

projekt badawczy:

Ferromagnetyczne materiały dla kontrolowanego pozycjonowania ścian domenowych

Umowa nr UMO-2013/08/M/ST3/00960 z Narodowym Centrum Nauki

Kierownik projektu: dr hab. M. Urbaniak

Okres realizacji: **36 miesięcy** (2013.08.29-2016.08.28)

projekt badawczy:

Ferromagnetyczne materiały dla kontrolowanego pozycjonowania ścian domenowych

Wykonawcy projektu (9):

- J. Aleksiejew
- prof. dr hab. A. Ehresmann
- mgr A. Jarosz
- dr P. Kuświk
- mgr inż. M. Matczak
- dr M. Schmidt
- prof. dr hab. F. Stobiecki
- dr B. Szymański
- dr hab. M. Urbaniak

projekt badawczy:

Ferromagnetyczne materiały dla kontrolowanego pozycjonowania ścian domenowych

Prace opublikowane (5):

[1] A. Maziewski, J. Fassbender, J. Kisielewski, M. Kisielewski, Z. Kurant, P. Mazalski, F. Stobiecki, A. Stupakiewicz, I. Sveklo, M. Tekielak, A. Wawro, V. Zablotskii, *Magnetization states and magnetization processes in nanostructures: From a single layer to multilayers*, *Physica Status Solidi A* **211**, 1005 (2014)

[2] M. Urbaniak, *Néel type magnetostatic coupling in perpendicular anisotropy bilayers – Micromagnetic simulations*, *Phys. Status Solidi B* **251**, 455 (2014)

[3] M. Matczak, B. Szymański, P. Kuświk, M. Urbaniak, F. Stobiecki, Z. Kurant, A. Maziewski, D. Lengemann, A. Ehresmann, *Tailoring magnetic anisotropy gradients by ion bombardment for domain wall positioning in magnetic multilayers with perpendicular anisotropy*, *Nanoscale Research Letters* **9**, 395, 2014

[4] M. Matczak, P. Kuświk, M. Urbaniak, B. Szymański, F. Stobiecki, *Influence of domain replication on magnetoresistance of Co/Au/Co film with perpendicular anisotropy and antiferromagnetic coupling*, *IEEE Trans. Magn.* **50**, 4400804 (2014)

[5] M. Matczak, Ł. Frąckowiak, P. Kuświk, M. Urbaniak, B. Szymański, F. Stobiecki, *Magnetization reversal and domain replication in Co/Au/Co film with perpendicular anisotropy*, *IEEE Trans. Magn.* **50**, 6000604 (2014)

projekt badawczy:

Ferromagnetyczne materiały dla kontrolowanego pozycjonowania ścian domenowych

Prace opublikowane (5):

[1] A. Maziewski, J. Fassbender, J. Kisielewski, M. Kisielewski, Z. Kurant, P. Mazalski, F. Stobiecki, A. Stupakiewicz, I. Sveklo, M. Tekielak, A. Wawro, V. Zablotskii, *Magnetization states and magnetization processes in nanostructures: From a single layer to multilayers*, Physica Status Solidi A **211**, 1005 (2014)

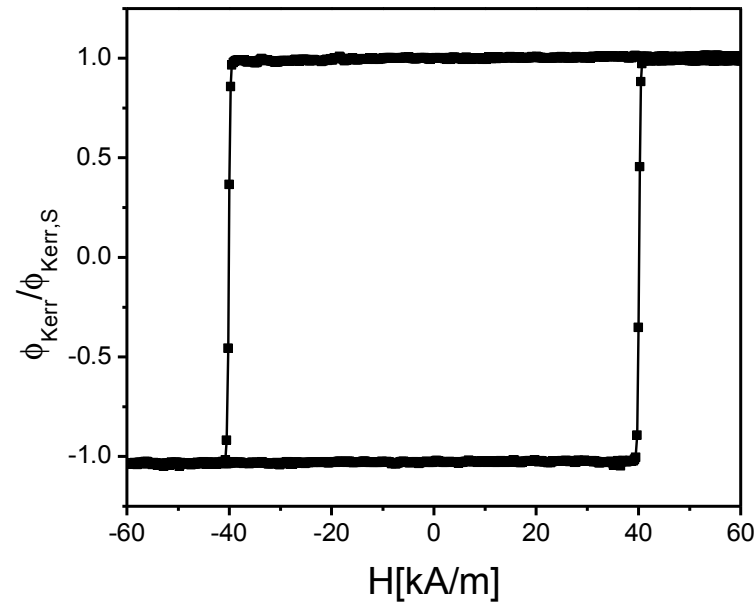
[2] M. Urbaniak, *Néel type magnetostatic coupling in perpendicular anisotropy bilayers – Micromagnetic simulations*, Phys. Status Solidi B **251**, 455 (2014)

[3] M. Matczak, B. Szymański, P. Kuświk, M. Urbaniak, F. Stobiecki, Z. Kurant, A. Maziewski, D. Lengemann, A. Ehresmann, *Tailoring magnetic anisotropy gradients by ion bombardment for domain wall positioning in magnetic multilayers with perpendicular anisotropy*, Nanoscale Research Letters **9**, 395, 2014

[4] M. Matczak, P. Kuświk, M. Urbaniak, B. Szymański, F. Stobiecki, *Influence of domain replication on magnetoresistance of Co/Au/Co film with perpendicular anisotropy and antiferromagnetic coupling*, IEEE Trans. Magn. **50**, 4400804 (2014)

[5] M. Matczak, Ł. Frąckowiak, P. Kuświk, M. Urbaniak, B. Szymański, F. Stobiecki, *Magnetization reversal and domain replication in Co/Au/Co film with perpendicular anisotropy*, IEEE Trans. Magn. **50**, 6000604 (2014)

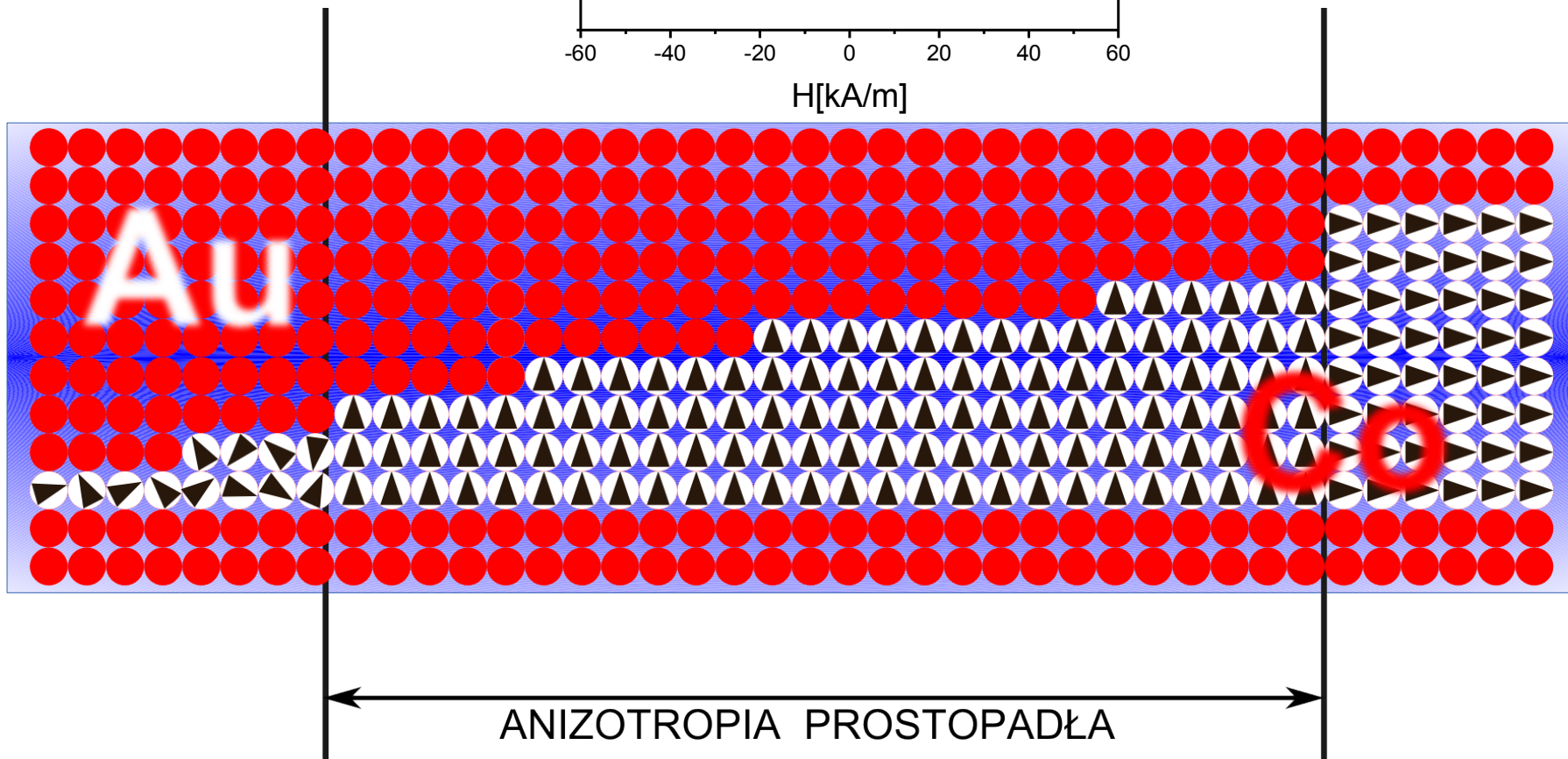
W badanych zakresach grubości warstw Co układy $(\text{Co}/\text{Au})_N$ wykazują prostopadłą anizotropię magnetyczną



pole prostopadłe do powierzchni warstwy

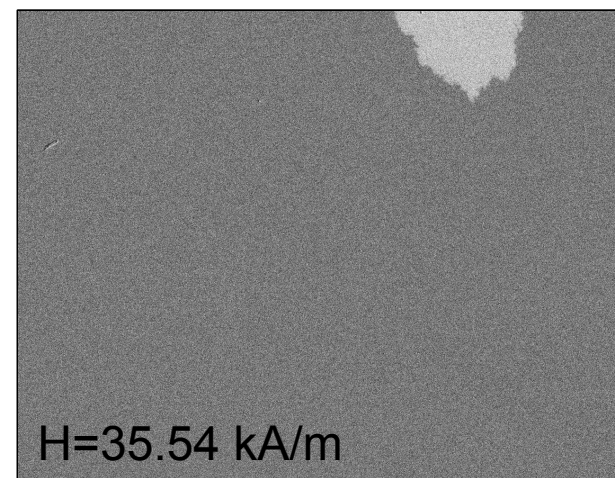
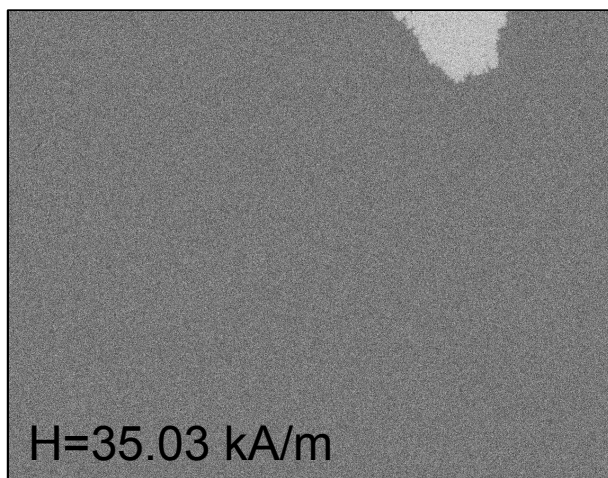
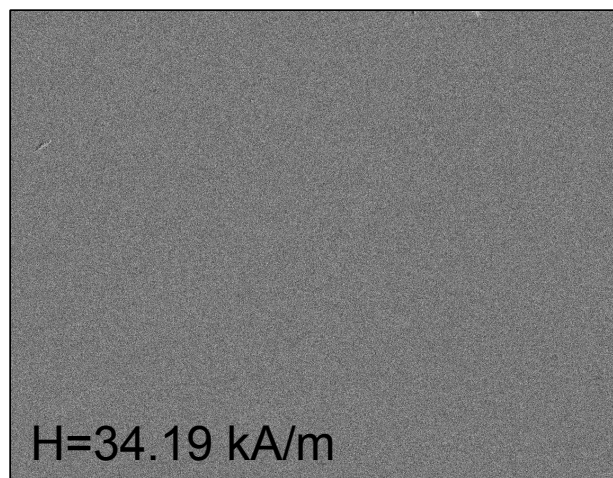
$[\text{Co}(0.8\text{nm})/\text{Au}(1\text{nm})]_2$

ZIARNA SUPERPARAMAGNETYCZNE

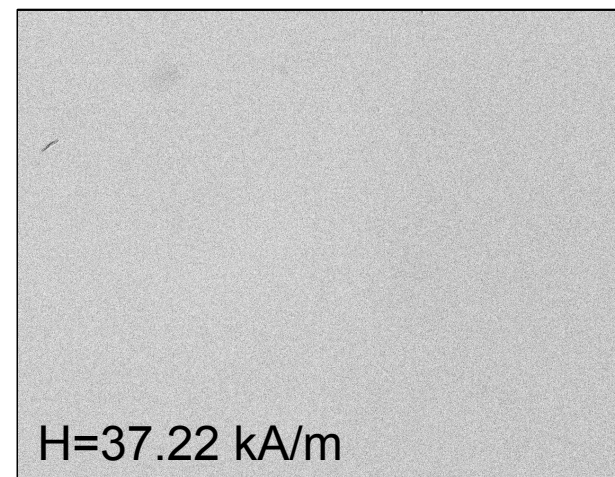
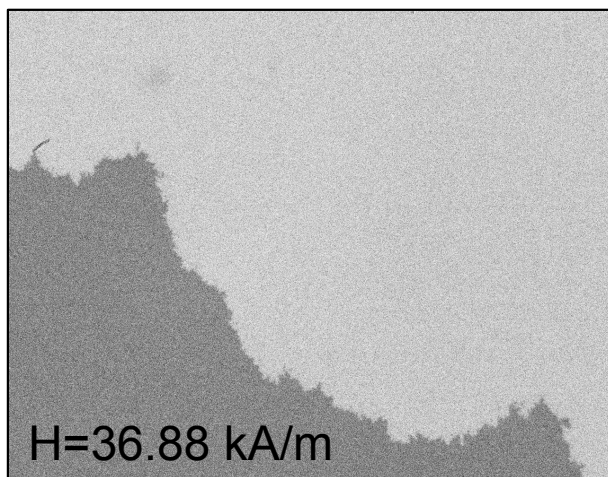
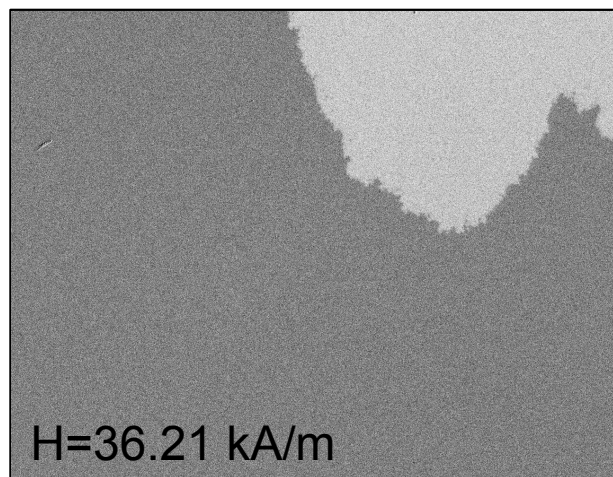


ANIZOTROPIA TYPU ŁATWA
PŁASZCZYZNA lub W PŁASZCZYZNIE

Przemagnesowanie wywołane propagacją ściany domenowej
jednorodna warstwa [Co(0.8nm)/Au(1nm)]₂

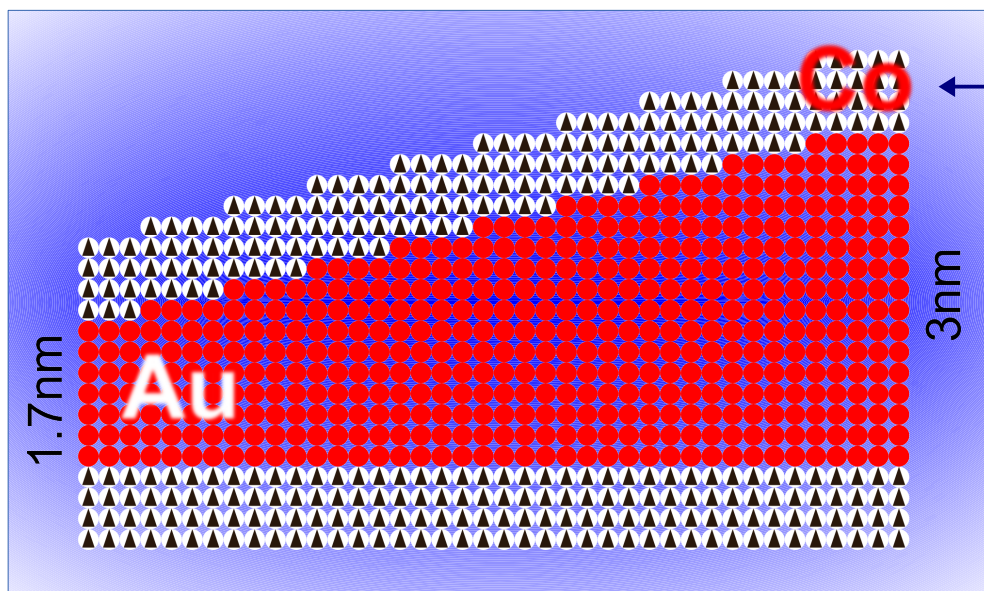


895×694 μm²



W dobrej jakości warstwach uzyskanych metodą rozpylania jonowego powierzchniowa **gęstość centrów nukleacji może być bardzo mała**. Dla serii obrazów pokazanych powyżej w obszarze o rozmiarach 895×694 μm² nie zaobserwowano centrum nukleacji o polu aktywacji mniejszym niż w sąsiadujących obszarach.

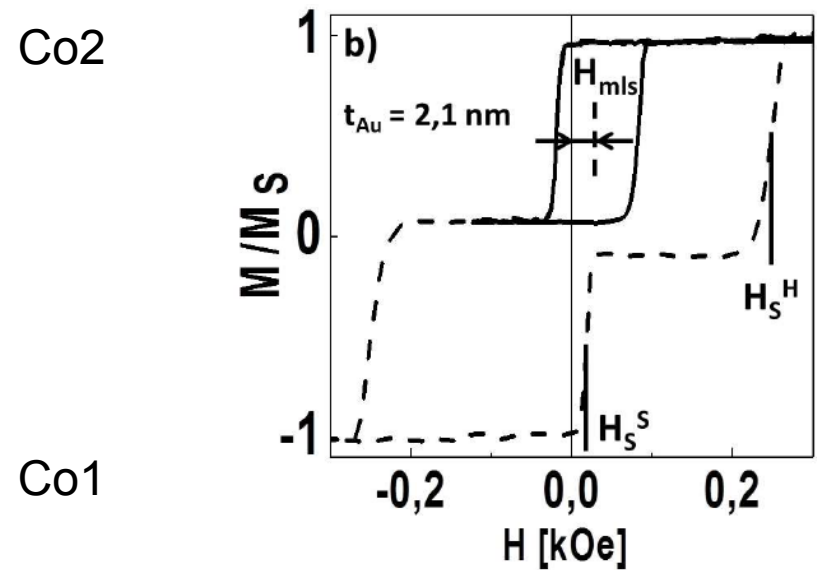
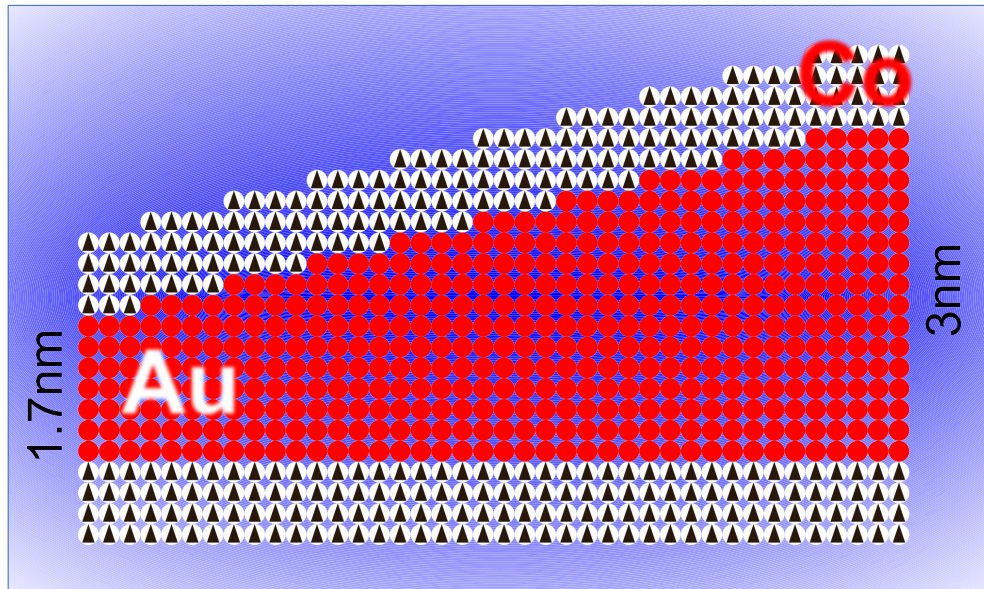
Replikacja domen w warstwie Si(100)/Ti(4nm)/Au(10nm)/Co(0.6nm)/Au/Co(0.6nm)



- w układach wielowarstwowych przemagnesowanie określone jest nie tylko przez własności subwarstw magnetycznych ale również przez oddziaływanie między nimi
- warstwa osadzona między buforem i 2nm warstwą przykrywającą Au
- górna warstwa Co jest twardsza magnetycznie (większe pole koercji)

klin – zmiana oddziaływania

Replikacja domen w warstwie Si(100)/Ti(4nm)/Au(10nm)/Co(0.6nm)/Au/Co(0.6nm)



gdy warstwy Co nie oddziałują ze sobą pętla warstwy miękkiej (Co^S) nie jest przesunięta względem osi $H=0$

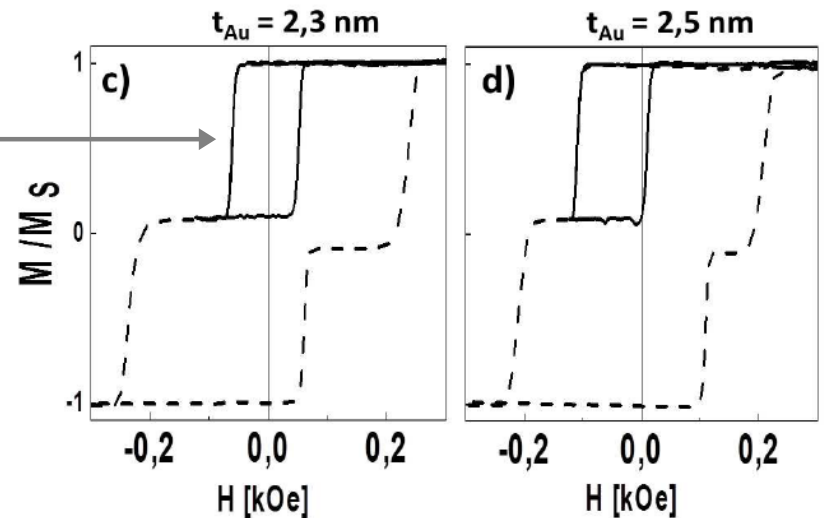


Fig. 1. (a) Switching fields H_S^S and H_S^H of magnetically hard (Co^H) and soft (Co^S) layers versus thickness of Au spacer (t_{Au}) measured for Co^S -0.6nm/Au-wedge 1.7-3nm/ Co^H -0.6nm/Au-2nm layered film. (b-d) Representative major (dashed line) and minor (solid line) hysteresis loops, corresponding to antiferromagnetic (b), zero (c) and ferromagnetic (d) coupling respectively. H_{mls} - center of the minor loop.

Replikacja domen w warstwie Si(100)/Ti(4nm)/Au(10nm)/Co(0.6nm)/Au/Co(0.6nm)

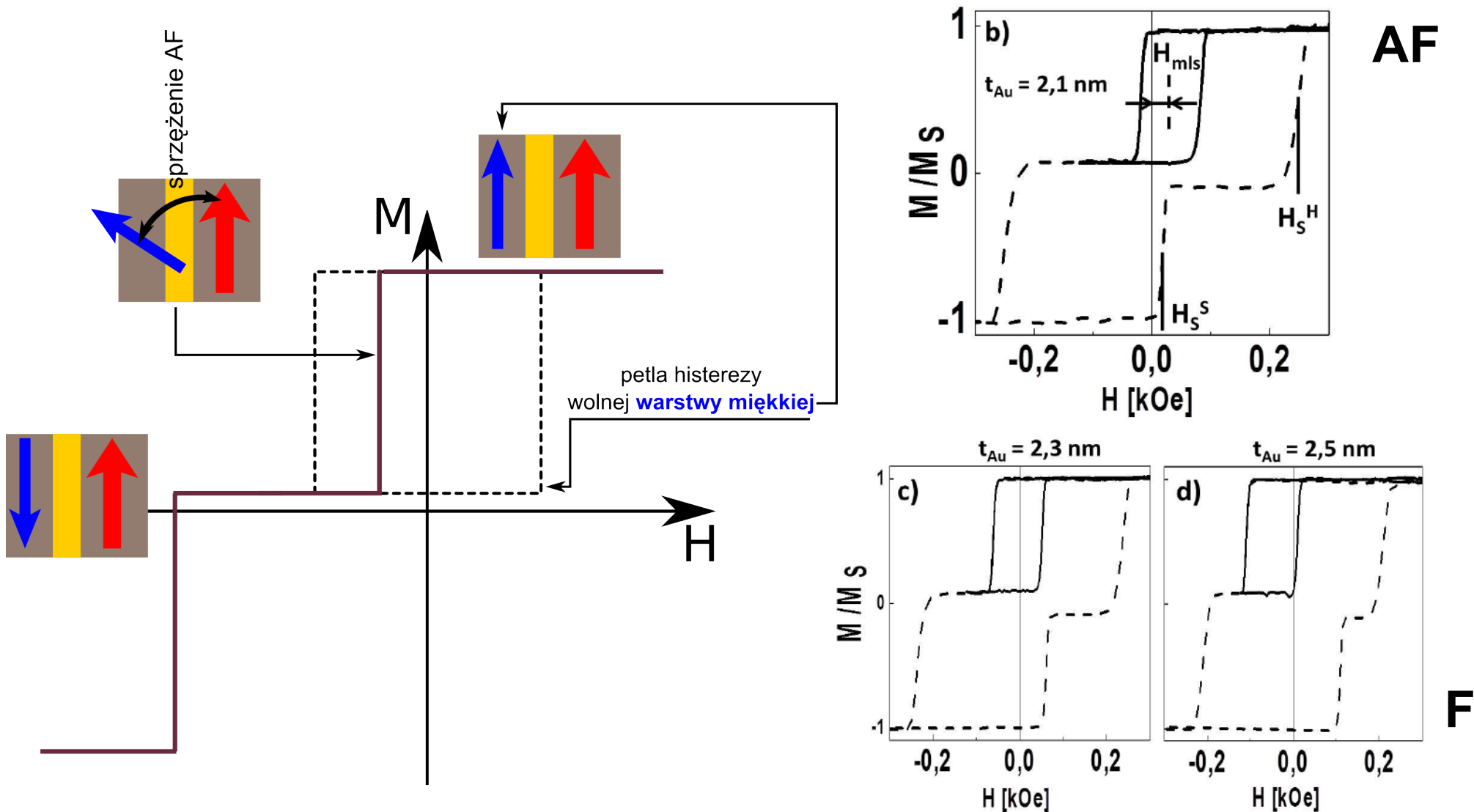


Fig. 1. (a) Switching fields H_S^S and H_S^H of magnetically hard (Co^H) and soft (Co^S) layers versus thickness of Au spacer (t_{Au}) measured for Co^S -0.6nm/Au-wedge 1.7-3nm/ Co^H -0.6nm/Au-2nm layered film. (b-d) Representative major (dashed line) and minor (solid line) hysteresis loops, corresponding to antiferromagnetic (b), zero (c) and ferromagnetic (d) coupling respectively. H_{mls} - center of the minor loop.

Replikacja domen w warstwie Si(100)/Ti(4nm)/Au(10nm)/Co(0.6nm)/Au/Co(0.6nm)

Pola nasycające warstwy twardej i miękkiej w funkcji grubości przekładki Au – wpływ zmiany znaku oddziaływania:

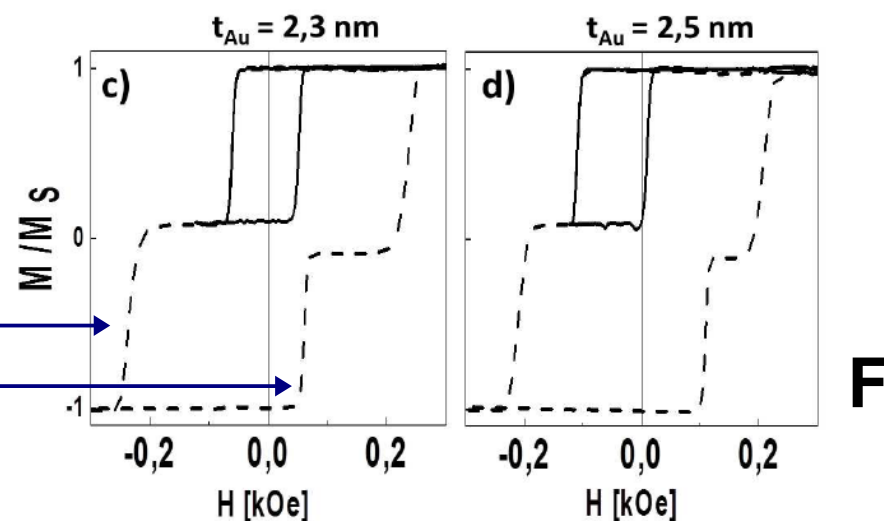
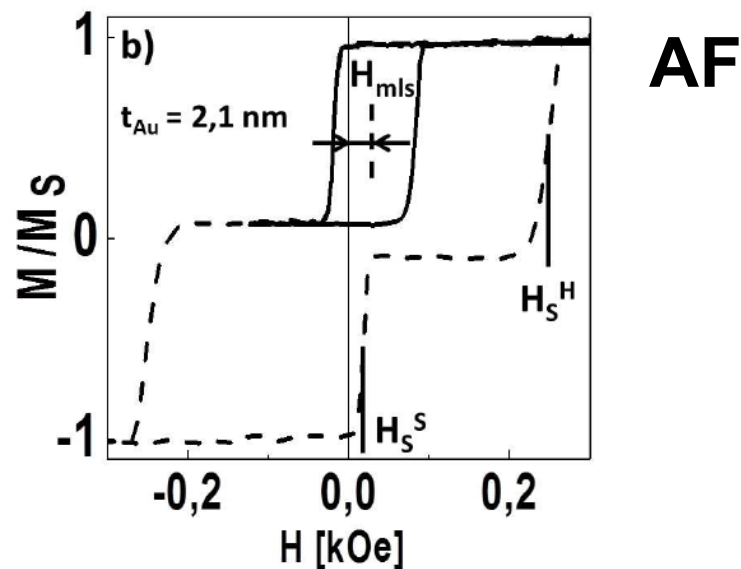
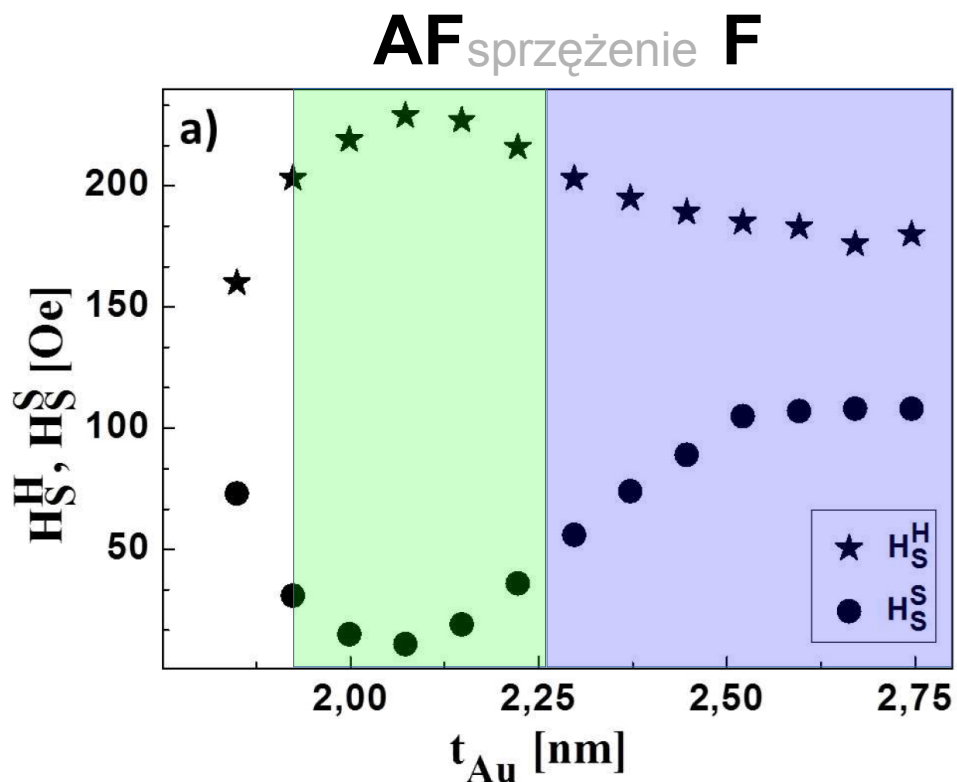


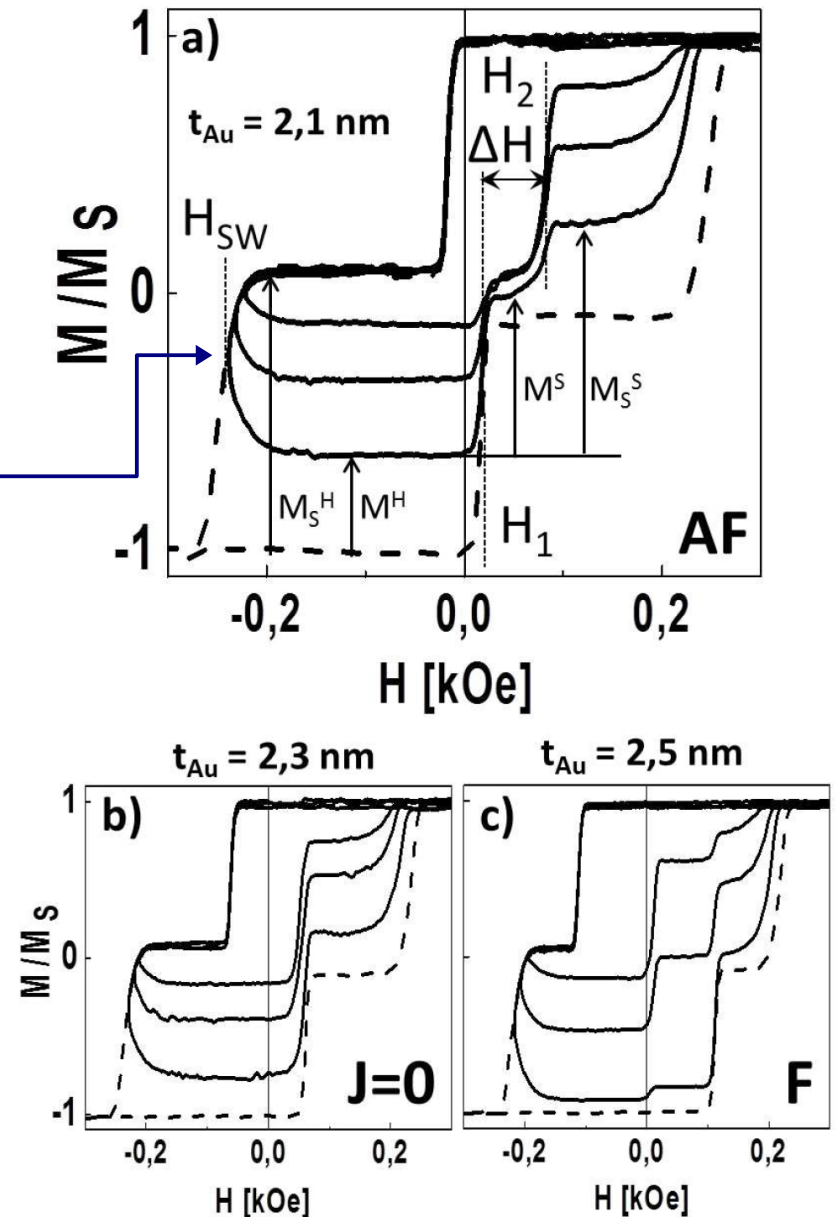
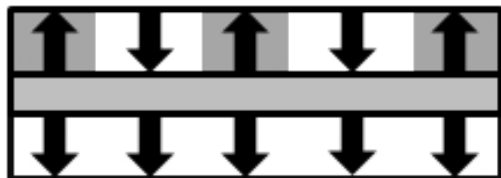
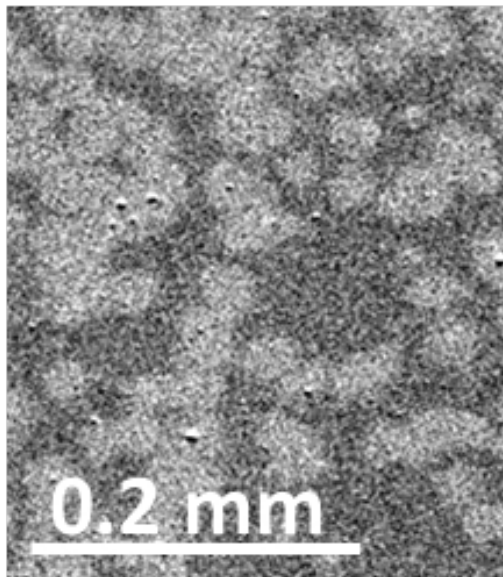
Fig. 1. (a) Switching fields H_S^S and H_S^H of magnetically hard (Co^H) and soft (Co^S) layers versus thickness of Au spacer (t_{Au}) measured for Co^S -0.6nm/Au-wedge 1.7-3nm/ Co^H -0.6nm/Au-2nm layered film. (b-d) Representative major (dashed line) and minor (solid line) hysteresis loops, corresponding to antiferromagnetic (b), zero (c) and ferromagnetic (d) coupling respectively. H_{mls} - center of the minor loop.

Replikacja domen w warstwie Si(100)/Ti(4nm)/Au(10nm)/Co(0.6nm)/Au/Co(0.6nm)

Przemagnesowanie warstwy miękkiej w stanie **niecałkowitego przemagnesowania** warstwy twardej

- w ujemny polu $H^{Hsw} \approx -H^H_s$, mniejszym od pola nasycającego warstwy twardej, kierunek zmian pola zostaje zmieniony
- warstwa twarda przemagnesowana jest tylko częściowo, warstwa miękka w całości:

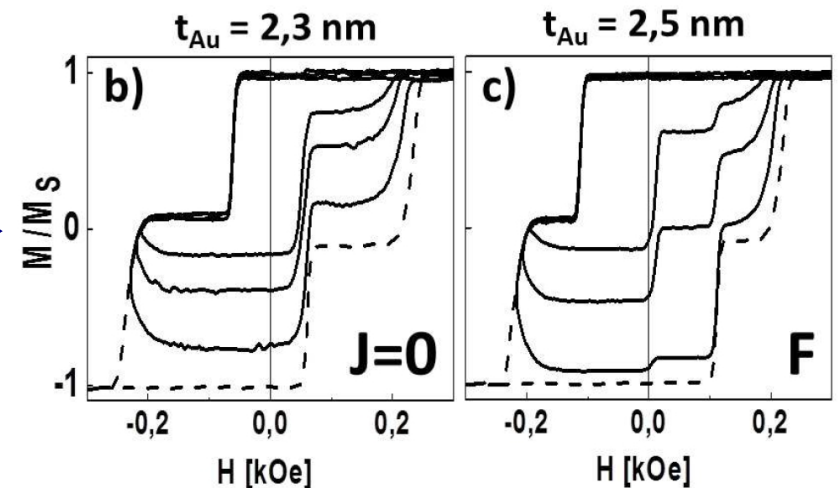
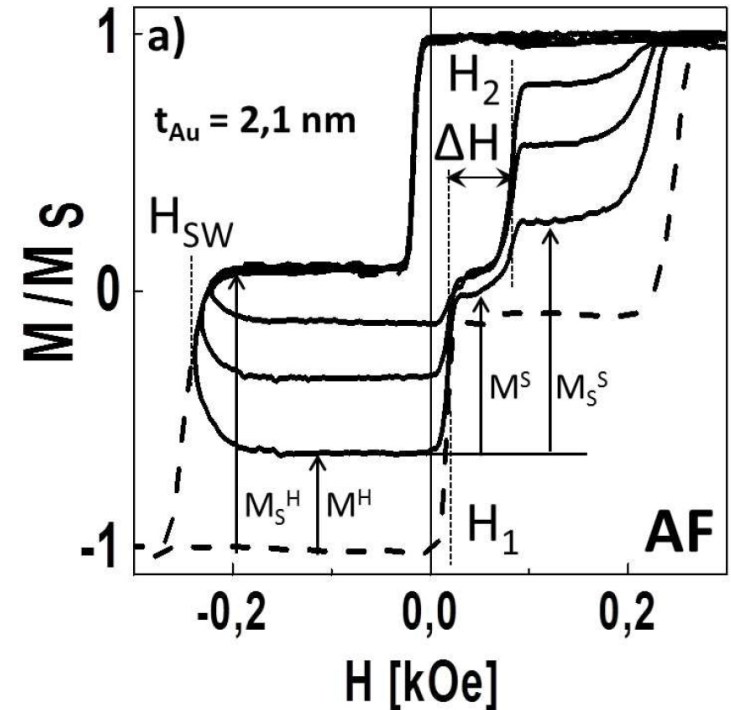
a) -16.7 kA/m



Replikacja domen w warstwie Si(100)/Ti(4nm)/Au(10nm)/Co(0.6nm)/Au/Co(0.6nm)

Przemagnesowanie warstwy miękkiej w stanie **niecałkowitego przemagnesowania** warstwy twardej

- w ujemny polu $H^{Hsw} \approx -H^H_s$, mniejszym od pola nasycającego warstwy twardej, kierunek zmian pola zostaje zmieniony
- warstwa twarda przemagnesowana jest tylko częściowo, warstwa miękka w całości
- w zależności od znaku sprzężenia przemagnesowanie warstwy miękkiej następuje w różny sposób
- W sytuacji braku sprzężenia warstwa miękka przemagnesowuje się w swoim wewnętrznym polu koercji



Replikacja domen w warstwie Si(100)/Ti(4nm)/Au(10nm)/Co(0.6nm)/Au/Co(0.6nm)

Przemagnesowanie warstwy miękkiej w stanie **niecałkowitego przemagnesowania** warstwy twardej

- Liniowość względnego namagnesowania warstwy miękkiej (M^S/M_S^S) w funkcji względnego namagnesowania warstwy twardej wskazuje na kopiowanie struktury domenowej
- Znak zależności $M^S/M_S^S(M^H/M_H^S)$ wskazuje na rodzaj oddziaływania (F lub AF)

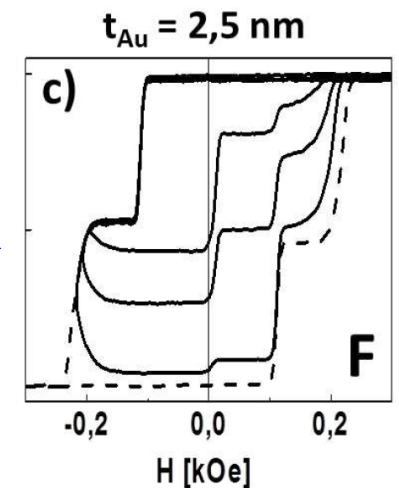
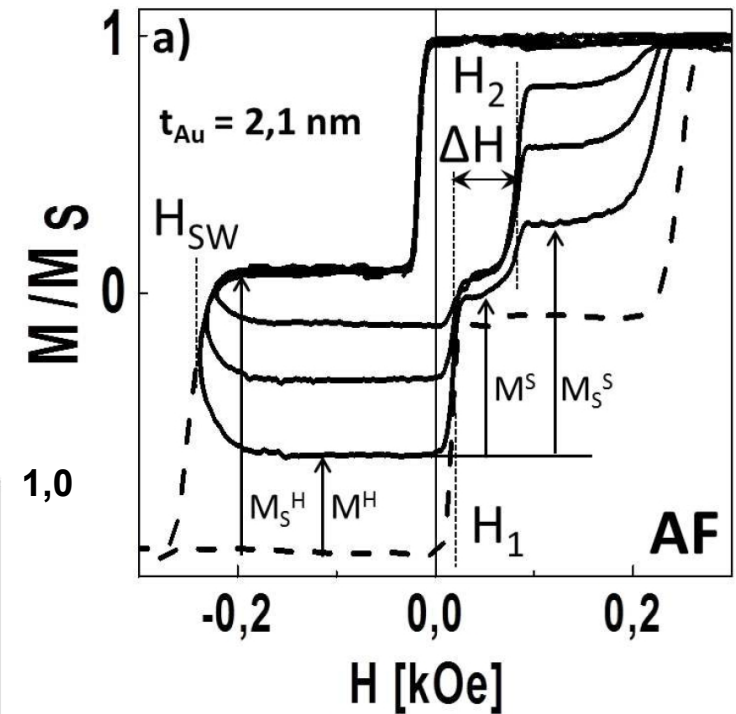
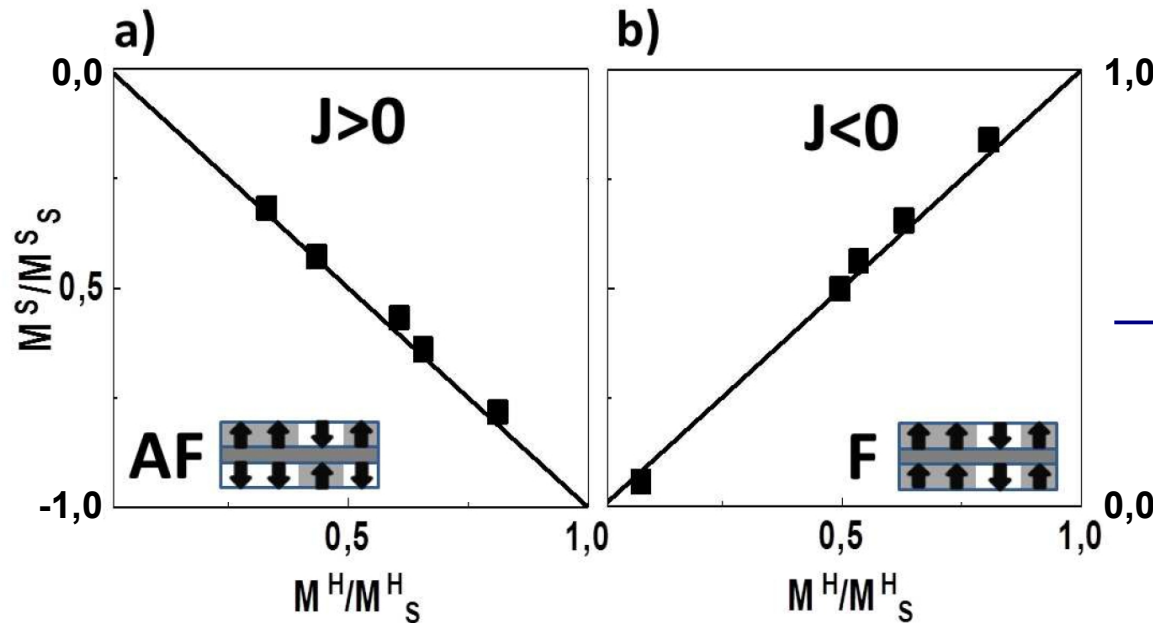
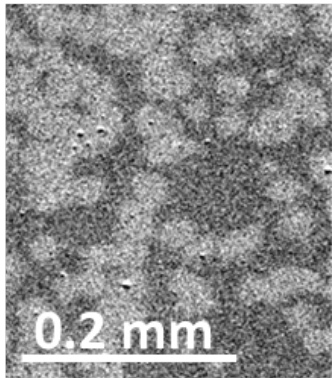


Fig. 3. Variation of the net magnetization of the soft layer as a function of the net magnetization of the hard layer for antiferromagnetic (a) and ferromagnetic (b) coupling.

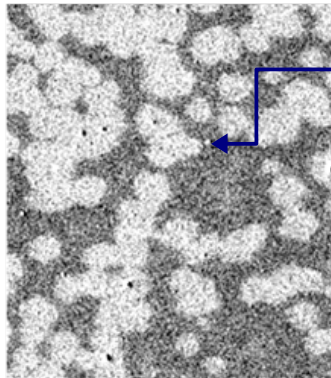
Replikacja domen w warstwie Si(100)/Ti(4nm)/Au(10nm)/Co(0.6nm)/Au/Co(0.6nm)

Przemagnesowanie warstwy miękkiej w stanie **niecałkowitego przemagnesowania** warstwy twardej

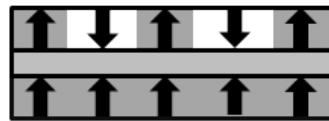
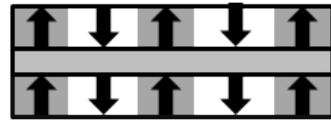
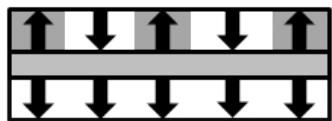
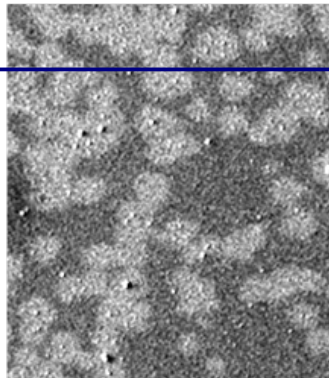
a) -16.7 kA/m



b) 2.8 kA/m

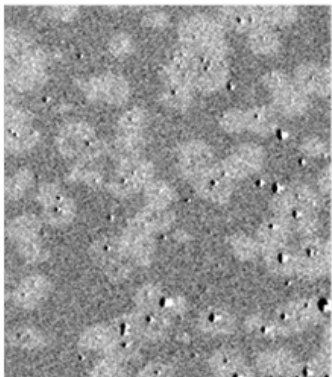


c) 10.0 kA/m

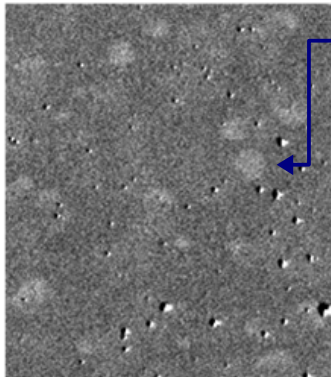


Co^H
Co^S

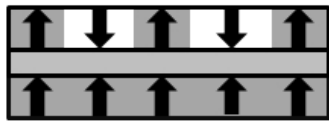
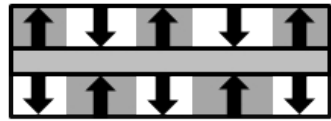
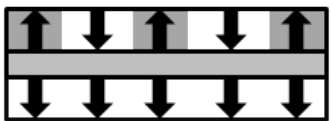
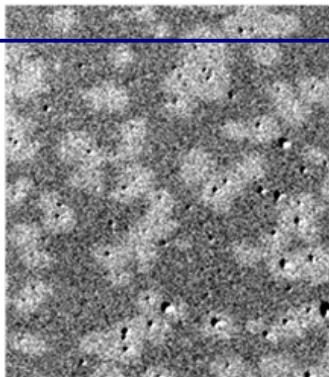
d) -19.1 kA/m



e) 3.2 kA/m



f) 8.0 kA/m



Co^H
Co^S

duże namagnesowanie wypadkowe
– duże skręcenie kerrowskie

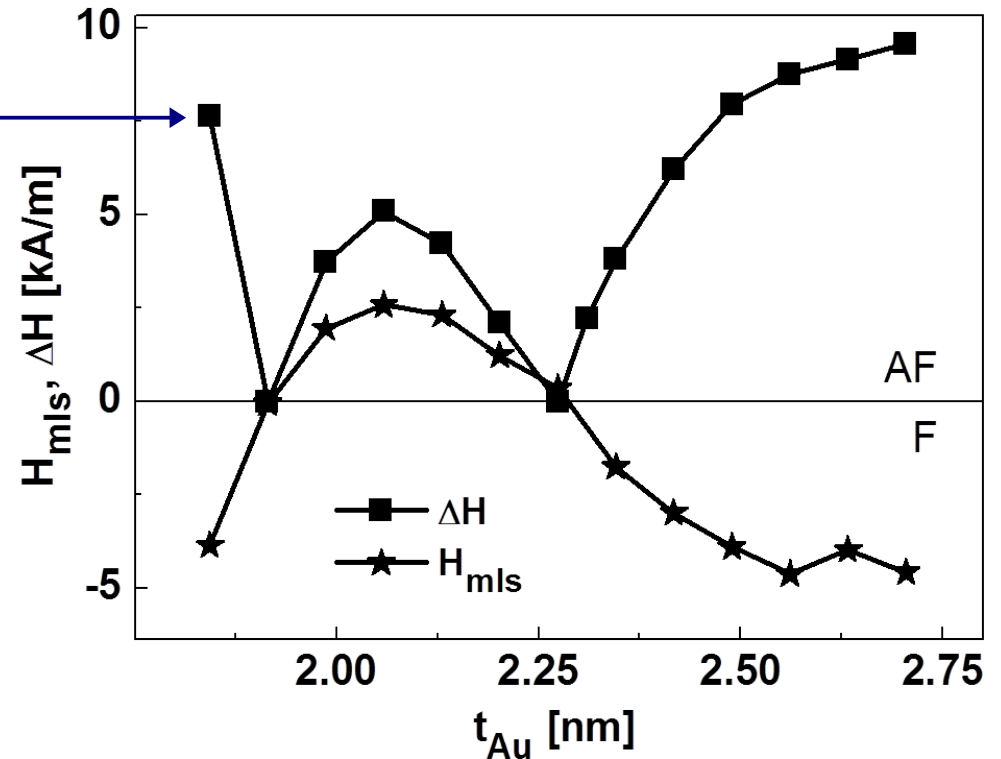
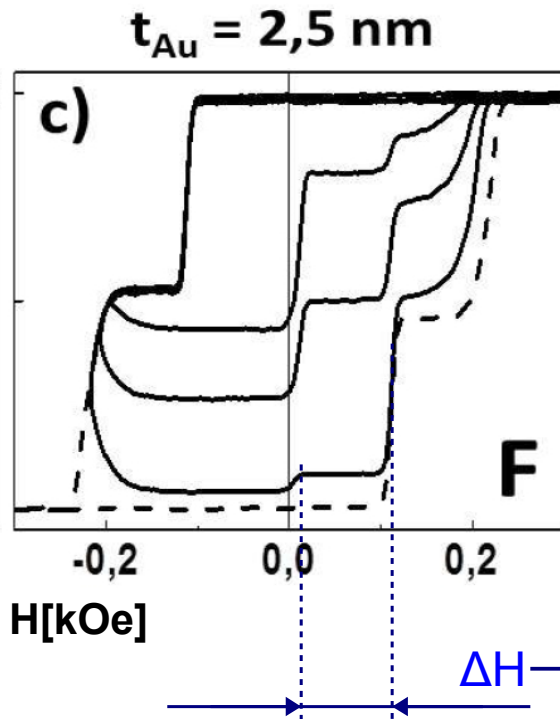
sprężenie
ferromagnetyczne
 $t_{Au} = 2.1 \text{ nm}$

wypadkowe namagnesowanie bliskie
zera – minimalne skręcenie kerrowskie

sprężenie
antyferromagnetyczne
 $t_{Au} = 2.5 \text{ nm}$

Replikacja domen w warstwie Si(100)/Ti(4nm)/Au(10nm)/Co(0.6nm)/Au/Co(0.6nm)

Przemagnesowanie warstwy miękkiej w stanie **niecałkowitego przemagnesowania** warstwy twardej



- wzrostowi energii sprzężenia towarzyszy wzrost zakresu pola magnetycznego ΔH , w którym obserwuje się replikację struktury domenowej

Wnioski:

- na podstawie pełnych i minorowych pętli histerezy wyznaczona została zależność oddziaływania między warstwami Co w funkcji grubości niemagnetycznej przekładki Au
- w stanie niecałkowitego przemagnesowania warstwy twardej zaobserwowano kopiowanie jej struktury domenowej do warstwy miękkiej
- wzrostowi energii sprzężenia towarzyszy wzrost zakresu pola magnetycznego ΔH , w którym obserwuje się replikację struktury domenowej