

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

Prace opublikowane (7):

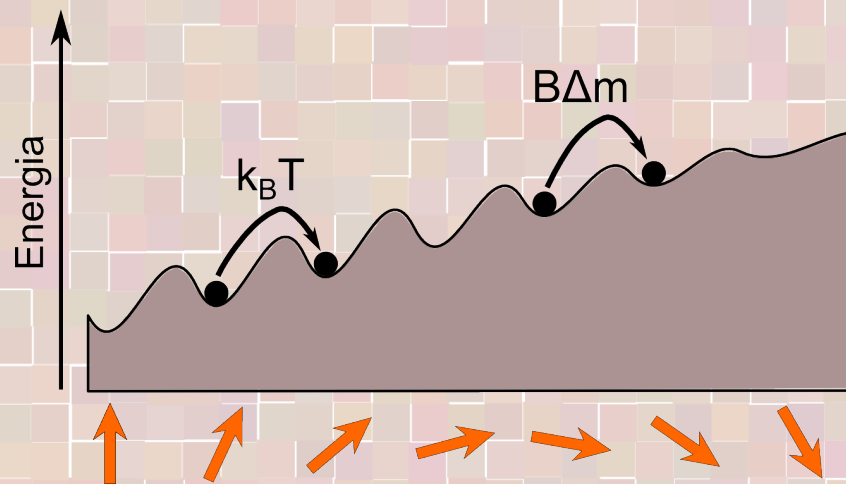
- [1] A. Maziewski, J. Fassbender, J. Kisielewski, M. Kisielewski, Z. Kurant, P. Mazalski, F. Stobiecki, A. Stupakiewicz, I. Sveklo, M. Tekielak, A. Wawro, V. Zablotskii, *Magnetization states and magnetization processes in nanostructures: From a single layer to multilayers*, Physica Status Solidi A **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)
- [6] M. Urbaniak, F. Stobiecki, A. Gaul, A. Ehresmann, *Magnetization reversal of Co/Au multilayer stripes with keV-He⁺ ion bombardment induced coercivity gradient*, J. Phys. D: Appl. Phys. **48**, 335003 (2015)
- [7] M. Matczak, R. Schäfer, M. Urbaniak, B. Szymański, P. Kuświk, A. Jarosz, M. Schmidt, J. Aleksiejew, S. Jurga, F. Stobiecki, *Domain wall generated by graded interlayer coupling in Co/Pt/Co film with perpendicular anisotropy*, Appl. Phys. Lett. **107**, 012404 (2015)

ROK 2015

[6] M. Urbaniak, F. Stobiecki, A. Gaul, A. Ehresmann, *Magnetization reversal of Co/Au multilayer stripes with keV-He⁺ ion bombardment induced coercivity gradient*, J. Phys. D: Appl. Phys. **48**, 335003 (2015)

[7] M. Matczak, R. Schäfer, M. Urbaniak, B. Szymański, P. Kuświk, A. Jarosz, M. Schmidt, J. Aleksiejew, S. Jurga, F. Stobiecki, *Domain wall generated by graded interlayer coupling in Co/Pt/Co film with perpendicular anisotropy*, Appl. Phys. Lett. **107**, 012404 (2015)

Pełzanie ścian domenowych (wall creeping)



Thermally activated wall creeping is a reversal process occurring in films as well as in bulk material, when a dc field slightly smaller than the wall motion coercive force H_c is applied parallel to the easy direction. When the energy increase related to a small movement of the wall (Barkhausen jump) is comparable with kT , a finite probability exists that this movement will take place without the necessary increase of the applied field. In normal Ni-Fe films with relatively small H_c 's, the magnetostatic coupling along the wall seems to allow only large Barkhausen jumps, so that thermally activated wall creeping does not occur. However, in films with relatively large H_c 's this kind of creeping is observed.⁵⁻⁹

S. Middelhoek, D. Wild, IBM Journal, styczeń 1967, 93

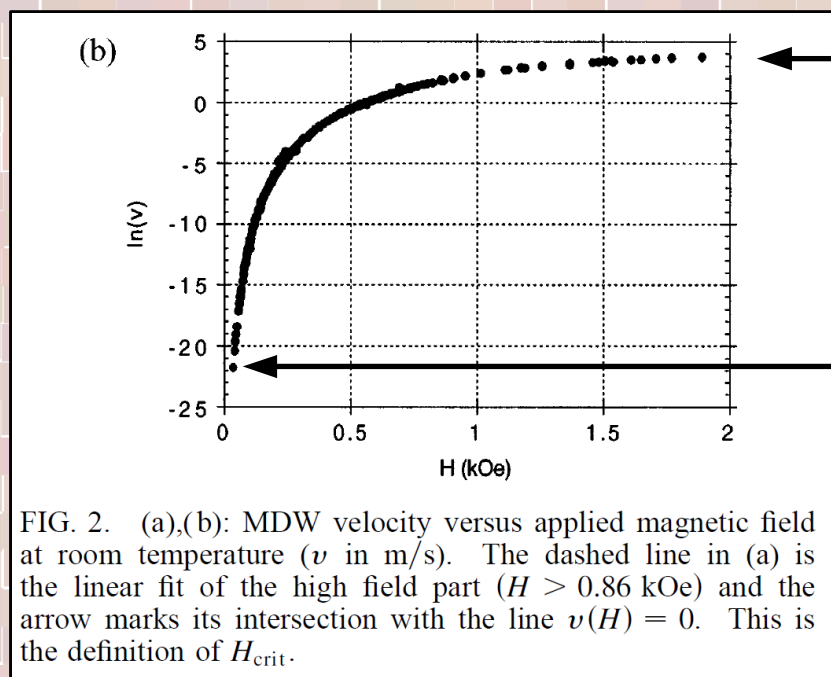


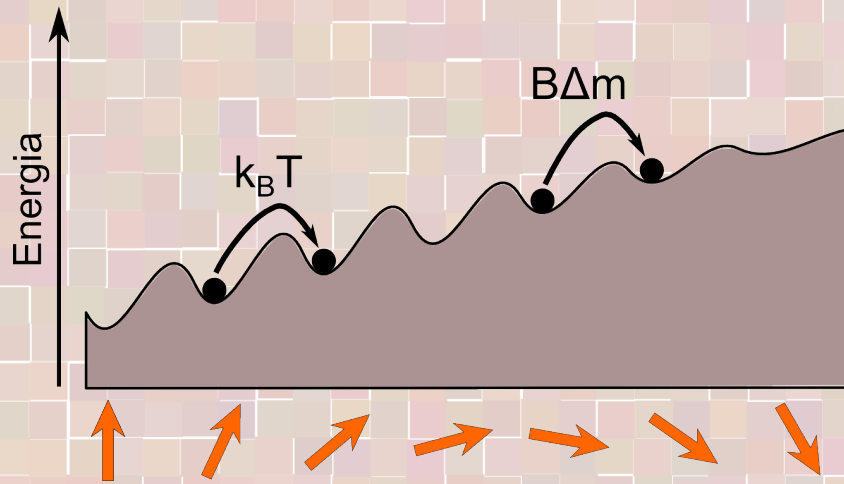
FIG. 2. (a),(b): MDW velocity versus applied magnetic field at room temperature (v in m/s). The dashed line in (a) is the linear fit of the high field part ($H > 0.86$ kOe) and the arrow marks its intersection with the line $v(H) = 0$. This is the definition of H_{crit} .

41 m/s

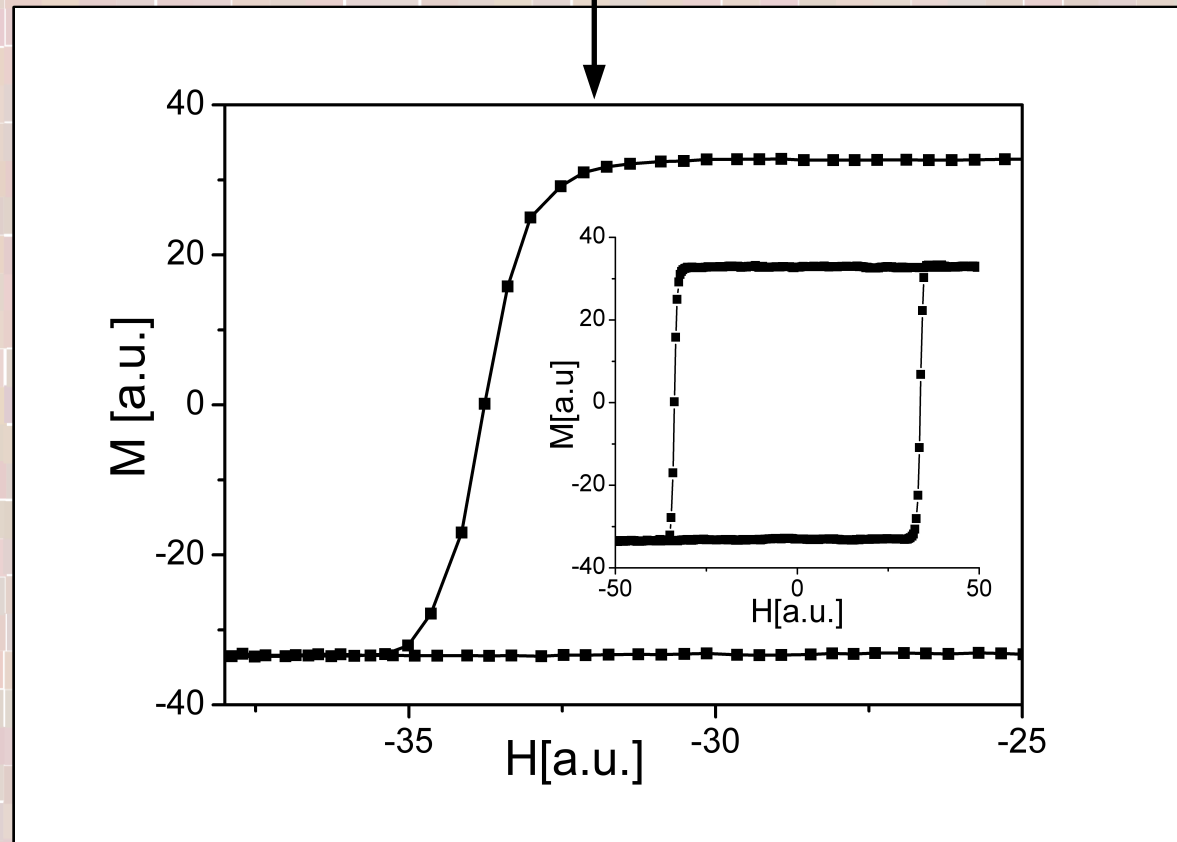
0.35 nm/s

S. Lemerle et al., Phys. Rev. Lett. 80, 849 (1998)

Pełzanie ścian domenowych (wall creeping)

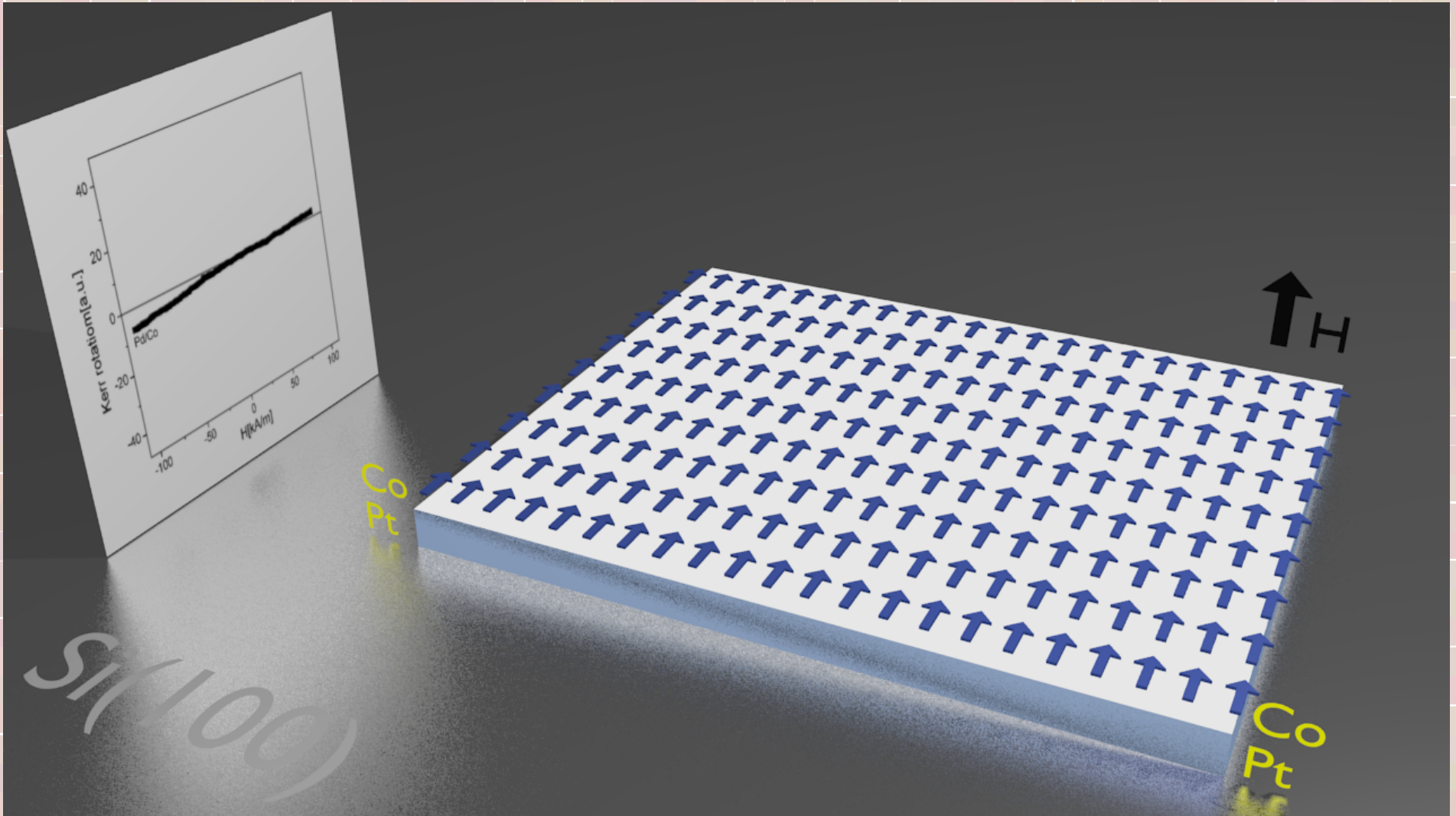


Pole znacznie niższe niż 35 kA/m, pod warunkiem odpowiedniego czasu działania, jest wystarczające do całkowitego przemagnesowania układu

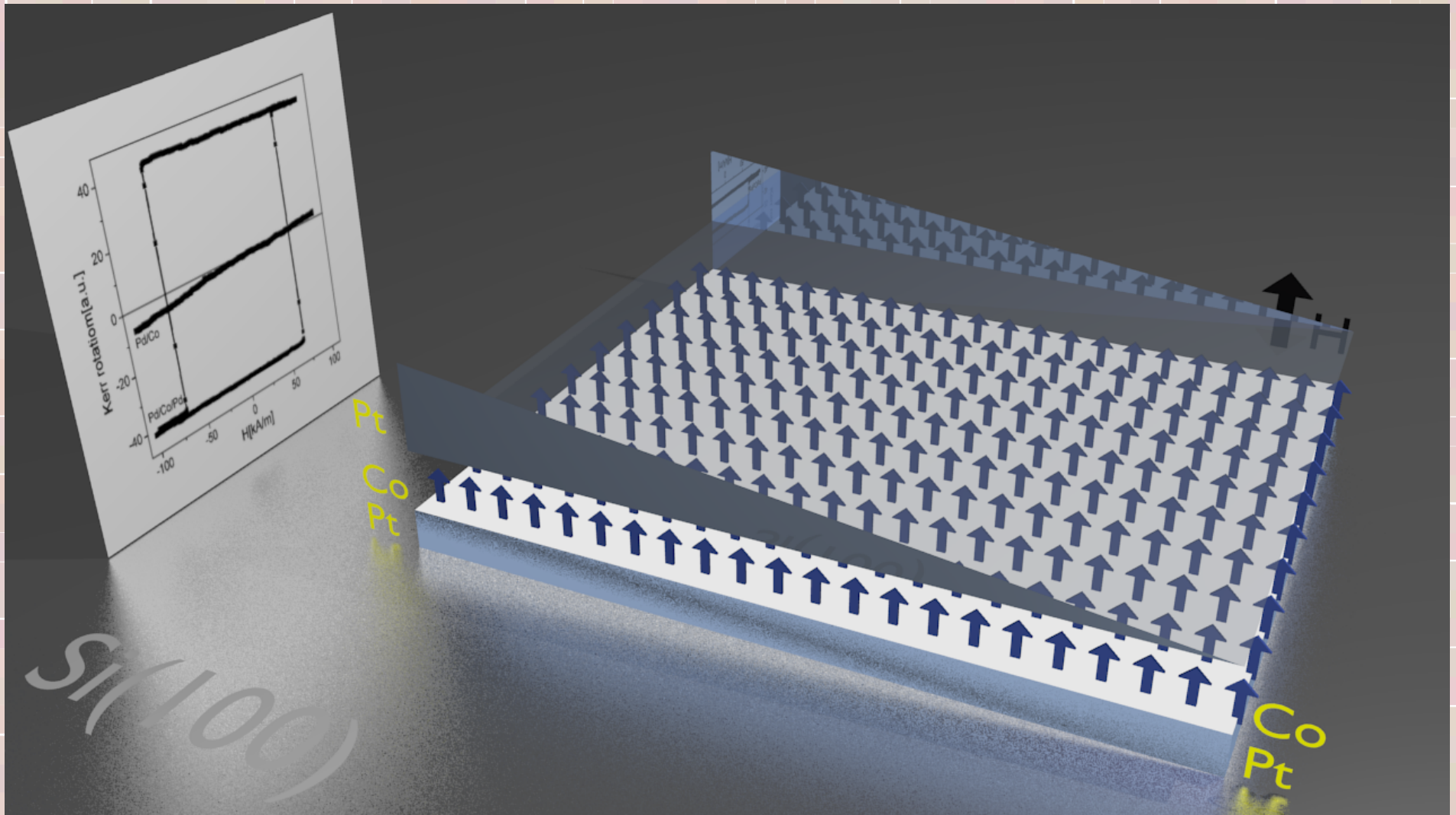


Pt/Co/Pt

M. Matczak, R. Schäfer, M. Urbaniak, B. Szymański, P. Kuświk, A. Jarosz, M. Schmidt, J. Aleksiejew, S. Jurga, F. Stobiecki, *Domain wall generated by graded interlayer coupling in Co/Pt/Co film with perpendicular anisotropy*, Appl. Phys. Lett. **107**, 012404 (2015)

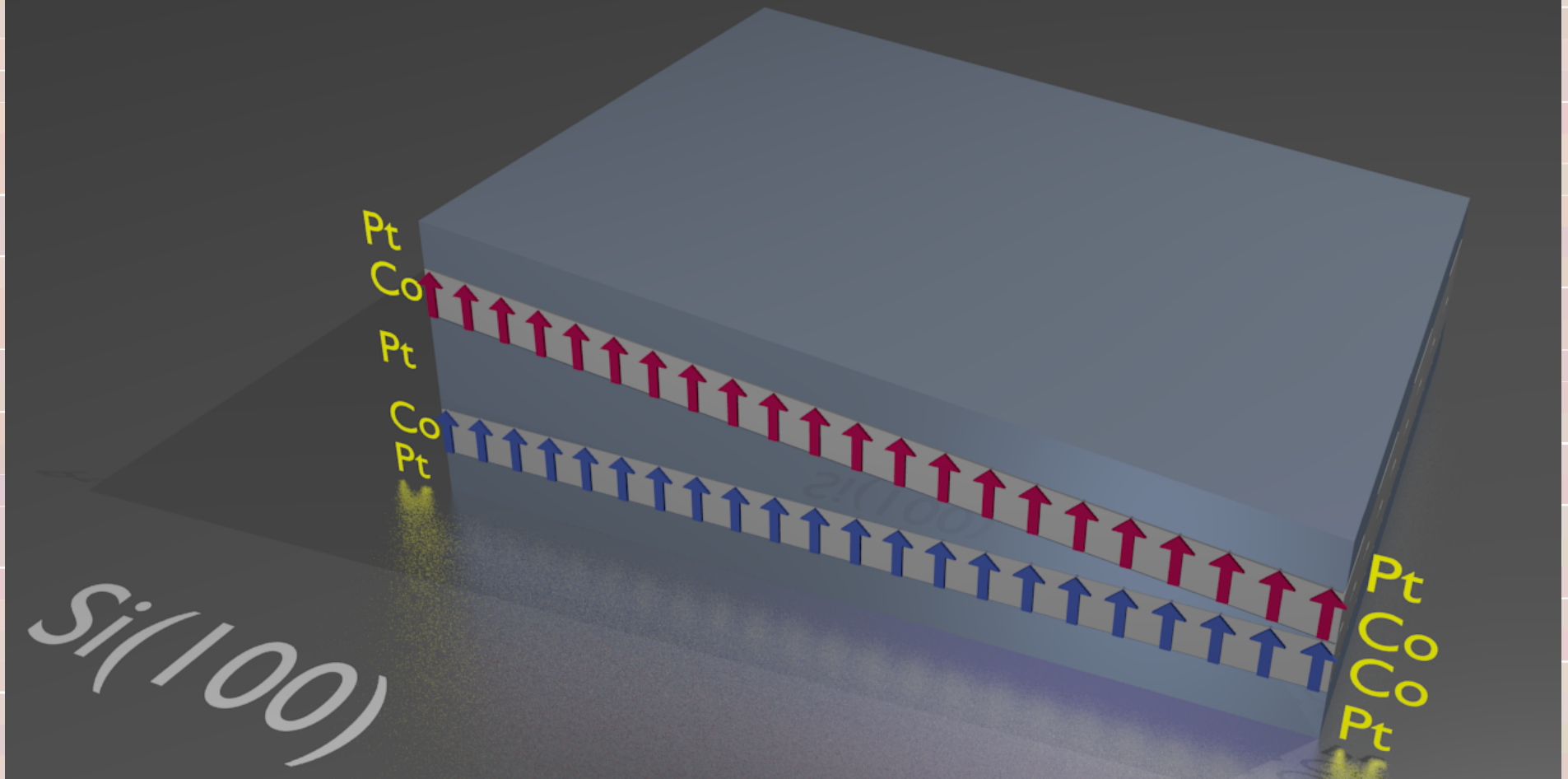


M. Matczak, R. Schäfer, M. Urbaniak, B. Szymański, P. Kuświk, A. Jarosz, M. Schmidt, J. Aleksiejew, S. Jurga, F. Stobiecki, *Domain wall generated by graded interlayer coupling in Co/Pt/Co film with perpendicular anisotropy*, Appl. Phys. Lett. **107**, 012404 (2015)

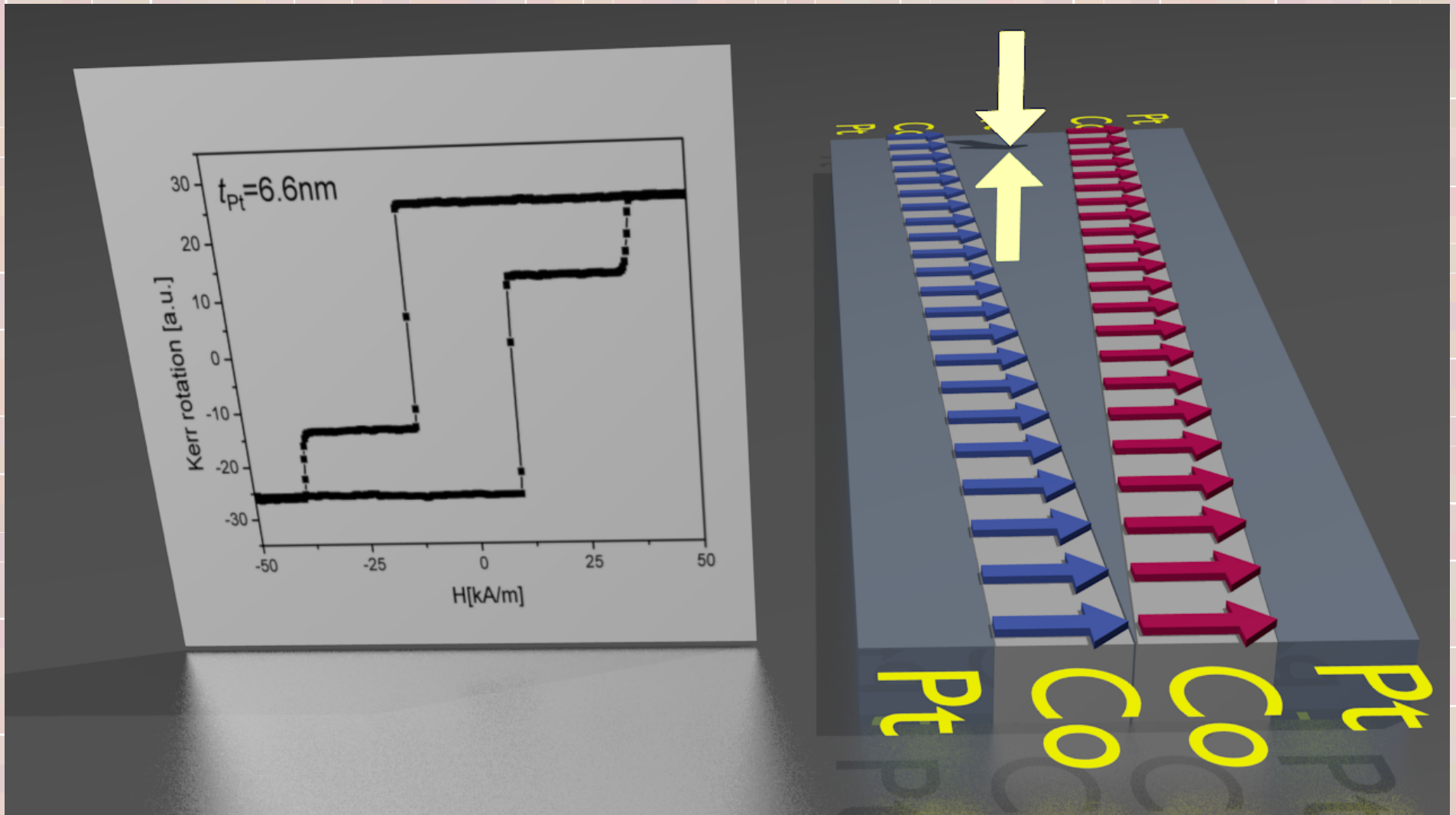


M. Matczak, R. Schäfer, M. Urbaniak, B. Szymański, P. Kuświk, A. Jarosz, M. Schmidt, J. Aleksiejew, S. Jurga, F. Stobiecki, *Domain wall generated by graded interlayer coupling in Co/Pt/Co film with perpendicular anisotropy*, Appl. Phys. Lett. **107**, 012404 (2015)

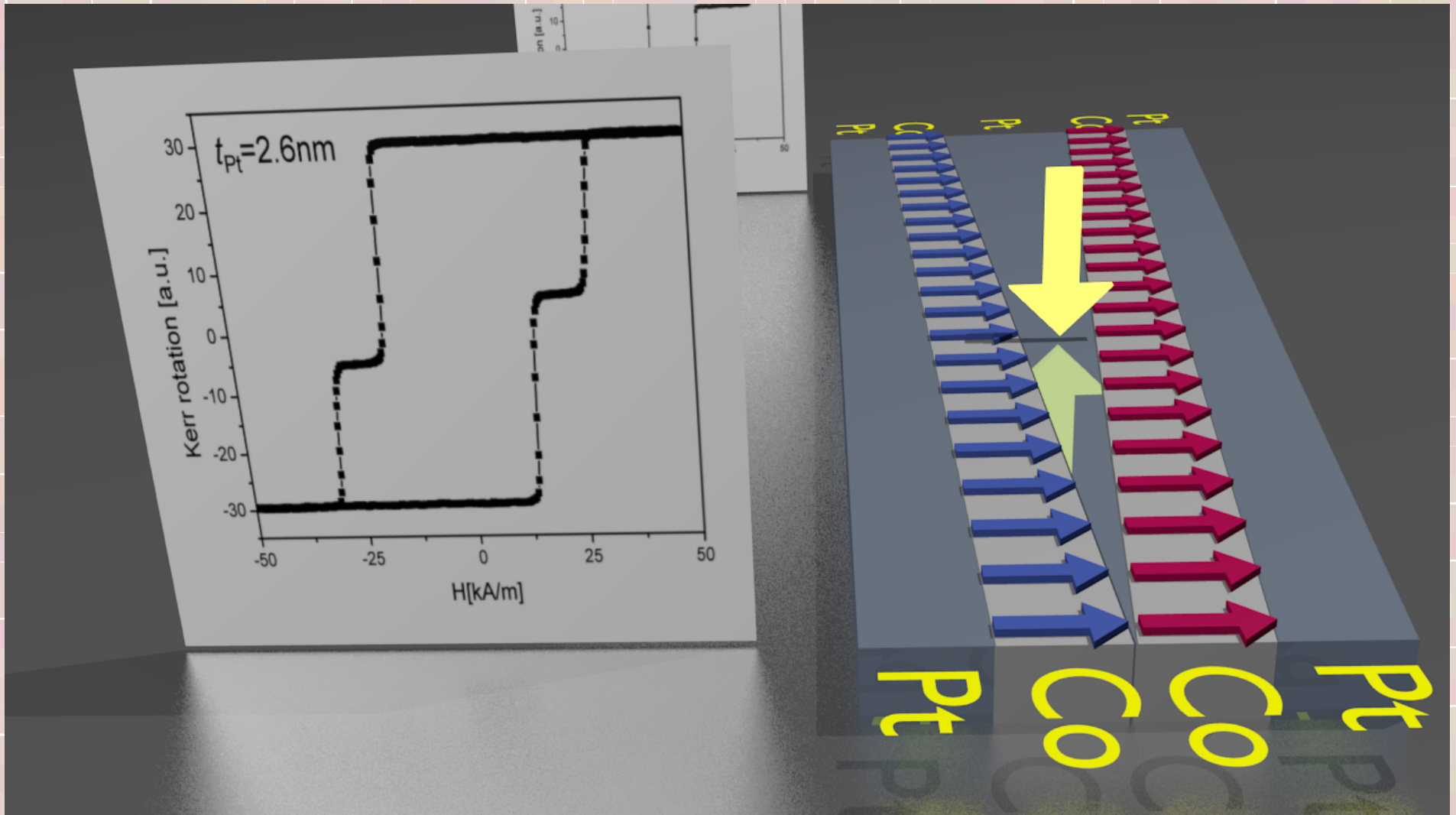
Si(100)/Pt(15 nm)/Co(0.8 nm)/Pt klin (0-7 nm)/Co(0.6 nm)/Pt (2 nm)



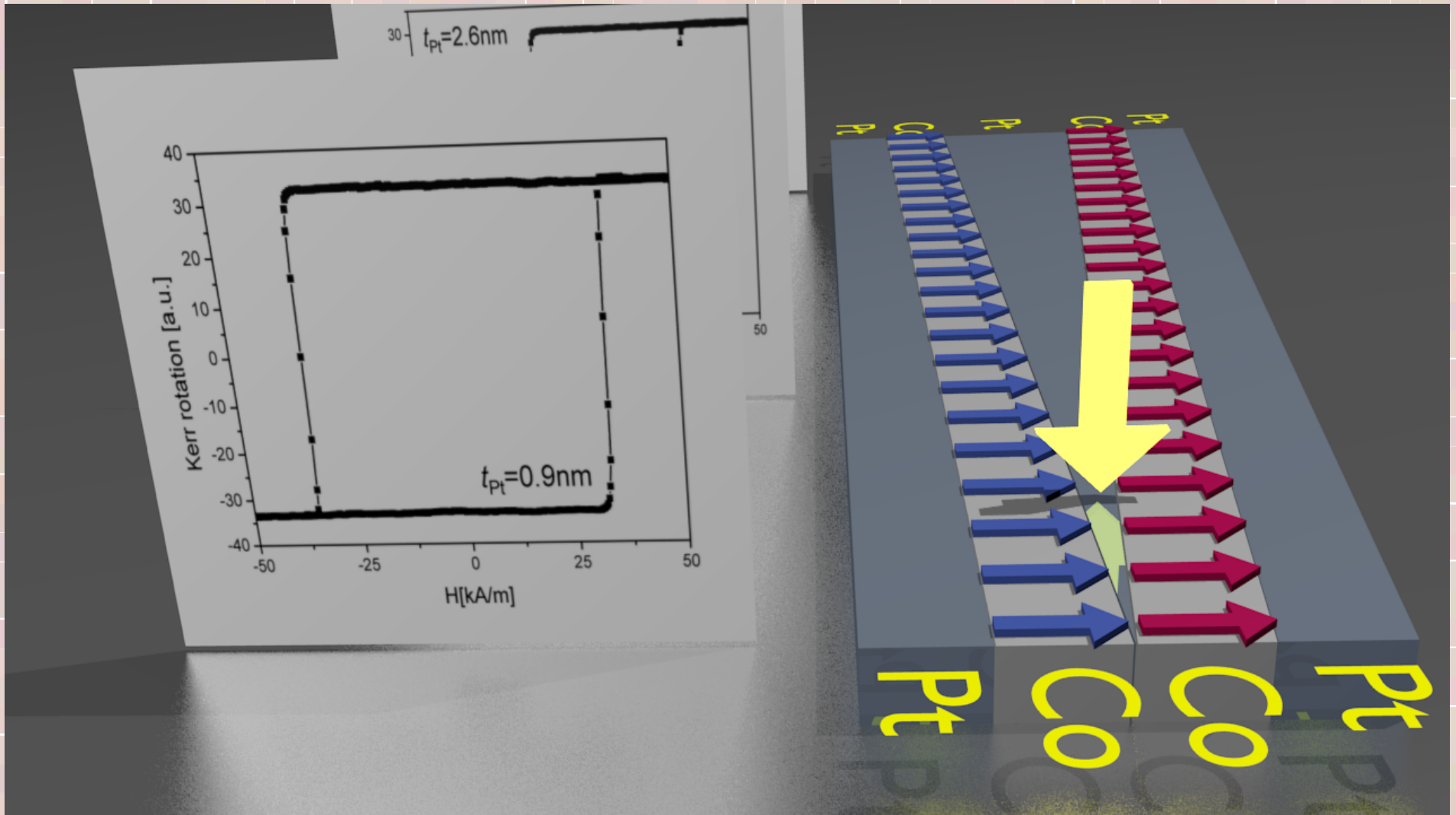
M. Matczak, R. Schäfer, M. Urbaniak, B. Szymański, P. Kuświk, A. Jarosz, M. Schmidt, J. Aleksiejew, S. Jurga, F. Stobiecki, *Domain wall generated by graded interlayer coupling in Co/Pt/Co film with perpendicular anisotropy*, Appl. Phys. Lett. **107**, 012404 (2015)

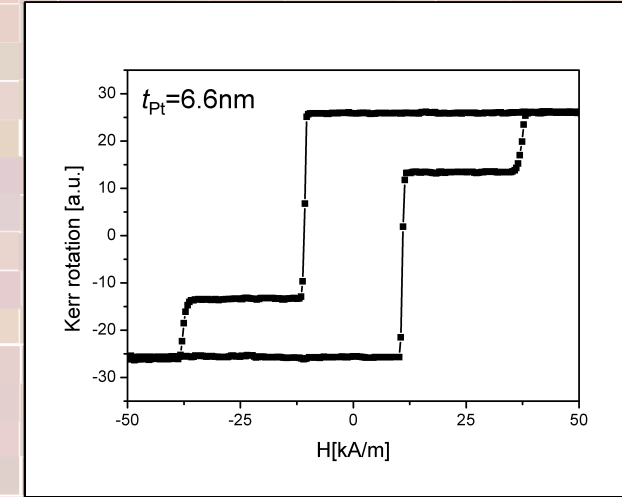
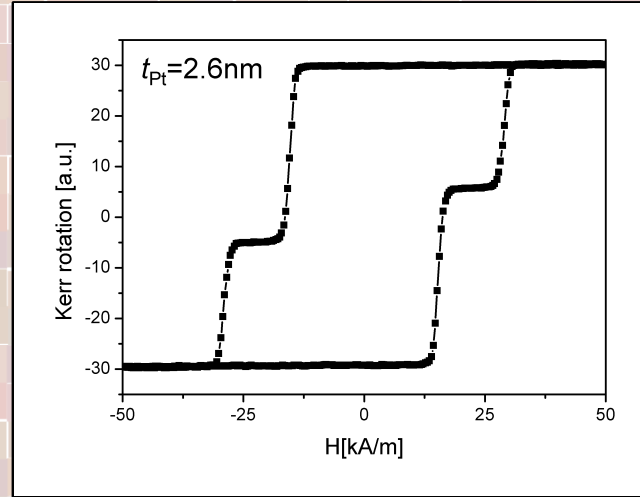
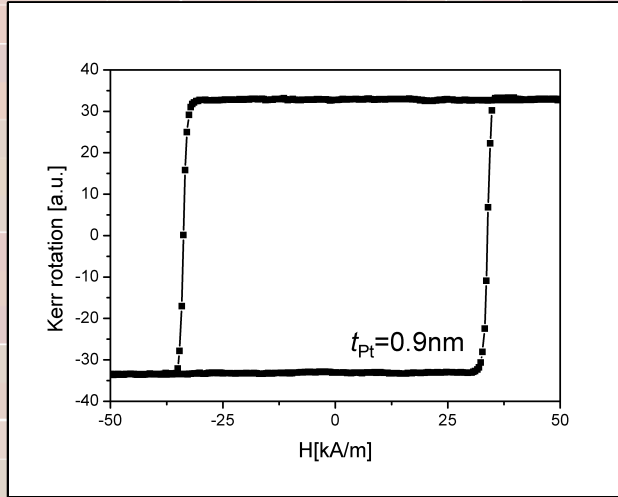


M. Matczak, R. Schäfer, M. Urbaniak, B. Szymański, P. Kuświk, A. Jarosz, M. Schmidt, J. Aleksiejew, S. Jurga, F. Stobiecki, *Domain wall generated by graded interlayer coupling in Co/Pt/Co film with perpendicular anisotropy*, Appl. Phys. Lett. **107**, 012404 (2015)

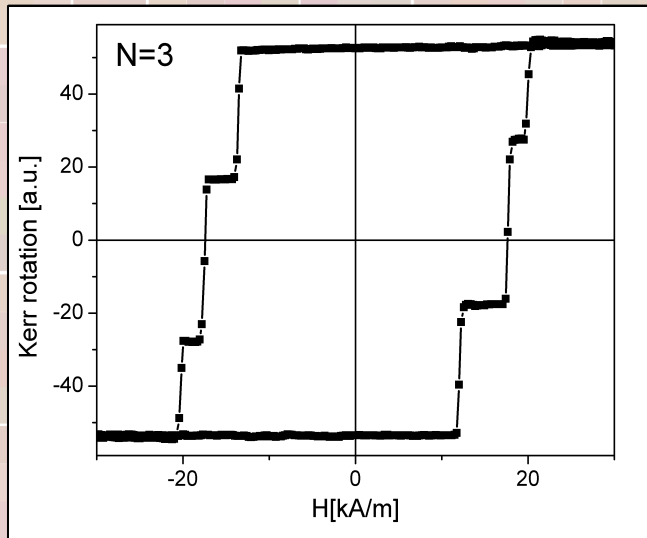


M. Matczak, R. Schäfer, M. Urbaniak, B. Szymański, P. Kuświk, A. Jarosz, M. Schmidt, J. Aleksiejew, S. Jurga, F. Stobiecki, *Domain wall generated by graded interlayer coupling in Co/Pt/Co film with perpendicular anisotropy*, Appl. Phys. Lett. **107**, 012404 (2015)



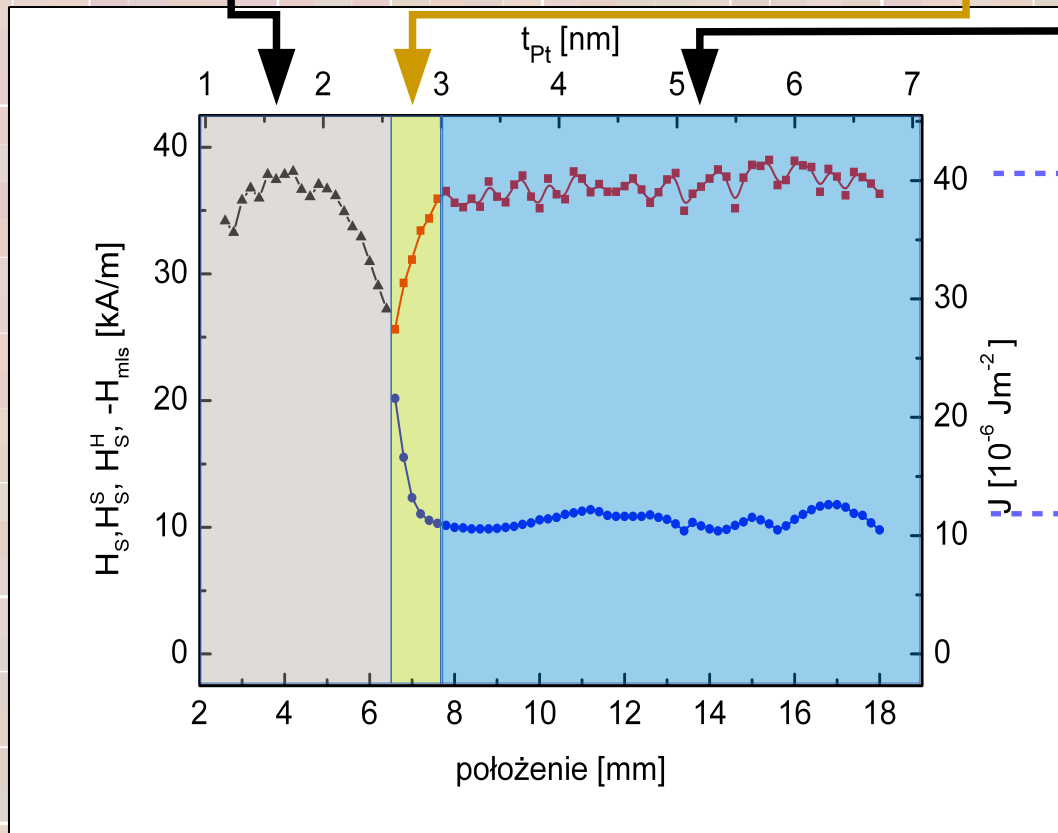
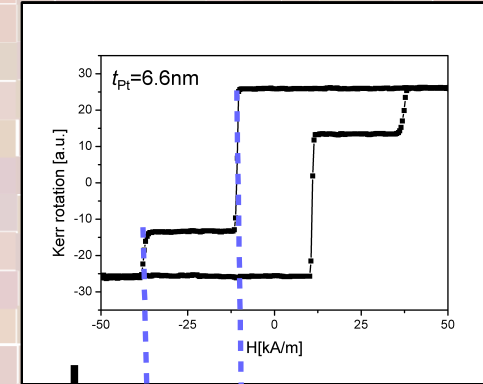
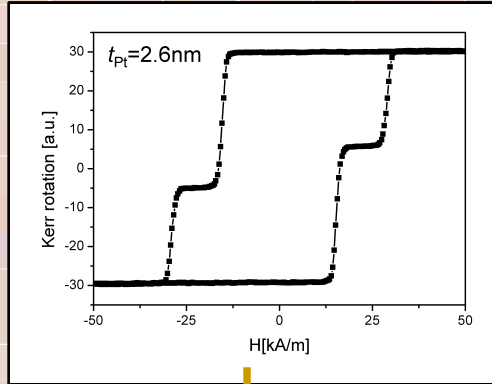
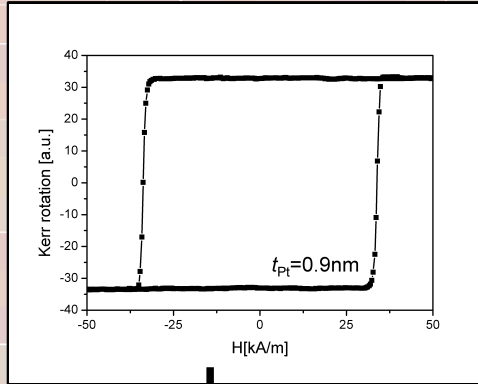


Si(100)/Pt(15 nm)/Co(0.8 nm)/Pt klin (0-7 nm)/Co(0.6 nm)/Pt(2 nm), **N=2**



- W warstwach wielokrotnych pola przełączania poszczególnych warstw magnetycznych są zwykle różne, ze względu na różne warunki wzrostu, inne zachowanie warstw zewnętrznych itp.
- Równoczesne przełączanie świadczy o obecności sprzężenia międzywarstwowego

Si(100)/Ti(15 nm)/Au(40 nm)/[Au(2nm)/Co(0.5 nm)]₃ /Au(2 nm), **N=3**

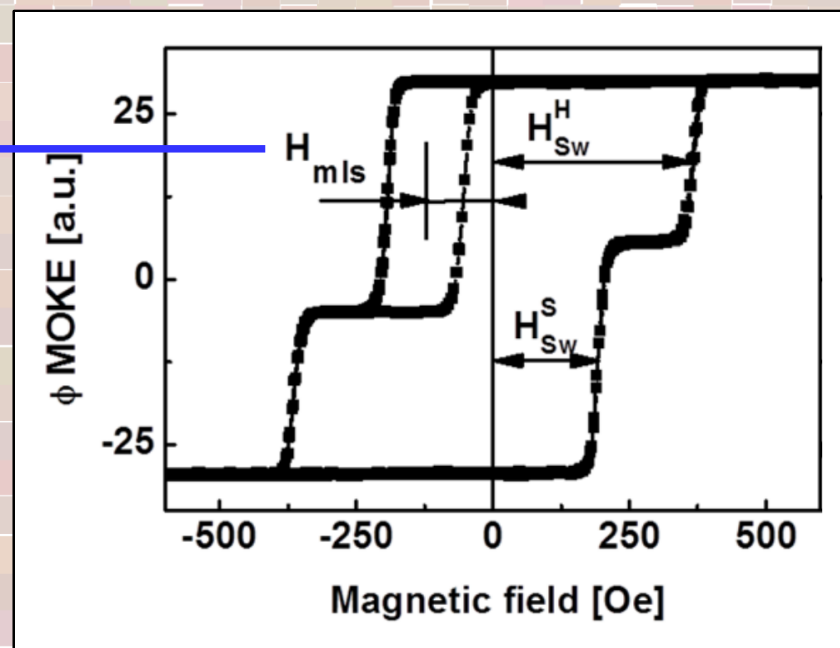
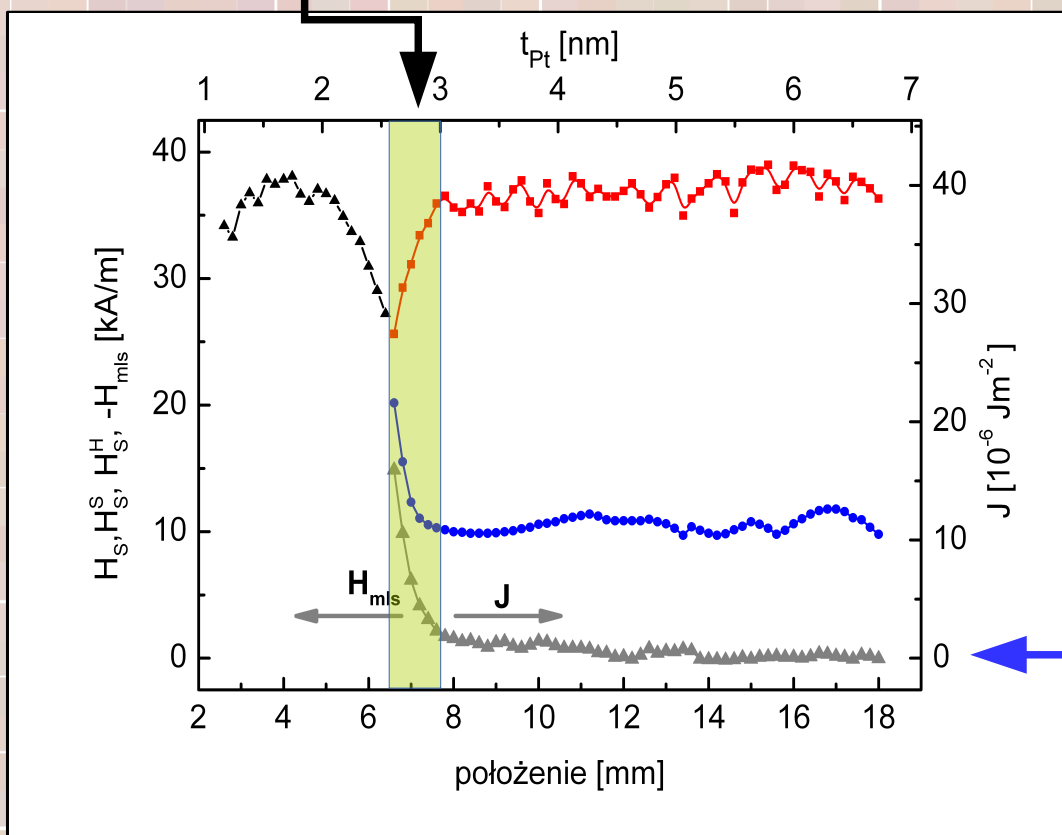


H_S^H H_S^S

Si(100)/Pt(15 nm)/Co(0.8 nm)/Pt klin (0-7 nm)/Co(0.6 nm)/Pt(2 nm), N=2

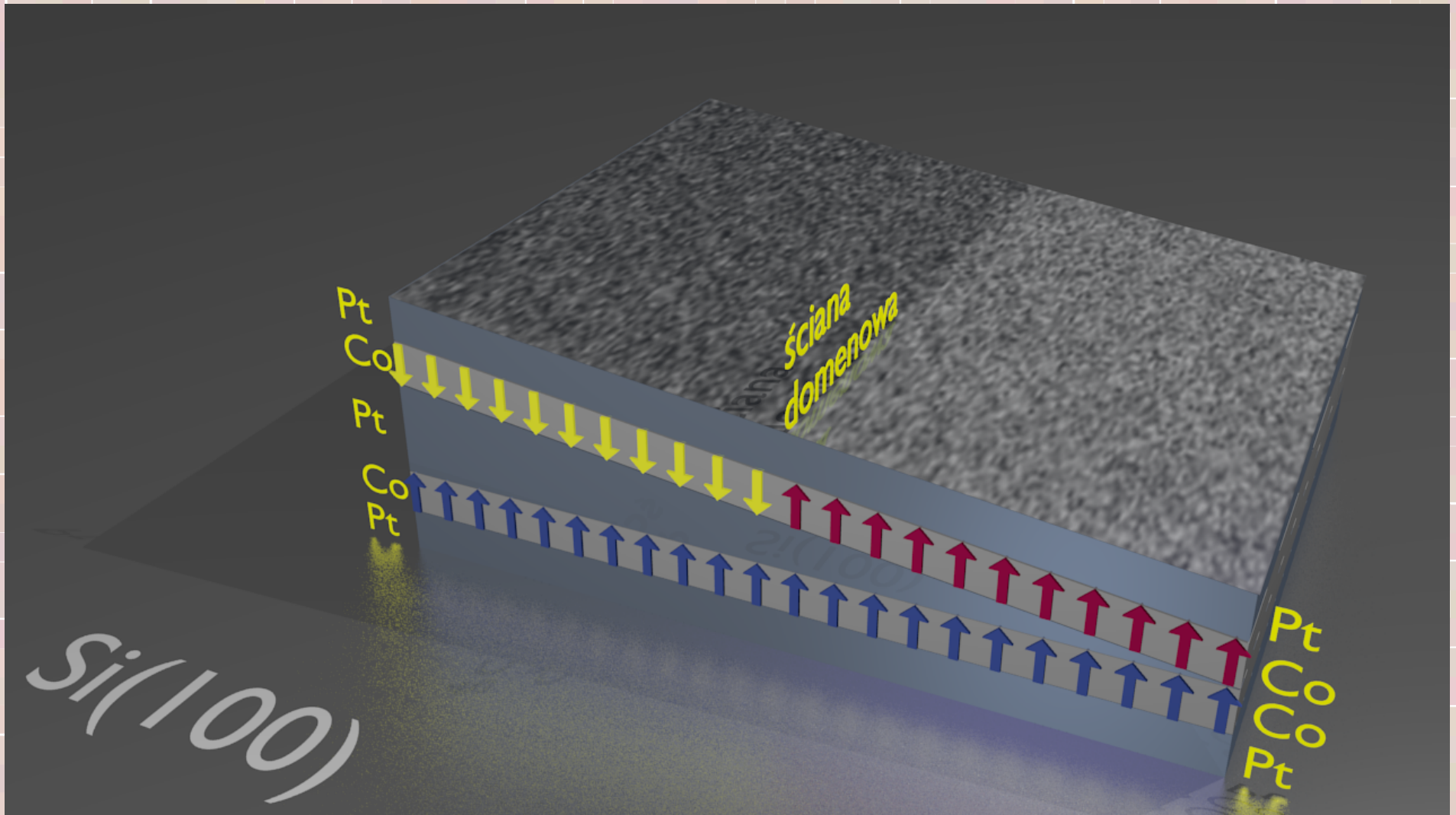
W omawianej pracy badany był głównie obszar charakteryzujący się dużym gradientem oddziaływania między warstwami Co.

- Przesunięcie pętli minorowej H_{mls} warstwy magnetycznie miękkiej, w stanie gdy moment magnetyczny warstwy twardej skierowany jest „do góry”, jest miarą oddziaływania między warstwami kobaltu.



Si(100)/Pt(15 nm)/Co(0.8 nm)/Pt klin (0-7 nm)/Co(0.6 nm)/Pt(2 nm), $N=2$

Struktura domenowa obserwowana za pomocą magnetycznej mikroskopii Kerra (konfiguracja prostopadła) – zmiana polaryzacji światła odbitego od powierzchni materiału magnetycznego



Prędkość propagacji ściany domenowej w obszarze z zaniedbywalnym sprzężeniem między warstwami Co opisywane jest wyrażeniem dla propagacji typu „creep”

$$v = v_0 \exp \left[-\frac{P}{H^{1/4}} \right]$$

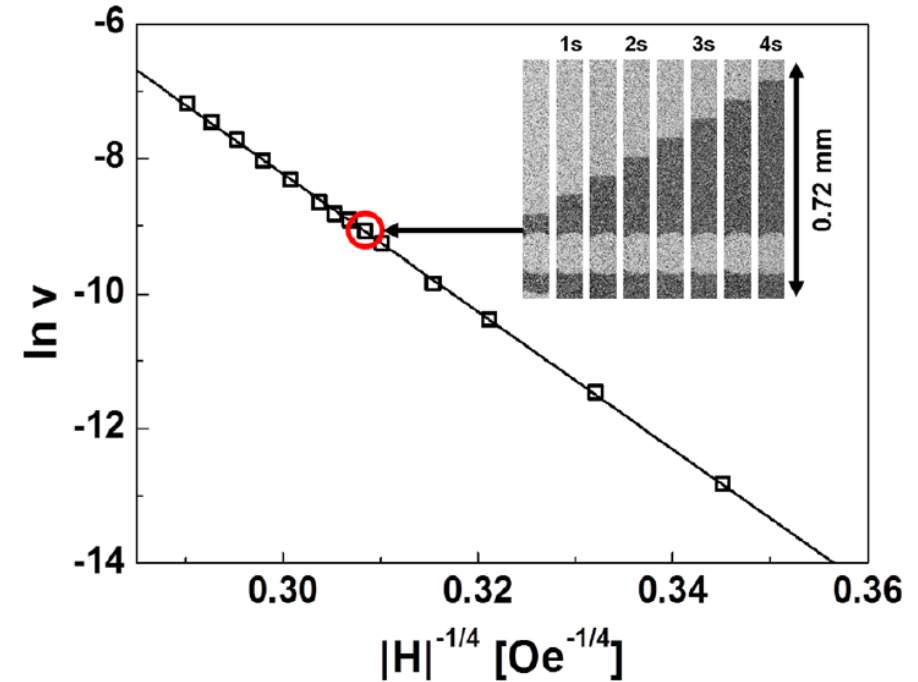
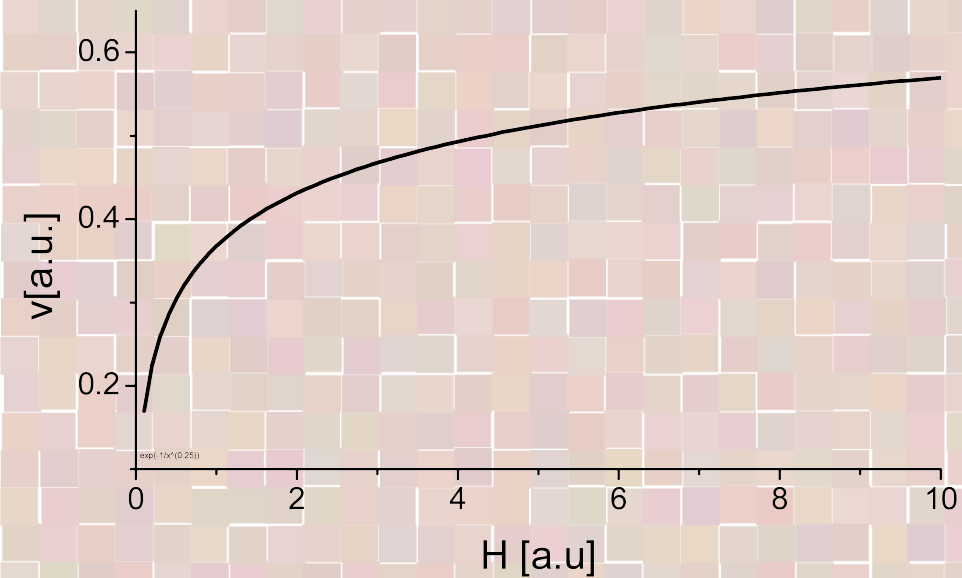
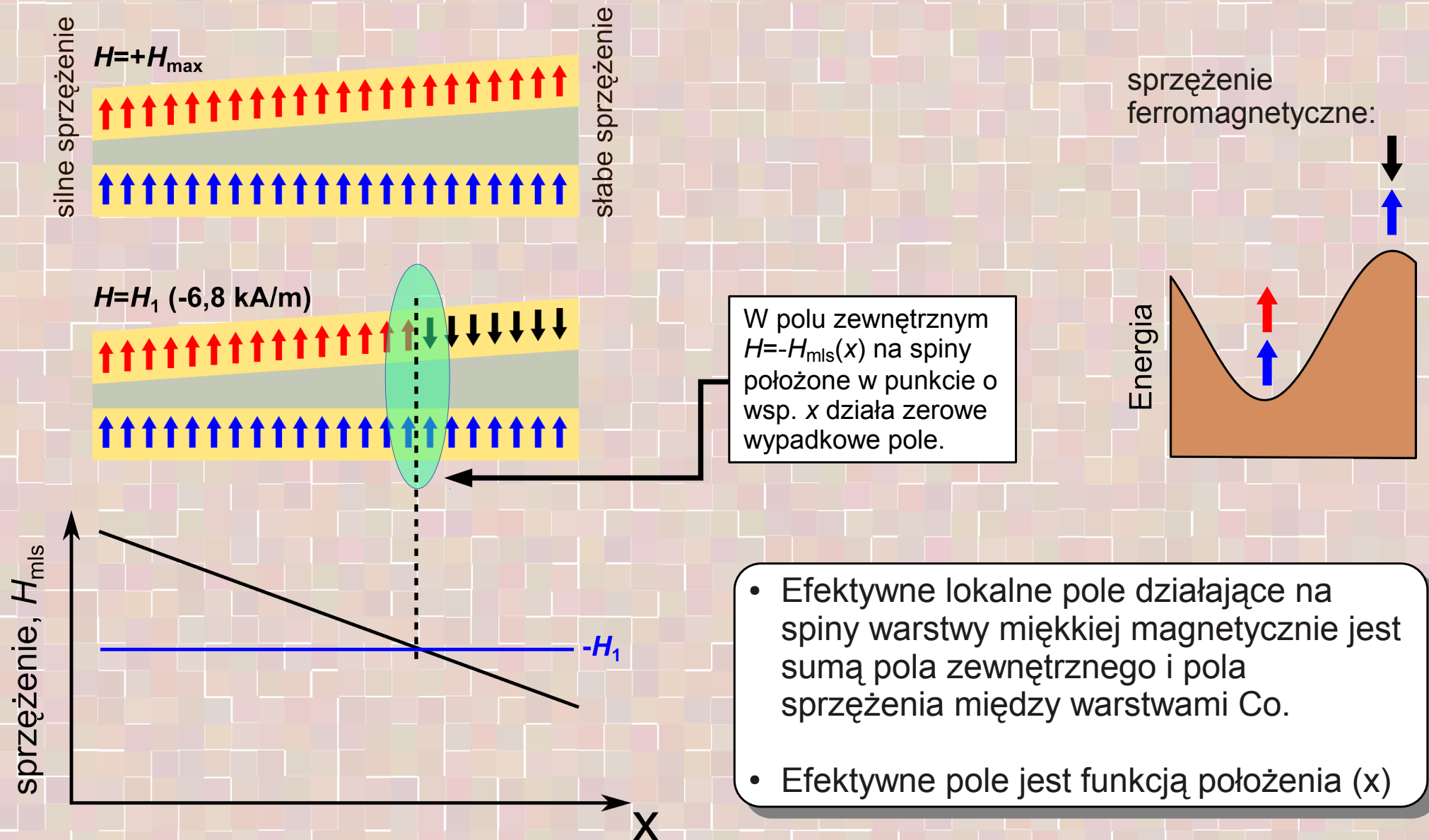
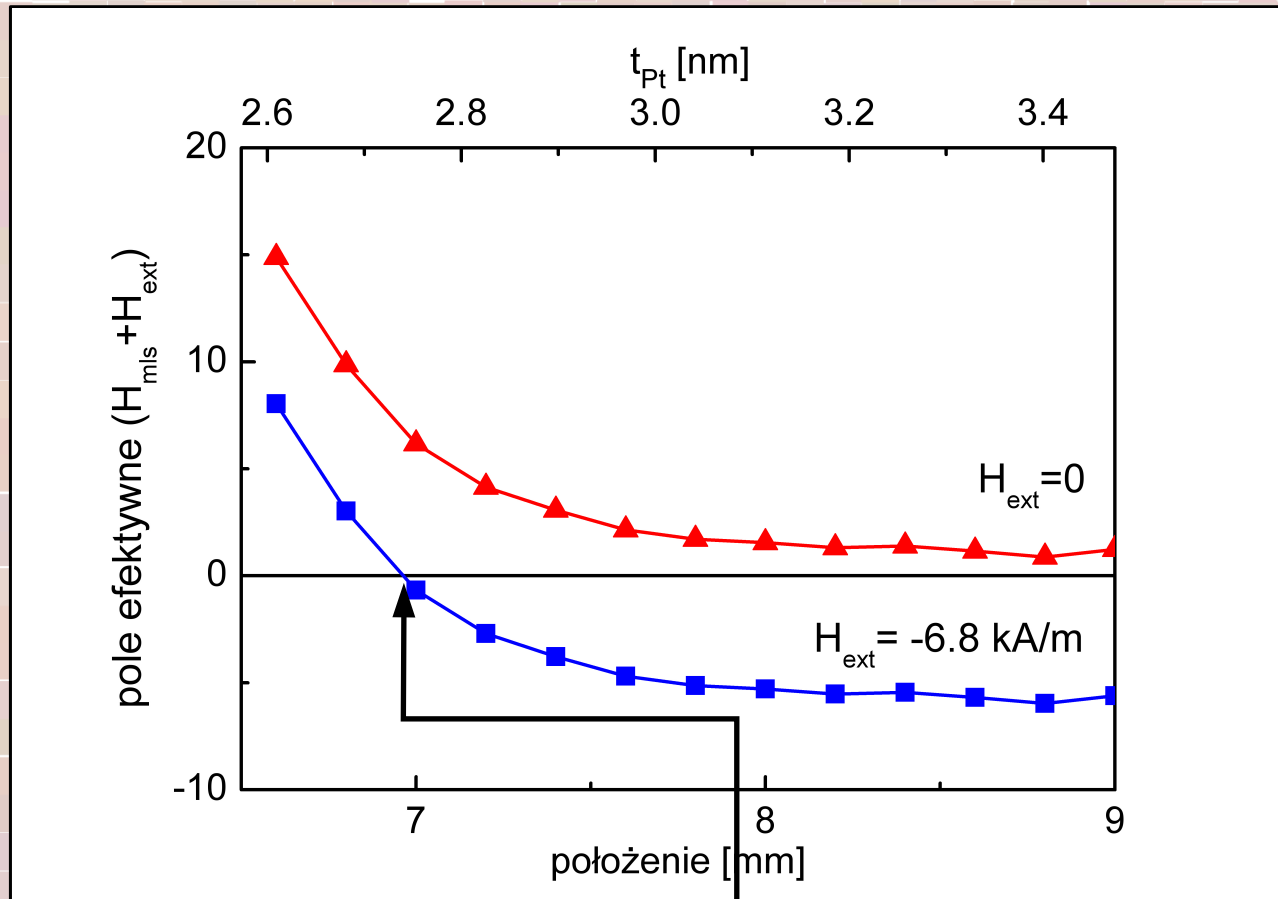


FIG. 3. Natural logarithm of the DW velocity v (expressed in m/s), in the Co^S layer versus $H^{-1/4}$ for a $\text{Co}^H/\text{Pt-wedge}/\text{Co}^S$ layered film determined for a spacer layer thickness $t_{\text{Pt}} = 6.6 \text{ nm}$ ($x = 17 \text{ mm}$), i.e., in the range corresponding to a weak interlayer coupling. The inset shows difference domain images where the upper dark area corresponds to the area reversed by the sum of consecutive field pulses.

Propagacja ściany domenowej w obecności gradientu oddziaływania ferromagnetycznego



Propagacja ściany domenowej w obecności gradientu oddziaływania ferromagnetycznego



Położenie równowagowe
(wypadkowe pole równe zero)
dla $H_{\text{ext}} = -6.8 \text{ kA/m}$

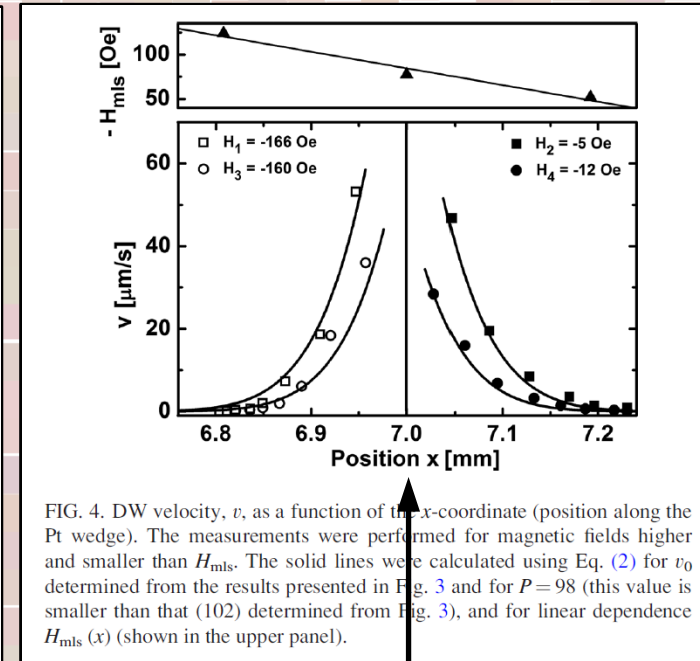
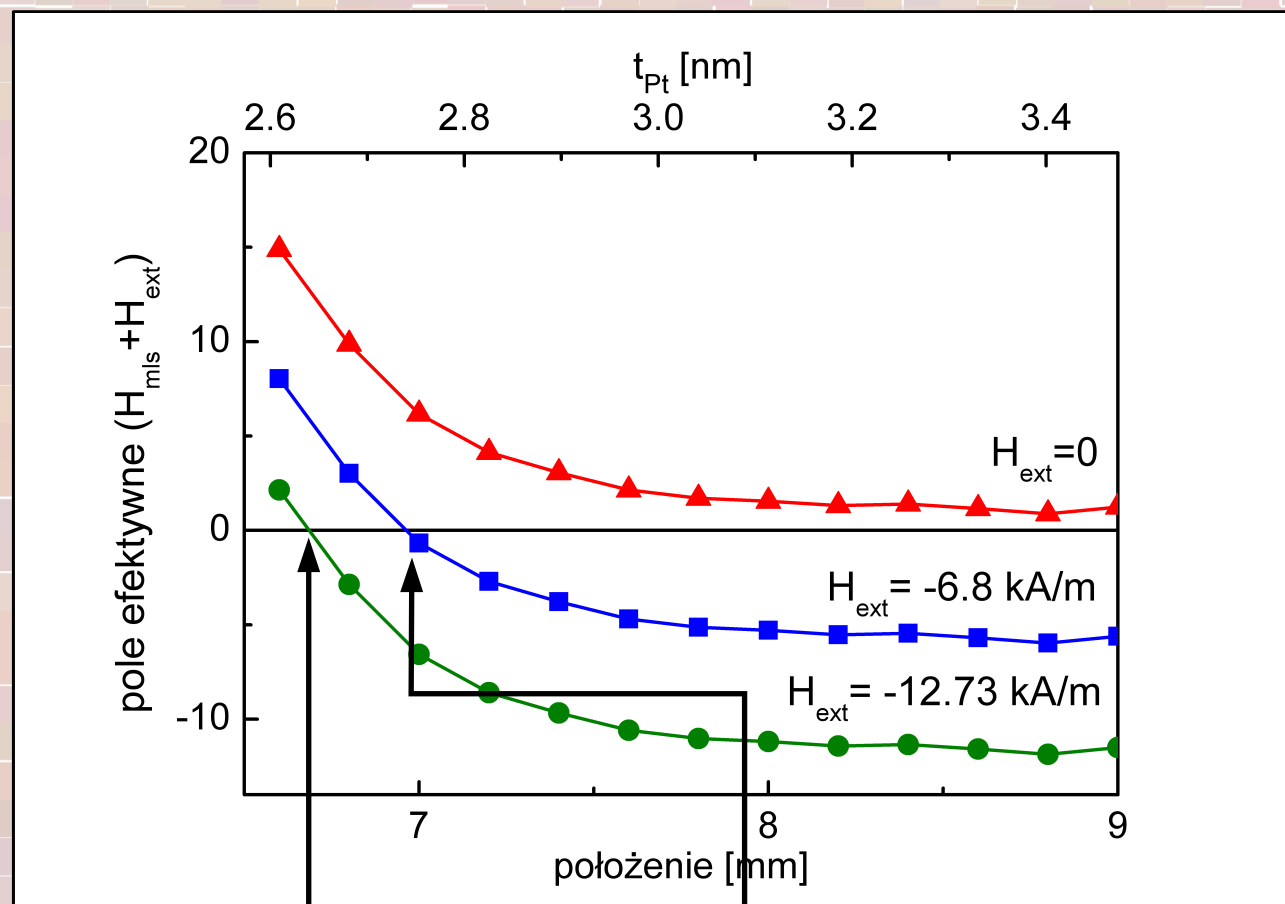


FIG. 4. DW velocity, v , as a function of the x -coordinate (position along the Pt wedge). The measurements were performed for magnetic fields higher and smaller than H_{mls} . The solid lines were calculated using Eq. (2) for v_0 determined from the results presented in Fig. 3 and for $P = 98$ (this value is smaller than that (102) determined from Fig. 3), and for linear dependence $H_{\text{mls}}(x)$ (shown in the upper panel).

Propagacja ściany domenowej w obecności gradientu oddziaływania ferromagnetycznego



Położenie równowagowe (wypadkowe pole równe zero) dla $H_{\text{ext}} = -12.73 \text{ kA/m}^*$

Położenie równowagowe (wypadkowe pole równe zero) dla $H_{\text{ext}} = -6.8 \text{ kA/m}$

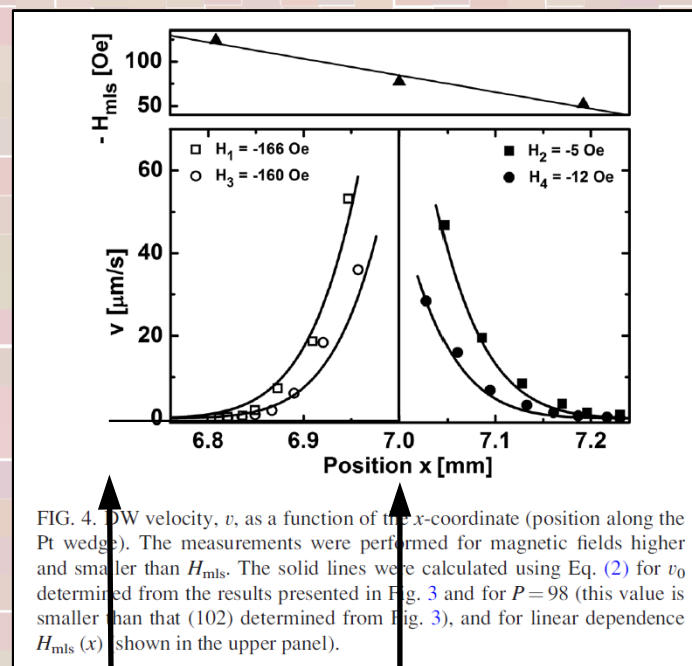


FIG. 4. DW velocity, v , as a function of the x -coordinate (position along the Pt wedge). The measurements were performed for magnetic fields higher and smaller than H_{mls} . The solid lines were calculated using Eq. (2) for v_0 determined from the results presented in Fig. 3 and for $P = 98$ (this value is smaller than that (102) determined from Fig. 3), and for linear dependence $H_{\text{mls}}(x)$ shown in the upper panel.

* -160 Oe w dawnych jednostkach

Propagacja ściany domenowej w obecności gradientu oddziaływania ferromagnetycznego

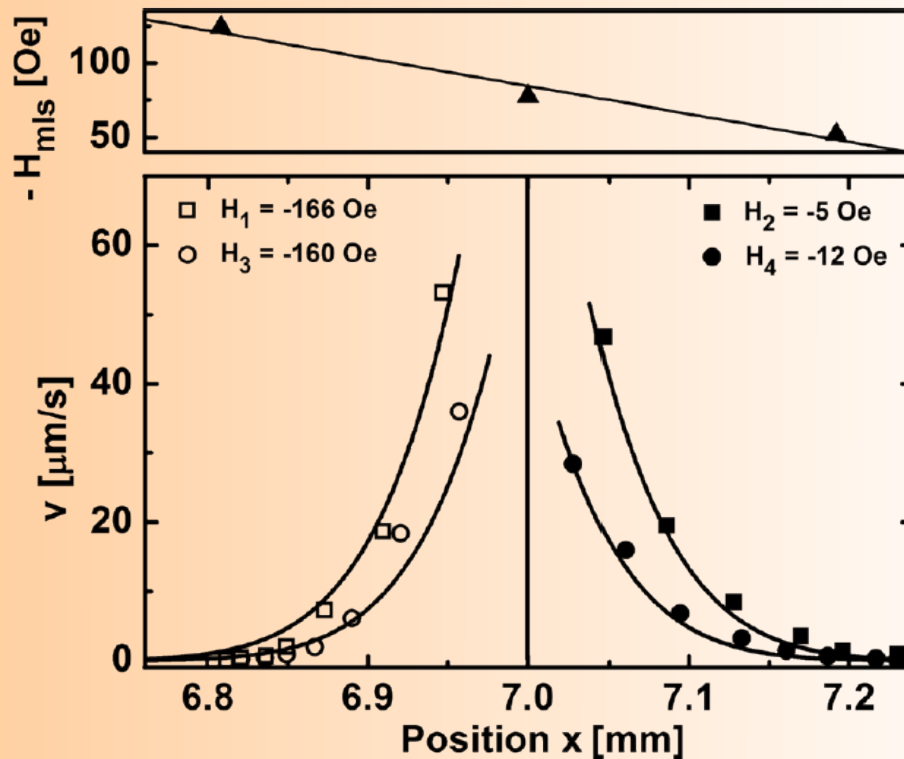


FIG. 4. DW velocity, v , as a function of the x -coordinate (position along the Pt wedge). The measurements were performed for magnetic fields higher and smaller than H_{mls} . The solid lines were calculated using Eq. (2) for v_0 determined from the results presented in Fig. 3 and for $P = 98$ (this value is smaller than that (102) determined from Fig. 3), and for linear dependence $H_{mls}(x)$ (shown in the upper panel).

Oddziaływanie między warstwami Co prowadzi do tłumienia termicznie aktywowanego pełzania magnetycznej ściany domenowej w warstwie miękkiej magnetycznie.

Wnioski:

- ruch ściany domenowej w warstwie miękkiej magnetycznie określony jest sumą pola zewnętrznego oraz pola związanego z ferromagnetycznym oddziaływaniem z sąsiednimi warstwami magnetycznymi
- w obszarze z gradientem oddziaływania międzywarstwowego mimo jednorodności zewnętrznego pola magnetycznego efektywne pole jest funkcją położenia – pole lokalne
- ruch ściany domenowej w warstwie miękkiej hamowany jest w przypadku ruchu do obszarów o silniejszym oddziaływaniu i przyspieszany gdy ruch odbywa się w kierunku obszarów o słabszym oddziaływaniu; w drugim przypadku „malejące” w trakcie ruchu ściany oddziaływanie prowadzi do zwolnienia propagacji

Propagacja ściany domenowej w obecności gradientu oddziaływania ferromagnetycznego

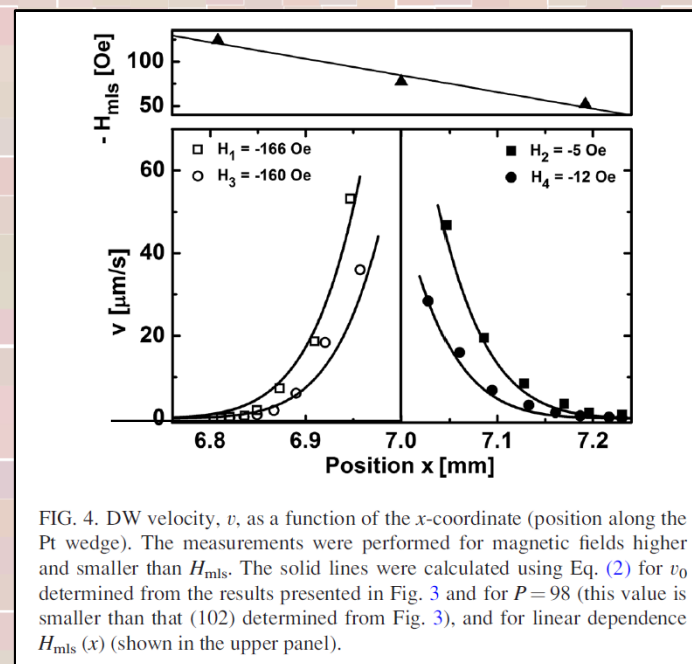
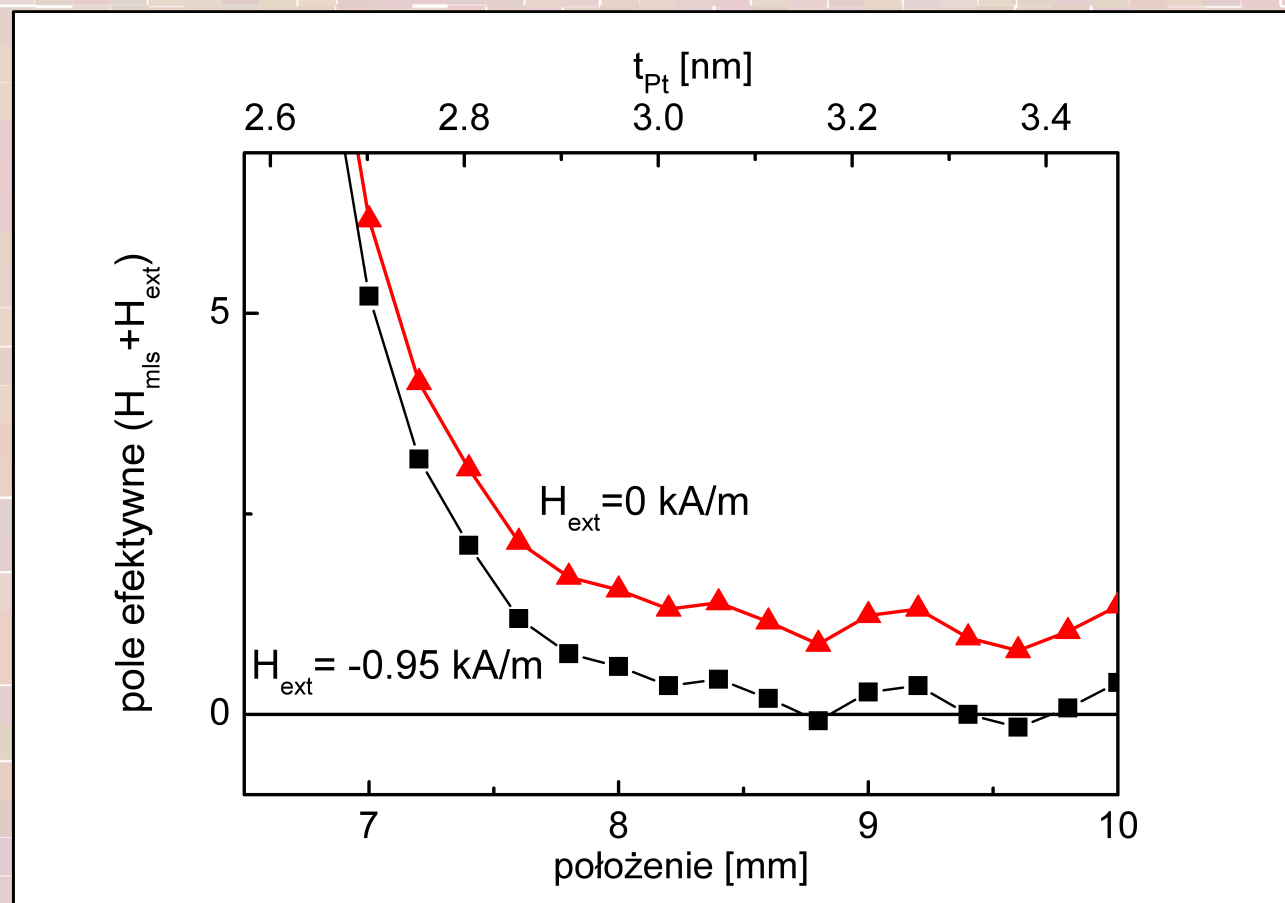


FIG. 4. DW velocity, v , as a function of the x -coordinate (position along the Pt wedge). The measurements were performed for magnetic fields higher and smaller than H_{mls} . The solid lines were calculated using Eq. (2) for v_0 determined from the results presented in Fig. 3 and for $P = 98$ (this value is smaller than that (102) determined from Fig. 3), and for linear dependence $H_{\text{mls}}(x)$ (shown in the upper panel).

Położenie równowagowe (wypadkowe pole równe zero) dla $H_{\text{ext}} = -0.95 \text{ kA/m}^*$ nie może być precyzyjnie określone na podstawie pętli histerezy – słabo określony punkt $H_{\text{ext}} + H_{\text{ext}} = 0$.

* -12 Oe w dawnych jednostkach