SWISS CONTRIBUTION

NANOSPIN

Dynamika namagnesowania warstwowych struktur magnetycznych i nanostruktur.

Hubert Głowiński, IFM PAN

promotor: prof. Janusz Dubowik

AGH

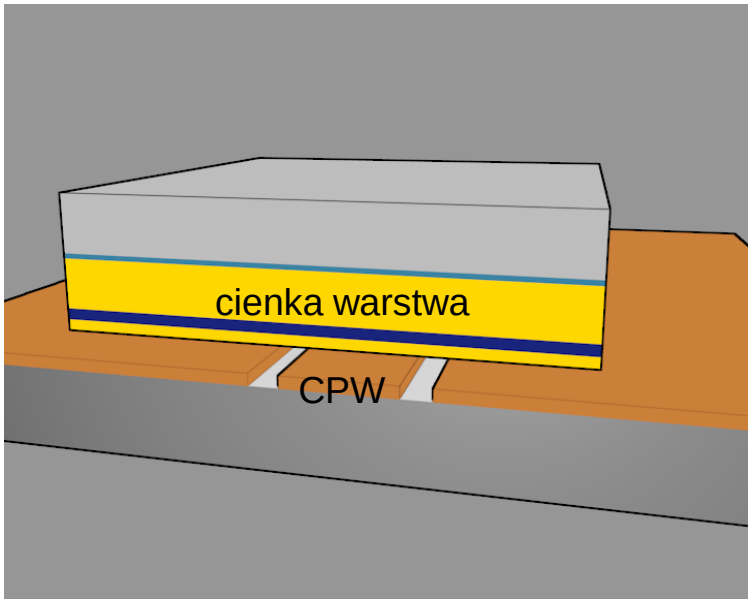
09.06.2015

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Praca była częściowo finansowana z grantu Polsko-Szwajcarskiego „Nanospin” PSPB-045/2010

Plan

- Wprowadzenie
- Układy z efektem „exchange-bias”
- Układy z anizotropią prostopadłą
- Podwójne zawory spinowe
- Efekt wzmocnienia sygnału
- Antyrezonans ferromagnetyczny
- Podsumowanie



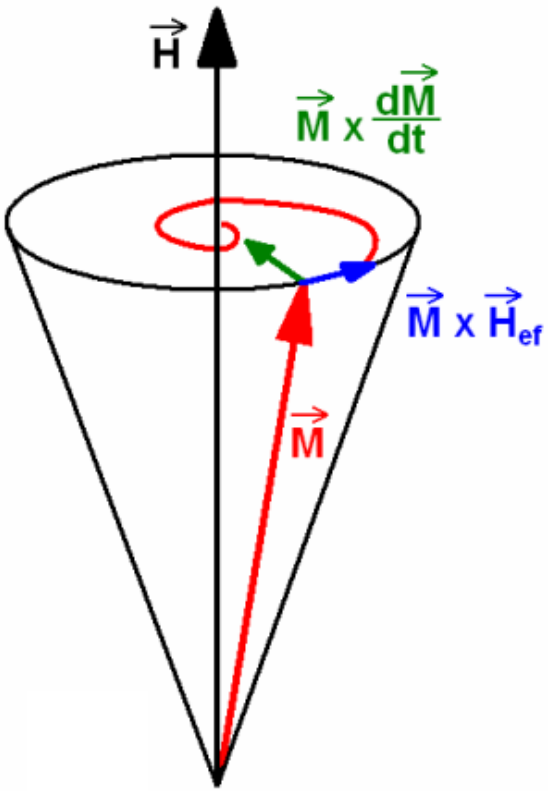
Dynamika namagnesowania

- Wektor namagnesowania precesuje w zewnętrznym polu magnetycznym

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma \vec{M} \times \vec{H}$$

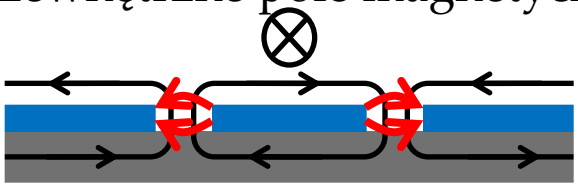
- Równanie Landau-Lifszyc-Gilbert (LLG)

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma \vec{M} \times \vec{H} + \frac{\alpha}{M}\left(\vec{M} \times \frac{d\vec{M}}{dt}\right)$$



VNA-FMR

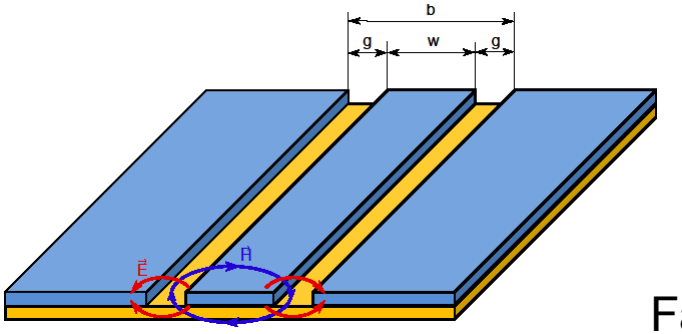
Zewnętrzne pole magnetyczne

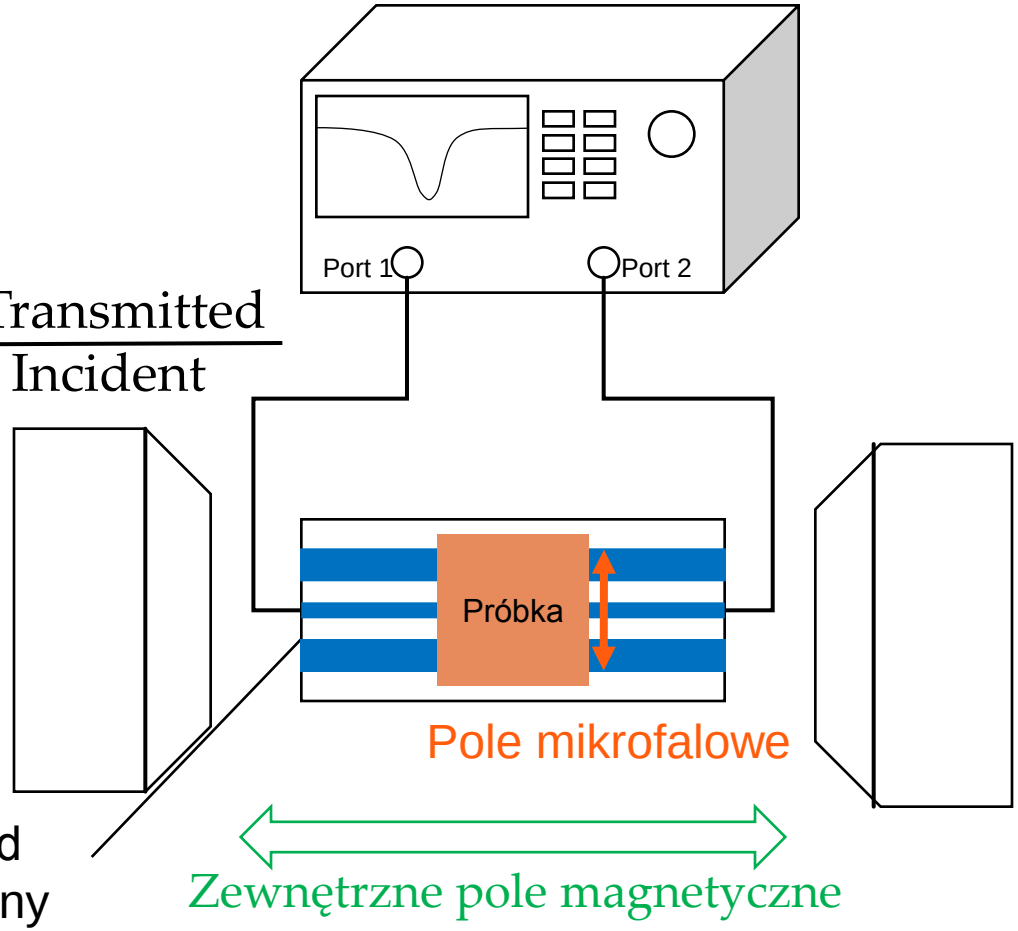


Linie pola magnetycznego

Linie pola elektrycznego

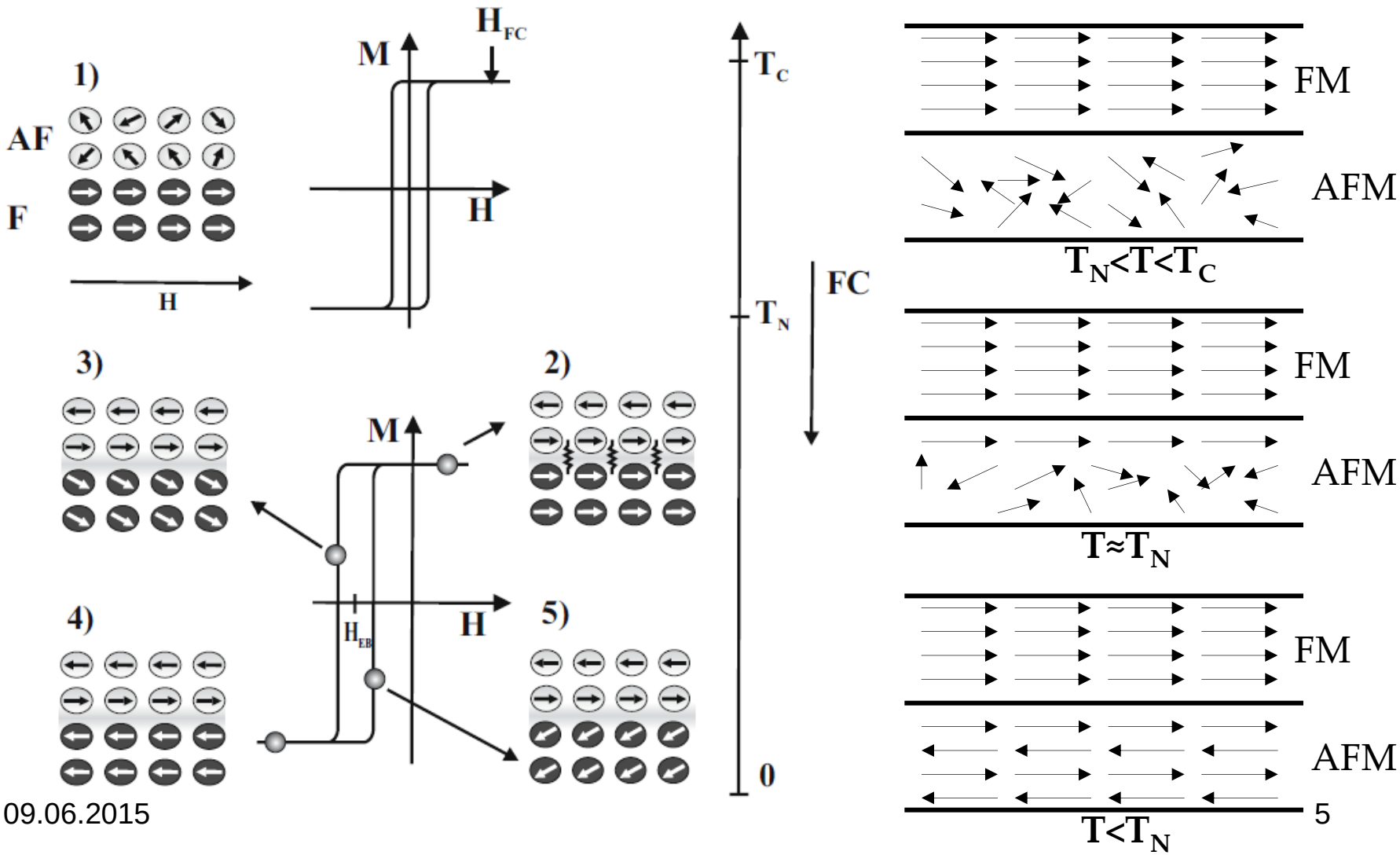
$$S_{21} = \frac{\text{Transmitted}}{\text{Incident}}$$





Falowód koplanarny

Sprzężenie typu exchange – bias



Mathias Getzlaff, *Fundamentals of Magnetism,* Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008

Zależność pola rezonansowego od kąta w płaszczyźnie

$$G = 2\pi M_0^2 \sin^2\theta - M_0 H_0 \sin\theta \cos(\phi - \alpha)$$
$$- M_0 H_B \sin\theta \cos\phi + (M_0 H_A/2) \sin^2\theta \sin^2\phi$$

- Korzystając ze wzoru Smita-Beljersa można z energii swobodnej przedstawionej powyżej wyprowadzić warunek dla rezonansu w układach z anizotropią jednozwrotową

$$(\omega/\gamma)^2 = (m_0^2 \sin^2\theta)^{-1}(G_{\theta\theta}G_{\phi\phi} - G_{\theta\phi}^2)$$

$$4\pi M_0 \gg H_0 \gg H_B, H_A$$

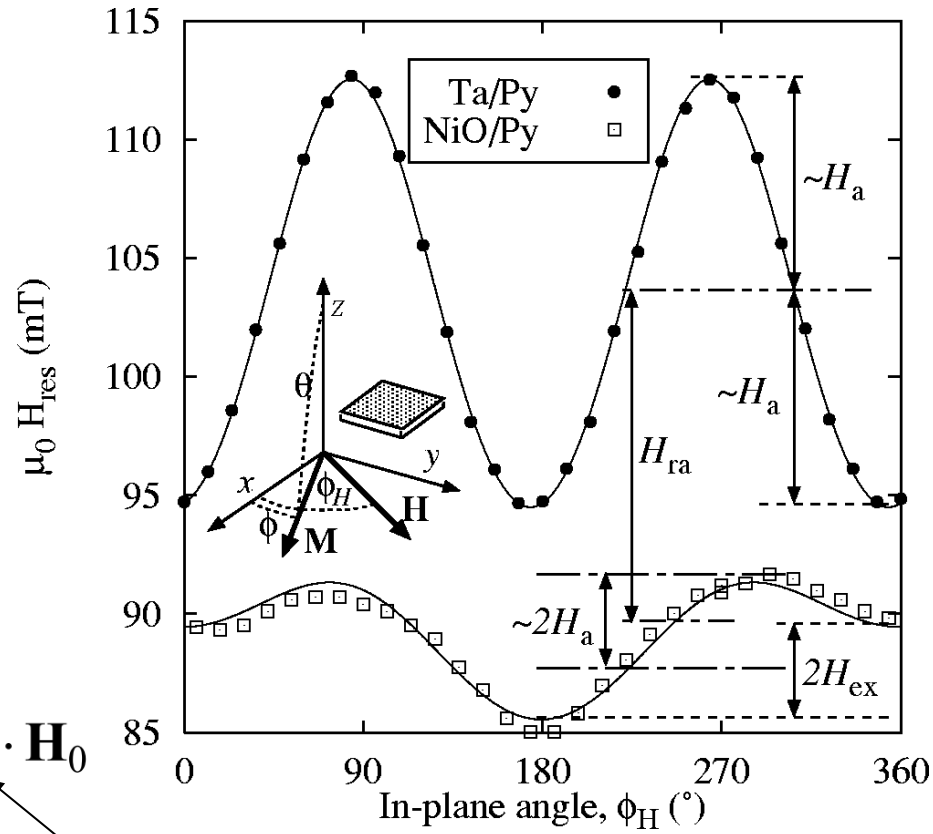
$$H_0 = H_{||} - H_B \cos(\alpha) - H_A \cos(2\alpha)$$

α – kąt pomiędzy namagnesowaniem, a kierunkiem pola podczas chłodzenia
H_A – pole anizotropii; H_B – pole przesunięcia exchange-bias;

Mark Rubinstein, Peter Lubitz, and Shu-Fan Cheng J. Magn. Magn. Mater., 195:299–306, 1999

Zależność pola rezonansowego od kąta w płaszczyźnie

- Na wykresie przedstawiono wielkości H_a, H_{eb}, H_{ra}



Energia anizotropii kształtu

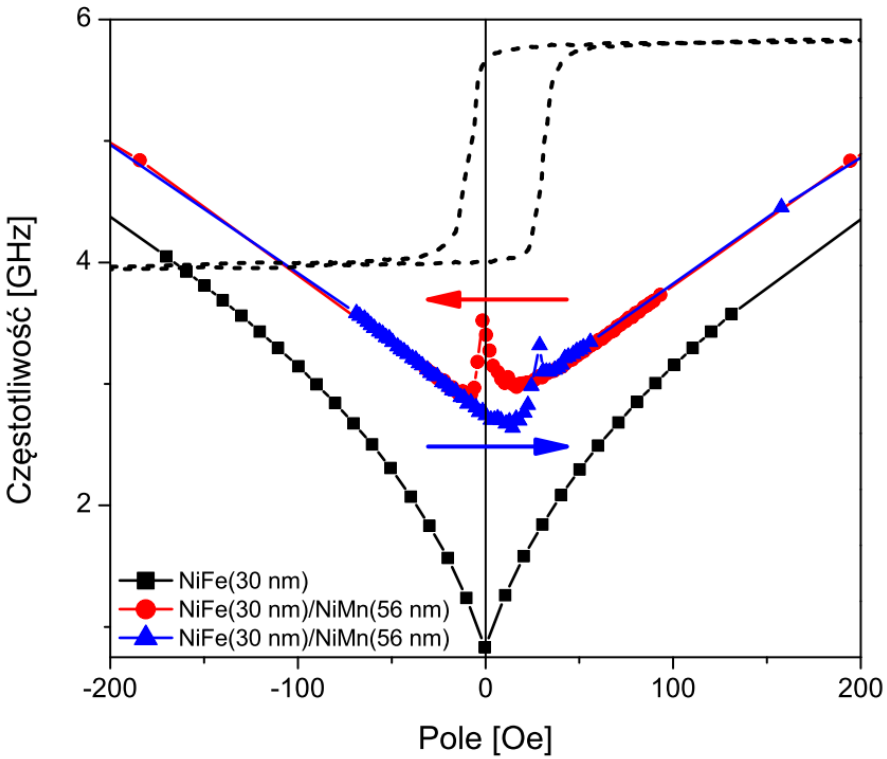
Energia anizotropii jednoosiowej

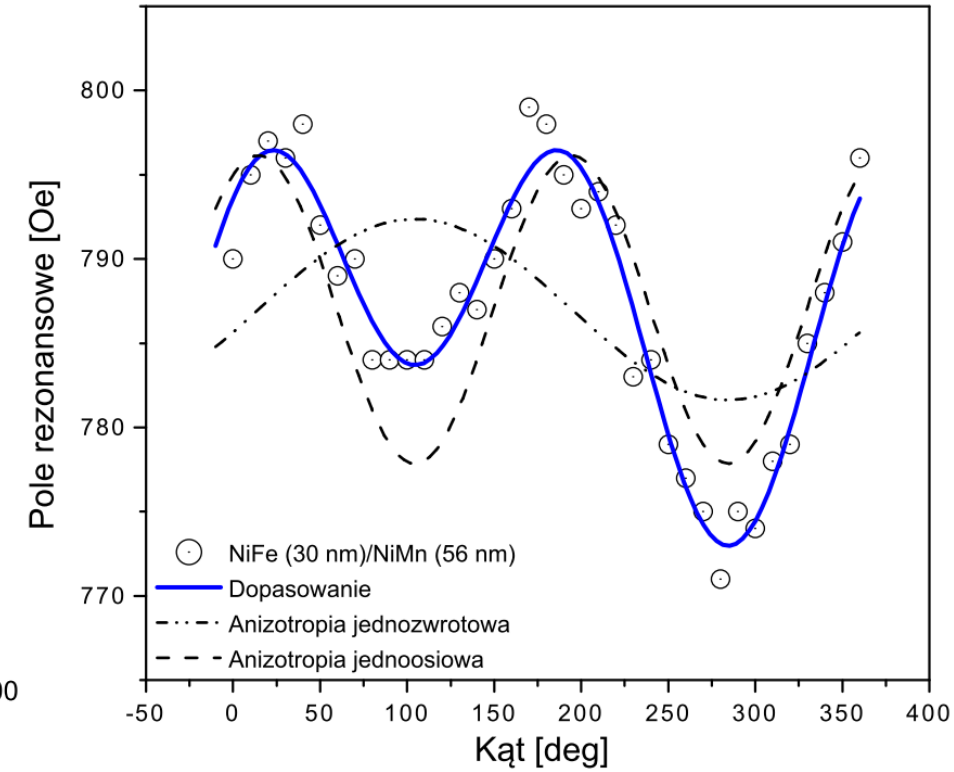
$$\mathcal{F} = K_u(\hat{\mathbf{m}}\cdot\hat{\mathbf{n}})^2 + K_a(\hat{\mathbf{m}}\cdot\hat{\mathbf{p}})^2 - \mu_0\mathbf{M}\cdot\mathbf{H}_0 \underbrace{- \mu_0\mathbf{M}\cdot\mathbf{H}_{\mathrm{ex}} - \mu_0\mathbf{M}\cdot\mathbf{H}_{\mathrm{ra}}}_{\text{Energie związane z AFM}}.$$

energia Zeemana

R. D. McMichael, M. D. Stiles, P. J. Chen, and W. F. Egelhoff, Jr., Phys. Rev. B 58, 8605 (1998)

Warstwy NiFe/NiMn

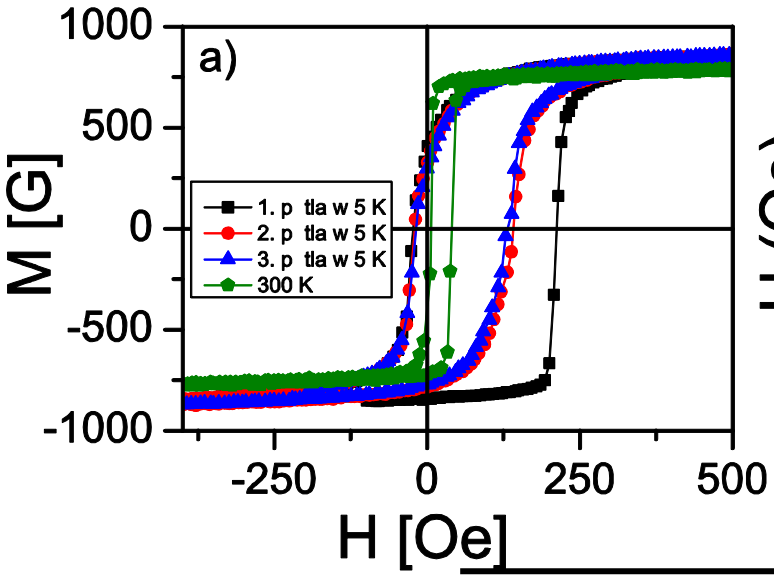


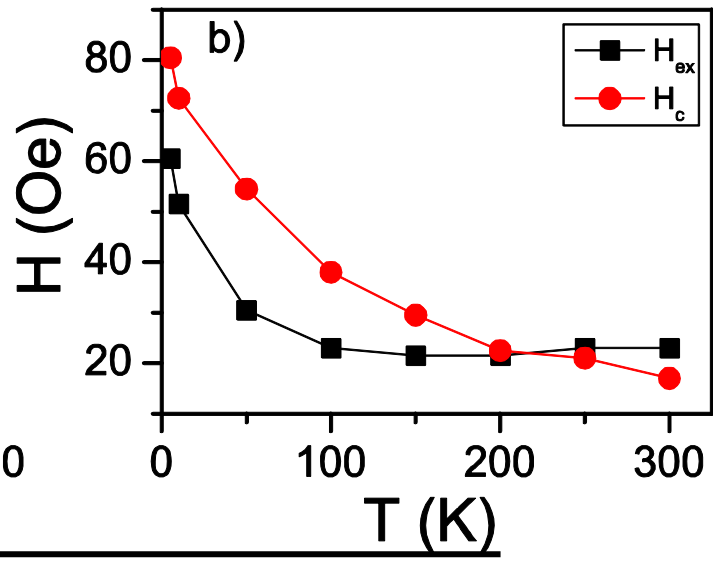


$$f_r = \frac{\gamma}{2\pi}\left[\left(H_u + H_{rot} + |H - H_{ex}|\right)\left(H_u + H_{rot} + |H - H_{ex}| + 4\pi M_{eff}\right)\right]^{1/2}$$

$$H_0 = H_{||} - H_B \cos(\alpha) - H_A \cos(2\alpha)$$

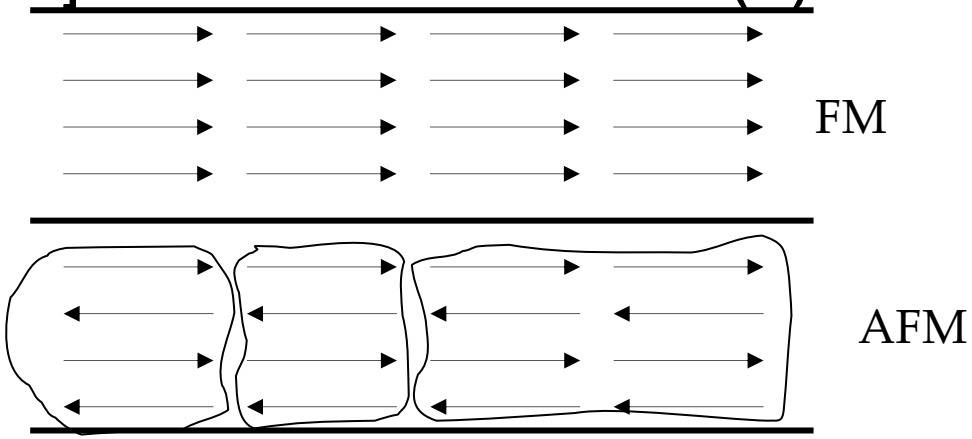
Warstwy NiFe/NiMn



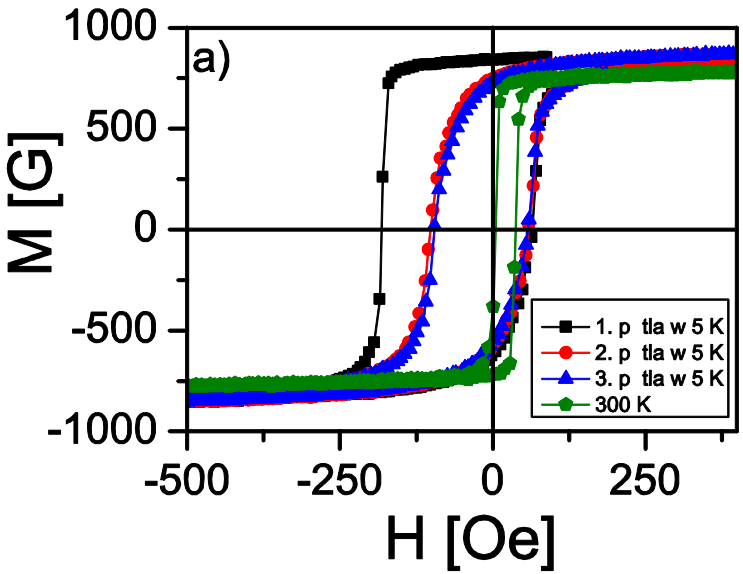


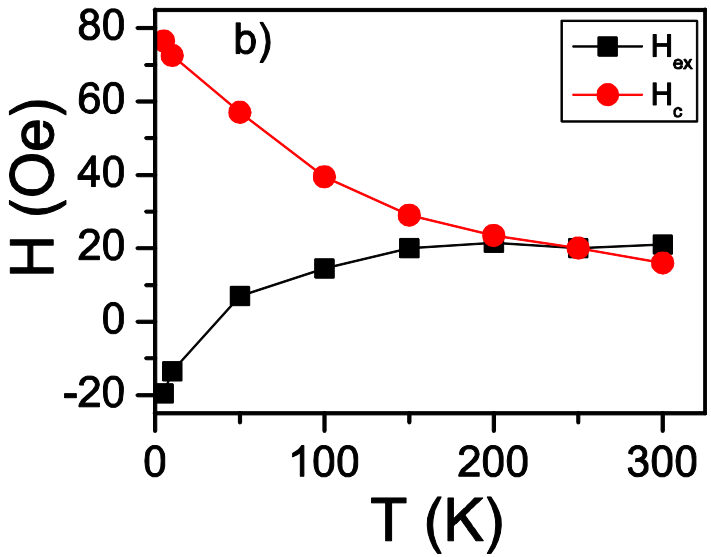
Pole podczas chłodzenia przyłożone przeciwnie do pola H_{ex}

Wpływ ziaren AFM o różnym KV na pole H_{ex}



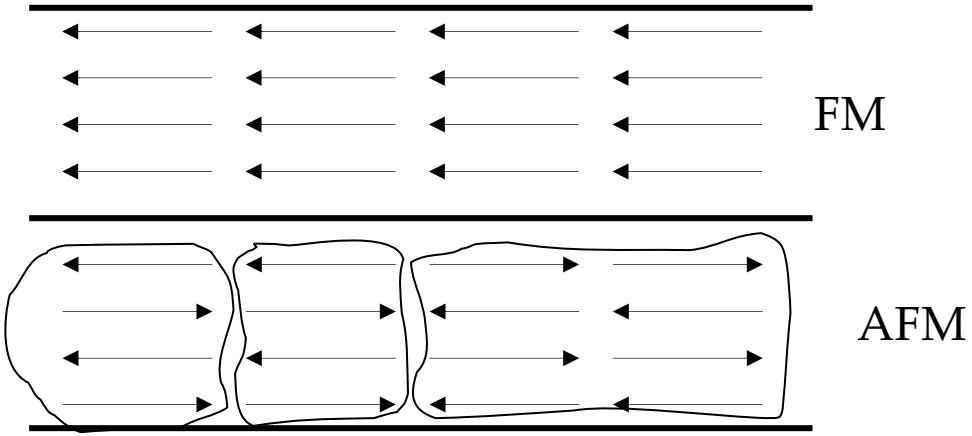
Warstwy NiFe/NiMn



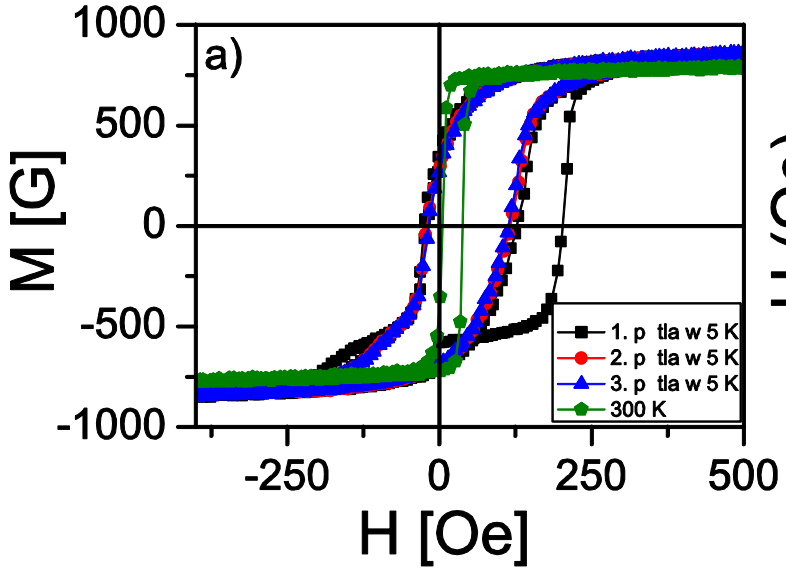


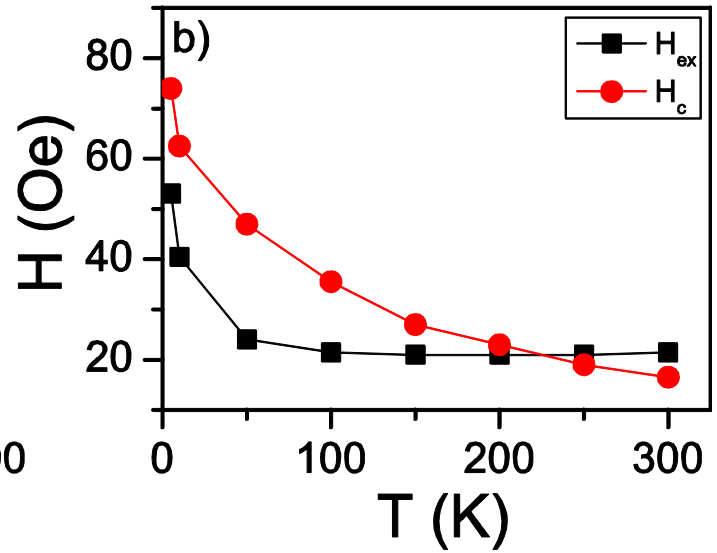
Pole podczas chłodzenia przyłożone zgodnie z polem H_{ex}

Namagnesowanie części ziaren AFM o $KV<k_BT$ uległo rotacji

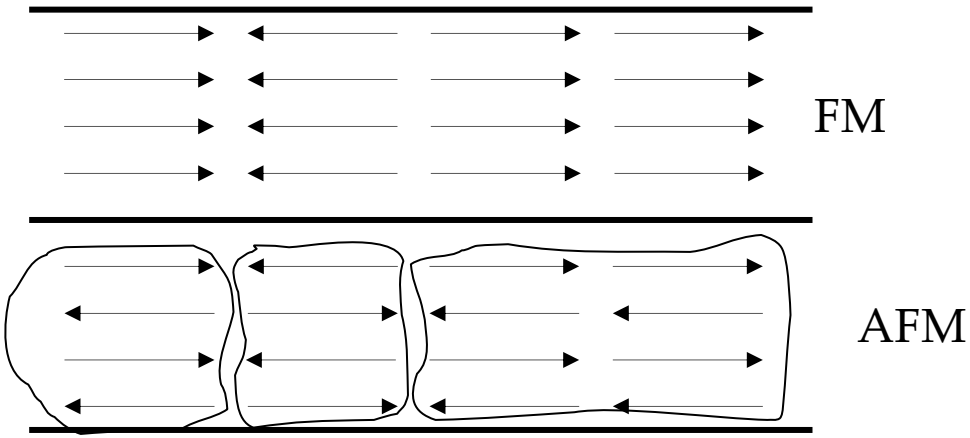


Warstwy NiFe/NiMn

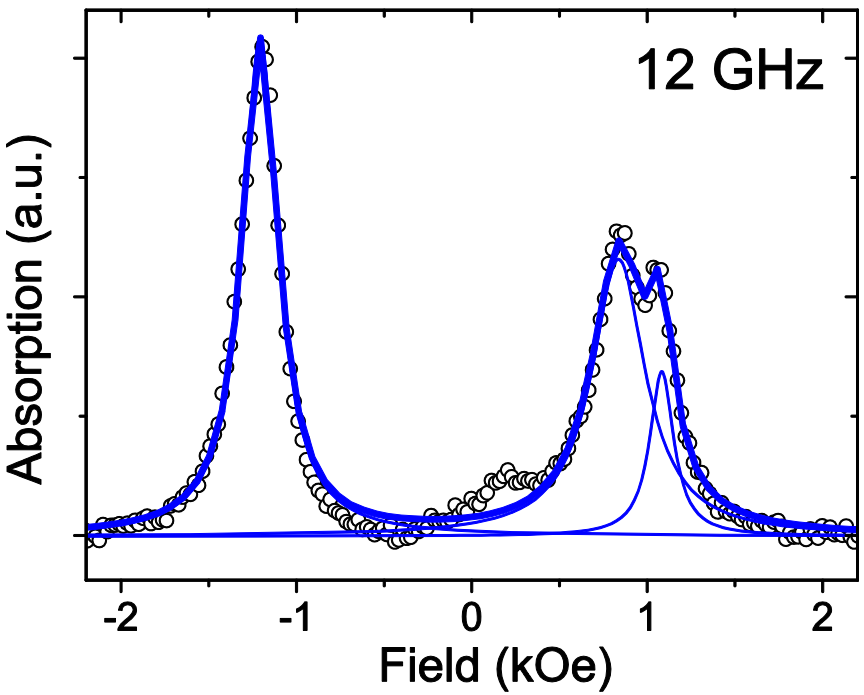


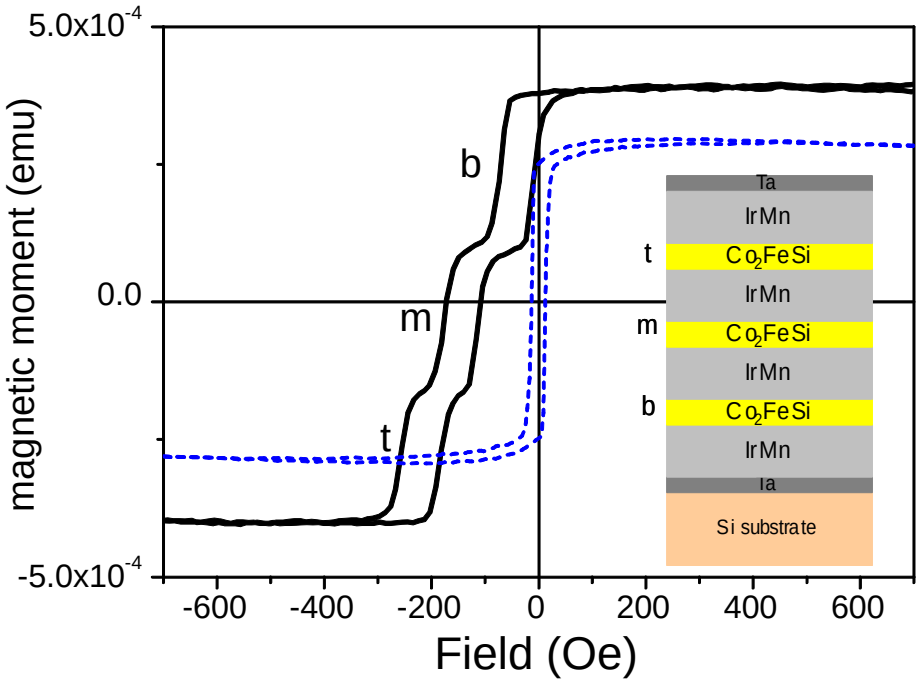


Chłodzenie bez pola, więc próbka nie była nasycona.



Warstwy Co_2FeSi/IrMn



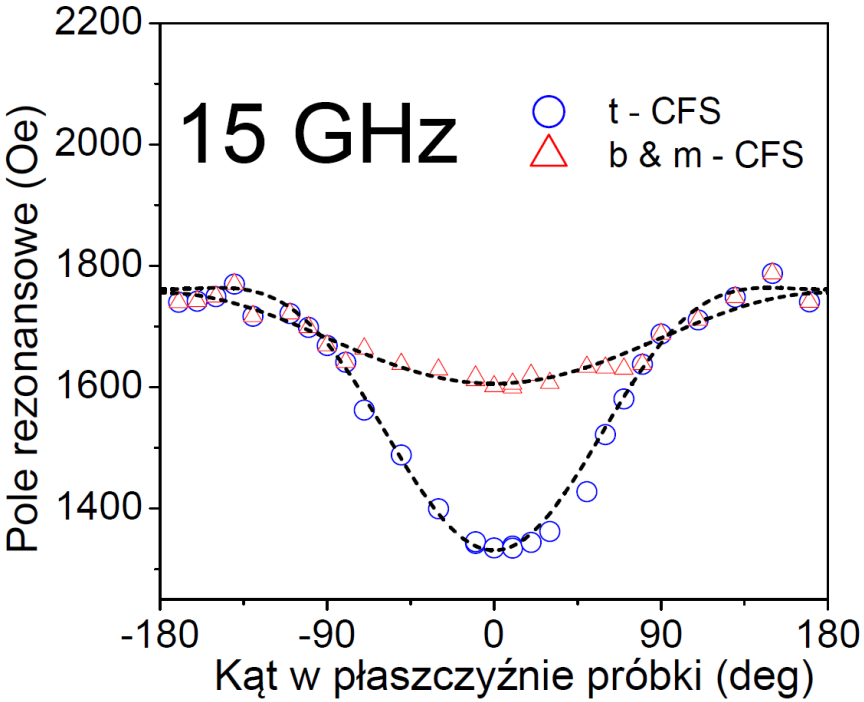


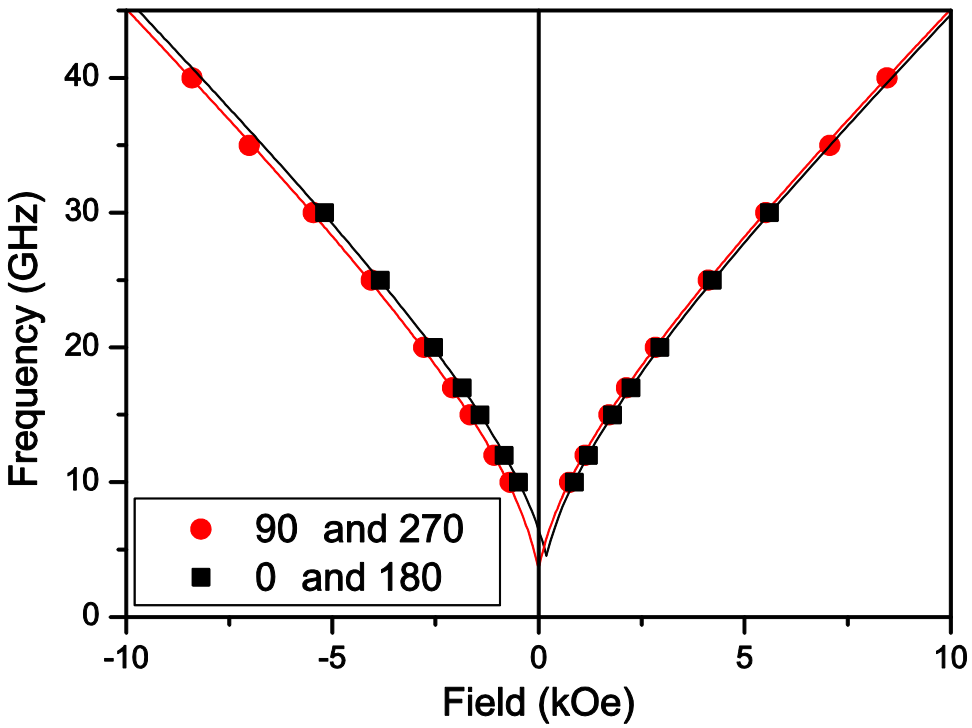
Wynik pomiaru VNA-FMR

Pętla histerezy

Kolejne warstwy Co_2FeSi mają coraz większe pole H_{ex}

Warstwy $Co_2FeSi/IrMn$

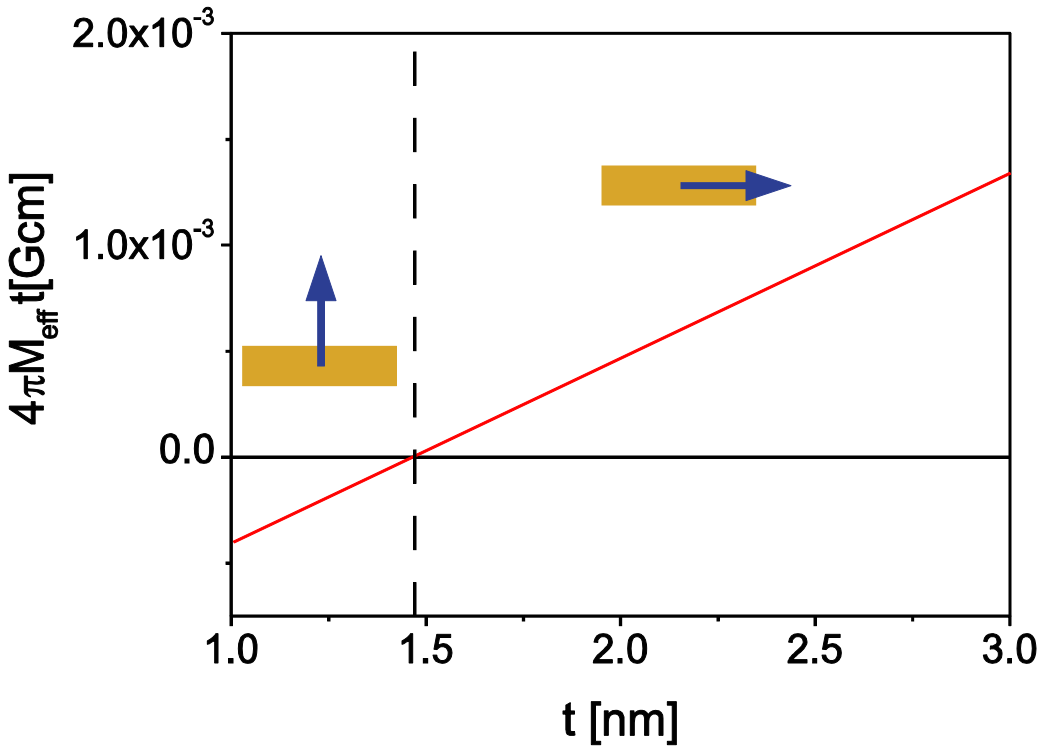


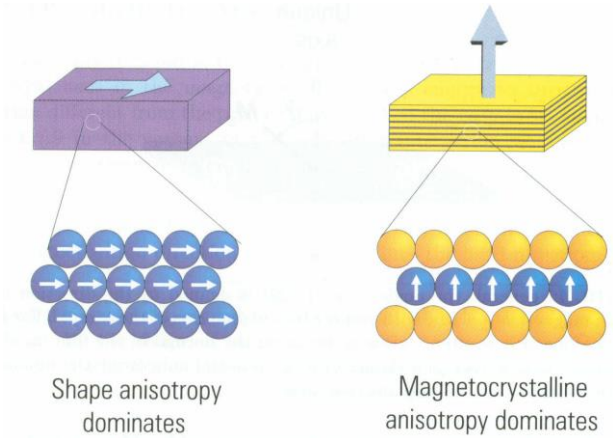


Warstwa	M G	H_{ex}^{VSM} Oe	H_c^{VSM} Oe	H_{ex}^{FMR} Oe	H_u^{FMR} Oe	H_{rot}^{FMR} Oe
(b)-CFS	970	30	30	72	24	80
(m)-CFS	970	140	30			
(t)-CFS	960	214	37	190	39	148

Porównanie wyników pomiarów VNA-FMR oraz pętli histerezy

Anizotropia prostopadła





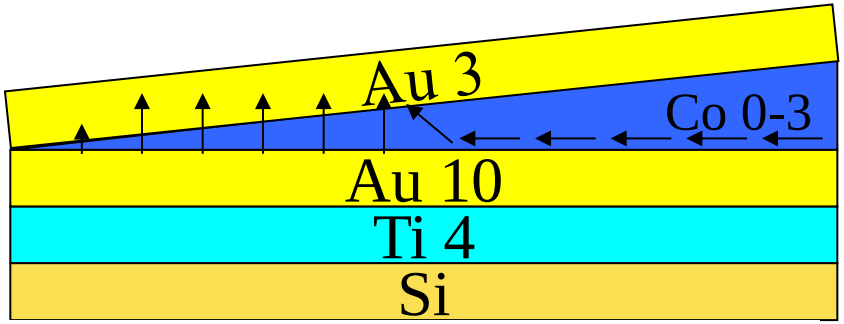
$$4\pi M_{eff}t = (4\pi M_s - \frac{2K_V}{M_s})t - 2\frac{2K_S}{M_s}$$

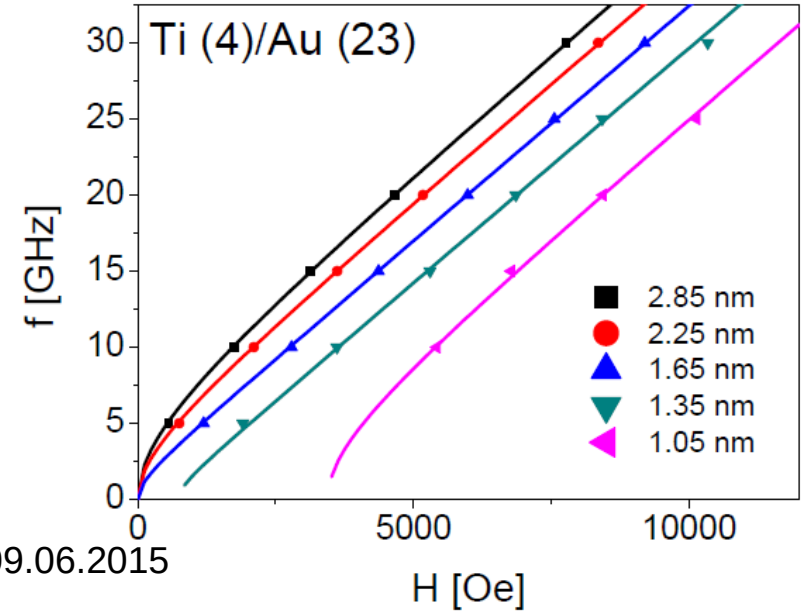
Zależność $4\pi M_{eff}t$ od grubości t pozwala wyznaczyć parametry anizotropii prostopadłej

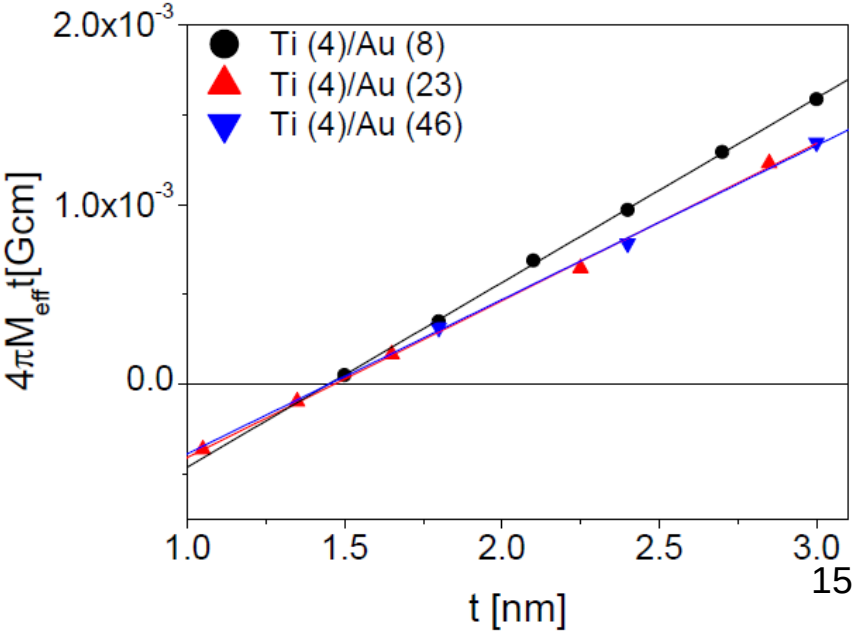
Warstwy Co/Au

Wyznaczenie parametrów anizotropii prostopadłej układu Co/Au na podstawie lokalnych pomiarów VNA-FMR klina Co

Grubość bufora Au nm	K_V erg/cm^3	K_S erg/cm^2
8	5.4×10^6	0.53
23	6.5×10^6	0.45
46	6.6×10^6	0.44

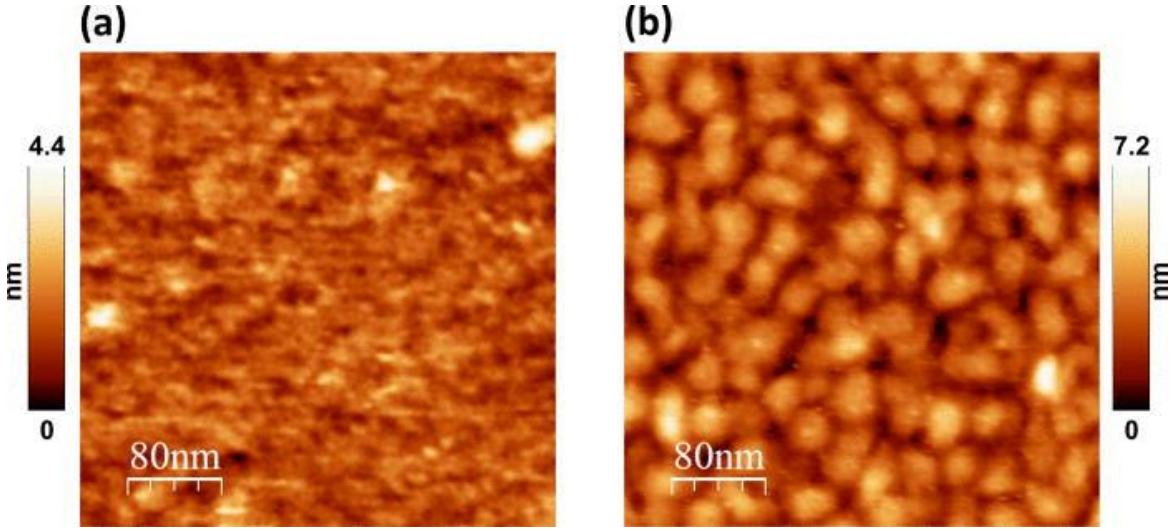


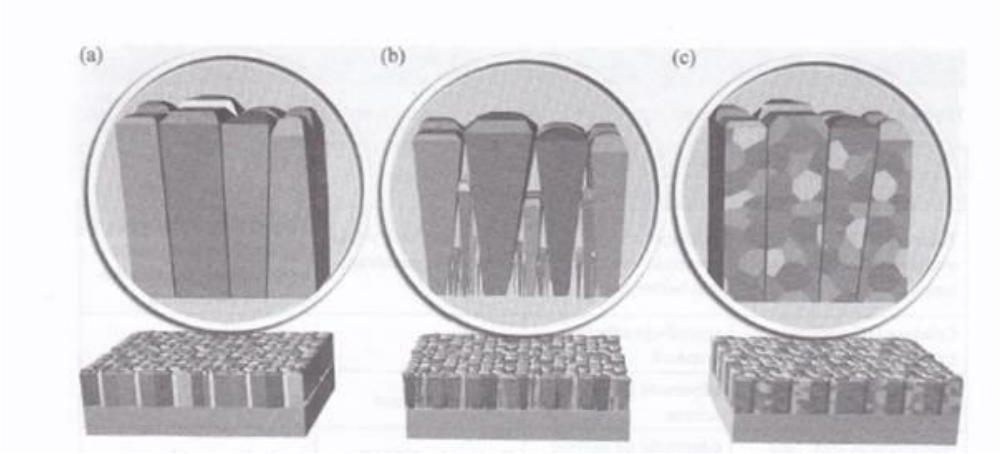




M. Matczak, B. Szymański, M. Urbaniak, M. Nowicki, H. Głowiński, P. Kuświk, M. Schmidt, J. Aleksiejew, J. Dubowik and F. Stobiecki ., J. Appl. Phys. 114, 093911 (2013)

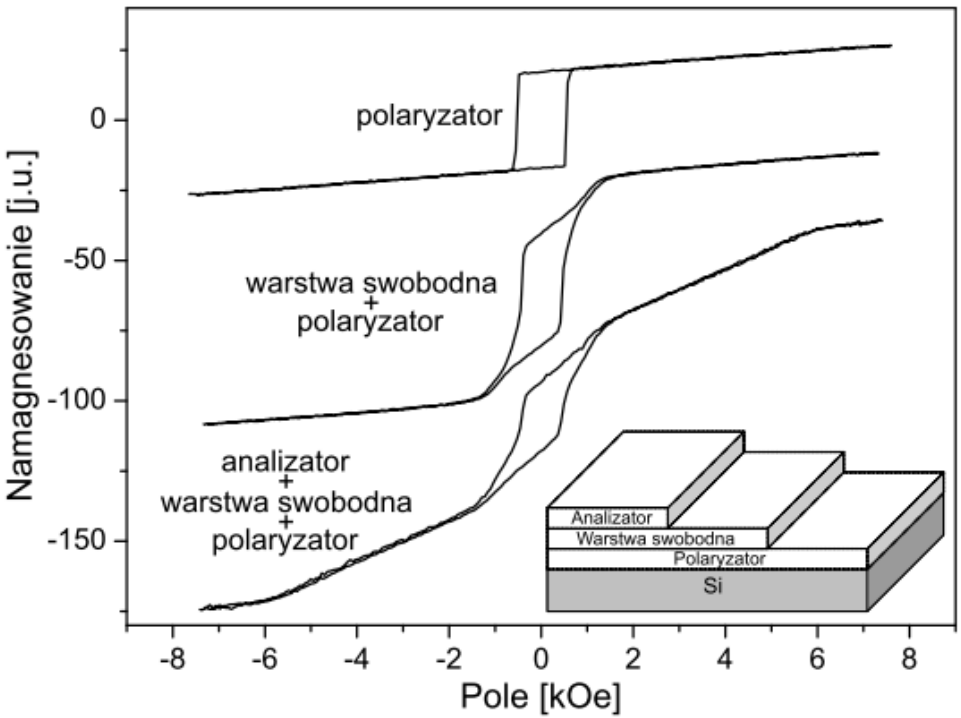
Chropowatość powierzchni

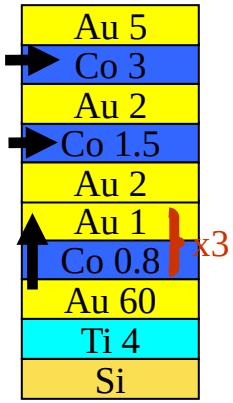


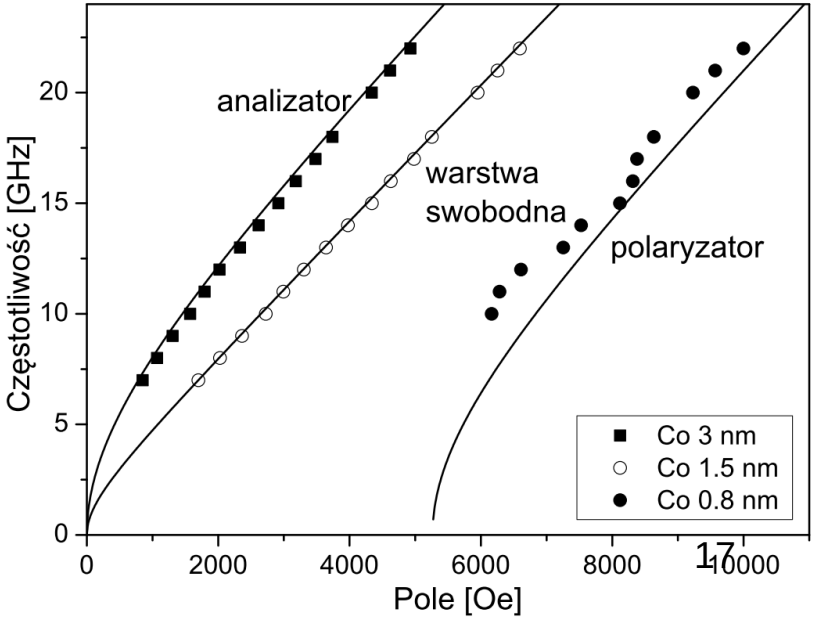


Matczak et al., J. Appl. Phys. 114, 093911 (2013);

Podwójny zawór spinowy

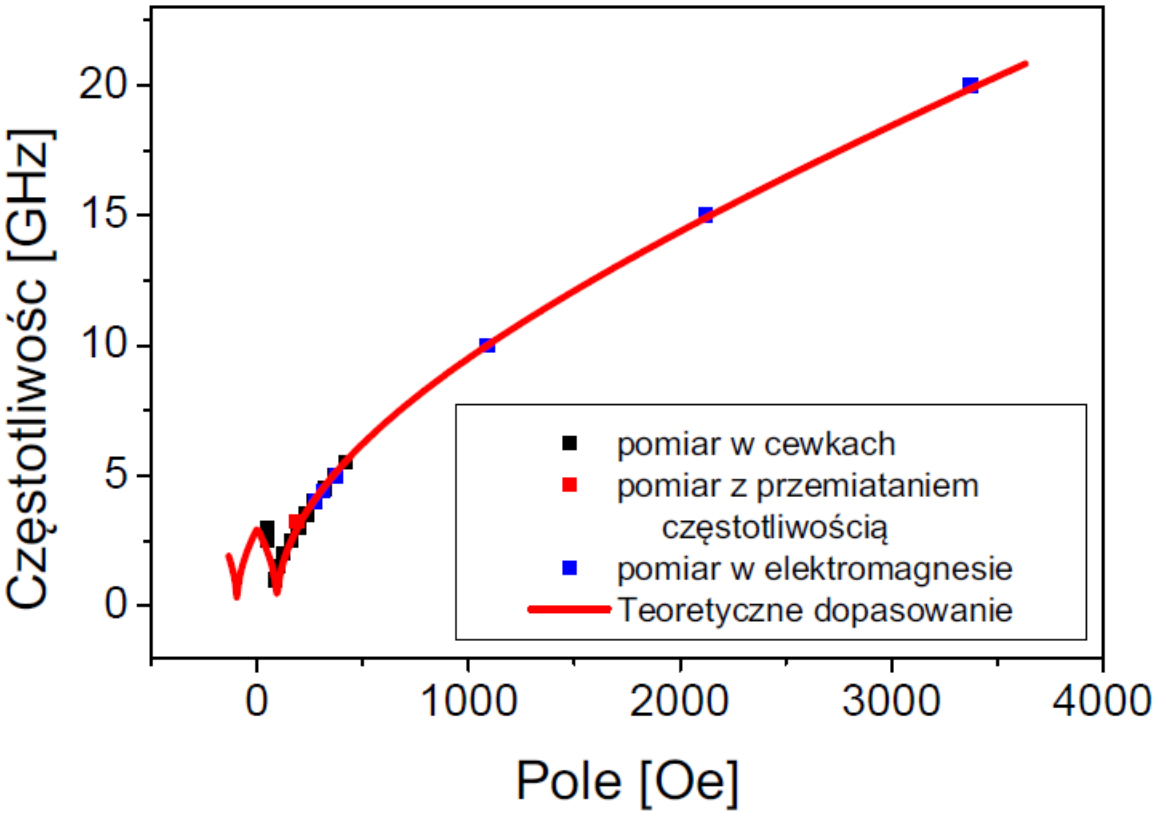


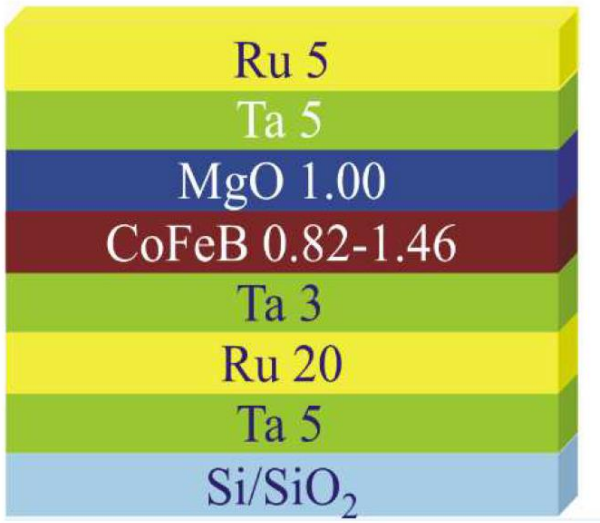




Wyniki pomiarów podwójnego zaworu spinowego o niekolinearnym ustawieniu namagnesowania w warstwach kobaltowych

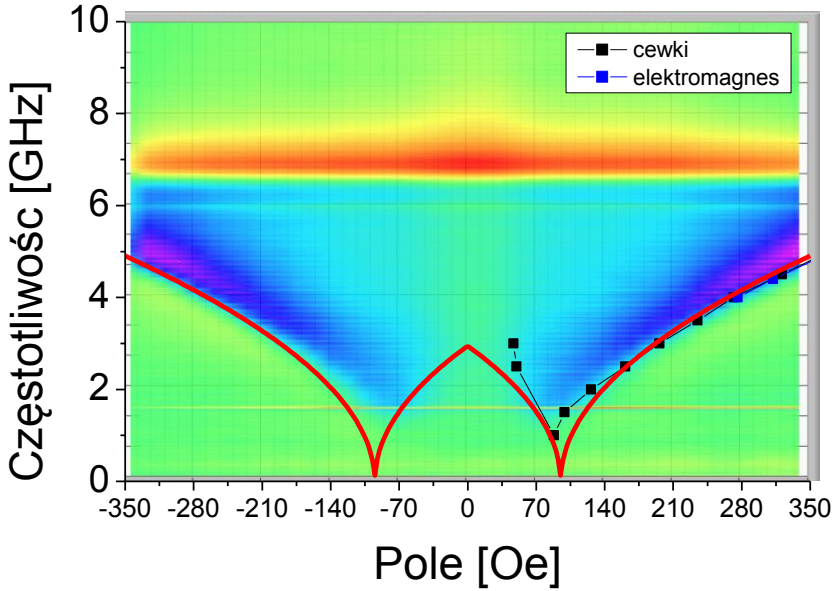
Warstwy CoFeB/MgO



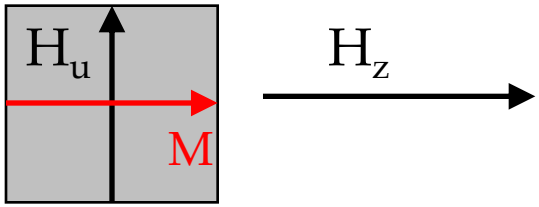


Porównanie wyników pomiarów uzyskanych przez przemiatanie polem i częstotliwością

Warstwy CoFeB w kontakcie z MgO

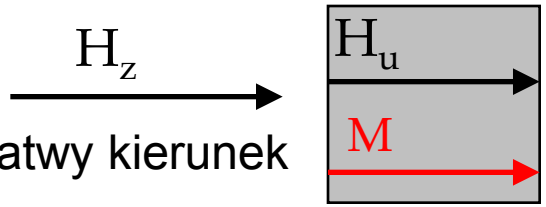


Trudny kierunek

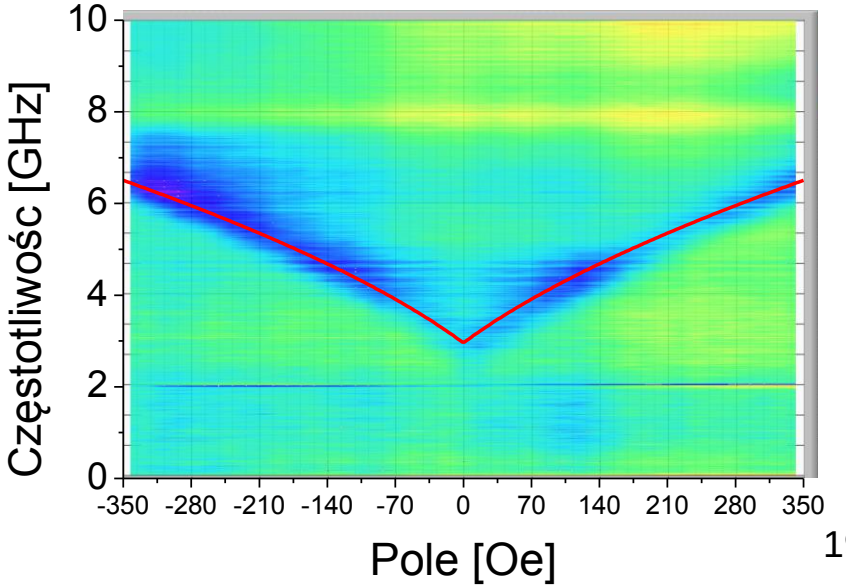


W małych polach wektor namagnesowania nie jest równoległy do pola zewn.

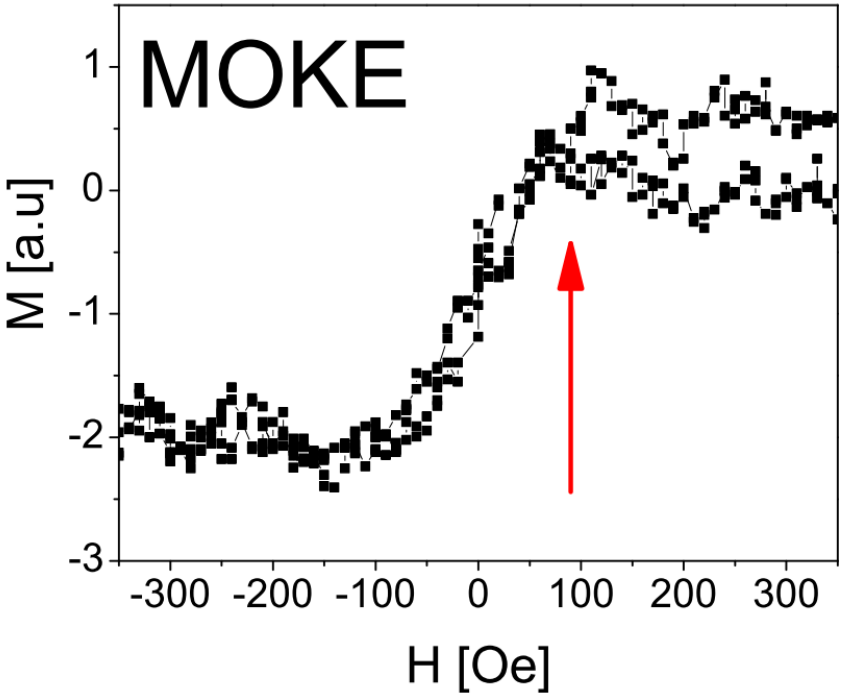
W małych polach wektor namagnesowania jest równoległy do pola zewn.

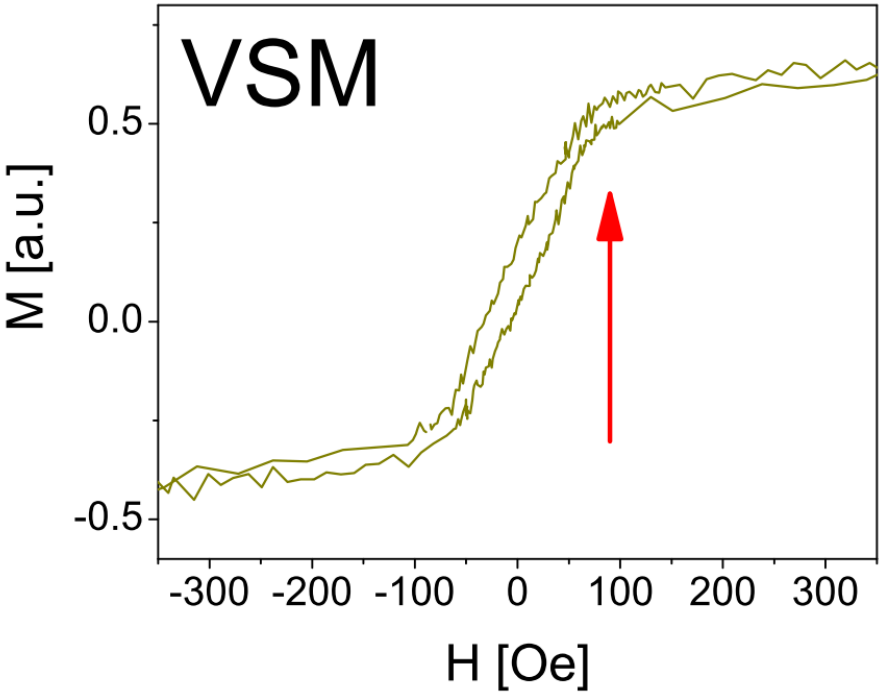


Łatwy kierunek



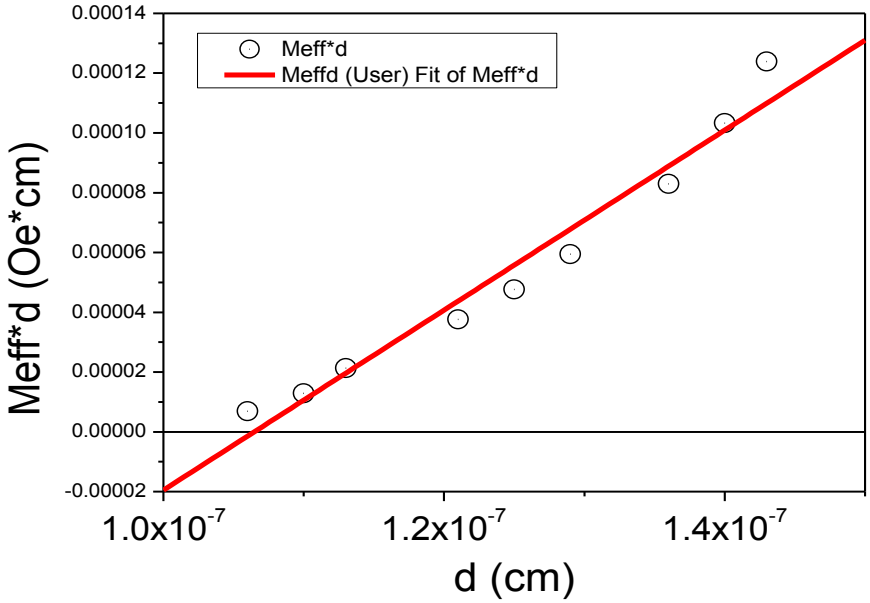
Warstwy CoFeB w kontakcie z MgO





Wyznaczenie pola anizotropii jednoosiowej w płaszczyźnie na podstawie pomiarów MOKE i VSM

Warstwy CoFeB w kontakcie z MgO



Wyznaczenie parametrów anizotropii prostopadłej w warstwach CoFeB

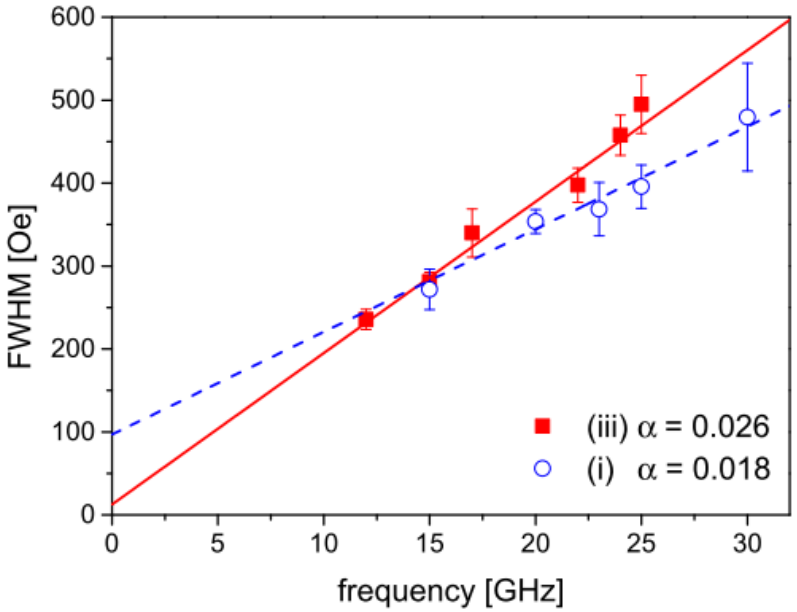
	Value	Standard Error
K_v [erg/cm^3]	-1.37E+07	2E+06
K_s [erg/cm^2]	2.4	0.2
M [emu/cm^3]	1200	0

$$K_p = \frac{K_S}{d} + K_V$$

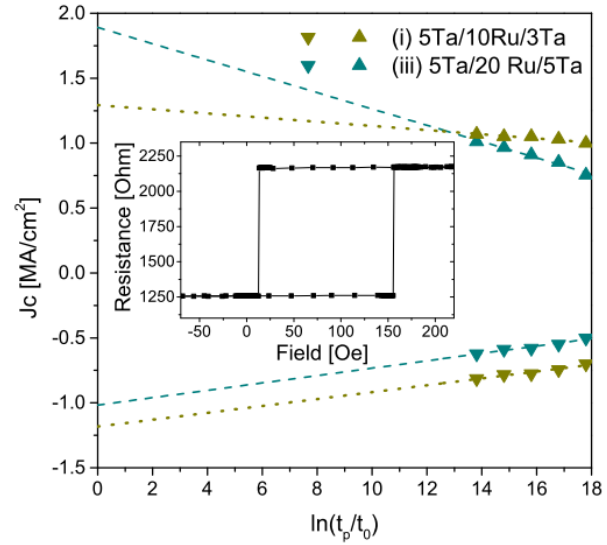
Tłumienie w warstwach CoFeB/MgO

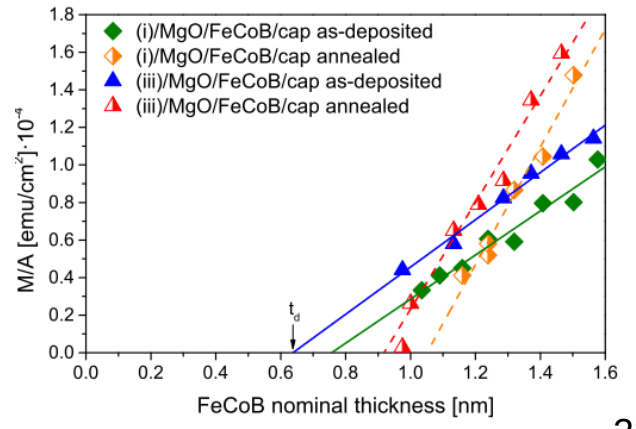
Si/bufor/MgO 1.28/CoFeB 1.5/Ta 5/Ru 5

(a) – Ta 5/Ru 10/Ta 3 oraz (c) – Ta 5/Ru 20/Ta 5



$$\Delta H = 2\alpha\frac{\omega}{\gamma} + \Delta H_0$$

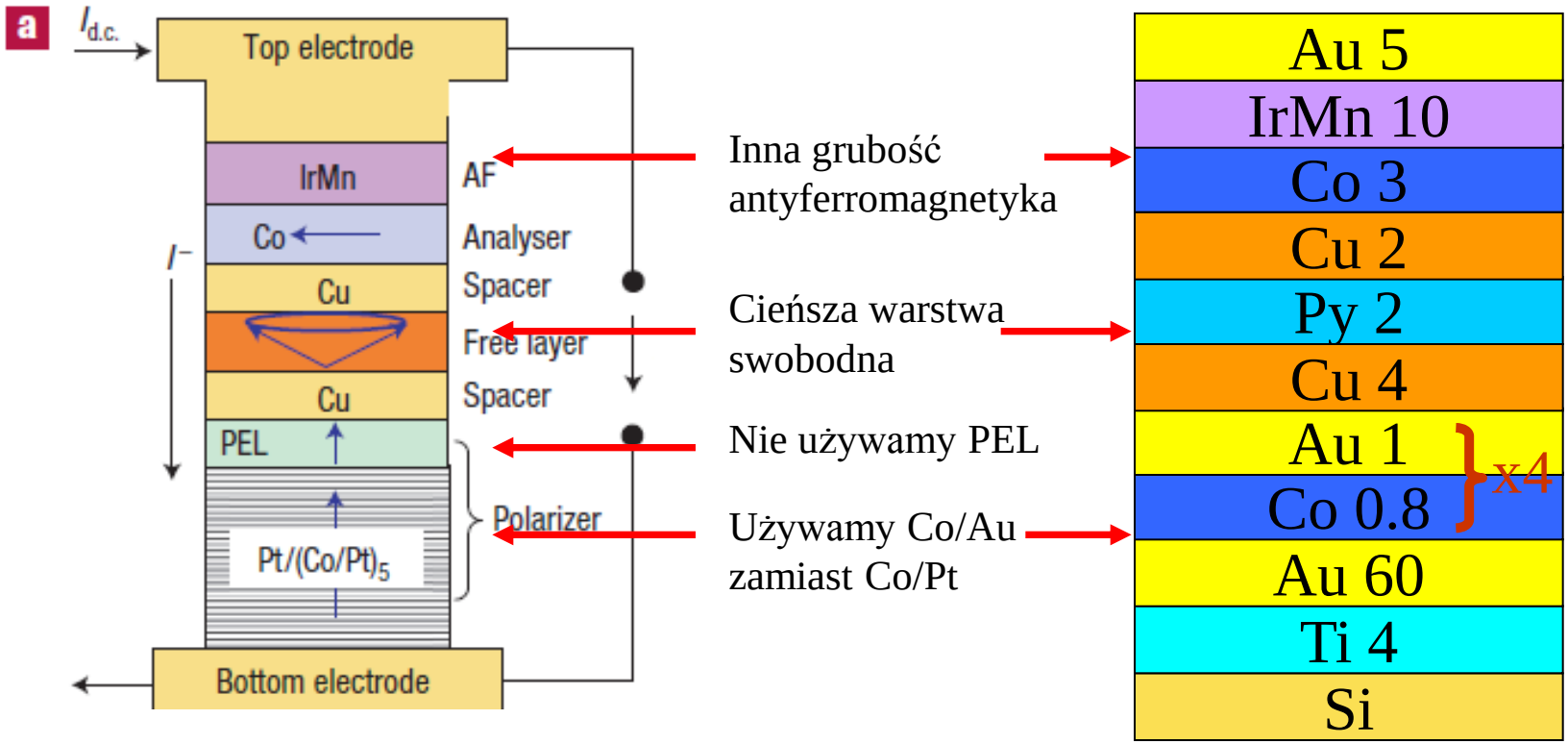




Wpływ buforu na tłumienie w warstwach CoFeB

Marek Frankowski, Antoni Żywczak , Maciej Czapkiewicz , Sławomir Ziętek , Jaroslaw Kanak , Monika Banasik , Wieslaw Powroznik , Witold Skowronski , Jakub Chęciński , Jerzy Wrona , Hubert Głowiński , Janusz Dubowik , Jean-Philippe Ansermet , Tomasz Wlodzimierz Stobiecki et al. JAP 2015

Struktura wielowarstwowa dla STO: podwójny zawór spinowy



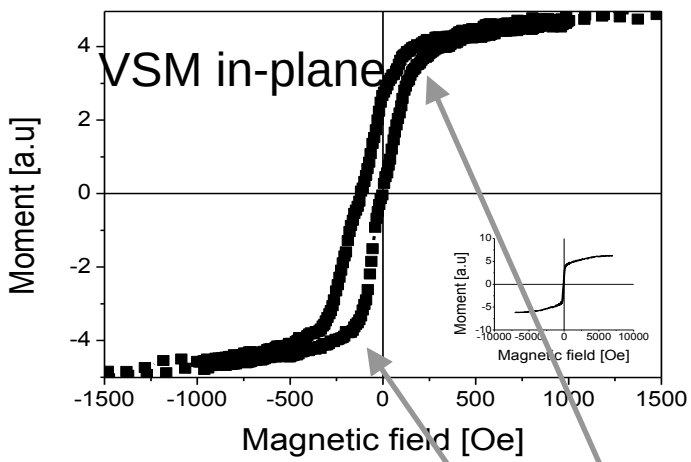
Pol/Cu4/$Fe_{20}Ni_{80}$3/Co0.5/Cu3/Co3/$Ir_{20}Mn_{80}$5, gdzie

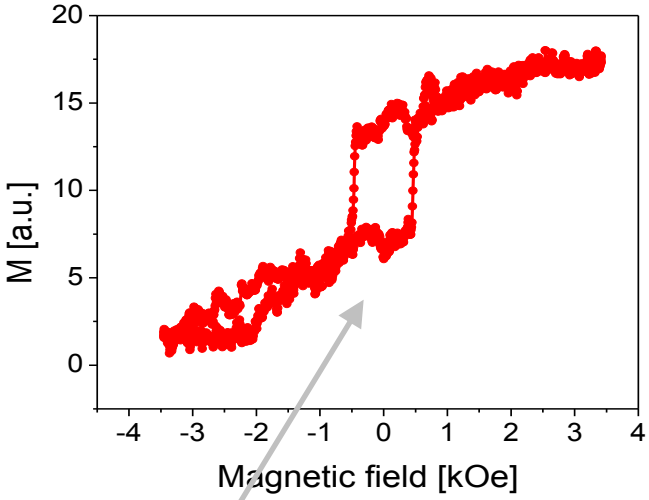
Pol=Pt20/(Co0.55/Pt0.25)5/(Co0.8/Cu0.3/Co0.8)

$$J_c^{AP-P} = \frac{2e}{\hbar}\frac{\alpha\mu_0 M_s t}{\eta(\pi)}(H + H_{dip} + H_k + M_s/2).$$

D. Houssameddine et al., Nat. Mater. 6, 447 (2007)

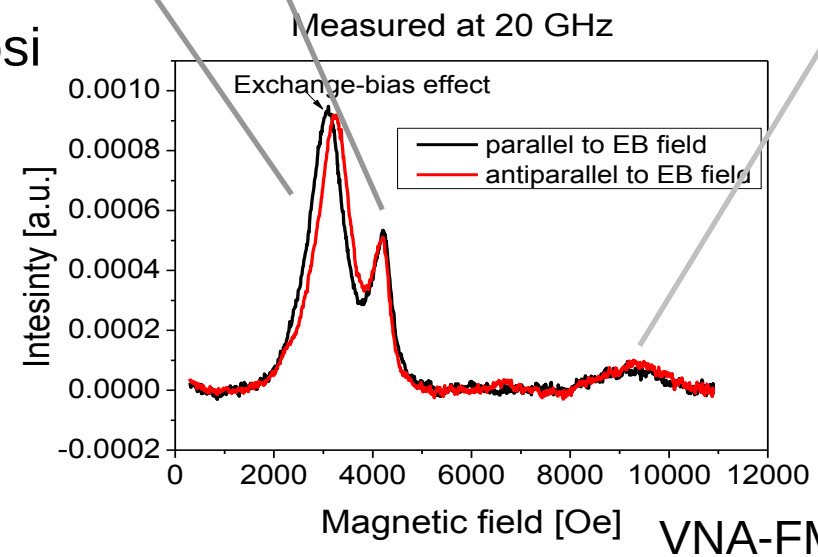
Podwójny zawór spinowy





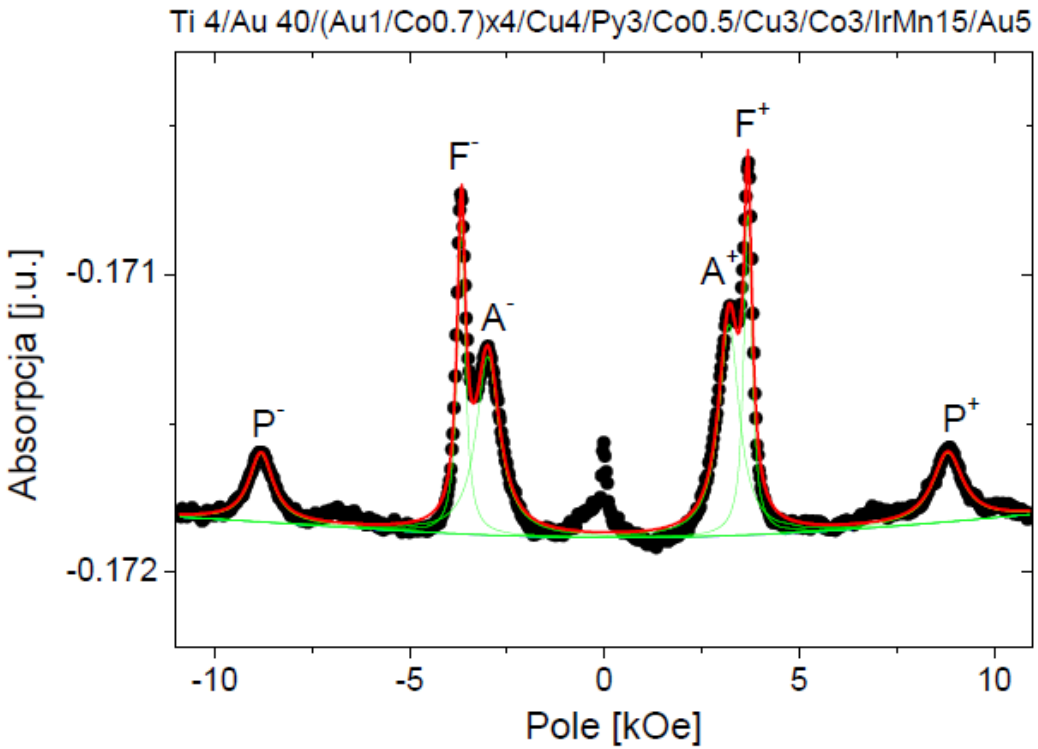
p - MOKE

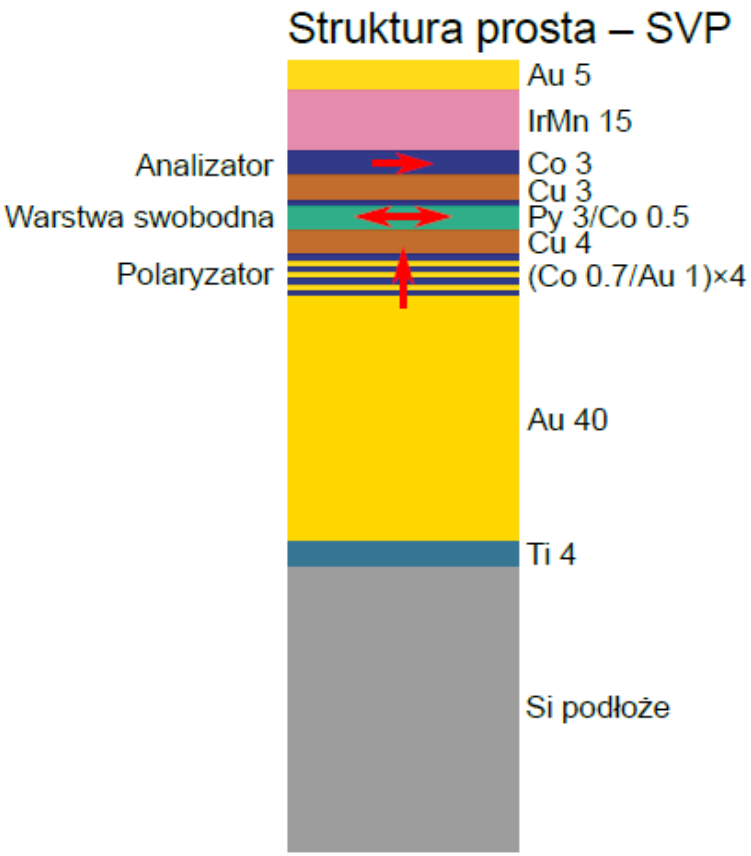
Pole przesunięcia pętli dla warstwy przyszpilonej wynosi 100 Oe



VNA-FMR

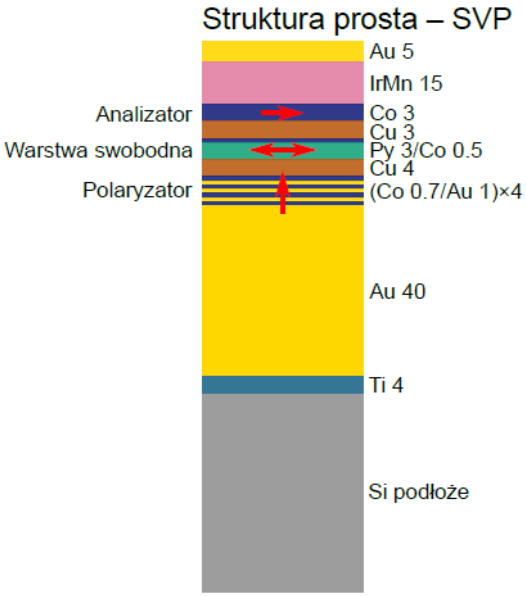
Podwójne zawory spinowe

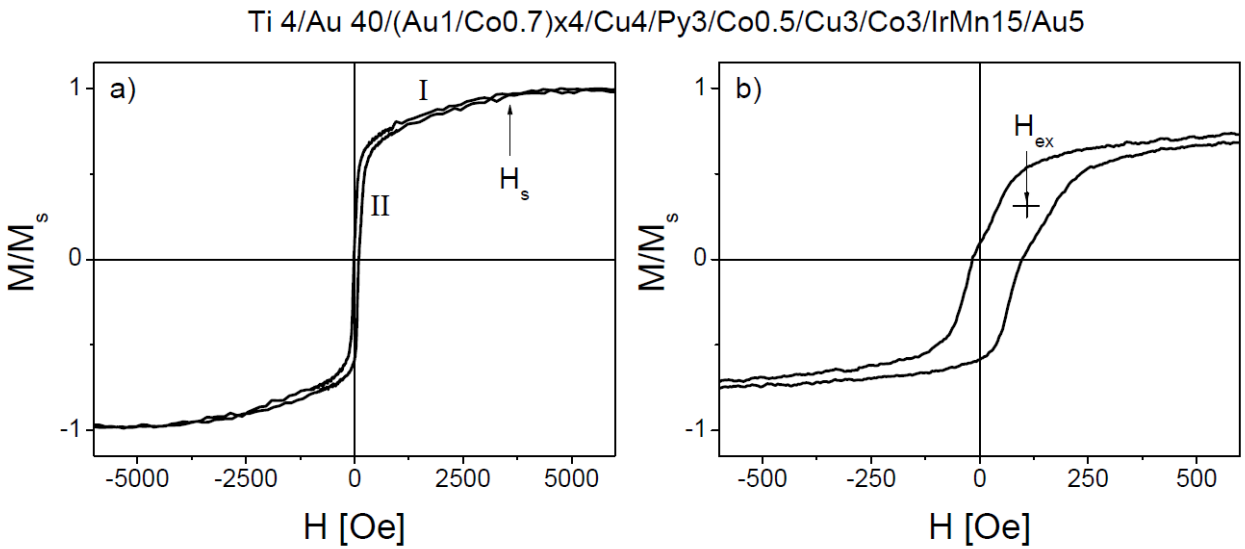




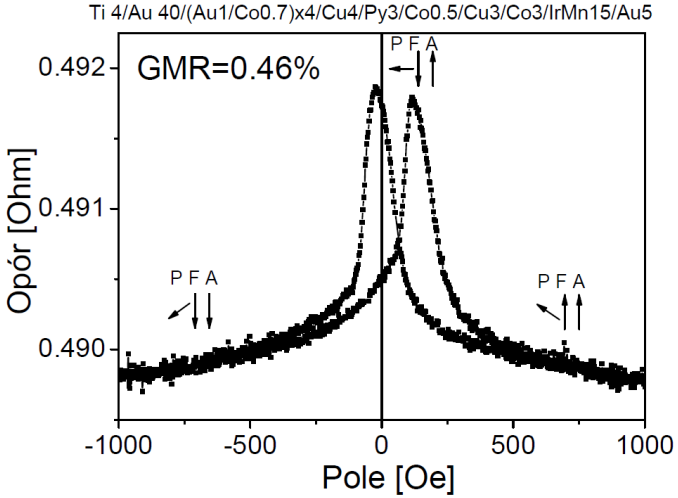
Wynik pomiaru VNA-FMR podwójnego zaworu spinowego

Podwójne zawory spinowe





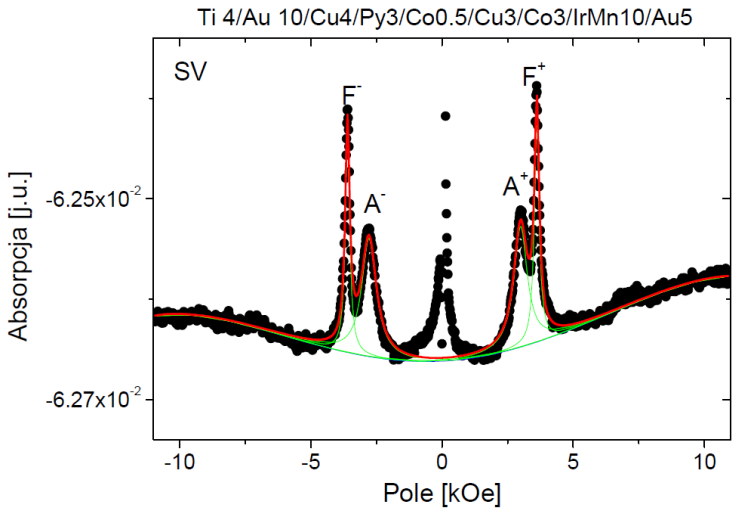
Pętle histerezy

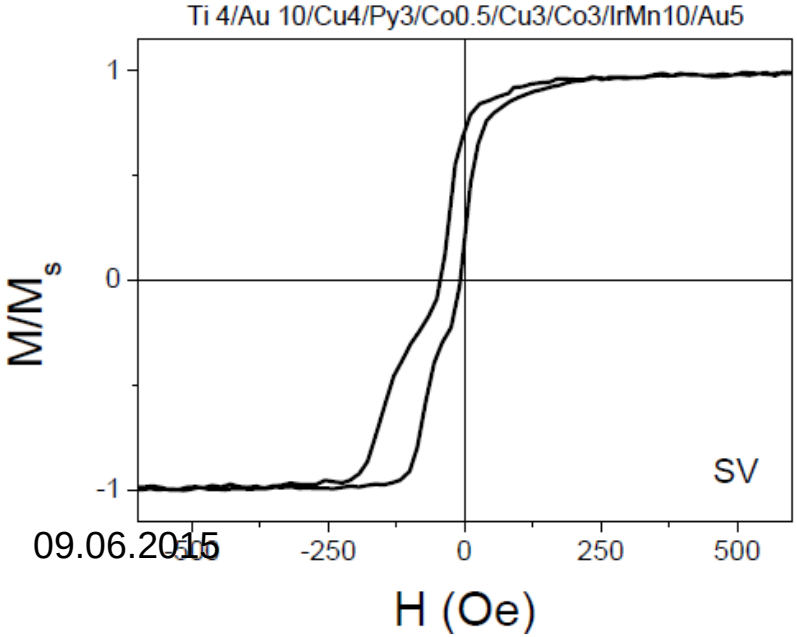


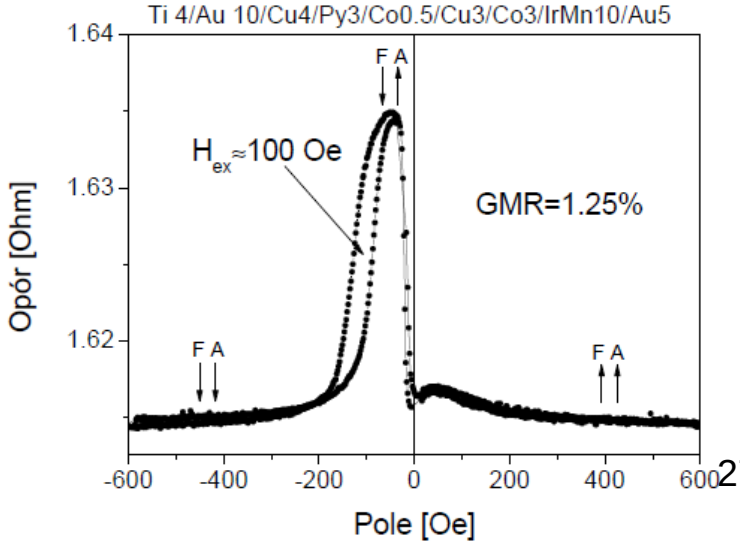
Magnetoopór

Zawór spinowy

- Zawór spinowy bez polaryzatora
- Wąskie pętle histerezy

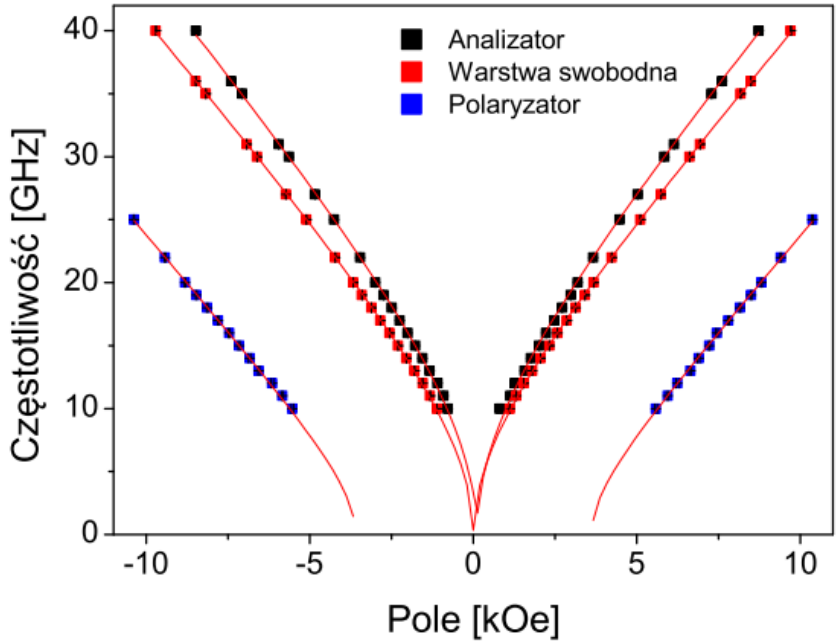


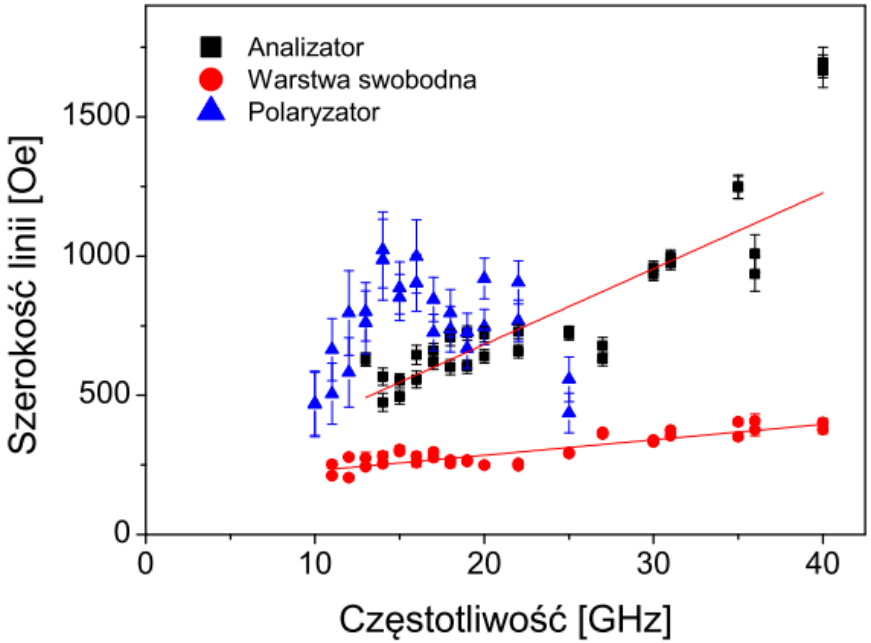




Podwójny zawór spinowy

Ti 4/Au 40/(Au1/Co0.7)x4/Cu4/Py3/Co0.5/Cu3/Co3/IrMn15/Au5



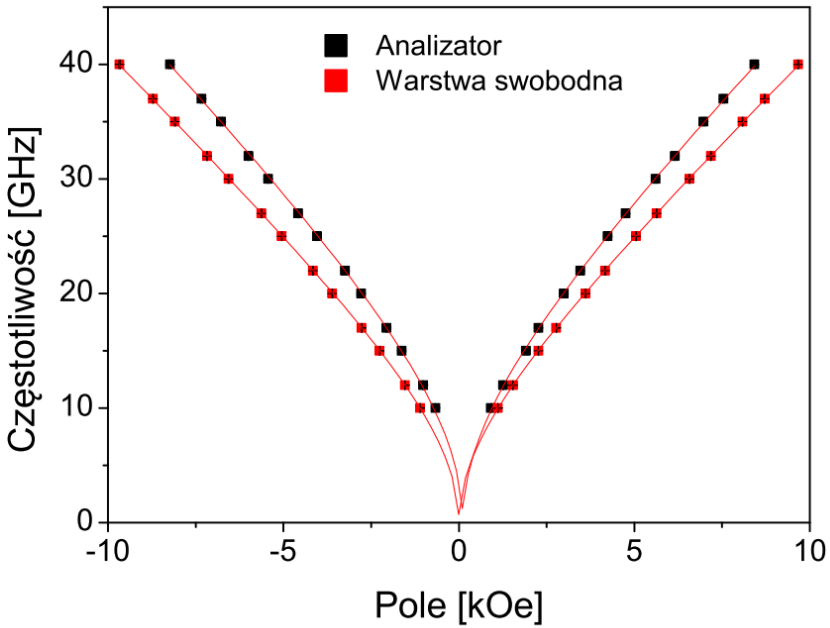


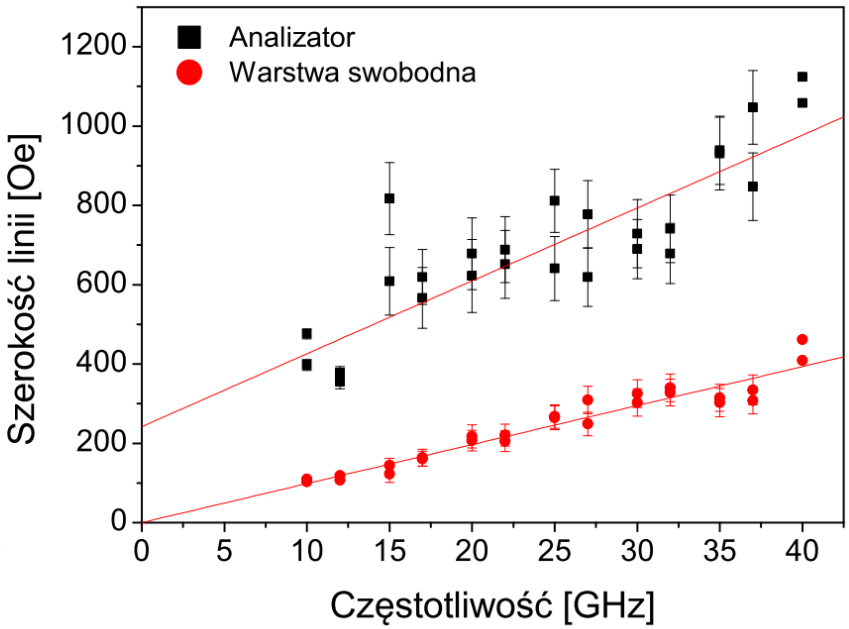
$$f_r = \frac{\gamma}{2\pi}\left[\left(H_u + H_{rot} + |H - H_{ex}|\right)\left(H_u + H_{rot} + |H - H_{ex}| + 4\pi M_{eff}\right)\right]^{1/2}$$

Wyznaczenie parametrów opisujących dynamikę namagnesowania podwójnego zaworu spinowego

Zawór spinowy

Ti 4/Au 10/Cu4/Py3/Co0.5/Cu3/Co3/IrMn10/Au5



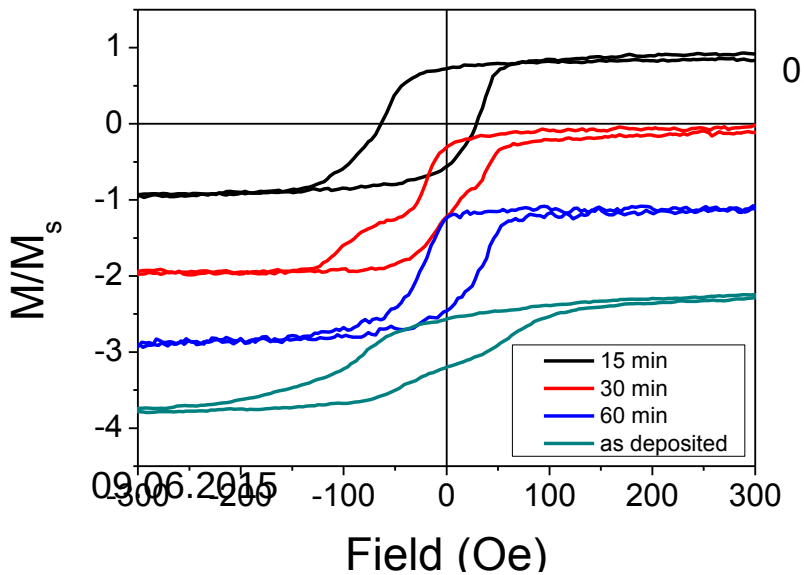


	SVP			SV	
	P	F	A	F	A
g	2.12	2.13	2.2	2.11	2.2
H_{ex} [Oe]	0	0	99	0	111
$4\pi M_{eff}$ [kOe]	-3.62	8.6	10.8	9.16	11.8
α	—	0.008	0.042	0.015	0.028
ΔH_0 [Oe]	—	174	138	0	242

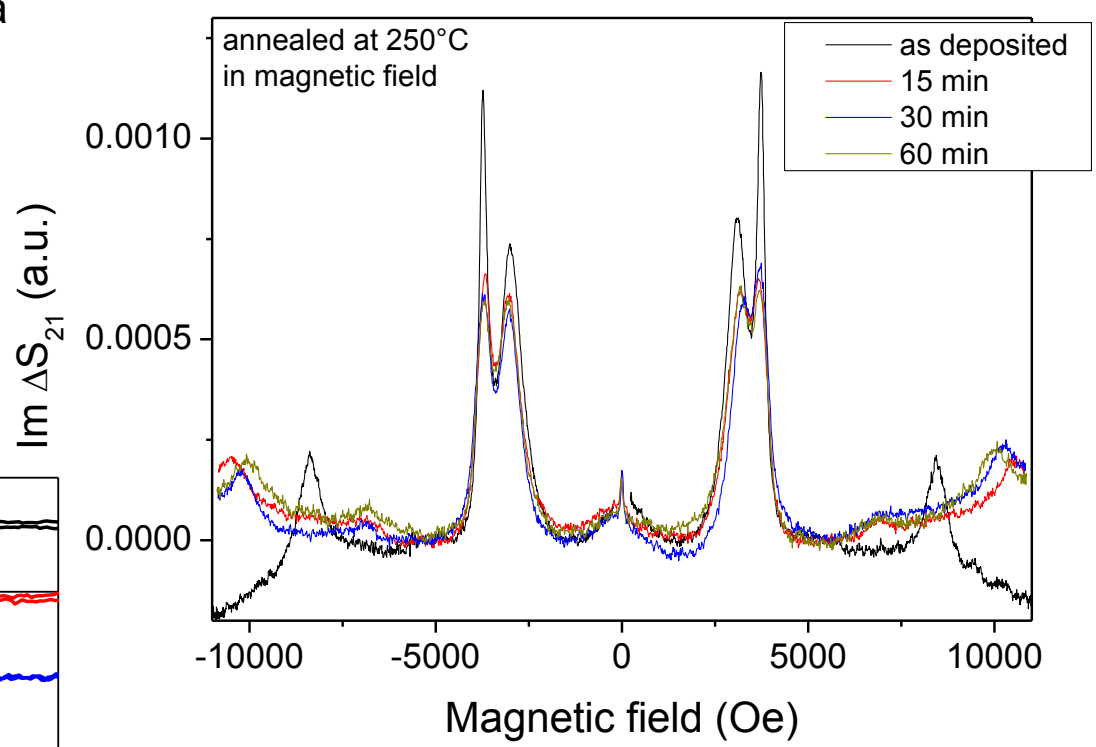
Wygrzewanie w polu magnetycznym

Wygrzewanie i chłodzenie w polu magnetycznym w celu wywołania efektu exchange-bias

- Zwiększenie pola rezonansowego o około 2-3 kOe
- Mały wpływ na exchange-bias



Si(Ti 4/Au 40/(Au1/Co0.7)x4/Cu4/Py3/Cu3/Co3/IrMn15/Au5)

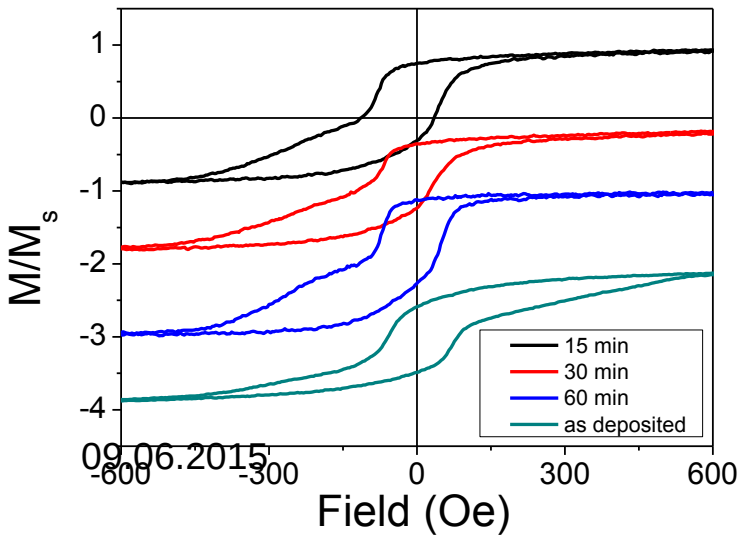


F. J. A. den Broeder, D. Kuiper, A. P. van de Mosselaer, and W. Hoving, Phys. Rev. Lett. 60, 2769–2772 (1988)

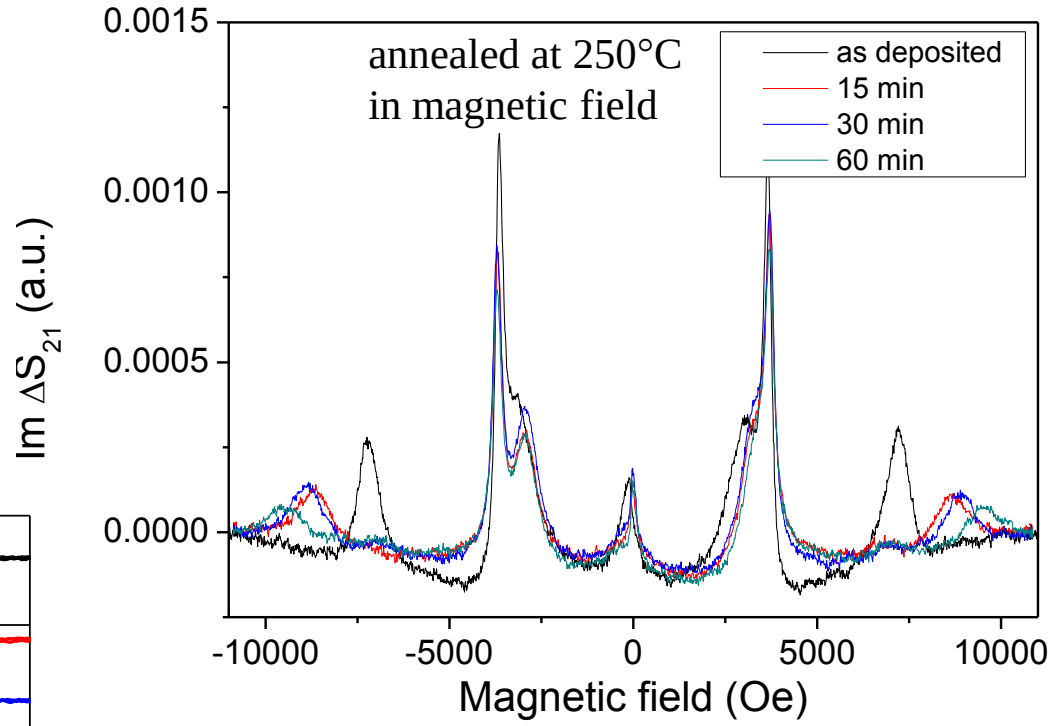
Wygrzewanie w polu magnetycznym

Struktura odwrócona

- Zwiększenie pola rezonansowego o około 2-3 kOe
- Mały wpływ na exchange-bias

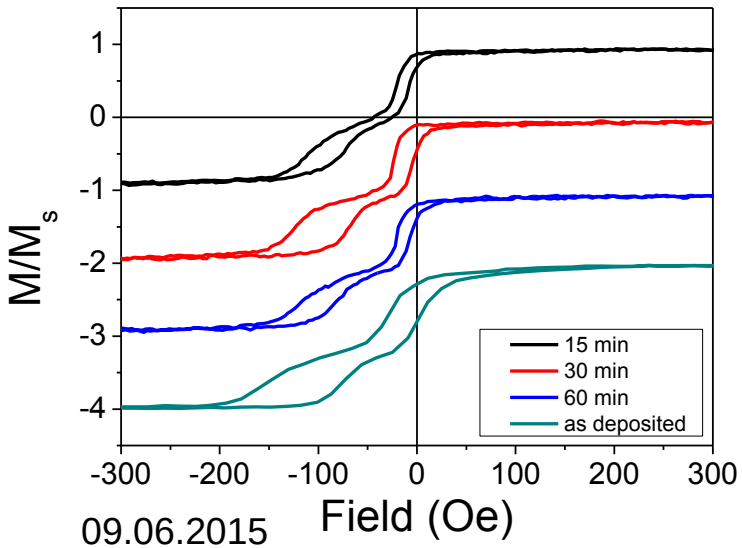


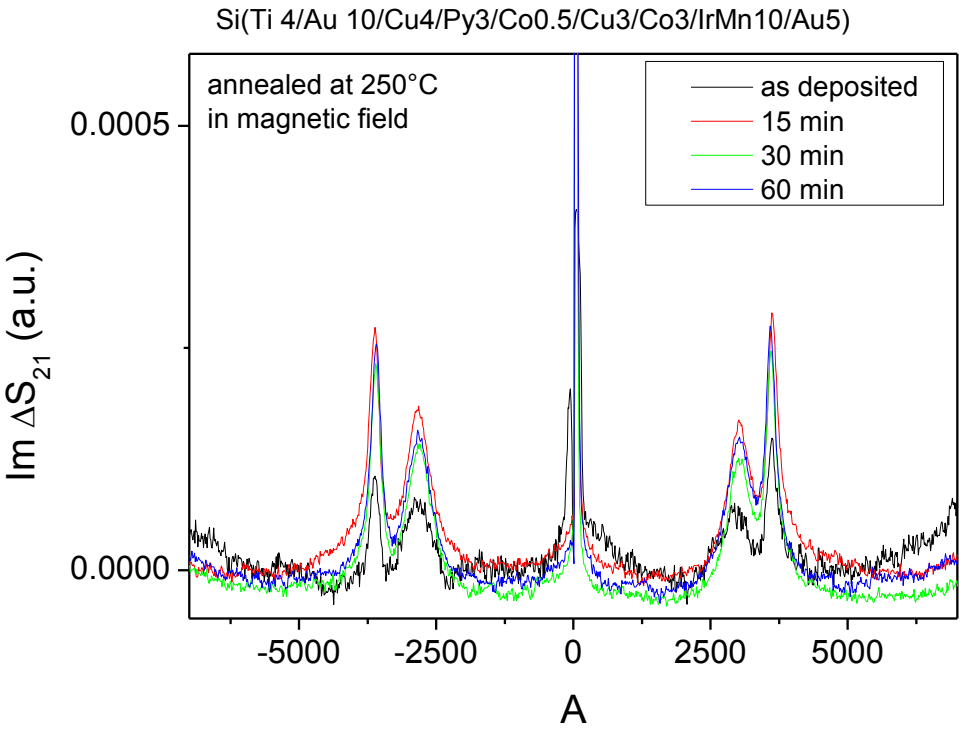
Si(Ti 4/Au 40/IrMn10/Co3/Cu3/Co0.5/Py3/Cu4/(Co0.7/Au1)x4/Au5)



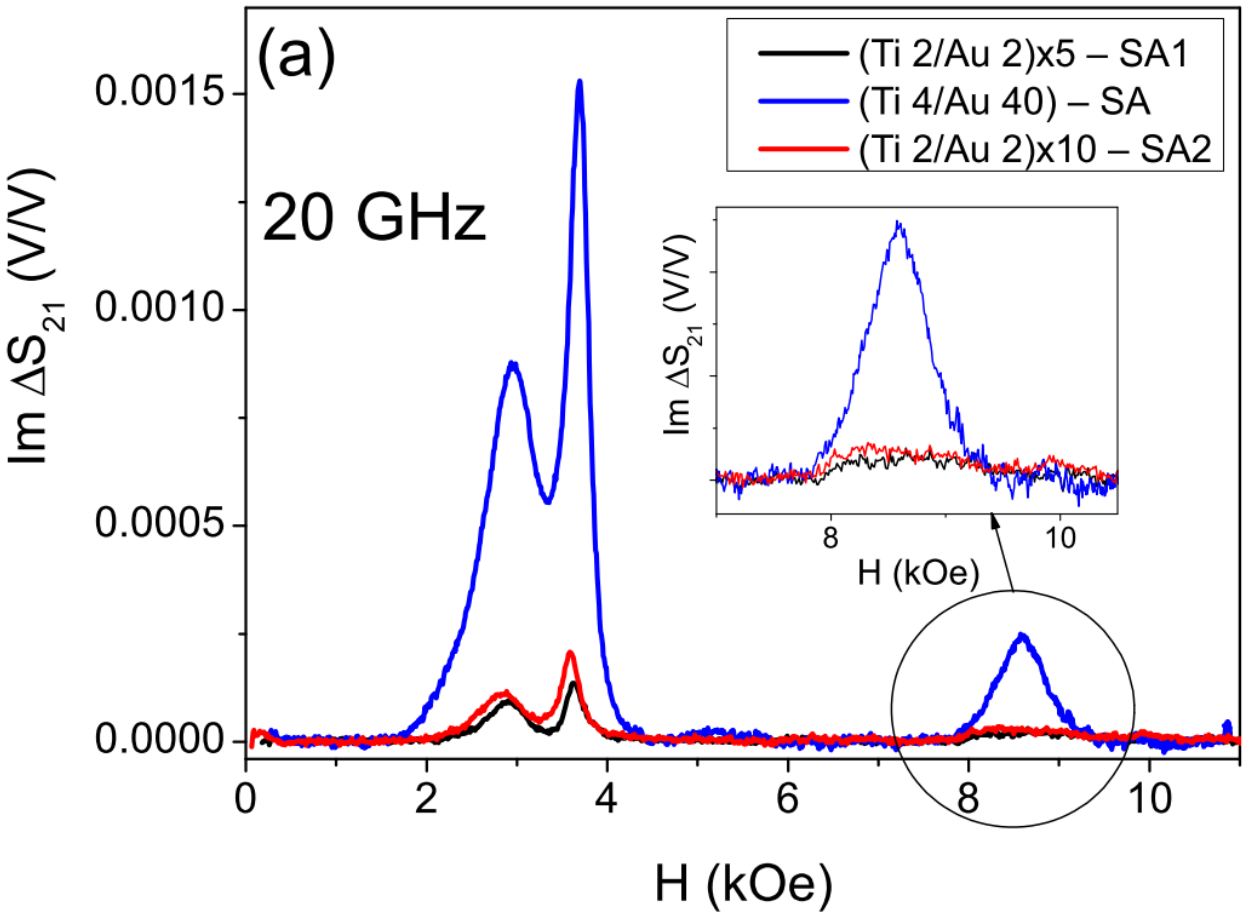
Wygrzewanie w polu magnetycznym

- Struktury bez polaryzatora
- Zwiększenie intesywności
- Brak wpływu na exchange-bias





Wzmocnienie sygnału VNA-FMR

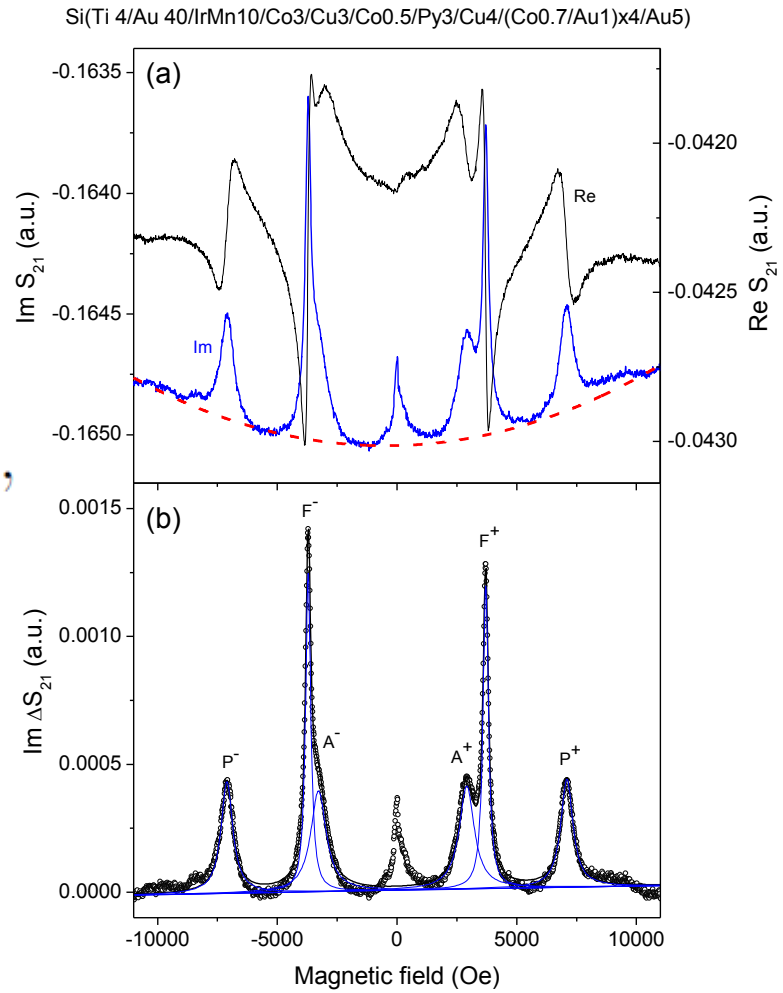


Co determinuje wielkość sygnału?

$$S_{21}(H,t) = S_{21}^{0} + Dt - \frac{\chi(H)}{\tilde{\chi}_0}$$

$$Im[\chi(H)] = \chi'' \approx \chi_0 \, Im\Delta S_{21}(H),$$

$$\mathcal{M}_S \propto \frac{\int \chi'' dH}{\left(\frac{H_{res}+4\pi M_{eff}}{2H_{res}+4\pi M_{eff}}\right)} = \frac{I}{\left(\frac{H_{res}+4\pi M_{eff}}{2H_{res}+4\pi M_{eff}}\right)}$$

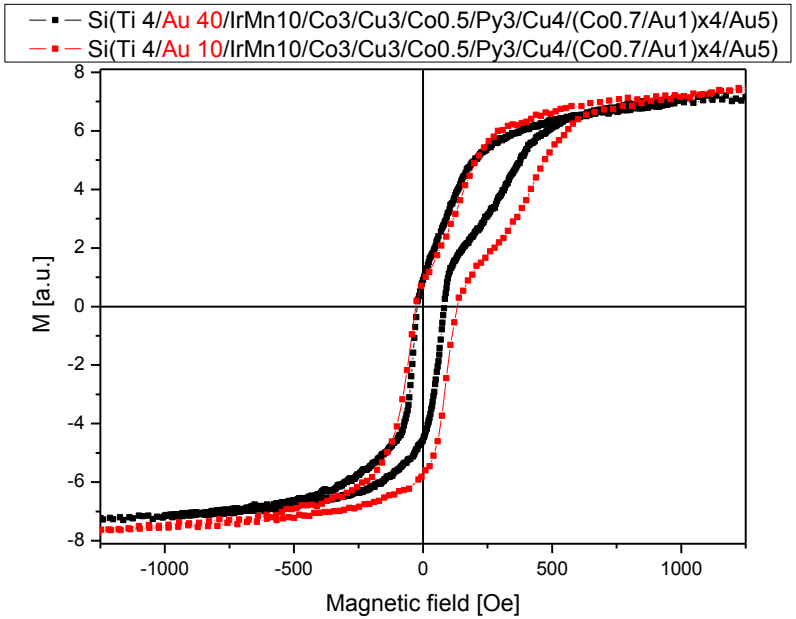


B. Heinrich · J.A.C. Bland (Eds.), Ultrathin Magnetic Structures II (1994)

H. T. NEMBACH *et al.* PHYSICAL REVIEW B **84**, 054424 (2011)

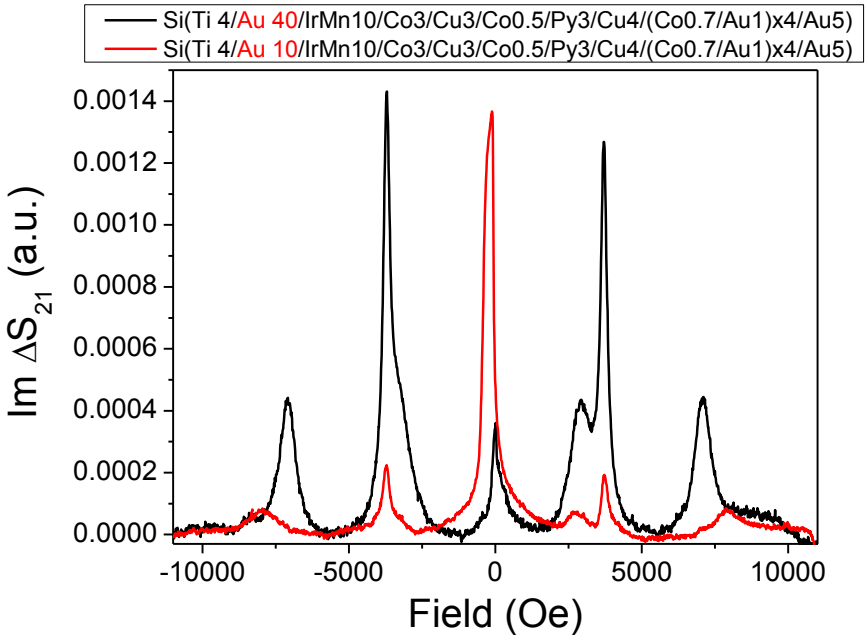
Wzmocnienie sygnału VNA-FMR

VSM – pomiar statyczny



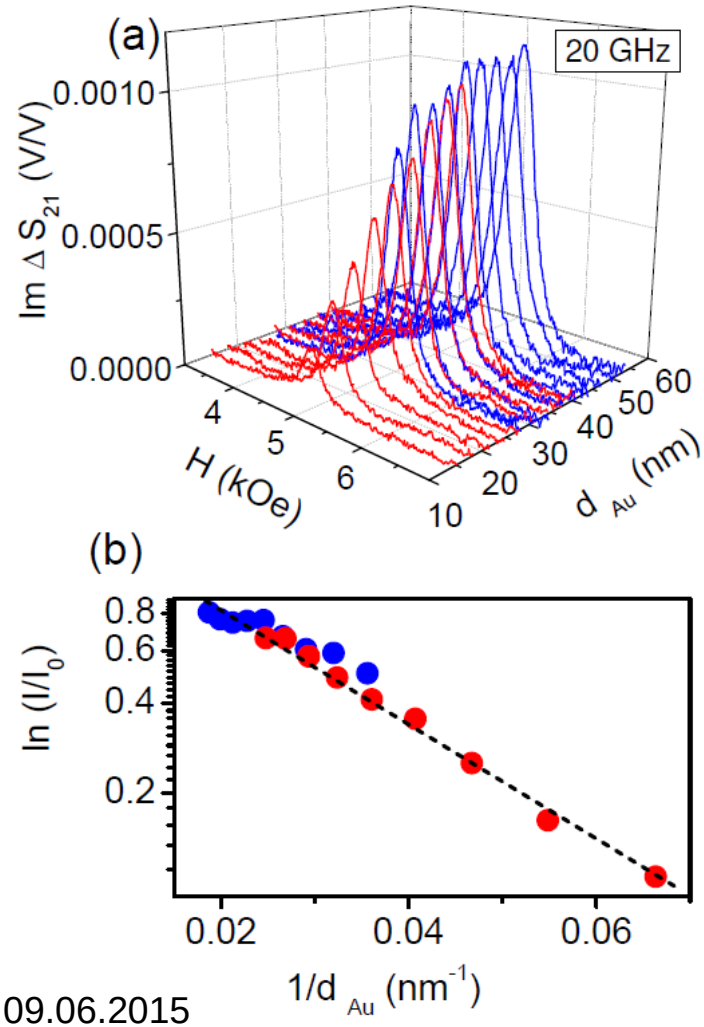
Pętle histerezy obu struktur są bardzo podobne

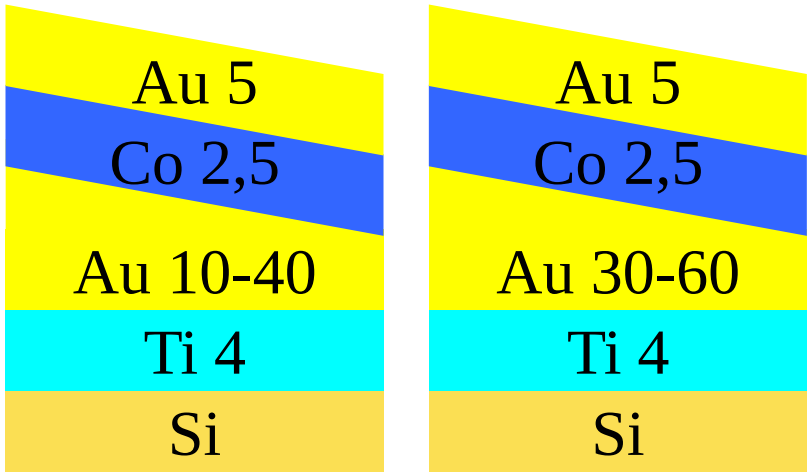
VNA-FMR – pomiar dynamiczny



Natomiast intensywności sygnału VNA-FMR są zupełnie różne

Wzmocnienie sygnału VNA-FMR

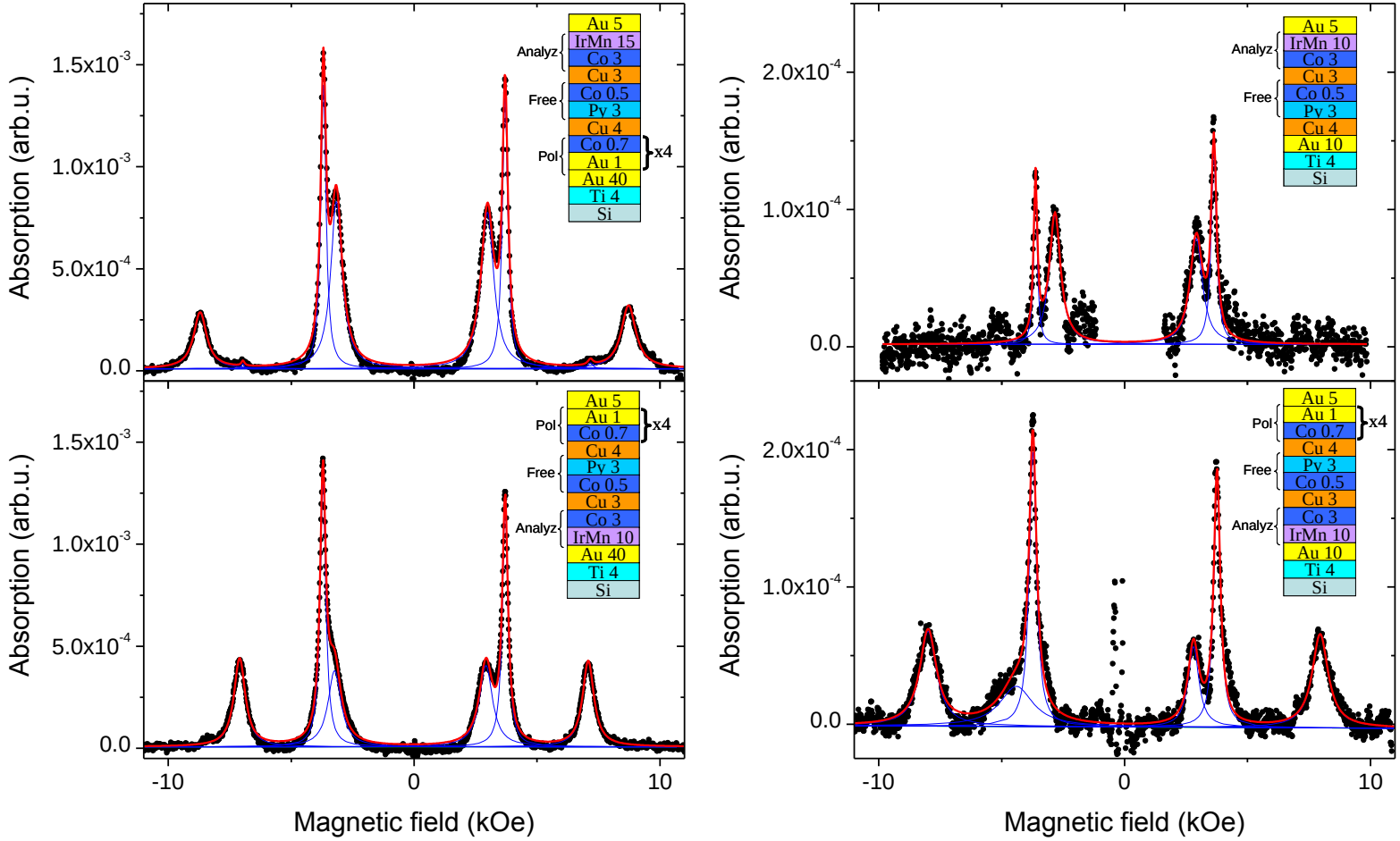




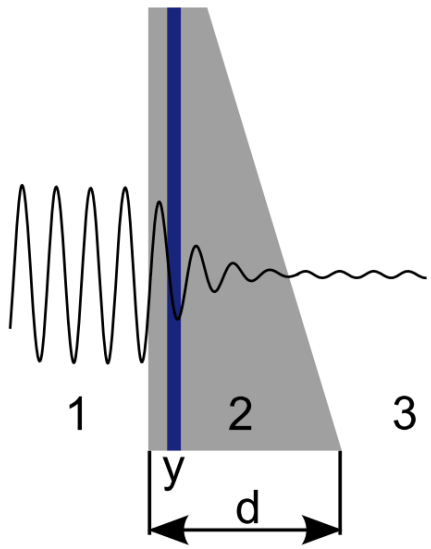
$$I = I_0 \exp\left(-\frac{d_0}{d_{Au}}\right) = I_0 \exp\left(-\frac{R_\square}{R_\square^0}\right)$$

Zależność intensywności sygnału od przewodzącej warstwy buforowej

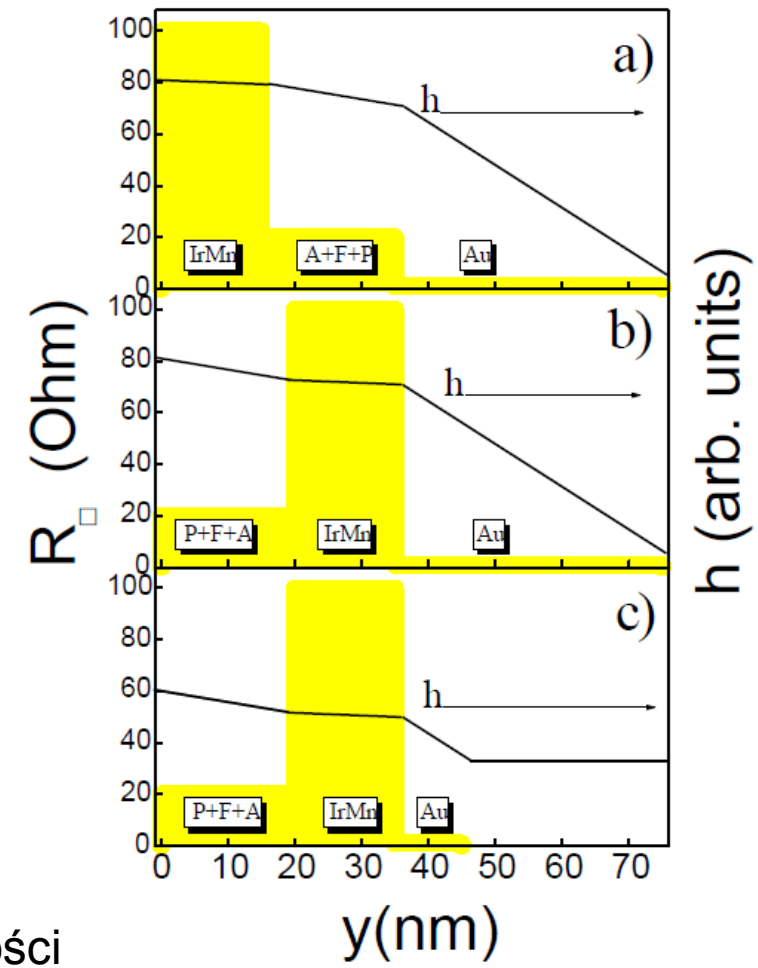
Wzmocnienie sygnału VNA-FMR



Wzmocnienie sygnału VNA-FMR



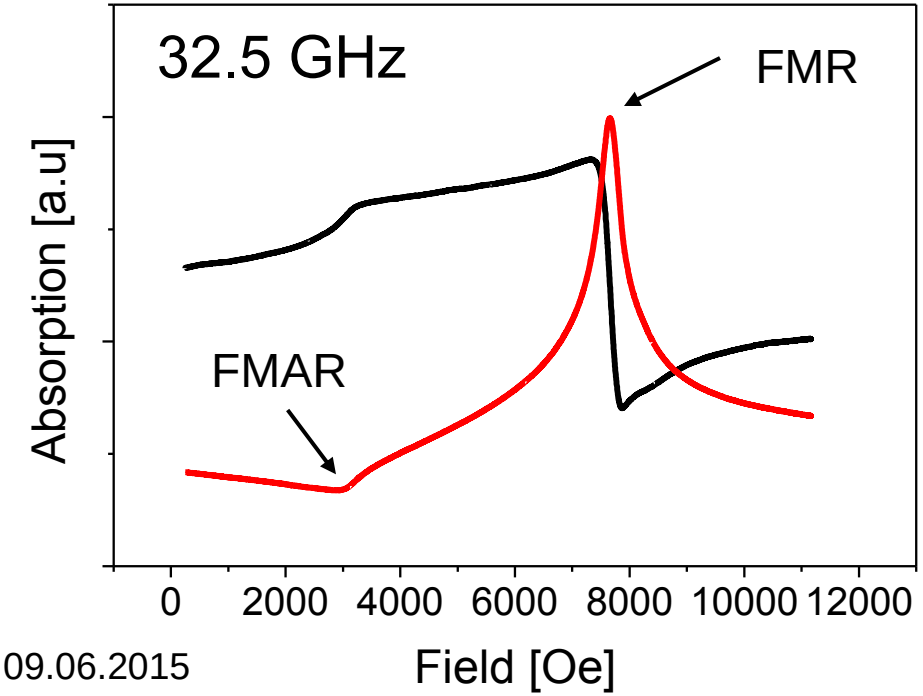
Próbka	m_P :	m_F :	m_A
SA,SB,SD	1	0.8	1.07
	I_P :	I_F :	I_A
SA - struktura prosta	1	0.84	0.97
SB - struktura inwersyjna	1	0.86	0.58
SD - struktura inwersyjna	1	0.64	0.40



Wyjaśnienie różnic w stosunkach intensywności w zależności od kolejności podukładów

Antyrezonans

- Taśma amorficzna NiFeMo
- Konfiguracja in-plane



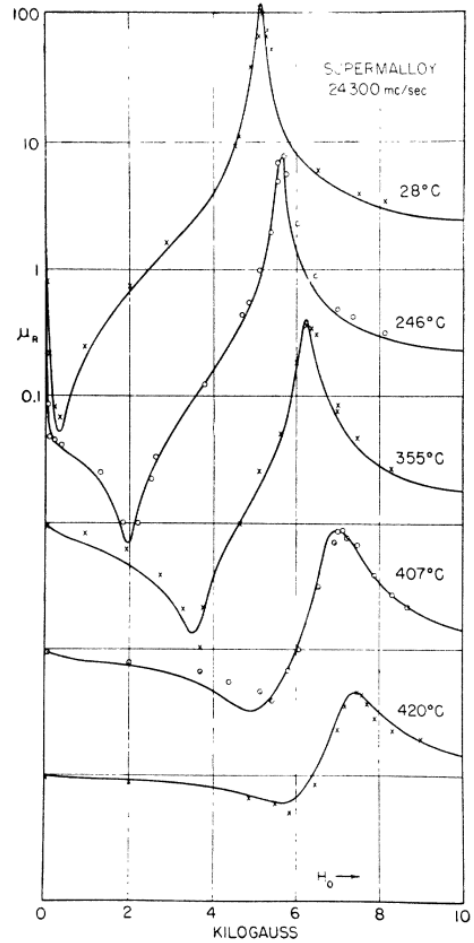
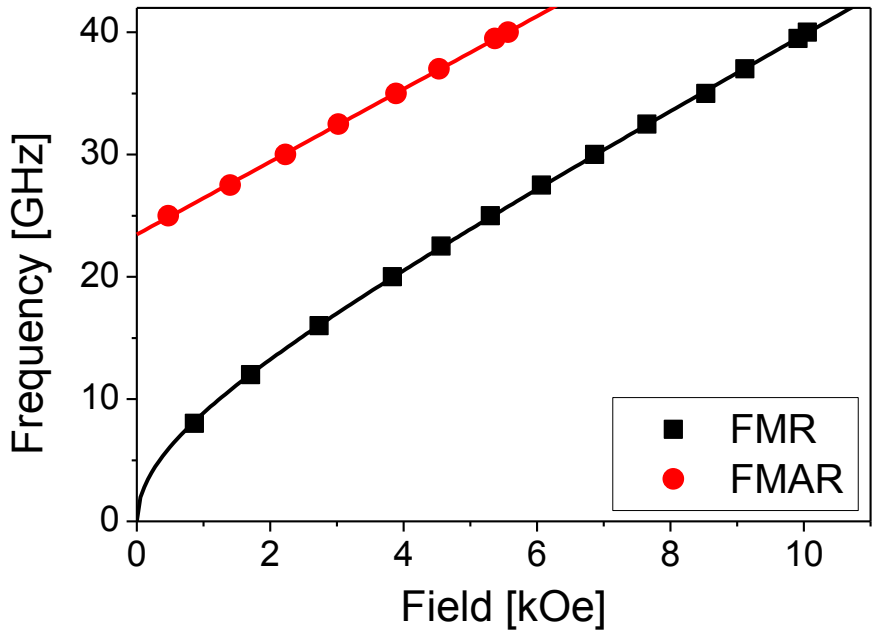


FIG. 5. The effective permeability of supermalloy at 24300 mc/sec. for various temperatures. Each curve is lowered by one decade with respect to the one above it. The numbers along the ordinate axis apply to the top curve. The drawn lines have been calculated theoretically.

N. Bloembergen, Phys. Rev. 78, 572–580 (1950)

Antyrezonans



$$\delta = \frac{c}{\sqrt{2\pi\sigma\omega\mu(\omega)}}$$

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = H_{FMR}\left(H_{FMR} + 4\pi M_s\right)$$

$$\frac{\omega}{\gamma} = H_{FMAR} + 4\pi M_s$$

	Estimate	Standard Error
g	2,126	0,003
M [emu/cm^3]	627	2

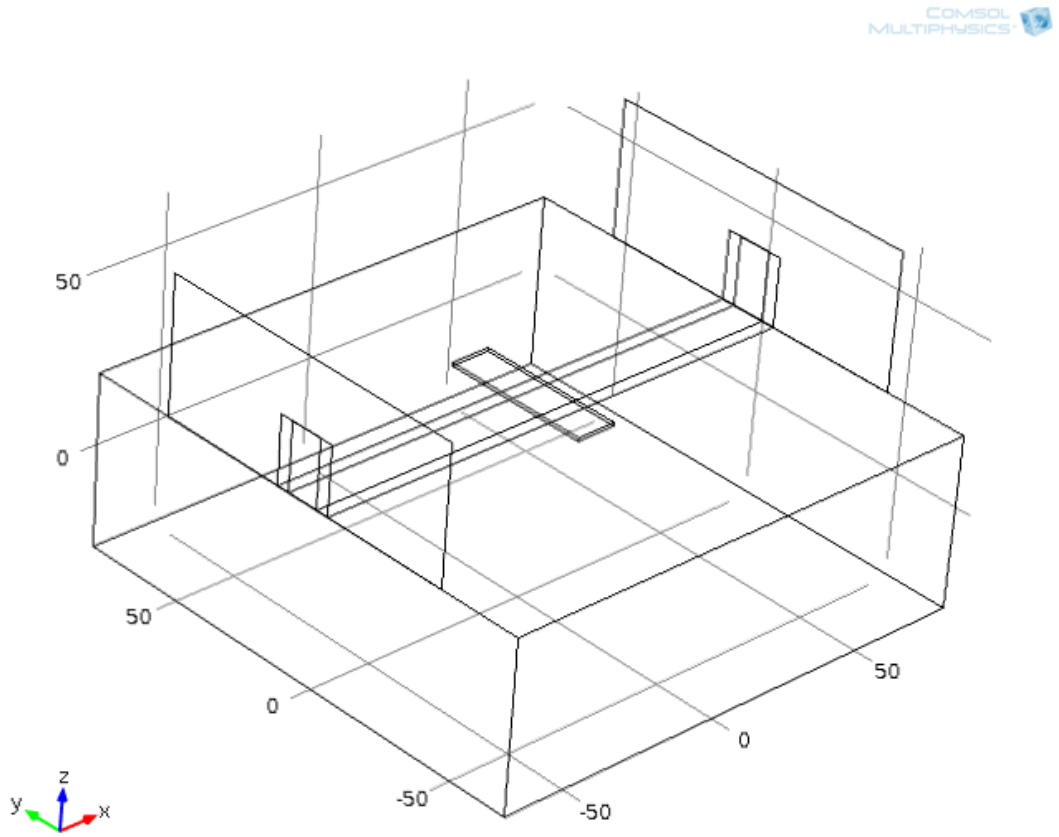
Taśma amorficzna NiFeMo

Podsumowanie

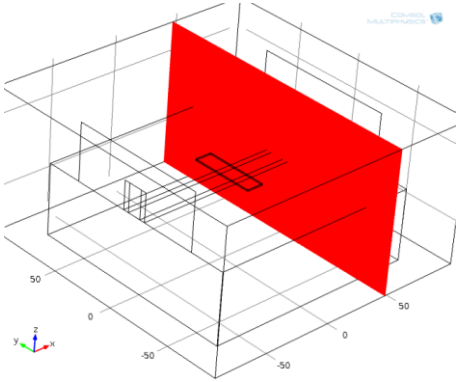
- VNA-FMR ze standardowym falowodem koplanarnym można wykorzystać do pomiarów zarówno grubych warstw (taśmy amorficzne o grubości rzędu mikrometrów), jak i ultracienkich warstw o grubości w zakresie pojedynczych nanometrów.
- W taśmie amorficznej występuje, oprócz rezonansu ferromagnetycznego, antyrezonans ferromagnetyczny.
- W cienkich warstwach obserwowane są zjawiska związane z powierzchnia, takie jak anizotropia powierzchniowa lub anizotropia jednozwrotowa związana z efektem „exchange-bias”.
- Warstwy metaliczne w sąsiedztwie warstw ferromagnetycznych wpływają na ich dynamikę namagnesowania

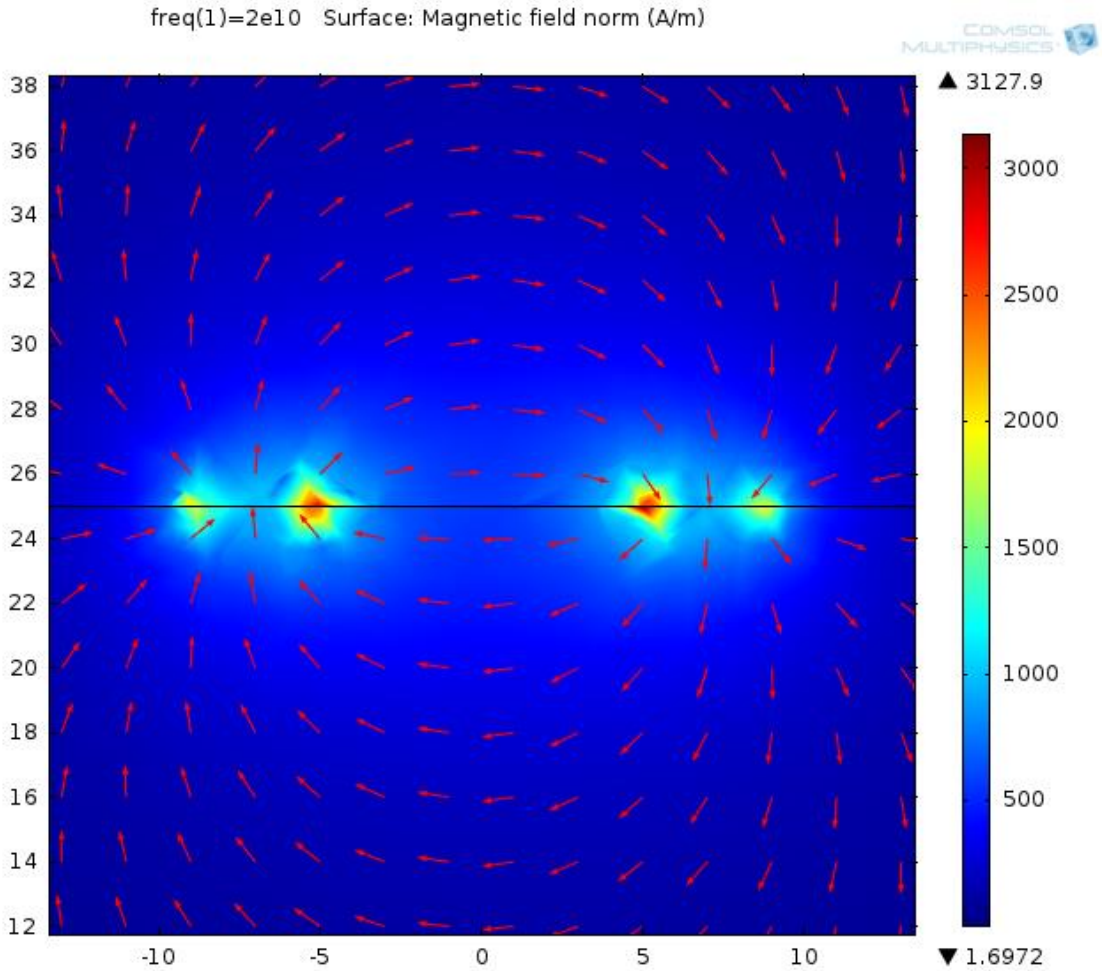
Dziękuję za uwagę!

Wzmocnienie sygnału VNA-FMR



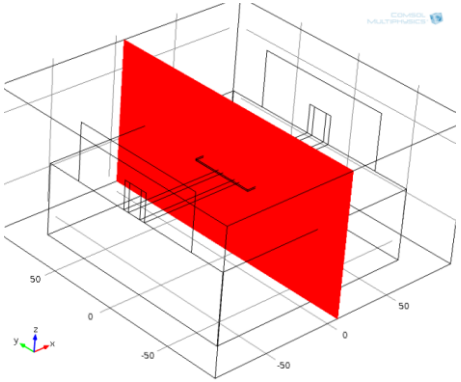
Wzmocnienie sygnału VNA-FMR

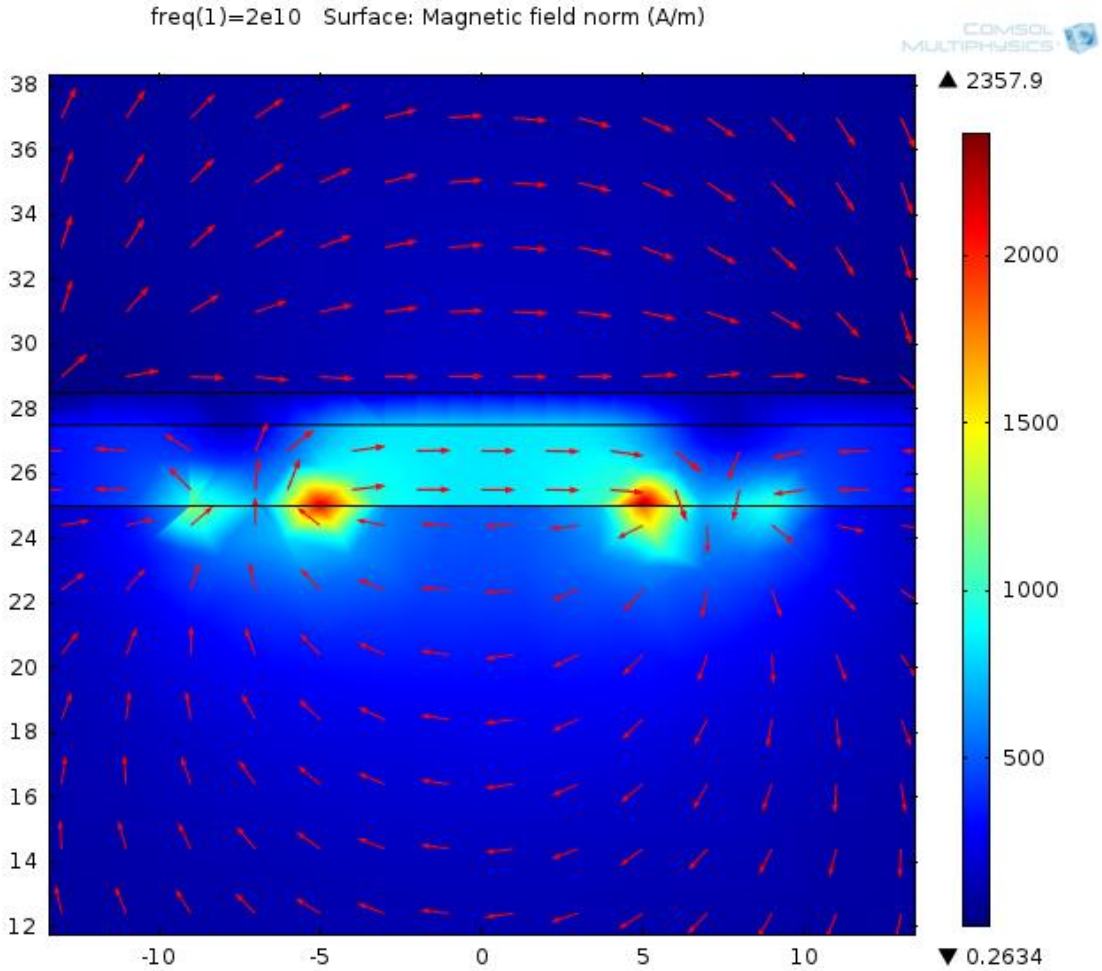




- Ekranowanie pola elektromagnetycznego

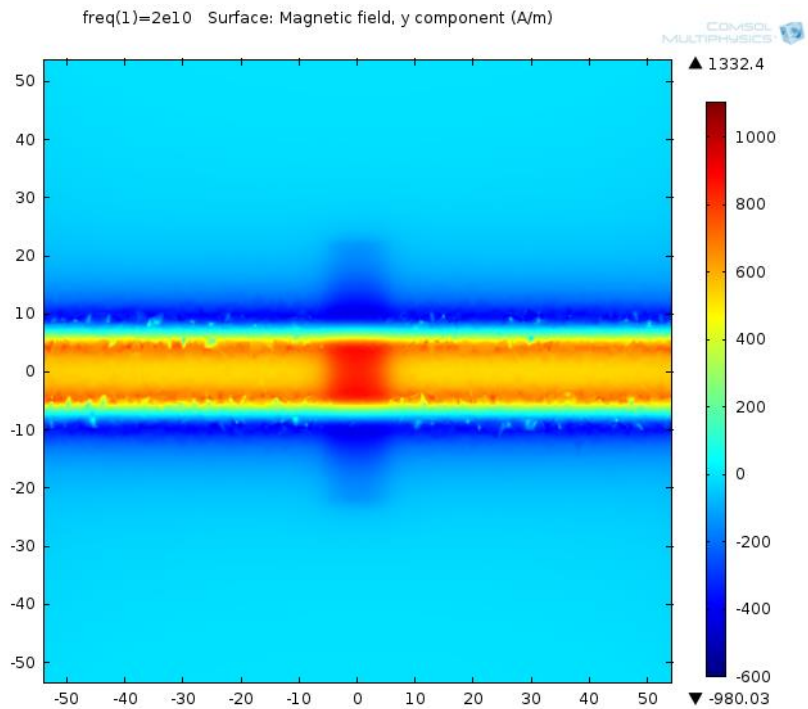
Wzmocnienie sygnału VNA-FMR

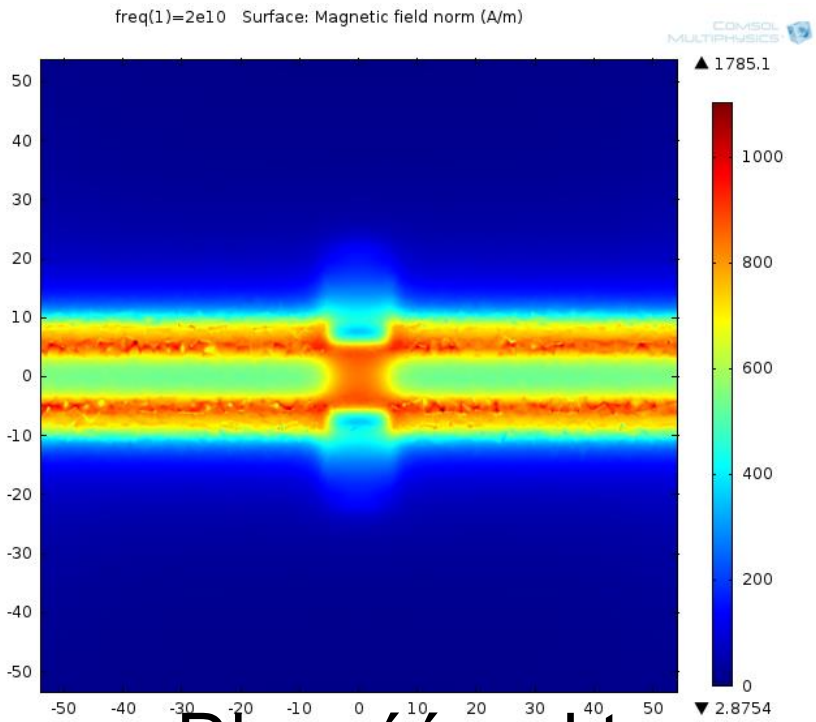




- Ekranowanie pola elektromagnetycznego

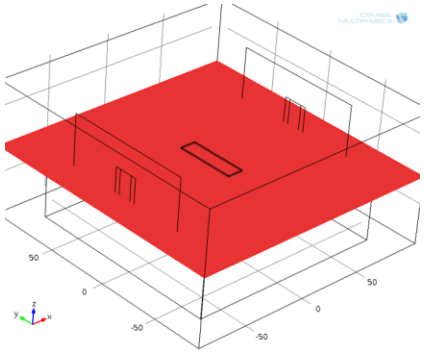
Wzmocnienie sygnału VNA-FMR





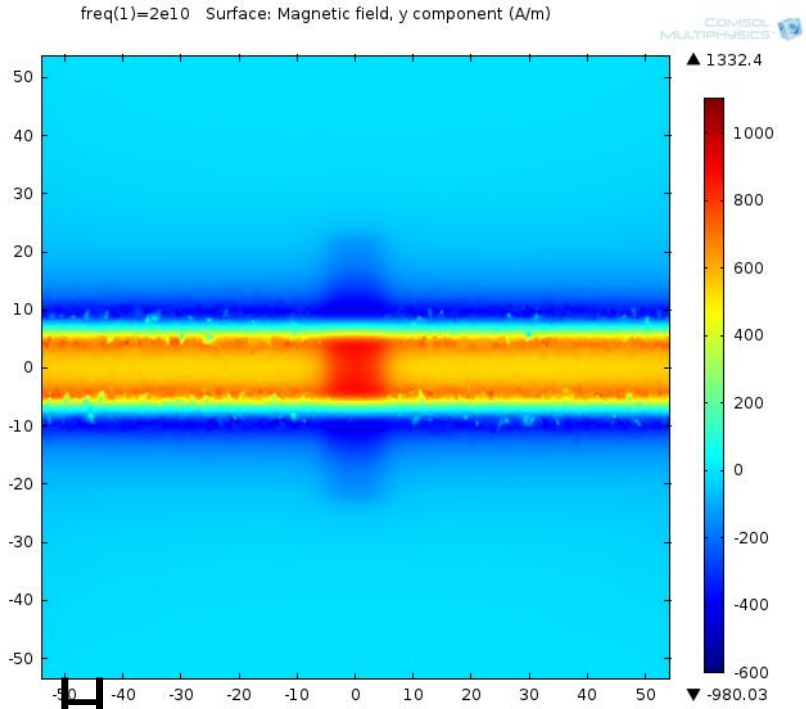
H_y

Długość wektora pola magnetycznego

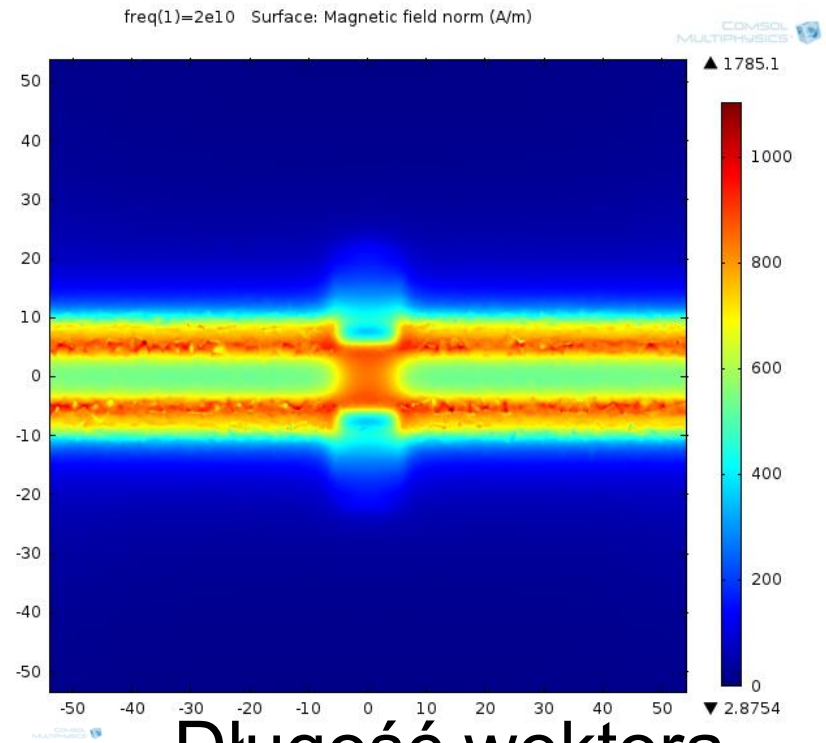


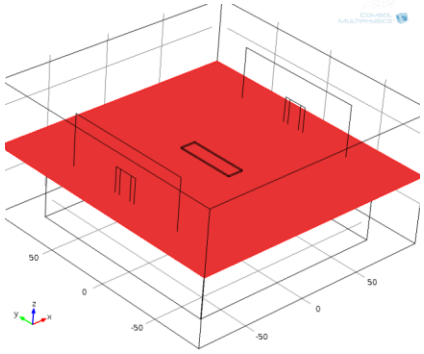
- Ekranowanie pola elektromagnetycznego

Wzmocnienie sygnału VNA-FMR

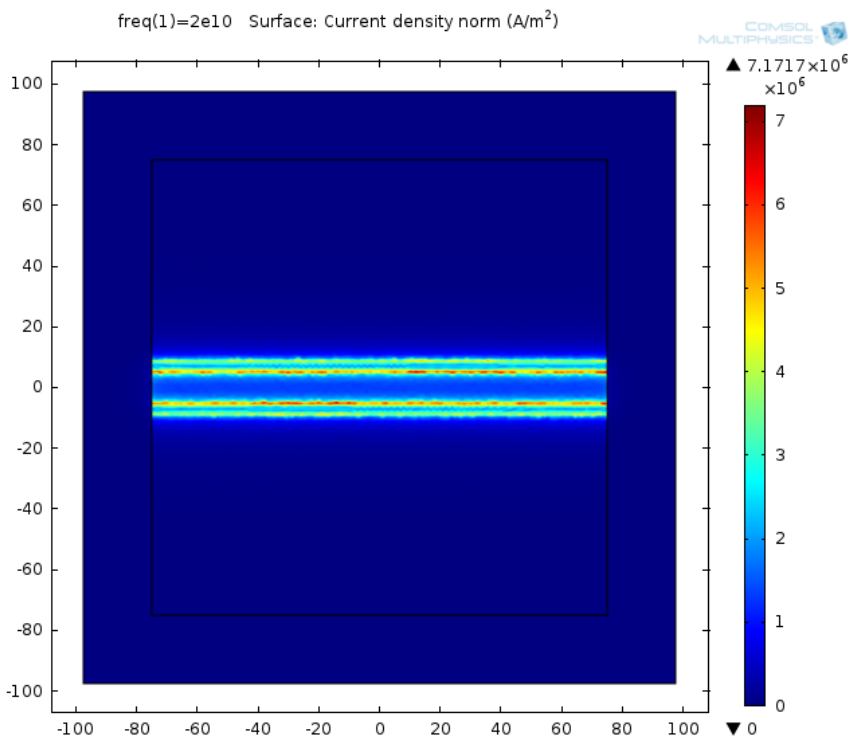
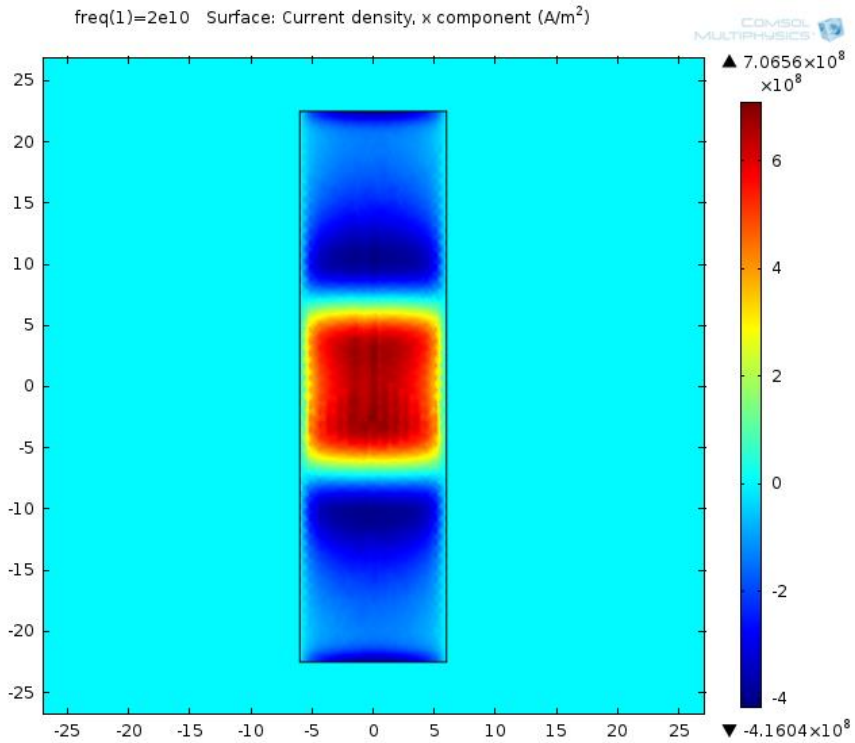


H_y





Długość wektora pola magnetycznego

- Ekranowanie pola elektromagnetycznego

Wzmocnienie sygnału VNA-FMR