

# Replikacja domen magnetycznych w warstwach wielokrotnych

Maciej Urbaniak, IFM PAN

16.03.2007 Poznań

# Replikacja domen magnetycznych w warstwach wielokrotnych

- Wprowadzenie
- Replikacja w układach z anizotropią w płaszczyźnie
- Replikacja w układach z anizotropią prostopadłą
- Podsumowanie

# Literatura

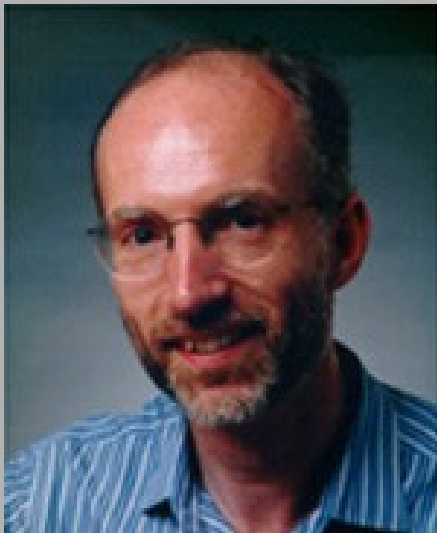
- [1] S. Wiebel et al., J. Appl. Phys. **100**, 043912 (2006)
- [2] B. Rodmacq et al., Phys. Rev. B **73**, 092405 (2004)
- [3] M.H. Kryder, Segate, [www.snwusa.com/documents/presentations-s06/MarkKryder.pdf](http://www.snwusa.com/documents/presentations-s06/MarkKryder.pdf)
- [4] S.S.P. Parkin, IBM, United States Patent US 7,031,178 B2
- [5] H.W. Fuller, D.L. Sullivan, J. Appl. Phys. **33**, 1063 (1962)
- [6] L. Thomas et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 3462 (2000)
- [7] W.S. Lew et al., Phys. Rev. Lett. **90**, 217201 (2003)
- [8] J.P. Jamet et al., Białowieża 2006, [labfiz.uwb.edu.pl/zfmag/tok/workshop06/pdf/JP\\_Jamet\\_talk.pdf](http://labfiz.uwb.edu.pl/zfmag/tok/workshop06/pdf/JP_Jamet_talk.pdf)
- [9] J.A. Borchers et al., Phys. Rev. Lett. **82**, 2796 (1999)

# Literatura

- [10] S. Bedanta et al., Phys. Rev. B **100**, 054426 (2006)
- [11] H. Koop, praca doktorska, Bielefeld 2004
- [12] R.C. Collette, praca doktorska, Pasadena 1964
- [13] F. Ott, PNR, ECNS'2003 Introductory Course
- [14] P. Bak, Rep. Prog. Phys., 45, 587 (1982)

# Przyszłość zapisu magnetycznego

IBM, S.S.P. Parkin:  
magnetic  
„race-track memory”



US007031178B2

(12) **United States Patent**  
**Parkin**

(10) **Patent No.:** **US 7,031,178 B2**  
(45) **Date of Patent:** **\*Apr. 18, 2006**

(54) **MAGNETIC SHIFT REGISTER WITH SHIFTABLE MAGNETIC DOMAINS BETWEEN TWO REGIONS, AND METHOD OF USING THE SAME**

(58) **Field of Classification Search** ..... 365/80, 365/83, 85  
See application file for complete search history.

(75) **Inventor:** **Stuart S. P. Parkin**, San Jose, CA (US)

(73) **Assignee:** **International Business Machines Corporation**, Armonk, NY (US)

(56) **References Cited**  
U.S. PATENT DOCUMENTS  
3,906,468 A \* 9/1975 Voegeli ..... 365/22  
6,834,005 B1 \* 12/2004 Parkin ..... 365/80  
\* cited by examiner

(\* ) **Notice:** Subject to any disclaimer, the term of this patent is extended or adjusted under 35 U.S.C. 154(b) by 0 days.  
This patent is subject to a terminal disclaimer.

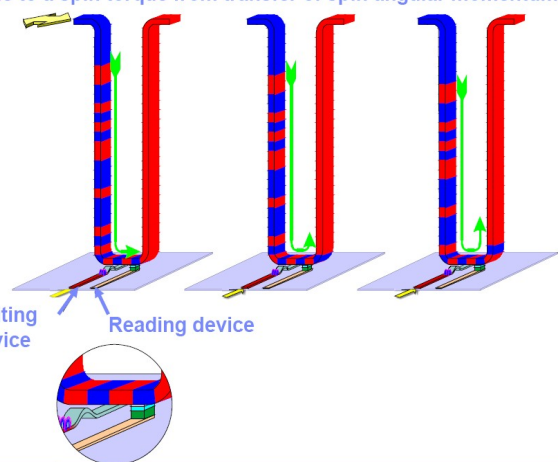
(74) **Attorney, Agent, or Firm—**Samuel A. Kassatly

(57) **ABSTRACT**  
A magnetic shift register uses the inherent natural propagation

IBM Research

## Magnetic Shift Register Memory

→ Nanosecond long current pulses push domain walls around race-track  
→ due to a spin torque from transfer of spin angular momentum



Writing device

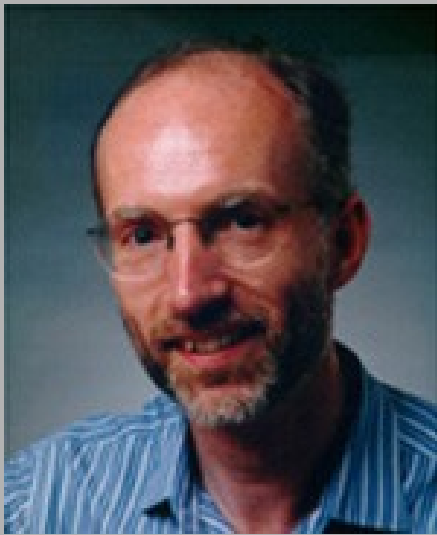
Reading device

Metal Spintronics | Stuart Parkin

© 2005 IBM Corporation

# Przyszłość zapisu magnetycznego

IBM, S.S.P. Parkin:  
magnetic  
„race-track memory”



## Hard disk drives

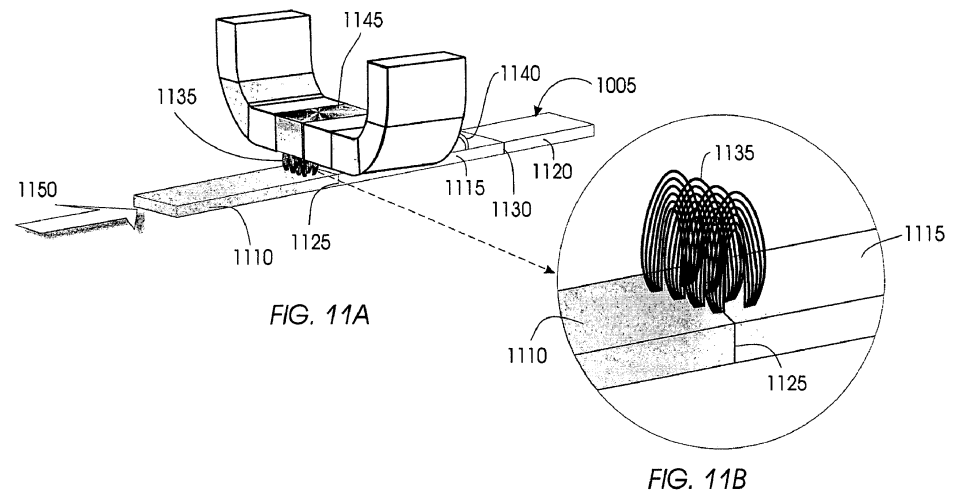
→ >400 fold increase in storage capacity

## Magnetic Random Access Memory

→ promises a solid state memory which is non-volatile, high performance and cheap

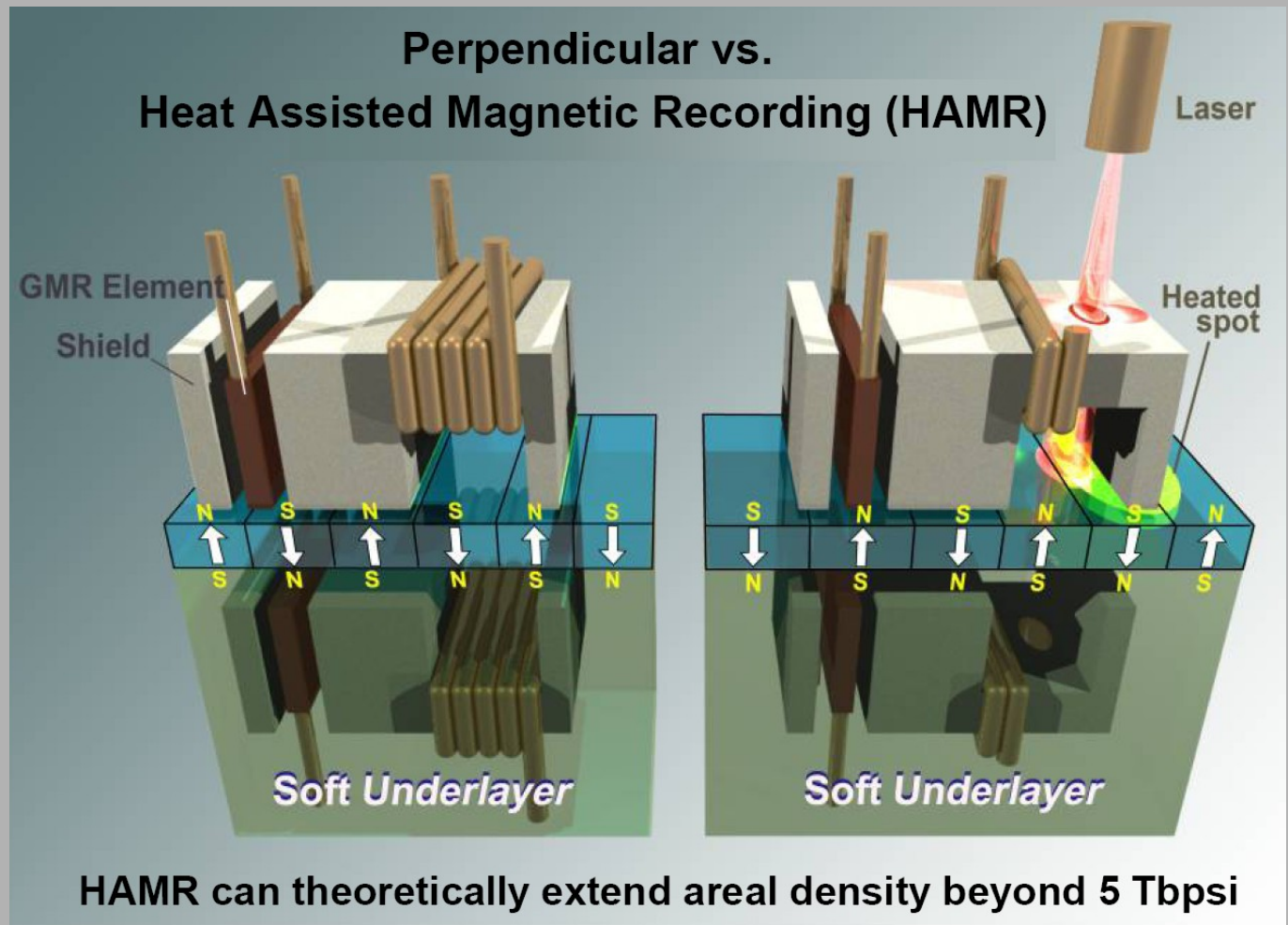
## Magnetic race-track memory

→ promises a novel data storage device with the capacity and cost of a hard disk drive but with the performance and reliability of solid state memory



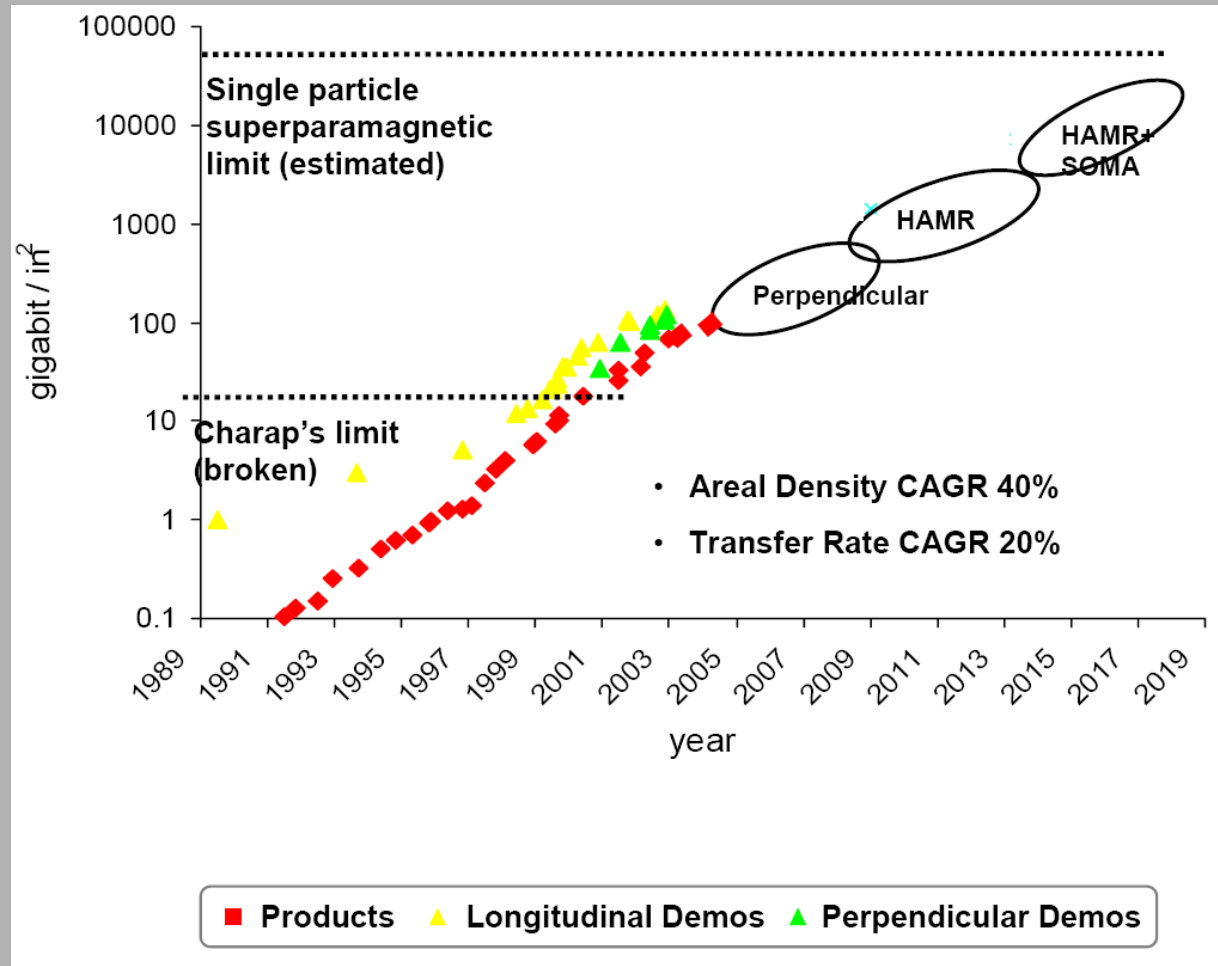
# Przyszłość zapisu magnetycznego

Seagate, M.H. Kryder, CTO, zapis prostopadły SOMA  
(self-ordered magnetic arrays)



# Przyszłość zapisu magnetycznego

Seagate, M.H. Kryder, CTO, zapis prostopadły SOMA  
(self-ordered magnetic arrays)





# Korelacja domen w warstwach wielokrotnych

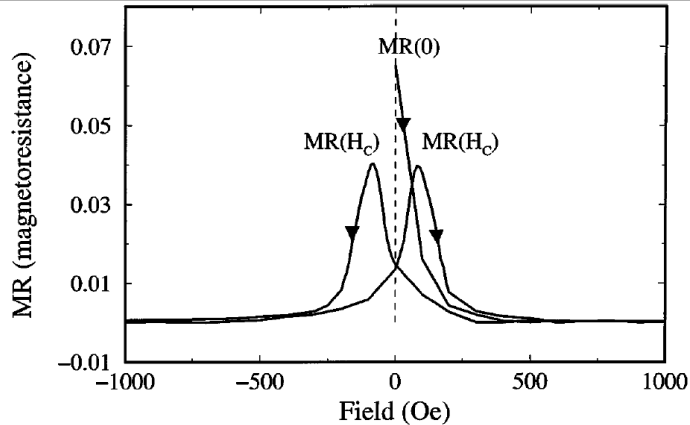


FIG. 1. Current-in-plane magnetoresistance measurements for the [Co(6 nm)|Cu(6 nm)]<sub>20</sub> multilayer at room temperature. The magnetoresistance of the as-prepared and coercive states are marked.

W stanie as-prepared opór układu jest największy:

$$MR(0)/MR(H_c) \approx 2$$

[Co(6 nm/Cu(**6 nm**))]<sub>20</sub>

bardzo słabe sprzężenie  
międzywarstwowe

# Korelacja domen w warstwach wielokrotnych

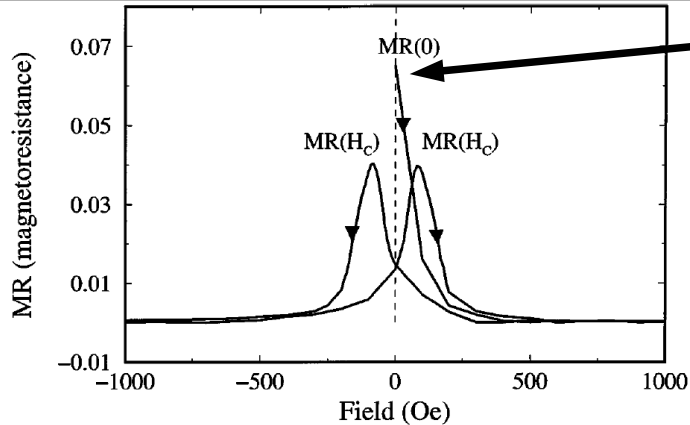


FIG. 1. Current-in-plane magnetoresistance measurements for the  $[\text{Co}(6 \text{ nm})|\text{Cu}(6 \text{ nm})]_{20}$  multilayer at room temperature. The magnetoresistance of the as-prepared and coercive states are marked.

Idealne AF sprzężenie



bardzo słabe sprzężenie międzywarstwowe

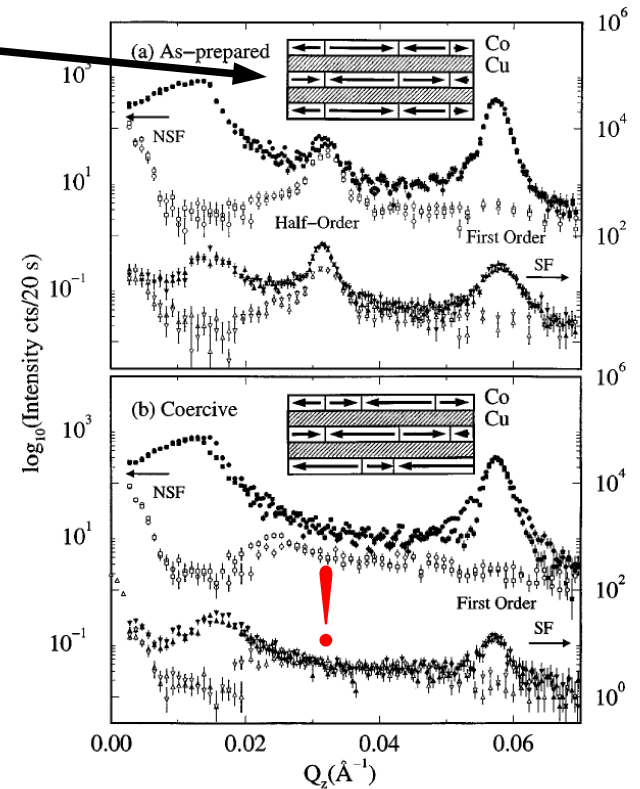


FIG. 2. Total PNR (shaded symbols) relative to the diffuse scattering (open symbols) as a function of  $Q_z = 4\pi/\lambda \sin \theta$  for  $[\text{Co}(6 \text{ nm})|\text{Cu}(6 \text{ nm})]_{20}$  in the (a) as-prepared and (b) coercive state at  $H_C = 54 \text{ Oe}$ . The diffuse scattering was measured by offsetting the angle  $\Omega$  by  $0.2^\circ$  and then scanning  $Q_z$ . The circles and squares correspond to  $(-)$  and  $(++)$  NSF data, respectively. The up and down triangles mark the  $(+-)$  and  $(-+)$  SF data. No corrections have been made for the polarization efficiencies or sample footprint. The insets show the idealized magnetic structures suggested by the scattering in each state.

# Korelacja domen w warstwach wielokrotnych

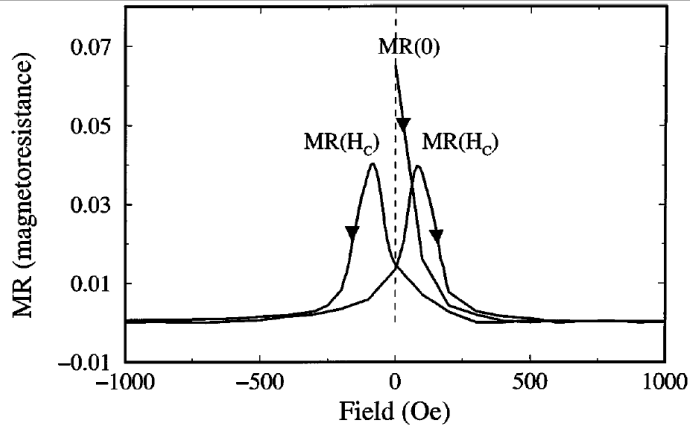
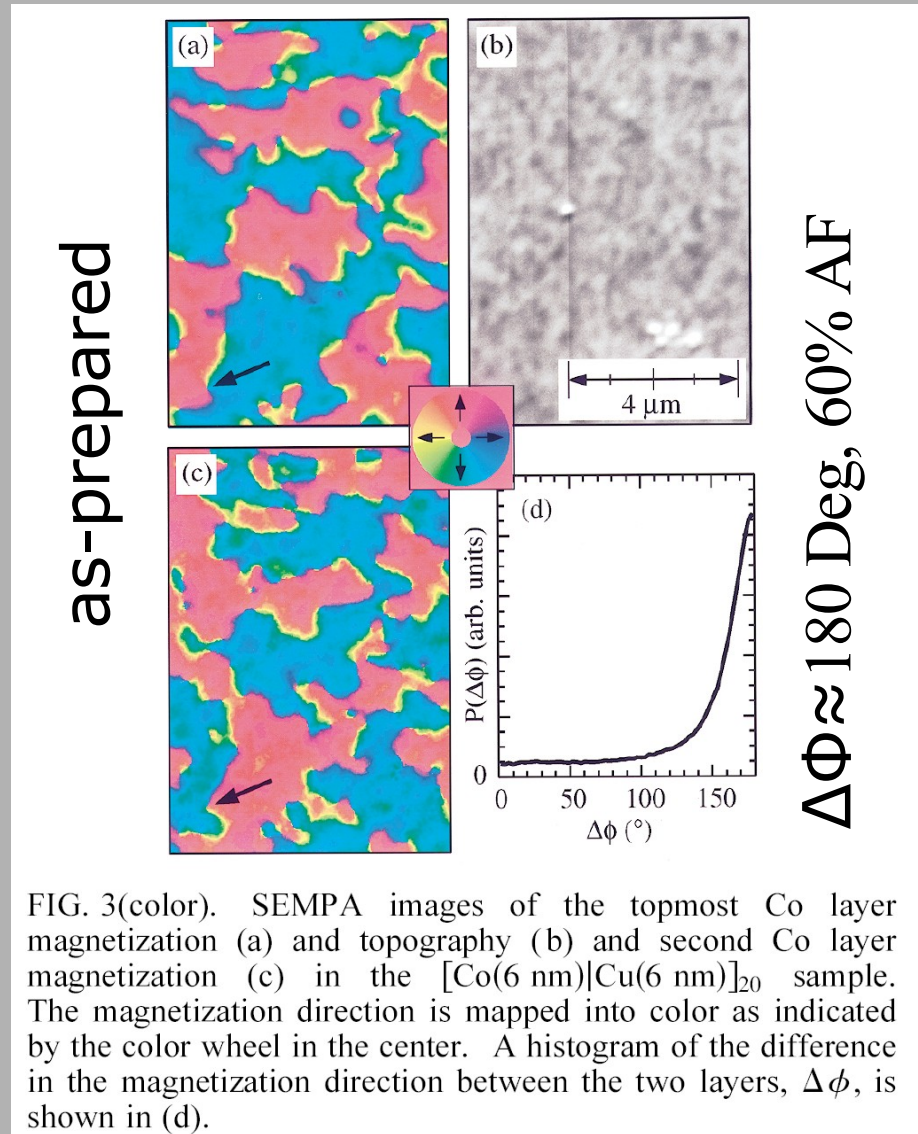


FIG. 1. Current-in-plane magnetoresistance measurements for the  $[\text{Co}(6 \text{ nm})|\text{Cu}(6 \text{ nm})]_{20}$  multilayer at room temperature. The magnetoresistance of the as-prepared and coercive states are marked.

$[\text{Co}(6 \text{ nm}/\text{Cu}(6 \text{ nm}))]_{20}$

SEMPA-trawienie jonowe  
2 keV,  $\text{Ar}^+$

J.A. Borchers et al., PRL **82**, 2796



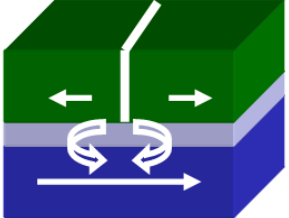
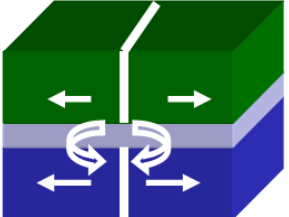
as-prepared

$\Delta\phi \approx 180 \text{ Deg}$ , 60% AF

FIG. 3(color). SEMPA images of the topmost Co layer magnetization (a) and topography (b) and second Co layer magnetization (c) in the  $[\text{Co}(6 \text{ nm})|\text{Cu}(6 \text{ nm})]_{20}$  sample. The magnetization direction is mapped into color as indicated by the color wheel in the center. A histogram of the difference in the magnetization direction between the two layers,  $\Delta\phi$ , is shown in (d).

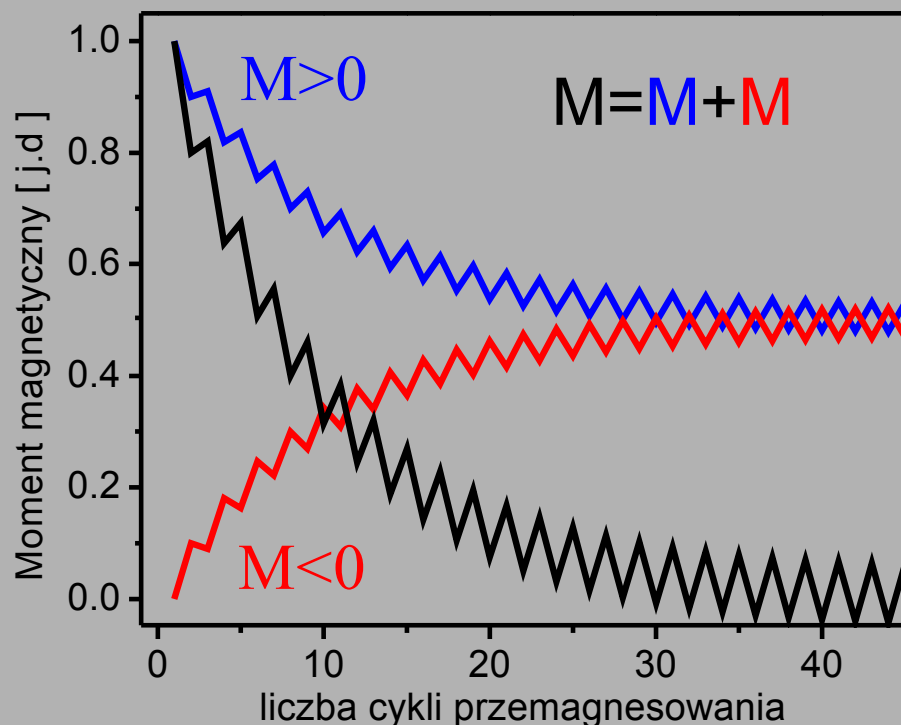
# Stabilność zapisu magnetycznego

## Oddziaływania dipolowe

	soft ferromagnet insulator hard ferromagnet	<u>Example for 1.:</u> Initially well defined magnetizations Soft layer forms domain walls during switching
		Cycle ....
	soft ferromagnet insulator hard ferromagnet	Cycle ...hard layer's initially homogeneous magnetization gets deteriorated ⇒ TMR shrinks

# Stabilność zapisu magnetycznego

## Oddziaływania dipolowe



$M$  – obszary namagnesowane  
„w górę”

W wyniku przemagnesowania warstwy miękkiej przemagnesowaniu ulega np. 10% ziaren warstwy twardej o namagnesowaniu przeciwnym do kierunku pola.

Stan początkowy:

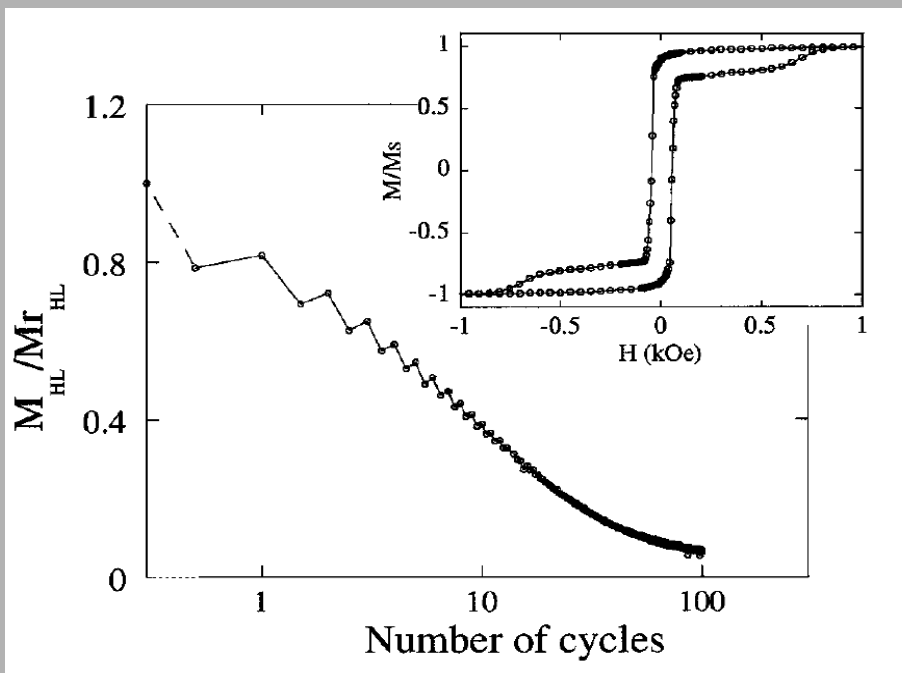
$M=1$ ,  $M=0$

Cykle nieparzyste:  $M(N_c) := M(N_c-1) \times 0.9$ ,  $M(N_c) := M(N_c-1) + M(N_c-1) \times 0.1$

Cykle parzyste:  $M(N_c) := M(N_c-1) + M(N_c-1) \times 0.1$ ,  $M(N_c) := M(N_c-1) \times 0.9$

# Stabilność zapisu magnetycznego

## Oddziaływania dipolowe



W wyniku przemagnesowania warstwy CoFe przemagnesowaniu ulega np. 10% ziaren CoPtCr o namagnesowaniu przeciwnym do kierunku pola.

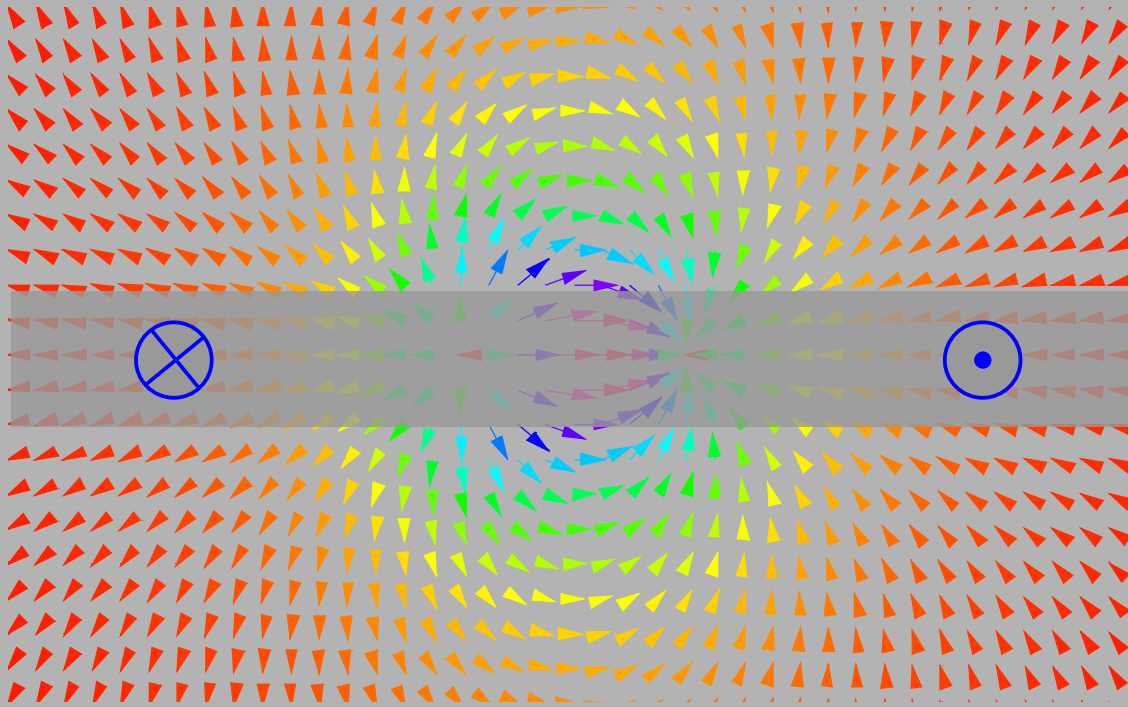
$$H_{\text{przemienne}} \ll H_{\text{koercji warstwy twardej}}$$

L. Thomas et al.,  
Phys. Rev. Lett. **84**, 3462 (2000)

$N_c$  indeksowane co pół cyklu  $\Rightarrow$   
poszczególne przełączania CoFe

Si(100)/SiO<sub>2</sub>/Co<sub>84</sub>Fe<sub>16</sub>(10nm)/Cr(1.5nm)/Co<sub>75</sub>Pt<sub>12</sub>Cr<sub>13</sub>(5nm)/Al.(1.5nm)

# Pola dipolowe domen

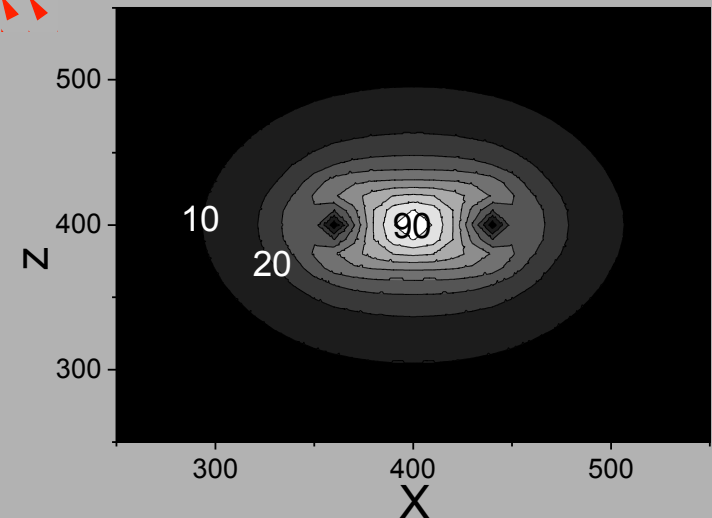


pole H

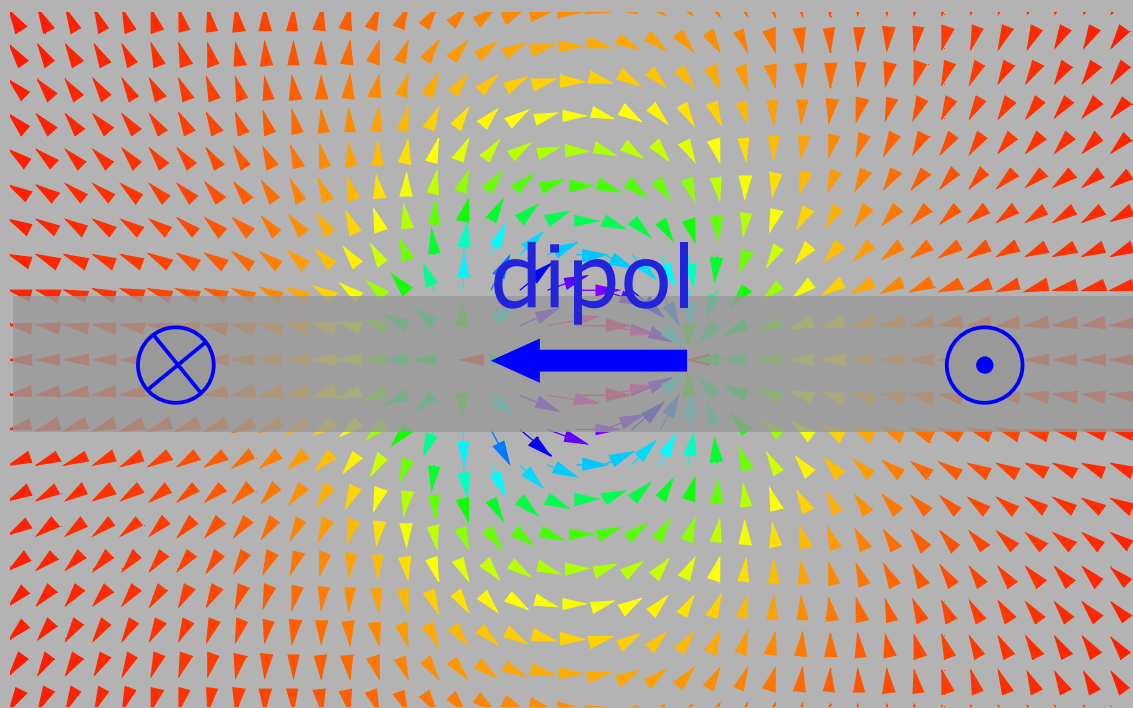
jednowymiarowa,  
liniowa ściana Néela

100×20

Pole ścian domenowych jest istotne  
w odległościach rzędu szerokości DW



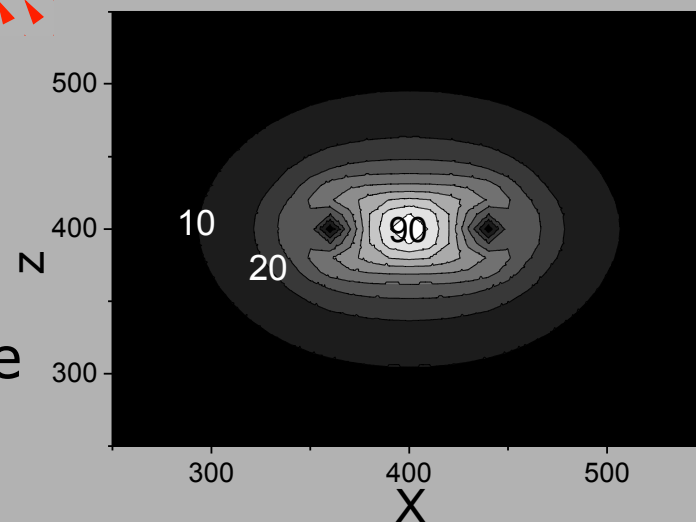
# Pola dipolowe domen



pole H

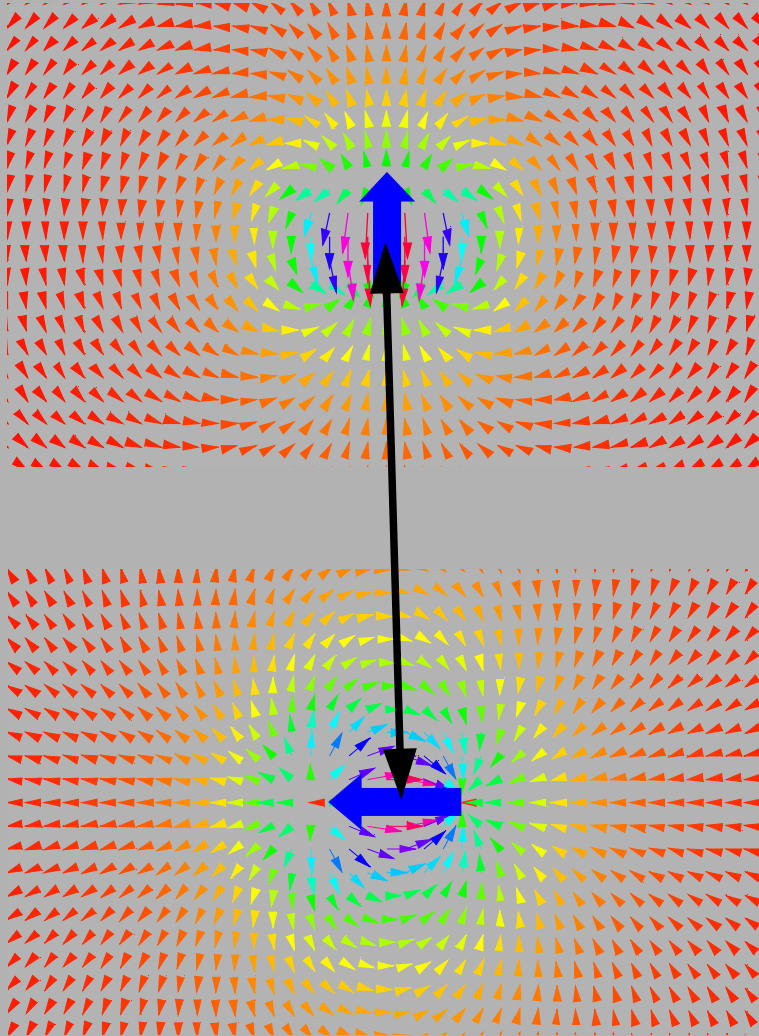
jednowymiarowa,  
liniowa ściana Néela

Pole ścian domenowych jest istotne w odległościach rzędu szerokości DW i w pierwszym przybliżeniu traktowane może być jako **pole dipolowe**





# Pola dipolowe domen



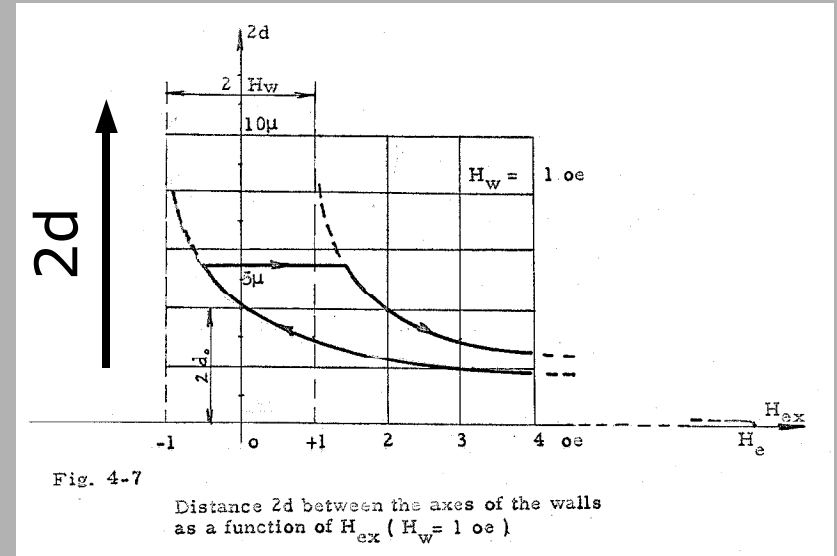
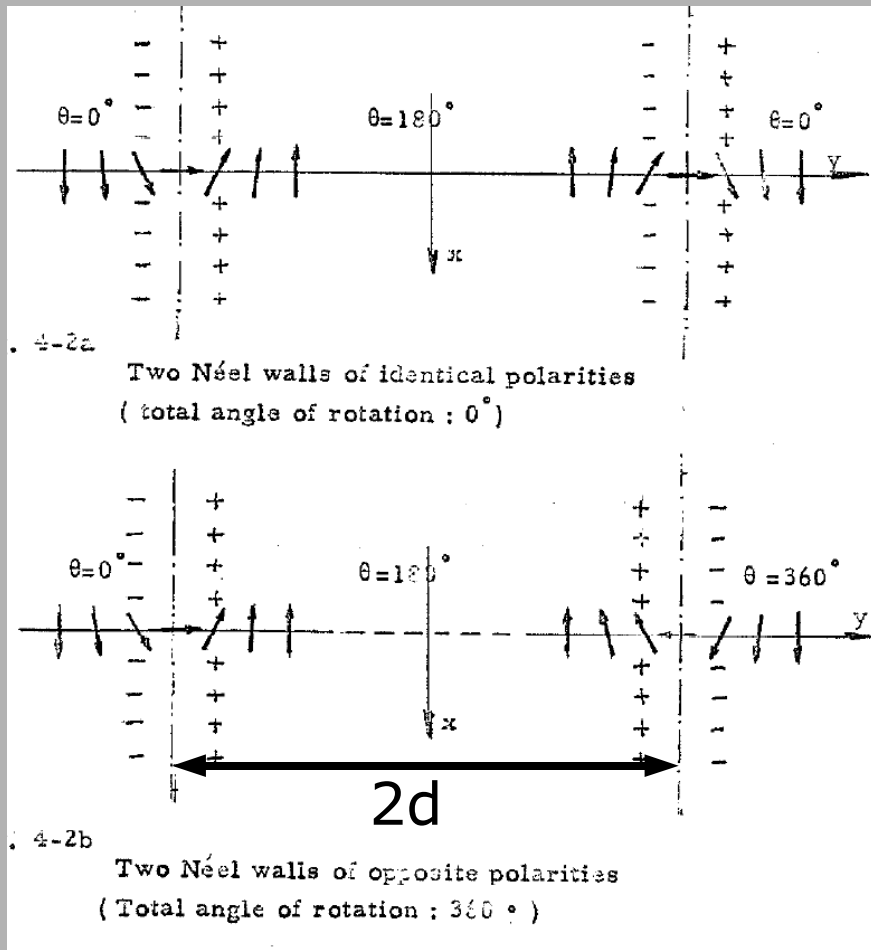
Felix Bloch (nobelprize.org)

Oddziaływanie między ścianami domenowymi może być przybliżone oddziaływaniem typu dipol liniowy-dipol liniowy



Louis Néel  
(photos.aip.org)

# Odziaływanie między ścianami domenowymi



Odległość między domenami  
jest funkcją pola  $H_{ex}$

Ściany domenowe w warstwie pojedynczej

# Replikacja w układach z anizotropią w płaszczyźnie

H.W. Fuller, D.L. Sullivan,

J. Appl. Phys. **33**, 1063 (1962)

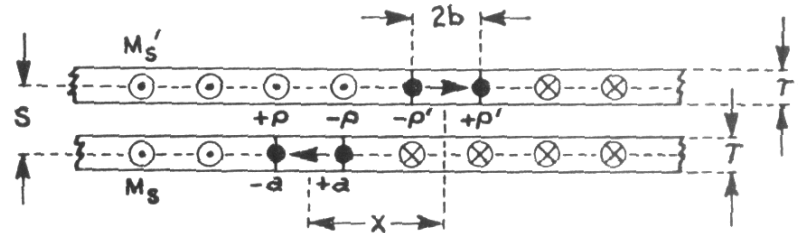
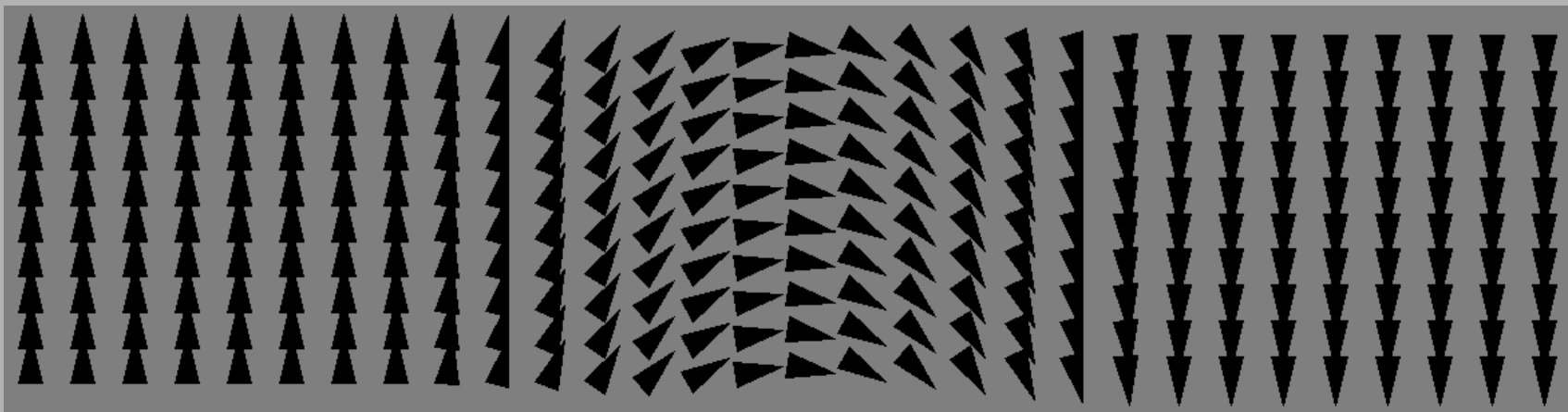


FIG. 1. Geometry for calculation of interaction between layered film structure.

## Ściana Néela



# Replikacja w układach z anizotropią w płaszczyźnie

H.W. Fuller, D.L. Sullivan,

J. Appl. Phys. **33**, 1063 (1962)

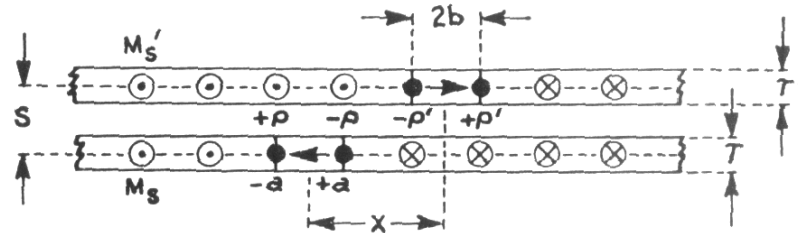
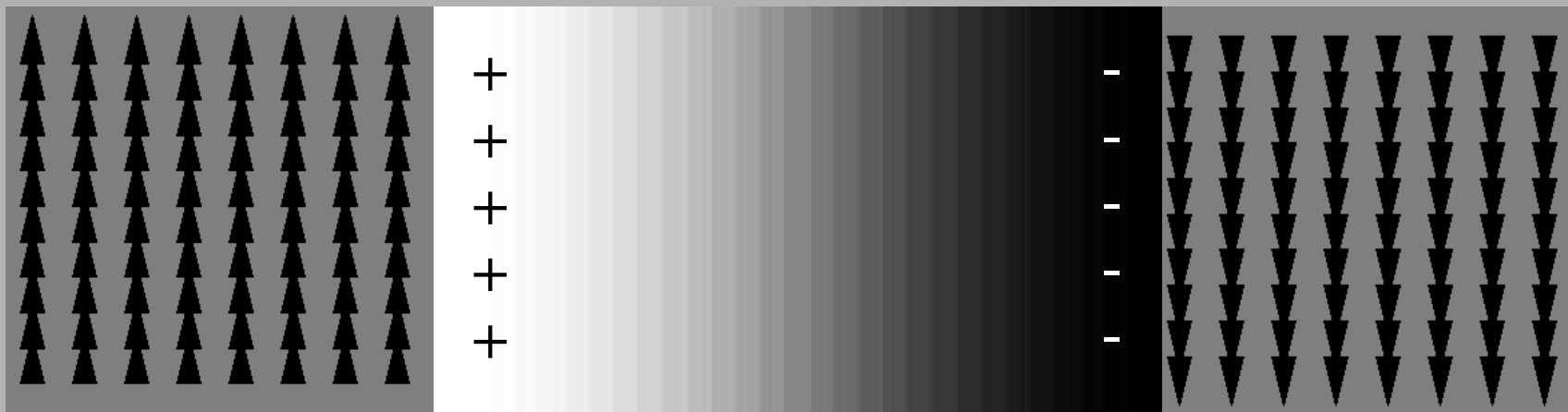


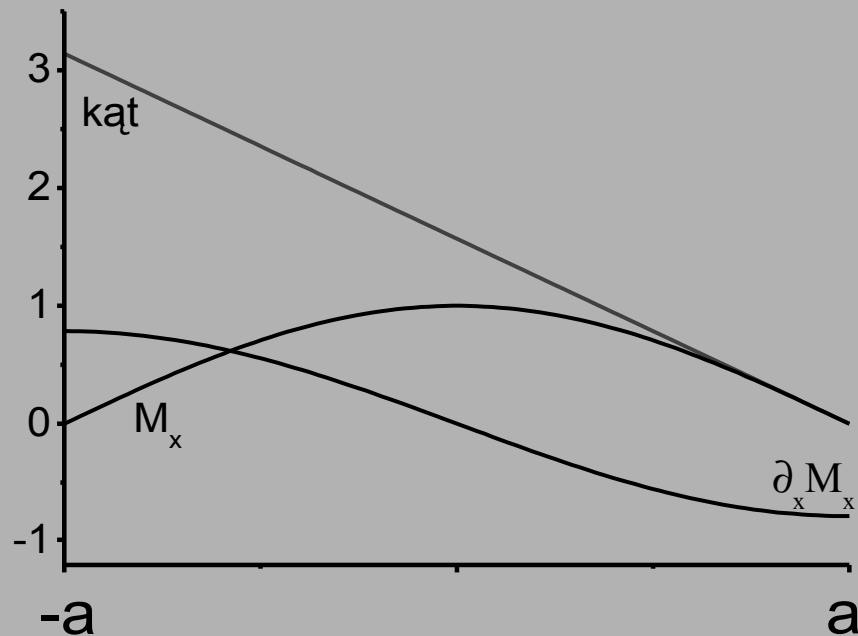
FIG. 1. Geometry for calculation of interaction between layered film structure.

## Ściana Néela

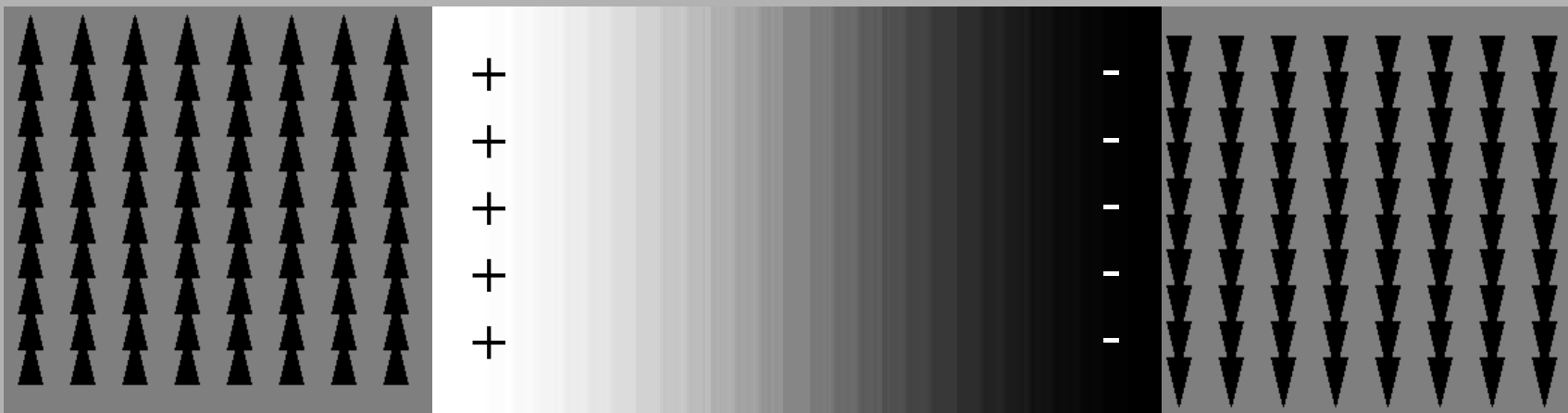


# Replikacja w układach z anizotropią w płaszczyźnie

H.W. Fuller, D.L. Sullivan,  
J. Appl. Phys. **33**, 1063 (1962)

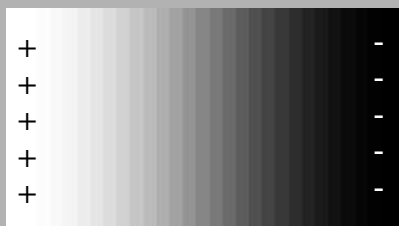
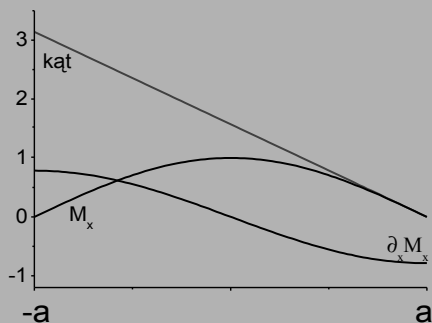


Ściana Nééla



# Replikacja w układach z anizotropią w płaszczyźnie

H.W. Fuller, D.L. Sullivan,  
J. Appl. Phys. **33**, 1063 (1962)



$$M_x(x) = \sin\left(\pi \frac{(a-x)}{2a}\right)$$

$$\text{Div } \vec{M} = -\pi \frac{\cos\left(\pi \frac{(a-x)}{2a}\right)}{2a} \quad \text{ładunek magnetyczny}$$

$$m = \int \rho(x) x dx = -Mt \int_{-a}^a \left(\pi \frac{\cos\left(\pi \frac{(a-x)}{2a}\right)}{2a}\right) x dx$$

$$= \frac{4t}{\pi} Ma \propto a \quad \text{moment magnetyczny}$$

Ścianę Néela można przybliżyć dwiema liniami, o przeciwnym ładunku magnetycznym, znajdującymi się w odległości  $2a$ .

# Replikacja w układach z anizotropią w płaszczyźnie

H.W. Fuller, D.L. Sullivan,  
J. Appl. Phys. **33**, 1063 (1962)

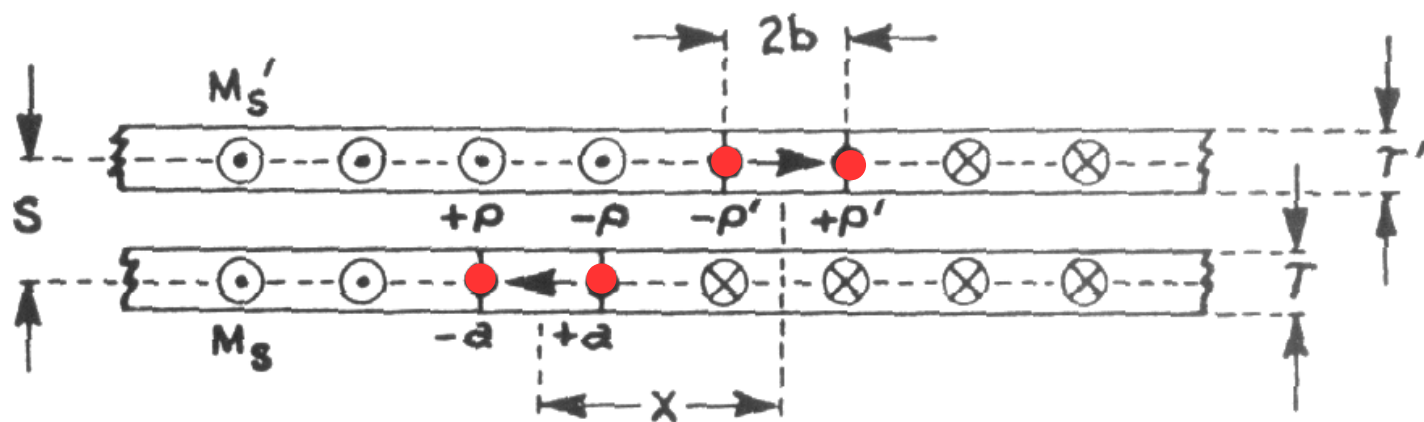


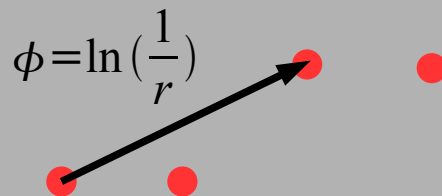
FIG. 1. Geometry for calculation of interaction between layered film structure.

Ścianę Néela można przybliżyć dwiema liniami, o przeciwnym ładunku magnetycznym, znajdującymi się w odległości  $2a$ .

# Replikacja w układach z anizotropią w płaszczyźnie

H.W. Fuller, D.L. Sullivan,  
J. Appl. Phys. **33**, 1063 (1962)

$$E_i = M_1 M_2 t_1 t_2 \left( \ln \left( \frac{1}{r_{13}} \right) + \ln \left( \frac{1}{r_{14}} \right) + \dots \right)$$



$$E_i = M_1 M_2 t_1 t_2 \ln \left[ \frac{[s^2 + (x+a-b)^2][s^2 + (x-a+b)^2]}{[s^2 + (x-a-b)^2][s^2 + (x+a+b)^2]} \right]$$

Zakłada się, że domena w dolnej warstwie jest nieruchoma

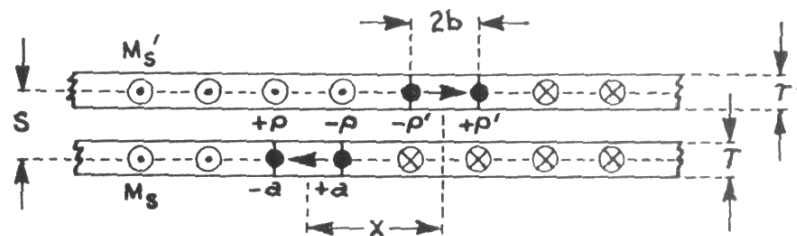


FIG. 1. Geometry for calculation of interaction between layered film structure.

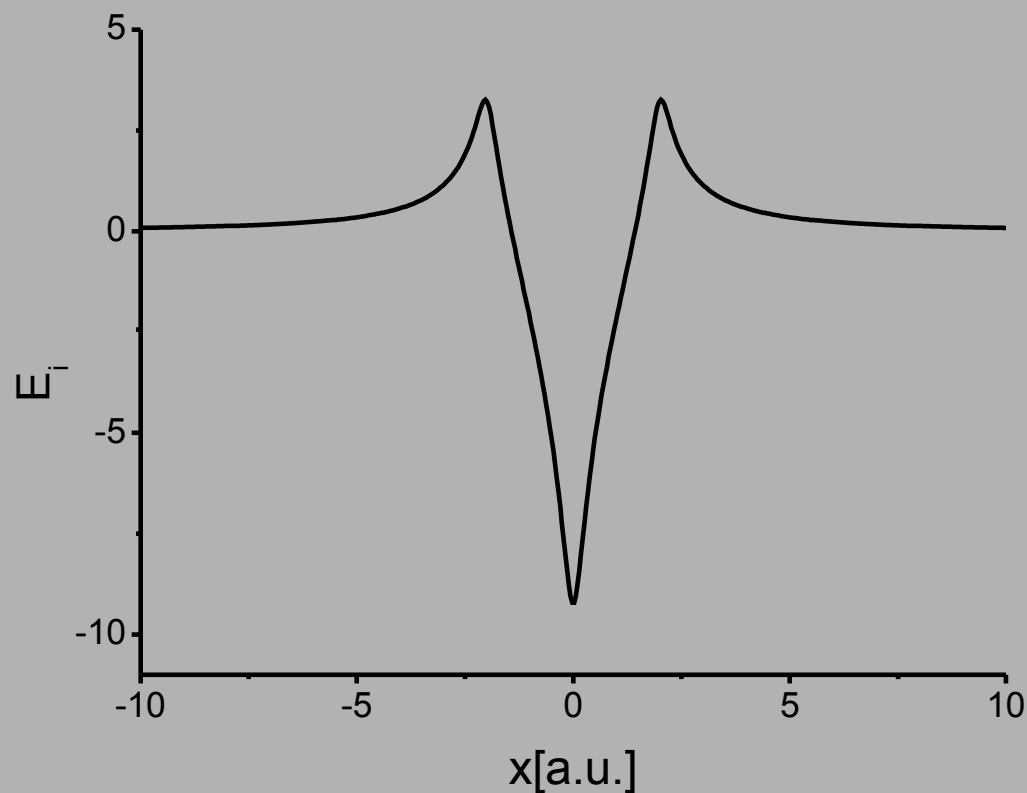


# Replikacja w układach z anizotropią w płaszczyźnie

H.W. Fuller, D.L. Sullivan,

J. Appl. Phys. **33**, 1063 (1962)

$$E_i = \ln \left[ \frac{[s^2 + (x + a - b)^2][s^2 + (x - a + b)^2]}{[s^2 + (x - a - b)^2][s^2 + (x + a + b)^2]} \right], \quad s=0.2, a=1, b=1$$

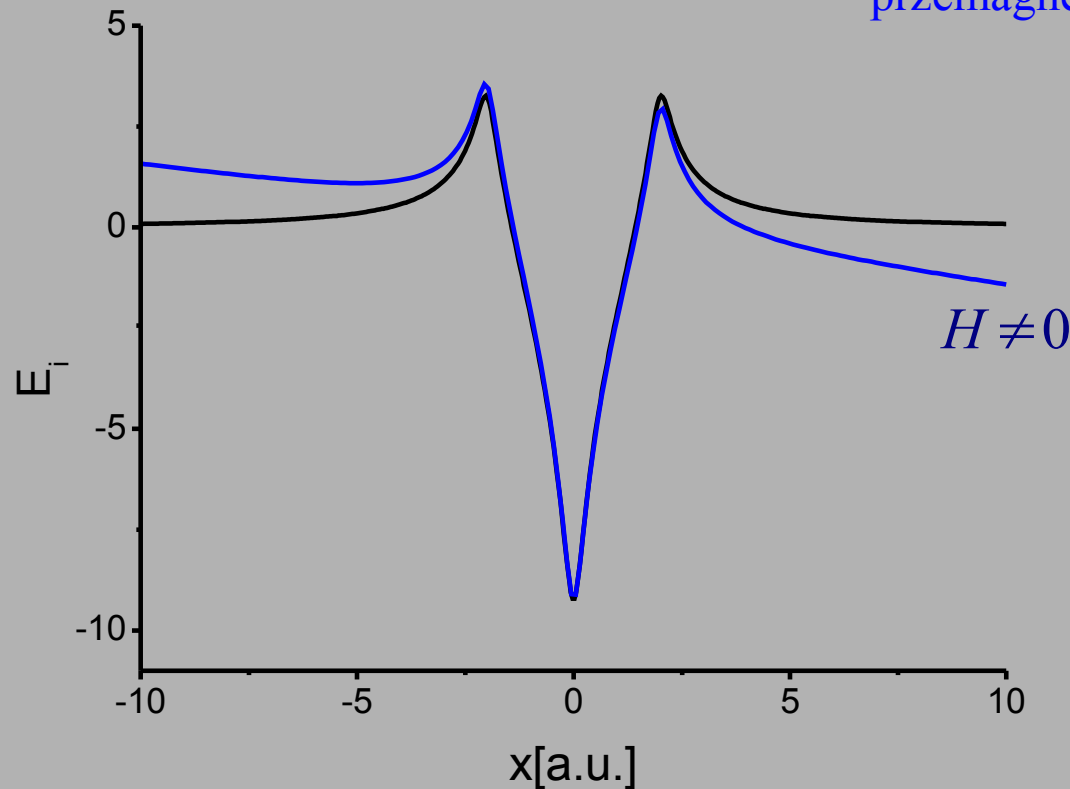


# Replikacja w układach z anizotropią w płaszczyźnie

H.W. Fuller, D.L. Sullivan,  
J. Appl. Phys. **33**, 1063 (1962)

$$E_i = \ln \left[ \frac{[s^2 + (x+a-b)^2][s^2 + (x-a+b)^2]}{[s^2 + (x-a-b)^2][s^2 + (x+a+b)^2]} \right] - 2t_2 M_2 B x, \quad s=0.2, a=1, b=1$$

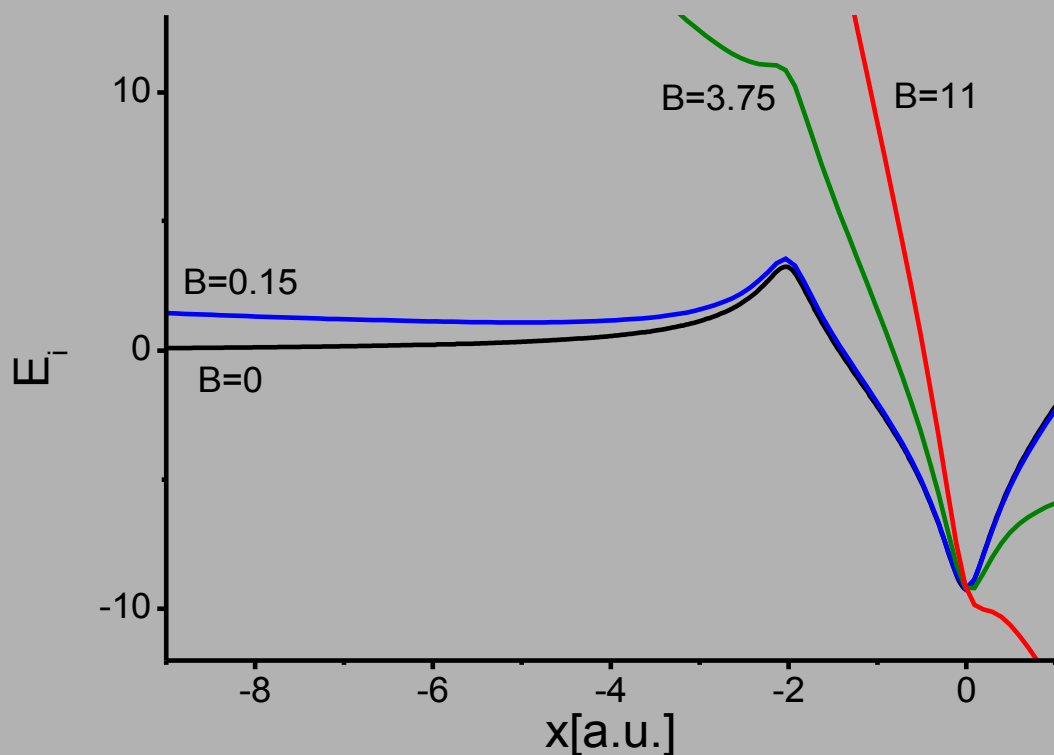
Ruch ściany domenowej  
przemagnesowuje warstwę



# Replikacja w układach z anizotropią w płaszczyźnie

H.W. Fuller, D.L. Sullivan,  
J. Appl. Phys. **33**, 1063 (1962)

$$E_i = \ln \left[ \frac{[s^2 + (x+a-b)^2][s^2 + (x-a+b)^2]}{[s^2 + (x-a-b)^2][s^2 + (x+a+b)^2]} \right] - 2t_2 M_2 B x, \quad s=0.2, a=1, b=1$$



W polu  $B \lesssim 11$  domena w warstwie górnej znajduje się w obszarze  $x \leq 0$  – przyszpilenie domeny

# Replikacja w układach z anizotropią w płaszczyźnie

2.5x2.5 cm<sup>2</sup>, szklane podłoże

1) 47 nm Ni<sub>50</sub>Co<sub>50</sub>, 2.5x2.5 cm<sup>2</sup>

2) 90 nm MgF<sub>2</sub>

3) 40 nm Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub>, 0.32x2.5 cm<sup>2</sup>

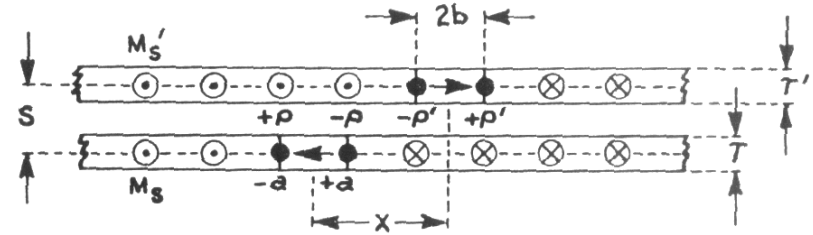


FIG. 1. Geometry for calculation of interaction between layered film structure.



1mm

FIG. 3. Bitter pattern showing narrow domain nucleated in low- $H_c$  film by field of Néel wall in high- $H_c$  film plus applied field.

# Replikacja w układach z anizotropią w płaszczyźnie

- 2.5x2.5 cm<sup>2</sup>, szklane podłoże  
 1) 47 nm Ni<sub>50</sub>Co<sub>50</sub>, 2.5x2.5 cm<sup>2</sup>  
 2) 90 nm MgF<sub>2</sub>  
 3) 40 nm Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub>, 0.32x2.5 cm<sup>2</sup>

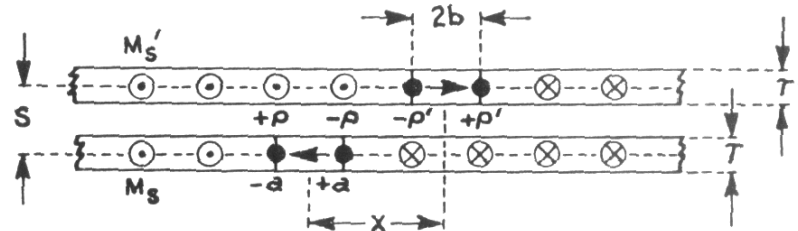


FIG. 1. Geometry for calculation of interaction between layered film structure.

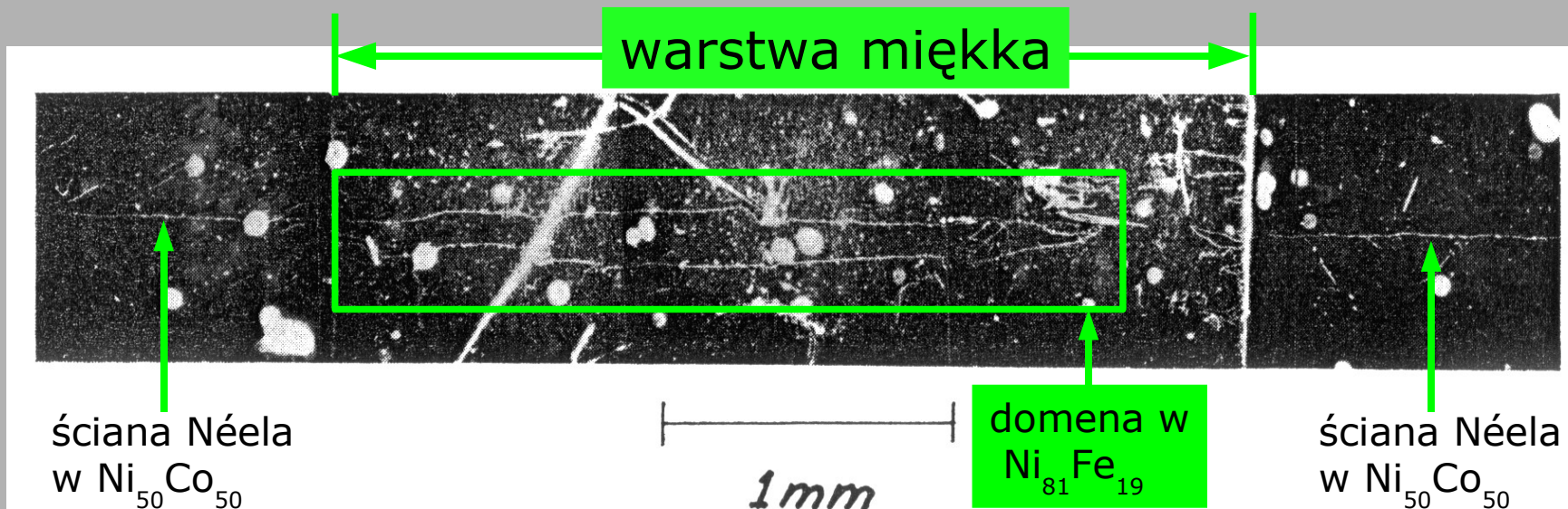


FIG. 3. Bitter pattern showing narrow domain nucleated in low- $H_e$  film by field of Néel wall in high- $H_e$  film plus applied field.



# Replikacja w układach z anizotropią w płaszczyźnie

2.5x2.5 cm<sup>2</sup>, szklane podłoże

1) 47 nm Ni<sub>50</sub>Co<sub>50</sub>, 2.5x2.5 cm<sup>2</sup>

2) 90 nm MgF<sub>2</sub>

3) 40 nm Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub>, 0.32x2.5 cm<sup>2</sup>

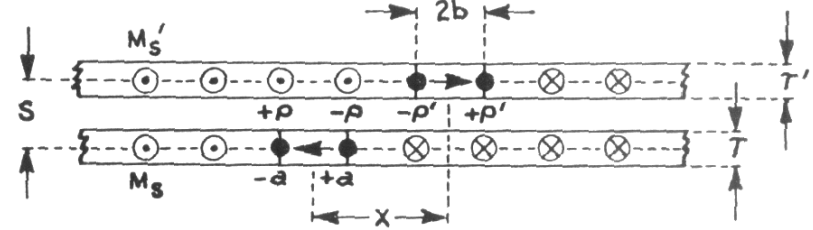


FIG. 1. Geometry for calculation of interaction between layered film structure.

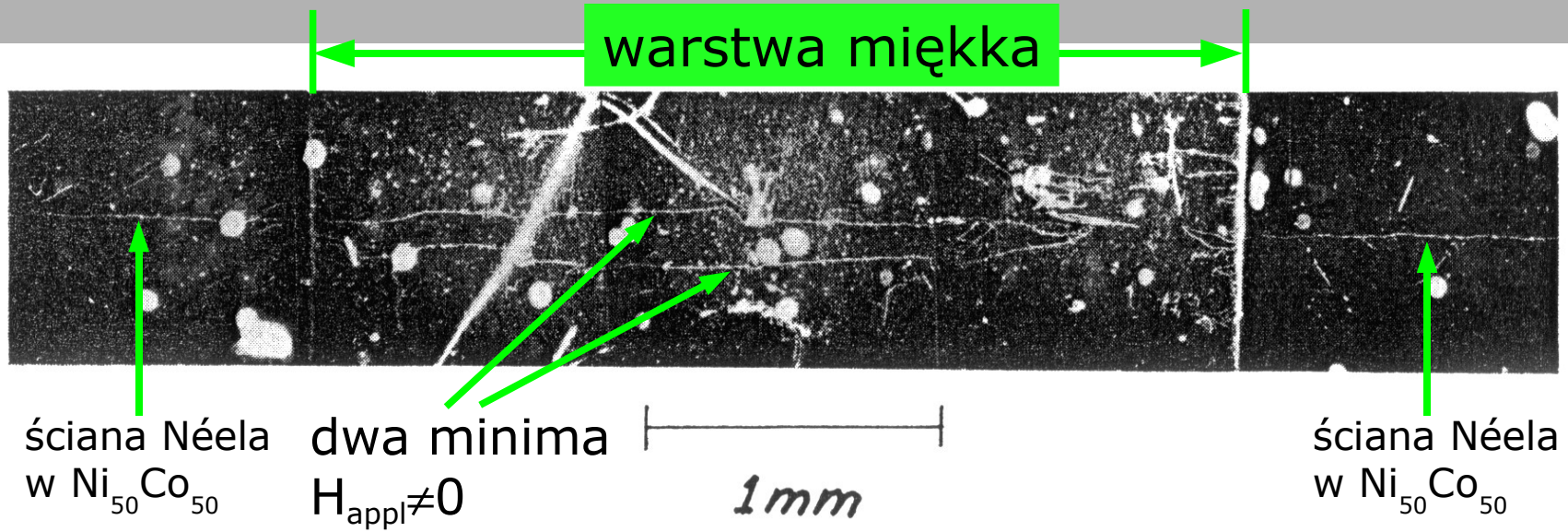
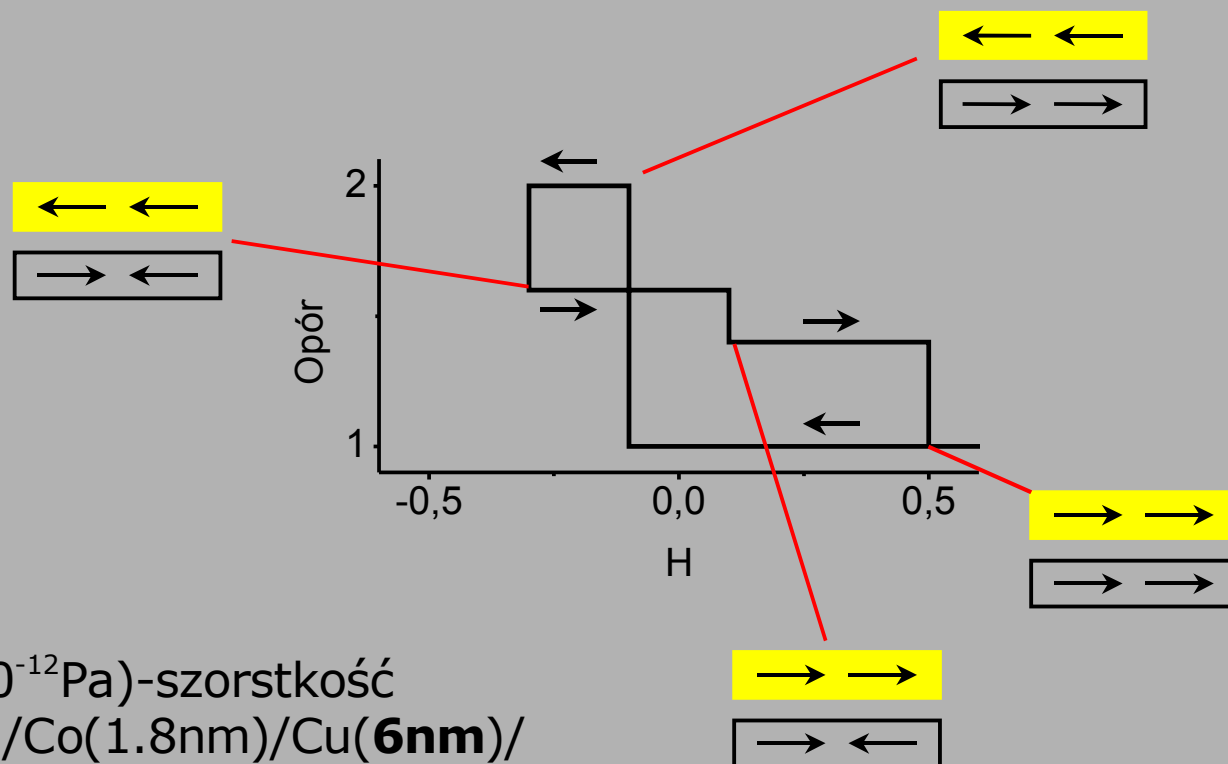


FIG. 3. Bitter pattern showing narrow domain nucleated in low- $H_c$  film by field of Néel wall in high- $H_c$  film plus applied field.

# Replikacja w układach z anizotropią w płaszczyźnie

W.S. Lew et al., Phys. Rev. Lett. **90**, 217201 (2003)

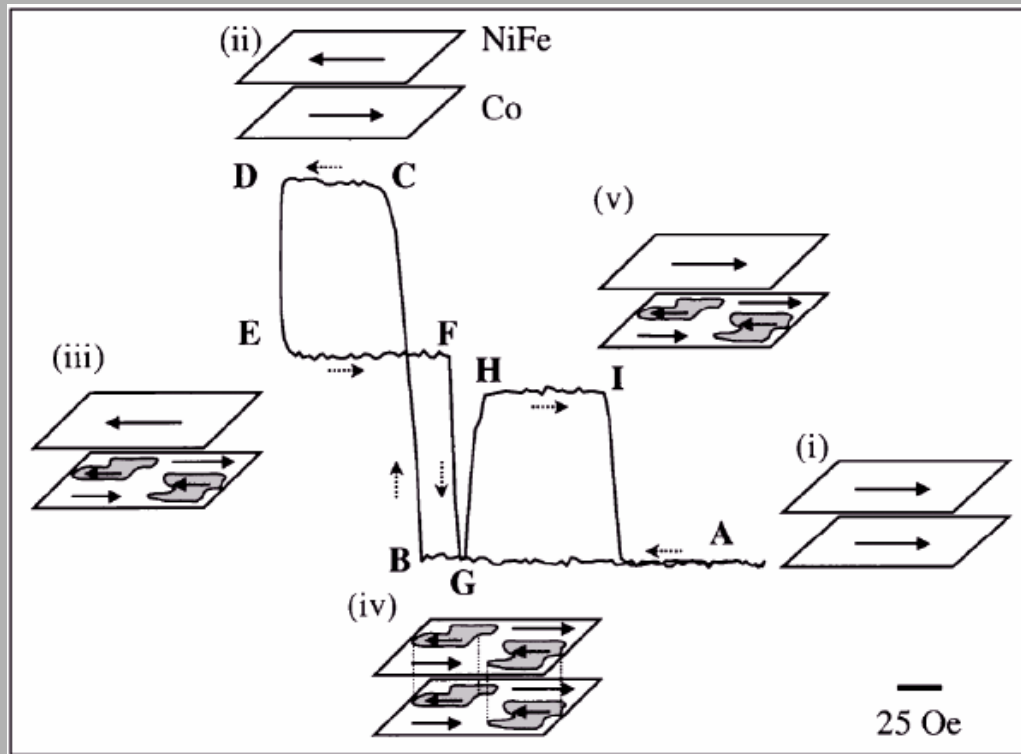
Typowa niepełna pętla R(H) układu warstwa twarda - warstwa miękka



- MBE** ( $2 \times 10^{-12}$  Pa)-szorstkość
- GaAs(100)/Co(1.8nm)/Cu(**6nm**)/**Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>**(6nm)
- Co-bcc, reszta fcc, in-situ RHEED
- wspólna magnetyczna oś łatwa

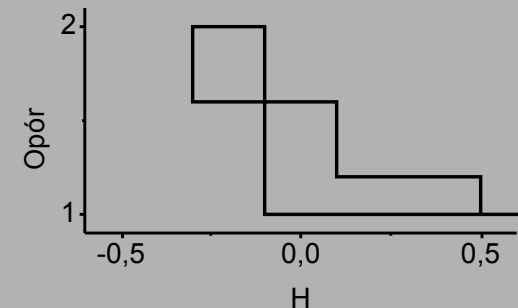
# Replikacja w układach z anizotropią w płaszczyźnie

W.S. Lew et al., Phys. Rev. Lett. **90**, 217201 (2003)



„Chwilowy” spadek oporu do minimum absolutnego (↑↑)

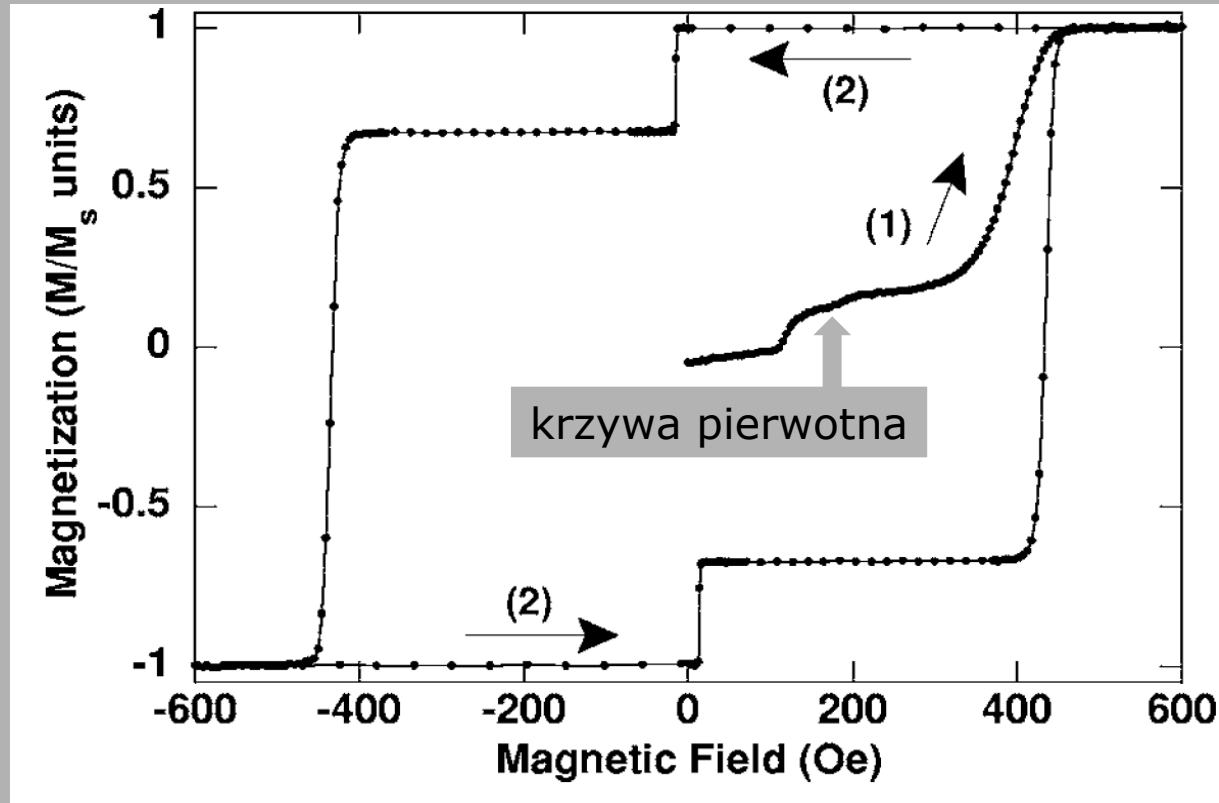
- $H(D) \approx$  pole nukleacji domen w Co
- $\Delta R_{DE}$  zależy od udziału objętości przełączonej w Co
- $H_r = -95$  Oe
- rozmiary domen w Co - około  $100\mu\text{m}$





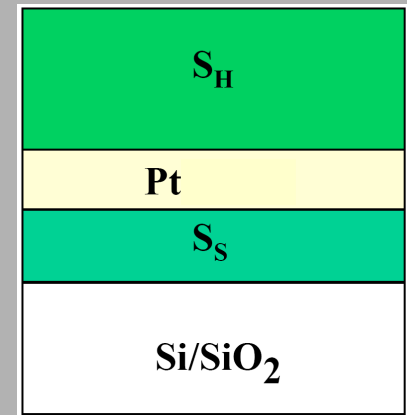
# Replikacja w układach z anizotropią prostopadłą

B. Rodmacq et al., Phys. Rev. B. **73**, 092405 (2006)



sputtering

Demagnetyzowanie:  
rotująca próbka (3Hz),  
-0.2 Oe/s



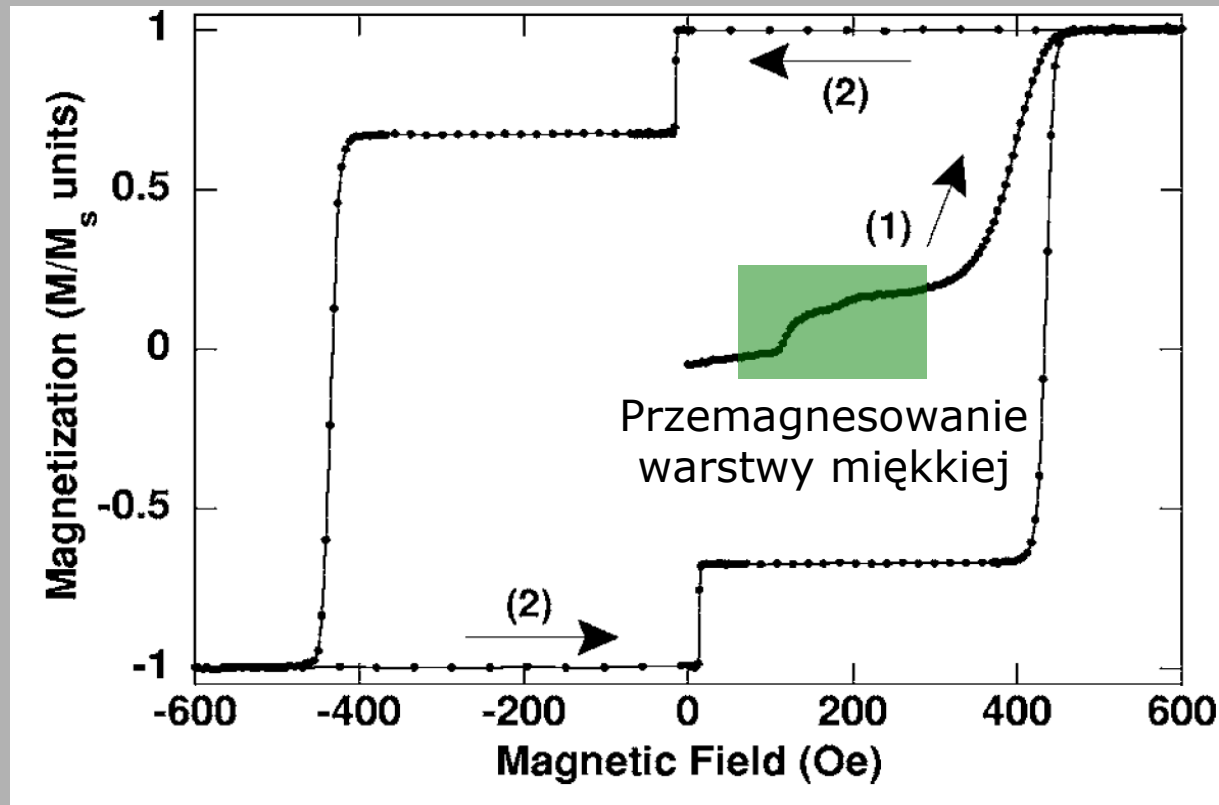
Si/SiO<sub>2</sub>/Pt(1.8 nm)/(Co/Pt)<sub>1</sub>/Pt(13.2 nm)/(Co/Pt)<sub>4</sub>

warstwa miękka

Co/Pt := Co(0.6 nm)/Pt(1.8 nm)

# Replikacja w układach z anizotropią prostopadłą

B. Rodmacq et al., Phys. Rev. B. **73**, 092405 (2006)



$H_C$  warstwy miękkiej na krzywej głównej wynosi około 12 Oe



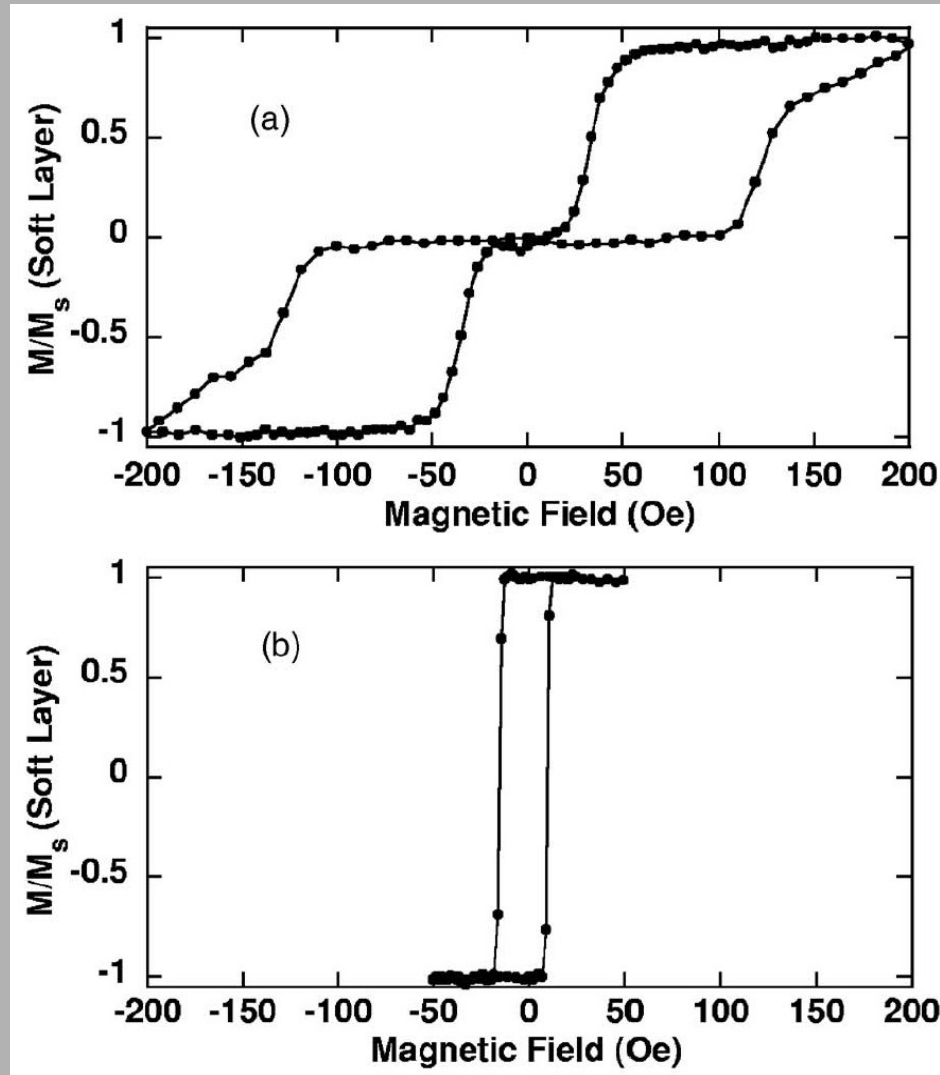
Przemagnesowanie warstwy miękkiej zależy od stanu magnetycznego warstwy twardej

Si/SiO<sub>2</sub>/Pt(1.8 nm)/(Co/Pt)<sub>1</sub>/Pt(13.2 nm)/(Co/Pt)<sub>4</sub>  
warstwa miękka

Co/Pt := Co(0.6 nm)/Pt(1.8 nm)

# Replikacja w układach z anizotropią prostopadłą

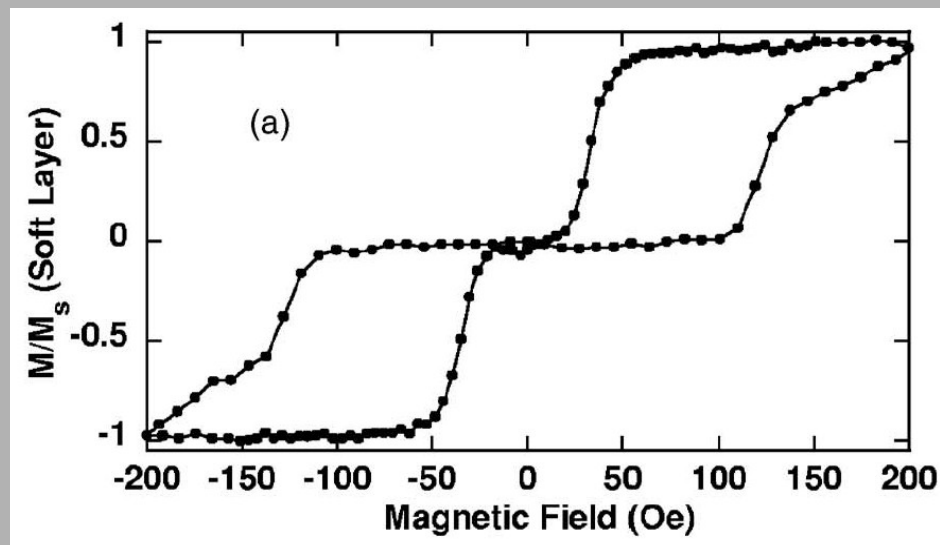
B. Rodmacq et al., Phys. Rev. B. **73**, 092405 (2006)



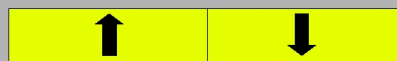
- rozmagnesowana warstwa twarda
- zerowa remanencja warstwy miękkiej
- koercja warstwy miękkiej zależy od stanu warstwy twardej
  
- warstwa twarda nasycona
- niska koercja warstwy miękkiej

# Replikacja w układach z anizotropią prostopadłą

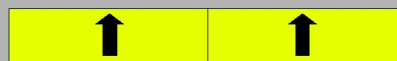
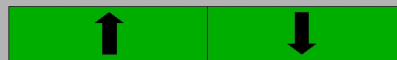
B. Rodmacq et al., Phys. Rev. B. **73**, 092405 (2006)



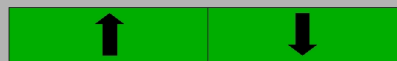
- pole magnetyczne domen jest efektywnie polem polaryzującym warstwy miękkie
- zerowa remanencja warstwy miękkiej
- koercja warstwy miękkiej zależy od stanu warstwy twardej



$$H=0$$

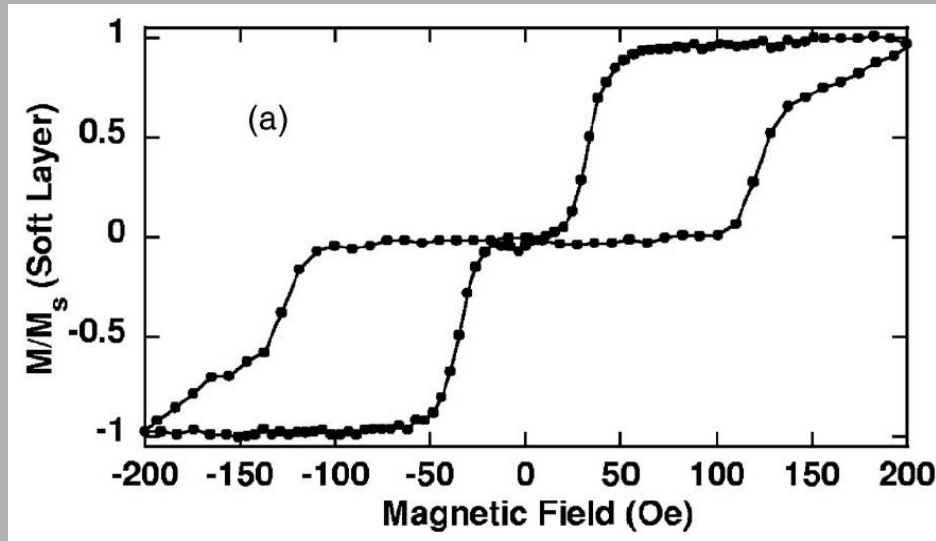


$$H=200 \text{ Oe}$$



# Replikacja w układach z anizotropią prostopadłą

B. Rodmacq et al., Phys. Rev. B. **73**, 092405 (2006)



- rozmagnesowana warstwa twarda
- zerowa remanencja warstwy miękkiej

Pętla  $M(H)$  jest symetryczna względem  $H=0$ :

- pola magnetyczne domen  $\uparrow$  i  $\downarrow$  w warstwie twardej są zbliżone
- MFM: domeny  $\uparrow$  i  $\downarrow$  mają podobny kształt i rozmiary (ok.  $1.6 \mu\text{m}$ )

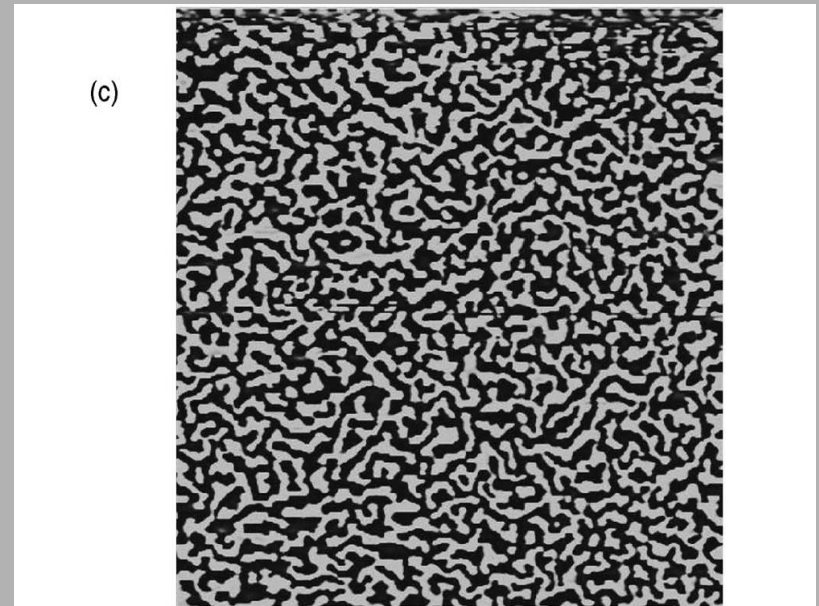
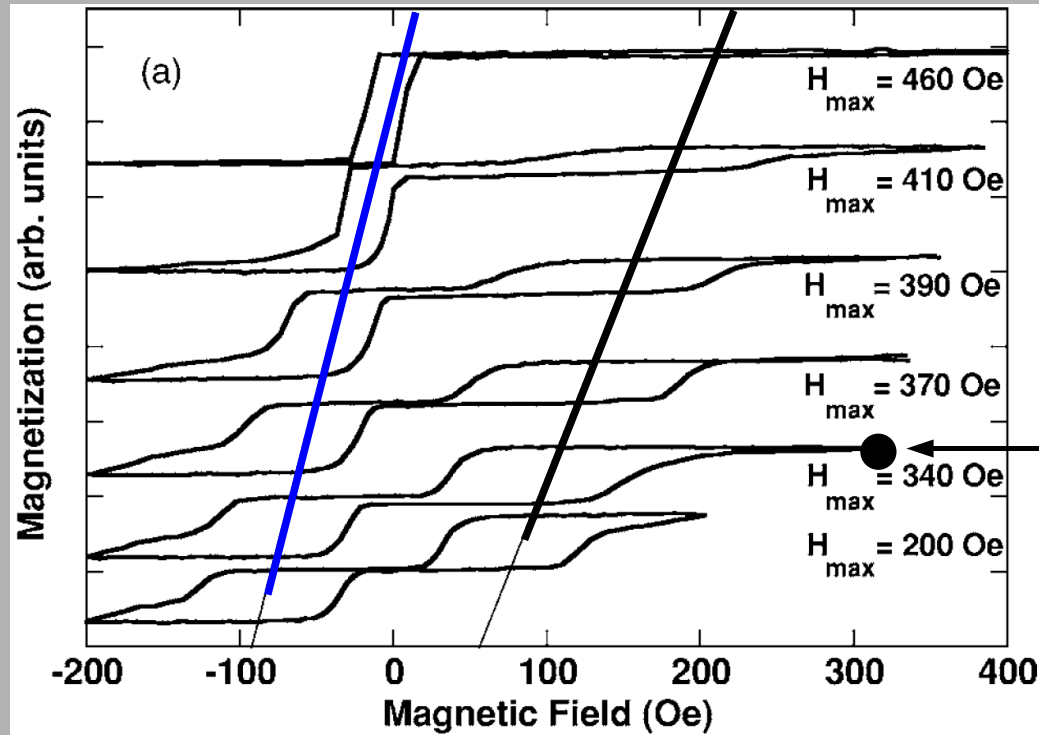


FIG. 2. Minor hysteresis loops for the soft layer. The hard layer is either (a) demagnetized or (b) saturated. The magnetization is normalized to that of the soft layer. (c) is a  $110 \times 110 \mu\text{m}^2$  MFM image in the demagnetized remanent state.

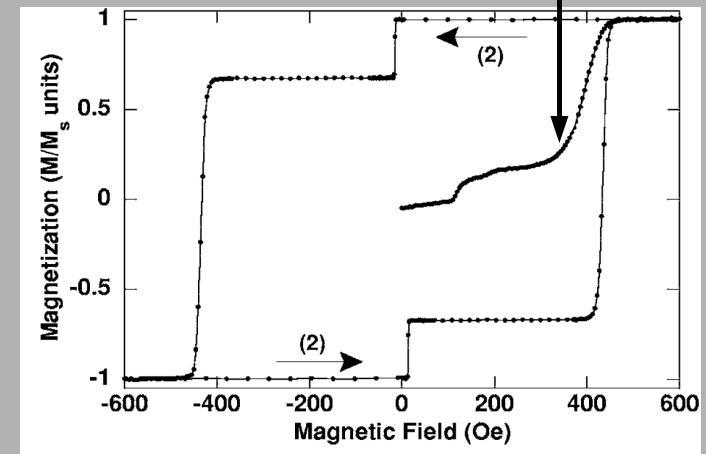
# Replikacja w układach z anizotropią prostopadłą

B. Rodmacq et al., Phys. Rev. B. **73**, 092405 (2006)



- namagnesowanie warstwy twardej różne od zera:  
⇒ wertykalne przesunięcie punktu początkowego małej pętli

start

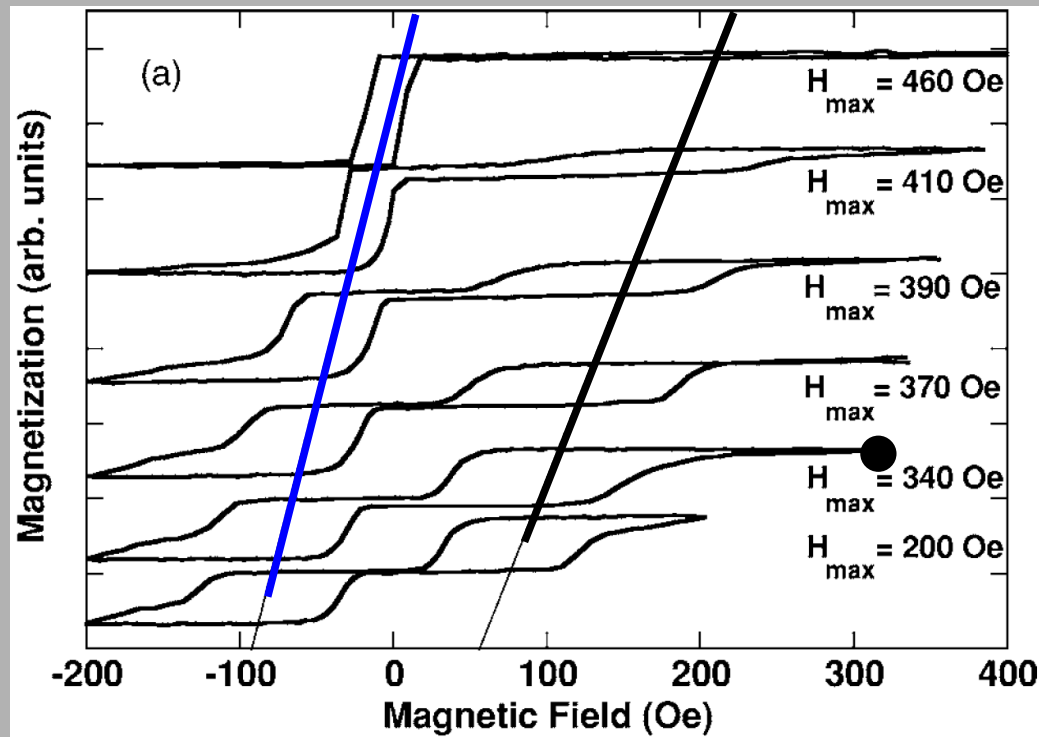


Przesunięcie pętli ujemnej od -80 do 0 Oe

Przesunięcie pętli dodatniej od +80 do 200 Oe

# Replikacja w układach z anizotropią prostopadłą

B. Rodmacq et al., Phys. Rev. B. **73**, 092405 (2006)

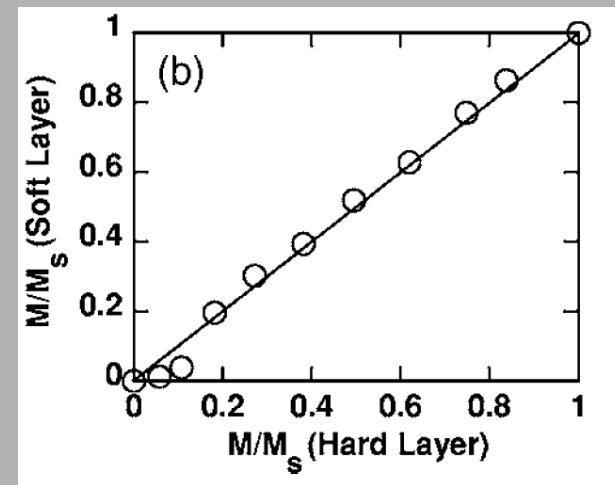


Replikacja występuje w całym zakresie namagnesowania warstwy twardej

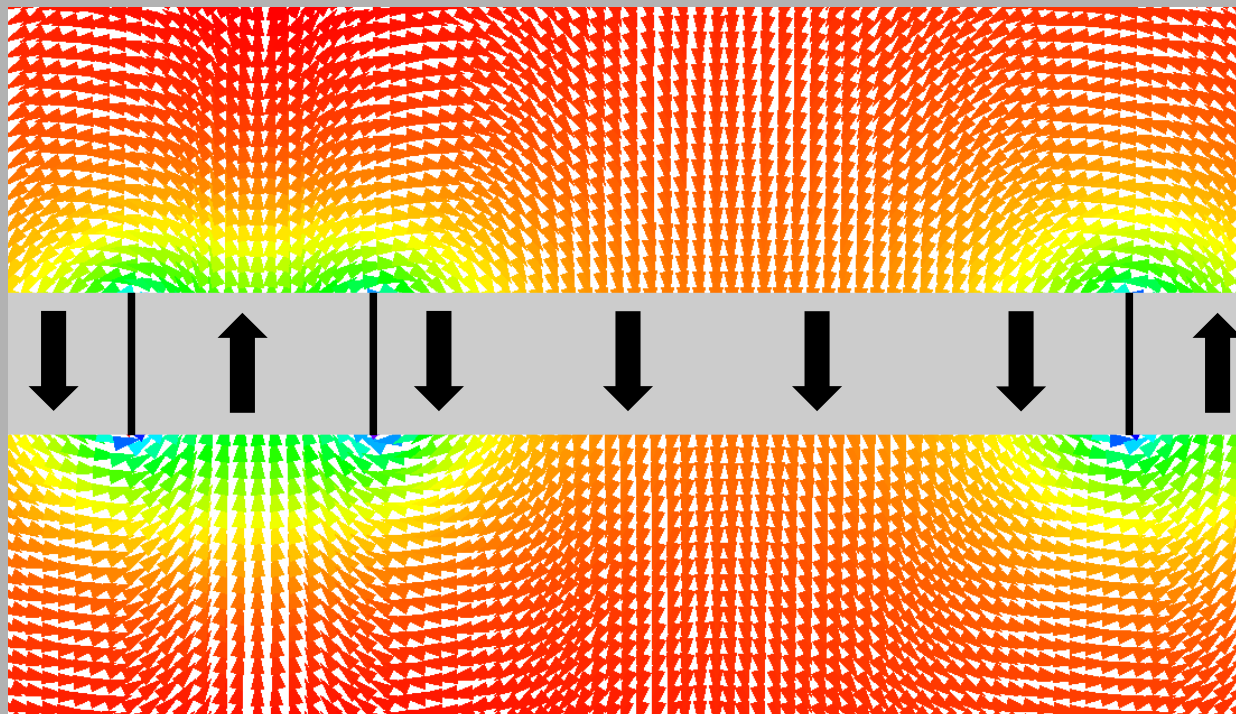


- namagnesowanie warstwy twardej różne od zera
- remanencja wzrasta ze wzrostem  $H_{max}$

Zależność momentu warstwy miękkiej od momentu warstwy twardej:



# Replikacja w układach z anizotropią prostopadłą

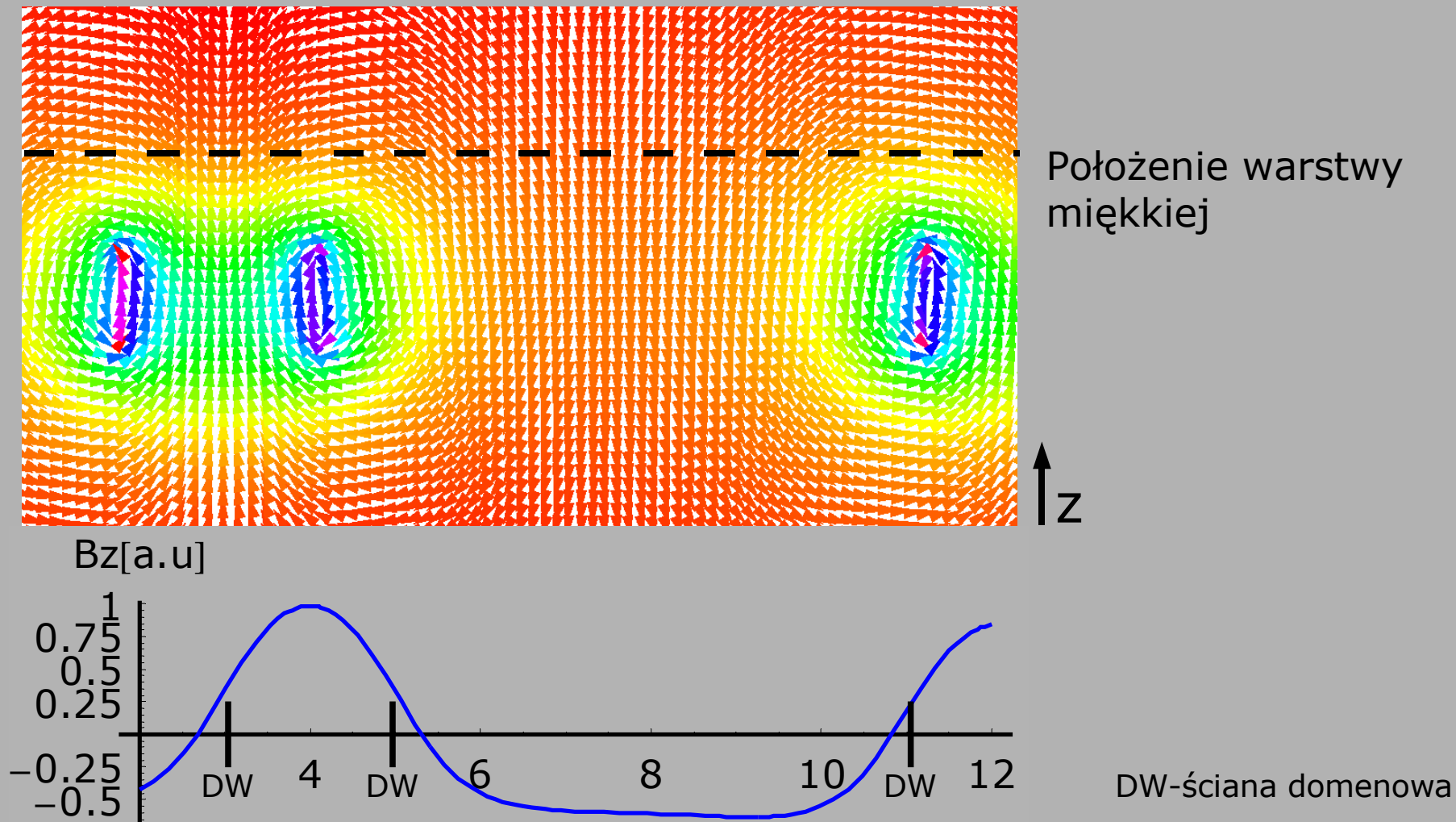


- Nieskończenie długie domeny
- zerowa szerokość ścian domenowych
- Biot-Savart

Pole magnetyczne domen zależy od stosunku szerokość/grubość

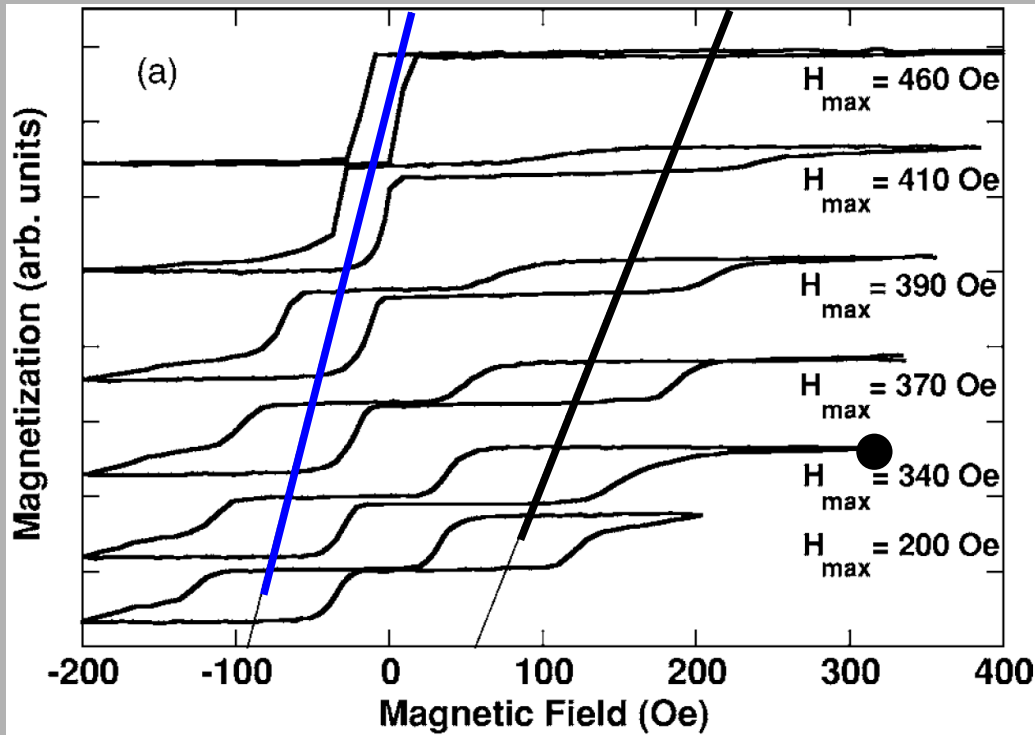


# Replikacja w układach z anizotropią prostopadłą

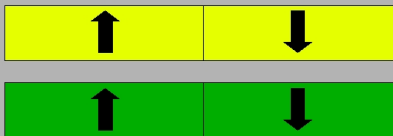


# Replikacja w układach z anizotropią prostopadłą

B. Rodmacq et al., Phys. Rev. B. **73**, 092405 (2006)



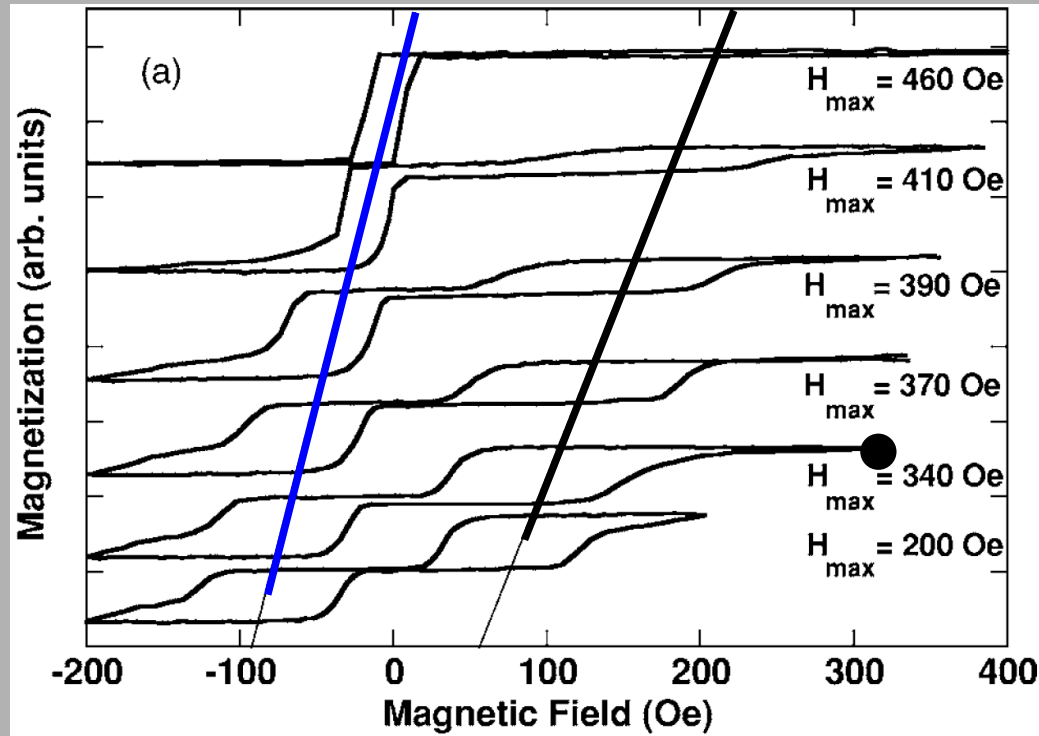
- ze wzrostem  $H_{\max}$  wzrasta obszar warstwy twardej namagnesowany „do góry”
- domeny  $\downarrow$  mają mniejsze rozmiary i tworzą silniejsze pola magnetyczne; skutkuje to *zwiększeniem przesunięcia pętli histerezy warstwy miękkiej*



W dodatniej połówce małej pętli na przemagnesowanie warstwy miękkiej wpływają głównie domeny „twarde” namagnesowane „na dół”.

# Replikacja w układach z anizotropią prostopadłą

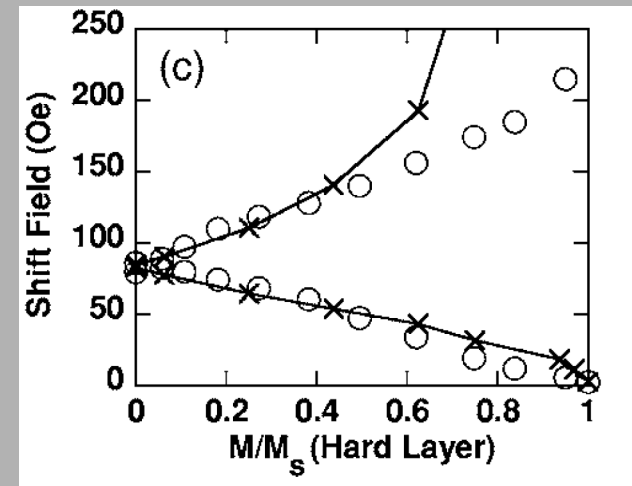
B. Rodmacq et al., Phys. Rev. B. **73**, 092405 (2006)



Porównanie zmierzonego „shift field” z polem domen prostopadłych otrzymanym z modelu domen pasiastych.

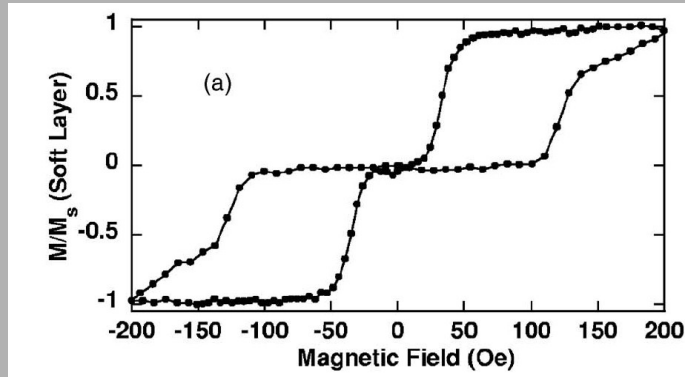
Założono, że okres struktury domenowej jest stały.

- niezgodność powyżej  $M/M_s = 0.5$ :  
- rzeczywista morfologia domen odbiega od modelu



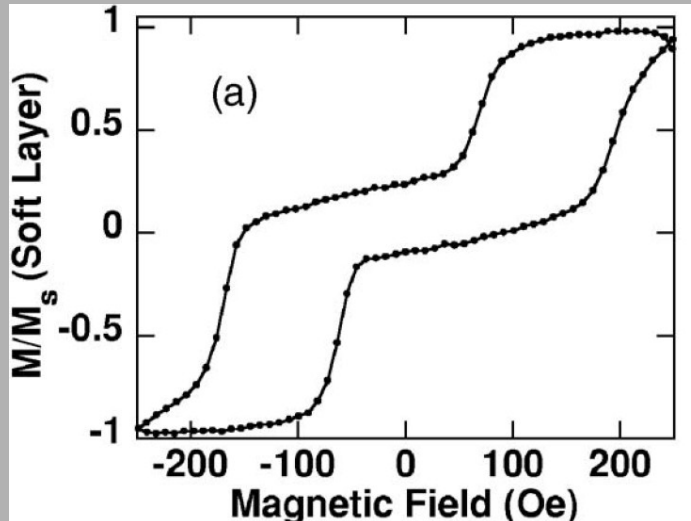
# Replikacja w układach z anizotropią prostopadłą

B. Rodmacq et al., Phys. Rev. B. **73**, 092405 (2006)



Pzesunięcie małej pętli zależy od rozmiaru domen i jest zgodne z szacowaniem pól z modelu domen pasiastych.

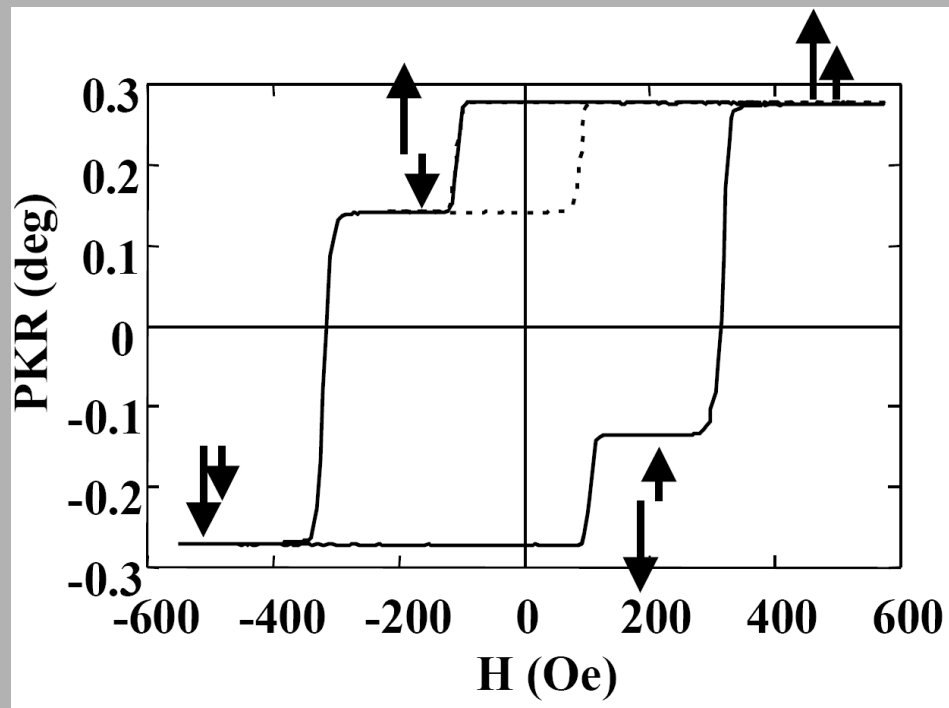
Szerokość domen-  $1.6\mu\text{m}$   
Przesunięcie 80 Oe  
Szacowanie pola 70 Oe



Szerokość domen-  $0.9\mu\text{m}$   
Przesunięcie 120 Oe  
Szacowanie pola 105 Oe

# Replikacja w układach z anizotropią prostopadłą

S. Wiebel et al., J. Appl. Phys. **100**, 043912 (2006)



500 Oe/s

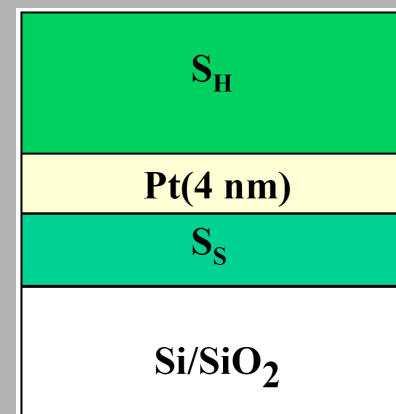
0.5 kOe/s → 50 kOe/s:

$\Delta H_{c(\text{soft,hard})} = 30 \text{ Oe}$

Neél: 8 Oe

Si/SiO<sub>2</sub>/Pt(1.8 nm)/(Co/Pt)<sub>2</sub>/Pt(4 nm)/(Co/Pt)<sub>4</sub>  
warstwa miękka

Co/Pt := Co(0.6 nm)/Pt(1.8 nm)



# Replikacja w układach z anizotropią prostopadłą

S. Wiebel et al., J. Appl. Phys. **100**, 043912 (2006)

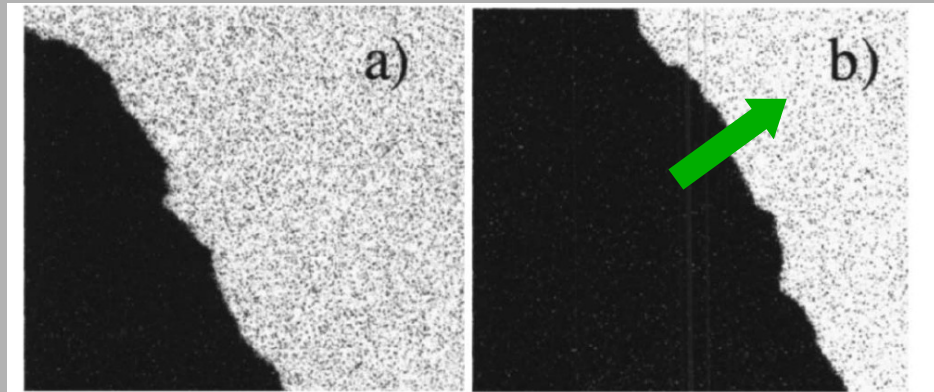
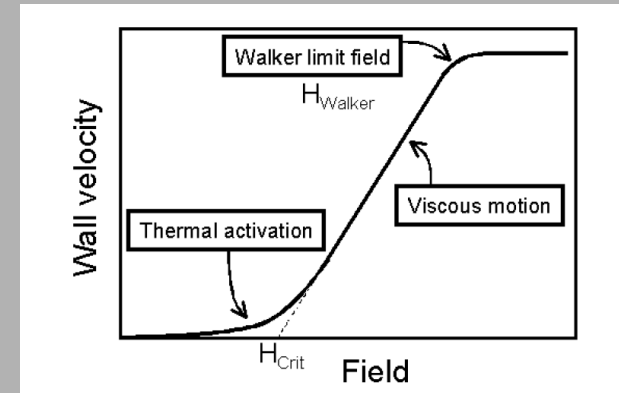


FIG. 2. Domain expansion in  $S_5$ : (a) initial domain state after switching off the field, (b) new snapshot after the application of a field pulse with magnitude  $H = -74$  Oe and duration  $t = 6$  ms, after switching off the field.

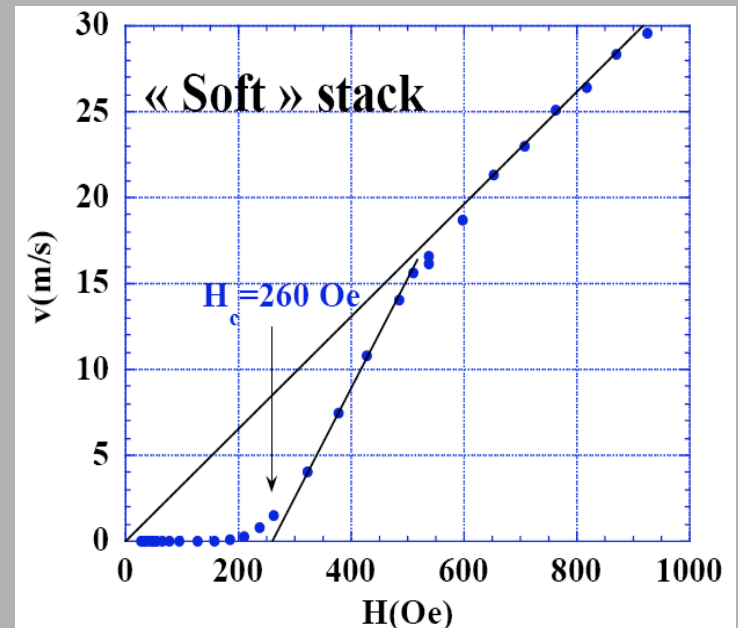
$$v = v_0 \exp\left[-A \left(\frac{H_{crit}}{H}\right)^{\frac{1}{4}}\right]$$

$$H > H_{crit}$$



K. Fukumoto

[www.diss.fu-berlin.de/2005/309/index.html](http://www.diss.fu-berlin.de/2005/309/index.html)



# Replikacja w układach z anizotropią prostopadłą

S. Wiebel et al., J. Appl. Phys. **100**, 043912 (2006)

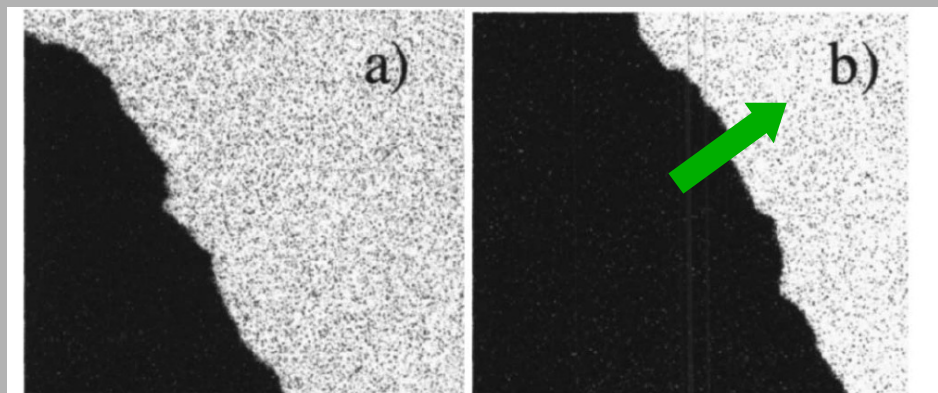
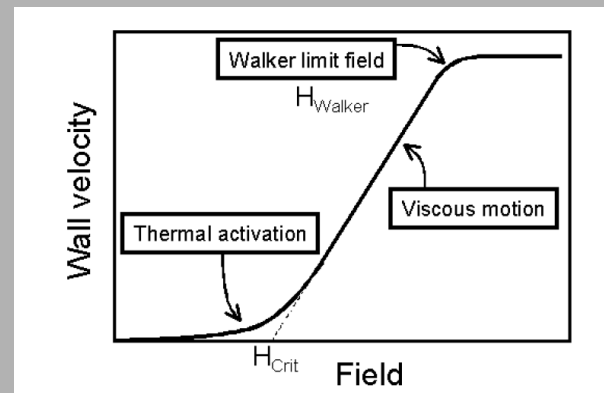


FIG. 2. Domain expansion in  $S_5$ : (a) initial domain state after switching off the field, (b) new snapshot after the application of a field pulse with magnitude  $H = -74$  Oe and duration  $t = 6$  ms, after switching off the field.

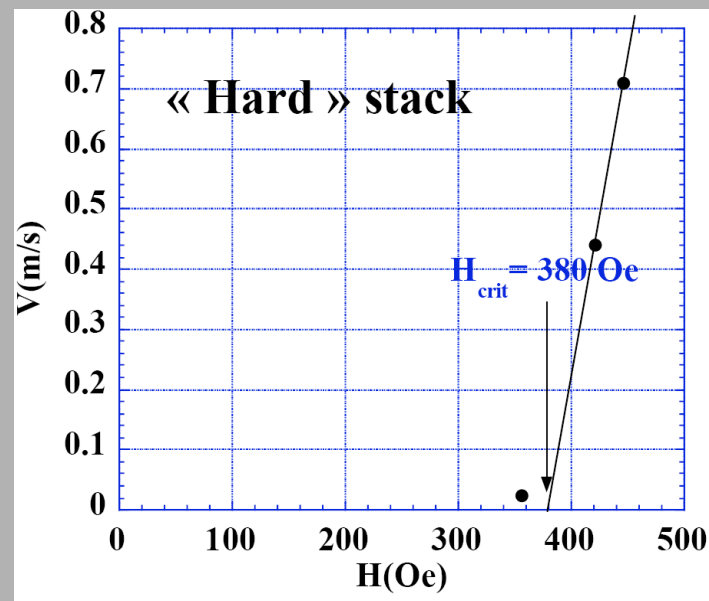
$$v = v_0 \exp\left[-A \left(\frac{H_{crit}}{H}\right)^{\frac{1}{4}}\right]$$

$$H > H_{crit}$$



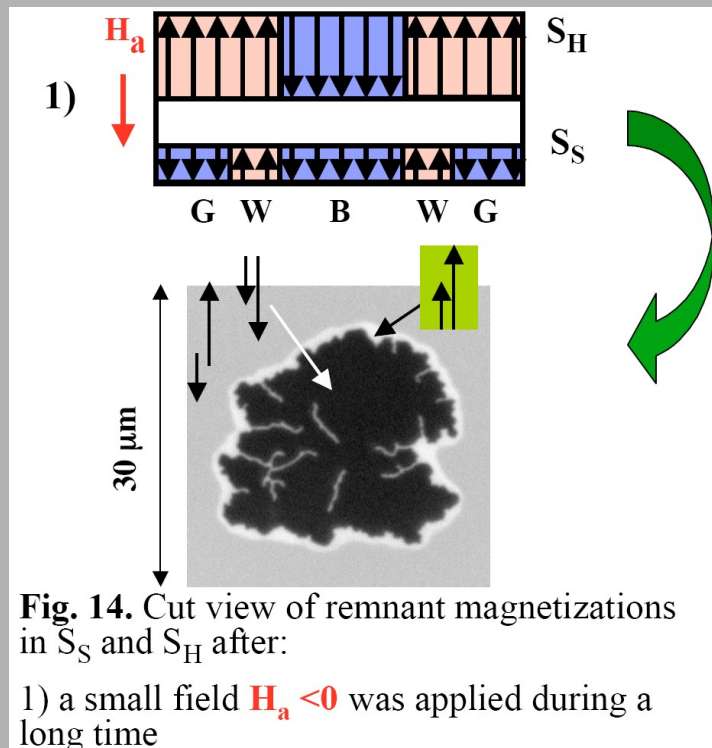
K. Fukumoto

[www.diss.fu-berlin.de/2005/309/index.html](http://www.diss.fu-berlin.de/2005/309/index.html)



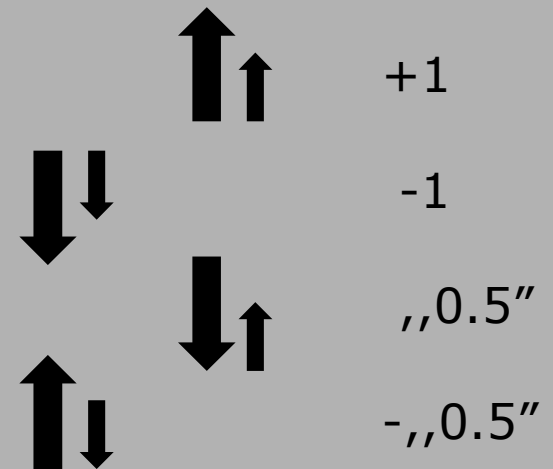
# Replikacja w układach z anizotropią prostopadłą

S. Wiebel et al., J. Appl. Phys. **100**, 043912 (2006)



Stan początkowy: góra-góra w polu 560 Oe

Sygnal MOKE (Kerr):

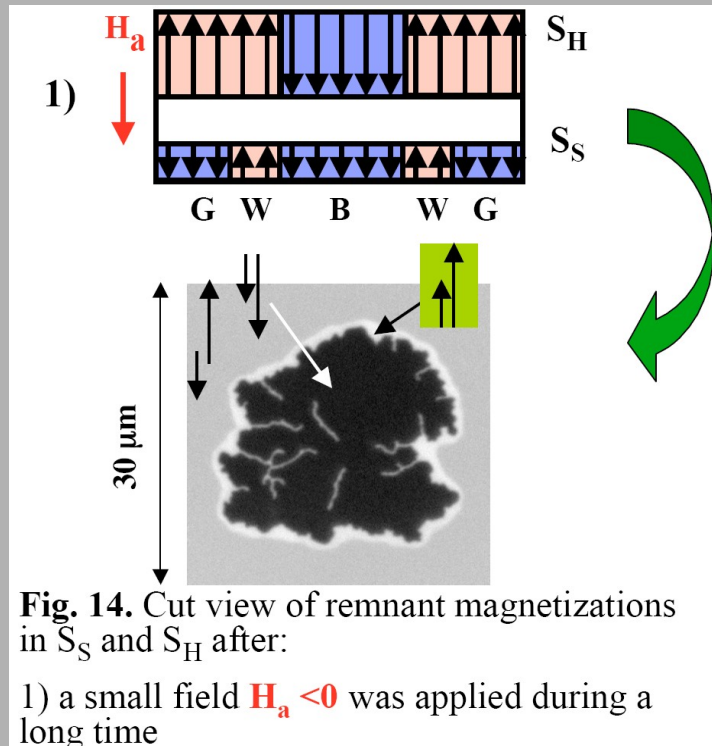


Dookoła domeny dół-dół tworzy się domena góra-góra

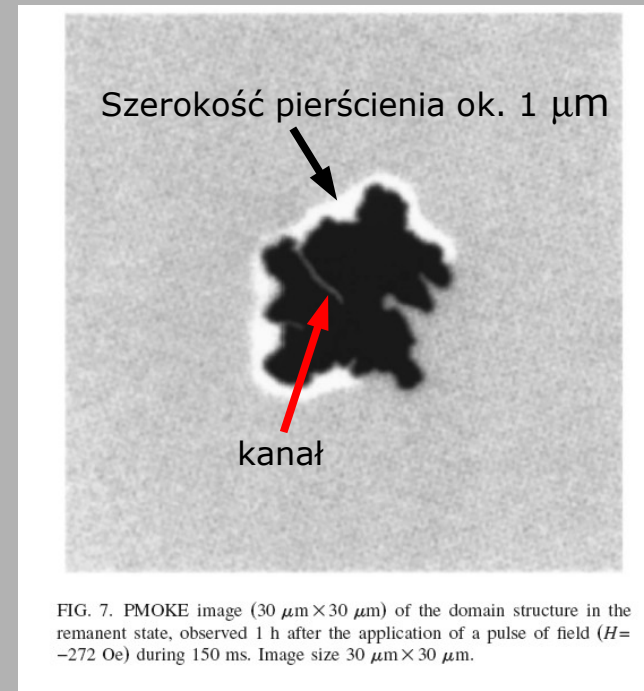


# Replikacja w układach z anizotropią prostopadłą

S. Wiebel et al., J. Appl. Phys. **100**, 043912 (2006)



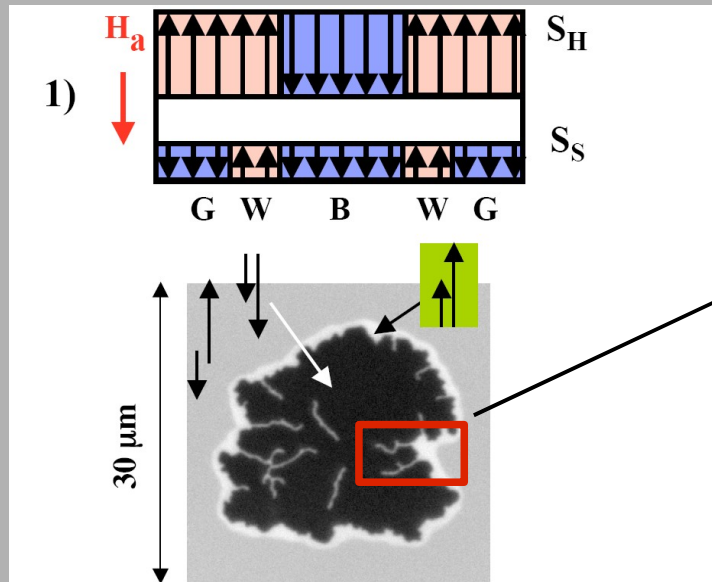
Stan początkowy: góra-góra w polu 560 Oe



Po wyłączeniu pola  $H_a$  pierścienie góra-góra pojawiają się początkowo w „kanałach”.

# Replikacja w układach z anizotropią prostopadłą

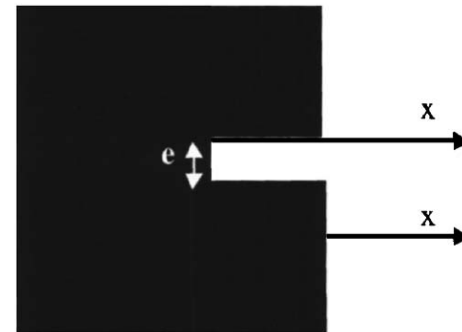
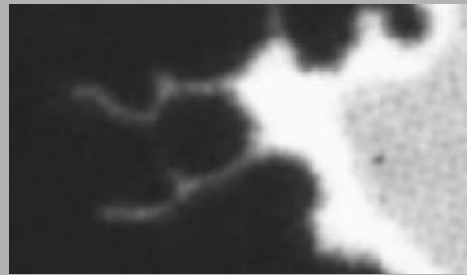
S. Wiebel et al., J. Appl. Phys. **100**, 043912 (2006)



**Fig. 14.** Cut view of remnant magnetizations in  $S_S$  and  $S_H$  after:

1) a small field  $H_a < 0$  was applied during a long time

Stan początkowy: góra-góra w polu 560 Oe



**FIG. 9.** Schematic upper view of a square down-down (black) magnetized domain with a nonreversed channel of width "e." The distance  $x$  is taken either from the square side or the base of the channel.

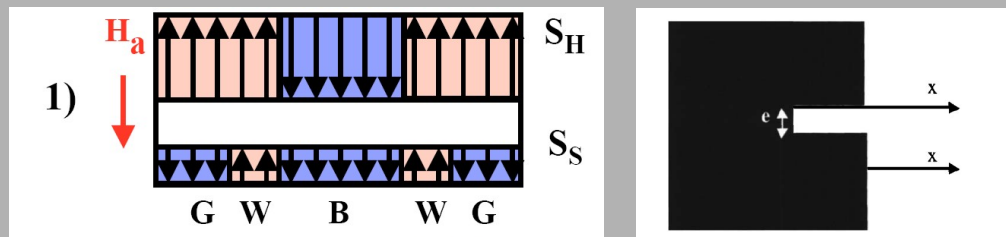
Model:

głębokość kanału - 1  $\mu\text{m}$

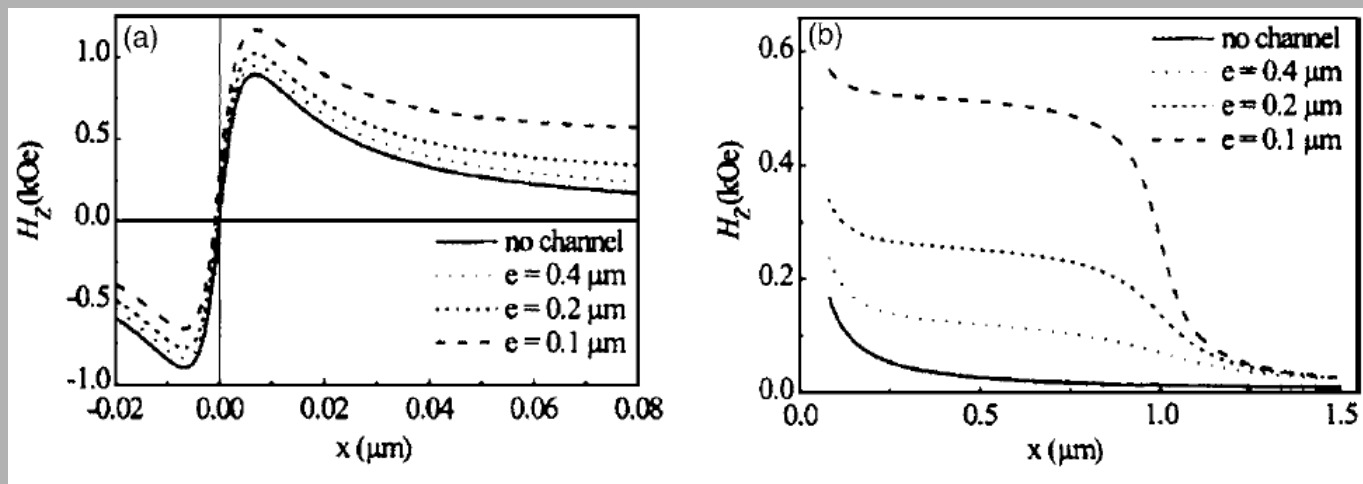
domena góra-góra 20×20  $\mu\text{m}^2$

# Replikacja w układach z anizotropią prostopadłą

S. Wiebel et al., J. Appl. Phys. **100**, 043912 (2006)

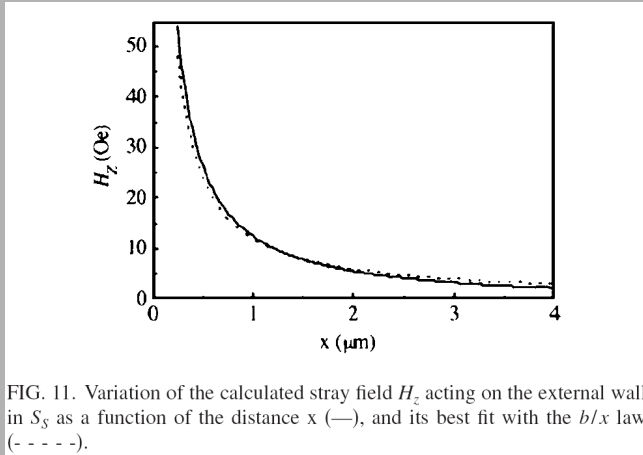


- obliczenie pola magnetycznego w warstwie miękkiej
- pole magnetyczne  $H$  od domeny dół-dół może przekraczać 800 Oe
- najsilniejsze pola  $H$  występują w kanałach – łatwiejsza nukleacja domen



# Replikacja w układach z anizotropią prostopadłą

S. Wiebel et al., J. Appl. Phys. **100**, 043912 (2006)



Zależność prostopadłej składowej pola domeny dół-dół od  $x$  przybliżona być może zależnością typu:

$$H_z \propto \frac{b}{x},$$

gdzie  $b=19 \text{ Oe } \mu\text{m}$ .

$$v = v_0 \exp\left[-A \left(\frac{H_{crit}}{H_z}\right)^{\frac{1}{4}}\right], \quad H > H_{crit}$$

$$\int_0^x \exp\left[A \left(\frac{H_{crit} x}{b}\right)^{\frac{1}{4}}\right] v_0^{-1} dx = t(x)$$

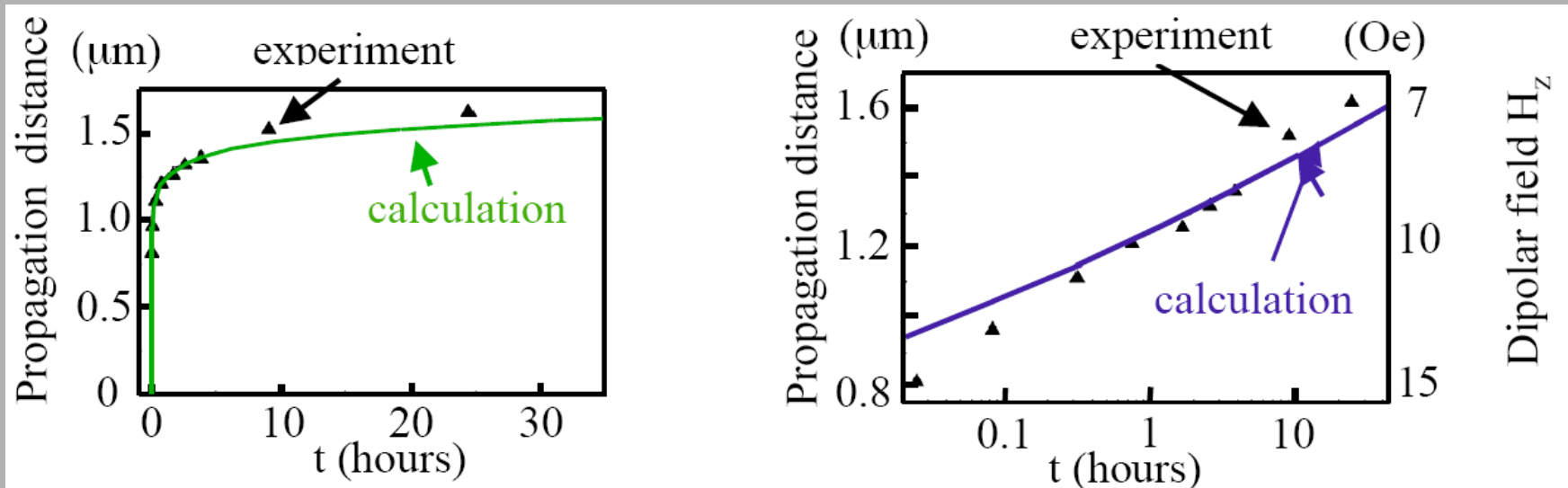
# Replikacja w układach z anizotropią prostopadłą

S. Wiebel et al., J. Appl. Phys. **100**, 043912 (2006)

Ściana domenowa asymptotycznie osiąga położenie równowagi

Zakłada się, że sprzężenie Néela jest zaniedbywalne.

Dokładność pomiaru  $x - 0.1\mu\text{m}$



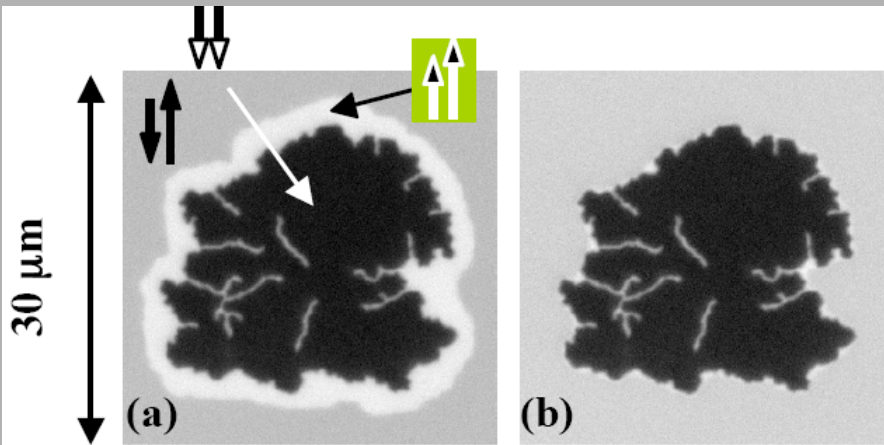
**Fig. 9a and b.** EXPERIMENT: ( $\blacktriangle$ ) time dependence of the width of the white crown surrounding the black domain, after  $H_a$  has been canceled.

# Replikacja w układach z anizotropią prostopadłą

S. Wiebel et al., J. Appl. Phys. **100**, 043912 (2006)

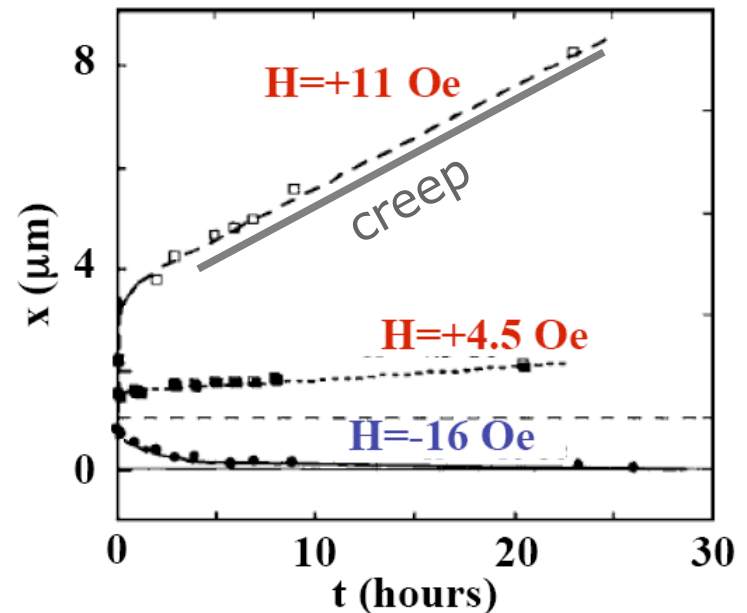
Szerokość pierścieniowej domeny góra-góra zmienia się z wartością pola zewnętrznego w sposób zgodny z równaniem ruchu domen dla

$$H_{\text{wyypadkowe}} = H_{\text{domen}} + H_{\text{zewnetrzne.}}$$



**Fig. 10.** MOKE images recorded after demagnetization (image under  $H_a = 0$ ), then after application of  $H_a$ :

- (a)  $H_a = +7$  Oe and  $\Delta t = 2$  mn,
- (b)  $H_a = -77$  Oe and  $\Delta t = 2$  mn

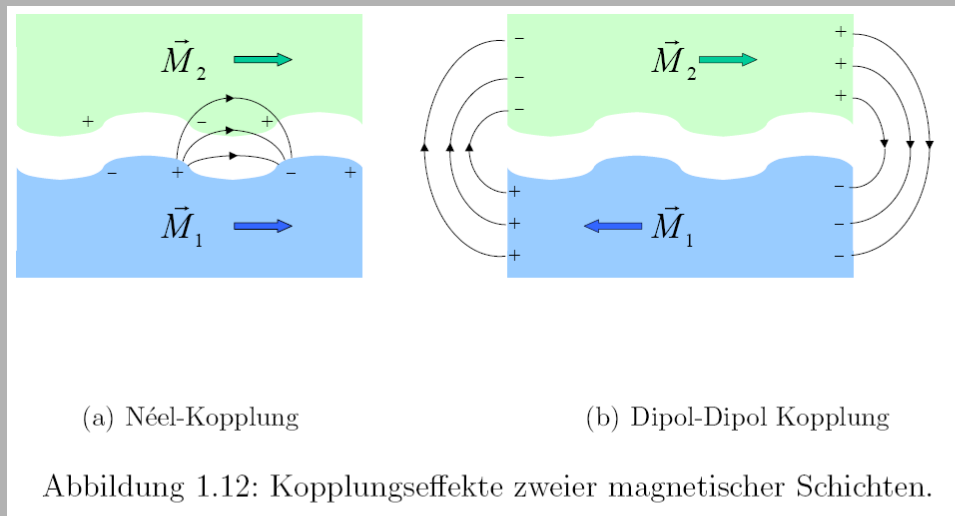
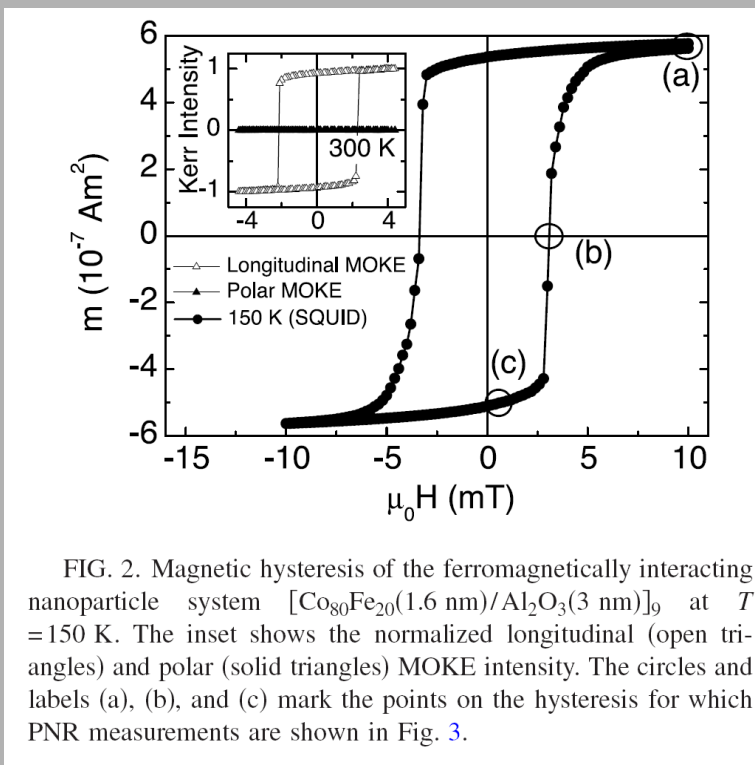


**Fig. 11.** Graph of mean propagation distance of the crown with time.

# Moment modulowany prostopadle do powierzchni

S. Bedanta et al., Phys. Rev. B **100**, 054426 (2006)

H. Koop, praca doktorska, Bielefeld 2004



W granularnych układach **Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** obserwuje się skorelowaną szorstkość ⇒ sprzężenie Néela

szkło/**[Co<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>(1.6 nm)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(3 nm)]<sub>9</sub>**  
Xe-ion beam sputtering

# Moment modulowany prostopadle do powierzchni

S. Bedanta et al., Phys. Rev. B **100**, 054426 (2006)

Reflektometria  
spolaryzowanych  
neutronów (PNR)

-pole prowadzące:  
0.47 mT

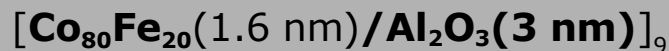
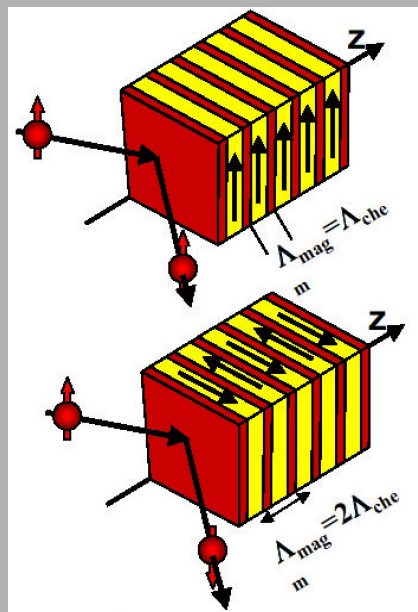
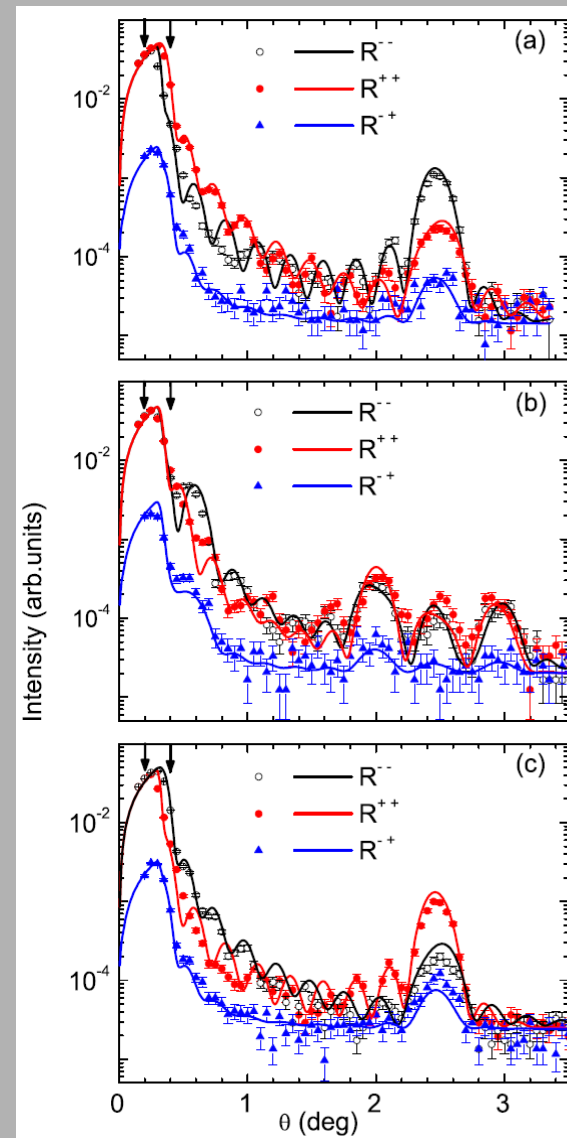


FIG. 3. (Color online) PNR reflectivities  $R^{++}$  in red (dark gray),  $R^{--}$  in black, and  $R^{+-}$  in blue (light gray) vs angle of incidence,  $\theta$  measured at  $T=150$  K and  $\mu_0 H=12$  mT (saturation) (a), close to the coercive field  $\mu_0 H=3.8$  mT (b), and close to remanence in the guiding field of the neutrons,  $\mu_0 H=0.47$  mT, after negative saturation (c) (see Fig. 2). The plateaus of total reflection,  $Q_c^{++}$  and  $Q_c^{--}$ , are designated by vertical arrows. (d) Magnetization of individual CoFe layers in the multilayer stack, numbered  $N=1, \dots, 9$  and extracted from the fitting to the PNR data at  $H_c$  (b, red), and to similar data for  $\mu_0 H_c + 0.04$  mT (black).



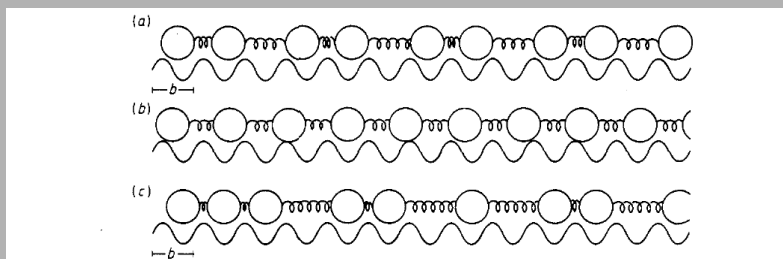


# Moment modulowany prostopadle do powierzchni

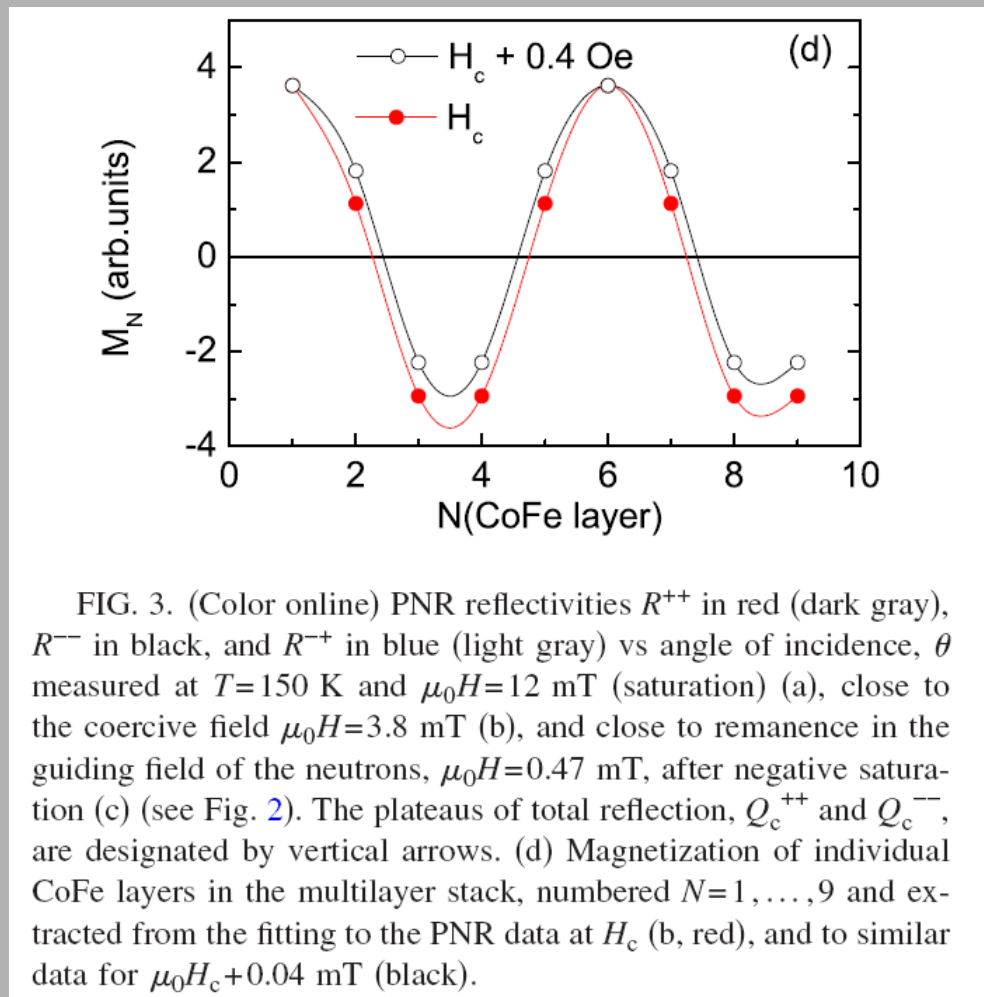
S. Bedanta et al., Phys. Rev. B **100**, 054426 (2006)

Reflektometria  
spolaryzowanych  
neutronów (PNR)

-pole prowadzące:  
0.47 mT



**Figure 1.** The one-dimensional FVdM model. The springs represent interactions between atoms, the wavy line the periodic potential. (a) Commensurate structure, (b) incommensurate structure, (c) chaotic structure.



**FIG. 3.** (Color online) PNR reflectivities  $R^{++}$  in red (dark gray),  $R^{--}$  in black, and  $R^{+-}$  in blue (light gray) vs angle of incidence,  $\theta$  measured at  $T=150$  K and  $\mu_0 H=12$  mT (saturation) (a), close to the coercive field  $\mu_0 H=3.8$  mT (b), and close to remanence in the guiding field of the neutrons,  $\mu_0 H=0.47$  mT, after negative saturation (c) (see Fig. 2). The plateaus of total reflection,  $Q_c^{++}$  and  $Q_c^{--}$ , are designated by vertical arrows. (d) Magnetization of individual CoFe layers in the multilayer stack, numbered  $N=1, \dots, 9$  and extracted from the fitting to the PNR data at  $H_c$  (b, red), and to similar data for  $\mu_0 H_c+0.04$  mT (black).

**[Co<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>(1.6 nm)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(3 nm)]<sub>9</sub>**

# Moment modulowany prostopadle do powierzchni

S. Bedanta et al., Phys. Rev. B **100**, 054426 (2006)

Reflektometria  
spolaryzowanych  
neutronów (PNR)

-pole prowadzące:  
0.47 mT

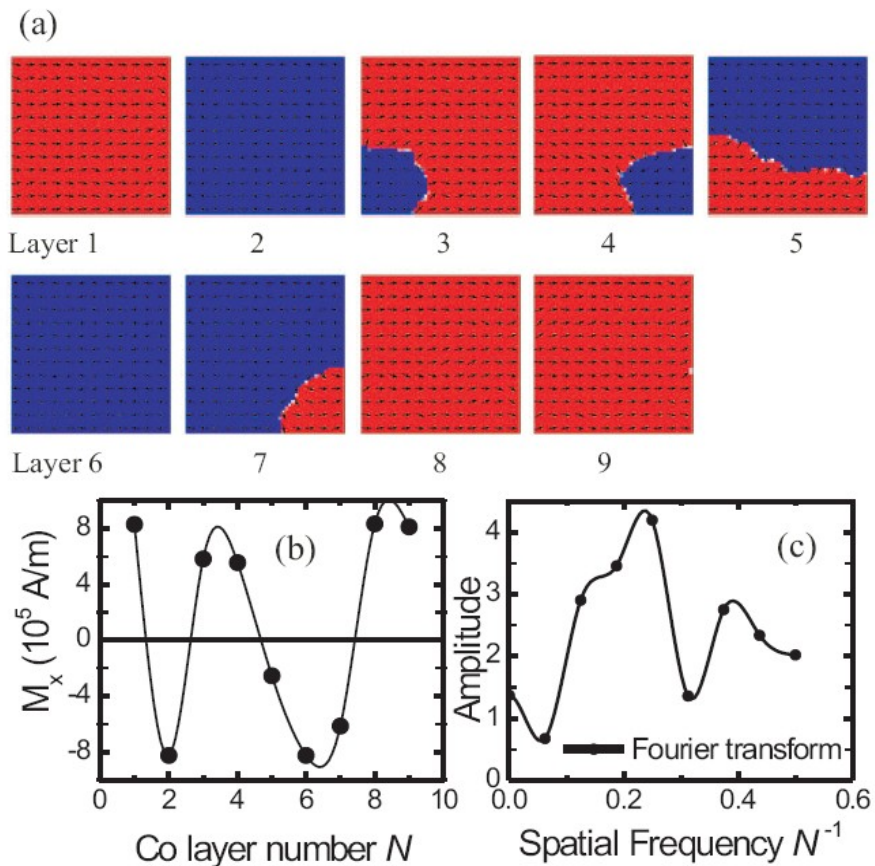
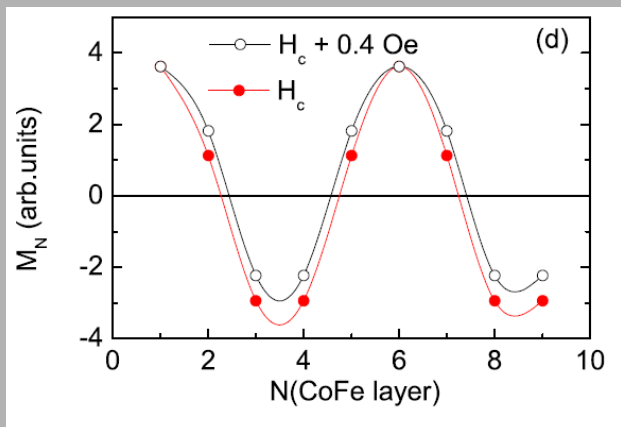
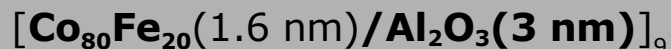


FIG. 4. (Color online) (a) Spin structure of the single layers coded  $M_x$  in red (light gray) and blue (dark gray) for  $M_x > 0$  and  $< 0$ , respectively, obtained from micromagnetic simulations (see text). The layer magnetization  $M_x$  vs distance in units of the bilayer thickness  $d=6.4 \text{ nm}$  and the corresponding Fourier transform in units  $d^{-1}$  are shown in panels (b) and (c), respectively.



# Wnioski

- Replikacja domen w warstwach z anizotropią w płaszczyźnie wywołana jest głównie polem ścian domenowych
- W warstwach z anizotropią prostopadłą istotną rolę odgrywają pola domen
- Replikacja domen silnie zależy od pól zewnętrznych

Dziękuję za  
uwagę