

# Dynamika w magnetycznych złączach tunelowych

**Witold Skowroński**

Katedra Elektroniki

Wydział Informatyki Elektroniki i Telekomunikacji

## Motywacja

- Badania magnetycznych złącz tunelowych pod kontem zastosowań
  - Magnetyczne komórki pamięci
  - Sensory pola magnetycznego
  - Komponenty elektroniki mikrofalowej
    - Generatory
    - Detektory mikrofalowe
- Nowe efekty fizyczne do zastosowań w Elektronice Spinowej



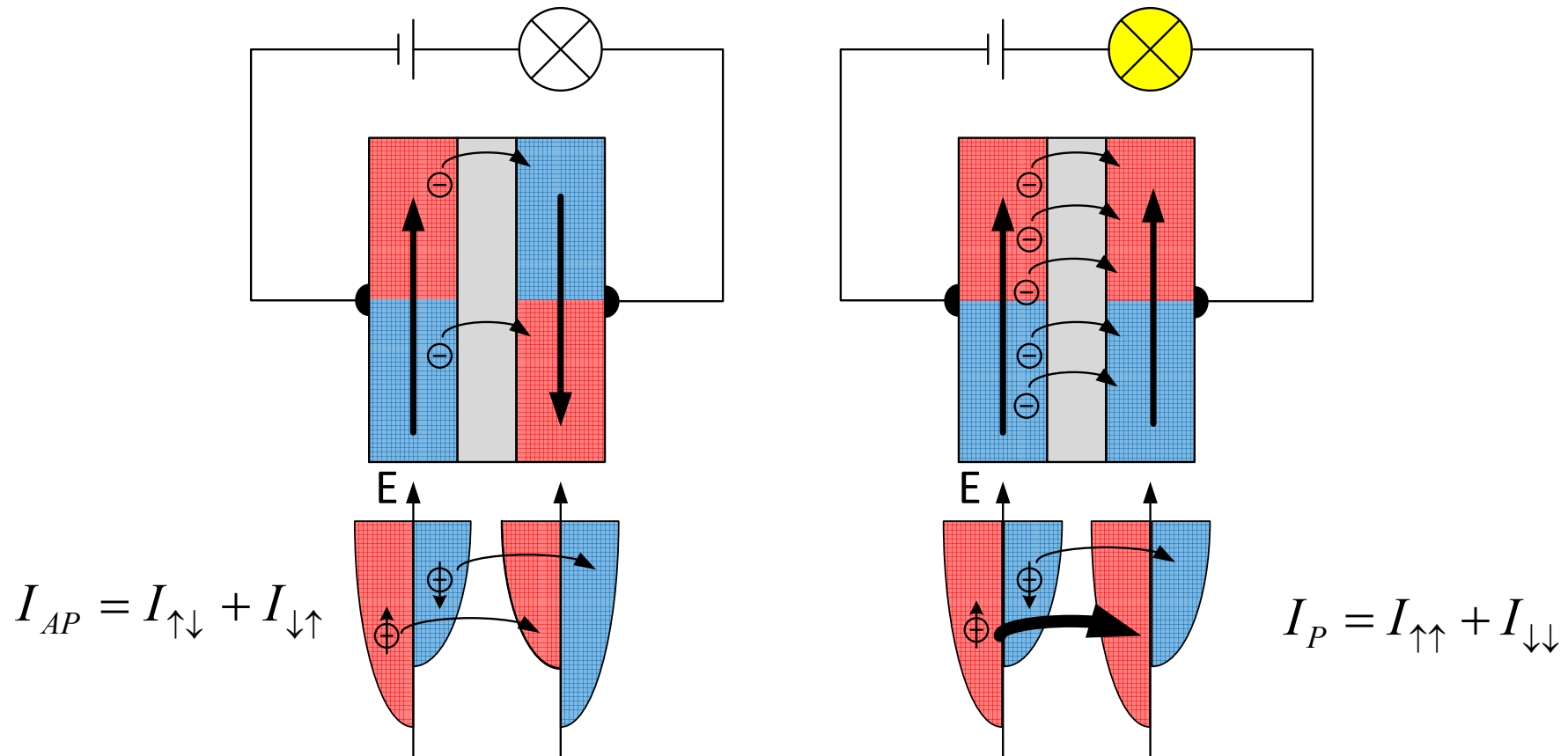
# Plan

- Magnetyczne złącze tunelowe
  - Tunelowa magnetorezystancja
  - Efekt transferu spinowego momentu siły (spin-transfer-torque - STT)
- Technologia wytwarzania magnetycznych złącz tunelowych
- Wyniki badań
  - Precesja magnetyzacji cienkich warstw
  - Generator/detektor sygnałów mikrofalowych
  - Wpływ pola elektrycznego
- Podsumowanie

# Plan

- Magnetyczne złącze tunelowe
  - Tunelowa magnetorezystancja
  - Efekt spinowego momentu siły (spin-transfer-torque - STT)
- Technologia wytwarzania magnetycznych złącz tunelowych
- Wyniki badań
  - Precesja magnetyzacji cienkich warstw
  - Generator/detektor sygnałów mikrofalowych
  - Wpływ pola elektrycznego
- Podsumowanie

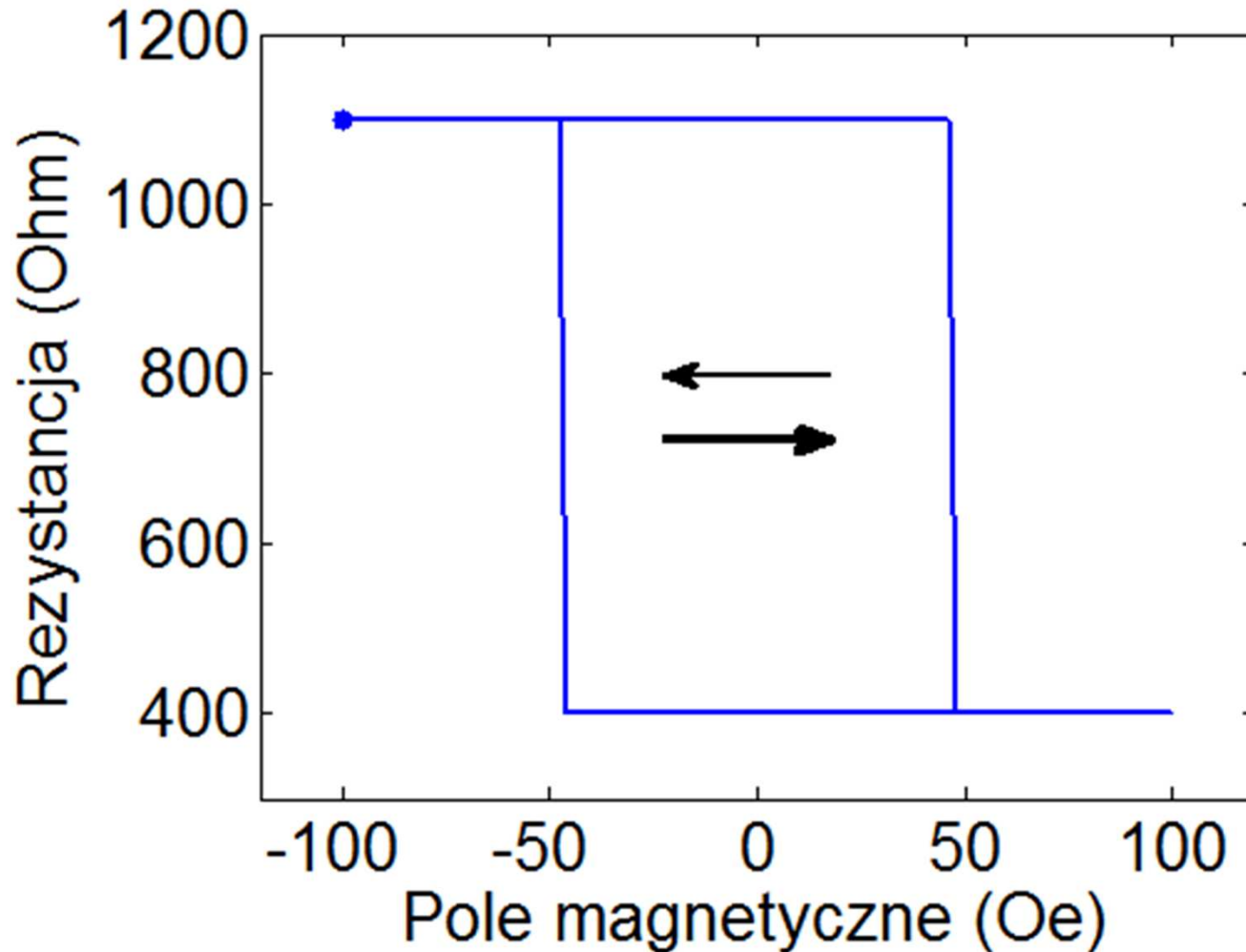
# Magnetyczne złącze tunelowe



$$TMR = \frac{R_{AP} - R_P}{R_P} = \frac{I_P - I_{AP}}{I_{AP}} = \frac{2p_1p_2}{1 - p_1p_2}$$

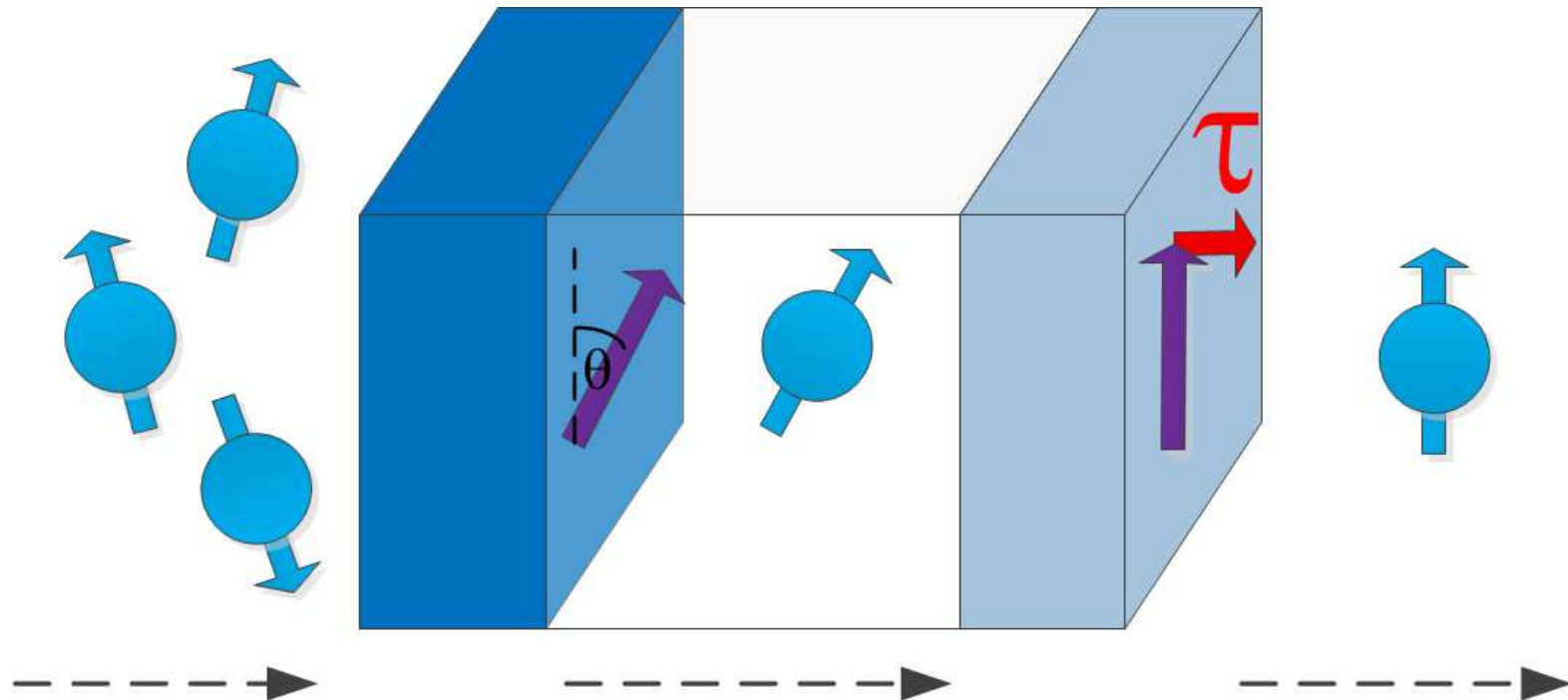
# Przełączanie złącza polem

H: -100.00 Oe



TMR = 175%

# Transfer spinowego momentu siły

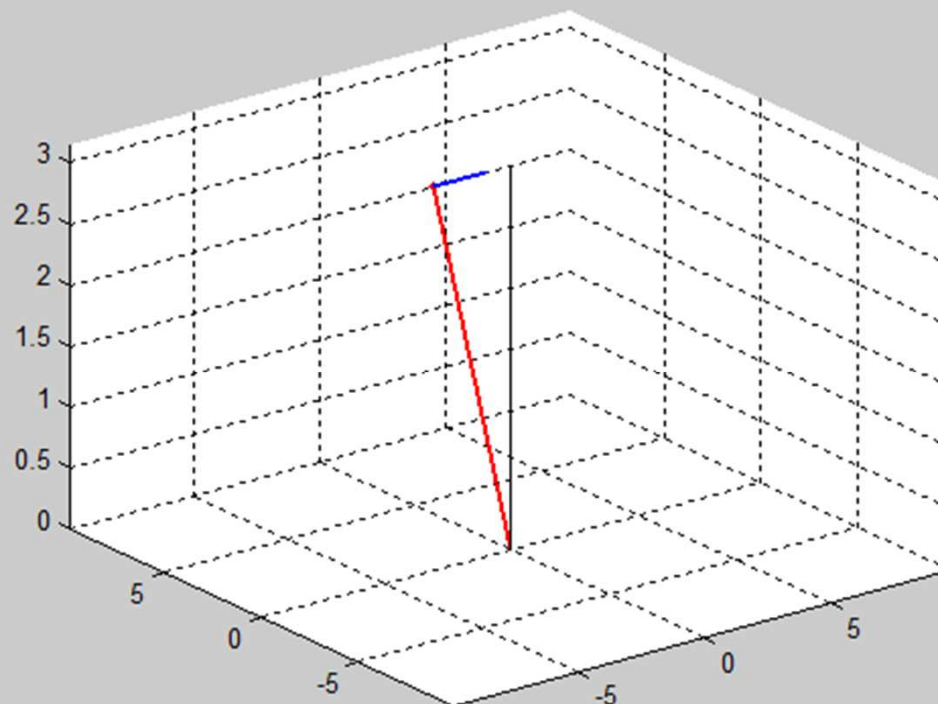


Slonczewski *JMMM* **158**, L1 (1996)

Berger *PRB* **54**, 9353 (1996)

# Dynamika złącza tunelowego

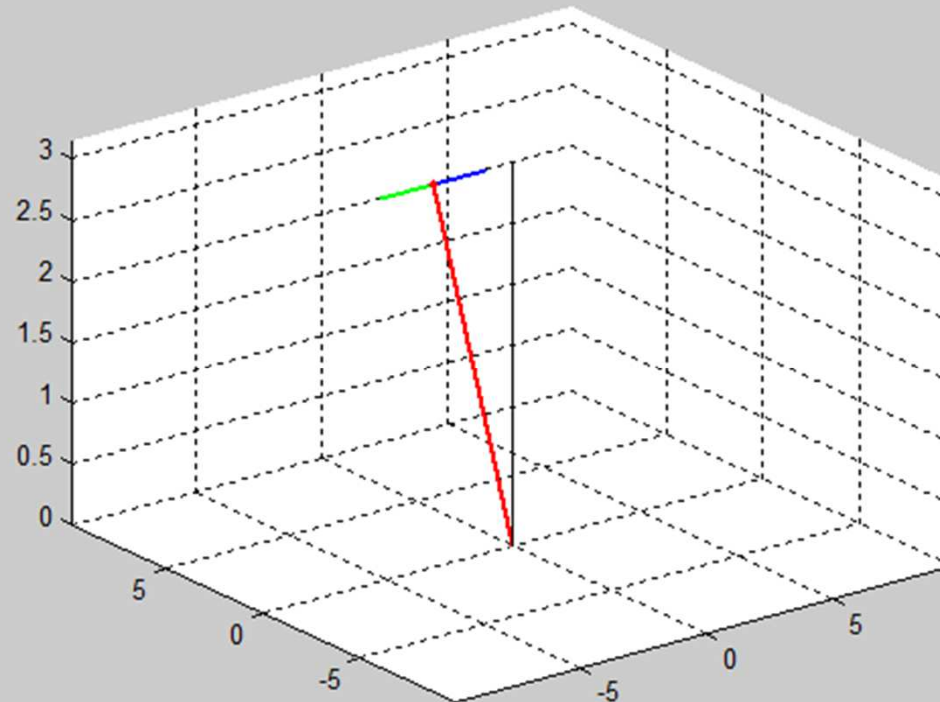
$$\frac{dm}{dt} = \overset{\text{precesja}}{-\gamma m \times H_{\text{eff}}} + \overset{\text{tłumienie}}{\alpha m \times \frac{dm}{dt}}$$





# Dynamika złącza tunelowego

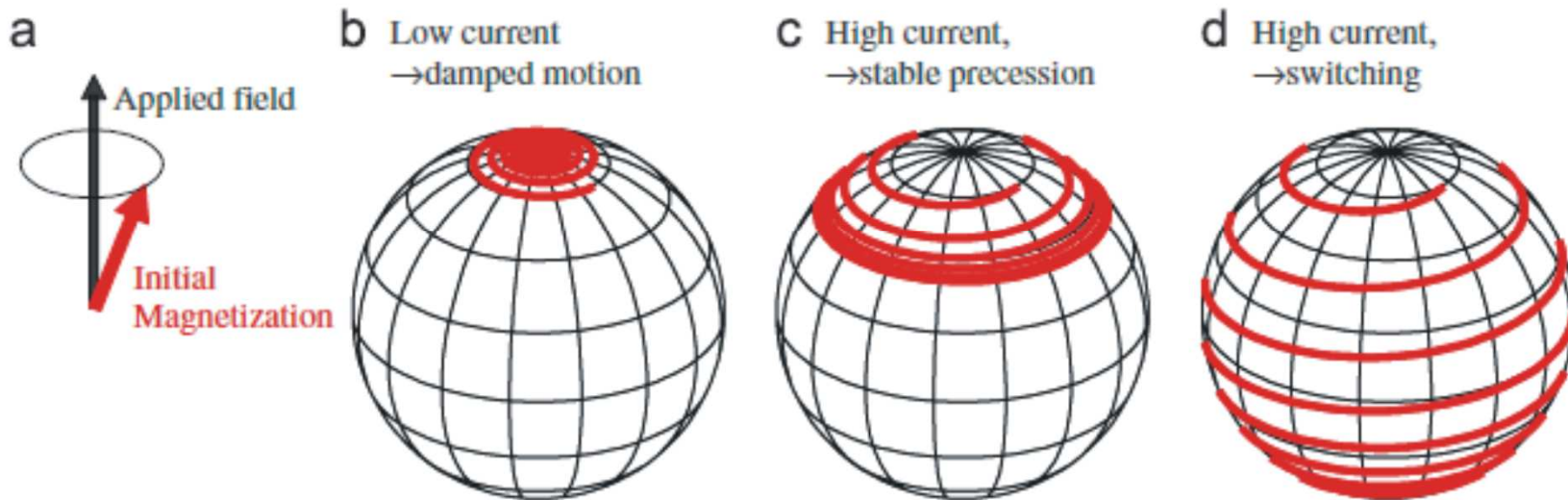
$$\frac{dm}{dt} = \underbrace{-\gamma m \times H_{eff}}_{\text{precesja}} + \underbrace{\alpha m \times \frac{dm}{dt}}_{\text{tłumienie}} - \underbrace{\gamma \frac{\tau_{\parallel}}{M_S Vol} m \times (m \times M)}_{\text{STT}} - \gamma \frac{\tau_{\perp}}{M_S Vol} m \times M$$



# Konsekwencje efektu STT

- Generacja/detekcja mikrofal
- Przełączenie magnetyzacji spinowo spolaryzowanym prądem

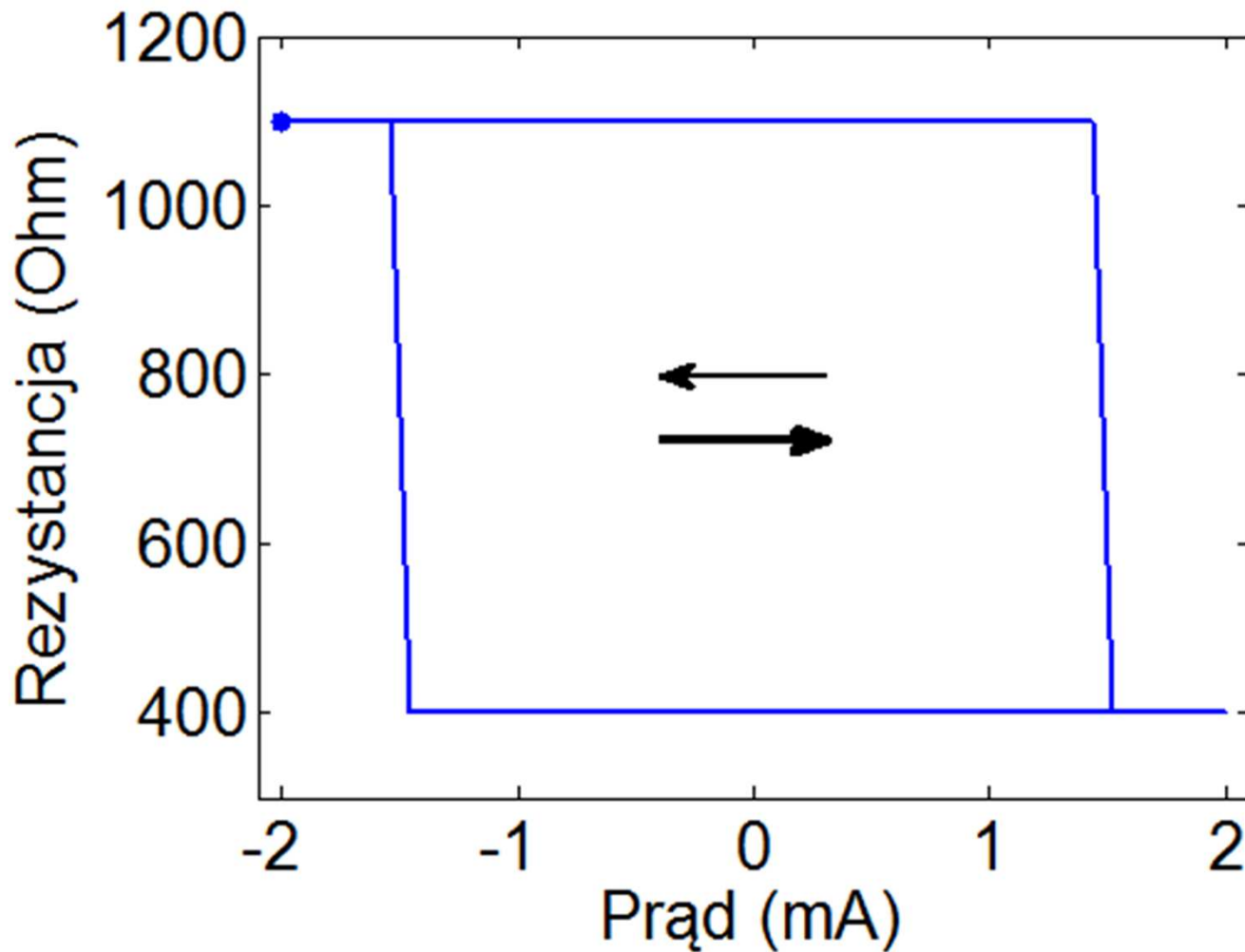
Moment in an applied field along  $z$  with no anisotropy



Ralph, Stiles *JMMM* 320, 1190 (2008)

# Przełączanie złącza prądem

I: -2.00 mA



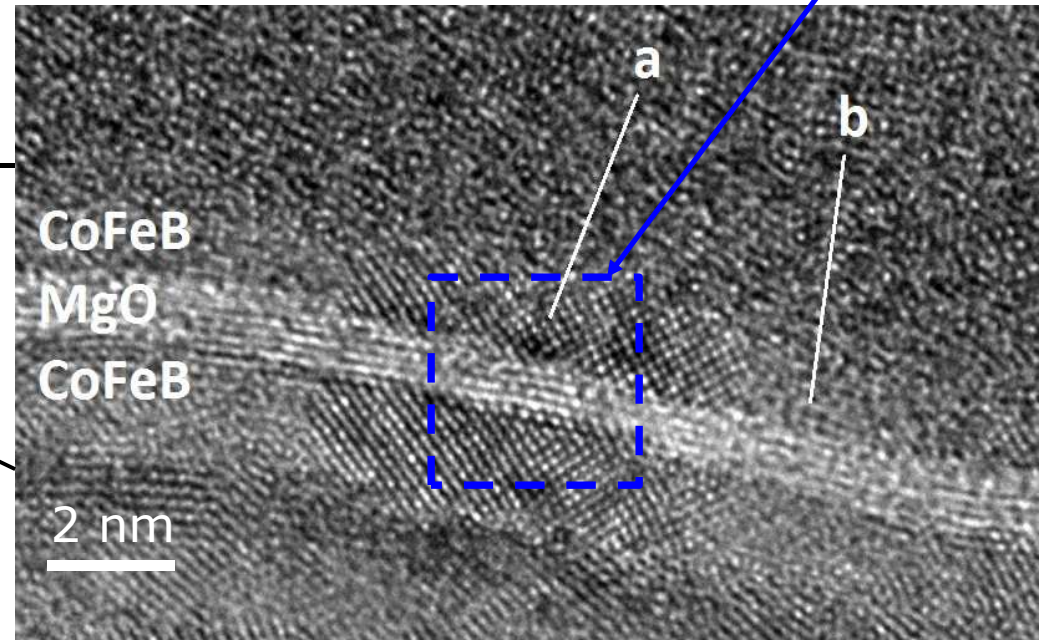
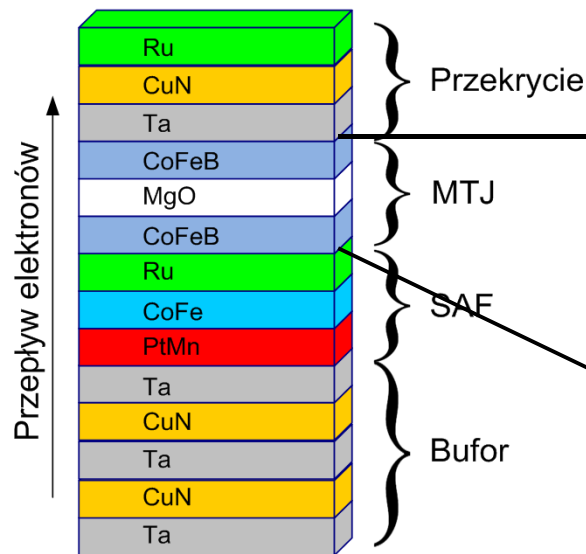
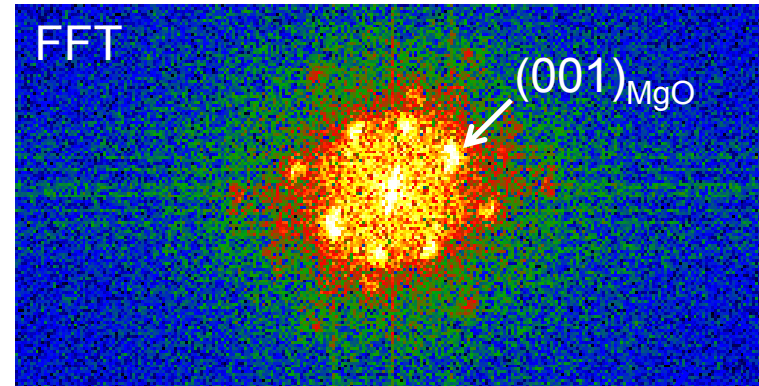
TMR = 175%

# Plan

- Magnetyczne złącze tunelowe
  - Tunelowa magnetorezystancja
  - Efekt spinowego momentu siły (spin-transfer-torque - STT)
- Technologia wytwarzania magnetycznych złącz tunelowych
- Wyniki badań
  - Precesja magnetyzacji cienkich warstw
  - Generator/detektor sygnałów mikrofalowych
  - Wpływ pola elektrycznego
- Podsumowanie

# Struktura warstwowa

- Warstwa swobodna oraz warstwa referencyjna ze stopu CoFeB (J. Wrona Singulus)
- Multiwarstwy Fe/MgO/Fe (prof. Korecki)



TEM – L. Yao, S. van Dijken

# Nano-litografia

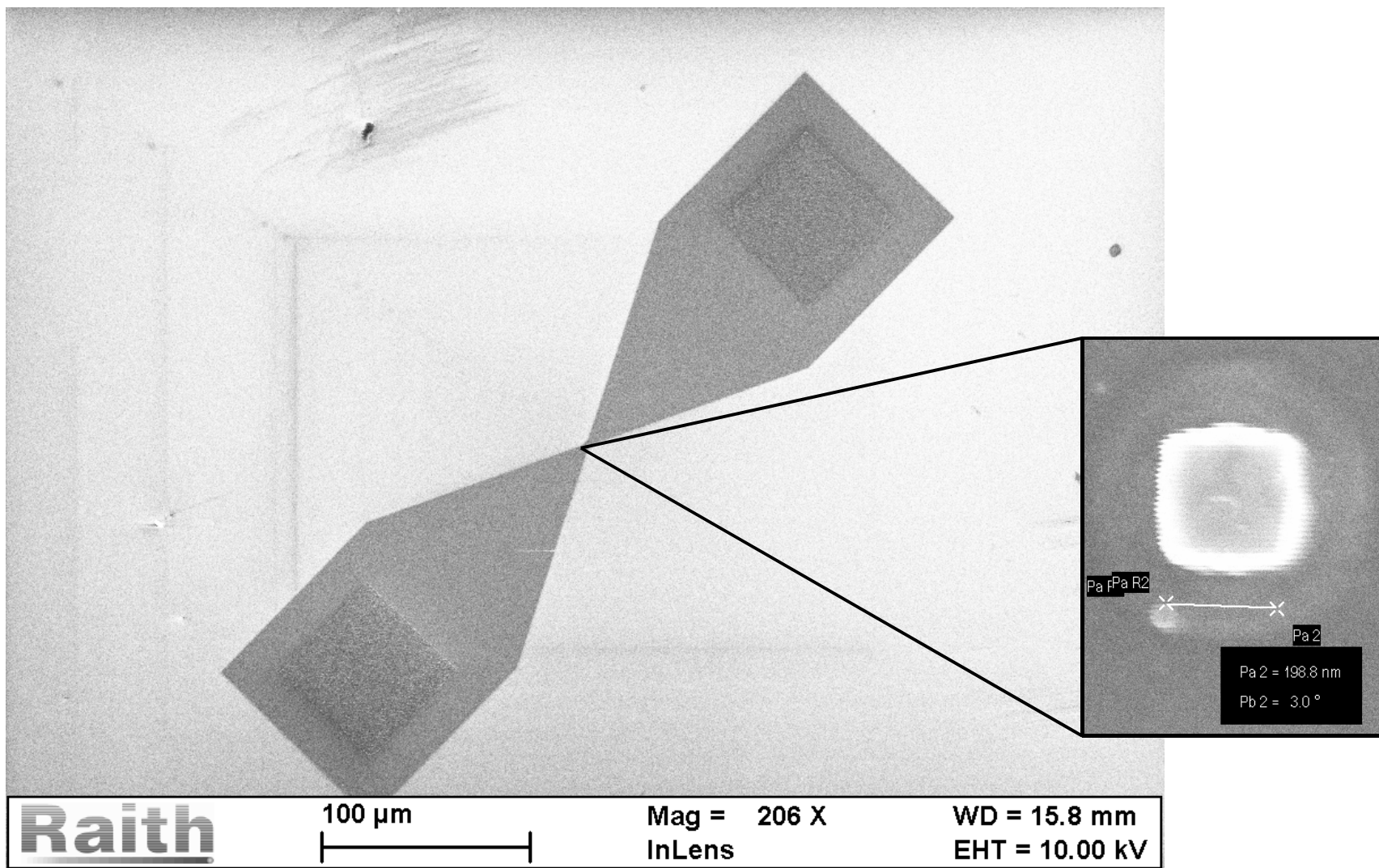
- Rozmiary rzędu nm potrzebne ze względu na:
  - Niski opór cienkiej bariery MgO
  - Jednorodne zachowanie namagnesowania
- Nanostrukturyzacja złącz o rozmiarach rzędu nm:
  - Litografia elektronowa
  - Trawienie jonowe
  - Nanoszenie dodatkowych warstw metal/izolator
- Cały proces dostępny w ACMIN

# Litografia elektronowa

- System Raith eLINE plus
- Rozmiary elementów do 50 nm



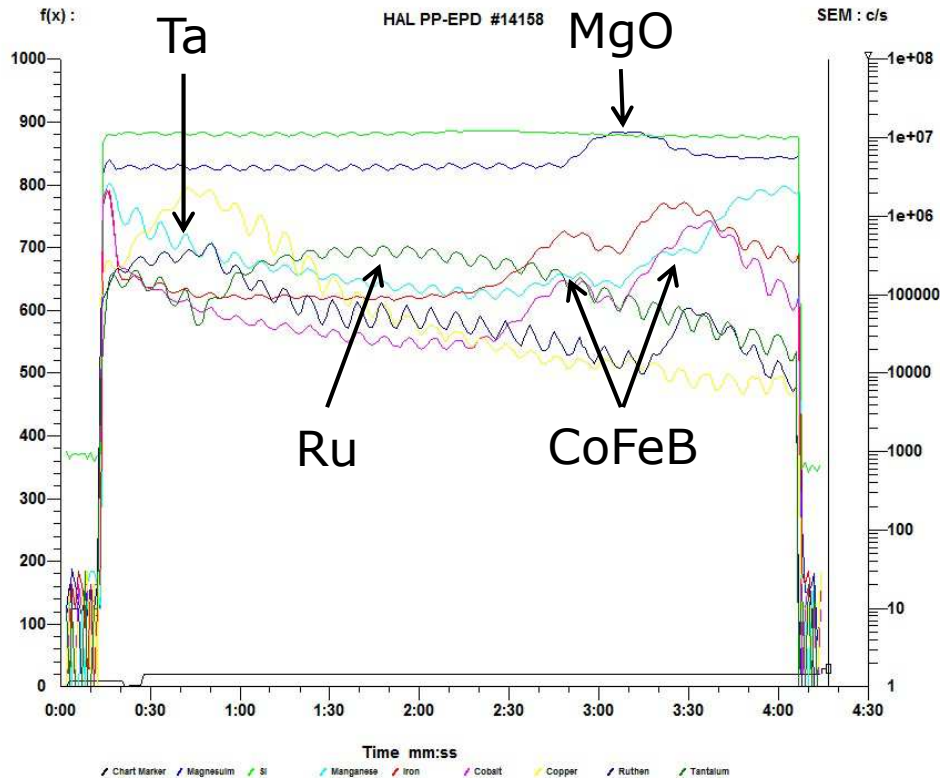
# Nano-złącza tunelowe





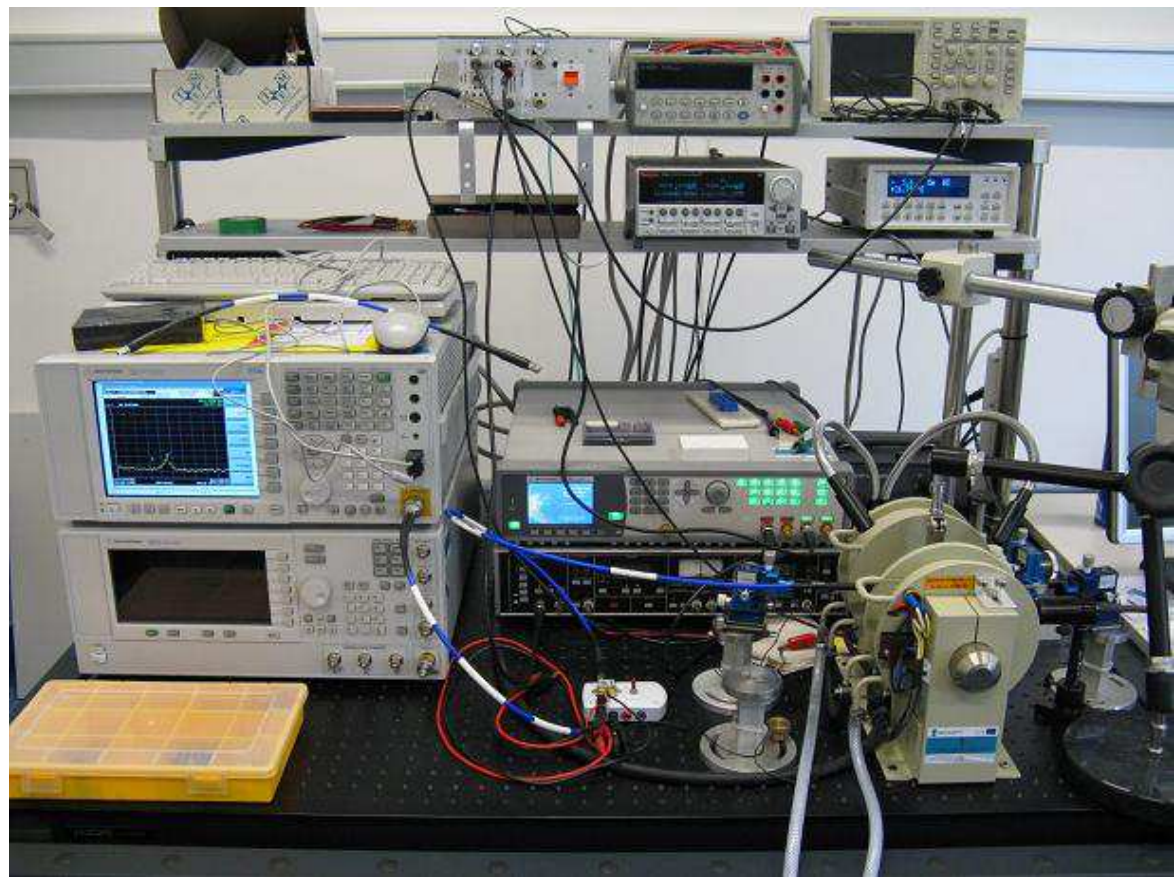
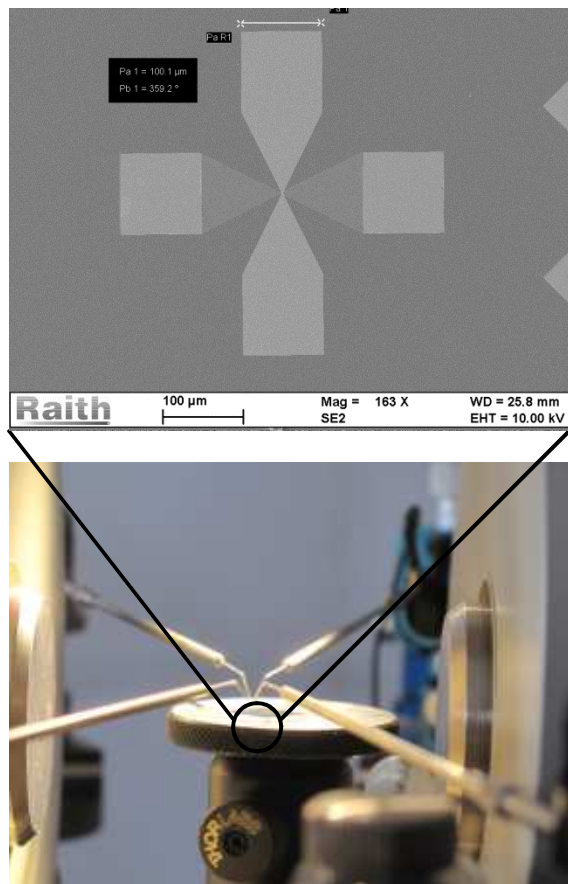
# Trawienie jonowe

- Trawienie jonami  $\text{Ar}^+$
- Detektor masowy Hiden Analytix



## Stanowisko pomiarowe

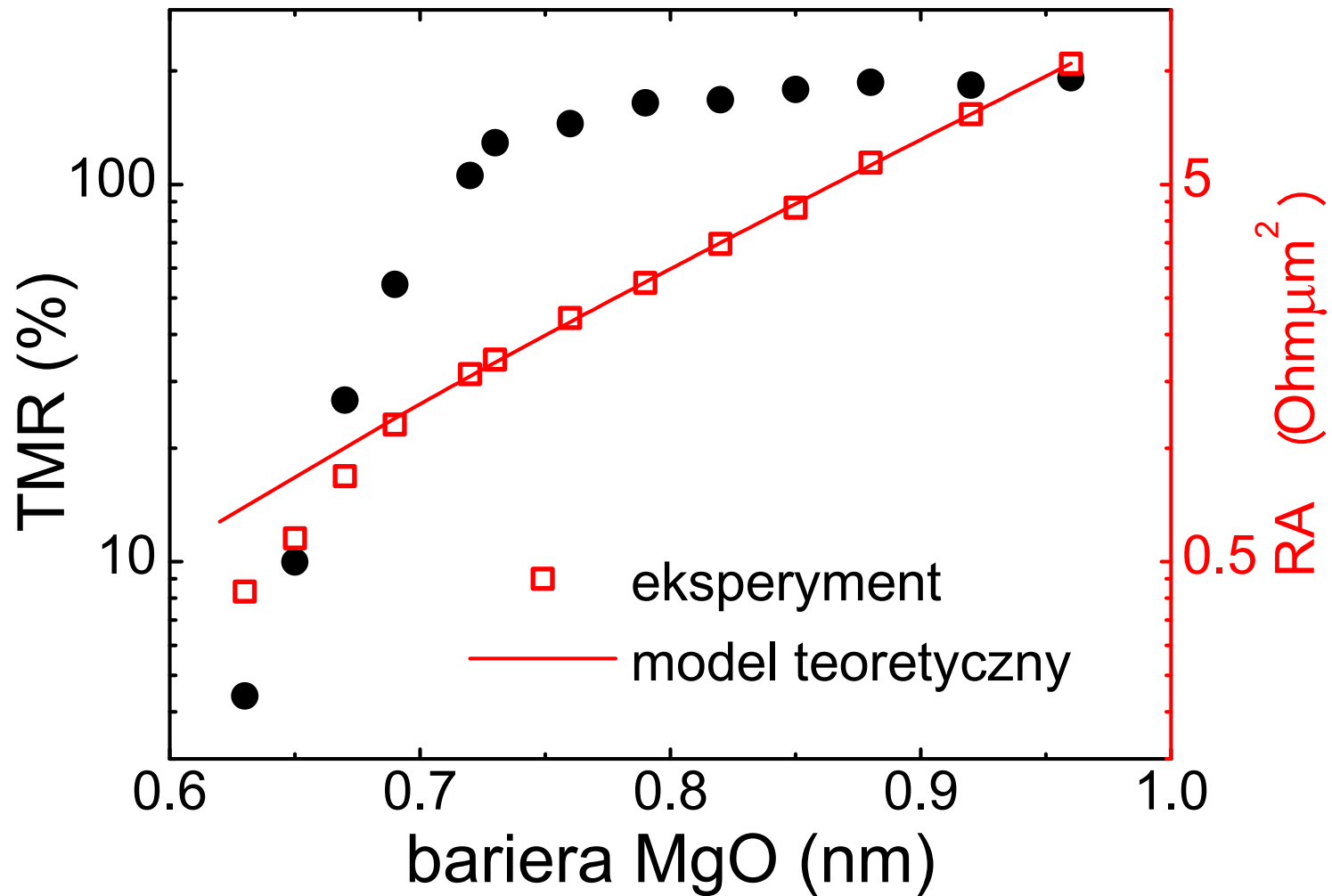
- Zautomatyzowane stanowisko (LabVIEW) do pomiarów magneto-transportowych



# Plan

- Magnetyczne złącze tunelowe
  - Tunelowa magnetorezystancja
  - Efekt spinowego momentu siły (spin-transfer-torque - STT)
- Technologia wytwarzania magnetycznych złącz tunelowych
- Wyniki badań
  - Precesja magnetyzacji cienkich warstw
  - Generator/detektor sygnałów mikrofalowych
  - Wpływ pola elektrycznego
- Podsumowanie

## Zmienna grubość bariery

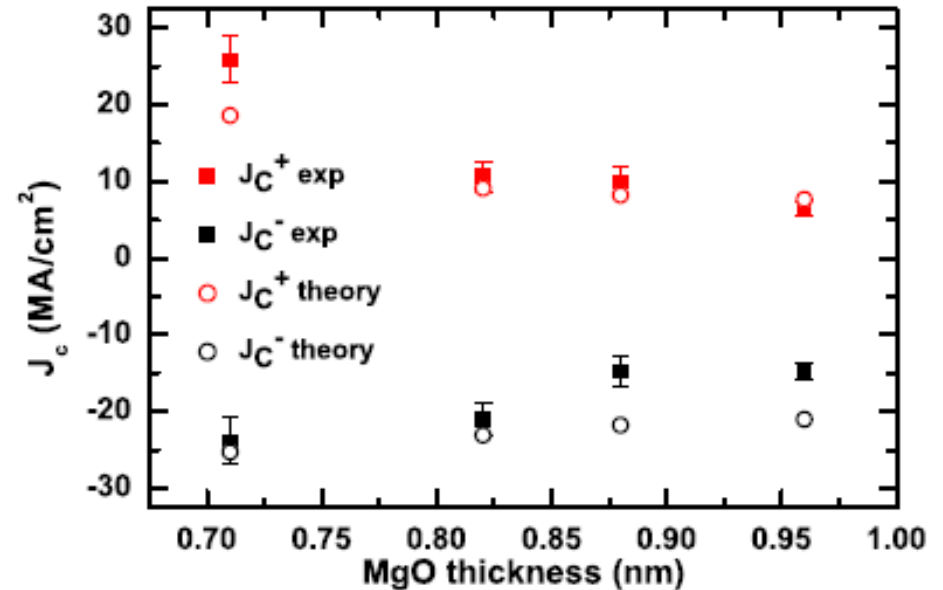
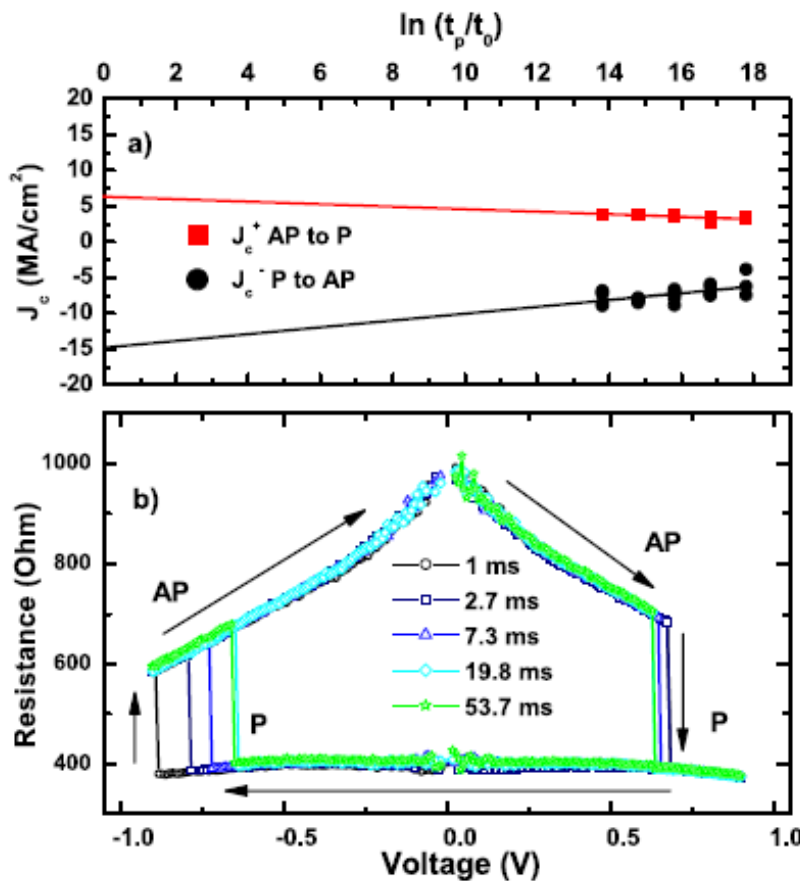


# Przełączanie złącza

- Jak wpływa grubość bariery tunelowej na prąd krytyczny?

$$J_{c0} = \frac{2e\alpha\mu_0 M_S t_{FL} H_{eff}}{\hbar\eta}$$

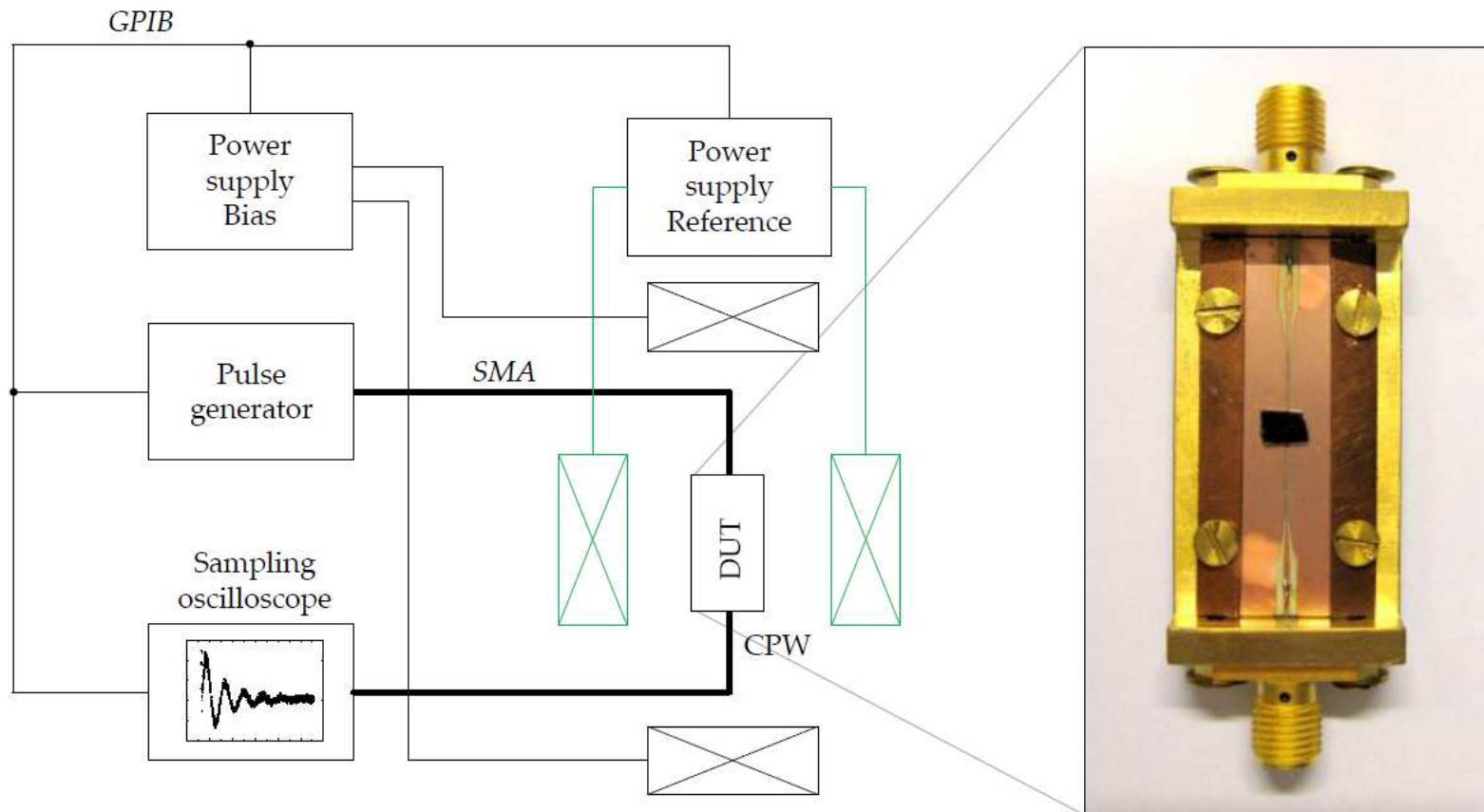
$$\eta = \frac{p}{2(1 - p^2 \cos \theta)} \quad p = \sqrt{\frac{TMR}{2 + TMR}}$$



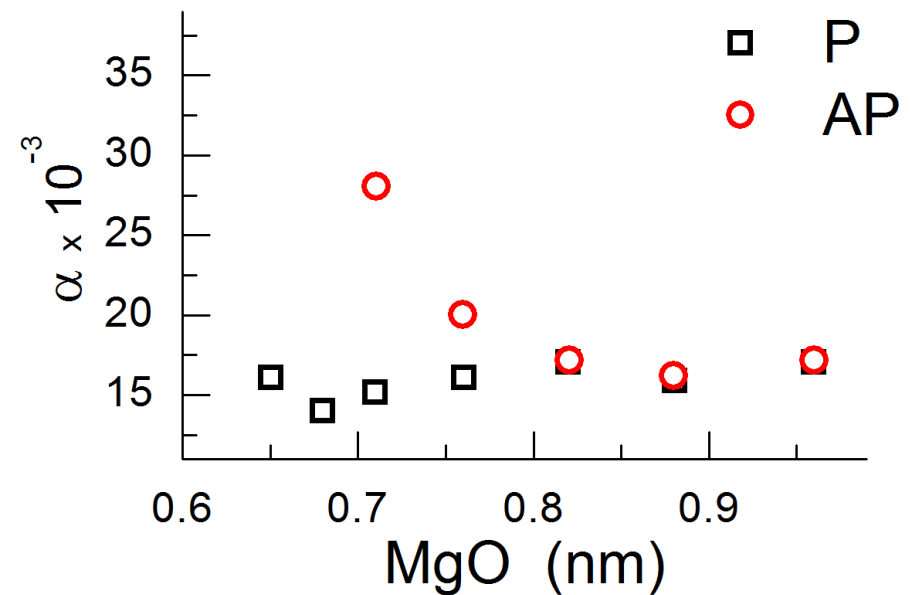
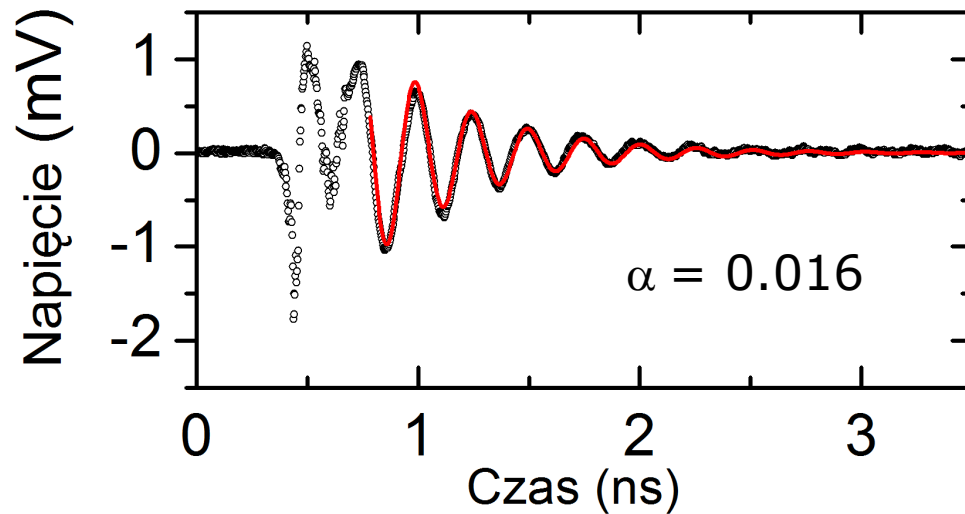
Skowroński et al. JAP **107**, 093917 (2010)

# Pomiar dynamiki tłumienia

- Mikrofalowy układ precesji spinowej

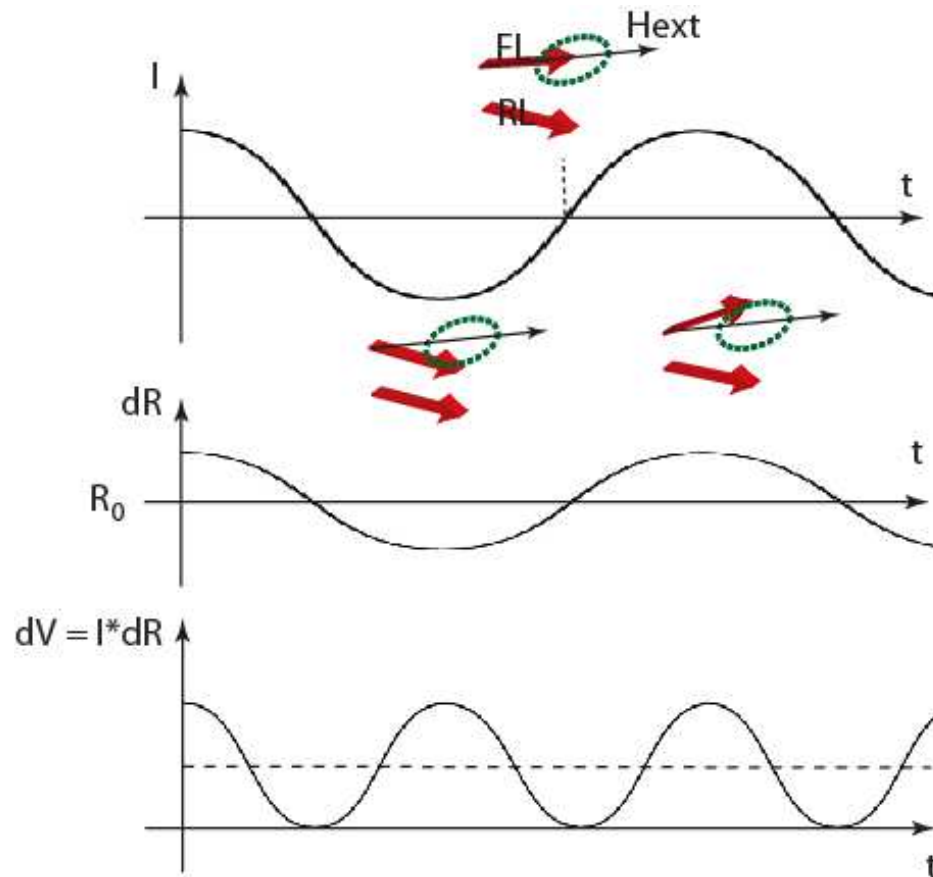


# Pomiar tłumienia



S. Serrano-Guisan, W. Skowroński  
et al. JAP **110**, 023906 (2011)

# Efekt diody spinowej



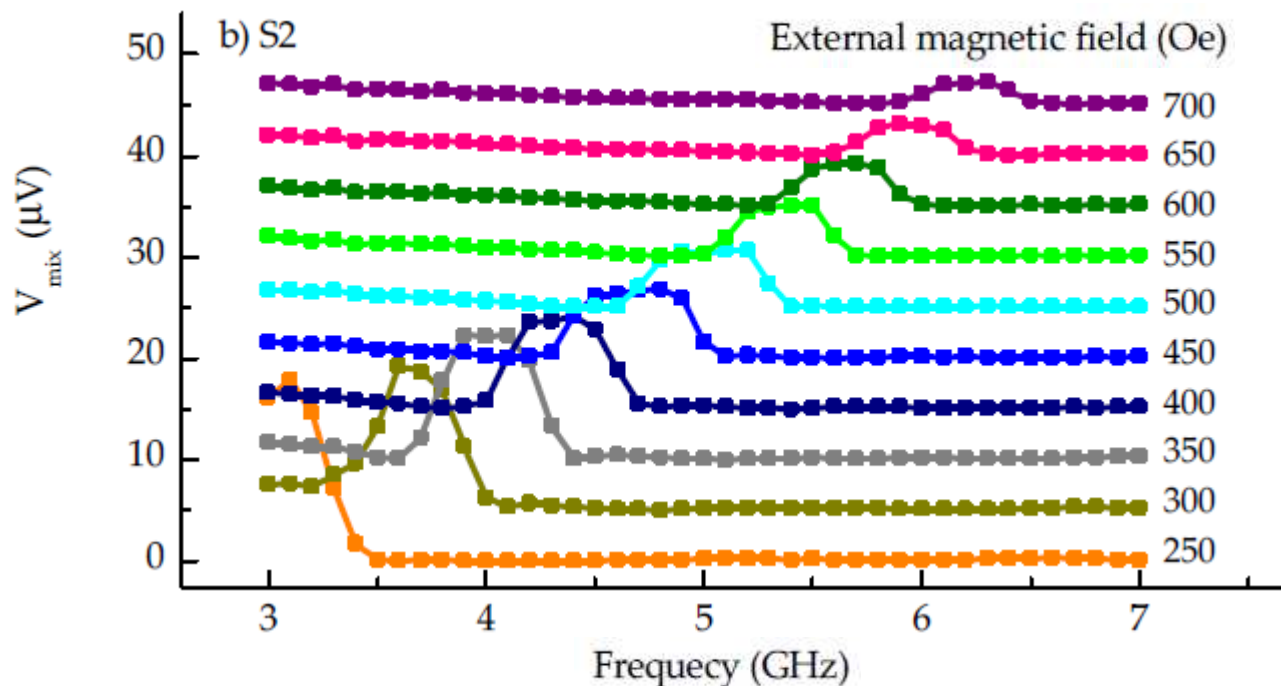
- MTJ zasilane sygnałem mikrofalowym
- Precesja namagnesowania w fazie z sygnałem wejściowym – mieszanie powoduje powstanie sygnału DC

*Tulapurkar et al. Nature*  
**438**, 339, 2005



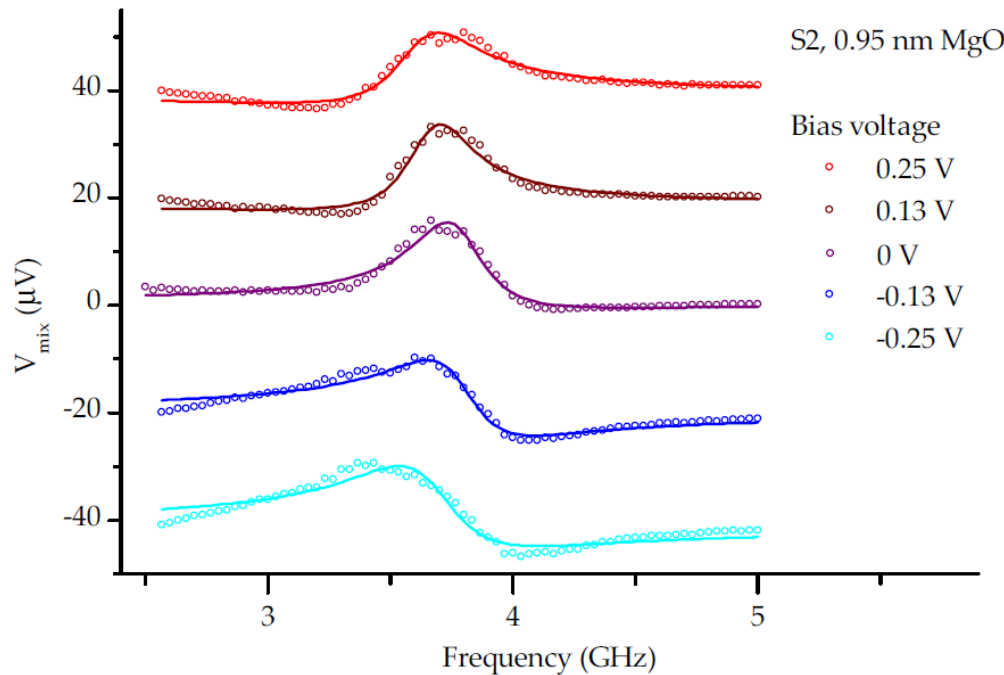
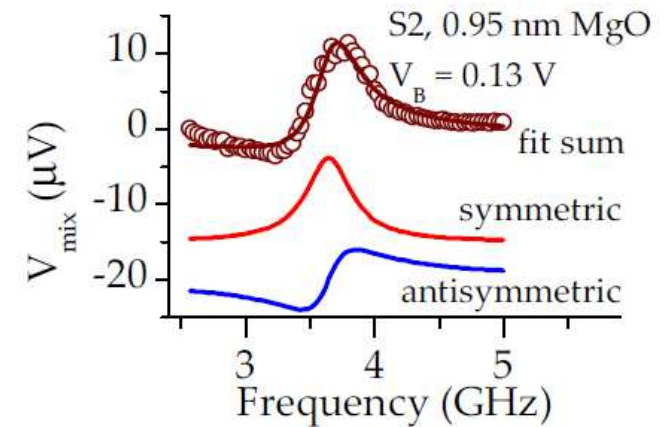
# Lokalny ST-FMR

- Dzięki efekty SOT lokalnie mierzony jest rezonans ferromagnetyczny
  - Anizotropia magnetyczna
  - tłumienie



# ST-FMR + napięcie DC

- Możliwy pomiar parametrów STT w funkcji napięcia



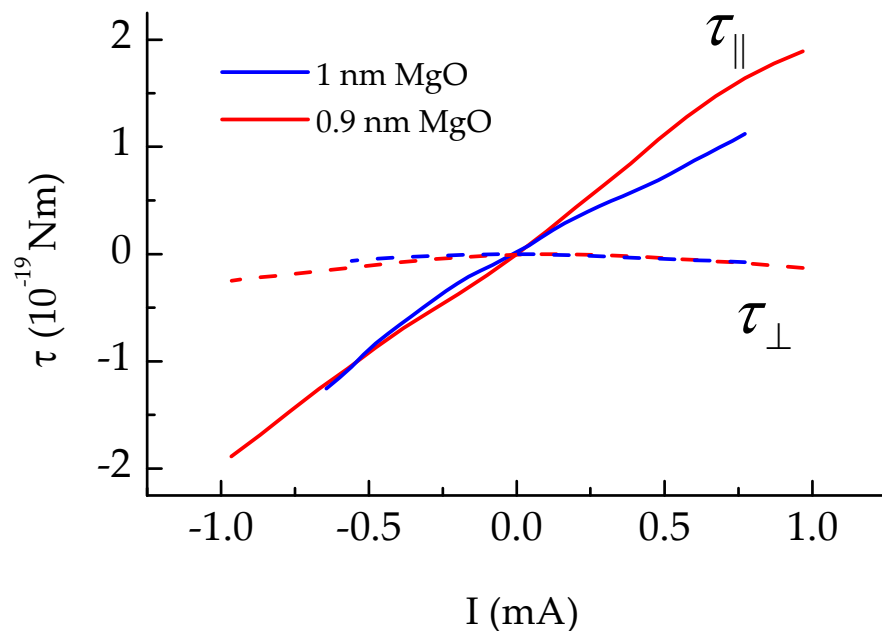
$$V_{mix} = \frac{1}{4} \frac{\partial^2 V}{\partial I^2} I_{RF}^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial I \partial \theta} \frac{\hbar \gamma \sin \theta}{4eM_s V_0 l \sigma} I_{RF}^2 [\xi_{\parallel} S(\omega) - \xi_{\perp} \Omega_{\perp} A(\omega)]$$

$$\xi_{\parallel} = \frac{2e}{\hbar} \sin \theta \frac{dV}{dI} \frac{d\tau_{\parallel}}{dV} \quad \xi_{\perp} = \frac{2e}{\hbar} \sin \theta \frac{dV}{dI} \frac{d\tau_{\perp}}{dV}$$

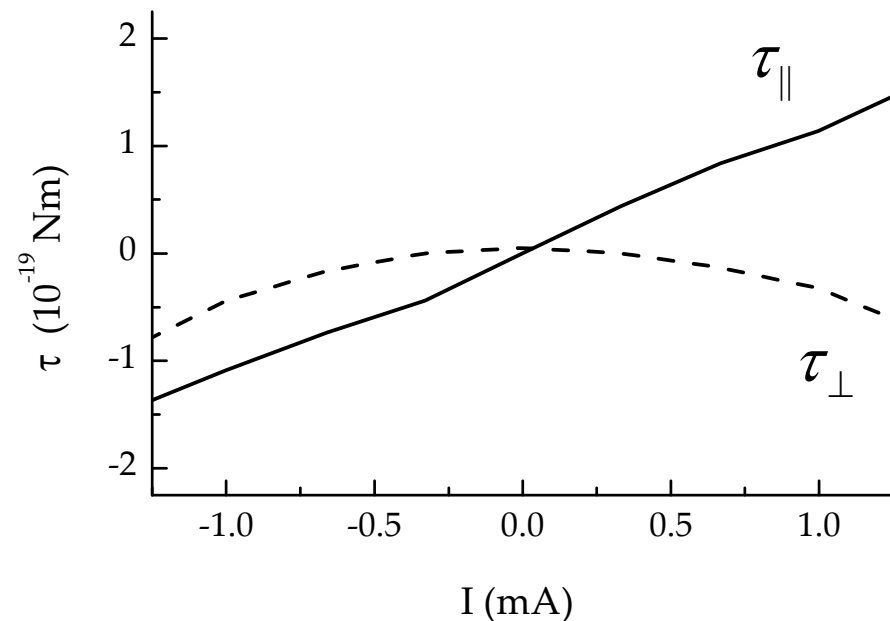
Wang et al. PRB 79, 224416, 2009

# Pomiary komponentów STT

eksperyment



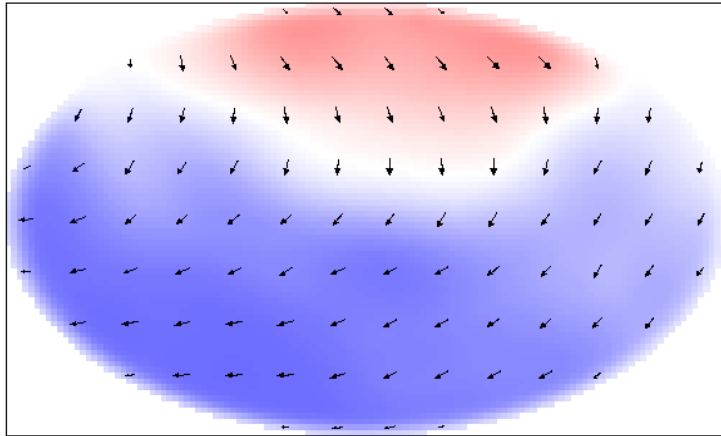
teoria



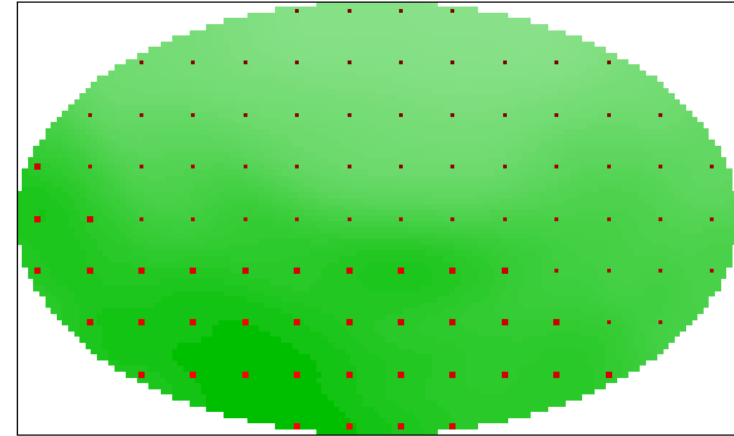
Skowroński et al. PRB **87**, 094419 (2013)

# Symulacje mikromagnetyczne

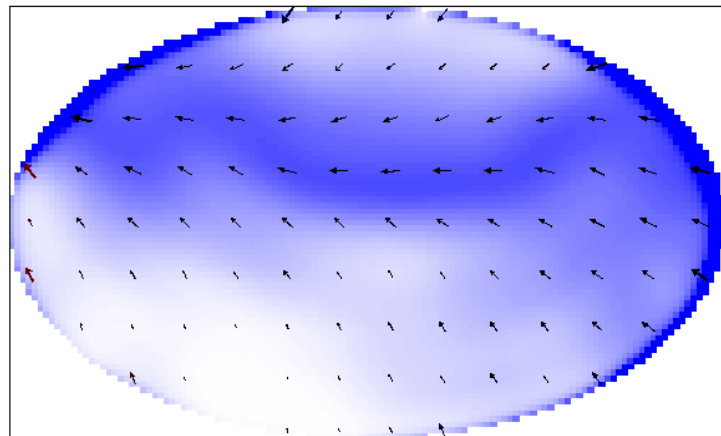
free layer magnetization distribution



current density distribution

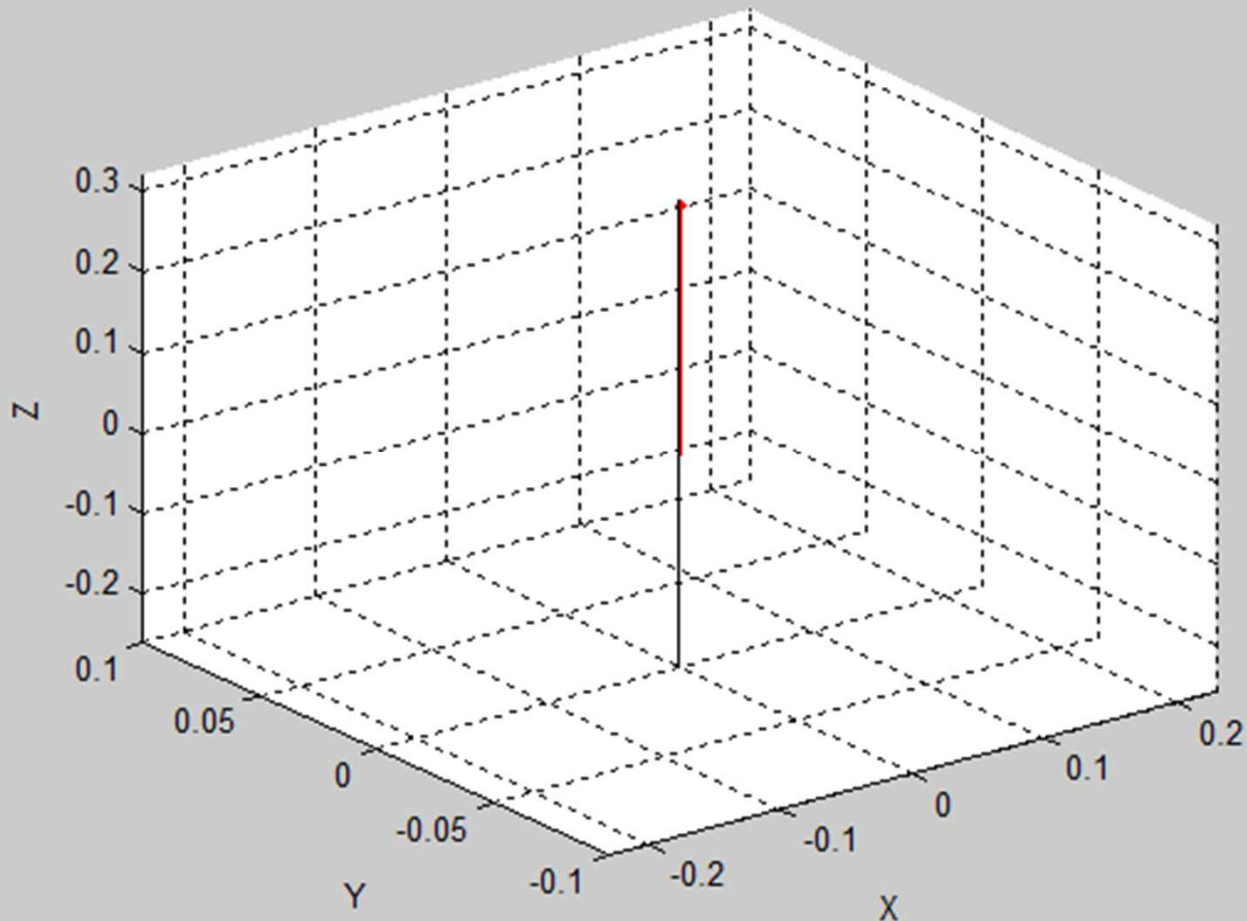


in-plane torque in free layer distribution



- Symulacje mikromagnetyczne w środowisku OOMMF
- M. Frankowski, M. Czapkiewicz

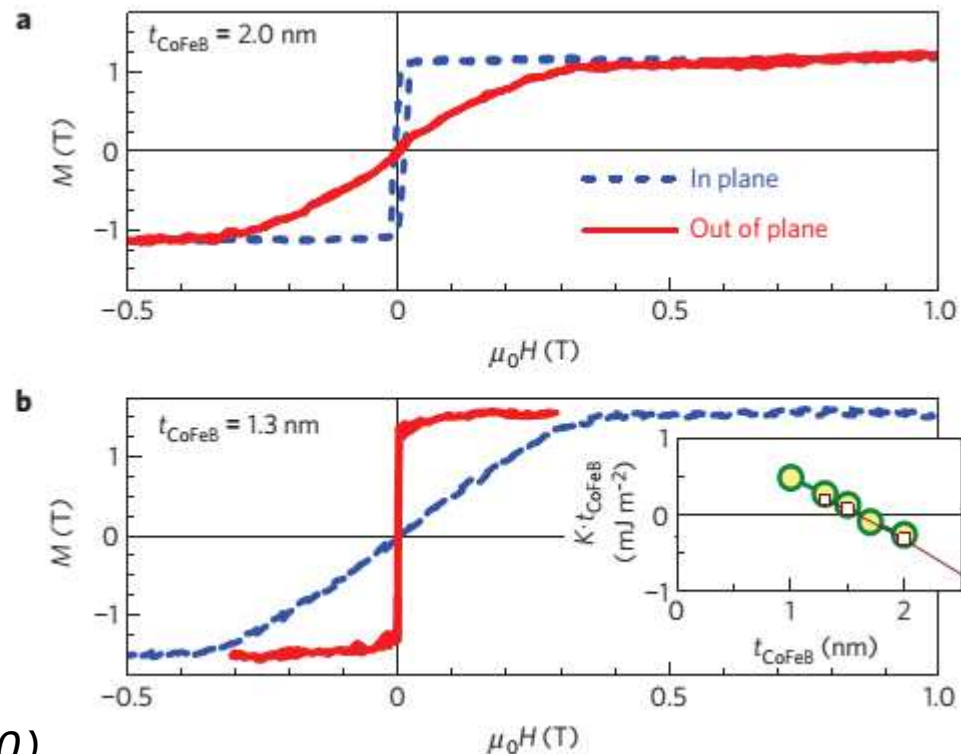
# Przełączanie dynamiczne



*M. Frankowski, M. Czapkiewicz, W. Skowroński, T. Stobiecki: Physica B (2013)*

# Anizotropia magnetyczna

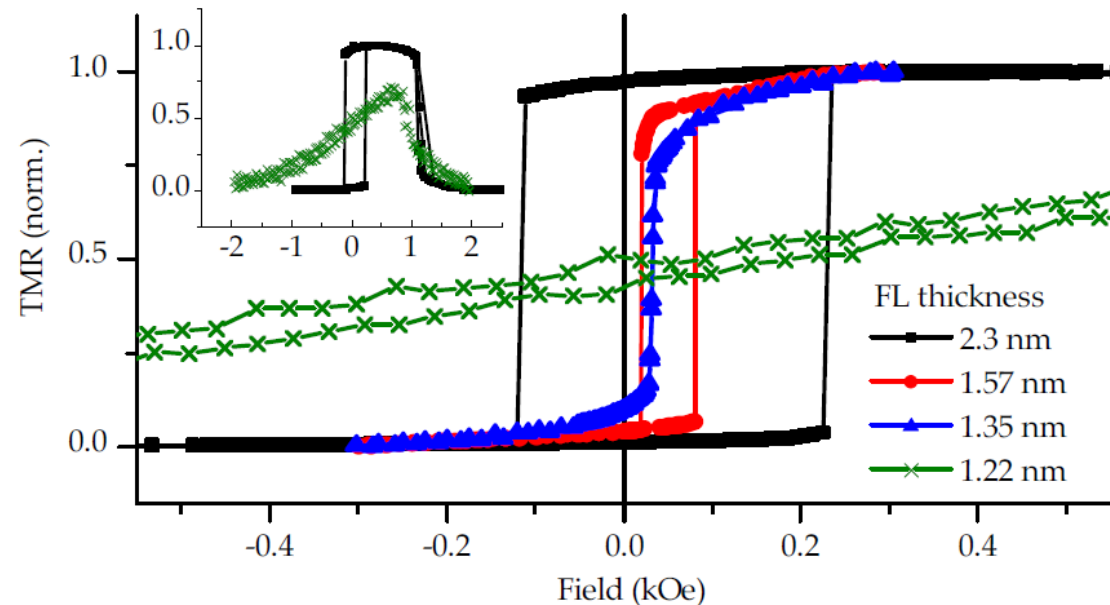
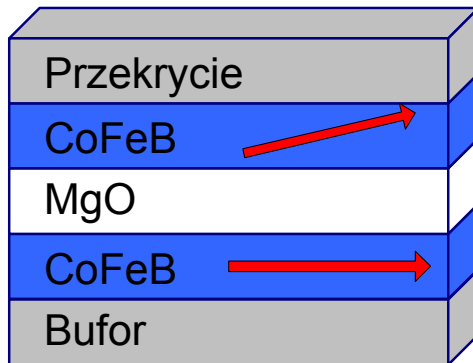
- Wraz ze zmniejszaniem grubości warstwy ferromagnetyka (CoFeB) anizotropia zmienia się z płaszczyzny do kierunku prostopadłego
- Lepsza stabilność termiczna
- Mniejszy prąd przełączania



*Ikeda et al. Nature Mater. 11, 1 (2010)*

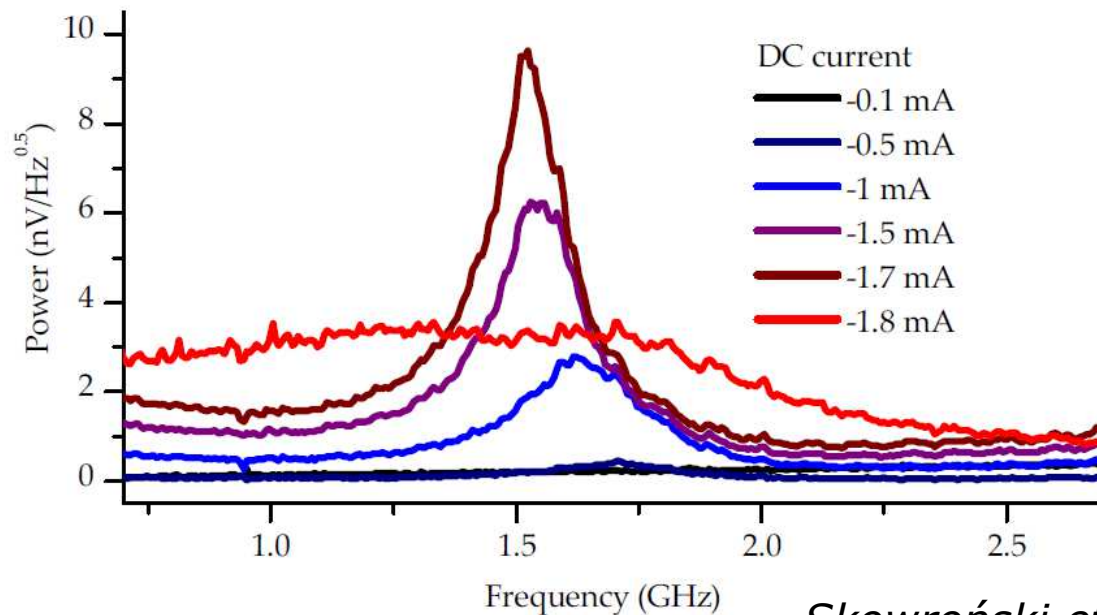
# Anizotropia warstwy swobodnej

- Krytyczna grubość przejścia dla CoFeB ok. 1.3 nm
- Ferromagnetyczne sprzężenie pomiędzy warstwą swobodną i referencyjną



## Generator RF z MTJ

- Dzięki anizotropii prostopadłej oraz sprzężeniu przez barierę MgO zaproponowano generator RF działający bez zew. pola magnetycznego

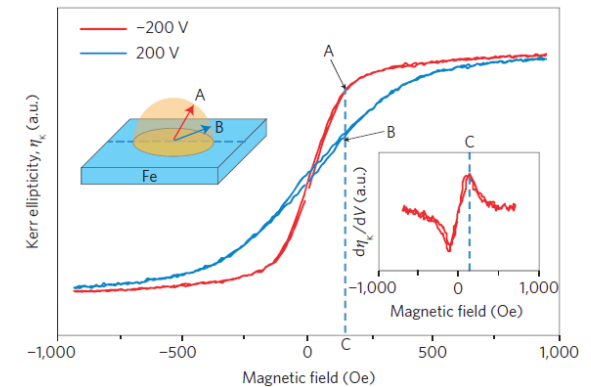
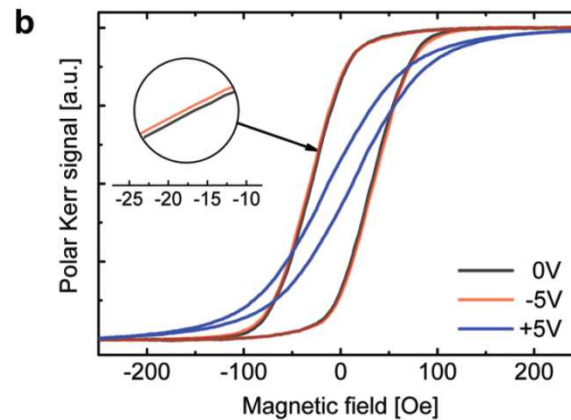
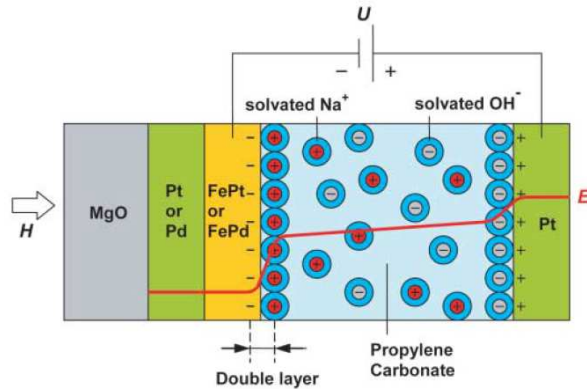


Skowroński et al. APEX **5**, 063005 (2012)

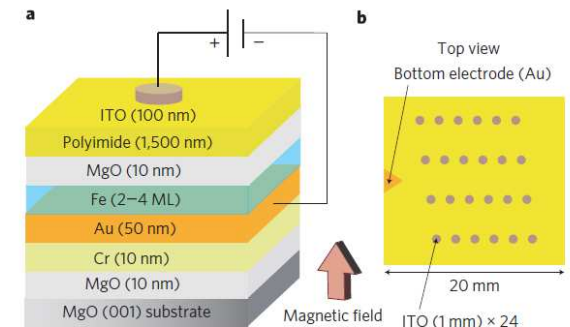


# Wpływ pola elektrycznego

- Pole elektryczne wpływa na anizotropię magnetyczną cienkiej warstwy ferromagnetycznej



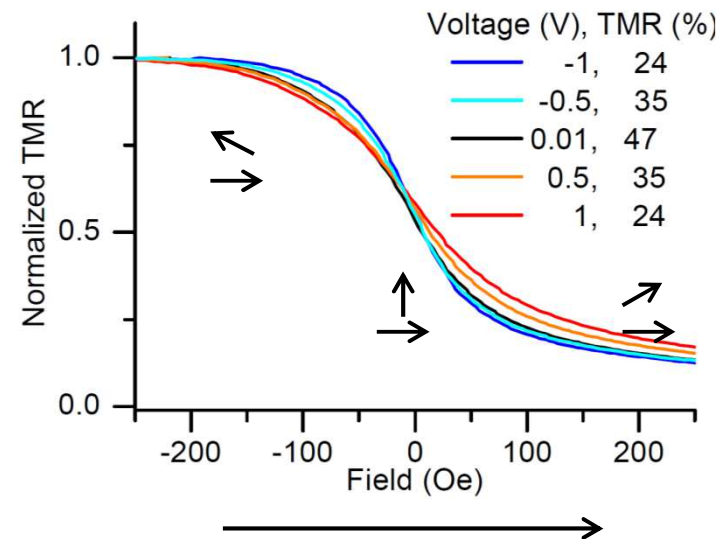
*Weisheit et al. Science 315, 349, 2007*  
*Murayama et al. Nat. Mater. 4, 158, 2008*  
*Bauer, Przybylski et al. Nano Lett. 1437, 2012*



## Kontrolowanie anizotropii w MTJ

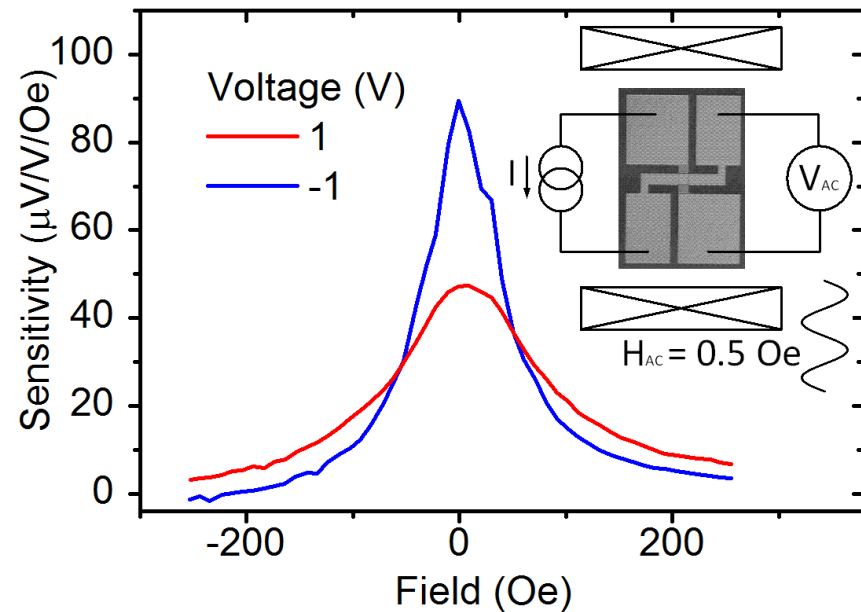
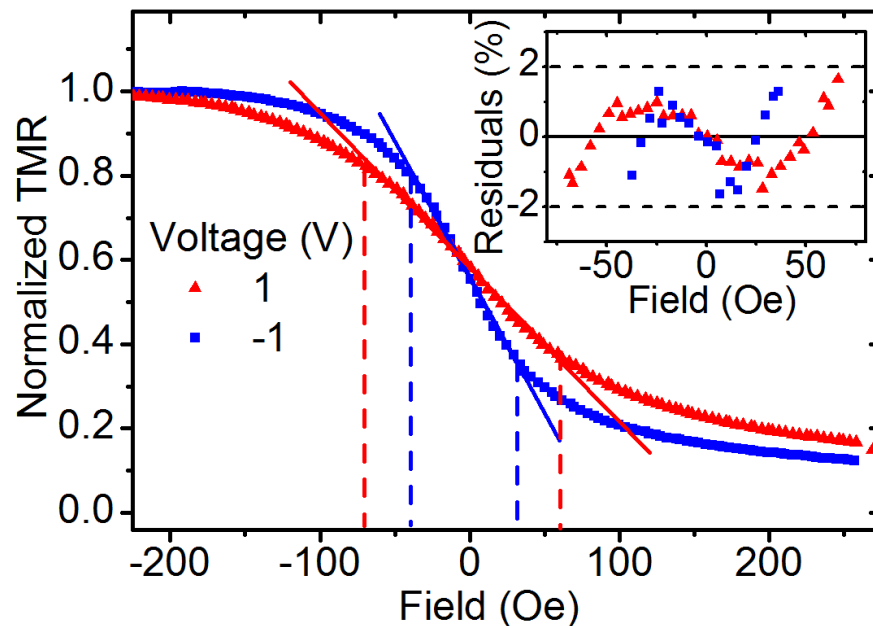
- CoFeB 2.3 (RL)/ MgO 2 / CoFeB 1.35 (FL)
- Zmiana grubości FL powoduje przejście z anizotropii w płaszczyźnie do prostopadłej
- Napięcie zmienia anizotropię warstwy FL

$$R = R_P + \frac{R_{AP} - R_P}{2} (1 - \cos \theta)$$



# Sterowany czujnik pola

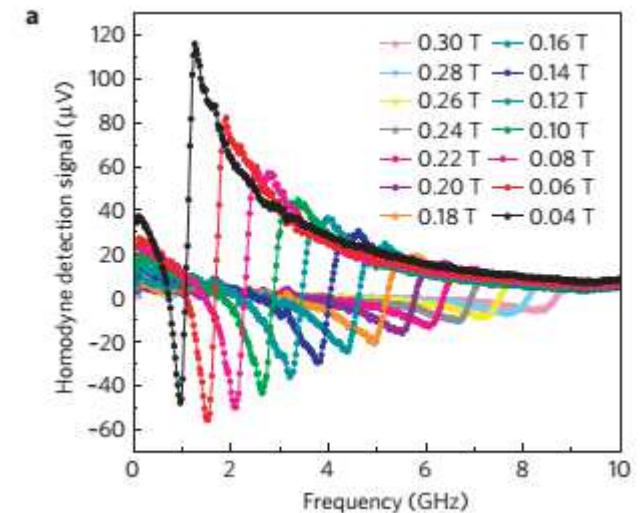
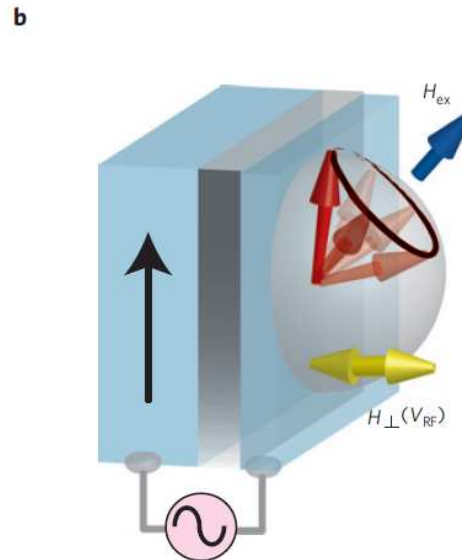
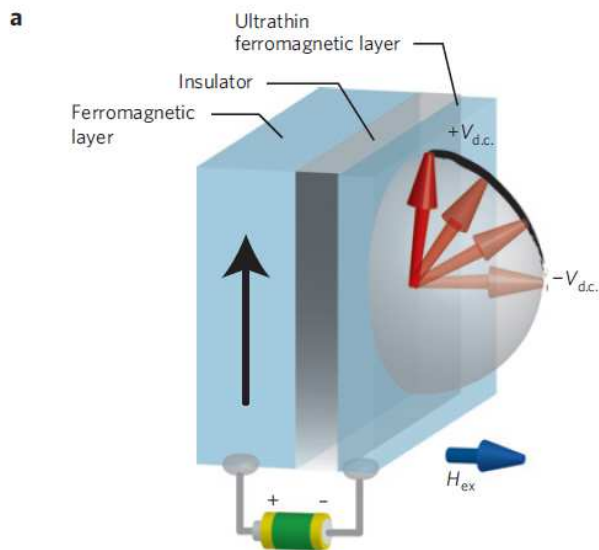
- Czujnik pola o sterowanych parametrach:
  - V+: większy zakres, mniejsza czułość
  - V-: mniejszy zakres, większa czułość



Skowroński, Wiśniowski et al. APL 101, 192401, 2012

# Precesja magnetyzacji wywołana polem E

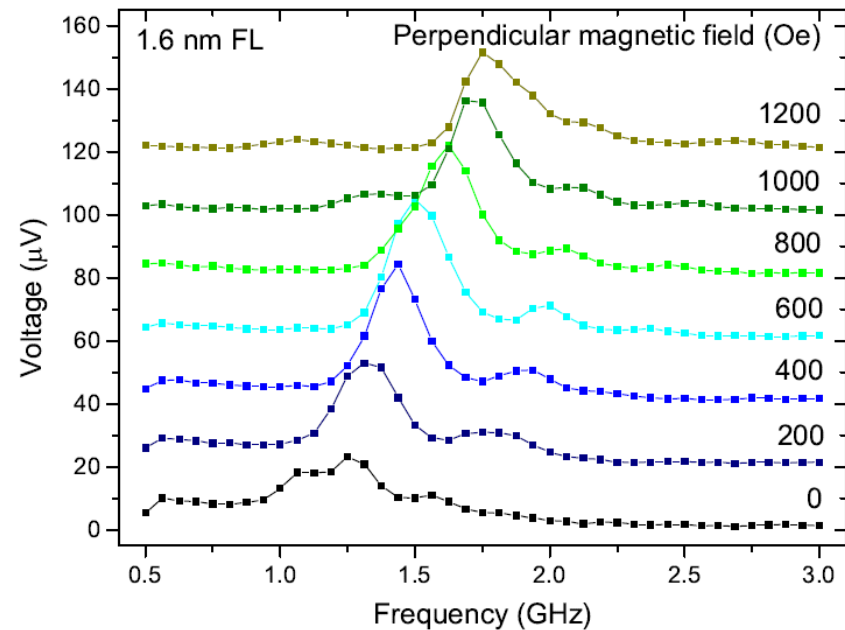
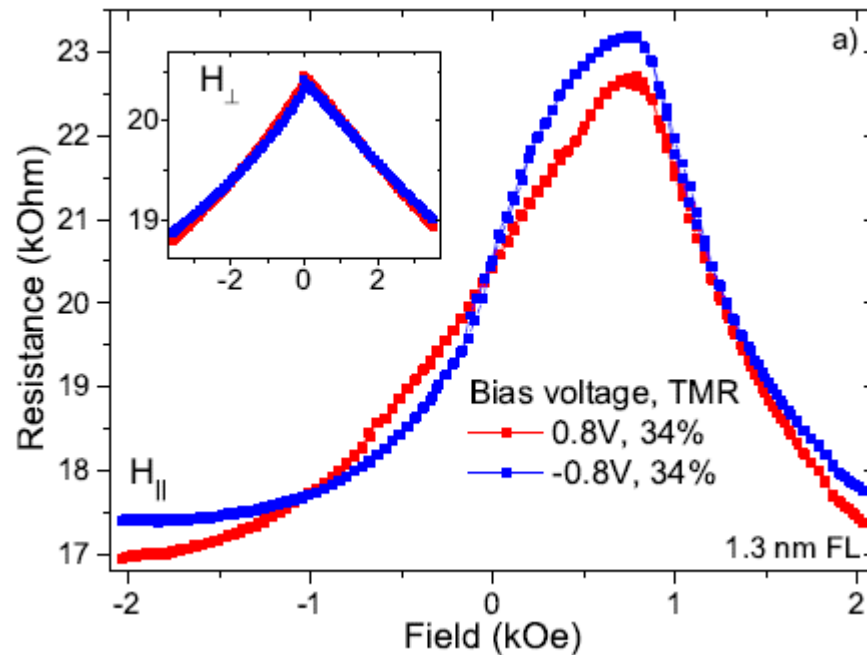
- Sygnał zmienny zasilający MTJ wywołuje precesję namagnesowania w FL



Nozaki et al. Nature Phys 8, 491, 2012

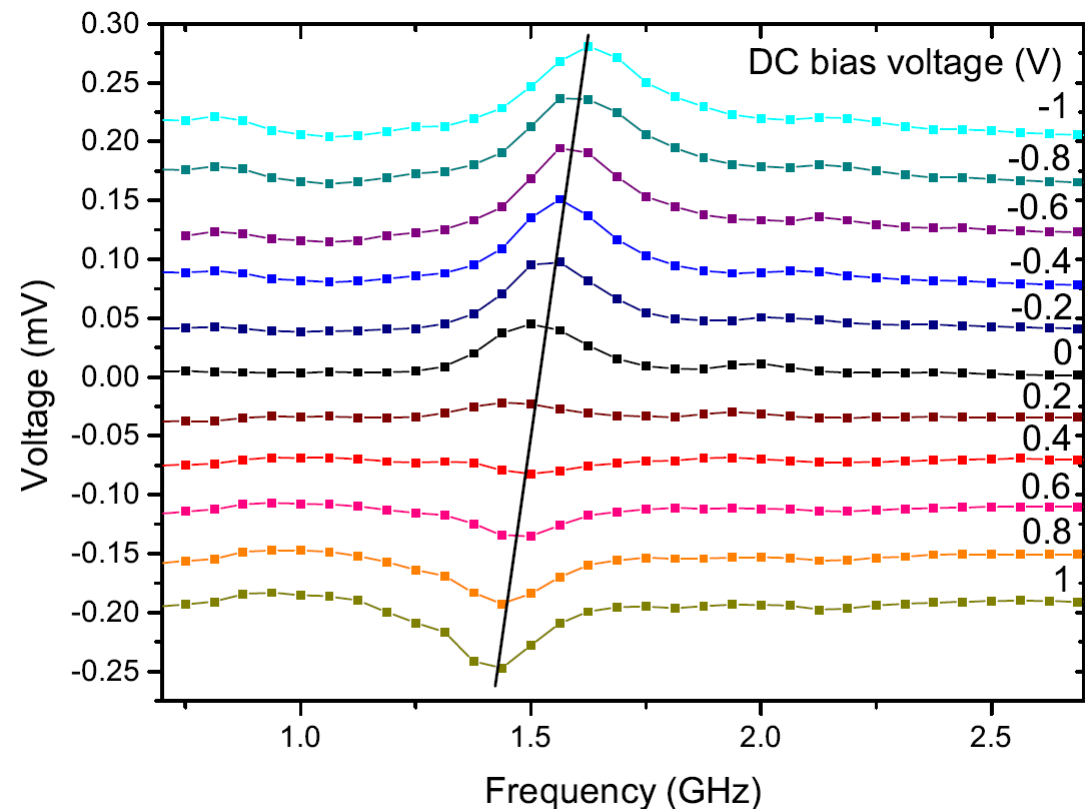
# Pomiary FMR

- CoFeB 2.3 (RL) / MgO 2 / CoFeB 1.6 (FL)
- Moc sygnału  $P_{in} = -10$  dBm,  
częstotliwość  $0.5 < f < 3$  GHz



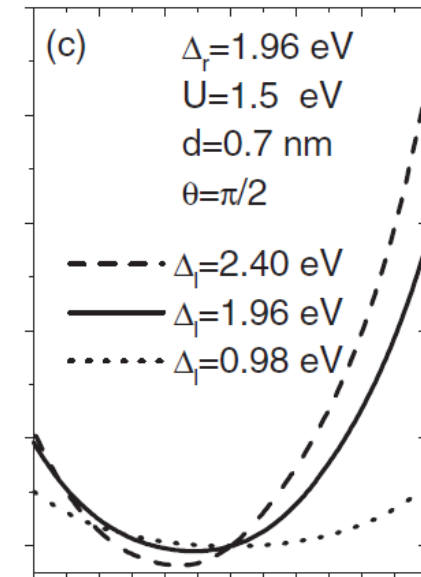
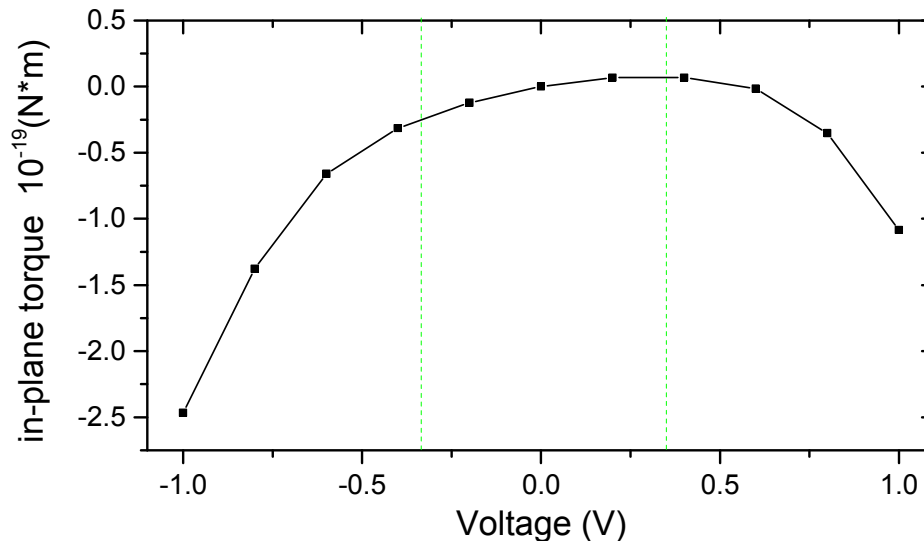
## Wpływ statycznego pola E

- FMR wywołany przez efekt STT
- Zmiana częstotliwości  $df = 97 \text{ MHz/V}$  wywołana polem E
- Koegzystencja efektów STT i VCMA



# STT dla dużych napięć

- Zmierzony FMR pochodzi od prądu (STT)
  - Inny kształt krzywej rezonansowej
  - Inna zależność kątowa
- Komponent STT zmierzony dla
- $-1 < V < 1 \text{ V}$



*Wilczyński et al.*  
*PRB 77, 054434,*  
*2008*

## Podsumowanie

- Podstawowe efekty wykorzystywane w elektronice spinowej: MR, STT
- Technologia wytwarzania i nanostrukturyzacji magnetycznych złącz tunelowych
- Dynamika w złączach wywołana spinowo spolaryzowanym prądem:
  - Generator
  - Detektor mikrofal
- Wpływ pola elektrycznego na anizotropię



## Ludzie

- T. Stobiecki, J. Wrona, M. Czapkiewicz, M. Frankowski, P. Wiśniowski, W. Powroźnik, J. Kanak, A. Żywczak
  - Katedra Elektroniki AGH
- S. van Dijken, L. Yao, Q. Qin
  - Nanomagnetism and spintronics, Uniwersytet Aalto, Finlandia
- G. Reiss, A. Thomas, K. Rott
  - Uniwersytet w Bielefeld, Niemcy
- S. Serrano-Guisan, H. Schumacher
  - PTB Braunschweig, Niemcy

# Podziękowania

- Fundacja na rzecz Nauki Polskiej, grant doktorski MPD Krakow Interdisciplinary PhD-Project in Nanoscience and Advanced Nanostructures
- Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, grant Iuventus Plus (2011)
- Narodowe Centrum Nauki, grant Harmonia E-CONTROL-2012/04/M/ST7/00799)
- NANOSPIN - Nanoscale spin torque devices for spin electronic PSPB-045/2010

Dziękuję.