

# Układy cienkowarstwowe o prostopadłej anizotropii magnetycznej sterowalnej polem elektrycznym

A. Koziół-Rachwał

*Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH  
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)*

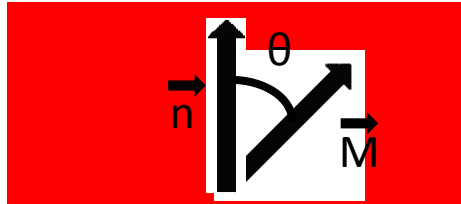
seminarium WFilS AGH  
28.04.2017

# Plan seminarium

- prostopadła anizotropia magnetyczna (PMA) w układach cienkowarstwowych
- efekt wpływu pola elektrycznego na PMA (VCMA)
- PMA oraz VCMA w układzie MgO/Fe/Cr
- jak zwiększyć PMA oraz VCMA w układzie MgO/Fe/Cr poprzez inżynierię interfejsową?

# Prostopadła anizotropia magnetyczna (PMA)

- $E = -K_{eff} \cos^2 \vartheta$

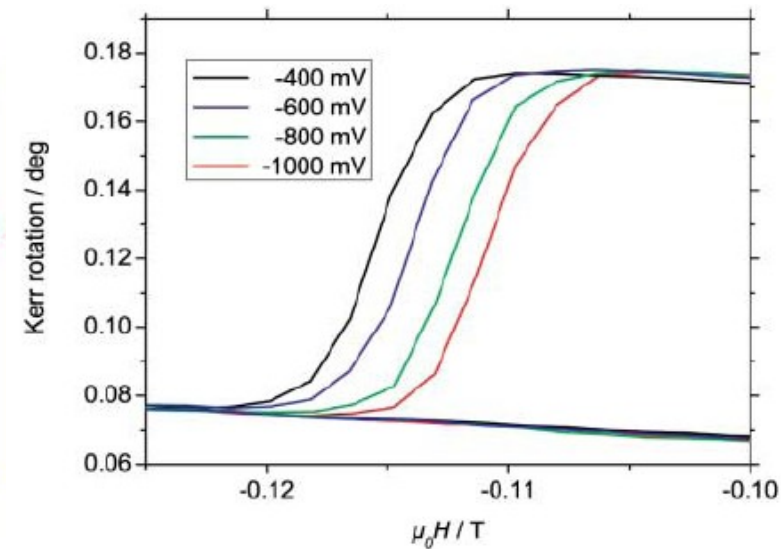
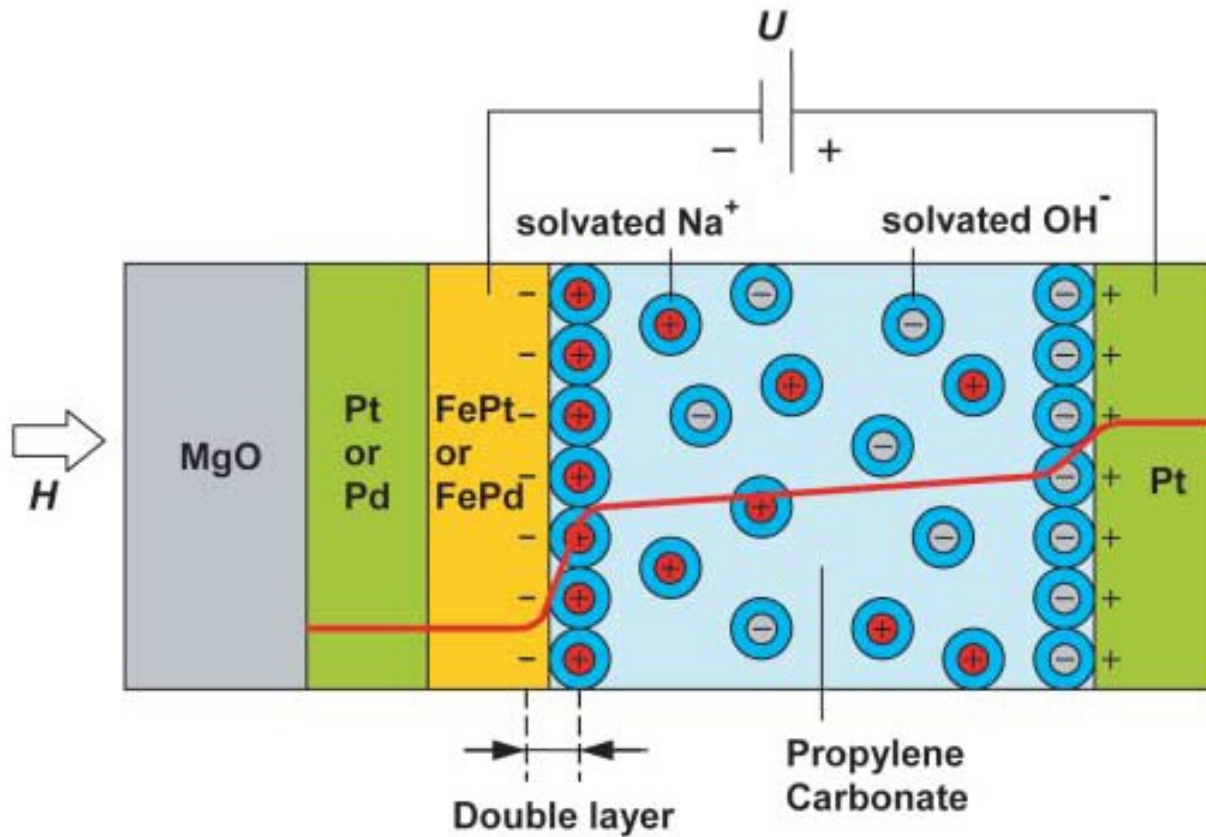


- $E = - (K_v + K_s / t) \cos^2 \vartheta$

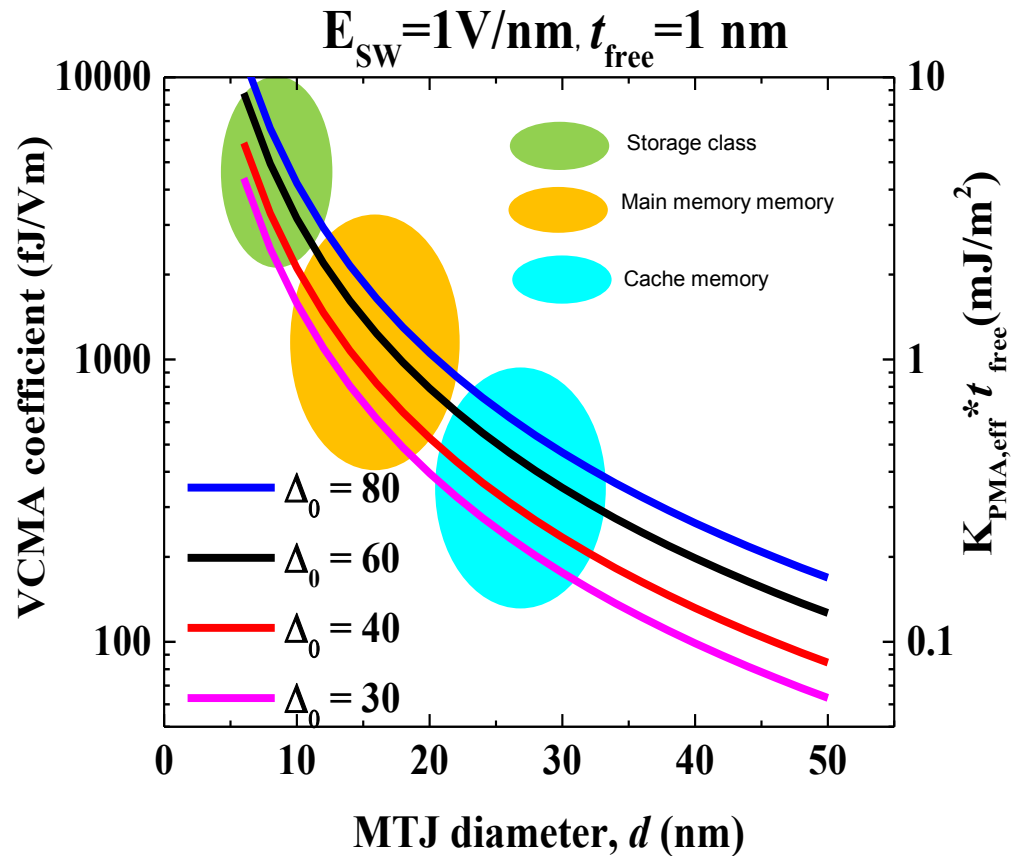
- $K_s \sim 0.5 \text{ mJ/m}^2$



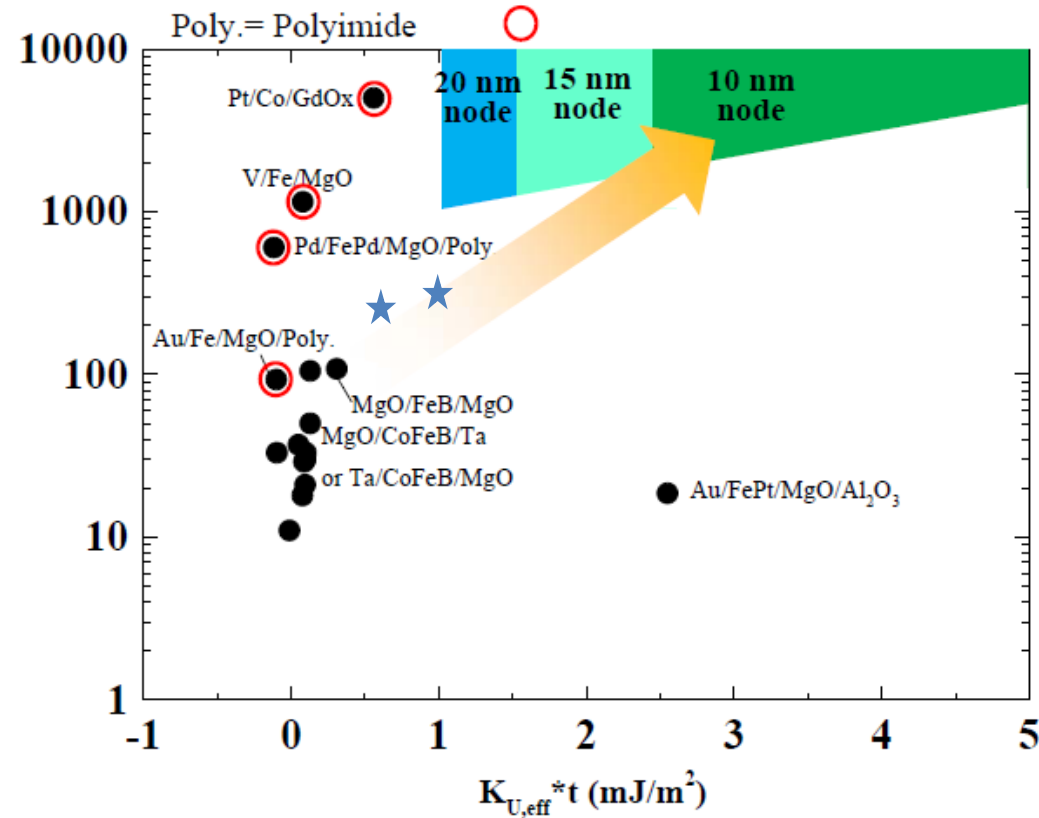
# Wpływ pola elektrycznego na PMA w cienkiej warstwie ferromagnetyka



# Duża PMA oraz silny efekt VCMA niezbędne do realizacji pamięci magnetycznej nowej generacji



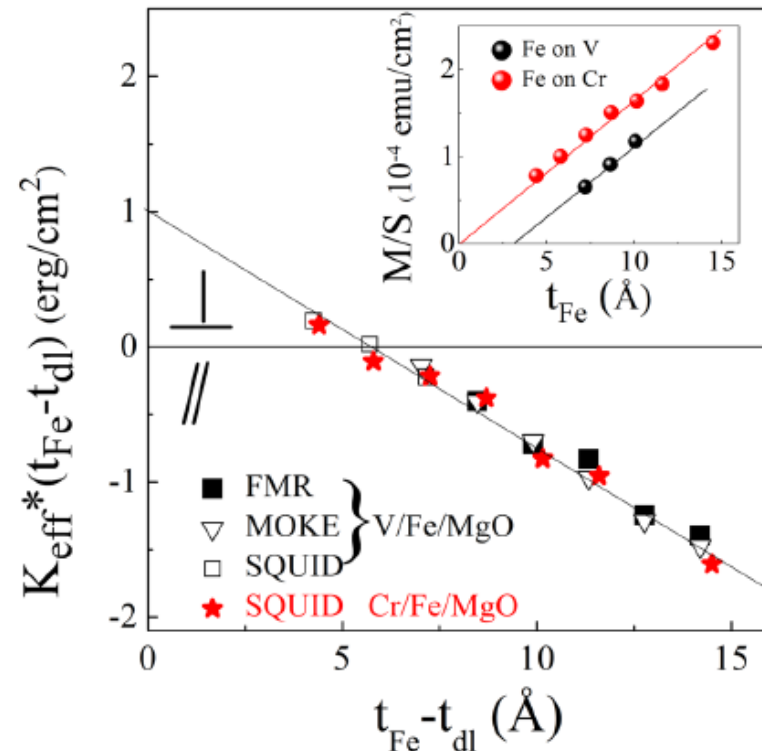
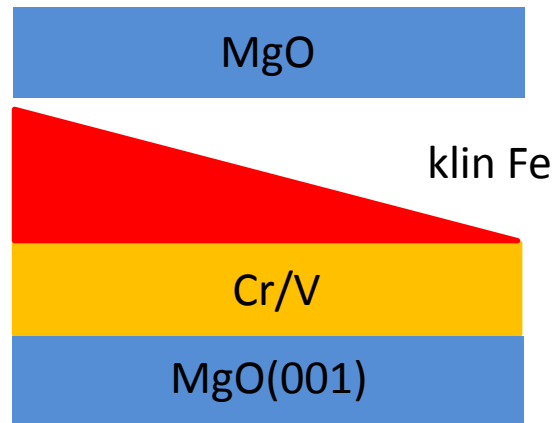
T. Nozaki et al., to be published



T. Nozaki et al., impACT symposium, 2015

# PMA w układzie MgO/Fe/Cr

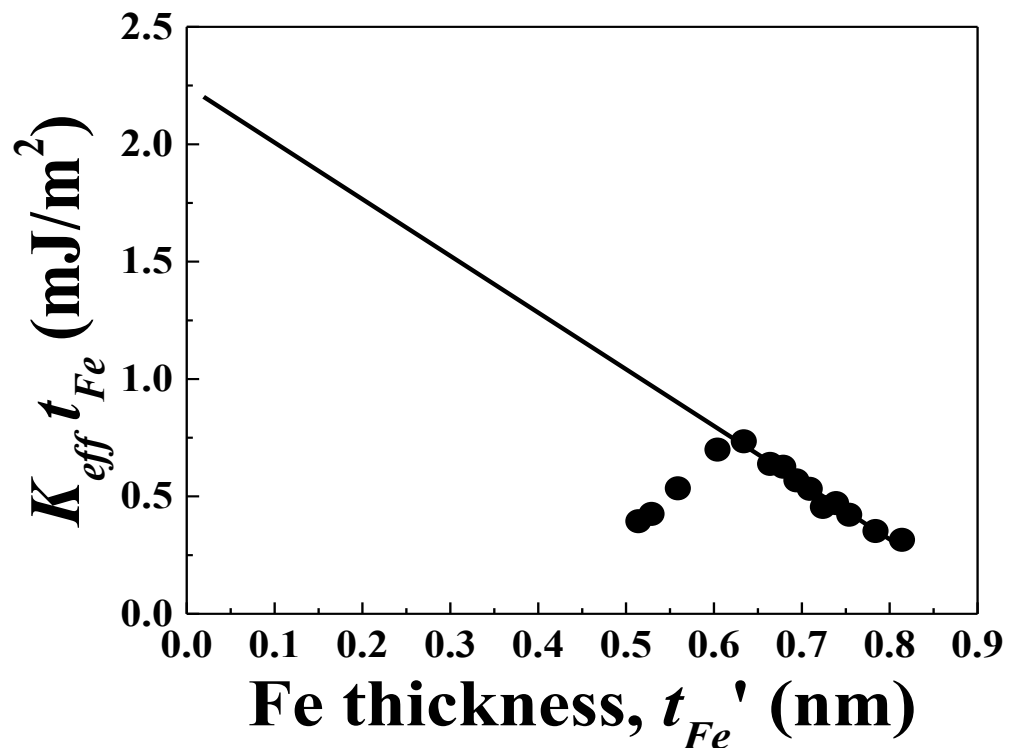
- PMA @ RT subnanometrowych warstw Fe w układzie MgO/Fe/Cr oraz MgO/Fe/V<sup>1,2</sup>
- pochodzenie PMA: anizotropia powierzchniowa ( $\sim 1\text{mJ/m}^2$ )



# Wpływ buforowej warstwy MgO na PMA w układzie MgO/Fe/Cr/bufor MgO/MgO(001)

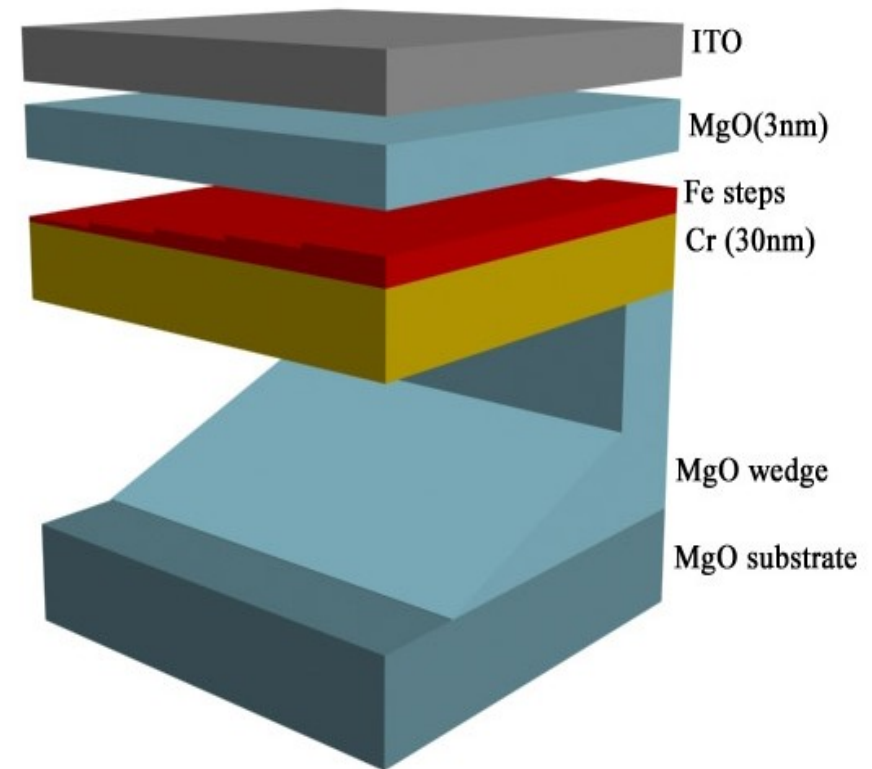
- PMA subnanometrowych warstw Fe w układzie MgO/Fe/Cr/buforMgO(3nm)/MgO(001)
- anizotropia powierzchniowa  $K_s \sim 2.1\text{mJ/m}^2$

Czy MA w układzie MgO/Fe/Cr/buforMgO/MgO(001) może być kontrolowana poprzez zmianę grubości bufora MgO?



# MgO/Fe(*t*)/Cr/bufor MgO(*d*)/MgO(001)

- podłoże MgO(001) (wygrzano @ 800°C)
- klinowa warstwa MgO @ 200°C,  $0 < d < 4\text{nm}$ (15nm)
- 30 nm Cr @ 200°C (wygrzano @ 800°C/20min.)
- Fe @ 200°C (0.4 – 1.1)nm (wygrzano@ 260°C)
- 3nm MgO @ 60°C (wygrzano@ 350°C/20minutes)
- 20nm ITO @ RT





# MgO/Fe(*t*)/Cr/**bufor** MgO(*d*)/MgO(001)

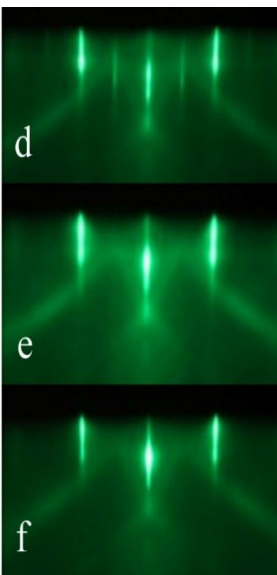
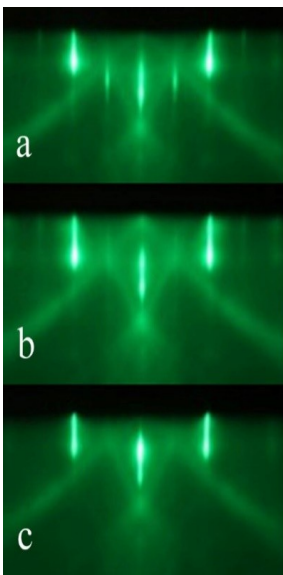
RHEED

Cr

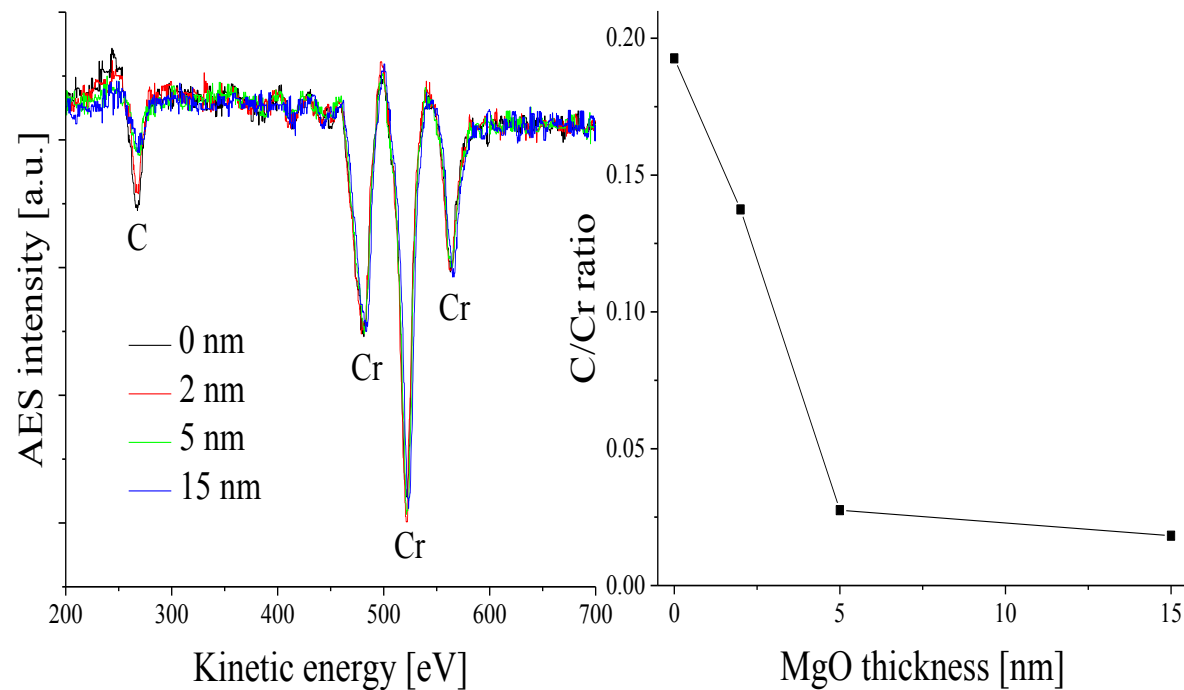
Fe(0.7nm)

grubość MgO

0nm



AES



# MgO/Fe(*t*)/Cr/bufor MgO(*d*)/MgO(001)

– pomiary PMOKE

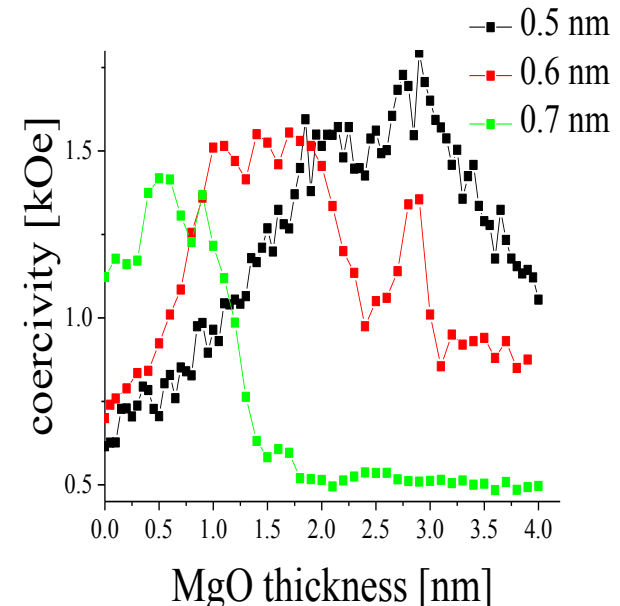
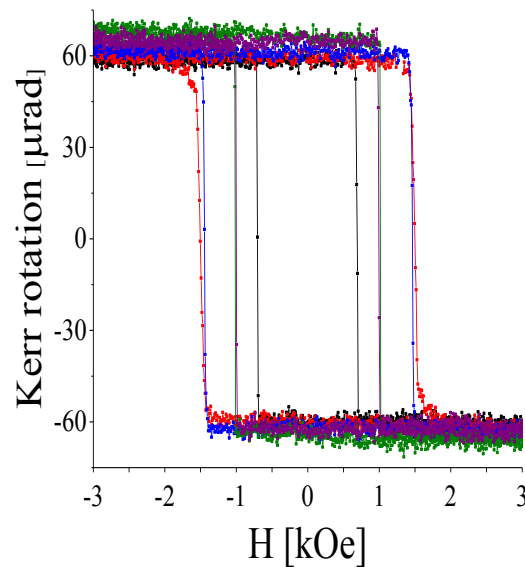
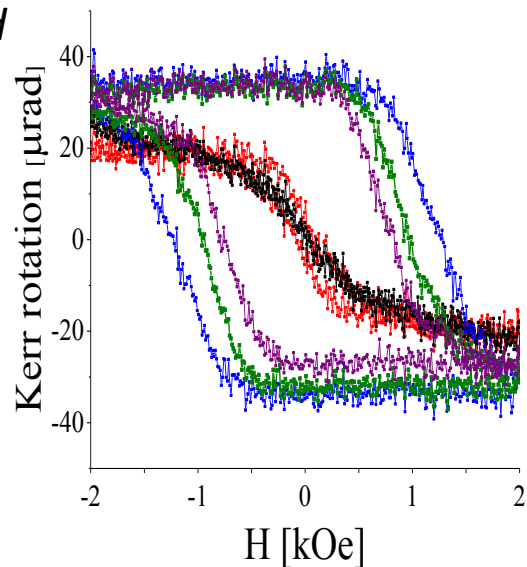
grubość Fe  $t = 0.4\text{nm}$

grubość Fe  $t = 0.6\text{nm}$

$H_c$  vs  $d$   
(grubość Fe:  
 $t=0.5\text{nm}, 0.6\text{nm}, 0.7\text{nm}$ )

grubość MgO  $d$

- 0nm
- 1nm
- 2nm
- 3nm
- 4nm



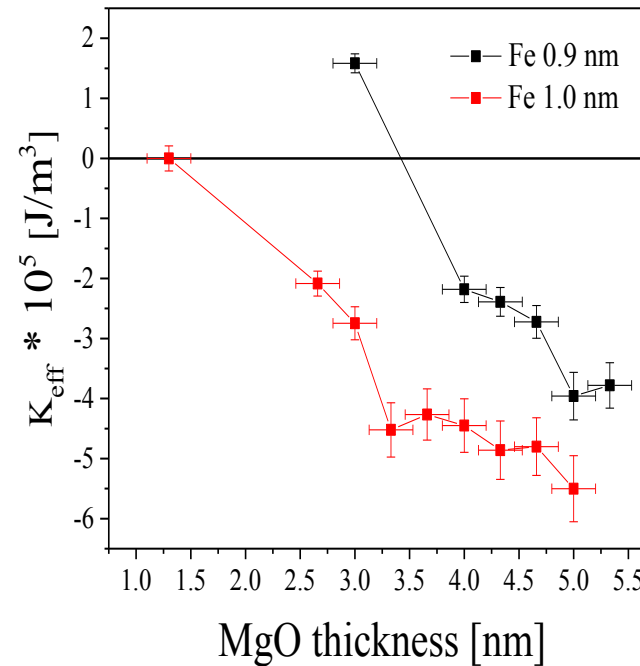
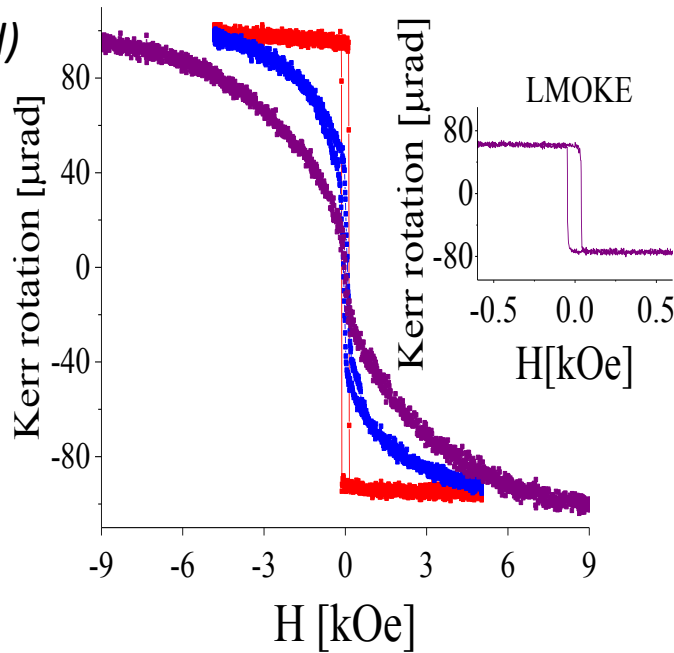
# Zależność MA od grubości bufora MgO(d)

grubość Fe  $t=1.0\text{nm}$

$K_{eff}$  vs grubość MgO ( $d$ ) ( $t=0.9\text{nm}, 1.0\text{nm}$ )

grubość MgO ( $d$ )

— 1nm  
— 2nm  
— 4nm



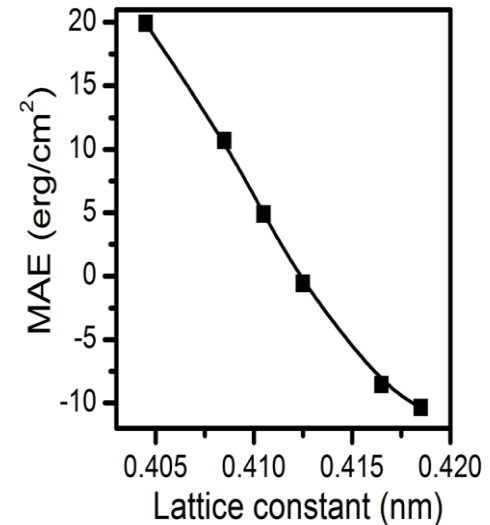
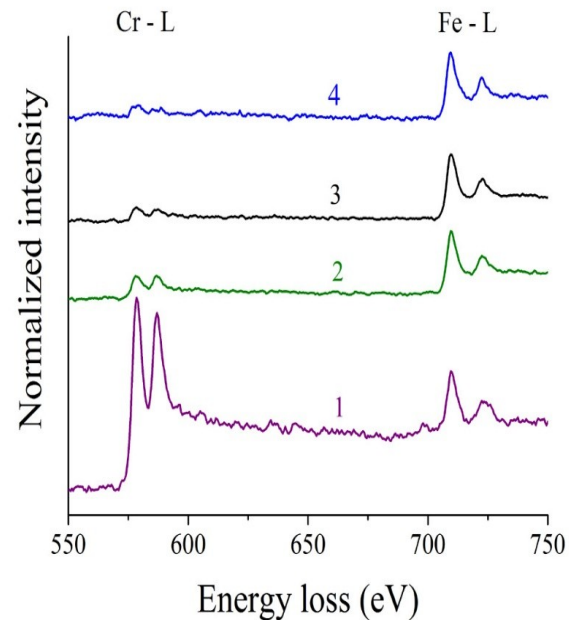
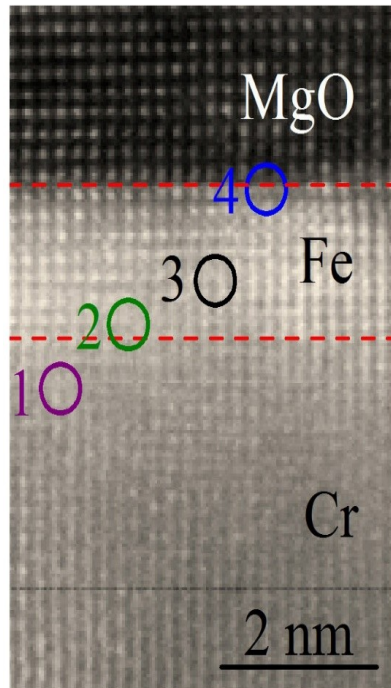
zmiana  $K_{eff}$  nie jest  
związana ze zmianą  
anizotropii kształtu

## Pytania:

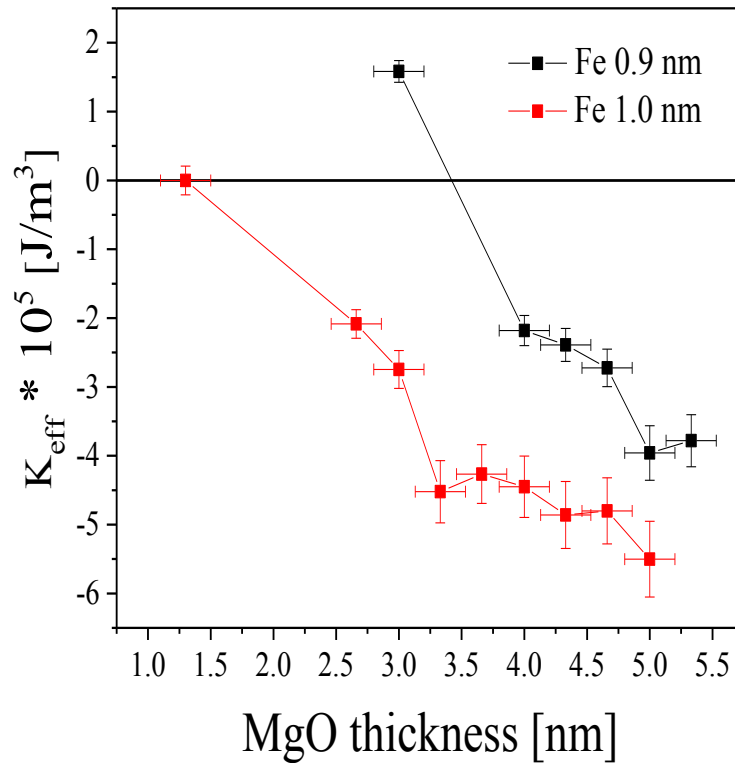
1. co jest źródłem MEA w układzie?
2. dlaczego MEA zmienia się z grubością bufora MgO?

# Pochodzenie MEA w układzie MgO/Fe/Cr

- silna zależność MEA vs. stała sieci dla FeCo (K. H. He and J. S. Chen, JAP 111, 07C109 (2012))
- dla  $d=3\text{nm}$  przyczynę objętościową do  $K_{\text{eff}} \sim K_v = -2 \cdot 10^6 \text{J/m}^3$
- zmiana stałej sieci Fe może być spowodowane mieszanym Fe i Cr



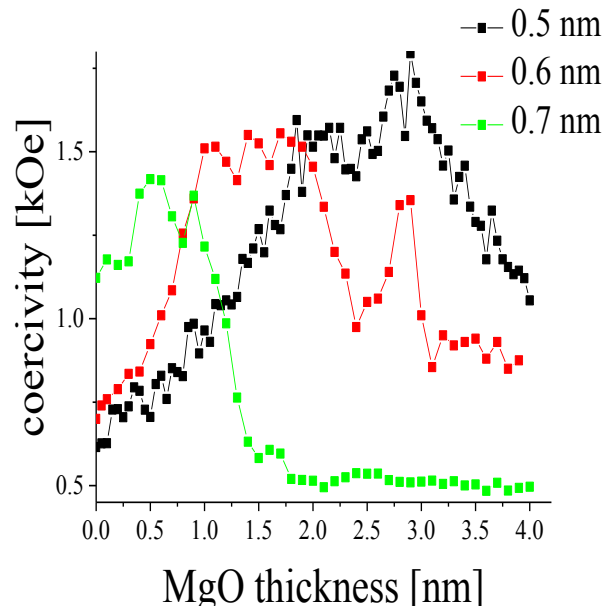
# Dlaczego $K_{eff}$ zmienia się z grubością $d$ ?



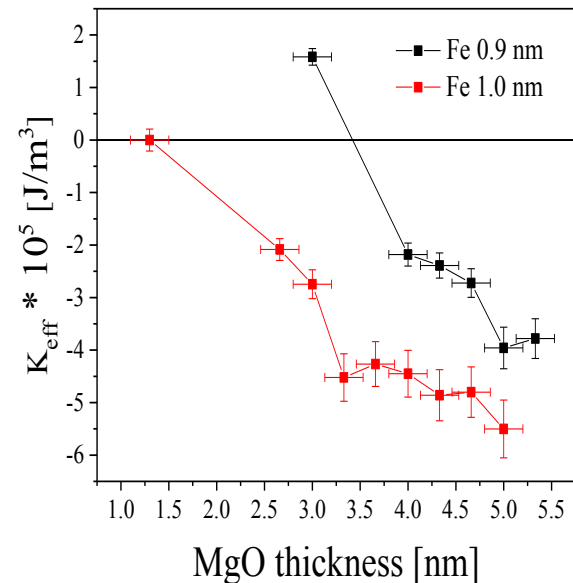
- wzrost ujemnego przyczynku do  $K_{eff}$  wraz ze wzrostem grubości MgO
- zmiana naprężeń w warstwie Fe

MA w układzie MgO/Fe(0.4nm – 1.0nm)/Cr/MgO(*d*)/MgO(001)  
zależy od grubości bufora MgO

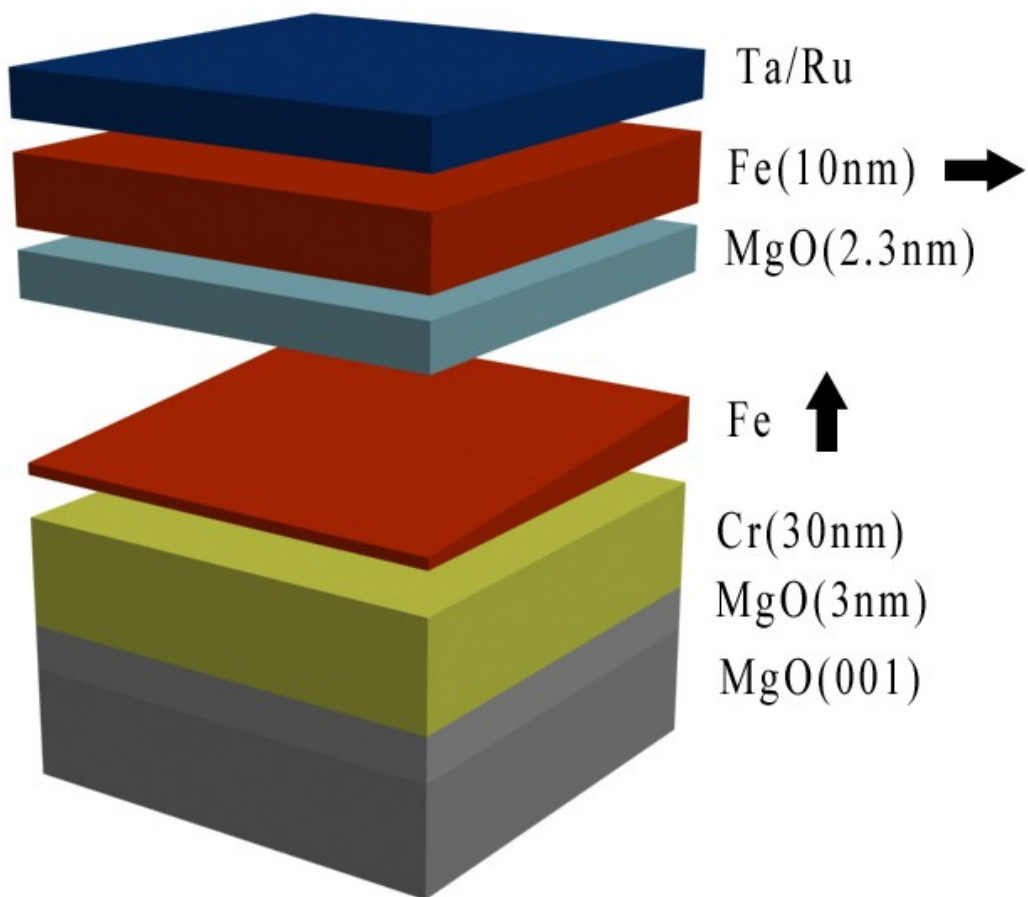
- dla  $t < 0.8$  nm niemonotoniczna zależność  $H_c(d)$



- dla  $0.8 \text{ nm} \leq t \leq 1.0 \text{ nm}$  zmiana kierunku namagnesowania (SRT) w funkcji grubości MgO



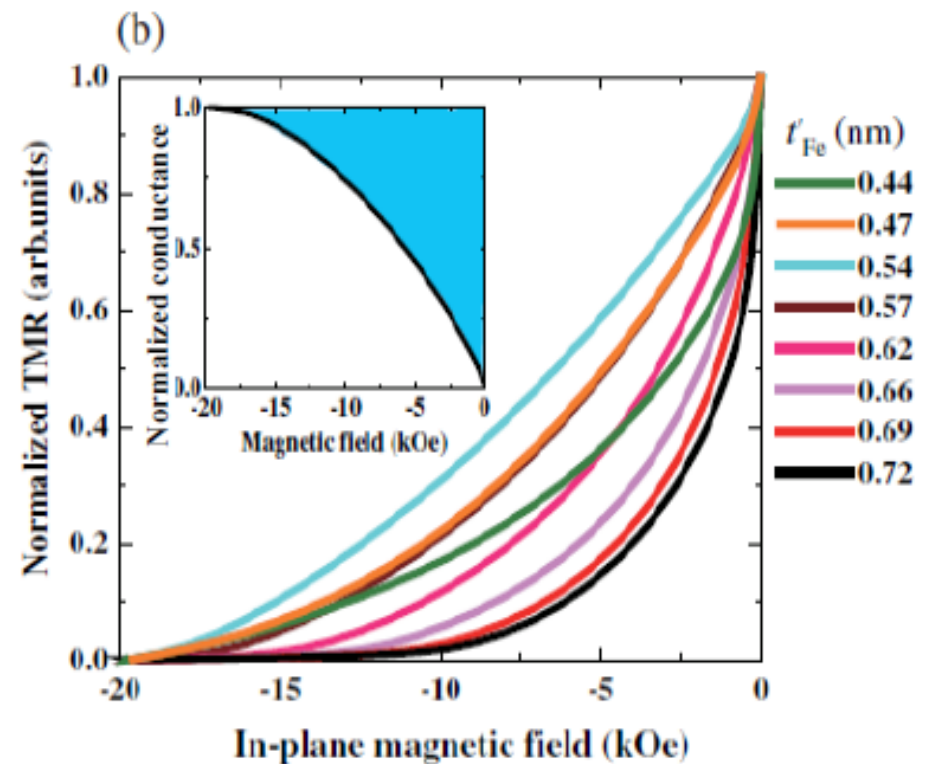
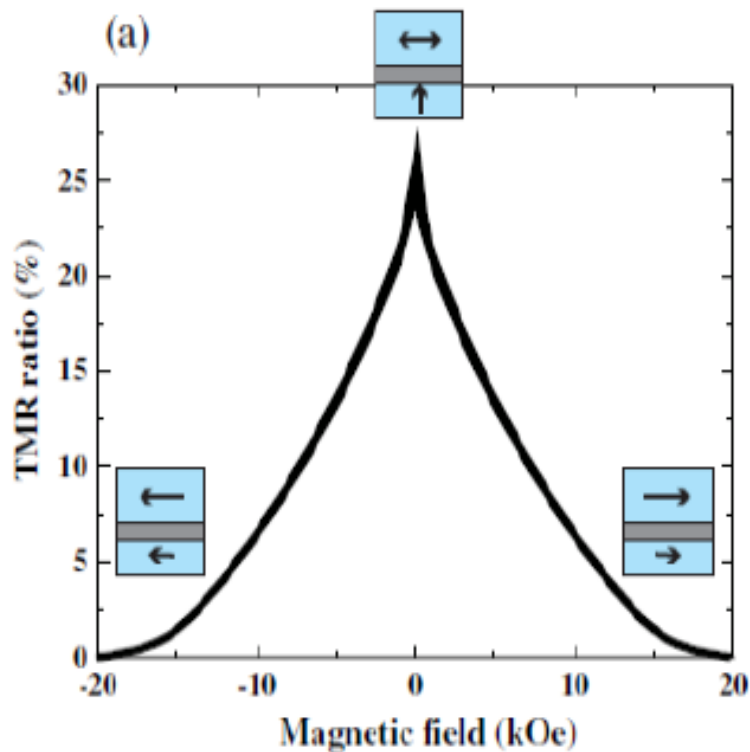
# Wpływ pola elektrycznego na MA w układzie Cr/Fe/MgO



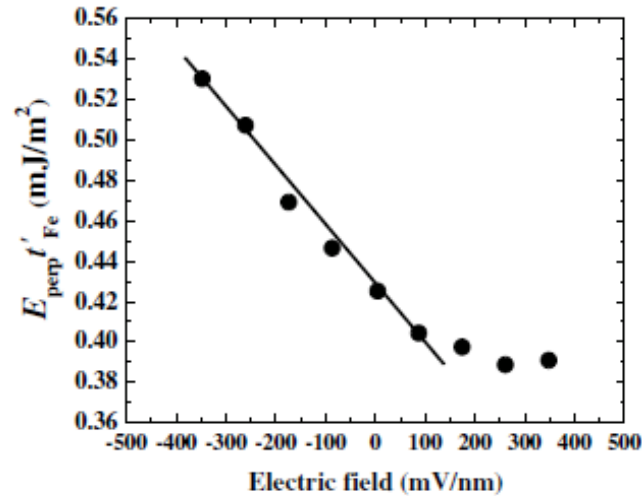
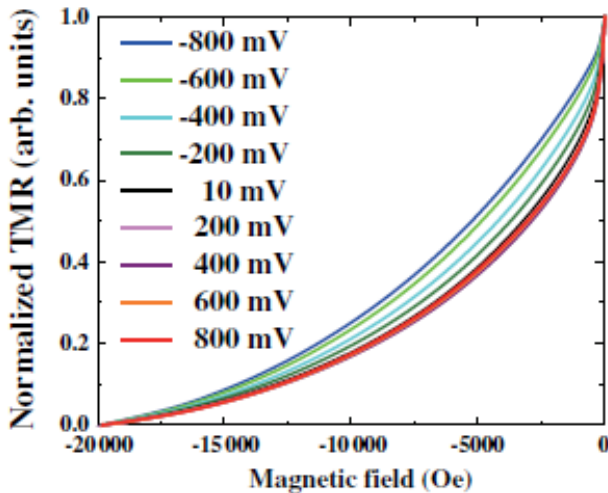


# Wpływ pola elektrycznego na MA w układzie Cr/Fe/MgO

$$G(\vartheta) = G_{90} + (G_p - G_{90}) \cos\vartheta$$

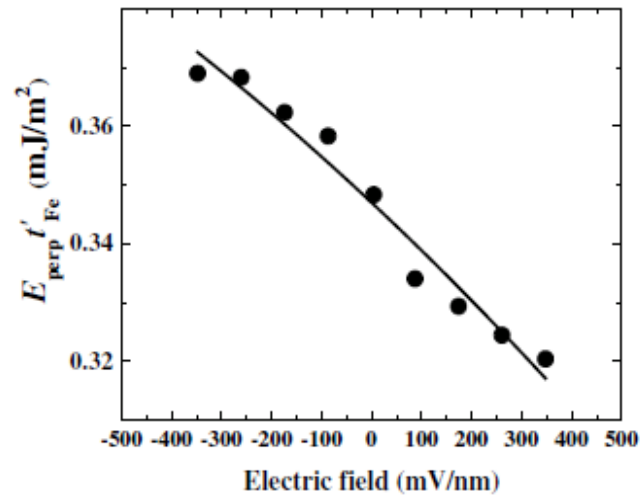
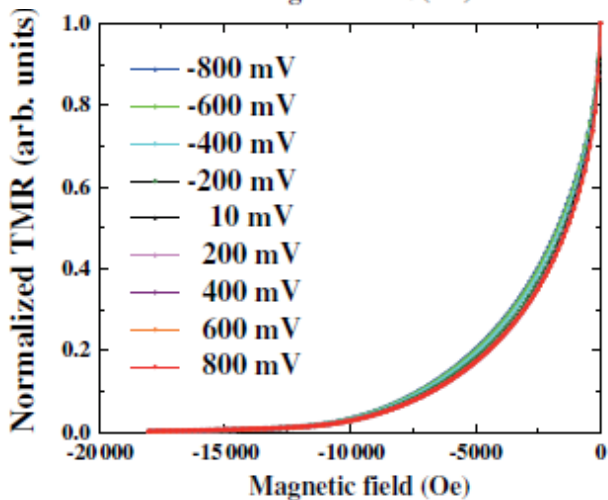


# Wpływ pola elektrycznego na MA w układzie Cr/Fe/MgO



$$t_{\text{Fe}} = 5.3 \text{ \AA}$$

VCMA ~ 290 fJ/Vm

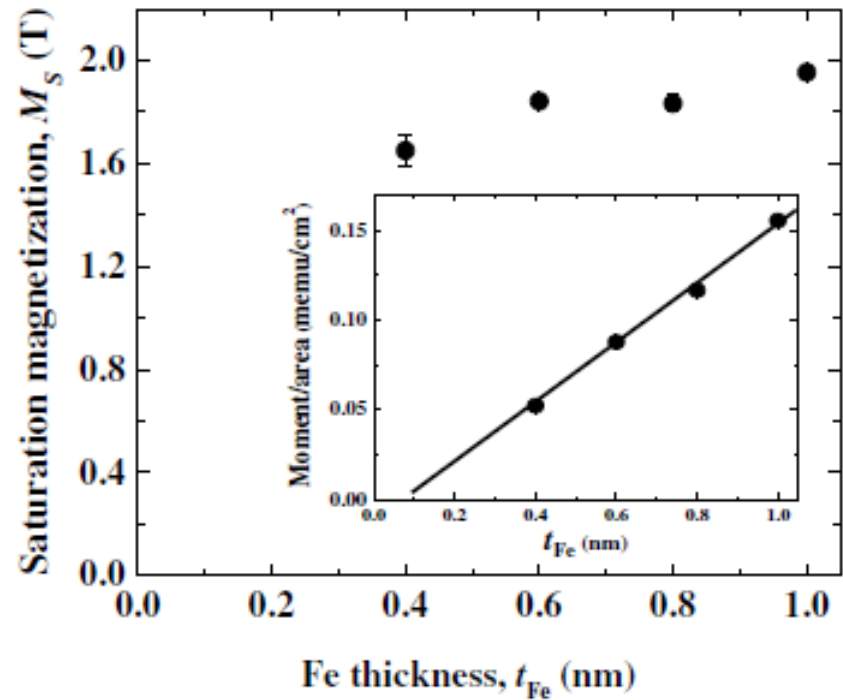
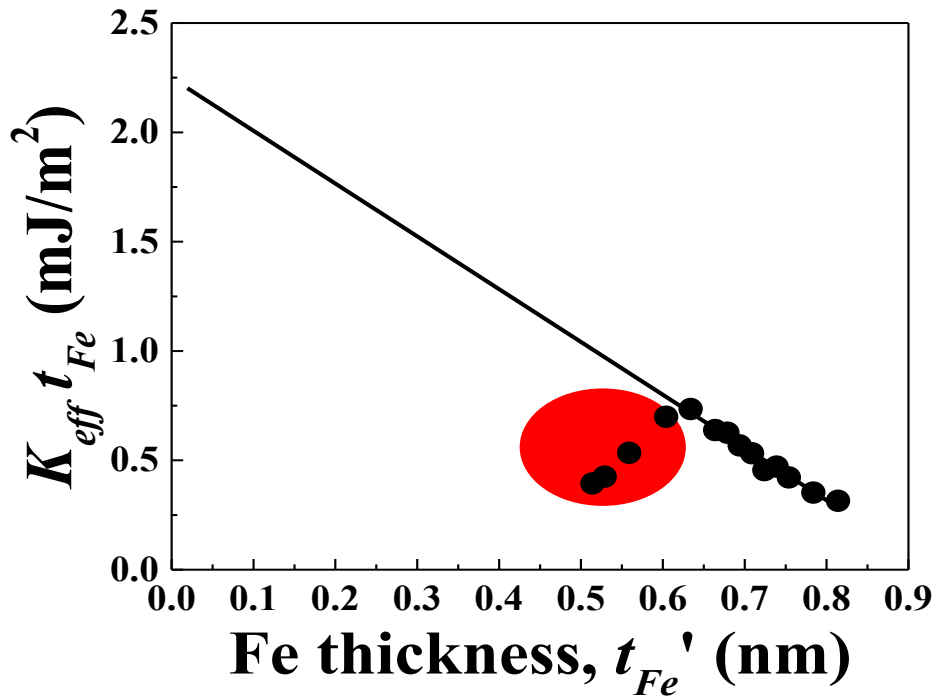


$$t_{\text{Fe}} = 7.8 \text{ \AA}$$

VCMA ~ 80 fJ/Vm

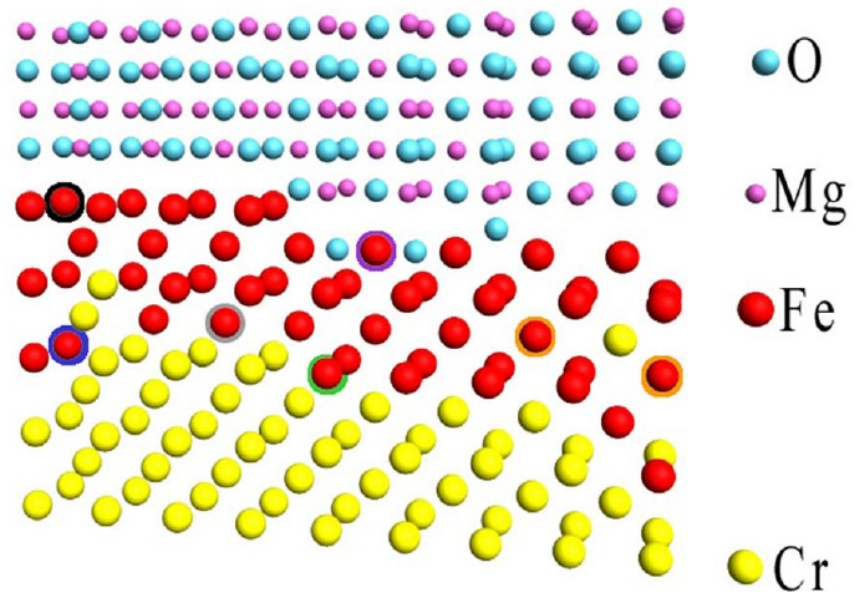
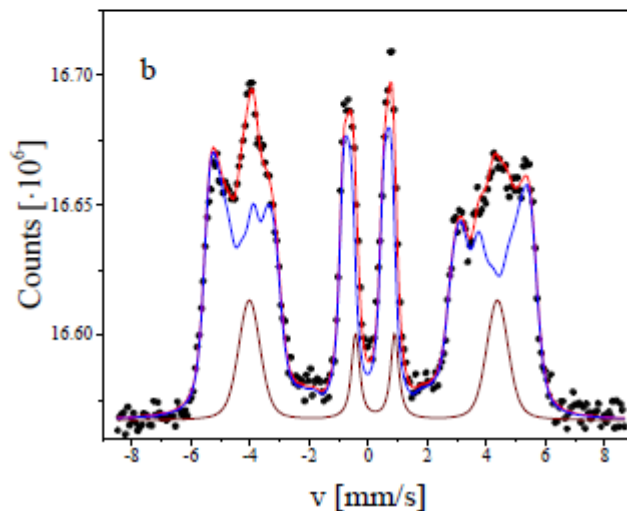
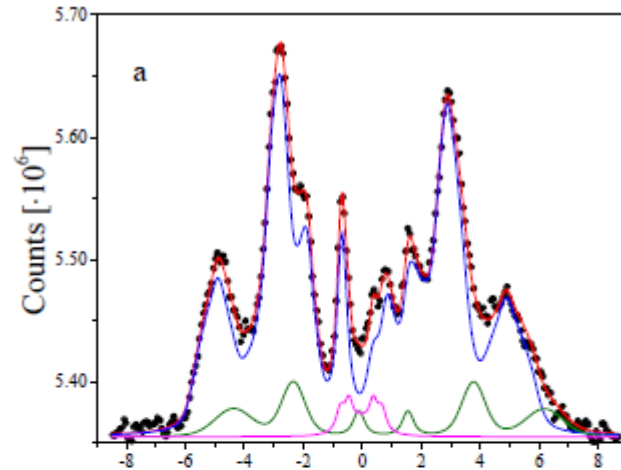
Silny efekt VCMA zaobserwowano dla  $t_{Fe} < 6\text{\AA}$  !

$$K_s \sim 2.1 \text{ mJ/m}^2$$



# Cr/<sup>57</sup>Fe(6Å)/MgO – spektroskopia Mössbauera

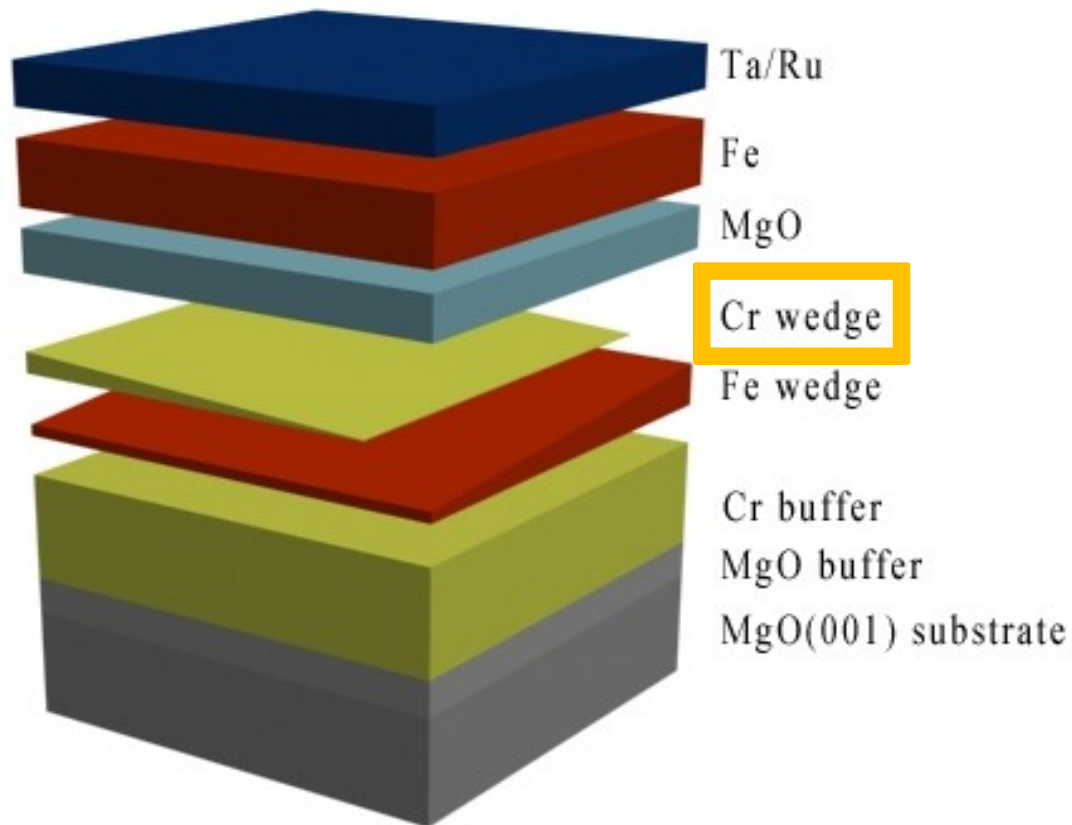
widmo Cr/<sup>57</sup>Fe(6Å)/MgO przed i po wygrzaniu



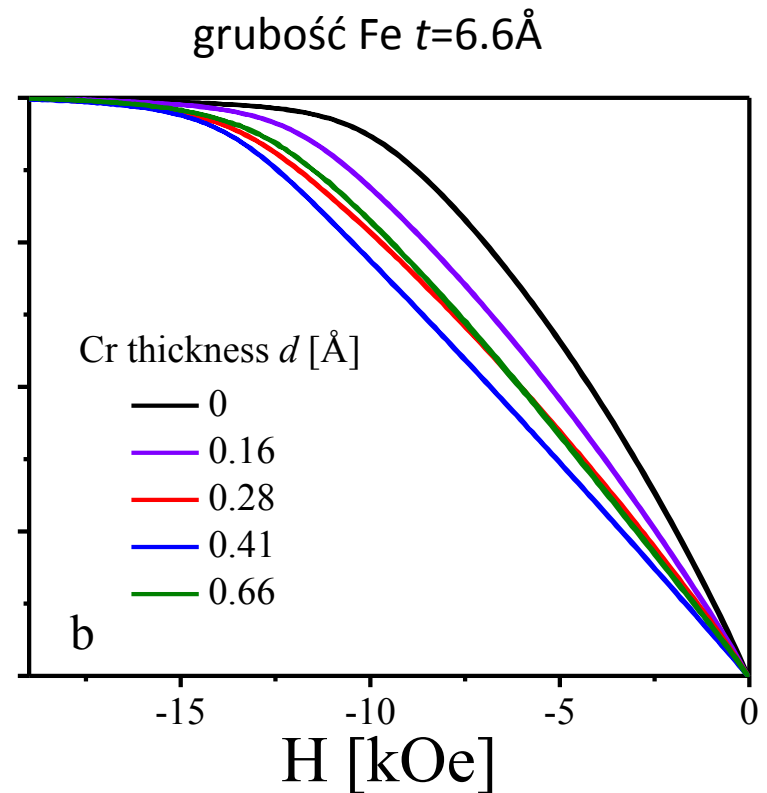
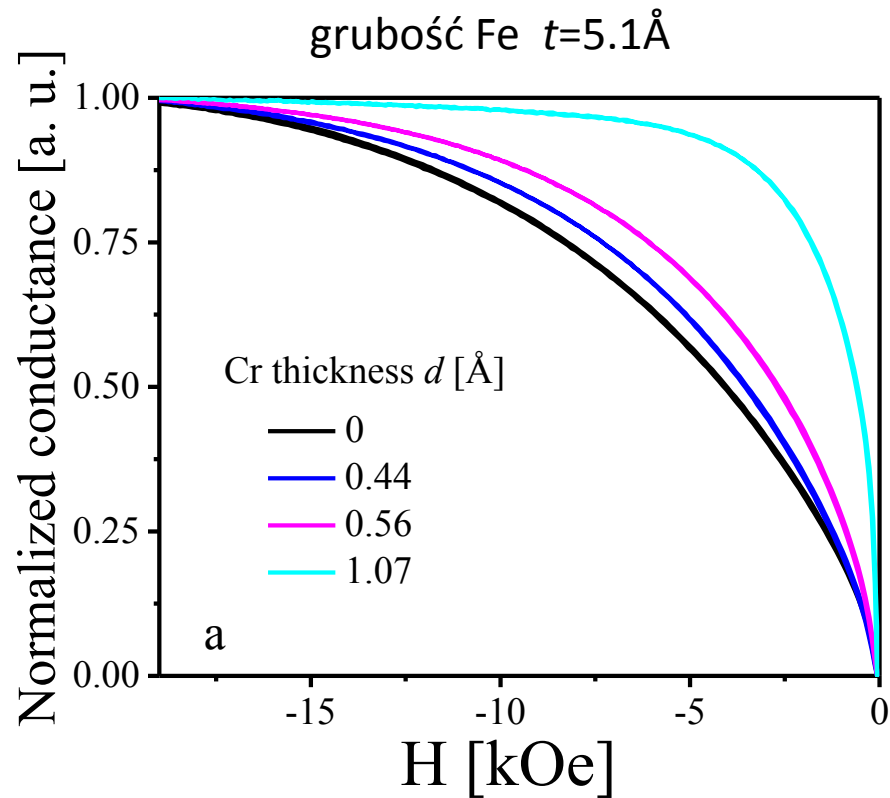
Po wygrzaniu:

- „wyostrzenie” interfejsów
- segregacja Cr
- SRT

# Jak obecność Cr wpływa w interfejsie Fe/MgO wpływa na PMA oraz VCMA?

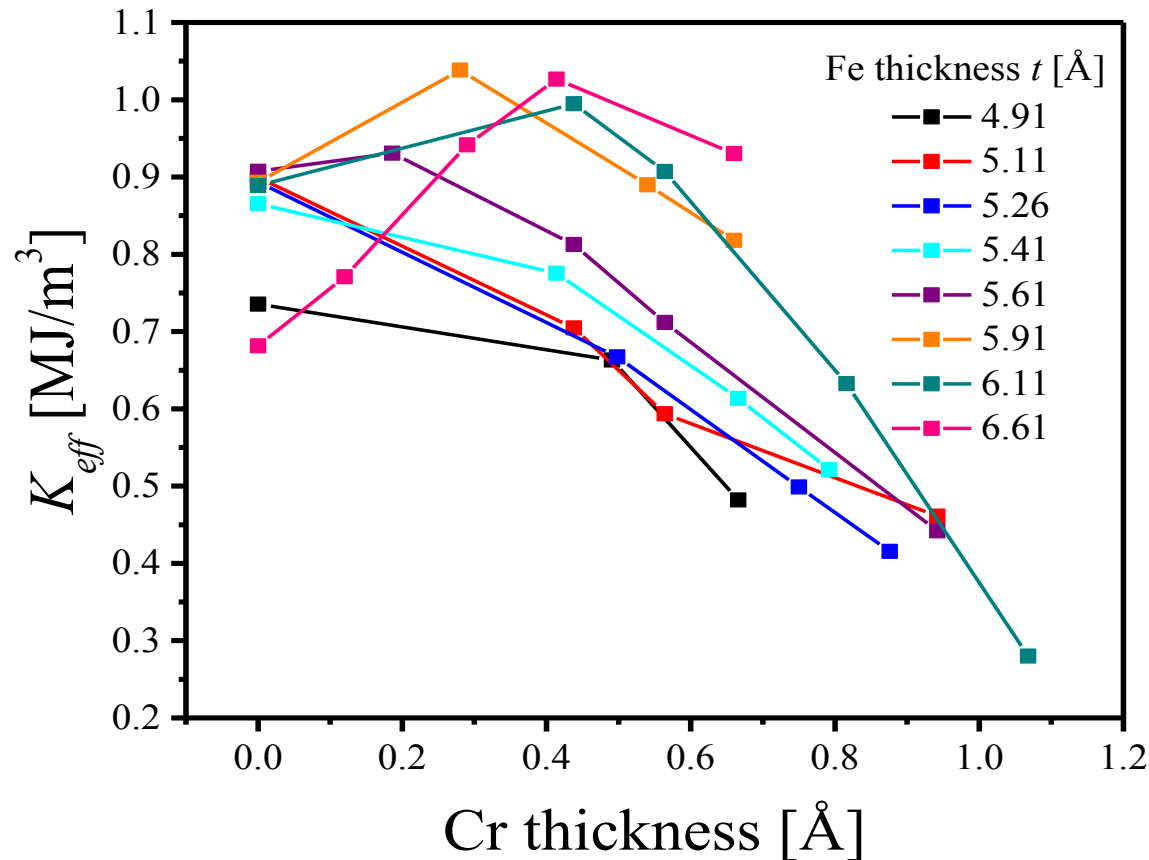


# Zależność $K_{eff}$ od grubości Cr



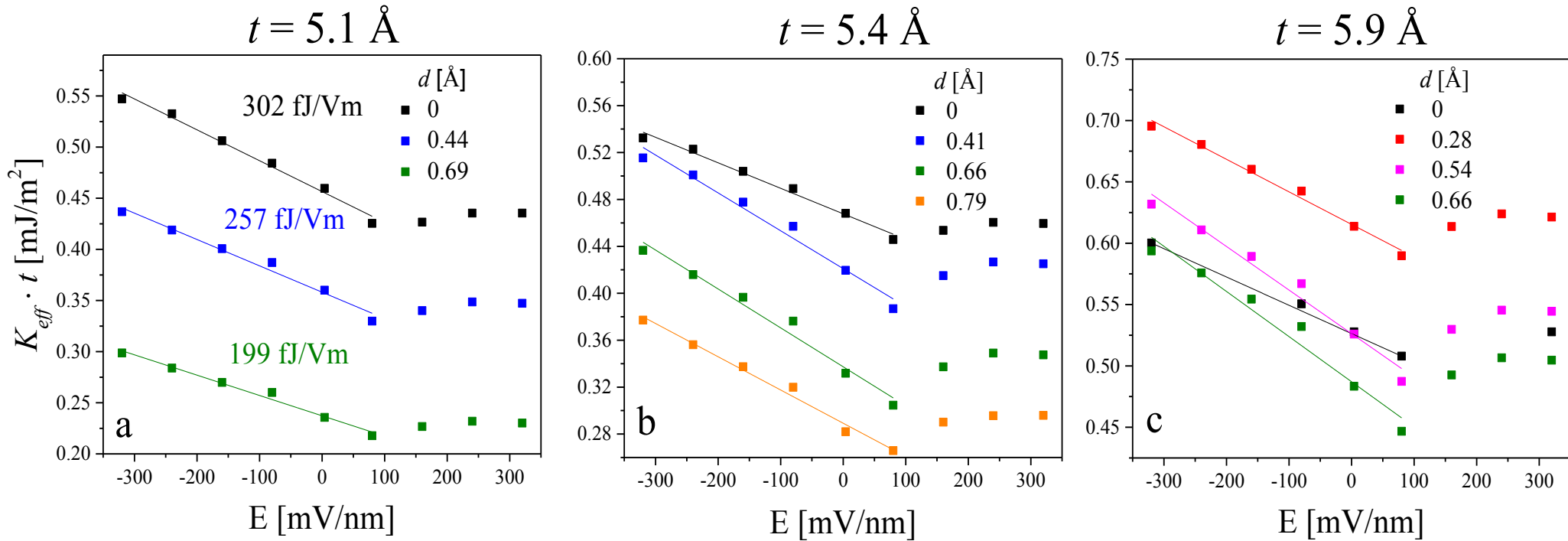
PMA w układzie Cr/Fe/MgO może być wzmocniona poprzez naniesienie cienkiej warstwy Cr pomiędzy Fe i MgO!

# Zależność $K_{eff}$ od grubości Cr $d$



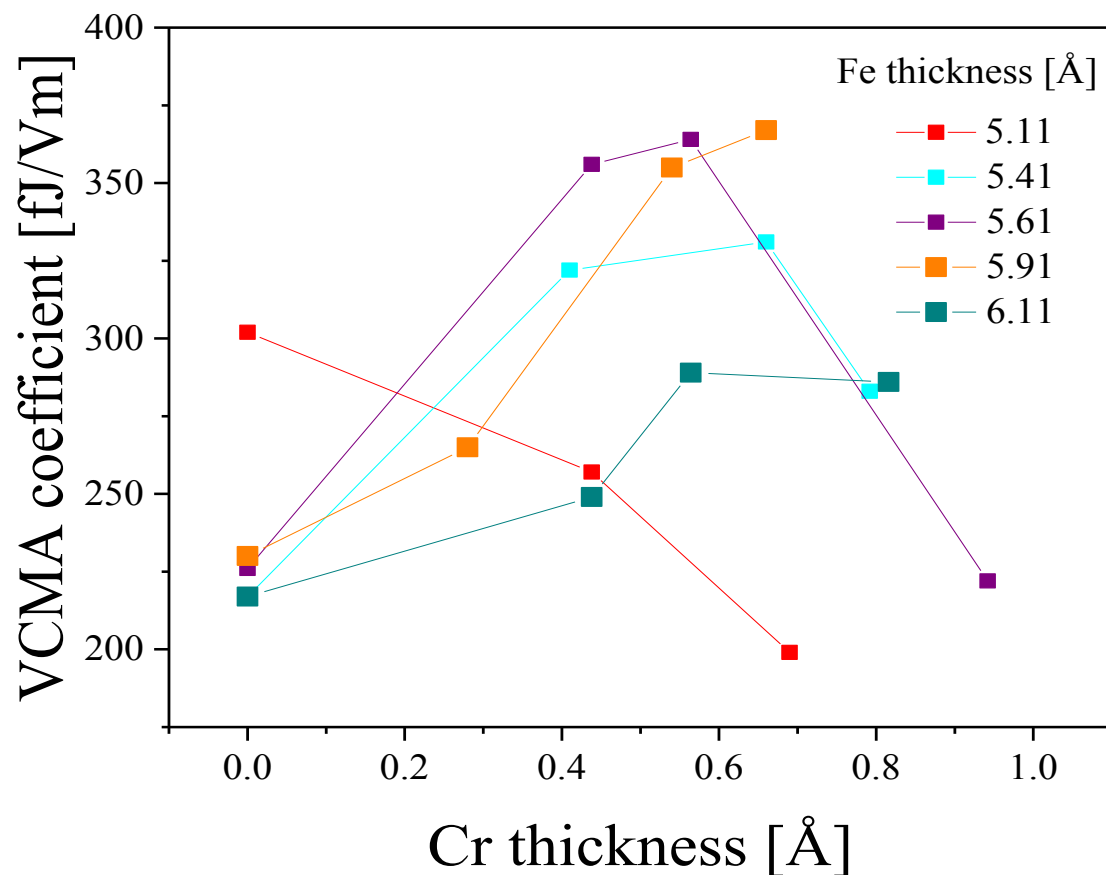
PMA w układzie Cr/Fe/MgO może być wzmocniona poprzez naniesienie cienkiej warstwy Cr pomiędzy Fe i MgO!

# Zależność efektu VCMA od grubości Cr



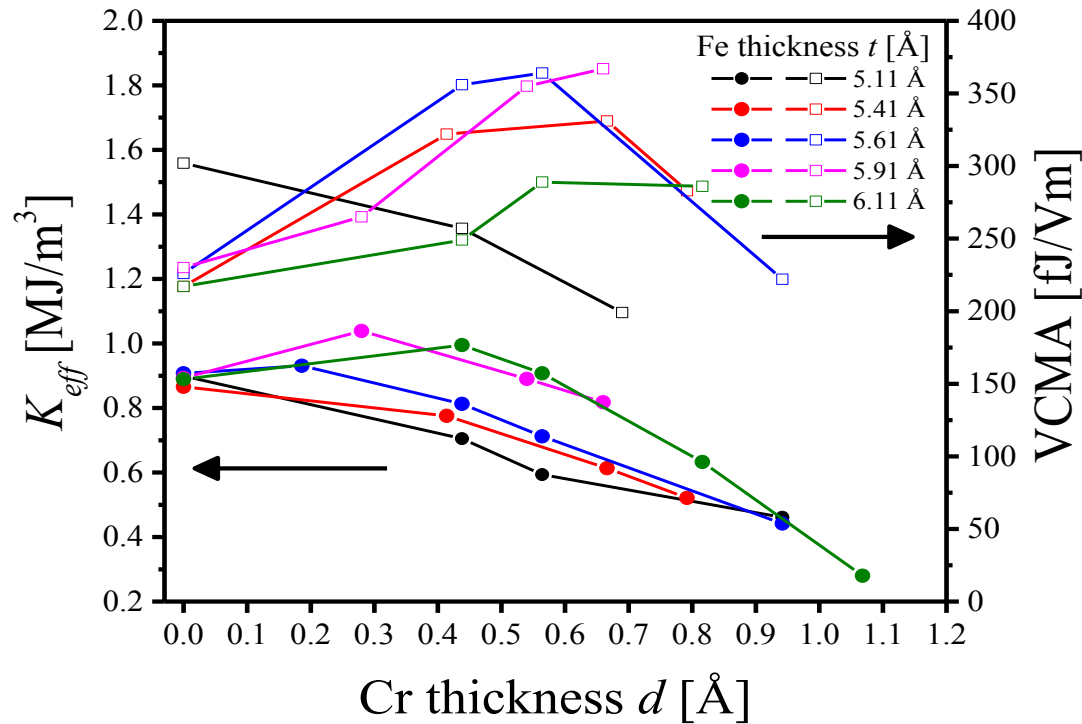


# Zależność efektu VCMA od grubości Cr



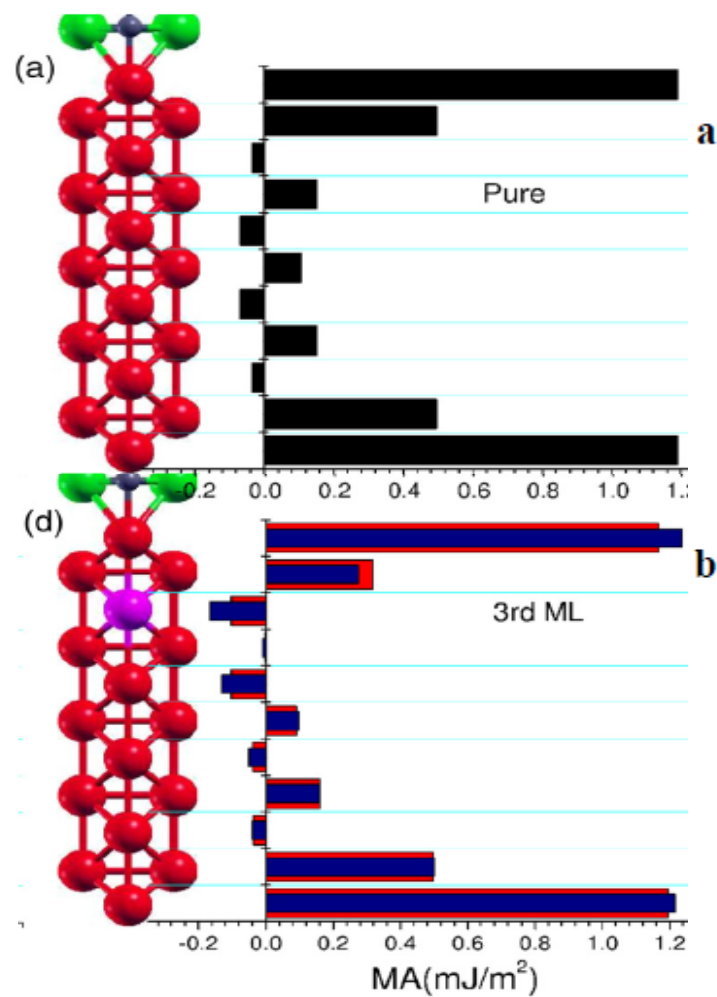
wzmocnienie VCMA dla optymalnej grubości Cr!

# Zależność PMA oraz VCMA od grubości Cr

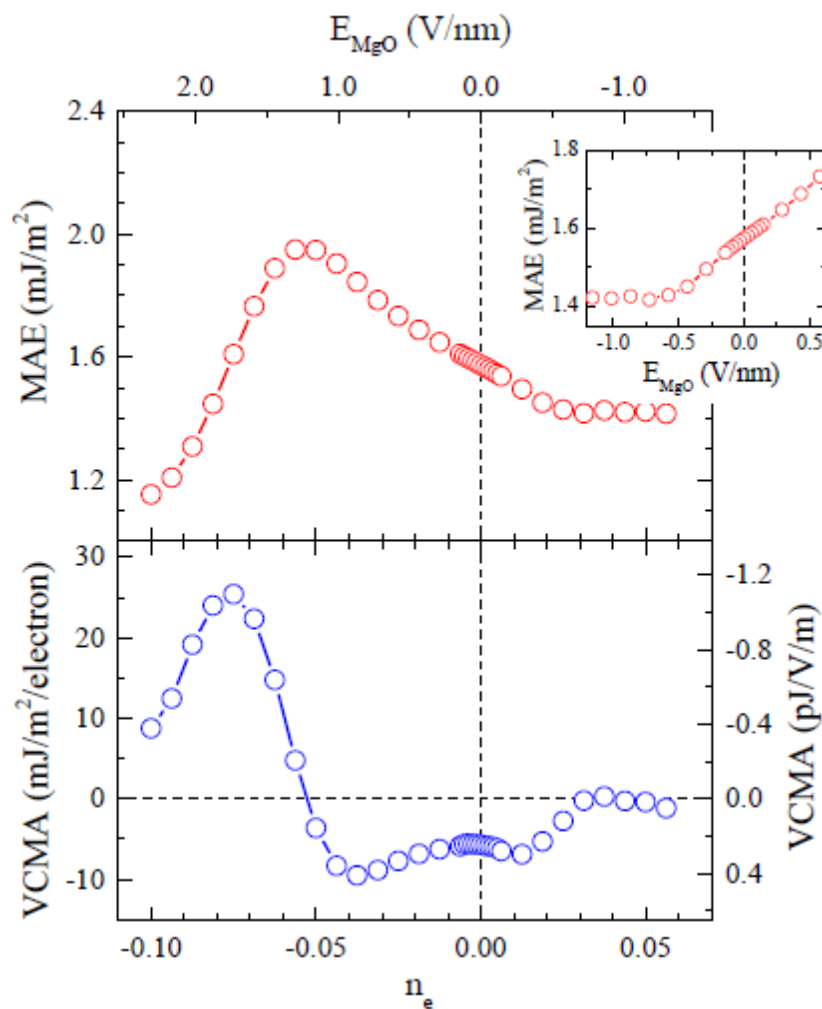


wzmocnienie PMA  
oraz VCMA dla  
optymalnej grubości Cr!

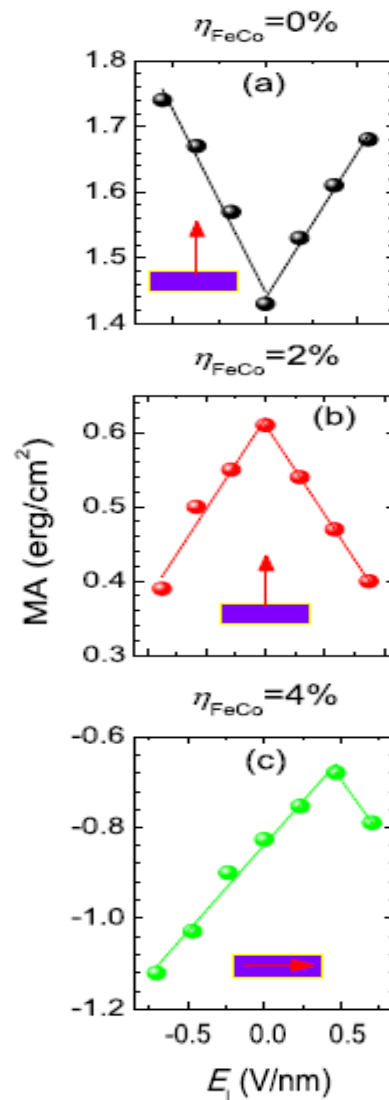
# Wzmocnienie PMA oraz VCMA – przyczyna?



A. Hallal et al. PRB 90, 064422(2016)

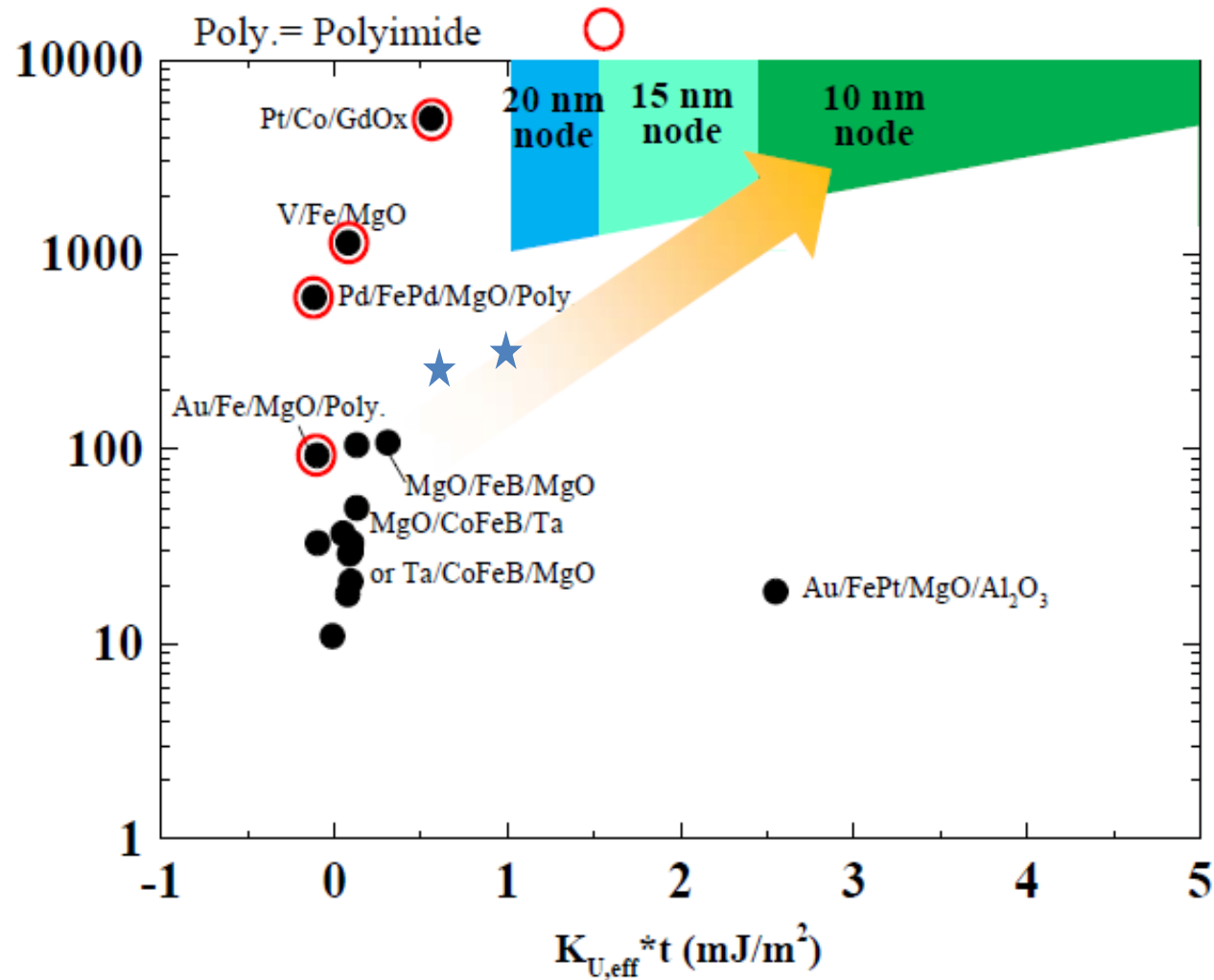


J. Zhang et al. arXiv:1612.02724v1



P. V. Ong et al. PRB 92, 020407(R) (2015)

# Podsumowanie



# Podziękowania

## **AIST (Tsukuba)**

### **Spintronics Research Center**

- *T. Nozaki*
- *V. Zayets*
- *Y. Shiota*
- *S. Tamaru*
- *H. Kubota*
- *A. Fukushima*
- *Y. Suzuki*
- *S. Yuasa*

## **AGH & IkiFP PAN**

- *W. Skowroński*
- *K. Freindl*
- *J. Korecki*