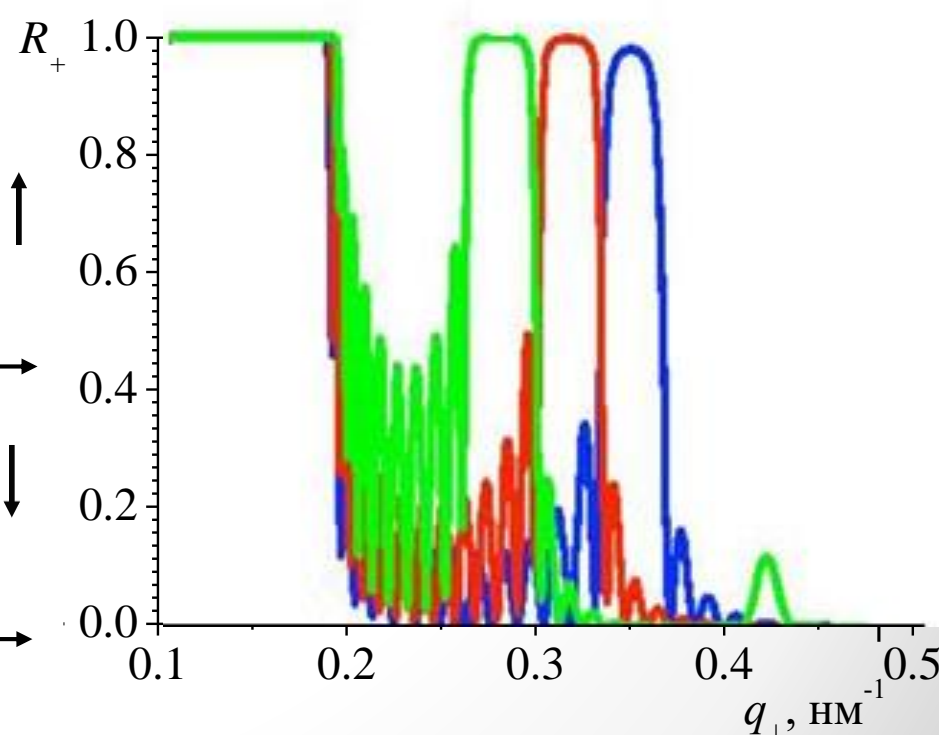
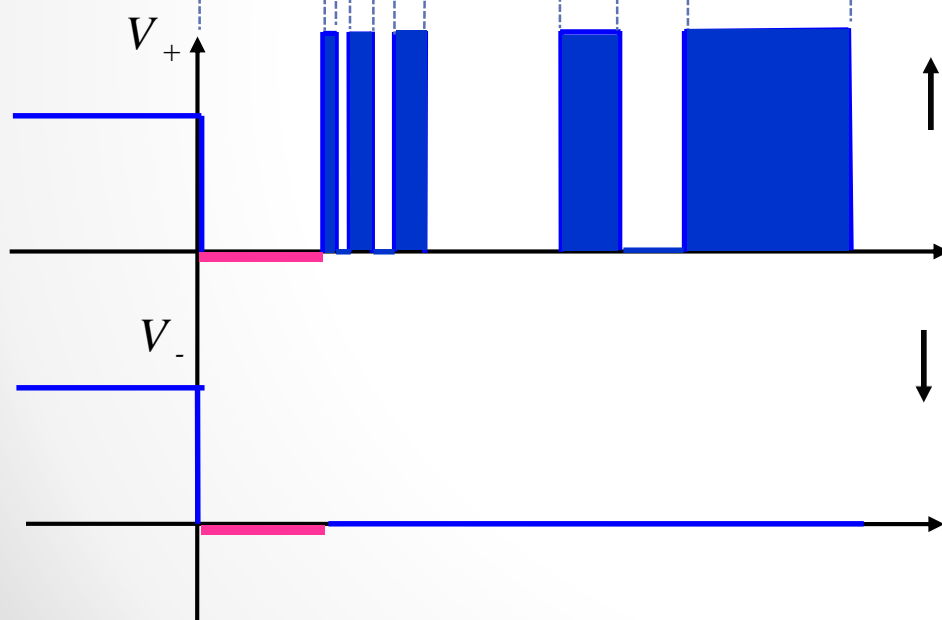
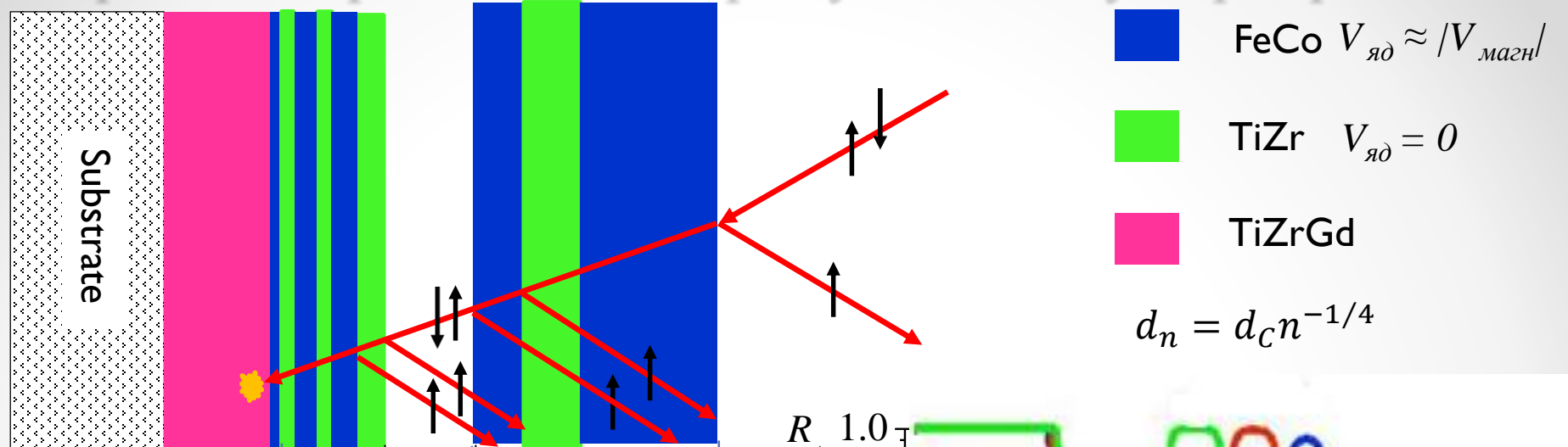


# Исследование возможности использования покрытий на основе нанослоев Ti и Co в поляризующей нейтронной оптике.

Матвеев В.А., ОИТОЭР ОНИ

# Принцип работы поляризующего суперзеркала



Глубинный профиль оптического потенциала  $V$  для нейтронов с разным направлением спина

Зависимость коэффициента отражения  $R$  от перпендикулярной составляющей переданного импульса  $q$

# Основные параметры поляризующих суперзеркал

Угловая приемная способность характеризуется параметром  $m$ , выражаемого в единицах  $\theta_{Ni}$  – максимального угла, при котором происходит полное отражение нейтронов от полированной поверхности никеля:

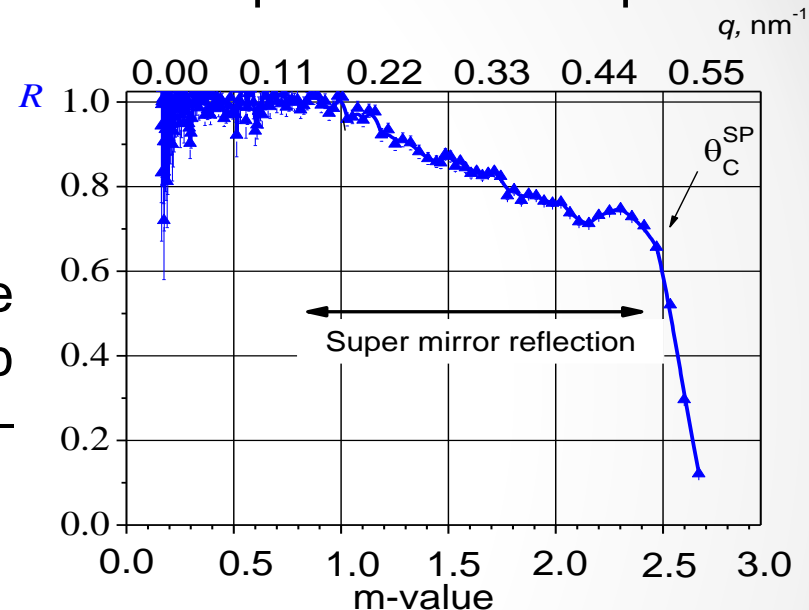
$$m = \frac{\theta_c^{SP}}{\theta_c^{Ni}} = \frac{q_c^{SP}}{q_c^{Ni}}$$

Основной фактор, который не позволяет увеличивать угловую приемную способность суперзеркал – рост межслойной шероховатости.

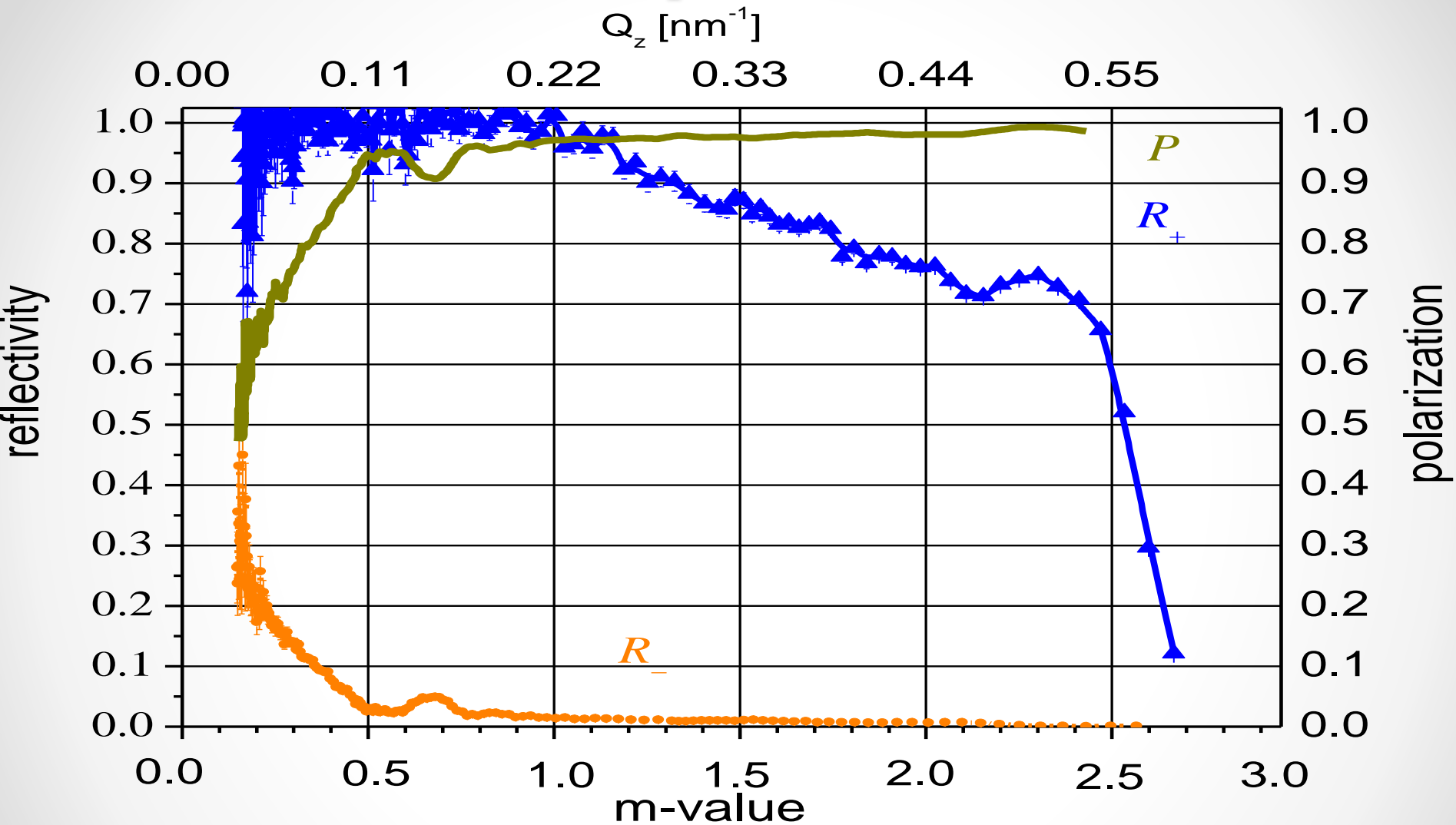
Для характеристики поляризующих свойств зеркал и нейтронно-оптических устройств (поляризаторов, анализаторов и т.д.) используют понятие поляризующей эффективности:

$$P = \frac{R_+ - R_-}{R_+ + R_-}$$

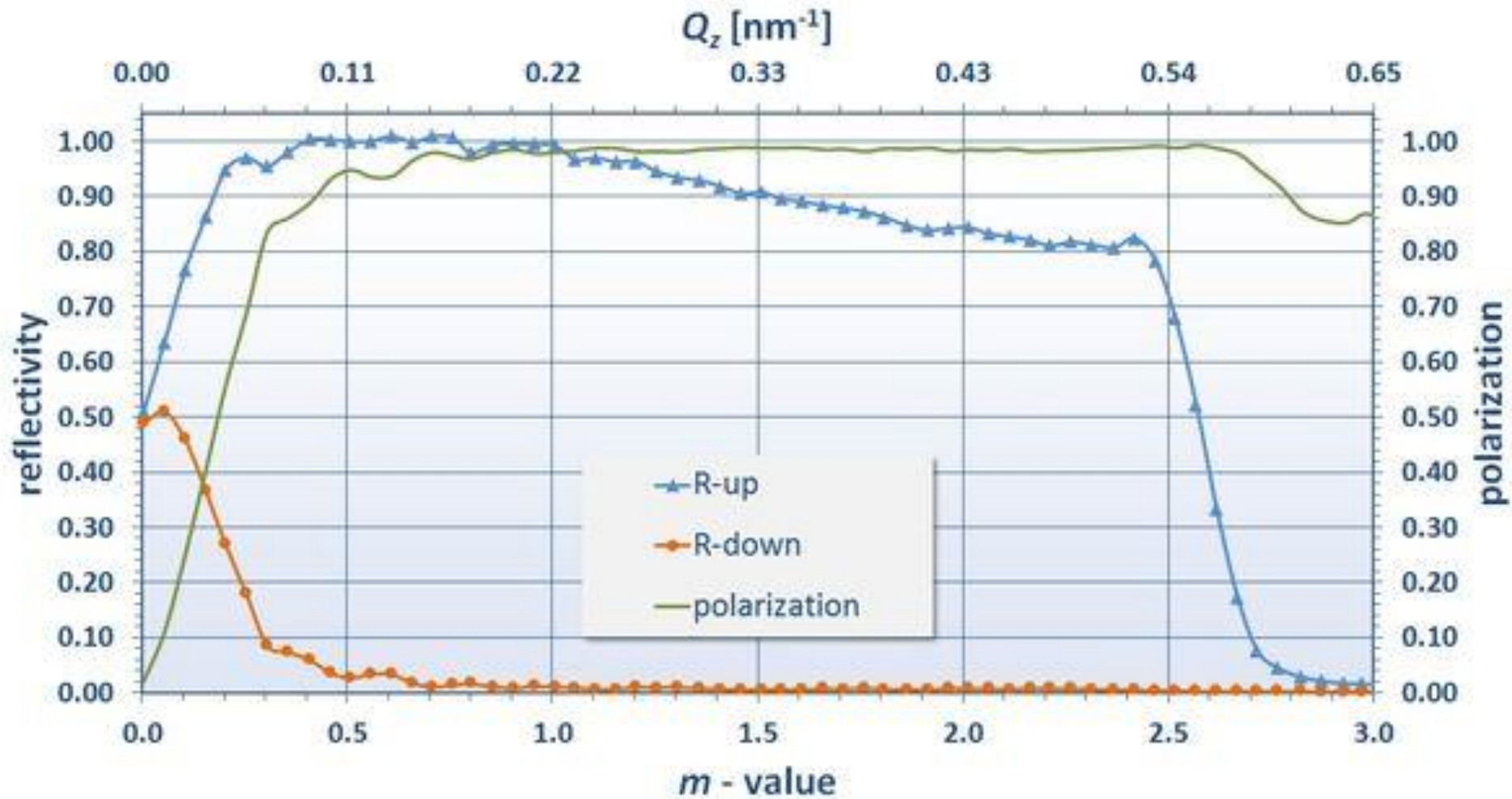
$R_+$ ,  $R_-$  - коэффициенты отражения нейтронов со спином «вверх» и «вниз»



# FeCo/TiZr supermirror (ПНЯФ)

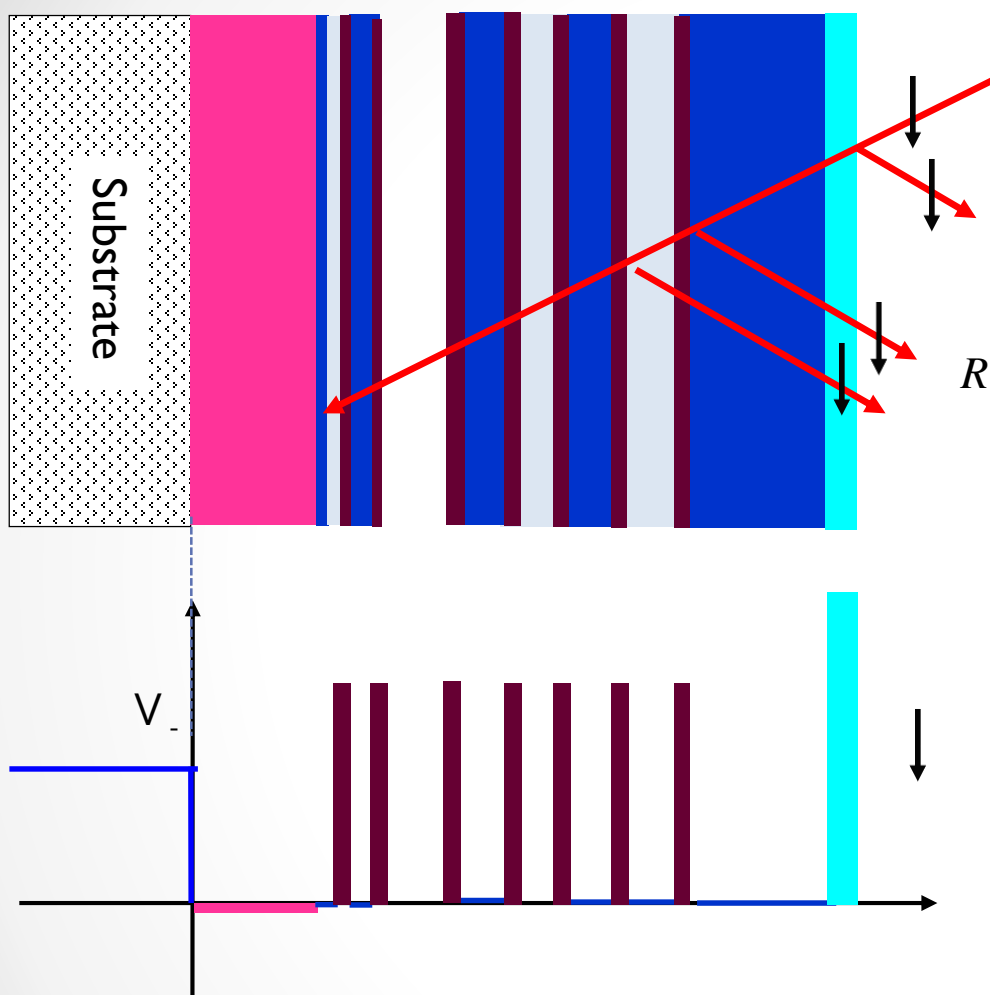


# FeCoV/TiN supermirror (Swissneutronics)

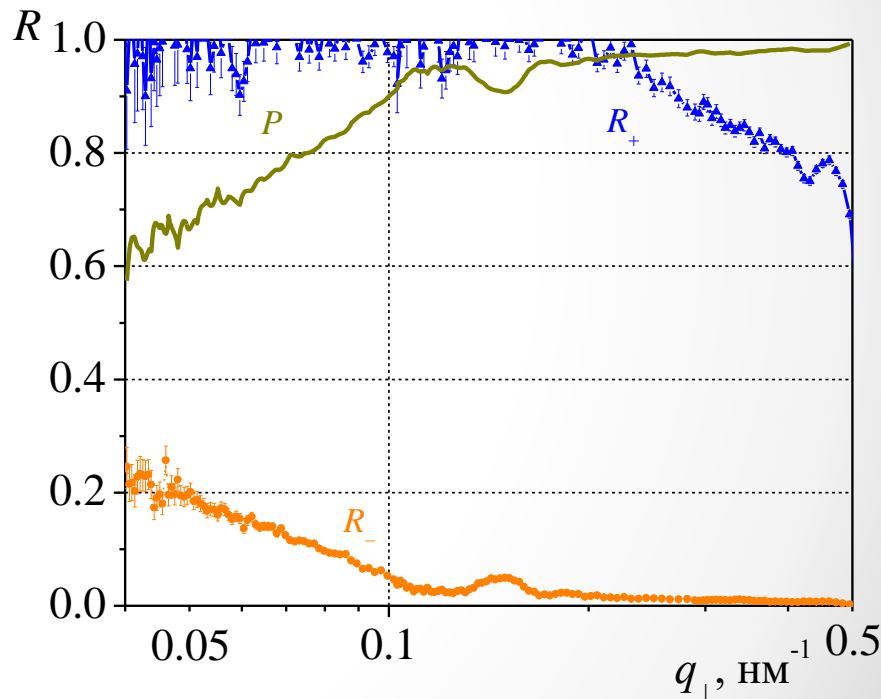


<http://www.swissneutronics.ch>

# Факторы уменьшающие поляризующую эффективность



- FeCo
- TiZr
- TiZrGd
- оксидный слой
- магнитно-мертвые слои



Области с нулевой намагниченностью (магнитно-мертвые слои) и окисный слой формируют потенциальные барьеры от которых отражаются нейтроны обоих направлений спина. Это приводит к снижению поляризации отраженного от покрытия нейтронного пучка.

# Антибарьерные слои

Коэффициент отражения нейтрона от прямоугольного барьера при  $bq_b \ll 1$ :

$$R_b(q) = 1 - 4 \left( \frac{q}{q_b} \right)^2 \frac{1}{(bq_b)^2}. \quad \text{при } q \rightarrow 0 \quad R = 1$$

$q_b = \sqrt{8m_n V_b} / \hbar$  - критическое значение переданного импульса для материала барьера

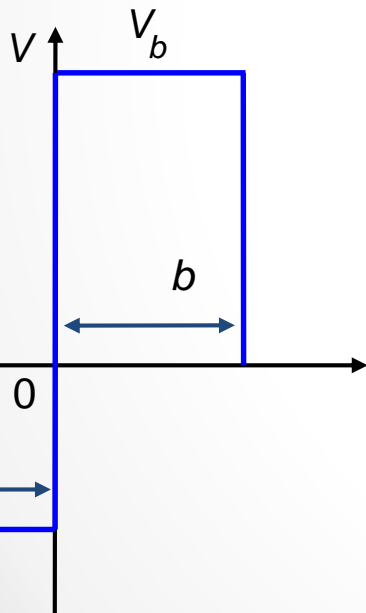
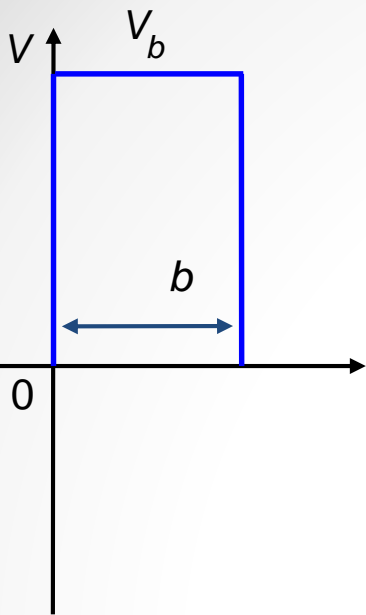
Если рядом с барьером разместить яму толщиной :

$$a = -\frac{V_b}{V_a} b \quad \text{или} \quad \langle V \rangle = \frac{V_a a + V_b b}{a + b} = 0$$

то для  $bq_b \ll 1$  коэффициент отражения нейтронов с  $q \rightarrow 0$ :

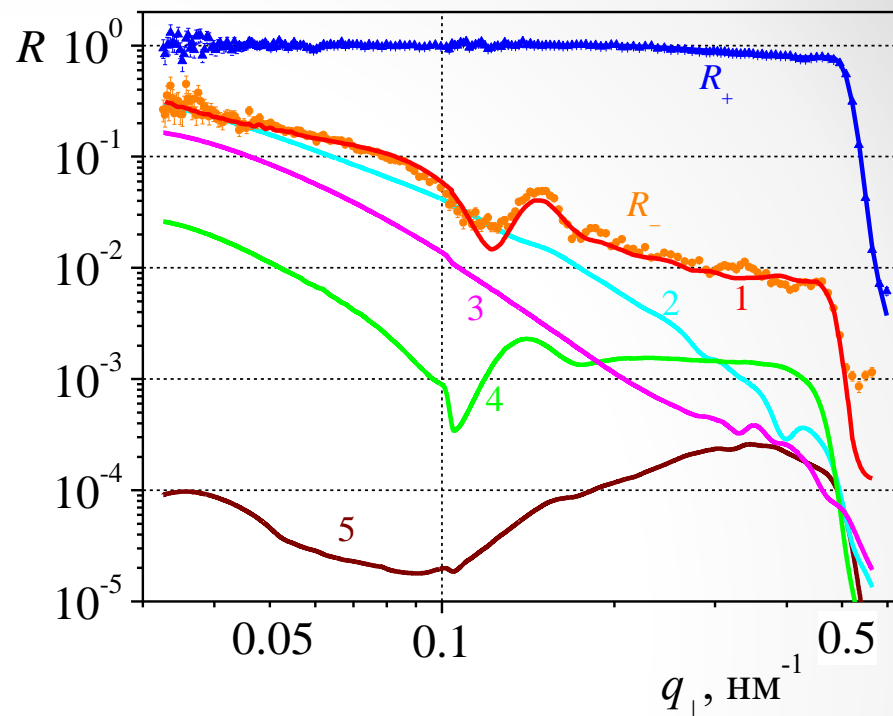
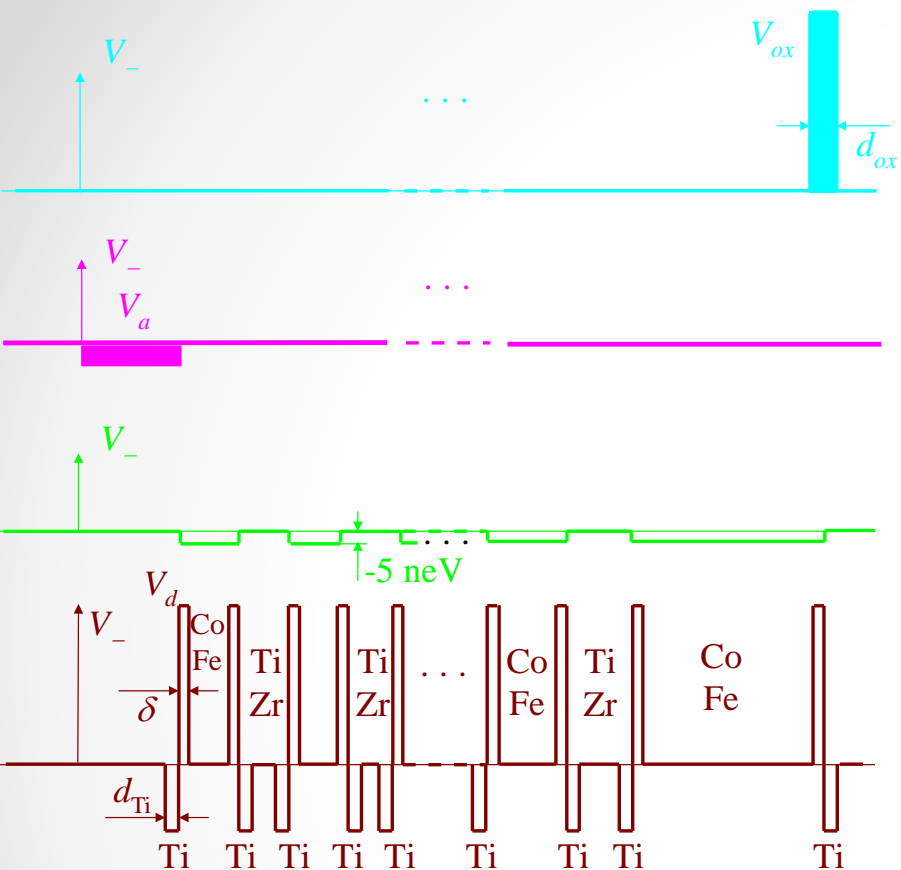
$$R \cong \frac{1}{64} \left[ bq_b \left( 1 + \left( \frac{q_b}{|q_a|} \right)^2 \right) \right]^2 \ll 1$$

Слой с отрицательным потенциалом, позволяющий уменьшить отражение нейтронов от потенциального барьера, будем называть антибарьерным.





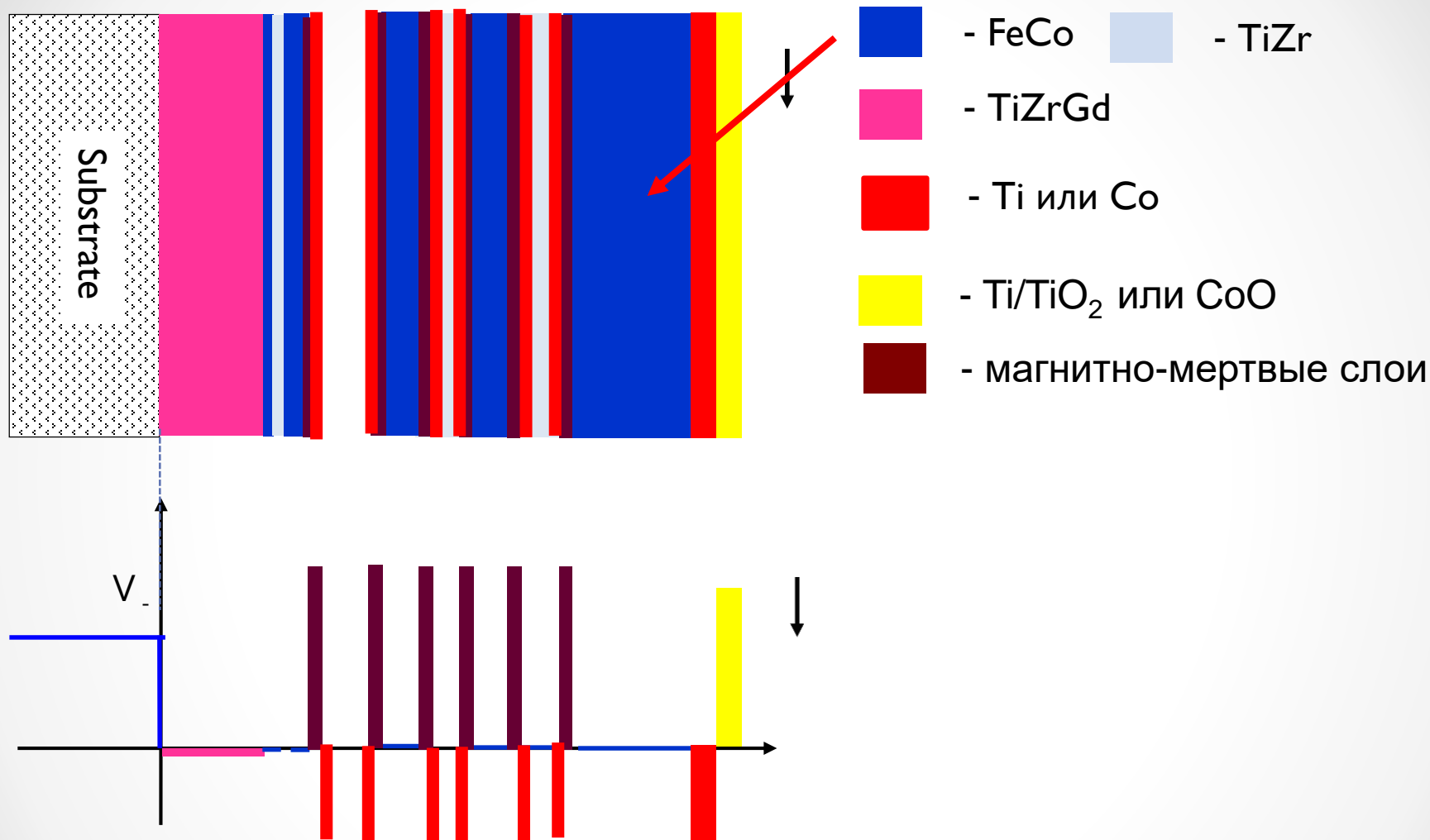




Экспериментальные (символы) и расчетные (линии) зависимости  $R(q)$ : 1 – расчет отражения от суперзеркала с учетом всех ухудшающих факторов; 2 – расчет отражения от суперзеркала с прослойками Ti и верхним оксидным слоем; 3 – расчет отражения от суперзеркала с прослойками Ti и поглощающим подслоем; 4 - суперзеркало с прослойками Ti и с рассогласованными потенциалами соседних слоев.

Подавление отражения нейтронов с нежелательным направлением спина «вниз» было продемонстрировано в работе [1]. Следующим по вкладу фактором является окисный слой на поверхности суперзеркала.

# Подавление отражения от оксидного слоя



Для исключения отражения нейтронов от оксидного слоя предлагается создавать на поверхности поляризующих суперзеркал антиотражающее покрытие в виде бислоя «яма-барьер». Главными кандидатами на роль такого покрытия являются бислои Ti/TiO<sub>2</sub> и Co/CoO.

## Цель и задачи работы

Целью работы: Исследование возможности использования нанослоев Ti и Co для создания антиотражающих покрытий в составе .

### Задачи:

1. Исследование бислойных систем Ti/TiO<sub>2</sub> и Co/CoO, формирующихся в процессе естественного окисления нанослоев Ti и Co.
2. Оценка толщины нанослоев Ti и Co, необходимых для создания антиотражающего покрытия.
3. Экспериментальная проверка подавления отражения нейтронов от поляризующих зеркал с антиотражающими покрытиями.

# I. Исследование бислойных систем Ti/TiO<sub>2</sub> и Co/CoO

## Образцы для исследований:

Бислойные системы Ti/TiO<sub>2</sub> и Co/CoO получались путем нанесения тонких слоев Ti и Co толщиной 5-100 нм с их последующим окислением в атмосфере воздуха при нормальных условиях в течении 80 суток. Нанесение нанослоев Ti и Co осуществлялось методом магнетронного напыления на установке ЛУНА (ФГБУ "ПИЯФ", Гатчина). Рабочее давление аргона при напылении составляло  $2.5 \cdot 10^{-3}$  мбар, а давление остаточных газов до напыления  $5 \cdot 10^{-5}$  мбар.

Материал мишени: технически чистый титан (ТГ-90) и технически чистый кобальт; подложка – флоат-стекло толщиной 5 мм (шероховатость подложек 0.5-1.0 нм).

# Нейтронная рефлектметрия

## Рефлектометр NR-4М (ПИЯФ, Гатчина)

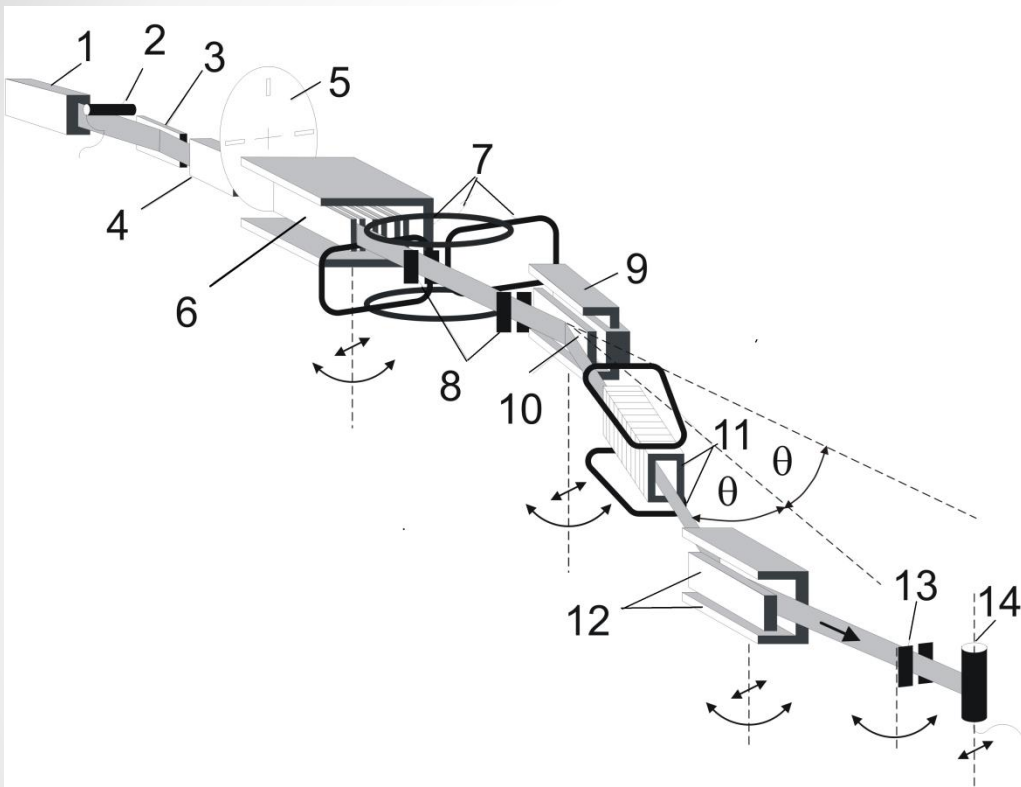
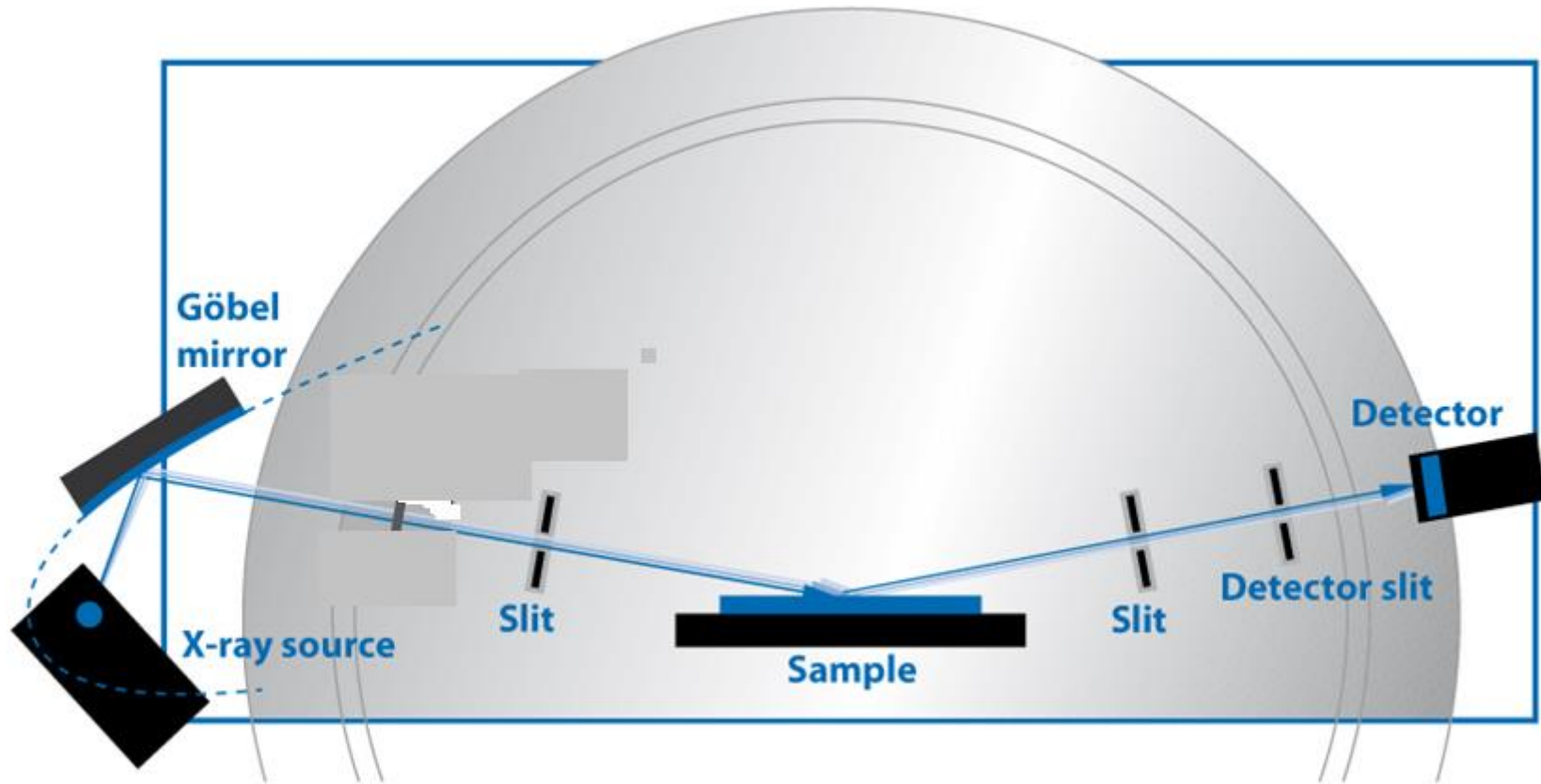


Схема рефлектометра NR-4М: (1) внутри-канальный коллиматор, (2) монитор, (3) суперзеркальный отклонитель пучка, (4) коллиматор, (5) прерыватель пучка, (6) формирователь пучка в постоянном магните, (7) флиппер Корнеева, (8) Cd диафрагмы, (9) узел образца с постоянным магнитом, (10) образец, (11) радиочастотный адиабатический спин-флиппер, (12) суперзеркальный CoFeV/TiZr анализатор в постоянном магните, (13) диафрагма детектора, (14) He детектор.

Основные параметры рефлектометра NR-4М:

максимальный диапазон длин волн $\lambda$ :	0.5÷5 Å
разрешение по длине волны $\Delta\lambda/\lambda$ :	0.05
плотность потока нейтронов на образце:	$7.5 \cdot 10^4$ имп·сек <sup>-1</sup> ·см <sup>-2</sup>
интегр. поляризация нейтронного пучка:	99%

# Рентгеновская рефлектометрия



длина волны  $\lambda$ :

разрешение по длине волны  $\Delta\lambda/\lambda$ :

интенсивность на образце:

13 угловая расходимость пучка  $\Delta\theta$ :

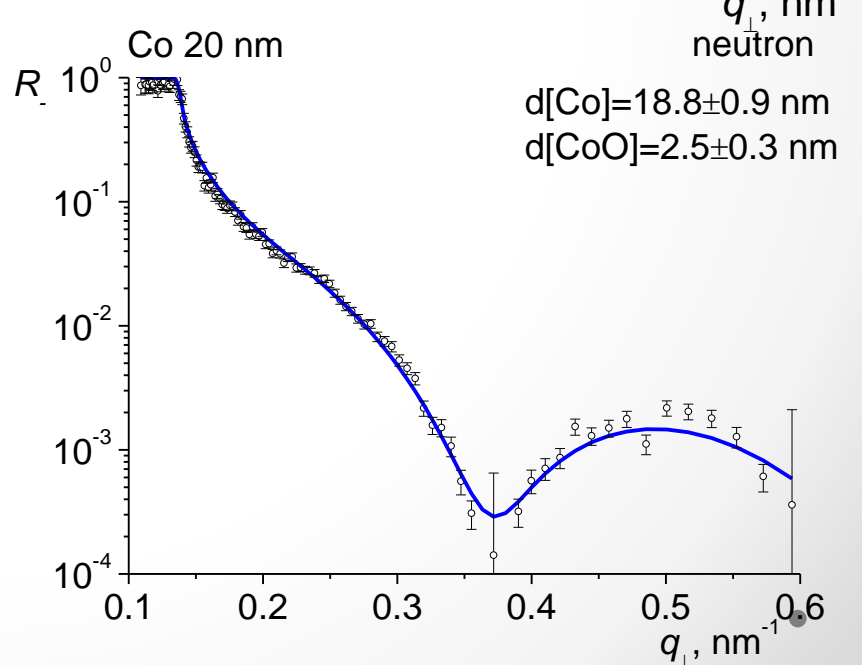
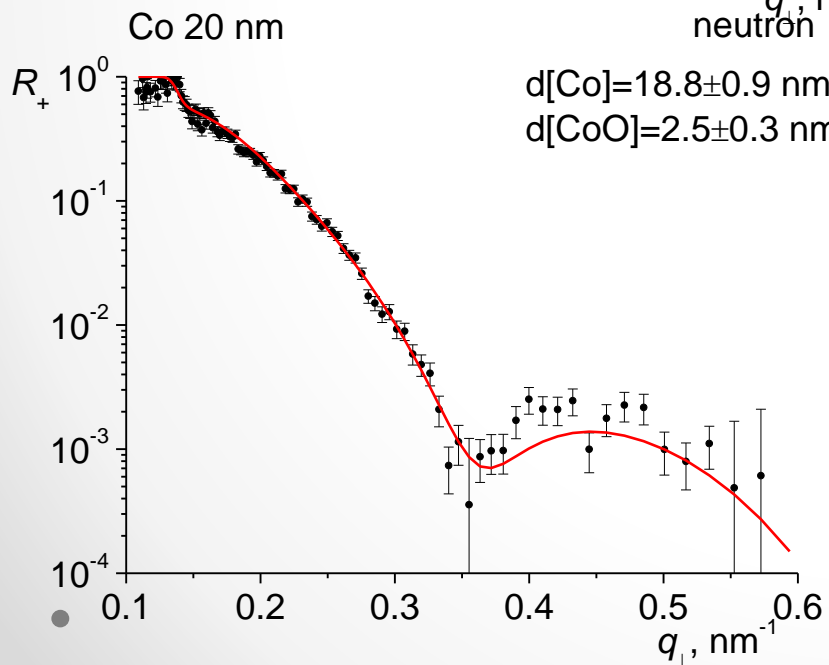
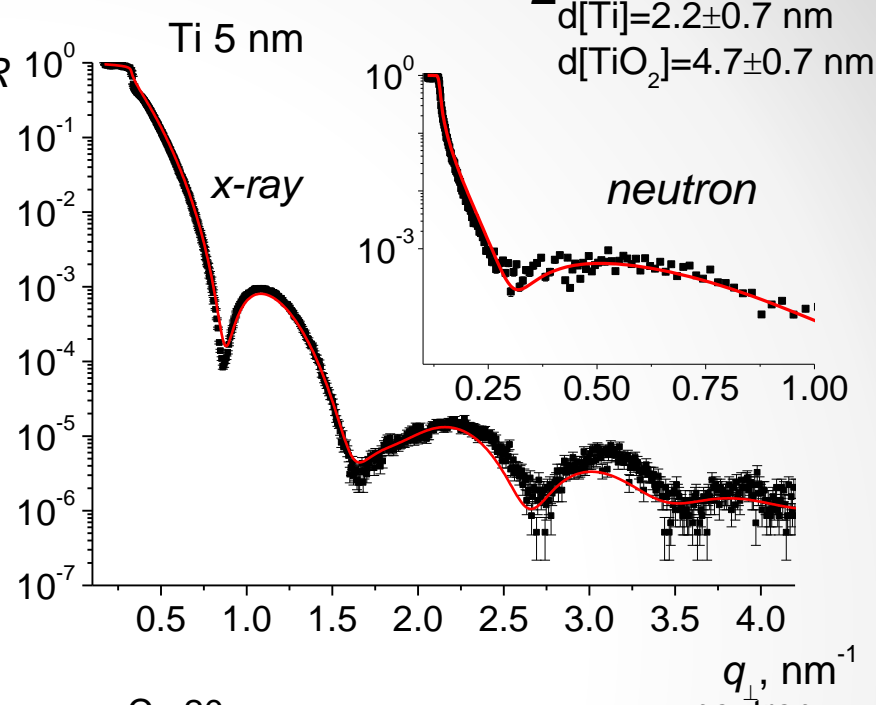
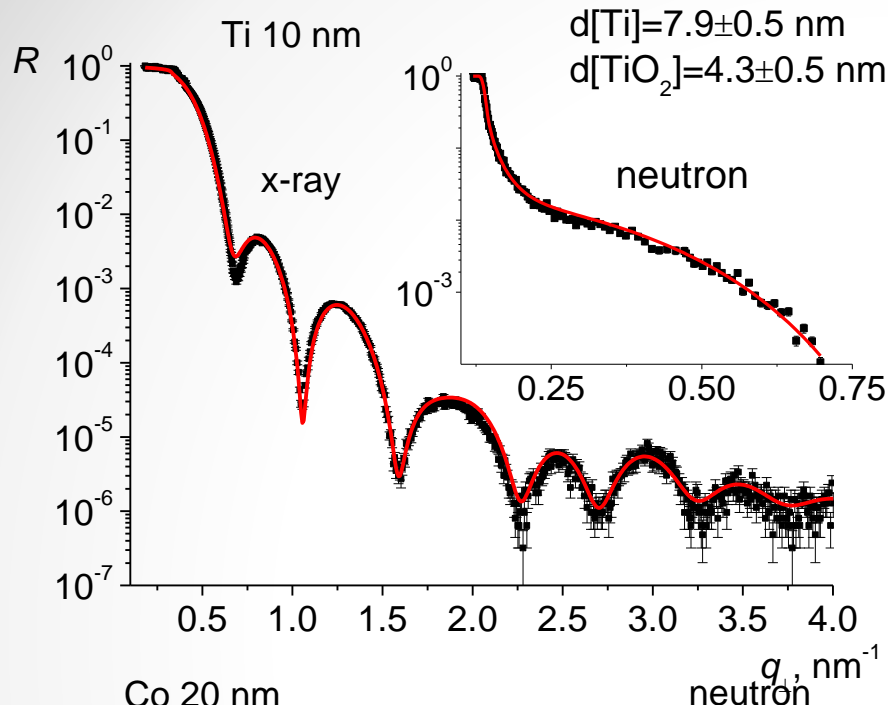
1.54 Å (CuK $\alpha$ )

0.01

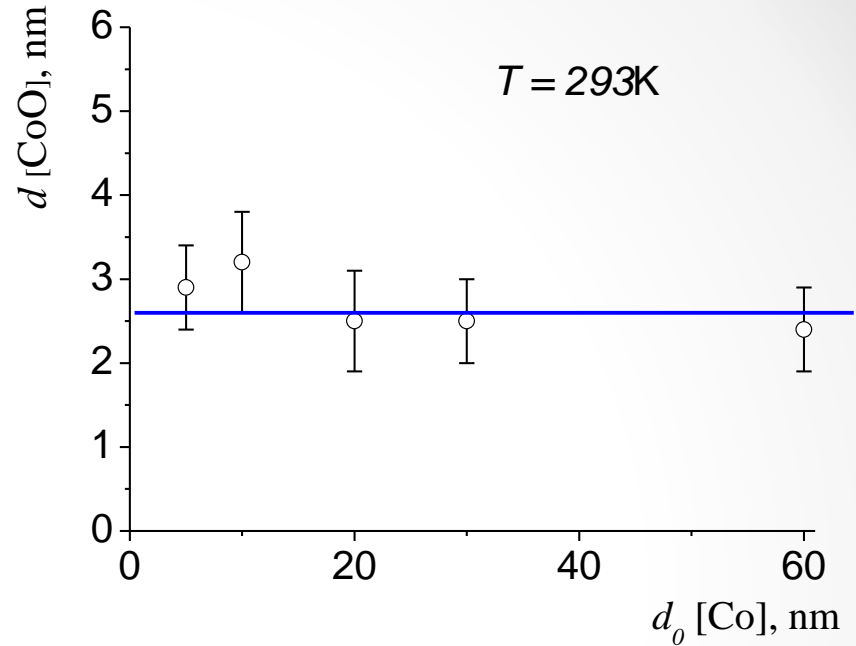
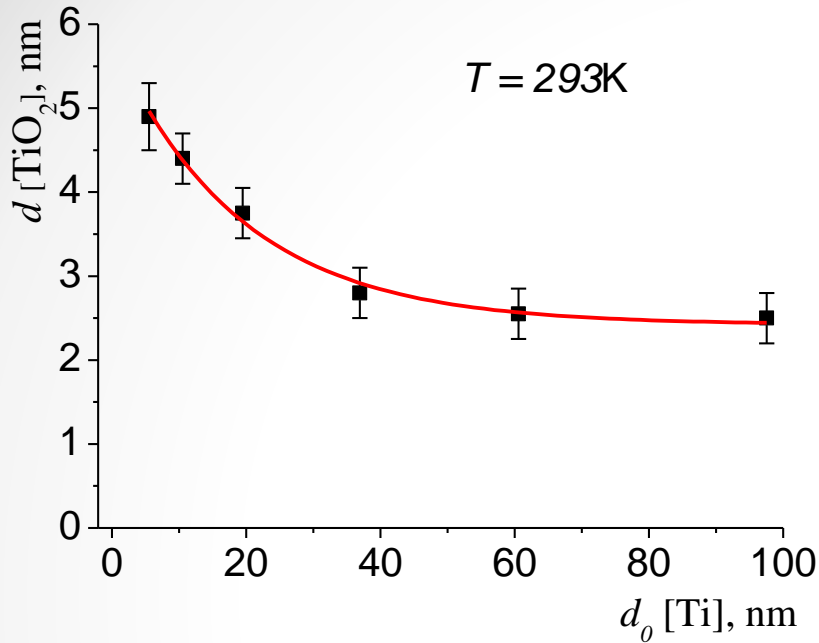
$10^8$  имп·сек $^{-1}$ ·см $^{-2}$

0.5 угл. мин.

# I. Исследование бислойных систем $\text{Ti}/\text{TiO}_2$ и $\text{Co}/\text{CoO}$



# I. Окисление тонких пленок Ti и Co на воздухе



Условие минимизации отражения от покрытия:

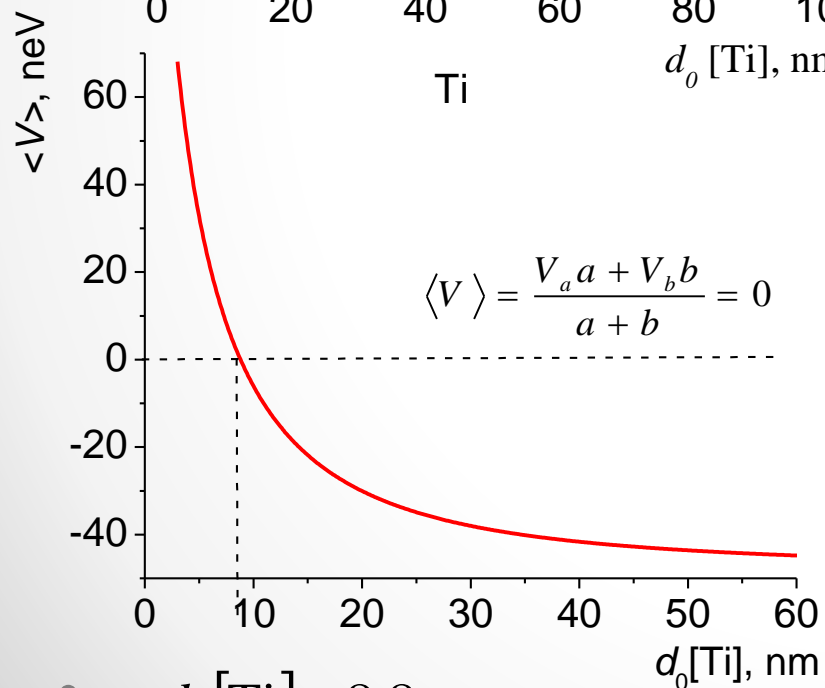
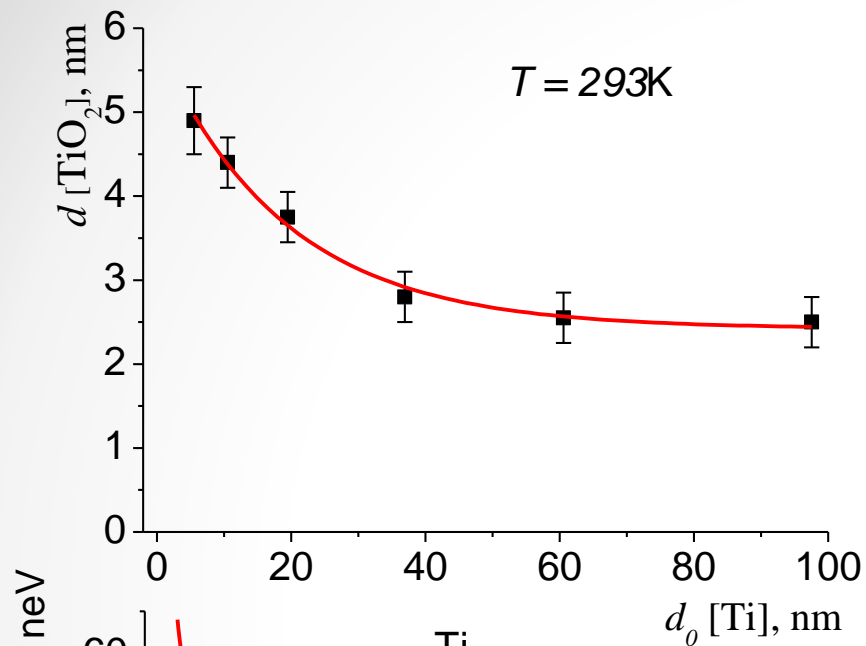
	<i>Ti</i>	<i>Co</i>
	$a = d[\text{Ti}]$	$a = d[\text{Co}]$
	$b = d[\text{TiO}_2]$	$b = d[\text{CoO}]$
$\langle V \rangle = \frac{V_a a + V_b b}{a + b} = 0$	$V_a^- [\text{Ti}] = -49.7 \text{ нЭВ}$	$V_a^- [\text{Co}] = -45.6 \text{ нЭВ}$
	$V_b^- [\text{TiO}_2] = 68.1 \text{ нЭВ}$	$V_b^- [\text{CoO}] = 104.0 \text{ нЭВ}$

Требуемую исходную (до окисления) толщину слоя металла можно оценить по формуле ( $\alpha[\text{TiO}_2, \text{CoO}]$  - коэффициент Бедтворта-Пиллинга):

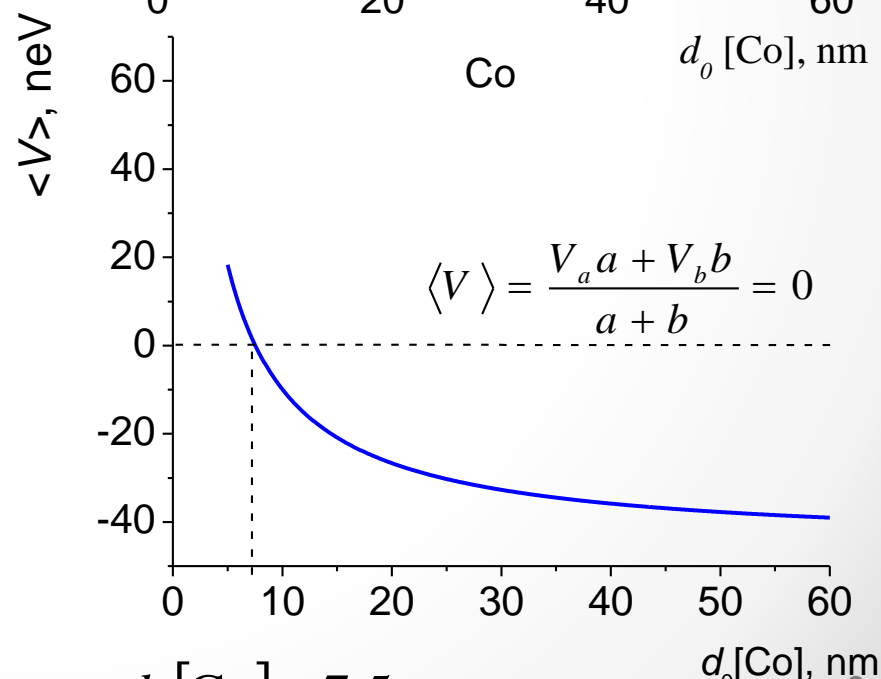
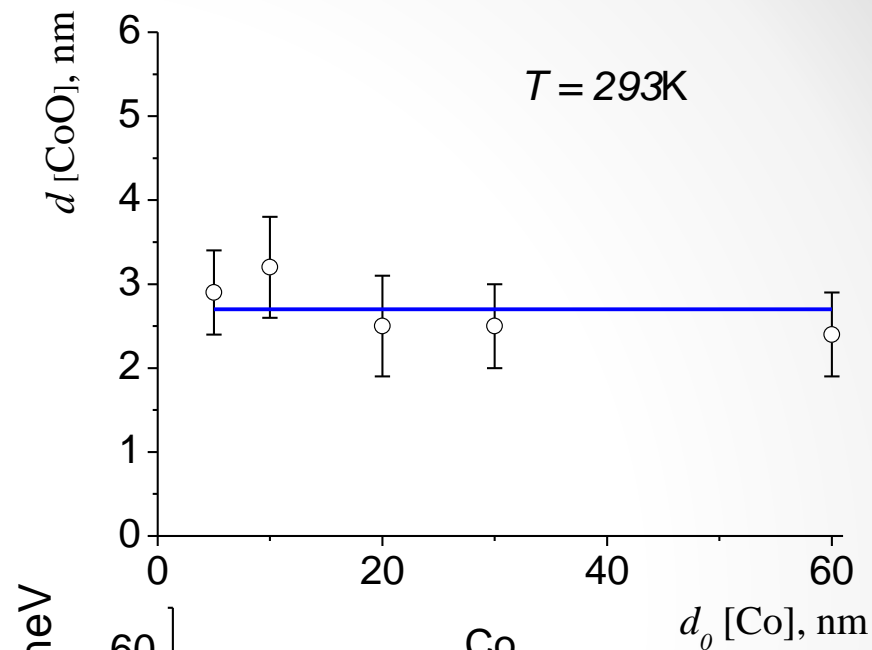
- $d_0[\text{Ti}, \text{Co}] = d[\text{Ti}, \text{Co}] + d[\text{TiO}_2, \text{CoO}] / \alpha[\text{TiO}_2, \text{CoO}]$



# II. Оценка оптимальных толщин нанослоев Ti и Co



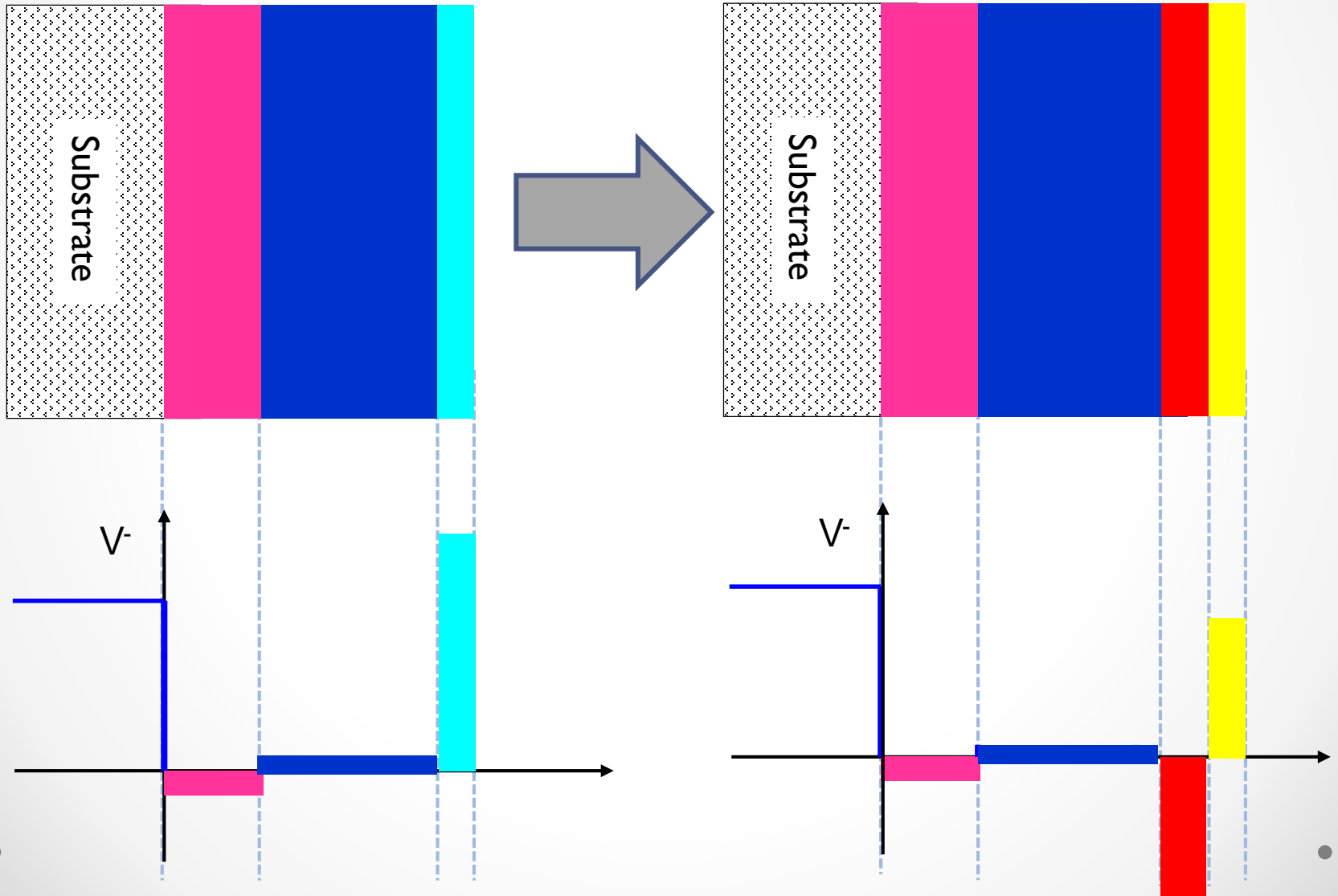
- $d_0[\text{Ti}] = 8.8 \text{ nm}$



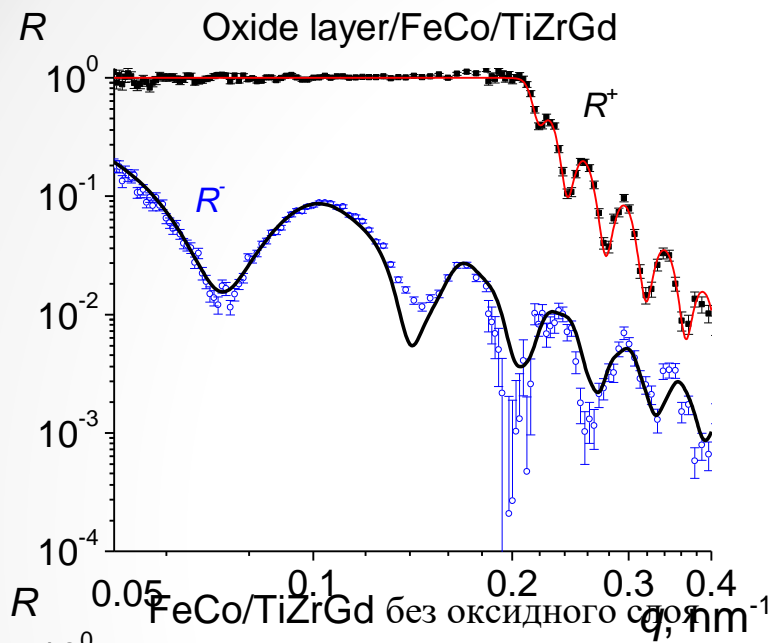
- $d_0[\text{Co}] = 7.5 \text{ nm}$

# III. Проверка эффективности покрытий

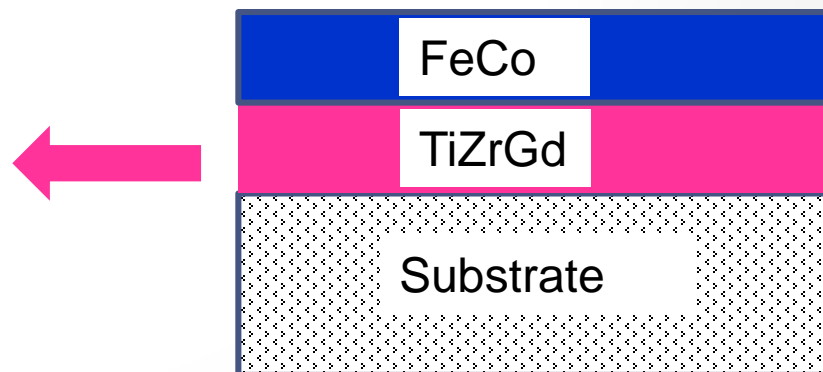
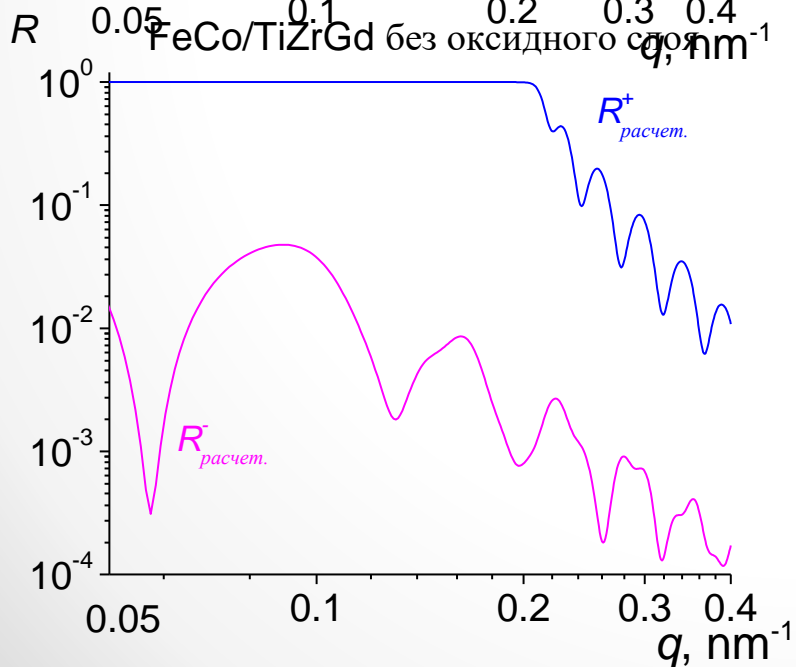
■ - TiZrGd   ■ - FeCo   ■ - оксид FeCo   ■ - Ti/Co   ■ - TiO<sub>2</sub>/CoO



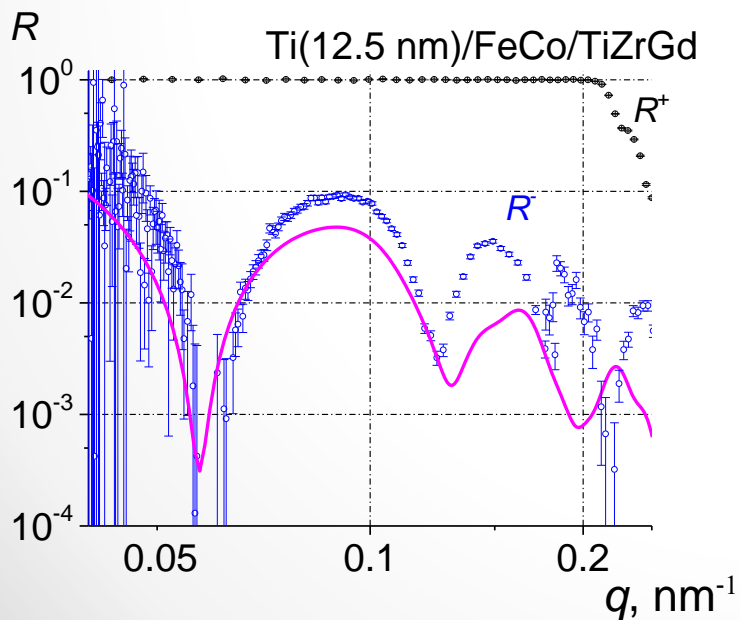
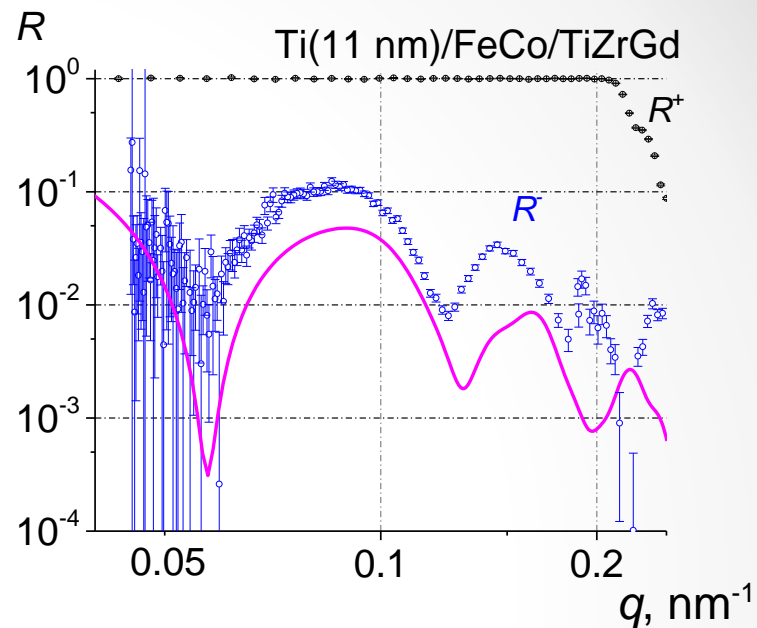
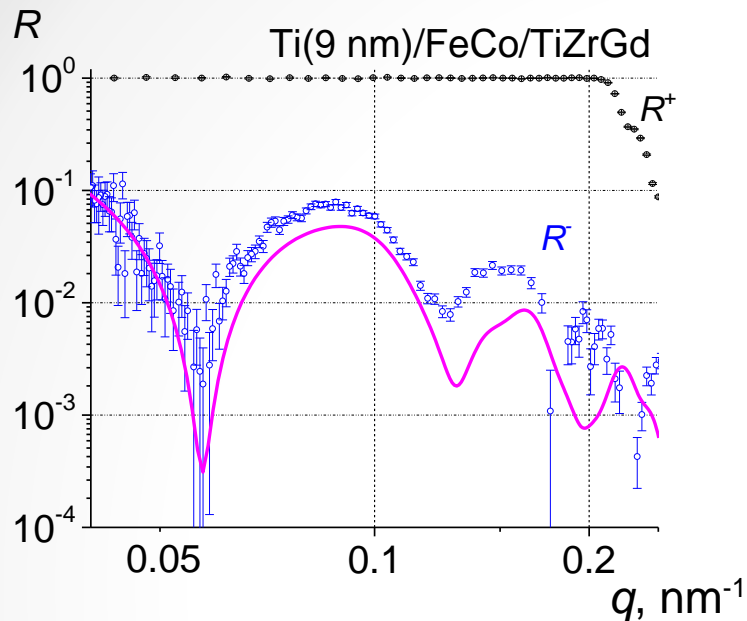
# III. Проверка эффективности покрытий



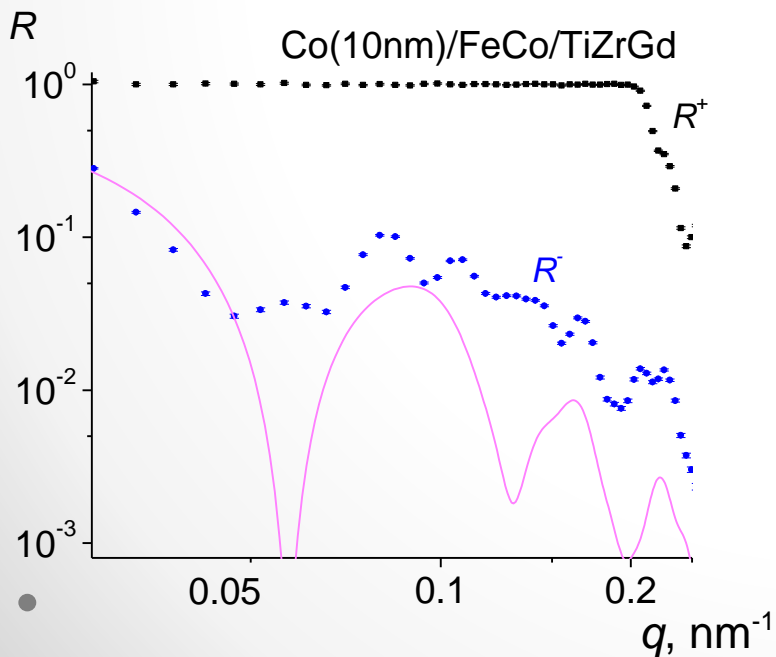
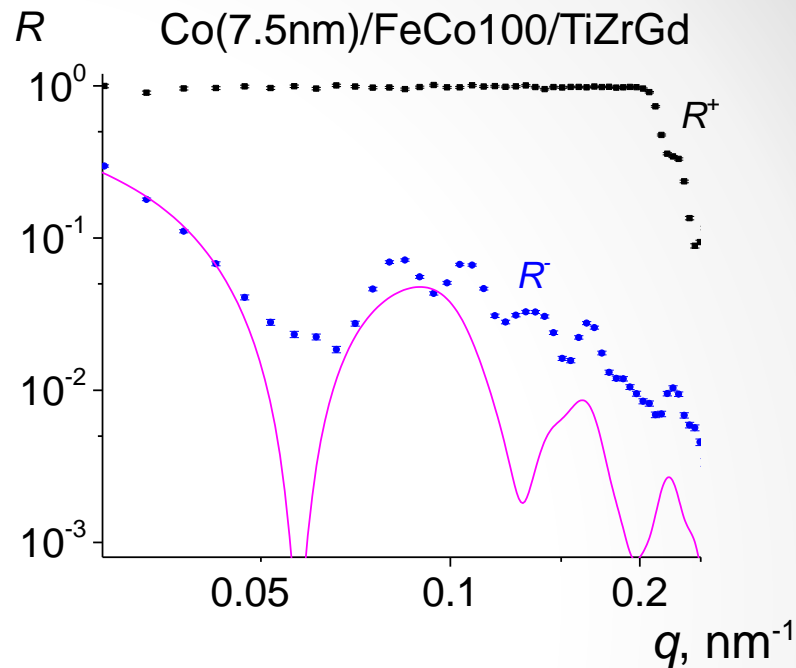
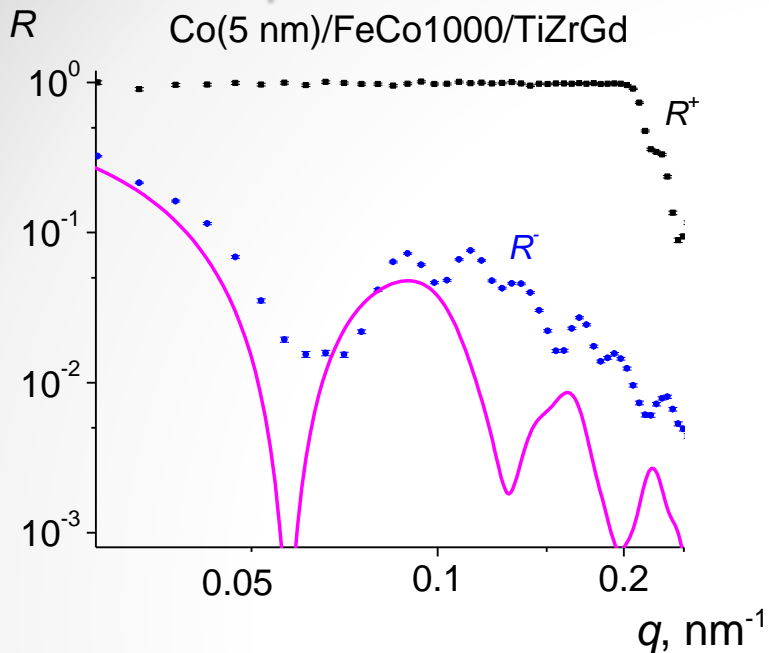
$d$ [оксида], нм	$3.1 \pm 0.5$
$\sigma$ [оксида], нм	$2.5 \pm 0.8$
$V$ [оксида], нЭВ	$126 \pm 3$
$d$ [FeCo], нм	$103.3 \pm 0.6$
$\sigma$ [FeCo], нм	$2.0 \pm 0.5$
$V_+$ [FeCo], нЭВ	$232 \pm 3$
$V_-$ [FeCo], нЭВ	$-3 \pm 3$
$d$ [TiZrGd], нм	250
$\sigma$ [TiZrGd], нм	$1.5 \pm 0.4$
$V$ [оксида], нЭВ	$-47 \pm 8$



# Покрyтия на основе бислоев Ti/TiO<sub>2</sub>



# Покрyтия на основе бислоев Co/CoO



## Заключение

- Установлено, что при комнатных температурах на поверхности тонких пленок Ti формируется слой оксида, толщина которого зависит от их исходной толщины титана. Для пленок Co такой явной зависимости не наблюдается и толщина оксида составляет величину порядка 2.7 нм.
- Используя полученные данные об окислении были получены оценки толщин нанослоев Ti и Co, которые необходимо напылять для создания антиотражающих покрытий.
- Экспериментальная проверка на поляризующем зеркале показала наличие эффекта подавления отражения нейтронов антиотражающим покрытием на основе бислоев Ti/TiO<sub>2</sub> и Co/CoO в области малых q<sub>⊥</sub>.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Соглашение №14.607.21.0194 от 26 Сентября 2017г., RFMEFI60717X0194*

*Благодарю за  
внимание!*