

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

Maciej Urbaniak

Instytut Fizyki Molekularnej PAN
Poznań 19.11.2008

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

MnIr/CoFe1/Cu/NiFe1/Cu/NiFe2/MnIr

[Co1/Au/Co2/Au]_N

[NiFe/Cu]_N

[NiFe/Au/Co/Au]_N

[NiFe/CuAgAu/Co/CuAgAu]_N

MnIr/CoFe/Al+O_x/NiFe

Cu/NiFe/V/NiFe/MnIr/Cu

Spis prac stanowiących podstawę rozprawy habilitacyjnej

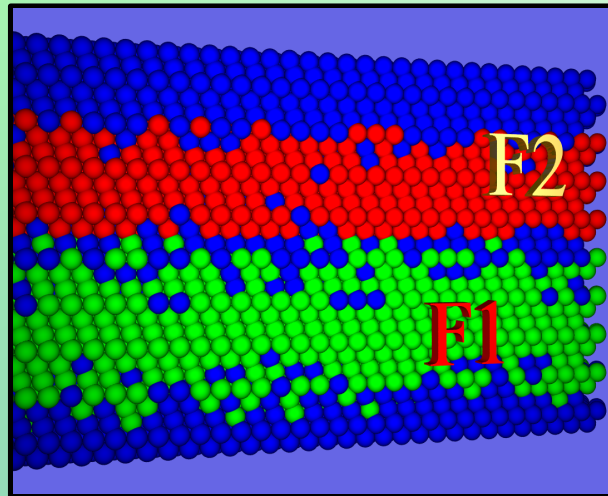
- [U.1] M. Urbaniak, H. Brückl, F. Stobiecki, T. Luciński and G. Reiss, Néel's Magnetostatic Coupling in Sputtered Cu/Py/V/Py/MnIr/Cu Multilayers, [Acta Phys. Polon. A](#) **105**, 307 (2004)
- [U.2] M. Urbaniak, F. Stobiecki, T. Luciński, B. Szymański, Magnetization and magnetoresistance correlation 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](#) ???, ??? (2008)
- [U.10] M. Urbaniak, Giant magnetoresistance as a probe of magnetostatic coupling in NiFe/Au/Co/Au multilayers, [J. Appl. Phys.](#) **104**, 094909 (2008)

Spis prac stanowiących podstawę rozprawy habilitacyjnej

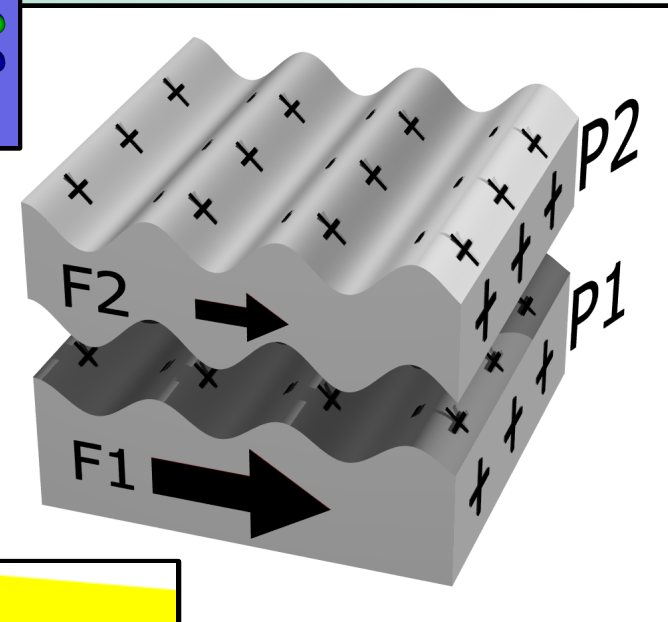
- [U.1] M. Urbaniak, H. Brückl, F. Stobiecki, T. Luciński and G. Reiss, Néel's Magnetostatic Coupling in Sputtered Cu/Py/V/Py/MnIr/Cu Multilayers, *Acta Phys. Polon. A* **105**, 307 (2004)
- [U.2] M. Urbaniak, F. Stobiecki, T. Luciński, B. Szymański, Magnetization and magnetoresistance correlation in 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* ???, ??? (2008)
- [U.10] M. Urbaniak, Giant magnetoresistance as a probe of magnetostatic coupling in NiFe/Au/Co/Au multilayers, *J. Appl. Phys.* **104**, 094909 (2008)

Sprężenia międzywarstwowe w układach wielowarstwowych

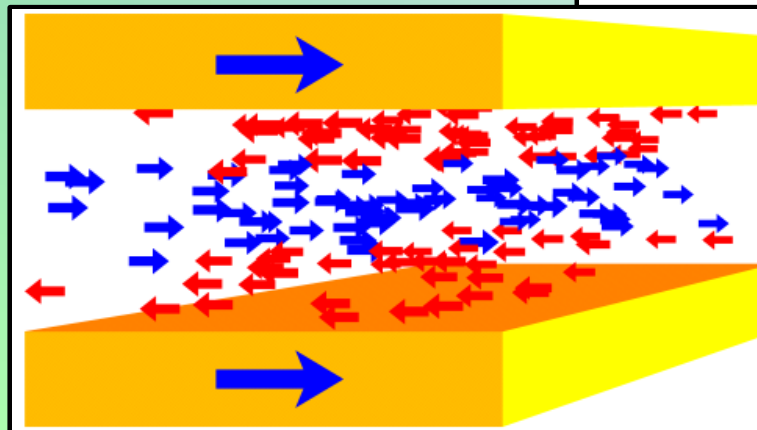
- sprężenie poprzez mostki ferromagnetyczne



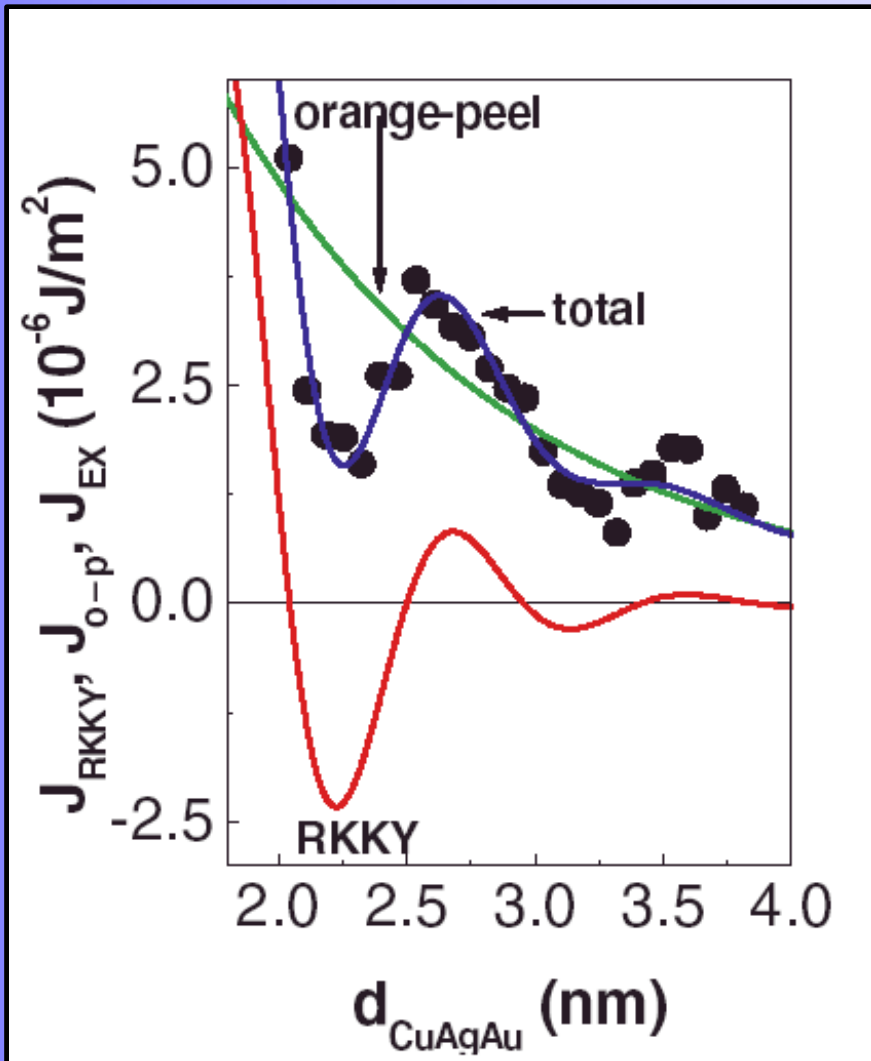
- sprężenie magnetostaticzne



- sprężenie typu Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida



Sprężenia międzywarstwowe w układach wielowarstwowych

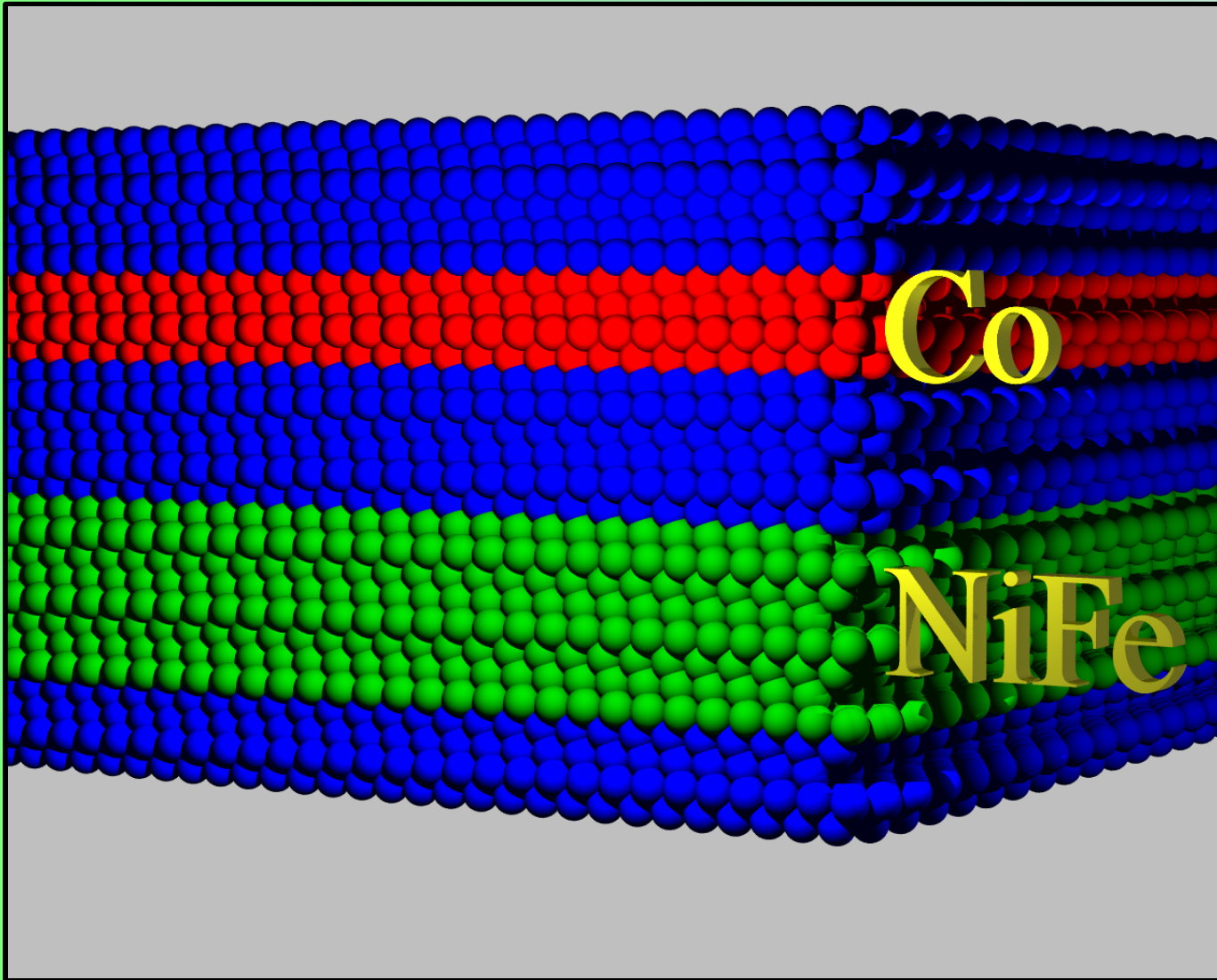


Sprężenia magnetostatyczne w wielu przypadkach **porównywalne są z oddziaływaniami typu RKKY.**

**Py(2.5 nm)Co(2.5 nm)/CuAgAu(2,4 nm)/
Co(2.5 nm)**

T. Luciński, A. Hütten, H. Brückl, T. Hempel, S. Heitmann, and G. Reiss
phys. stat. sol. (a) 196, No. 1, 97–100 (2003)

Struktura i własności magnetyczne



Podłoże: naturalnie utleniony Si(100)

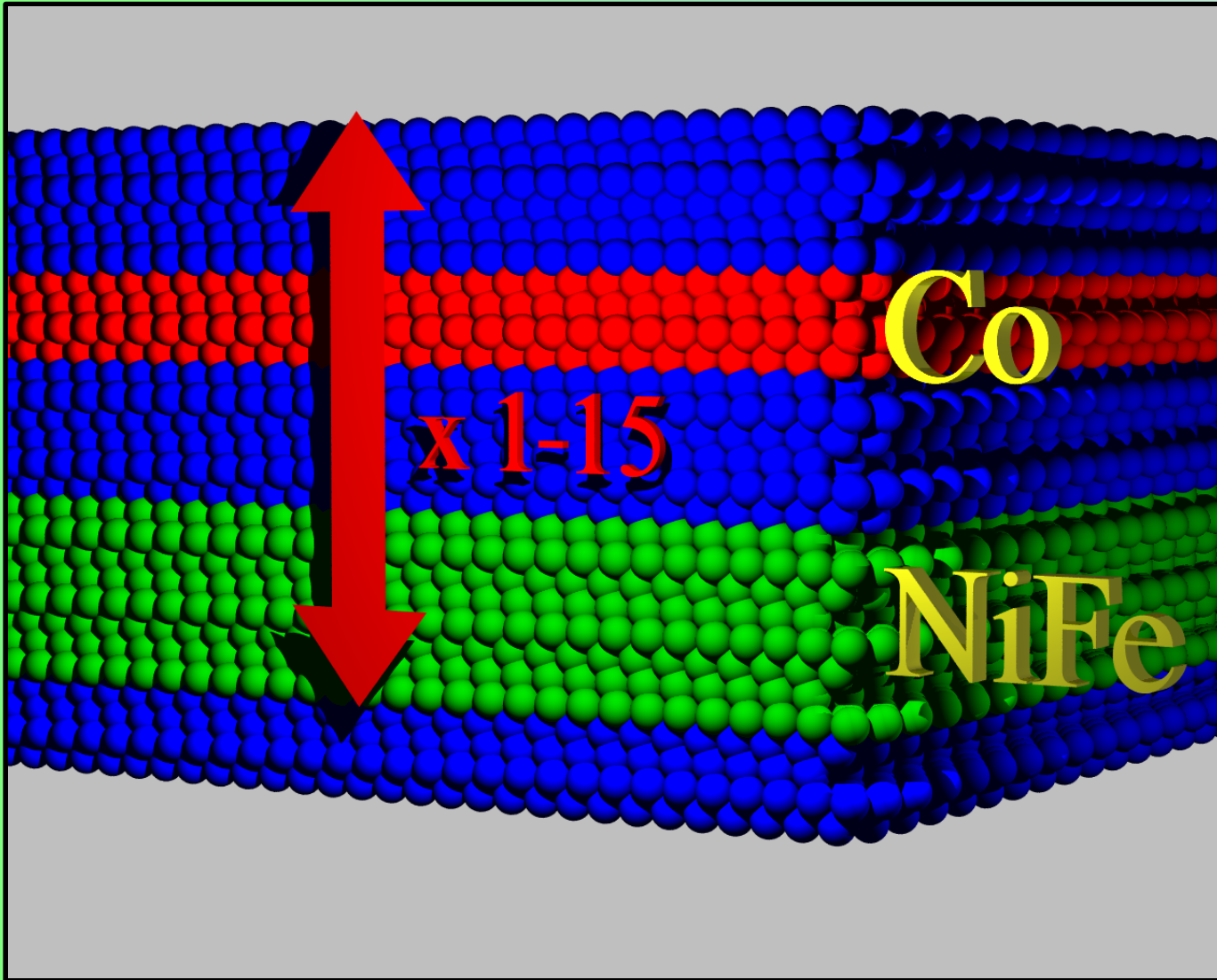
$$t_{\text{Co}} = 0.2 - 1.5 \text{ nm}$$

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

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

Rozpylanie katodowe

Struktura i własności magnetyczne



Podłoże: naturalnie utleniony Si(100)

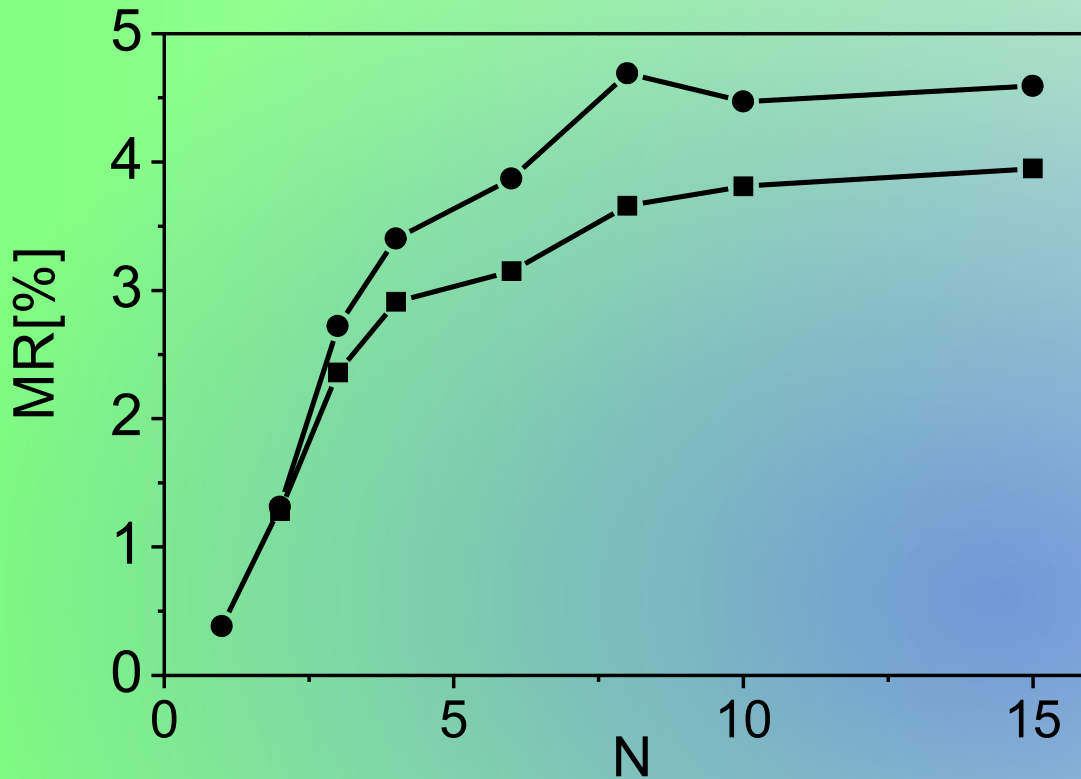
$$t_{\text{Co}} = 0.2 - 1.5 \text{ nm}$$

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

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

Rozpylanie katodowe

Struktura i własności magnetyczne



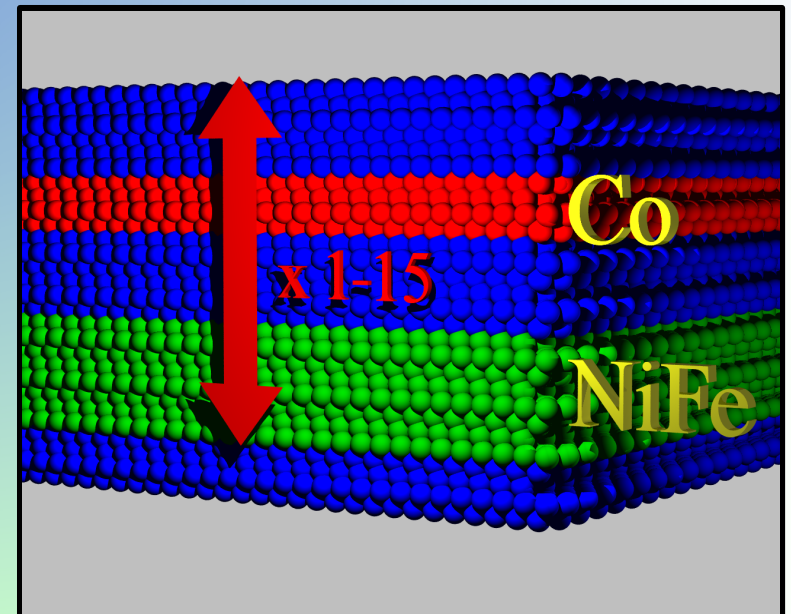
$[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(2 \text{ nm})/\text{Au}(3 \text{ nm})/\text{Co}(0.8 \text{ nm})/\text{Au}(3 \text{ nm})]_N$

Podłoże: naturalnie utleniony Si(100)

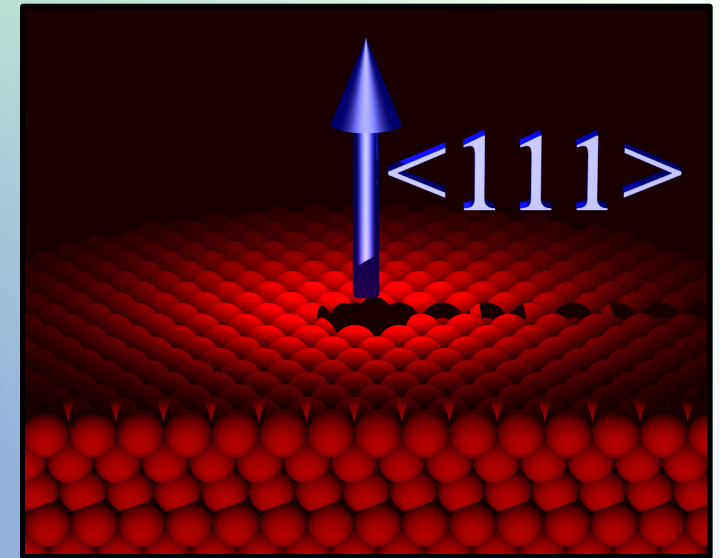
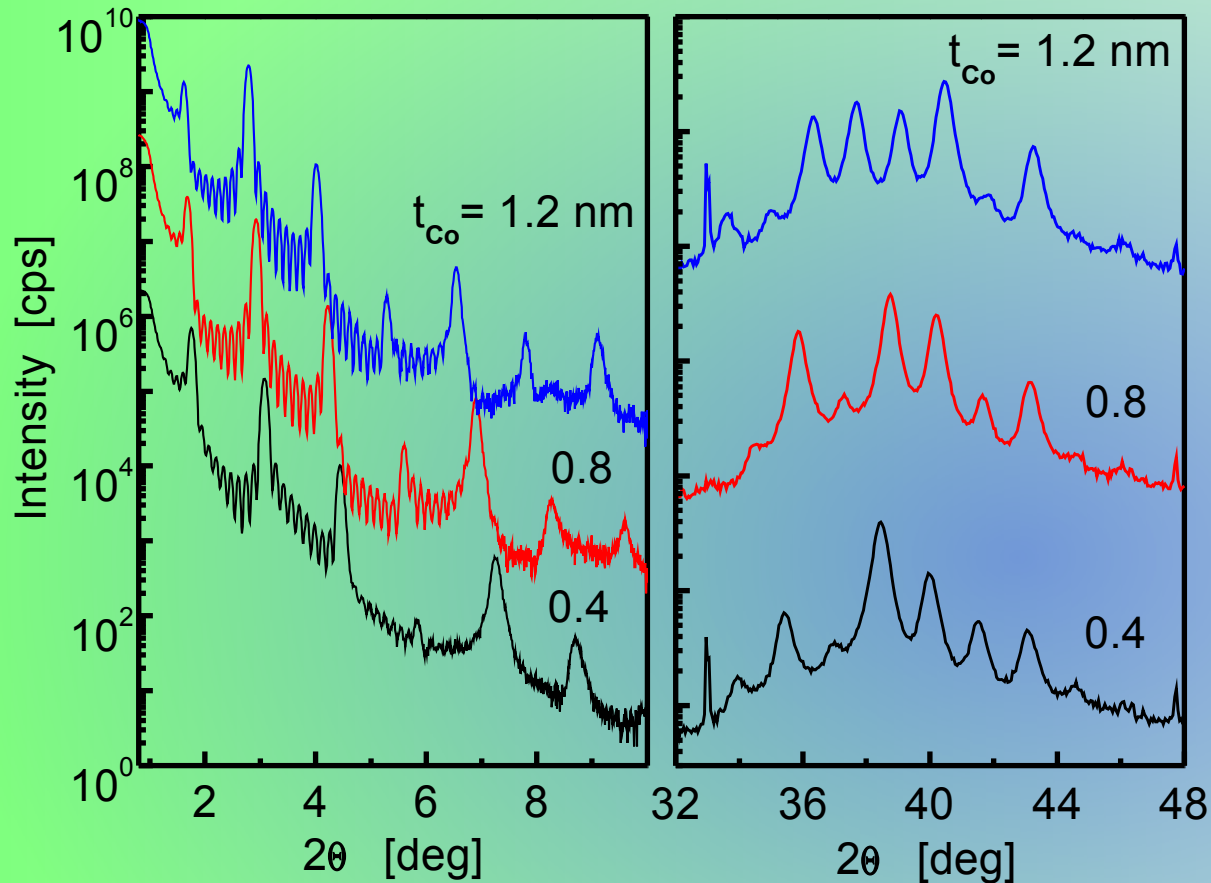
$t_{\text{Co}} = 0.2 - 1.5 \text{ nm}$

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

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



Struktura i własności magnetyczne

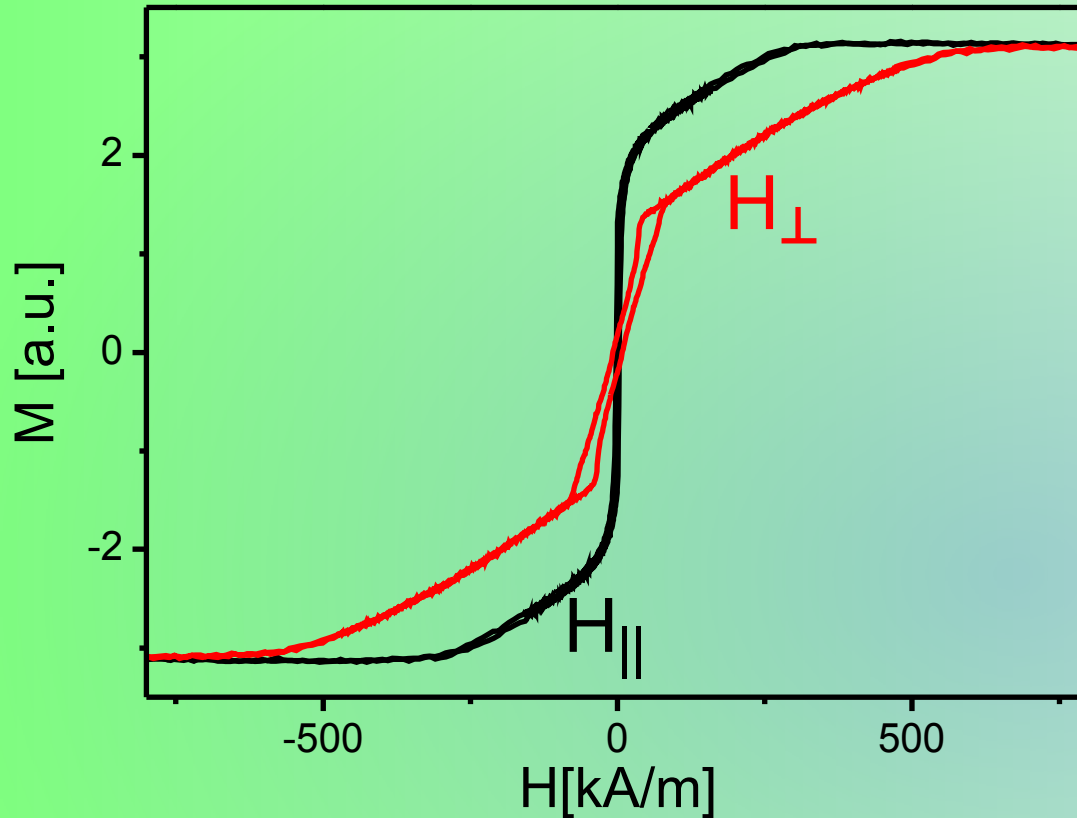


fcc (111)



Cu $K\alpha$

Struktura i własności magnetyczne



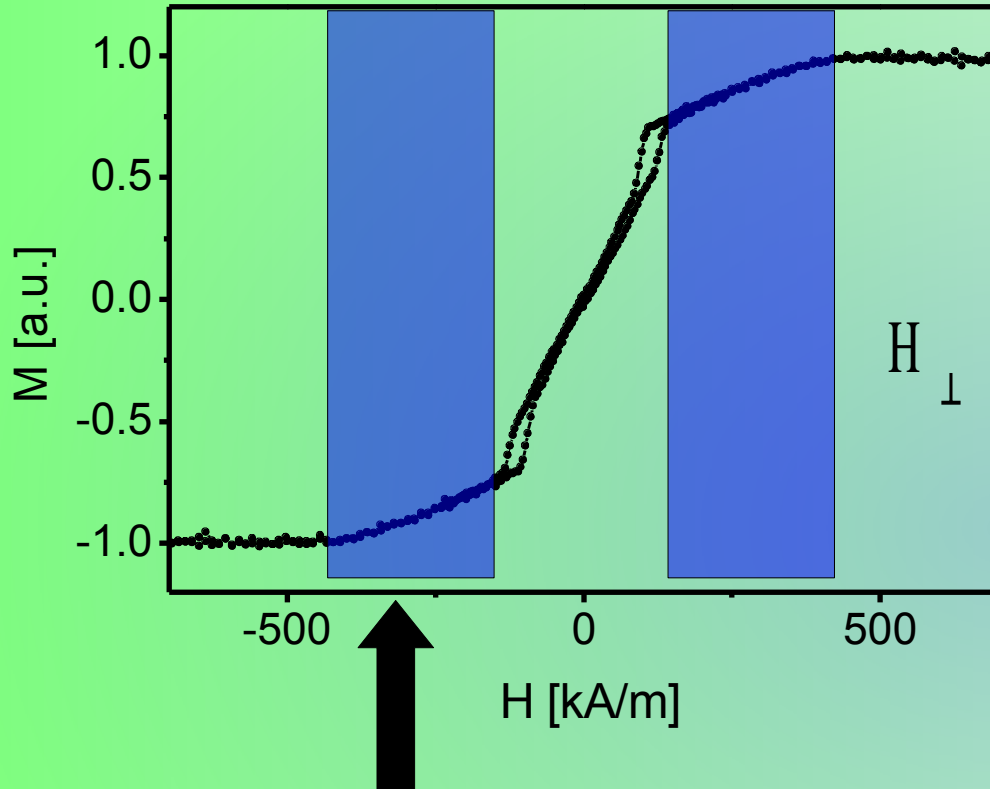
NiFe – magnetyczna oś łatwa w płaszczyźnie subwarstw

Co – magnetyczna oś łatwa prostopadła do płaszczyzny subwarstw

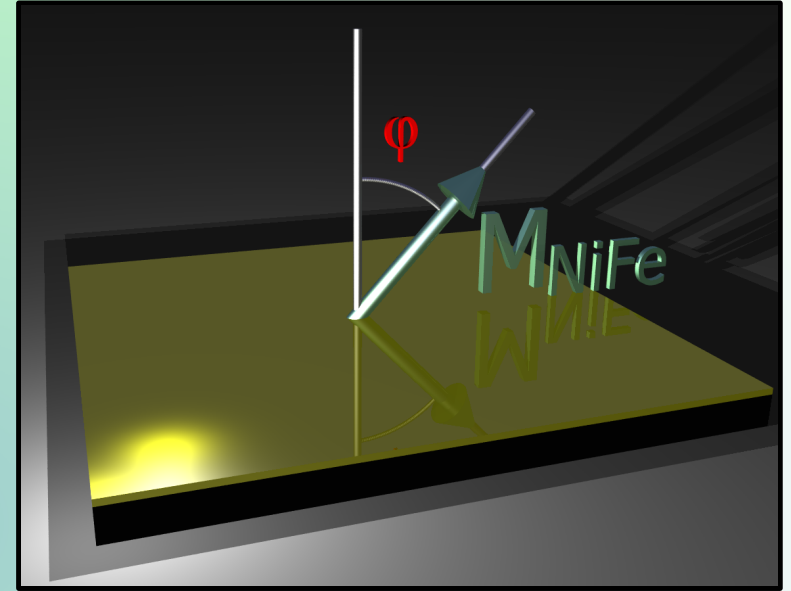
magnetometr wibracyjny

- 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



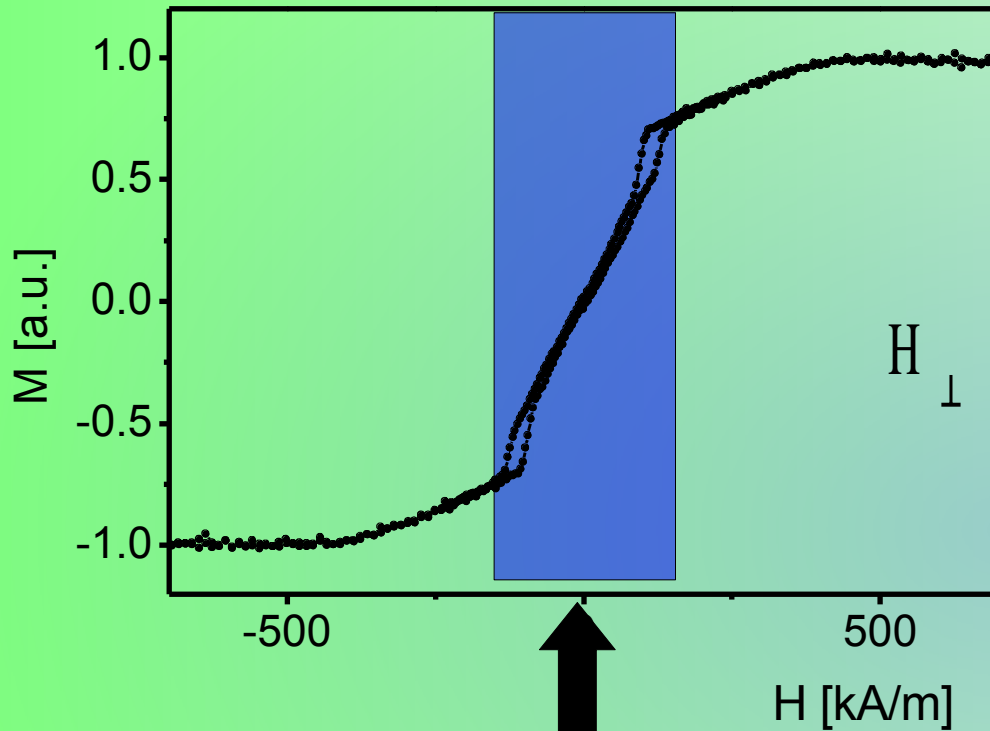
$$K_u = \frac{1}{2} \mu_0 (M_S^{NiFe})^2$$



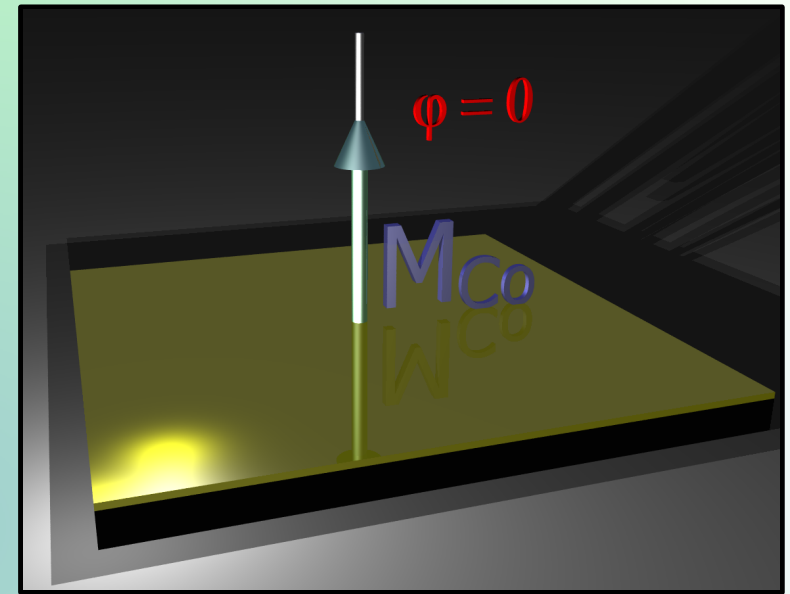
Anizotropia kształtu:

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

Struktura i własności magnetyczne

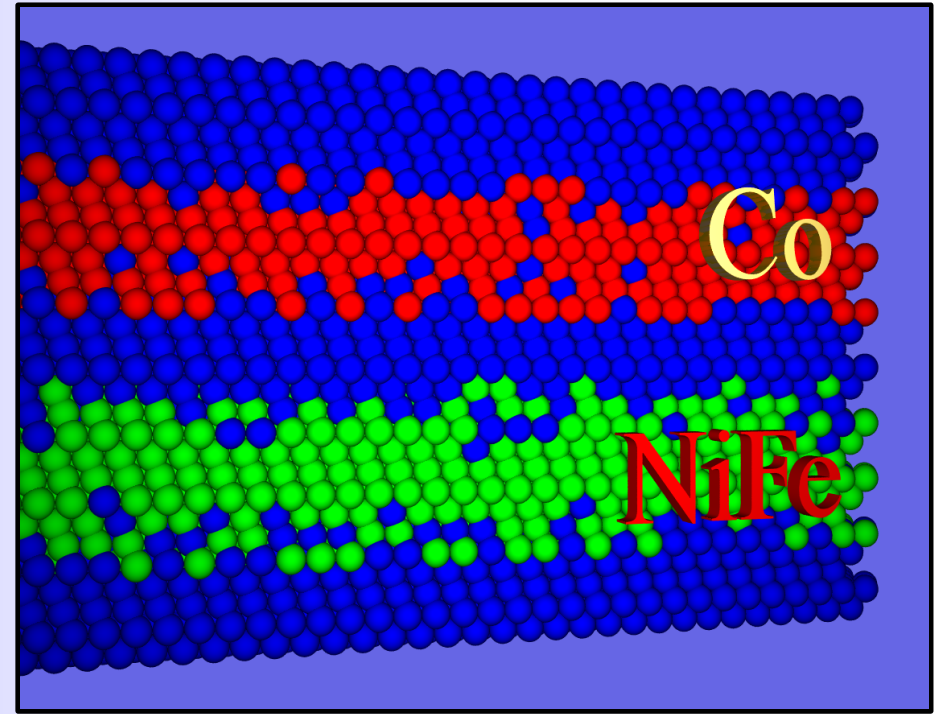
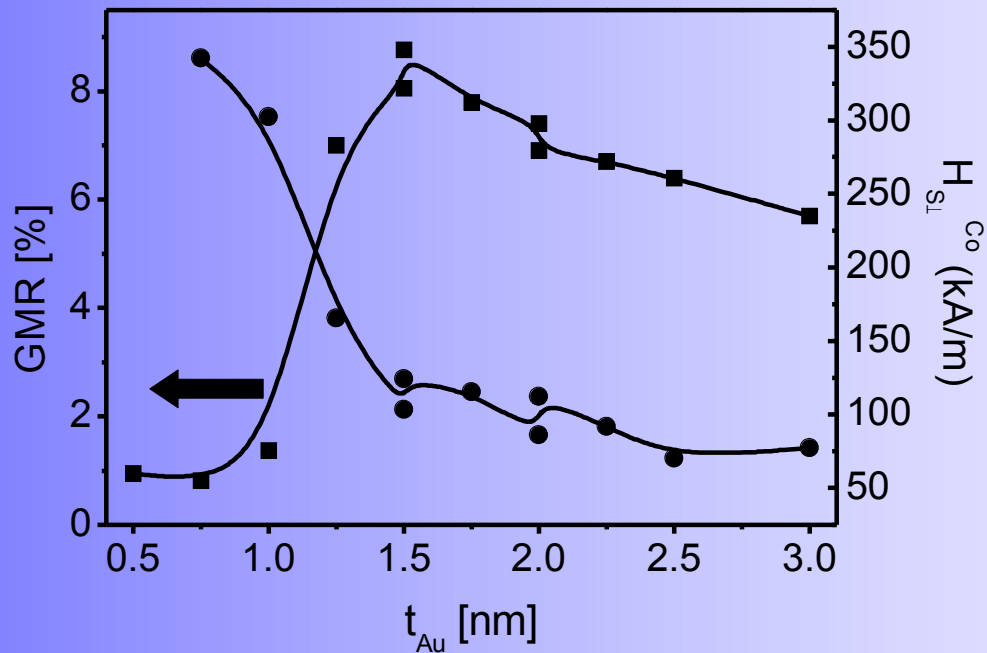


przemagnesowanie
NiFe i Co



Oś łatwa subwarstw Co jest
prostopadła do powierzchni
warstwy wielokrotnej

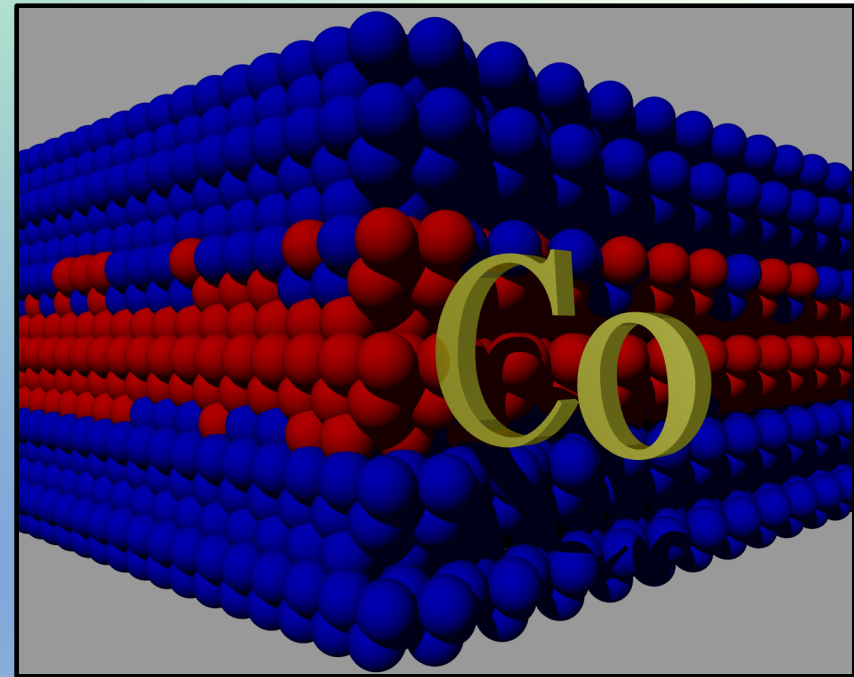
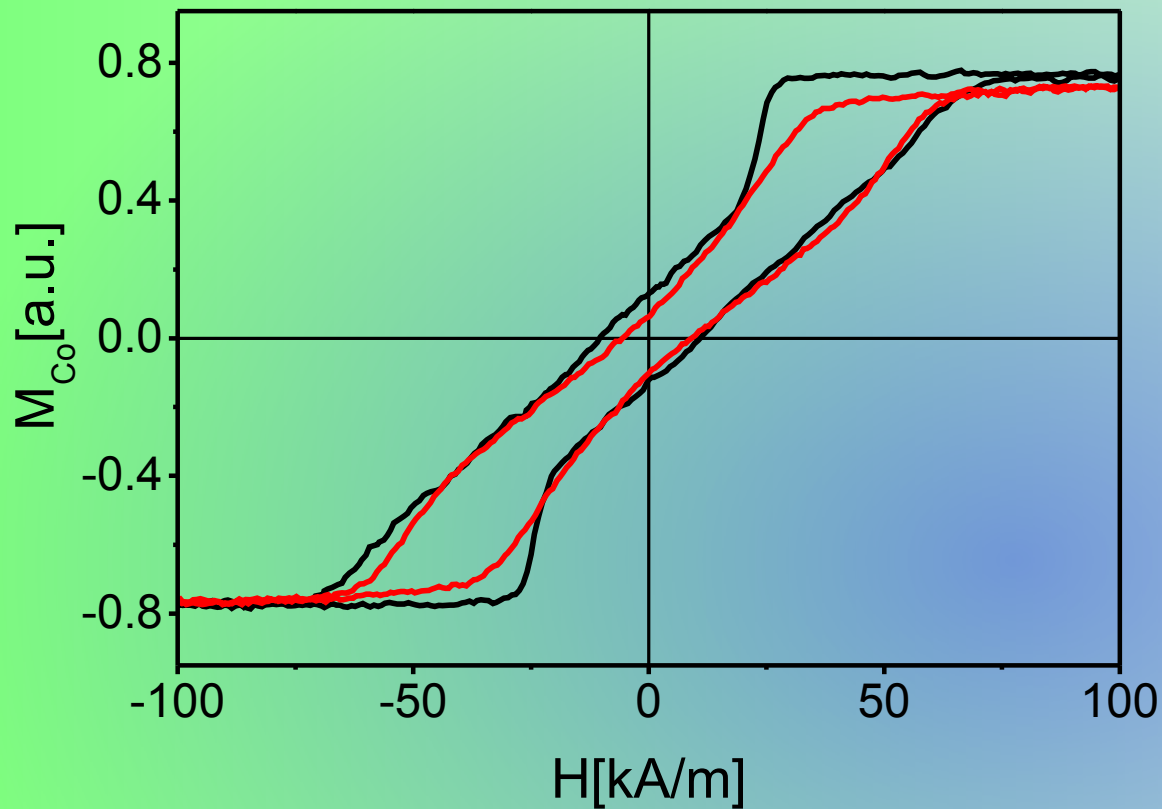
Struktura i własności magnetyczne



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

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

Struktura i własności magnetyczne

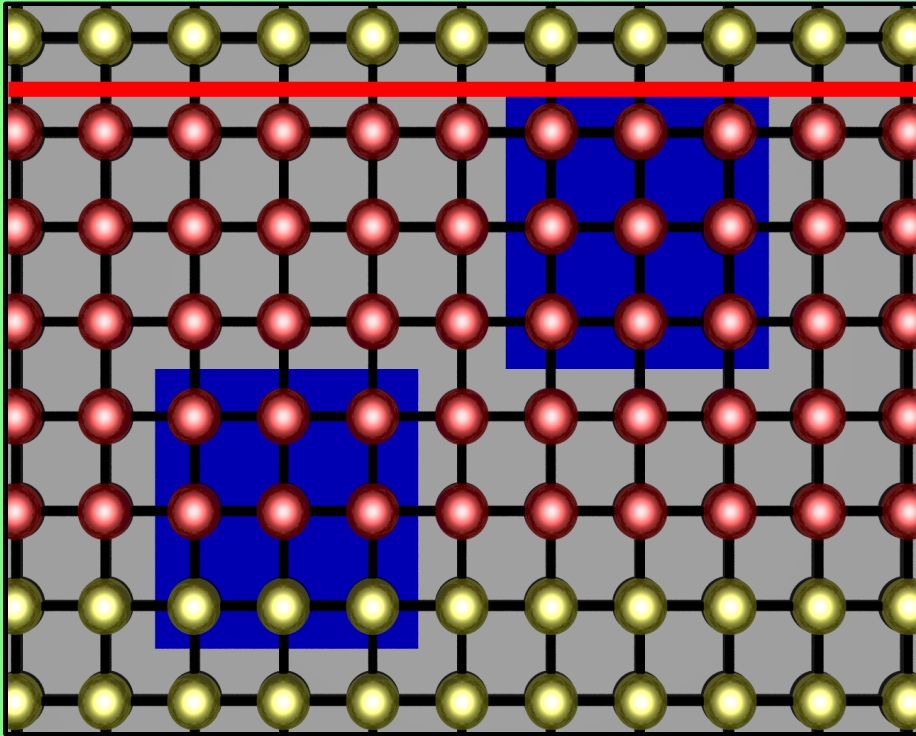


$[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(2 \text{ nm})/\text{Au}(1.9 \text{ nm})/\mathbf{\text{Co}(0.6 \text{ nm})}/\text{Au}(1.9 \text{ nm})]_{10}$

$[\text{Co}(0.6 \text{ nm})/\text{Au}(4.4 \text{ nm})]_{15}$

Obecność subwarstw NiFe nie wpływa w istotny sposób na przemagnesowanie subwarstw Co

Struktura i własności magnetyczne



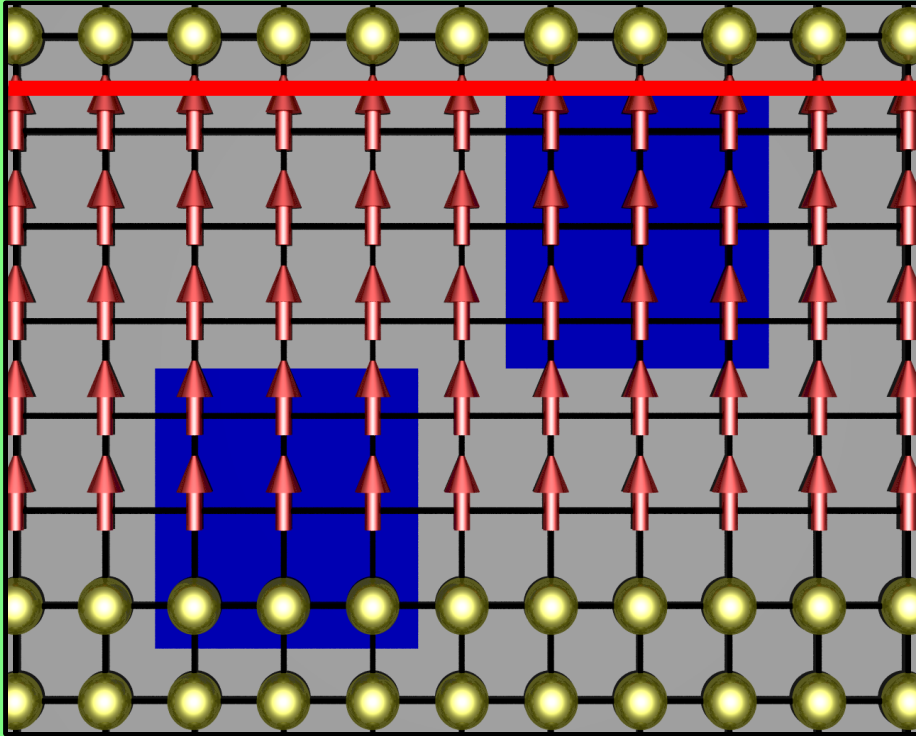
Zmiana lokalnej symetrii na interfejsie



W układach Co/Au powstaje powierzchniowy przyczynek do anizotropii magnetycznej (K_{1s})

W badanych układach grubość warstw Co jest porównywalna z odległościami międzypłaszczyznowymi w kierunku prostopadłym do warstwy \Rightarrow silny udział efektów powierzchniowych.

Struktura i własności magnetyczne



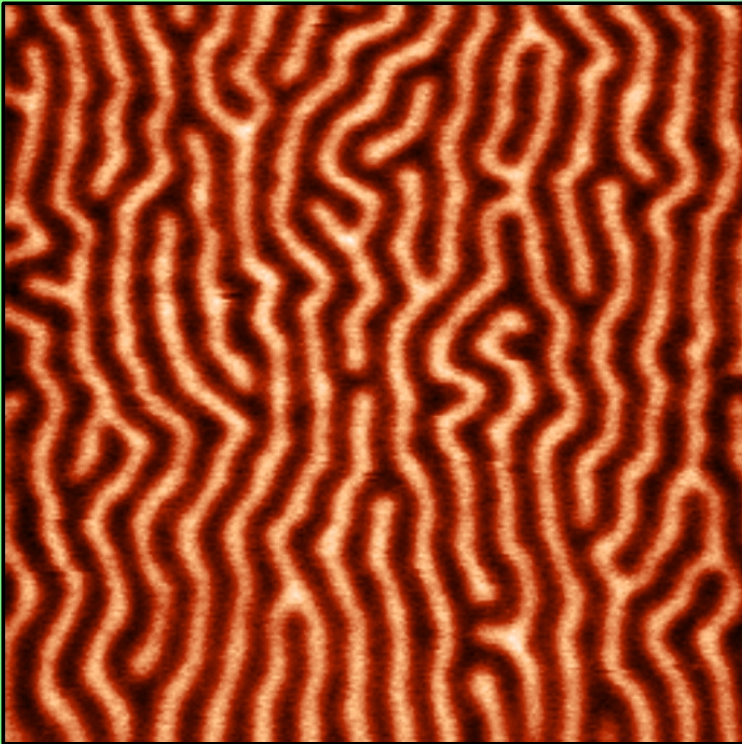
Zmiana lokalnej symetrii na interfejsie



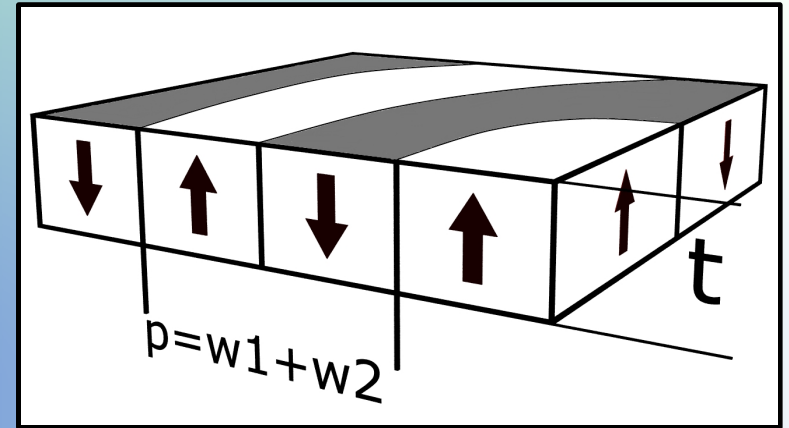
W układach Co/Au powstaje powierzchniowy przyczynek do anizotropii magnetycznej (K_{1s})

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

Struktura i własności magnetyczne



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

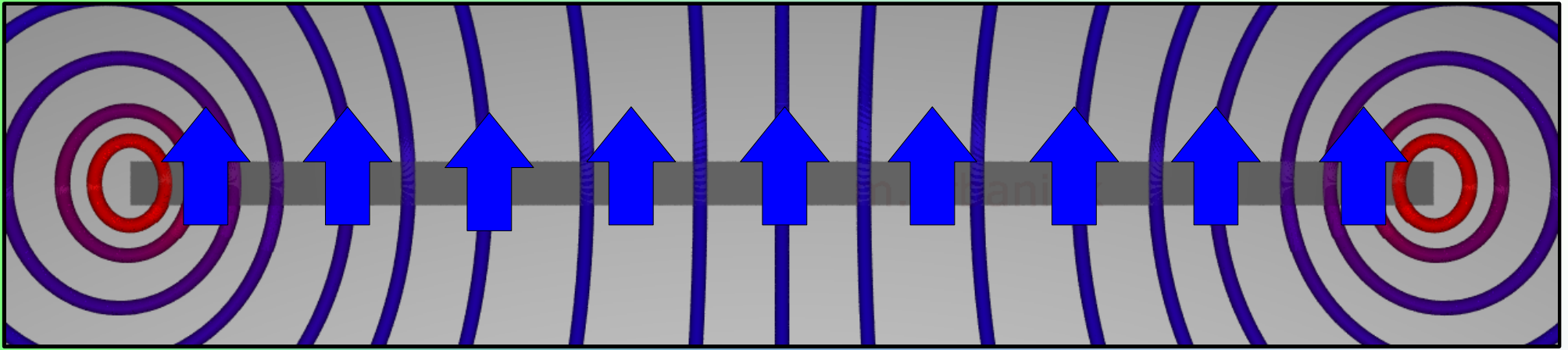


okres 400-1000 nm

- Pomiar MFM potwierdza obecność pasiastej struktury domenowej charakterystycznej dla układów z anizotropią prostopadłą.
- Okres przestrzenny struktury pasiastej zależy silnie od grubości subwarstw Co i Au.

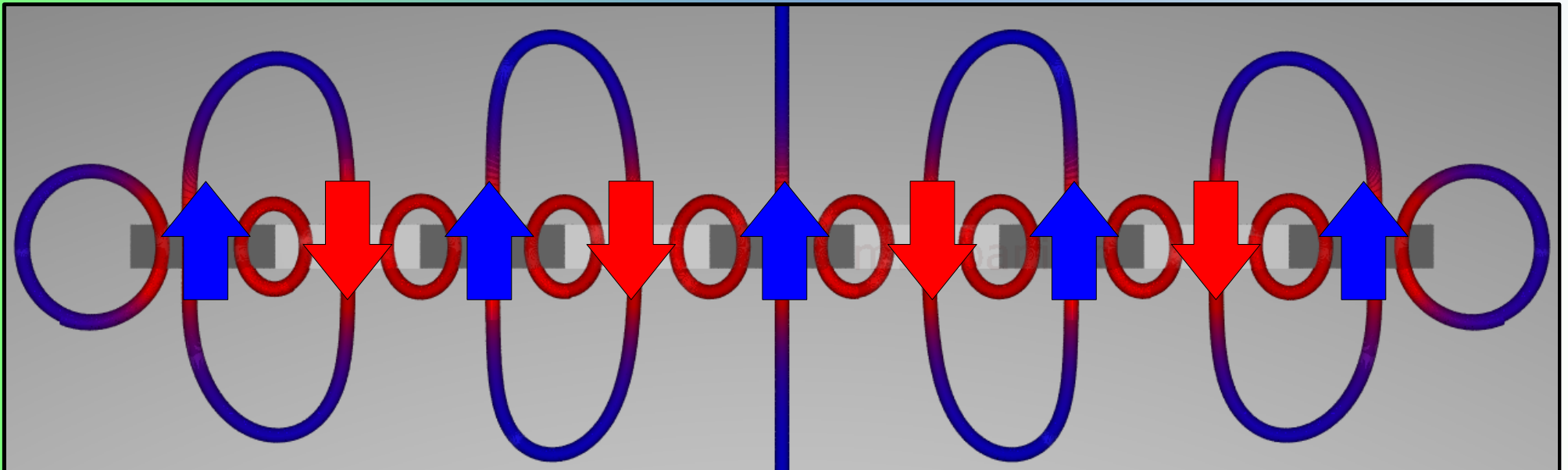
$[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}^*(2 \text{ nm})/\text{Au}(2.4 \text{ nm})/\text{Co}(1.2 \text{ nm})/\text{Au}(2.4 \text{ nm})]_{10}$

* z ^{57}Fe

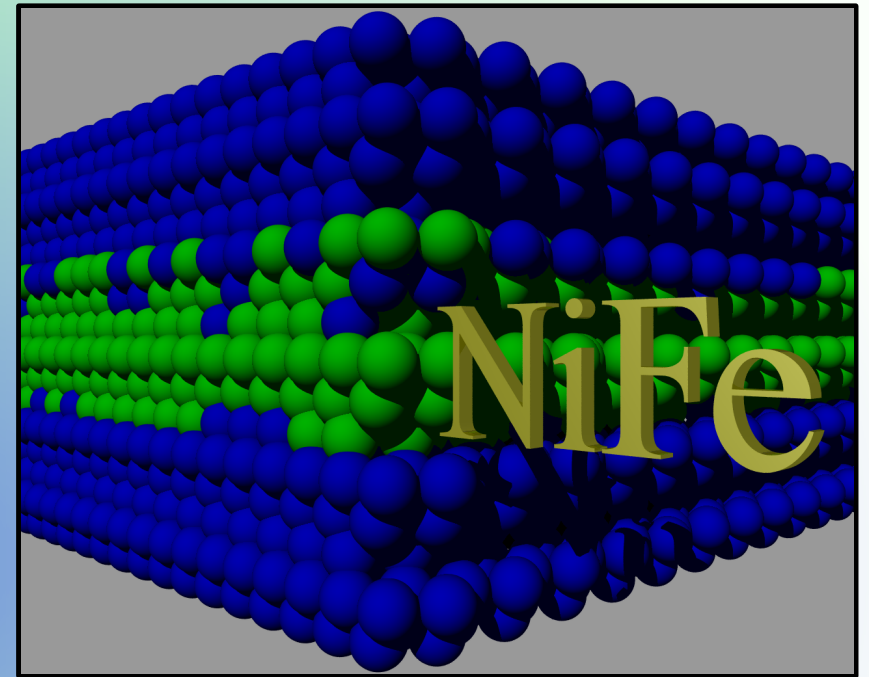
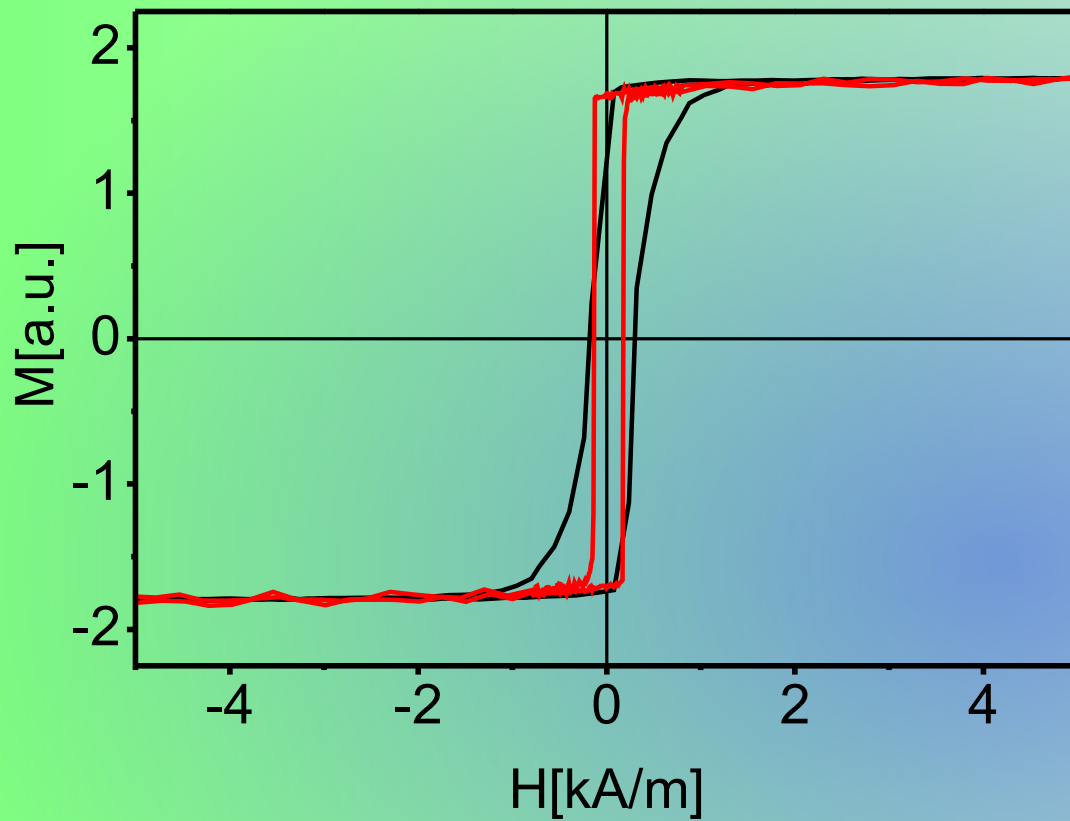


Podział na domeny prowadzi do zwiększenia wartości pola magnetycznego (B) w obrębie warstwy i obniżenia energii \Rightarrow **pasiasta struktura domenowa**.

$$E_{magn} = -\vec{B} \cdot \vec{M}$$



Struktura i własności magnetyczne

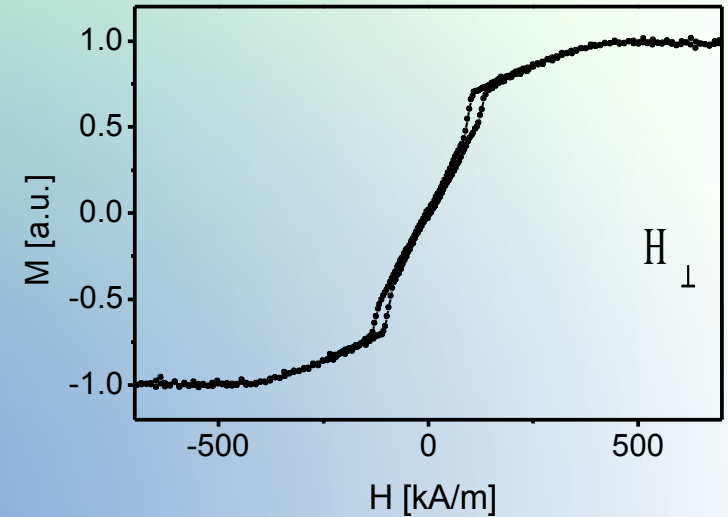
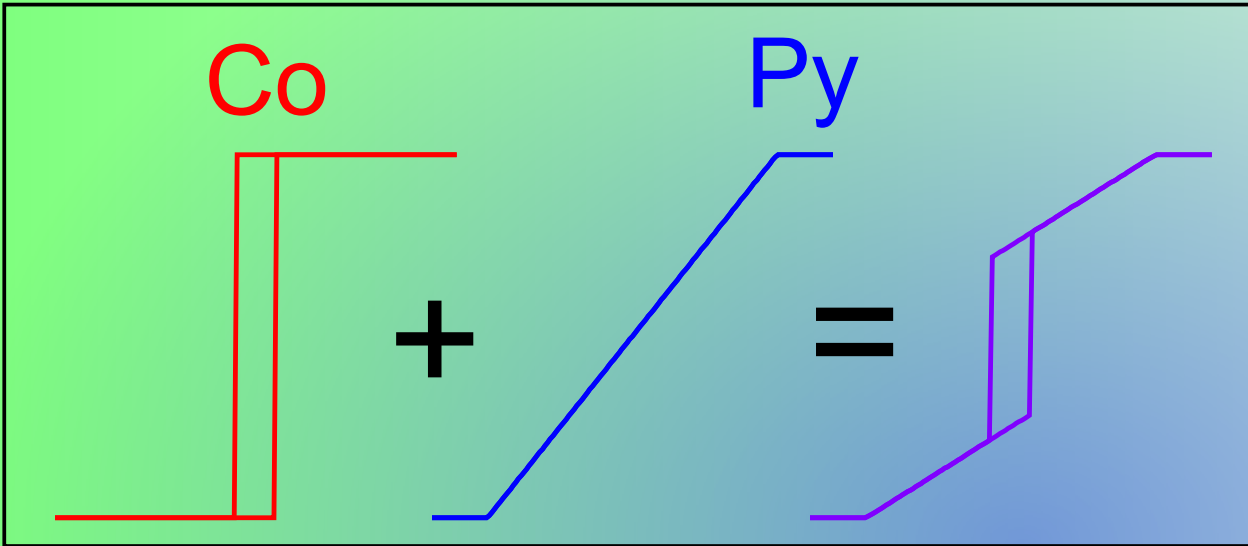


$[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(2 \text{ nm})/\text{Au}(5 \text{ nm})]_{15}$

$\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(38 \text{ nm})$

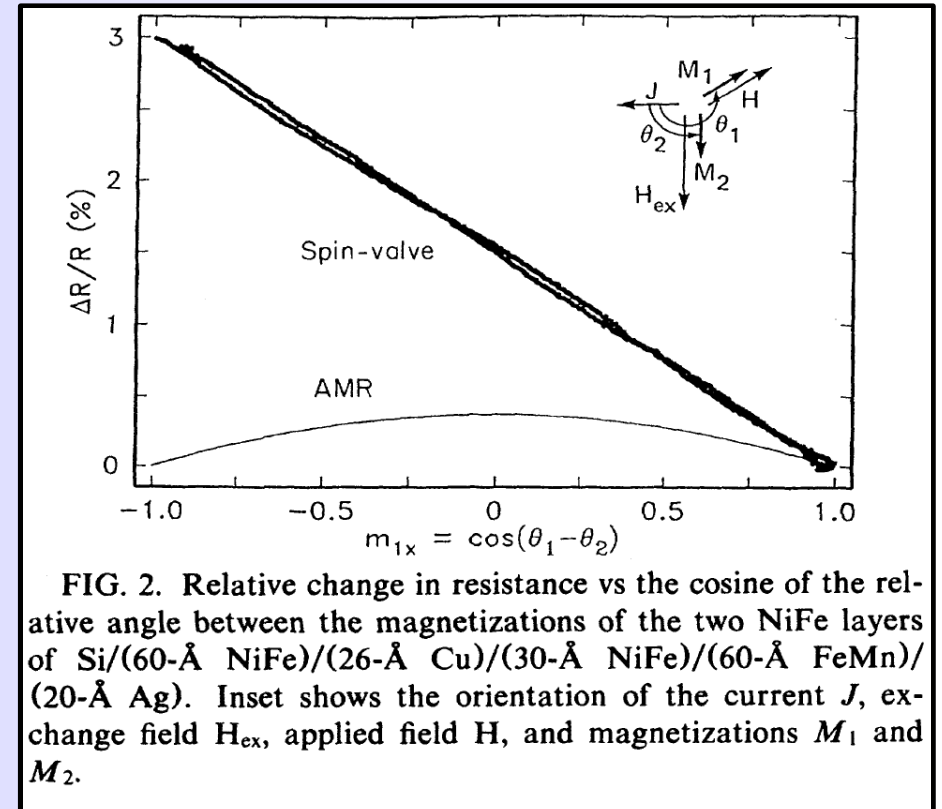
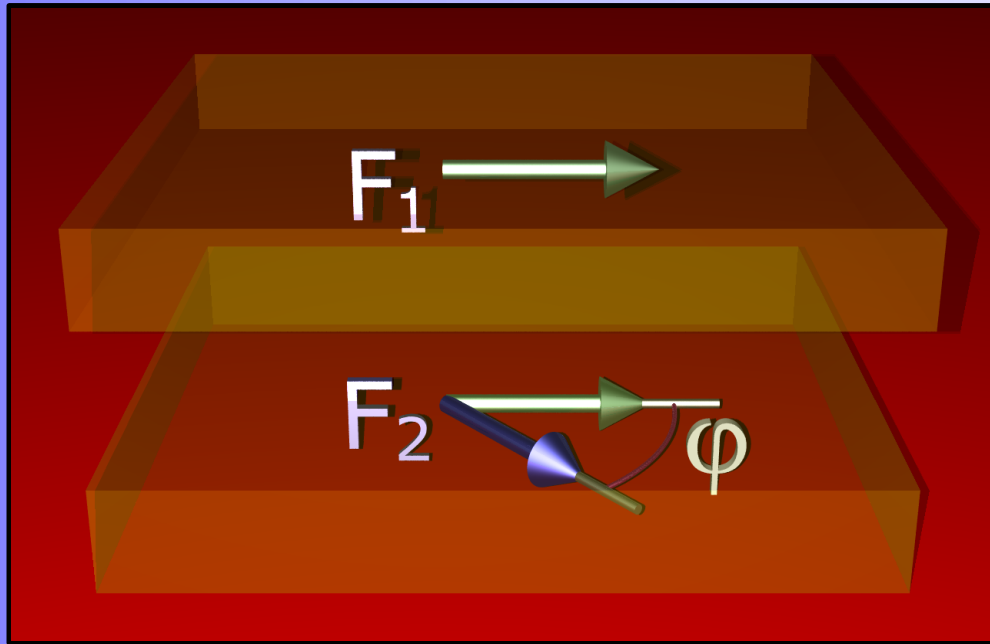
$\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ - materiał miękki magnetycznie, $H_C \approx 160 \text{ A/m}$

Struktura i własności magnetyczne



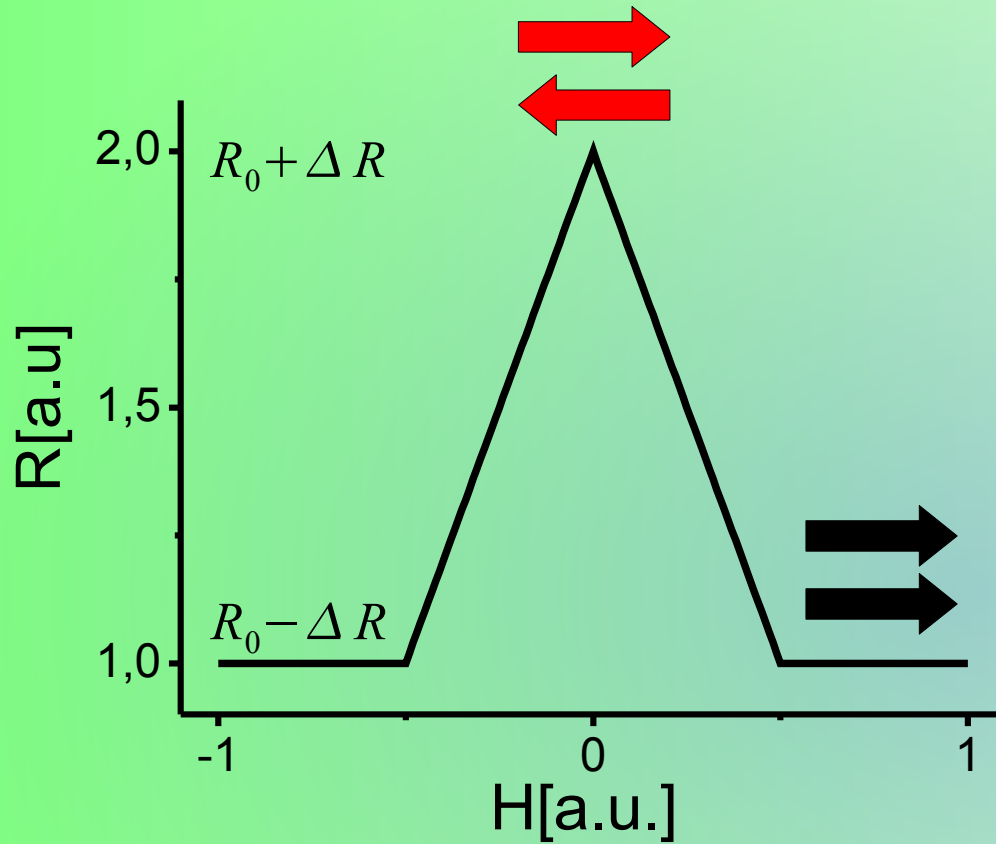
W pierwszym przybliżeniu warstwy Co i NiFe można traktować jako niesprężone

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



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

Gigantyczny magnetoopór

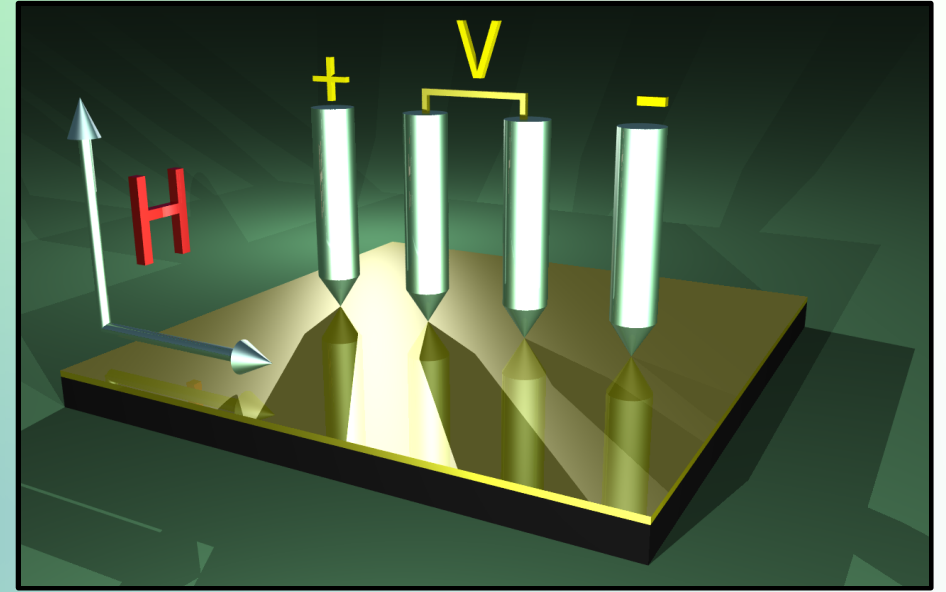
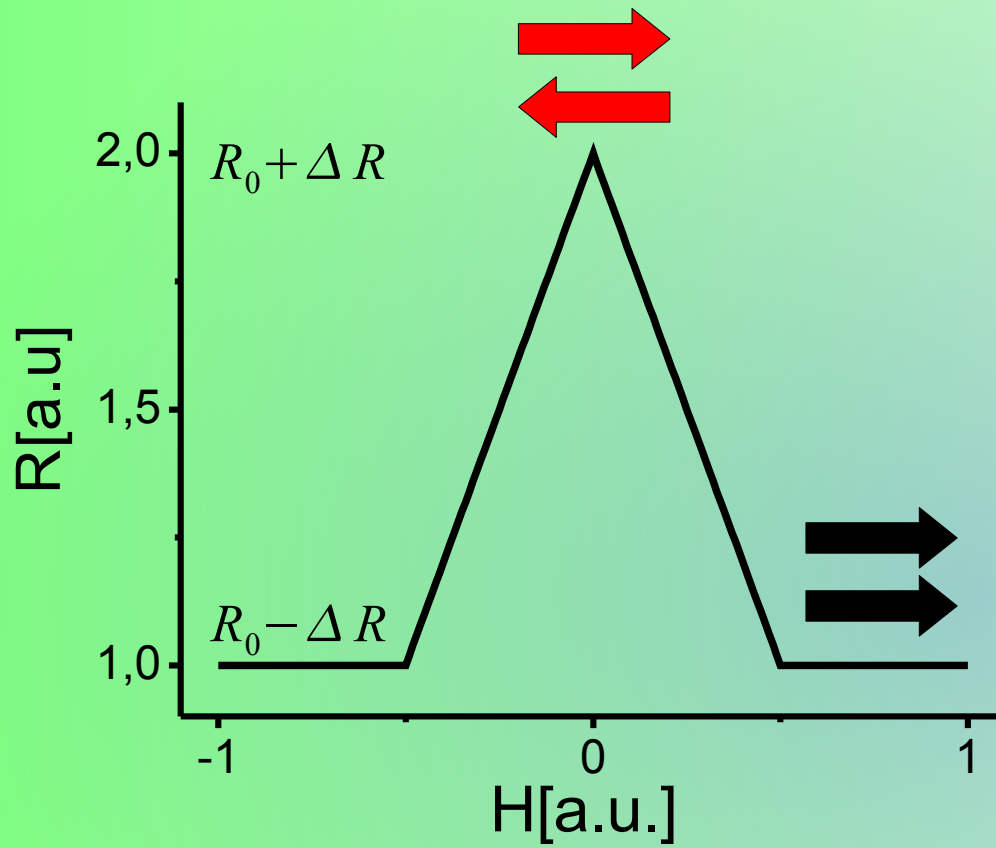


$$2\Delta R / (R_0 - \Delta R) = 1 \div 100 \%$$

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

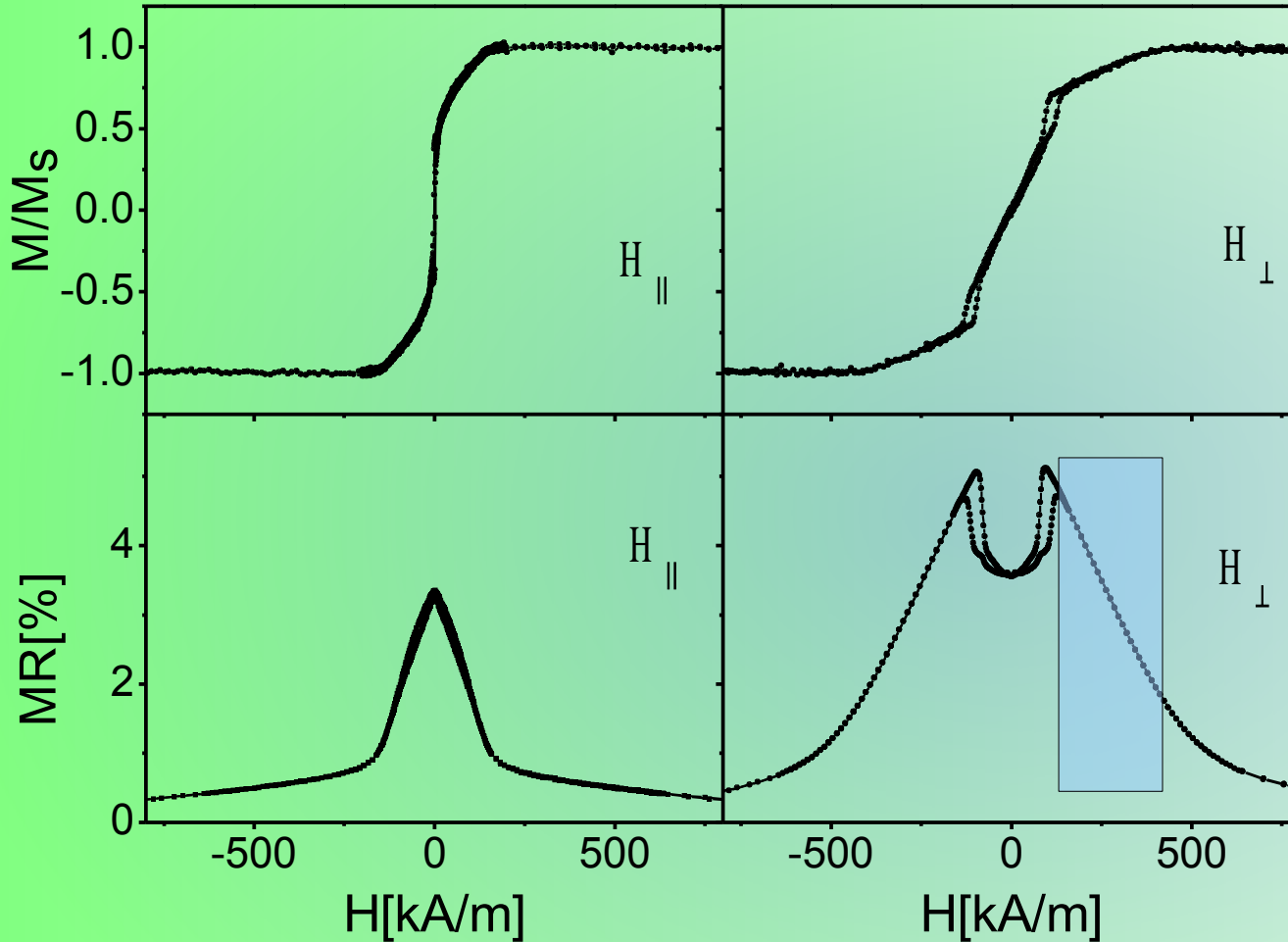
$$R = R_0 - \Delta R \cos(\varphi)$$

Gigantyczny magnetoopór



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

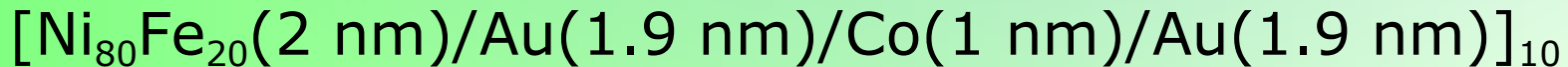
Gigantyczny magnetoopór warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$



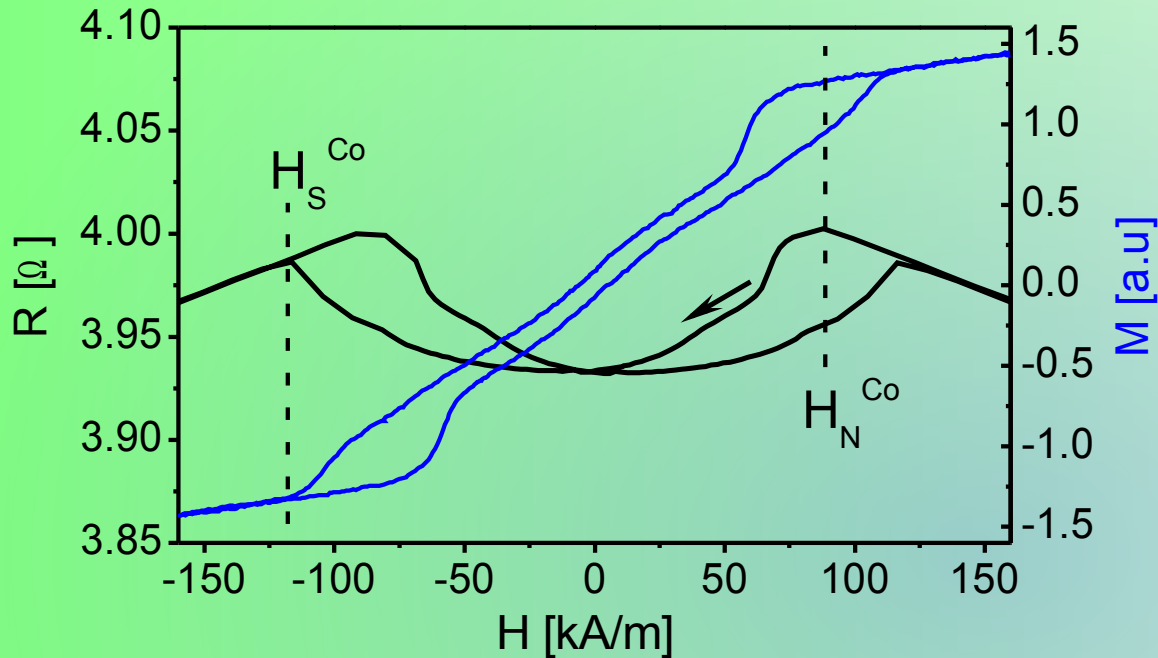
Szeroki zakres liniowy w zależności $R(H)$:

-subwarstwy magnetyczne przemagnesowane w kierunku trudnym

-brak histerezy w zakresie liniowym



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



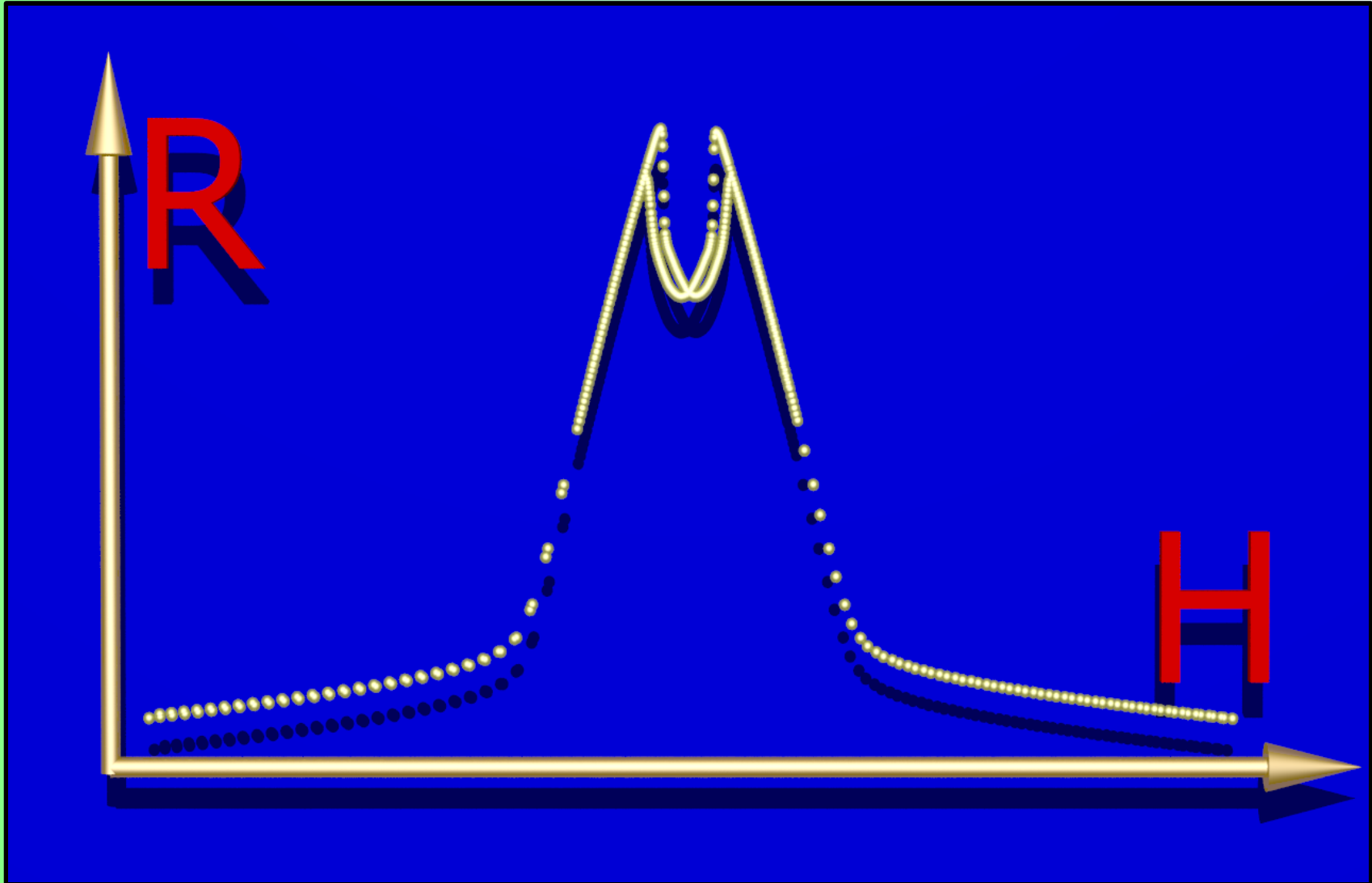
W zależności $R(H)$ występuje lokalne minimum oporu.

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

Korelacja namagnesowanie-opór

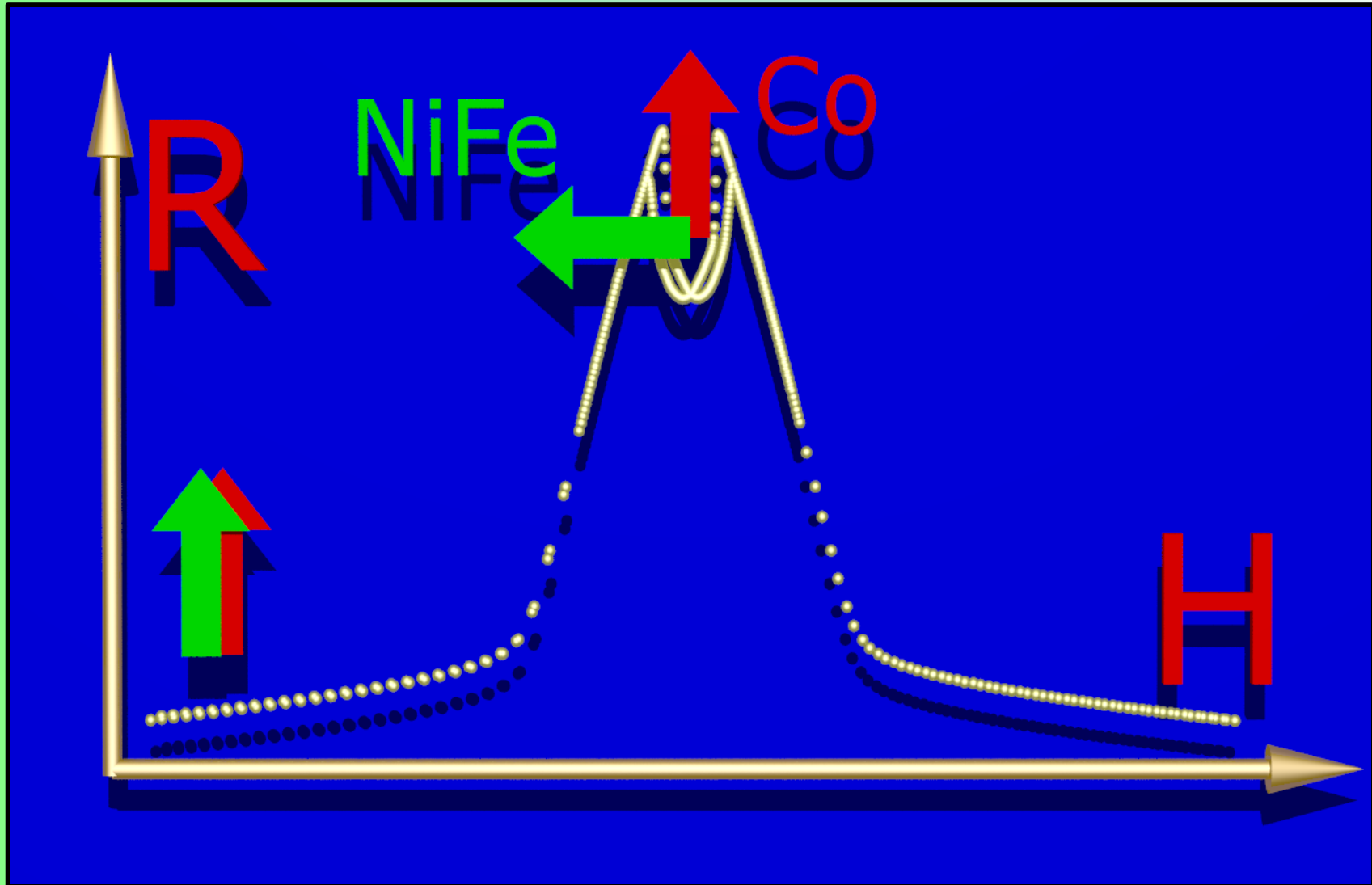
Gigantyczny magnetoopór warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$

Wyjaśnienie zależności $R(H)$



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

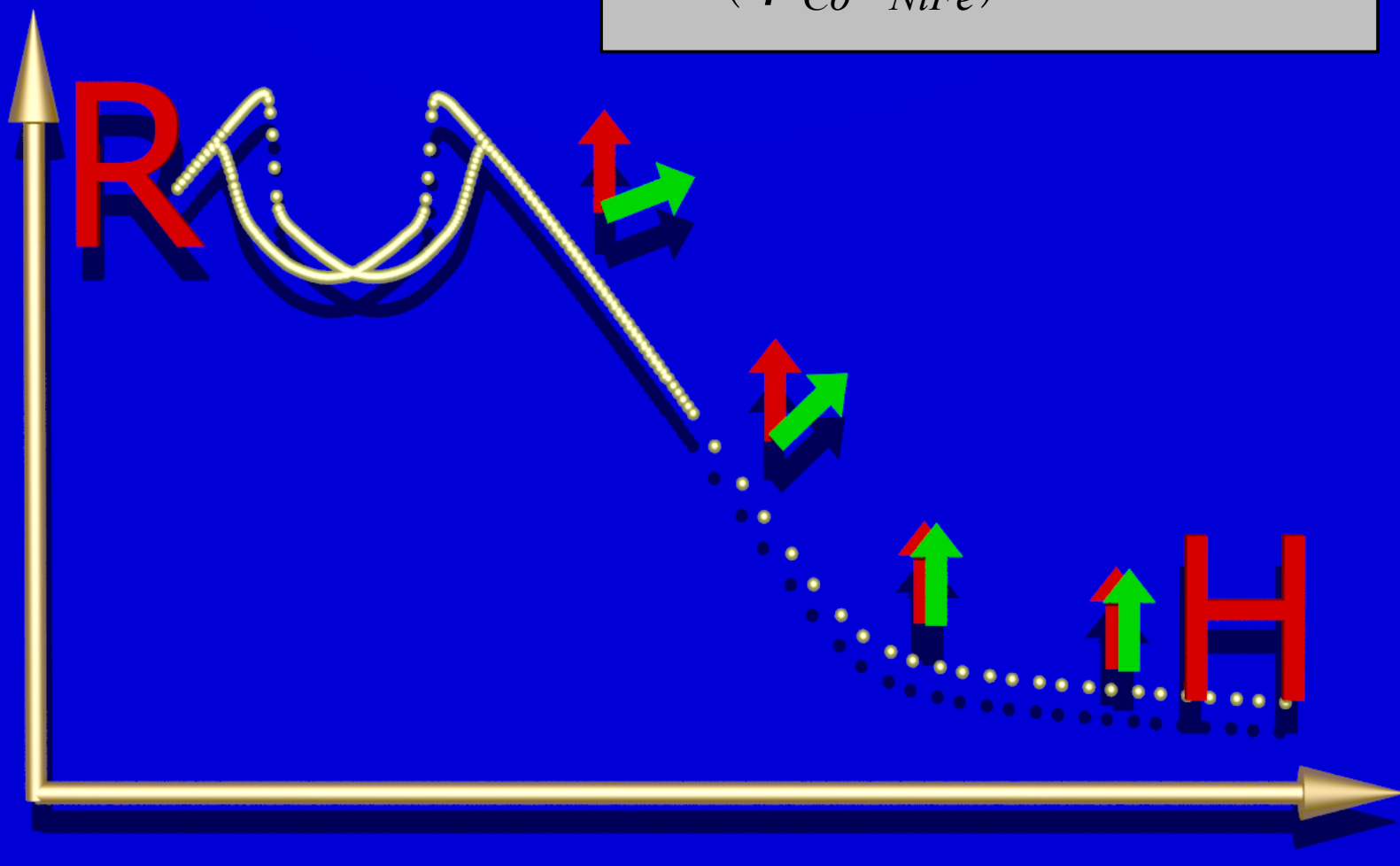
Wyjaśnienie zależności $R(H)$



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

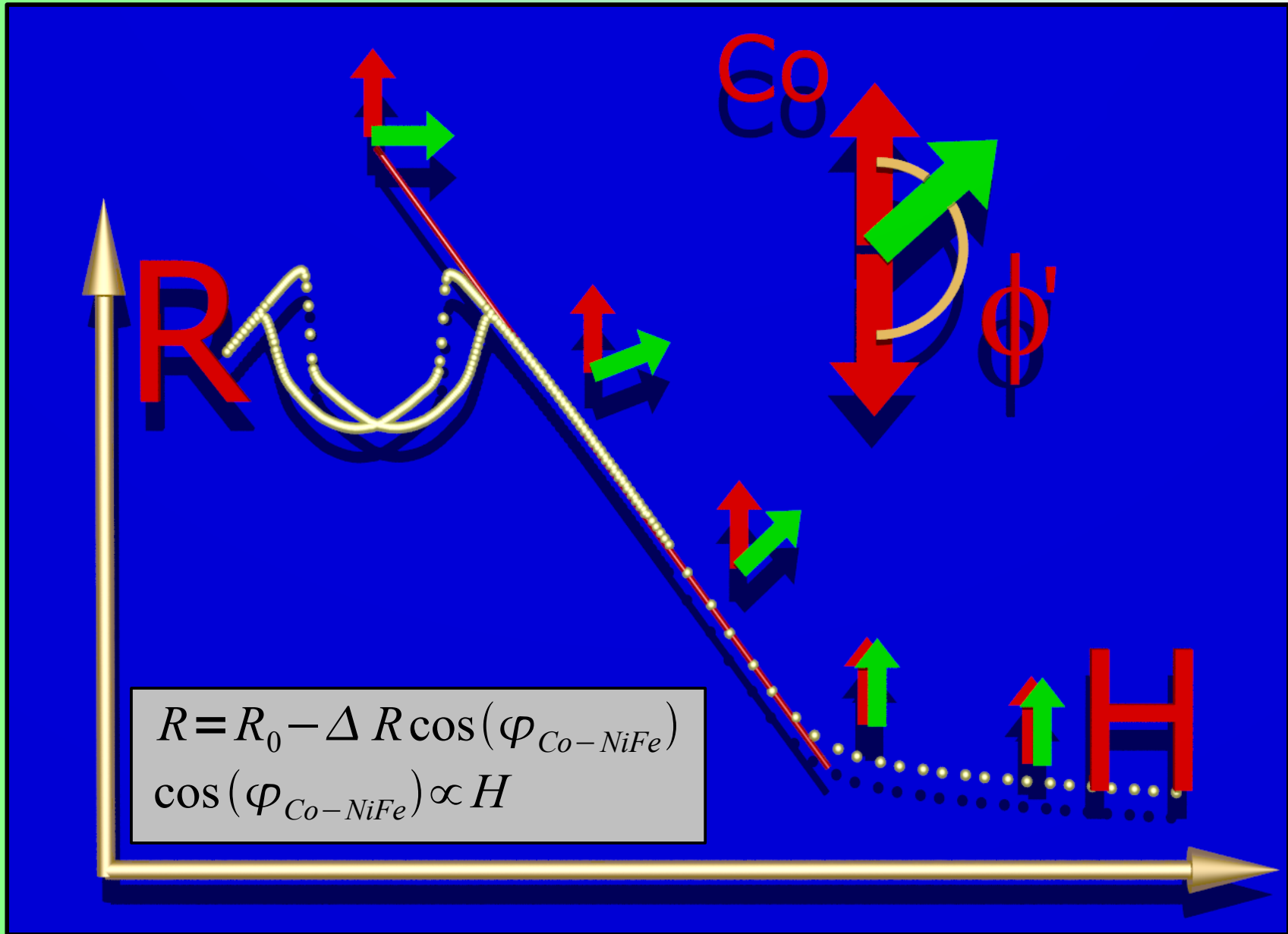
Wyjaśnienie zależności $R(H)$

$$R = R_0 - \Delta R \cos(\varphi_{Co-NiFe})$$
$$\cos(\varphi_{Co-NiFe}) \propto H$$

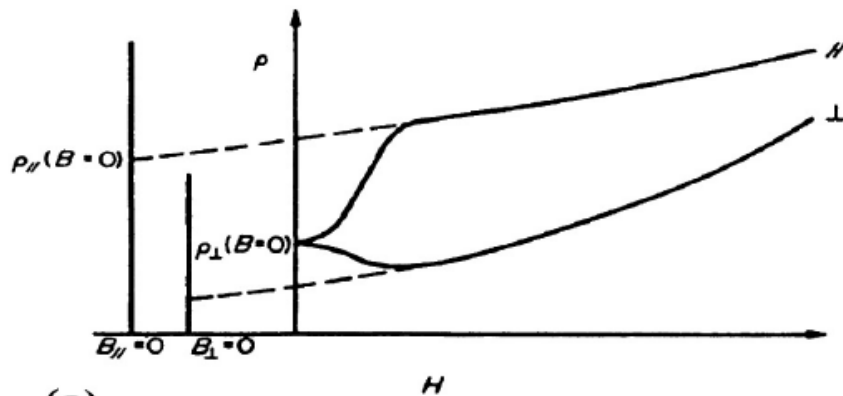


Gigantyczny magnetoopór warstw [NiFe/Au/Co/Au]_N

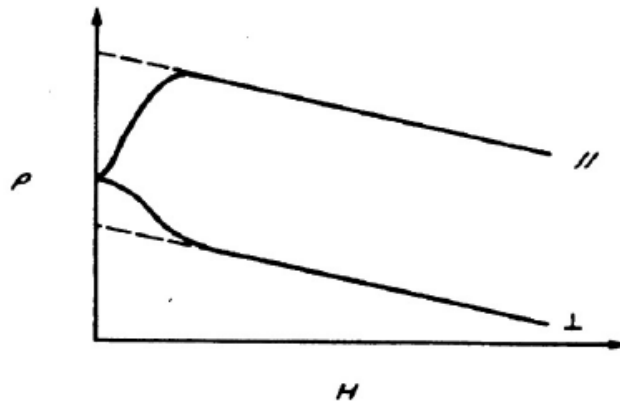
Wyjaśnienie zależności $R(H)$



Magnetoopór anizotropowy (AMR)



(a)



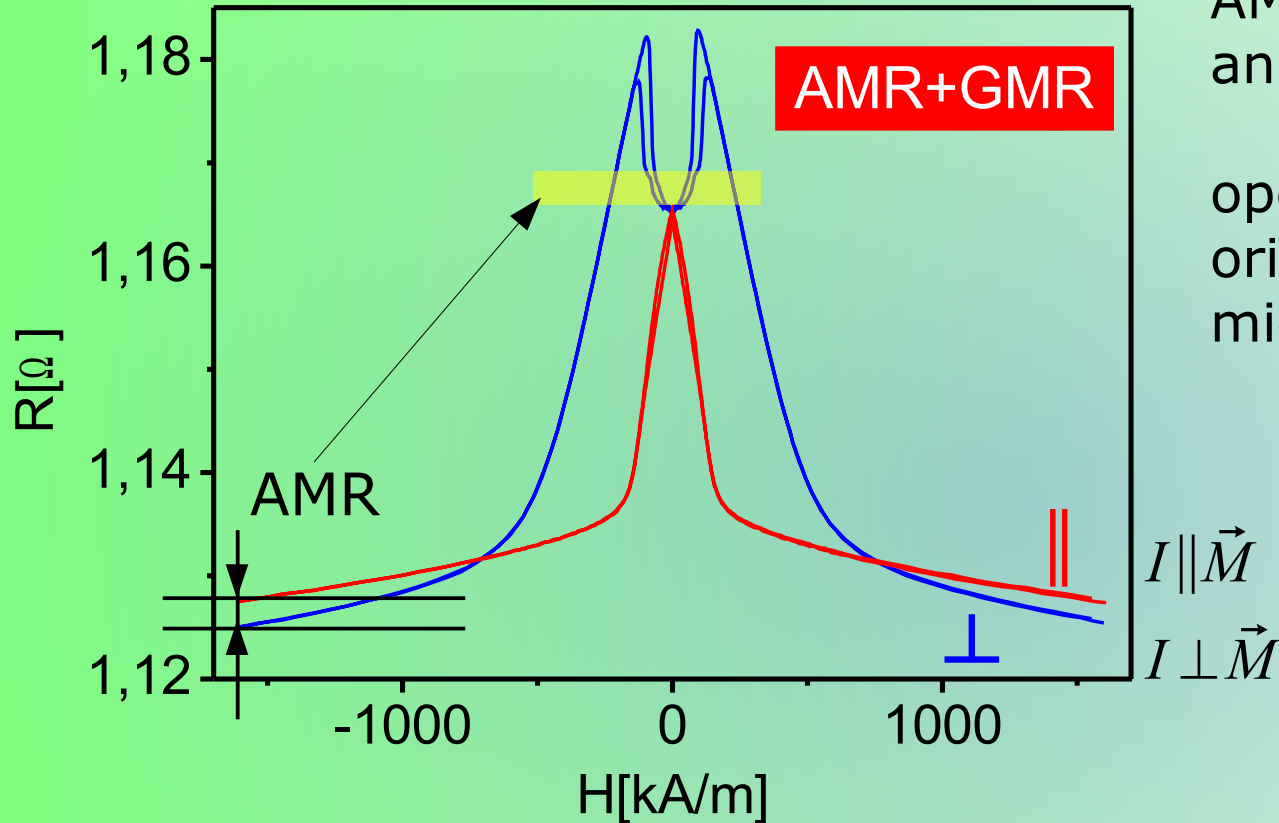
(b)

Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der Magnetfeldabhängigkeit des spezifischen Widerstands in einem ferromagnetischen Metall. Im Niederfeldbereich dominiert der AMR, wogegen oberhalb des Sättigungsmagnetfeldes der positive Magnetwiderstand (a) oder der negative Magnetwiderstand durch Reduzierung der Spinunordnung (b) dominiert. Die gestrichelten Linien deuten an, wie man durch Rückextrapolation den positiven oder negativen Magnetwiderstandsbeitrag bei kleinen Feldern eliminieren kann, um den reinen AMR-Effekt zu erhalten.

AMR w stopach NiFe sięga 5%.

opór układu zależy od kąta między mierzonym prądem i lokalnym momentem magnetycznym.

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



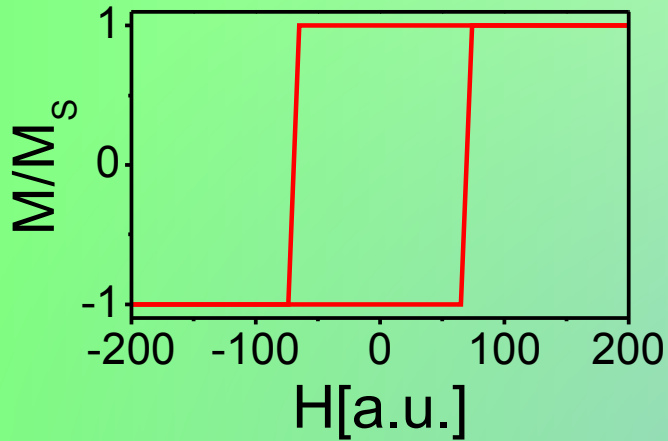
AMR – magnetoopór anizotropowy:

opór zależy od wzajemnej orientacji namagnesowania i mierzącego prądu

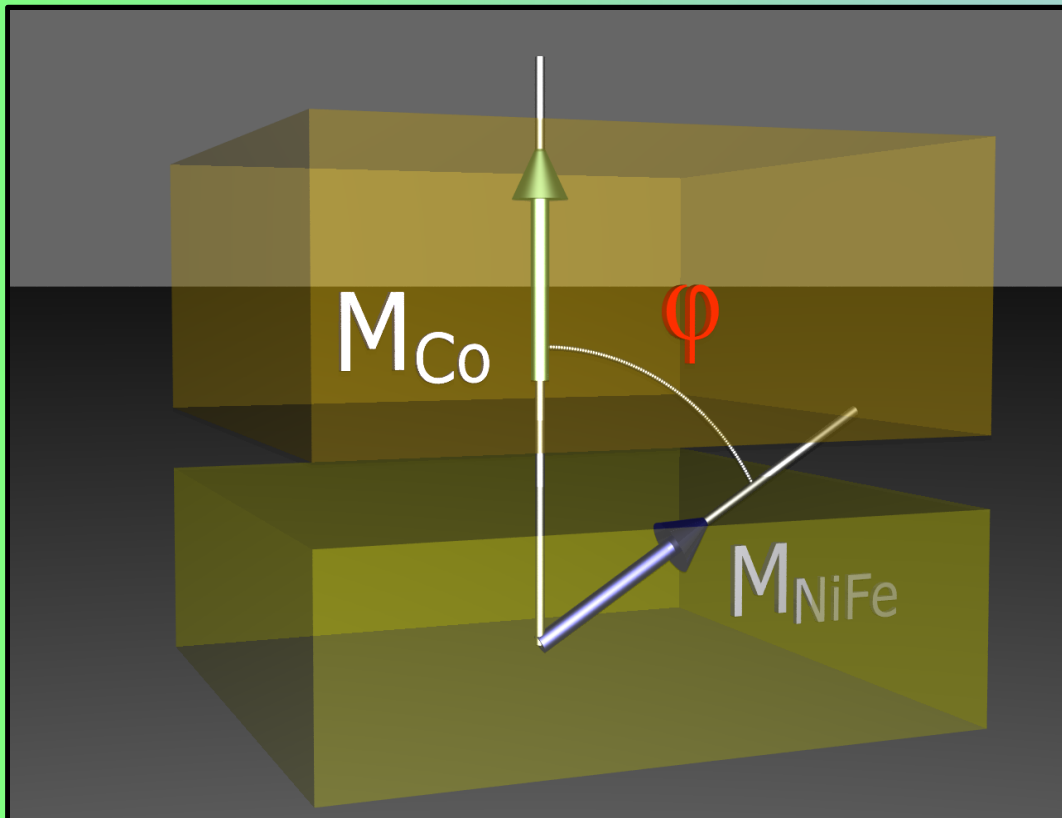
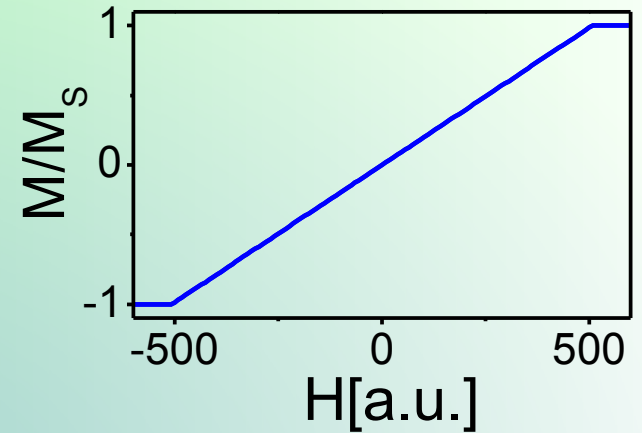
Magnetoopór anizotropowy jest **zbyt mały** by mógł być główną przyczyną występowania lokalnych minimów oporu w zależnościach $R(H)$.

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

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



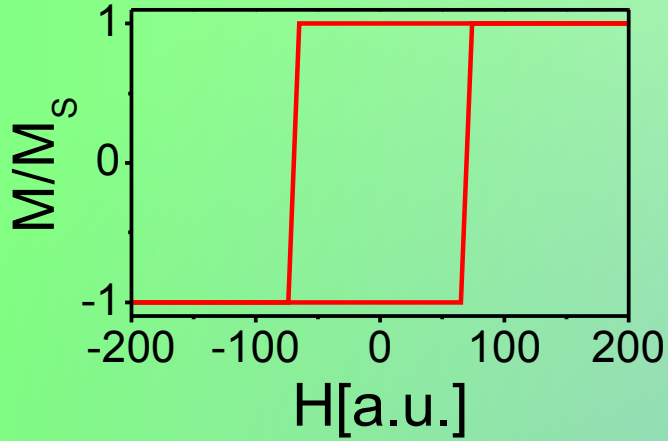
$$\Delta R \propto \cos(\varphi)$$



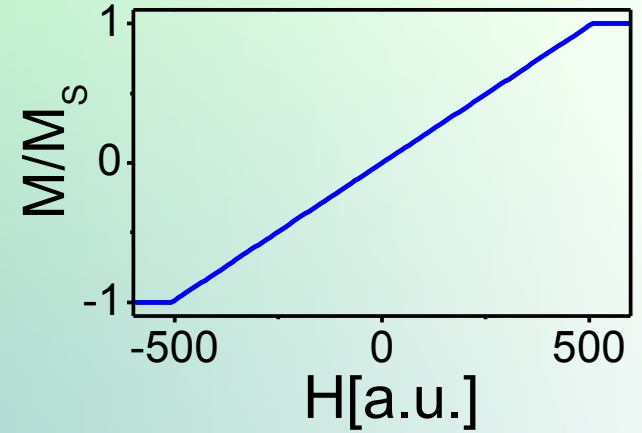
Założenia:

- momenty warstw Co są prostopadłe do płaszczyzny warstwy
- warstwy NiFe-anizotropia typu łatwa płaszczyzna
- pole magnetyczne prostopadłe do płaszczyzny warstwy

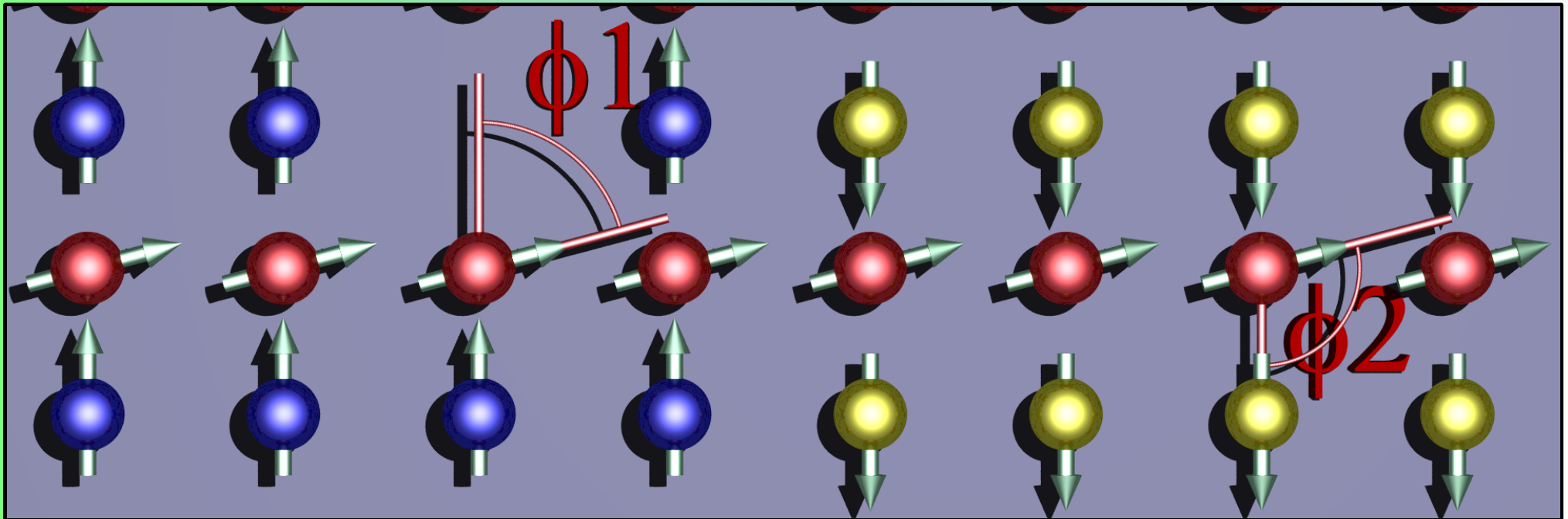
Gigantyczny magnetoopór warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ -model



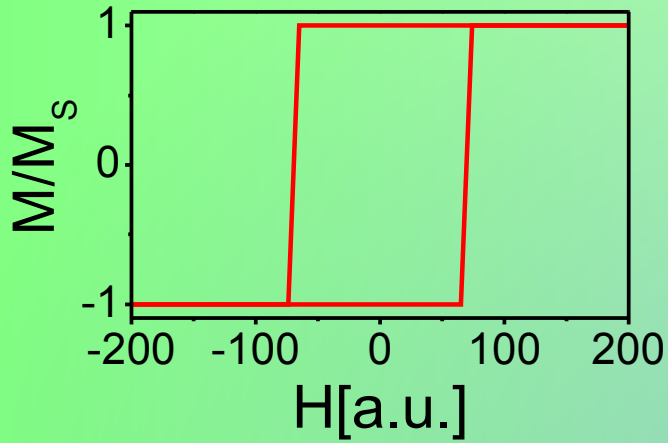
$$\Delta R \propto \cos(\varphi)$$



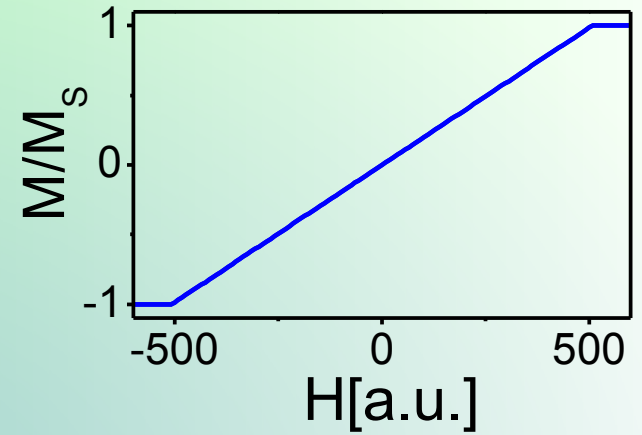
$$R(H) = a(R_0 - \Delta R \cdot \cos(\varphi_1)) + (1-a)(R_0 + \Delta R \cdot \cos(\varphi_2))$$



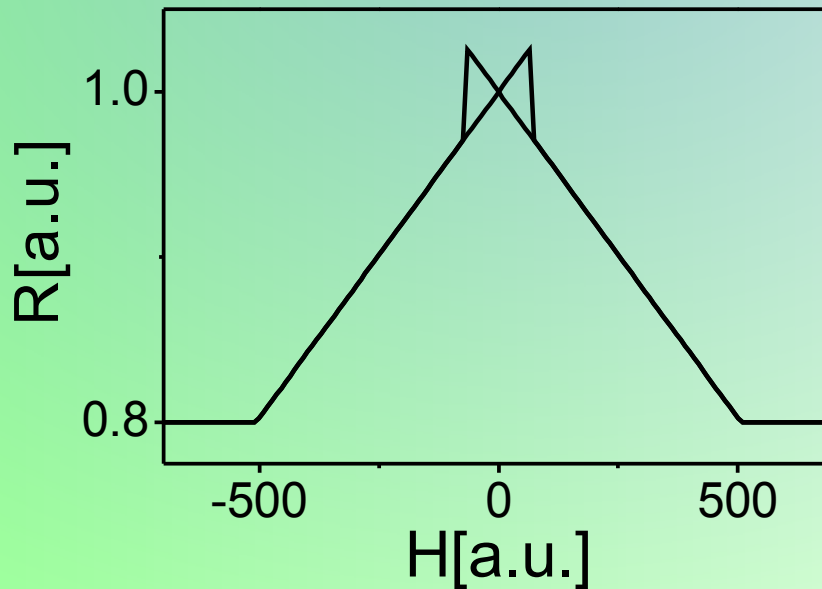
Gigantyczny magnetoopór warstw [NiFe/Au/Co/Au]_N-model



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

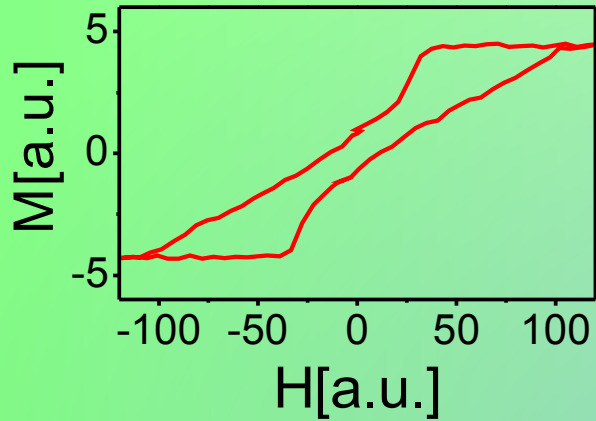


$$R(H) = a(R_0 - \Delta R \cdot \cos(\varphi_1)) + (1-a)(R_0 + \Delta R \cdot \cos(\varphi_2))$$

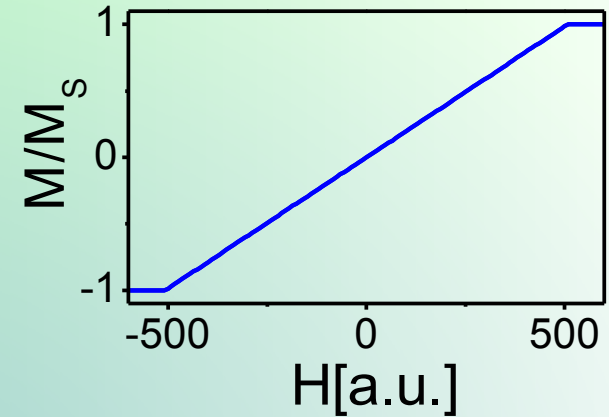


$$a(H) = \frac{1}{2} \left(\frac{M^{Co}(H)}{M_s^{Co}} + 1 \right)$$

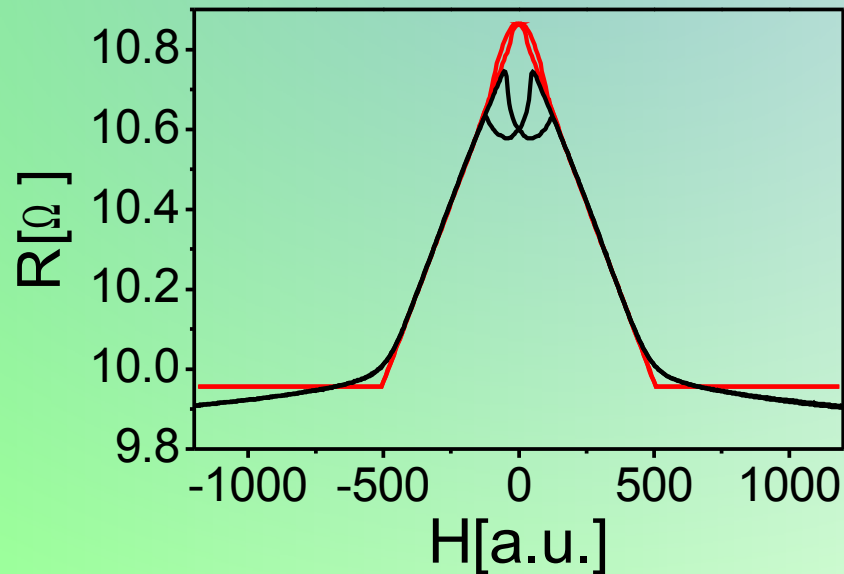
Gigantyczny magnetoopór warstw [NiFe/Au/Co/Au]_N-model



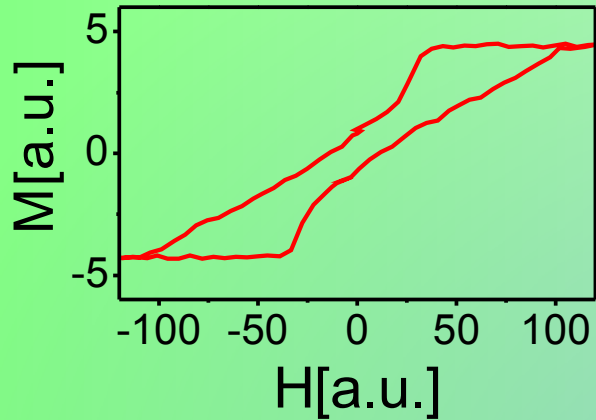
$$\Delta R \propto \cos(\varphi)$$



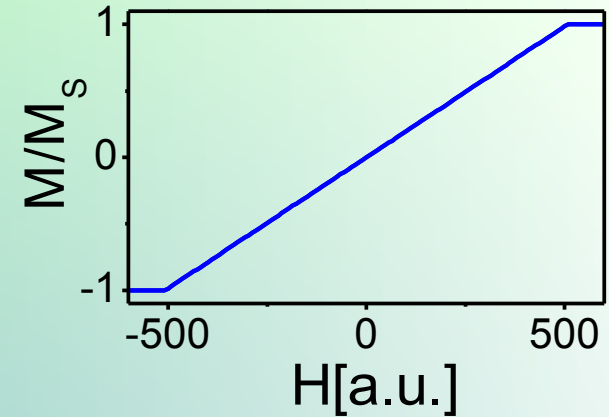
$$R(H) = a(R_0 - \Delta R \cdot \cos(\varphi_1)) + (1-a)(R_0 + \Delta R \cdot \cos(\varphi_2))$$



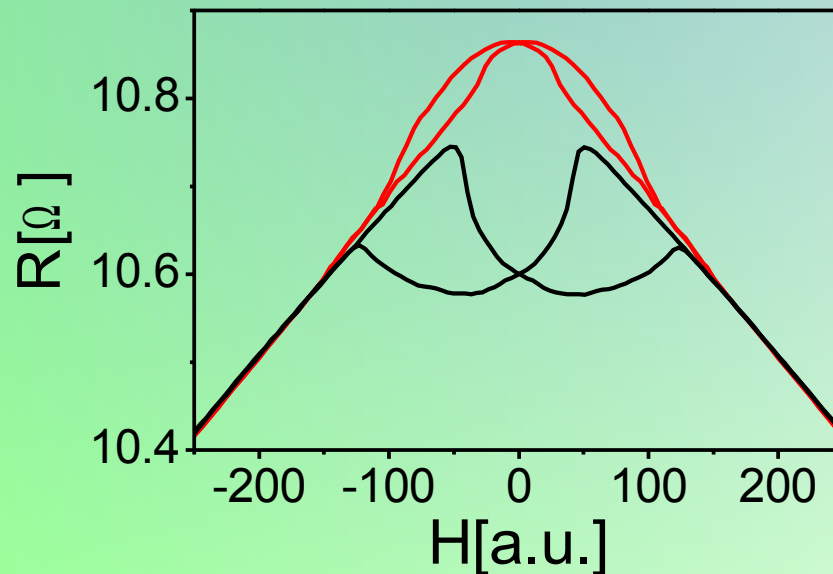
Gigantyczny magnetoopór warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ -model



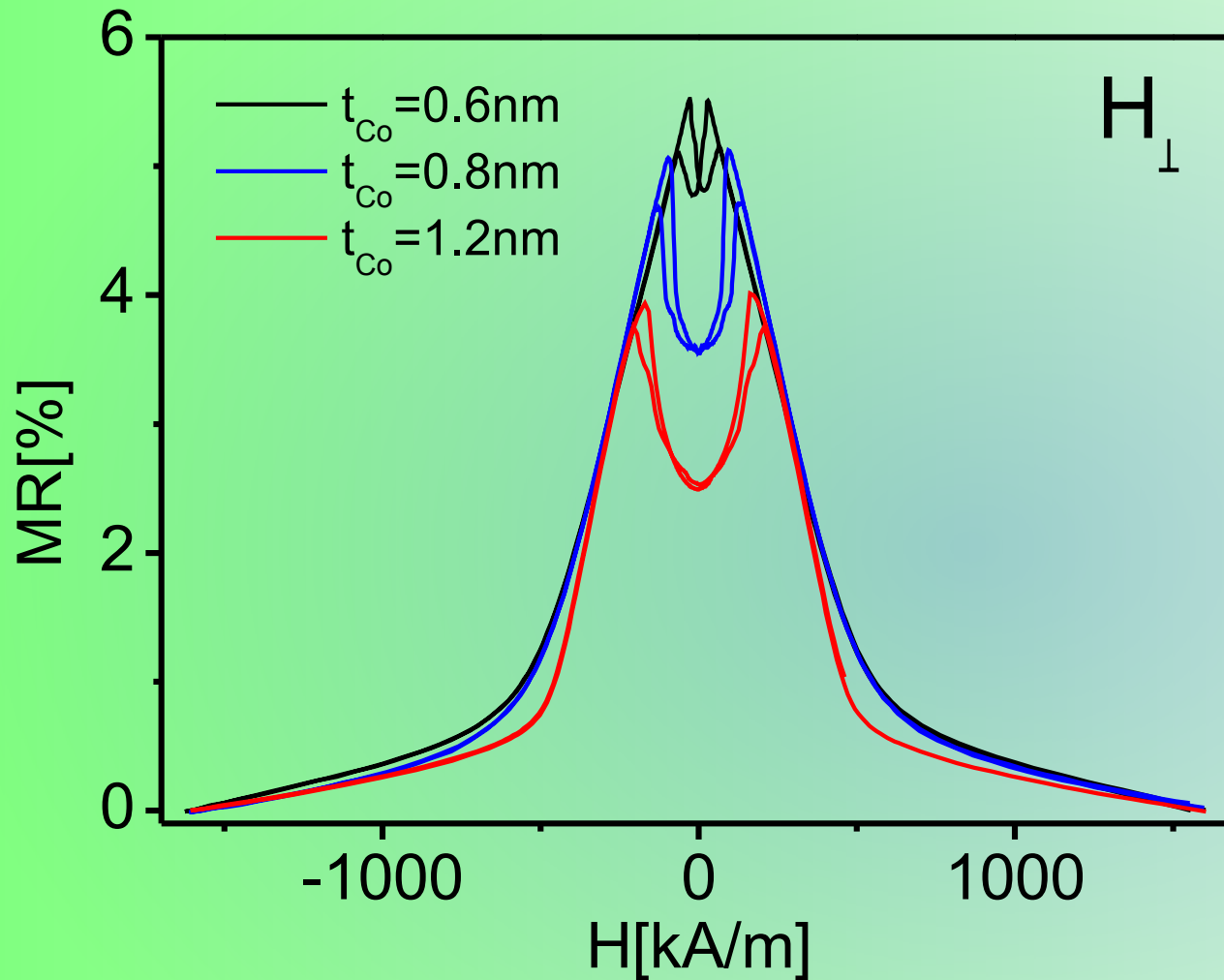
$$\Delta R \propto \cos(\varphi)$$



Niezależne przemagnesowanie warstw Co i NiFe nie prowadzi do występowania lokalnego minimum oporu



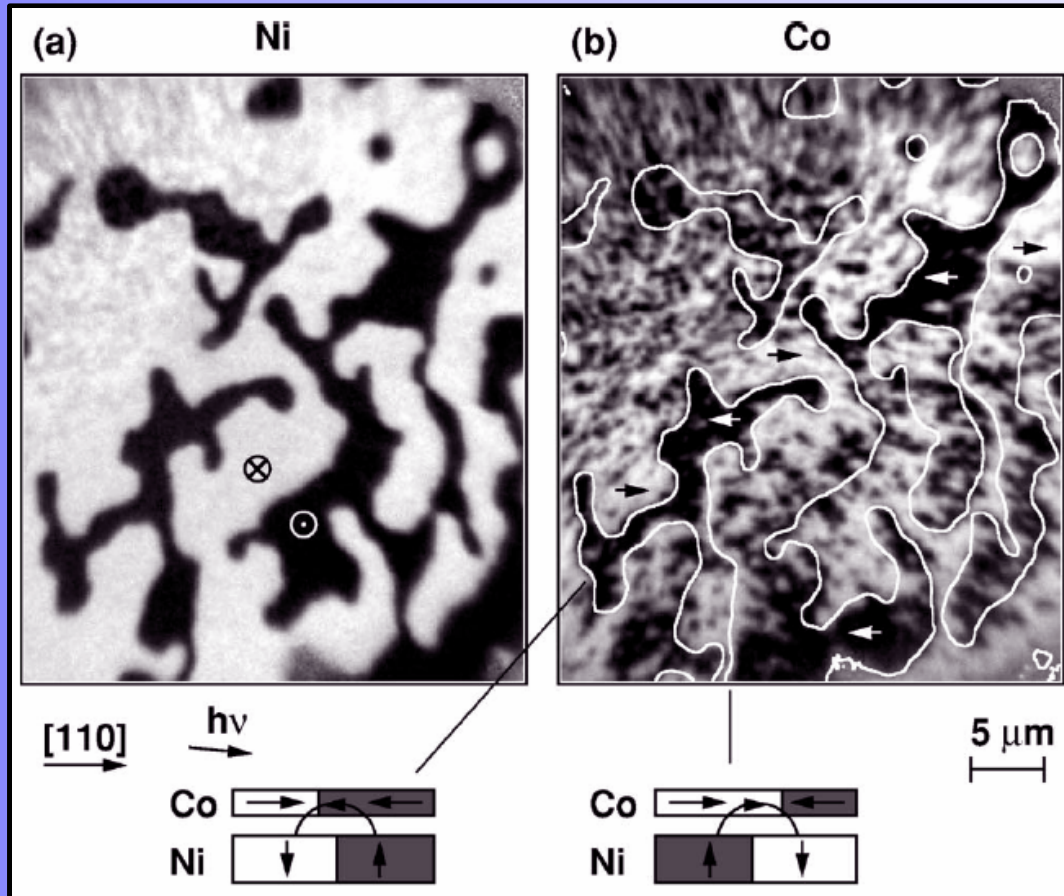
Gigantyczny magnetoopór warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$



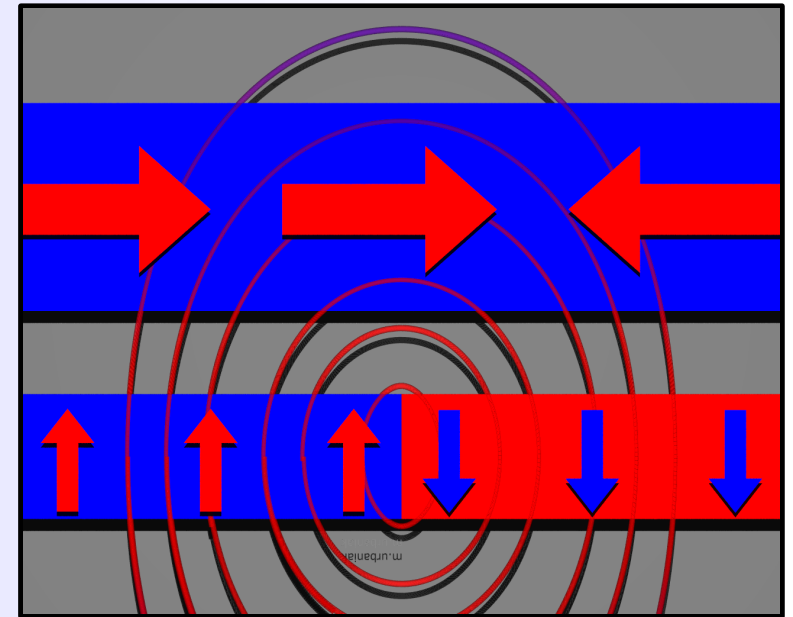
Względna „głębokość” minimum oporu zależy silnie od grubości subwarstw Co.

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

Oddziaływania dipolowe w warstwach wielokrotnych

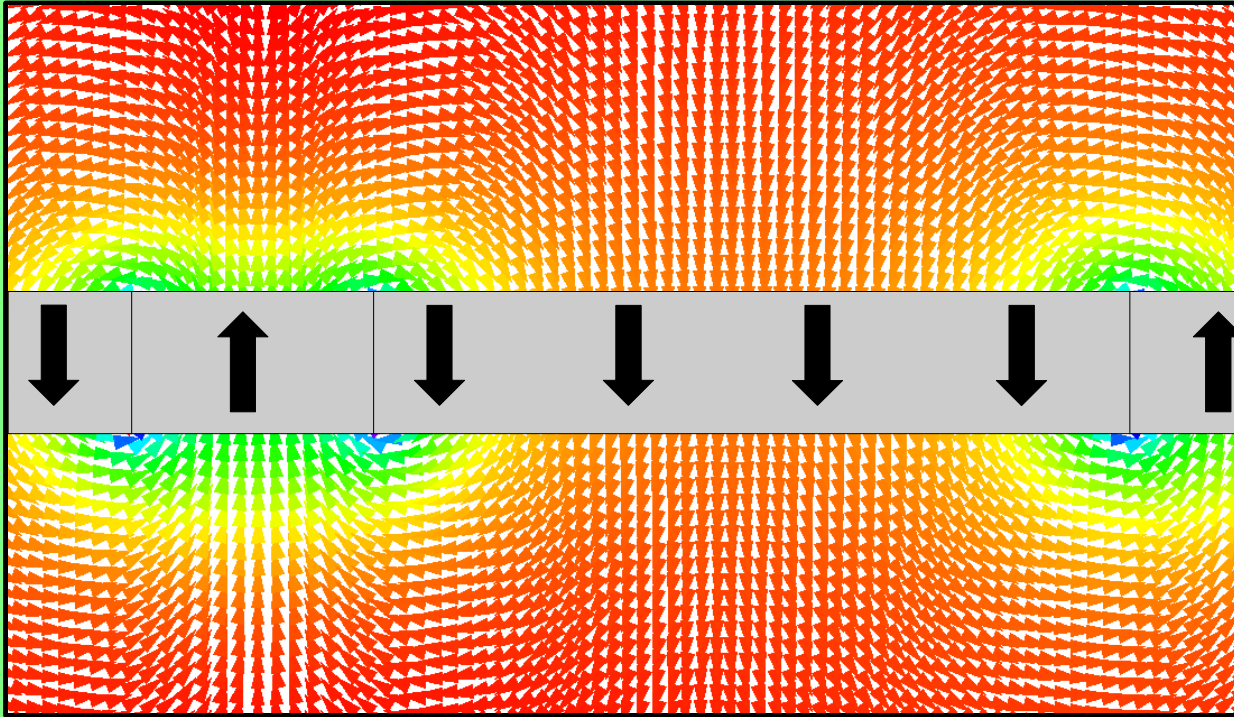


mikroskopia fotoelektronów (PEEM) +
dichroizm magnetyczny promieni X (XMCD)

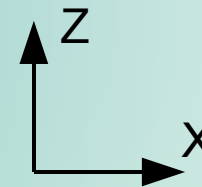


- Cu(001)/Ni/Cu/Co
- Cu – klin (ok. 1ML/10m)
- odparowanie wiązką elektronów
- Ni - anizotropia prostopadła**
- pole DW Ni w Co: 250Oe

Pola magnetostaticzne w warstwach [NiFe/Au/Co/Au]_N



- Nieskończenie długie domeny (kierunek y)
- zerowa szerokość ścian domenowych
- Biot-Savart

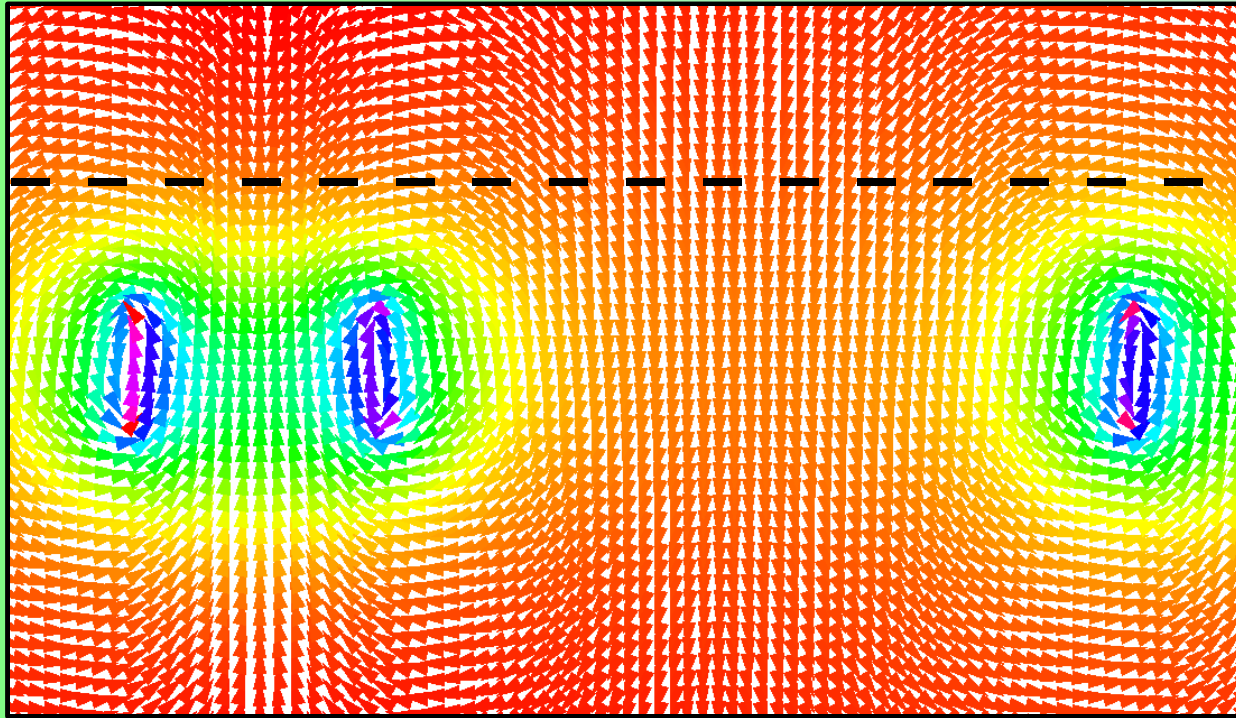


$$H_z = \frac{M_S^{Co}}{2\pi} \arctan\left(\frac{z_2 - z}{x_2 - x_1}\right) \Bigg|_{z_0}^{z_3}$$

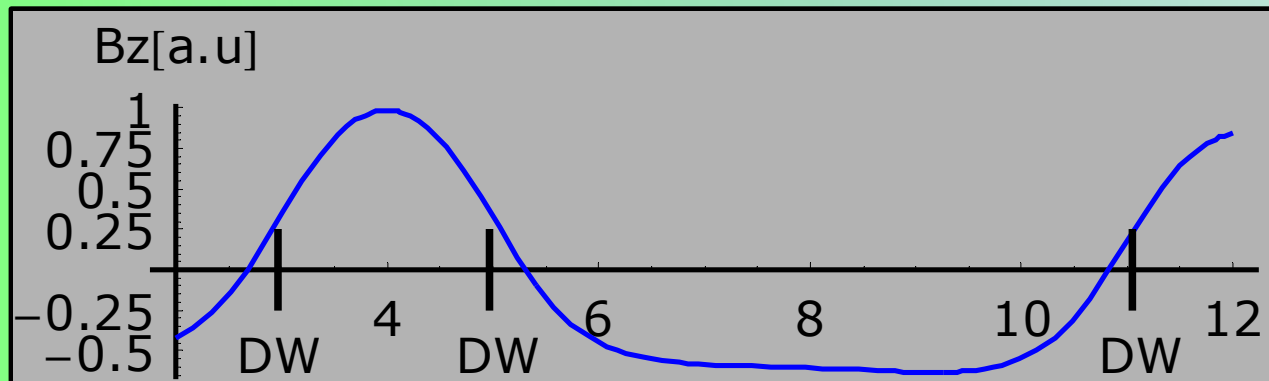
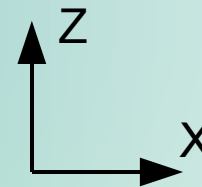
$$H_x = \frac{M_S^{Co}}{2\pi} \ln\left[\frac{(x_2 - x_1)^2 + (z_2 - z)^2}{(x_2 - x_1)^2 + (z_2 - z_0)^2}\right] \Bigg|_{z_0}^{z_3}$$

Pole magnetyczne domen silnie zależy od stosunku szerokość/grubość

Pola magnetyczne w warstwach [NiFe/Au/Co/Au]_N

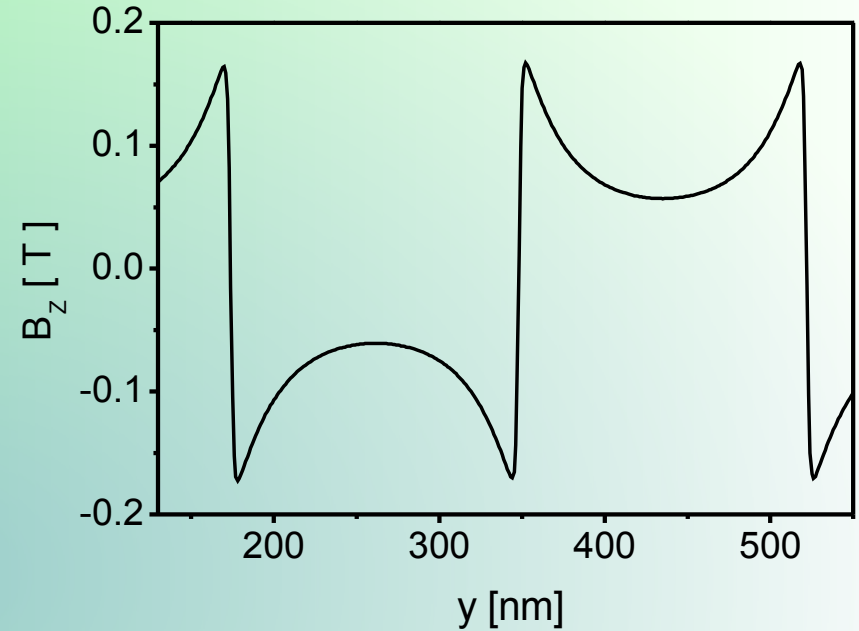
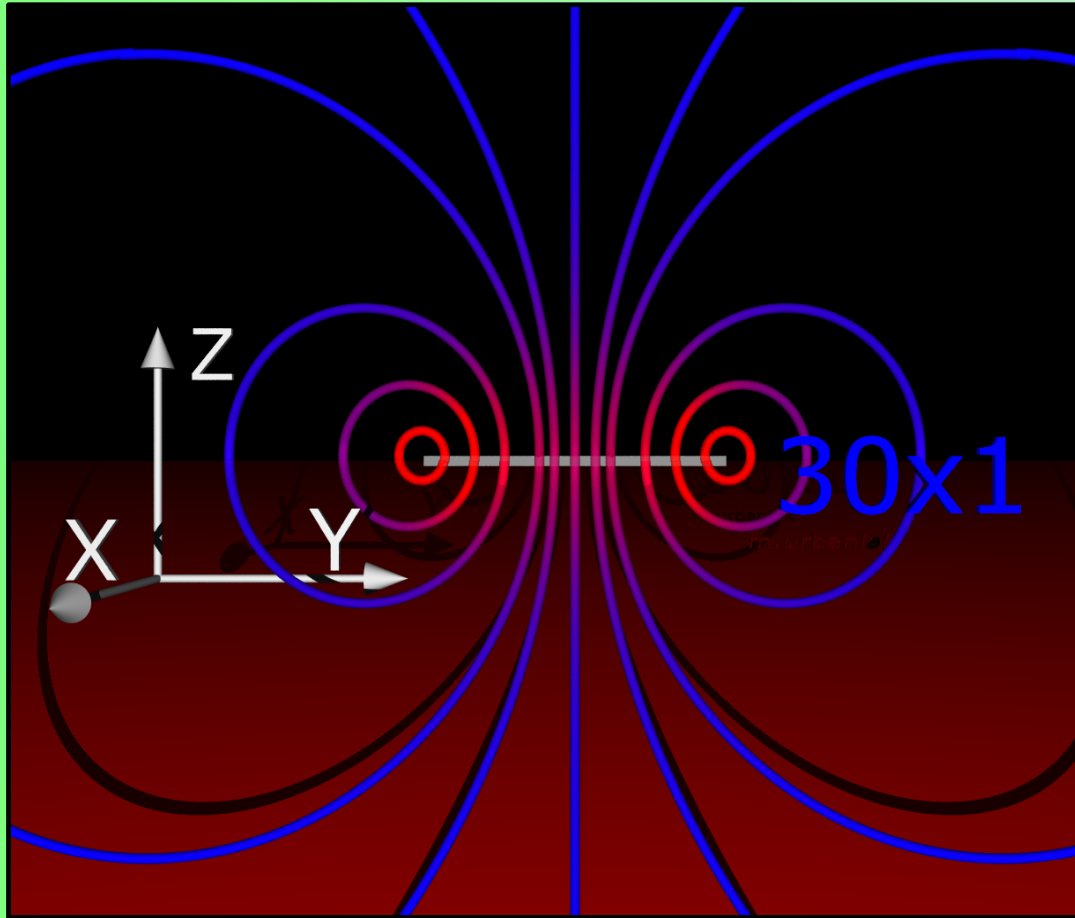


Położenie warstwy
miękkiej (NiFe)



DW-ściana domenowa

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



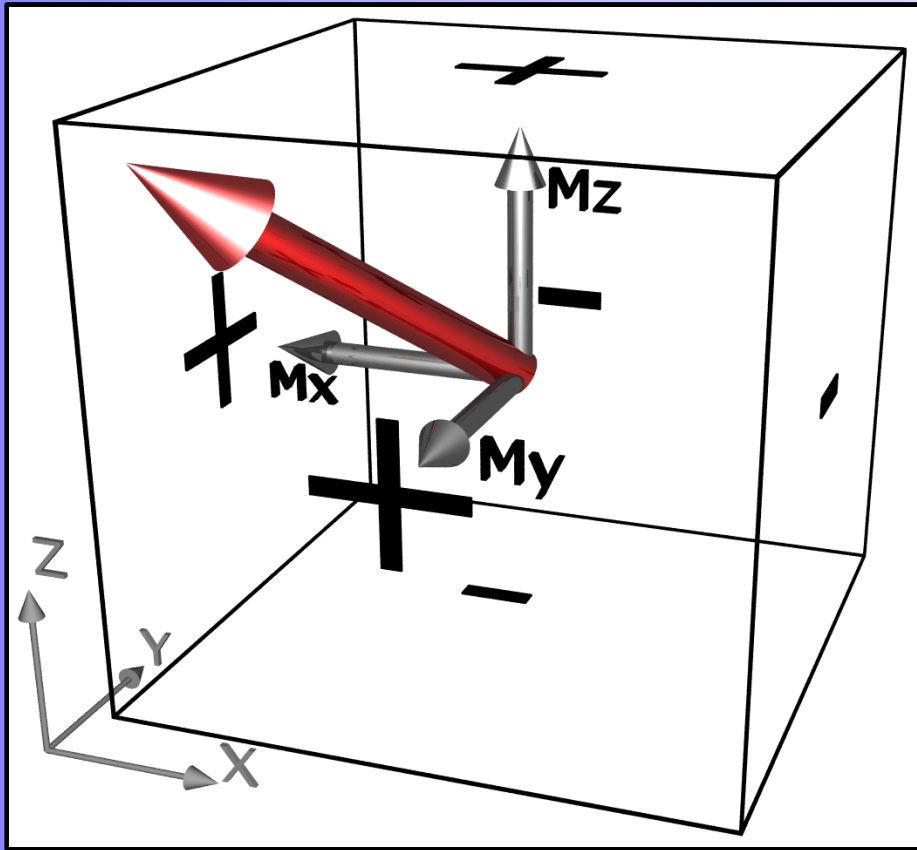
Model:

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.

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



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

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

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

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

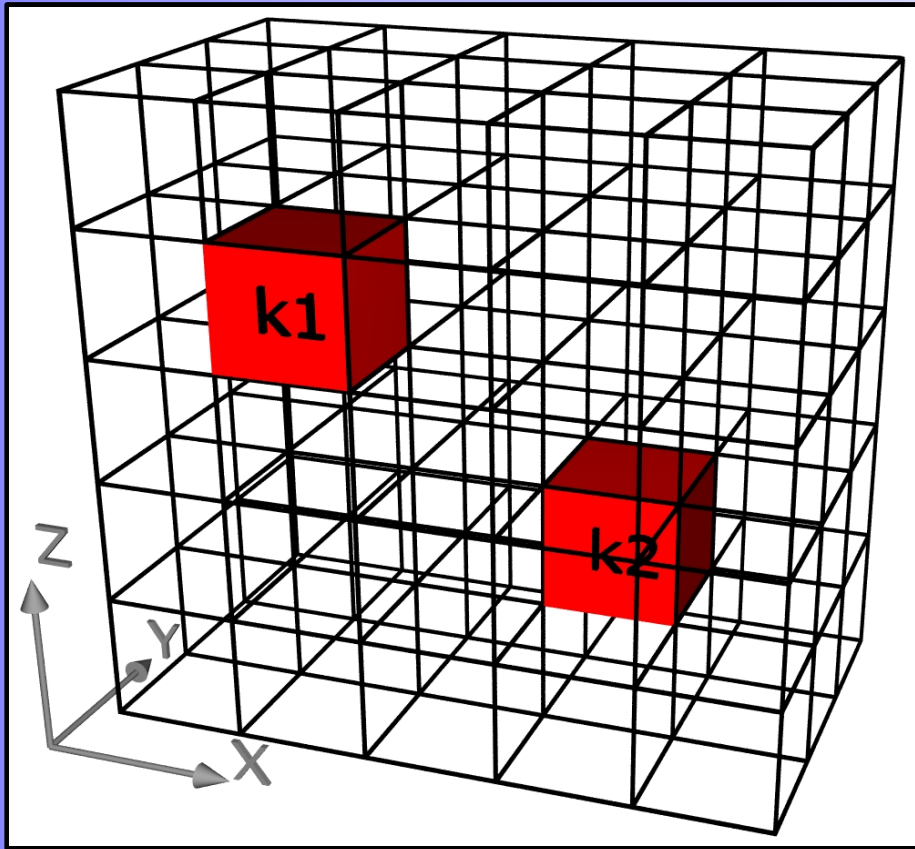
$$\phi_m = \frac{1}{4\pi} \int d\tau (\vec{M} \nabla_q r^{-1})$$

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

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

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

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



Równanie LLG:

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

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

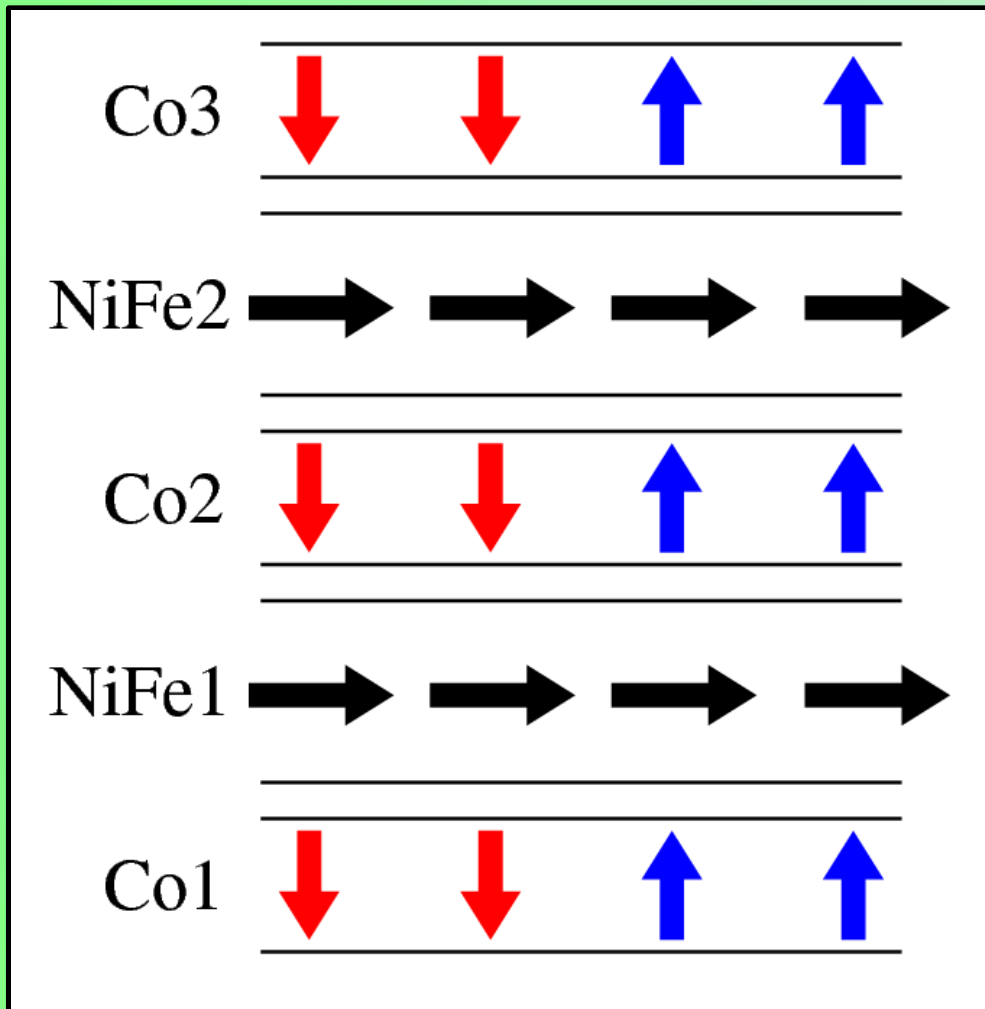
$$\vec{H}_{eff} = \frac{-1}{\mu_0 \vec{M}_s} \frac{\delta \epsilon}{\delta \vec{m}}$$

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

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

Oddziaływanie magnetostatyczne między komórkami ma charakter globalny.

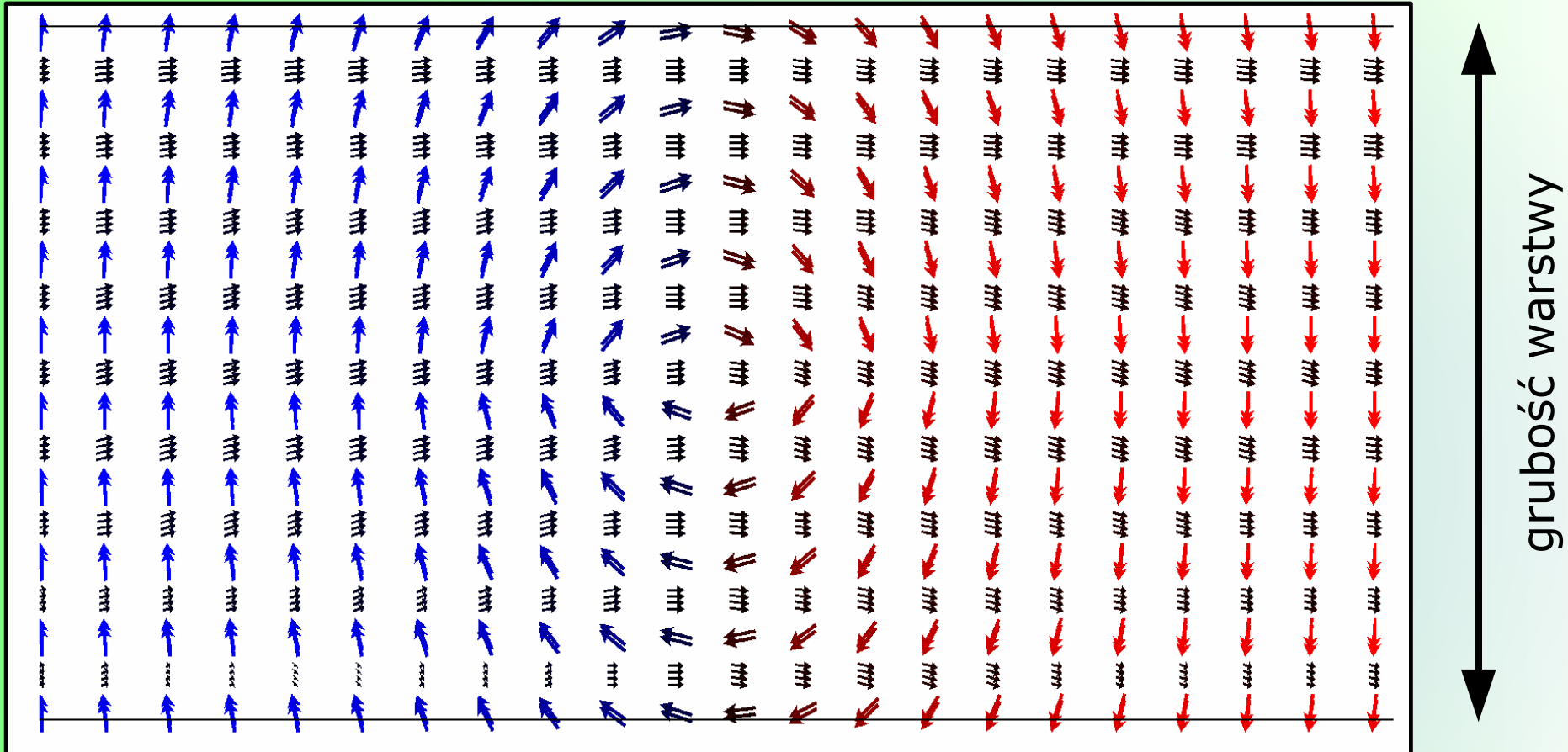
Struktura domenowa warstw [NiFe/Au/Co/Au]_N - symulacje mikromagnetyczne*



- symulacja stanu remanencyjnego
- w stanie początkowym domeny pasiaste w subwarstwach Co
- w stanie początkowym stan jednodomenowy w warstwach NiFe

*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 $(5 \times 0.5 \times 50\text{nm}^3)$; stała wymiany: Co: $30\text{e-}12 \text{ J/m}$, NiFe: $13\text{e-}12 \text{ J/m}$

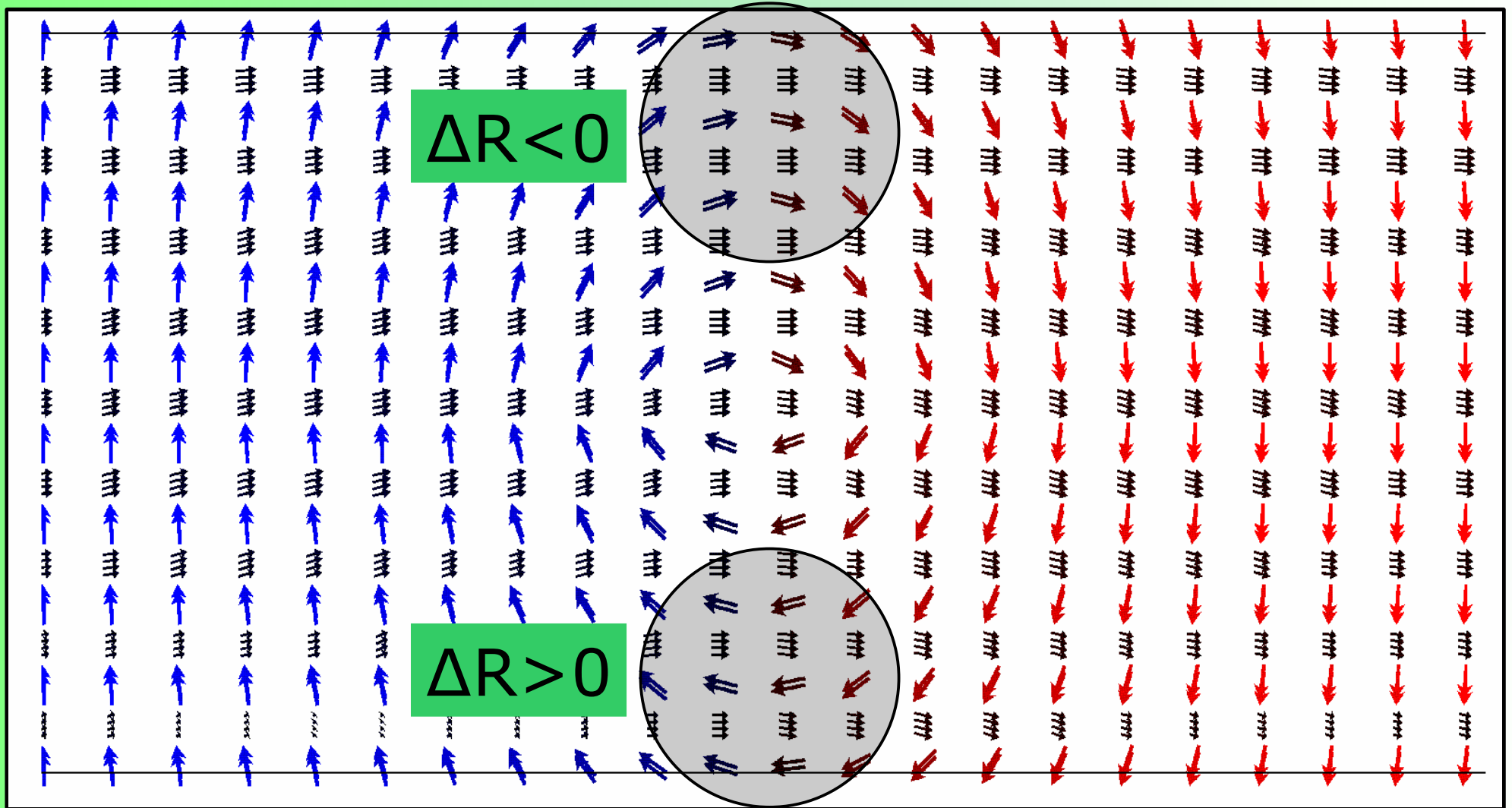
Struktura domenowa warstw [NiFe/Au/Co/Au]_N - symulacje mikromagnetyczne*



$H=0$ A/m

*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 $(5 \times 0.5 \times 50\text{nm}^3)$; stała wymiany: Co: $30\text{e-}12$ J/m, NiFe: $13\text{e-}12$ J/m

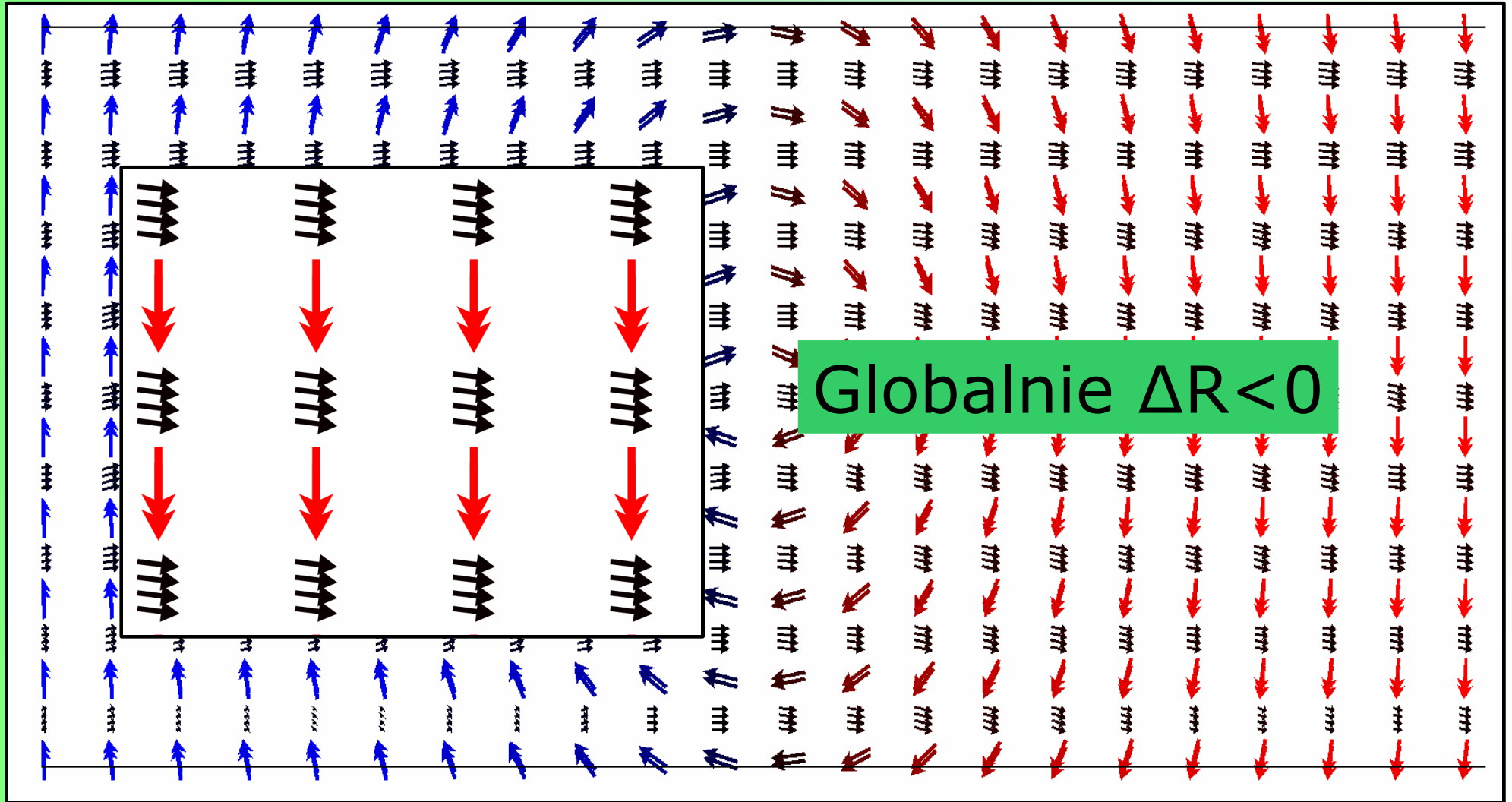
Struktura domenowa warstw [NiFe/Au/Co/Au]_N - symulacje mikromagnetyczne



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

$H=0$ A/m

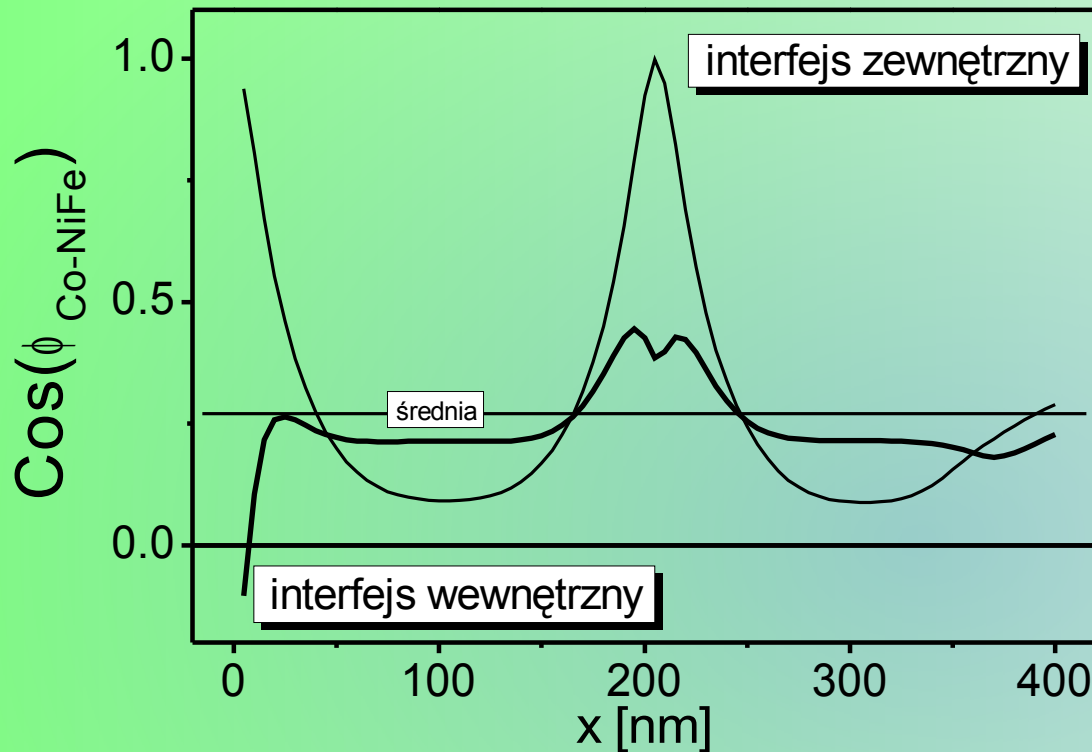
Struktura domenowa warstw [NiFe/Au/Co/Au]_N - symulacje mikromagnetyczne



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

$H=0$ A/m

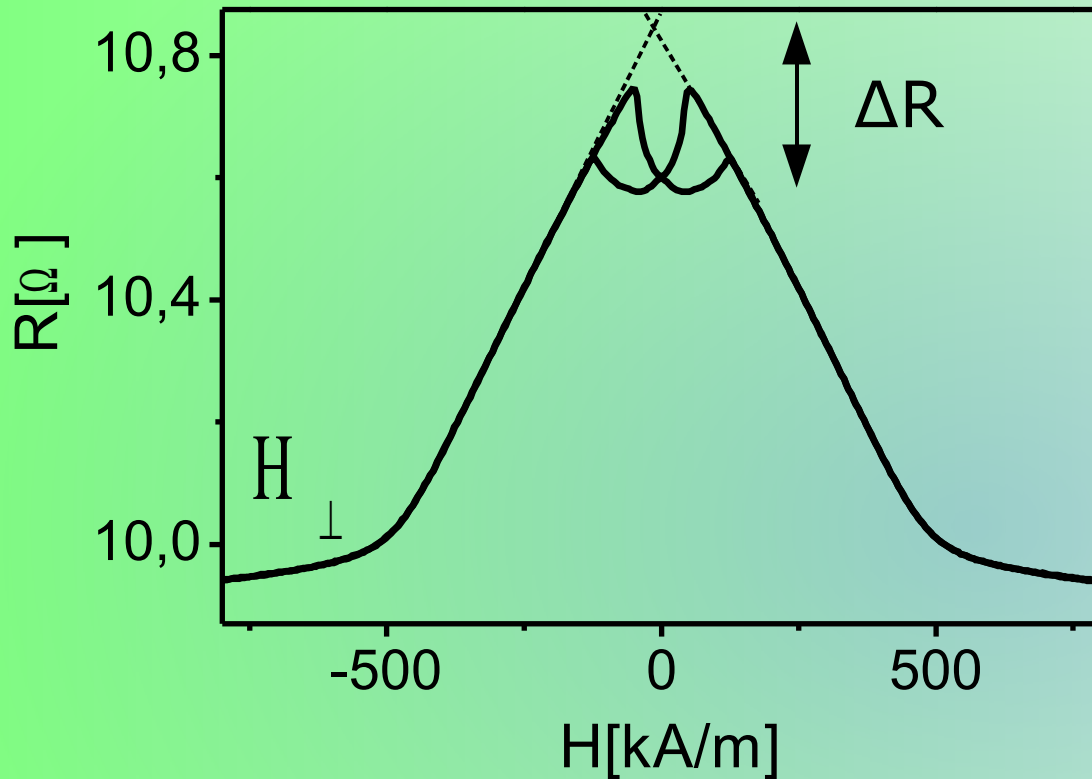
Struktura domenowa warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ - symulacje mikromagnetyczne



$$\Delta \text{cos}(\varphi) = 0.265$$

W wyniku oddziaływań magnetostatycznych między warstwami Co i NiFe zwiększeniu ulega średnia wartość kosinus kąta między momentami magnetycznymi sąsiednich warstw \Rightarrow spadek oporu.

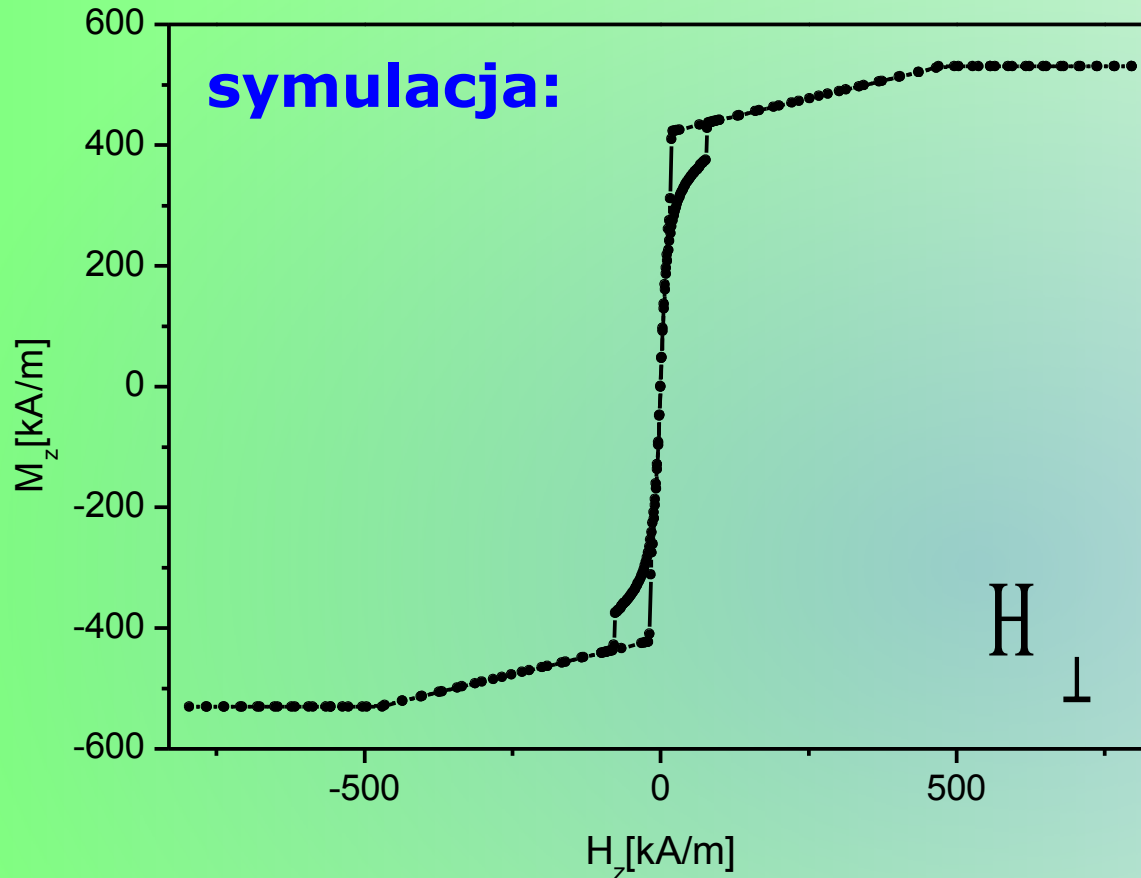
Struktura domenowa warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ - symulacje mikromagnetyczne



$$\Delta \cos(\varphi) = 0.265$$

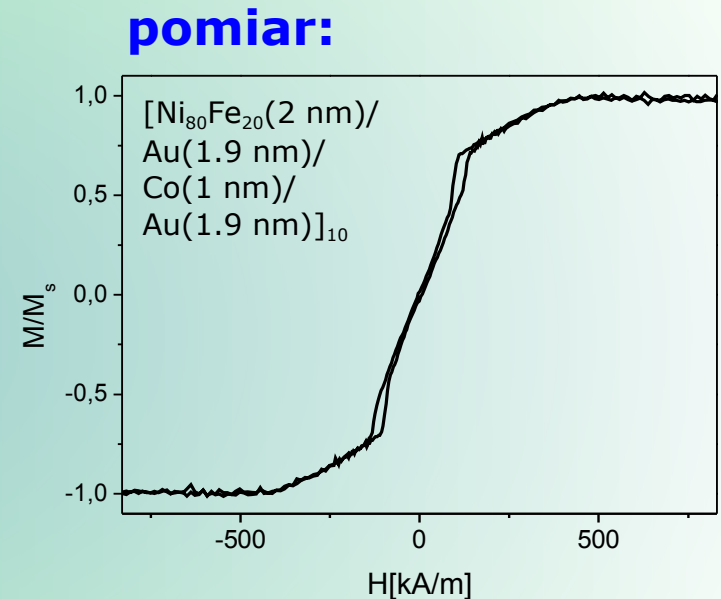
W wyniku oddziaływań magnetostatycznych między warstwami Co i NiFe zwiększeniu ulega średnia wartość kosinus kąta między momentami magnetycznymi sąsiednich warstw \Rightarrow spadek oporu.

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



Co-anizotropia prostopadła

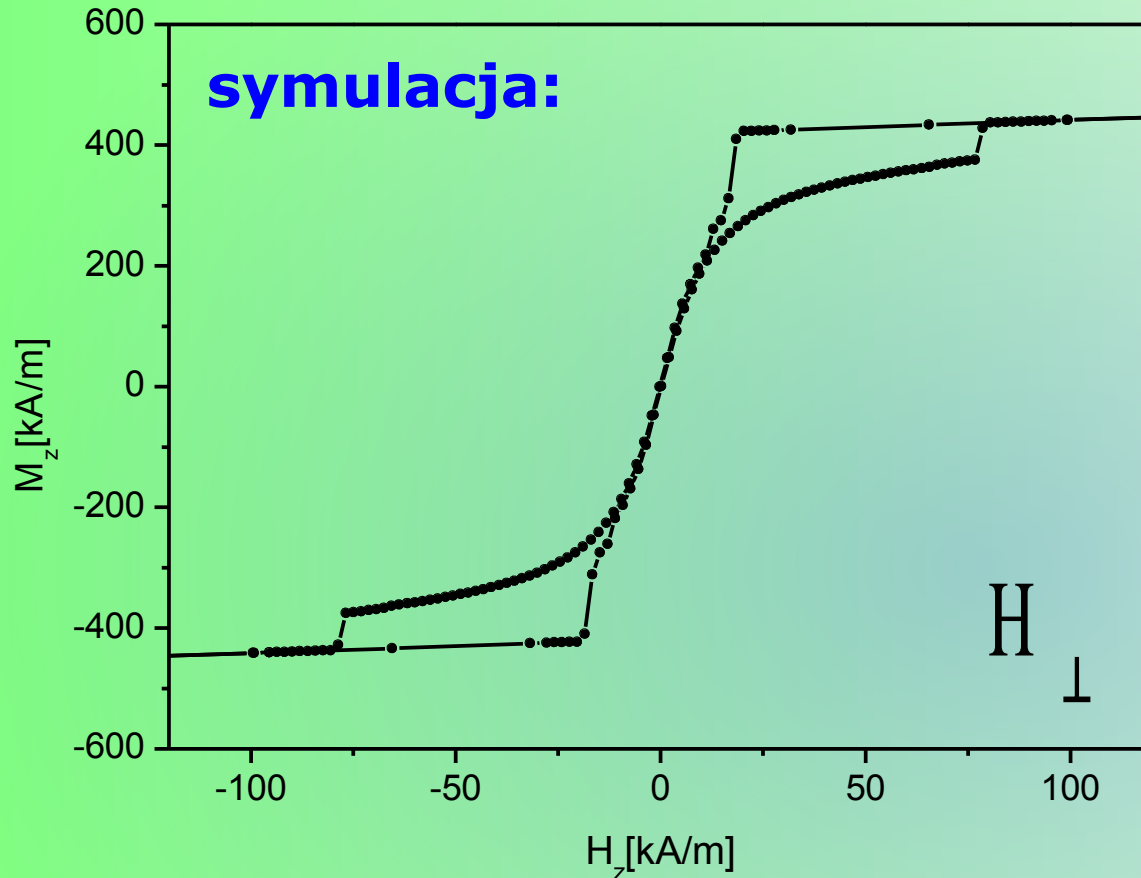
NiFe-anizotropia kształtu



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

*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: $13\text{e-}12 \text{ J/m}$

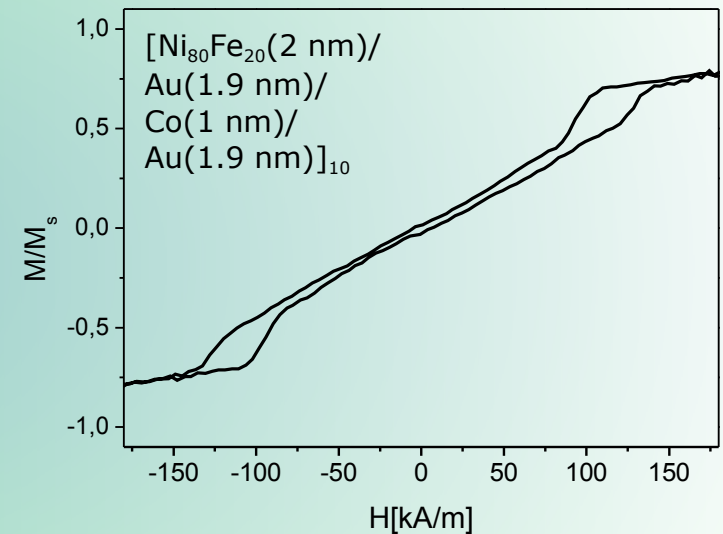
Struktura domenowa warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ - symulacje mikromagnetyczne



Co-anizotropia prostopadła

NiFe-anizotropia kształtu

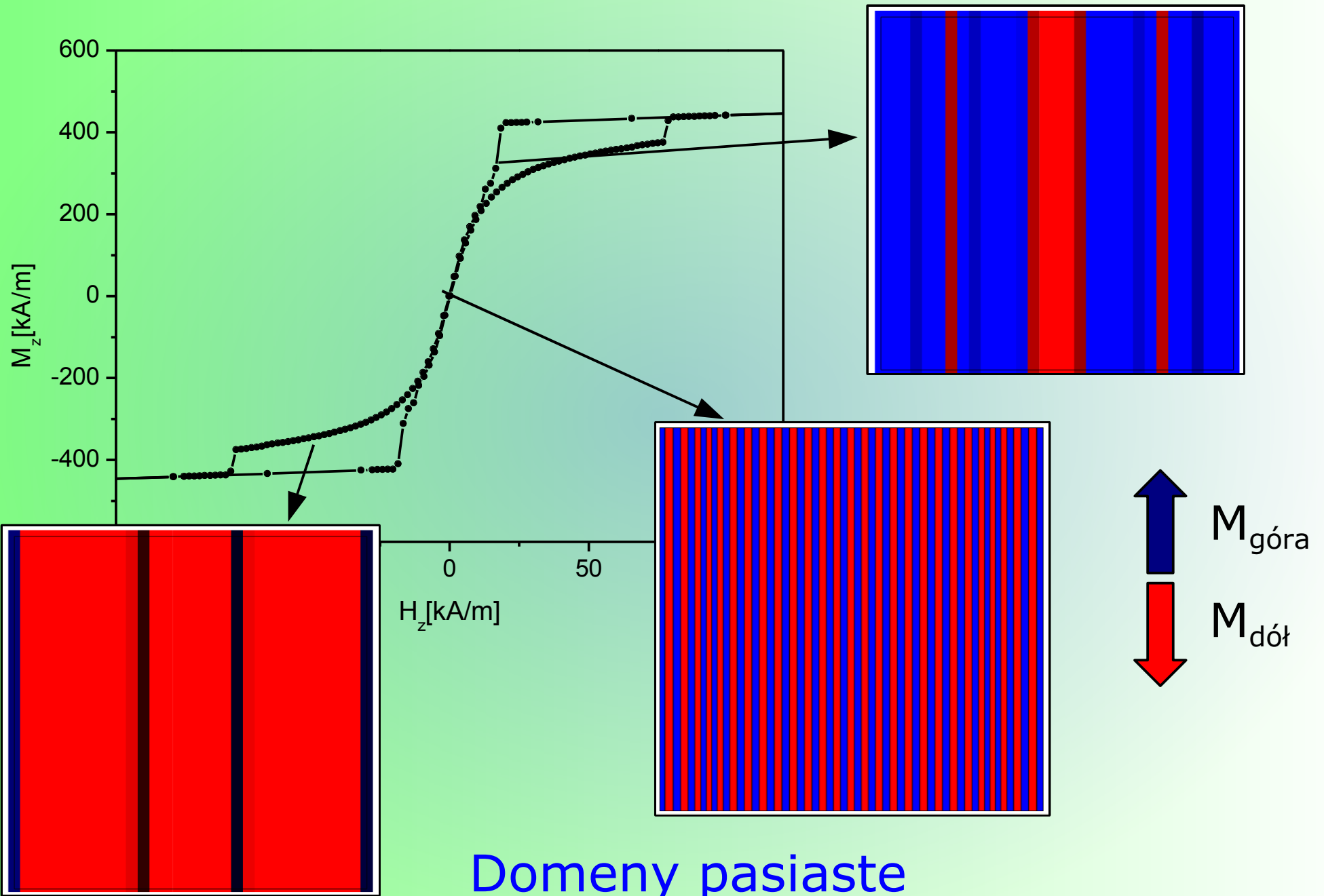
pomiar:



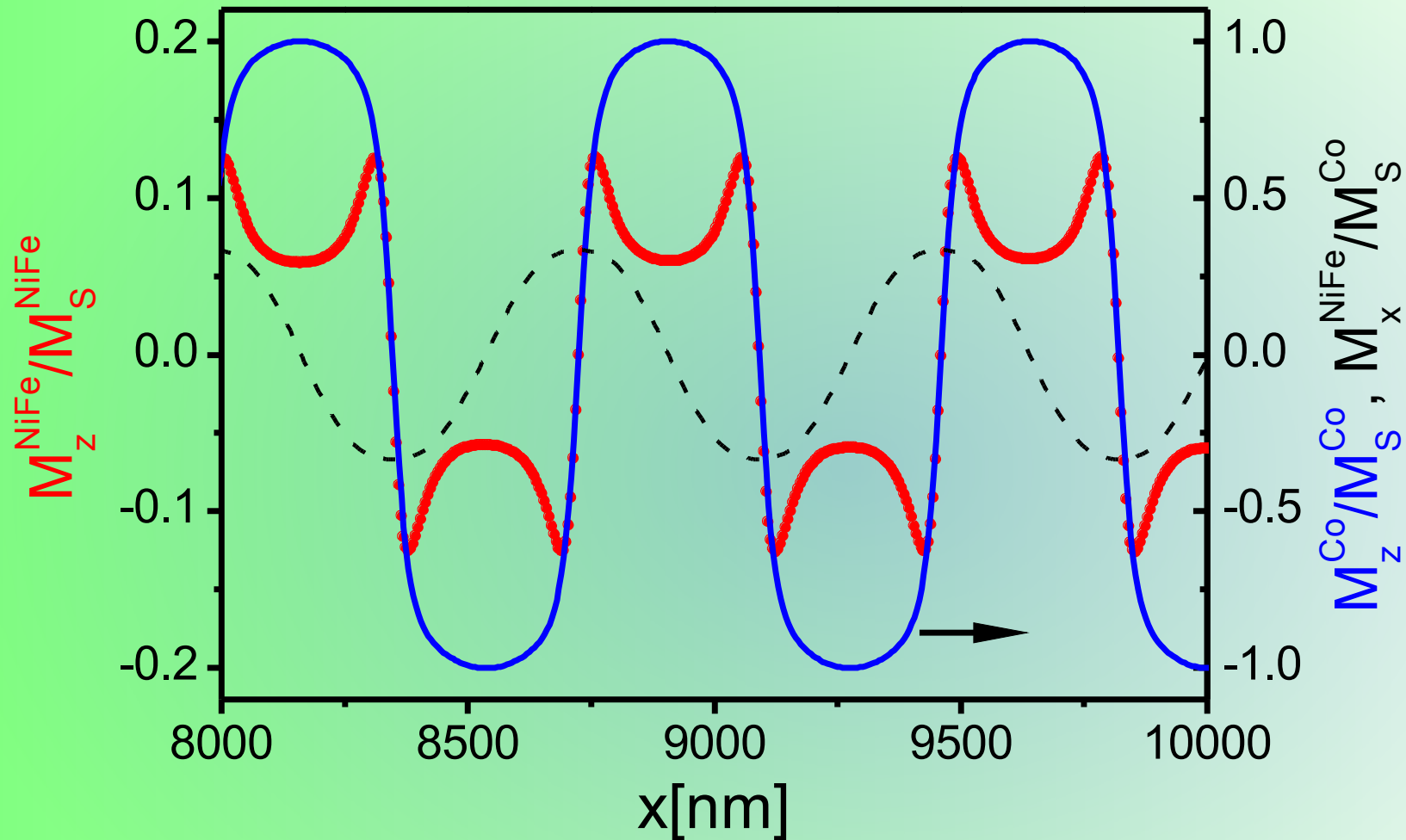
$[\text{Co}(1\text{nm})/\text{przekładka}(1\text{nm})/\text{NiFe}(1\text{nm})/\text{przekładka}(1\text{nm})]_4/\text{Co}(1\text{nm})$

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 mikromagnetyczne

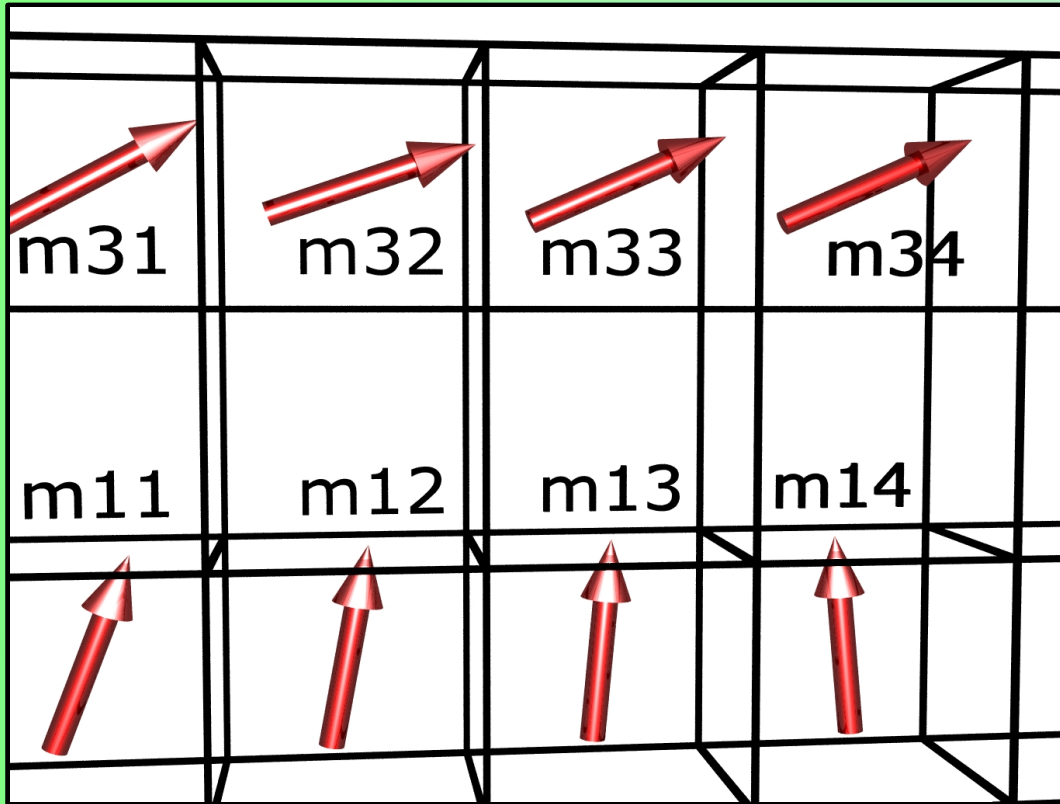


Struktura domenowa warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ - symulacje mikromagnetyczne



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

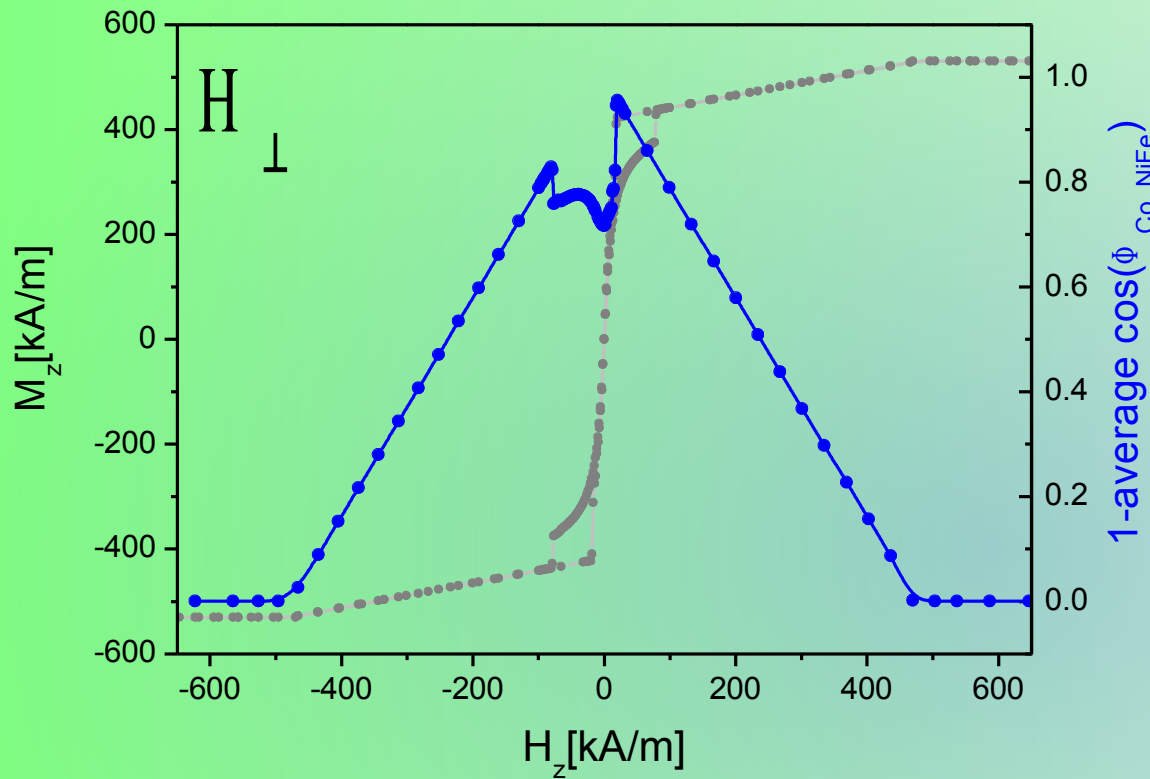
Magnetoopór warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ - symulacje mikromagnetyczne



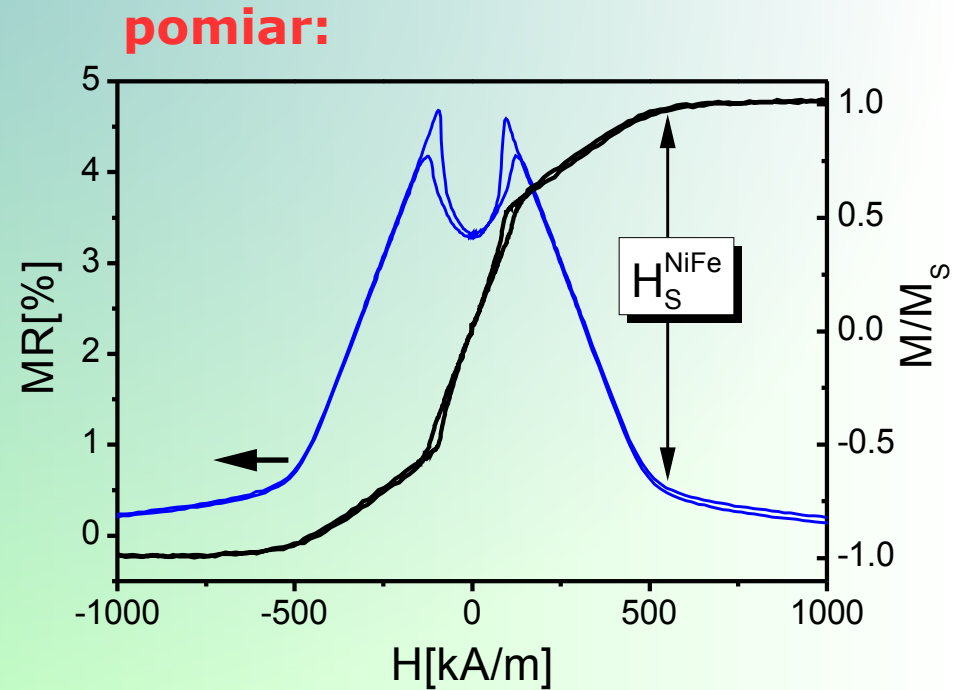
- zakłada się, że zmienna część oporu elektrycznego warstwy $\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}$ jest proporcjonalna do średniego kosinusa kątów między momentami magnetycznymi sąsiednich subwarstw magnetycznych
- w poniższych obliczeniach nie uwzględnia się innych rodzajów magnetooporu (OMR, AMR)

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

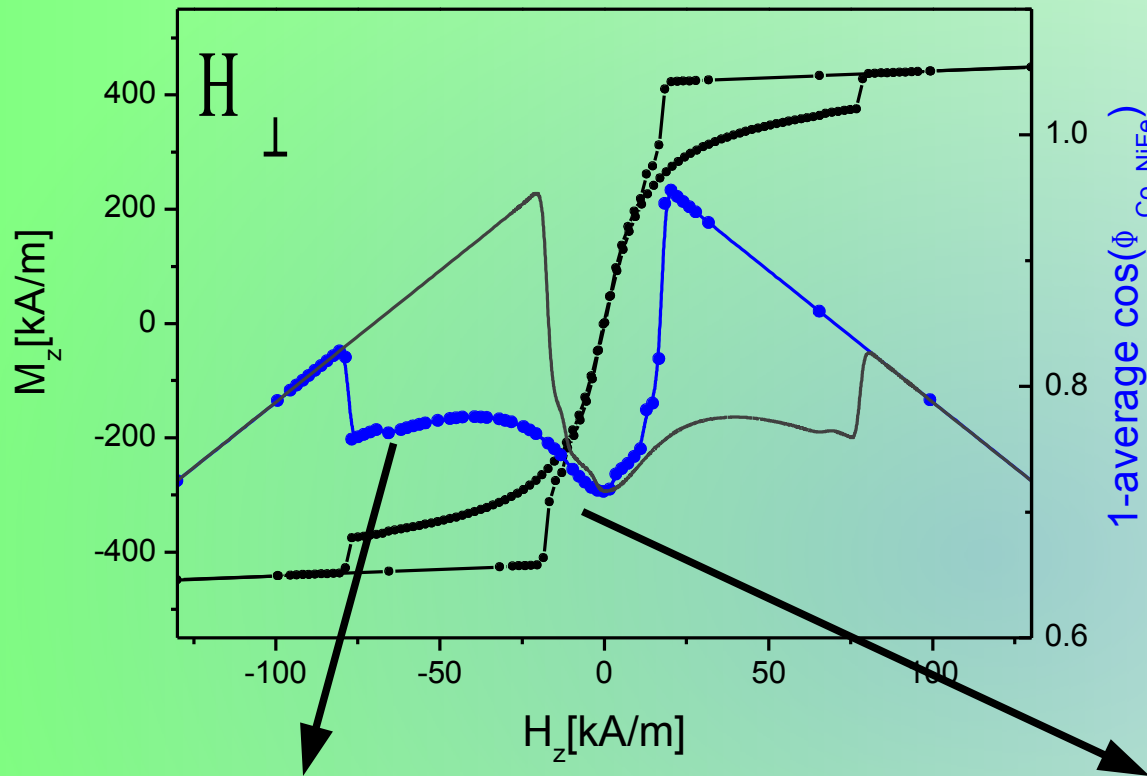
Magnetoopór warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ - symulacje mikromagnetyczne



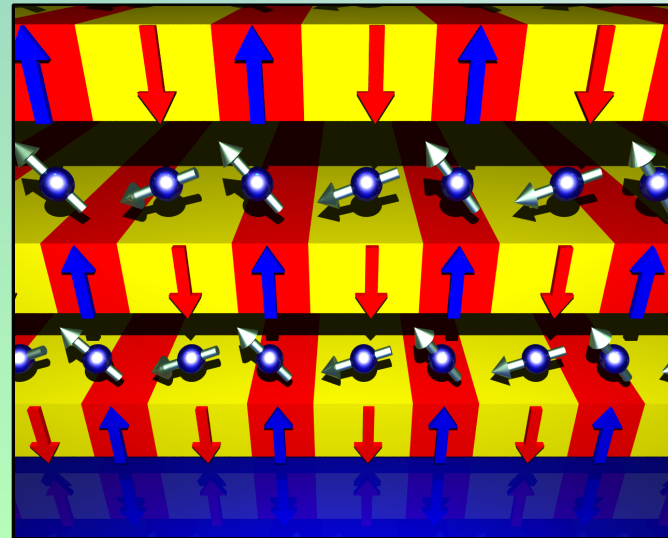
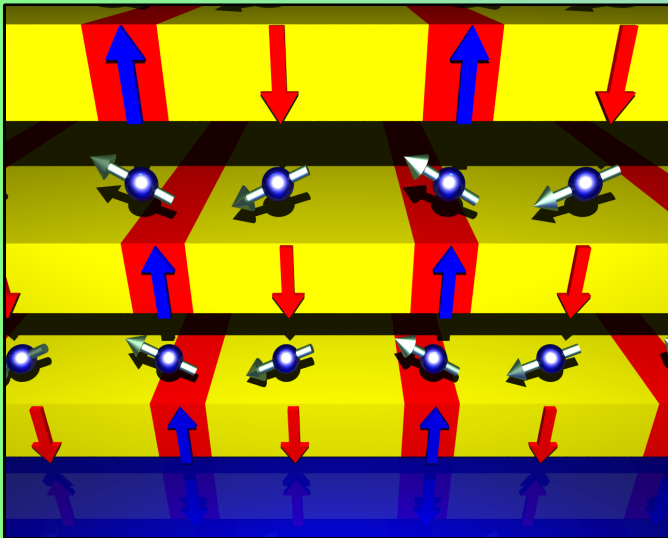
Gigantyczny magnetoopór warstw wielokrotnych NiFe/Au/Co/Au może być odwzorowany za pomocą symulacji mikromagnetycznych.



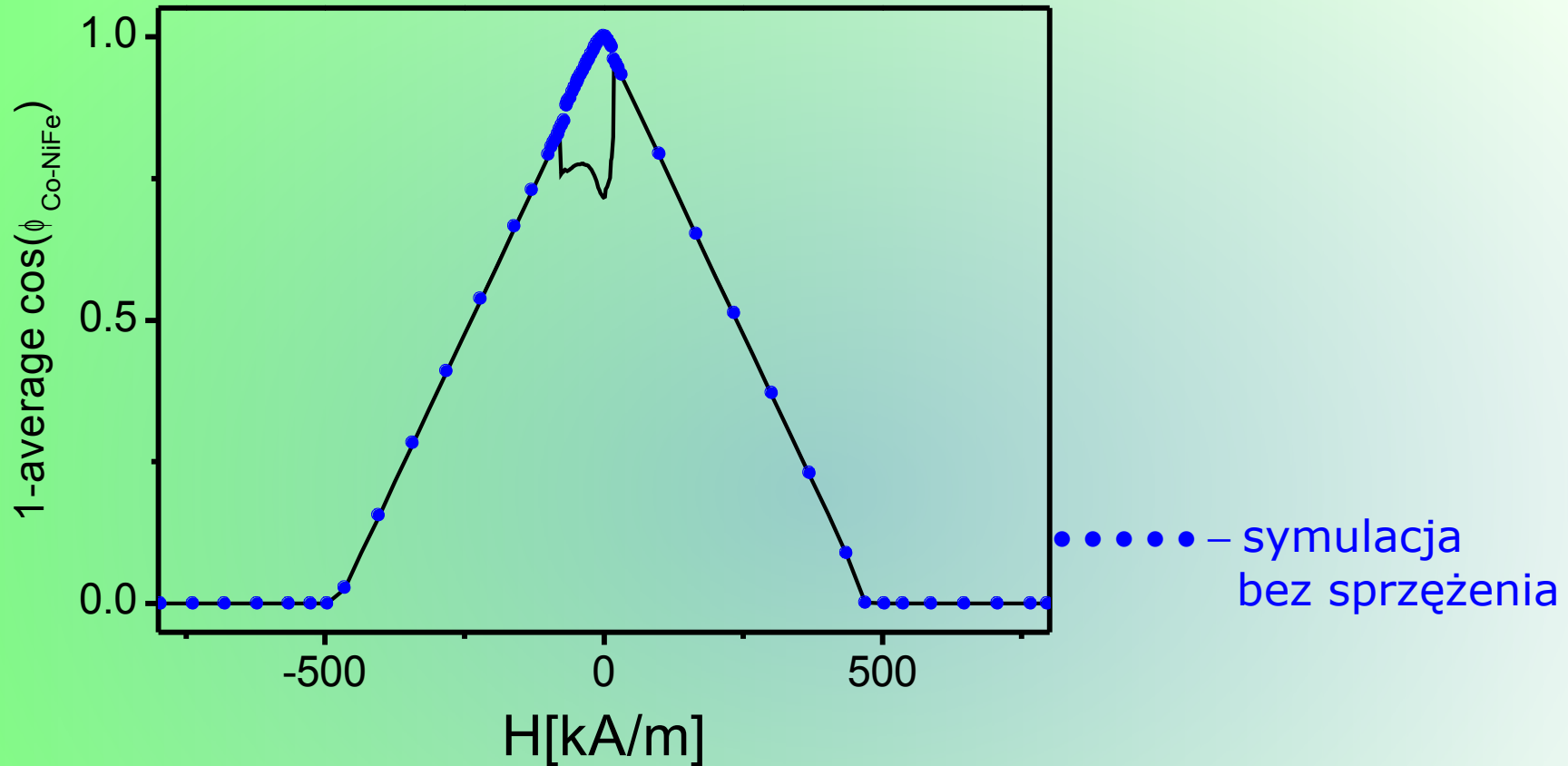
Magnetoopór warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ - symulacje mikromagnetyczne



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

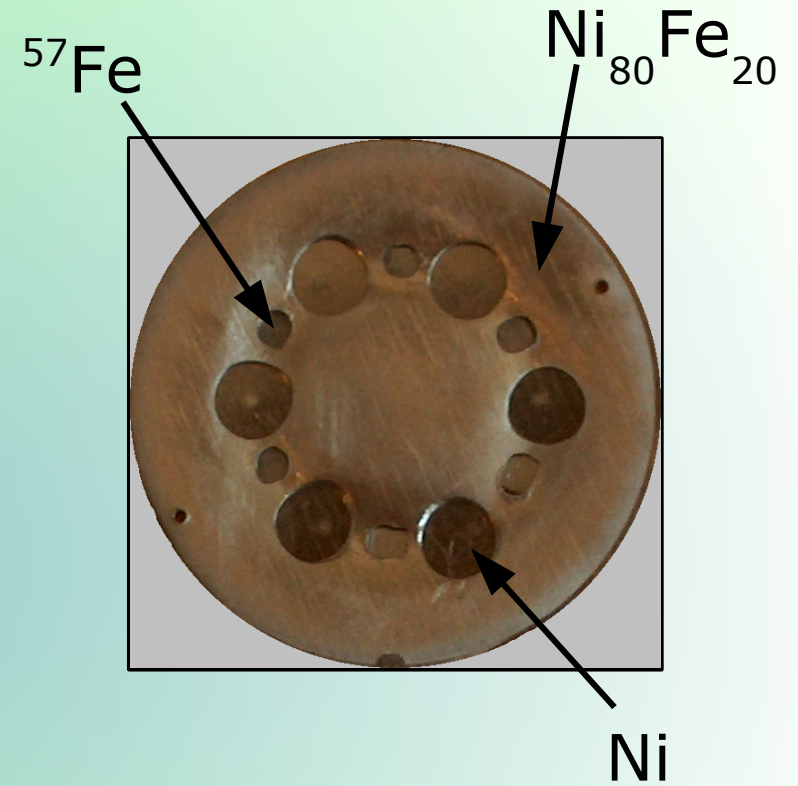
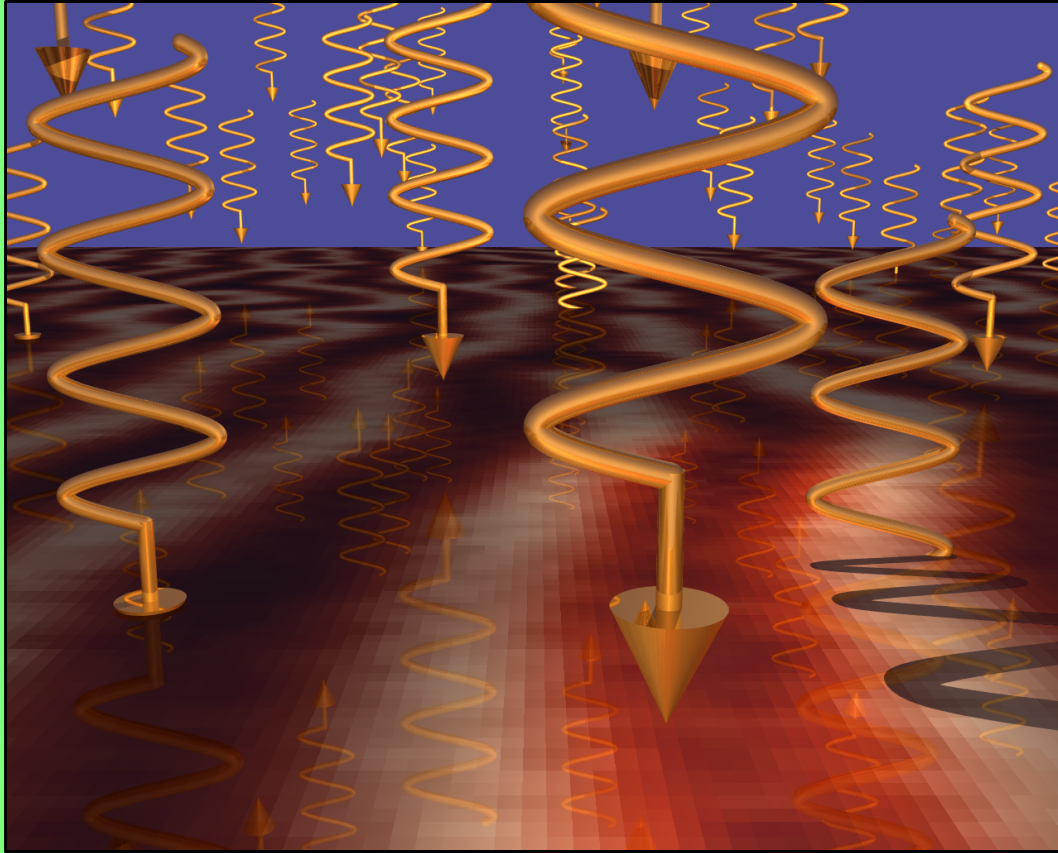


Magnetoopór warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$ - symulacje mikromagnetyczne



Gdy oddziaływanie magnetostaticzne między sąsiednimi subwarstwami magnetycznymi jest „wyłączone” nie występuje lokalne minimum oporu

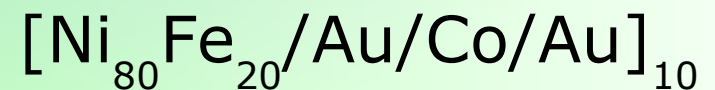
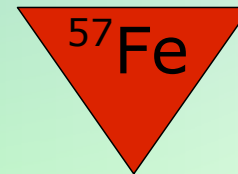
Spektroskopia Mössbauera warstw $[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_{\text{N}}$



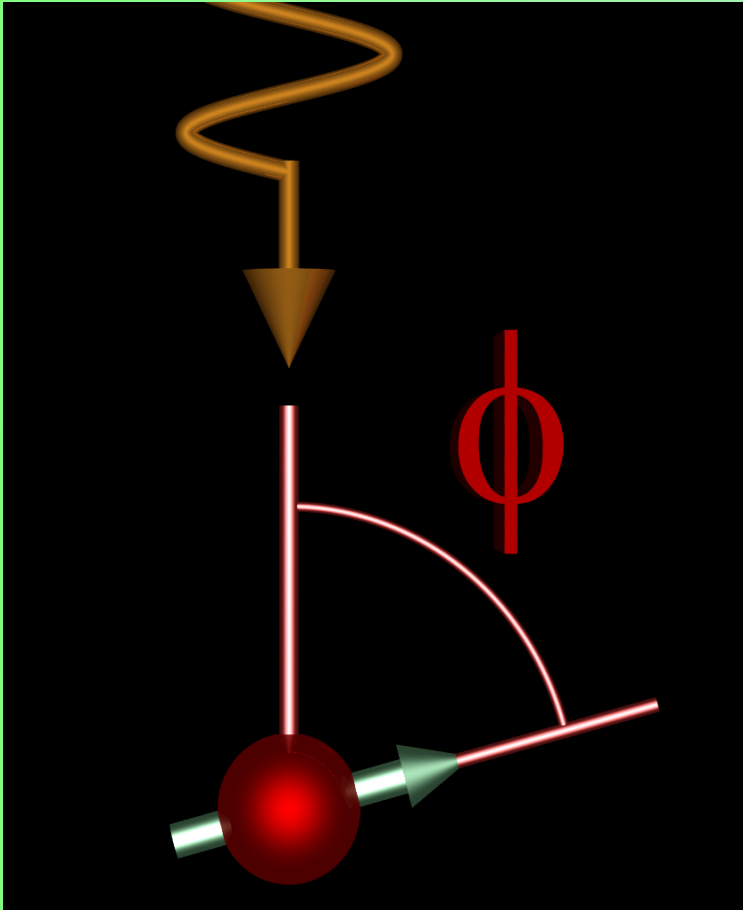
Conversion electron Mössbauer spectroscopy (CEMS)

Źródło ^{57}Co

^{57}Fe 95.3 at.%

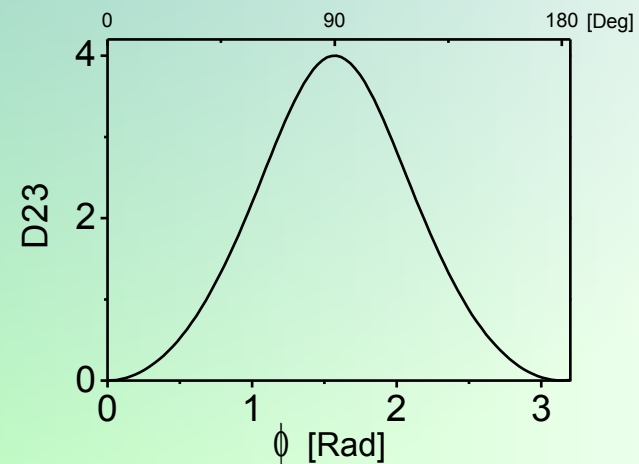
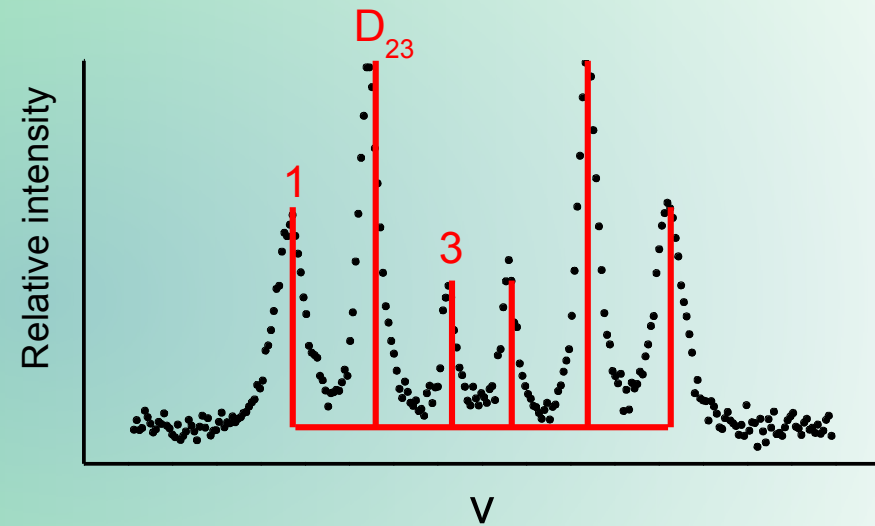


Spektroskopia Mössbauera warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$

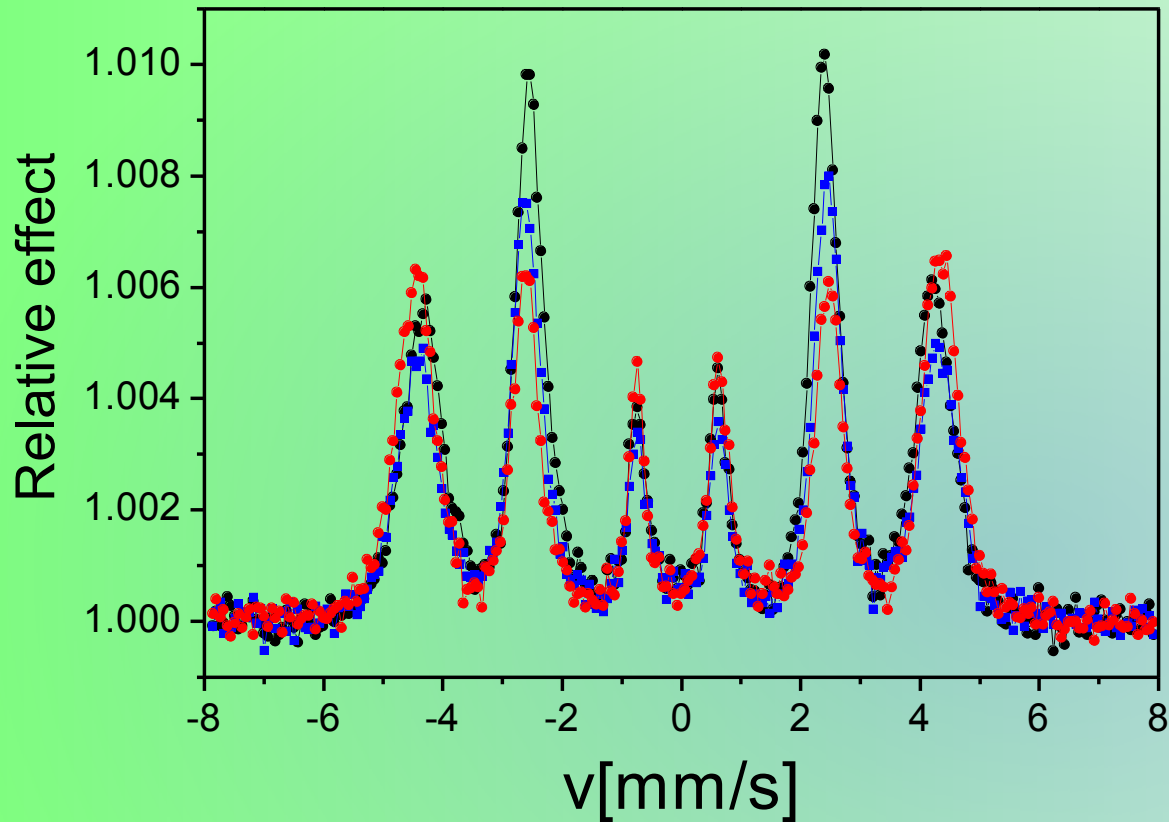


Względna intensywność linii 2 i 3 zmienia się z kątem ϕ między padającym promieniowaniem γ i momentem magnetycznym.

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



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

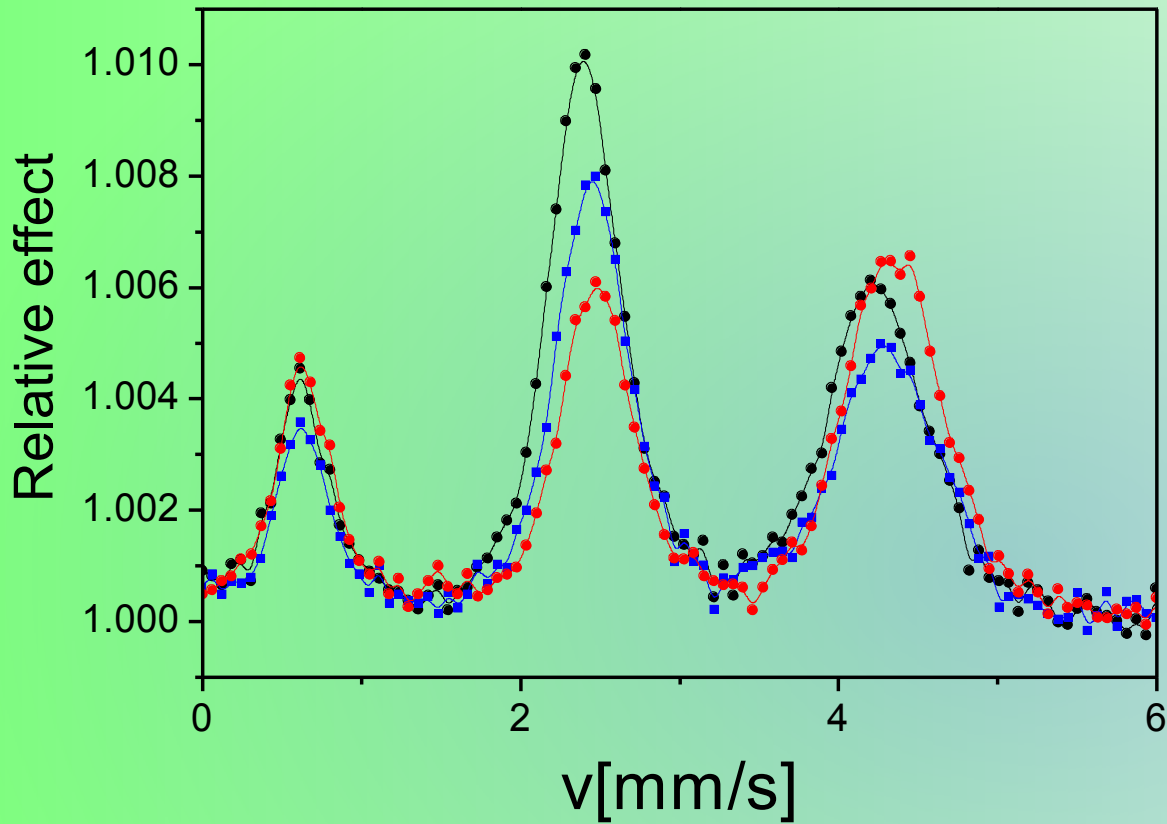


[Ni₈₀Fe₂₀(3.2 nm)/Au(2.4 nm)/Co(0.8 nm)/Au(2.4 nm)]₁₀

[Ni₈₀Fe₂₀(2.6 nm)/Co(0.6 nm)/Au(2.4 nm)/Co(0.8 nm)/Au(2.4 nm)]₁₀

[Co(0.6 nm)/Ni₈₀Fe₂₀(2.6 nm)/Au(2.4 nm)/Co(0.8 nm)/Au(2.4 nm)]₁₀

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

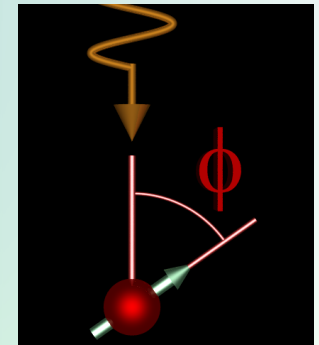
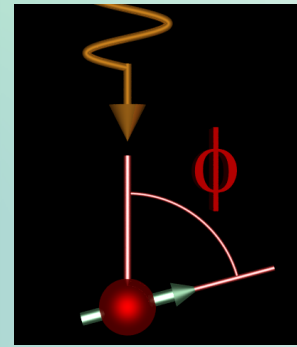
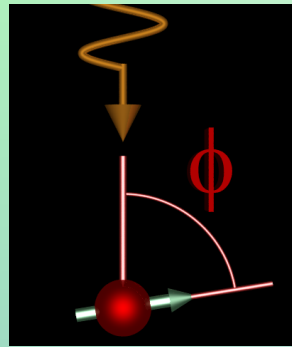
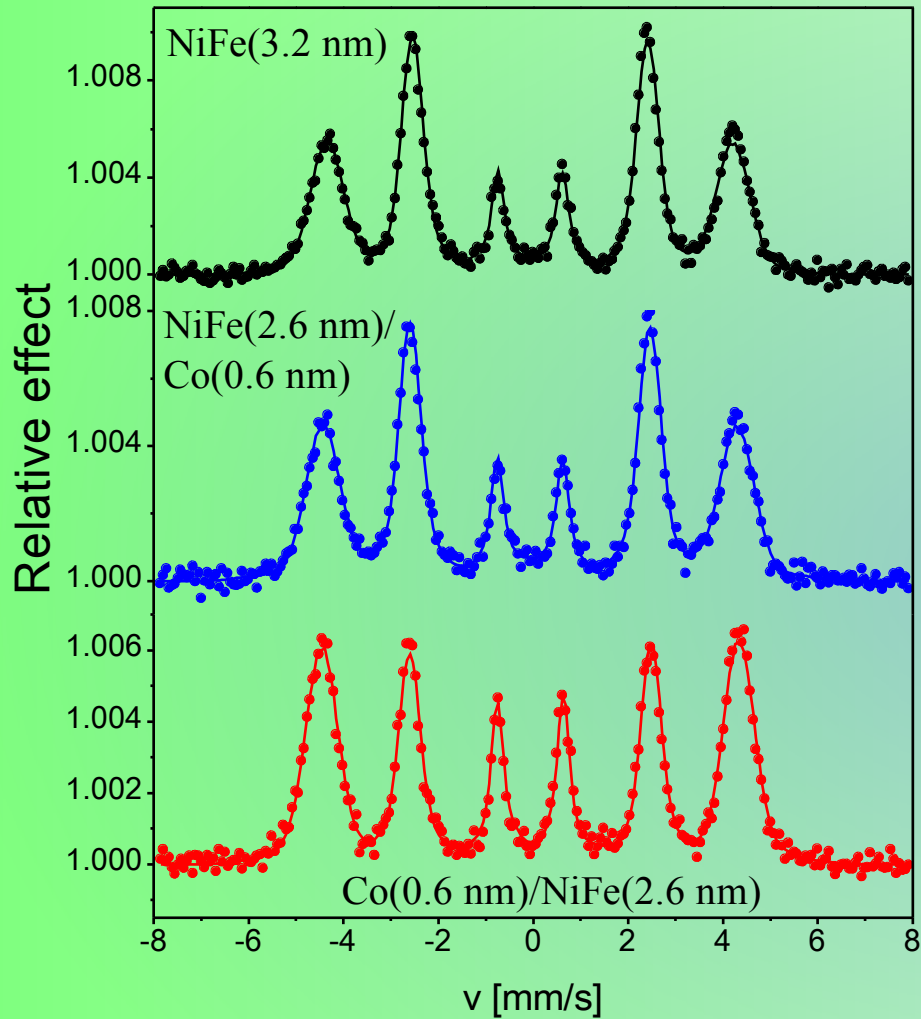


[Ni₈₀Fe₂₀(3.2 nm)/Au(2.4 nm)/Co(0.8 nm)/Au(2.4 nm)]₁₀

[Ni₈₀Fe₂₀(2.6 nm)/Co(0.6 nm)/Au(2.4 nm)/Co(0.8 nm)/Au(2.4 nm)]₁₀

[Co(0.6 nm)/Ni₈₀Fe₂₀(2.6 nm)/Au(2.4 nm)/Co(0.8 nm)/Au(2.4 nm)]₁₀

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

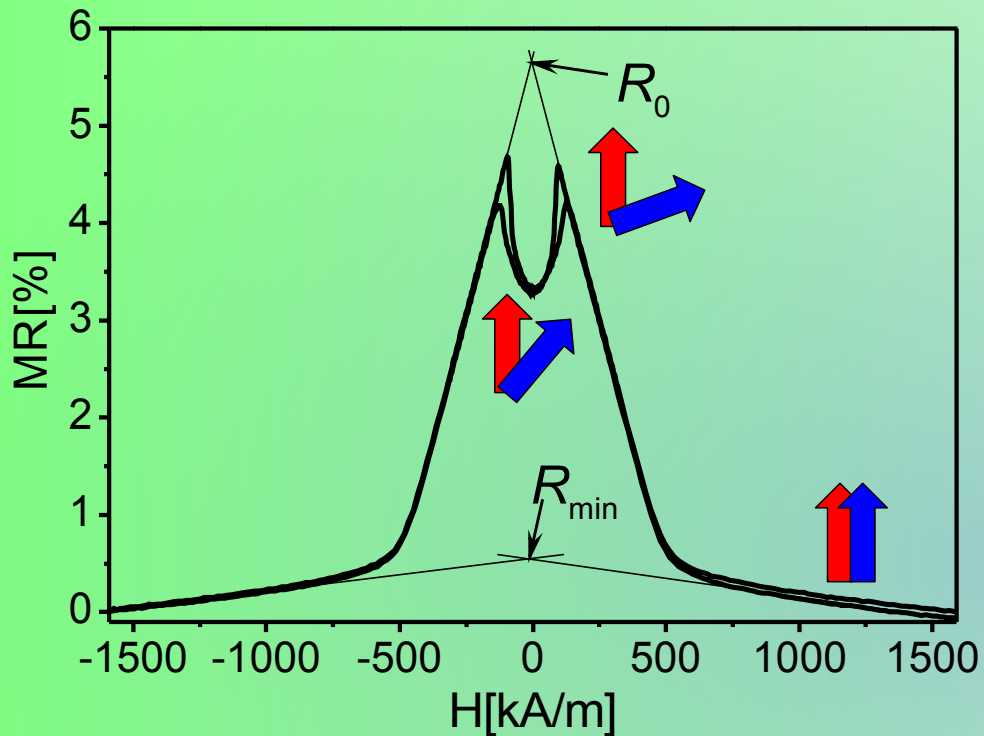


[Ni₈₀Fe₂₀(3.2 nm)/Au(2.4 nm)/Co(0.8 nm)/Au(2.4 nm)]₁₀

[Ni₈₀Fe₂₀(2.6 nm)/Co(0.6 nm)/Au(2.4 nm)/Co(0.8 nm)/Au(2.4 nm)]₁₀

[Co(0.6 nm)/Ni₈₀Fe₂₀(2.6 nm)/Au(2.4 nm)/Co(0.8 nm)/Au(2.4 nm)]₁₀

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

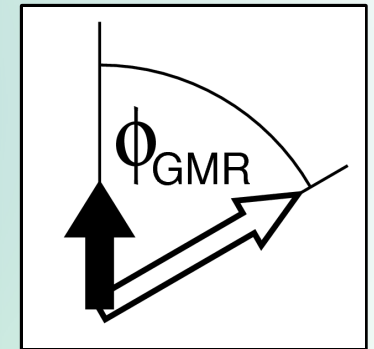
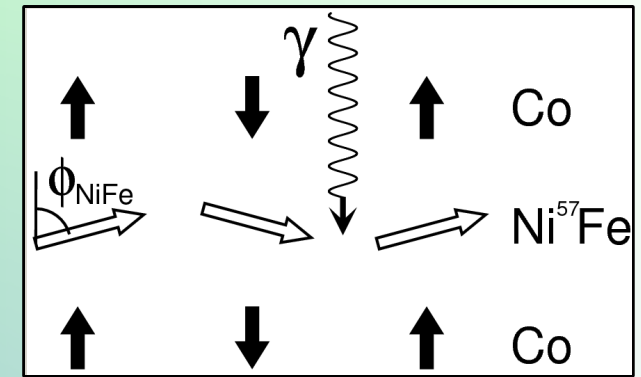
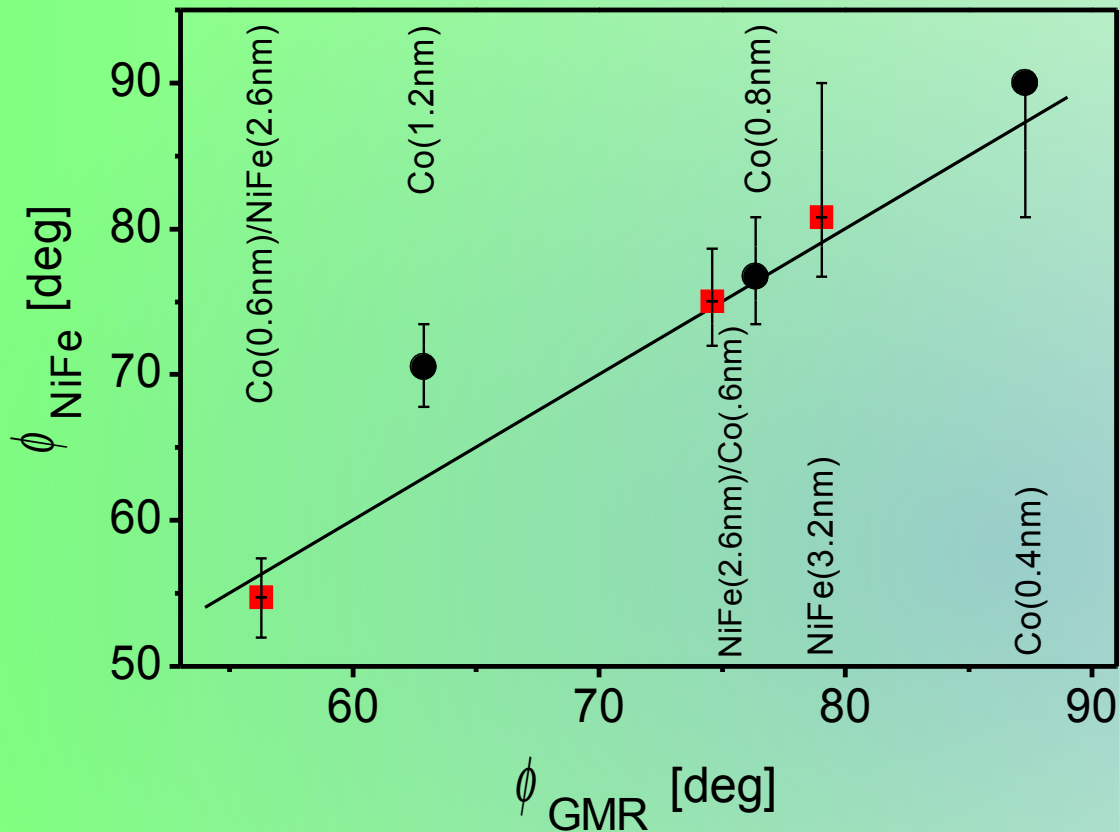


$$R = R_0 - (R_0 - R_{min}) \cos(\varphi_{Co-NiFe})$$

Pomiary oporu pozwalają oszacować średni kosinus kąta między sąsiednimi momentami magnetycznymi subwarstw **Co** i **NiFe**.

$[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(2 \text{ nm})/\text{Au}(2.4 \text{ nm})/\text{Co}(1.2 \text{ nm})/\text{Au}(2.4 \text{ nm})]_{10}$

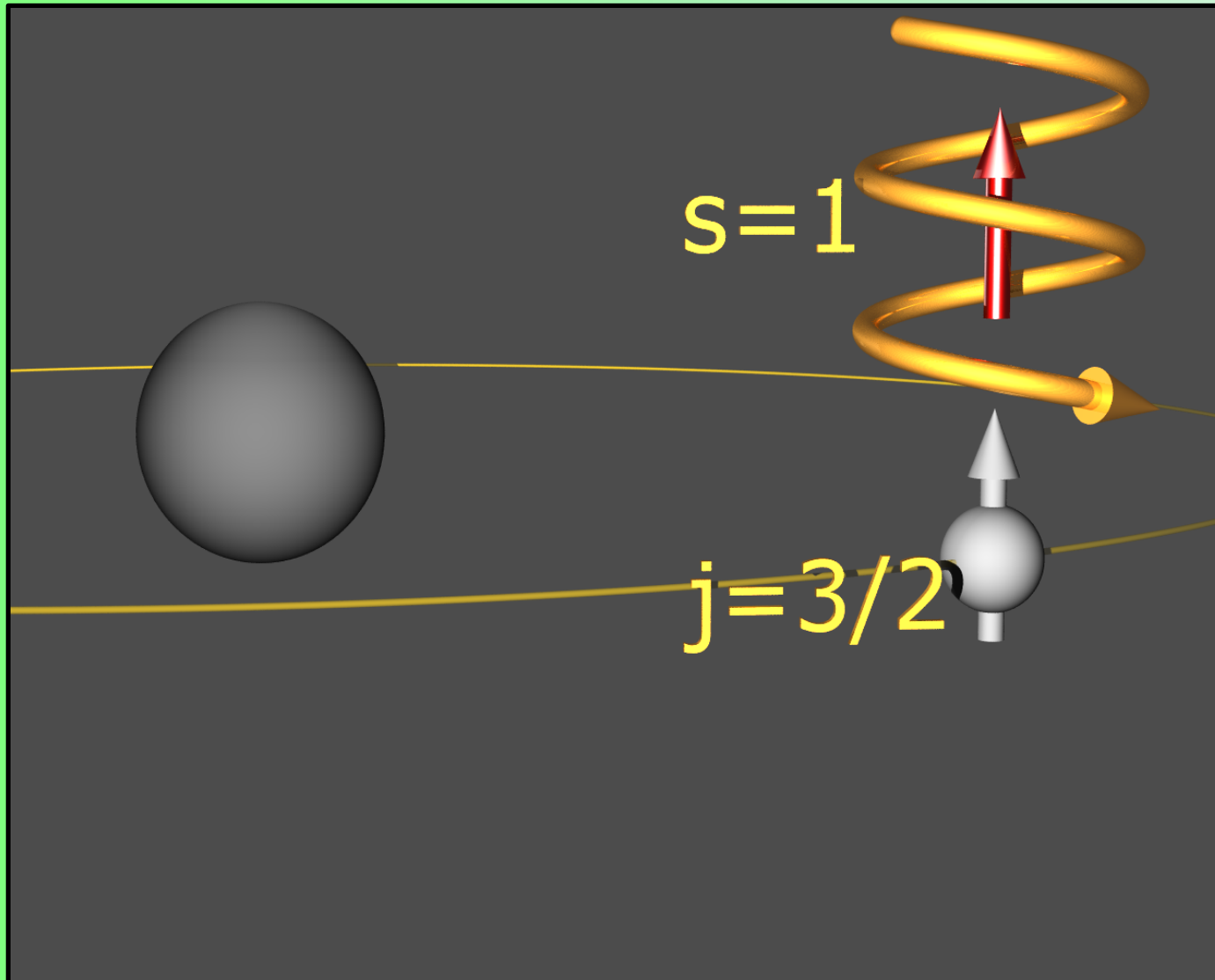
Porównanie wyników spektroskopii Mössbauera i pomiarów GMR



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)



Światło kołowo
spolaryzowane
 $\lambda \approx 1.4$ nm

oddziaływanie z
elektronami
rdzenia

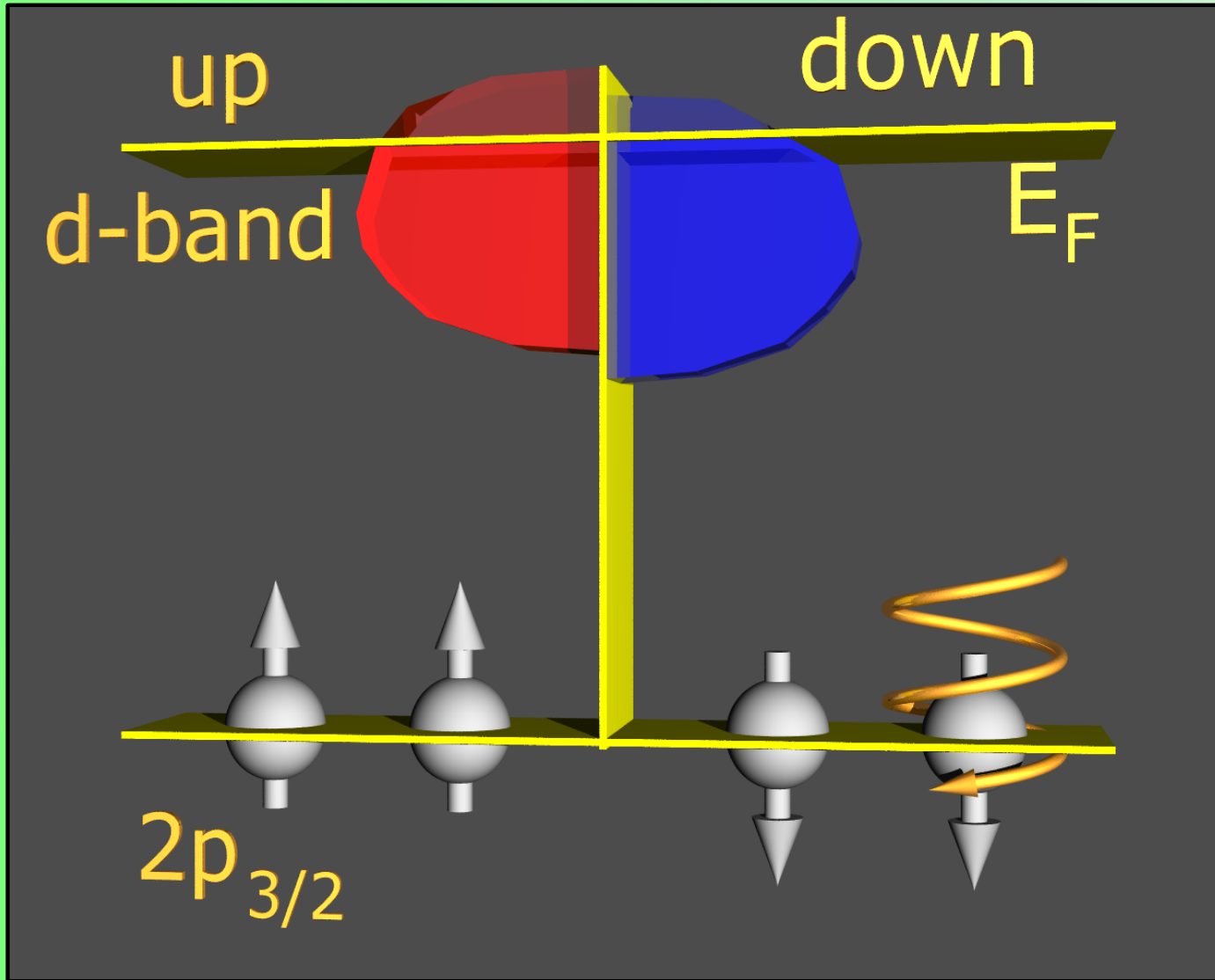
energia fotonów
dopasowana do
krawędzi absorpcji



**czułość ze
względem na
pierwiastek
chemiczny**

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

Rezonansowe magnetyczne rozpraszanie promieni X (SXRMS)



Światło kołowo spolaryzowane
 $\lambda \approx 1.4$ nm

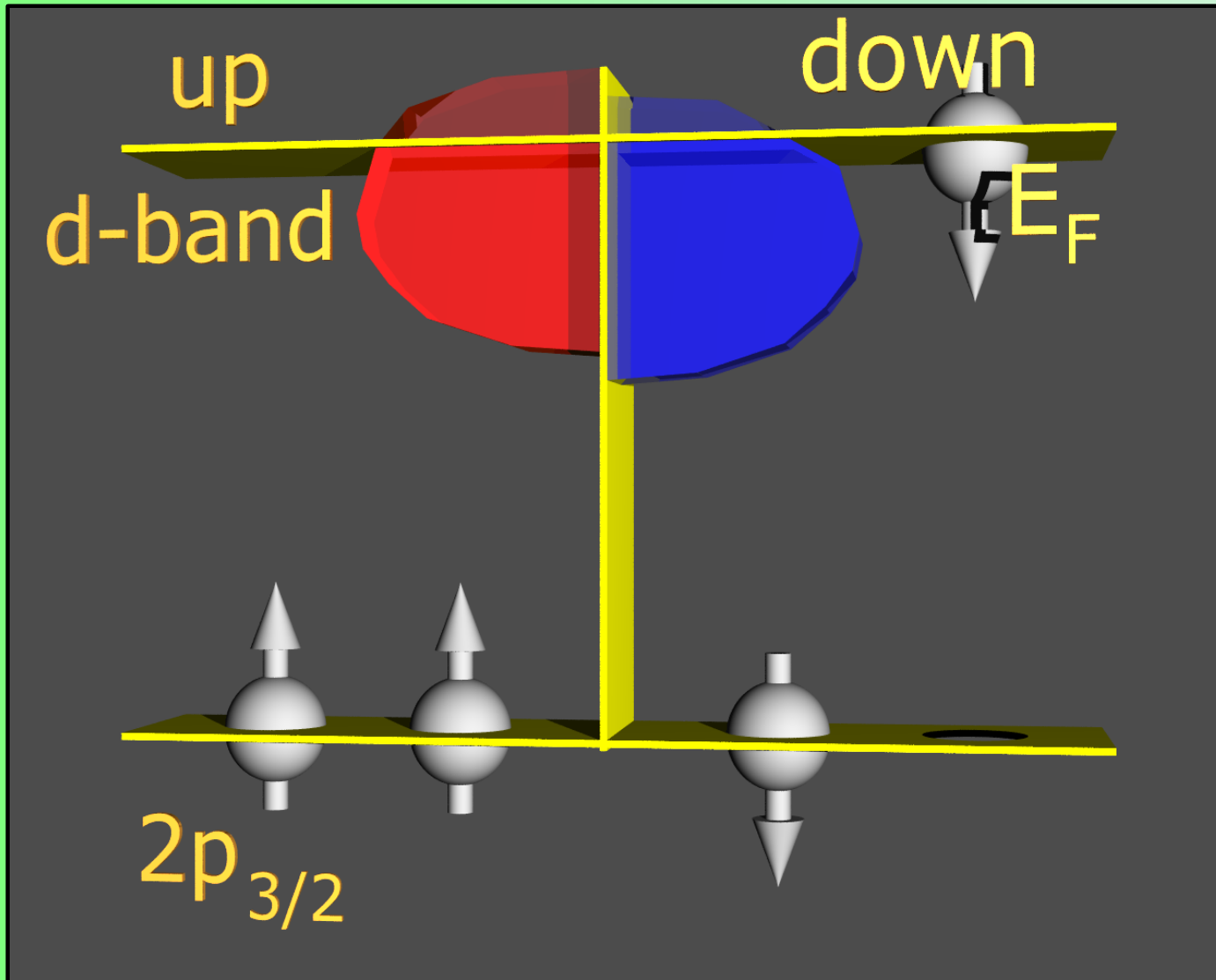
oddziaływanie z
elektronami
rdzenia

energia fotonów
dopasowana do
krawędzi absorpcji



**czułość ze
względem na
pierwiastek
chemiczny**

Rezonansowe magnetyczne rozpraszanie promieni X (SXRMS)



Światło kołowo spolaryzowane
 $\lambda \approx 1.4$ nm

oddziaływanie z
elektronami
rdzenia

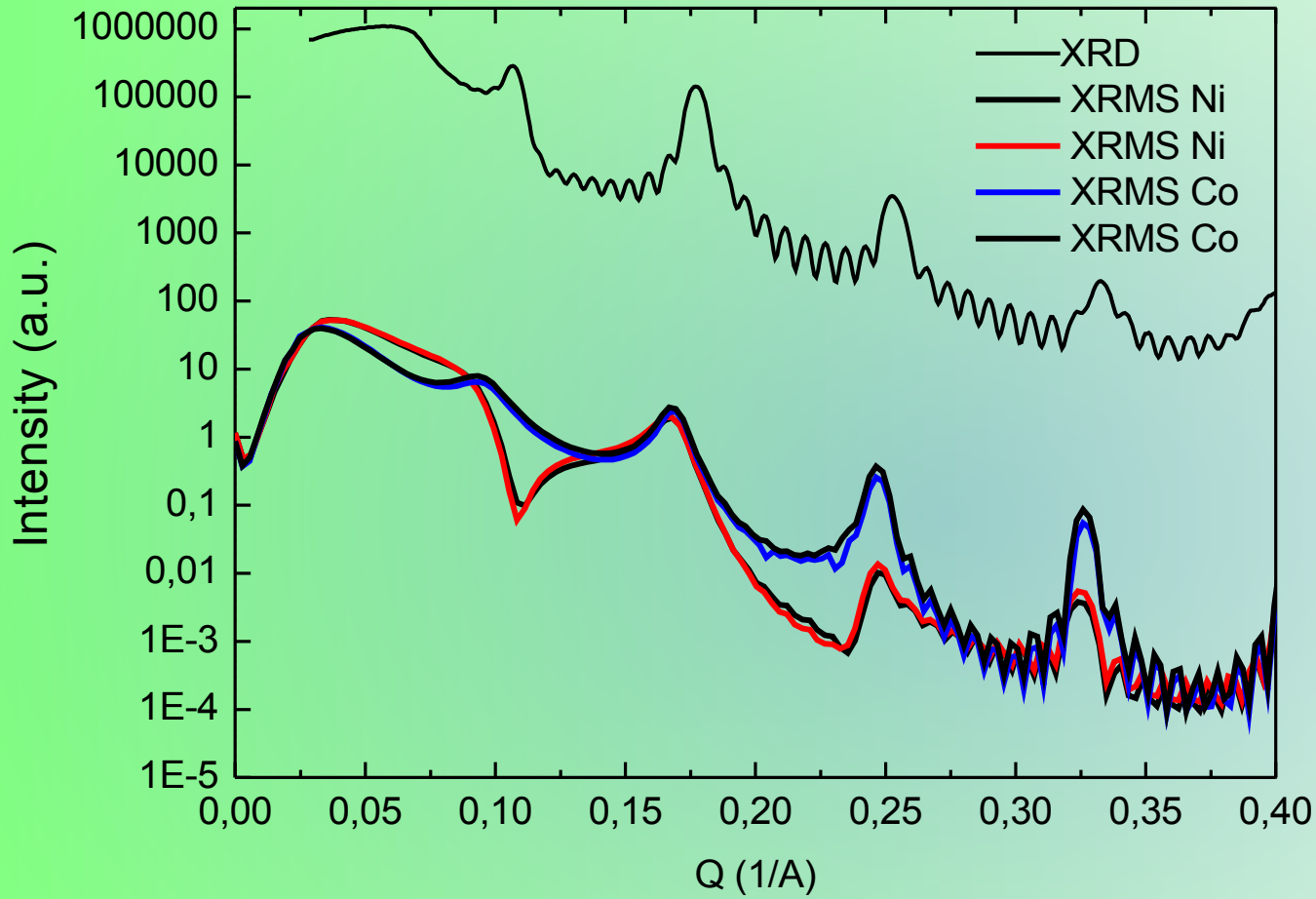
energia fotonów
dopasowana do
krawędzi absorpcji



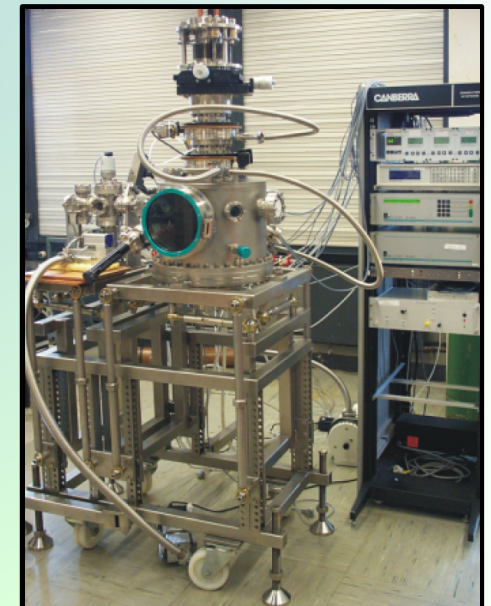
**czułość ze
względem na
pierwiastek
chemiczny**

W metalach ferromagnetycznych różnica gęstości stanów na E_F prowadzi do zależności absorpcji promieniowania od orientacji spinu.

Rezonansowe magnetyczne rozpraszanie promieni X (SXRMS)

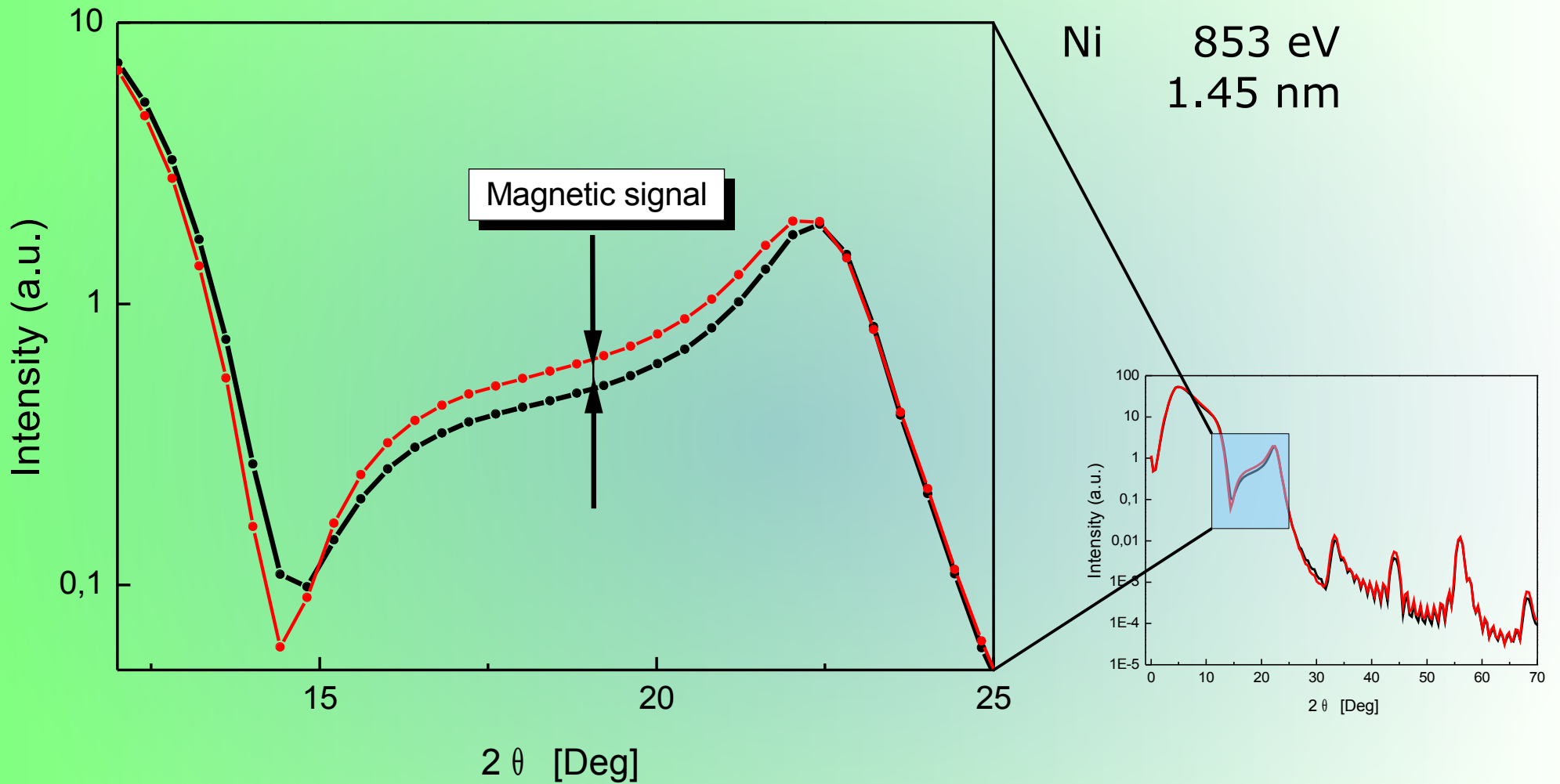


Cu K_{α} 8048 eV
Ni 853 eV
Co 778 eV



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

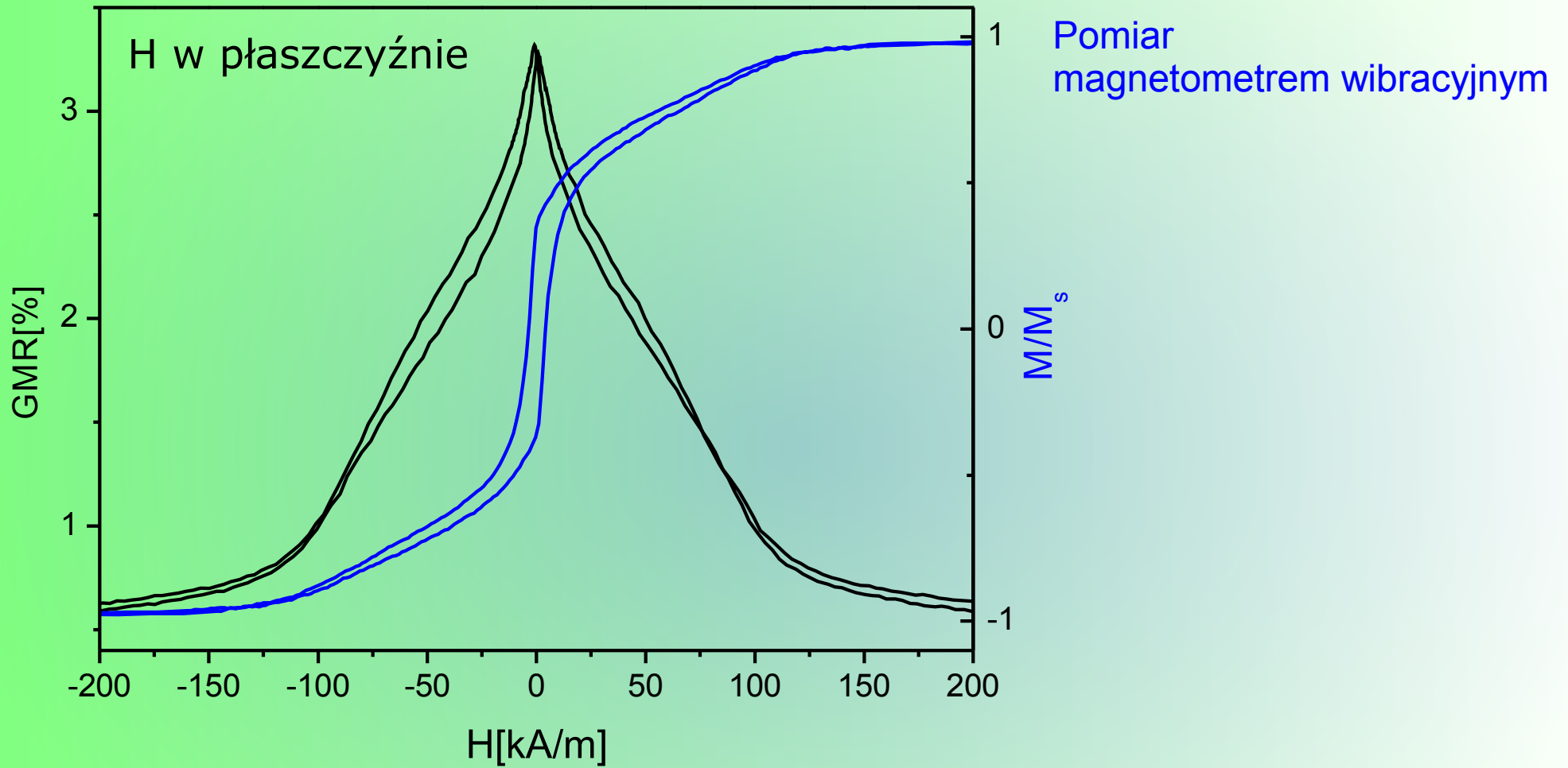
Rezonansowe magnetyczne rozpraszanie promieni X (SXRMS)



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

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

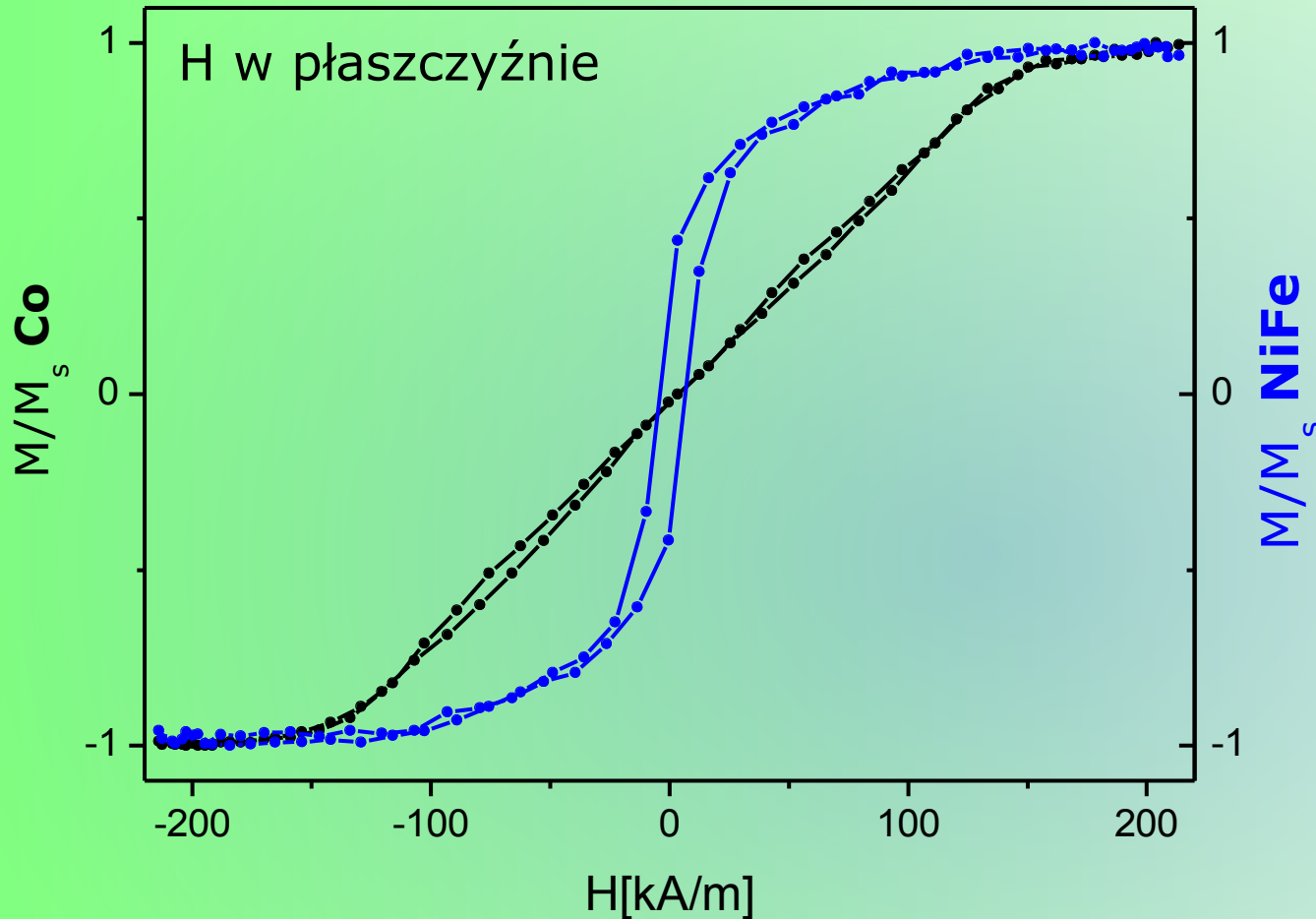
Rezonansowe magnetyczne rozpraszanie promieni X (SXRMS)



$R(H) \leftrightarrow M(H)$

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

Rezonansowe magnetyczne rozpraszanie promieni X (SXRMS)



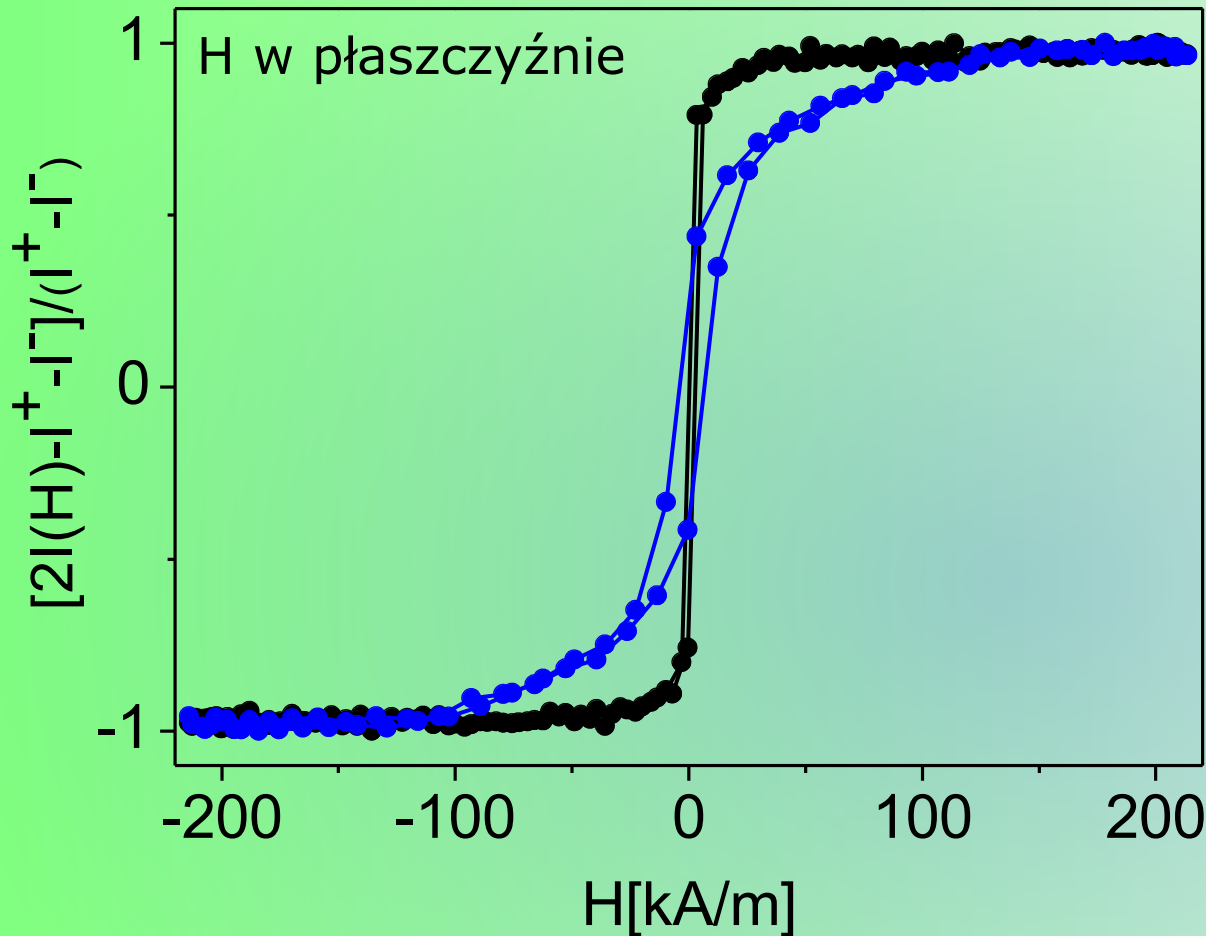
XRMS pozwala na niezależny pomiar zależności $M(H)$ subwarstw **Co** i **NiFe**.

$\Theta = 8.5 \text{ Deg}$
 $E = 853 \text{ eV}$ (Ni L_3)
 $E = 778 \text{ eV}$ (Co L_3)

$$M/M_s \propto [2I(H) - I^+ - I^-] / (I^+ - I^-)$$

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

Rezonansowe magnetyczne rozpraszanie promieni X (SXRMS)

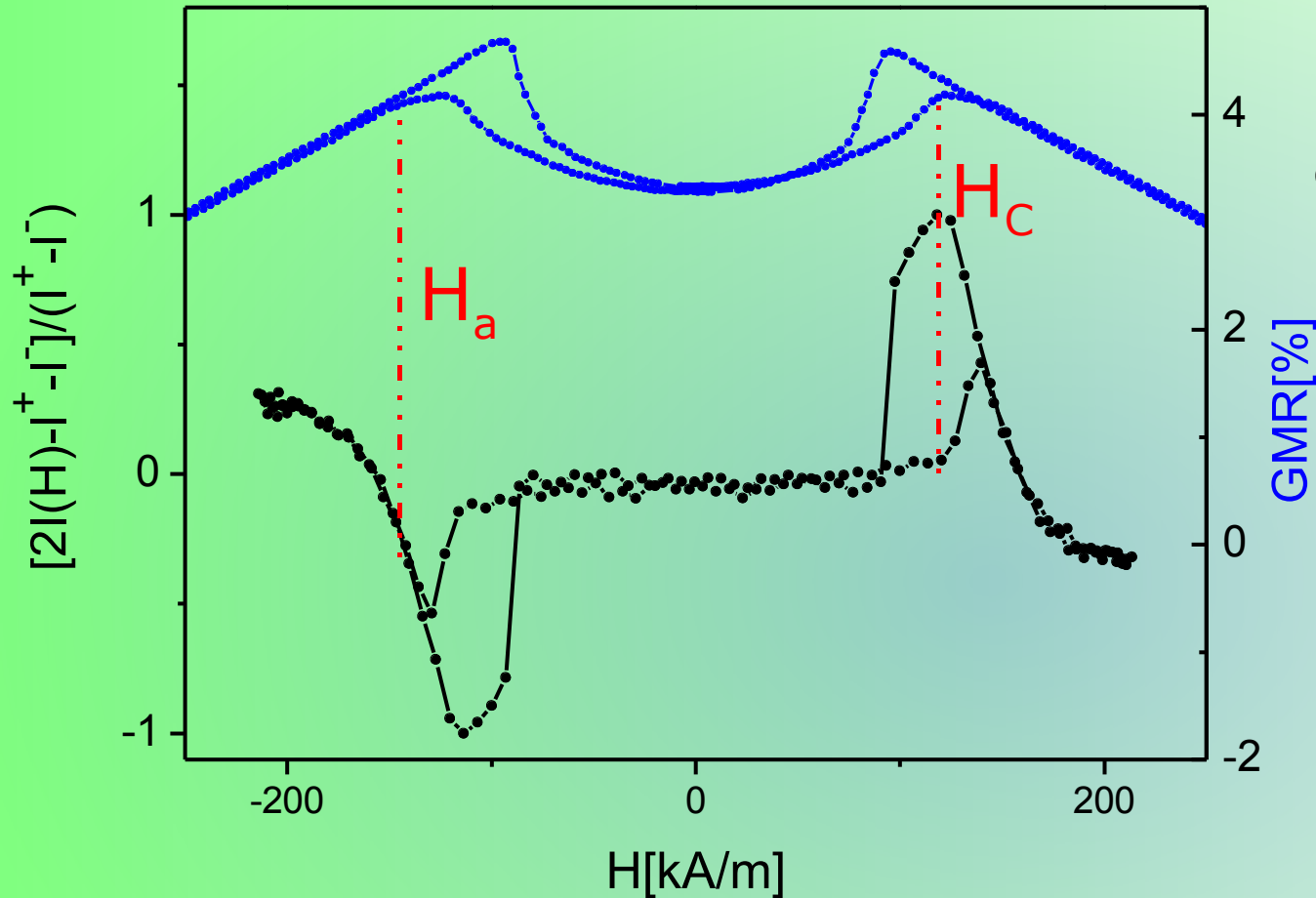


Grubsze subwarstwy
Co silniej wpływają na
przemagnesowanie
subwarstw NiFe.

$[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(2 \text{ nm})/\text{Au}(2.4 \text{ nm})/\mathbf{\text{Co}(0.4 \text{ nm})}/\text{Au}(2.4 \text{ nm})]_{10}$

$[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(2 \text{ nm})/\text{Au}(2.4 \text{ nm})/\mathbf{\text{Co}(1.1 \text{ nm})}/\text{Au}(2.4 \text{ nm})]_{10}$

Rezonansowe magnetyczne rozpraszanie promieni X (SXRMS)



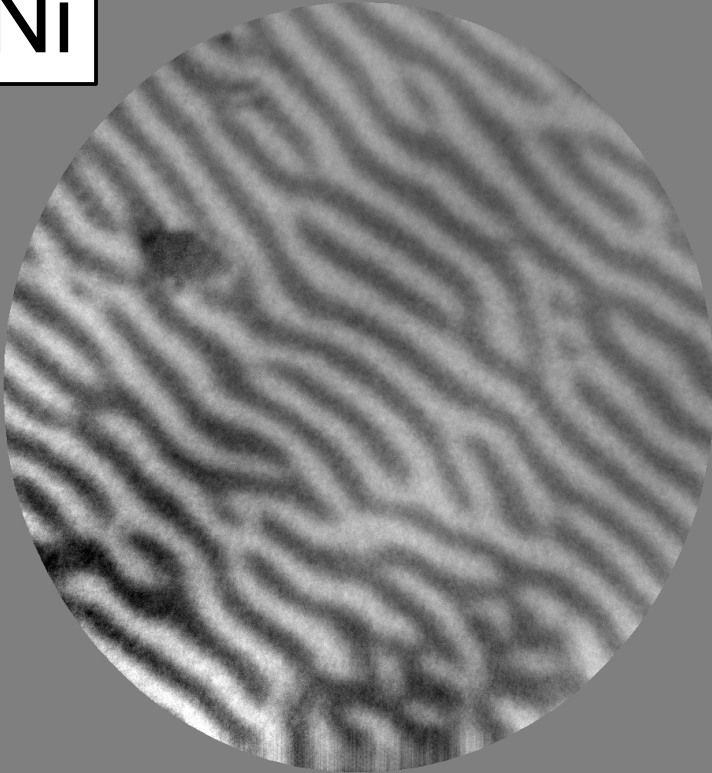
Pole magnetyczne przyłożone prostopadle do powierzchni warstwy

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

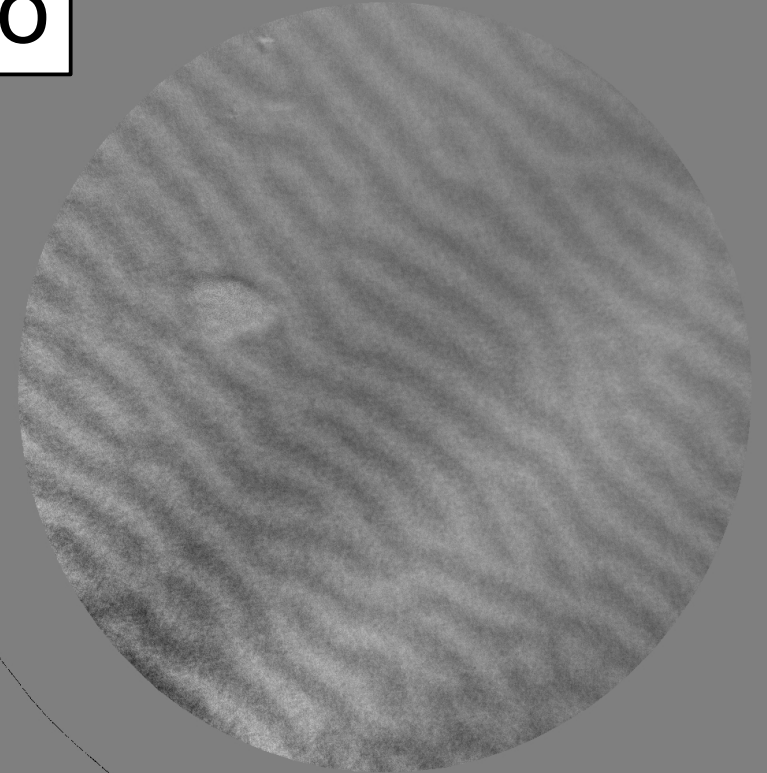
- tworzenia pasiastej struktury domenowej (H_c)
- anihilacji struktury domenowej (H_a)

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

FeNi



Co



Eksperymentalne potwierdzenie replikacji domen Co w subwarstwach NiFe

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

po namagnesowaniu ex-situ polem w płaszczyźnie 0.7T

Wnioski

- Pomiary własności magnetycznych i transportu elektrycznego dowodzą istnienia magnetostatycznego sprzężenia między subwarstwami Co i NiFe w warstwach wielokrotnych typu NiFe/Au/Co/Au.
- Źródłem oddziaływania magnetostatycznego jest obecność pasiastej struktury domenowej w subwarstwach Co.
- Selektywne ze względu na pierwiastki chemiczne metody pomiarów własności magnetycznych potwierdzają 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.

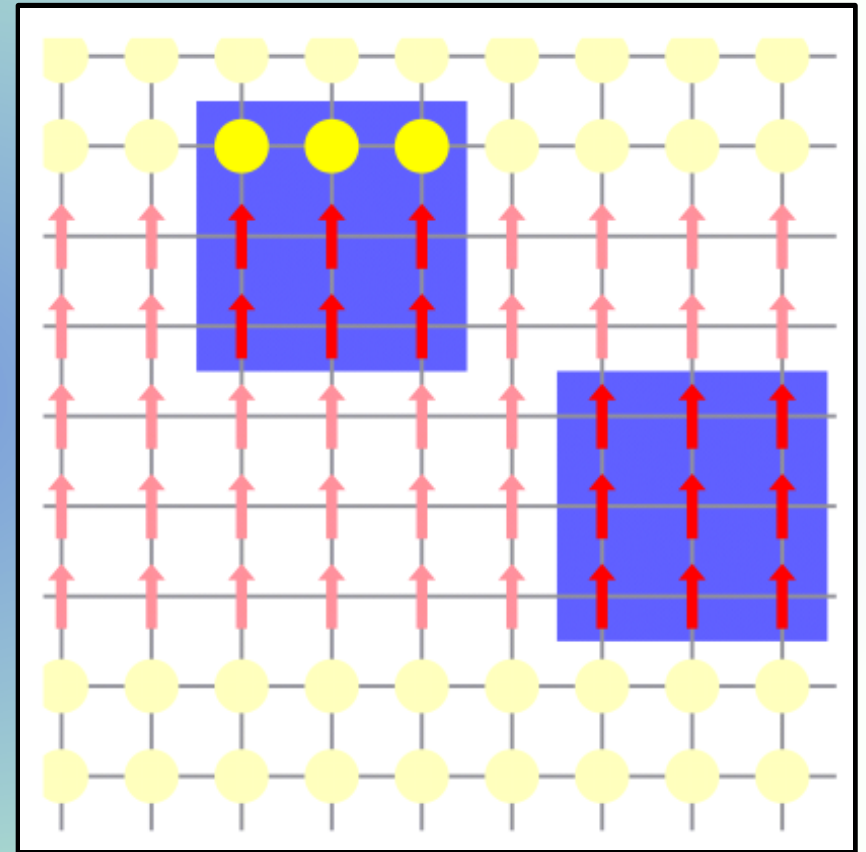
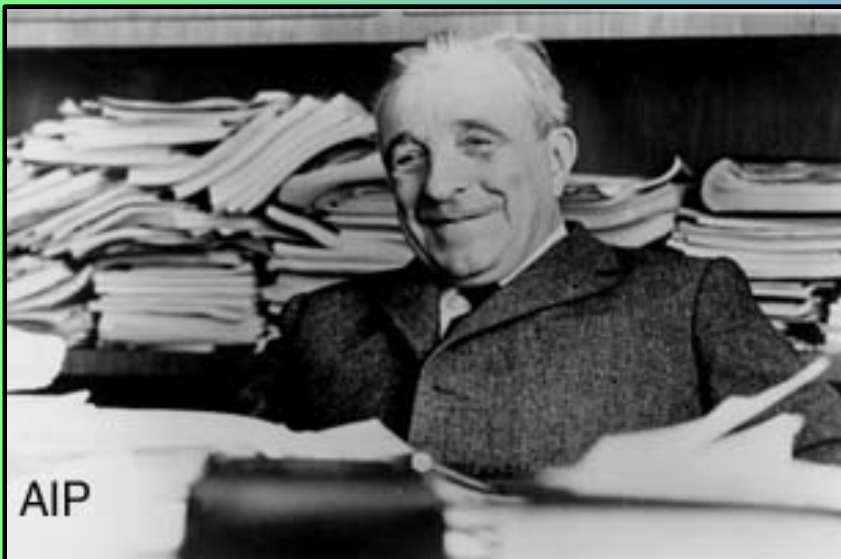
Dziękuję za uwagę

$$E(\Omega_M) = \int_V dV E_V(\Omega_M) + \int_S dS E_S(\Omega_M)$$

Źródła anizotropii powierzchniowej:

- ✓ zależność lokalnej symetrii od położenia atomów

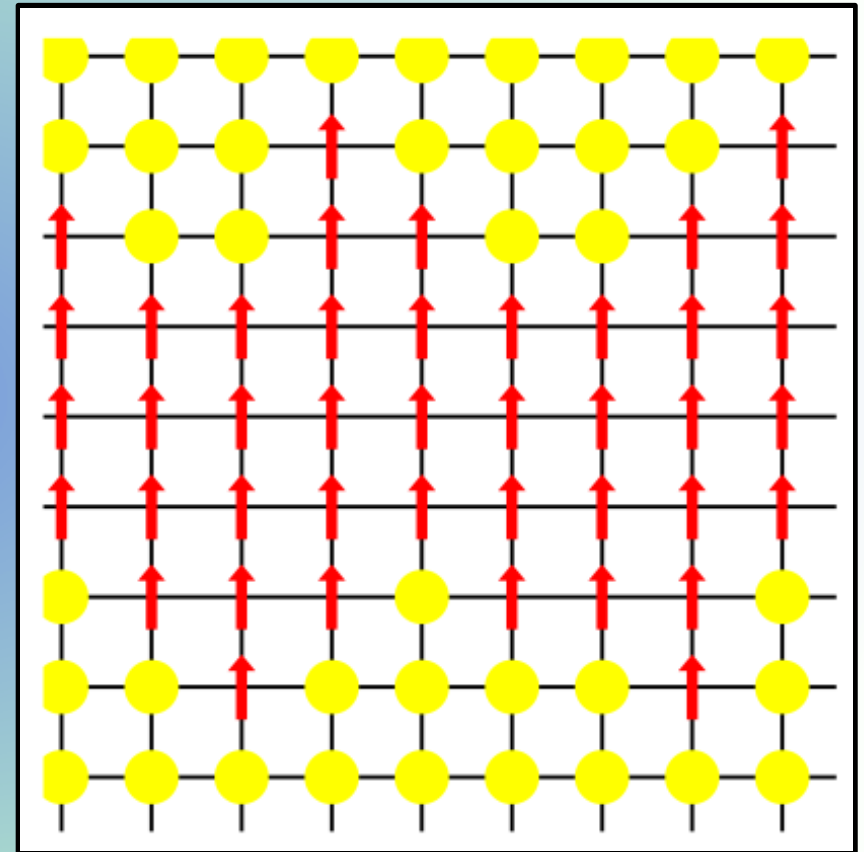
L.Néel 1954



$$E(\Omega_M) = \int_V dV E_V(\Omega_M) + \int_S dS E_S(\Omega_M)$$

Źródła anizotropii powierzchniowej:

- ✓ zależność lokalnej symetrii od położenia atomów
- ✓ szorstkość powierzchni: złamanie symetrii, nieciągłości M

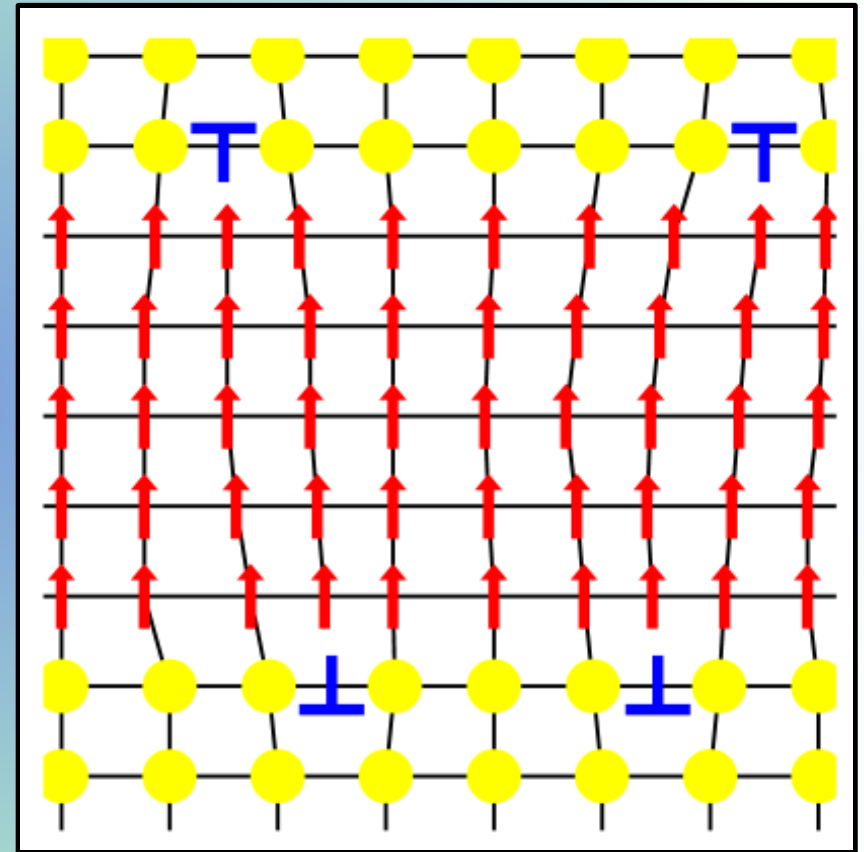


P. Bruno, 1988

$$E(\Omega_M) = \int_V dV E_V(\Omega_M) + \int_S dS E_S(\Omega_M)$$

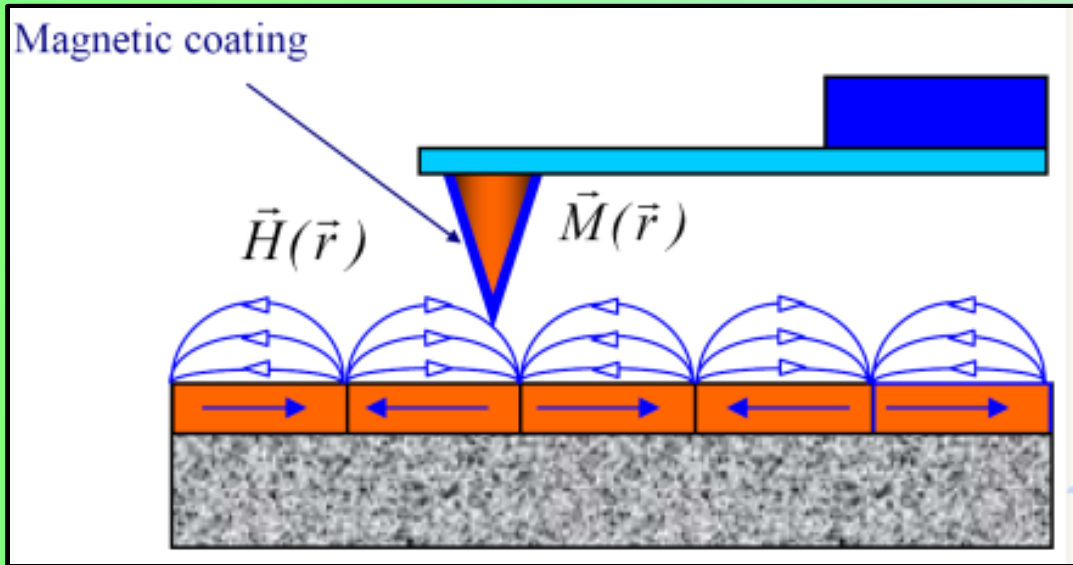
Źródła anizotropii powierzchniowej:

- ✓ zależność lokalnej symetrii od położenia atomów
- ✓ szorstkość powierzchni: złamanie symetrii, nieciągłości M
- ✓ niedopasowanie parametrów sieci warstwa/podłoże-dyslokacje



P. Bruno, 1988

Mikroskopia sił atomowych



V.L.Mironow,
Nizhniy Novgorod 2004

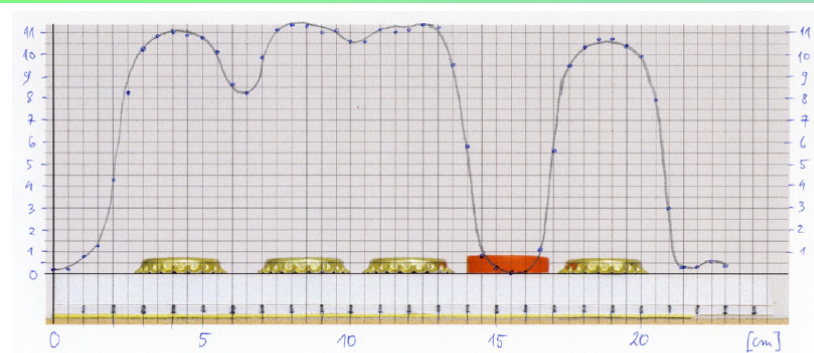
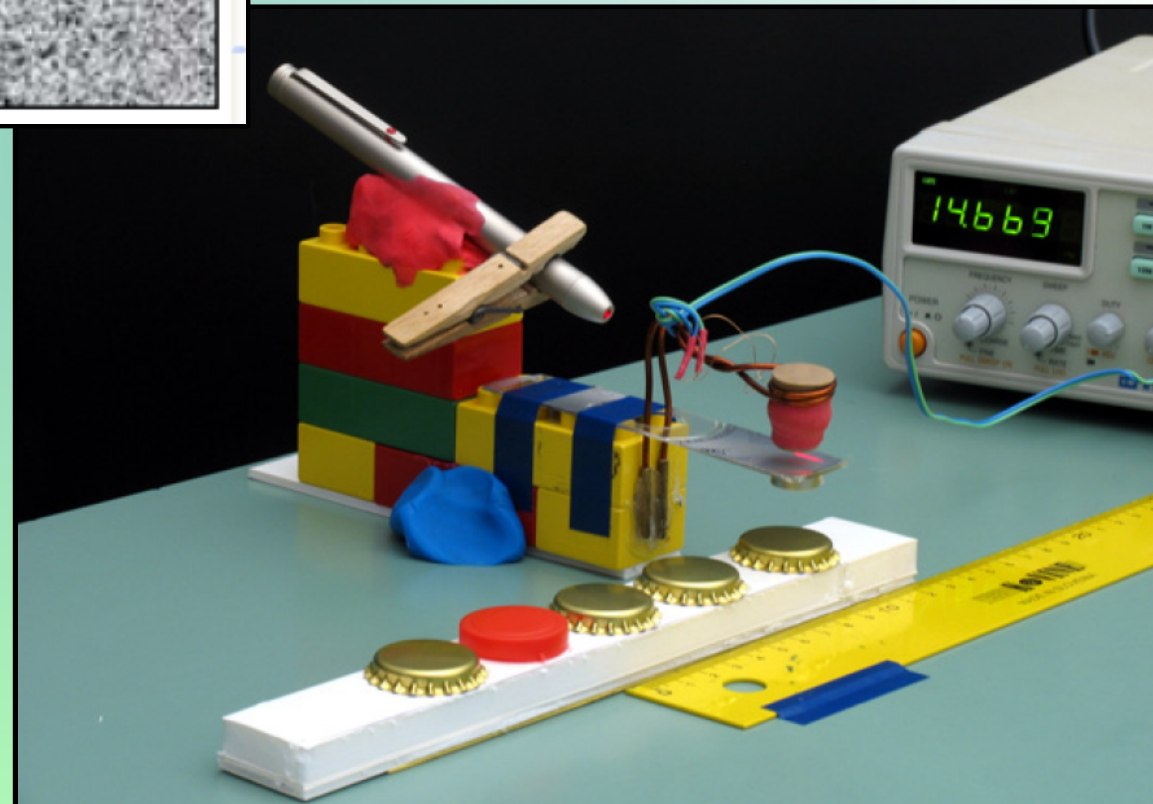
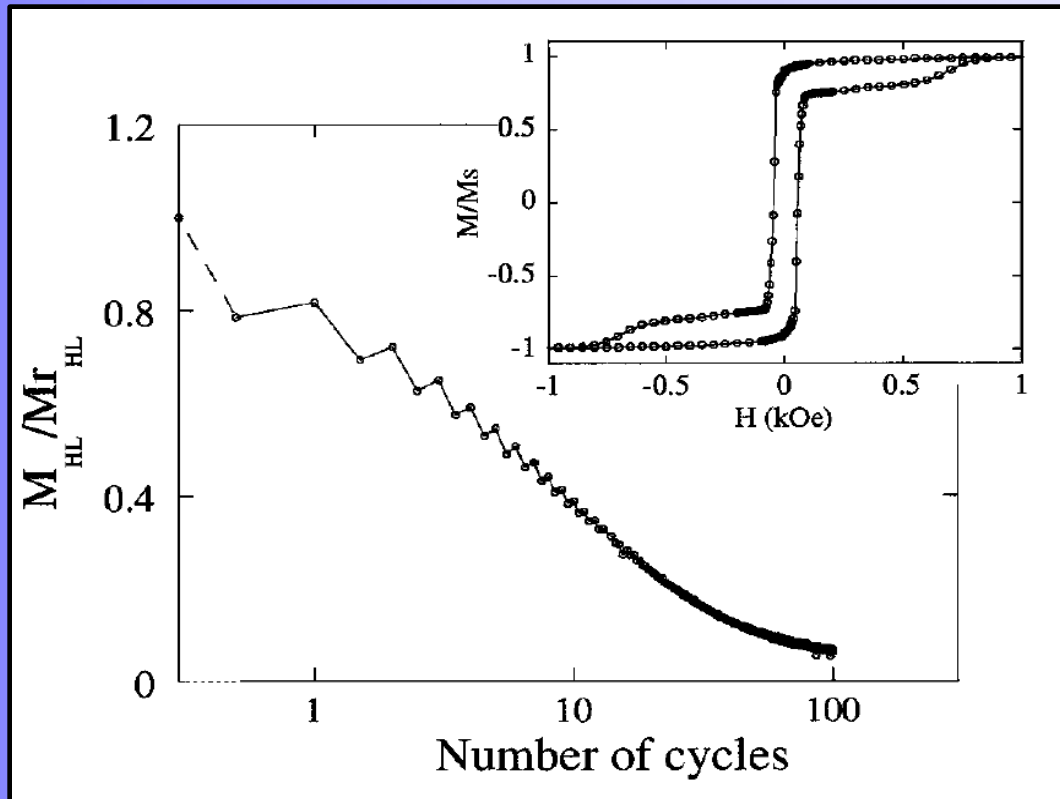


Figure 5. Laboratory sheet: graphical presentation of the measurements obtained in the oscillating mode compared with the original sample. The vertical coordinates of the points (given in arbitrary units) correspond to the amplitudes of the oscillating light spot on the wall and were all subtracted from the largest measured value.



Oddziaływania dipolowe w warstwach wielokrotnych



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

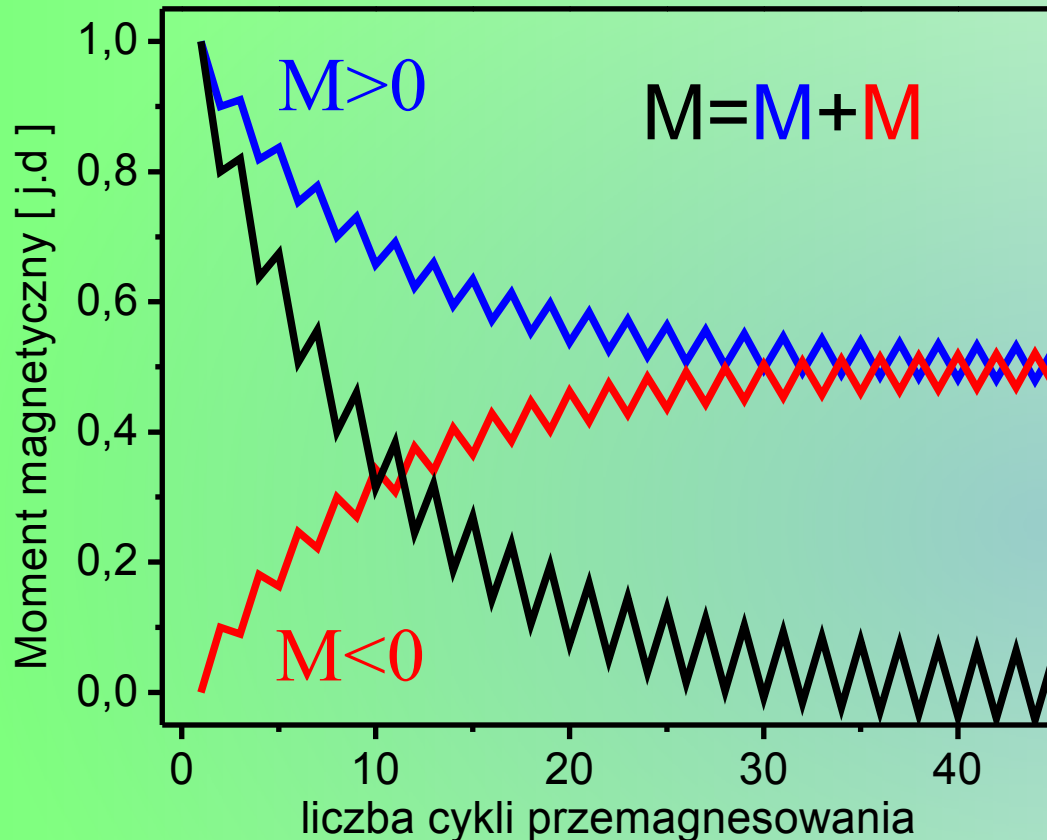
$$H_{\text{przemienne}} \ll H_{\text{koercji warstwy twardej}}$$

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

N_c indeksowane co pół cyklu \Rightarrow
poszczególne przełączania CoFe

Si(100)/SiO₂/Co₈₄Fe₁₆(10nm)/Cr(1.5nm)/Co₇₅Pt₁₂Cr₁₃(5nm)/Al(1.5nm)

Sprężenie poprzez ściany domenowe-model niepełnego przemagnesowania



Pole rozproszone DW tylko w części objętości twardej warstwy jest wystarczające do przełączenia ziaren CoPtCr.

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

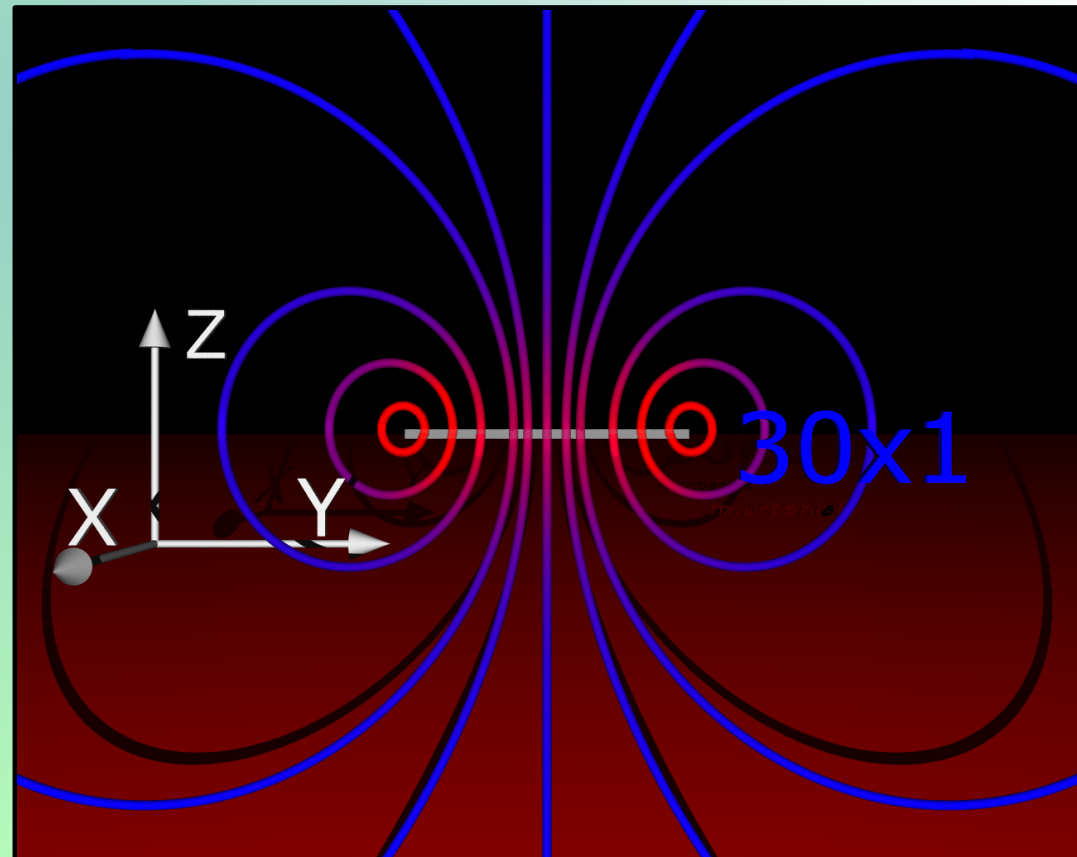
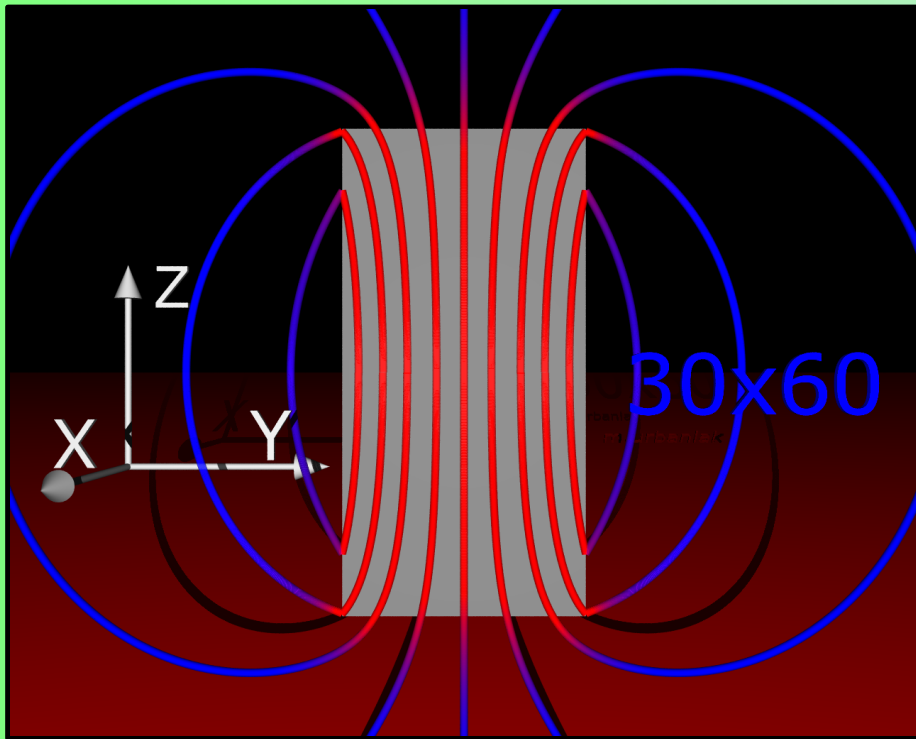
Stan początkowy:

$M = 1$, $M = 0$

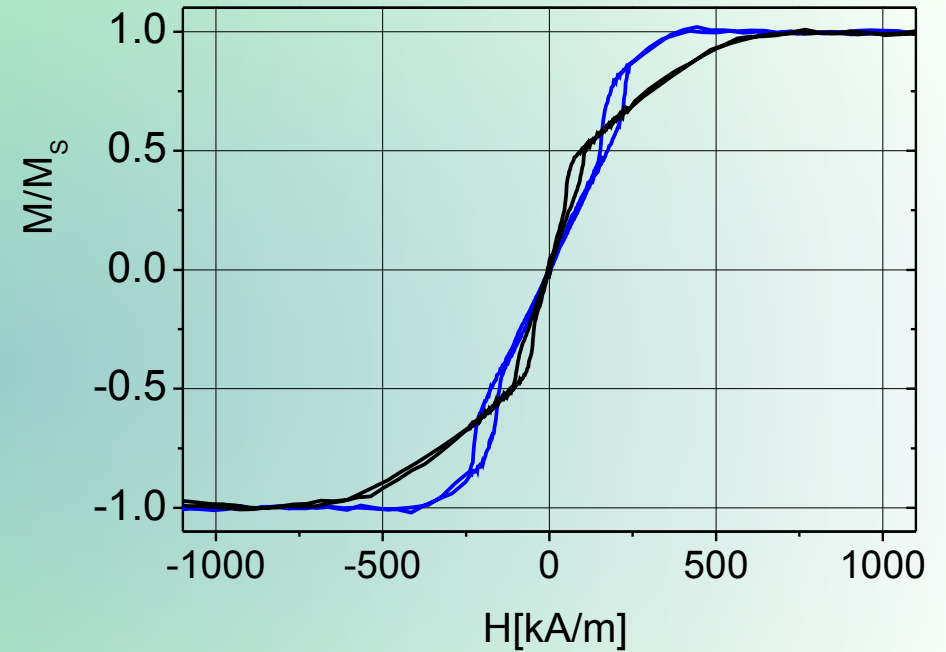
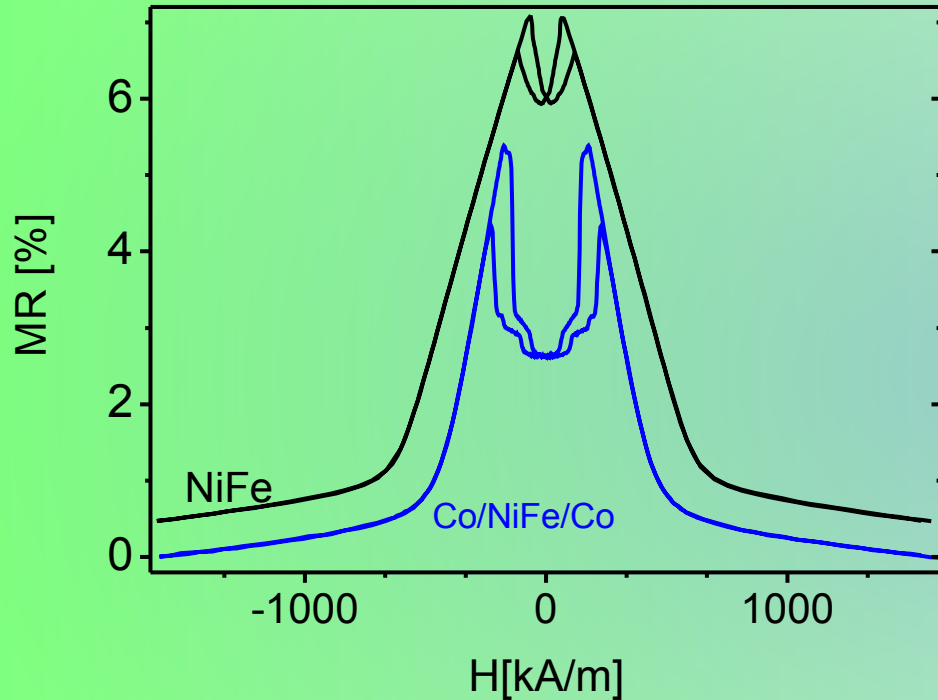
Cykle nieparzyste: $M(N_C) := M(N_C - 1) \times 0.9$, $M(N_C) := M(N_C - 1) + M(N_C - 1) \times 0.1$

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

Pole magnetyczne cienkiej warstwy namagnesowanej prostopadle



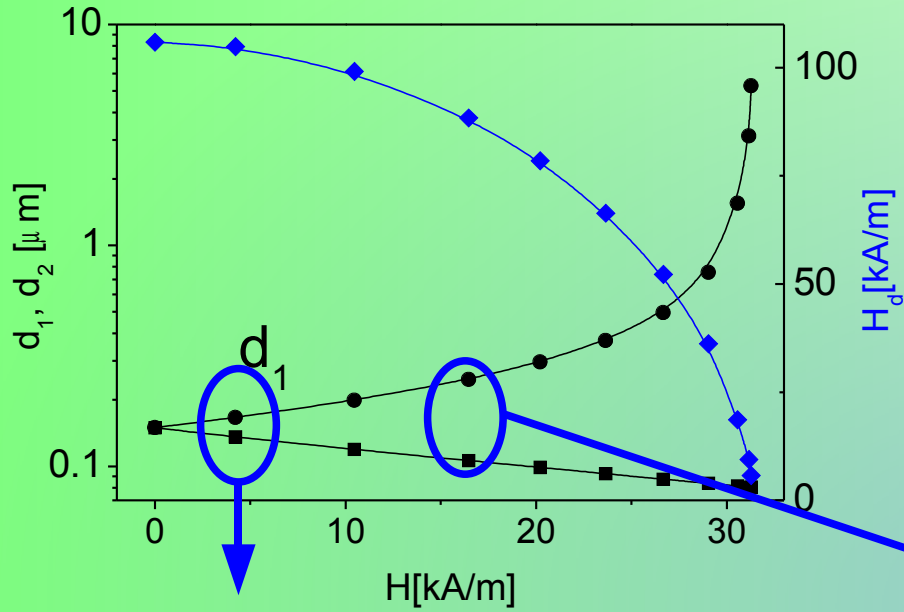
Modyfikacja struktury subwarstw z anizotropią w płaszczyźnie



Subwarstwa NiFe zastąpiona została hybrydową trówarstwą Co/NiFe/Co – prowadzi to do obniżenia efektywnej anizotropii typu łatwa płaszczyzna.

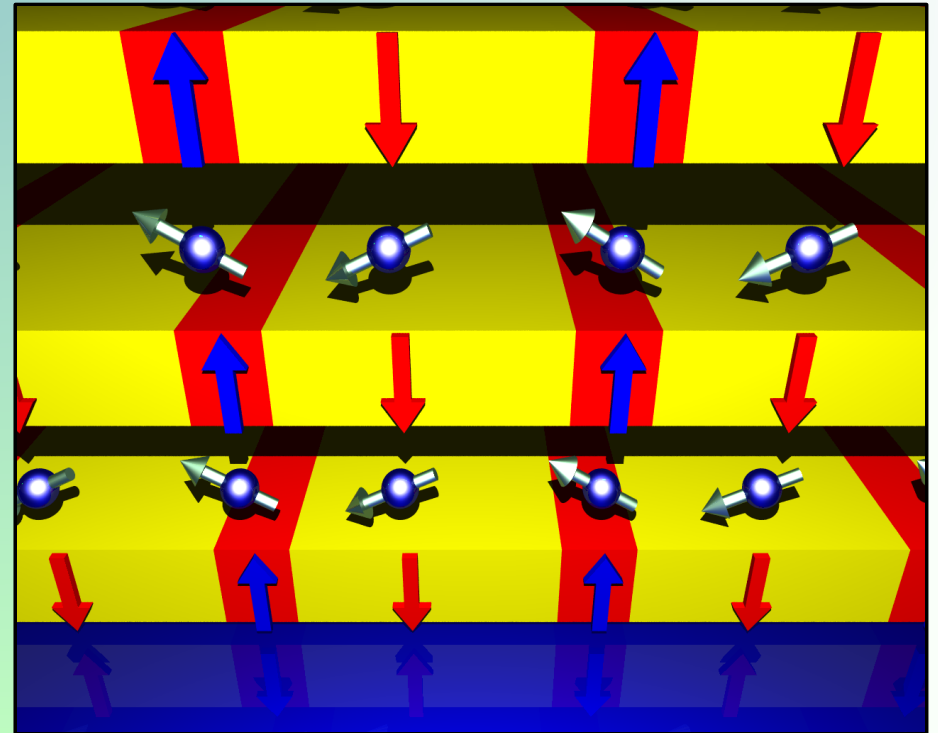
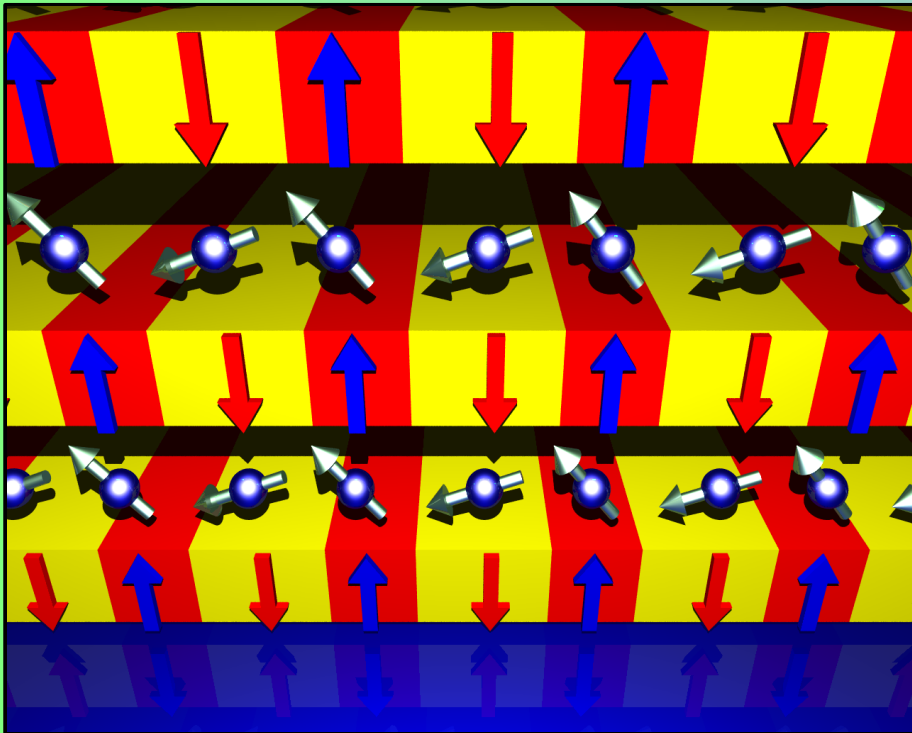
Lokalne minima oporu są głębsze.

Pola magnetyczne w warstwach wielokrotnych [NiFe/Au/Co/Au]_N

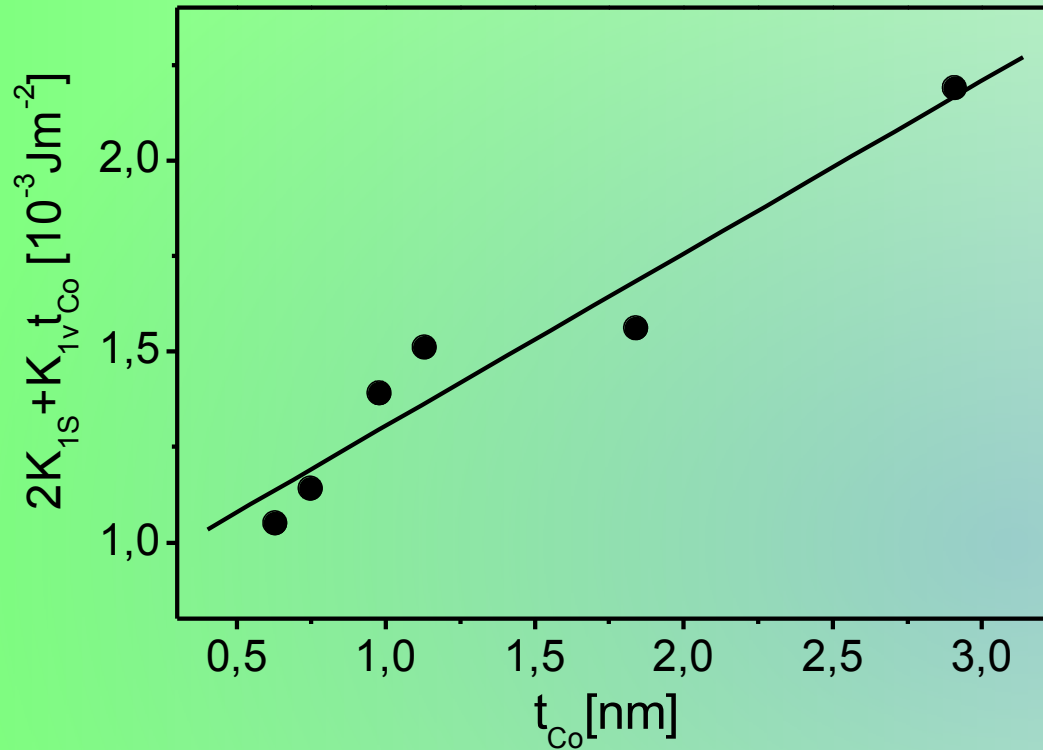


$$R(H) = .$$

$$r_0 - \frac{dr}{M_S^{NiFe}} \left[H \frac{M^{Co}(H)}{M_S^{Co}} + H_d(H) \right]$$

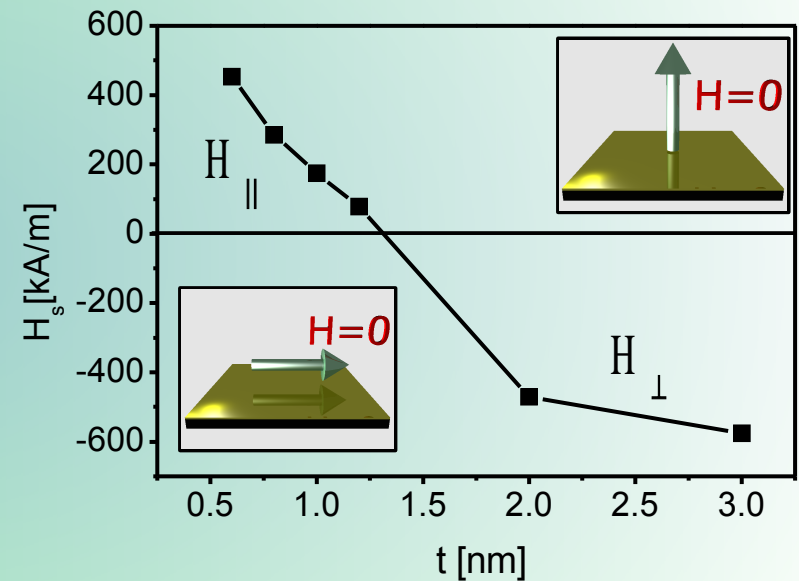


Własności magnetyczne warstw wielokrotnych [NiFe/Au/Co/Au]_N



$$K_{1s} = 4.25 \times 10^{-4} \text{ Jm}^{-2}$$

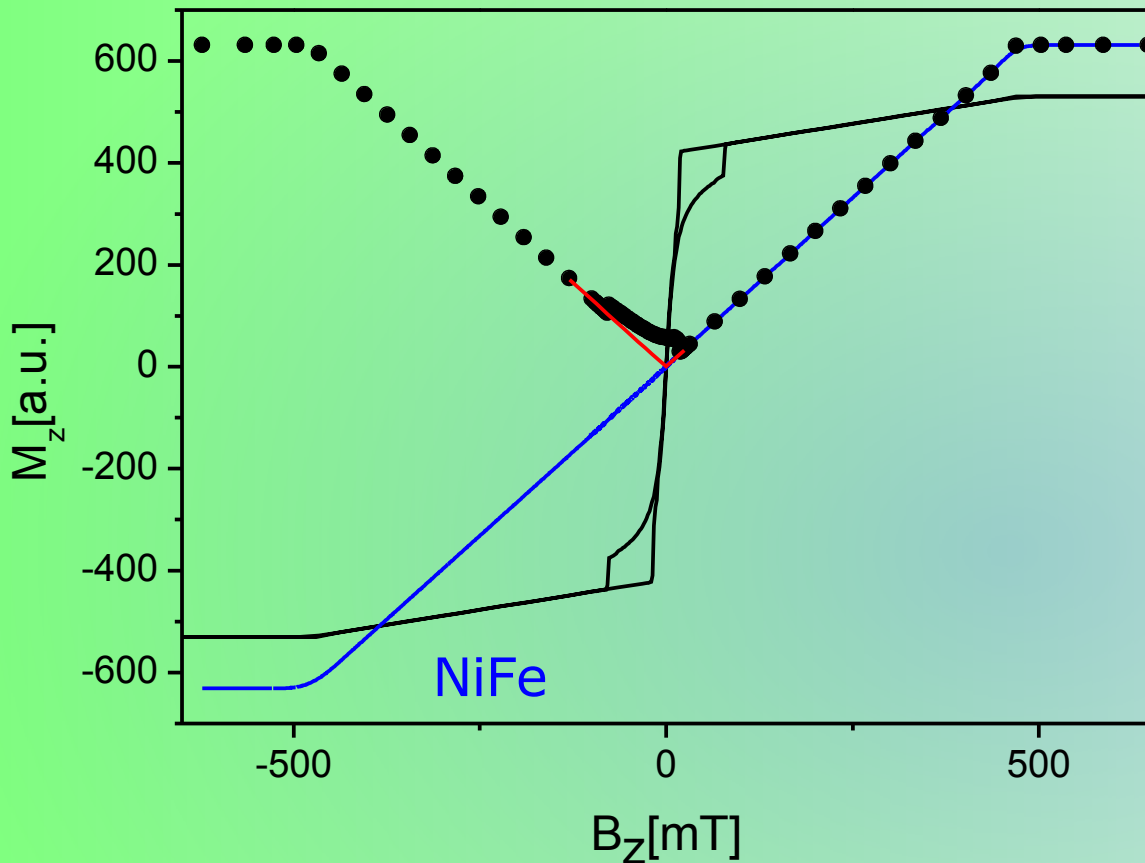
$$K_{1v} = 452 \times 10^3 \text{ Jm}^{-3}$$



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

[Ni₈₀Fe₂₀(2 nm)/Au(3 nm)]₁₀/Au(0-2 nm)/
Co(0-2.4 nm)/Au(3 nm)

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



Zależność $M(H)$ subwarstw NiFe pozostaje liniowa mimo wpływu pól magnetycznych pochodzących od subwarstw Co.

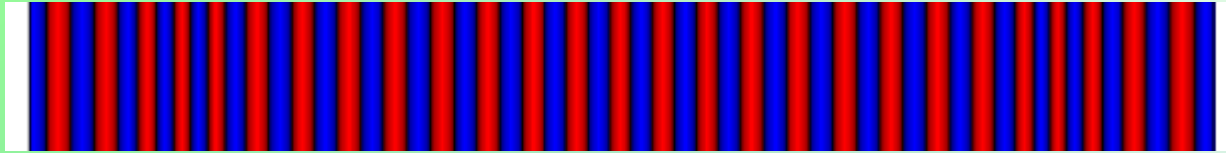
Zależność $abs(M(H))$ subwarstw NiFe (••••) nie jest liniowa - wpływ subwarstw Co.

W $[\text{NiFe}(1\text{nm})/\text{spacer}(1\text{nm})]_4$ zal. $abs(M(H))$ jest liniowa.

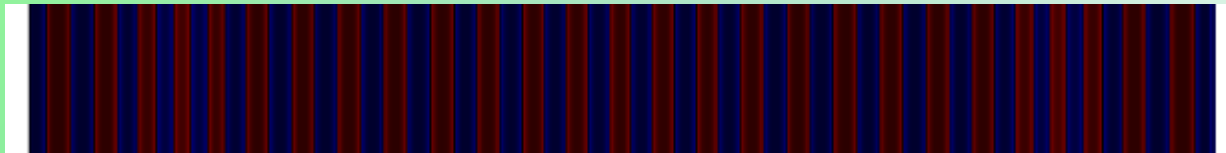
W zakresie pól odpowiadającym istnieniu pasiastej struktury domenowej w subwarstwach Co wpływają one w sposób istotny na przemagnesowanie subwarstw NiFe.

[NiFe/Au/Co/Au]_N - symulacje mikromagnetyczne

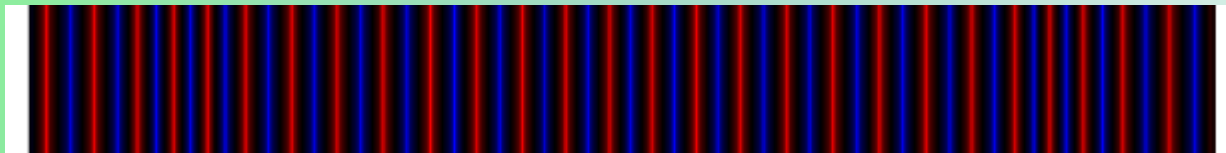
Co1 składowa z



Py1 składowa z
(skala 100000)



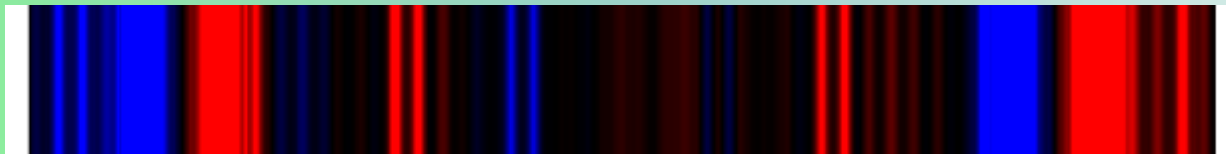
Co1 składowa x



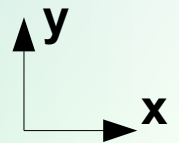
Py1 składowa x



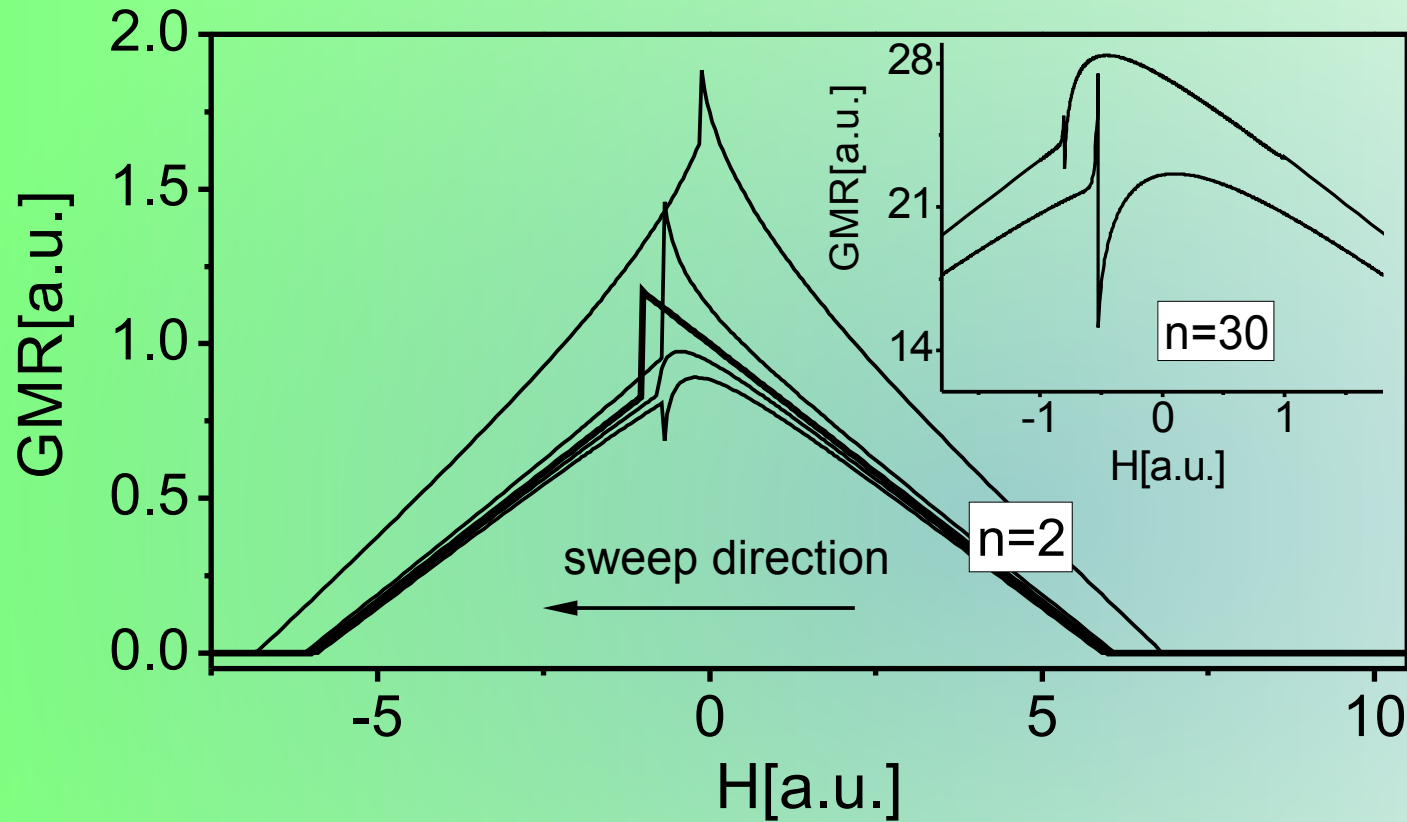
Co1 składowa y
(skala 10000)



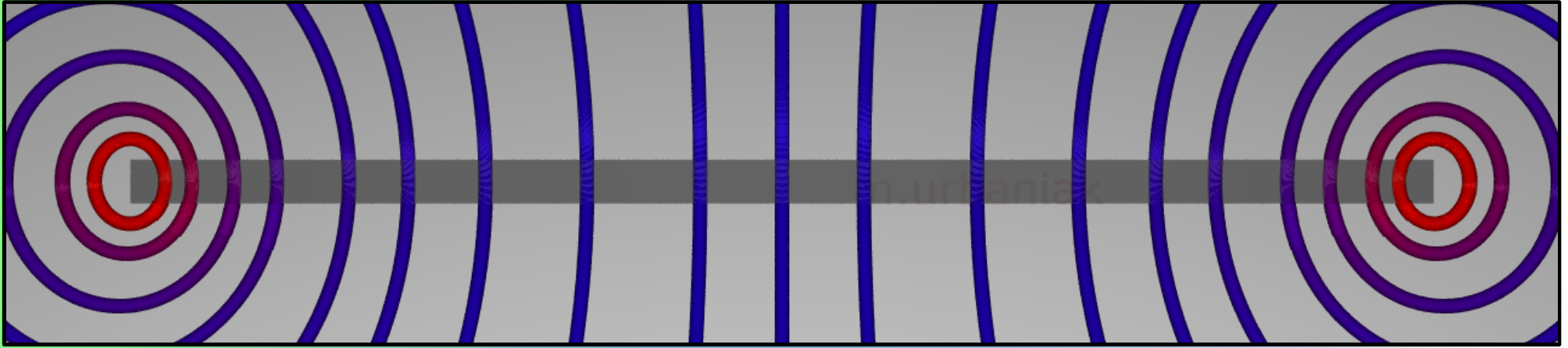
Py1 składowa y



[NiFe/Au/Co/Au]_N- model stałych momentów magnetycznych

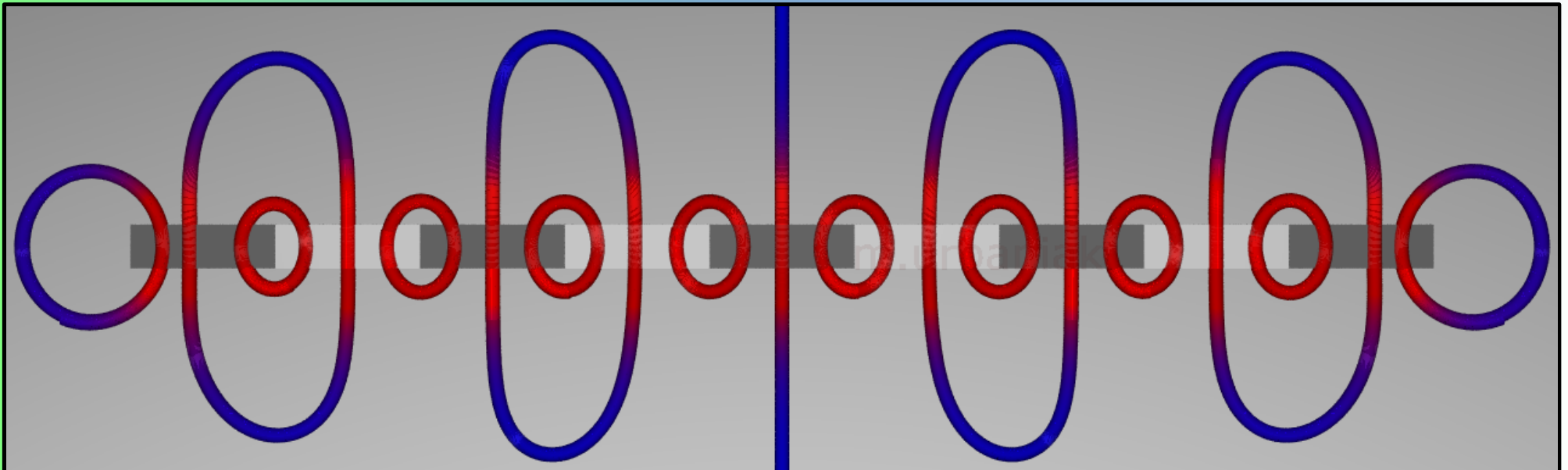


$$E = -\mu_0 \sum_{i=1}^n M_i t_i H \cos(\alpha_{iH}) + K_{\text{Co}} \sum_{i=2,4,\dots}^n \sin^2 \theta_i + K_{\text{Py}} \sum_{i=1,3,5,\dots}^n \sin^2 (\pi/2 - \theta_i) - \sum_{i=1}^{n-1} J \cos(\alpha_{i,i+1}).$$

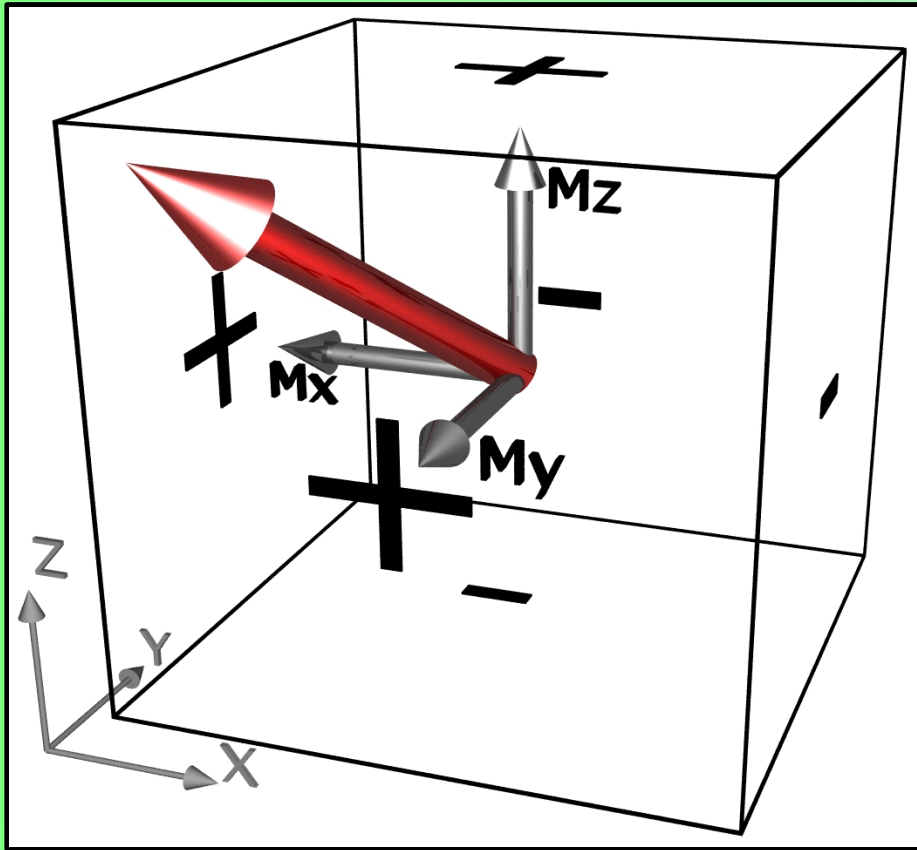


Podział na domeny prowadzi do zwiększenia wartości pola magnetycznego (B) w obrębie warstwy i obniżenia energii \Rightarrow **pasiasta struktura domenowa**.

$$E_{magn} = -\vec{B} \cdot \vec{M}$$



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



$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$$

$$\text{Maxwell: } \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \cdot \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = 0 \rightarrow \vec{\nabla} \cdot \vec{H} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{M}$$

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

$$\vec{\nabla} \cdot (-\vec{\nabla} \phi) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \phi + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \phi + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \phi$$

$$\nabla^2 \phi = \vec{\nabla} \cdot \vec{M}$$

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

Magnetoopór w materiałach ferromagnetycznych

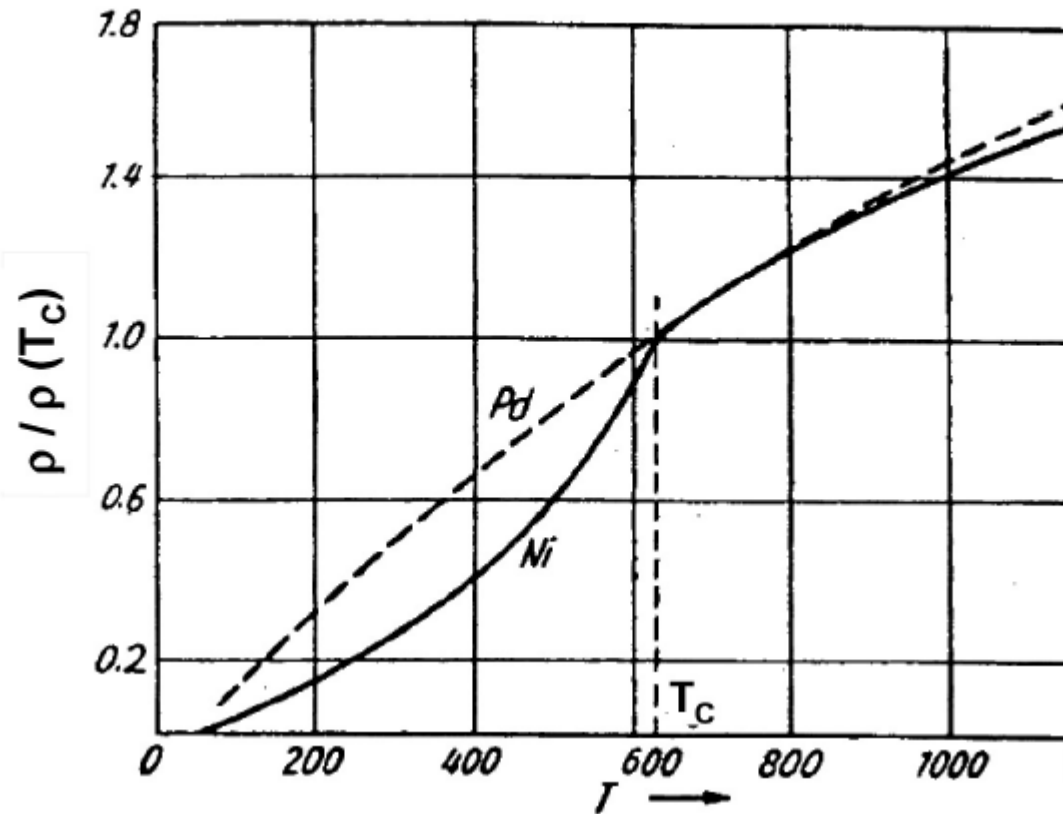
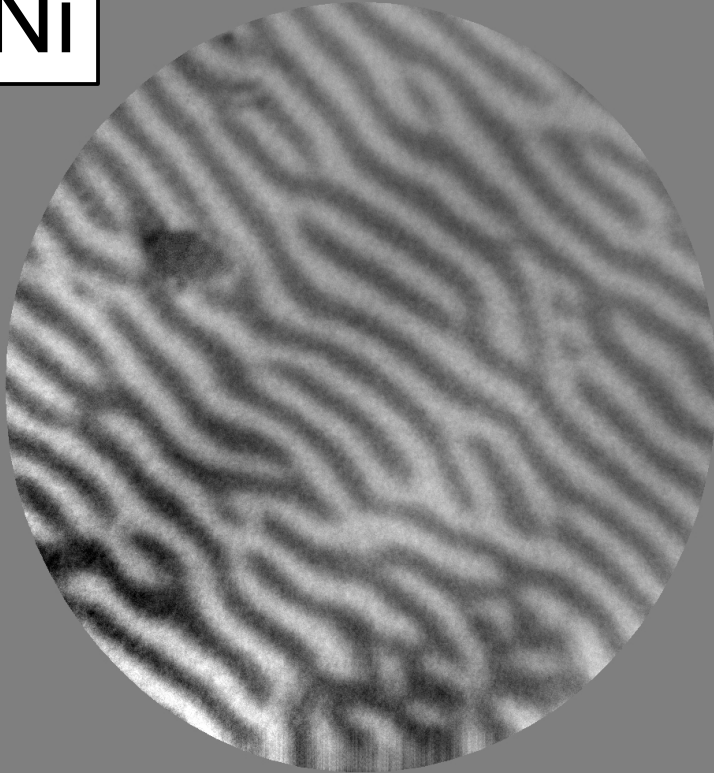
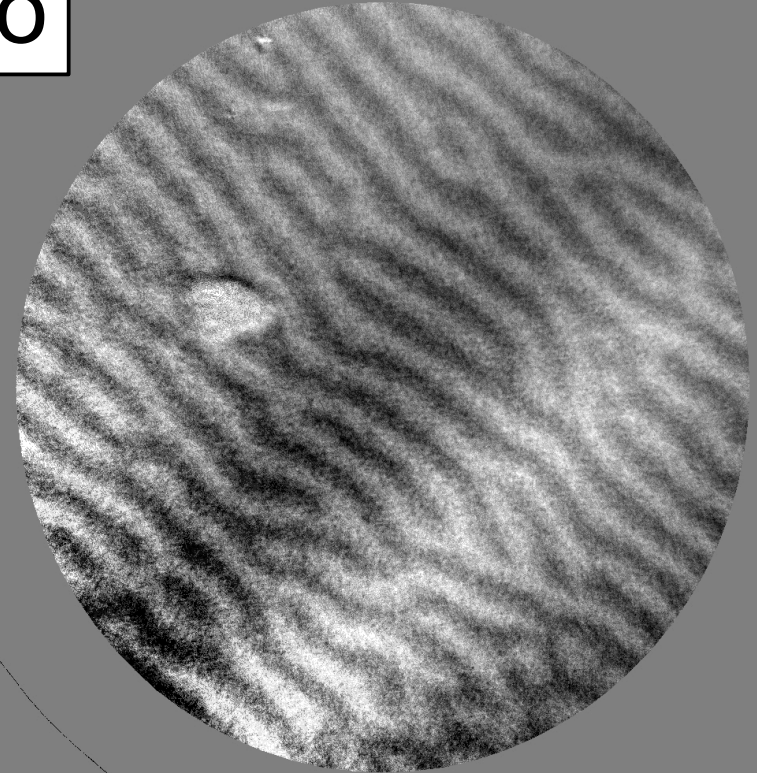


Abbildung 2.1: Elektrischer Widerstand von Nickel und Palladium (Coles 1958). Die Widerstandsachse ist auf den spezifischen Widerstand des jeweiligen Materials bei der Curie-Temperatur T_C normiert.

FeNi



Co



Eksperymentalne potwierdzenie replikacji domen Co w subwarstwach NiFe

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

po namagnesowaniu ex-situ polem w płaszczyźnie 0.7T