

# **Влияние поликристаллической структуры на магнитные свойства тонких пленок и наноструктур на их основе**

Аспирант 2-го года обучения Татарский  
Д.А.



# План семинара

- Метастабильные состояния в ферромагнитных наночастицах
- Приближение слабой случайной анизотропии
- Наноструктуры из поликристаллических пленок, получаемые в ИФМ РАН



# **МЕТАСТАБИЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ В ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦАХ**

# Энергия ферромагнетика

$$E = \frac{1}{2} \int \left( \alpha \left( \frac{\partial \vec{M}}{\partial \vec{r}} \right)^2 - \beta (\vec{n} \cdot \vec{M}(\vec{r}))^2 \right) d\vec{r}$$

$$\alpha, \beta, \vec{n} = \text{const}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} - \text{ширина доменной стенки}$$

$$L_e = \sqrt{\frac{\alpha}{M_s^2}} - \text{обменная длина}$$

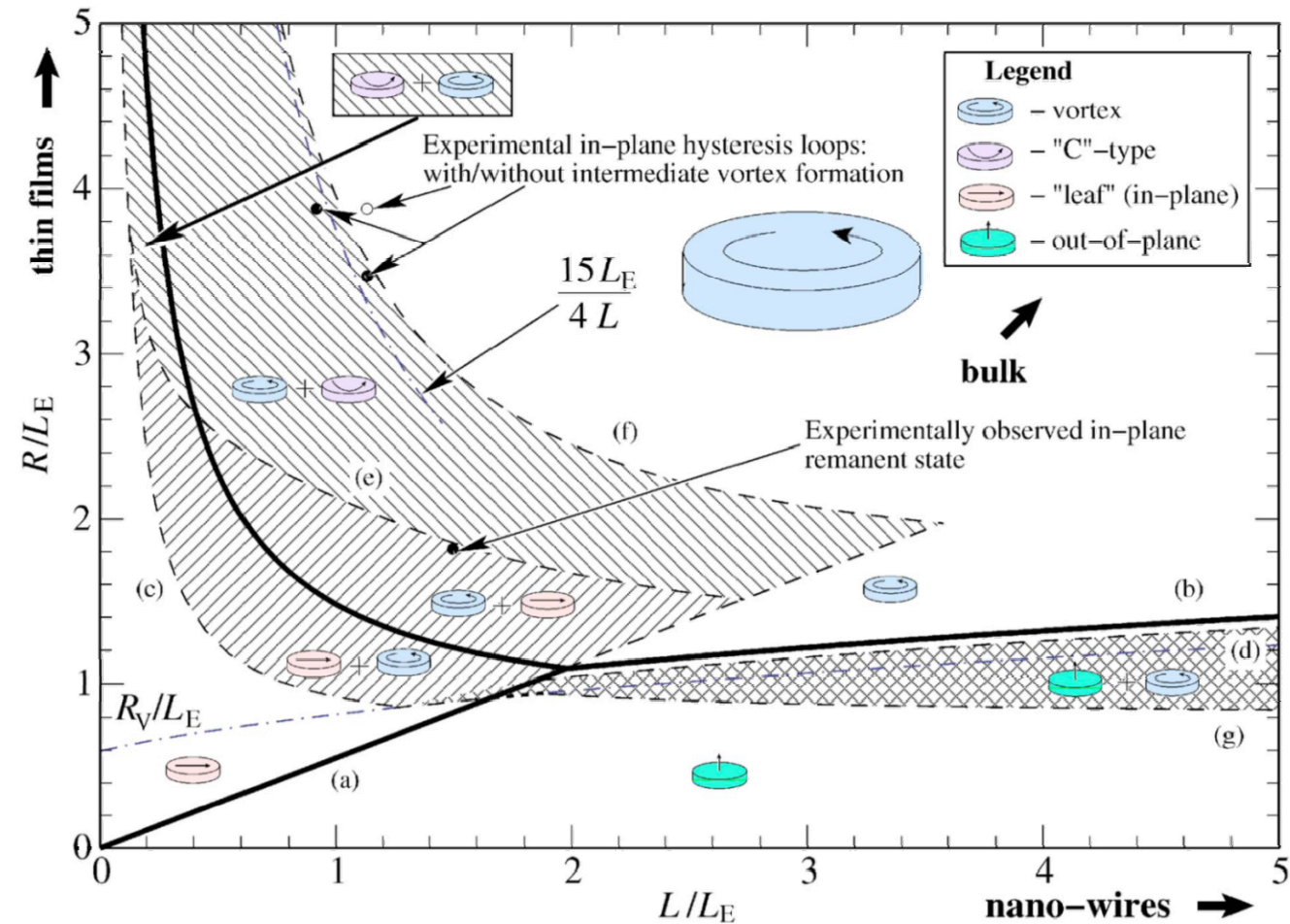
Л.Д.Ландау, Е.М. Лифшиц, том VIII  
Электродинамика сплошных сред

# Характерные длины в некоторых ферромагнетиках

Вещест- во	Обменная энергия, эрг/см	Константа анизотропии, эрг/см <sup>3</sup>	Намагничен- ность насыщения, Э	Ширина доменной стенки, нм	Обменная длина, нм
Co	$30 \cdot 10^{-7}$	$520 \cdot 10^4$	17 900	7,6	12,2
Fe	$21 \cdot 10^{-7}$	$48 \cdot 10^4$	21 580	20,9	8,4
CoFe	$30 \cdot 10^{-7}$	$6,8 \cdot 10^4$	18 850	66,4	11,5



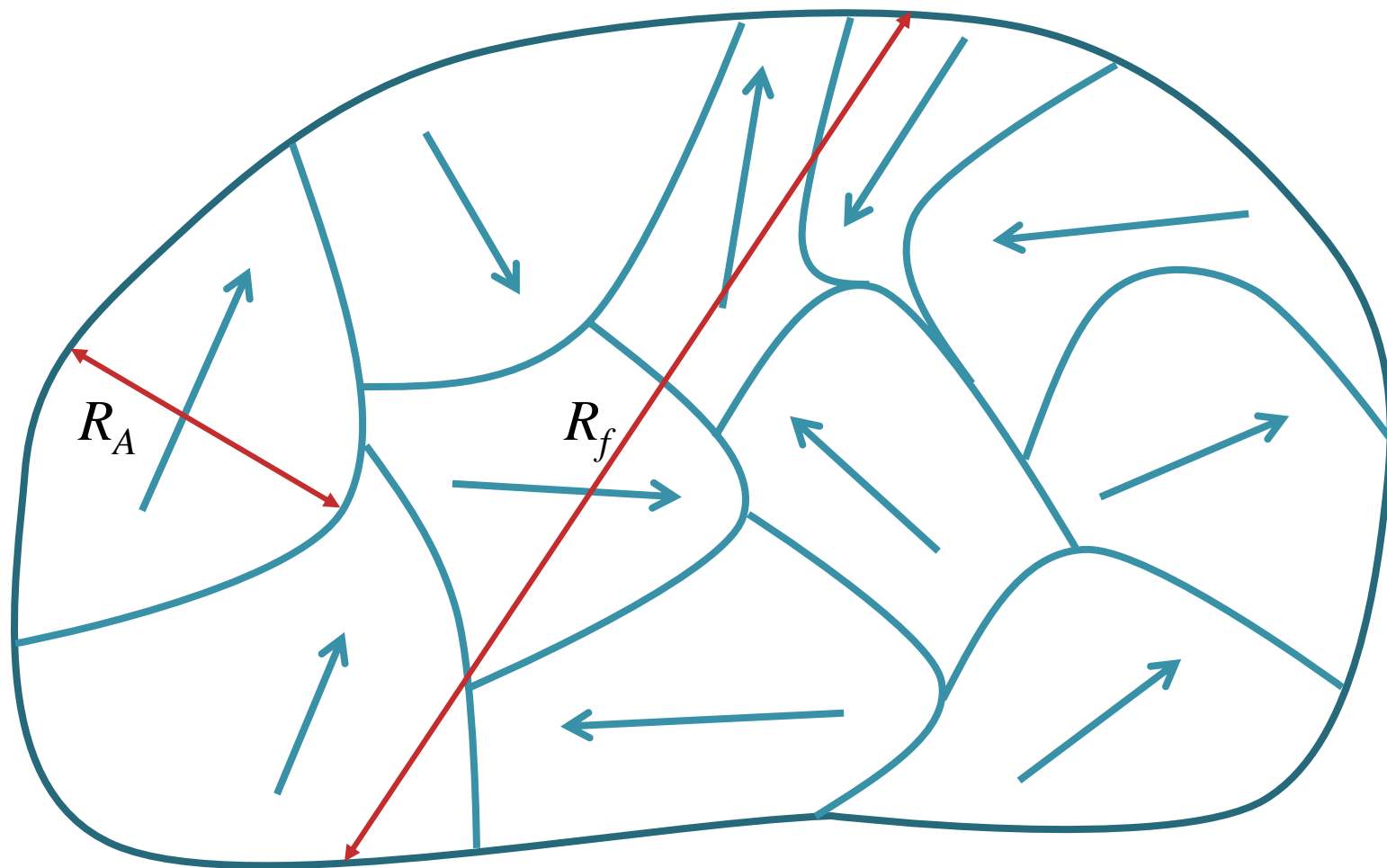
# Фазовая диаграмма метастабильных состояний в цилиндрической частице





# **ПРИБЛИЖЕНИЕ СЛАБОЙ СЛУЧАЙНОЙ АНИЗОТРОПИИ**

# Поликристалл



$R_A$  – размер кристаллита



# Слабая случайная анизотропия

$$E = \frac{1}{2} \int \left( \alpha \left( \frac{\partial \vec{M}}{\partial \vec{r}} \right)^2 - \beta \left( \vec{M}(\vec{r}) \cdot \vec{n}(\vec{r}) \right)^2 \right) d^d \vec{r}$$

$$H_{ex} = \frac{\alpha M_0}{R_A^2} \quad H_r = \beta M_0$$

$$H_{ex} > H_r \quad \Rightarrow \quad R_A < \delta - \text{условие слабой анизотропии}$$

$R_F$  — длина ферромагнитной корреляции

Phys.Rev.Lett. **35**, 1399 (1975)

J.Appl.Phys. **49**, 1653 (1978)

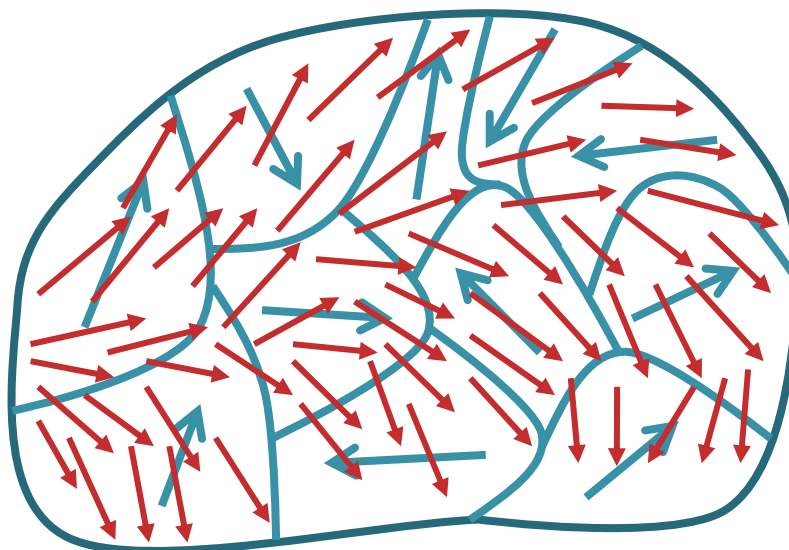
Phys.Rev.B **33**, 251 (1986)

# Усреднение по объему поликристалла

Количество кристаллитов в одном «домене» —  $N = \left( \frac{R_A}{R_F} \right)^d$

Средняя энергия анизотропии —  $\bar{E}_r = -\frac{\beta M_0^2}{2\sqrt{N}}$

Средняя обменная энергия —  $\bar{E}_{ex} = \frac{\alpha M_0^2}{R_F^2}$



# Длина ферромагнитной корреляции

$$\bar{E} \sim \frac{\alpha}{R_F^2} - \frac{\beta R_A^{d/2}}{R_F^{d/2}}$$

$$\frac{\partial \bar{E}}{\partial R_F} = 0$$

⇓

$$R_F \sim R_A \left( \frac{\delta}{R_A} \right)^{\frac{4}{4-d}} > R_A$$

$$R_F^{2D} \sim \delta^2 / R_A$$

$$R_F^{3D} \sim \delta^4 / R_A^3$$

J.Appl.Phys. **49**, 1653 (1978)  
Phys.Rev.B **33**, 251 (1986)

# Поле насыщения и коэрцитивная сила

$$E_{S,C} \sim \frac{\beta M_0^2 R_A^{d/2}}{2R_F^{d/2}}$$

$\Downarrow$

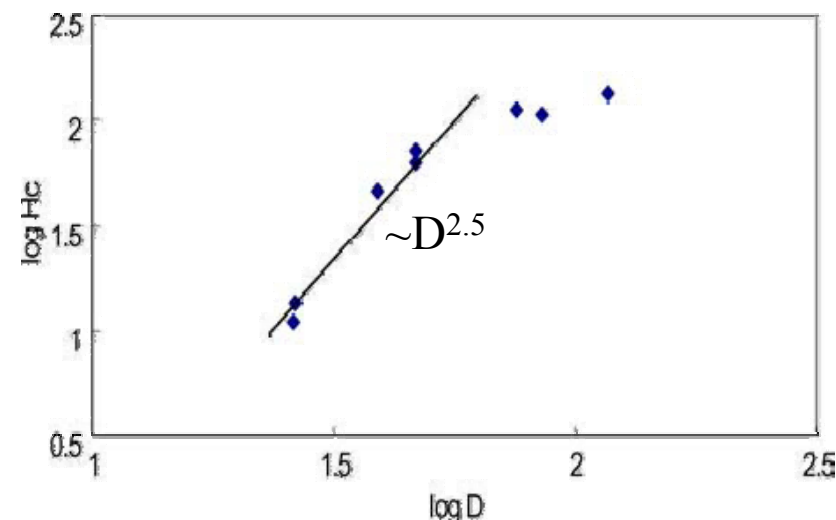
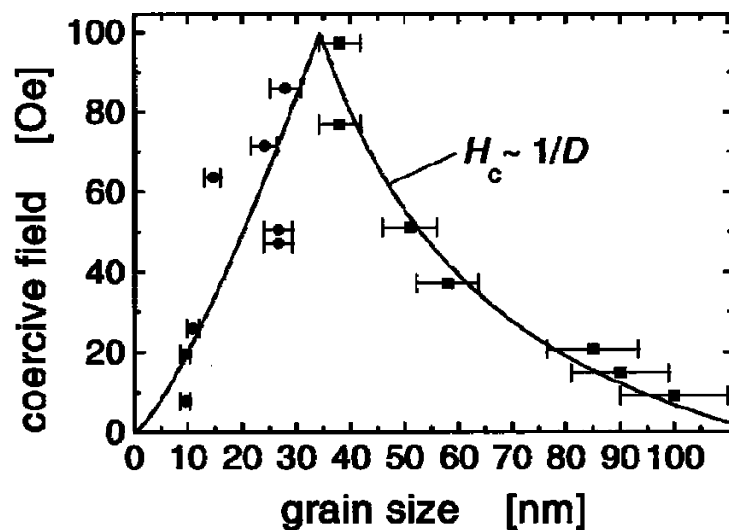
$$E_{S,C} \sim R_A^{\frac{2d}{4-d}}$$

$$H_{S,C} \sim E_{S,C} / M_0$$

$$H_{S,C}^{2D} \sim R_A^2$$

$$H_{S,C}^{3D} \sim R_A^6$$

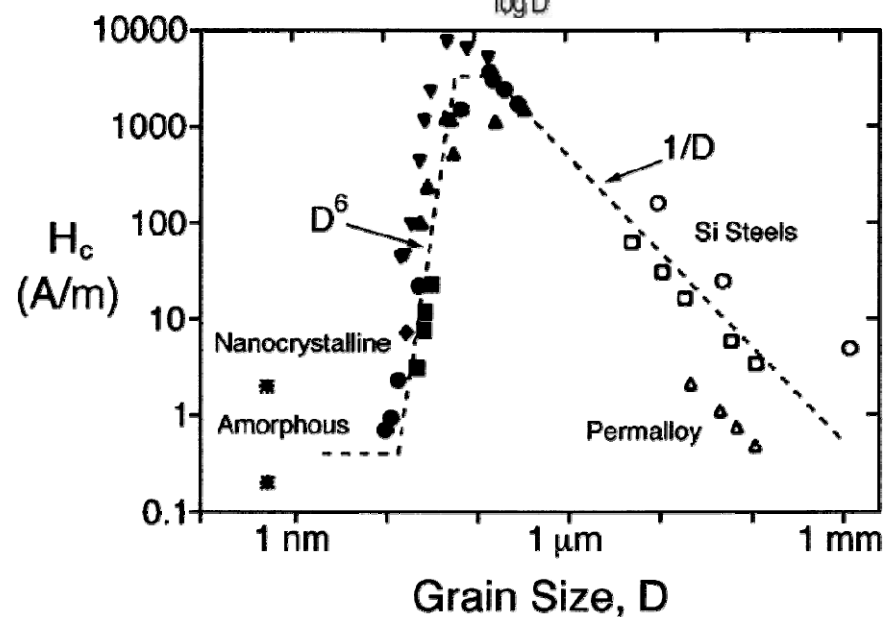
# Коэрцитивность vs. размер зерен



Phys.Rev.B **57**, 2915 (1998)

J.Mater.Sci. **40**, 3209 (2005)

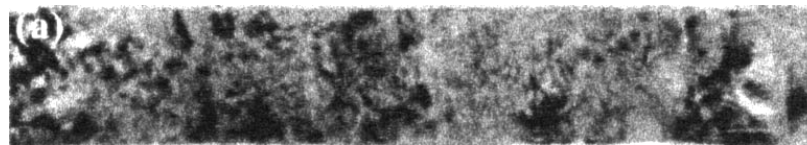
Acta mater. **48**, 223 (2000)





# Управление микрокристаллической структурой

Поперечный срез пленки CoFe 50 нм с различными подслоями



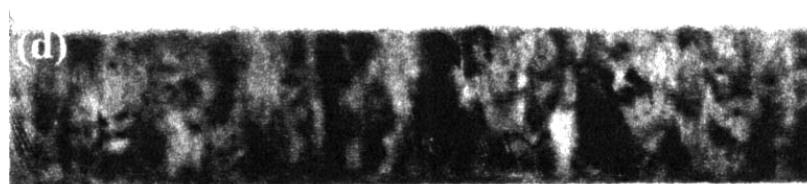
Подложка Si



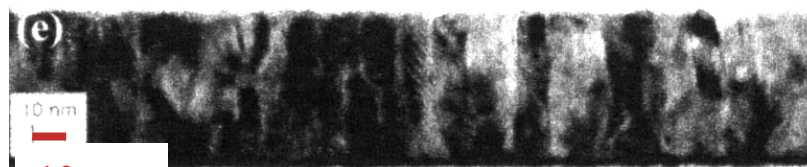
Подслой Ta



Подслой Cu



Подслой NiFe



Подслой Ru

10 nm  
10 nm

J.Appl.Phys. **93**, 6462 (2003)

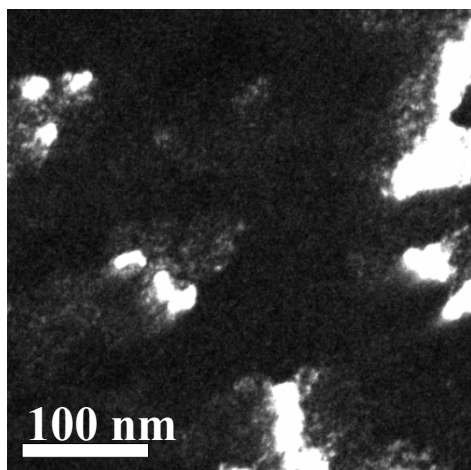




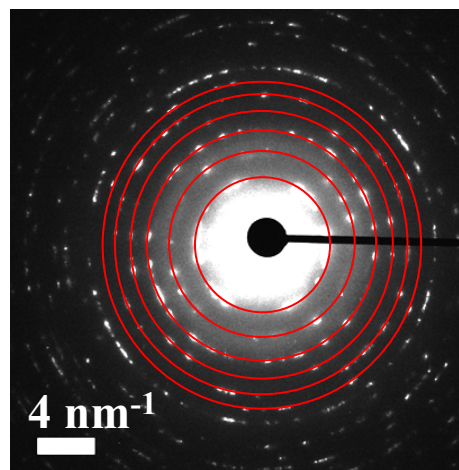
# **ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ФЕРРОМАГНИТНЫЕ ПЛЕНКИ, ПОЛУЧАЕМЫЕ В ИФМ РАН**

# Микроструктурная структура плёнок $\text{Co}_{60}\text{Fe}_{40}$ 30 нм

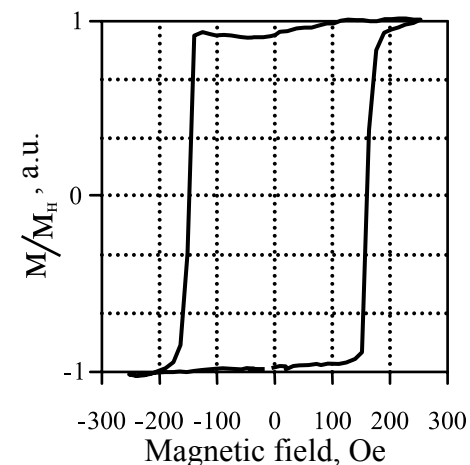
Тёмное поле



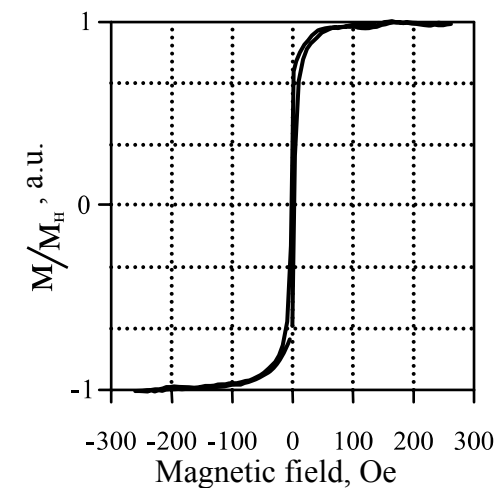
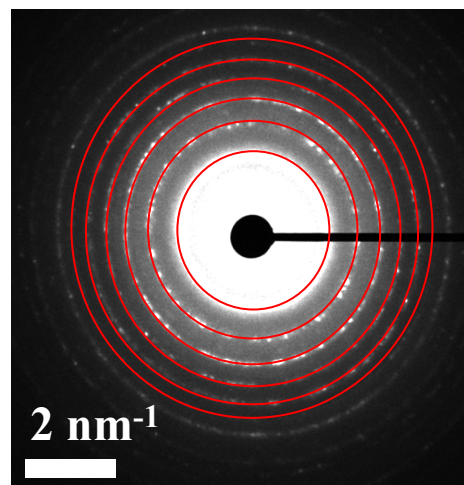
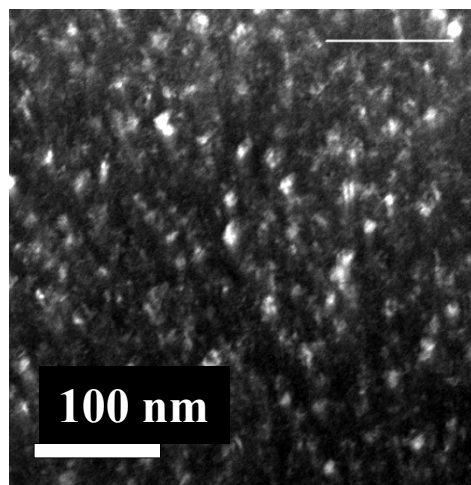
Микродифракция



Магнитооптика

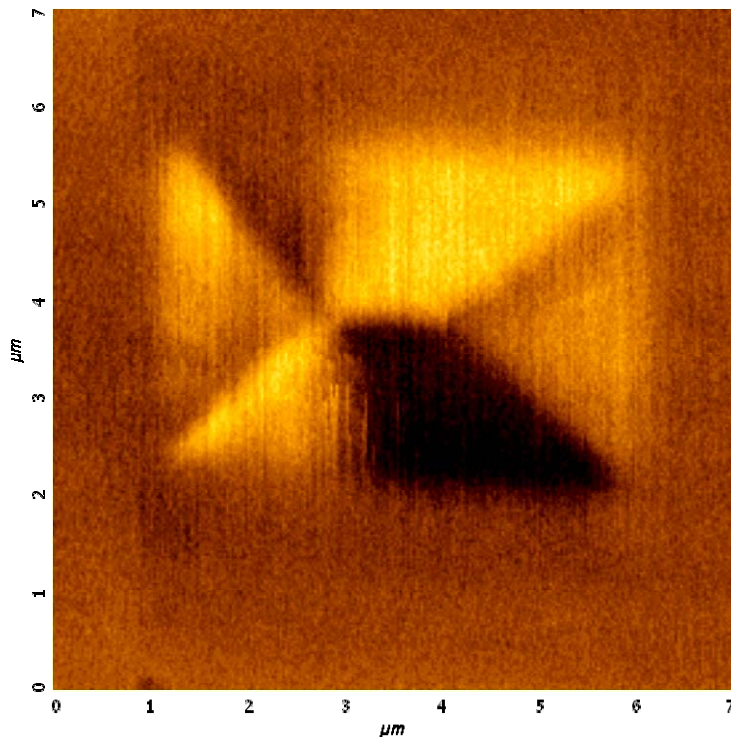


Послой  $\text{Ni}_3\text{Fe}$

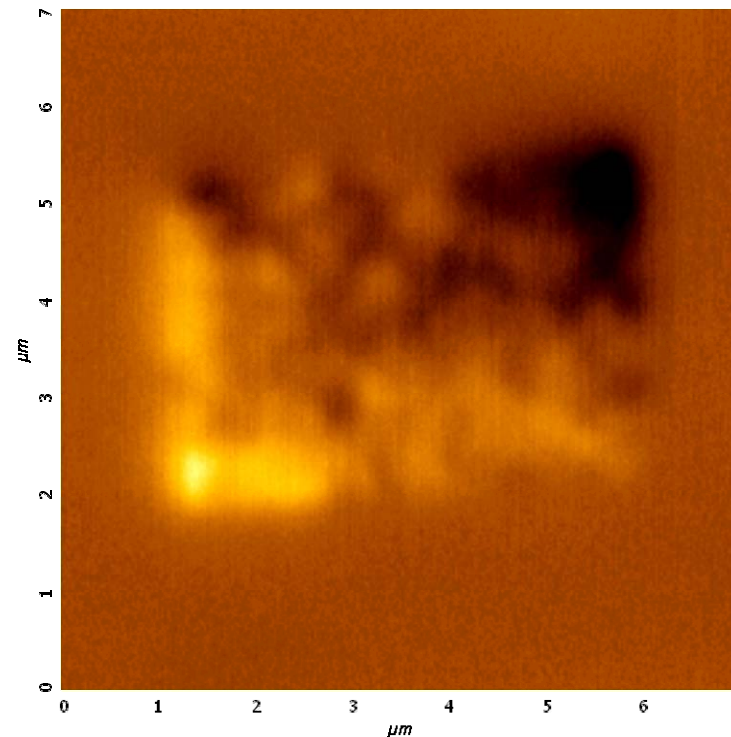


# Прямоугольная частица

Подслой NiFe



Подслой  $\text{AlO}_x$



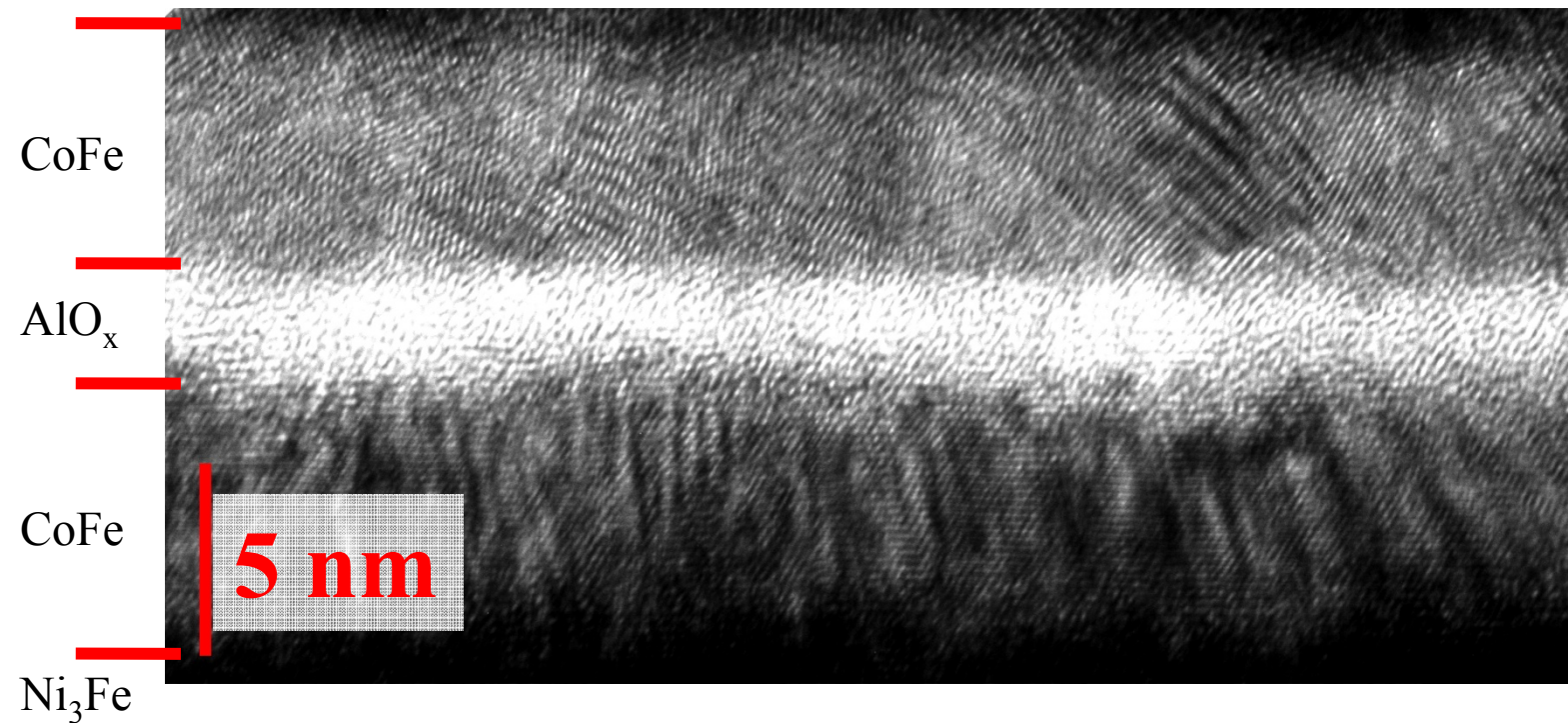
$$R_f \approx 200 \text{ нм}$$

Страйп-структура

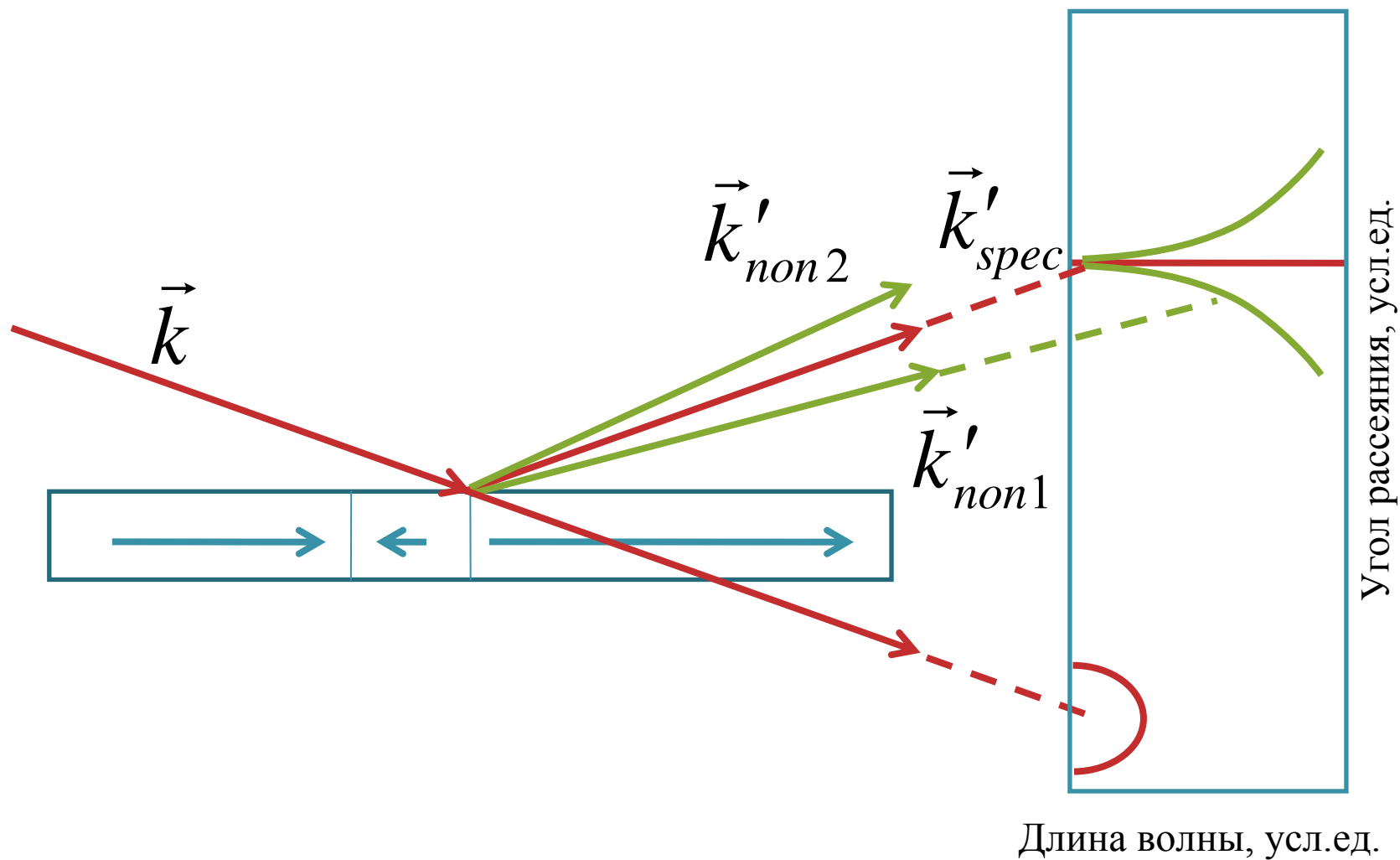
Л.Д.Ландау, Е.М. Лифшиц, том VIII  
Электродинамика сплошных сред



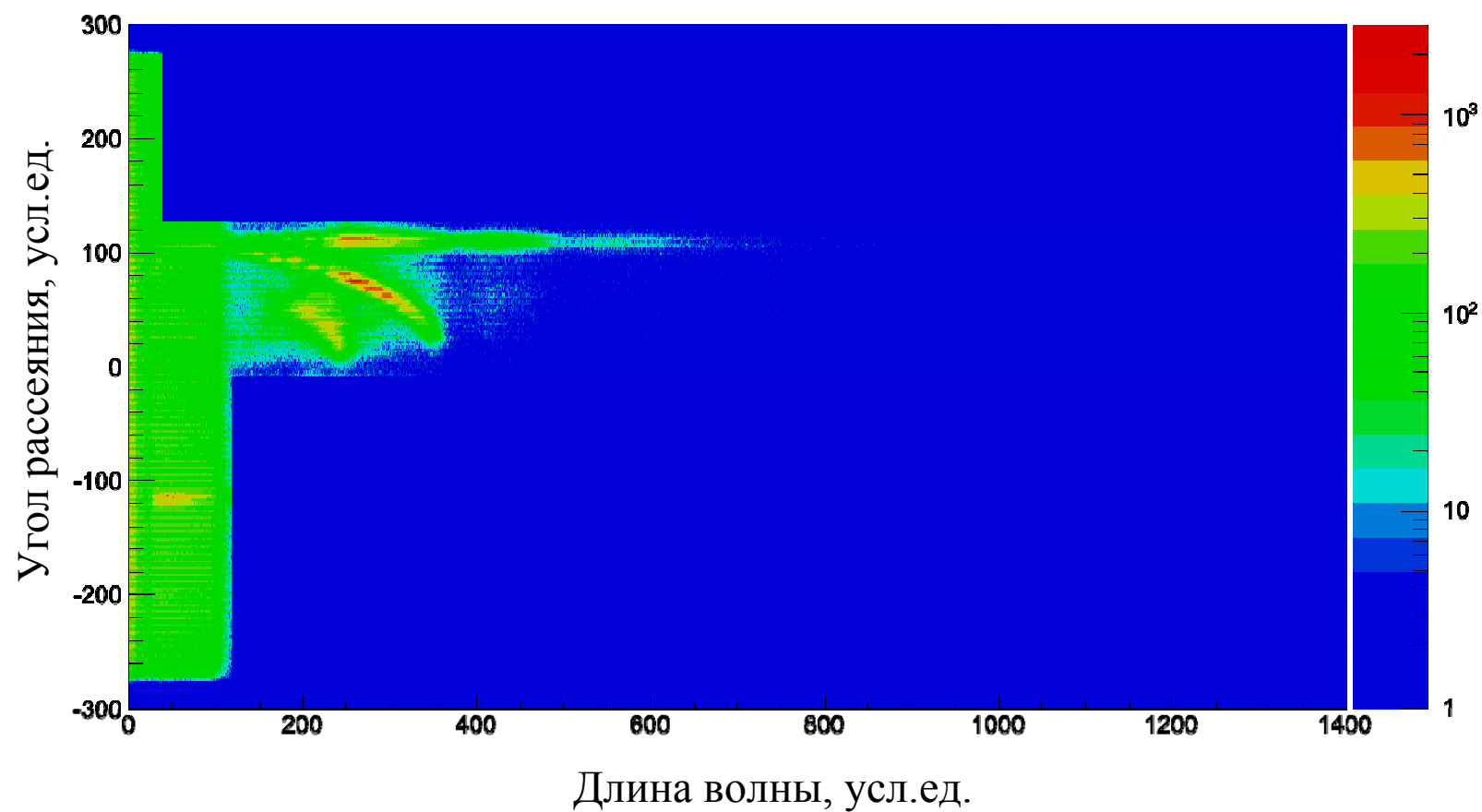
# Поперечный срез TMR-структуры



# Рассеяние нейтронов на магнитной неоднородности в пленке

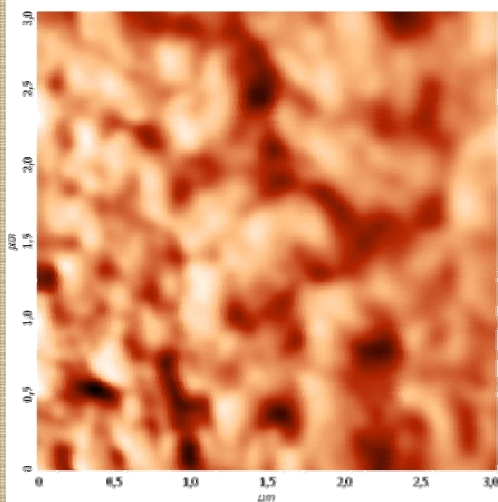


# Диффузное рассеяние нейтронов

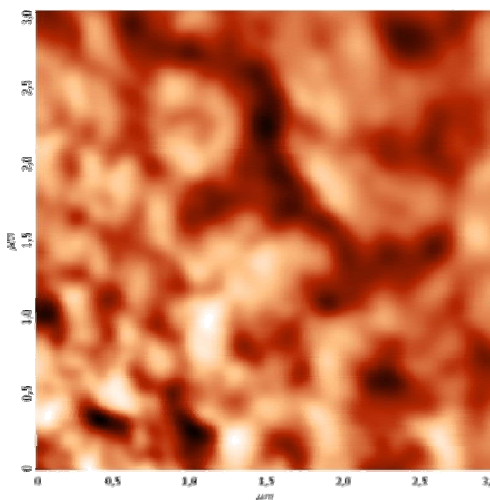




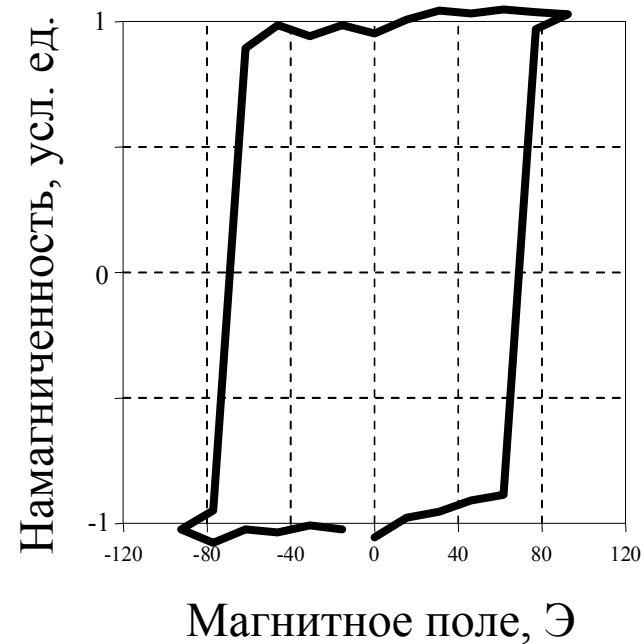
# Рябь намагниченности в пленке $\text{Co}_{60}\text{Fe}_{40}$ толщиной 100 нм (MFM)



$H = 0$  Э



$H = +300$  Э



# Фазовая диаграмма метастабильных состояний в частице





° СПАСИБО ЗА  
ВНИМАНИЕ!