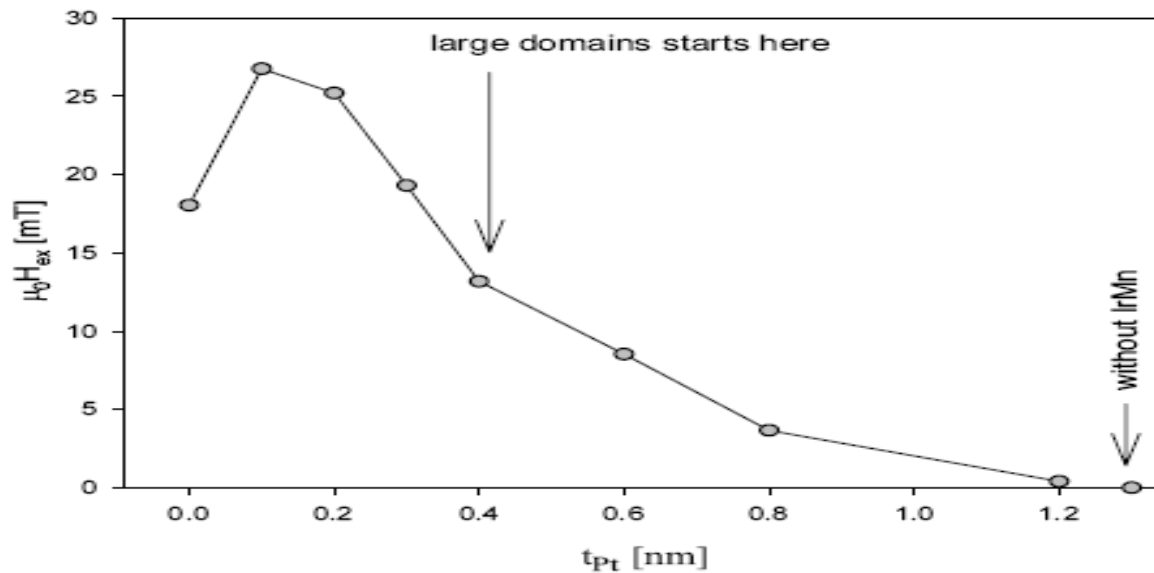
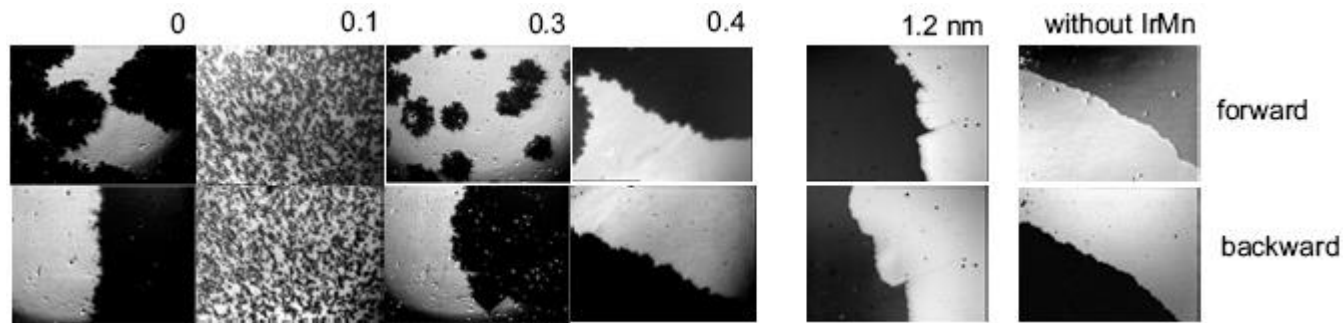


S. van Dijken, M. Czapkiewicz et al., Journal of Applied Physics 99, 083901 (2006)

Układ z separatorem $[\text{Co}/\text{Pt}]_n/\text{Pt}/\text{IrMn}$



Jak separator Pt wpływa na oddziaływanie IrMn na supersieć Co/Pt?

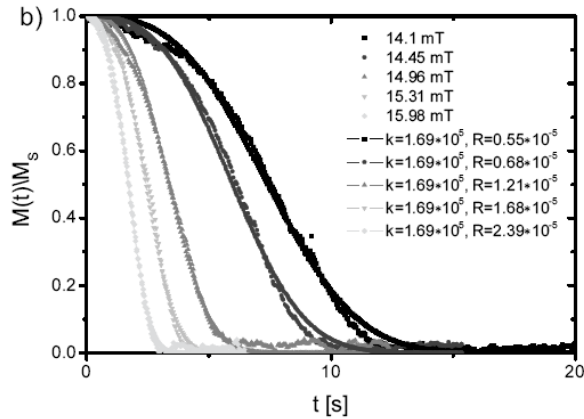


M. Czapkiewicz et al., *phys. stat. sol. (c)* 3, 48 (2006)

Wyznaczanie objętości Barkhausena

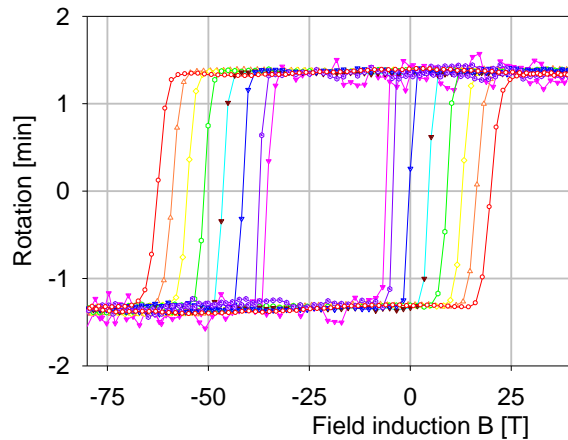
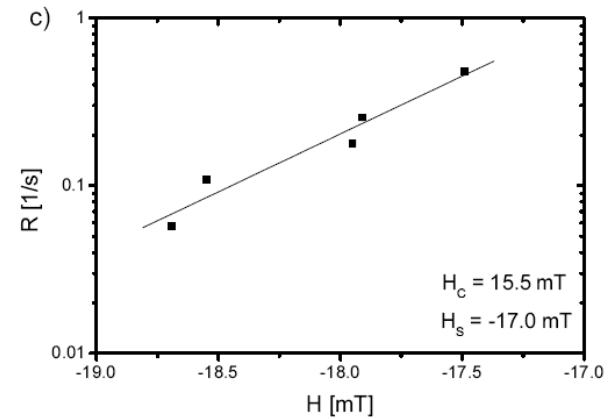


$$M(t) = \exp(-2k^2(1-(Rt+1/k) + 0.5(Rt+1/k)^2 - \exp(-Rt)(1-1/k) - 0.5k^2(1-Rt)))$$

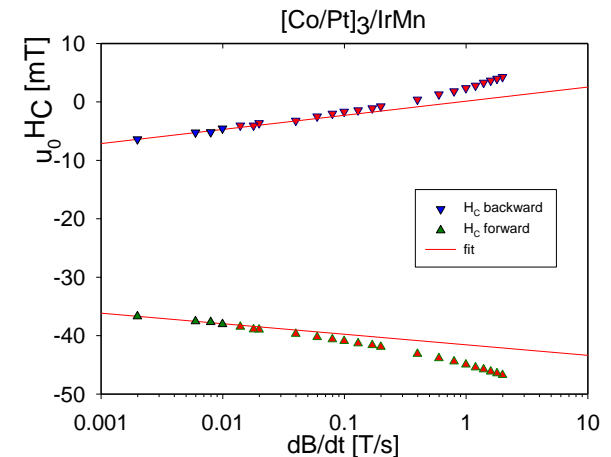


$$R(H, T) = R_0 \exp[-(W_N - 2HMV_N) / k_B T]$$

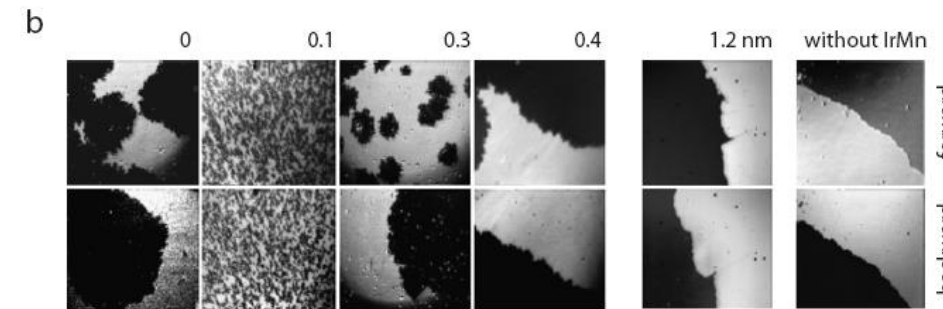
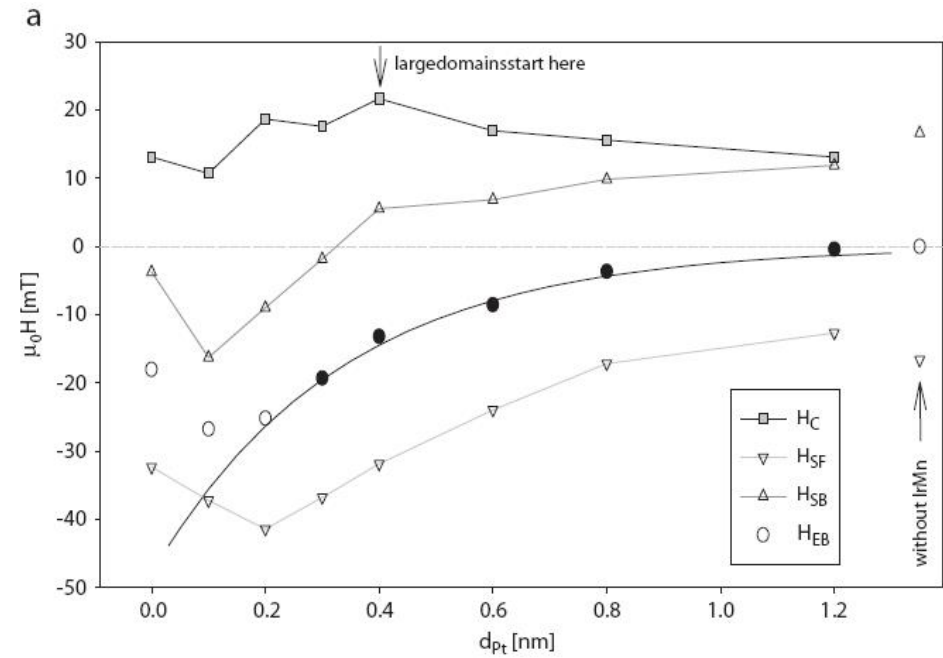
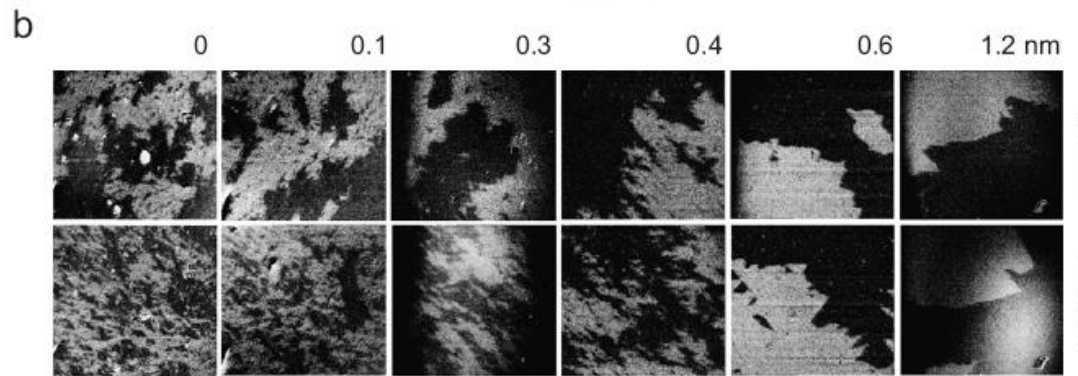
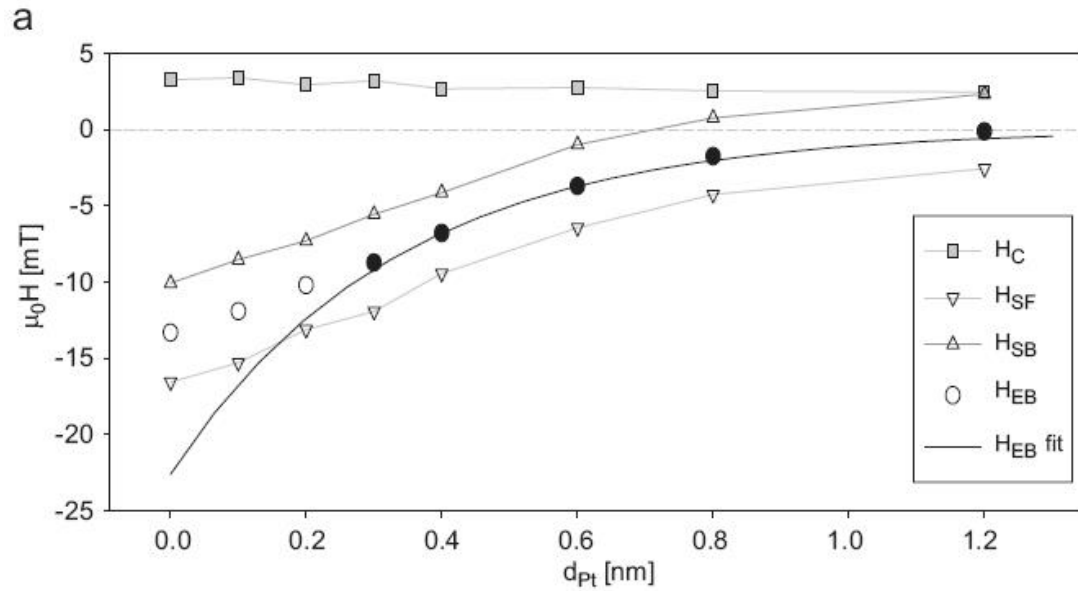
$$k = v / r_c R$$



$$\mu_0 H_s = \frac{k_B T}{V_B M_s} \cdot \ln\left(\mu_0 \frac{dH}{dt}\right) + H_{s_0}$$



M. Labrune et al, *J. Magn. Magn. Mater.* 80, 211 (1989)
 B. Raquet et al, *Phys. Rev. B* 54, 4128 (1996)
 M. Czapkiewicz et al., *phys. stat. sol. (c)* 3, 48 (2006)



M. Czapkiewicz et al, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 316, 151 (2007)

Model dyspersji barier energetycznych

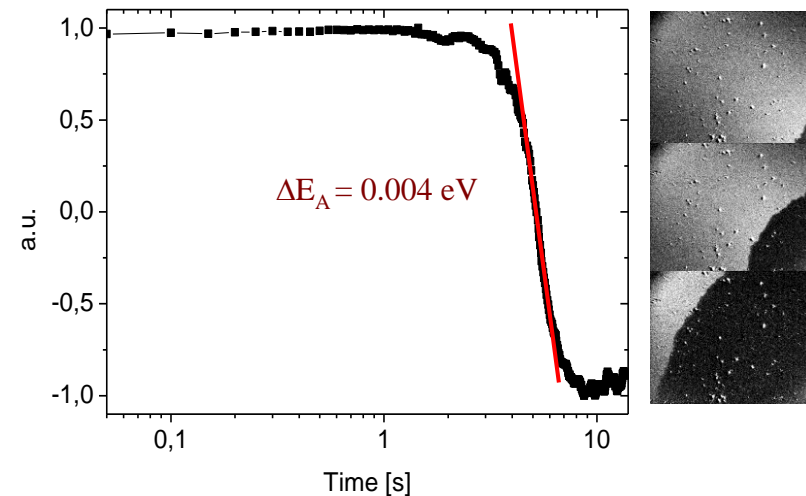
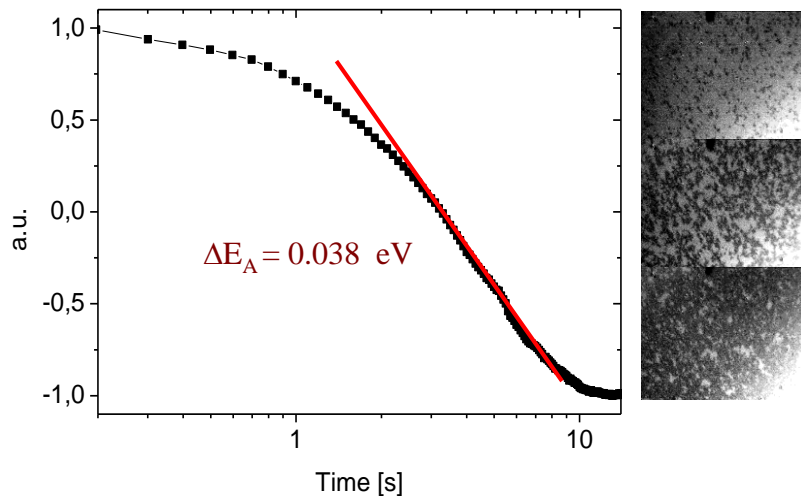


$$m(t) = \int_0^{\infty} g(\tau) \exp(-t/\tau) d\tau.$$

$$g(\tau) = 1/[\tau \ln(\tau_M/\tau_m)],$$

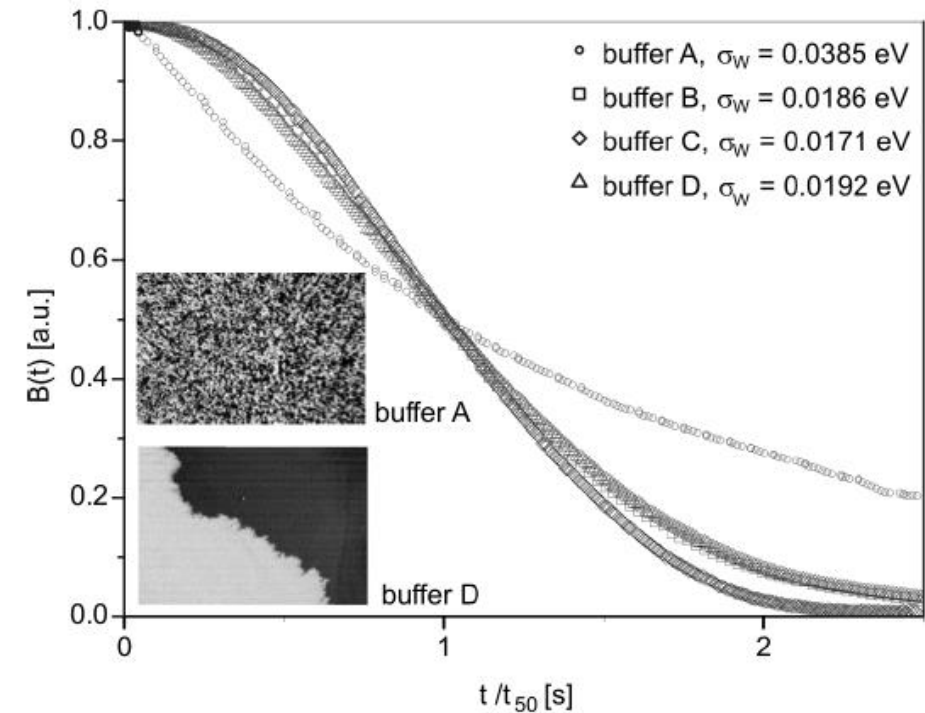
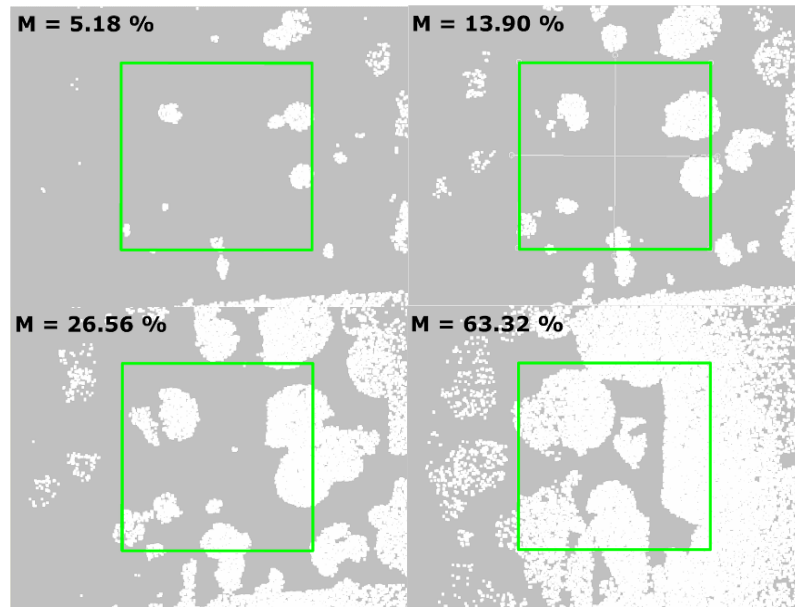
$$\frac{dm(t)}{d \ln(t)} = - [\exp(-t/\tau_M) - \exp(-t/\tau_m)] / \ln(\tau_M/\tau_m).$$

$$\left(\frac{-dm(t)}{d \ln(t)} \right)_{\max} = 1/\ln(\tau_M/\tau_m) = k_B T / \Delta E_A$$



P. Bruno, G. Bayreuther et al., J. Appl. Phys. 68, 5759 (1990)

Narzędzia do wyznaczania dyspersji



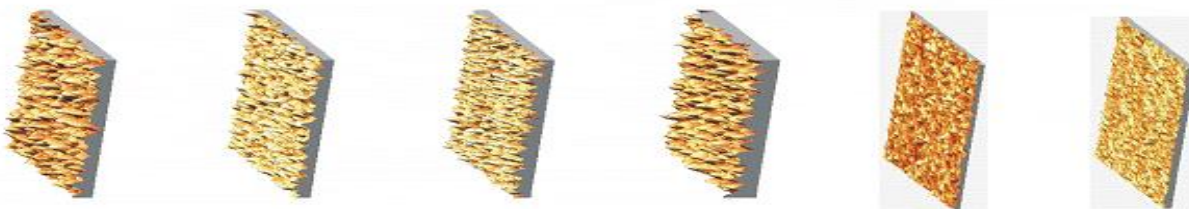
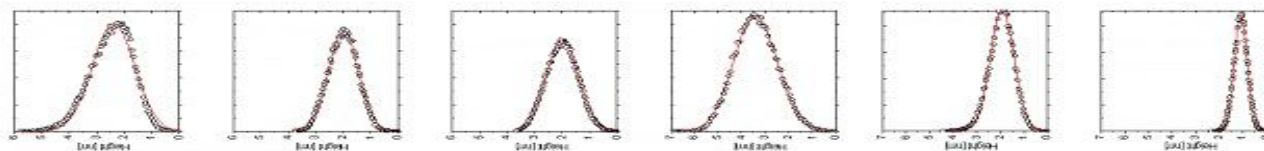
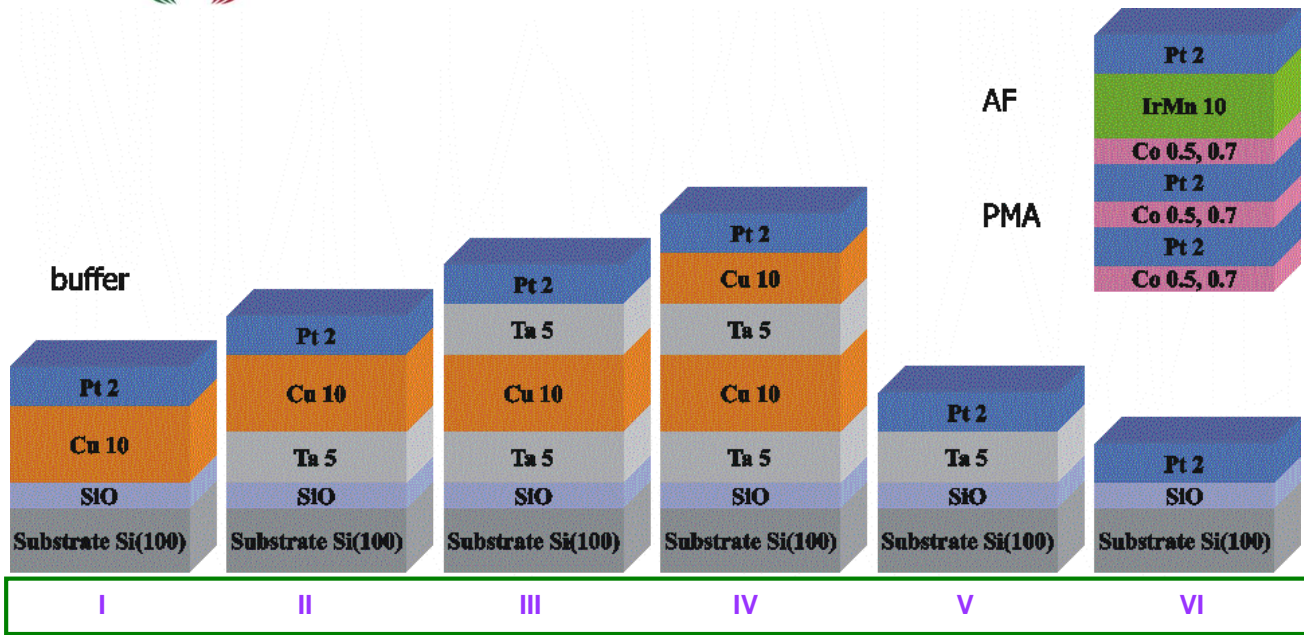
$$B(t) = \frac{M(t) + M_s}{2M_s}$$

$$\frac{dB}{d \ln(t)_{\max}} = -\frac{k_B T}{2\sigma_W}$$

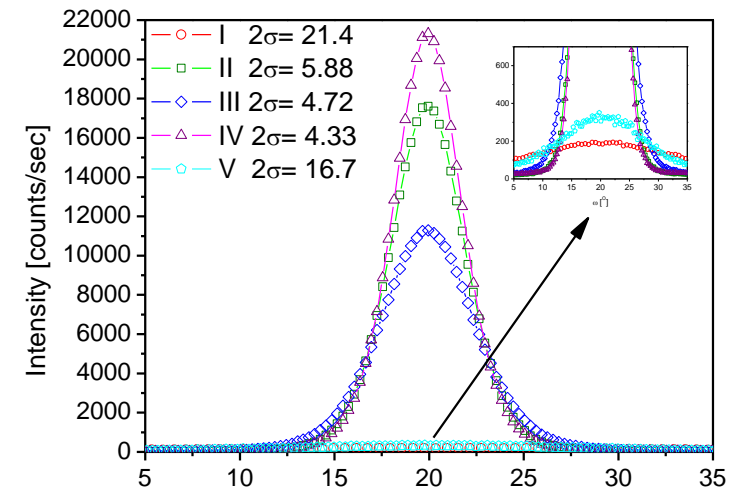
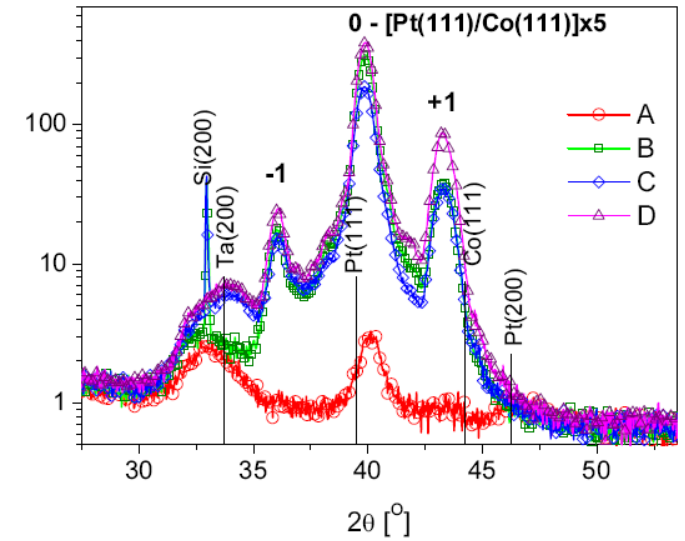
M. Czapkiewicz, J. Kanak et al, *Materials Science-Poland* 26, 839 (2008)

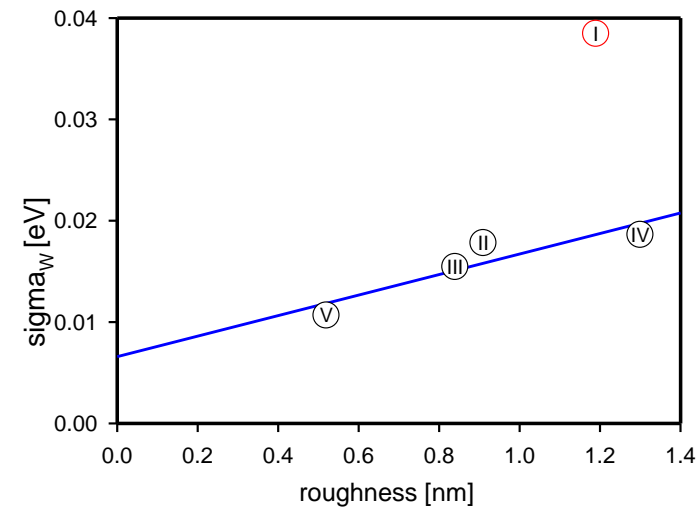
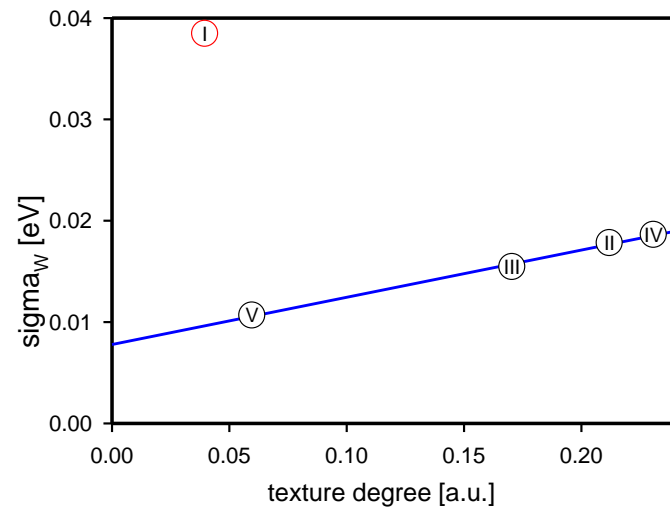


Korelacja struktury i dyspersji energii



J. Kanak, M. Czapkiewicz et al., *phys. stat. sol. (a)* 204, 3950 (2007)

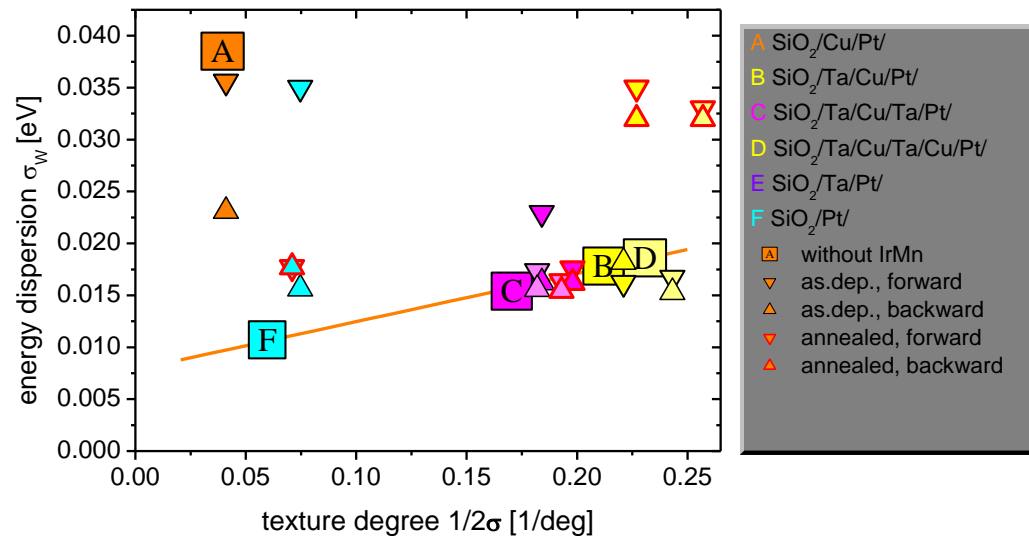
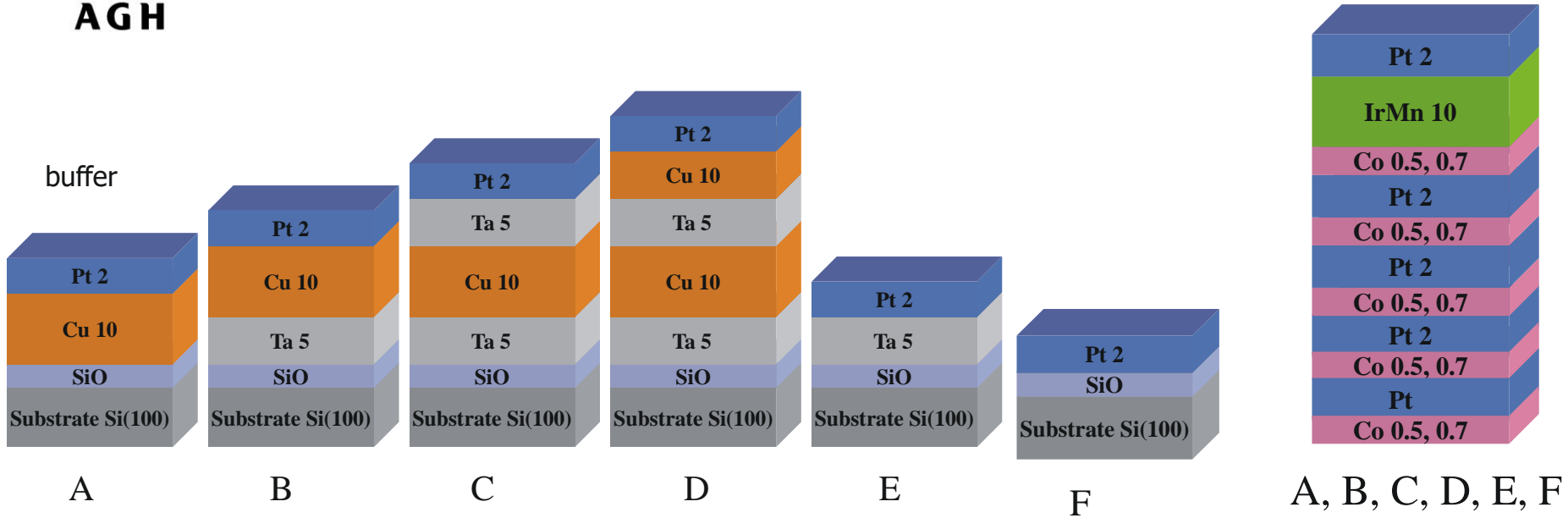




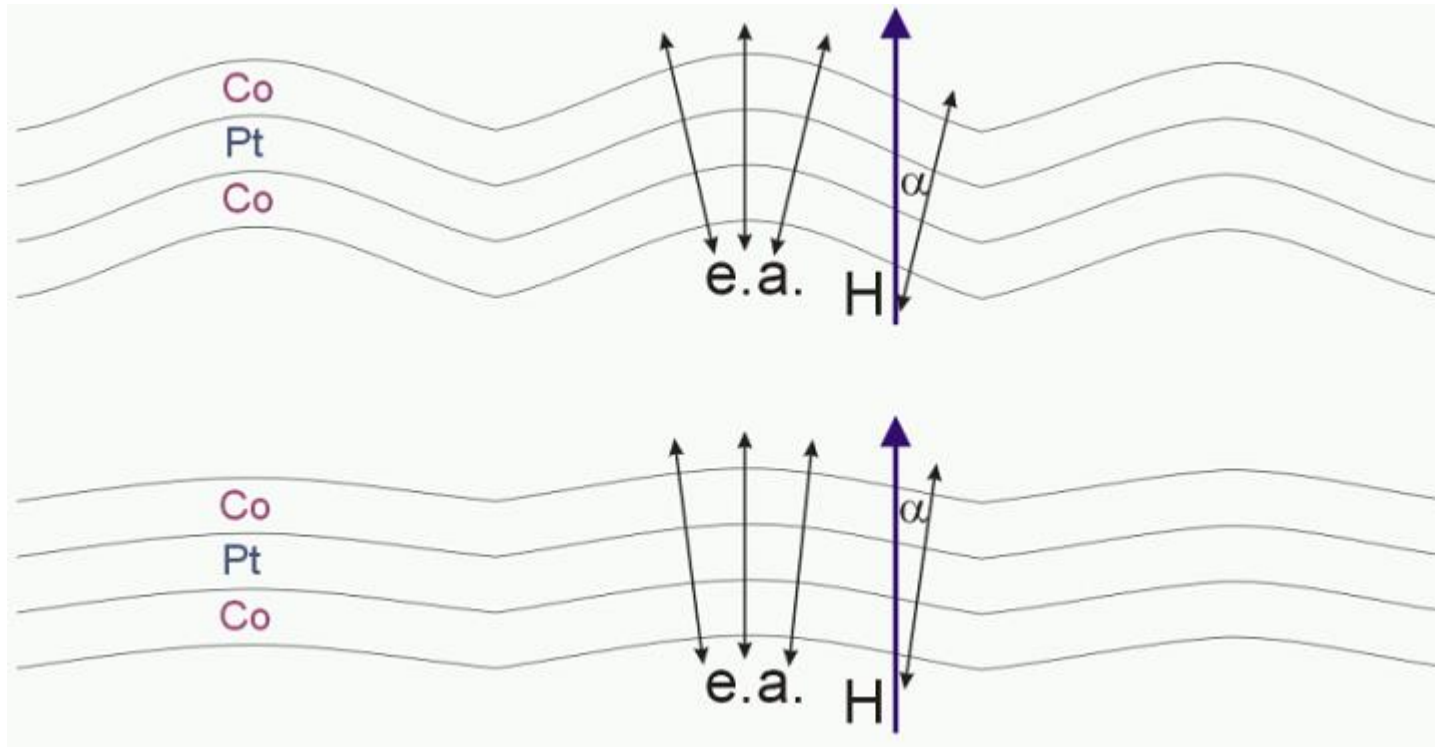
Dla supersieci Co/Pt (regularnie wzrastającej) dyspersja barier energetycznych jest wprost proporcjonalna do rozmiarów krystalitów

J. Kanak , M. Czapkiewicz et al, phys. stat. sol. (a) 204, 3950 (2007)

Dyspersja energii w układach z IrMn



Co powoduje asymetrię w $[\text{Co}/\text{Pt}]_n/\text{IrMn}$?

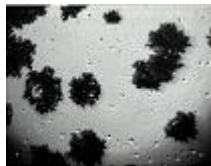
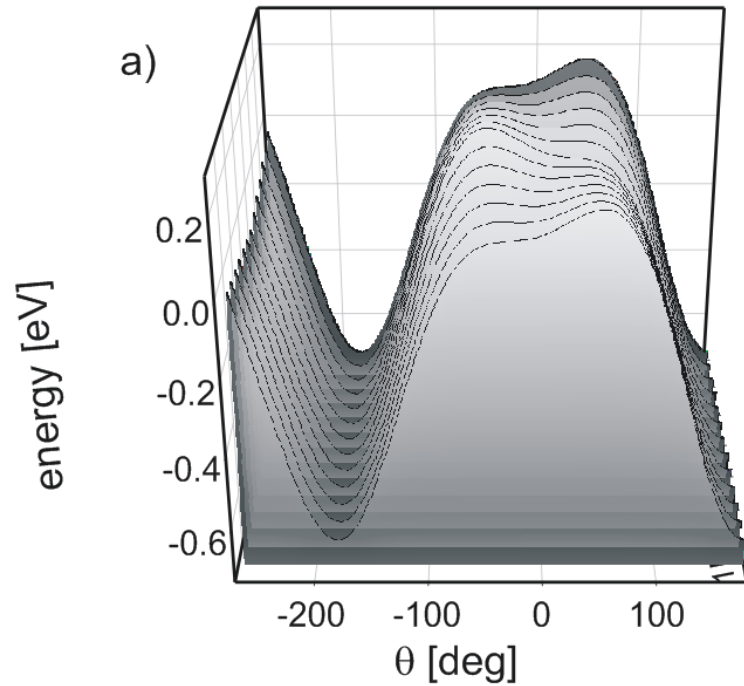


Zależność przestrzennej dyspersji barier energetycznych od kierunku przełączania magnetyzacji w układach PMA z antyferromagnetykiem jest spowodowana przez różnice w lokalnych kątach PMA wynikające z falistości struktury polikrystalicznej

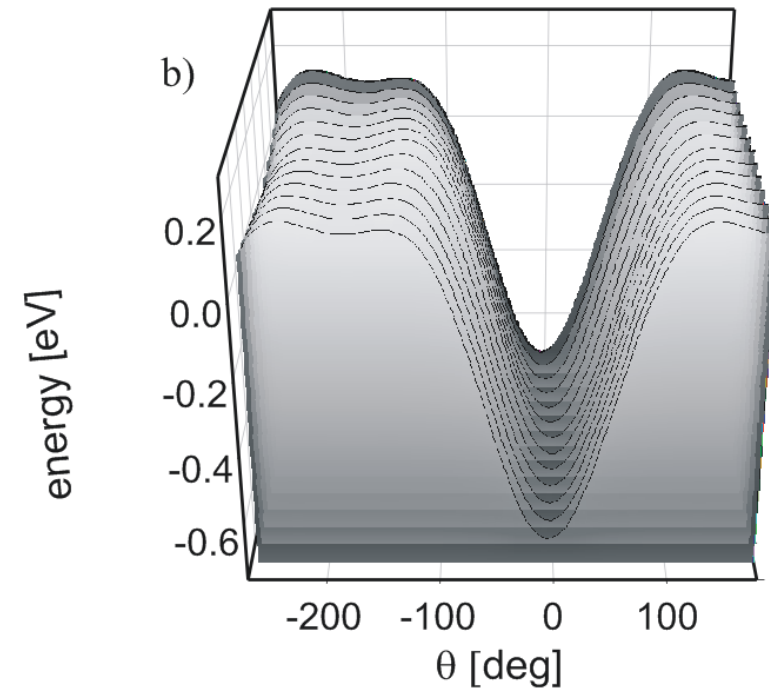
M. Czapkiewicz et al, Phys. Rev. B 77, 024416 (2008)



$\sigma_\theta = 3^\circ$, $K_U = 12 \text{ kJ/m}^3$, $\epsilon_{\text{int}} = 0.047 \text{ mJ/m}^2$, $\mu_0 H = -34.3 \text{ mT}$



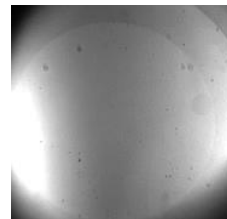
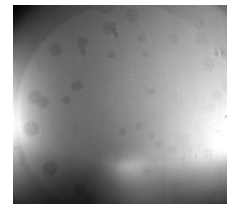
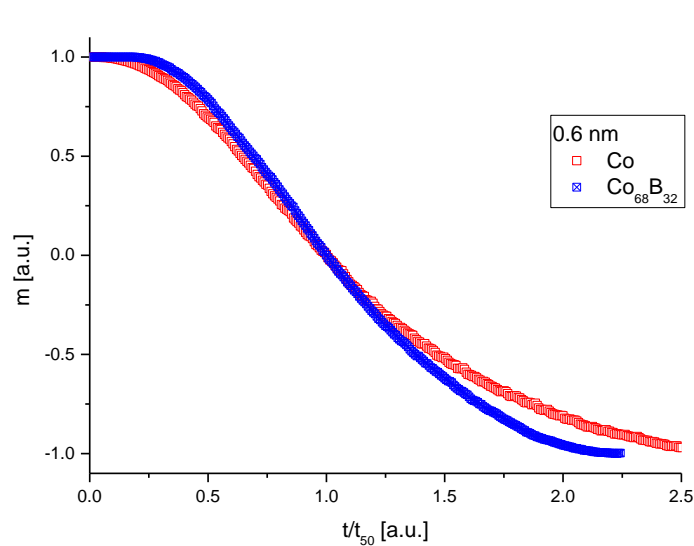
$\sigma_\theta = 3^\circ$, $K_U = 12 \text{ kJ/m}^3$, $\epsilon_{\text{int}} = 0.047 \text{ mJ/m}^2$, $\mu_0 H = -9.7 \text{ mT}$



M. Czapkiewicz et al, Phys. Rev. B 77, 024416 (2008)



Łatwe określanie wpływu preparatyki cienkich warstw (składu, parametrów nanoszenia) na własności strukturalne i magnetyczne cienkich warstw ferromagnetycznych z PMA – parametr ilościowy



Co 0.6 nm	7.9 meV
Co68B32 0.6 nm	7.0 meV

R. Lavrijsen, M. Czapkiewicz et al., *Applied Physics Letters* 96, 022501 (2010)

M. Frankowski, A. Żywczak, M. Czapkiewicz et al, *Journal of Applied Physics* 117, 223908 (2015)



- Dyspersja barier energetycznych związana jest z gładkością powierzchni cienkiej warstwy
- Dzięki pomiarom magnetoptycznym możliwe jest ilościowa parametryzacja gładkości nanoszonych warstw
- Lokalne rozporządkowanie kierunków PMA wraz z energią podmagnesowania wskutek sprzężenia z antyferromagnetykiem prowadzi do anomalii w postaci asymetrii procesu przełączania magnetyzacji
- Zawory spinowe z antyferromagnetykiem nie są optymalne w przypadku układów z PMA



- Zamiast warstwy antyferromagnetyka, można stosować sztuczny antyferromagnetyk zbudowany z dwóch supersieci rozdzielonych warstwą zapewniającą sprzężenie antyferromagnetyczne, na przykład:

seed/[Co_(0.5)/Pt_(0.2)]_{x6}/Co_(0.6)/Ru_(0.8)/Co_(0.6)/[Pt_(0.2)/Co_(0.5)]_{x3}/W_(0.25)/CoFeB_(1.0)/MgO_(0.8)/CoFeB_(t)/W_(0.2)/CoFeB_(0.5)/MgO_(0.75)/Ta_(3.0)/top

Top	
Ta	3.0
MgO	0.75
CoFeB	0.5
W	0.2
CoFeB	t _{FL}
MgO	0.8
CoFeB	1.0
W	0.25
[Co/Pt]	2.7
Ru	0.8
[Co/Pt]	4.8
Ta	seed
Bottom	



Magnetization process and domains in MTJ,

M. Czapkiewicz, M. Zoladz, J. Wrona, P. Wisniowski, R. Rak, T. Stobiecki, C. G. Kim, C.O.Kim, M. Takahashi, M. Tsunoda,
phys. Stat. sol. (b) 241, 1477 (2004)

Asymmetric magnetization reversal in exchange-biased Co/Pt multilayers,

S. van Dijken, M. Czapkiewicz, M. Zoladz, T. Stobiecki,
phys. Stat. sol. (b) 243, 169 (2006)

Magnetization reversal and field annealing effects in perpendicular exchange-biased Co/Pt multilayers and spin valves with perpendicular magnetization,

S. van Dijken, M. Crofton, M. Czapkiewicz, M. Zoladz, T. Stobiecki,
Journal of Applied Physics 99, 083901 (2006)

Magnetization dynamics of perpendicular exchange-biased (Pt/Co)-Pt-IrMn multilayers studied by MOKE microscopy and magnetometry,

M. Czapkiewicz, S. van Dijken, T. Stobiecki, R. Rak, M. Zoladz, and P. Mietniowski
phys. stat. sol. (c) 3, 48 (2006)

Correlation between exchange bias dynamics and magnetization reversal asymmetry in [Pt/Co]₃/Pt/IrMn multilayers,

G. Malinowski, S. van Dijken, M. Czapkiewicz, T. Stobiecki
Applied Physics Letters 90, 082501 (2007)

Exchange bias energy in Co/Pt/IrMn multilayers with perpendicular and in-plane anisotropy,

M. Czapkiewicz, T. Stobiecki, R. Rak, M. Żołądź, S. van Dijken,
Journal of Magnetism and Magnetic Materials 316, 151 (2007)



Influence of buffer layers on the texture and magnetic properties of Co/Pt multilayers with perpendicular anisotropy,
J. Kanak, M. Czapkiewicz, T. Stobiecki, M. Kachel, I. Sveklo, A. Maziewski, S. van Dijken,
phys. stat. sol. (a) 204, 3950 (2007)

Micromagnetic properties of Co/Pt multilayers deposited on various buffer layers,
M. Czapkiewicz, J. Kanak, T. Stobiecki, M. Kachel, M. Żołądź, I. Sveklo, A. Maziewski, S. Van Dijken,
Materials Science-Poland 26, 839 (2008)

Thermally activated magnetization reversal in exchange-biased [Pt/Co]₃/IrMn multilayers,
M. Czapkiewicz, T. Stobiecki, S. van Dijken,
Phys. Rev. B 77, 024416 (2008)
doi: 10.1103/PhysRevB.77.024416

Reduced domain wall pinning in ultrathin Pt / Co 100 x B x / Pt with perpendicular magnetic anisotropy,
R. Lavrijsen, G. Malinowski, J. H. Franken, J. T. Kohlhepp, H. J. M. Swagten, B. Koopmans, M. Czapkiewicz and T. Stobiecki,
Applied Physics Letters 96, 022501 (2010)

Buffer influence on magnetic dead layer, critical current, and thermal stability in magnetic tunnel junctions with perpendicular magnetic anisotropy,
M. Frankowski, A. Żywczak, M. Czapkiewicz, S. Ziętek, J. Kanak, M. Banasik, W. Powroźnik, W. Skowroński, J. Chęciński, J. Wrona, H. Głowiński, J. Dubowik, J-P. Ansermet, T. Stobiecki
Journal of Applied Physics 117, 223908 (2015)

Understanding stability diagram of perpendicular magnetic tunnel junctions,
W. Skowroński, M. Czapkiewicz, S. Ziętek, J. Chęciński, M. Frankowski, P. Rzeszut, J. Wrona;
Scientific Reports 7, 10172 (2017)



Katedra Elektroniki, WIEiT AGH:

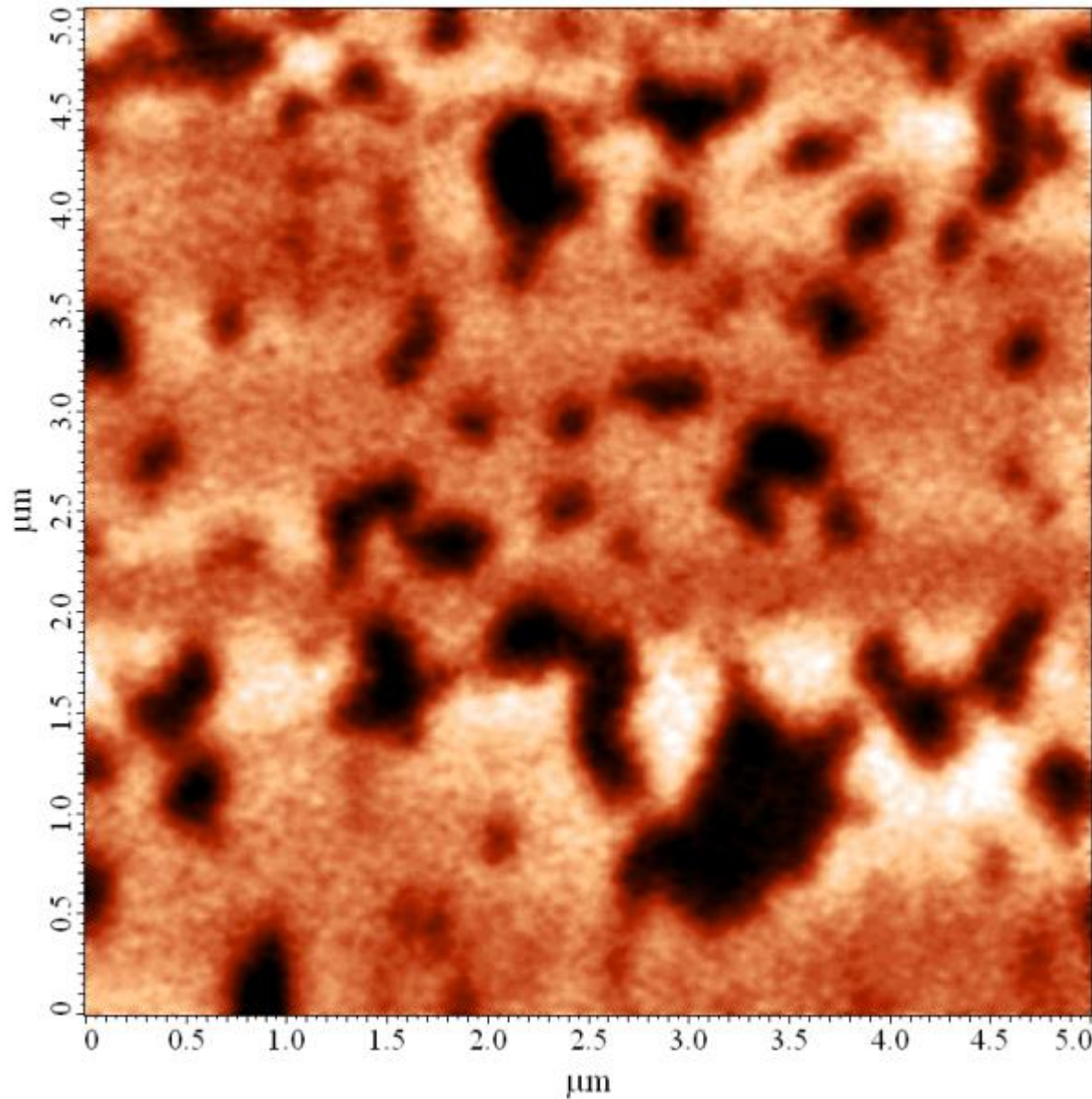
- Jarosław Kanak
- Witold Powroźnik
- Witold Skowroński
- Tomasz Stobiecki

Katedra Metrologii i Elektroniki, WEAIiB AGH:

- Miroslaw Żołądź

Singulus Technologies, Niemcy:

- Jerzy Wrona



$B = -60 \text{ mT}$

Buffer A (10 nm Cu), 2 s pulses



Bezpośredni pomiar prędkości propagacji ściany domenowej

$$v = v_0 \exp\left(-\frac{(W - \mu_0 M_S H V_B)}{k_B T}\right).$$

