



Исследование неоднородных магнитных многослойных наноструктур поверхностным рассеянием рентгена и поляризованных нейтронов

Виктор Уклеев

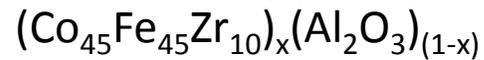
ПИЯФ НИЦ КИ, СПБАУ НОЦНТ РАН

*Е. А. Дядькина, А. А. Воробьёв, D. Lott, А. В. Ситников, Ю. Е. Калинин,
О. В. Геращенко, L. Caron, С. В. Григорьев*



Введение

Многослойные наноструктуры метал-диэлектрик / полупроводник:

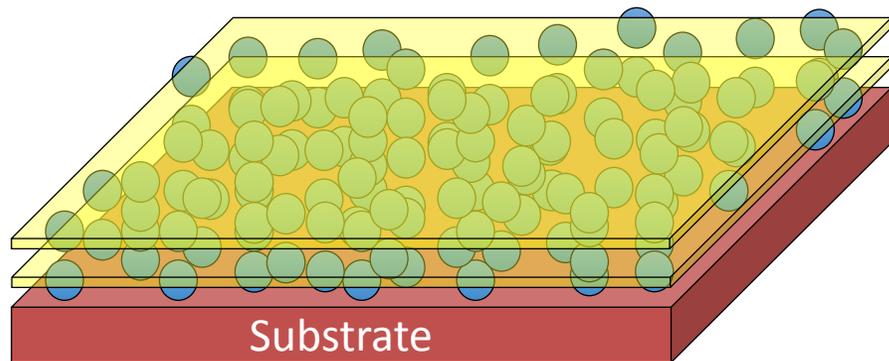


Наночастицы из магнитно-мягкого сплава в диэлектрической матрице

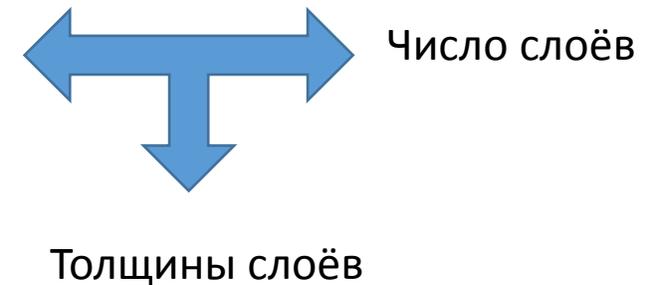
α -Si:H

Аморфный полупроводник

Стеклокерамическая подложка



Состав МД композита
x
(1-x)



Образцы напыляются с градиентом толщины/концентрации, что позволяет получать серию в одном технологическом цикле

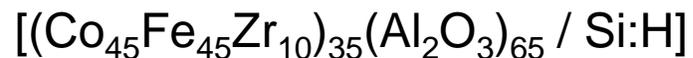
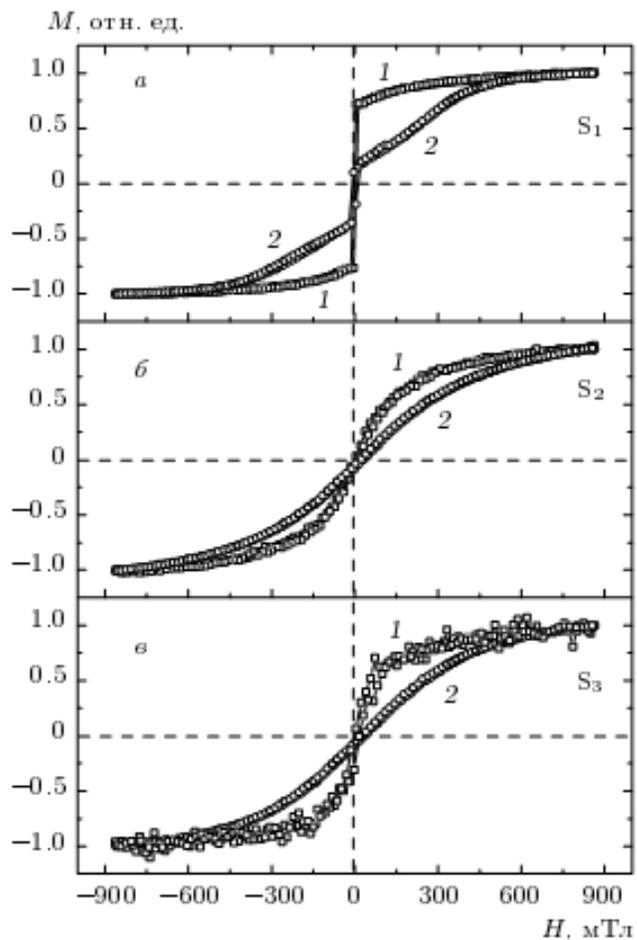
A. V. Ivanov, Yu. E. Kalinin, V. N. Nechaev et al., Solid State Physics, 51, 2331 (2009).

И. В.Золотухин, Ю. Е. Калинин, и др., Альтернативная энергетика и экология, 2, 7 (2002) .

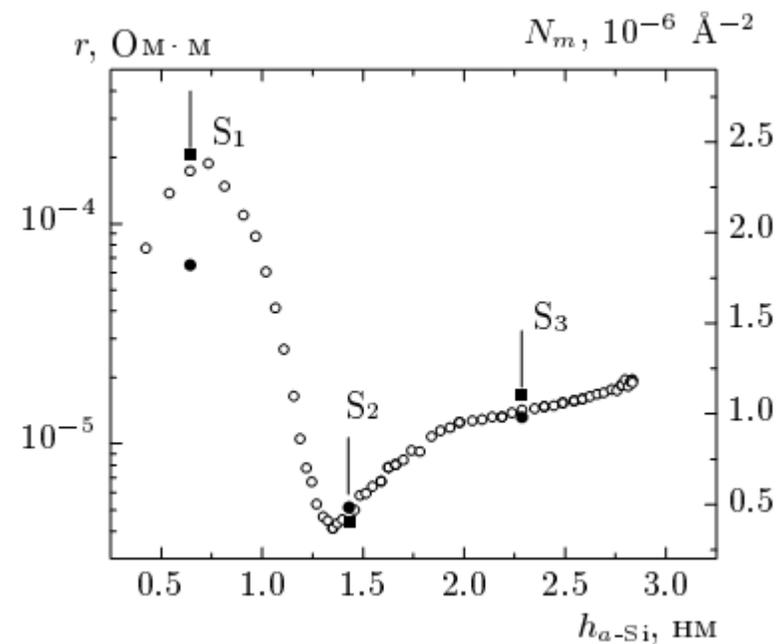
В. А. Белоусов, Ю. Е. Калинин, и др., Вестник ВГТУ, 2, 24 (2006) .



Магнитные и электропроводящие свойства



- $d_{\text{Si}} = 0.7$ нм (образец "S₁")
- $d_{\text{Si}} = 1.5$ нм (образец "S₂")
- $d_{\text{Si}} = 2.3$ нм (образец "S₃")

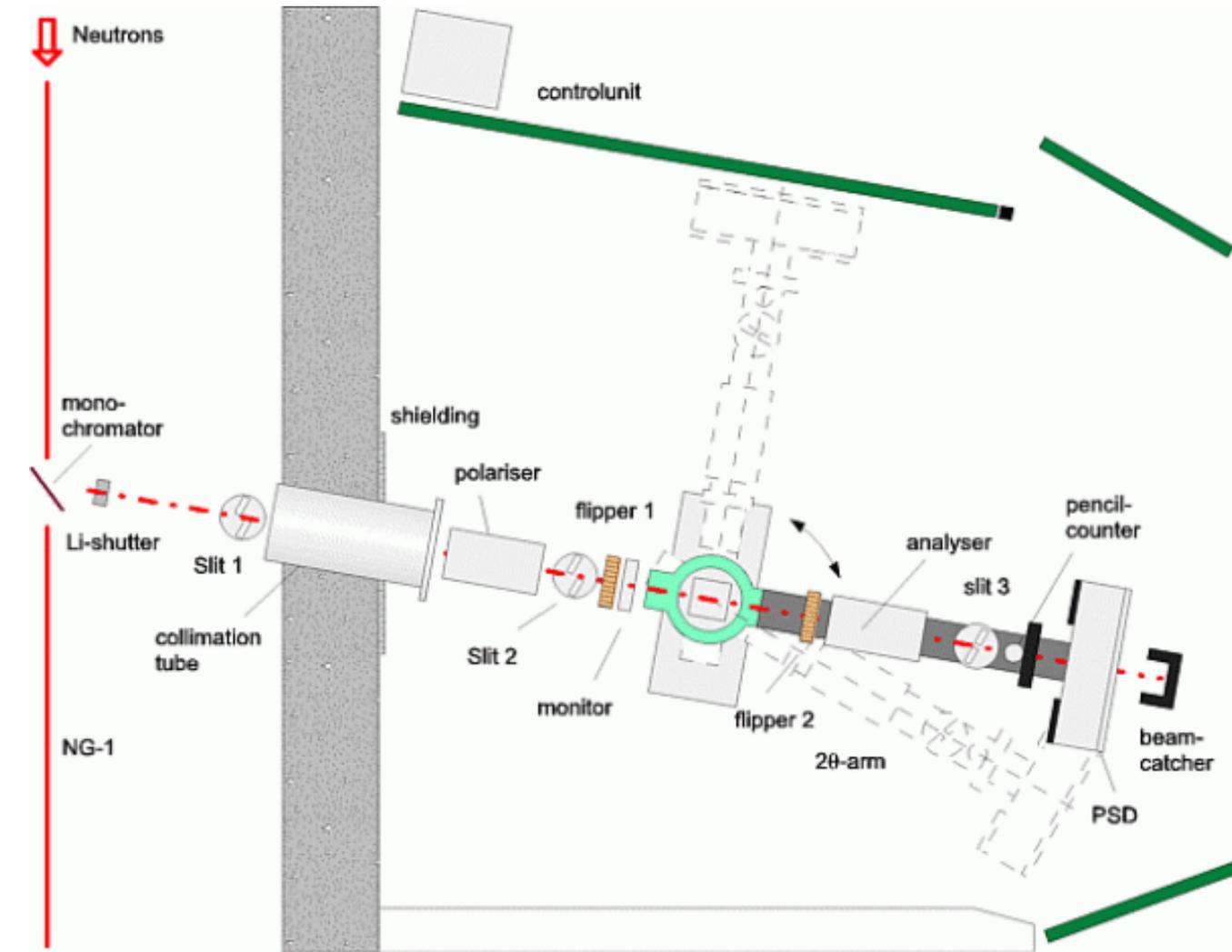


- Петли намагниченности говорят о переходе от магнитомягкого к суперпарамагнитному состоянию.
- Удельное сопротивление имеет локальный минимум.



Эксперимент (PNR)

NERO Helmholtz Zentrum Geesthacht (GKSS Forschungszentrum)

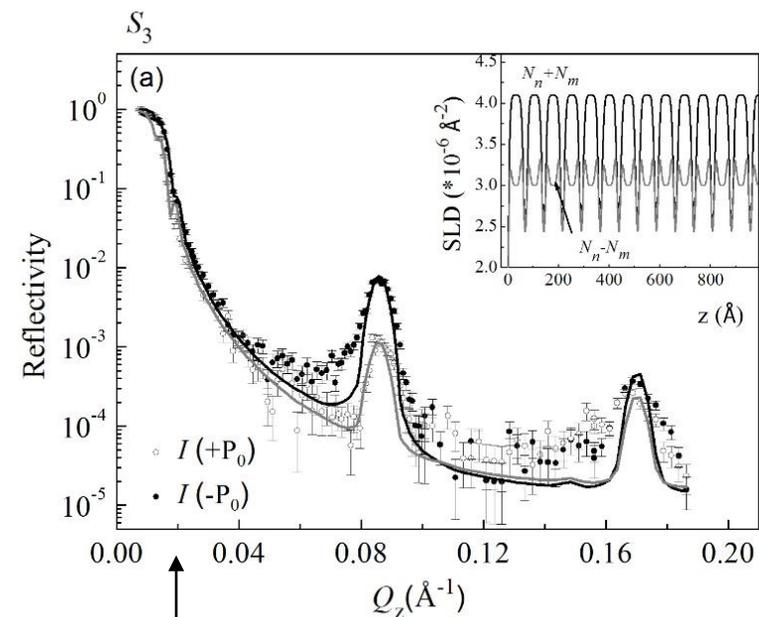
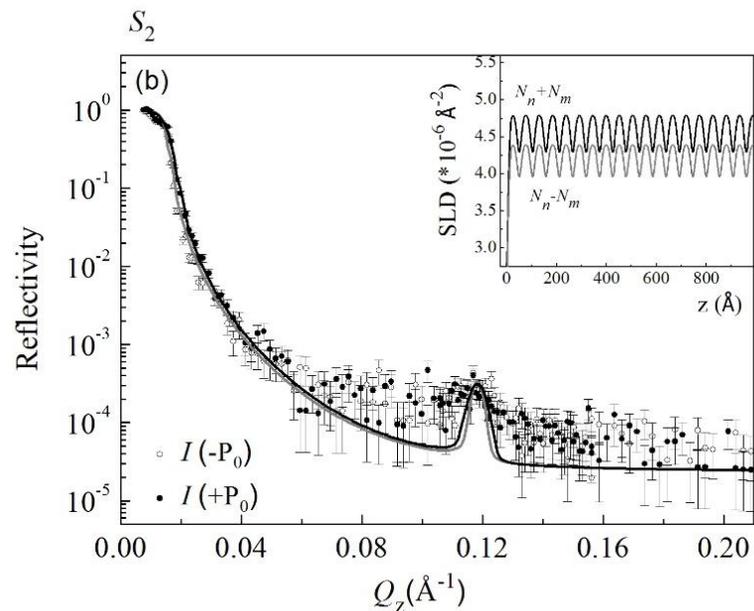
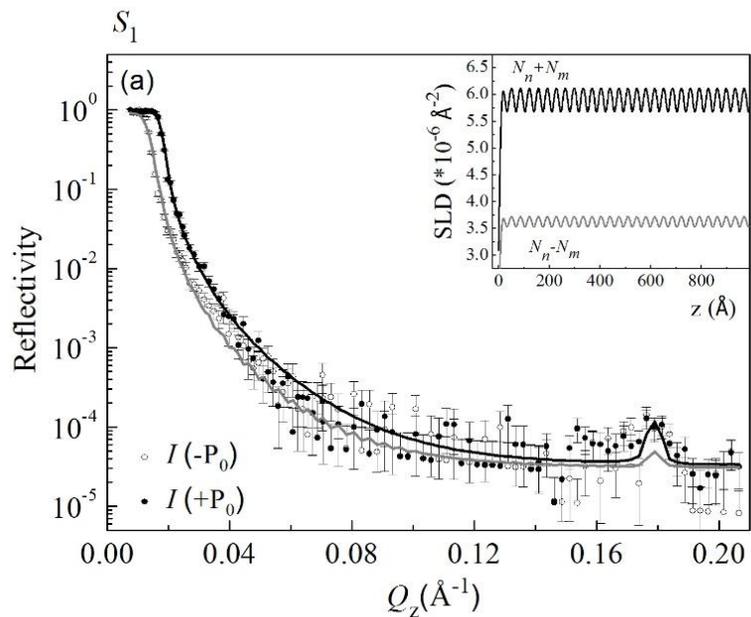


$$\lambda = 4.35 \text{ \AA}, B = 550 \text{ mT}, P_0 = 0.95$$





Эксперимент (PNR)



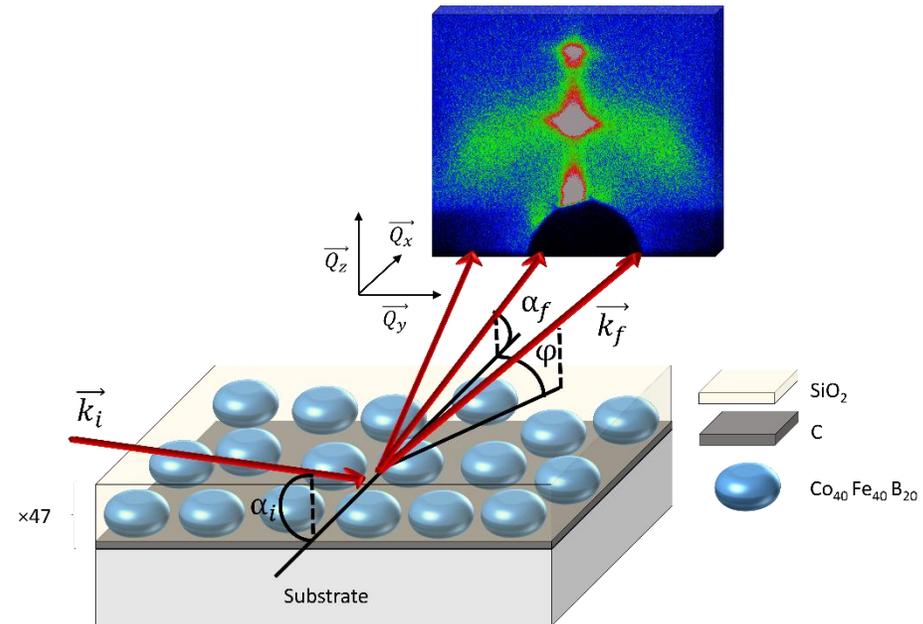
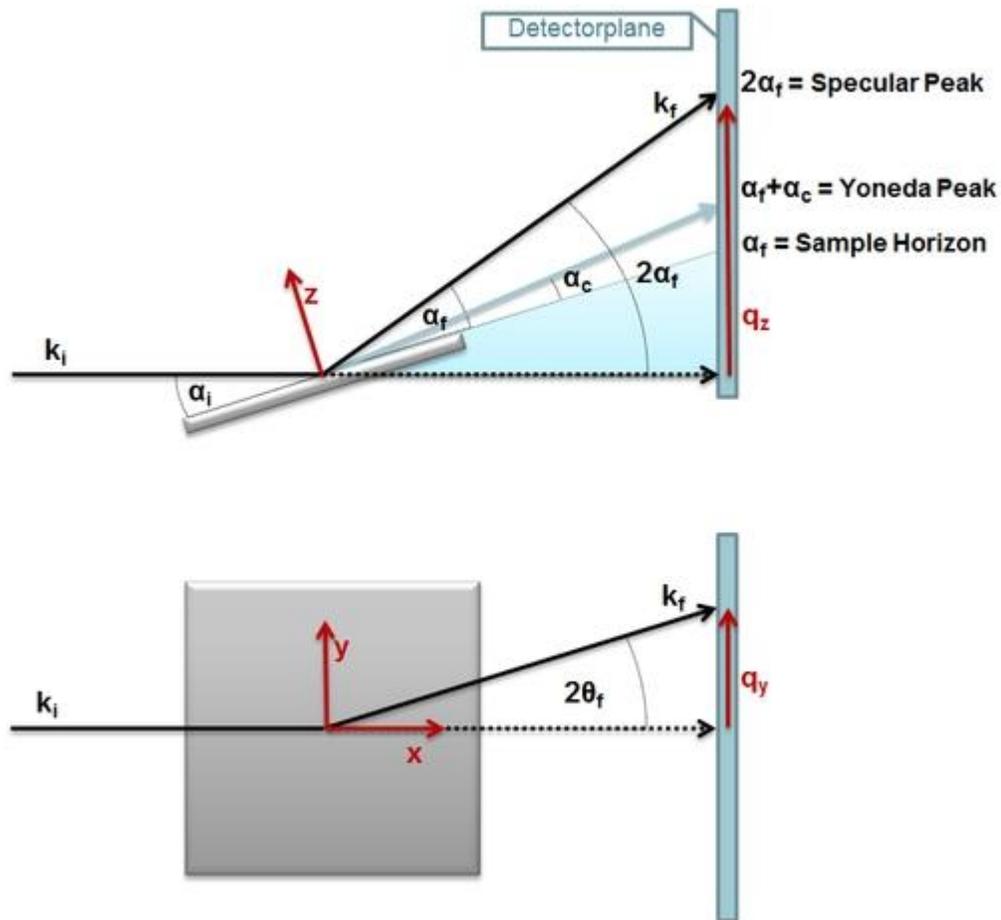
Расщепление в области 1^{st} Брэгговского пика



Расщепление R^{++} и R^- кривых прямо пропорционально интегральной намагниченности образца



Малоугловое рассеяние в скользящей геометрии (GISAXS)



$$Q_z(\varphi, \alpha_f) = \frac{2\pi}{\lambda}(\sin \alpha_f + \sin \alpha_i),$$

$$Q_{\parallel}(\varphi, \alpha_f) = \sqrt{Q_x^2(\varphi, \alpha_f) + Q_y^2(\varphi, \alpha_f)},$$

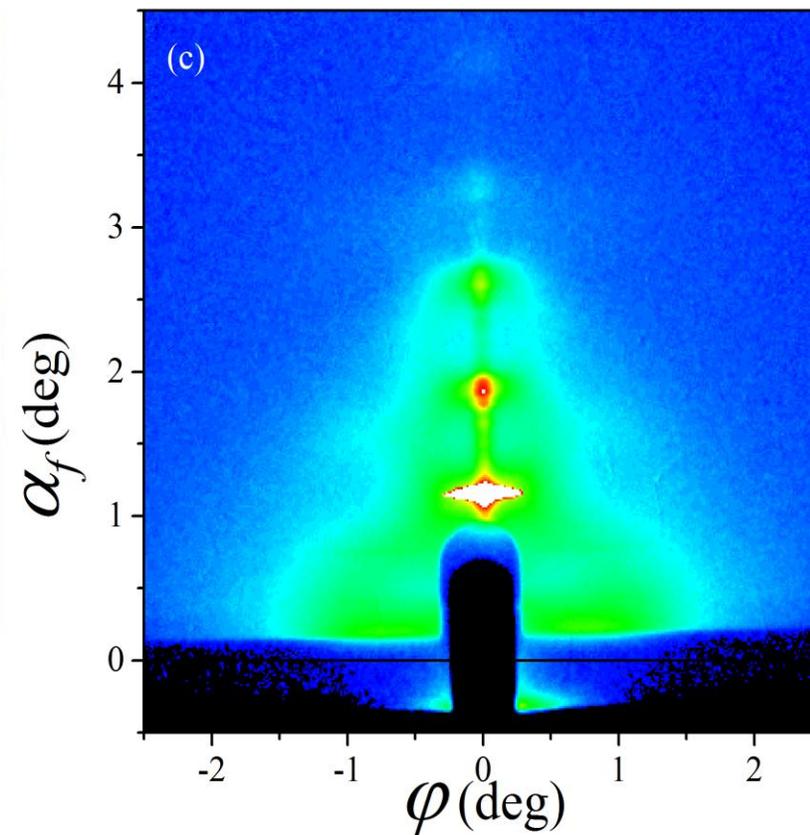
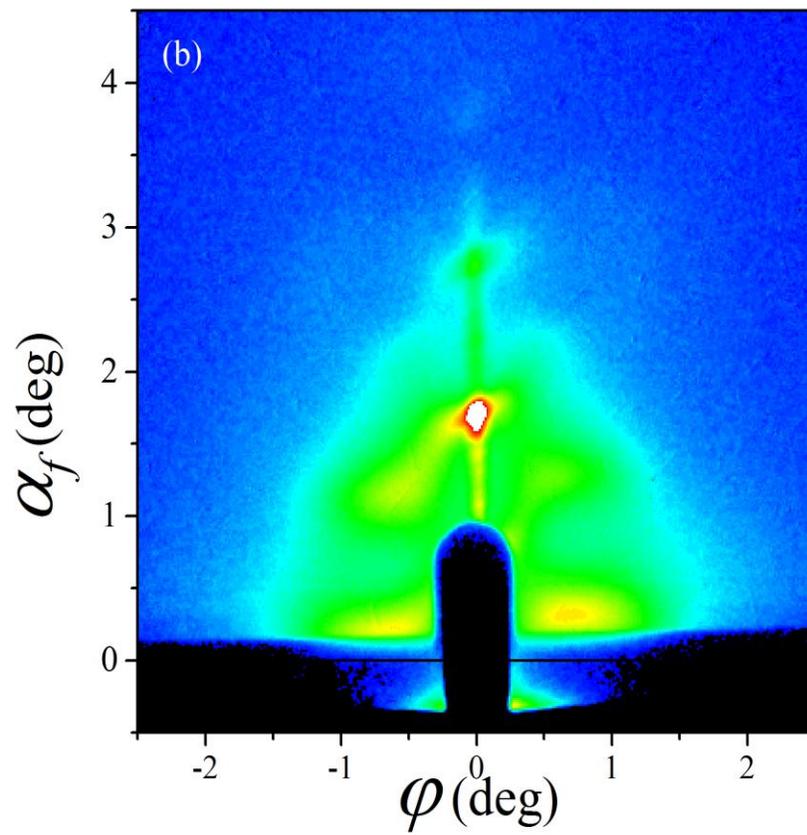
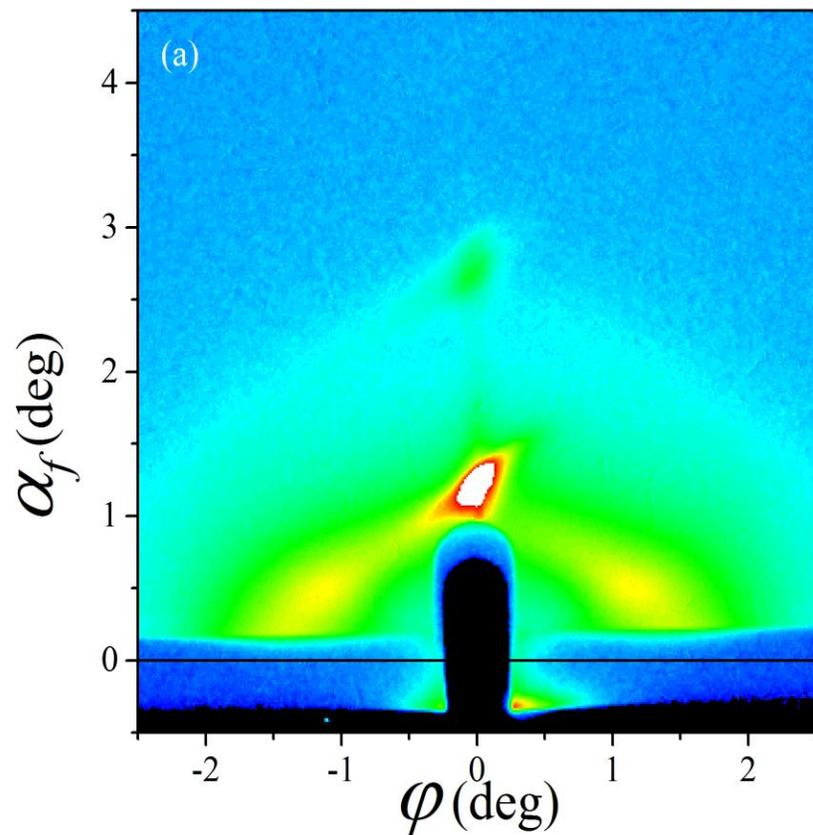
$$Q_x(\varphi, \alpha_f) = \frac{2\pi}{\lambda}(\cos \alpha_f \cos \varphi - \cos \alpha_i),$$

$$Q_y(\varphi, \alpha_f) = \frac{2\pi}{\lambda} \cos \alpha_f \sin \varphi.$$



Эксперимент (GISAXS)

$\lambda = 0.95 \text{ \AA}$, $\alpha_i = 0.36^\circ$

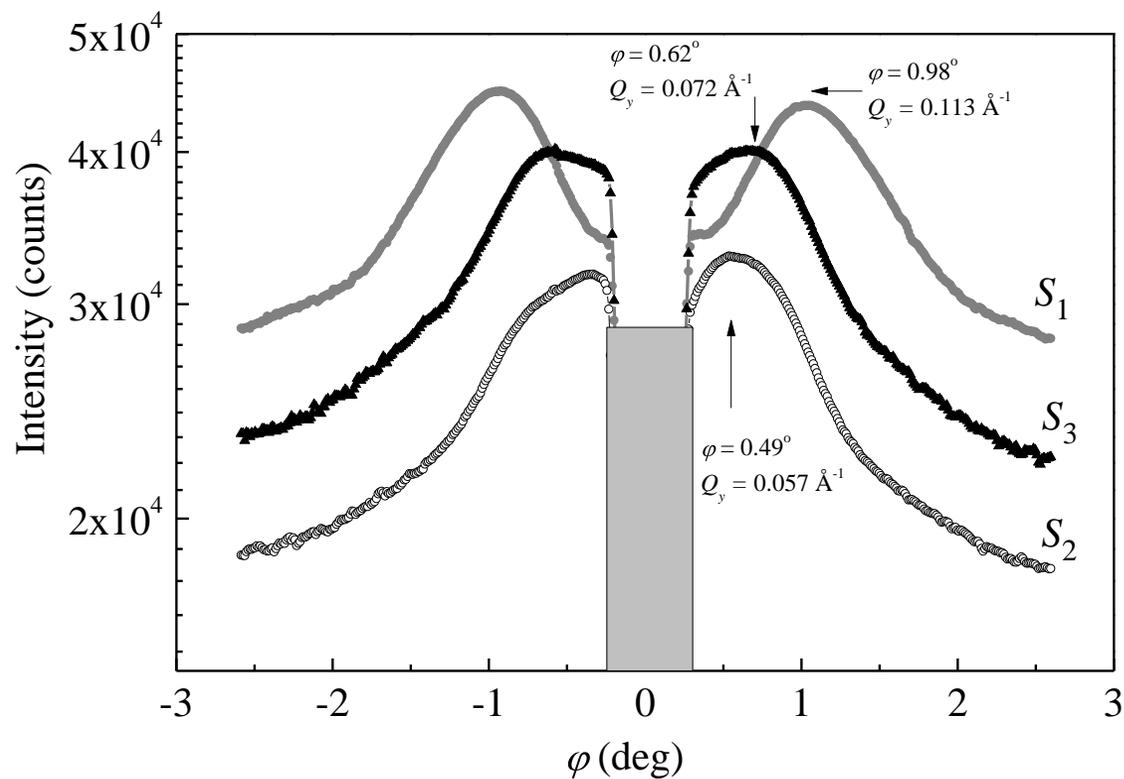


Толщина слоя Si

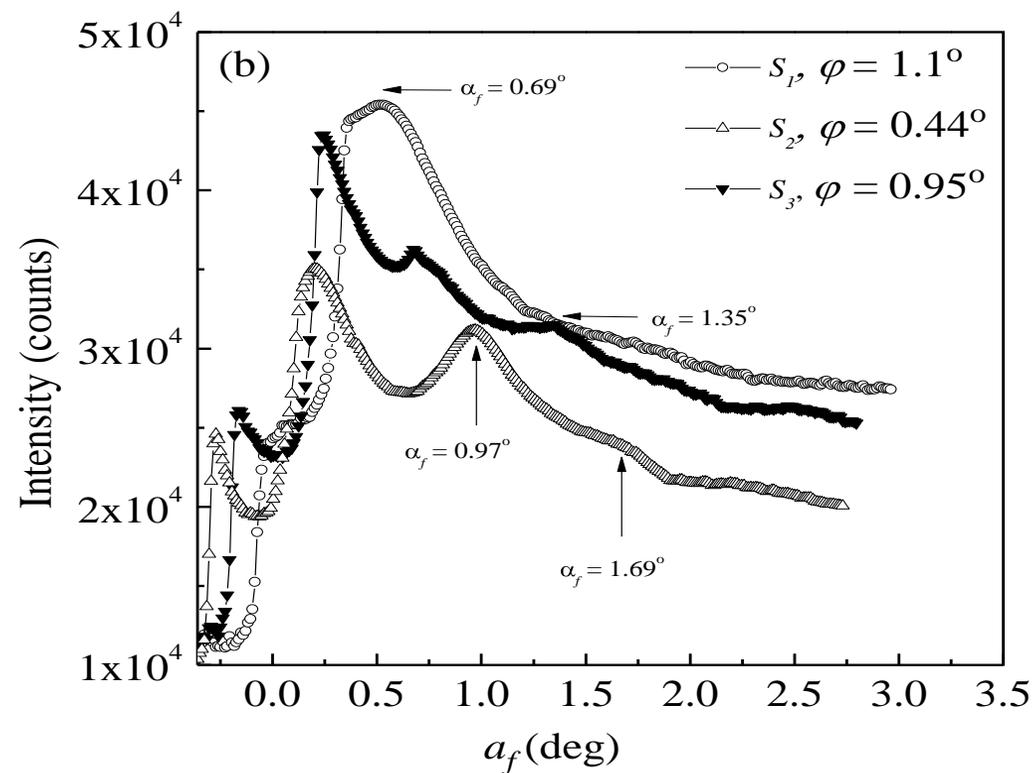


Эксперимент (GISAXS)

Из профилей вдоль векторов $Q(\alpha_f = \text{const}, \varphi)$ определяется межчастичное расстояние в плоскости плёнки, вдоль the $Q(\alpha_f, \varphi = \text{const})$ перпендикулярно плоскости.



$\alpha_f = 0.23^\circ$



$\varphi = \text{const}^\circ$

Обсуждение

Образец	Метод рефлектометрии поляризованных нейтронов			Метод малоуглового рассеяния синхротронного излучения в скользящей геометрии		r_v (нм)	r_h (нм)	δ (нм)
	h_1 (нм)	h_2 (нм)	h (нм)	h (нм)	d (нм)			
S_1	3.3	0.2	3.5	3.8	4.2	1.61	1.61	0.04
S_2	5.0	0.4	5.4	5.2	7.9	2.50	3.00	0
S_3	6.2	1.3	7.5	7.6	7.0	2.80	2.80	0.30

$$r_h = \frac{d}{2} \sqrt{\chi \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \left(1 + \frac{\delta}{r_v}\right)} = \frac{d}{2} \sqrt{\chi \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \frac{h_1}{r_v}}$$

h_1 – толщина МД слоя

h_2 – толщина ПП слоя

h – толщина бислоя

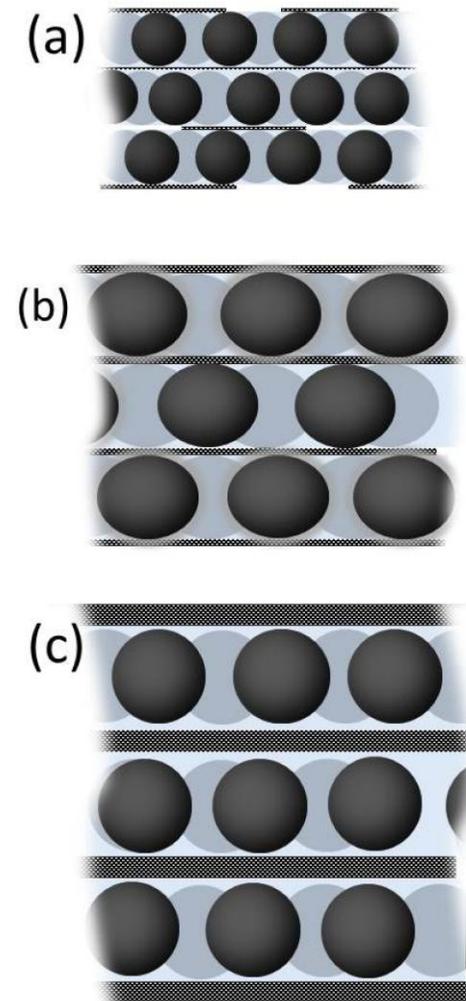
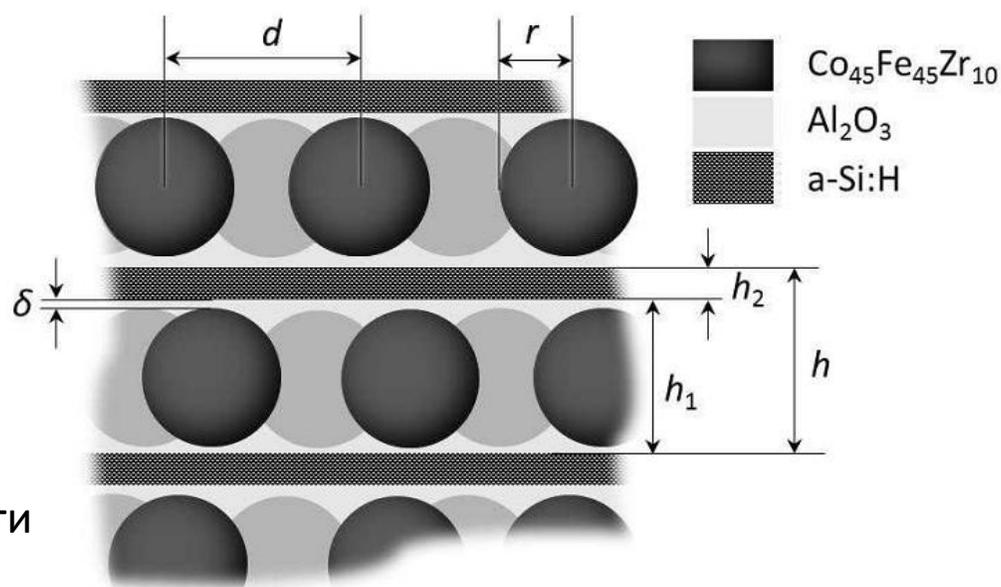
d – среднее межчастичное расстояние

χ – концентрация металла

r_h – радиус частицы в плоскости

r_v – радиус частицы перпендикулярно плоскости

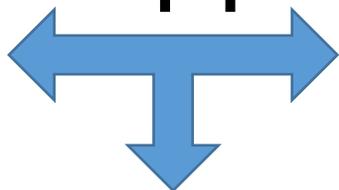
δ – толщина диэлектрической щели





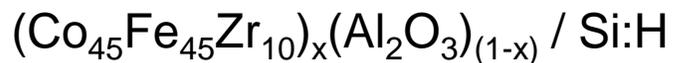
Многослойные структуры с различным составом МД

Состав МД композита
 x (1- x)

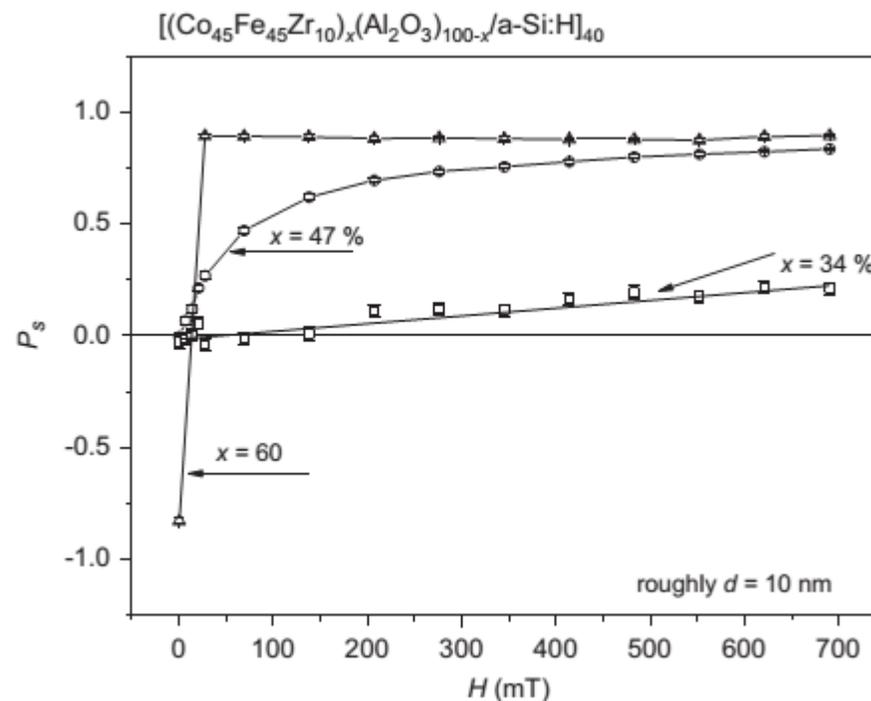


Число слоёв

Толщины слоёв



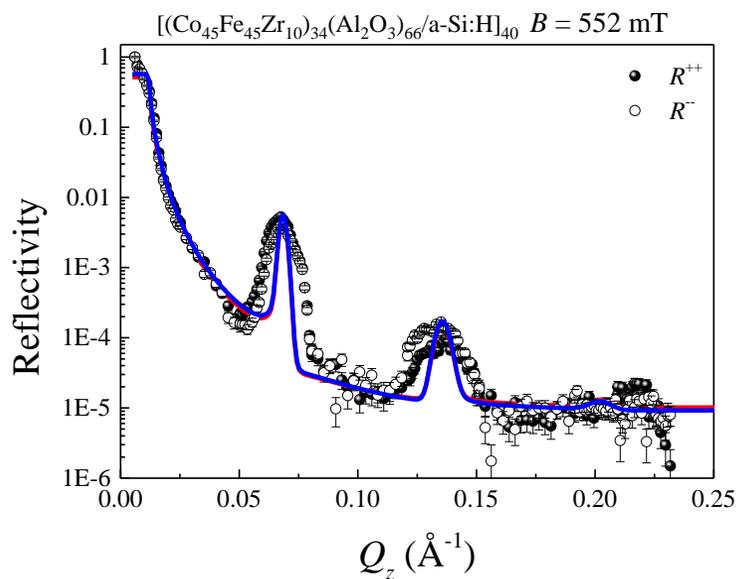
ФМ	Диэлектрик
$x = 34\%$ at.	$1-x=66\%$
$x = 47\%$ at.	$1-x=53\%$
$x = 66\%$ at.	$1-x=34\%$
Порог перколяции $x=45\%$ at.	



Зависимость спиновой асимметрии от магнитного поля, приложенного к образцам с одинаковой толщиной бислоя и разными концентрациями ФМ: $x=34$ at% (квадраты), 47 at% (круги) и 60 at% (треугольники).

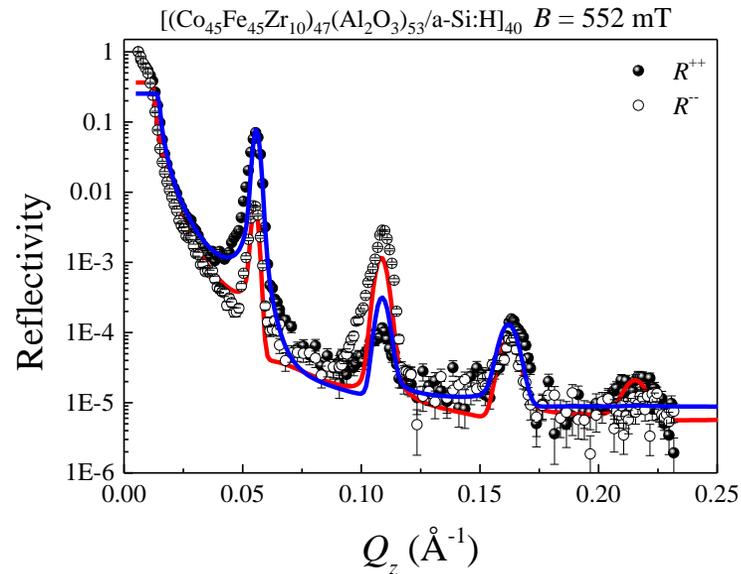


Эксперимент (PNR)



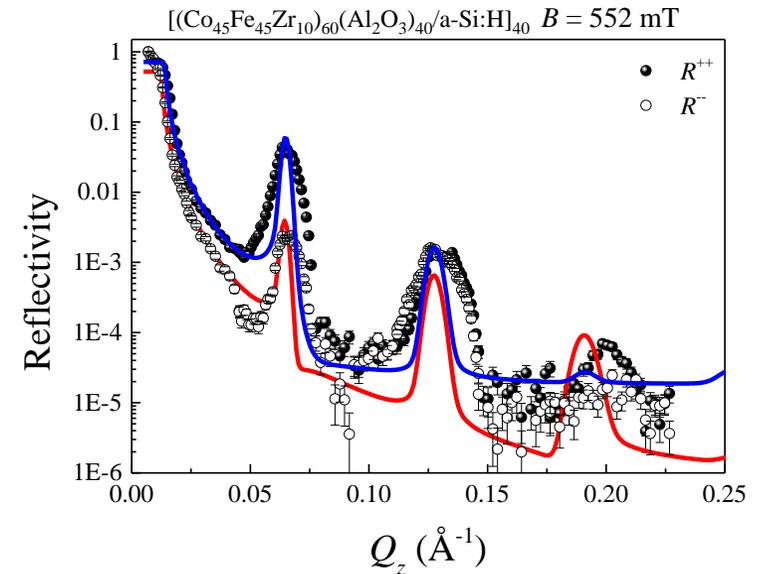
$x = 34$ % at.

До порога перколяции



$x = 47$ % at.

На пороге перколяции



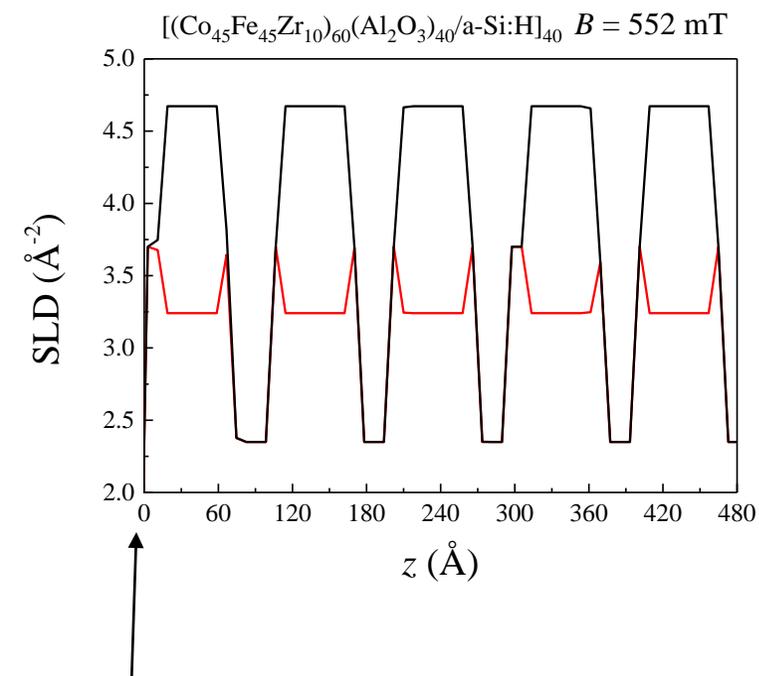
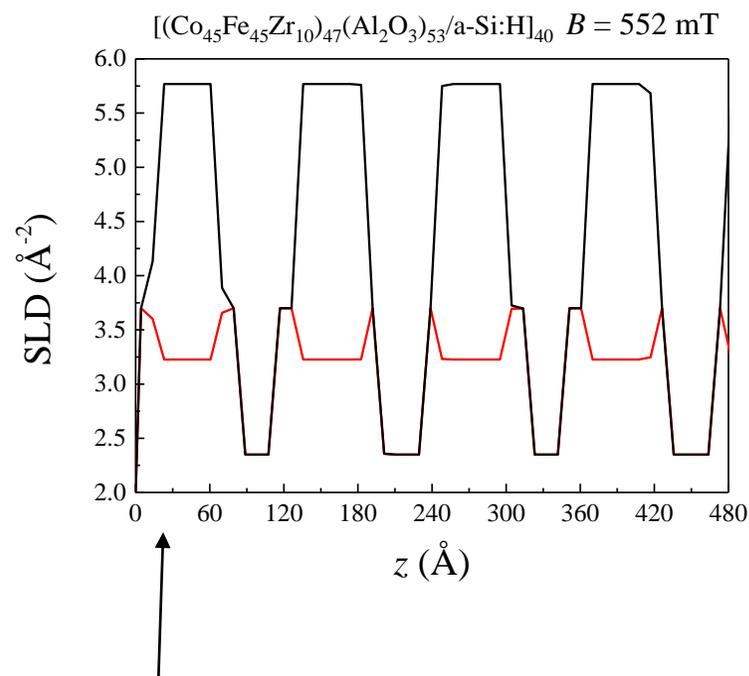
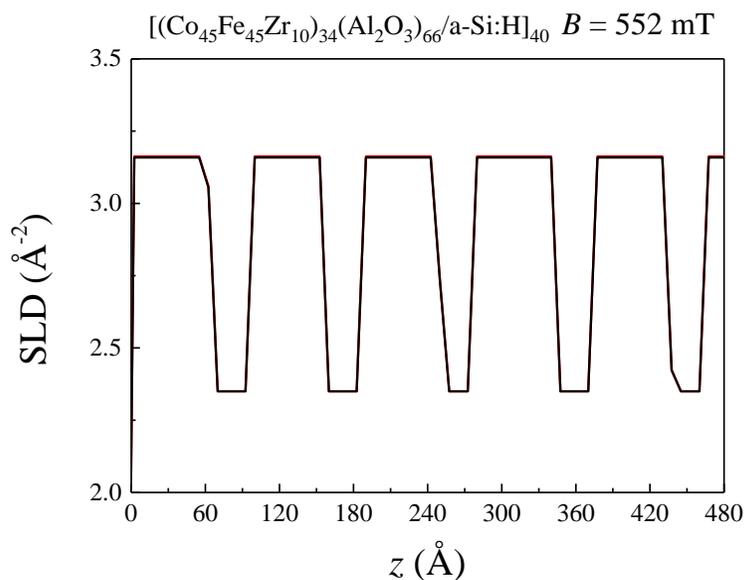
$x = 60$ % at.

За порогом перколяции

- Нулевая намагниченность в случае $x = 34\%$ at.
- Чередование амплитуды чётных / нечётных Брэгговских пиков R^{++}/R^{-} кривых в случаях $x = 47\%$ at. и $x = 47\%$ at. из-за магнитно-мёртвых слоёв на интерфейсах МД-ПП.
- Уширение пиков из-за градиента толщины.



Модель (PNR)



Магнитно-мёртвые слои на интерфейсах МД-ПП

Причиной магнитной деградации интерфейсов может служить образование оксидов и силицидов кобальта и железа, показанное в работах:

Gan'shina, E. a., Buravtsova, V., Novikov, a., Kalinin, Y., & Sitnikov, a. V. (2012). Features of Magneto-Optical Response on Multilayer Nanostructures $\{(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_z(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-z}/\alpha\text{-Si:H}\}_n$. *Solid State Phenomena*, 190, 361–364. doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.190.361

Domashevskaya, E. P., Storozhilov, S. a., Turishchev, S. Y., Kashkarov, V. M., Terekhov, V. a., Stognei, O. V., ... Molodtsov, S. L. (2008). XANES study of interatomic interactions in $(\text{CoFeZr})_x(\text{SiO}_2)_{1-x}$ nanocomposites. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 72(4), 448–452. doi:10.3103/S1062873808040072

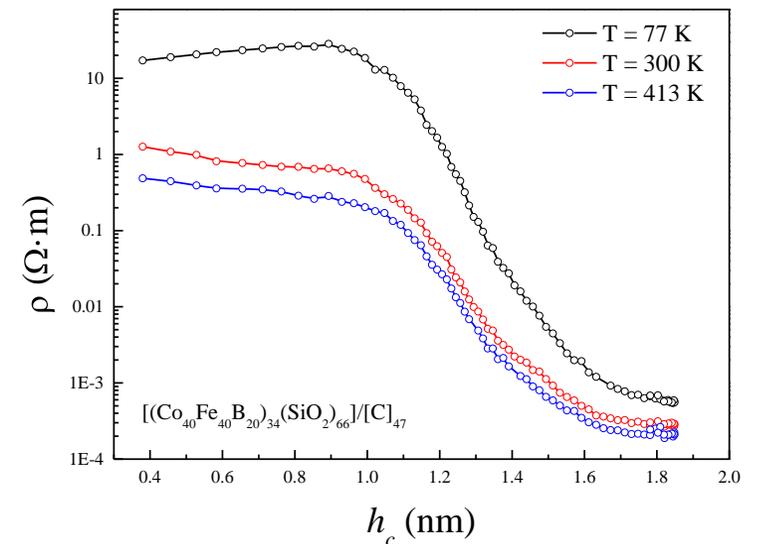
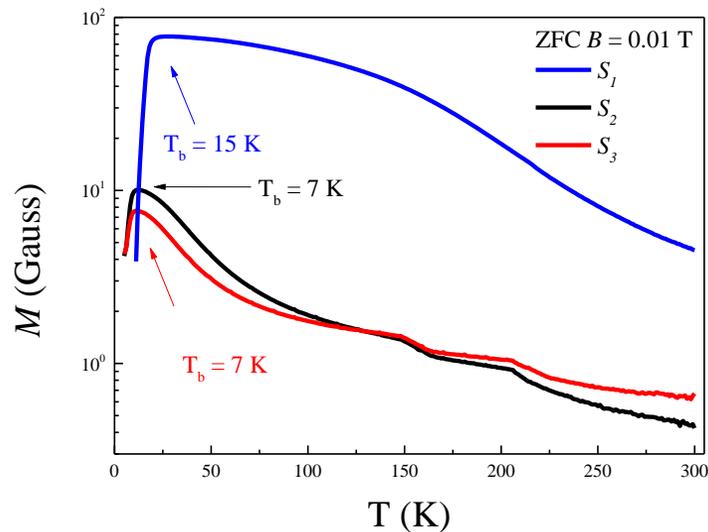
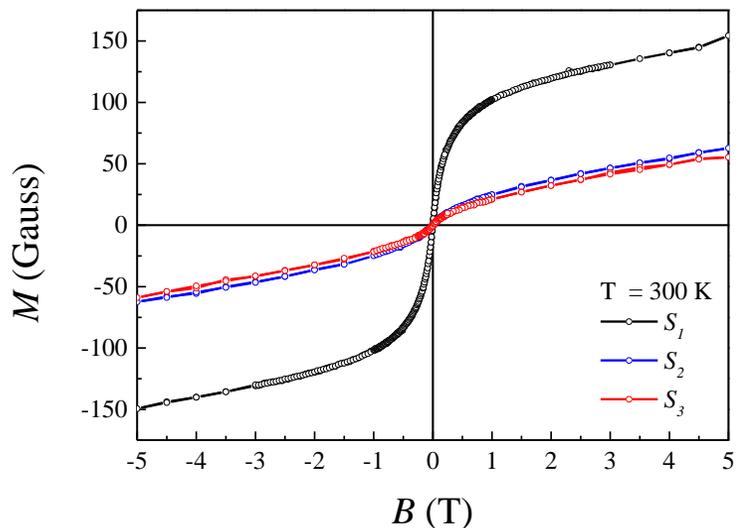
Saad, a. M., Fedotov, a. K., Svito, I. a., Fedotova, J. a., Andrievsky, B. V., Kalinin, Y. E., ... Sitnikov, a. V. (2006). Impedance and magnetization of CoFeZr nanoclusters embedded into alumina matrix. *Journal of Alloys and Compounds*, 423(1-2), 176–180. doi:10.1016/j.jallcom.2005.12.115



Многослойные структуры [(Co₄₀Fe₄₀B₂₀)₃₄(SiO₂)₅₆/C]₄₇

Образцы с химически неактивной ПП прослойкой: [(Co₄₀Fe₄₀B₂₀)₃₄(SiO₂)₅₆/C]₄₇

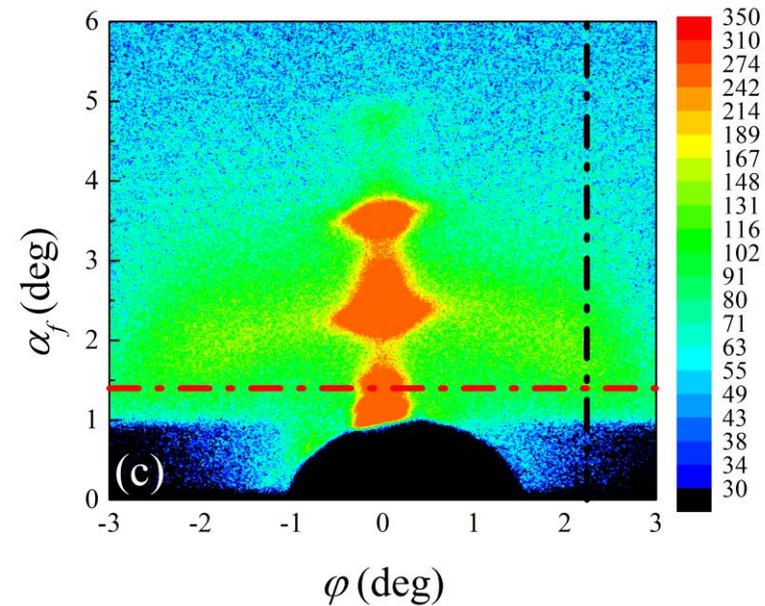
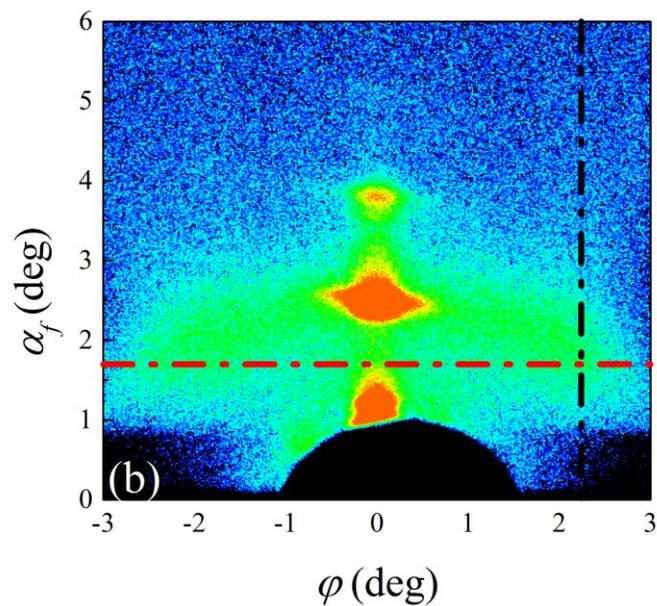
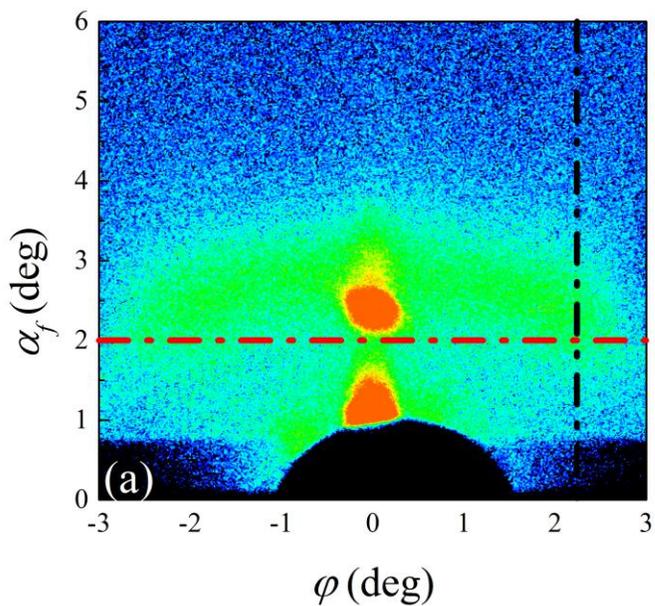
Исследование магнитных и проводящих свойств в зависимости от толщины прослойки C:



МД / C h_c = 0.81 nm T_b (H=100 mT) = 16 K
МД / C h_c = 1.50 nm T_b (H=100 mT) = 7 K
МД / C h_c = 1.81 nm T_b (H=100 mT) = 7 K



Эксперимент (GISAXS. XRR)

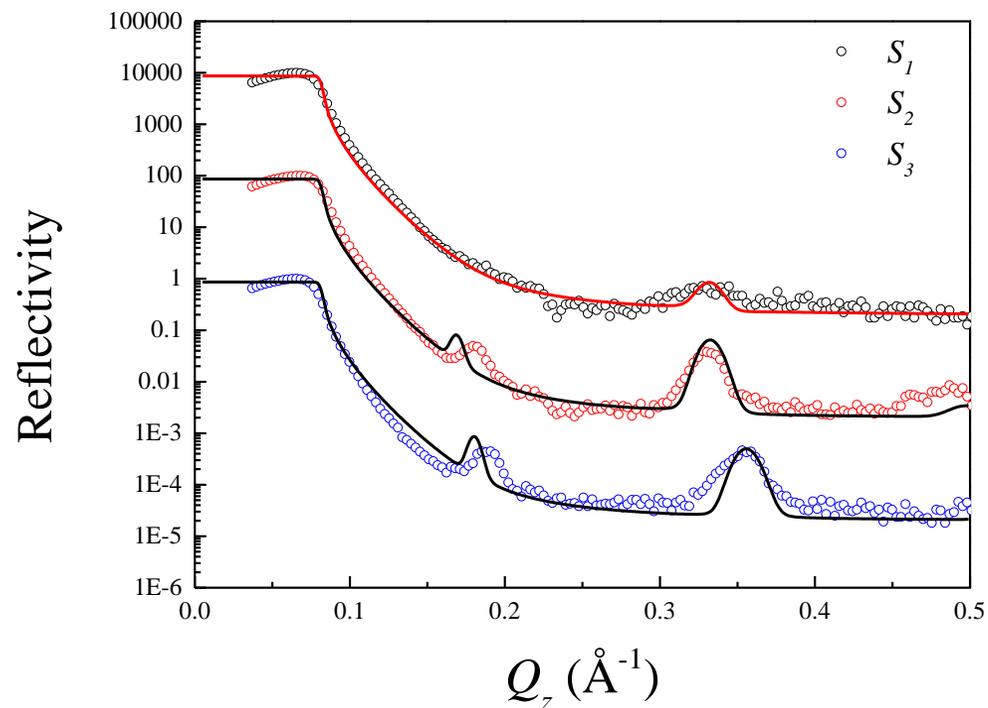
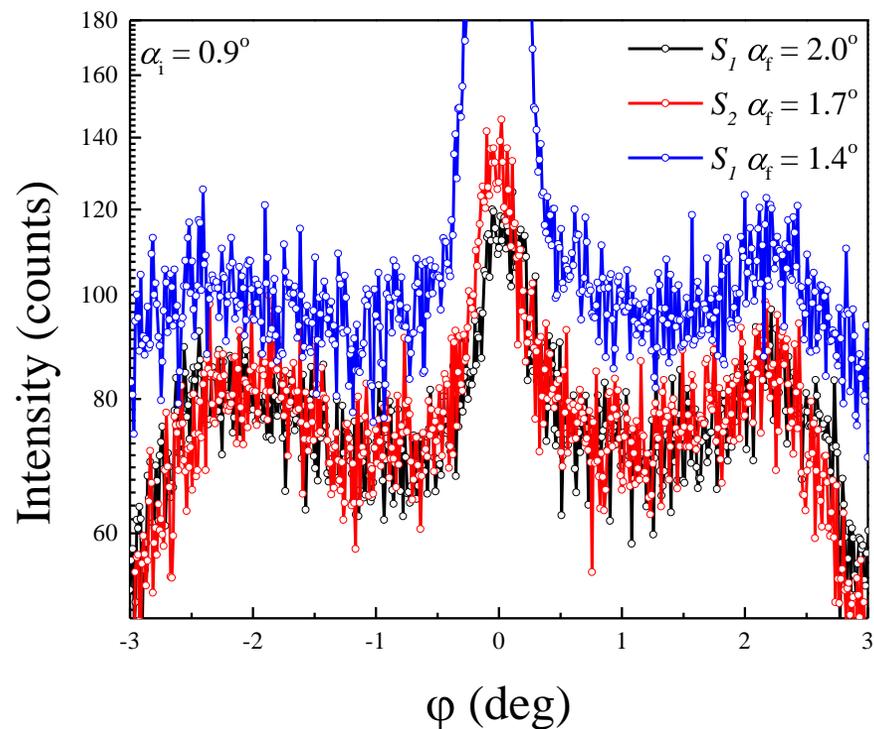


Эксперимент по GISAXS выполнен на лабораторном дифрактометре Bruker Discover D8 с двумерным детектором Vantec 500 (2048 x 2048, 68 x 68 μm).





Эксперимент (GISAXS, XRR)



Sample	XRR				GISAXS		r_h (nm)	r_v (nm)
	Thickness of MI layer, h_1 (nm)	Thickness of the interfaces, h_i (nm)	Thickness of SC layer, h_2 (nm)	Thickness of the bilayer, h (nm)	In-plane interparticle distance, l (nm)			
S_1	1.8	0.2	0.1	1.9	4.1	2.2	0.70	
S_2	2.5	0.5	1.1	3.6	4.1	2.5	0.75	
S_3	2.5	0.5	1.3	3.8	4.1	2.5	0.75	

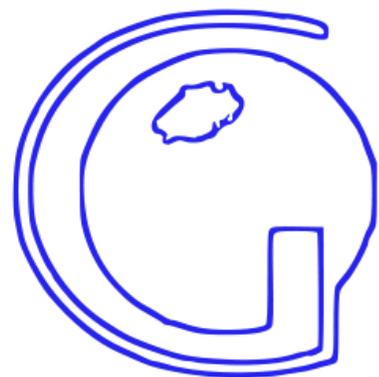


Заключение

- Магнитные и электропроводящие свойства многослойных систем МД / ПП зависят от состава МД композита и морфологии полупроводникового слоя.
- Si и C не формируют сплошного слоя толщиной менее 1 нм.
- На интерфейсах МД / Si образуются магнитно-мёртвые слои.
- Для полноценного исследования неоднородных многослойных наноструктур в дополнение к рефлектометрии необходимо использовать малоугловое рассеяние в скользящей геометрии.



Спасибо за внимание!



UPPSALA
UNIVERSITET



 **Helmholtz-Zentrum
Geesthacht**

Zentrum für Material- und Küstenforschung

 **TU Delft** Delft
University of
Technology

