

Maciej Urbaniak, IFM PAN Poznań

Właściwości magnetyczne i
magnetoopór warstw
wielokrotnych typu
 $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$

2010.03.30

Właściwości magnetyczne i magnetoopór warstw wielokrotnych typu $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$

Wprowadzenie

Struktura i własności magnetyczne

Gigantyczny magnetoopór

Korelacja namagnesowanie-opór

Sprzężenie magnetostatyczne

Podsumowanie

Spis prac stanowiących rozprawę habilitacyjną

- [U.1] M. Urbaniak, H. Brückl, F. Stobiecki, T. Luciński and G. Reiss, Néel's Magnetostatic Coupling in Sputtered Cu/Py/V/Py/MnIr/Cu Multilayers, **Acta Phys. Polon. A** **105**, 307 (2004)
- [U.2] M. Urbaniak, F. Stobiecki, T. Luciński, B. Szymański, Magnetization and magnetoresistance correlation in NiFe/Au/Co/Au multilayers, **Molecular Physics Reports** **40**, 176 (2004)
- [U.3] M. Urbaniak, F. Stobiecki, B. Szymański, Interlayer coupling induced by domain structure in NiFe/Au/Co/Au multilayers, **phys. stat. sol. (a)** **202**, 2013 (2005)
- [U.4] M. Urbaniak, F. Stobiecki, D. Engel, B. Szymański, A. Ehresmann, and J. Kim, Domain structure and magnetoresistance of NiFe/Au/Co/Au multilayers with perpendicular anisotropy, **phys. stat. sol. (c)** **3**, 57 (2006)
- [U.5] M. Urbaniak, F. Stobiecki, B. Szymański, A. Ehresmann, A. Maziewski, M. Tekielak, Magnetic and magnetoresistive properties of NiFe/Au/Co/Au multilayers with perpendicular anisotropy of Co layers, **J. Appl. Phys.** **101**, 013905 (2007)
- [U.6] M. Urbaniak, F. Stobiecki, B. Szymański, Stability of perpendicular anisotropy in NiFe/Au/Co/Au multilayers, **J. Alloys Compd.** **454**, 57 (2008)
- [U.7] F. Stobiecki, M. Urbaniak, B. Szymański, J. Dubowik, P. Kuświk, M. Schmidt, T. Weis, D. Engel, D. Lengemann, A. Ehresmann, I. Sveklo, A. Maziewski, Magnetic field induced transition from weak to strong ferromagnetic coupling in NiFe/Au/Co/Au multilayers, **Appl. Phys. Lett.** **92**, 012511 (2008)
- [U.8] M. Urbaniak, F. Stobiecki, B. Szymański, M. Kopcewicz, Mössbauer and giant magnetoresistance effect study of magnetic structure in NiFe/Au/Co/Au multilayers with perpendicular anisotropy of the Co layers, **J. Phys.: Condens. Matter** **20**, 085208 (2008)
- [U.9] M. Urbaniak, NiFe/Au/Co/Au layered films - magnetic properties and possible applications, **Materials Science-Poland** **26**, 831 (2009)
- [U.10] M. Urbaniak, Giant magnetoresistance as a probe of magnetostatic coupling in NiFe/Au/Co/Au multilayers, **J. Appl. Phys.** **104**, 094909 (2008)

Właściwości magnetyczne i magnetoopór warstw wielokrotnych typu $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$

Wprowadzenie

Struktura i własności magnetyczne

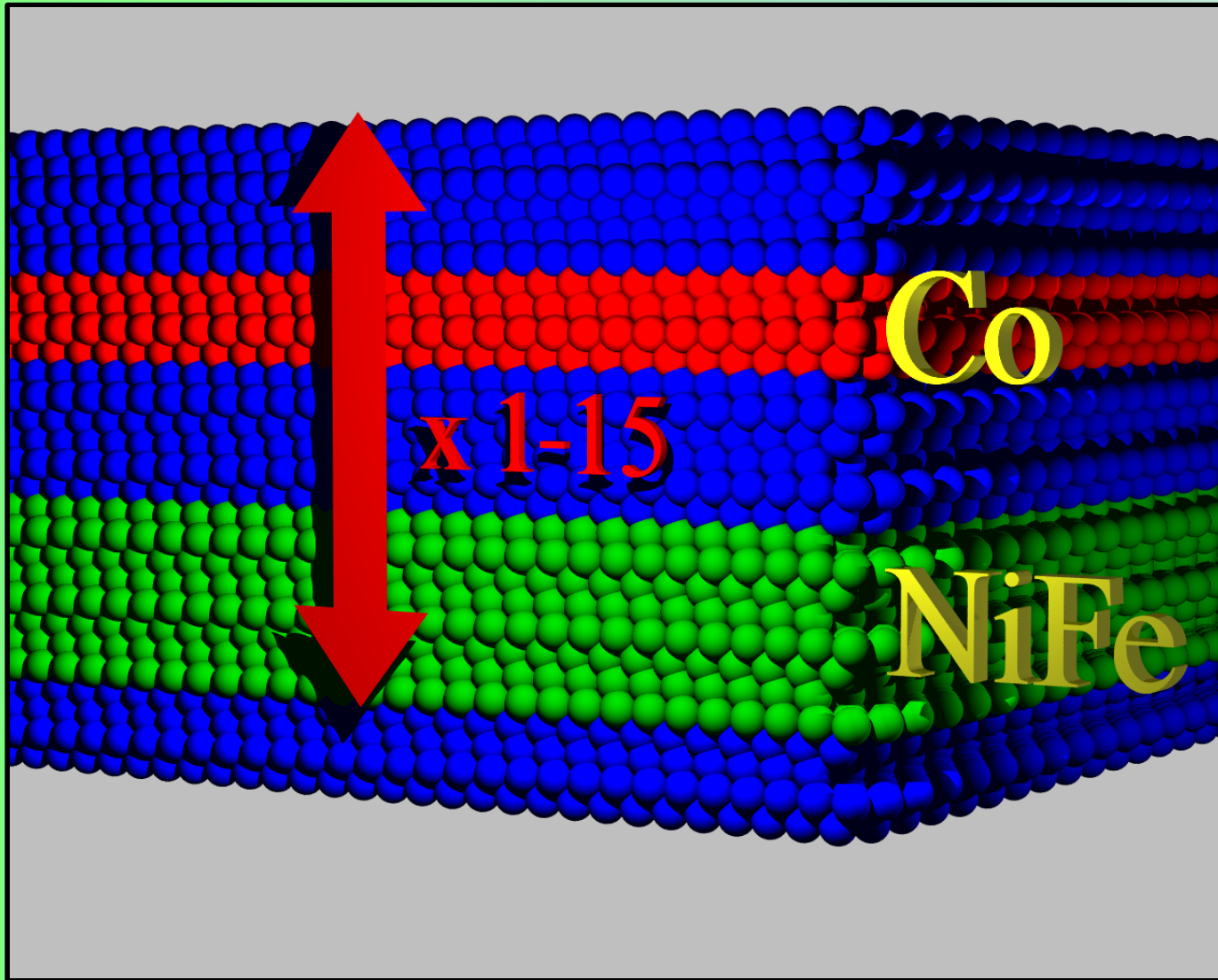
Gigantyczny magnetoopór

Korelacja namagnesowanie-opór

Sprzężenie magnetostatyczne

Podsumowanie

Struktura i własności magnetyczne



Podłoże: naturalnie utleniony Si(100), szkło, taśma klejąca

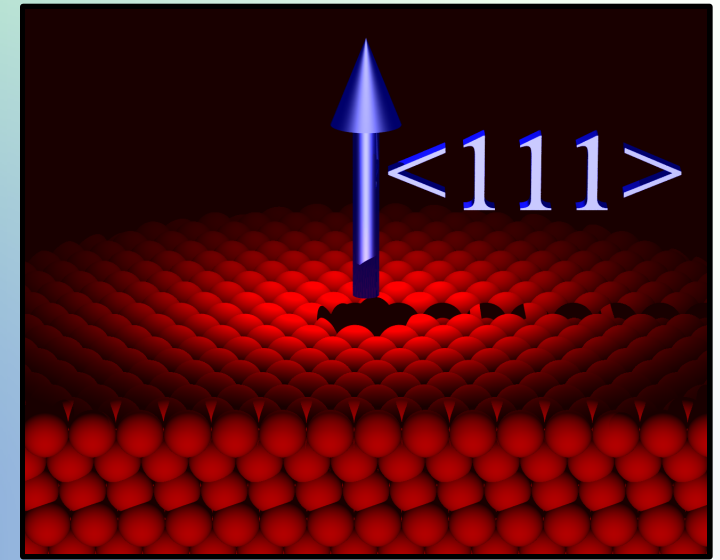
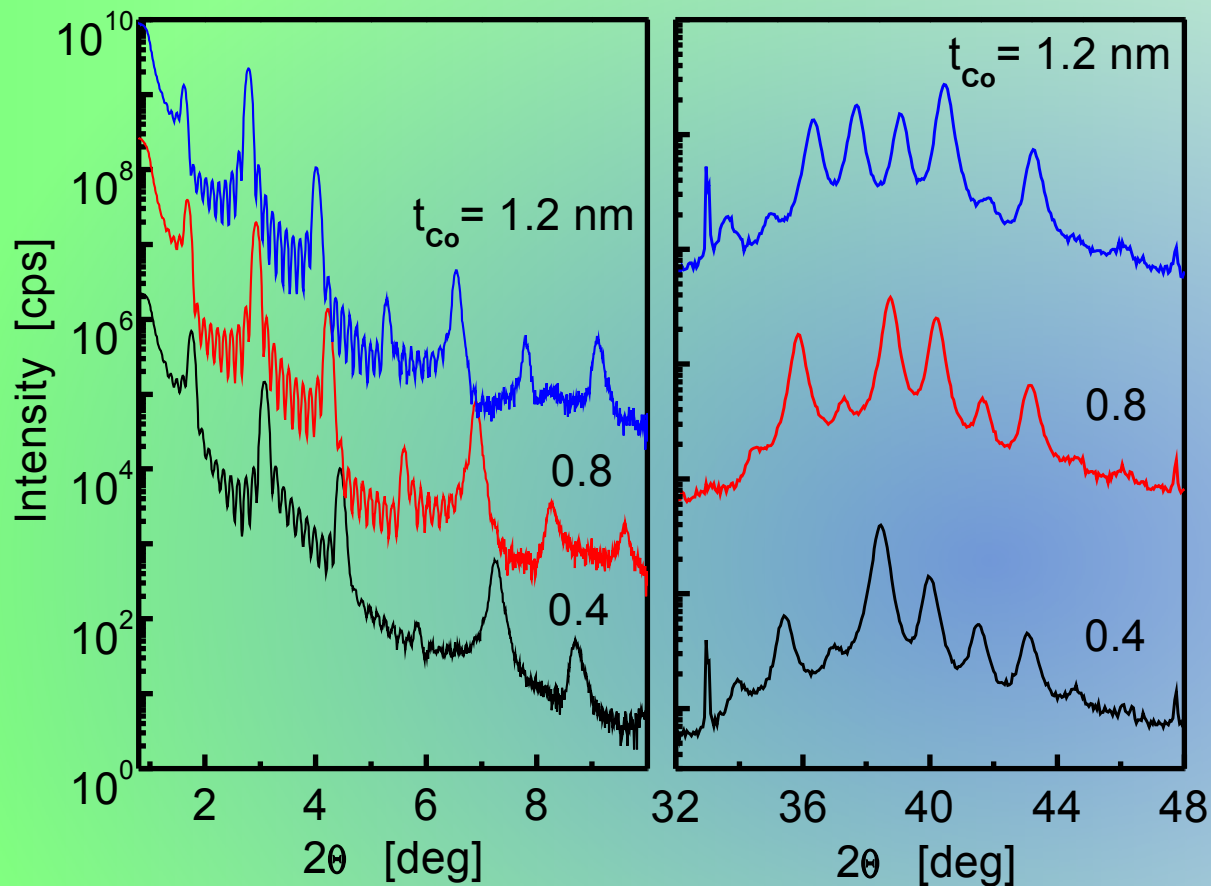
$$t_{\text{Co}} = 0.2-1.5 \text{ nm}$$

$$t_{\text{NiFe}} = 0.5-4 \text{ nm}$$

$$t_{\text{Au}} = 1.5-3 \text{ nm}$$

Rozpylanie katodowe

Struktura i własności magnetyczne



NiFe, Au – tekstura
fcc (111)

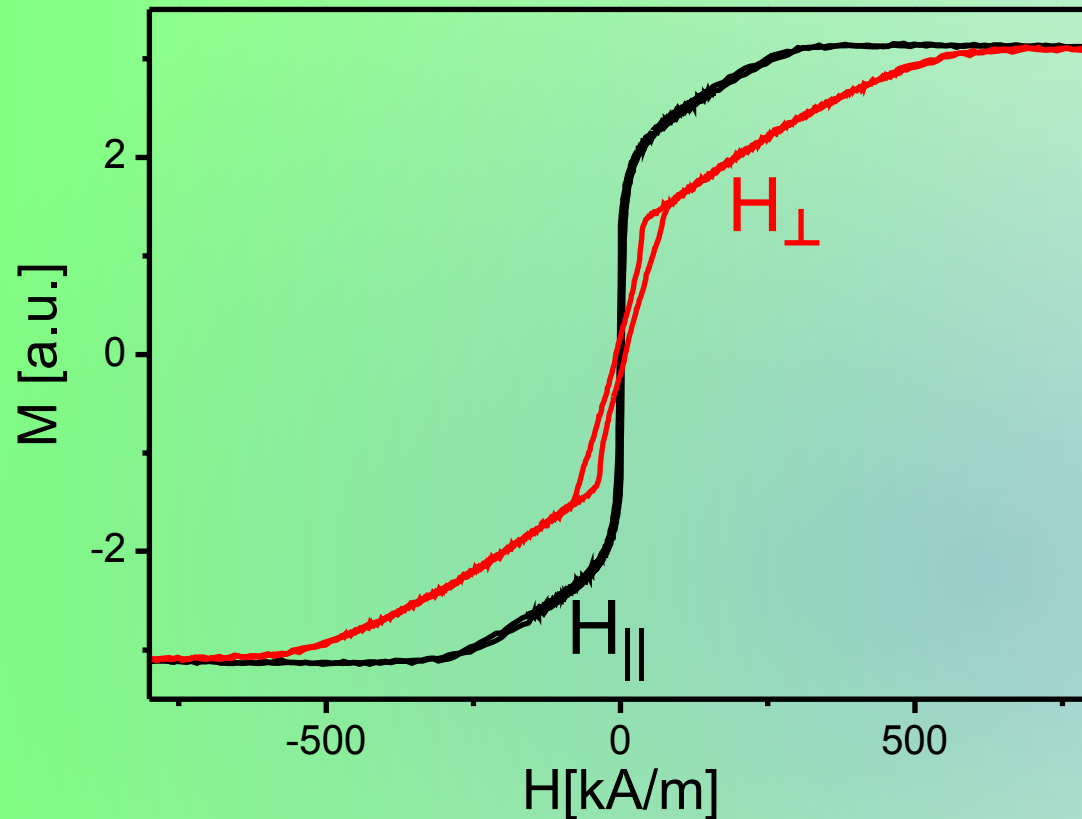
Co – fcc, hcp ?

stabilny proces
osadzania

$[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(2 \text{ nm})/\text{Au}(1.9 \text{ nm})/\text{Co}(t_{\text{Co}})/\text{Au}(1.9 \text{ nm})]_N$

Cu K α

Struktura i własności magnetyczne



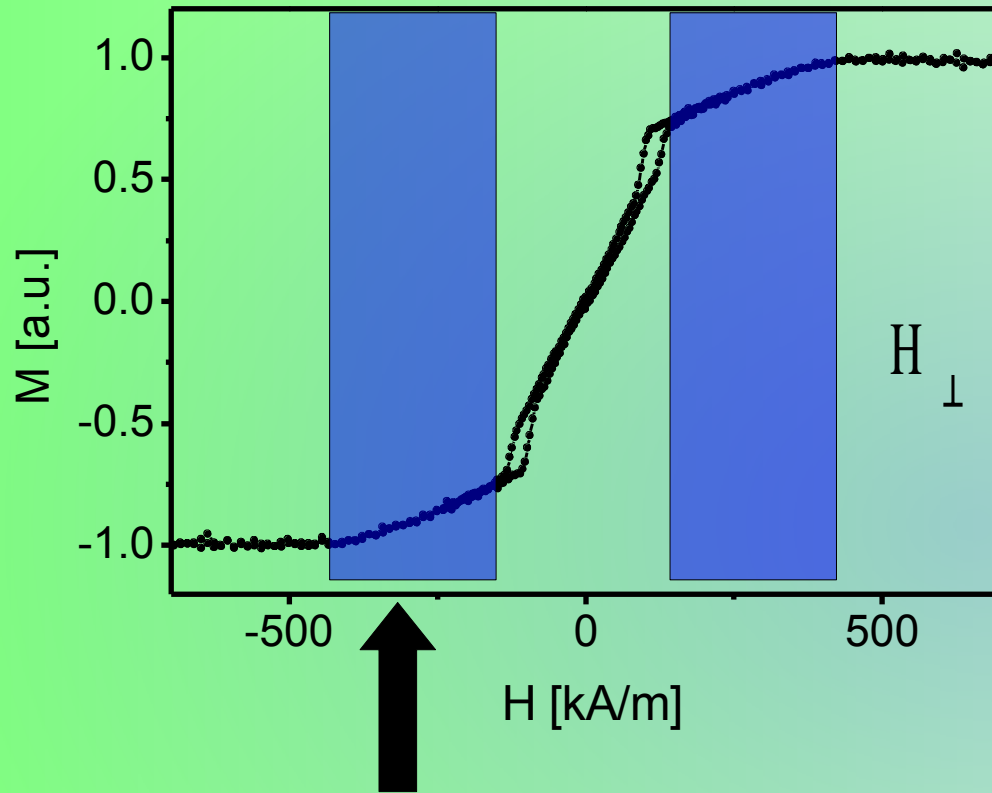
NiFe – magnetyczna oś łatwa w płaszczyźnie subwarstw

Co – magnetyczna oś łatwa prostopadła do płaszczyzny subwarstw

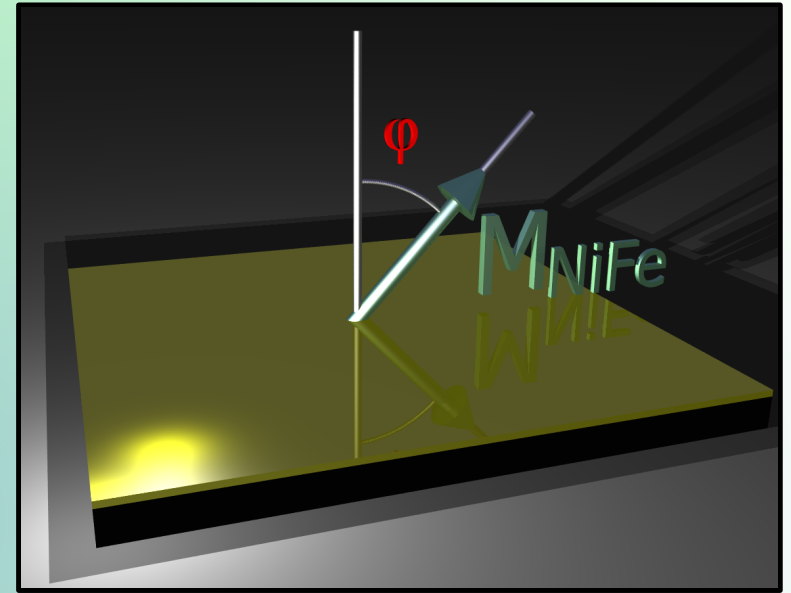
magnetometr wibracyjny

- Środkowy obszar pętli w polu prostopadłym jest charakterystyczny dla układów z **pasiastą strukturą domenową**
- Dla obu konfiguracji pola warstwy Co i NiFe przemagnesowują się quasi niezależnie

Struktura i własności magnetyczne



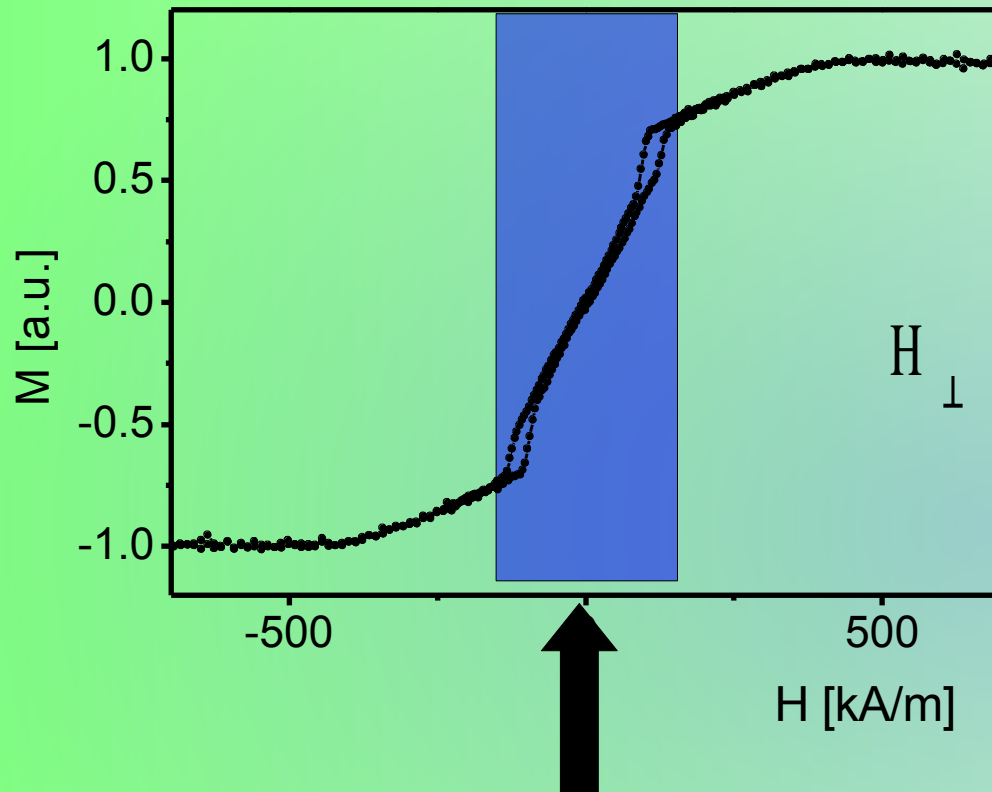
$$K_u = \frac{1}{2} \mu_0 (M_S^{NiFe})^2$$



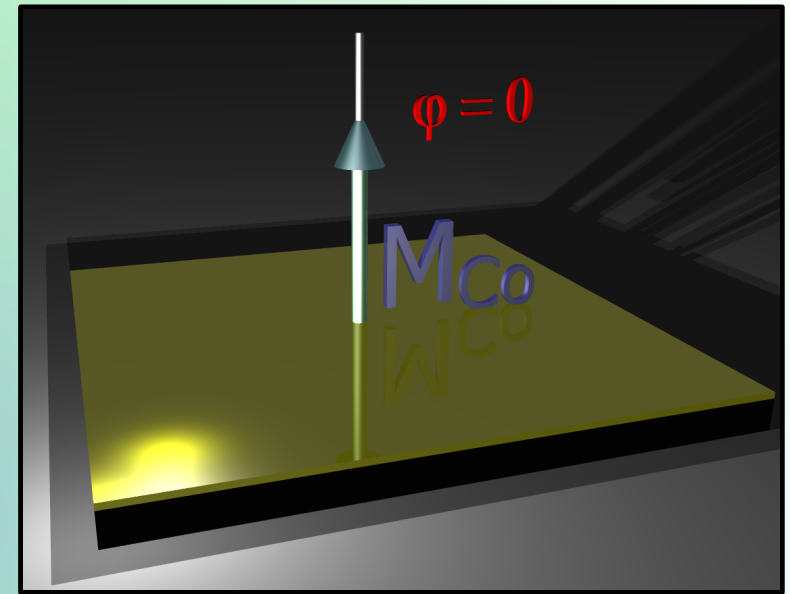
Anizotropia kształtu:

$$\cos(\varphi) = \frac{H}{M_S}$$

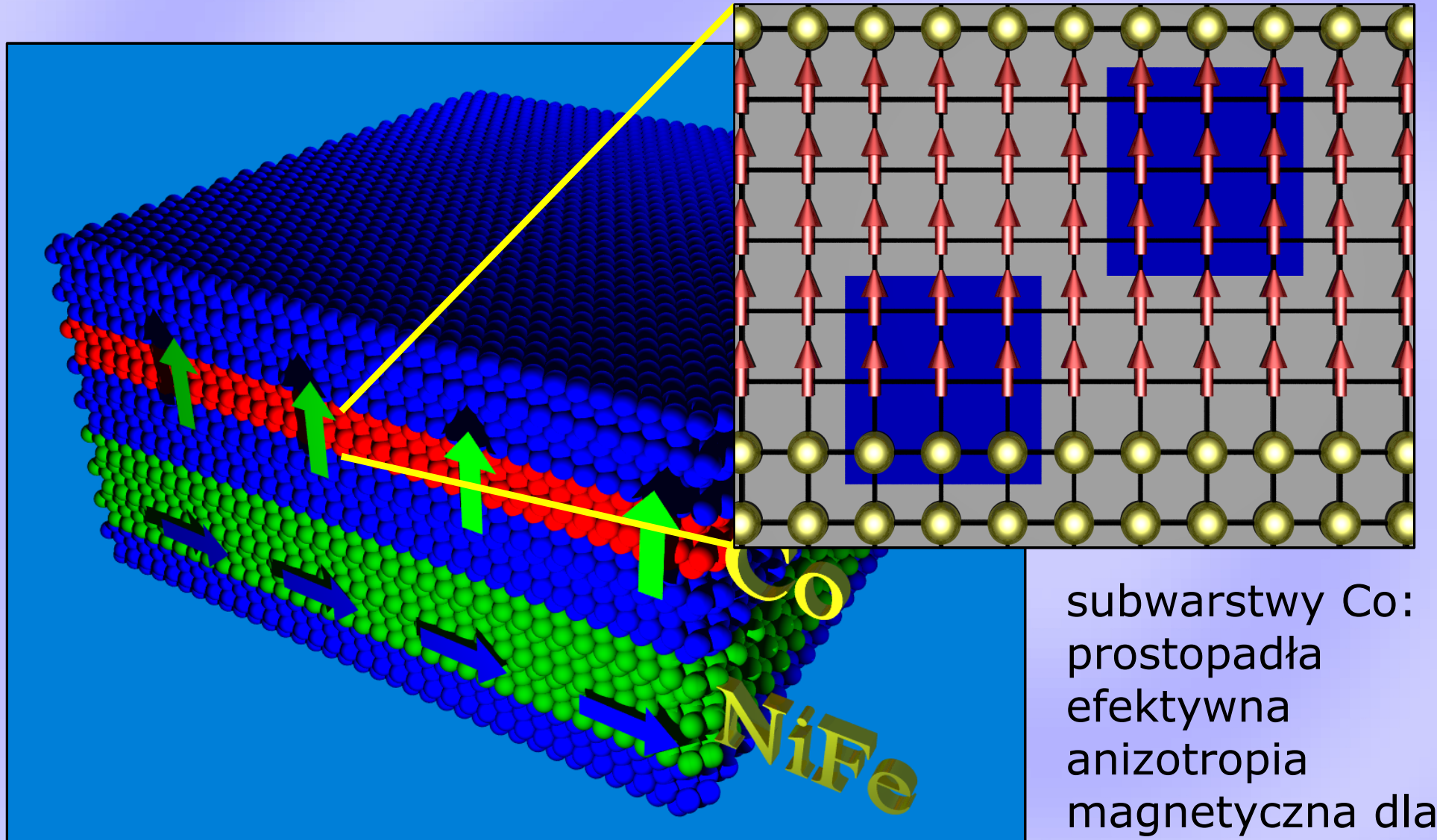
Struktura i własności magnetyczne



przemagnesowanie
NiFe i Co



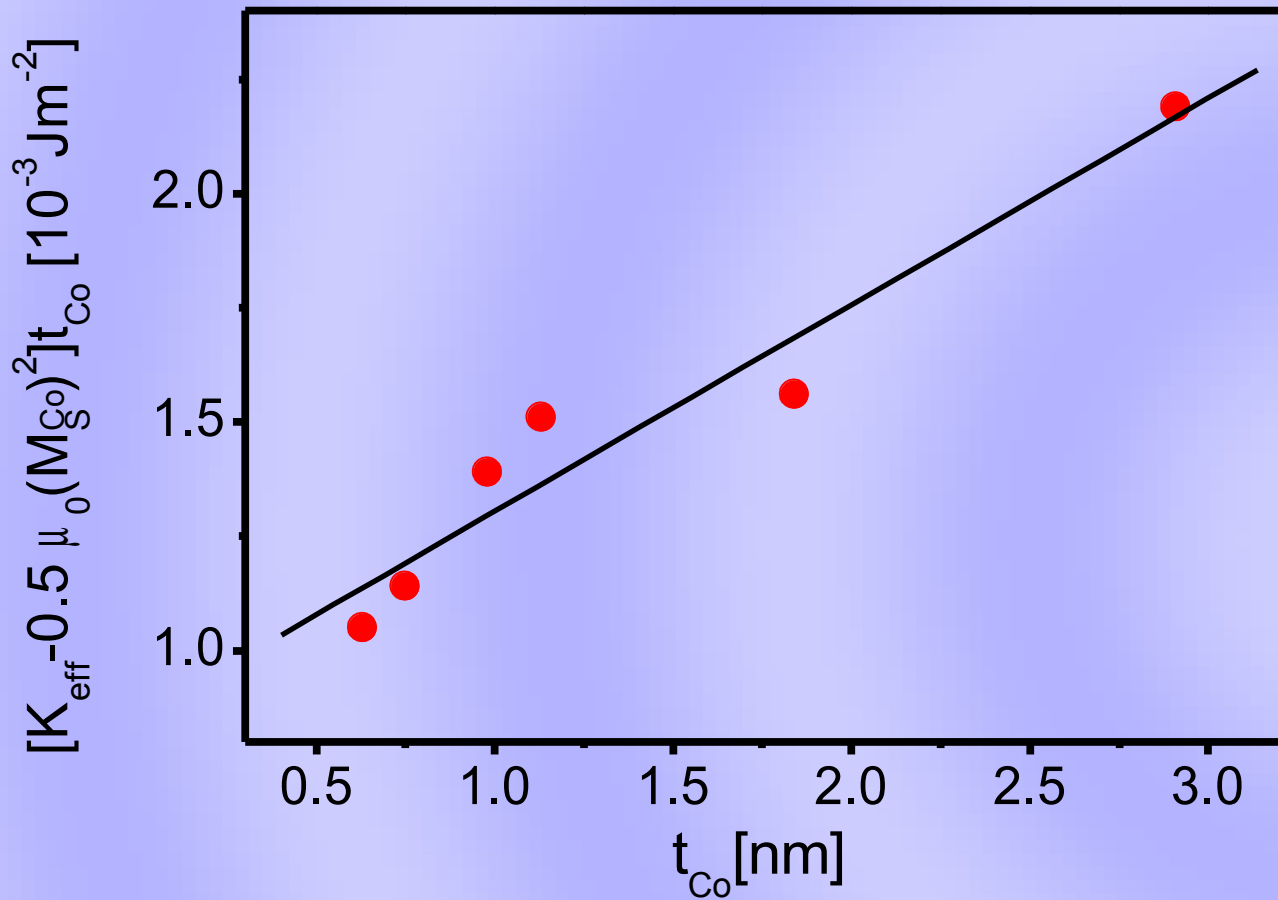
Oś łatwa subwarstw Co jest
prostopadła do powierzchni
warstwy wielokrotnej



subwarstwy Co:
 prostopadła
 efektywna
 anizotropia
 magnetyczna dla
 $t_{Co} = 0.5 \div 1.2 \text{ nm}$

$$K_{eff} = \frac{2 K_{1s}}{t_{Co}} + K_{1v} - \frac{1}{2} \mu_0 (M_S^{Co})^2$$

Struktura i własności magnetyczne



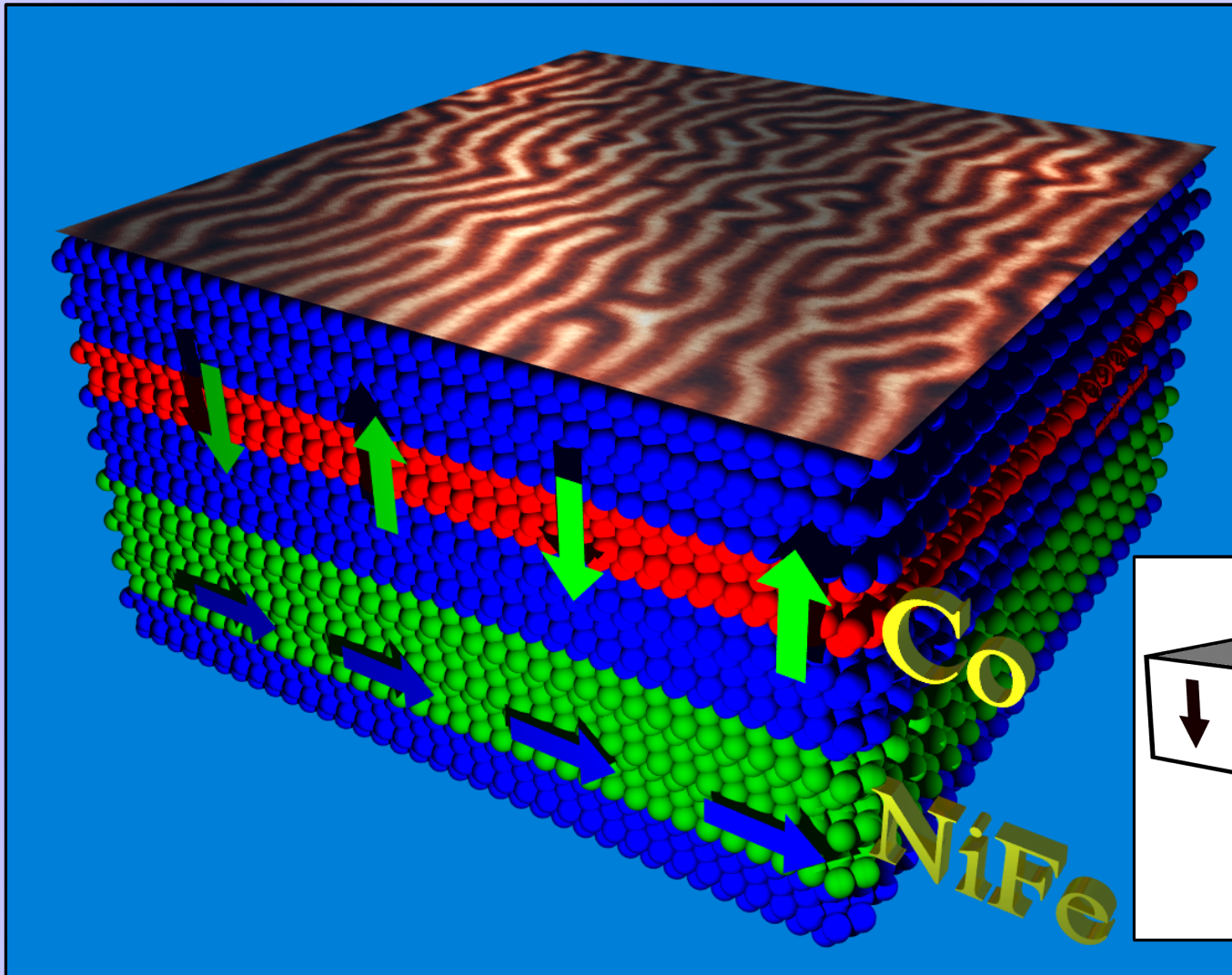
$$K_{1s} = 4.3 \pm 0.4 \cdot 10^{-4} \text{Jm}^{-2}$$

$$K_{1v} = 450 \pm 50 \cdot 10^3 \text{Jm}^{-3}$$

W makroskopowym
monokryształe hcp
Co:

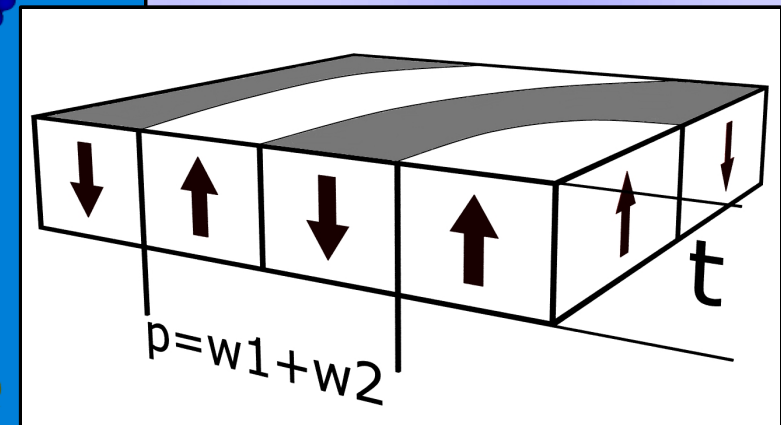
$$K_{1v} = 430 \cdot 10^3 \text{Jm}^{-3}$$

$$K_{eff} = \frac{2K_{1s}}{t_{Co}} + K_{1v} - \frac{1}{2} \mu_0 (M_S^{Co})^2$$



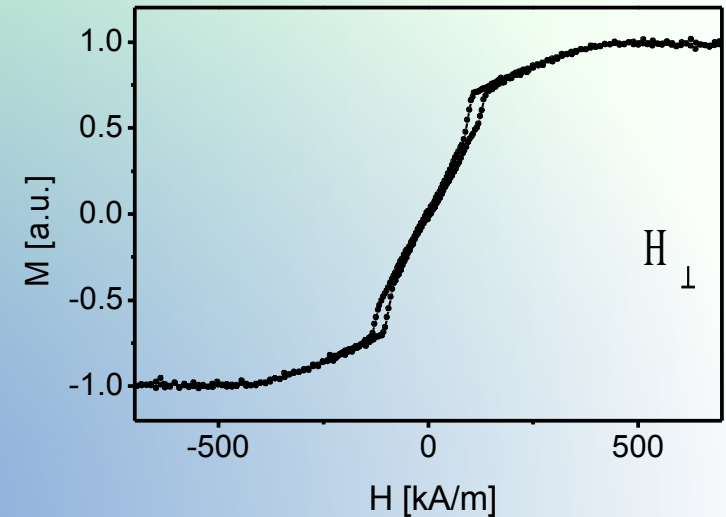
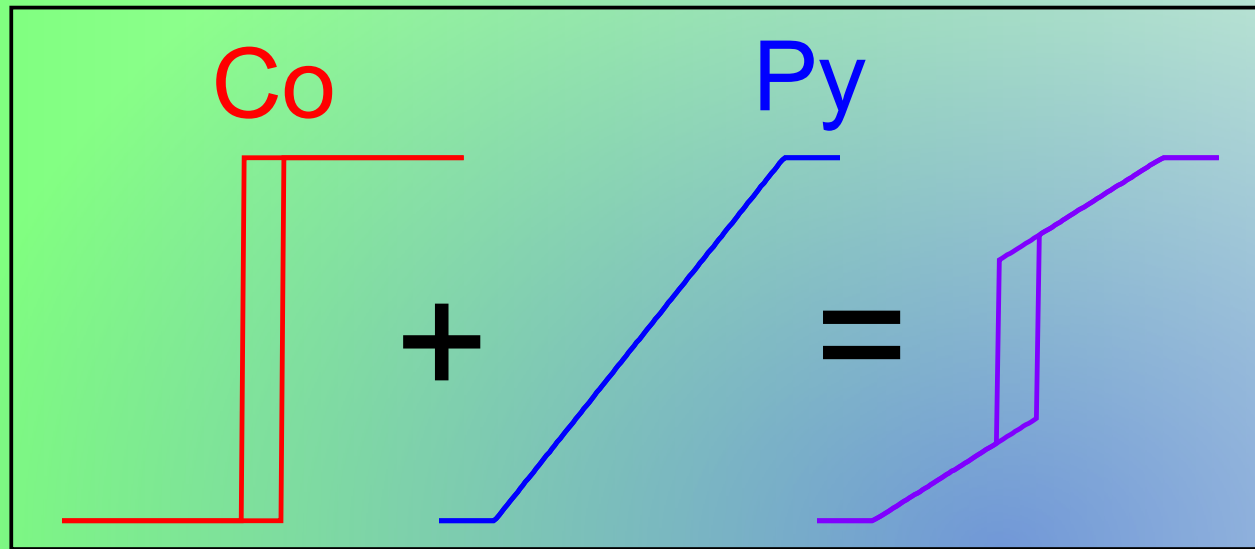
$5 \times 5 \mu\text{m}^2$

okres 400 - 1000 nm



Mikroskopia sił magnetycznych (MFM) potwierdza obecność **pasiastej struktury domenowej** charakterystycznej dla układów z anizotropią prostopadłą.

Struktura i własności magnetyczne



W pierwszym przybliżeniu warstwy Co i NiFe można traktować jako niesprężone

Zależność $M(H)$ struktury NiFe/Au/Co jest wtedy arytmetyczną sumą zależności $M(H)$ warstw Co i NiFe.

Właściwości magnetyczne i magnetoopór warstw wielokrotnych typu $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$

Wprowadzenie

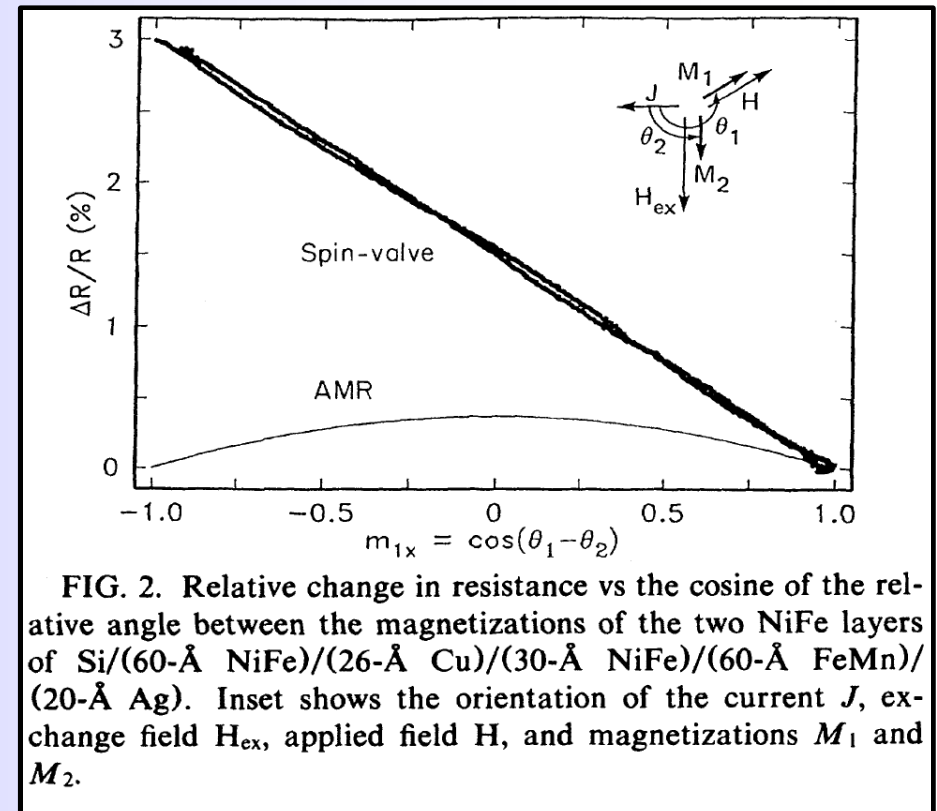
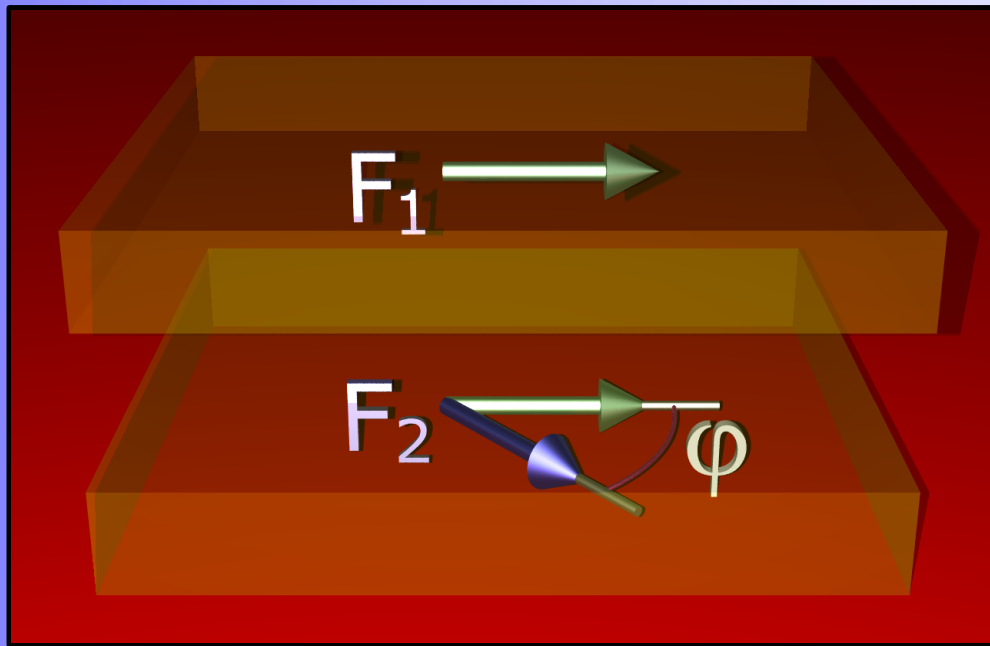
Struktura i własności magnetyczne

Gigantyczny magnetoopór

Korelacja namagnesowanie-opór

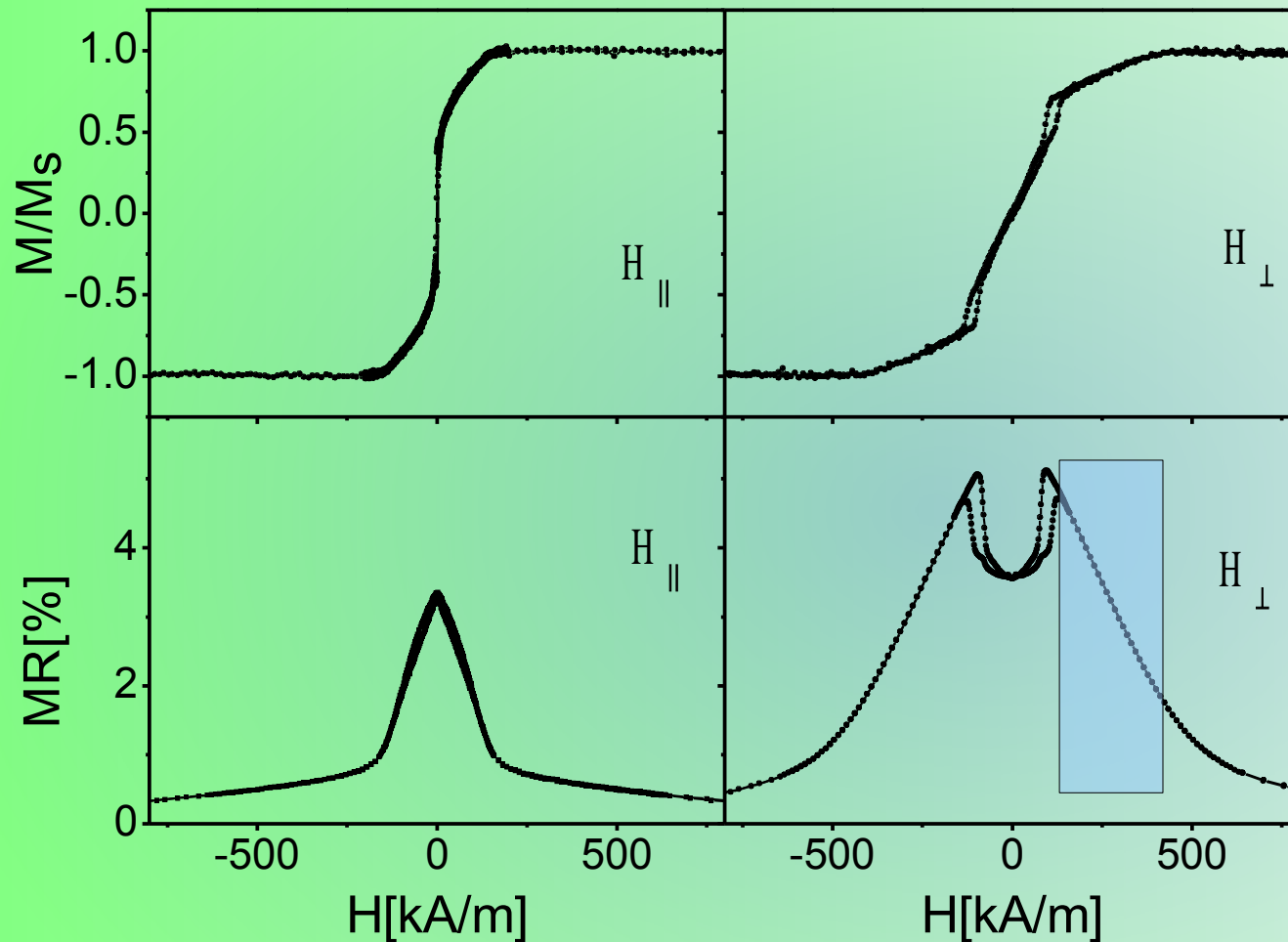
Sprzężenie magnetostatyczne

Podsumowanie



$$\Delta R \propto \cos(\varphi)$$

Gigantyczny magnetoopór warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$



Szeroki zakres liniowy w zależności $R(H)$:

-subwarstwy magnetyczne przemagnesowane w kierunku trudnym

-brak histerezy w zakresie liniowym

$[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(2 \text{ nm})/\text{Au}(1.9 \text{ nm})/\text{Co}(1 \text{ nm})/\text{Au}(1.9 \text{ nm})]_{10}$

Właściwości magnetyczne i magnetoopór warstw wielokrotnych typu $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$

Wprowadzenie

Struktura i własności magnetyczne

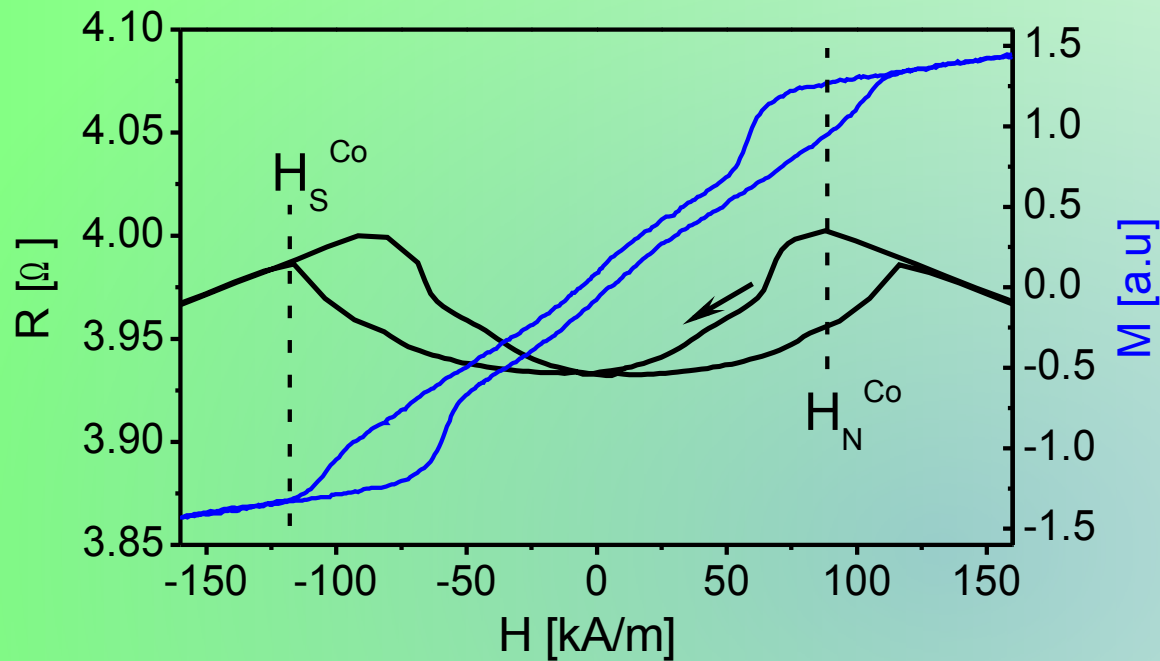
Gigantyczny magnetoopór

Korelacja namagnesowanie-opór

Sprzężenie magnetostatyczne

Podsumowanie

Gigantyczny magnetoopór warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$

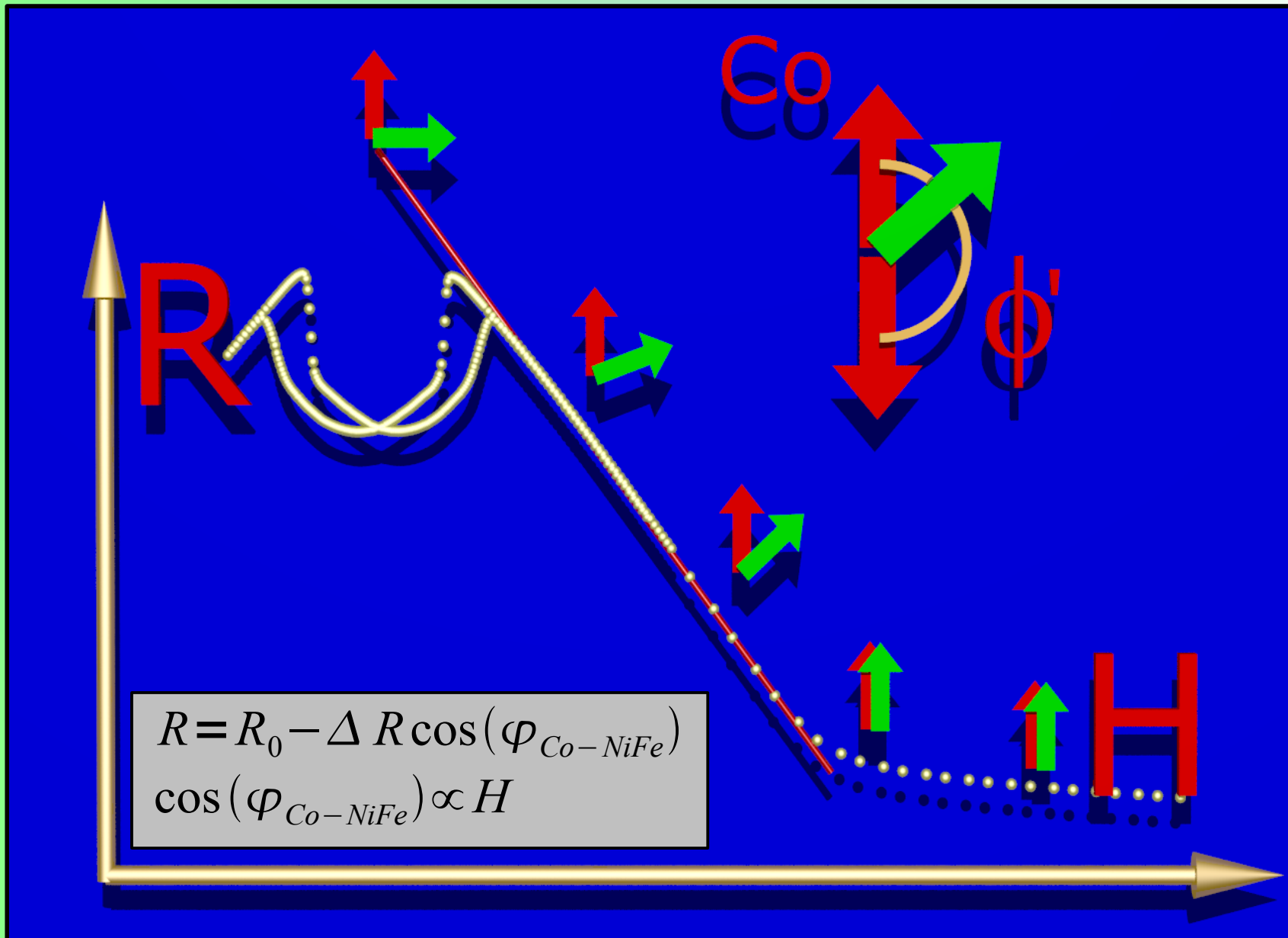


W zależności $R(H)$ występuje lokalne minimum oporu.

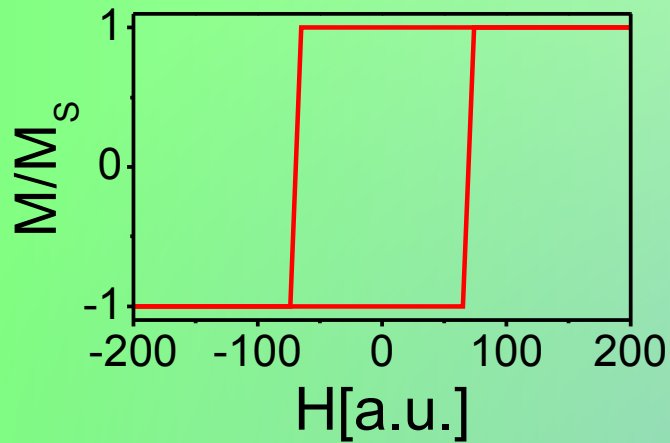
Pola nukleacji (tworzenie struktury domenowej) i anihilacji (nasylenie warstw Co) są widoczne zarówno w zależnościach $R(H)$ jak i $M(H)$.

Korelacja namagnesowanie-opór

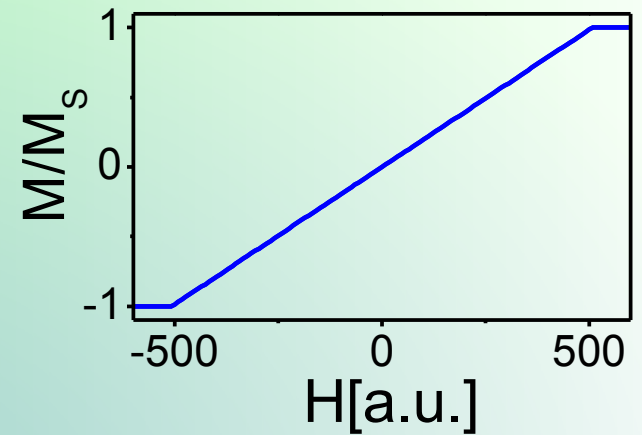
Wyjaśnienie zależności $R(H)$



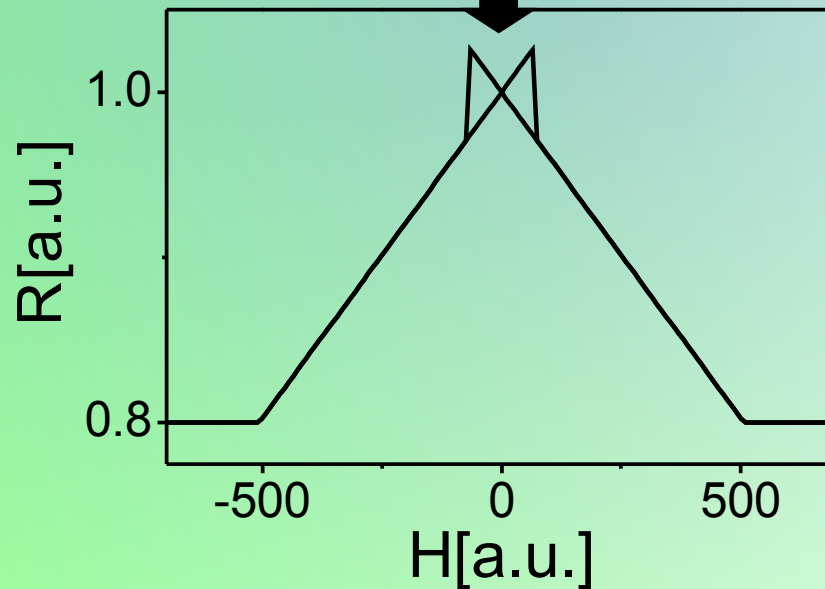
Gigantyczny magnetoopór warstw [NiFe/Au/Co/Au]_N - model



$$\Delta R \propto \cos(\varphi)$$

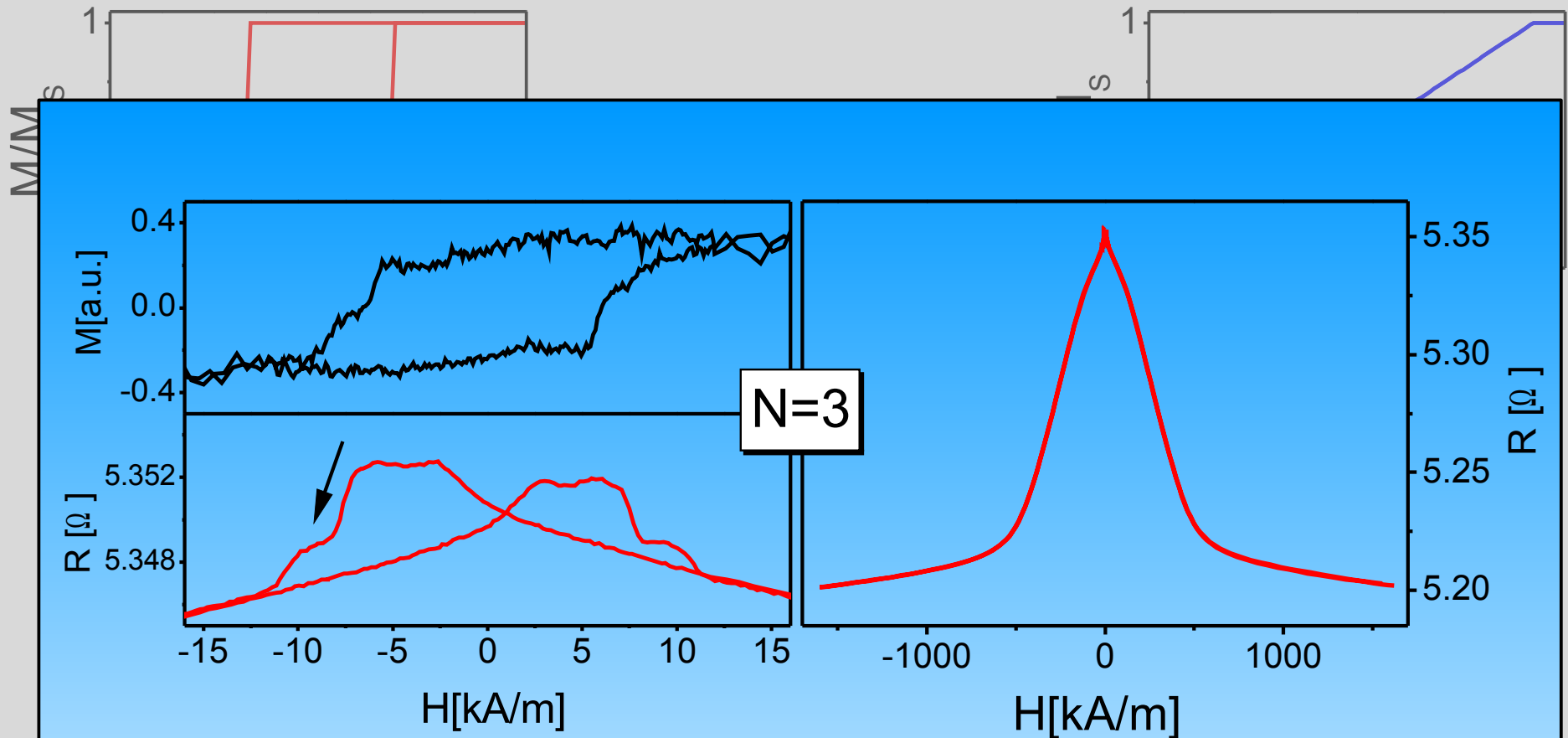


$$R(H) = a(R_0 - \Delta R \cdot \cos(\varphi_1)) + (1-a)(R_0 + \Delta R \cdot \cos(\varphi_2))$$



$$a(H) = \frac{1}{2} \left(\frac{M^{Co}(H)}{M_s^{Co}} + 1 \right)$$

Gigantyczny magnetoopór warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ - model



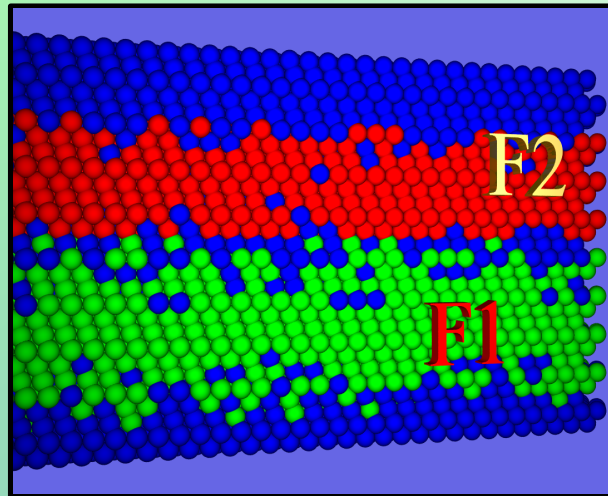
$[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(2 \text{ nm})/\text{Au}(3 \text{ nm})/\text{Co}(0.8 \text{ nm})/\text{Au}(3 \text{ nm})]_3$

$N=3$: nie występuje struktura pasiasta

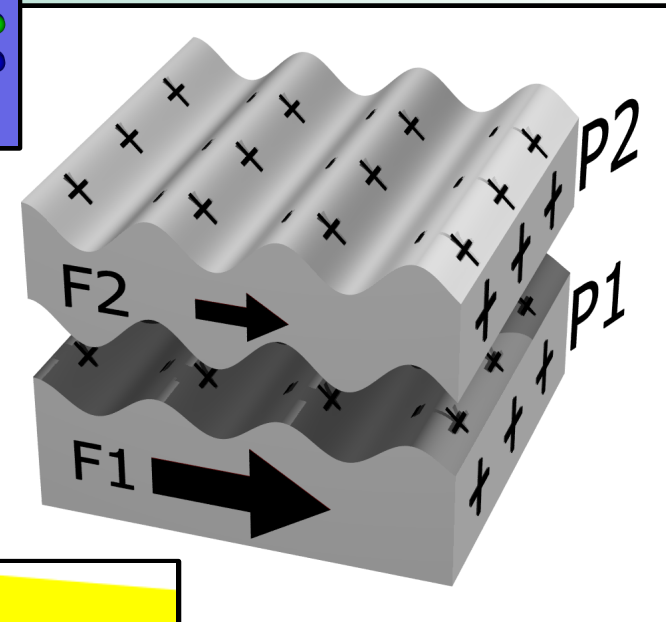
nie występuje lokalne minimum oporu

Sprężenia międzywarstwowe w układach wielowarstwowych

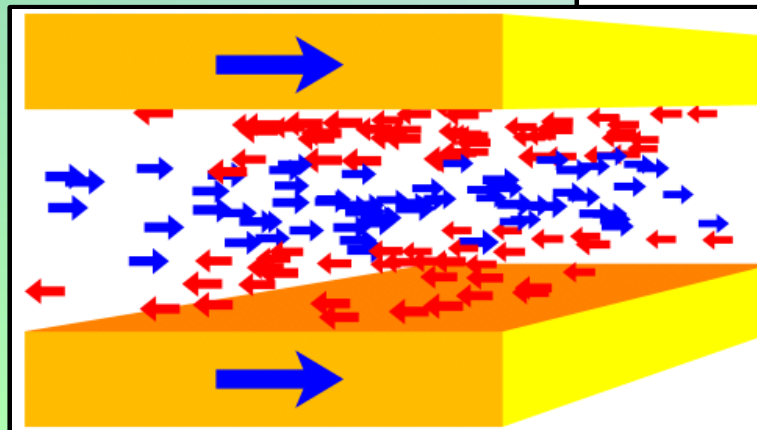
- sprzężenie poprzez mostki ferromagnetyczne



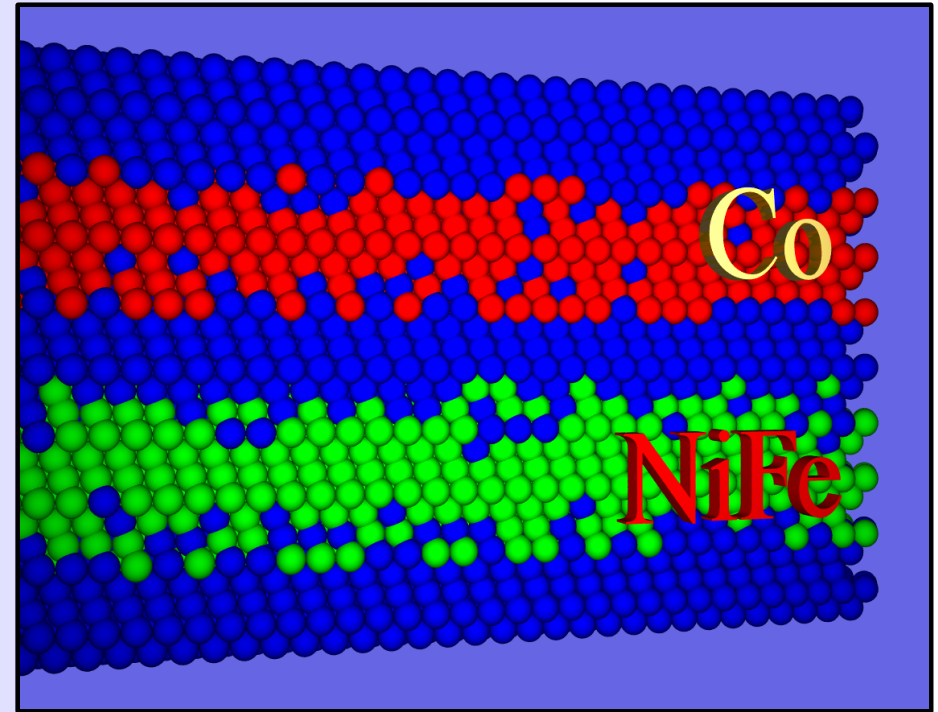
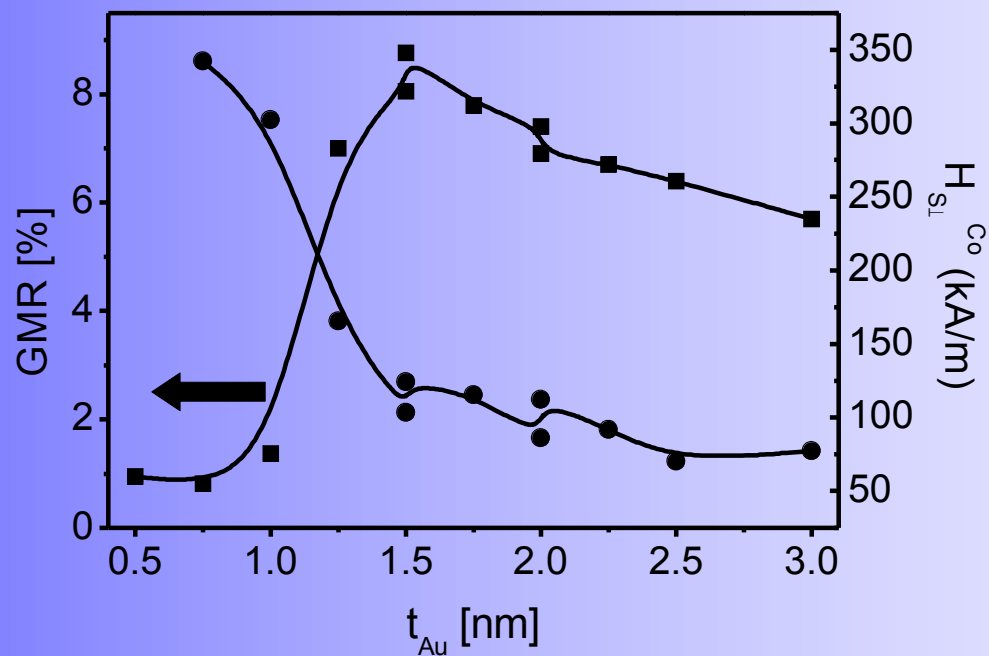
- sprzężenie magnetostaticzne



- sprzężenie typu Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida



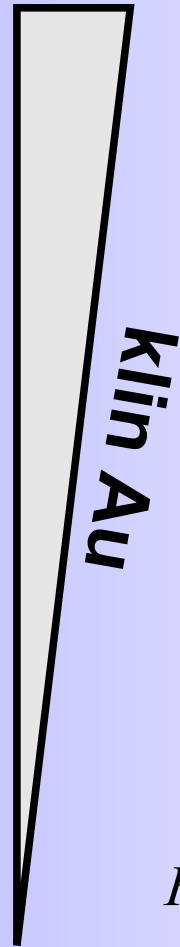
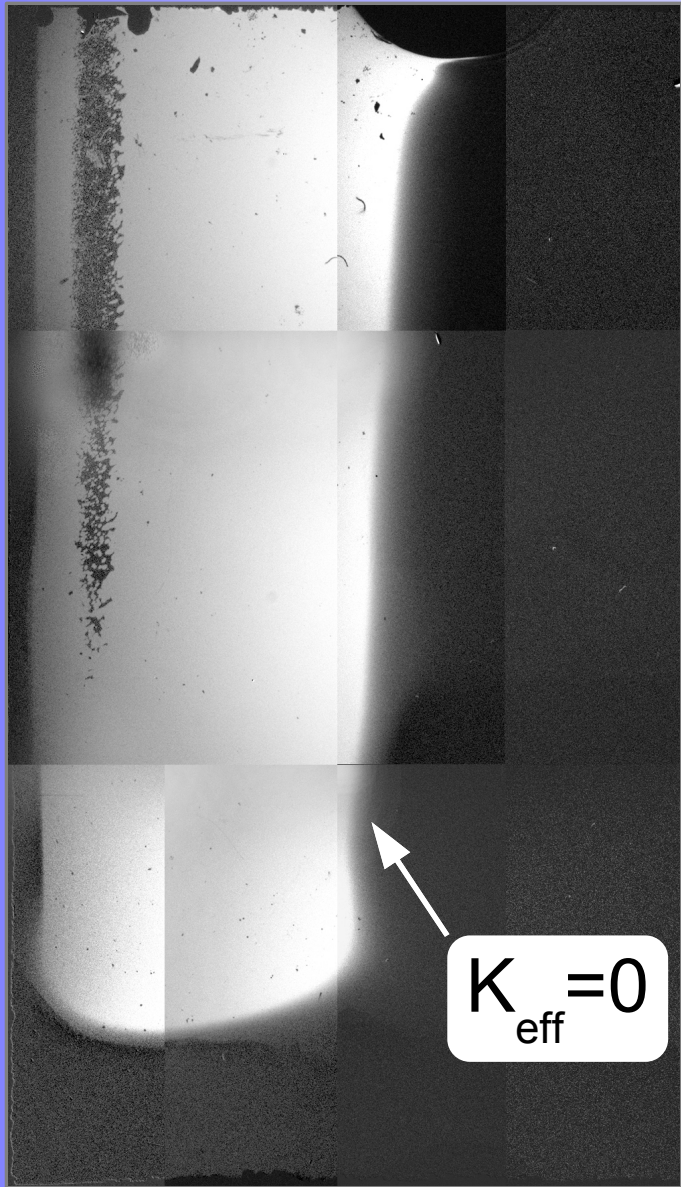
Struktura i własności magnetyczne



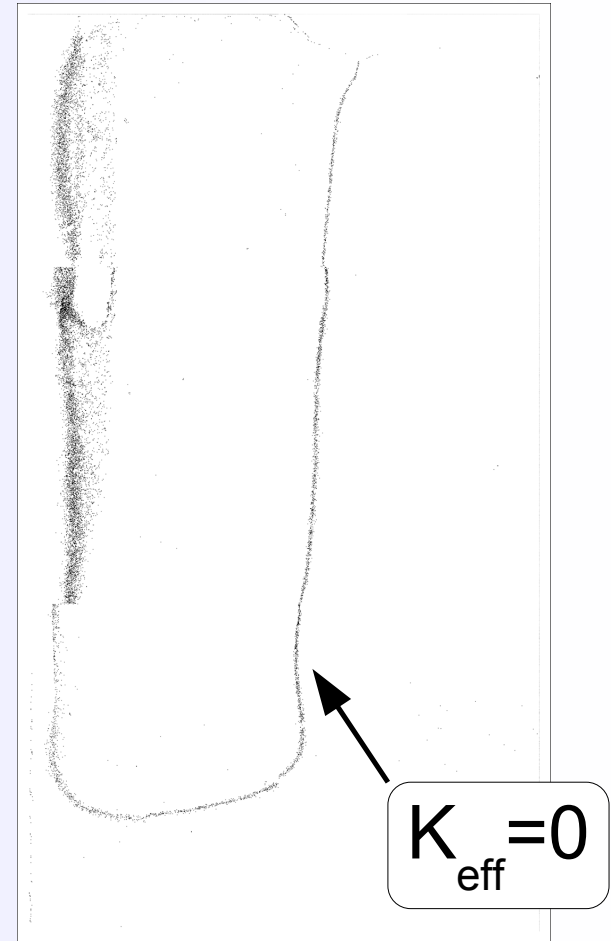
$[Ni_{80}Fe_{20}(2 \text{ nm})/Au(t_{Au})/Co(0.6 \text{ nm})/Au(t_{Au})]_{15}$

Dla małych wartości t_{Au} mostki ferromagnetyczne (pinholes) prowadzą do bezpośredniego sprzężenia subwarstw Co i NiFe.

Sprężenie RKKY w układach wielowarstwowych [NiFe/Au/Co/Au]_N



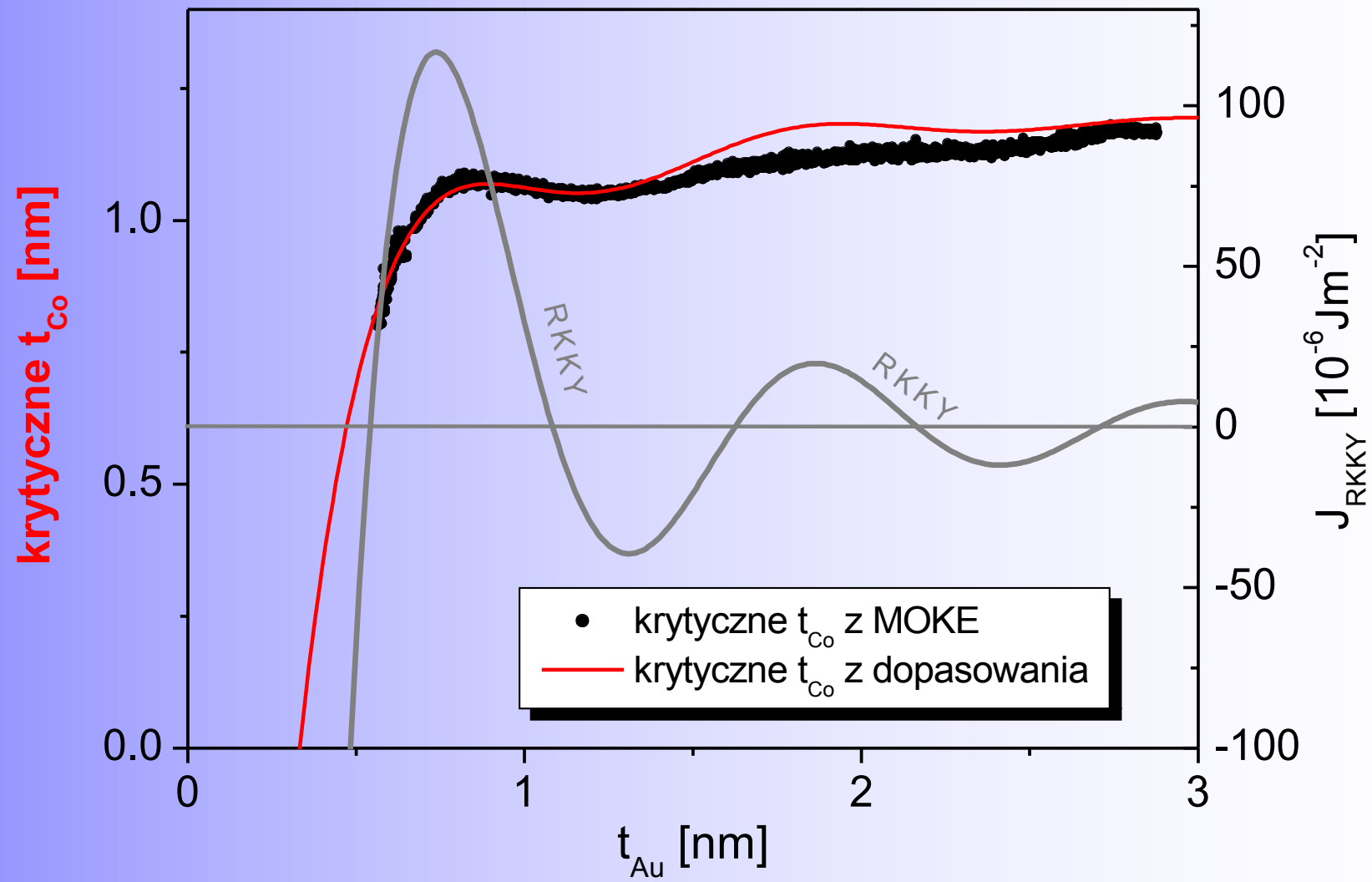
MOKE



$$K_{eff} = \frac{2K_{1s}}{t_{Co}} + K_{1v} - \frac{1}{2} \mu_0 (M_S^{Co})^2 - E_{Neel}(t_{Au}) + \mathbf{J}_{rkky}$$

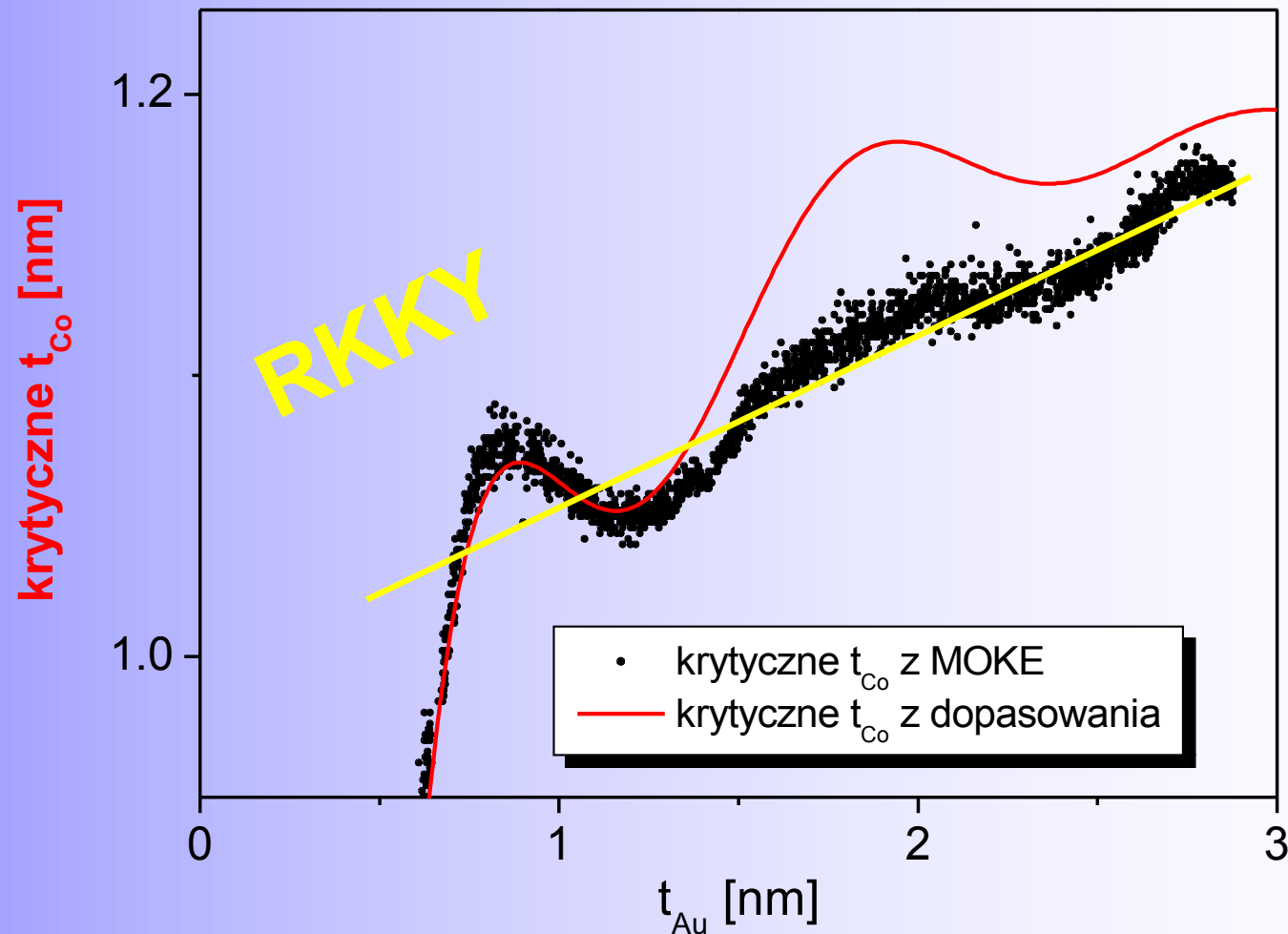
Si(100)/[NiFe(2nm)/Au(3nm)]₁₀/
 NiFe(2nm)/Au(0-3nm)/Co(0-2nm)/Au(3nm)

Sprzężenie RKKY w układach wielowarstwowych [NiFe/Au/Co/Au]_N



$$t_{co}^{krytyczne} = \frac{2K_s - a \exp(-bt_{Au}) + \frac{c}{t_{Au}^2} \sin(2dt_{Au})}{K_v - \frac{1}{2} \mu_0 (M_s^{Co})^2} \sim \frac{\text{aniz. Powierzchniowa} - \text{Neel} + \text{RKKY}}{\text{aniz. Krystaliczna} - \text{aniz. Kształtu}}$$

Sprzężenie RKKY w układach wielowarstwowych [NiFe/Au/Co/Au]_N



W próbkach klinowych *NiFe/klin Au/Co* występują oscylacje krytycznej grubości Co wskazujące na możliwość występowania sprzężenia RKKY. W drugim maksimum RKKY oscylacje te są zwykle niewidoczne.

Właściwości magnetyczne i magnetoopór warstw wielokrotnych typu $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$

Wprowadzenie

Struktura i własności magnetyczne

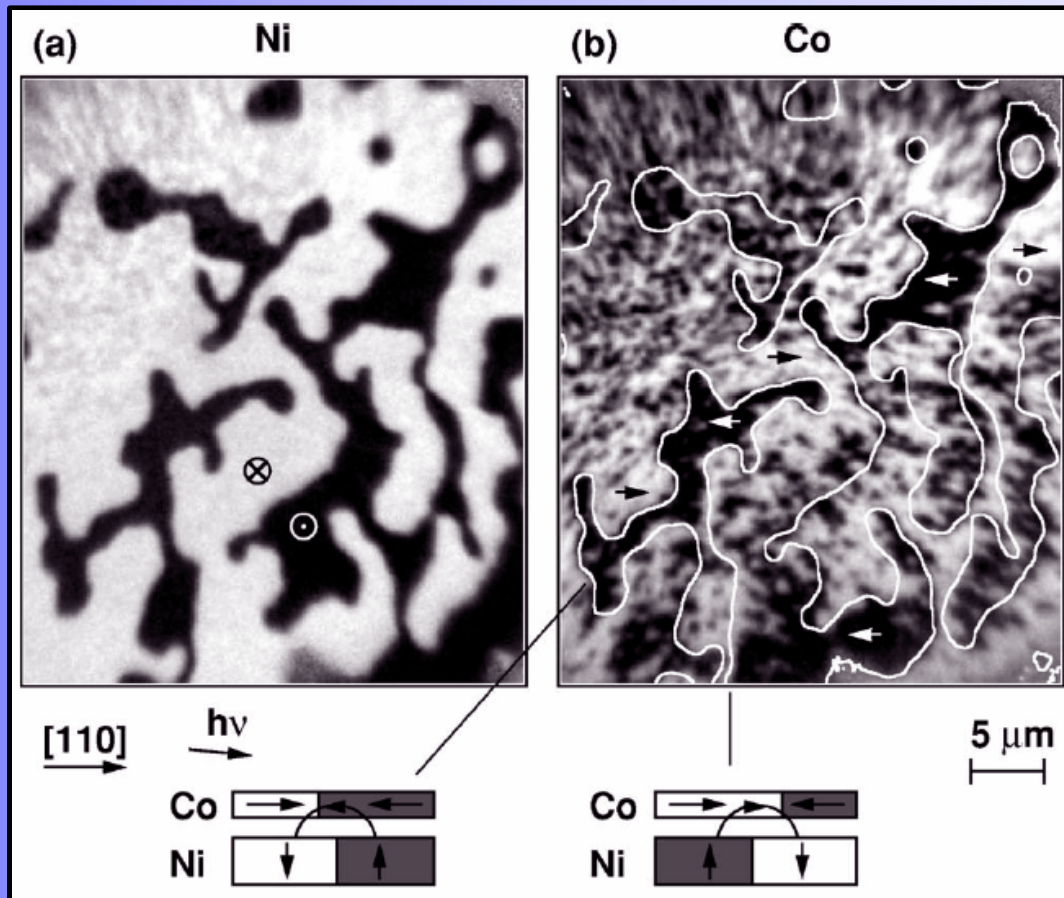
Gigantyczny magnetoopór

Korelacja namagnesowanie-opór

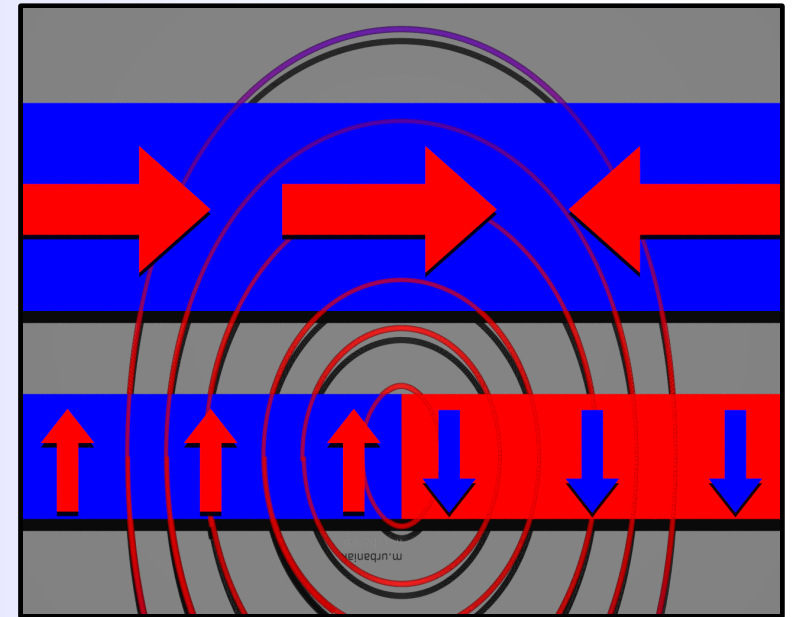
Sprężenie magnetostatyczne

Podsumowanie

Oddziaływania dipolowe w warstwach wielokrotnych

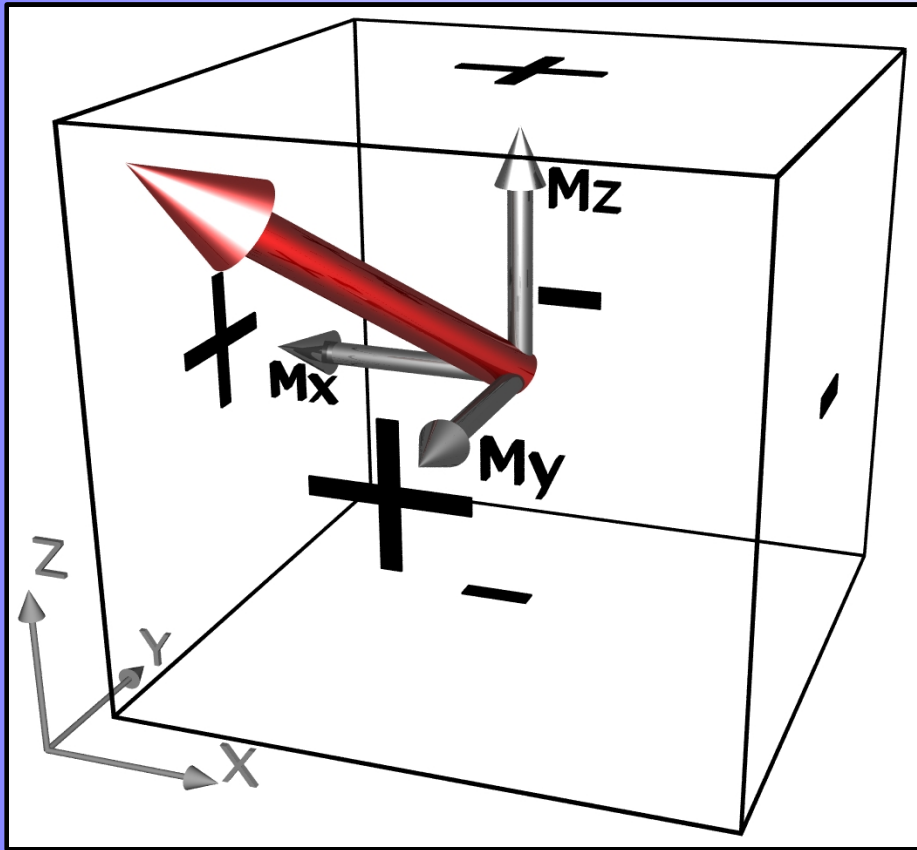


mikroskopia fotoelektronów (PEEM) +
dichroizm magnetyczny promieni X (XMCD)



- Cu(001)/Ni/Cu/Co
- Cu – klin (ok. 1ML/10m)
- odparowanie wiązką elektronów
- Ni - anizotropia prostopadła
- pole DW Ni w Co: 250Oe

Struktura domenowa warstw [NiFe/Au/Co/Au]_N - symulacje



С. В. Вонсовский, МАГНЕТИЗМ
«Наука», 1971

$$r = [(x_n - x_q)^2 + (z_n - z_q)^2 + (z_n - z_q)^2]^{1/2}$$

$$\phi_m^{(i)} = \frac{1}{4\pi} \frac{(\vec{\mu} \vec{r})}{r^3}$$

$$\vec{H} = -\vec{\nabla} \phi$$

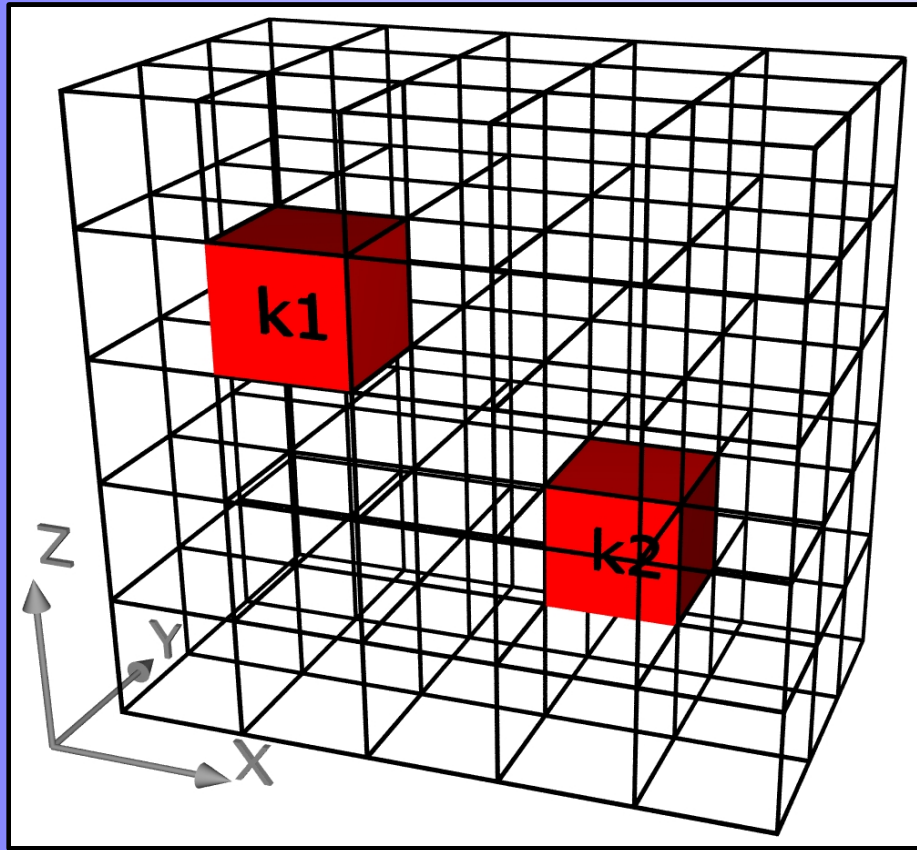
$$\phi_m = \frac{1}{4\pi} \int d\tau (\vec{M} \nabla_q r^{-1})$$

$$(\vec{M} \nabla_q r^{-1}) = \nabla_q (r^{-1} \vec{M}) - \frac{1}{r} \nabla_q \vec{M}$$

$$\phi_m = \frac{1}{4\pi} \left(-\int d\tau \frac{\nabla_q \vec{M}}{r} + \oint dS \frac{\vec{n} \vec{M}}{r} \right)$$

Źródłem wewnętrznego pola magnetycznego są ładunki magnetyczne w objętości układu lub na jego powierzchniach ograniczających.

Struktura domenowa warstw [NiFe/Au/Co/Au]_N - symulacje



Równanie LLG:

$$\dot{\vec{m}} = \frac{\vec{M}}{M_s}$$

$$\frac{d\vec{m}}{dt} = \gamma_0 (\vec{m} \times \vec{H}_{eff}) + \alpha \left[\vec{m} \times \frac{d\vec{m}}{dt} \right]$$

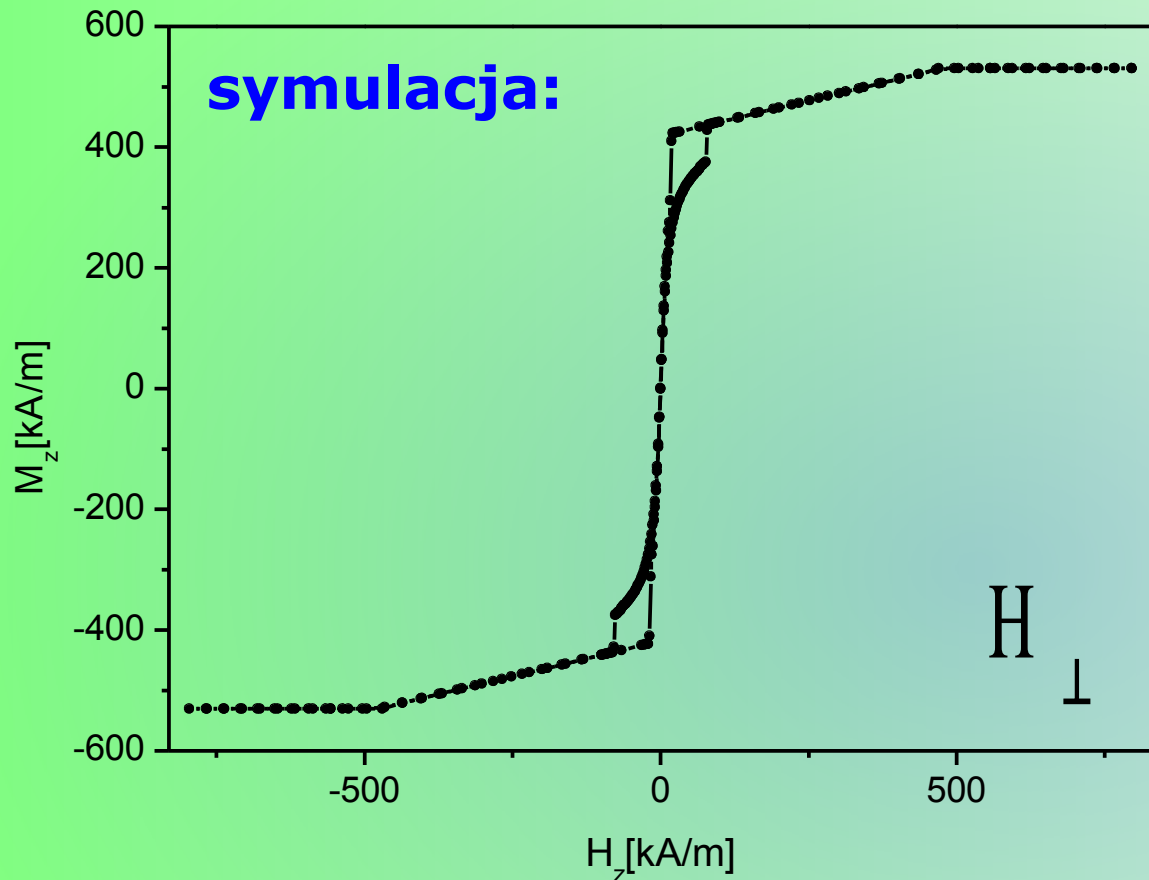
$$\vec{H}_{eff} = \frac{-1}{\mu_0 \vec{M}_s} \frac{\delta \epsilon}{\delta \vec{m}}$$

$$\vec{H}_{eff} = \frac{A}{\mu_0 \vec{M}_s} \frac{\delta (\nabla \vec{m})^2}{\delta \vec{m}} - \frac{1}{\mu_0 \vec{M}_s} \frac{\delta \epsilon_K}{\delta \vec{m}} + \vec{H}_{appl} + \vec{H}_d$$

\vec{H}_{eff} = „energia wymiany” + „energia anizotropii” + „pole zewnętrzne” + „pole własne”

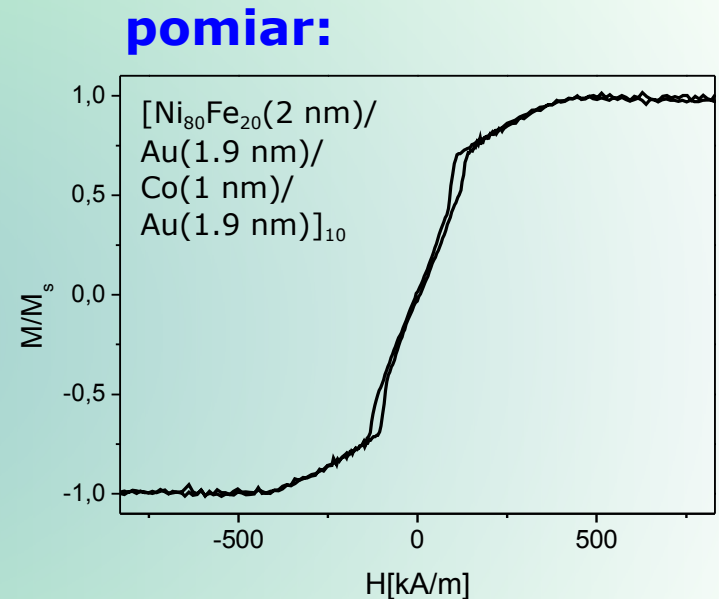
Oddziaływanie magnetostaticzne między komórkami ma charakter globalny.

Struktura domenowa warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ - symulacje



Co-anizotropia prostopadła

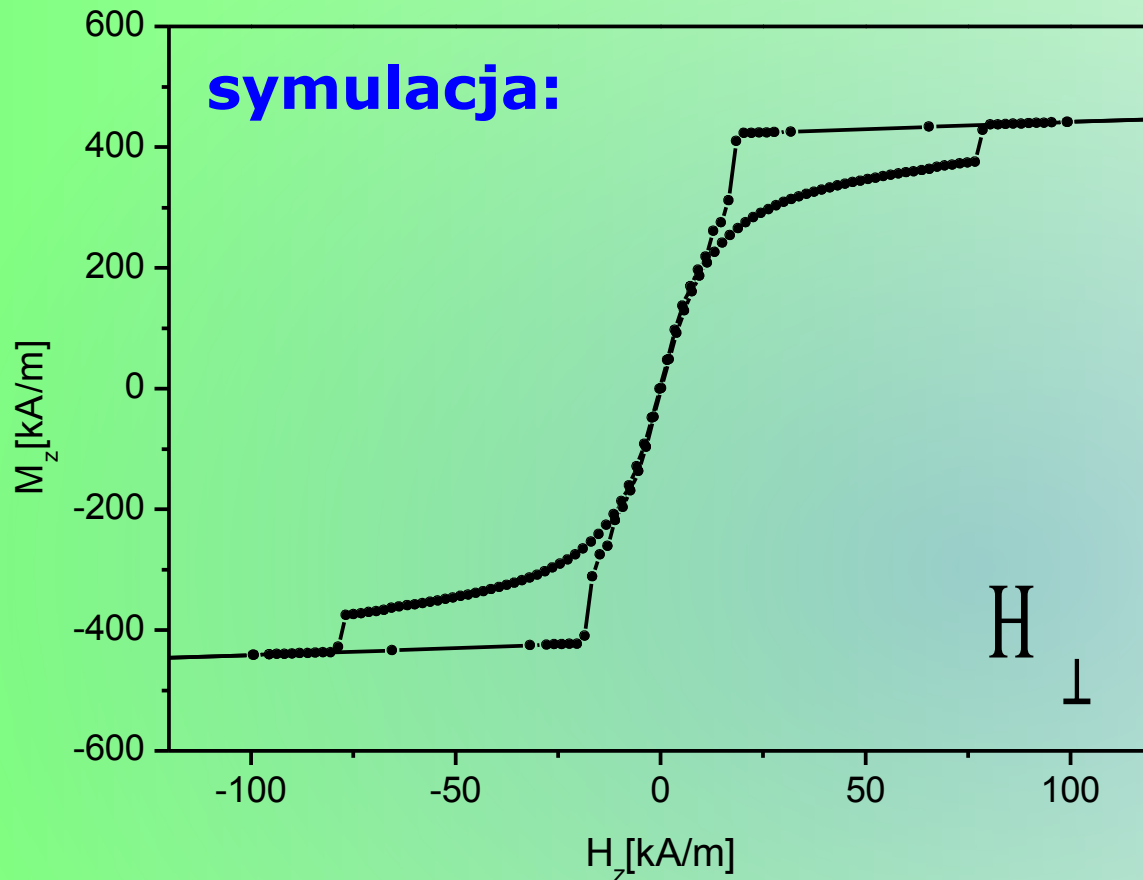
NiFe-anizotropia kształtu



$[\text{Co}(1\text{nm})/\text{przekładka}(1\text{nm})/\text{NiFe}(1\text{nm})/\text{przekładka}(1\text{nm})]_4/\text{Co}(1\text{nm})$

*Symulacja bezpłatnym pakietem oommf z NIST; $(1 \times 1 \mu\text{m}^2) \times 55\text{nm}$; szerokość domen Co 200 nm; $\alpha=0.5$; sieć regularna z komórką $(5 \times 20000 \times 2\text{nm}^3)$; stała wymiany: Co: $30\text{e-}12 \text{ J/m}$, NiFe: $13\text{e-}12 \text{ J/m}$

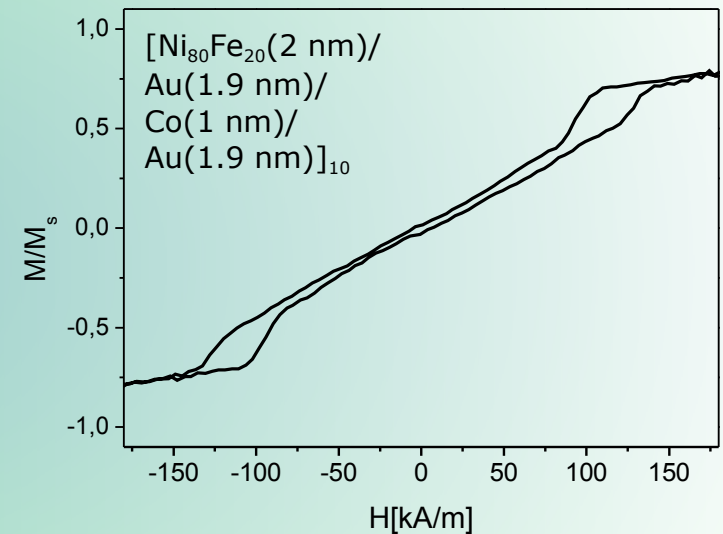
Struktura domenowa warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ - symulacje



Co-anizotropia prostopadła

NiFe-anizotropia kształtu

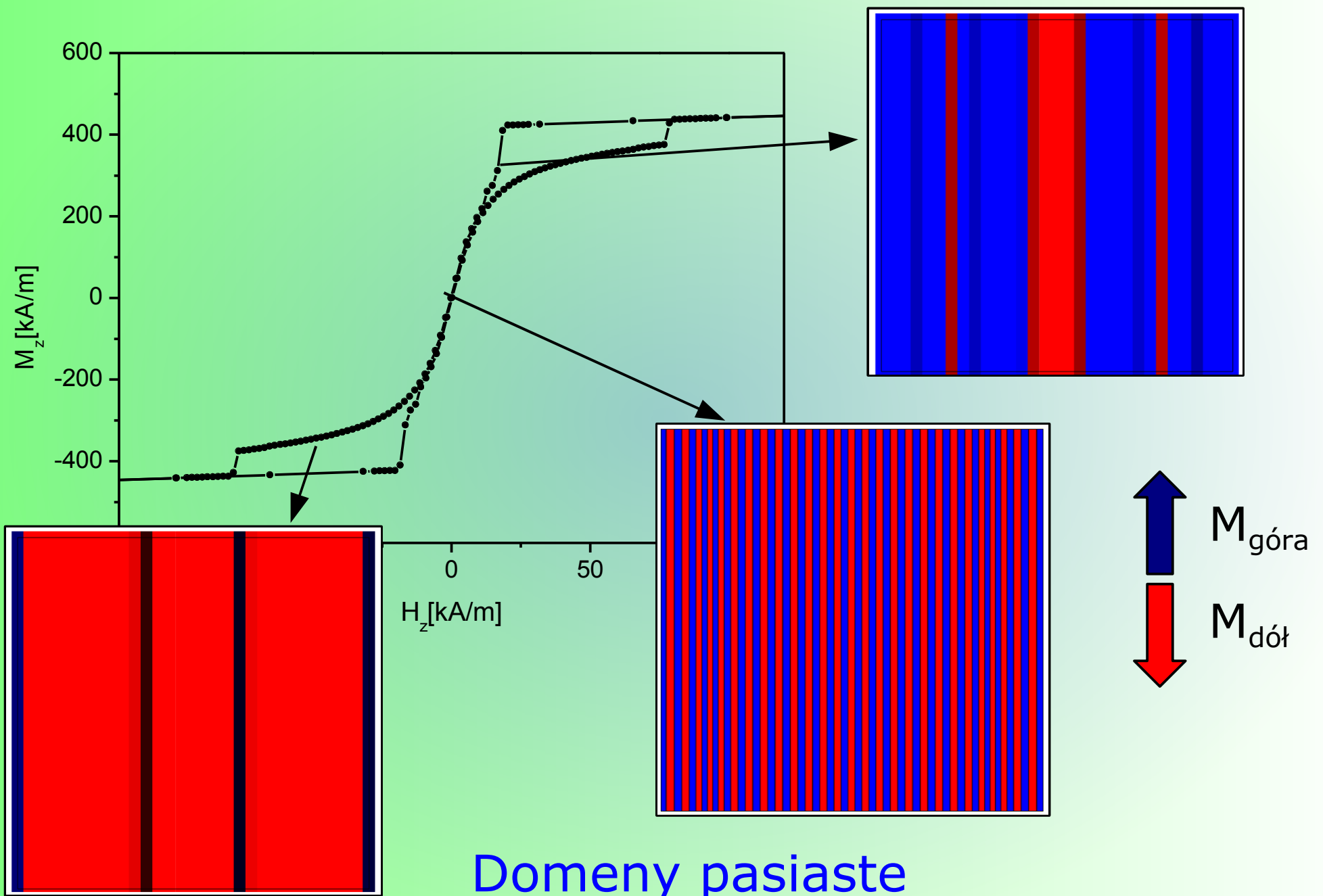
pomiar:



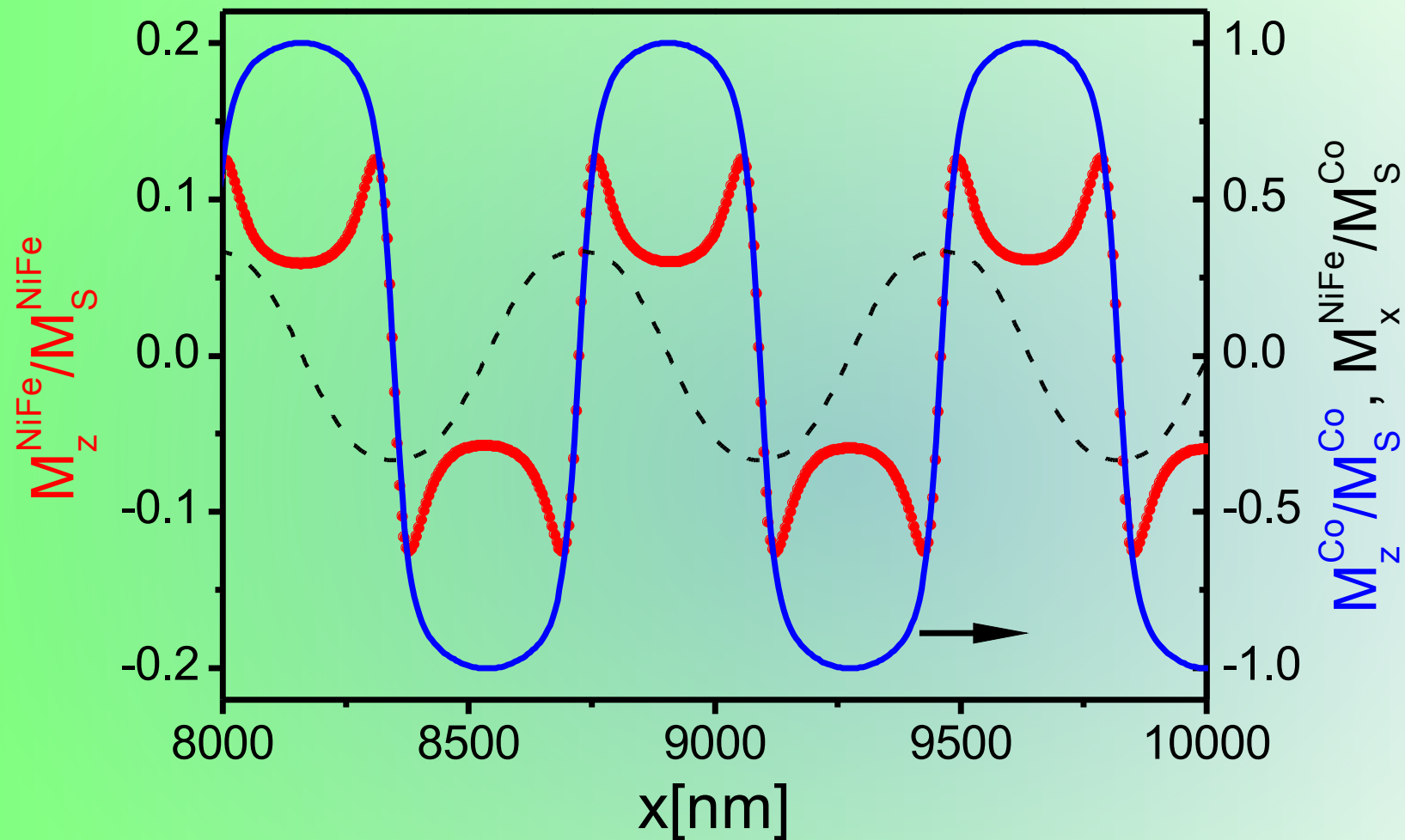
$[\text{Co}(1\text{nm})/\text{przekładka}(1\text{nm})/\text{NiFe}(1\text{nm})/\text{przekładka}(1\text{nm})]_4/\text{Co}(1\text{nm})$

Pola kreacji i anihilacji pasiastej struktury domenowej w symulacji i pomiarze są różne ze względu na różną liczbę subwarstw Co.

Struktura domenowa warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ - symulacje

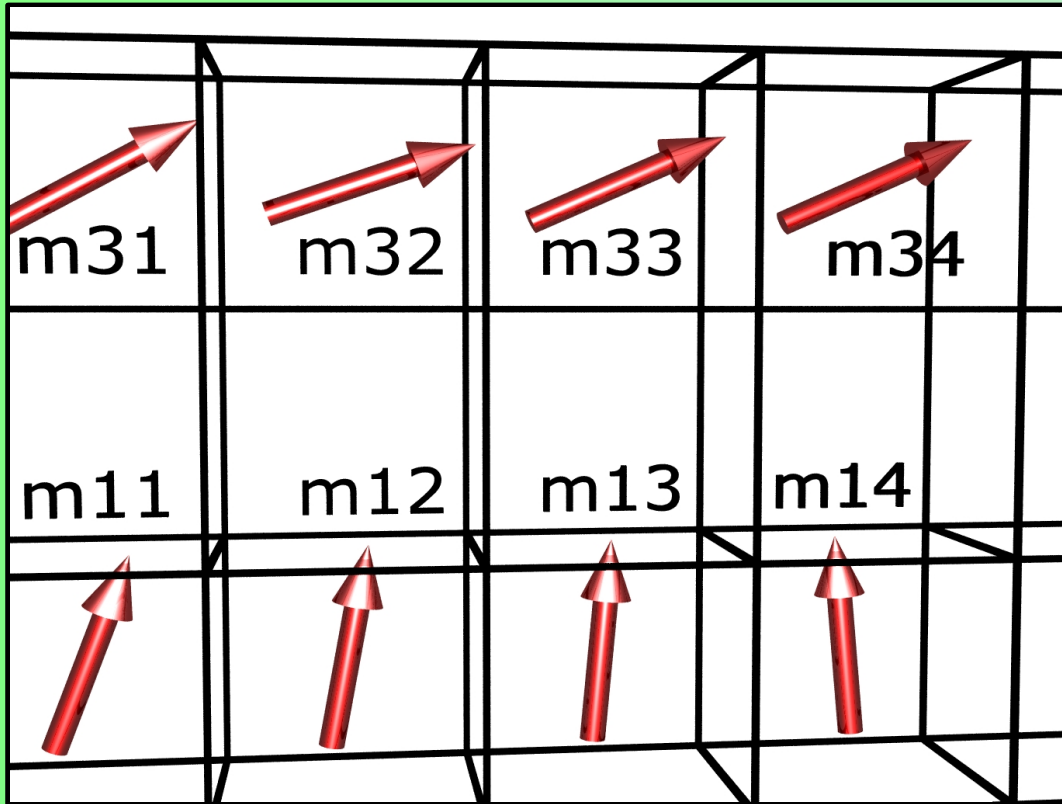


Struktura domenowa warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ - symulacje



Domeny pasiaste subwarstw Co są zreplikowane w **prostopadłej składowej** namagnesowania subwarstw NiFe.

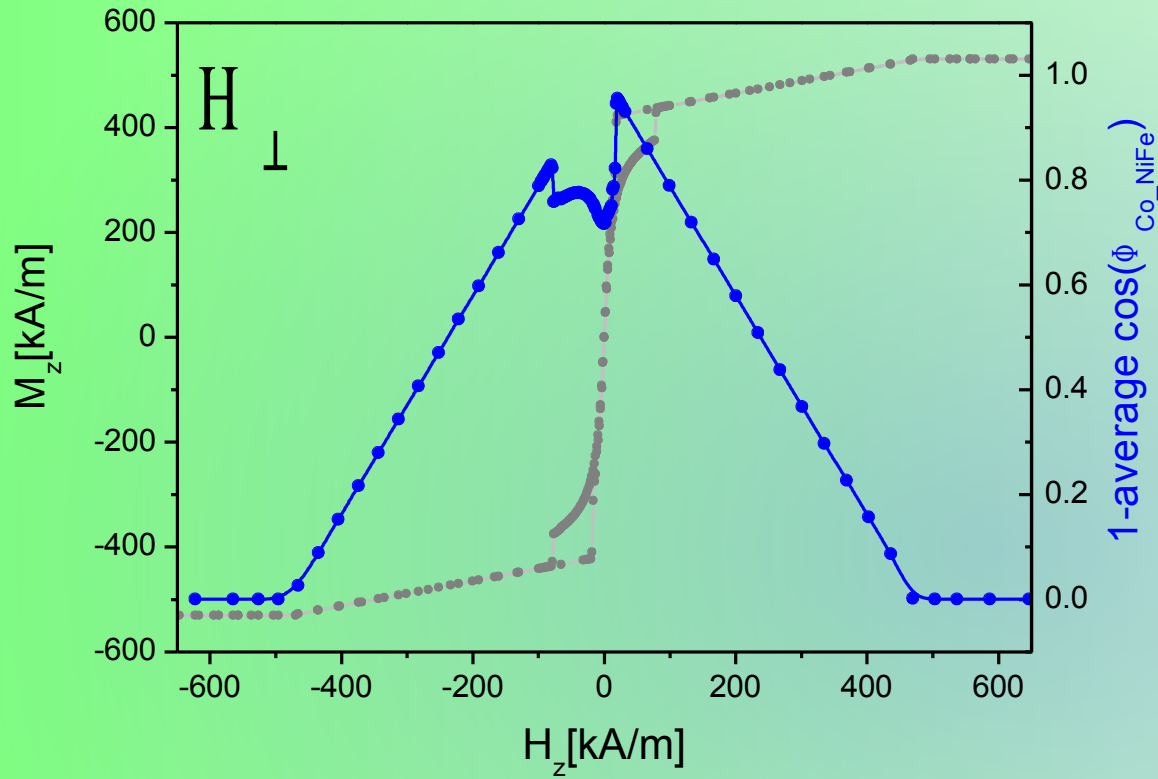
Magnetoopór warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ - symulacje mikromagnetyczne



- zakłada się, że zmienna część oporu elektrycznego warstwy NiFe/Au/Co/Au jest proporcjonalna do średniego kosinusa kątów między momentami magnetycznymi sąsiednich subwarstw magnetycznych
- w poniższych obliczeniach nie uwzględnia się innych rodzajów magnetooporu (OMR, AMR)

$$\Delta R_{GMR} = \frac{1}{n} \sum_n \cos(\phi_{\text{NiFe-Co}})$$

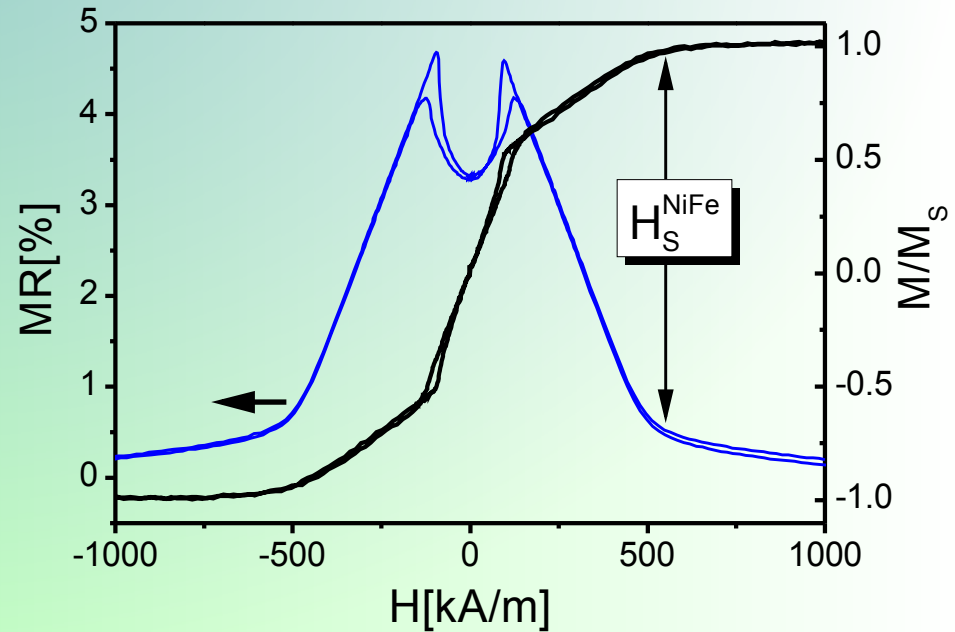
Magnetoopór warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ - symulacje mikromagnetyczne



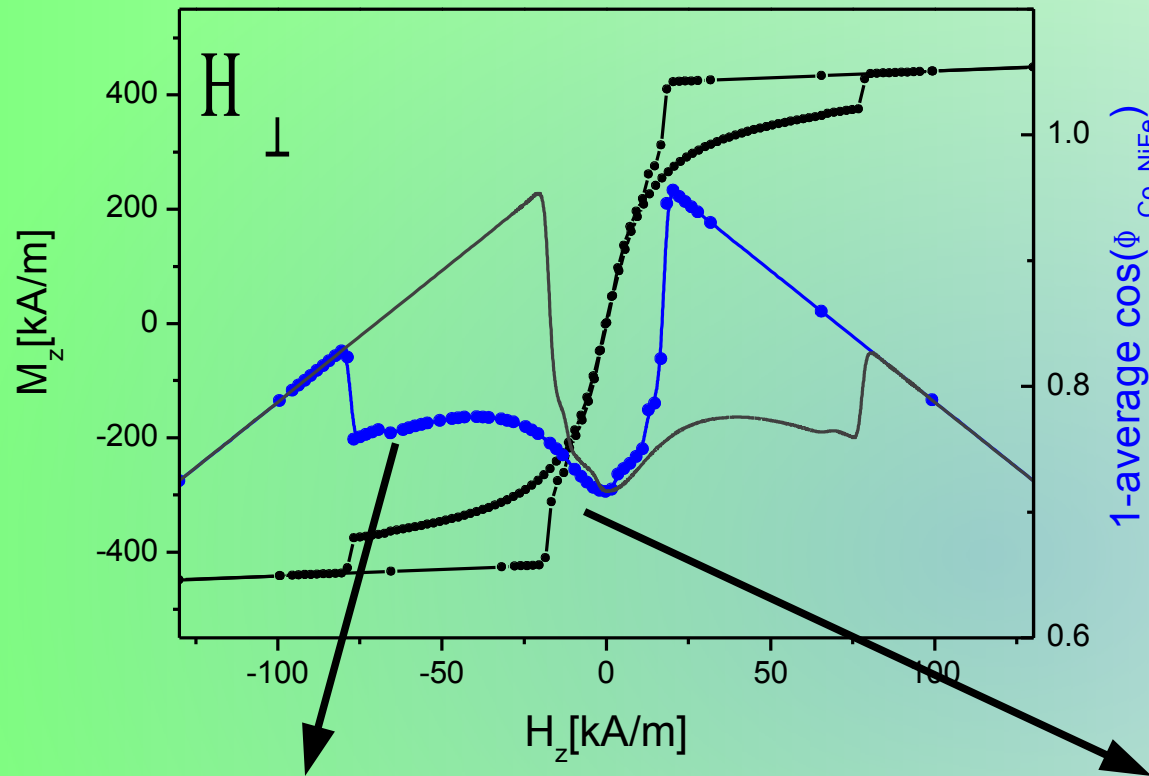
1-average $\cos(\phi_{\text{Co-NiFe}})$

Gigantyczny magnetoopór warstw wielokrotnych NiFe/Au/Co/Au może być odwzorowany za pomocą symulacji mikromagnetycznych.

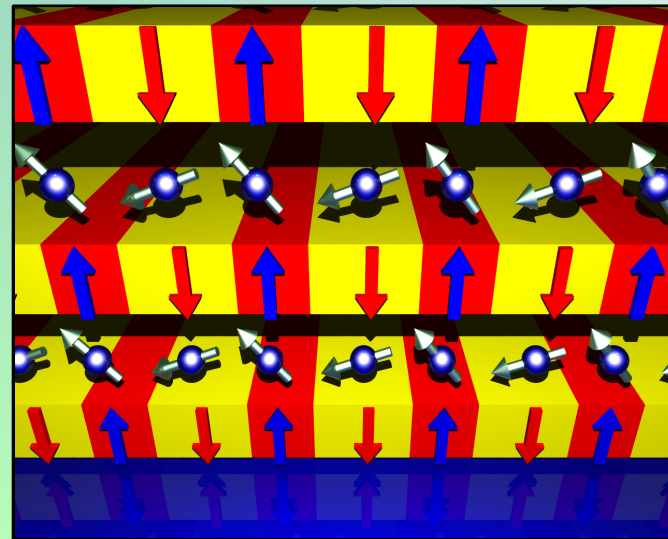
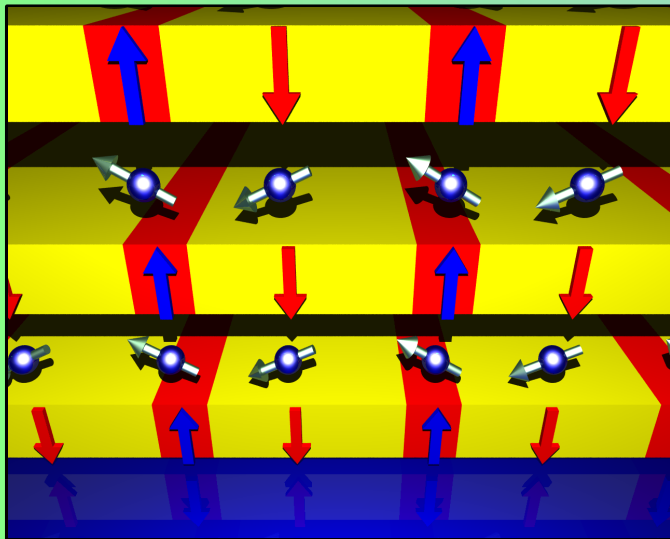
pomiar:



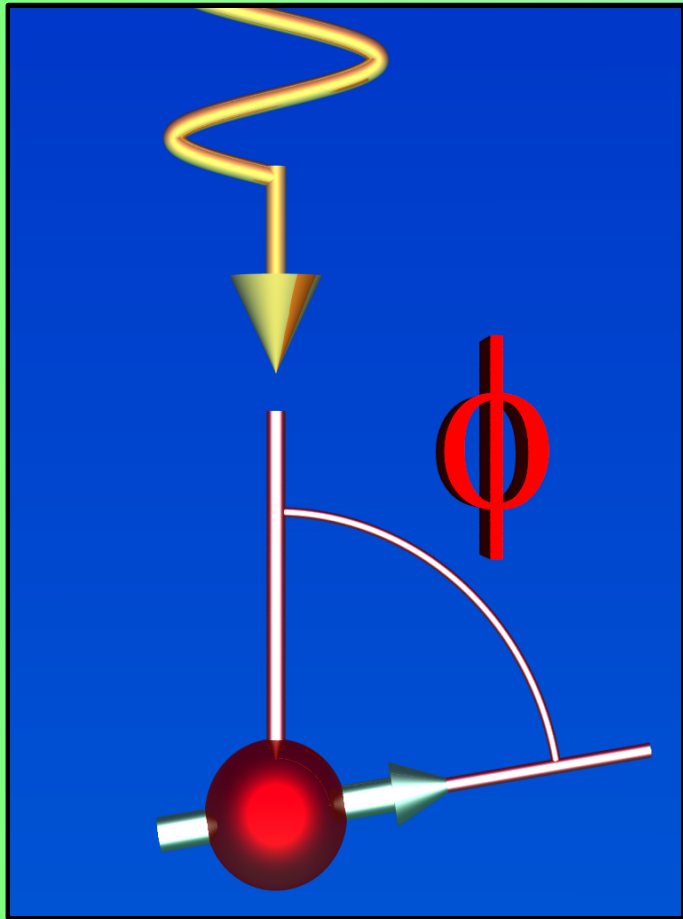
Magnetoopór warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ - symulacje mikromagnetyczne



Minimum oporu występuje w zakresie pól zewnętrznych odpowiadającym największym domenom pasiastym.

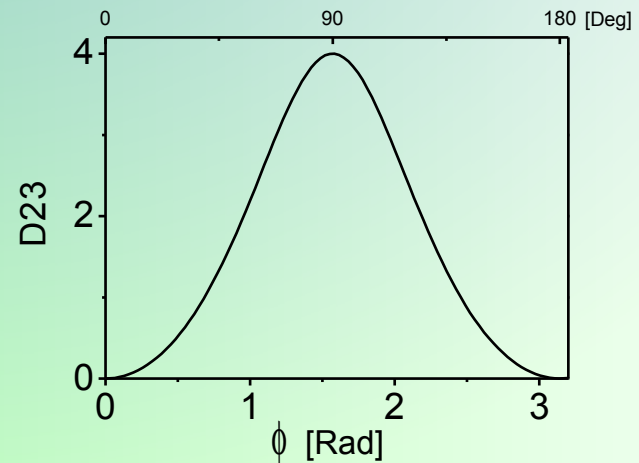
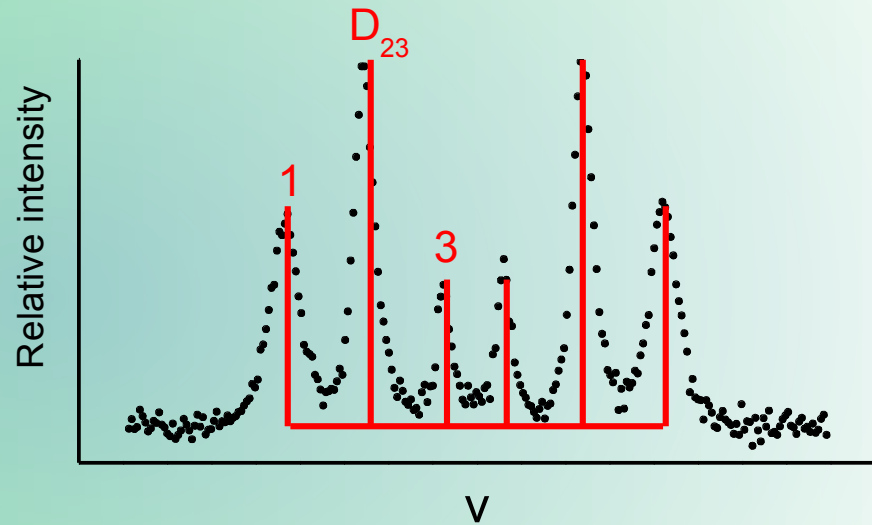


Spektroskopia Mössbauera warstw [NiFe/Au/Co/Au]_N

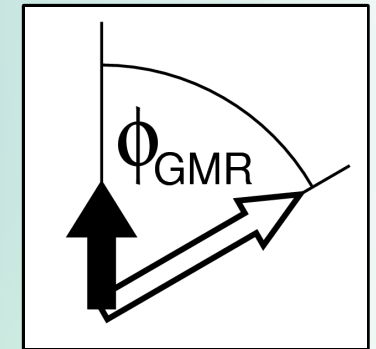
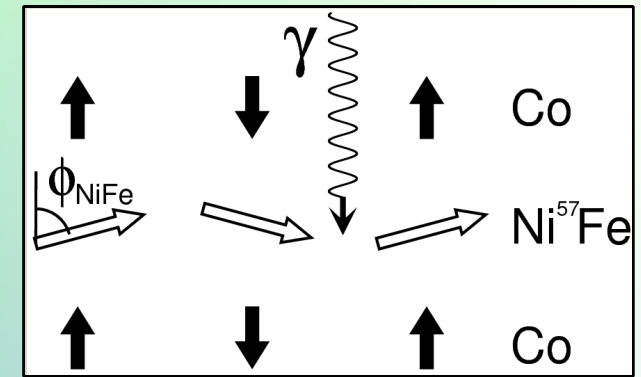
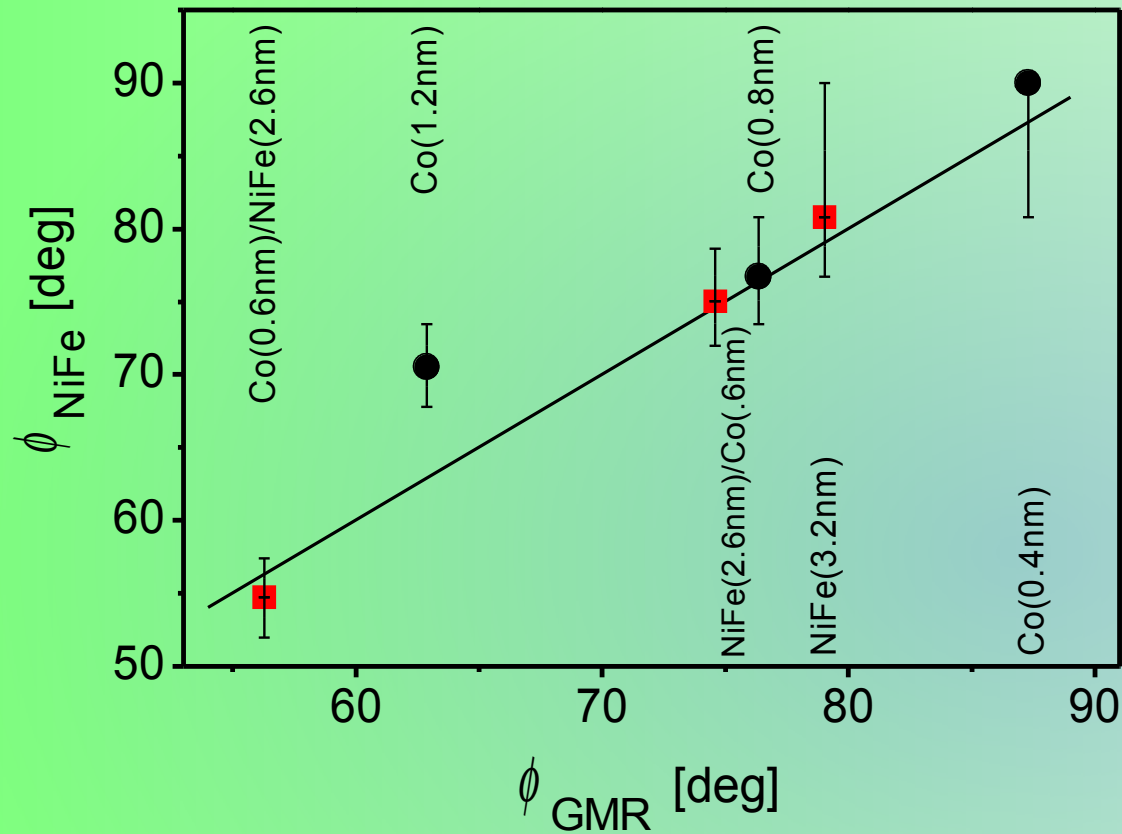


Względna intensywność linii 2 i 3 zmienia się z kątem ϕ między padającym promieniowaniem γ i momentem magnetycznym.

$$D_{23} = \frac{4 \sin^2(\phi)}{(1 + \cos^2(\phi))}$$



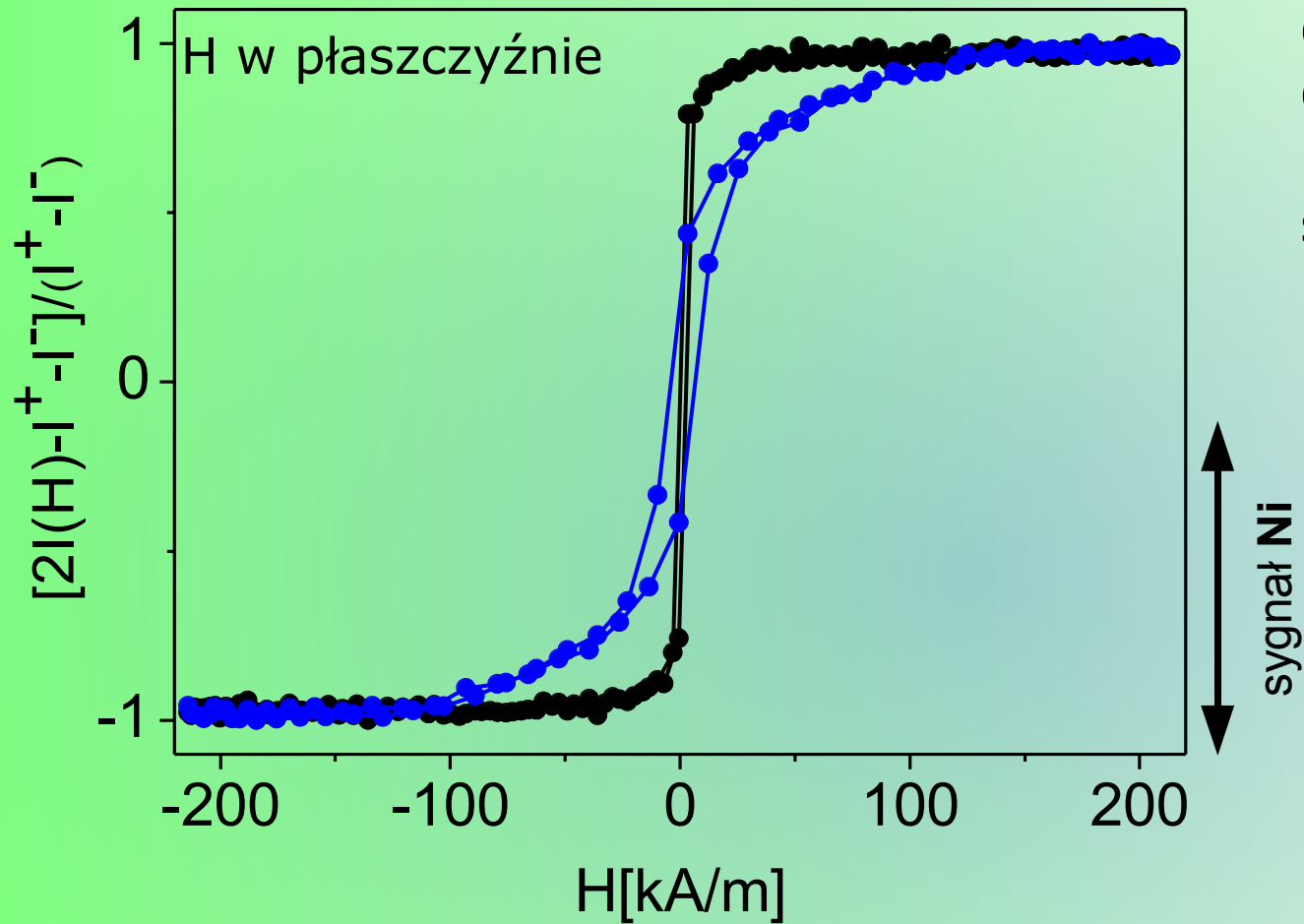
Porównanie wyników spektroskopii Mössbauera i pomiarów GMR



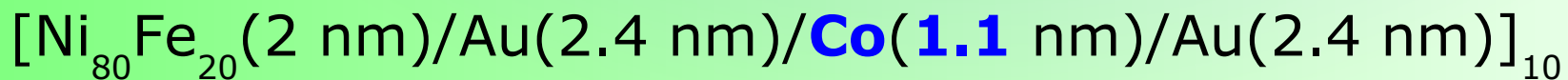
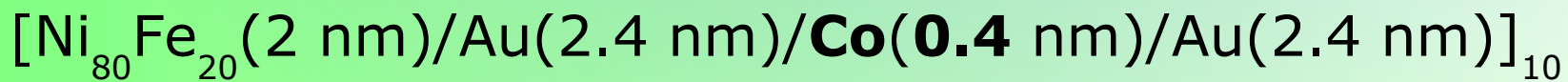
Pola magnetostaticzne pochodzące od subwarstw Co powodują wychylenie momentów magnetycznych subwarstw NiFe. Wychylenie jest tym silniejsze im słabsza jest wypadkowa anizotropia typu łatwa płaszczyzna subwarstw NiFe (lub warstw hybrydowych).

[**X**/Au(2.4 nm)/Co(0.8 nm)/Au(2.4 nm)]₁₀
 [Ni₈₀Fe₂₀(2 nm)/Au(2.4 nm)/**Co**/Au(2.4 nm)]₁₀

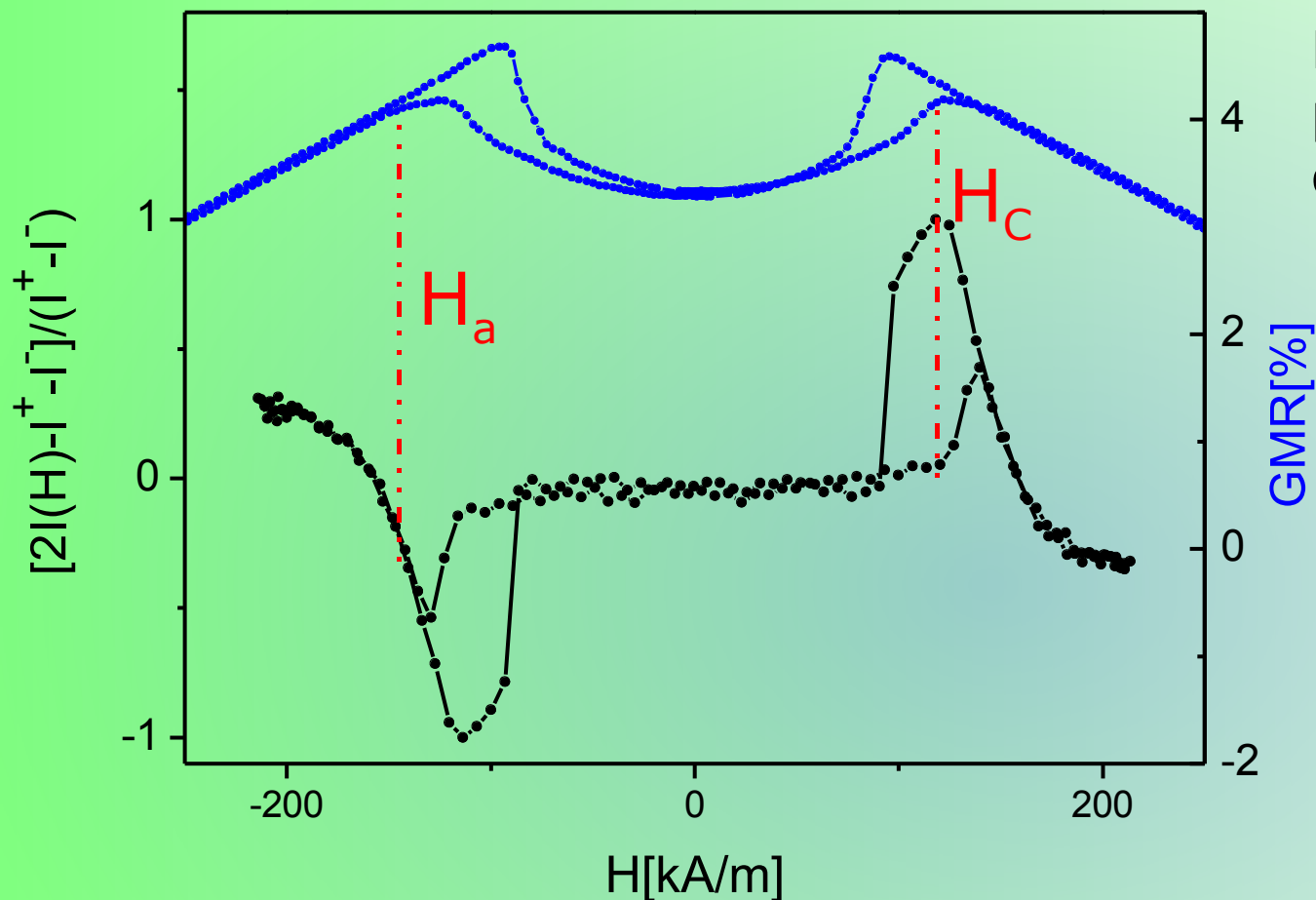
Rezonansowe magnetyczne rozpraszanie promieni X (SXRMS)



Grubsze subwarstwy Co silniej wpływają na przemagnesowanie subwarstw NiFe.



Rezonansowe magnetyczne rozpraszanie promieni X (SXRMS)

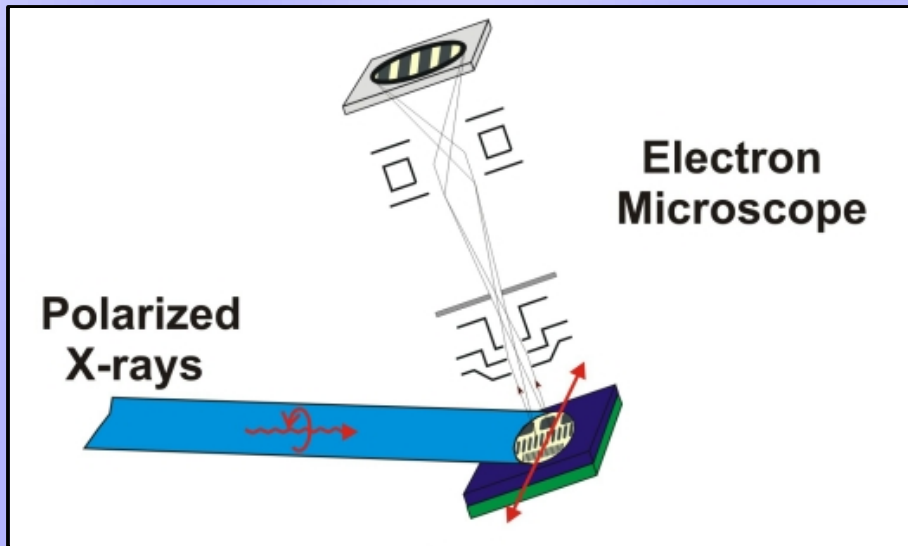


Pole magnetyczne przyłożone prostopadle do powierzchni warstwy

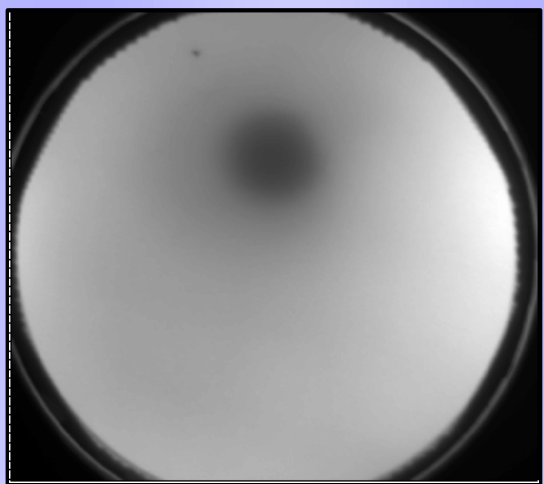
Sygnal SXRMS pochodzący od subwarstw **NiFe** pokazuje pola charakterystyczne dla przemagnesowania subwarstw Co:

- tworzenia pasiastej struktury domenowej (H_c)
- anihilacji struktury domenowej (H_a)

$[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(\mathbf{2\text{ nm}})/\text{Au}(2\text{ nm})/\text{Co}(1.1\text{ nm})/\text{Au}(2\text{ nm})]_{10}$

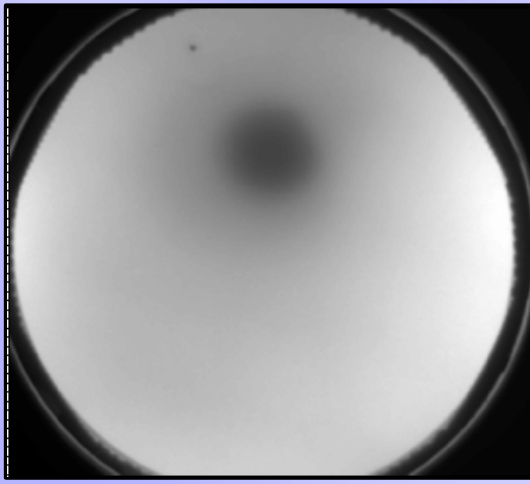


*graphics from: ssrl.slac.stanford.edu/stohr/xmcd.htm



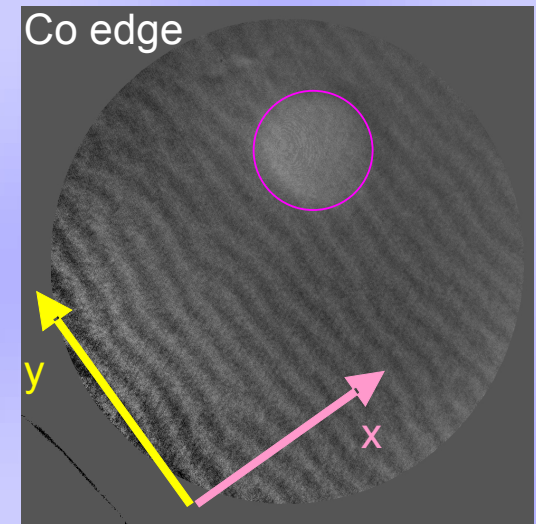
σ^L

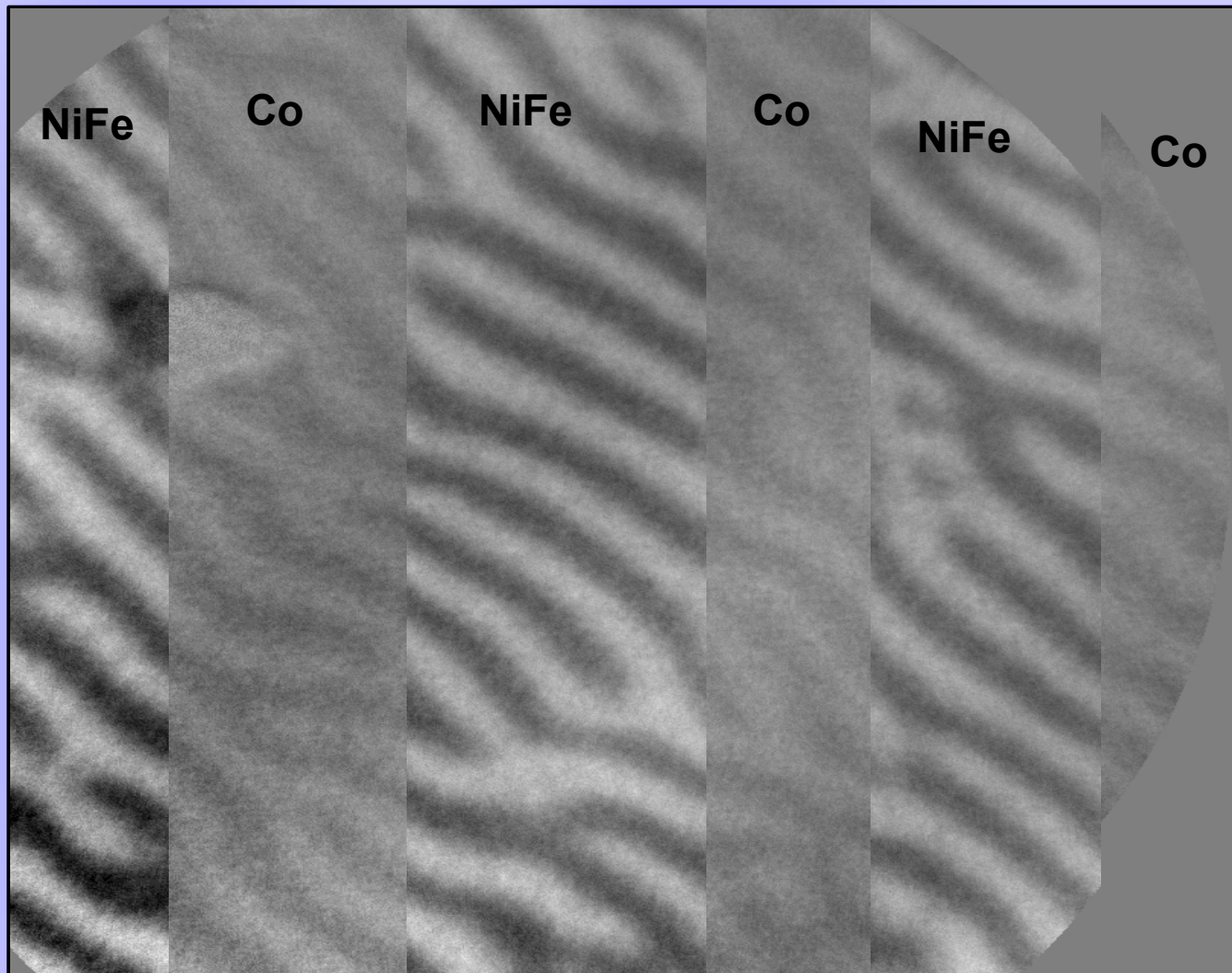
-



σ^R

=





po namagnesowaniu ex-situ polem w płaszczyźnie 0.7T

Eksperymentalne potwierdzenie replikacji domen Co w prostopadłej składowej namagnesowanie subwarstw NiFe.

$[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(2 \text{ nm})/\text{Au}(2 \text{ nm})/\mathbf{Co}(0.8 \text{ nm})/\text{Au}(2 \text{ nm})]_{10}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(2 \text{ nm})$

Wnioski

- Pomiary własności magnetycznych i transportu elektrycznego dowodzą istnienia magnetostaticznego sprzężenia między subwarstwami Co i NiFe w warstwach wielokrotnych typu NiFe/Au/Co/Au.
- Źródłem oddziaływania magnetostaticznego jest obecność pasiastej struktury domenowej w subwarstwach Co.
- Selektywne ze względu na pierwiastki chemiczne metody pomiarów własności magnetycznych dowodzą wpływ pasiastej struktury domenowej subwarstw Co na przemagnesowanie subwarstw NiFe.
- Symulacje mikromagnetyczne potwierdzają, że obserwowane zależności $R(H)$, z lokalnym minimum oporu w zakresie odpowiadającym histerezie subwarstw Co, związane są z obecnością domen pasiastych.

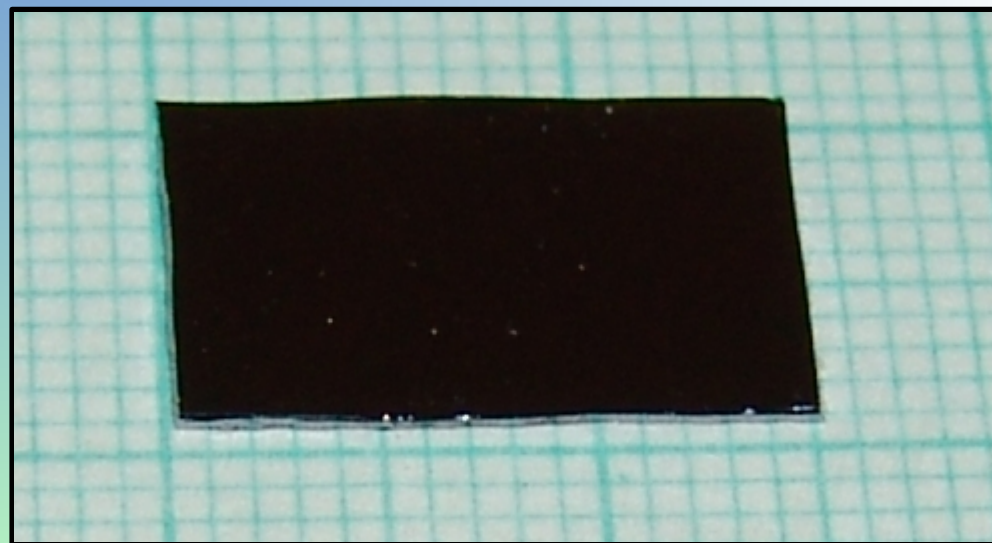
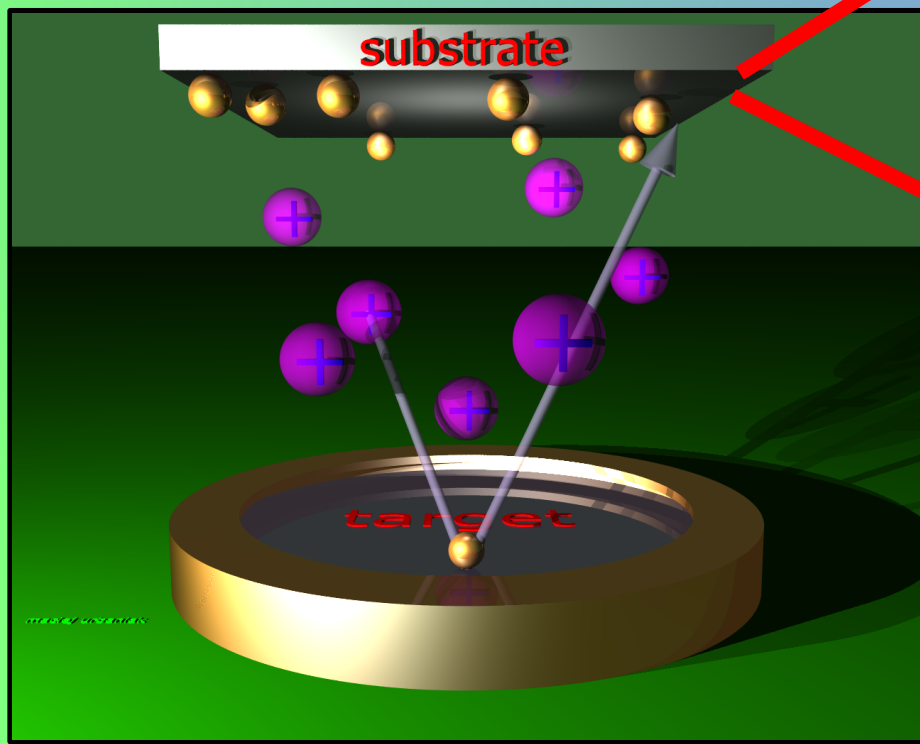
Dziękuję

za

uwagę

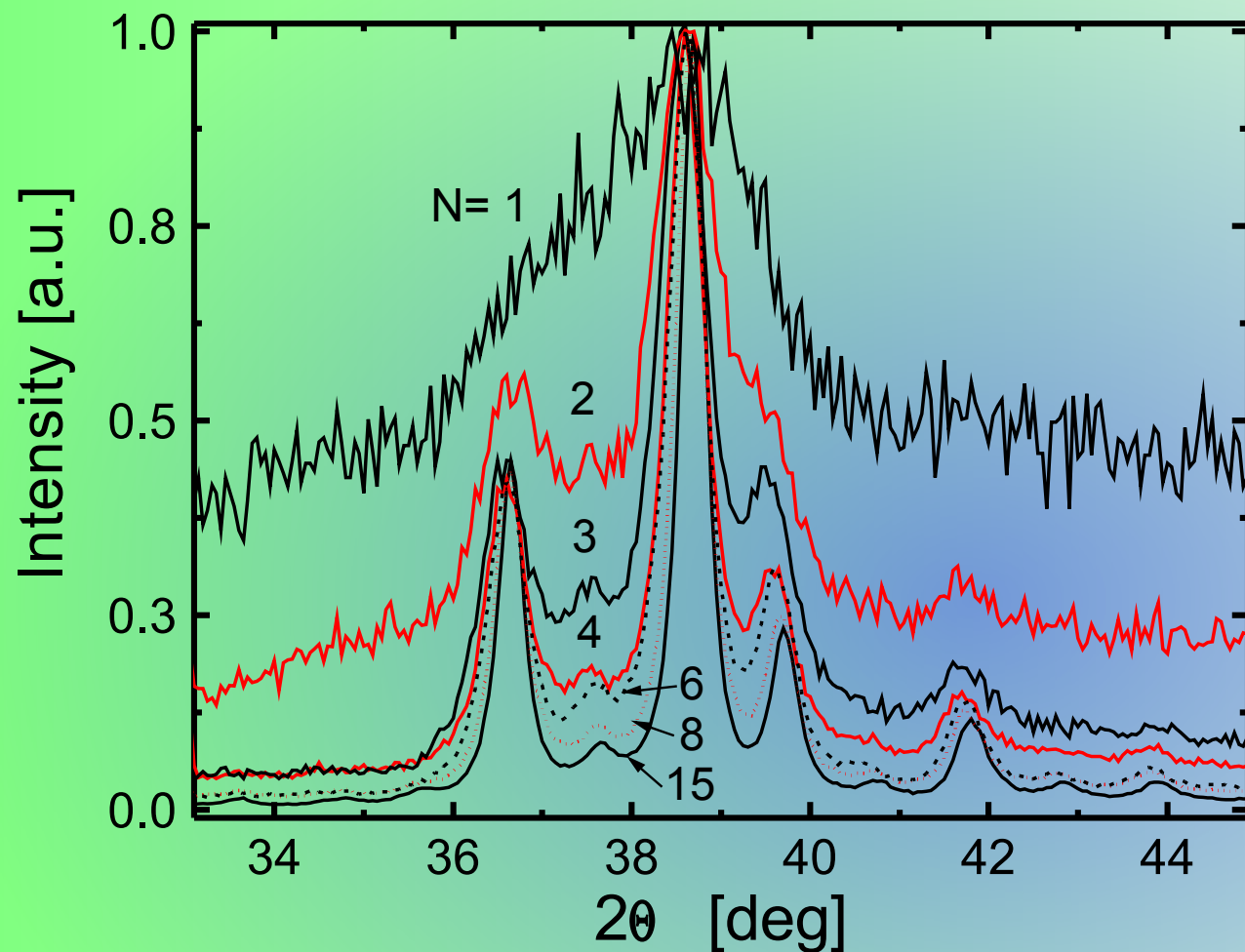
Otrzymywanie

Właściwości warstw nanoszonych na **podłoża elastyczne** są zbliżone do właściwości warstw nanoszonych na Si(100).



Rozpylanie katodowe

Struktura i własności magnetyczne

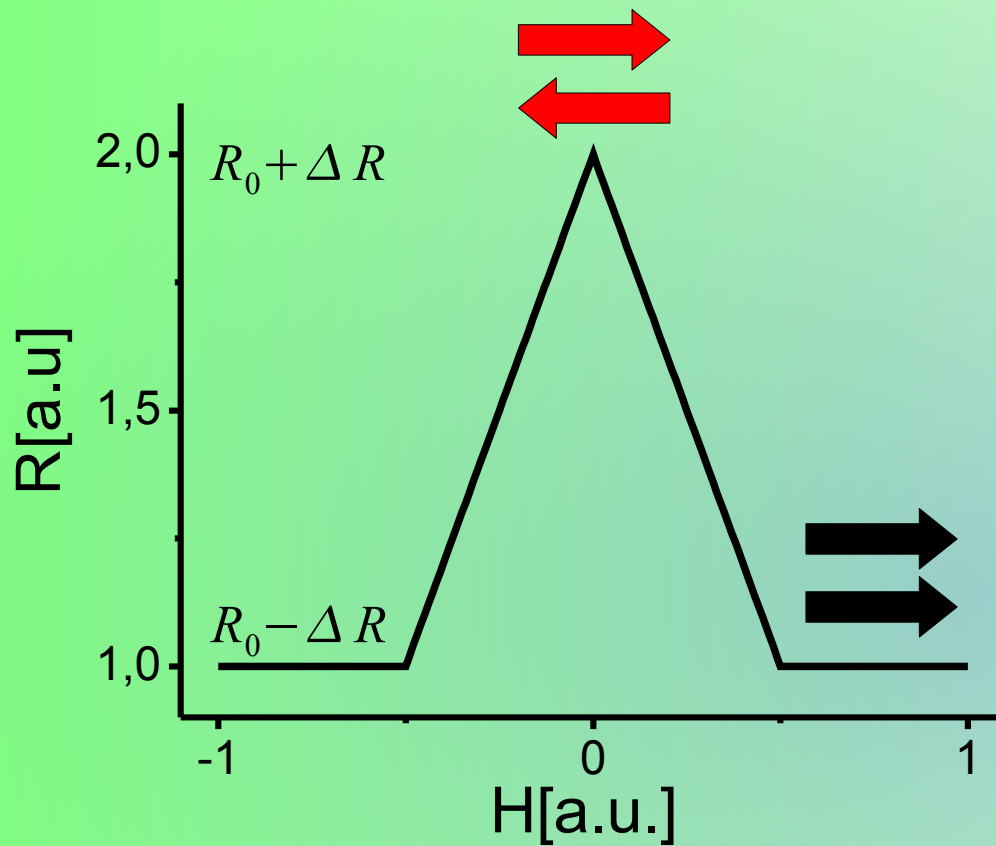


“the profile for MLs with $N = 3$ shows all features typical of profiles for large N .”

$[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(2 \text{ nm})/\text{Au}(3 \text{ nm})/\text{Co}(0.8)/\text{Au}(3 \text{ nm})]_N$

Cu $K\alpha$ 0.154nm

Gigantyczny magnetoopór



$$2\Delta R / (R_0 - \Delta R) = 1 \div 100 \%$$

Co/Au,
NiFe/Au,
NiFe/Cu,
Fe/Au,.....

$$R = R_0 - \Delta R \cos(\varphi)$$

trójwarstwowy
Co/Au(111)/Co

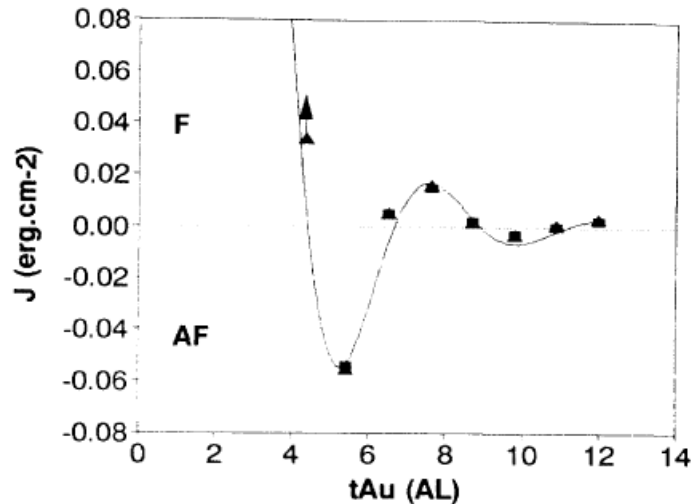


FIG. 5. Dependence of the exchange coupling J between Co layers versus the thickness t_{Au} of the Au(111) interlayer. J was determined in the trilayer schematized in Fig. 3: (square) from field shift in the minor hysteresis loops [cf. Fig. 4(b)], and (triangle) from the field H_2 in the full hysteresis loops [cf. Fig. 4(a)]. The arrow for $t_{Au}=4.36$ AL means that, due to imperfect separation between magnetization reversals in the two layers, the value reported here must be considered as a lower estimate. Continuous line: theoretical fit of experimental data to Eq. (3) (RKKY model), with $I_0=33.8$ ergs cm⁻², $\Lambda=4.5$ AL, $\psi=0.11$ rad, $t_c=5$ AL, and $m^*/m=0.16$.

V. Grolier et al., Phys.Rev.Lett.**71**, 3023 (1993)

-odparowanie wiązką elektronową lub z łódki
-interfejsy **płaskie na poziomie monowarstw**
(terasy o szerokości 30nm)

warstwy
wielokrotne

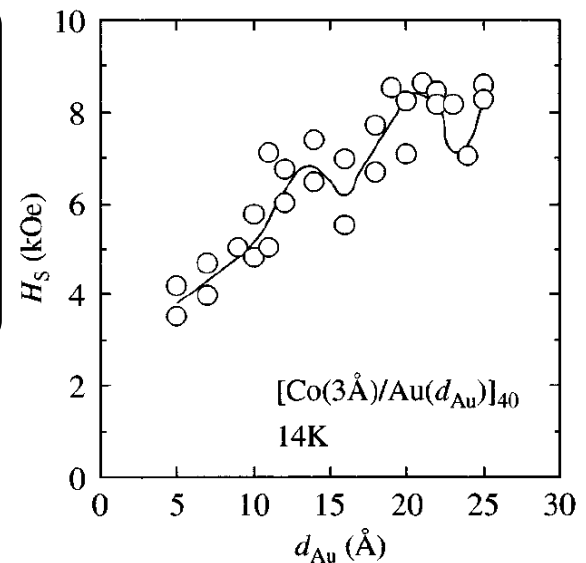


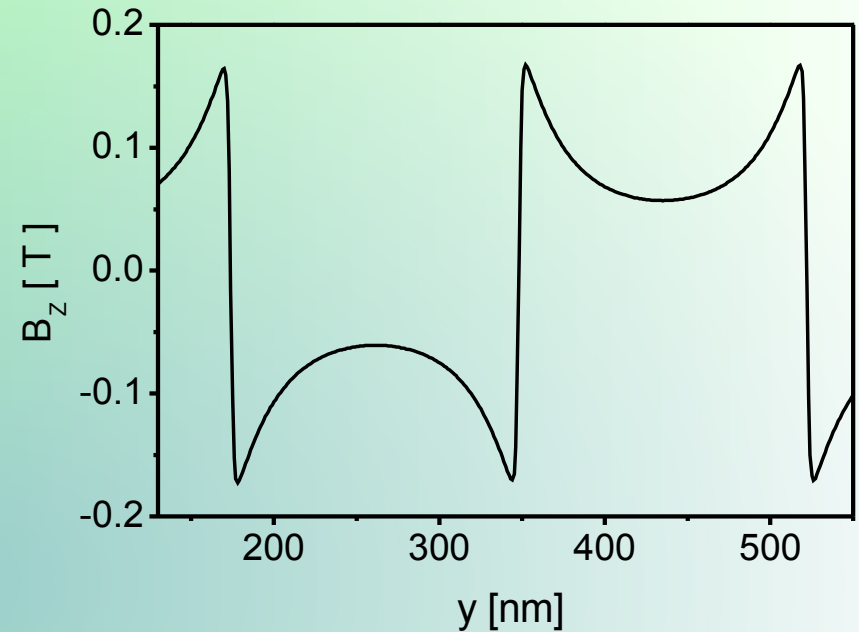
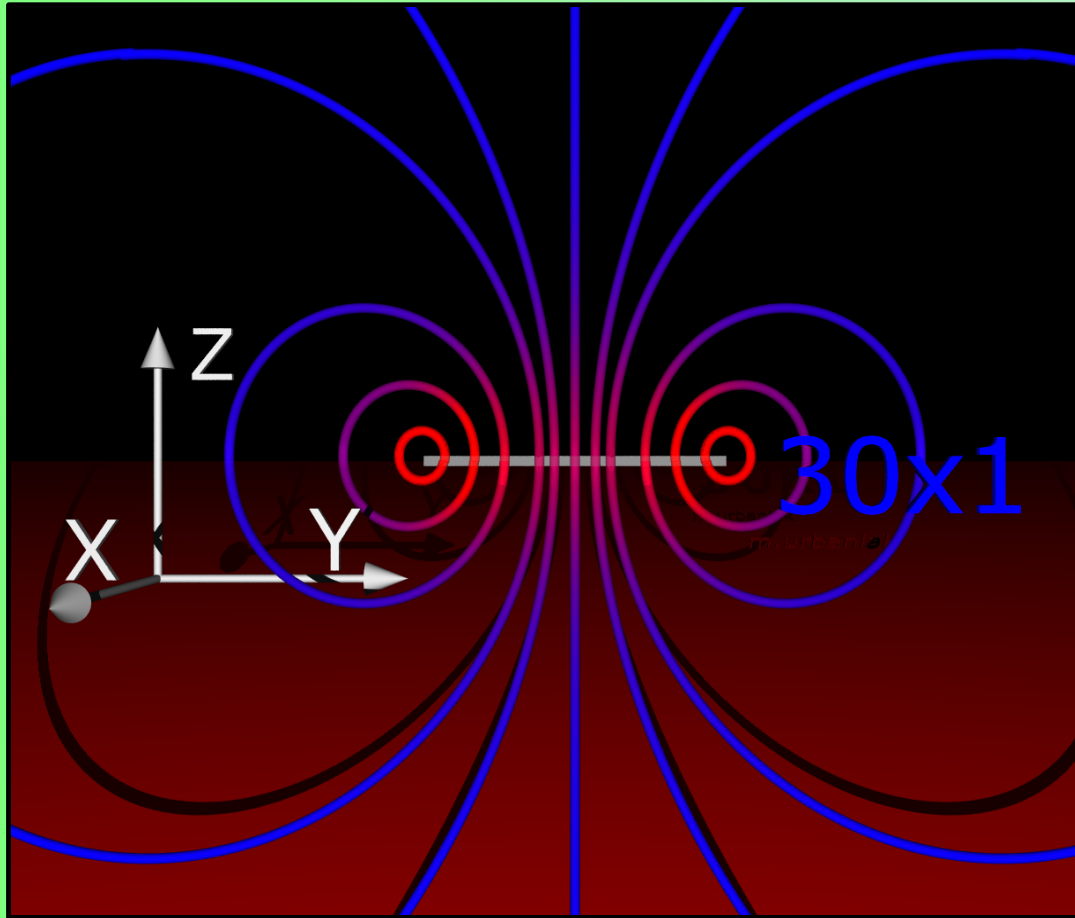
FIG. 9. Saturation field H_s at 14 K vs d_{Au} for [Co(3 Å)/Au(d_{Au})]₄₀ MLs.

S. Hond et al., J. Appl. Phys.**80**, 5175 (1996)

odparowanie wiązką elektronową

"This [niskokątowa dyfrakcja] implies that the layer **structure becomes slightly obscure** or the continuity of Co layer is broken at local points, although the periodic structure is held for the Co layer of 1 or 2 monolayers."

Pola magnetostaticzne w warstwach $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$



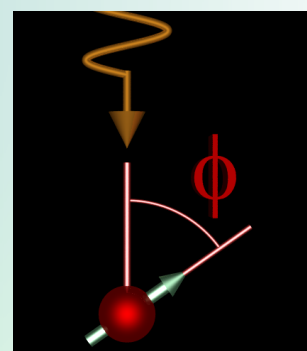
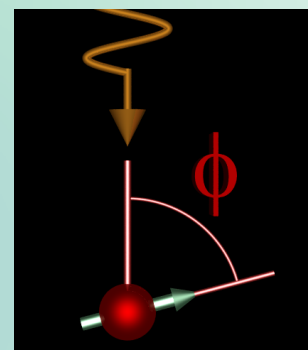
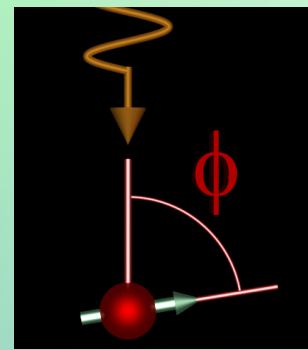
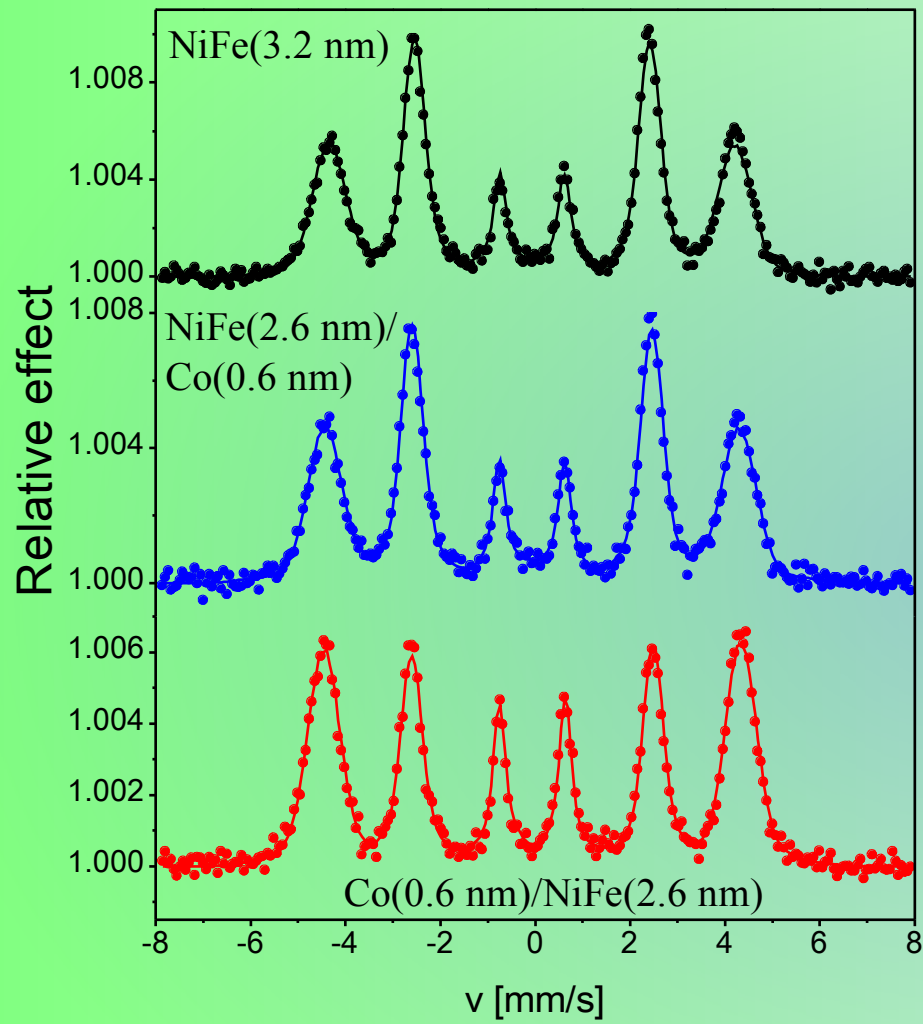
Model:

szerokość domen: 174 nm

$t_{\text{Co}}=0.6$ nm **10 warstw Co**

Pola magnetyczne pochodzące od pasiastej struktury domenowej są w badanych warstwach $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ rzędu 0.1 T.

Spektroskopia Mössbauera warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$

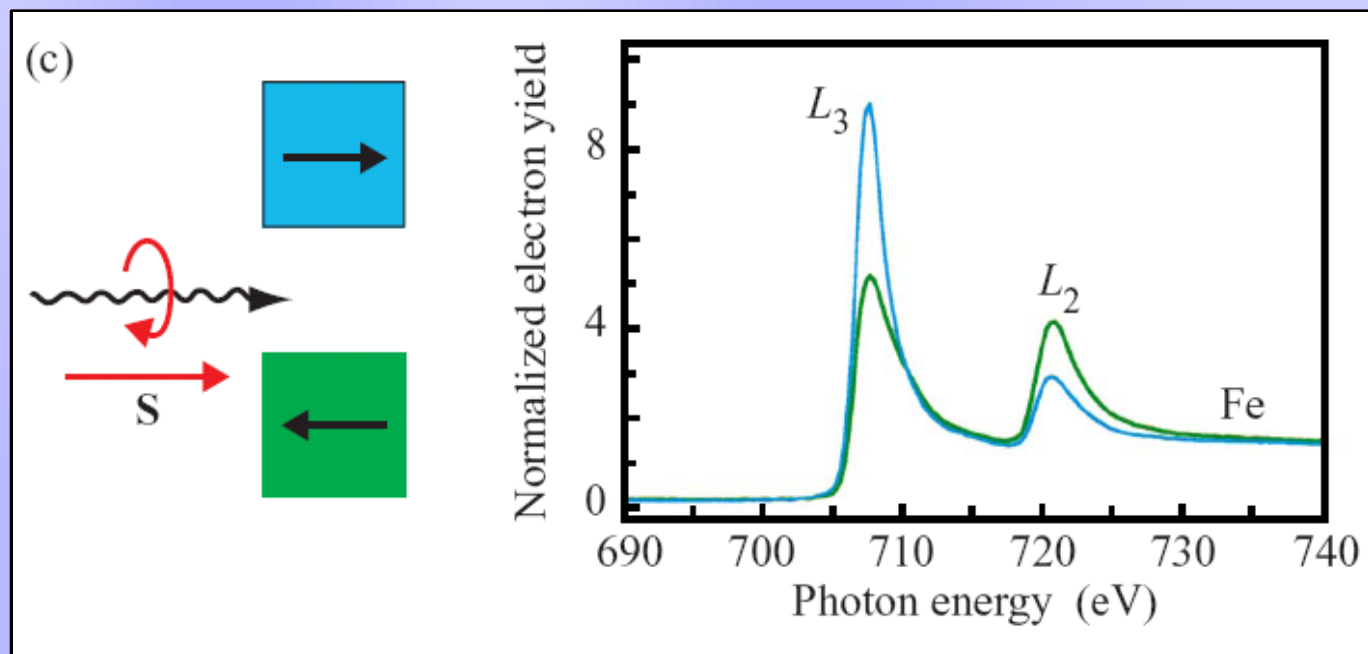


$[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(3.2 \text{ nm})/\text{Au}(2.4 \text{ nm})/\text{Co}(0.8 \text{ nm})/\text{Au}(2.4 \text{ nm})]_{10}$

$[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(2.6 \text{ nm})/\text{Co}(0.6 \text{ nm})/\text{Au}(2.4 \text{ nm})/\text{Co}(0.8 \text{ nm})/\text{Au}(2.4 \text{ nm})]_{10}$

$[\text{Co}(0.6 \text{ nm})/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(2.6 \text{ nm})/\text{Au}(2.4 \text{ nm})/\text{Co}(0.8 \text{ nm})/\text{Au}(2.4 \text{ nm})]_{10}$

Rezonansowe magnetyczne rozpraszanie promieni X (SXRMS)



Światło kołowo spolaryzowane

$\lambda \approx 1.4$ nm

Oddziaływanie z elektronami rdzenia

Energia fotonów dopasowana do progu absorpcji



czułość ze względu na pierwiastek

*

SXRMS at BESSY – measurement of the intensity of a reflected X-ray versus the external magnetic field (θ - 2θ geometry).

głębokość próbkowania ~ 10 nm

Dyfraktometr ALICE na linii UE56/2-PGM2 w BESSY II (Berlin)

*grafika z: ssrl.slac.stanford.edu/stohr/xmcd.htm
see ssrl.slac.stanford.edu/stohr/X-Rays_and_Magnetism.ppt