

"Analiza dynamiki przemagnesowania ferromagnetycznych struktur niskowymiarowych pod kątem zastosowań w układach pamięciowych i przetwarzania informacji"

Słowa kluczowe:

spintronika, logika magnetyczna, pamięci MRAM, symulacje magnetyczne.

mgr inż. Paweł Stebliński

PLAN PREZENTACJI:

- 1. PORÓWNANIE KLASYCZNEJ ELEKTRONIKI ZE SPINTRONIKĄ***
 - 2. STOSOWANE METODY NUMERYCZNE NA PRZYKŁADZIE
SYMULACJI UKŁADU DOŚWIADCZALNEGO***
 - 3. ZBADANE MODELE SPINTRONICZNE***
 - 4. PLANOWANE DALSZE BADANIA***
-
-

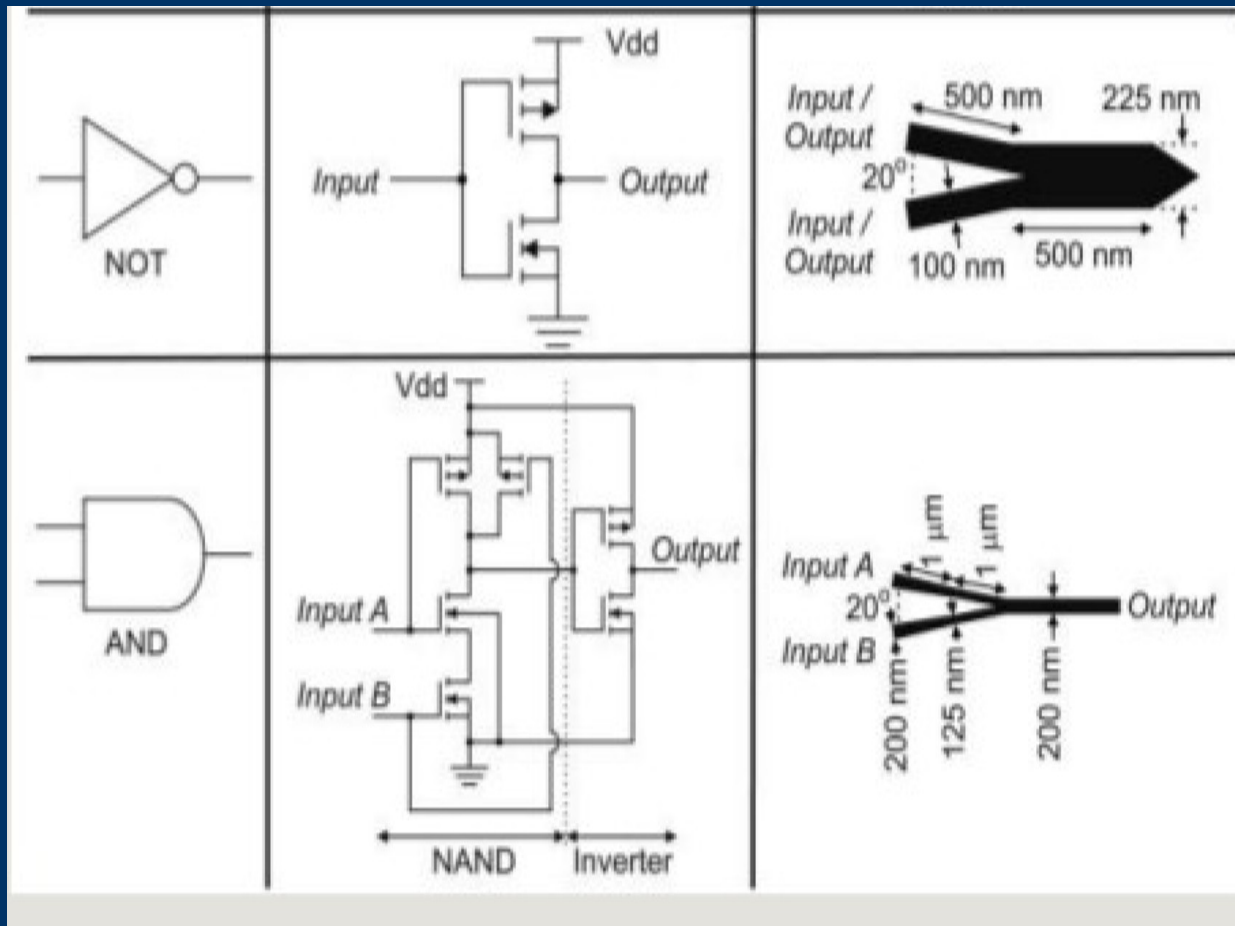
PORÓWNANIE KLASYCZNEJ ELEKTRONIKI ZE SPINTRONIKĄ



Technologia półprzewodnikowa ma swoje ograniczenia:

- 1. Elementy składowe (n. p. tranzystory) układów są relatywnie duże, rzędu dziesiątek i więcej nano – metrów***
 - 2. Układy półprzewodnikowe przetwarzają sygnały relatywnie wolno. Obecnie jest to rząd GHz***
-
-

PORÓWNANIE KLASYCZNEJ ELEKTRONIKI ZE SPINTRONIKĄ



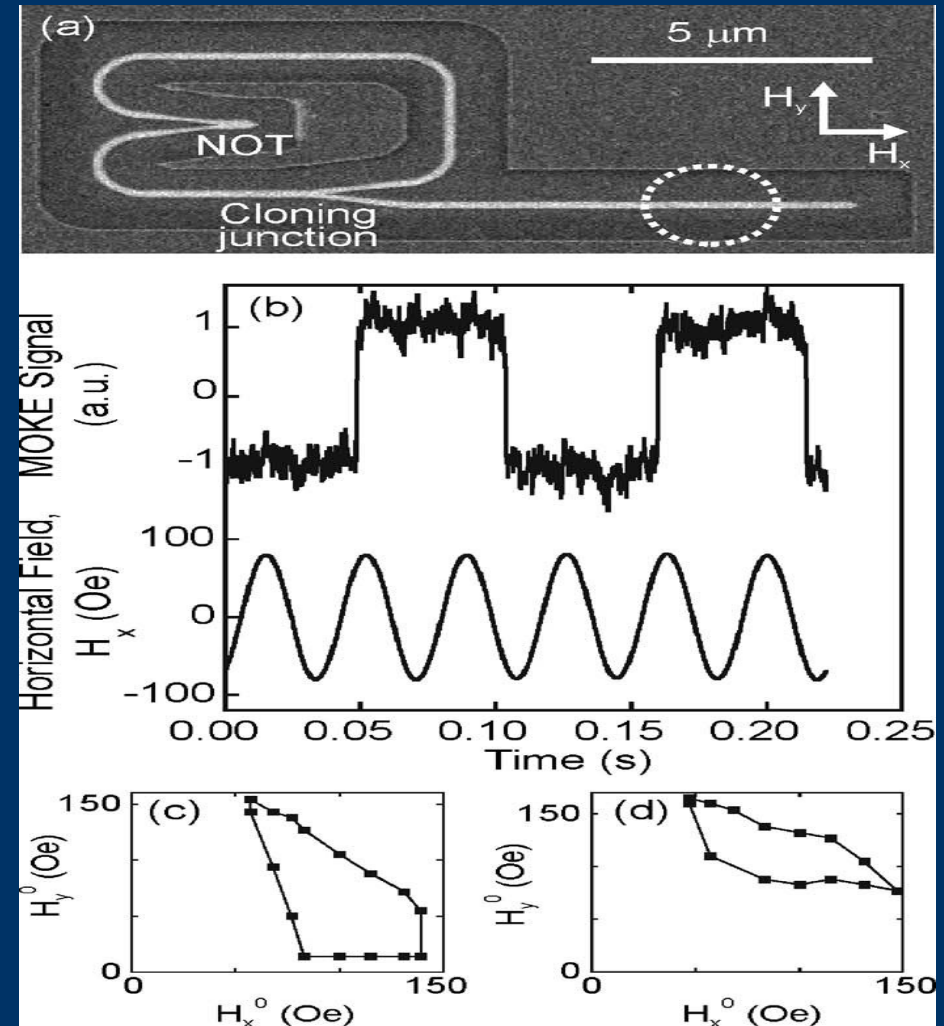
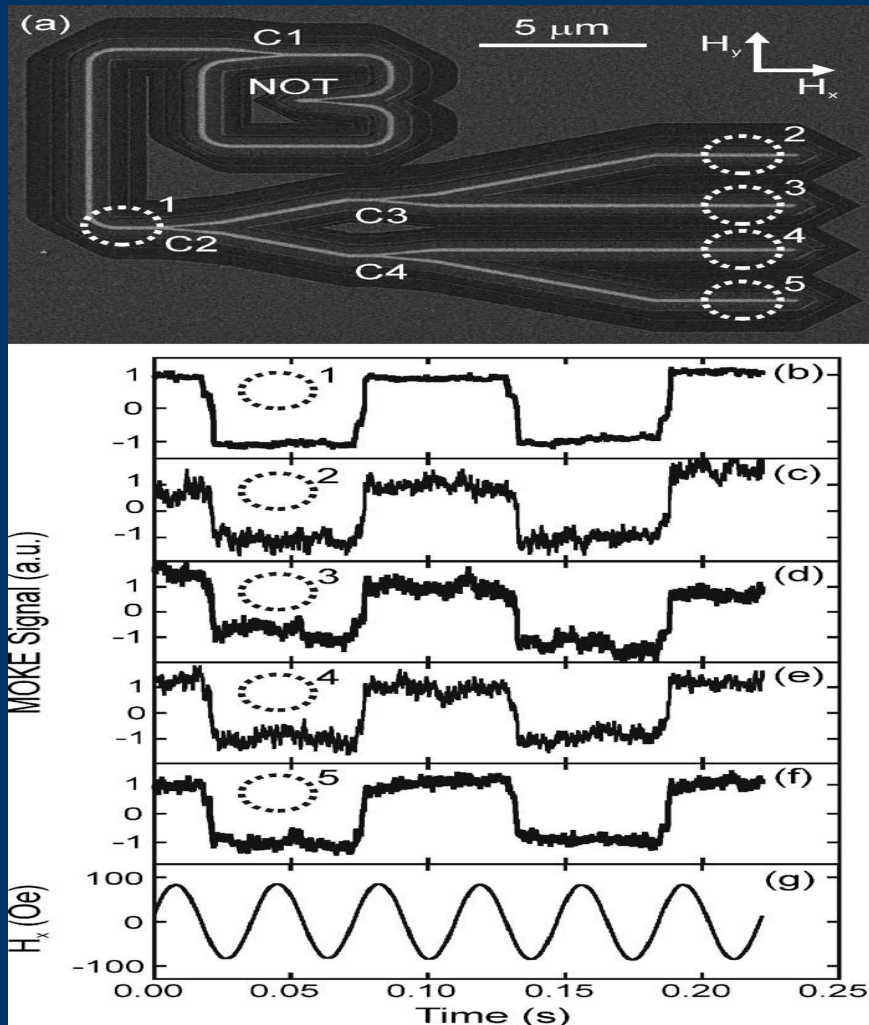
Alternatywa:

Spintronika –
*elektronika, której
przetwarzanie
sygnału bazuje na
zmianach rozkładu
namagnesowania w
przestrzeni lub czasie*

„Magnetic Domain-Wall Logic”

D. A. Allwood, et al. *Science* 309, 1688
(2005)

PORÓWNIANIE KLASYCZNEJ ELEKTRONIKI ZE SPINTRONIKĄ

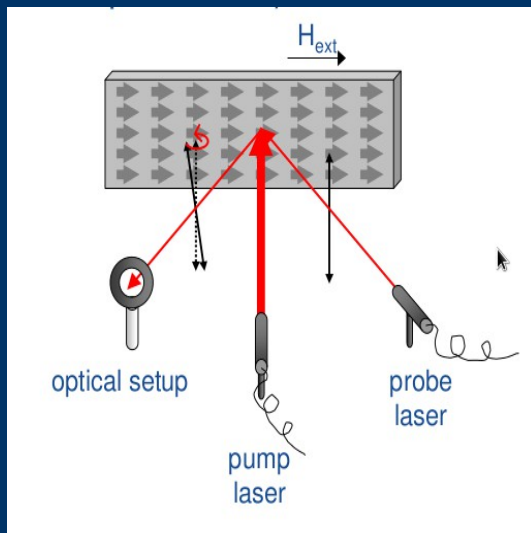


"Domain wall cloning in magnetic nanowires"

D. A. Allwood, Gang Xiong, R. P. Cowburn

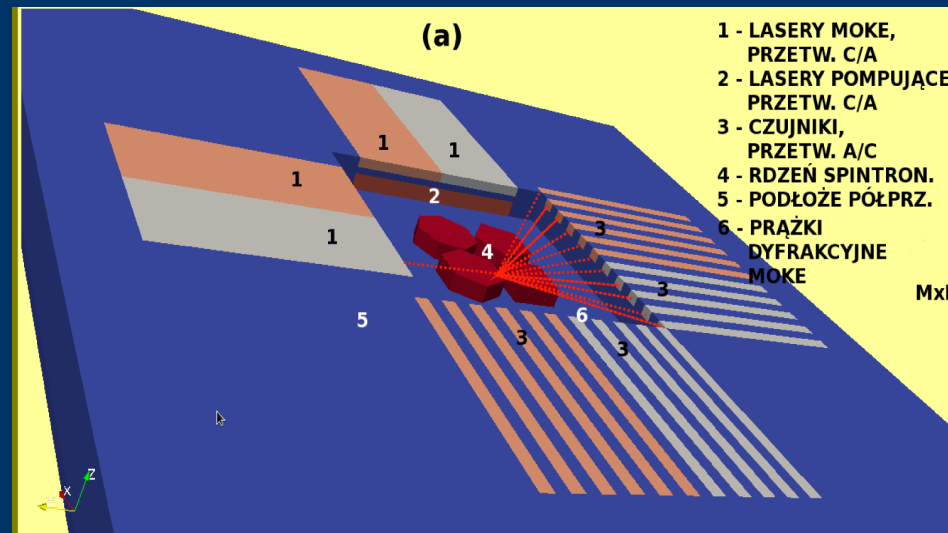
JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 101, 024308 2007

STOSOWANE METODY NUMERYCZNE NA PRZYKŁADZIE SYMULACJI UKŁADU DOŚWIADCZALNEGO



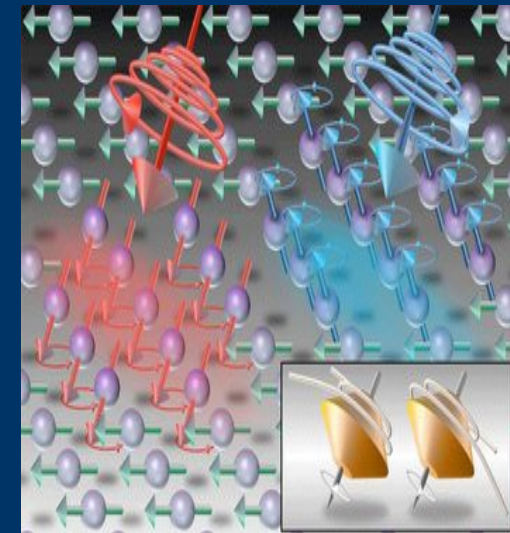
„Experimentelle Untersuchung
und Simulation der
Magnetisierungsdynamik in
Exchange-Bias-Systemen”

A.Tillmanns, T. Błachowicz,
P.Stebliński, Hannover 2010



„Koncepcja hybrydowego procesora cyfrowego z
rdzeniem spintronicznym”

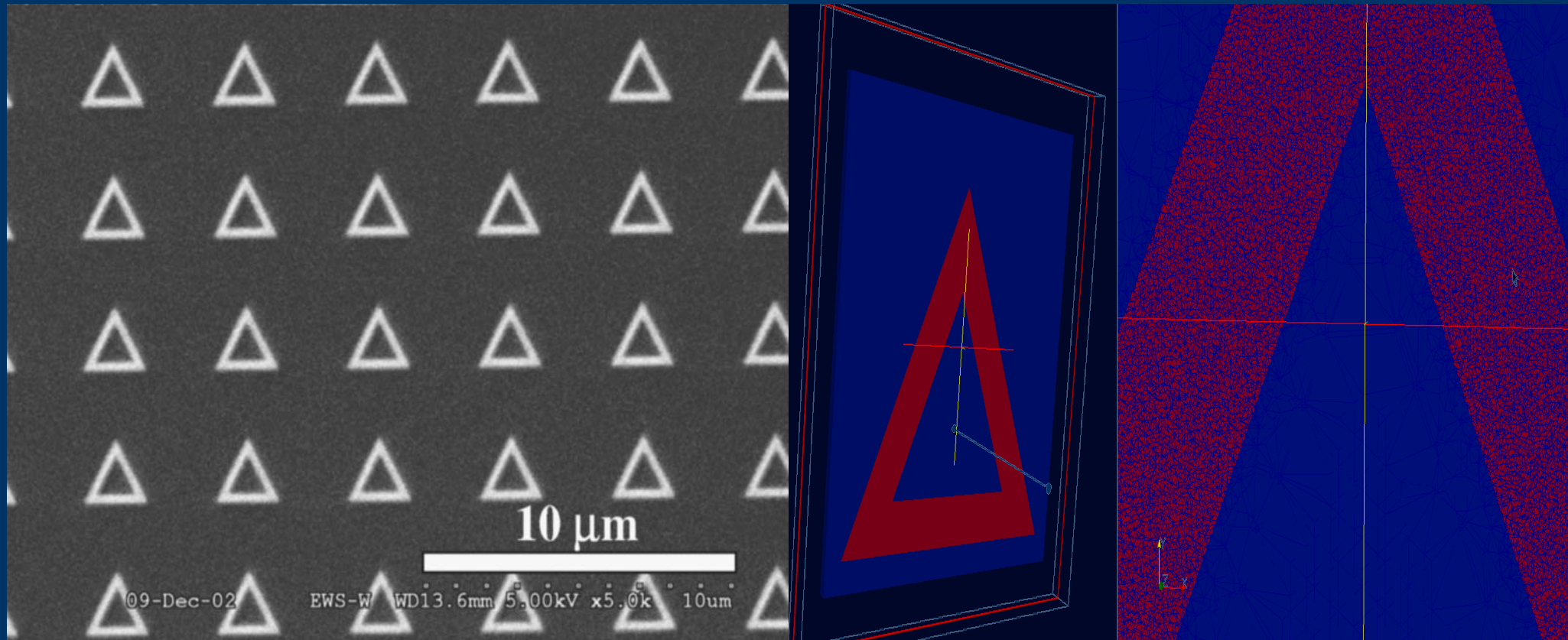
P.Stebliński, T.Błachowicz, KKE 2011, Wiadomości
Elektrotechniczne nr 11, 2011



Spintronics-info.com

**Przemagnesowanie
impulsem lasera
pompującego w czasie 5ps**

STOSOWANE METODY NUMERYCZNE NA PRZYKŁADZIE SYMULACJI UKŁADU DOŚWIADCZALNEGO



"Chirality and stability of vortex state in Permalloy triangular ring micromagnets"

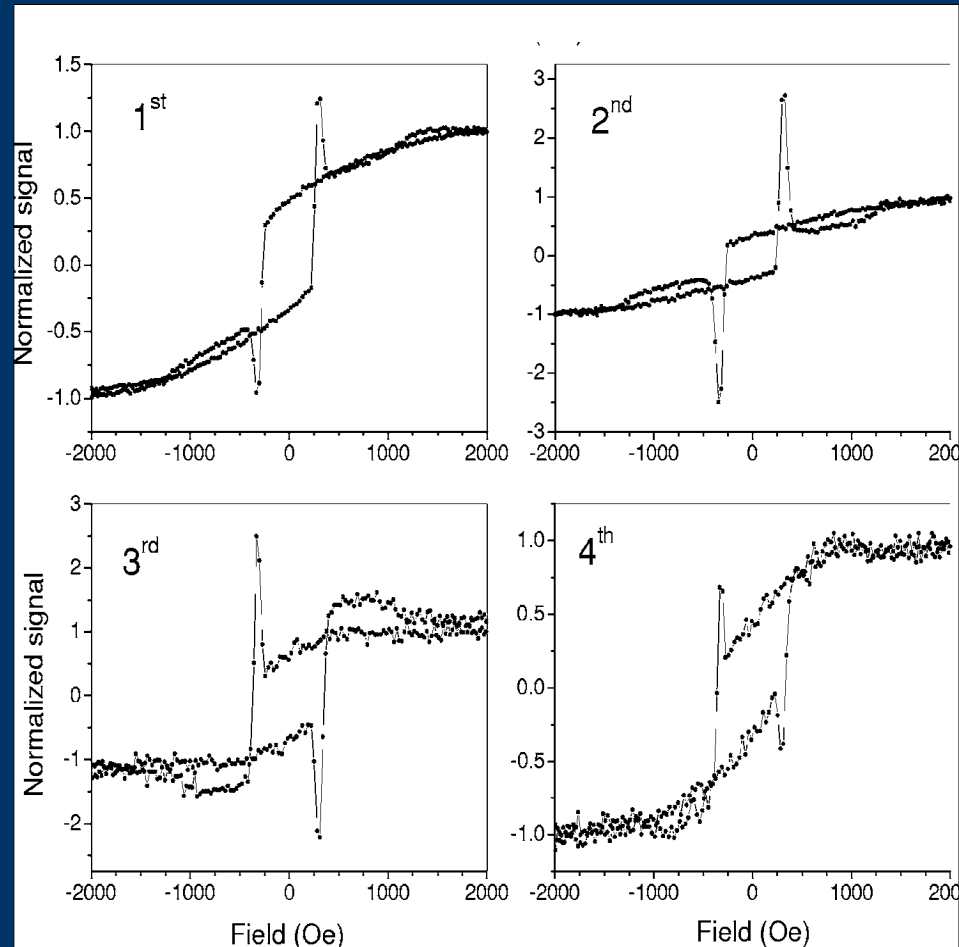
P. Vavassoria, O. Donzelli, M. Grimsditch, V. Metlushko, B. Ilic
JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 101, 023902 2007

„Badanie ewolucji namagnesowania w niskowymiarowych, periodycznych obiektach magnetoelektronicznych”

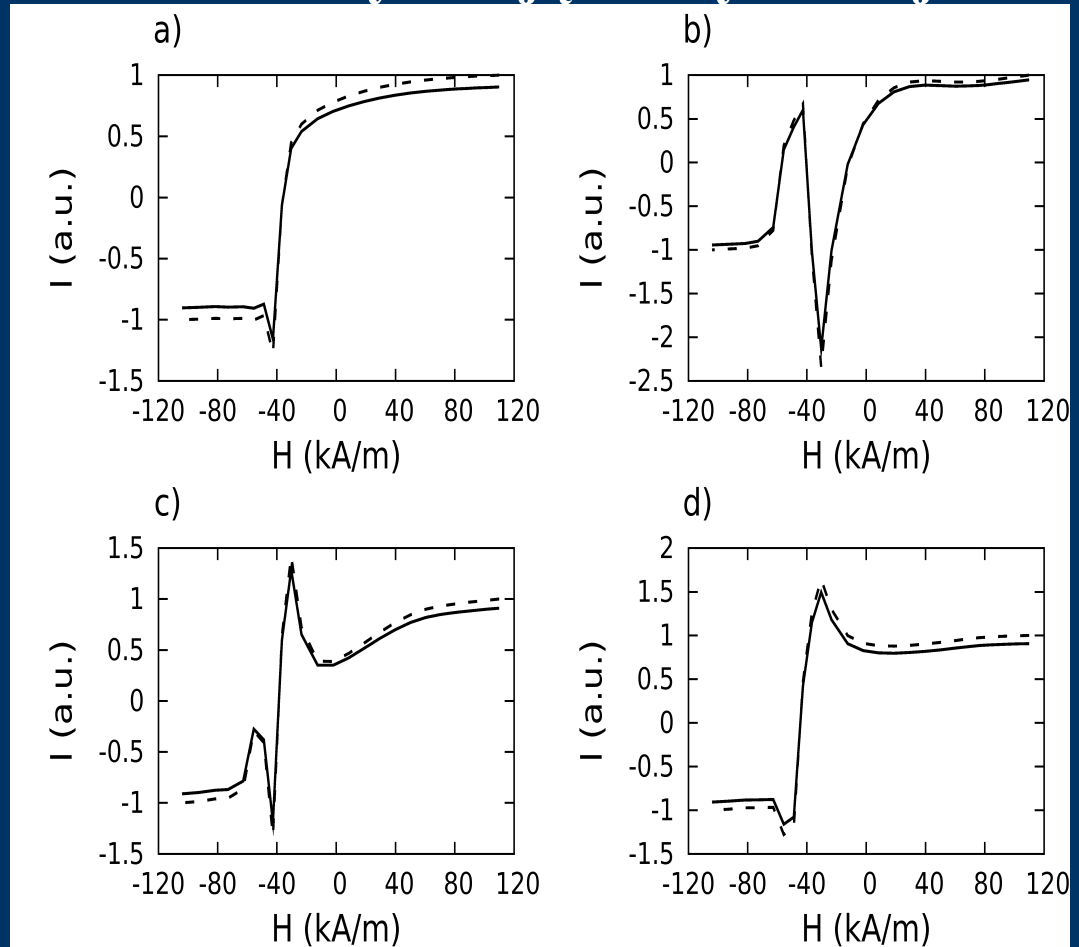
Paweł Stebliński, Tomasz Błachowicz
KKE, 2010

STOSOWANE METODY NUMERYCZNE NA PRZYKŁADZIE SYMULACJI UKŁADU DOŚWIADCZALNEGO

Dane doświadczalne



Dane wynikające z symulacji



**"Chirality and stability of vortex state in
Permalloy triangular ring micromagnets"**

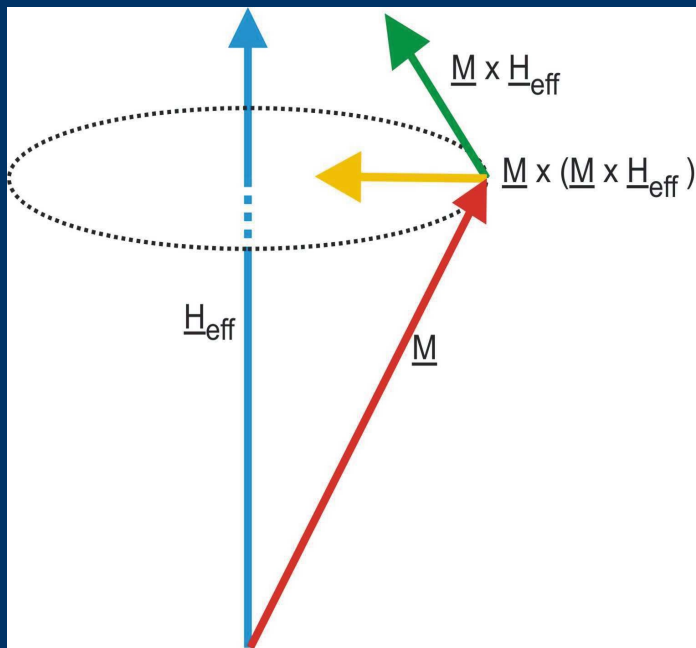
P. Vavassoria, O. Donzelli, M. Grimsditch, V. Metlushko, B. Ilic
JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 101, 023902 2007

**„Badanie ewolucji namagnesowania w
niskowymiarowych, periodycznych obiektach
magnetoelektronicznych”**

Paweł Stebliński, Tomasz Błachowicz, KKE, 2010

STOSOWANE METODY NUMERYCZNE NA PRZYKŁADZIE SYMULACJI UKŁADU DOŚWIADCZALNEGO

Przebieg rozkładu przestrzennego namagnesowania w czasie określa równanie LLG (Landaua-Lifszycy-Gilberta), w którym można wyróżnić dwa główne wyrazy: kręt oddziaływania pola efektywnego oraz wyraz tłumienia



$$\frac{1}{\gamma} \frac{d\vec{M}}{dt} = -\frac{1}{\alpha^2 + 1} (\vec{M} \times \vec{H}_{eff}) - \frac{1}{M_s} \frac{\alpha}{\alpha^2 + 1} (\vec{M} \times (\vec{M} \times \vec{H}_{eff}))$$

$$\vec{H}_{eff} = -\frac{\partial E_{tot}}{\partial \vec{M}} \quad \vec{M} = M_s(\vec{r}) \vec{u}(\vec{r}, t)$$

$$E_{tot} = \int_V [A \sum_k^{x,y,z} (\nabla u_k)^2 + K_1 (1 - (\vec{a} \cdot \vec{u})^2) - \vec{M} \cdot \vec{H}_{ext} - \frac{1}{2} \vec{M} \cdot \vec{H}_{dem}] dV$$

Celem rozwiązania równania LLG oraz wyznaczenia postaci pola efektywnego cały problem dyskretyzuje się używając metody Galerkina

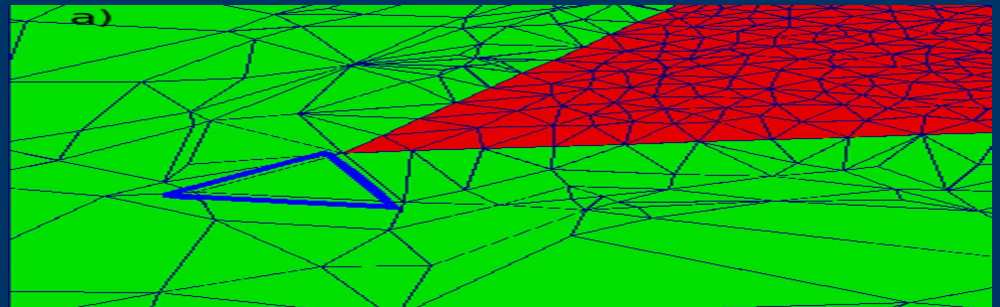
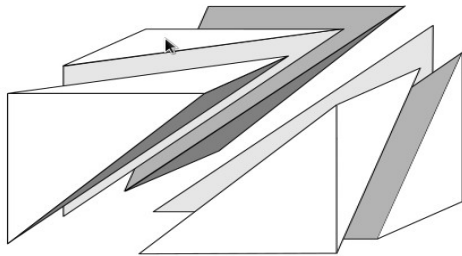
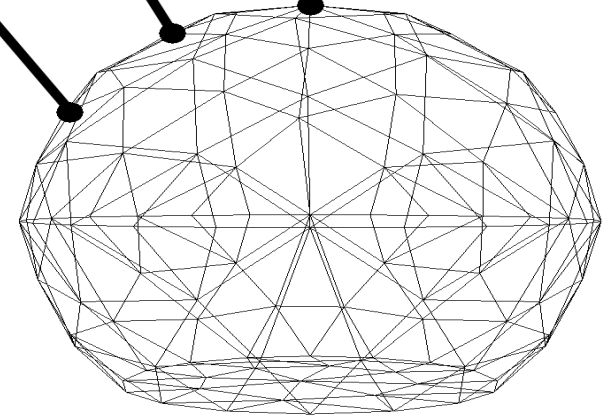
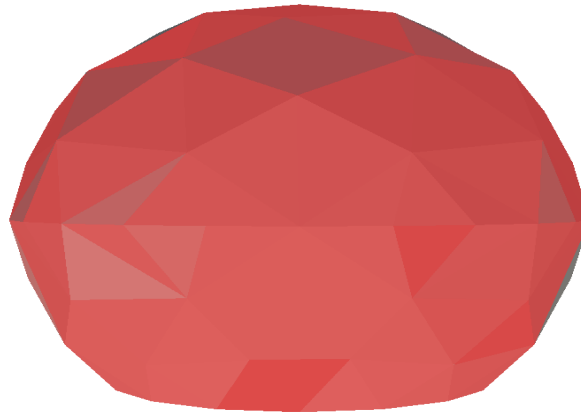
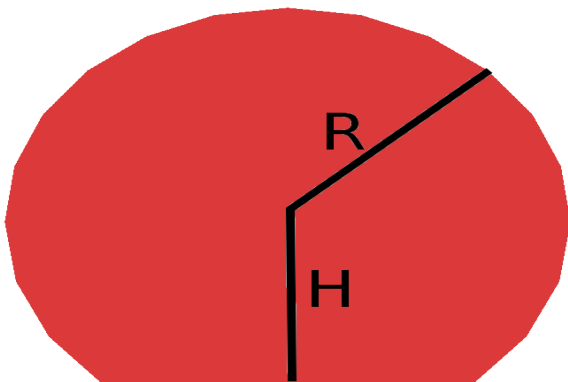
STOSOWANE METODY NUMERYCZNE NA PRZYKŁADZIE SYMULACJI UKŁADU DOŚWIADCZALNEGO

$$\frac{1}{\mathcal{V}} \frac{d\vec{M}_1}{dt} = -\frac{1}{\alpha^2+1} (\vec{M}_1 \times \vec{H}_{1,eff}) - \frac{1}{M_s} \frac{\alpha}{\alpha^2+1} (\vec{M}_1 \times (\vec{M}_1 \times \vec{H}_{1,eff}))$$

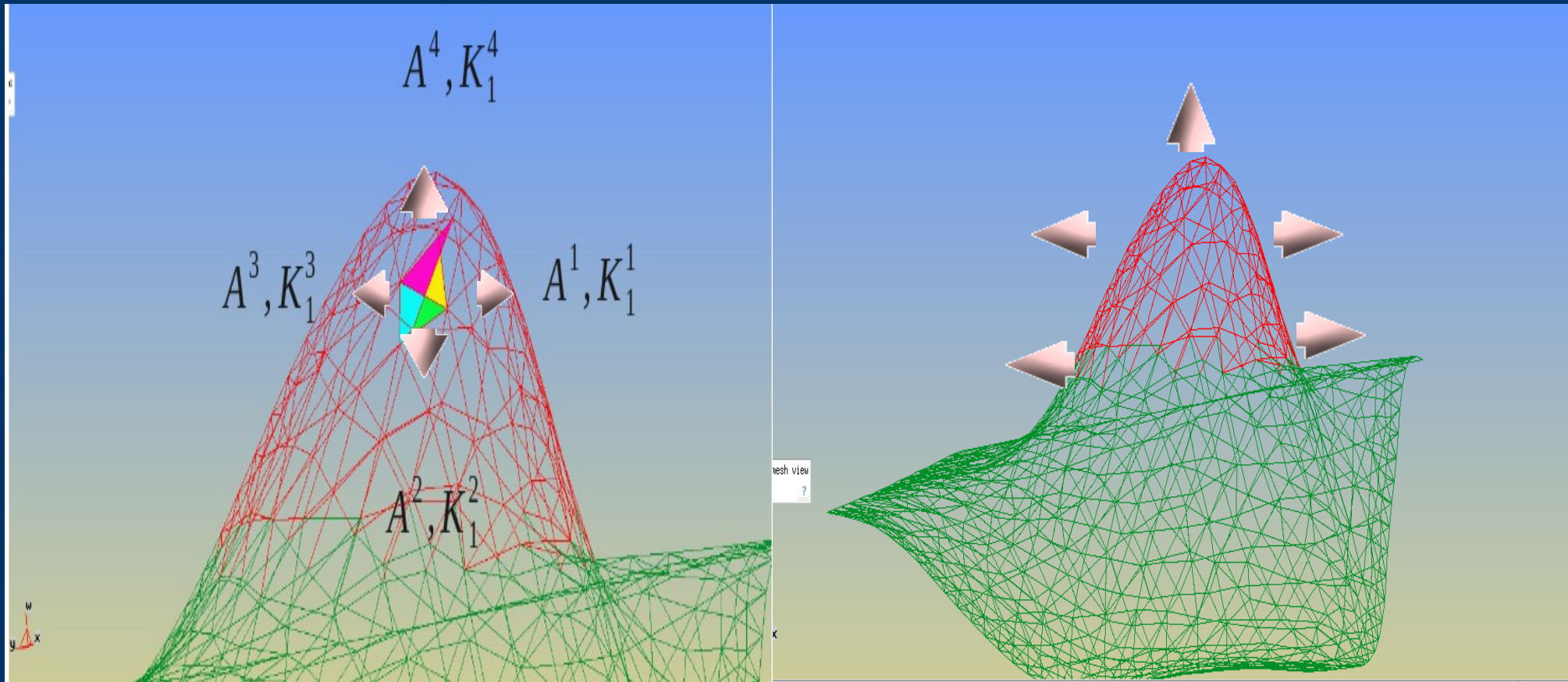
$$\frac{1}{\mathcal{V}} \frac{d\vec{M}_2}{dt} = -\frac{1}{\alpha^2+1} (\vec{M}_2 \times \vec{H}_{2,eff}) - \frac{1}{M_s} \frac{\alpha}{\alpha^2+1} (\vec{M}_2 \times (\vec{M}_2 \times \vec{H}_{2,eff}))$$

*
*
*
*
*

$$\frac{1}{\mathcal{V}} \frac{d\vec{M}_n}{dt} = -\frac{1}{\alpha^2+1} (\vec{M}_n \times \vec{H}_{n,eff}) - \frac{1}{M_s} \frac{\alpha}{\alpha^2+1} (\vec{M}_n \times (\vec{M}_n \times \vec{H}_{n,eff}))$$



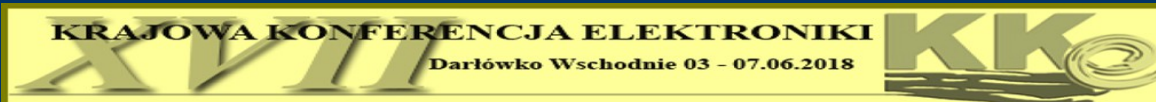
STOSOWANE METODY NUMERYCZNE NA PRZYKŁADZIE SYMULACJI UKŁADU DOŚWIADCZALNEGO



Łączenie materiałów
(domieszkowanie) i
adaptacja przestrzenna
stałych materiałowych w
obrębie siatki tetraedrów

Zmiana geometrii próbki i
adaptacja kształtu siatki
tetraedrów określającej
kształt próbki

ZBADANE MODELE SPINTRONICZNE



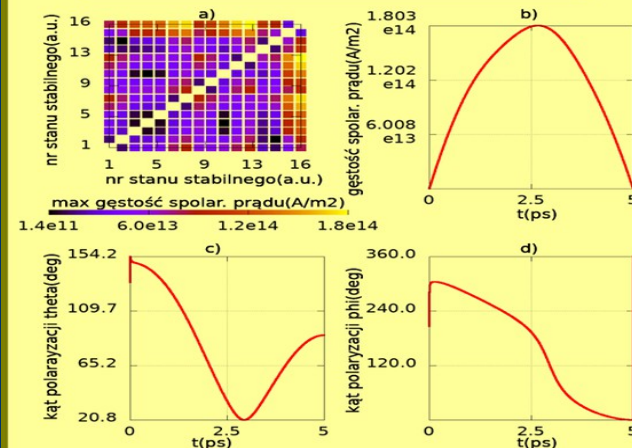
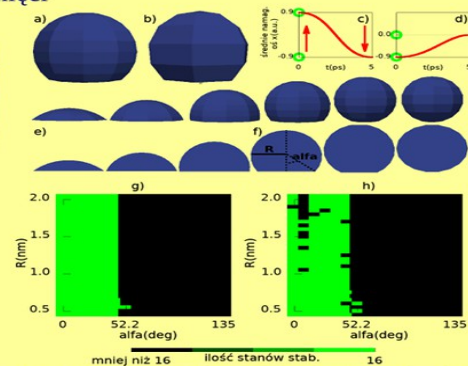
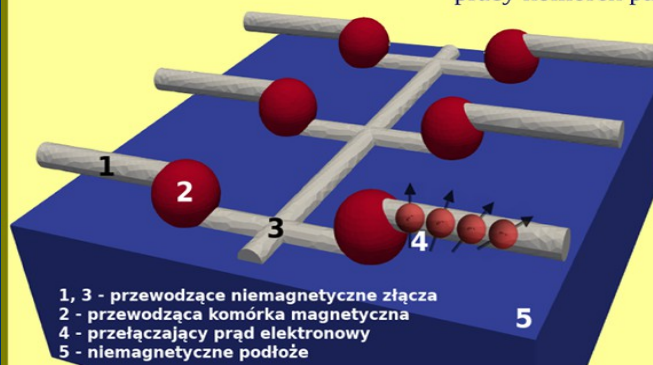
Paweł Stebliński
WEiI - Politechnika Koszalińska
ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin

Tomasz Błachowicz
Instytut Fizyki – CND Politechnika Śląska
ul. S. Konarskiego 22B, 44-100 Gliwice

Koncepcja pamięci magnetycznej przełączanej prądem o zmiennej gęstości i zmiennym kierunku polaryzacji spinu

Słowa kluczowe: spintronika, logika magnetyczna, pamięci BPM, symulacje magnetyczne

Cel badań: miniaturyzacja komórek pamięci, zwiększenie gęstości zapisu, zwiększenie szybkości pracy komórek pamięci



rys. 2. a) Mapa maksymalnych gęstości prądu dla wszystkich (240) kombinacji przejść dla komórki o 100 wierzchołkach, promieniu 0.95 nm i kącie α 0.0 stopni. Dla tej komórki i dla przejścia ze stanu nr 12 do stanu nr 16 - b) przebieg czasowy gęstości prądu, c) i d) współrzędne sferyczne polaryzacji elektronów - odpowiednio θ , ϕ . Dla tego przejścia, gęstość prądu, posiada maksimum o największej wartości ze wszystkich rozpatrywanych maksimów dla kombinacji 240 przejść między stanami i wartość ta jest zaznaczona na rys. 3 c) w punkcie e) oraz posiada najjaśniejszy kolor na mapie z rys. 2 a)

$$\frac{1}{\gamma} \frac{d\vec{m}}{dt} = -\frac{1}{1+\alpha^2} [\vec{m} \times (\vec{H}_{eff} + \frac{jg}{\gamma} \alpha \vec{p}) + \vec{m} \times (\vec{m} \times (\alpha \vec{H}_{eff} - \frac{jg}{\gamma} \vec{p}))] \quad (1) - \text{równanie LLG z wyrazem Słoneczewskiego}[1,2]$$

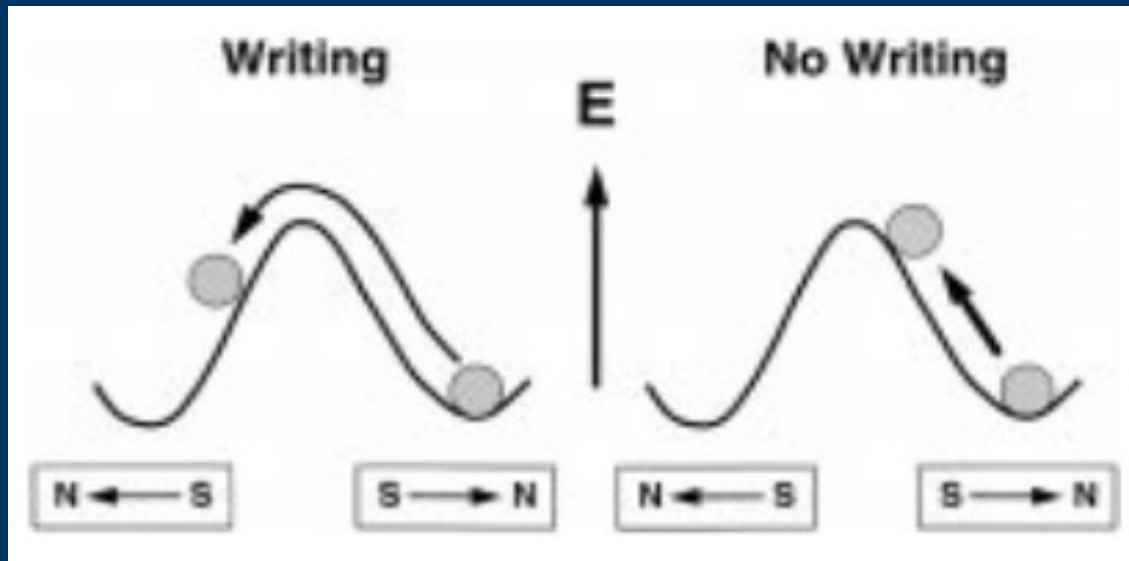
$$g = \frac{\hbar}{M_s * e * 2 * d * (\Lambda^2 + 1) + (\Lambda^2 - 1) * \cos(\angle(\vec{m}, \vec{p}))} P_r * \Lambda^2 \quad (2) - \text{wyraz skalujący gęstość prądu przełączania}[1,2]$$

rys. 3. Mapa pokazująca maksymalne ze wszystkich 240 przejść między stanami quasi-stabilnymi maksima gęstości prądów zmieniających stan przy zmiennych parametrach geometrycznych komórek: a) i b) - komórka z 36 wierzchołkami odpowiednio dla czasów przejścia 5 ps i 1 ps, c) i d) - komórka ze 100 wierzchołkami dla 5 ps i 1 ps. Punkt e) to wartość w maksimum z wykresu na rys. 2 b) i najjaśniejszy kolor na mapie z rys. 2 a)

[1] A. Vansteenkiste, J. Leliaert, M. Dvornik, M. Helsen, F. Garcia-Sanchez, B. Van Waeyenbergh, „The design and verification of MuMax3”, AIP Advances 4, 107133 (2014)

[2] R. Lehnndorff, D.E. Bürgler, A. Kakay, R. Hertel, C. M. Schneider, „Spin-Transfer Induced Dynamic Modes in Single-Crystalline Fe-Ag-Fe Nanopillars”, IEEE Trans. Magn., 44(2008) 1951

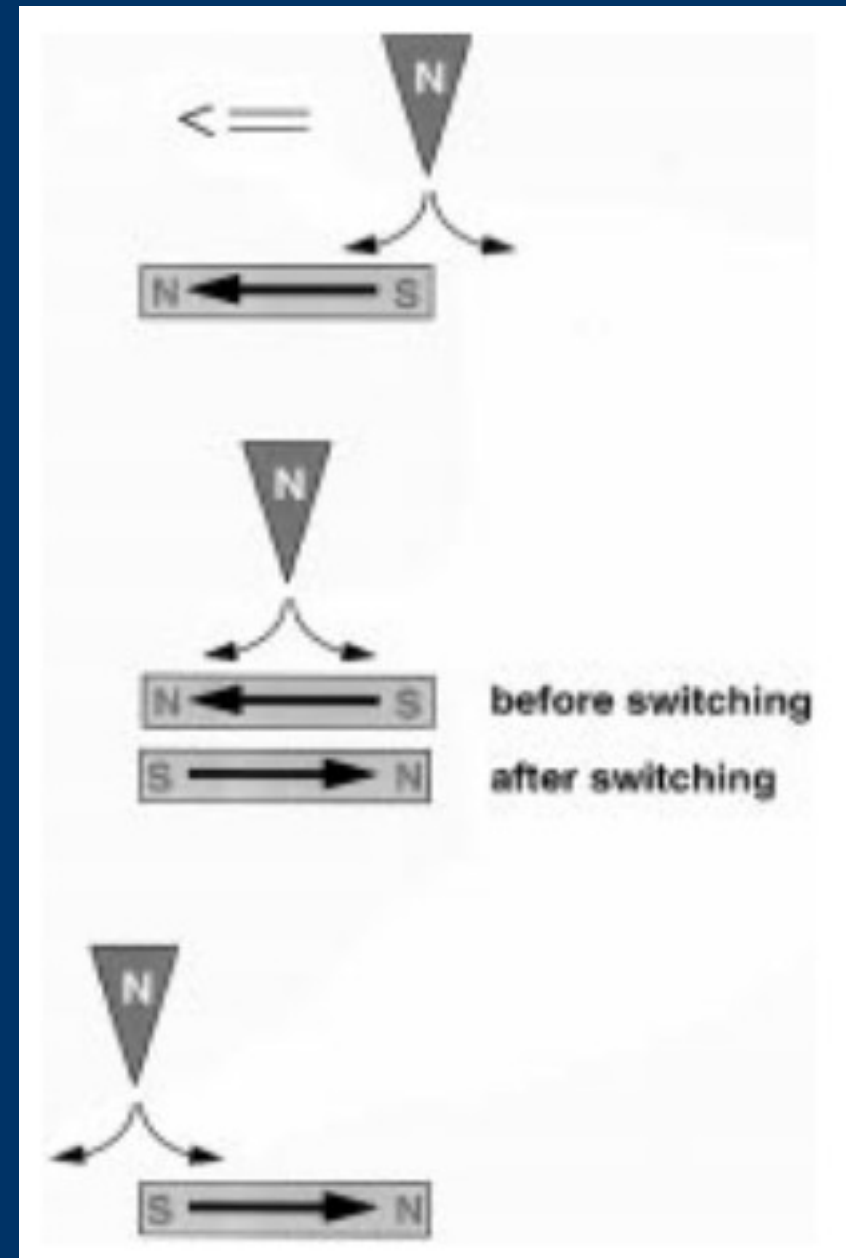
ZBADANE MODELE SPINTRONICZNE



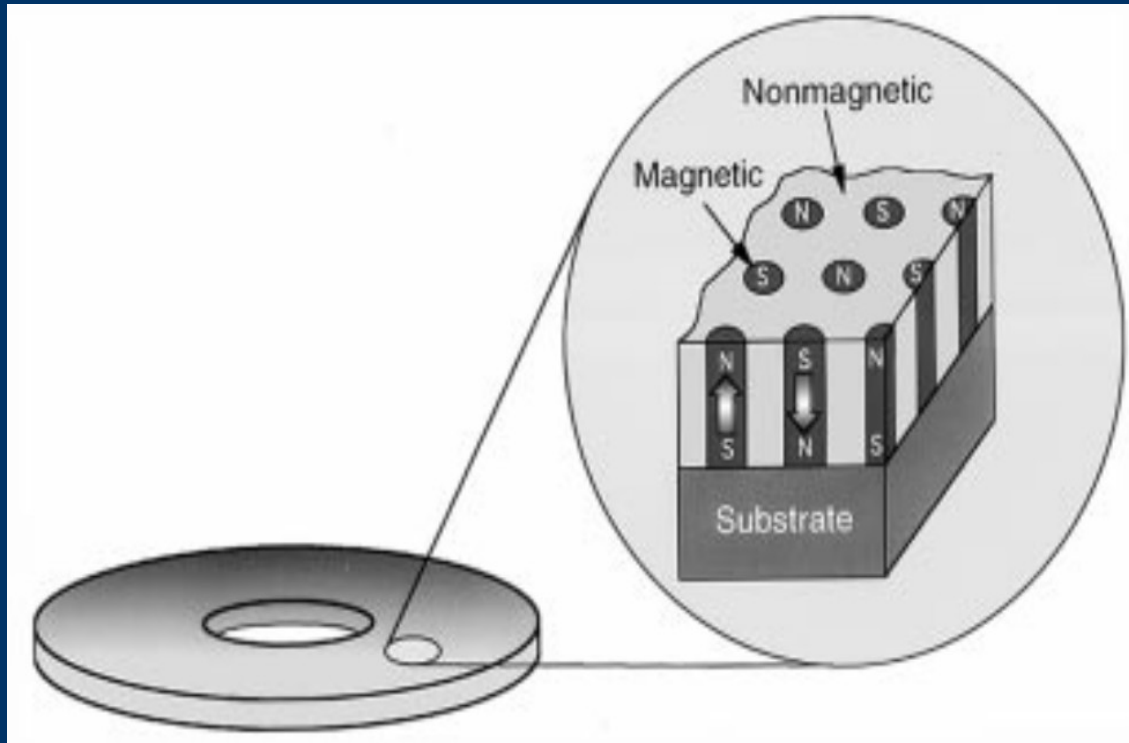
„Patterned Magnetic Nanostructures and Quantized Magnetic Disks”

STEPHEN Y. CHOU, Invited Paper

Układy magnetyczne, które mają stany stabilne namagnesowania w minimach energetycznych układu, mogą być wykorzystane do konstrukcji pamięci



ZBADANE MODELE SPINTRONICZNE



„Patterned Magnetic Nanostructures and Quantized Magnetic Disks”

STEPHEN Y. CHOU Invited Paper

Pamięci BPM (Bit Patterned Memories) stosują zespoły oddzielnych komórek a nie warstw magnetycznych

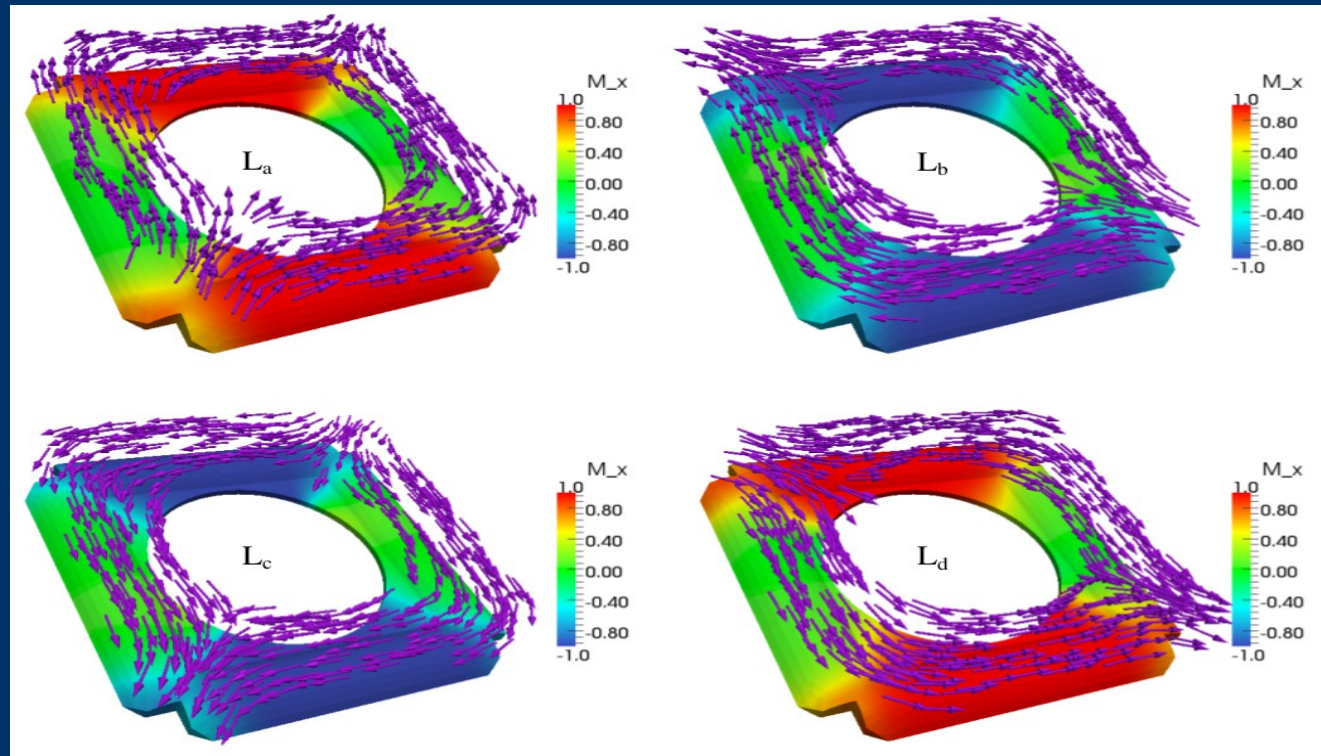
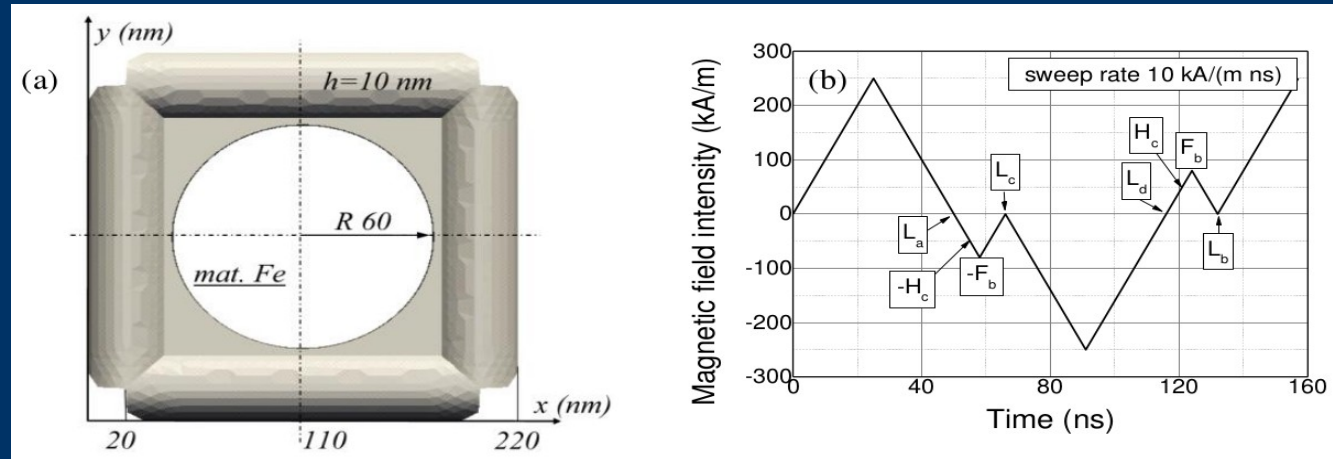
ZBADANE MODELE SPINTRONICZNE

Pojedyncza komórka magnetyczna może posiadać wiele minimów energetycznych przez to możemy na niewielkiej powierzchni zapisywać wiele bitów informacji - rośnie gęstość zapisu

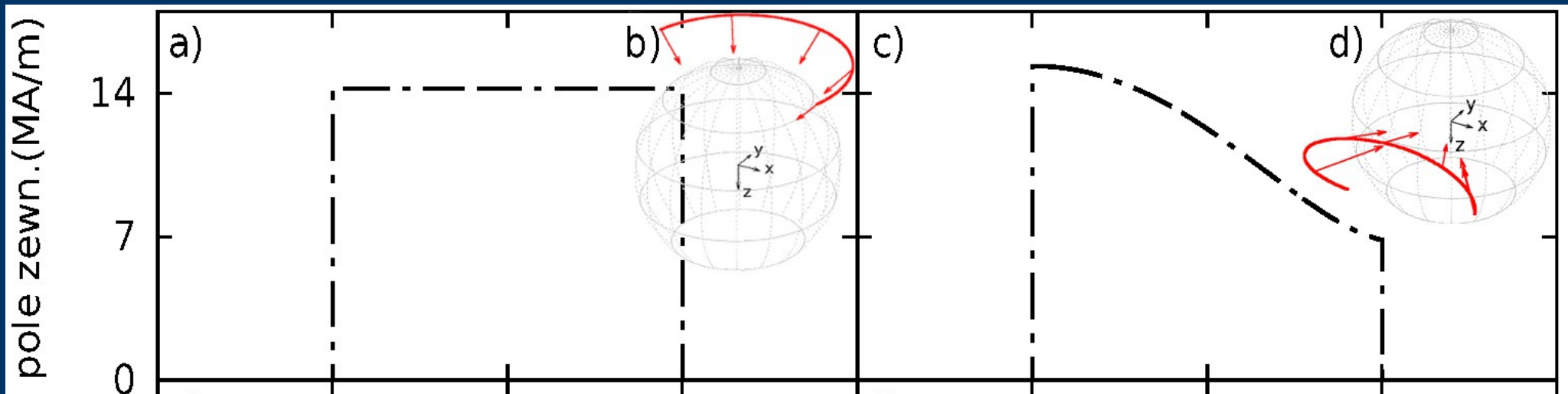
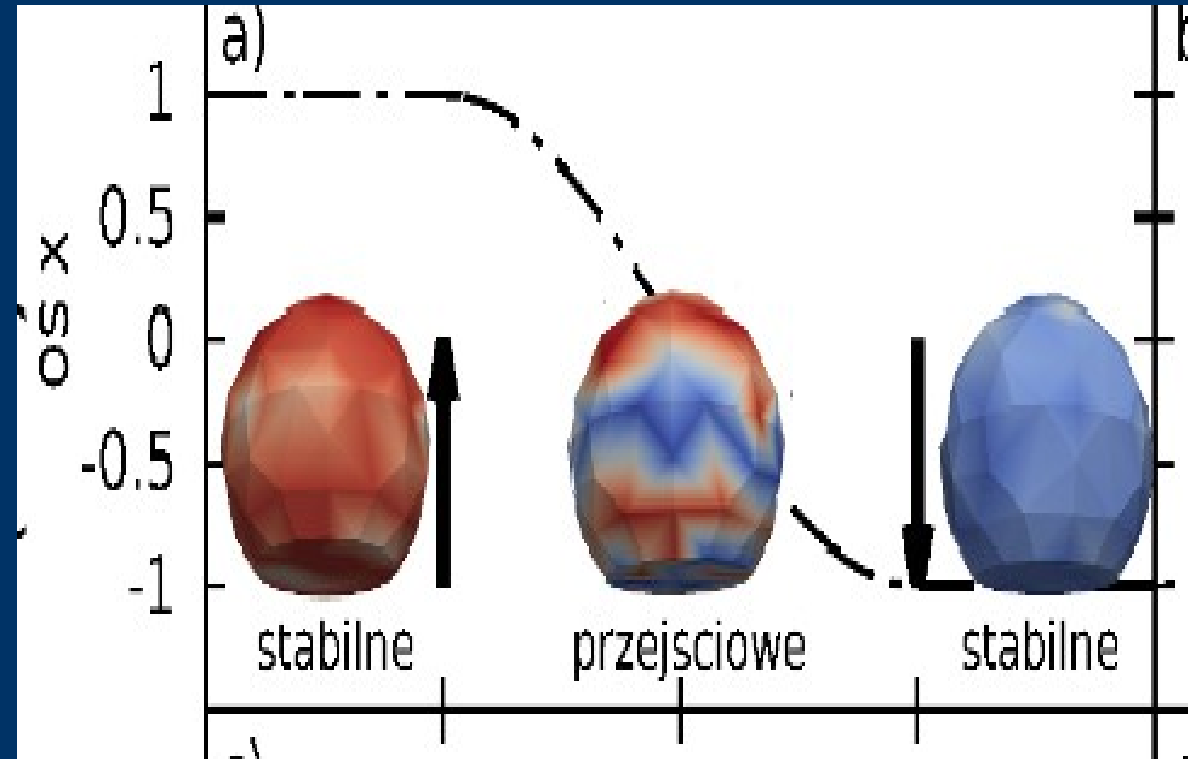
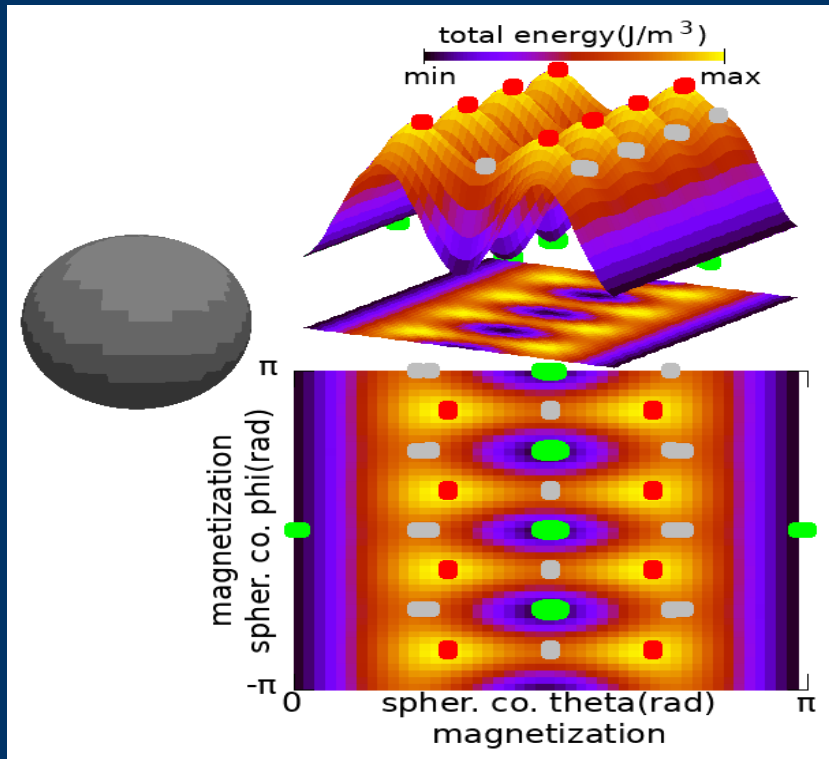
Komórka 4 - stanowa (2 bitowa)

„Square nano-magnets as bit-patterned media with doubled possible data density”

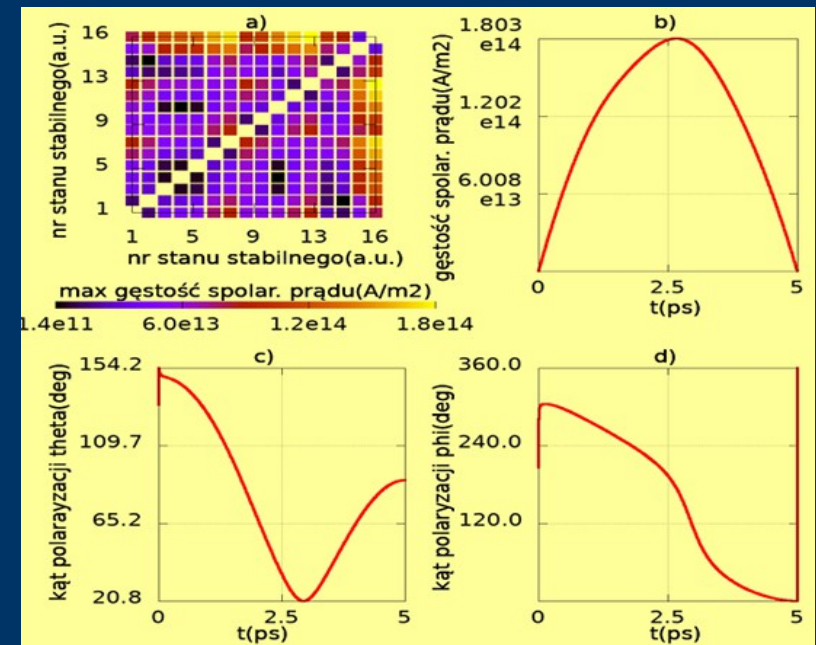
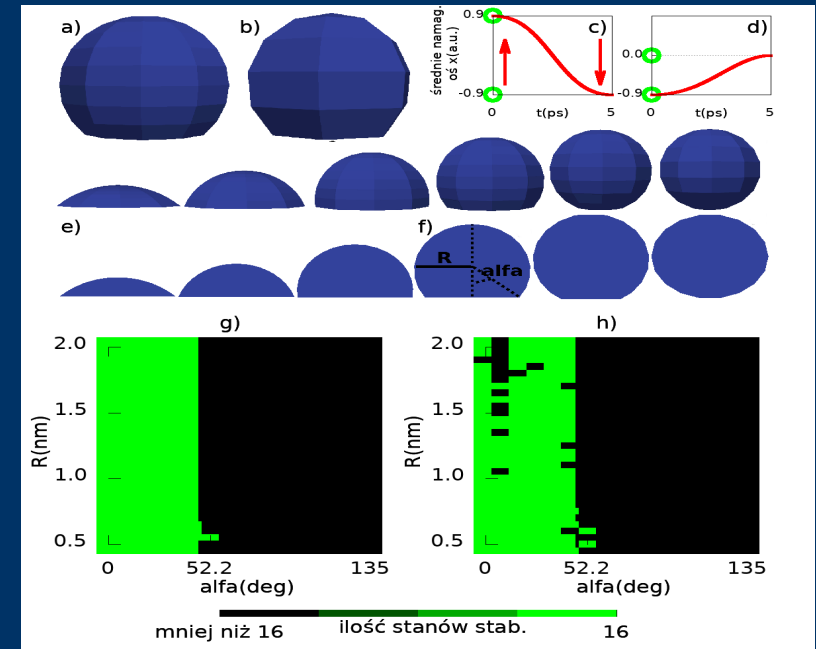
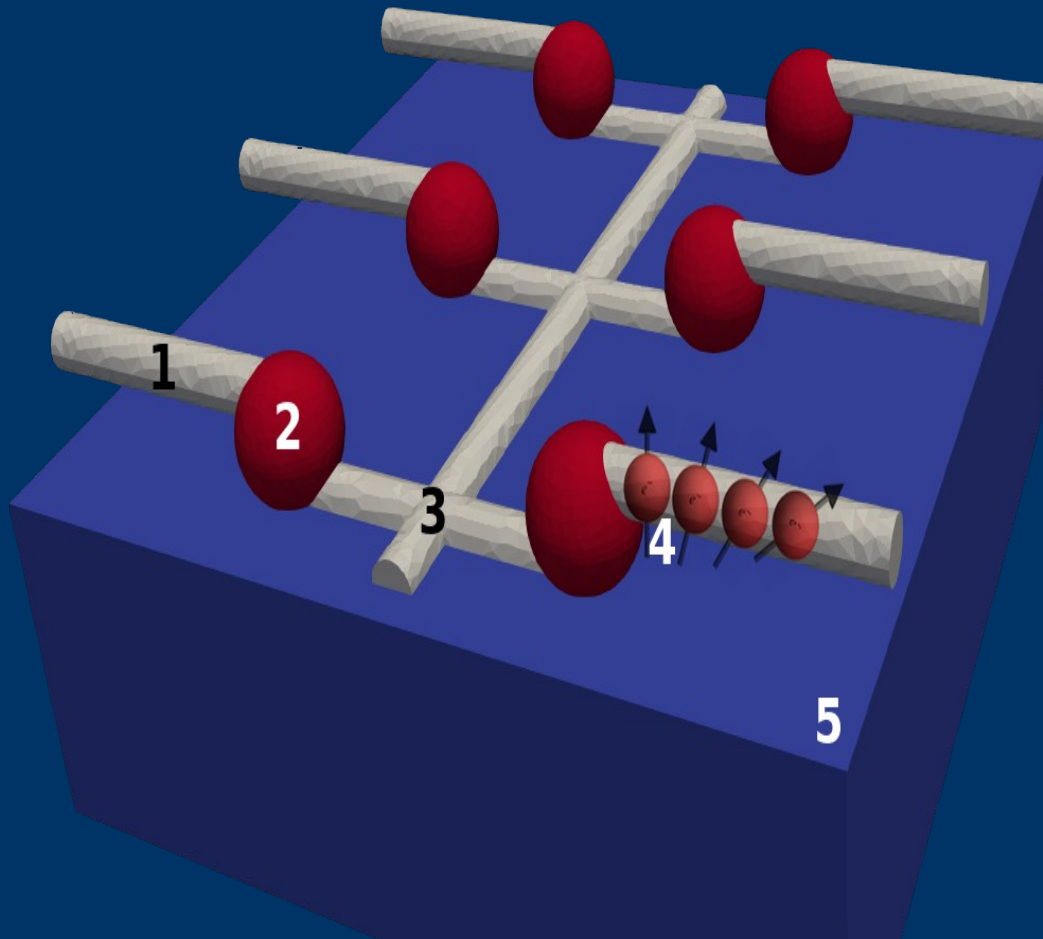
T. Błachowicz, A.Ehrmann
Materials Today 2016



ZBADANE MODELE SPINTRONICZNE



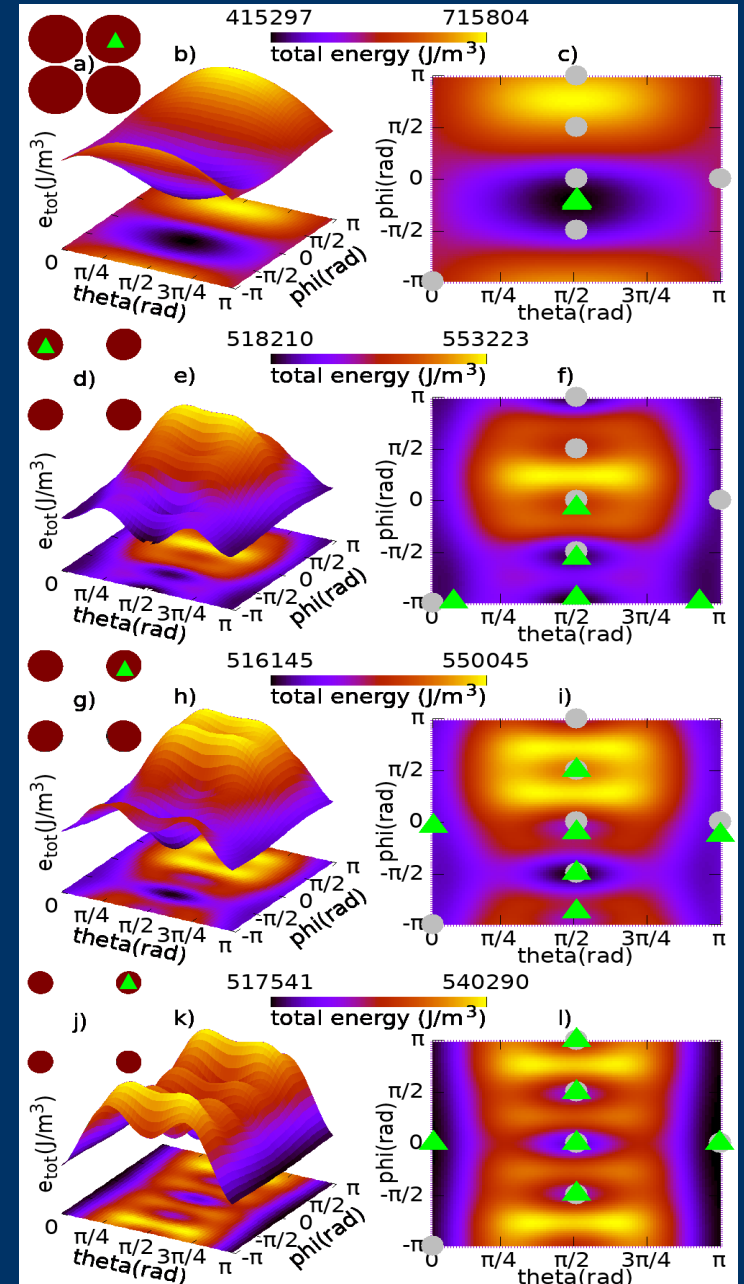
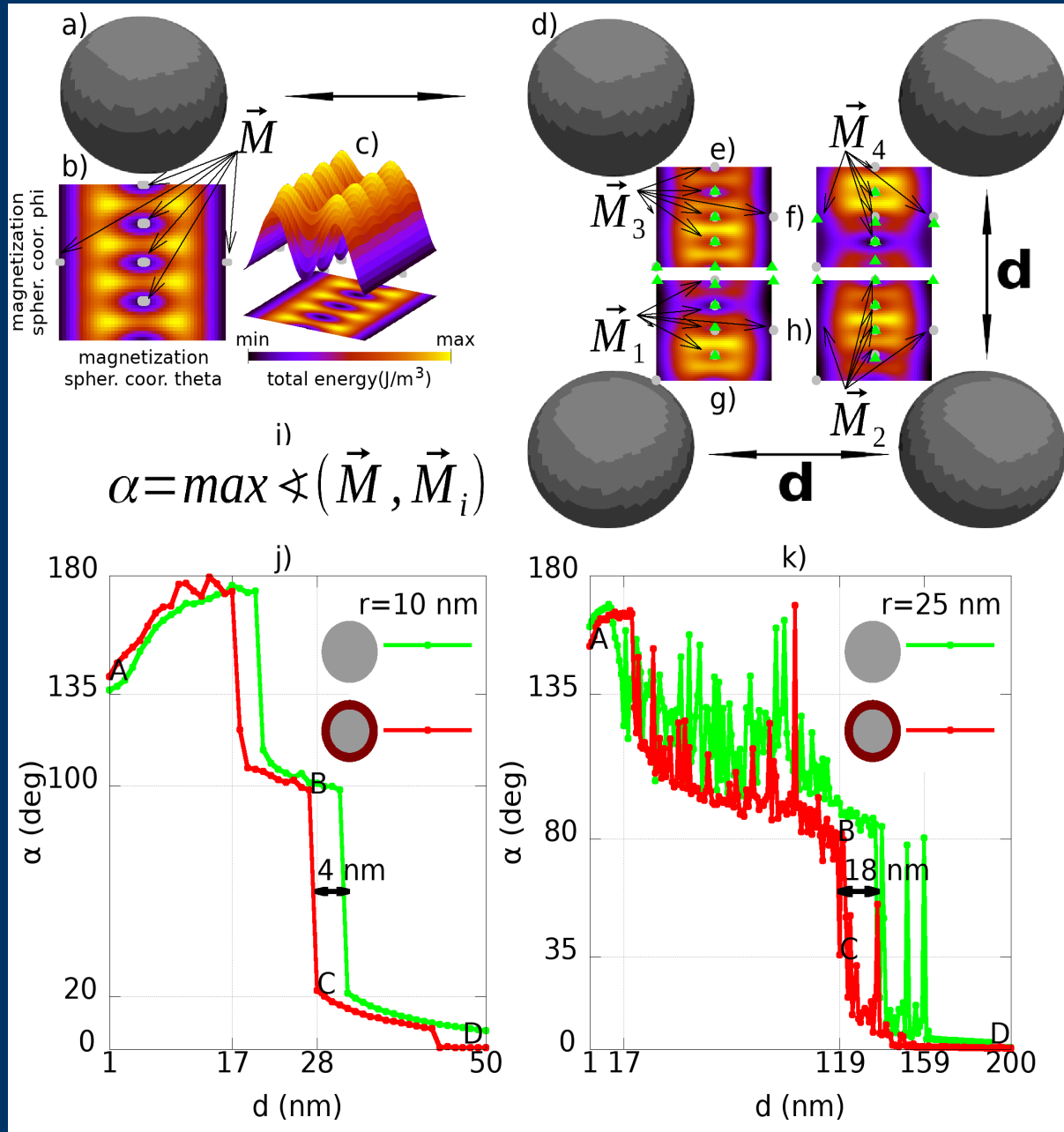
ZBADANE MODELE SPINTRONICZNE



$$\frac{1}{\gamma} \frac{d\vec{m}}{dt} = -\frac{1}{1+\alpha^2} [\vec{m} \times (\vec{H}_{eff} + \frac{jg}{\gamma} \alpha \vec{p}) + \vec{m} \times (\vec{m} \times (\alpha \vec{H}_{eff} - \frac{jg}{\gamma} \vec{p}))]$$

$$g = \frac{\hbar}{M_s * e * 2 * d} * \frac{P_r * \Lambda^2}{(\Lambda^2 + 1) + (\Lambda^2 - 1) * \cos(\angle(\vec{m}, \vec{p}))}$$

ZBADANE MODELE SPINTRONICZNE



PLANOWANE DALSZE BADANIA

ODPOWIEDŹ NA PYTANIA:

- 1. W JAKI SPOSÓB TEMPERATURA WYŻSZA OD 0 K WPŁYNIE NA ILOŚĆ STANÓW STABILNYCH UKŁADÓW PAMIĘCI MAGNETYCZNEJ?**
 - 2. W JAKI SPOSÓB OBECNOŚĆ IMPULSU TEMPERATUROWEGO (HEAT ASSISTED) WPŁYNIE NA SPECYFIKĘ SYGNAŁU PRZEŁĄCZAJĄCEGO (NA JEGO POZIOM I UKIERUNKOWANIE)?**
 - 3. W ZWIĄZKU Z POWYŻSZYM CZY POPRAWIA/POGORSZĄ SIĘ PARAMETRY PAMIĘCI TAKIE JAK GĘSTOŚĆ ZAPISU, CZAS PRZEŁĄCZANIA, ZŁOŻONOŚĆ REALIZACJI PRODUKCYJNEJ?**
-
-

PUBLIKACJE (h-index: 2 w/g Web of Science):

1. „Wavelets as q-bits and q-bit states as wavelets”, P.Steblinski, T.Blachowicz, arXiv
2. „Wavelets spectra of magnetization dynamics in geometry driven magnetic thin layers”, P. Steblinski, T. Blachowicz, arXiv
3. „Magnetization reversal in magnetic half-balls influenced by shape perturbations”, T.Blachowicz, A. Ehrmann, P.Steblinski, L.Pawela, Journal of Applied Physics 108 (12)
4. „Koncepcja hybrydowego procesora cyfrowego z rdzeniem spintronicznym”, P.Steblinski, T. Blachowicz, Wiadomości Elektrotechniczne nr 11
5. „Directional-dependent coercivities and magnetization reversal mechanisms in fourfold ferromagnetic systems of varying sizes”, T. Blachowicz, A. Ehrmann, P. Stebliński, J. Palka, Journal of Applied Physics 113 (1)
6. „Wielostanowa komórka pamięci magnetycznej - analiza czasowa szybkości zapisu oraz gęstości upakowania komórek”, P.Steblinski, T.Blachowicz, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektroniki i Informatyki Politechniki Koszalińskiej nr 11
7. „Magnetic Nanofiber Mats for Data Storage and Transfer”, Ch. Döpke , T. Grothe, P. Steblinski, M. Klöcker, L. Sabantina, D. Kosmalska, T. Blachowicz, A.Ehrmann, Nanomaterials 9 (1)
8. „Conception of magnetic memory switched by time dependant current density and current electron spin polarization”, P.Steblinski, T.Blachowicz, International Journal of Electronics and Telecommunications, 65(2)
9. „Magnetization reversal in ferromagnetic Fibonacci nano-spirals” P. Kern , Ch. Döpke , T. Blachowicz , P.Steblinski , A.Ehrmann, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 484, p.37-41

KONFERENCJE (*h-index: 2 w/g Web of Science*):

1. „Simulations of magnetization dynamics using LLG equation and finite element method”

M.Wieja, P.Steblinski, T.Blachowicz, SPINSWITCH, Kraków

2. ”Experimentelle Untersuchung und Simulation der Magnetisierungsdynamik in Exchange-Bias-

Systemen” *A. Tillmanns, T. Blachowicz, P. Steblinski, DPG-Frühjahrstagung Kurzzeitphysik, Hannover*

08.03.2010

3. „Badanie ewolucji namagnesowania w periodycznych obiektach magnetoelektronicznych”,

P.Steblinski, T. Blachowicz, Krajowa Konferencja Elektroniki, Darłówko Wschodnie

4. „Neue Anisotropien von der Grundlagenforschung zu optimierten magnetischen Speichermedien”,

A. Ehrmann, T. Blachowicz, P. Steblinski, C. Griesel, M. O. Weber, Workshop der ASIM/GI-

Fachgruppen STS und GMMS 25.02.2011

5. „Koncepcja hybrydowego procesora cyfrowego z rdzeniem spintronicznym”,

P.Steblinski, T.Blachowicz, Krajowa Konferencja Elektroniki, Darłówko Wschodnie

6. „Wielostanowa komórka pamięci magnetycznej - analiza czasowa szybkości zapisu oraz gęstości

upakowania komórek”, *P.Steblinski, T.Blachowicz, Krajowa Konferencja Studentów, Mielno*

7. „Investigation of magnetization reversal processes in bent nanofibers” *T. Blachowicz, A.Ehrmann,*

P. Steblinski DPG – Berlin

8. „Koncepcja pamięci magnetycznej przełączanej prądem o zmiennej gęstości i zmiennym kierunku

polaryzacji spinu”, *P.Steblinski, T.Blachowicz,*

Krajowa Konferencja Elektroniki, Darłówko

DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ

