

Mikromagnetyczne symulacje nanostruktur magnetycznych

Amadeusz Filipek

Model mikromagnetyzmu

- ▶ Aproksymacja ciągła
- ▶ Struktura atomowa jest pomijana
- ▶ Mikromagnetyzm statyczny
- ▶ Mikromagnetyzm dynamiczny

Mikromagnetyzm statyczny

- ▶ Minimalizacja energii całkowitej
- ▶ Energia wymiany
- ▶ Energia anizotropii
- ▶ Energia demagnetyzacji
- ▶ Energia magnetoelastyczna
- ▶ Energia Zeemana

Gęstość energii wymiany

$$dE = A(\nabla m)^2 dV$$

- ▶ $m = \frac{M}{M_s}$ - zredukowane namagnesowanie
- ▶ A - stała wymiany
- ▶ Faworyzuje układy o wolno zmiennej magnetyzacji.
- ▶ Minimalizacja prowadzi do jednorodnego namagnesowania.

Gęstość energii anizotropii (jednoosiowej)

$$dE = K_u(1 - m_z^2)dV$$

- ▶ K_u - jednoosiowa stała anizotropii
- ▶ Kierunek anizotropii stanowi oś łatwą magnetyzacji
- ▶ Minimalizacja energii prowadzi do jednorodnej magnetyzacji w kierunku osi łatwej

Gęstość energii demagnetyzacji

$$dE = -\frac{1}{2}\mu_0 M \cdot H_d dV$$

- ▶ H_d - pole demagnetyzacji, efekt namagnesowania, wyliczane z równań :

$$\nabla \cdot H_d = -\nabla \cdot M$$

$$\nabla \times H_d = 0$$

$$H_d = -\frac{1}{4\pi} \int_V \nabla \cdot M \frac{\vec{r}}{r^3} dV$$

- ▶ $-\nabla \cdot M$ - gęstość ładunku magnetycznego
- ▶ Minimalizacja prowadzi do konfiguracji o małym ładunku magnetycznym
- ▶ Minimalizacja prowadzi do wzrostu innych energii
- ▶ Odpowiada za tworzenie się domen

Gęstość energii Zeemana

$$dE = -\mu_0 H \cdot M dV$$

- ▶ Namagnesowanie w zewnętrznym polu magnetycznym
- ▶ Minimalizacja prowadzi do orientacji równoległej namagnesowania do zewnętrznego pola magnetycznego

Mikromagnetyzm dynamiczny

- ▶ Równanie Landaua-Lifshitz-Gilberta :

$$\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t} = -|\gamma| \mathbf{m} \times \mathbf{H}_{eff} + \alpha \mathbf{m} \times \frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t}$$

- ▶ \mathbf{H}_{eff} - pole efektywne widziane przez namagnesowanie

$$\mathbf{H}_{eff} = -\frac{1}{\mu_0 M_s} \frac{d^2 E}{d\mathbf{m} dV}$$

- ▶ γ - żyromagnetyczny współczynnik Gilberta
- ▶ α - stała tłumienia

Object Oriented MicroMagnetic Framework (OOMMF)

- ▶ Środowisko dostępne publicznie
- ▶ Napisane w C++
- ▶ Umożliwia iteracyjne rozwiązywanie zadanych problemów mikromagnetycznych metodą skończonych elementów
- ▶ Symulacje statyczne oraz dynamiczne

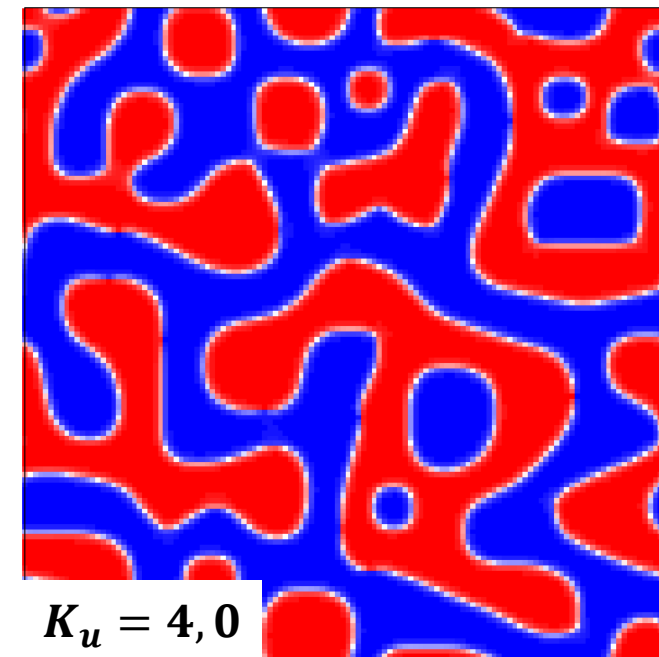
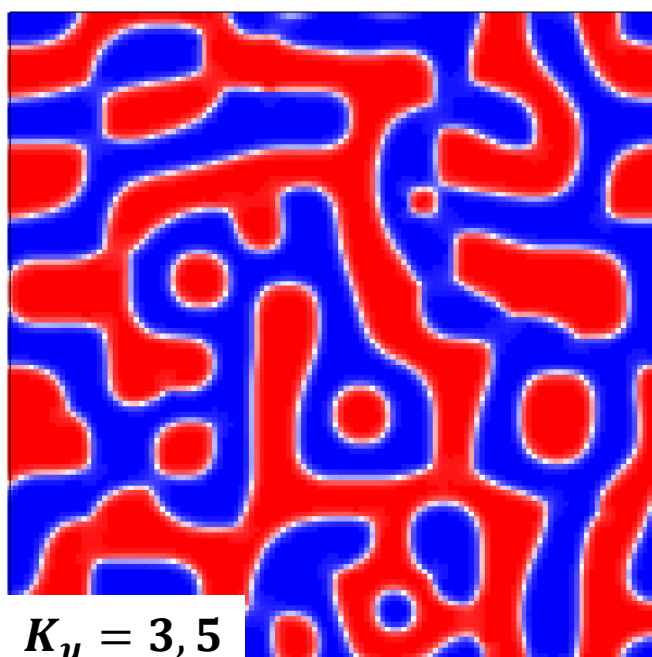
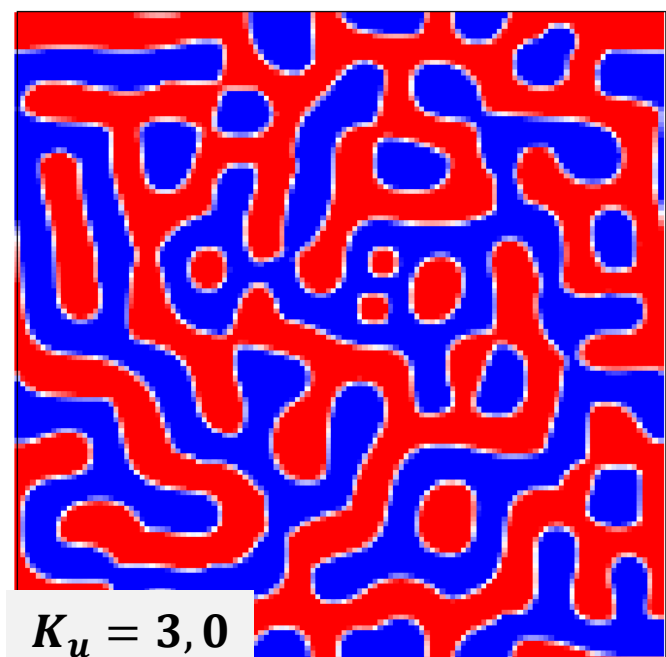
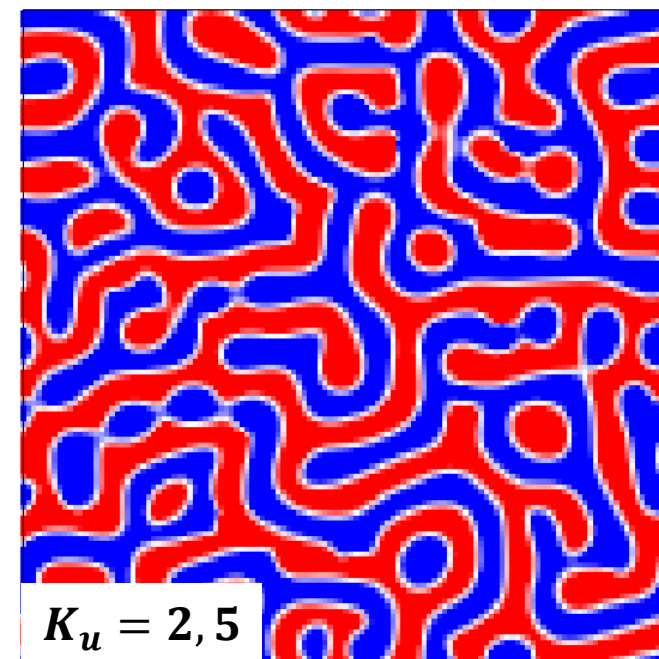
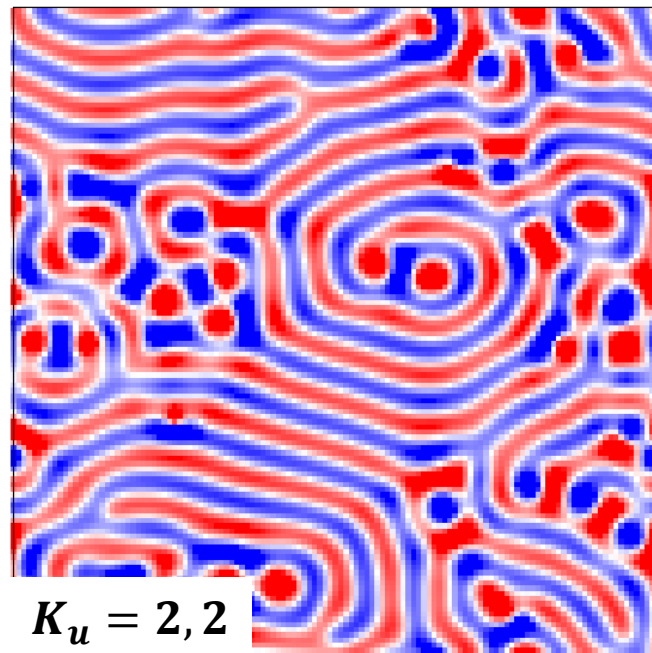
Parametry wejściowe

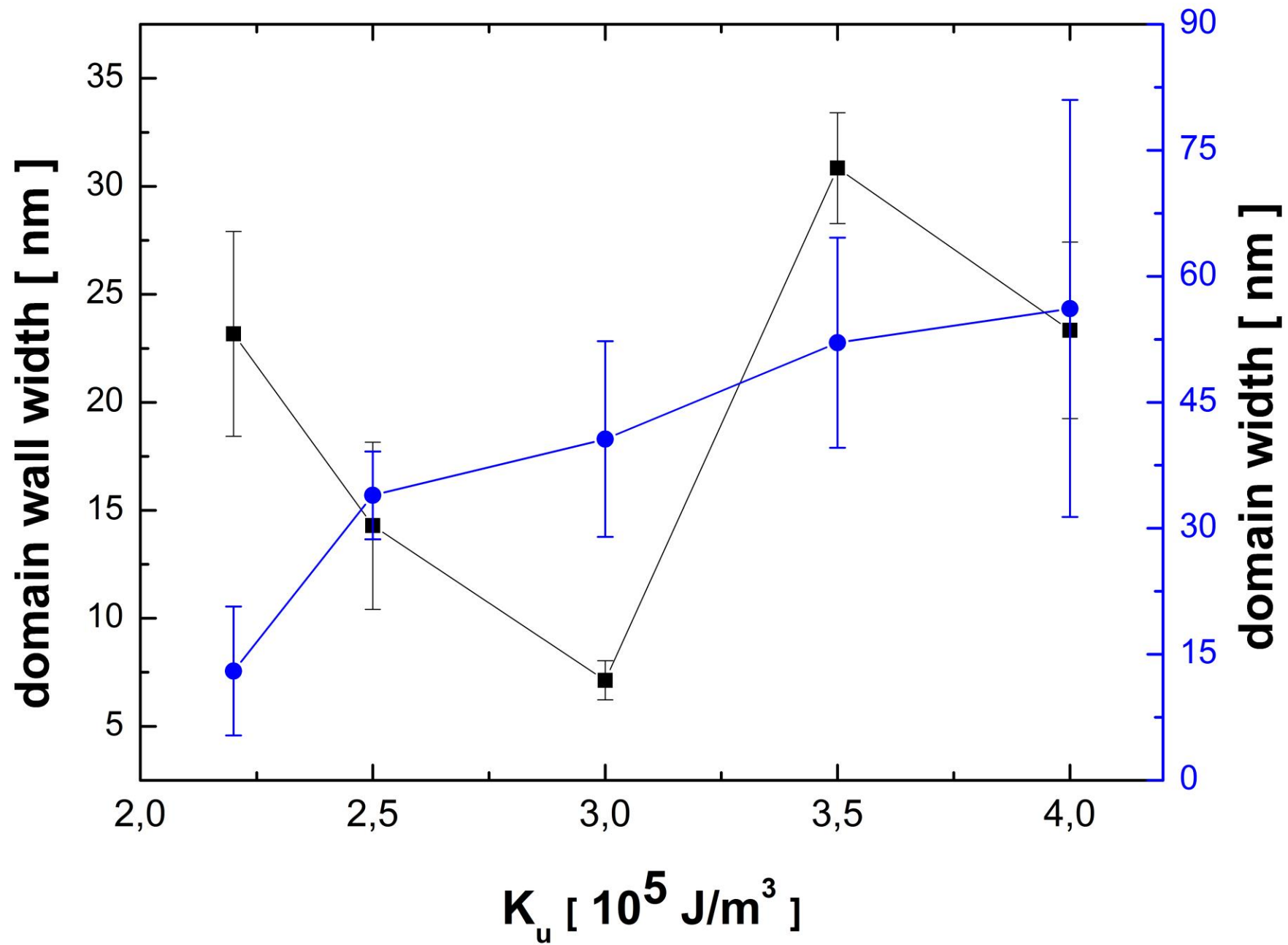
- ▶ Zdefiniowanie geometrii próbki
- ▶ Zadanie wymiarów siatki obliczeniowej
- ▶ Parametry energetyczne:
 - ▶ Stała wymiany A
 - ▶ Stała anizotropii K_u
 - ▶ Stała Namagenosowania saturacji M_s
- ▶ Specyfikacja doświadczenia (geometria i wartość zewnętrznego pola magnetycznego, rozkład startowy namagnesowania)

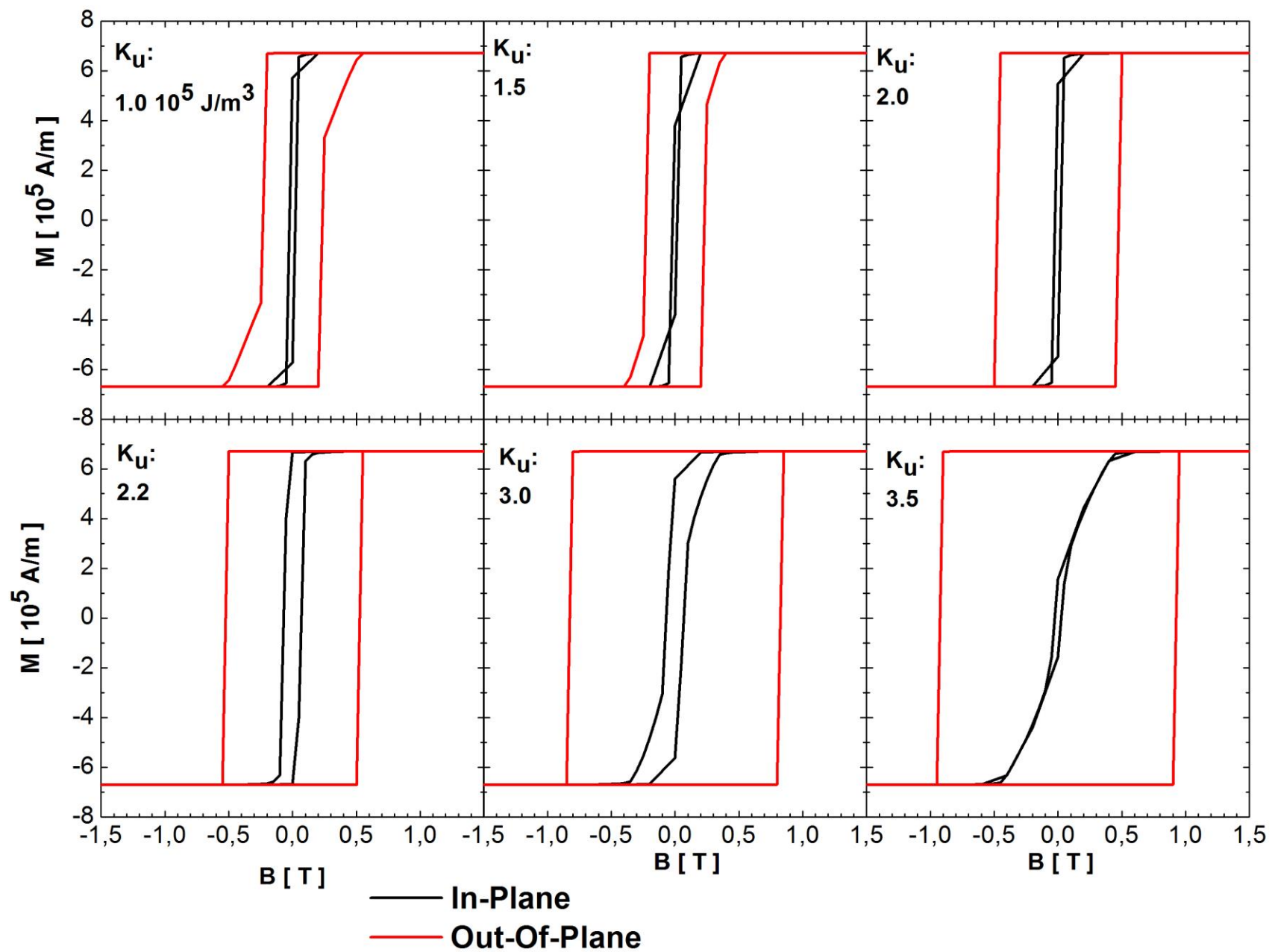
Symulacje nanostruktur

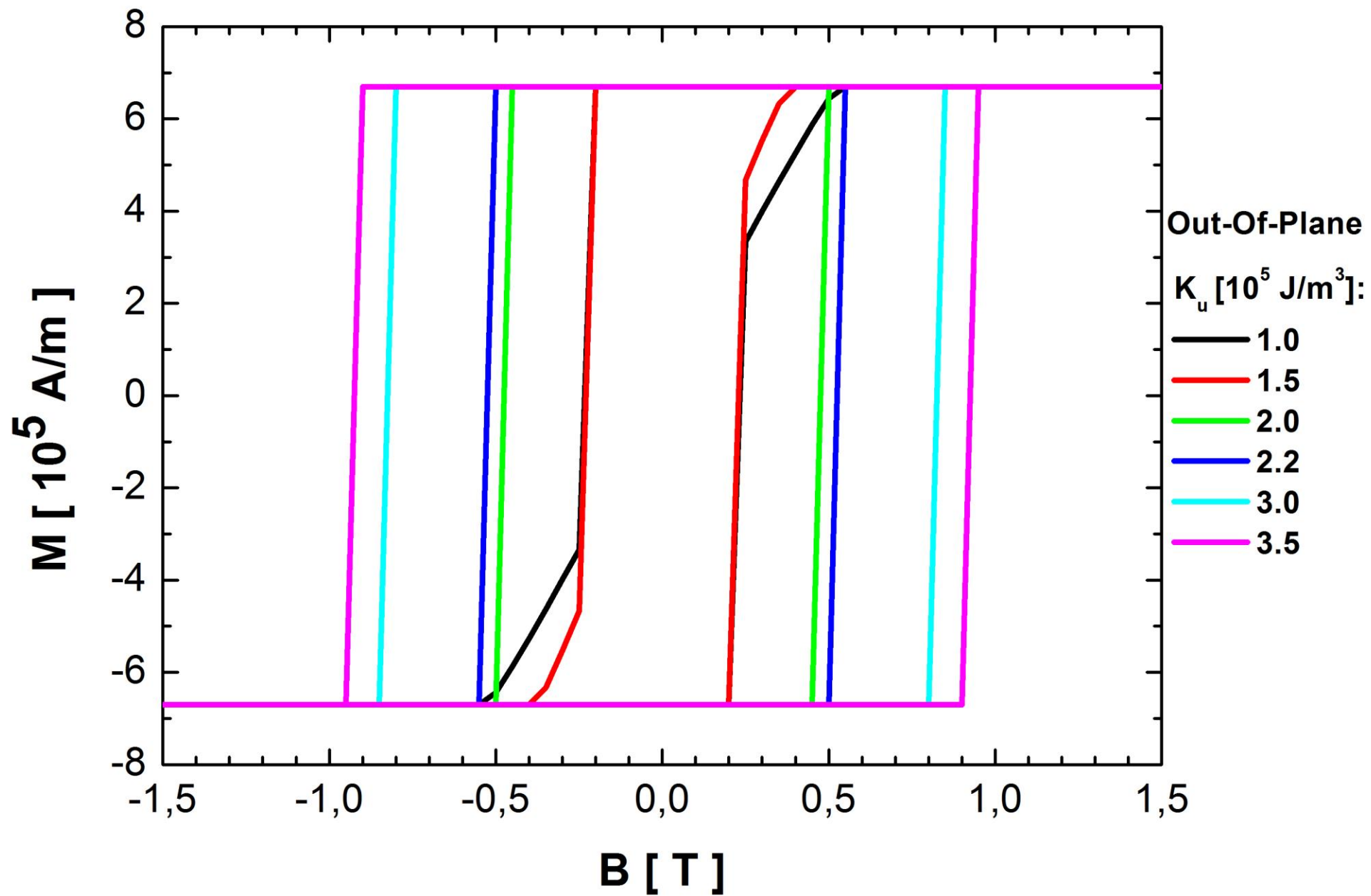
- ▶ Wymiary układu : 1000 nm x 1000 nm x 12 nm
- ▶ Wymiary komórki obliczeniowej : 4 x 4 x 3 nm
- ▶ $\gamma = 2.211 \cdot 10^5 \frac{m}{A \cdot s}$
- ▶ $\alpha = 0.5$
- ▶ Temperatura $T = 0 K$
- ▶ Parametry wyjściowe :
 - ▶ $M_s = 6,7 \cdot 10^5 \frac{A}{m}$ (wartość z pomiarów)
 - ▶ $A = 5 \cdot 10^{-12} \frac{J}{m}$ (z literatury)
 - ▶ $K_u = 2,2 \cdot 10^5 \frac{J}{m^3}$ w osi z (wartość z pomiarów)
- ▶ Symulacje histerezy w jednorodnym polu magnetycznym w zakresie -2 do 2 T
- ▶ Periodyczne warunki brzegowe dla domen

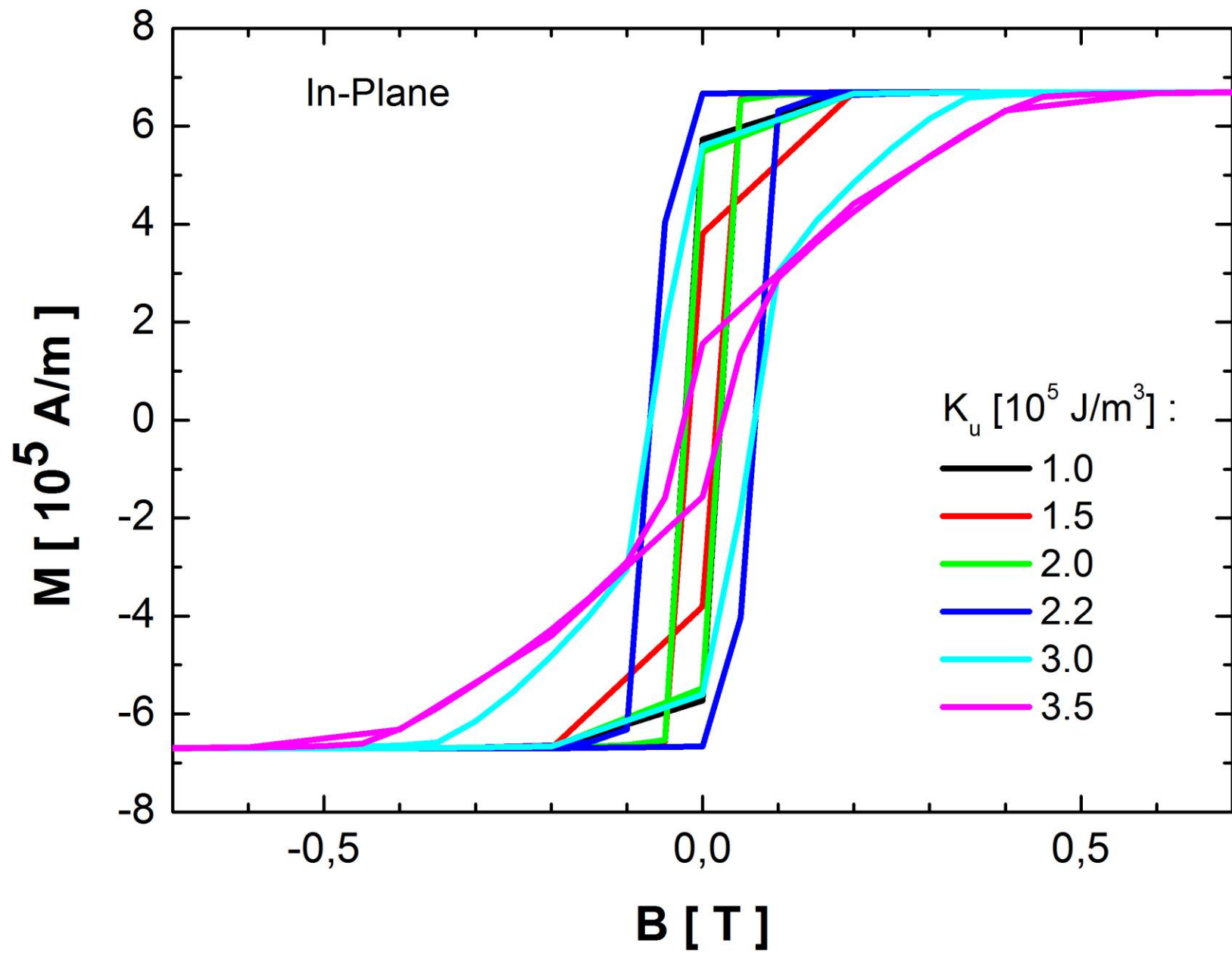
$$K_u = 2 \cdot 10^5 \frac{J}{m^3}$$

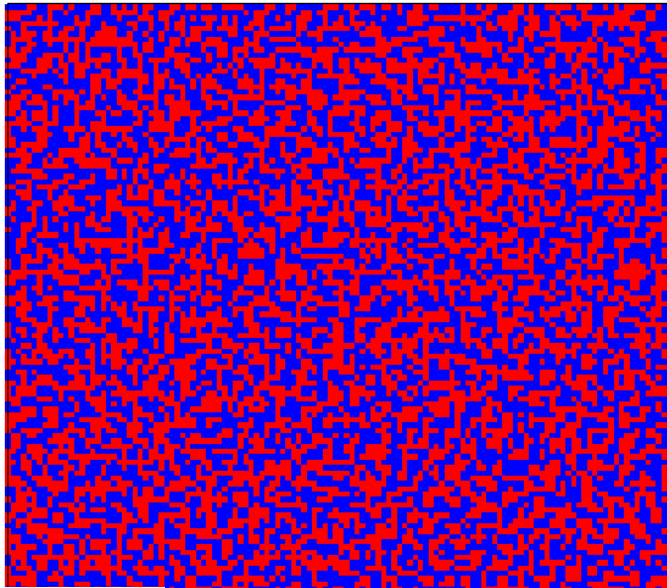




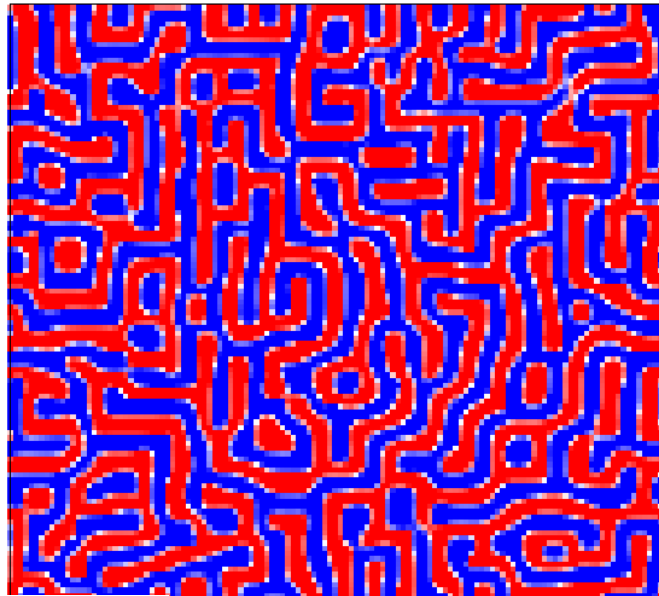




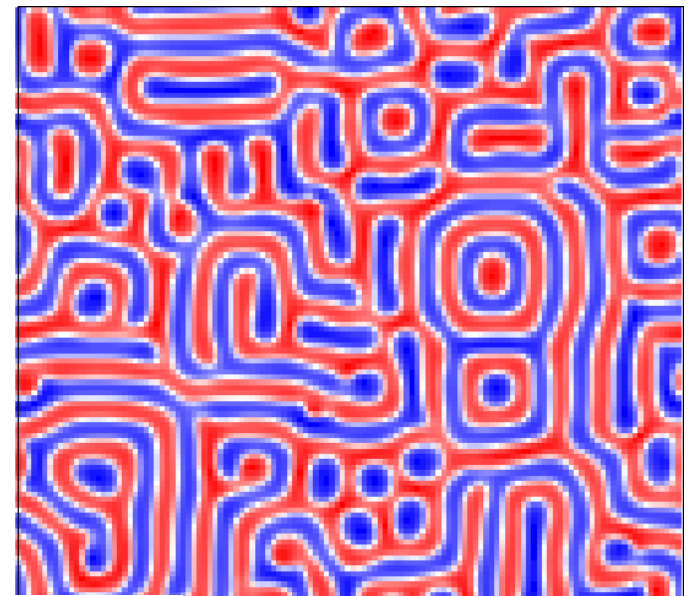




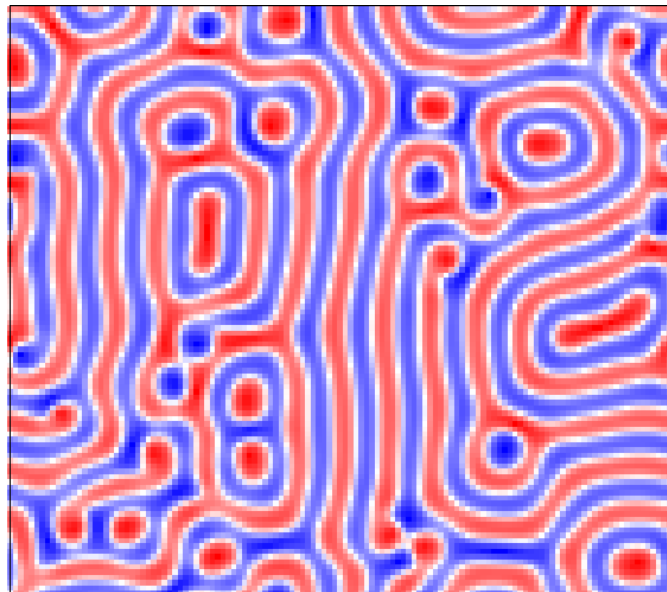
$A = 1$



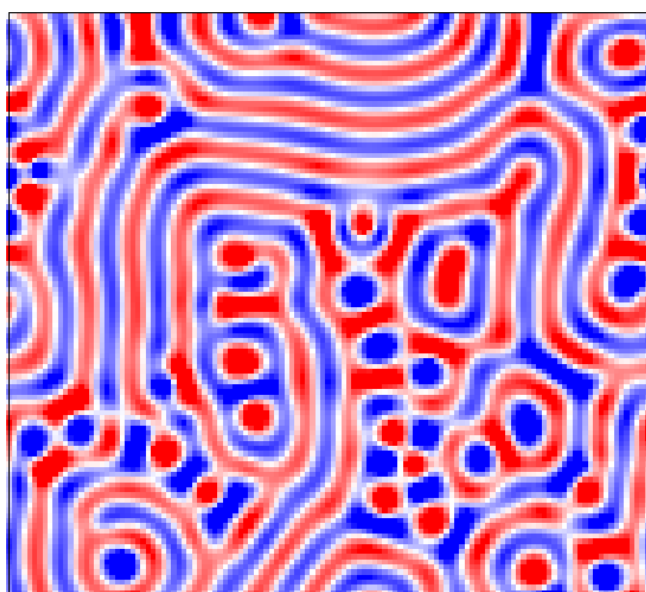
$A = 2$



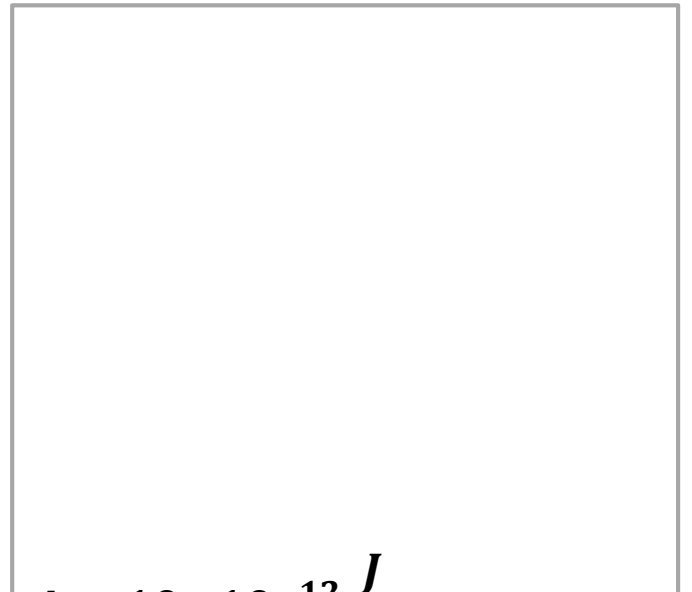
$A = 3$



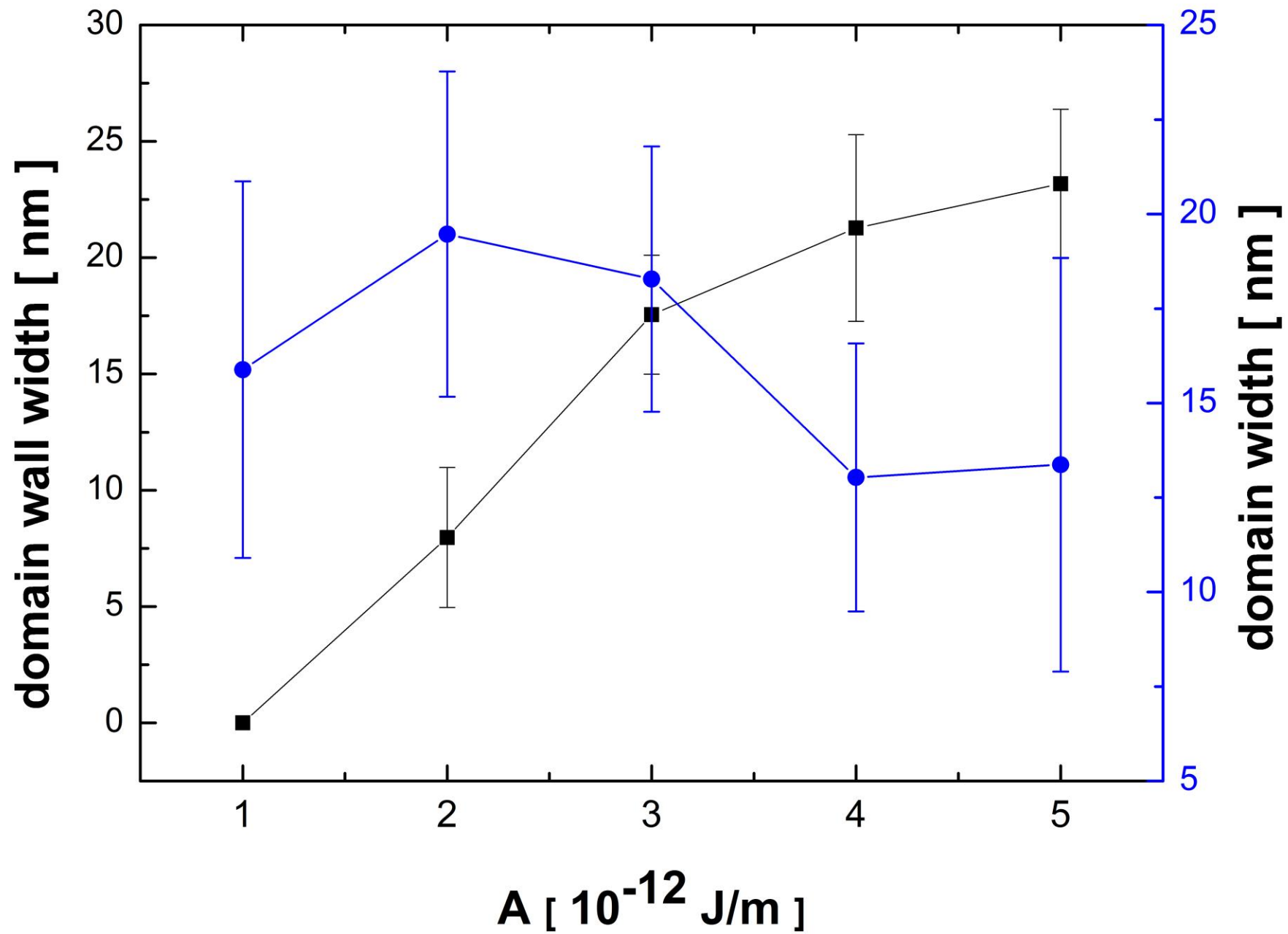
$A = 4$

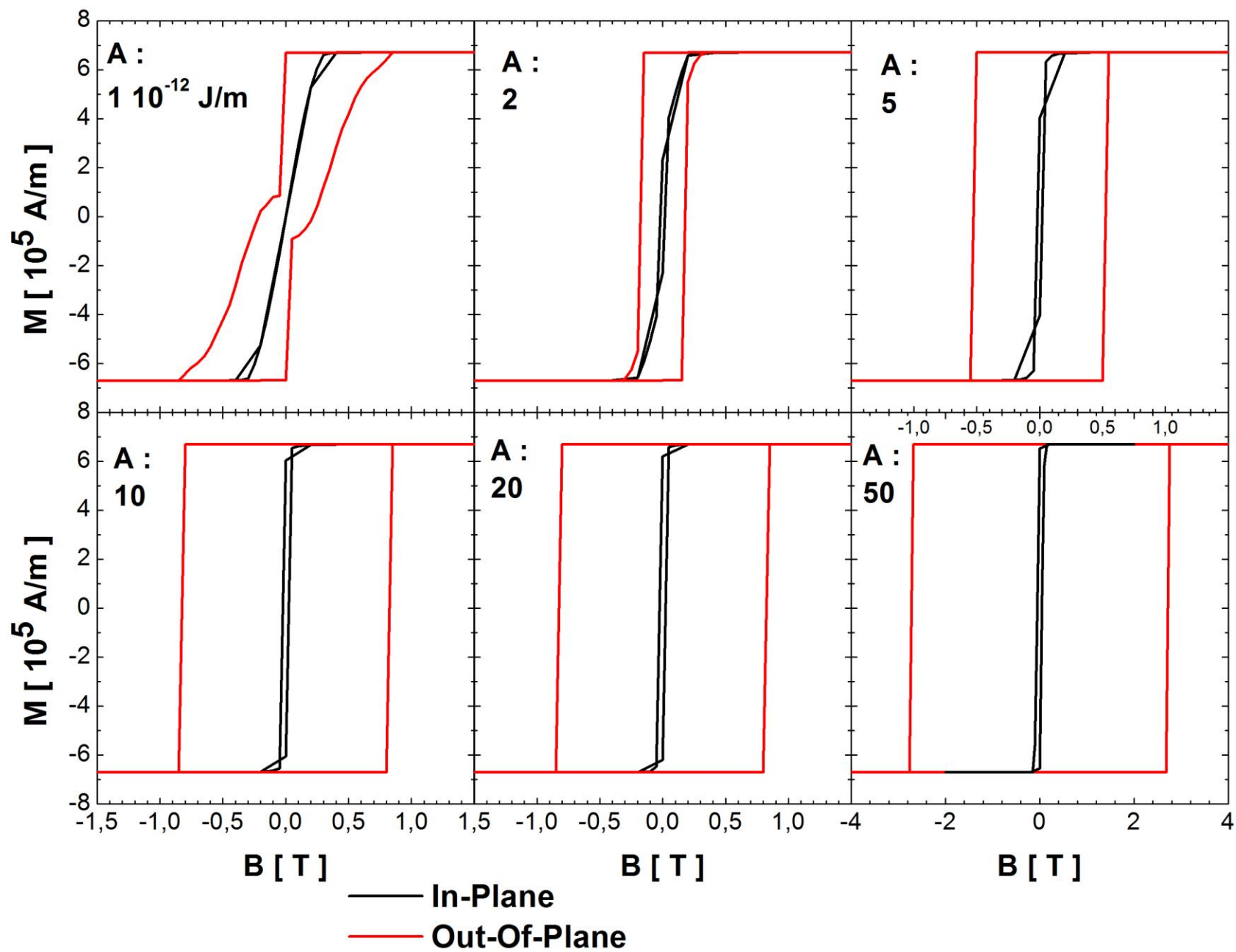


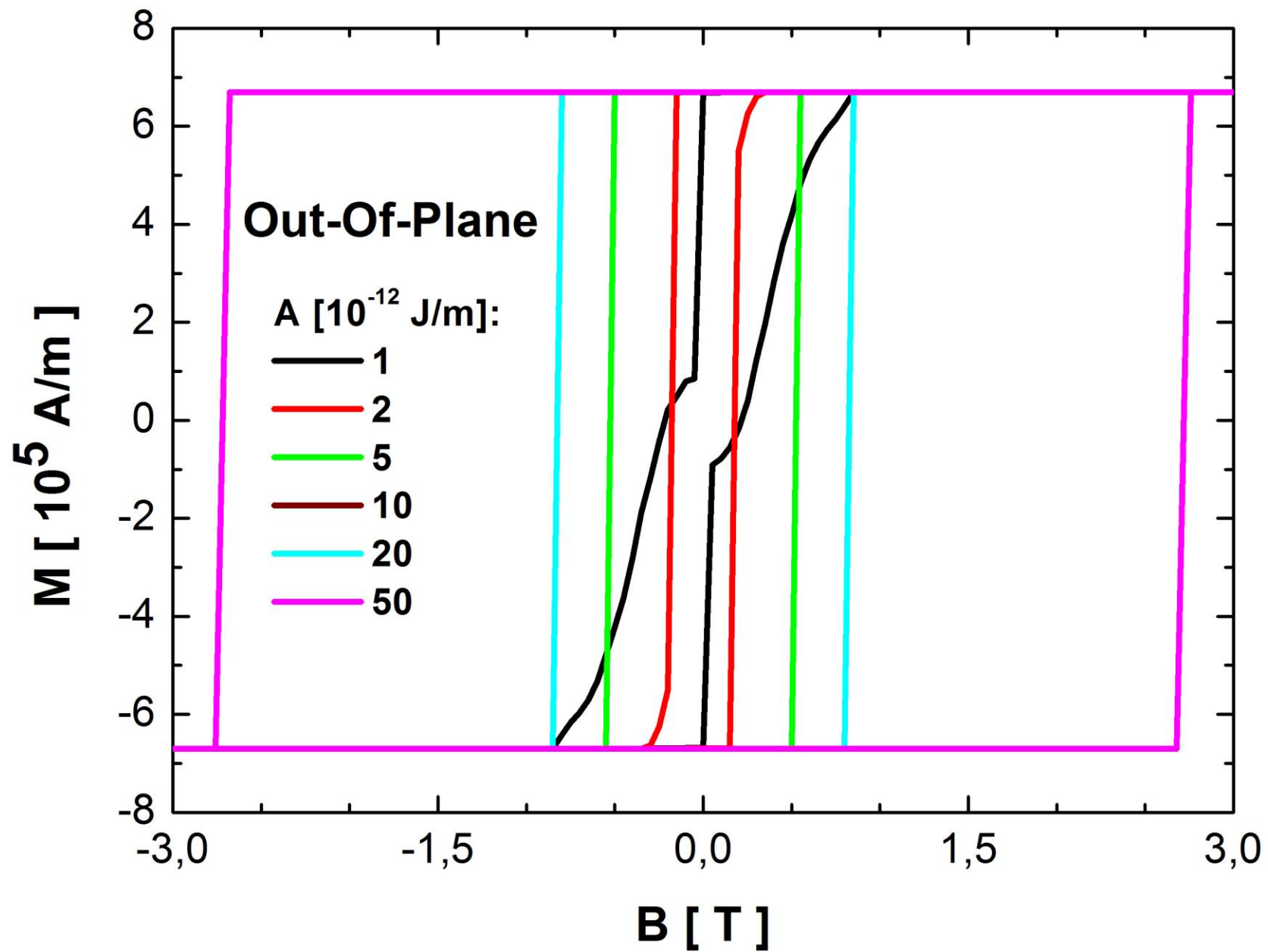
$A = 5$

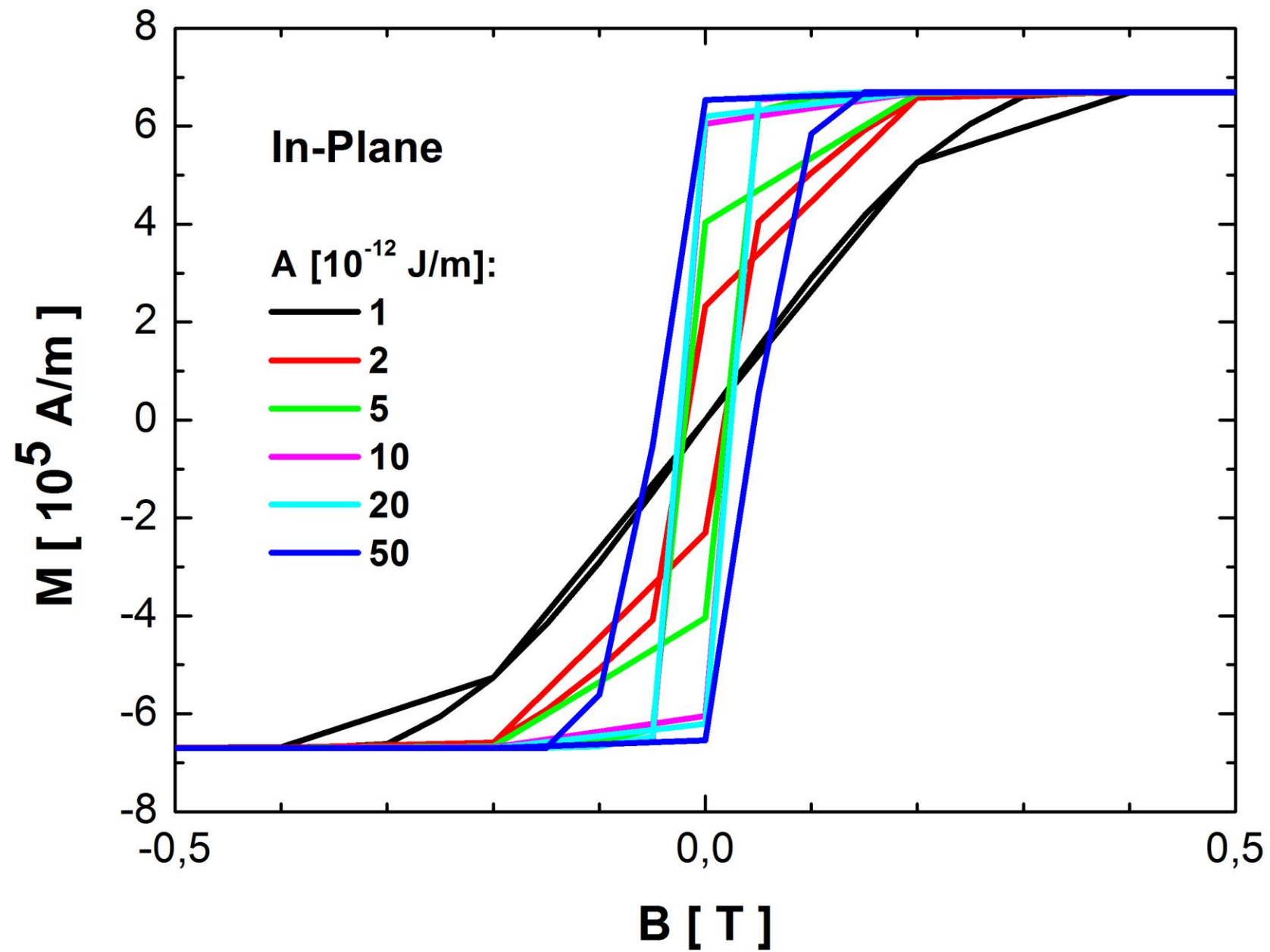


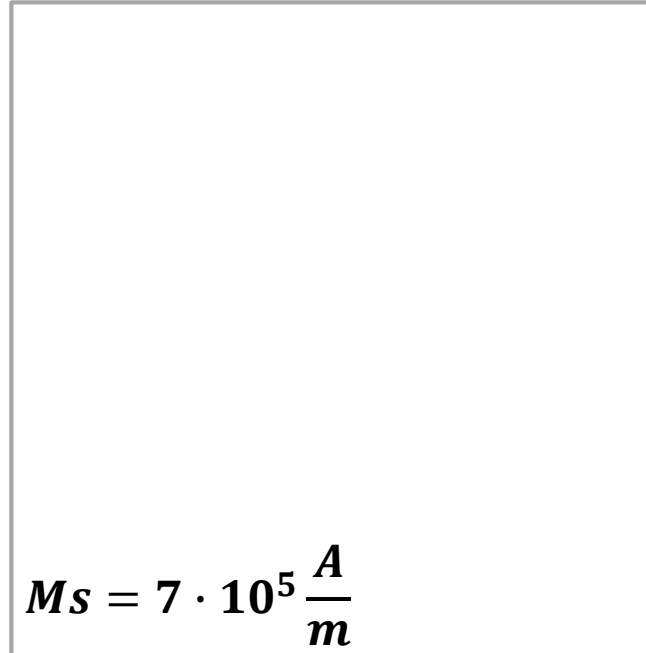
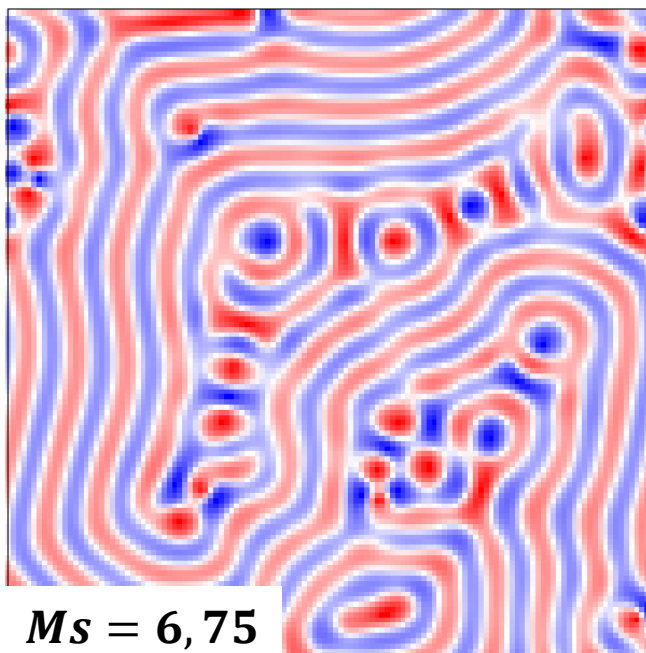
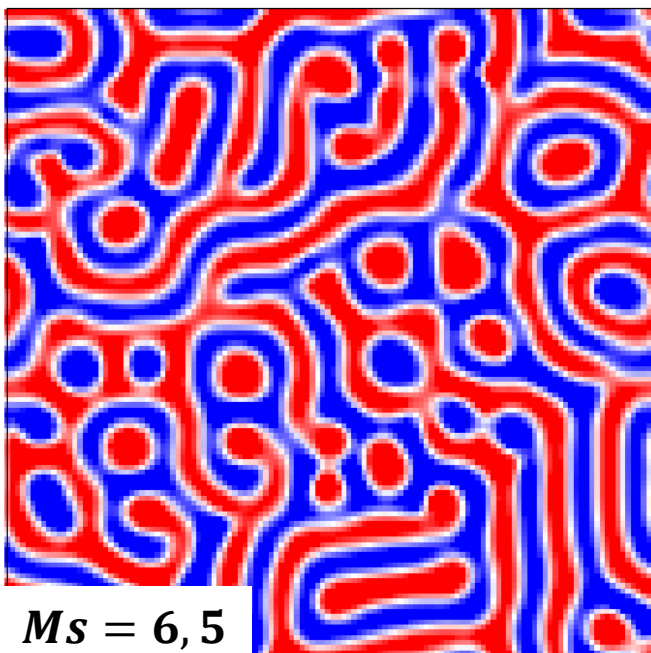
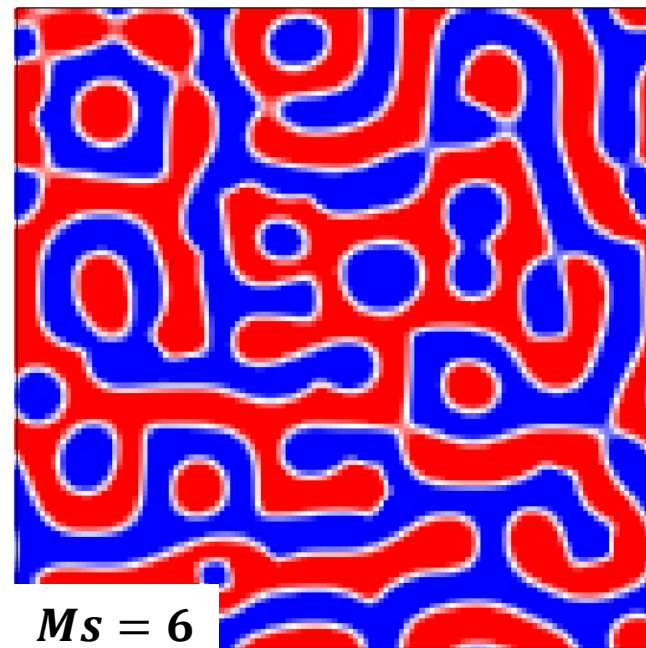
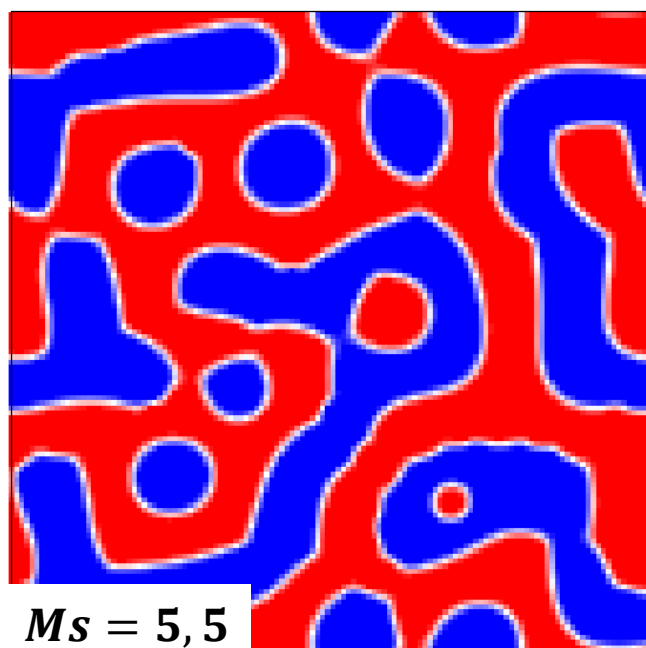
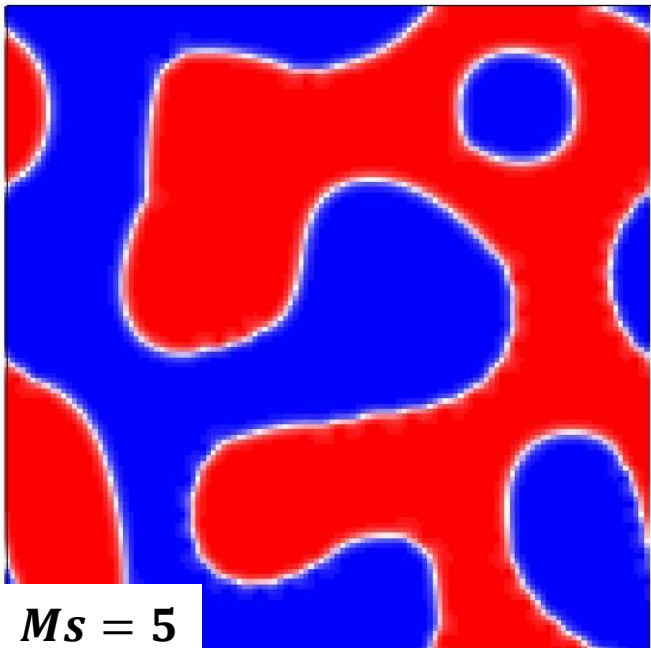
$A = 10 \cdot 10^{-12} \frac{J}{m}$

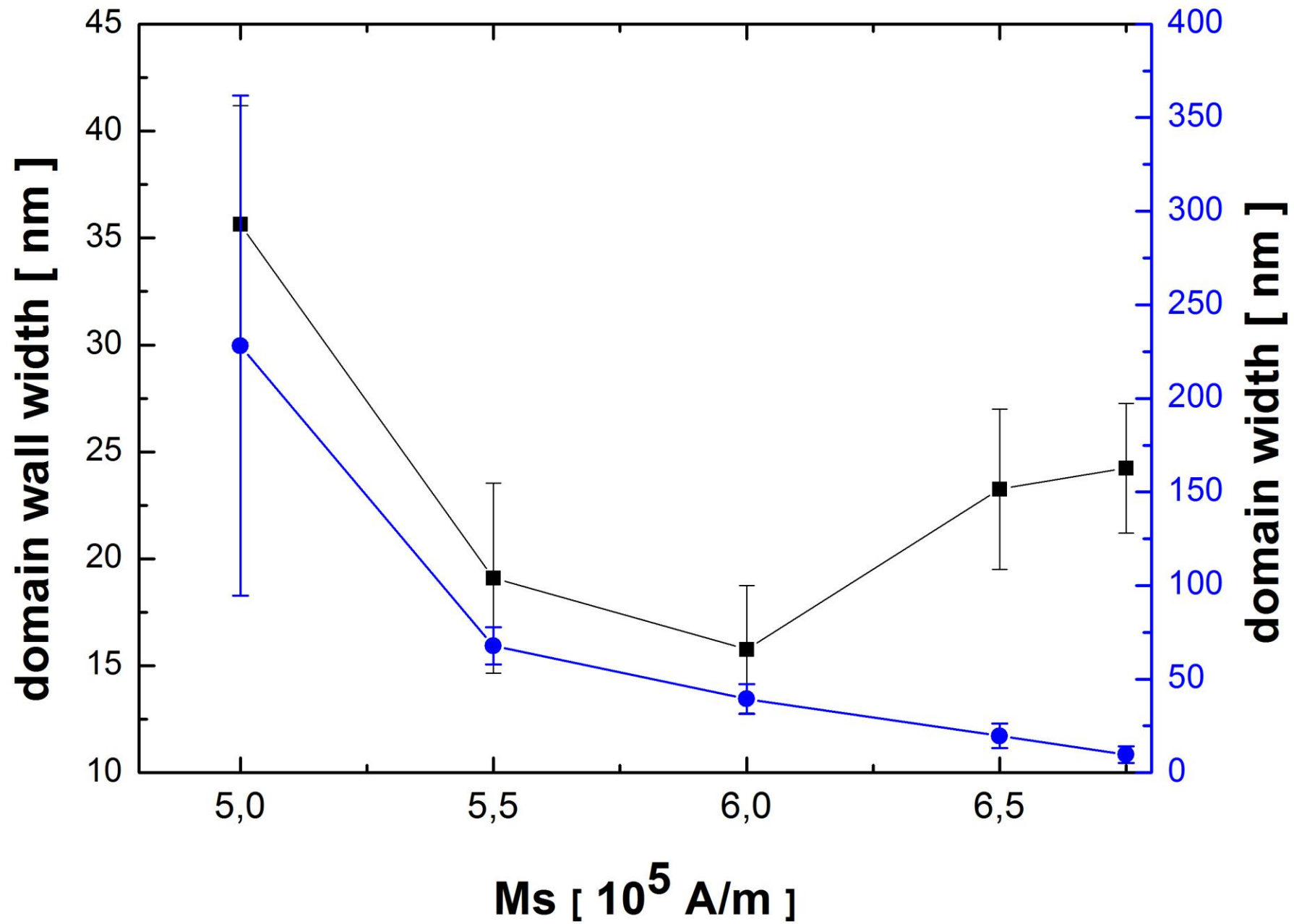




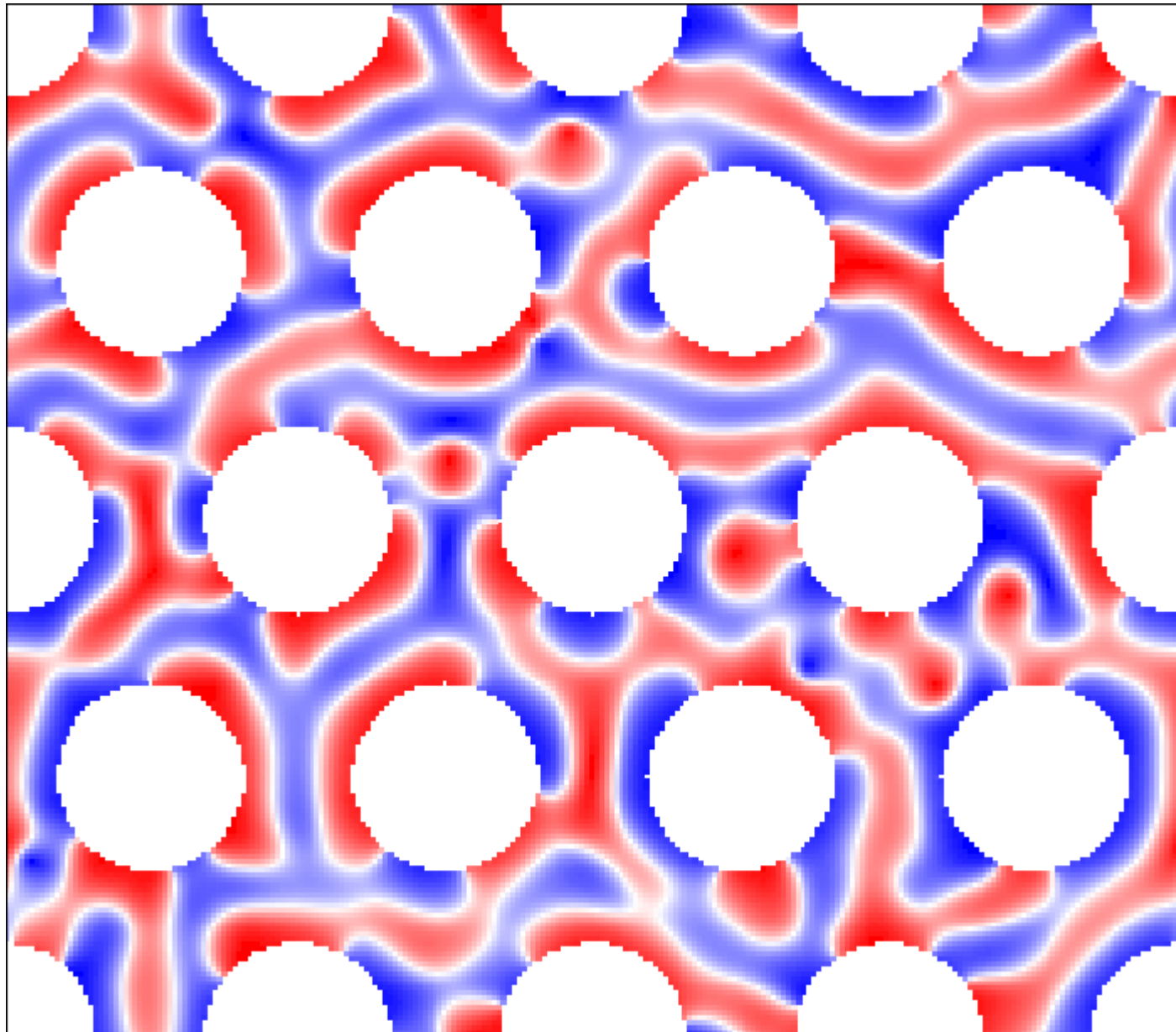


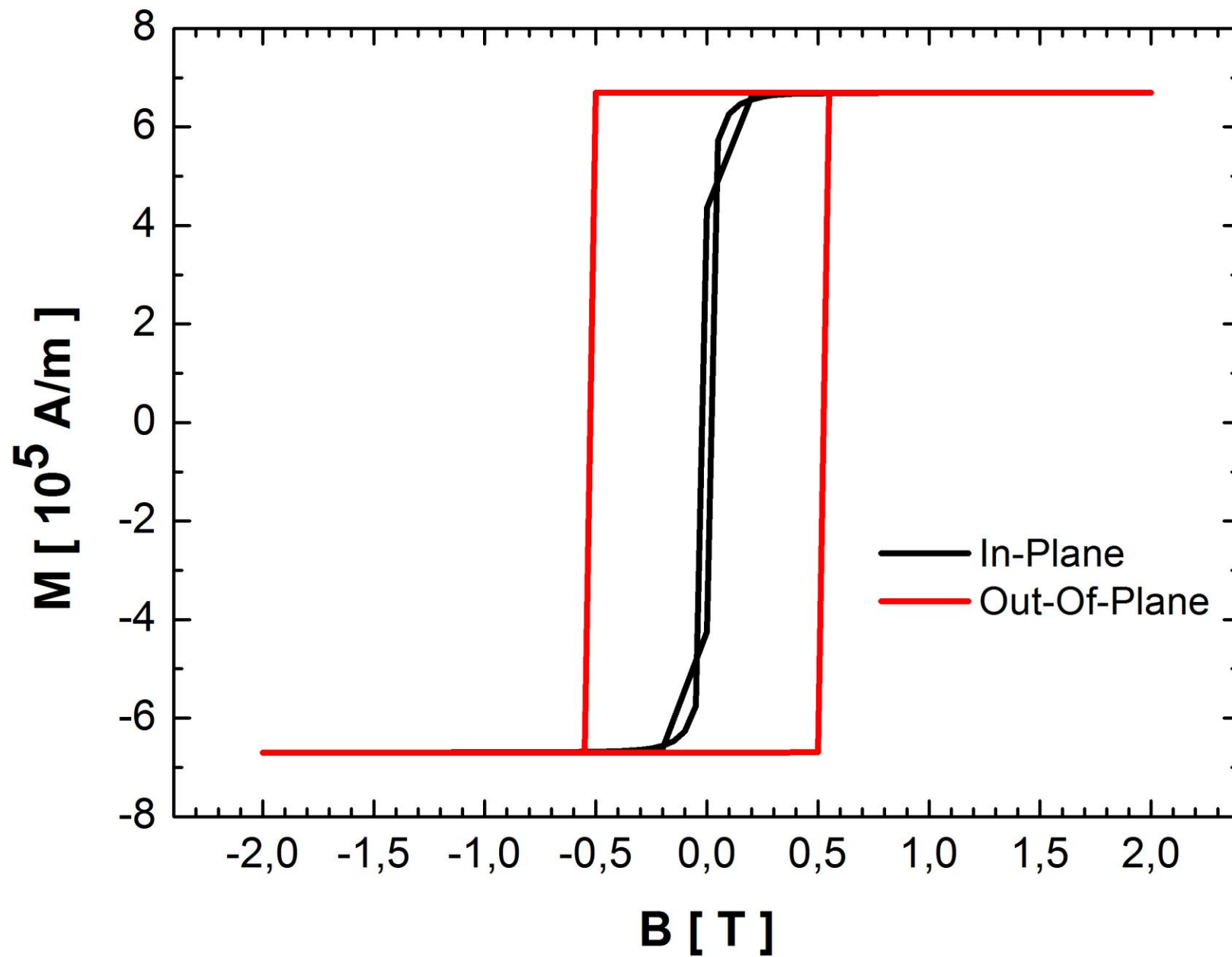






- Wymiary : 960 nm x 840 nm x 12 nm
- Period sieci : ~240 nm
- Promień dziury : 75 nm

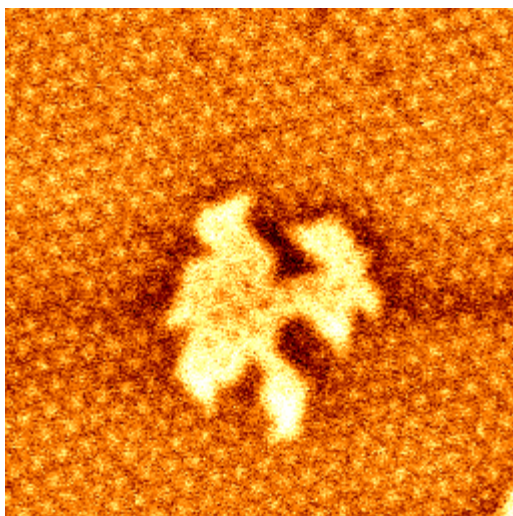
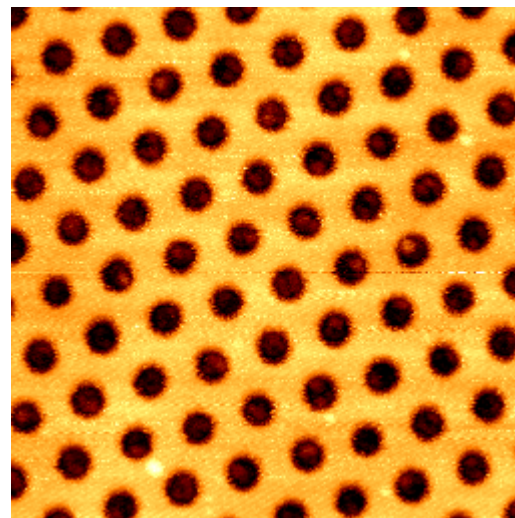




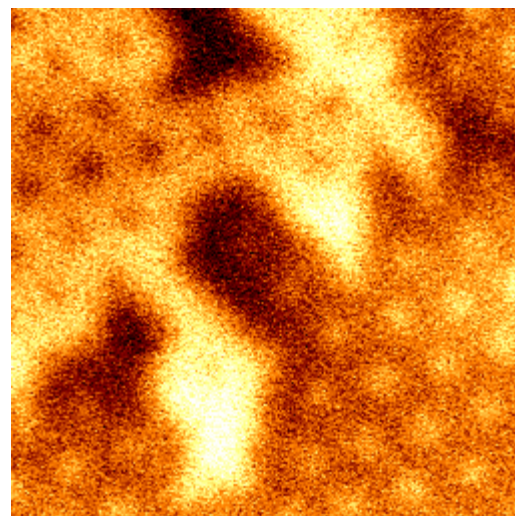
Topografia próbki 2 x 2 μm

Period sieci : $\sim 263 \text{ nm}$

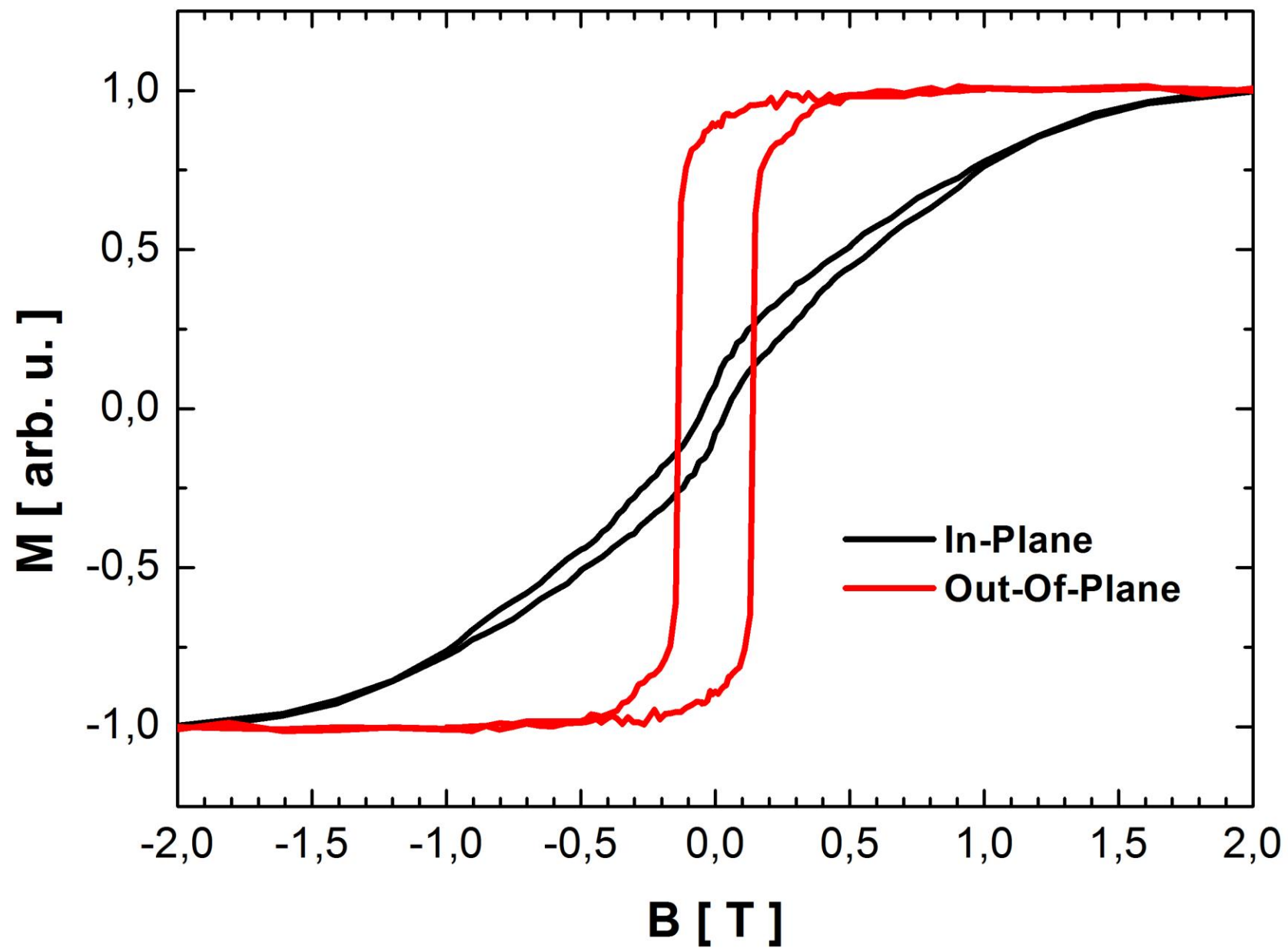
Promień dziury $\sim 78 \text{ nm}$



5 x 5 μm



2 x 2 μm



Podsumowanie

- ▶ Symulacje przewidują tworzenie się struktur domenowych typu stripe domain
- ▶ Zbadane parametry w istotny sposób wpływają na strukturę domenową układu
- ▶ Przyjęte uproszczenia :
 - Monokrystaliczna budowa symulowanego układu
 - Temperatura 0 K
 - Idealna gładkość powierzchni
 - Brak defektów i zanieczyszczeń
- ▶ Wykonane symulacje mogą stanowić podstawę do dalszych badań

Dziękuję za uwagę