Indukowana prądem dynamika momentu magnetycznego w złączach tunelowych

mgr inż. Piotr Ogrodnik

Warszawa, 19-05-2015

Promotor: prof. dr hab. Renata Świrkowicz

NARODOWE CENTRUM NAUKI

SWISS CONTRIBUTION

Plan wystąpienia

- Przedmiot badań i motywacja pracy
- Zjawisko indukowanego prądem spinowym transferu momentu siły w złączach tunelowych
- Zastosowany model dynamiki momentu spinowego
- Główne wyniki obliczeń numerycznych oraz analitycznych
- Podsumowanie wyników pracy

Przedmiot badań i motywacja pracy

Postęp cywilizacyjny jest ściśle związany z ogromnym wzrostem ilości wytwarzanych, przechowywanych oraz przetwarzanych informacji w nauce, biznesie i rozrywce.

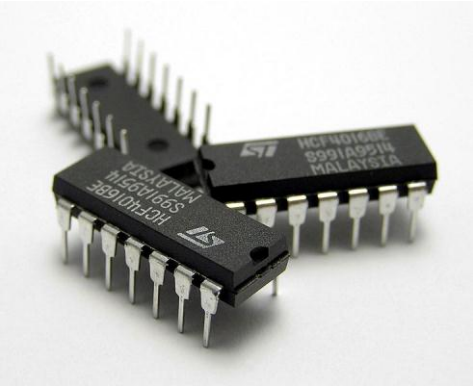
CERN (LHC) – przetwarzenie 1 Pb danych dziennie

serwis *YouTube* – co minutę przesyłanych jest 100 godzin materiału filmowego

Facebook – przetwarzenie 500 Tb dziennie !

Przedmiot badań i motywacja pracy

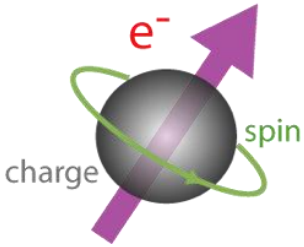
Czy istnieje rozwiązanie ?



Tradycyjna elektronika: pamięci RAM, oscylatory, układy procesorowe.
<u>Kluczowy jest ładunek elektryczny elektronu</u>

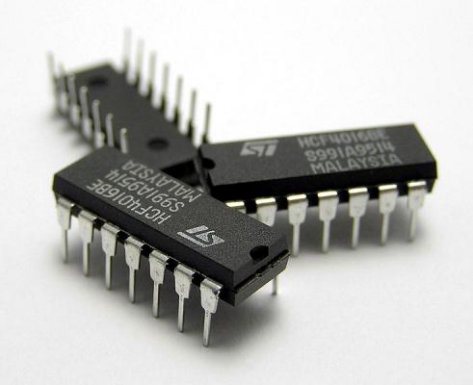
Pamięci masowe: tradycyjny zapis informacji wykorzystujący własności magnetyczne materii.
<u>Kluczowy jest spin elektronu</u>

S p i n t r o n i k a



Przedmiot badań i motywacja pracy

Czy istnieje rozwiązanie ?



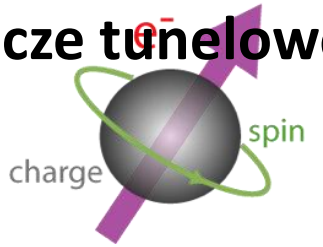
Tradycyjna elektronika: pamięci RAM, oscylatory, układy procesorowe.
Kluczowy jest ładunek elektryczny elektronu

Pamięci masowe: tradycyjny zapis informacji wykorzystujący własności magnetyczne materii.
Kluczowy jest spin elektronu

Wykorzystanie ładunku oraz spinu elektronu w jednym układzie

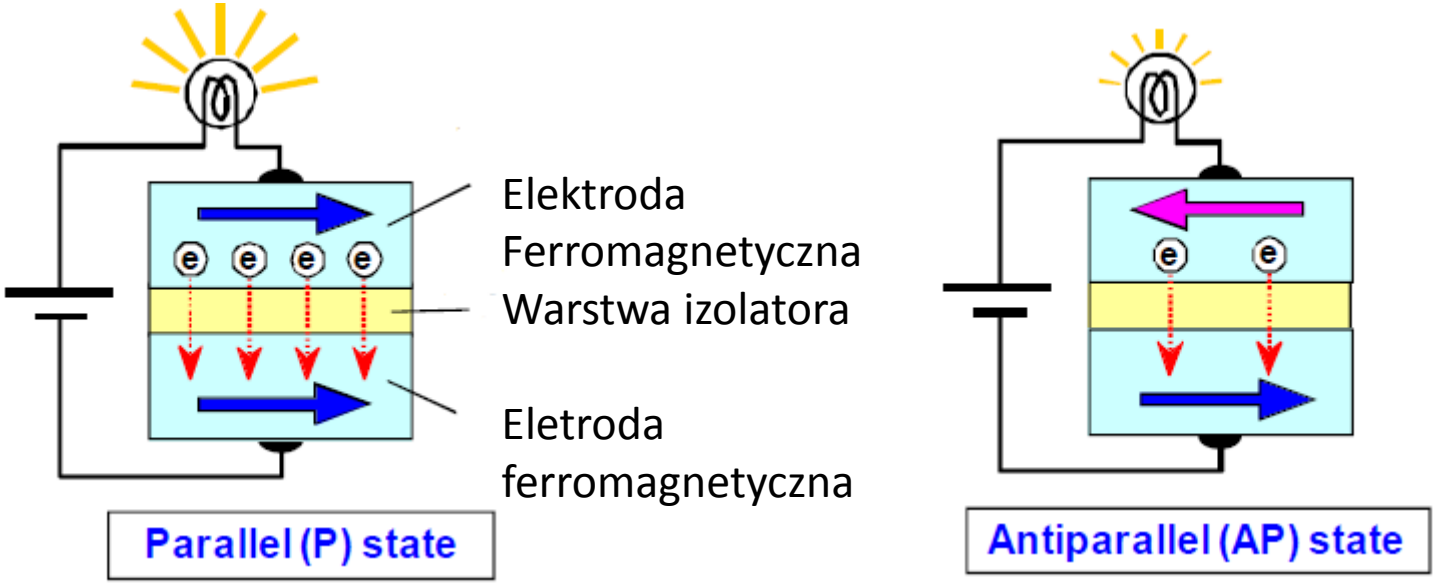
Jednym z układów spintronicznych jest złącze tunelowe...

S p i n t r o n i k a



Przedmiot badań i motywacja pracy

Złącze tunelowe:

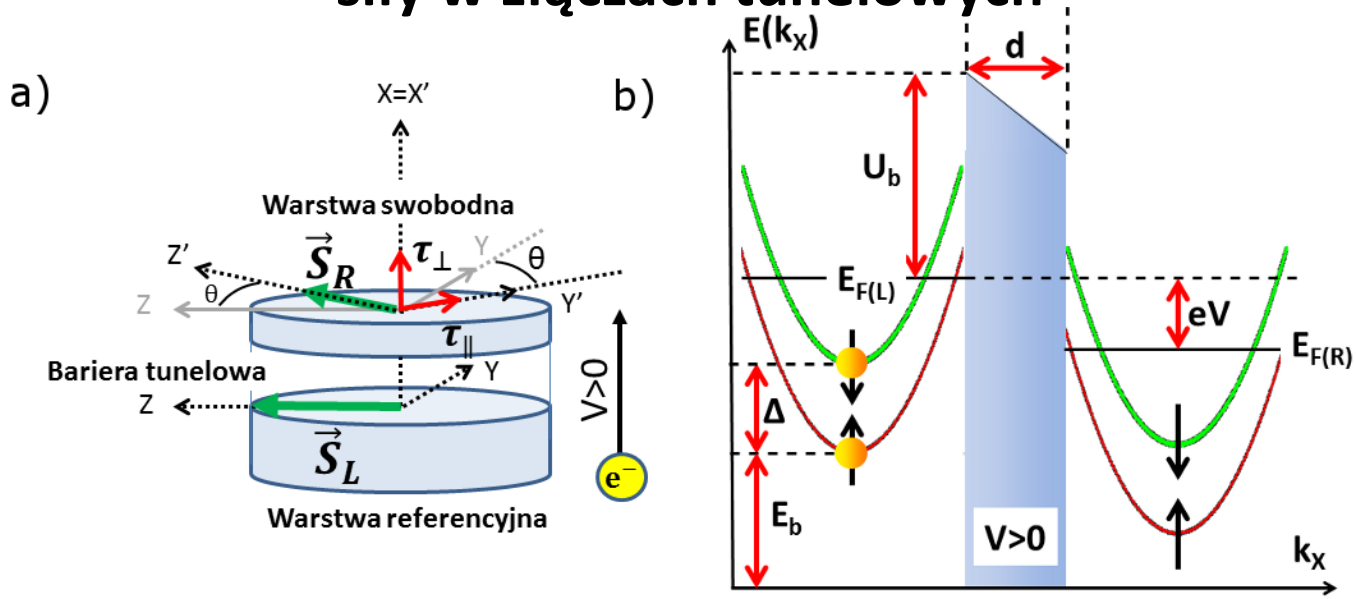


Zastosowanie – jeden i ten sam układ może służyć jako:

1. komórka pamięci (ustalone stany logiczne 1 i 0 odpowiadają stanom magnetycznym P i AP)

2. nanooscylator (emitery i detektory sygnałów mikrofalowych rzędu GHz)

Zjawisko indukowanego prądem spinowym transferu momentu siły w złączach tunelowych



- Tunelujące spolaryzowane spinowo nośniki oddziałują z momentem magnetycznym warstwy swobodnej tylko wtedy gdy momenty obu warstw są niekolinearne tj. $\theta \neq 0, \pi$.
- Nośniki te spolaryzowane wzdłuż momentu magnetycznego warstwy referencyjnej, przekazują część swojego momentu pędu (spinowego) momentowi magnetycznemu warstwy swobodnej. Powstaje moment siły obracający moment magnetyczny warstwy (zjawisko STT – spin transfer torque).
- Przy braku napięcia(prądu ładunkowego) może płynąć niezerowy prąd spinowy odpowiedzialny za wymienne sprzężenie międzywarstwowe złącza

Model dynamiki

Równanie Landaua-Lifszyca-Gilberta-Slonczewskiego (LLGS) opisujące dynamikę momentu spinowego warstwy swobodnej:

$$\frac{d\vec{s}_R}{dt} + \alpha \vec{s}_R \times \frac{d\vec{s}_R}{dt} = \vec{\Gamma}$$

Moment siły stojący po prawej stronie równości zawiera człony pochodzące z obecności anizotropii magnetycznej, pola odmagnesowania, odziaływania Zeemana jak również wyrazy związane ze zjawiskiem STT:

$$\vec{\tau}_{\parallel} = \tau_{\parallel} \vec{s}_R \times \left(\vec{s}_R \times \vec{s}_L\right)$$

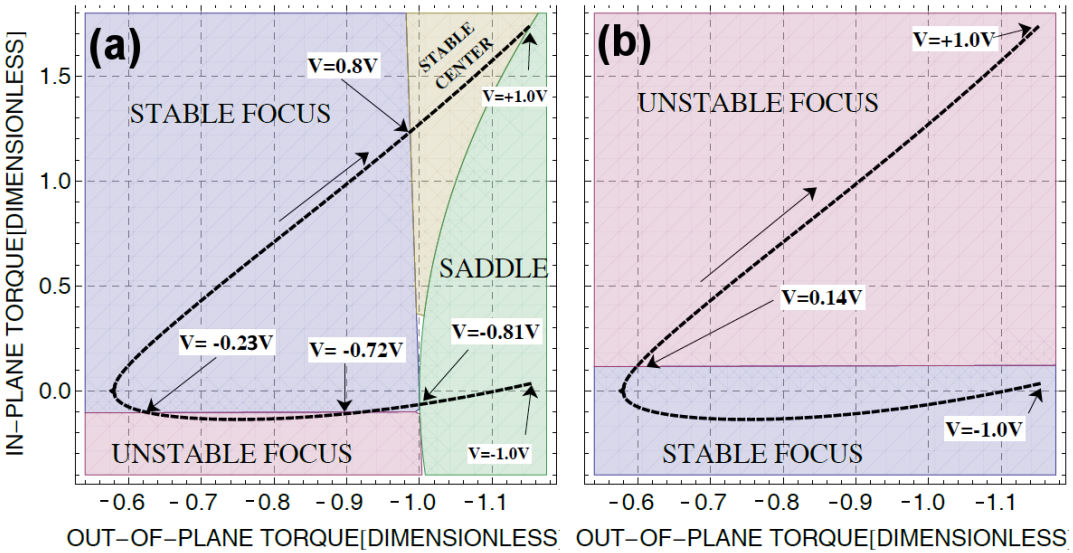
$$\vec{\tau}_{\perp} = \tau_{\perp} \vec{s}_R \times \vec{s}_L$$

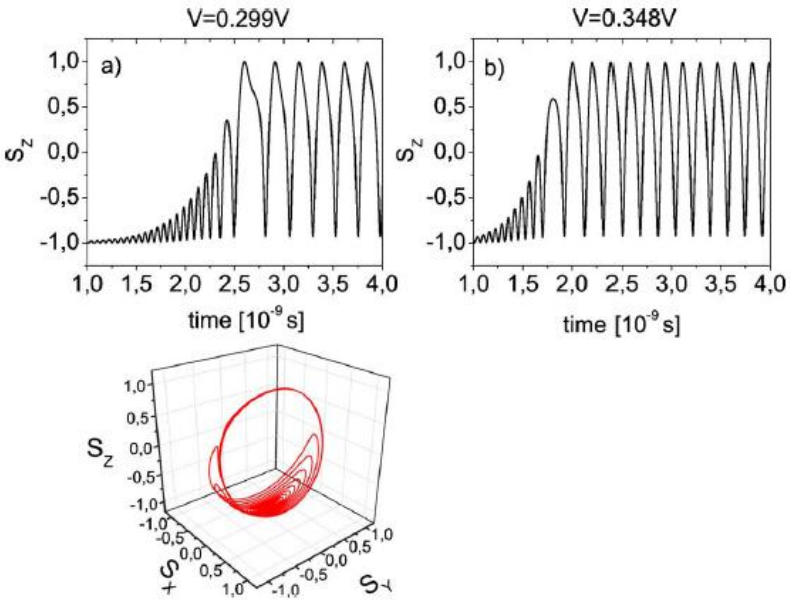
Amplitudy obliczone z modelu swobodnych elektronów, bądź metodami ab initio, bądź uzyskane z rzeczywistych pomiarów

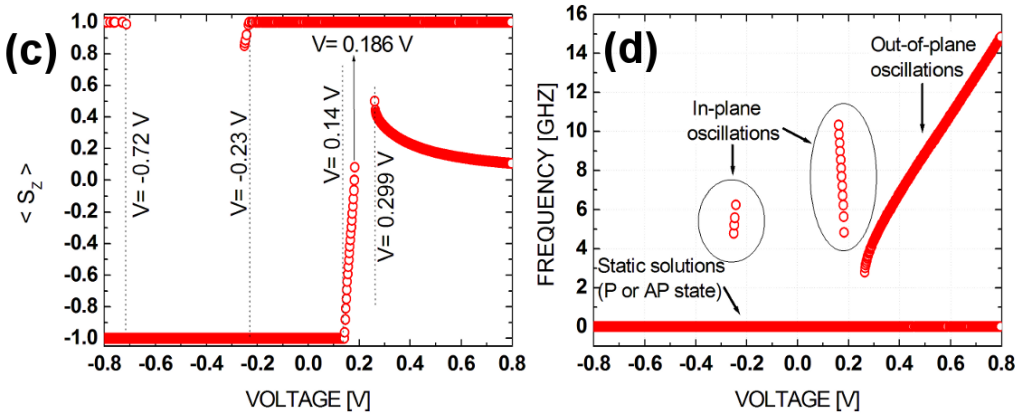
Główne wyniki pracy

1. Dynamika w układach z anizotropią w płaszczyźnie warstwy

"Spin transfer torque and magnetic dynamics in tunnel junctions", P. Ogrodnik, M. Wilczyński, R. Świrkowicz, J. Barnaś, *Physical Review B*, 82, 134412 (2010)





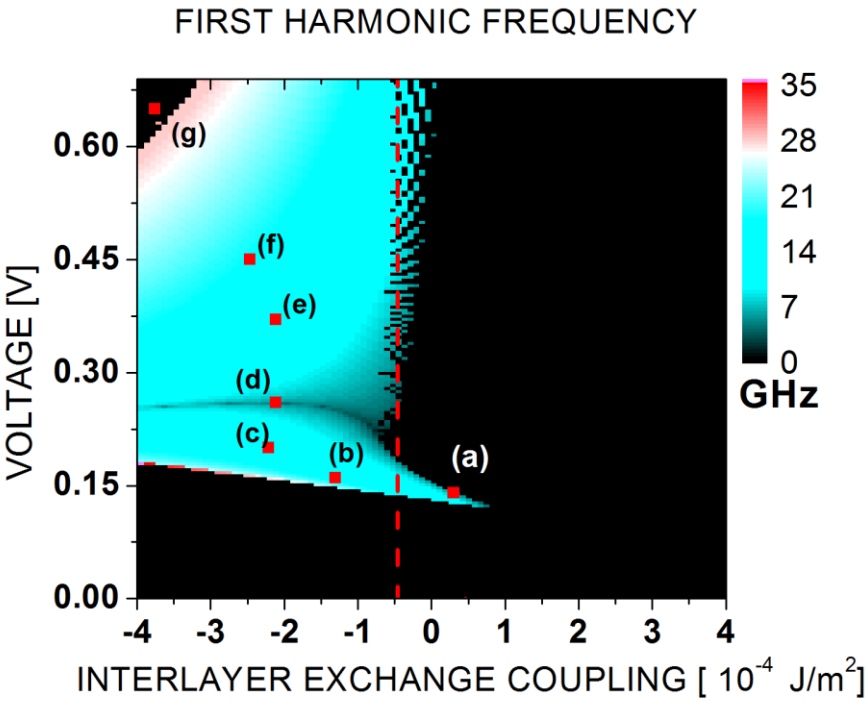


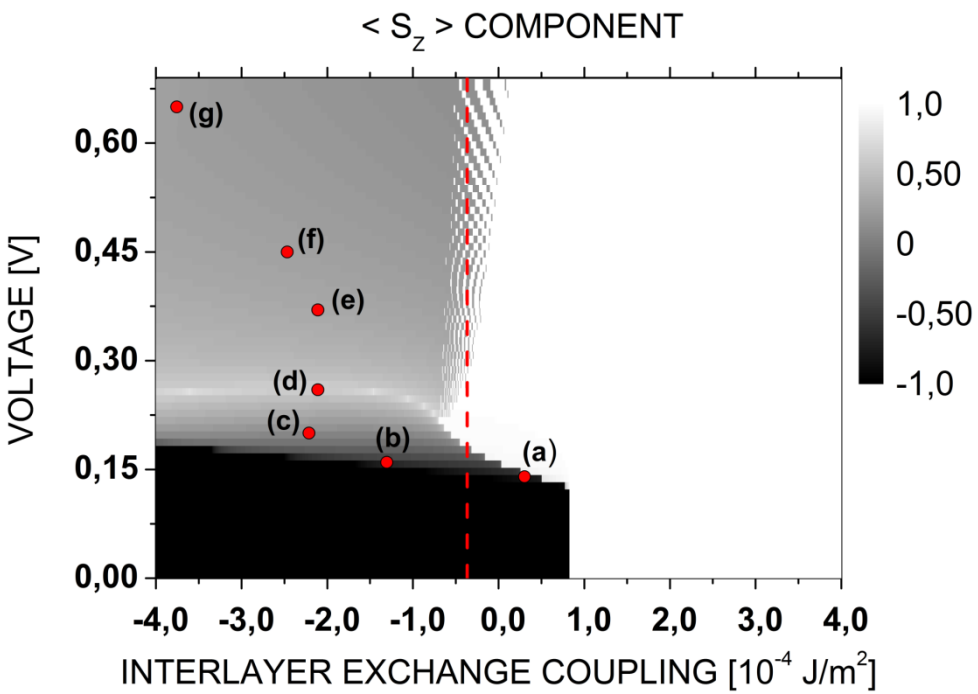
Możliwość uzyskania oscylacji momentu magnetycznego warstwy swobodnej o dużej amplitudzie bez użycia zewnętrznego pola magnetycznego.

Główne wyniki pracy

2. Dynamika w układach z anizotropią w płaszczyźnie warstwy - wpływ sprzężenia międzywarstwowego.

"Magnetization dynamics in a magnetic tunnel junction due to spin transfer torque in the presence of interlayer exchange coupling", *IEEE Transaction on Magnetics* 47, p.1627-1630 (2011)





Wartość sprzężenia obliczonego z modelu swobodnych elektronów oznaczona czerwoną linią.

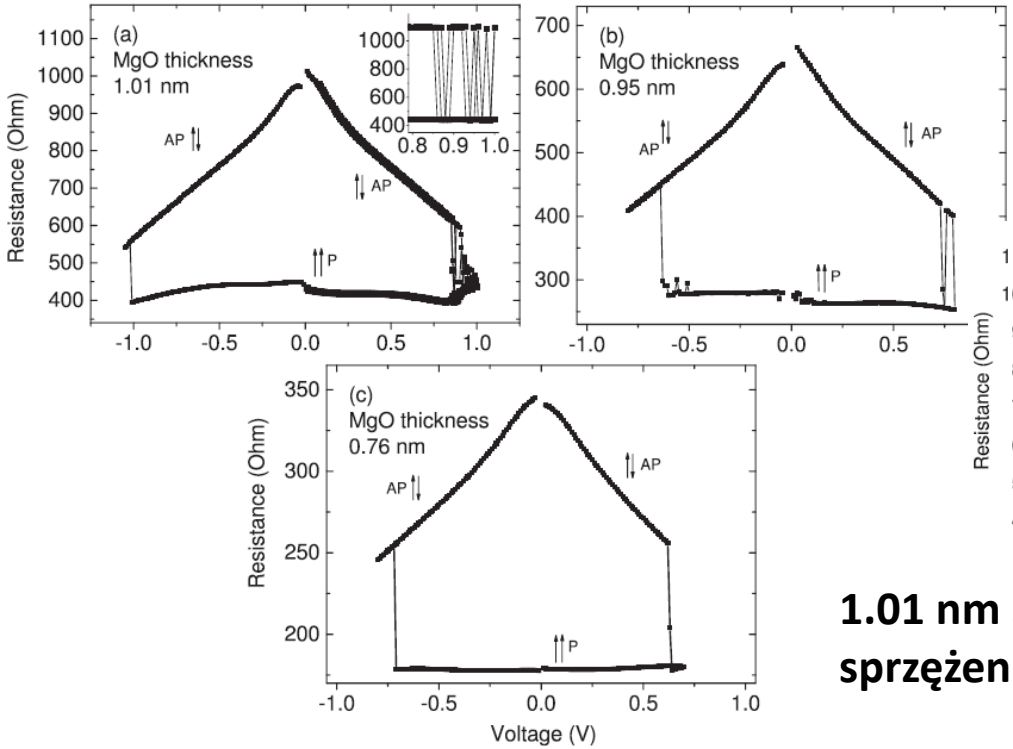
Widoczny poszarpany pas oznacza obszar niestabilności pracy złącza – niewielka zmiana napięcia powoduje, że układ przechodzi bądź do stanu stacjonarnego(P) bądź też stanu oscylacyjnego.

Główne wyniki pracy

3. Zjawisko back-hoppingu (współpraca z AGH, projekt NANOSPIN)

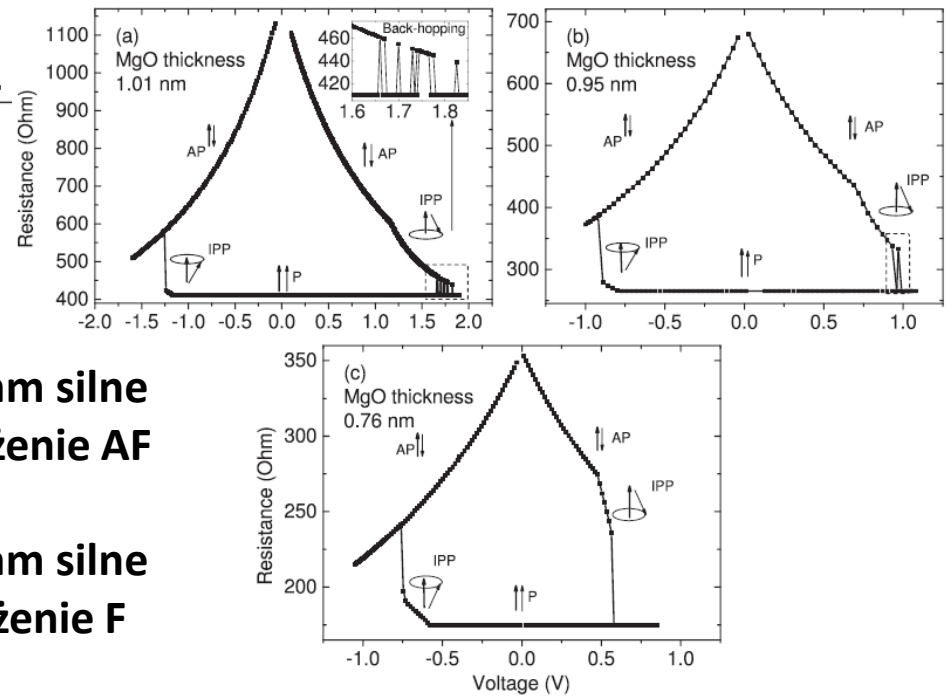
Potwierdzenie hipotezy o sprzężeniu międzywarstwowym jako przyczynie zjawiska.

"Backhopping effect in magnetic tunnel junctions: comparison between theory and experiment",
W. Skowroński, P.Ogrodnik, J.Wrona, T.Stobiecki, R.Świrkowicz, J.Barnaś, G. Reiss, S. van Dijken,
Journal of Applied Physics, 114(23), 233905 (2013)



Eksperyment (AGH)

Teoria (PW)



1.01 nm silne sprzężenie AF

0.76 nm silne Sprzężenie F

Główne wyniki pracy

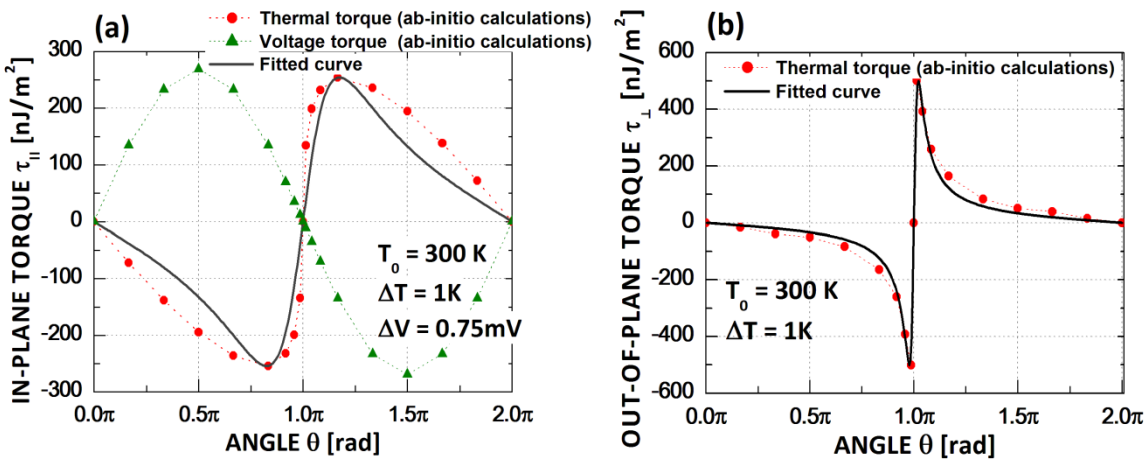
4. Dynamika indukowana gradientem temperatury (współpraca z TU Delft oraz Normal University Pekin + projekt NANOSPIN)

- **zbadanie wpływu skośności zależności kątowych momentów sił na własności dynamiczne złącza.**

"Thermally induced dynamics in ultrathin magnetic tunnel junctions", P. Ogrodnik, G.E.W. Bauer, K. Xia, *Physical Review B*, 88, 024406 (2013)

Relacja Onsagera:

$$\begin{pmatrix} \vec{J}_c \\ \vec{J}_s \\ \vec{J}_Q \end{pmatrix} = \sigma(E_F) \begin{pmatrix} 1 & P & S \\ P & 1 & P'S \\ ST & P'ST & \kappa T/\sigma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nabla \frac{\mu_c}{e} \\ \nabla \frac{\mu_s}{2e} \\ -\frac{\nabla T}{T} \end{pmatrix}$$

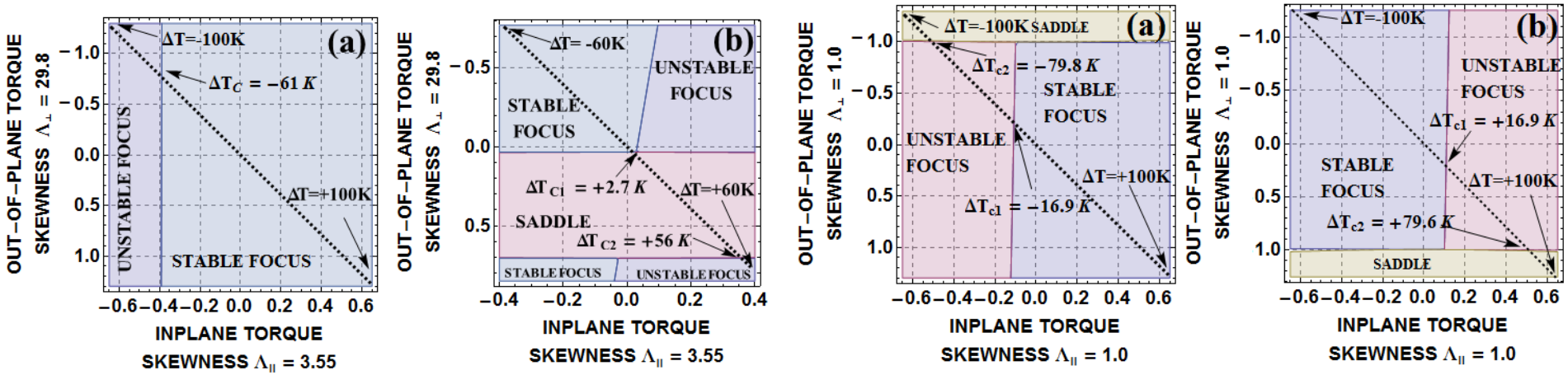


$$\tau_{\parallel(\perp)} = \tau^0_{\parallel(\perp)} \left(\Lambda_{\parallel(\perp)} \cos^2 \frac{\theta}{2} + \frac{1}{\Lambda_{\parallel(\perp)}} \sin^2 \frac{\theta}{2} \right)^{-1}$$

Główne wyniki pracy

4. Dynamika indukowana gradientem temperatury

Wyznaczono macierze dynamiczne określające stabilność punktów stacjonarnych P, AP oraz niepolarnych.



Wyznaczono krytyczne wartości gradientów temperatury dla różnych stanów dynamicznych w tych dwóch przypadkach:

stan dynamiczny:	**Krytyczna wartość** ΔT (przypadek $\Lambda_{\parallel(\perp)} > 1.0$)	**Krytyczna wartość** ΔT (przypadek $\Lambda_{\parallel(\perp)} = 1.0$)
oscylacje IPP	+4.7K (brak)	+16.9 K (-16.9 K)
przełączanie z AP do P	+12.9 K	+19.1 K
oscylacje OPP	+43 K (brak)	brak (brak)
przełączanie z P do AP	-61 K	-19.1 K

Główne wyniki pracy

5. **Efekt diody spinowej w złączu tunelowym z anizotropią prostopadłą**

(współpraca z AGH, projekt E-CONTROL)

Potwierdzenie hipotezy o współistnieniu efektów STT oraz VCMA (Voltage Controlled Magnetic Anisotropy).

"Spin-torque diode radio-frequency detector with voltage tuned resonance",
W. Skowronski, M. Frankowski, J. Wrona, T. Stobiecki, P. Ogrodnik, J. Barnas, Applied Physics Letters 105(7), 072409 (2014)

Zmienne napięcie powoduje, poprzez zjawisko STT lub VCMA oscylacje rezystancji złącza.

Efektem mieszania szybkozmiennego napięcia przyłożonego do próbki oraz rezystancji zależnej od kąta pomiędzy wektorami namagnesowania warstw magnetycznych jest pojawienie się mierzalnej składowej stałej napięcia:

$$\boldsymbol{V_{out} = V_{DC} + V_{AC} = \frac{1}{R(\theta_0)} \Re\{V e^{i\omega t}\} \Re\{\overline{\delta R} e^{i(\omega t + \beta)}\}}$$

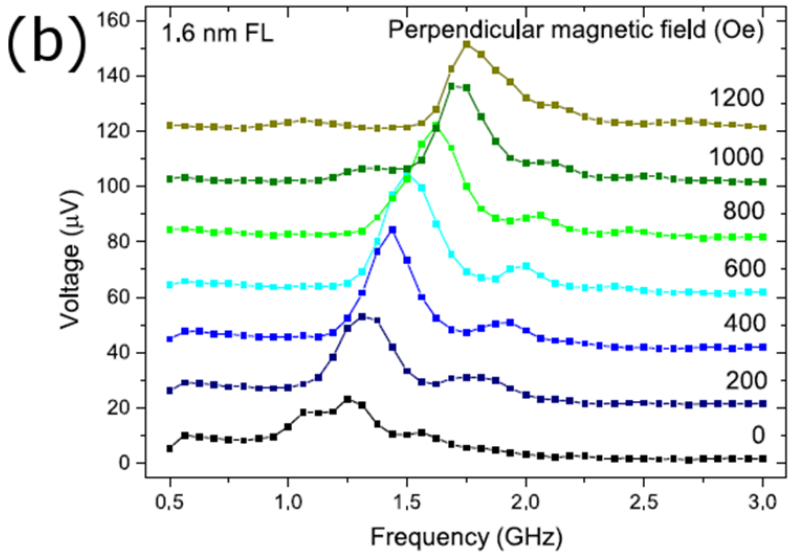
Wykorzystując równanie LLGS można wyznaczyć zmiany rezystancji $\overline{\delta R}$.

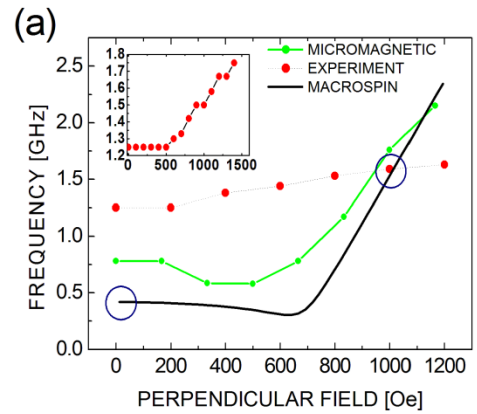
Obliczono w ten sposób teoretyczną linię sygnału diodowego V_{DC}

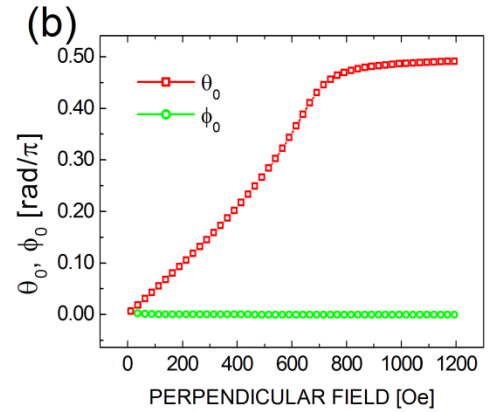
Główne wyniki pracy

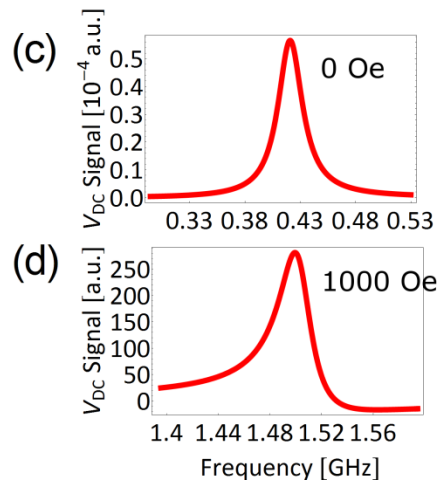
5. Efekt diody spinowej w złączu tunelowym z anizotropią prostopadłą

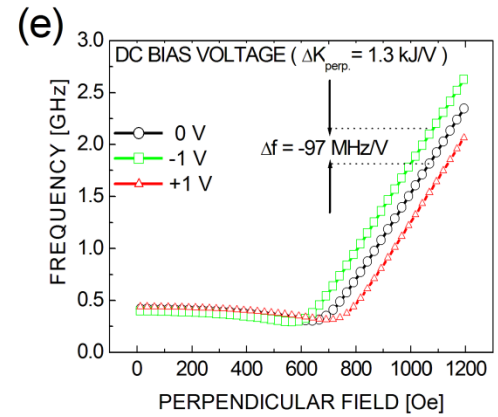
Eksperyment i teoria:











- Symetryczny kształt linii – zjawisko STT
- Plateau w relacji dyspersji f(H) – brak wpływu VCMA w tym obszarze
- Przesunięcie piku rezonansowego z napięciem
- Uzyskano zgodność jakościową z eksperymentem

Podsumowanie wyników

- Po raz pierwszy wskazano możliwość uzyskania niegasnących oscylacji momentu magnetycznego o bardzo dużej amplitudzie w symetrycznym złączu tunelowym.

  bez udziału zewnętrznego pola magnetycznego

- Oryginalnym wkładem autora jest przedyskutowanie wpływu wymiennego sprzężenia międzywarstwowego na dynamikę warstwy swobodnej złącza. Pokazano, że przy pewnych wartościach sprzężenia złącze wykazuje niestabilną pracę (czułość na niewielkie zmiany napięcia)

- Przedstawiono i wykazano wpływ sprzężenia międzywarstwowego na obserwowane eksperymentalnie zjawisko back-hoppingu.

- Po raz pierwszy przedstawiono różnice pomiędzy standardowymi a skośnymi (tj. generowanymi gradientem temperatury) kątowymi zależnościami momentów sił indukowanych prądem spinowym.

- Przeprowadzono obliczenia sygnału diody spinowej dla złącza tunelowego z anizotropią prostopadłą. Potwierdzono teoretycznie pochodzenie symetrycznych linii rezonansowych. Wykazano, że zjawisko STT współistnieje ze zjawiskiem VCMA, oraz pokazano, iż model przewiduje istnienie szerokiego plateau relacji dyspersji f(H), w którym możliwość „przestrajania” polem elektrycznym częstości rezonansowej jest bardzo ograniczona.

Dziękuję za uwagę !

Praca uzyskała wsparcie finansowe w ramach projektów:

SWISS CONTRIBUTION

NANOSPIN

NARODOWE CENTRUM NAUKI

Electric-field controlled spintronic devices (E-CONTROL)

IFMPAN

AGH