

*Институт физики
микроструктур РАН*

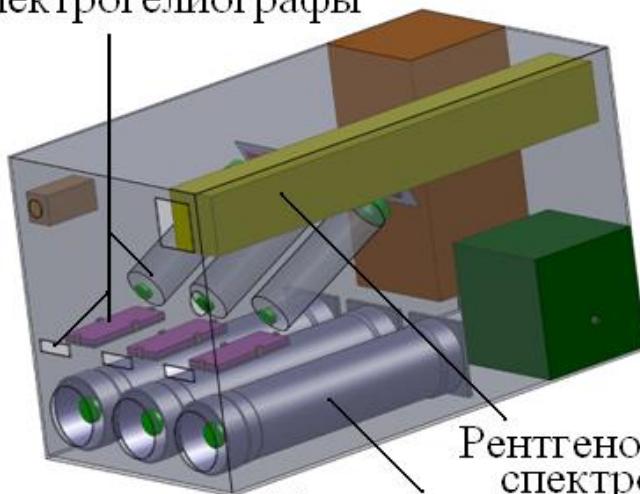
ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА, СИНТЕЗ И
АТТЕСТАЦИЯ АПЕРИОДИЧЕСКИХ
МНОГОСЛОЙНЫХ ЗЕРКАЛ

Семинар аспирантов и студентов 21 марта 2019

Гарахин Сергей

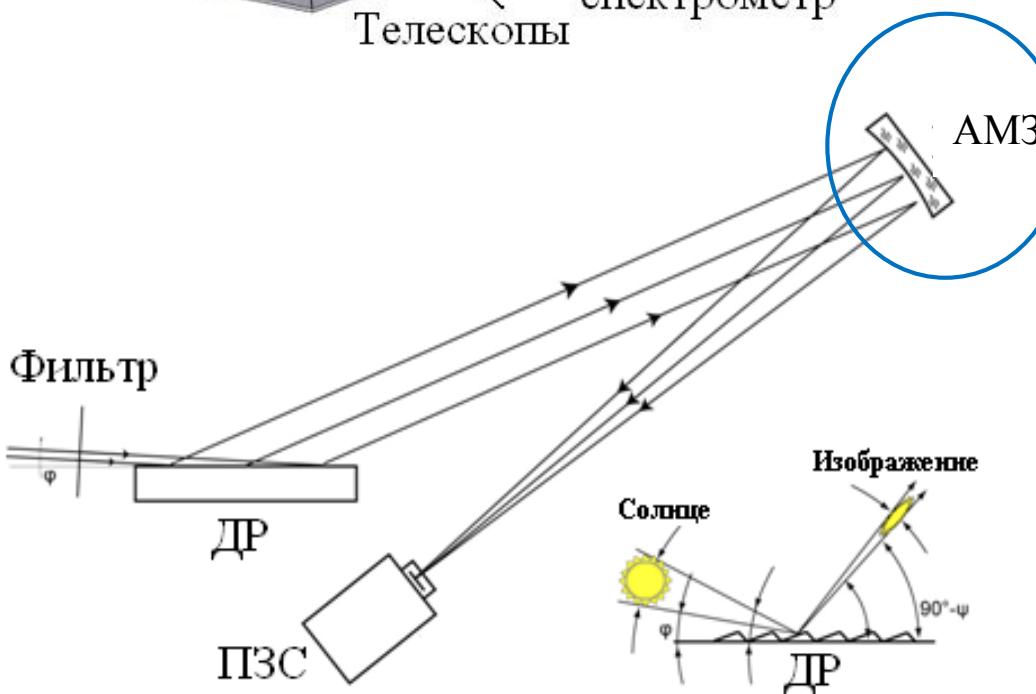
Интерес к апериодическим рентгеновским зеркалам

Спектрографы



Рентгеновский спектрометр

Телескопы

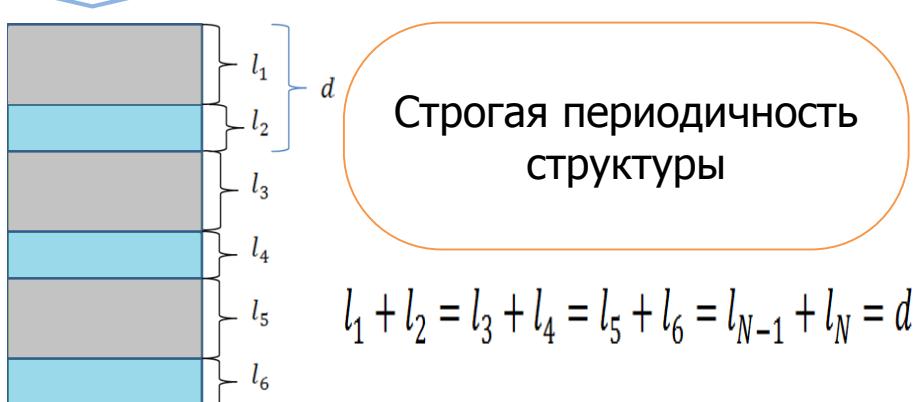


Аппаратура «Кортес» для исследования короны Солнца в EUV диапазоне с размещением на МКС.

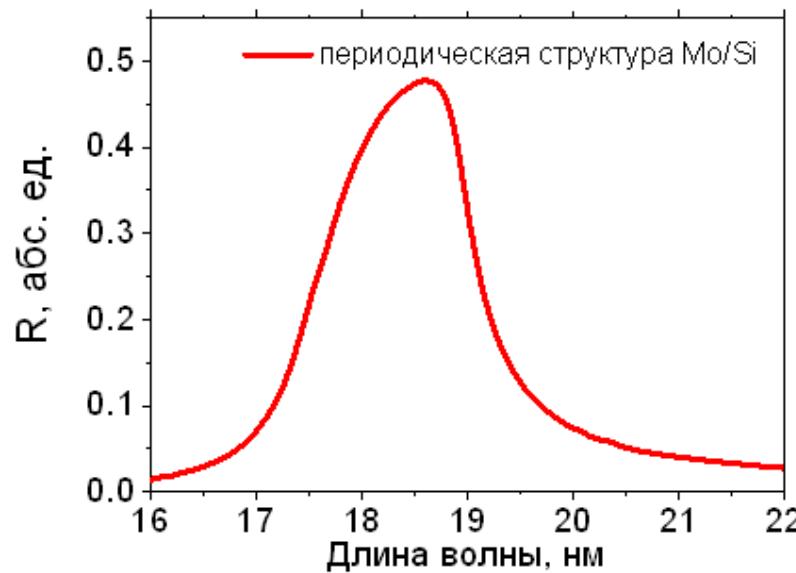
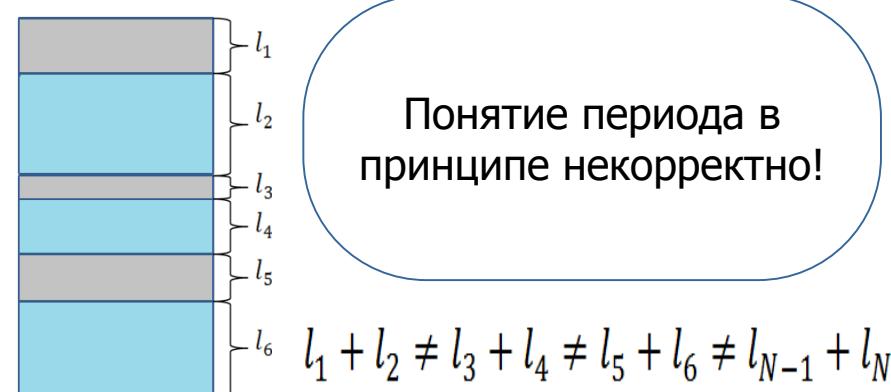
Диапазон длин волн, нм	Основные ионы
17-21	Fe XI, Fe XII, Fe XIII, Fe XXIV
28-33	Si VIII, Si IX, Si XI, Mg VIII, Ni XVIII, Ca XVIII, Fe XI, Fe XII, Fe XIII, Fe XIV, Fe XV, Fe XVII, S XII

Периодически vs апериодические рентгеновские зеркала

Характеристика ПМЗ



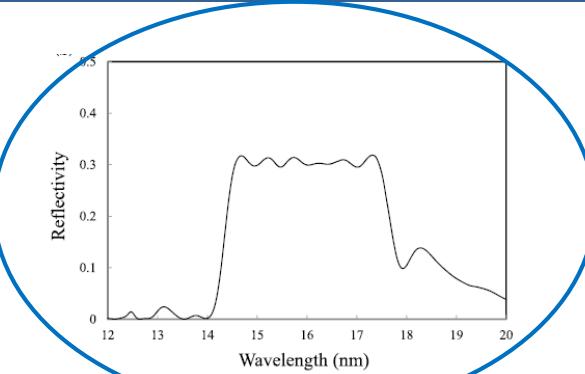
Характеристика АМЗ



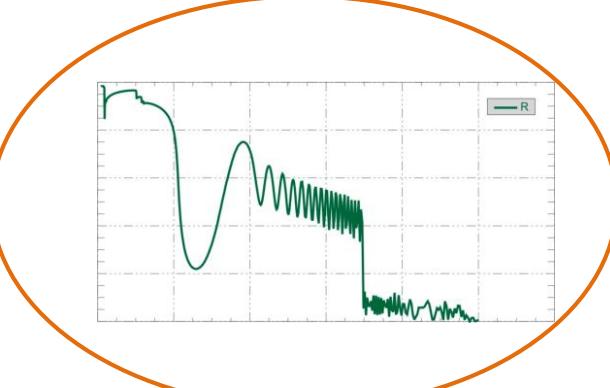
Многообразие АМЗ

Апериодические зеркала

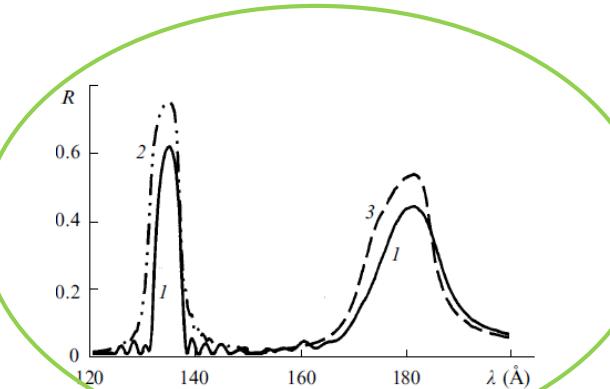
«Стандартная»
полка



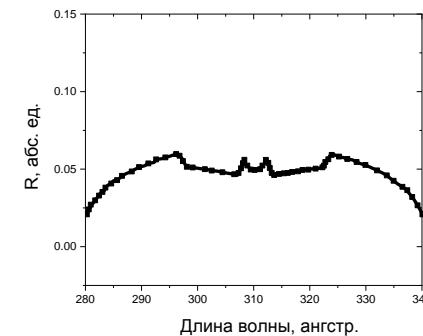
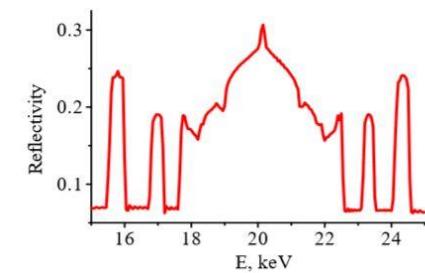
«Супер»-
зеркала



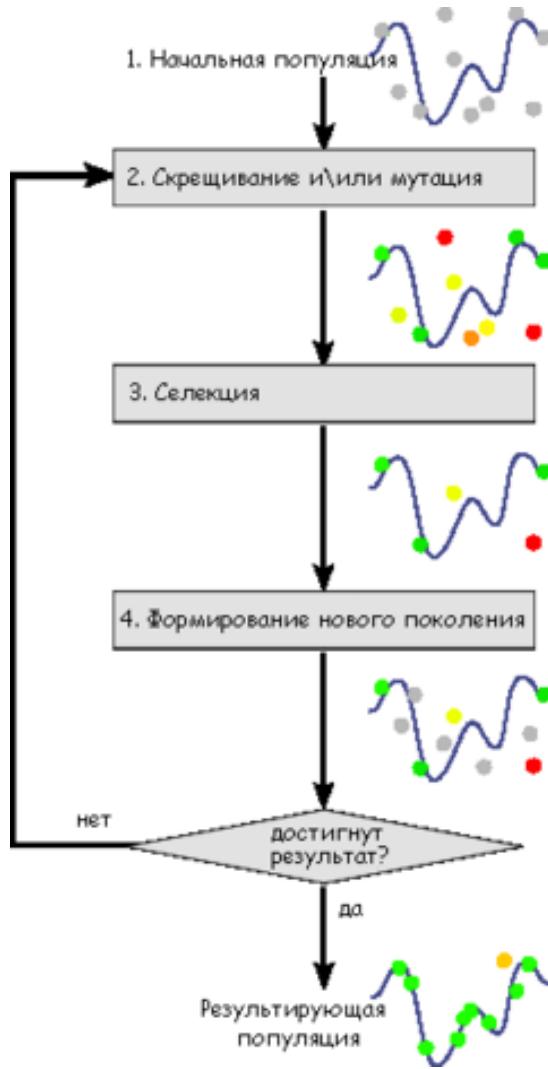
«Периодика
+ периодика»



Экзотика:
«Тадж-Махал»
и
«Бэтмен»



Генетический алгоритм



F - оценочный функционал
(норма отличия
коэффициента отражения
от целевой функции)

Целевая
функция

$$F = \int [R(\lambda) - R^{target}]^{2m} d\lambda,$$

Задача - минимизировать F

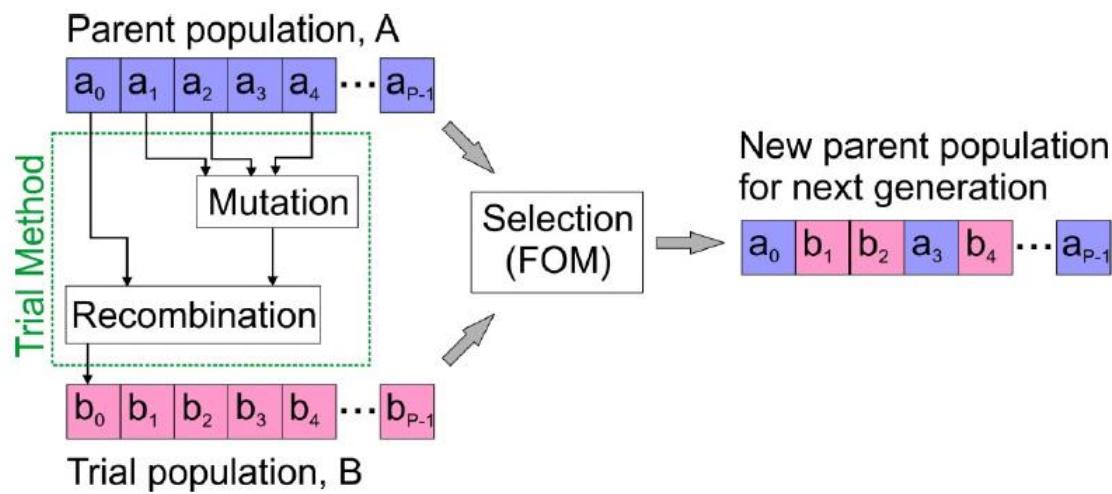
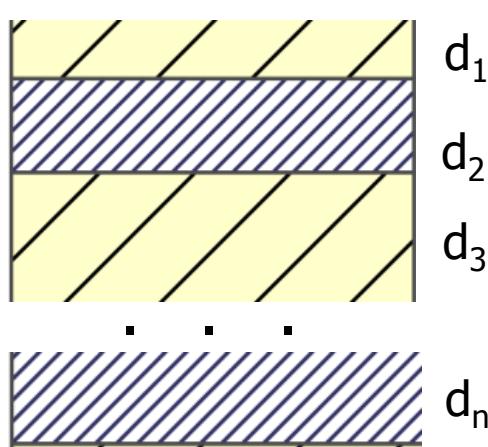


Схема отбора оптимального АМЗ



d_1
 d_2
 d_3

 d_n

$$M_0 \begin{pmatrix} d_1^0 \\ d_2^0 \\ d_3^0 \end{pmatrix}$$

$$M_1 \begin{pmatrix} d_1^1 \\ d_2^1 \\ d_3^1 \end{pmatrix}$$

$$M_2 \begin{pmatrix} d_1^2 \\ d_2^2 \\ d_3^2 \end{pmatrix}$$

... $M_{...}$



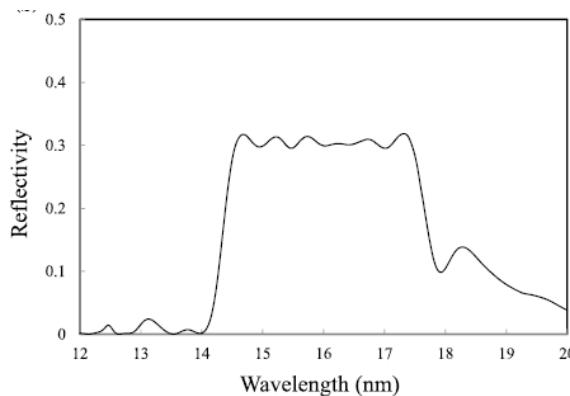
$$\frac{\Delta_{\text{уст.}}}{10} \leq |\delta d_1| \leq \Delta_{\text{уст.}}$$

$$|\delta d_2|$$

$$|\delta d_3|$$

Проверка на жизнеспособность

$$\tilde{M}_0 \begin{pmatrix} d_1^0 + \delta d_1 \\ d_2^0 + \delta d_1 \\ d_3^0 + \delta d_1 \end{pmatrix} \dots \rightarrow$$



$$\|M_0 - \tilde{M}_0\| \rightarrow 0$$

$$\|M_1 - \tilde{M}_1\| \rightarrow 0$$

$$\|M_2 - \tilde{M}_2\| \rightarrow 0$$

.....



Синтез



Генетический алгоритм

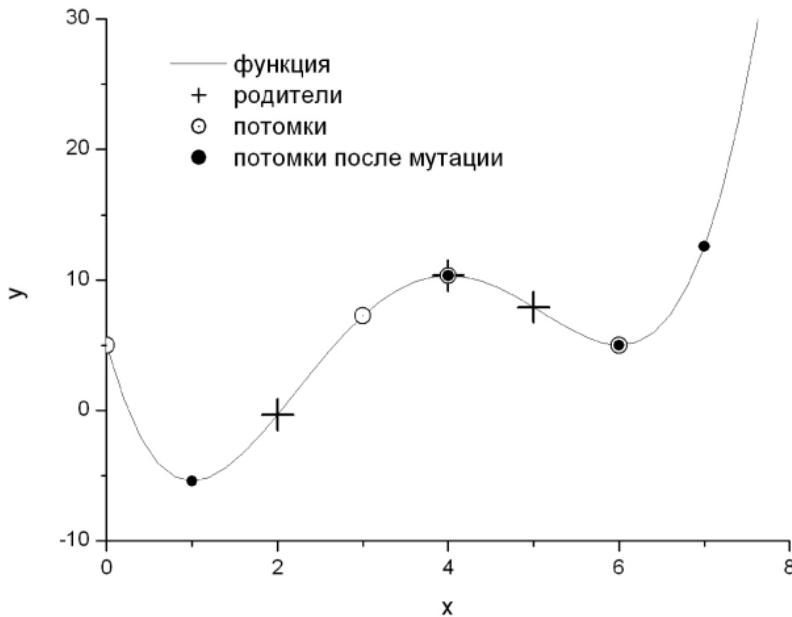
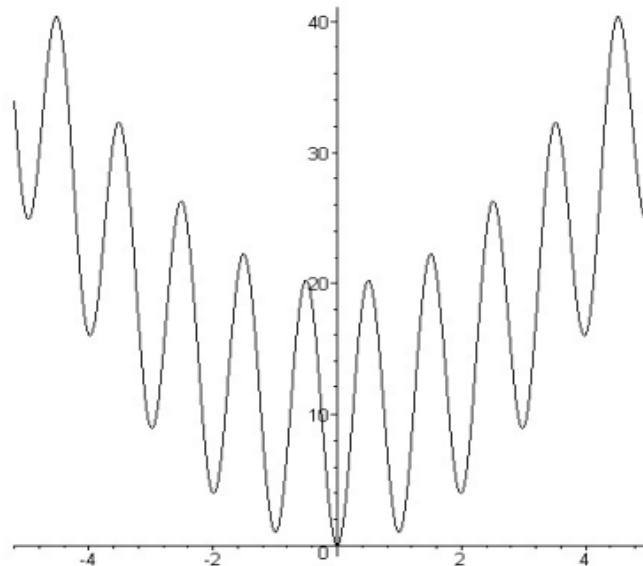


График целевой функции с выбранными значениями пробных решений

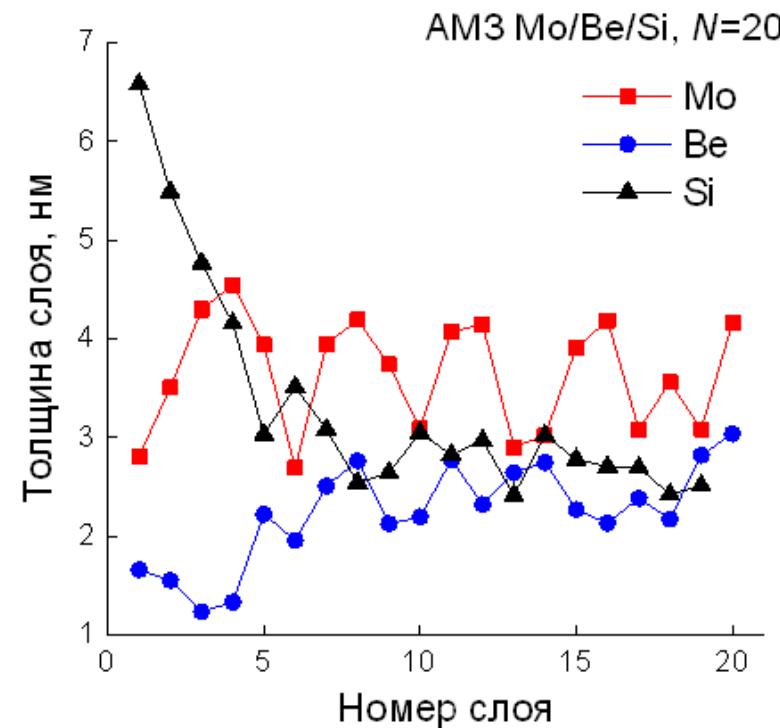
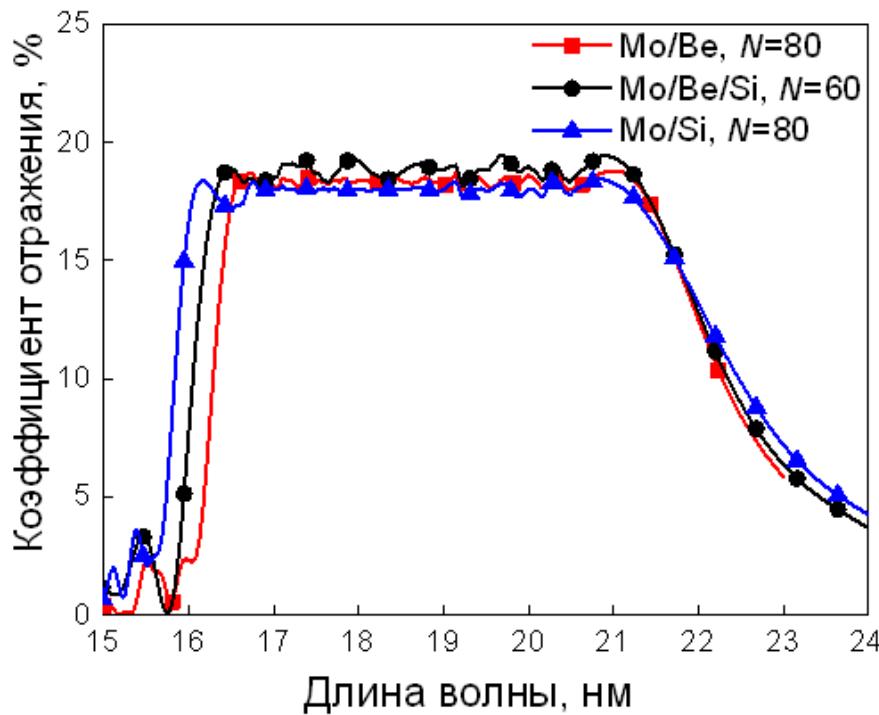
Недостатки генетического алгоритма:

- с помощью ГА проблематично найти точный глобальный оптимум
- ГА неэффективно применять в случае оптимизации функции, требующей большого времени на вычисление
- ГА непросто смоделировать для нахождения всех решений задачи
- ГА практически невозможно реализовать в многоэкстремальных задачах

Функция Растигина



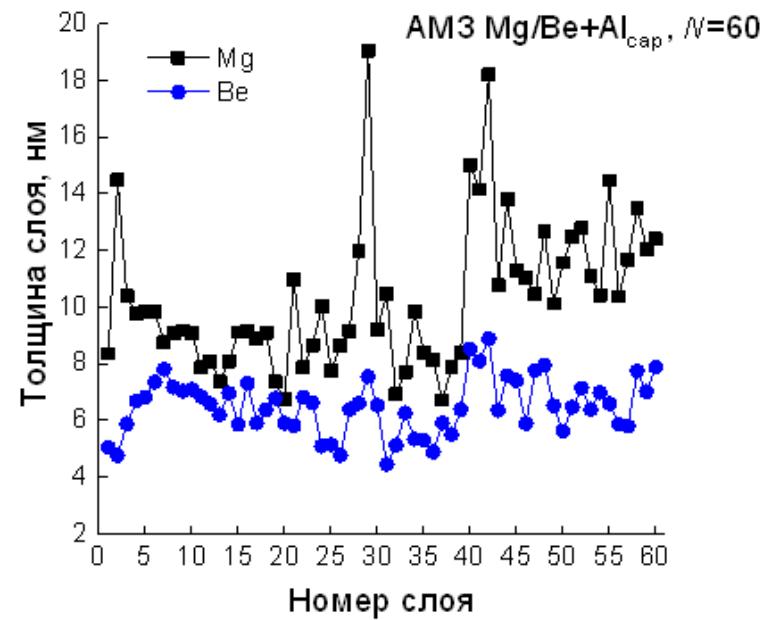
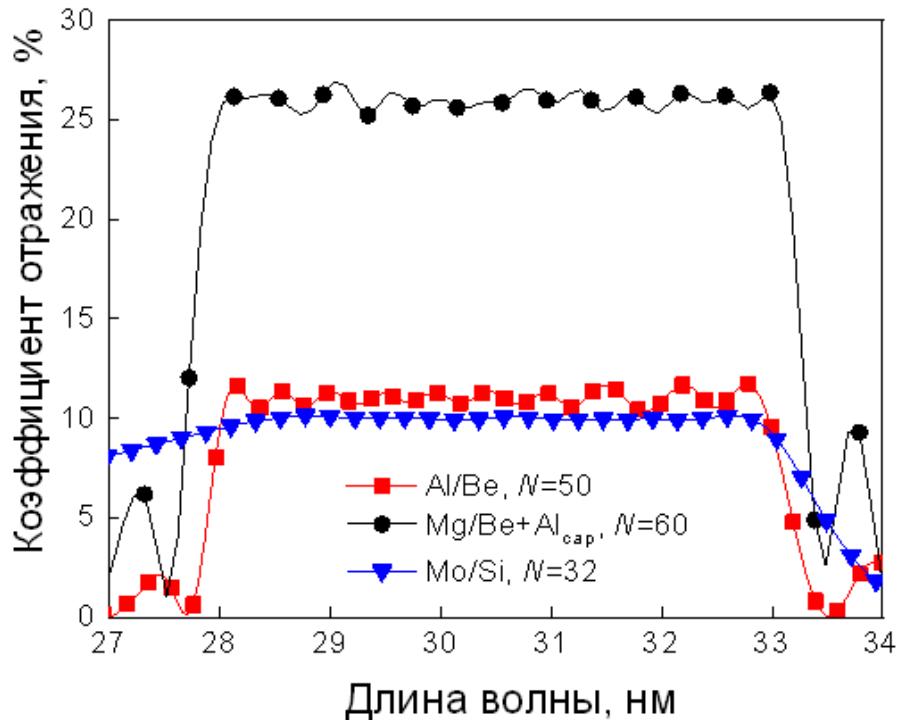
Апериодические зеркала для солнечной астрономии



АМЗ для
диапазона
17– 21 нм

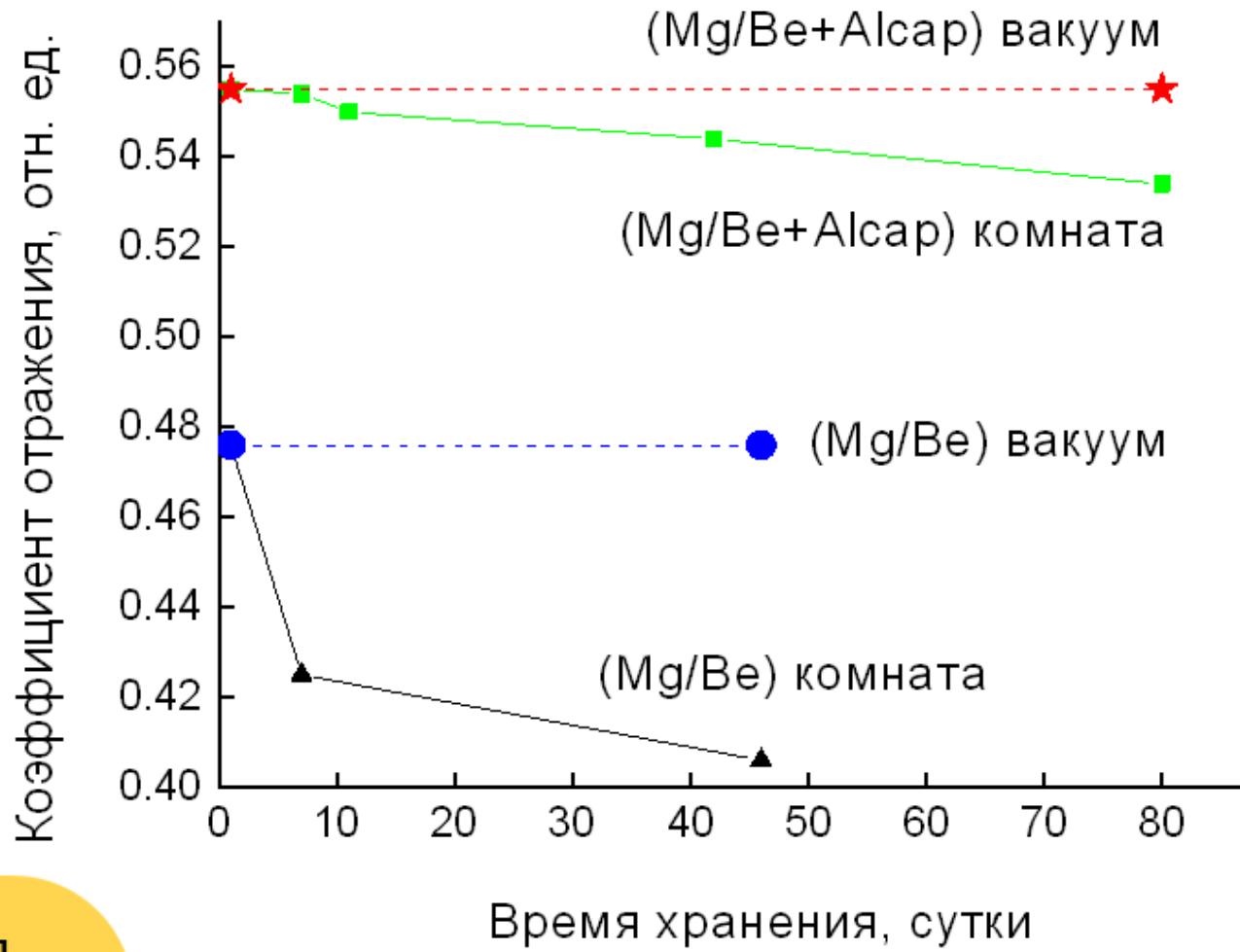
Структура	σ_{Mo} , нм	σ_{Si} , нм	σ_{Be} , нм
Mo/Si	0.6	1.2	-
Mo/Be	0.7	-	0.35
Mo/Be/Si	0.27	0.6	0.6

Апериодические зеркала для солнечной астрономии



АМЗ для диапазона
28–33 нм

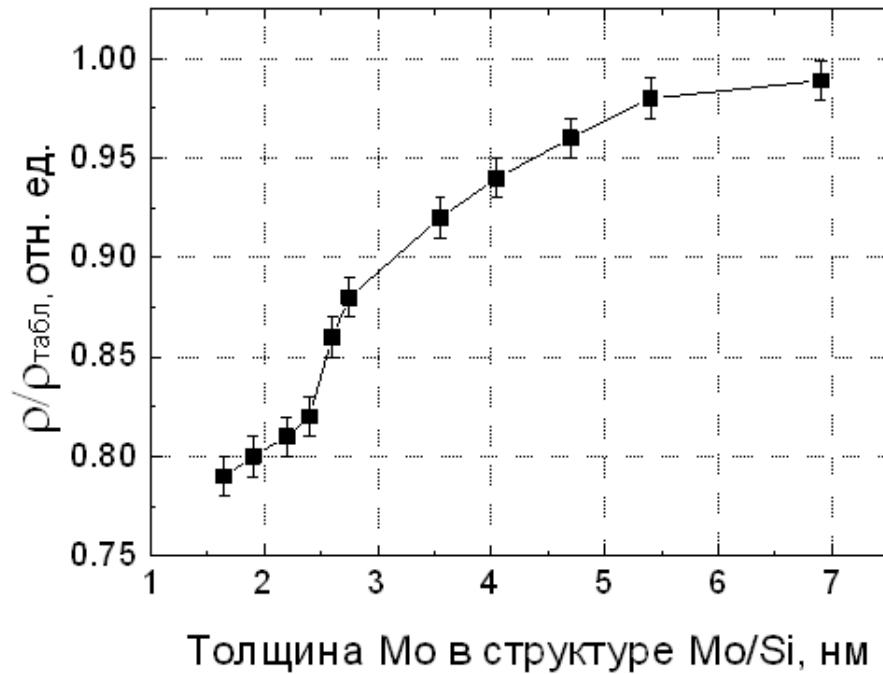
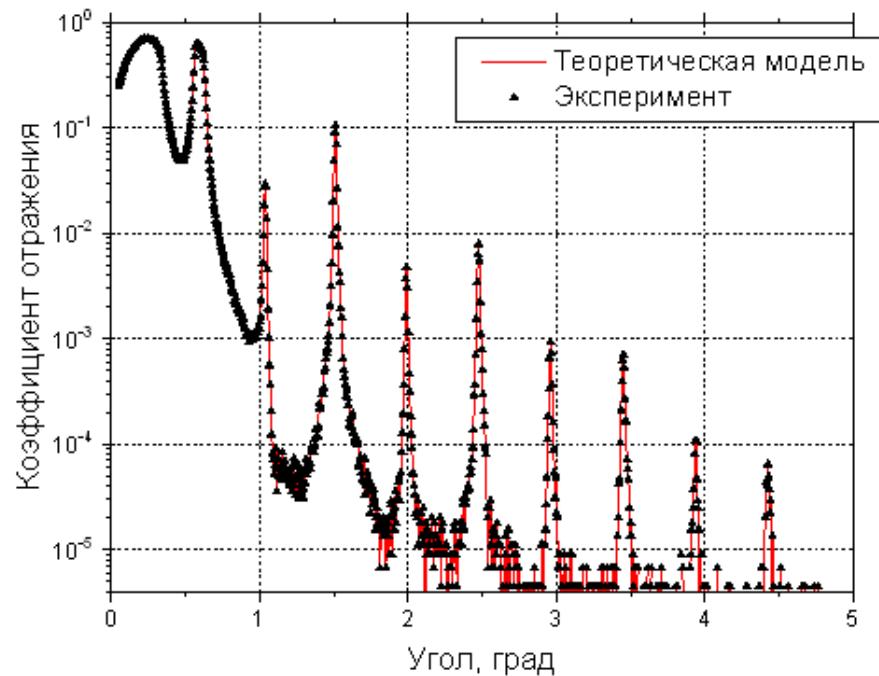
Апериодические зеркала для солнечной астрономии



Что с Mg?

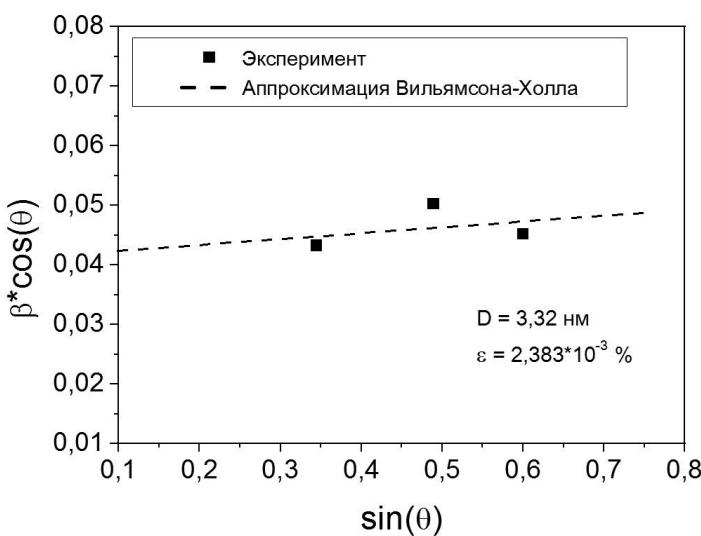
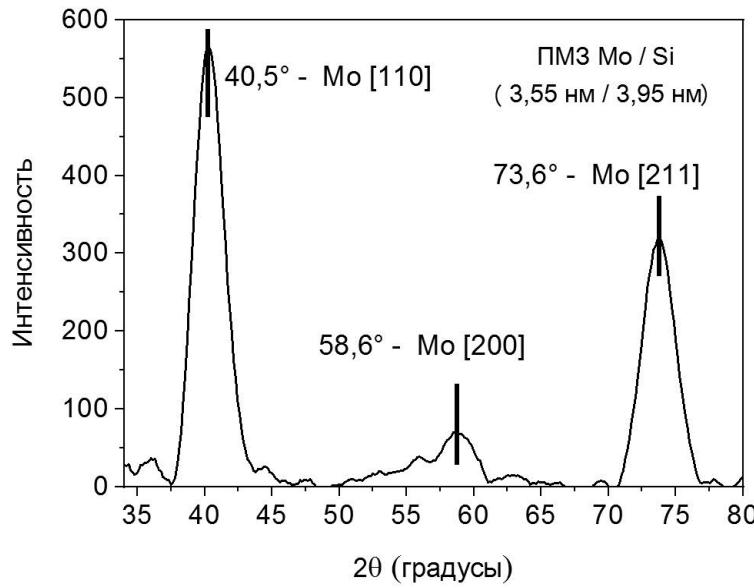
АМЗ для
диапазона
28– 33 нм

Плотность Mo в ПМЗ Mo/Si



Образец	h_{Mo} , нм	h_{Si} , нм	d , нм	ρ_{Mo} , г/см ³	Образец	h_{Mo} , нм	h_{Si} , нм	d , нм	ρ_{Mo} , г/см ³
SG-89	1,65	3,85	5,5	8,07	SG-91	3,55	3,95	7,5	9,40
SG-96	1,90	3,96	5,86	8,18	SG-122	4,05	3,7	7,75	9,61
SG-92	2,20	3,65	5,89	8,27	SG-123	4,70	4,3	9	9,81
SG-93	2,40	4,1	6,5	8,38	SG-124	5,40	3,95	9,35	10,02
SG-90	2,60	3,85	6,45	8,78	SG-127	6,90	3,36	10,26	10,07

Построение Вильямсона-Холла и формула Шеррера



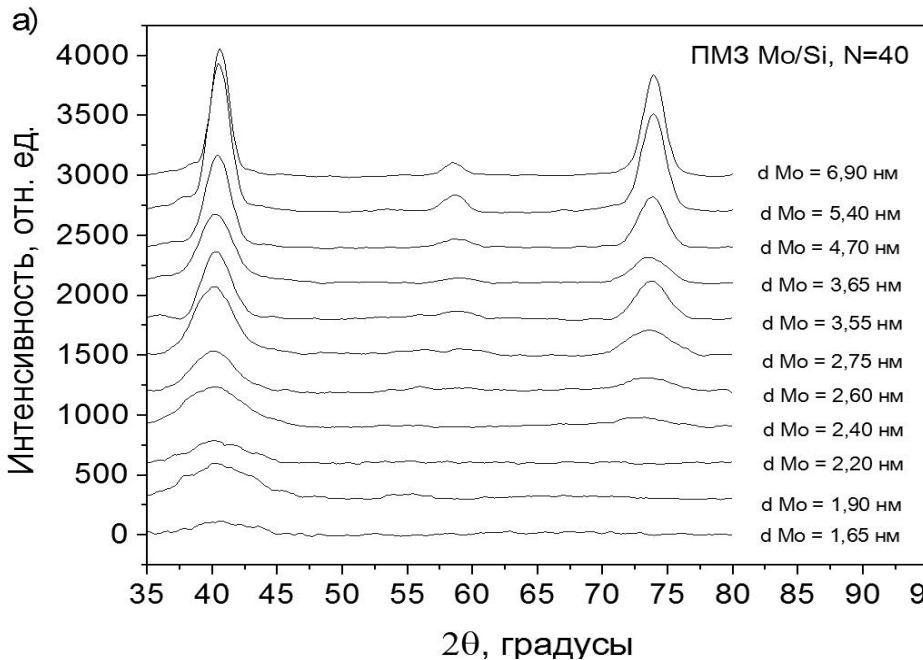
$$\beta \cos \theta = \frac{\lambda}{D} + 4 \varepsilon \sin \theta$$

β – уширение дифракционного максимума, λ – длина волны используемого излучения, D – размер ОКР, θ – Брэгговский угол, ε – величина микроискажений кристаллической решетки.

$$D = \frac{\lambda}{\beta \sin \theta},$$

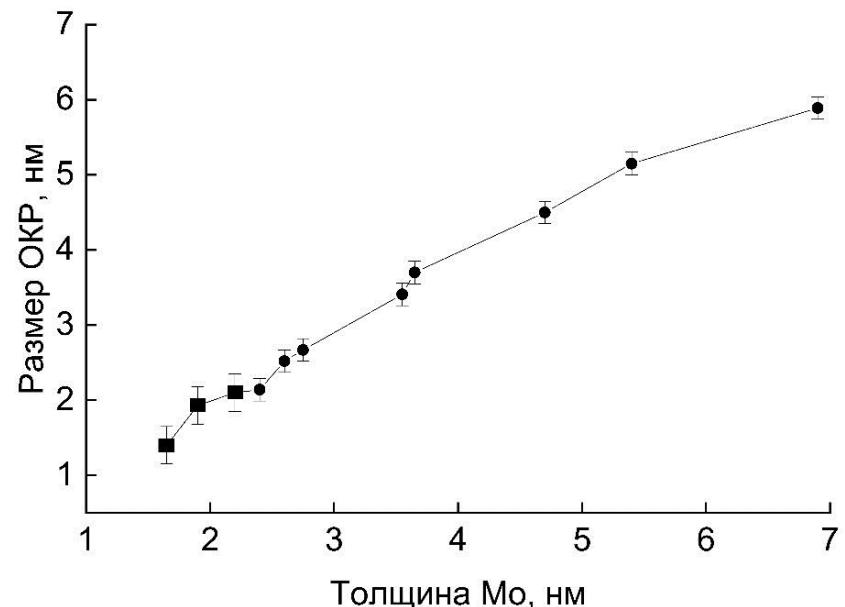
D – эффективный размер кристаллита, который зависит от его формы и направления $[hkl]$ и связан с истинным размером через константу, β – интегральная ширина линии.

Оценка размеров ОКР

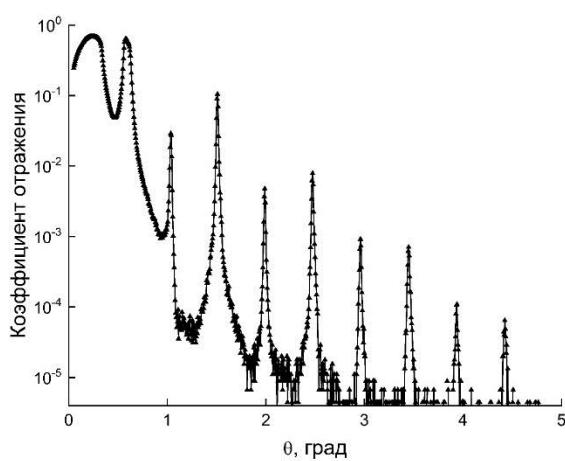
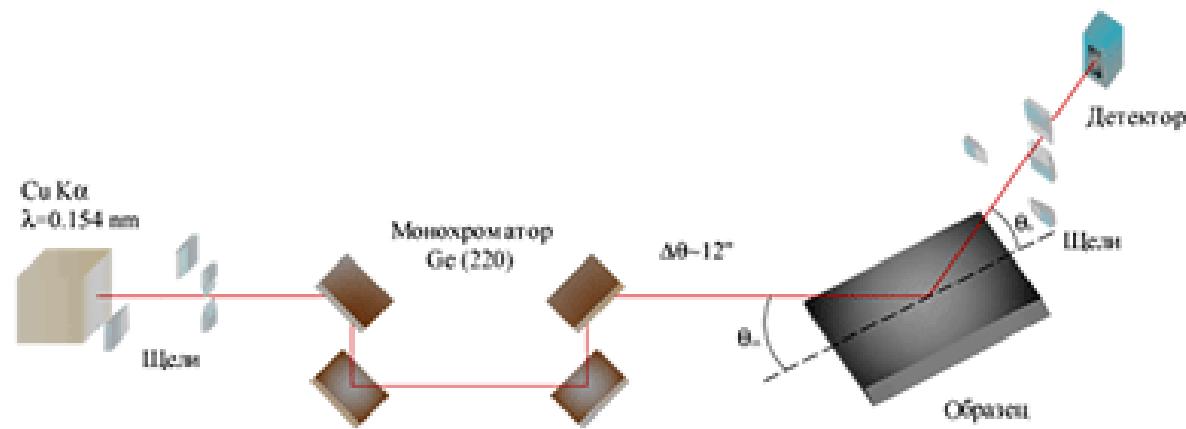


Участок дифрактограммы
 $2\theta=35^\circ$ – 80° для
многослойной структуры
Mo/Si

Оценка размеров ОКР по построению
Вильямсона-Холла и формуле Шеррера для
многослойных структур Mo/Si (толщина
 $Si = 4$ нм, толщины Mo = 1,65 – 6,9 нм)

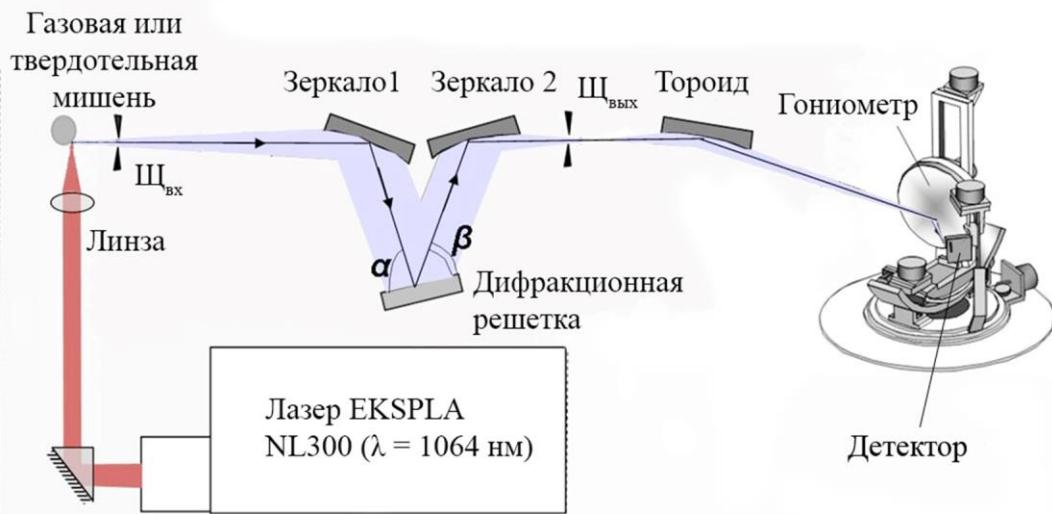


ЧЕТЫРЕХКРИСТАЛЬНЫЙ ДИФРАКТОМЕТР PANALITICAL X'PERT PRO



Для изучения строения многослойных зеркал применялся метод малоугловой дифракции рентгеновских лучей. Измерения проводились в диапазоне углов падения излучения на образец $\theta=0-5^\circ$ с использованием четырехкристального высокоразрешающего дифрактометра PANalytical X'Pert Pro на длине волны 0,154 нм.

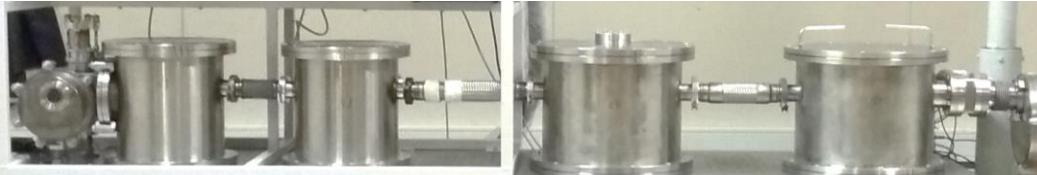
Лабораторный рефлектометр для исследования оптических элементов в диапазоне длин волн 4-50 нм



Камера мишени Камера 1 Камера 2



Камера 3



Камера 4

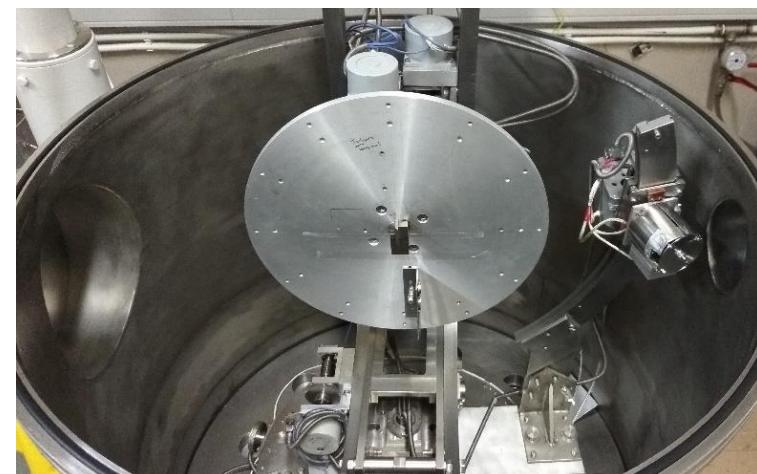


Входная щель Коллиматорная щель

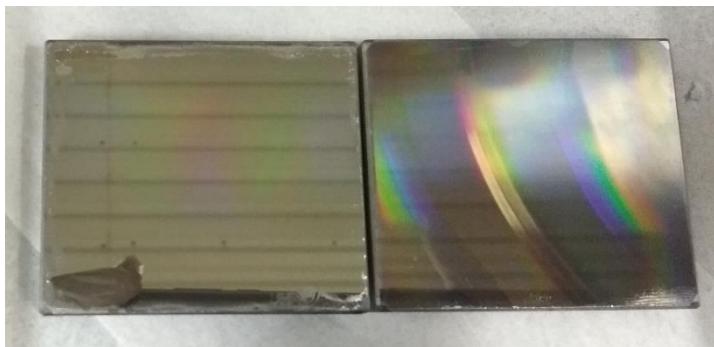
Система зеркал и дифракционная решетка

Выходная щель и

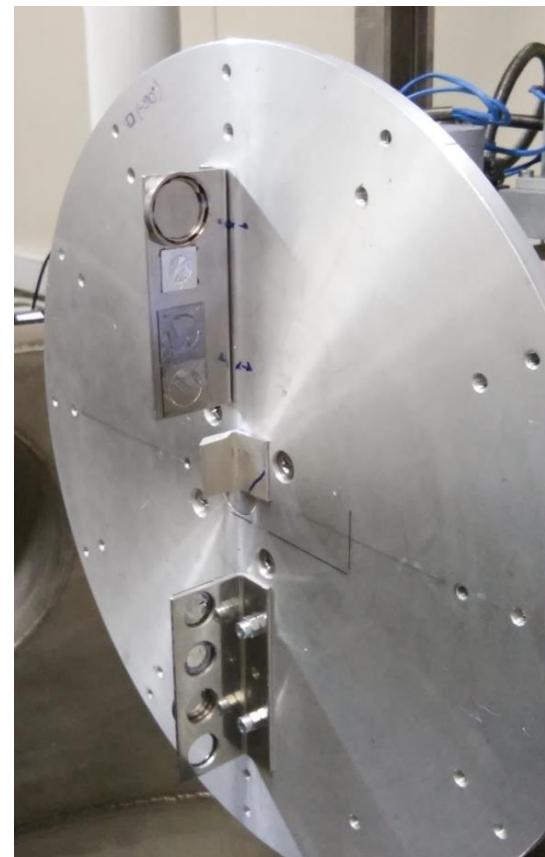
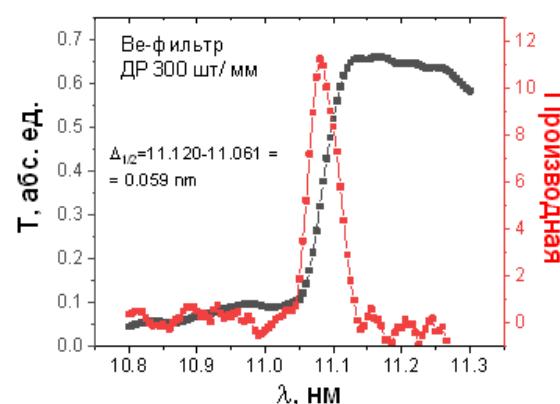
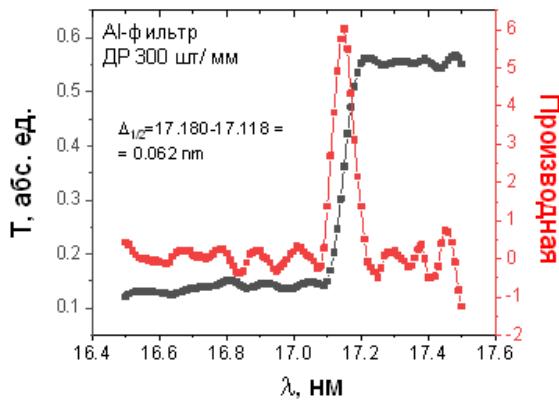
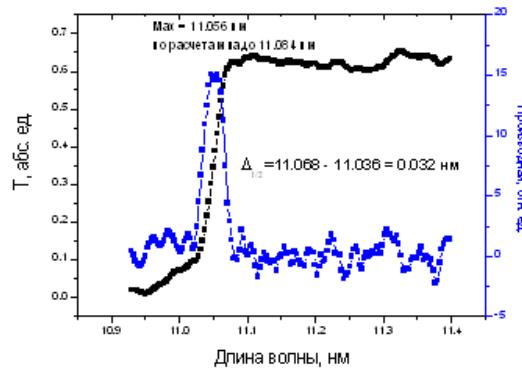
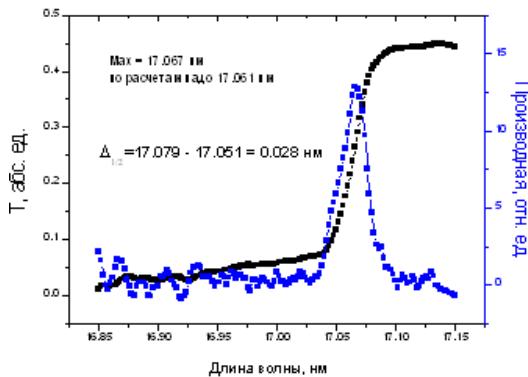
Тороидальное зеркало



Определение спектрального разрешения прибора по краям поглощения свободновисящих фильтров



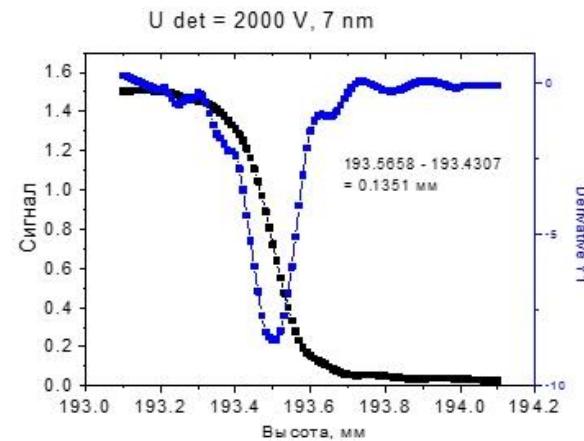
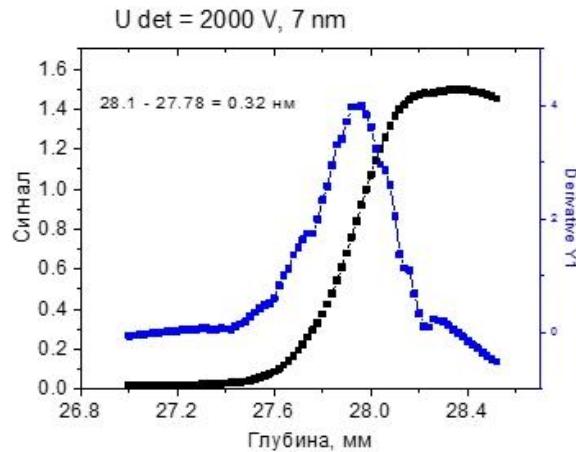
В настоящее время активно используются дифракционные решетки 300 и 900 шт./мм (Казань)



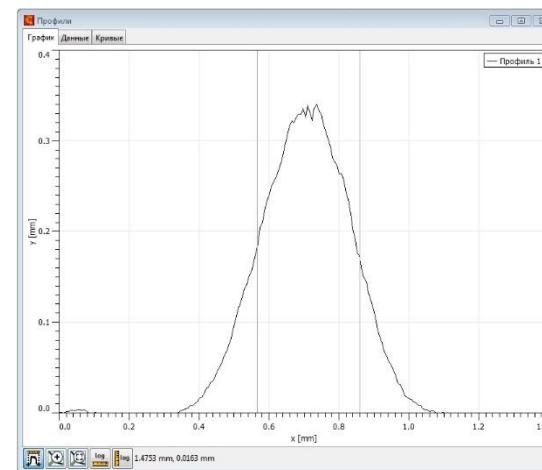
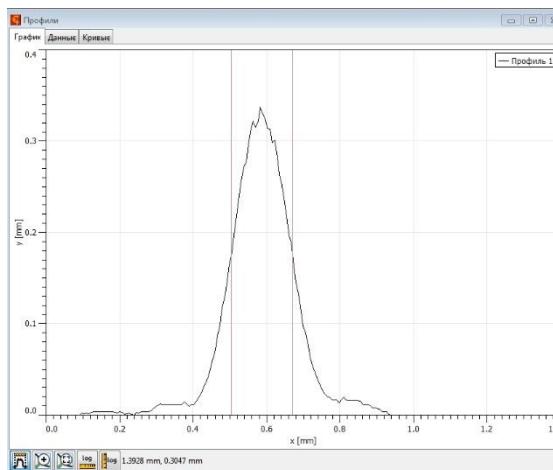
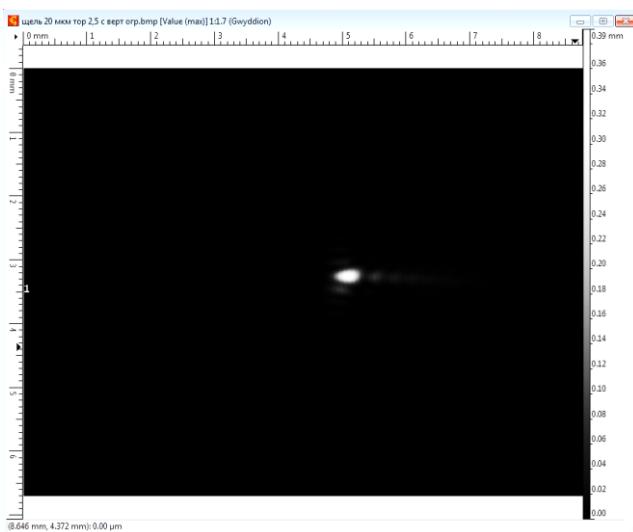
Лабораторный рефлектометр для исследования оптических элементов в диапазоне длин волн 4-50 нм

ПЗС камера

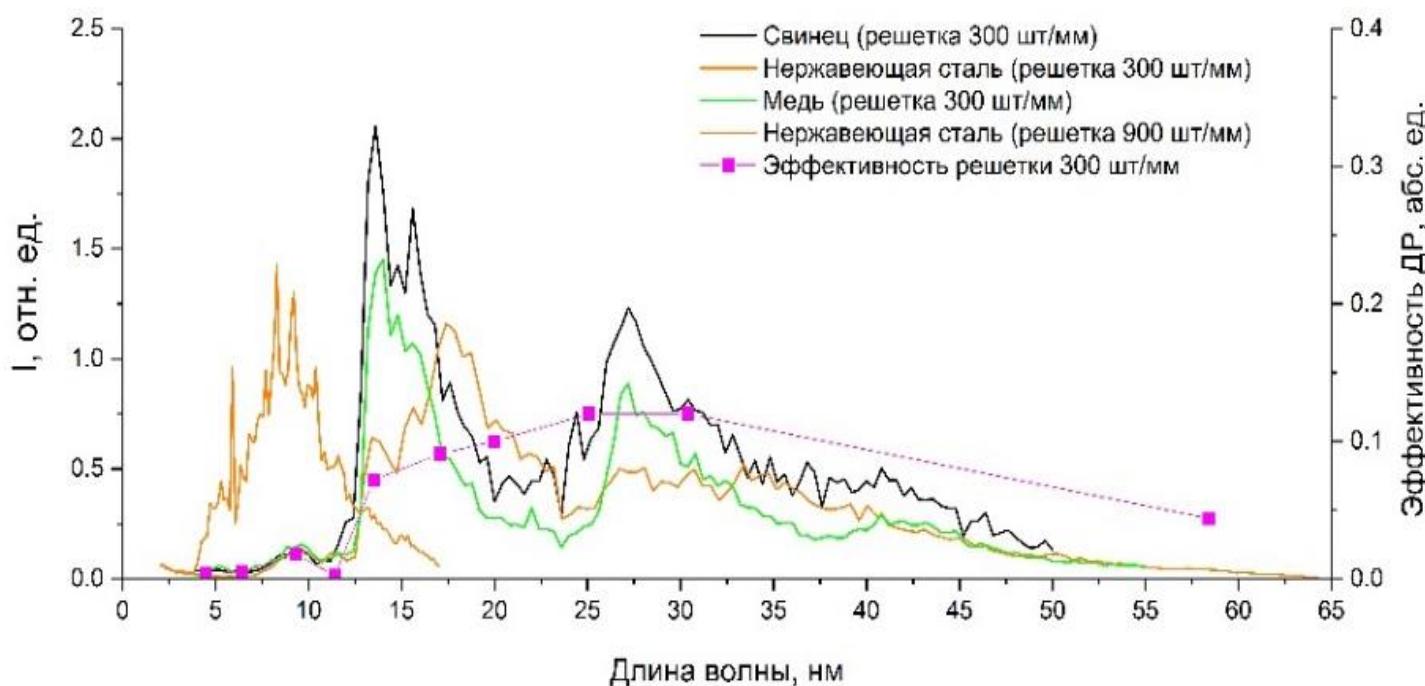
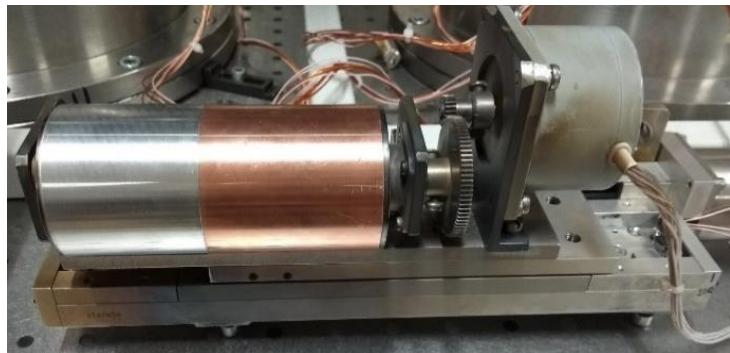
Исследование размера рентгеновского пучка «ножевым методом»



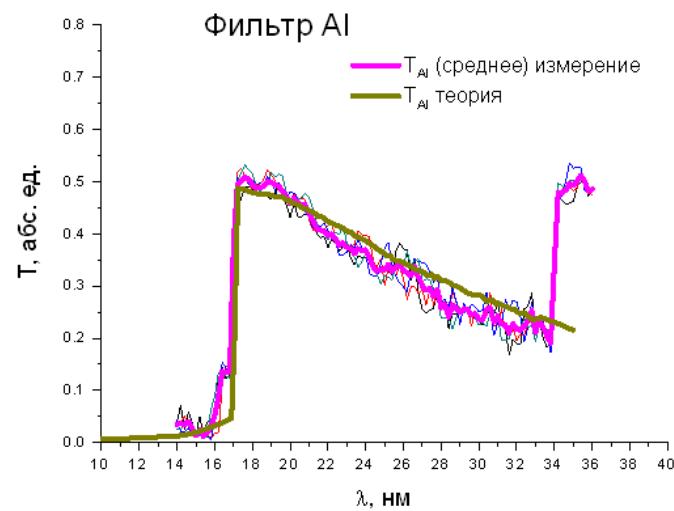
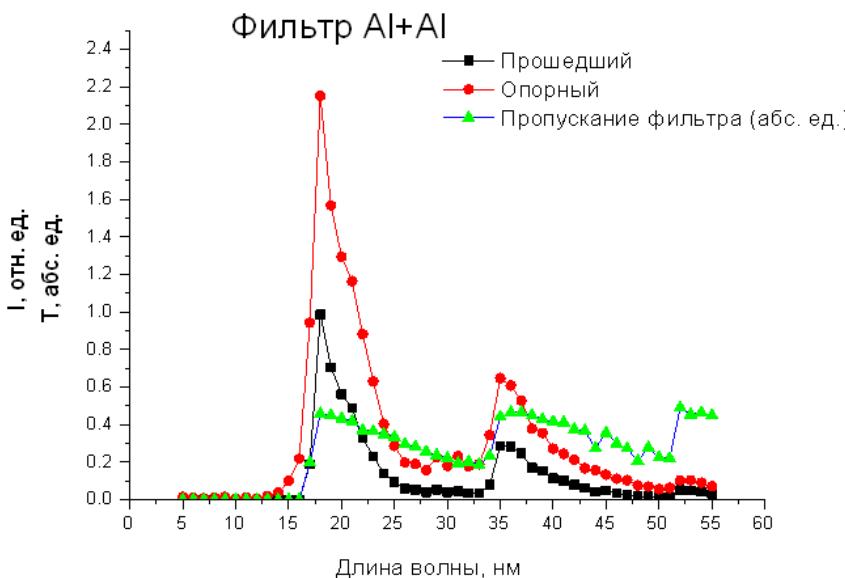
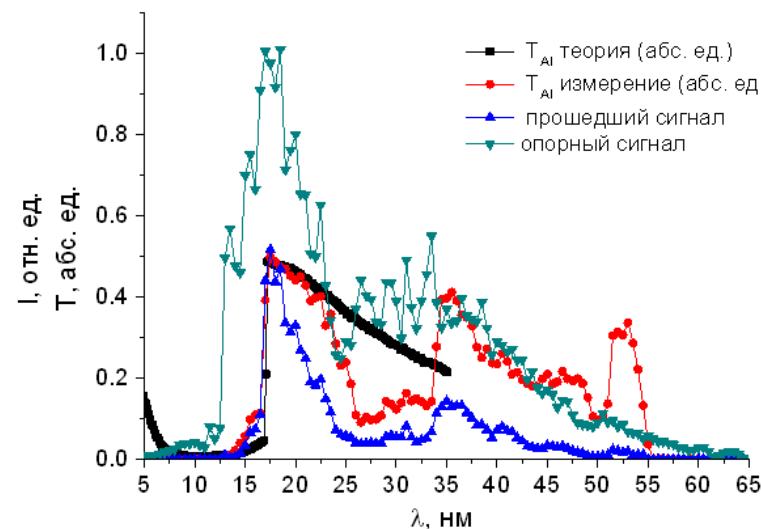
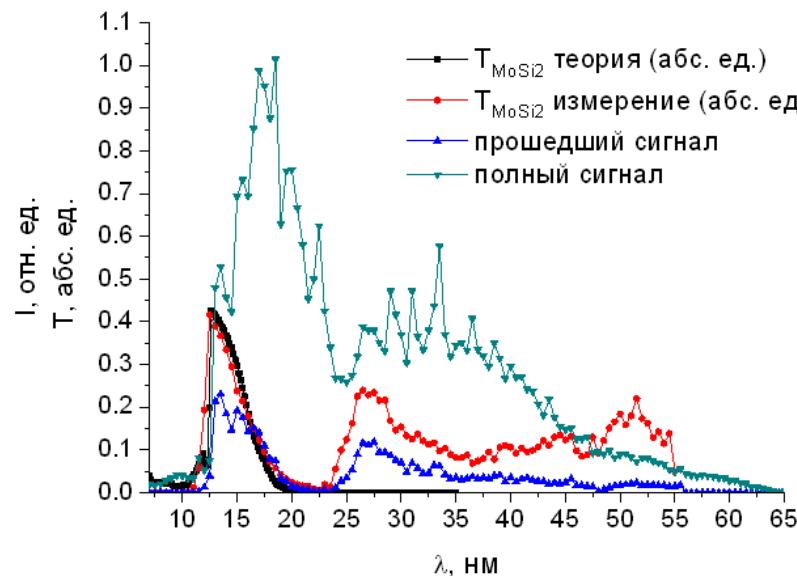
0.32×0.135 мм



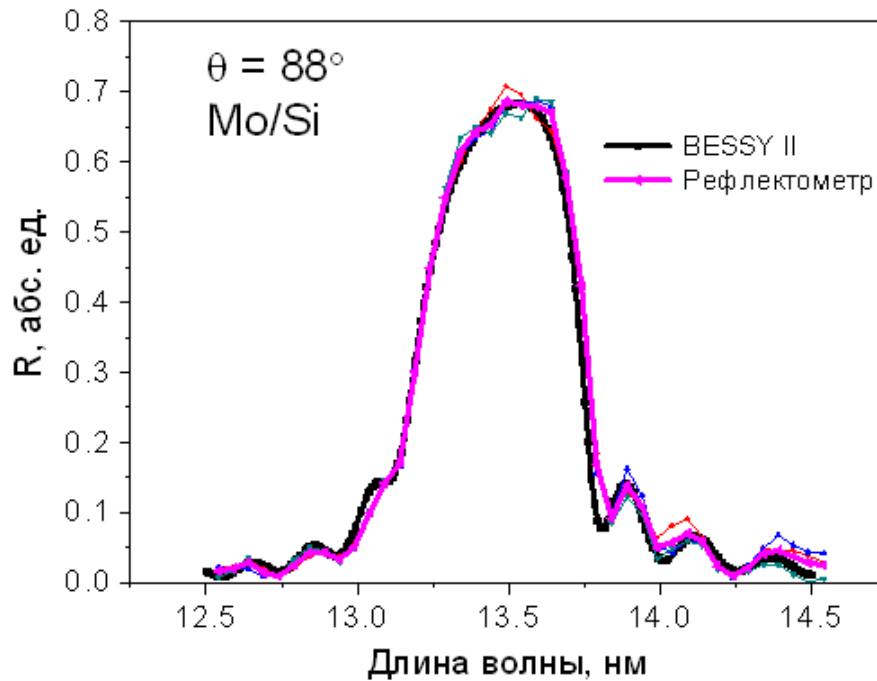
Лабораторный рефлектометр для исследования оптических элементов в диапазоне длин волн 4-50 нм



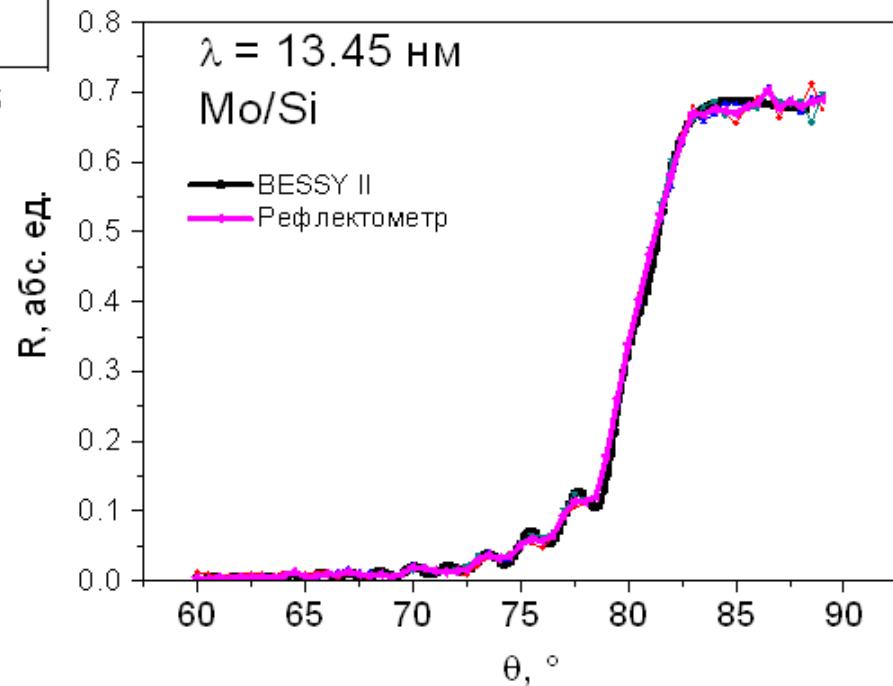
Лабораторный рефлектометр для исследования оптических элементов в диапазоне длин волн 4-50 нм



Примеры съемки угловых и спектральных характеристик



Как проверить правильность работы?
Сравнение с эталоном.



Совпадение с синхротронными измерениями достаточное для лабораторных исследований

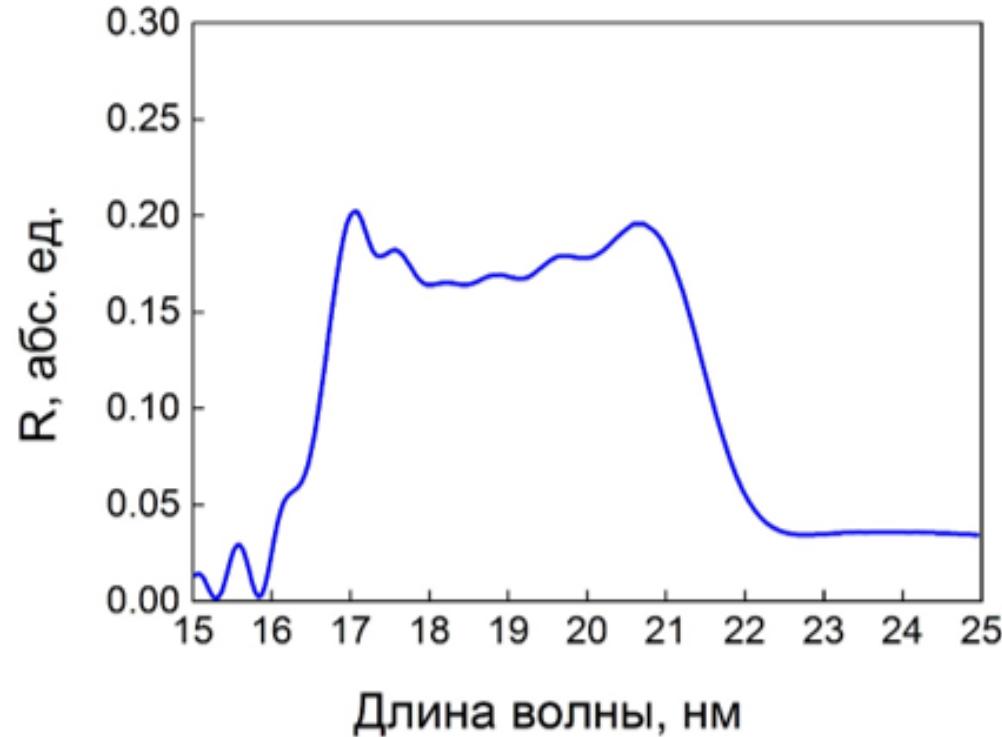
Минусы «классических» АМЗ

Невозможность полной калибровки толщин

Неоднозначность восстановленных параметров

Корректировка крайне затруднена

Трудность воспроизводимости

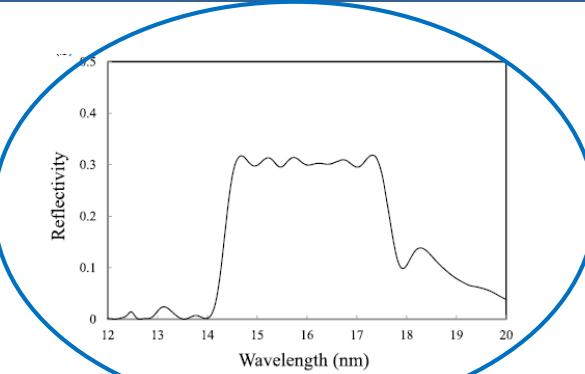


Как сделать удобнее?

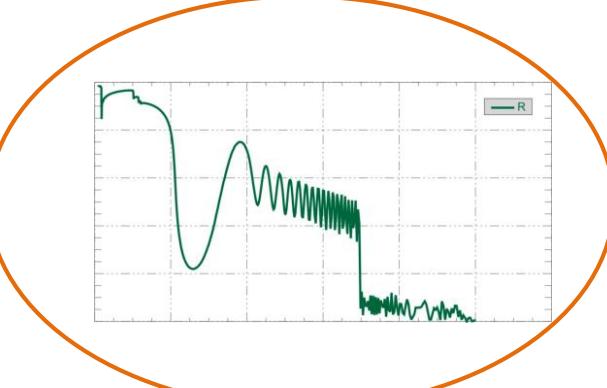
Многообразие АМЗ

Апериодические зеркала

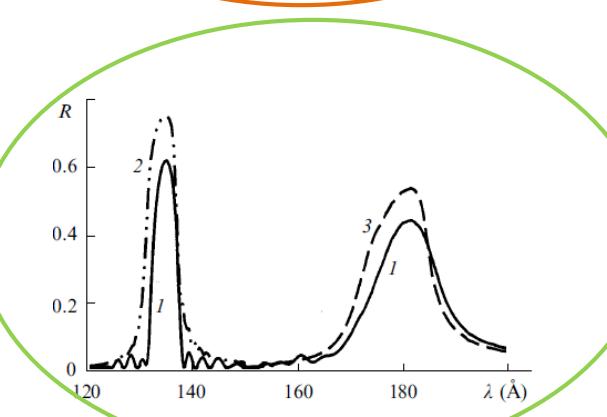
«Стандартная»
полка



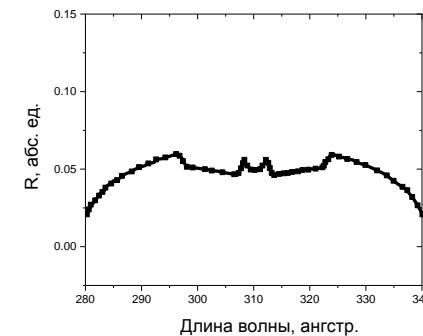
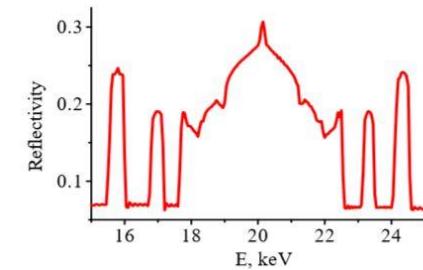
«Супер»-
зеркала



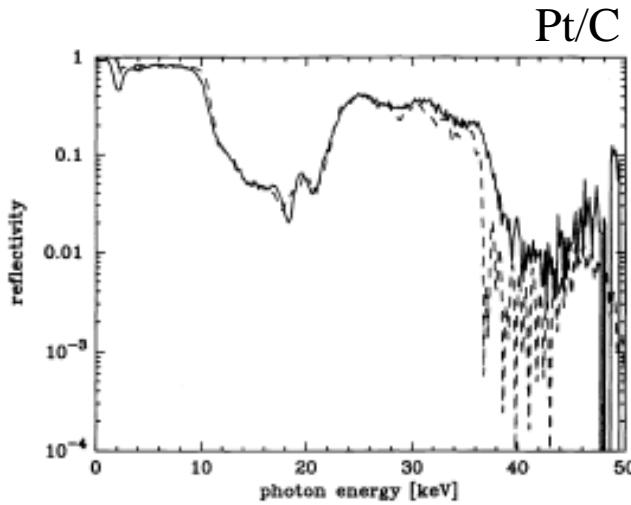
«Периодика
+ периодика»



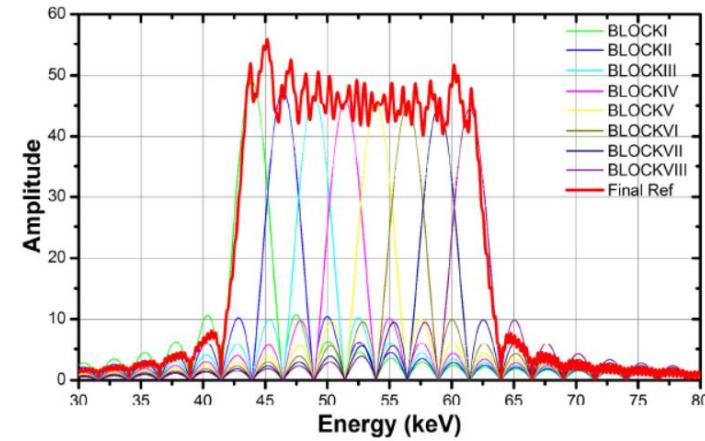
Экзотика:
«Тадж-Махал»
и
«Бэтмен»



БЛОК-STRUCTURES

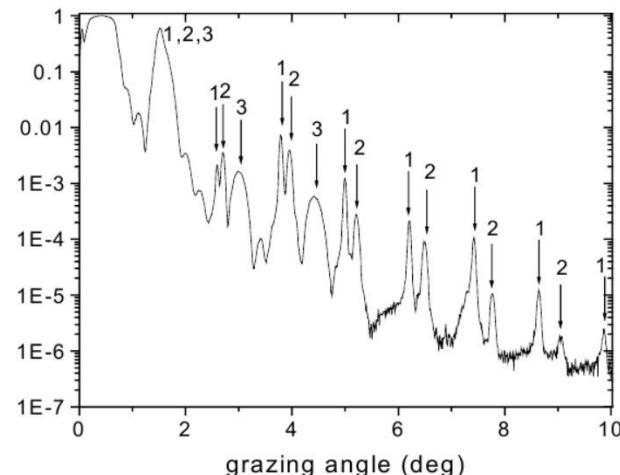
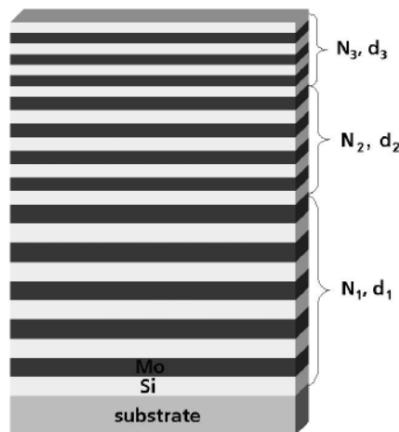


Yamashita K., Kunieda H., Tawara Y. et al. Proc. SPIE, 3766, 327(1999)

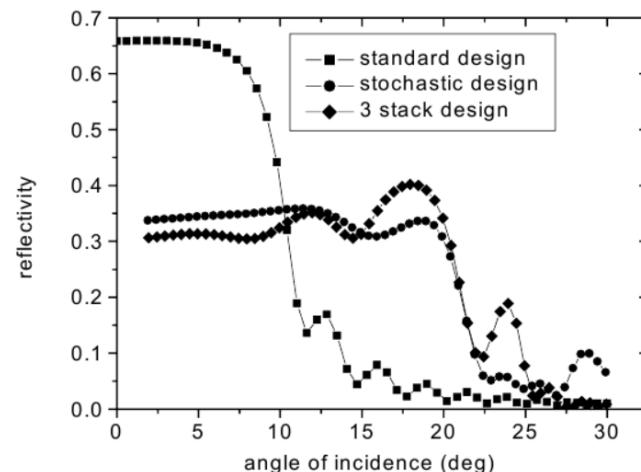


Yao Y., Kunieda H. and Z. Wang. Optics Express, 21, 7, 8638 (2013)

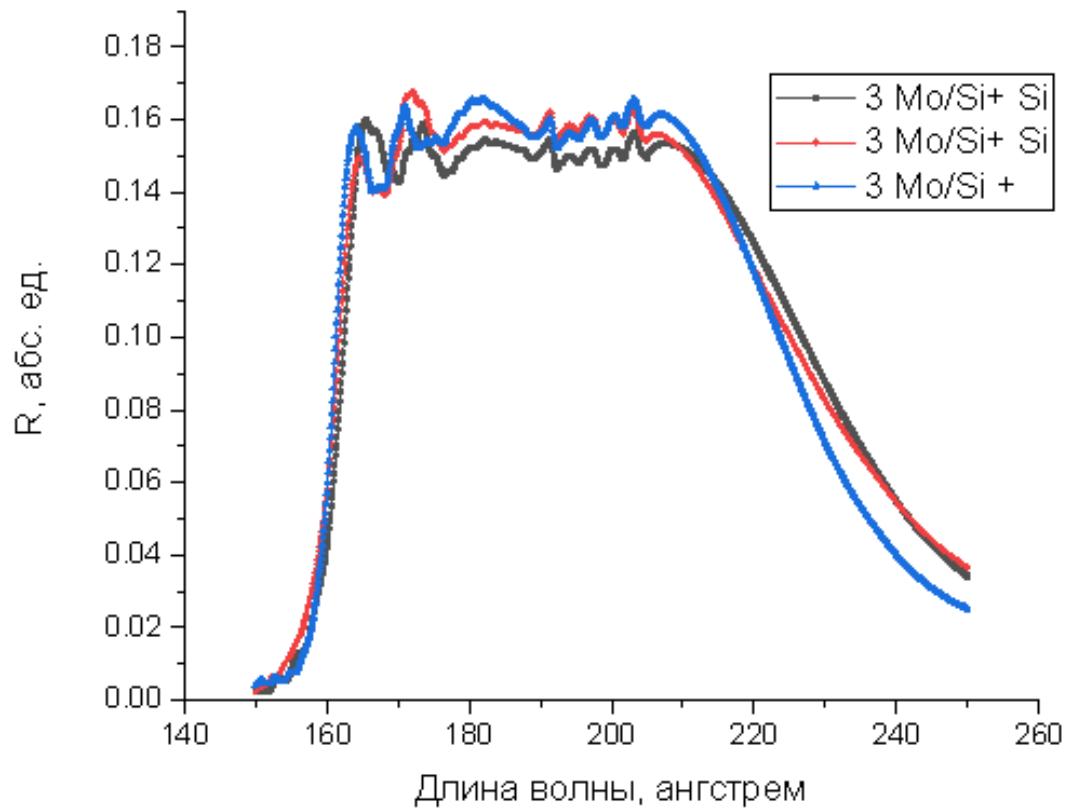
Kozhevnikov I. V., Bukreeva I.N., Ziegler E.// Nuclear Instruments and Methods in Phys.Res.A, 460, 2-3, 424 (2001)



Kuhlmann T., Yulin S., Feigl T., Kaiser N. Proc. SPIE, 4782, 196 (2002)



Результаты «удачных» оптимизаций



3 Mo/Si+ Si

$d(\text{Si}) = 1.4\text{nm}$
 $N1 = 3, d1 = 11.1\text{nm}, 0.35$
 $N2 = 3, d2 = 8.77\text{nm}, 0.36$
 $N3 = 35, d3 = 9.12\text{nm}, 0.52$

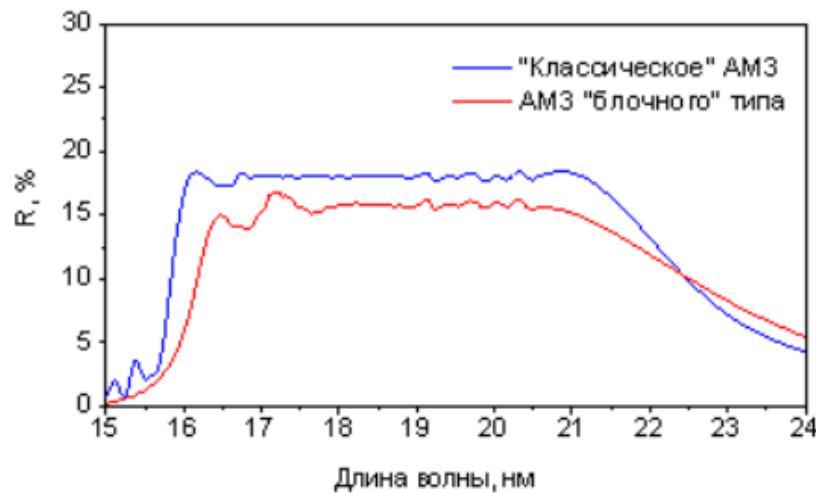
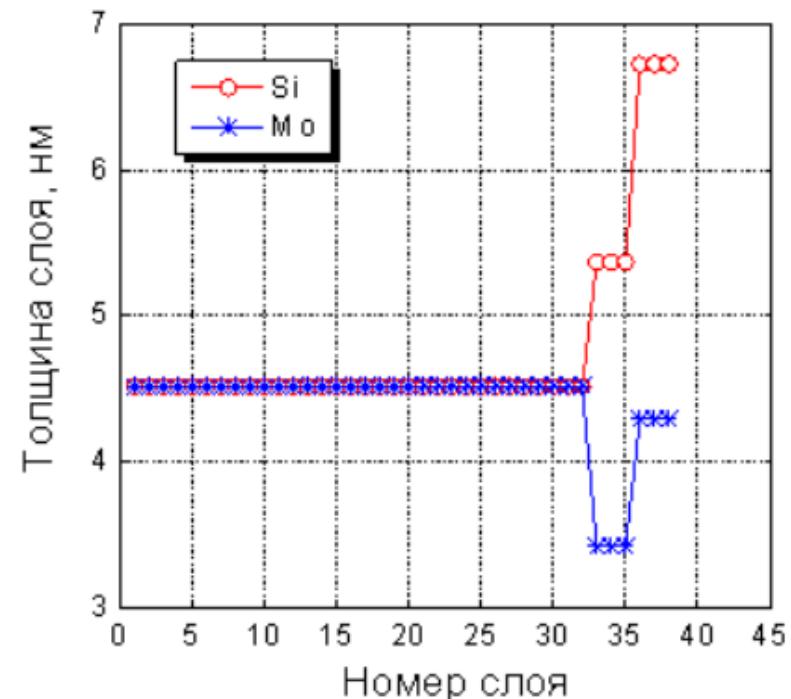
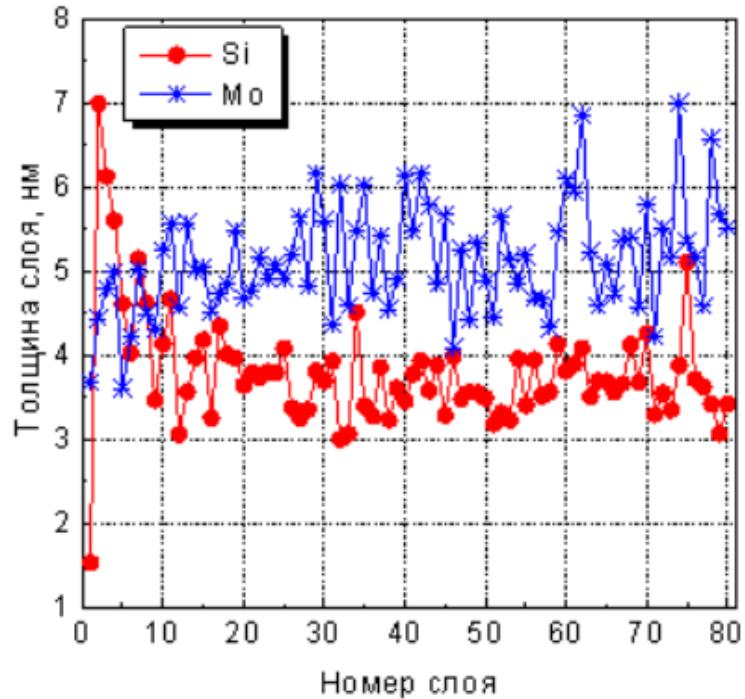
3 Mo/Si +

$d(\text{Si}) = 1.5\text{nm}$
 $N1 = 3, d1 = 10.84\text{nm}, 0.38$
 $d(\text{Mo}) = 13.5\text{nm}$
 $N2 = 3, d2 = 8.14 \text{ nm}, 0.35$
 $d(\text{Si}) = 1.3\text{nm}$
 $N3 = 50, d3 = 8.9\text{nm}, 0.44$

3 Mo/Si+ Si

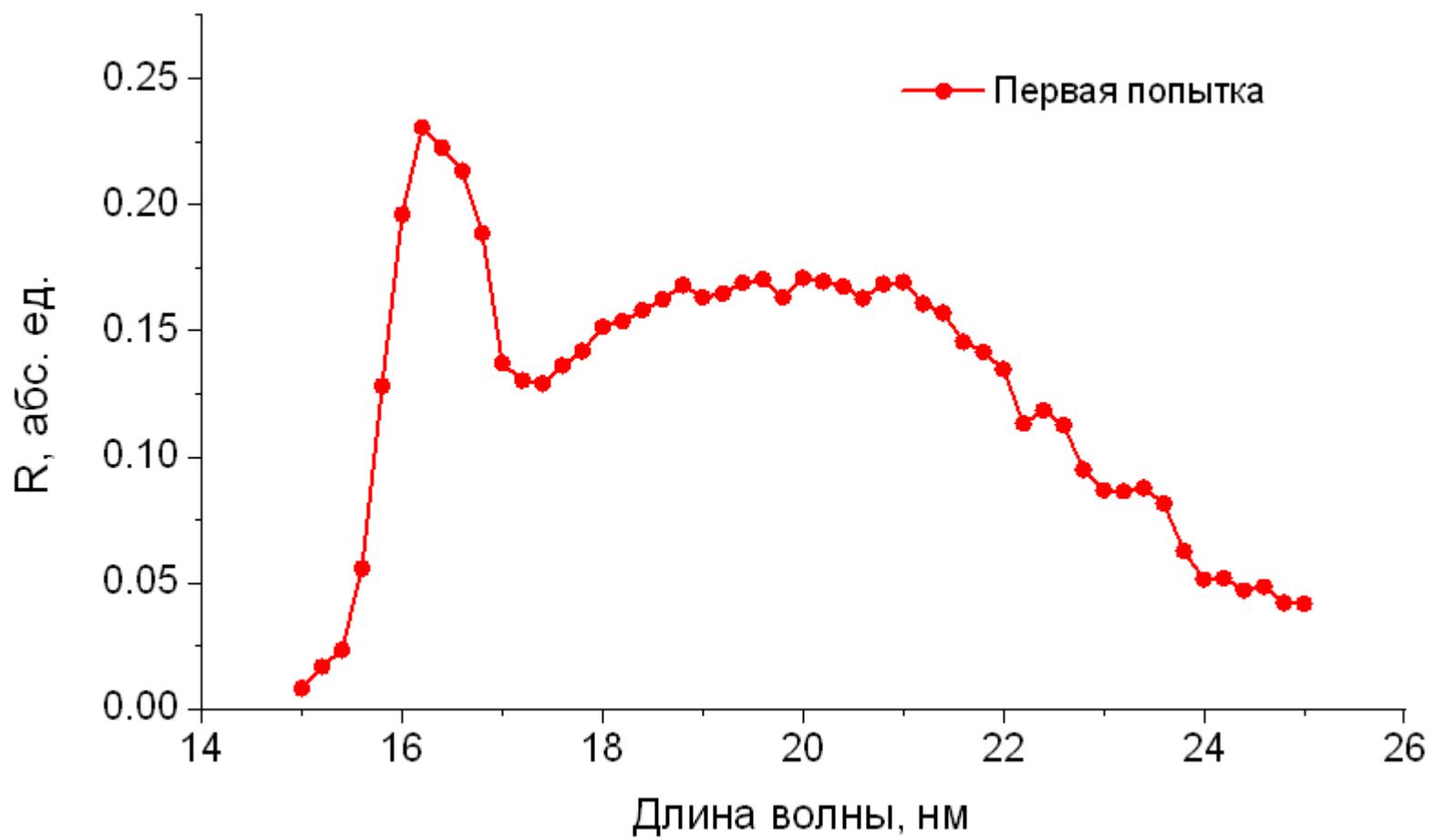
$d(\text{Si}) = 1.4\text{nm}$
 $N1 = 3, d1 = 11.02\text{nm}, 0.39$
 $N2 = 3, d2 = 8.8 \text{ nm}, 0.39$
 $N3 = 32, d3 = 9.04\text{nm}, 0.5$

Классическое и «блочное» АМЗ



Зависимости толщин слоев Si и Mo от номера слоя (отсчет от подложки):
апериодическое многослойное зеркало и стековое

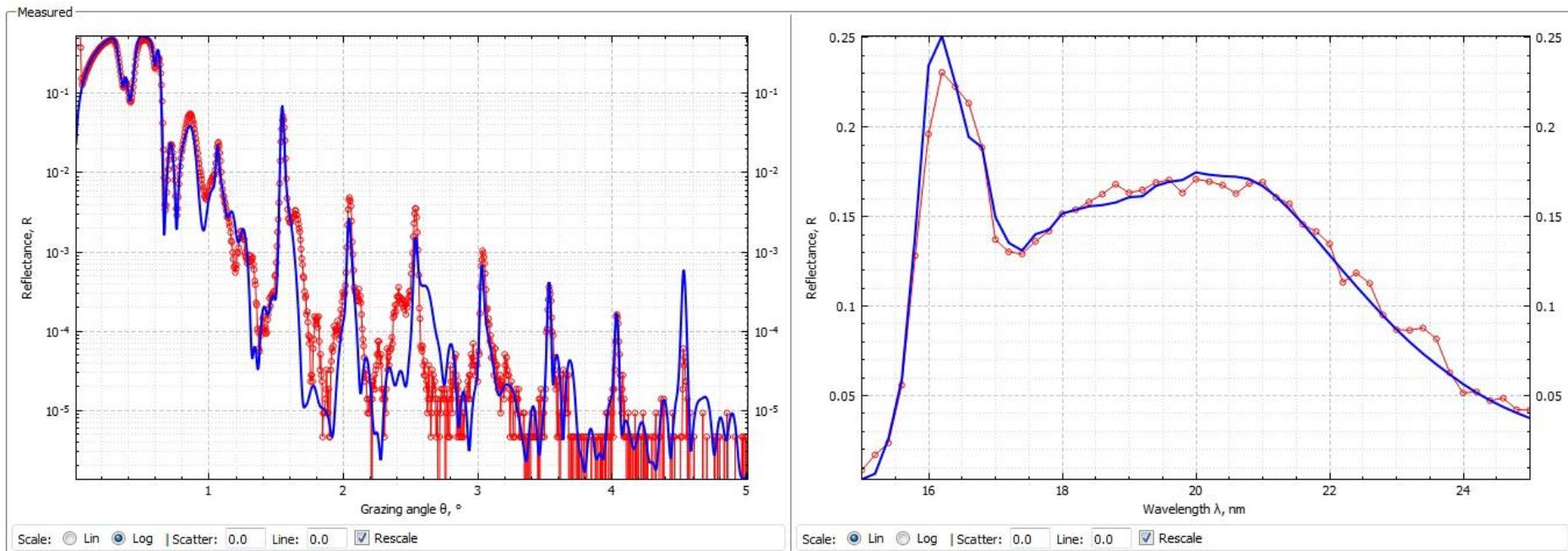
Первая итерация...



Что дальше?

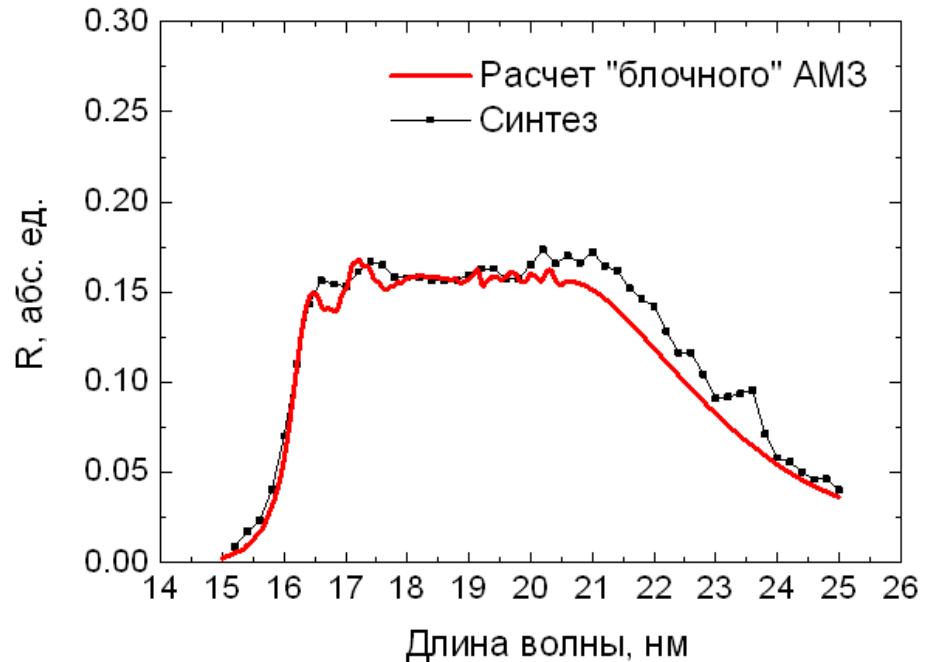
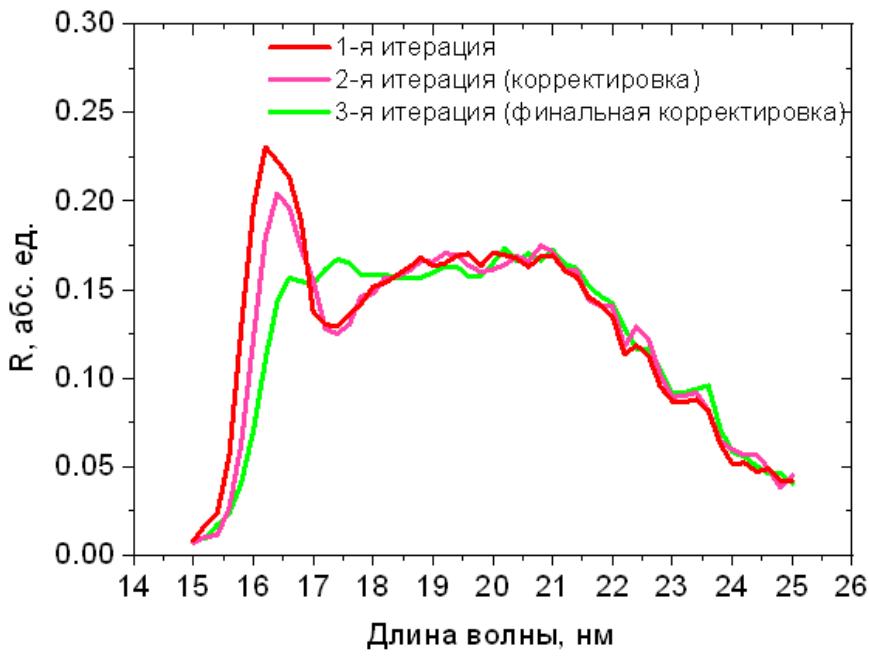
Обратная задача

Восстановление параметров стековой Mo/Si структуры программа «Multifitting»



Обратная задача

Процесс корректировки параметров стековой Mo/Si структуры

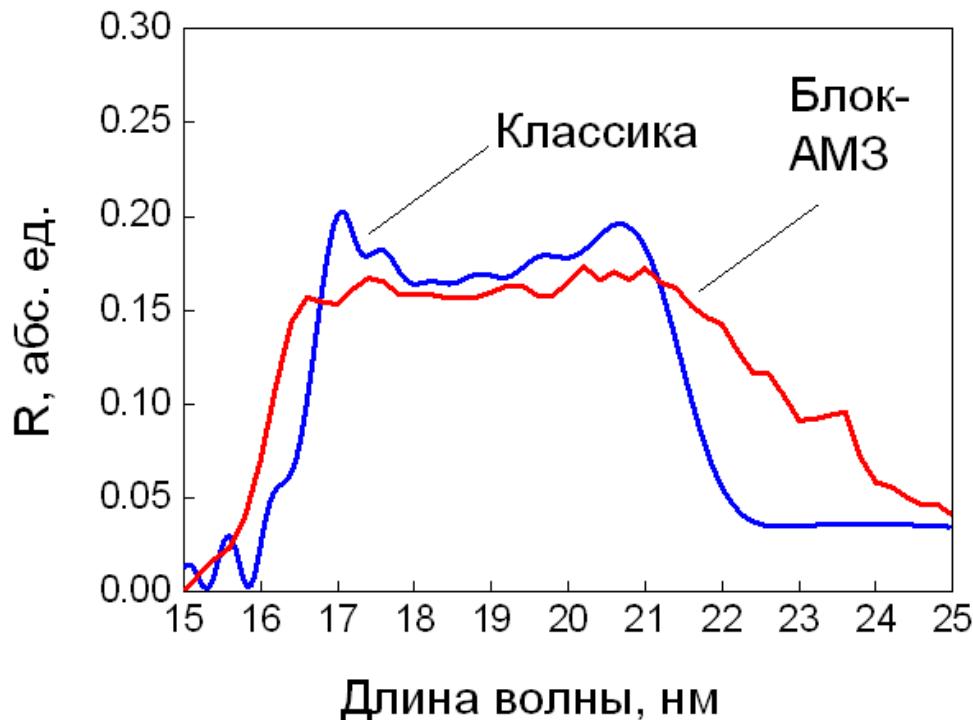


Обратная задача

Таблица. Восстановленные параметры
стековой Mo/Si структуры

Номер стека от подложки	N	Расчет	Первичная структура	1-я коррекция	Финальная коррекция
пленка Si	1	$h_{Si} = 1.40 \text{ нм}$			
3	3	$h_{Mo} = 4.30 \text{ нм}$	$h_{Mo} = 4.34 \text{ нм}$	$h_{Mo} = 4.33 \text{ нм}$	$h_{Mo} = 4.34 \text{ нм}$
		$h_{Si} = 6.72 \text{ нм}$	$h_{Si} = 6.66 \text{ нм}$	$h_{Si} = 6.66 \text{ нм}$	$h_{Si} = 6.72 \text{ нм}$
2	3	$h_{Mo} = 3.43 \text{ нм}$	$h_{Mo} = 3.35 \text{ нм}$	$h_{Mo} = 3.35 \text{ нм}$	$h_{Mo} = 3.44 \text{ нм}$
		$h_{Si} = 5.37 \text{ нм}$	$h_{Si} = 5.21 \text{ нм}$	$h_{Si} = 5.21 \text{ нм}$	$h_{Si} = 5.39 \text{ нм}$
1	32				
		$h_{Mo} = 4.50 \text{ нм}$	$h_{Mo} = 4.30 \text{ нм}$	$h_{Mo} = 4.40 \text{ нм}$	$h_{Mo} = 4.52 \text{ нм}$
		$h_{Si} = 4.50 \text{ нм}$	$h_{Si} = 4.30 \text{ нм}$	$h_{Si} = 4.40 \text{ нм}$	$h_{Si} = 4.52 \text{ нм}$

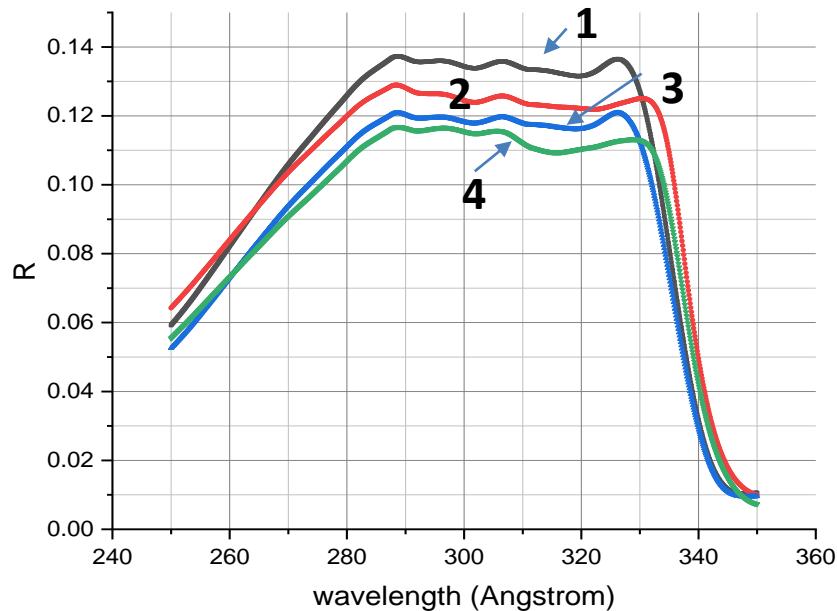
Сравнение подходов



Измеренные спектральные
зависимости коэффициента
отражения классической
апериодической и стековой
структур

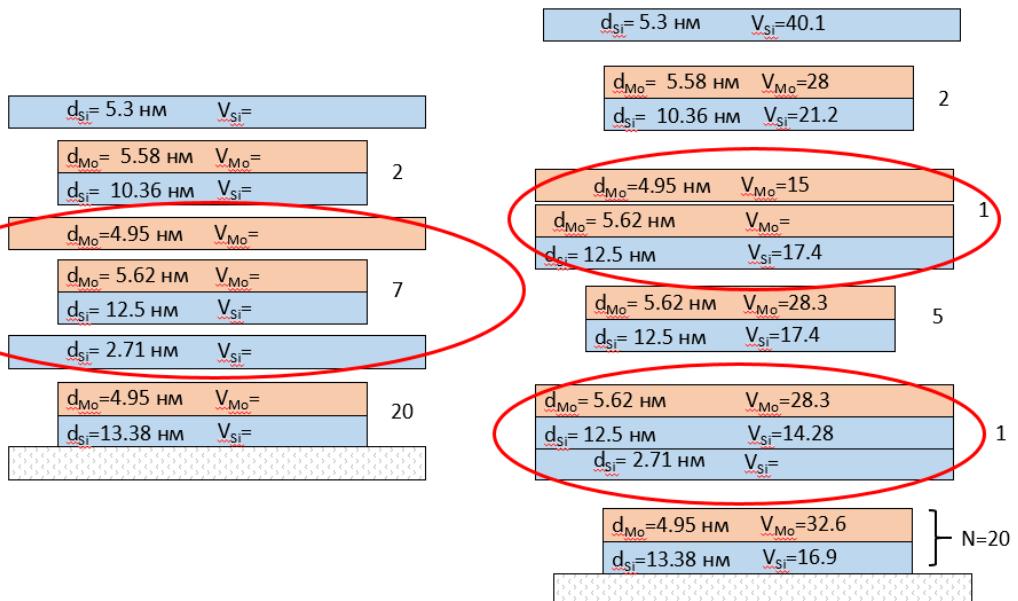
Для стековых структур удается достичь равномерного отражения на уровне 16% при хорошей воспроизводимости результата. Незначительно проигрывая в теории апериодической структуре в величине R , стековое зеркало оказывается намного более выигрышным с точки зрения скорости изготовления и аттестации!

Блок-АМЗ Mo/Si 28-33 нм

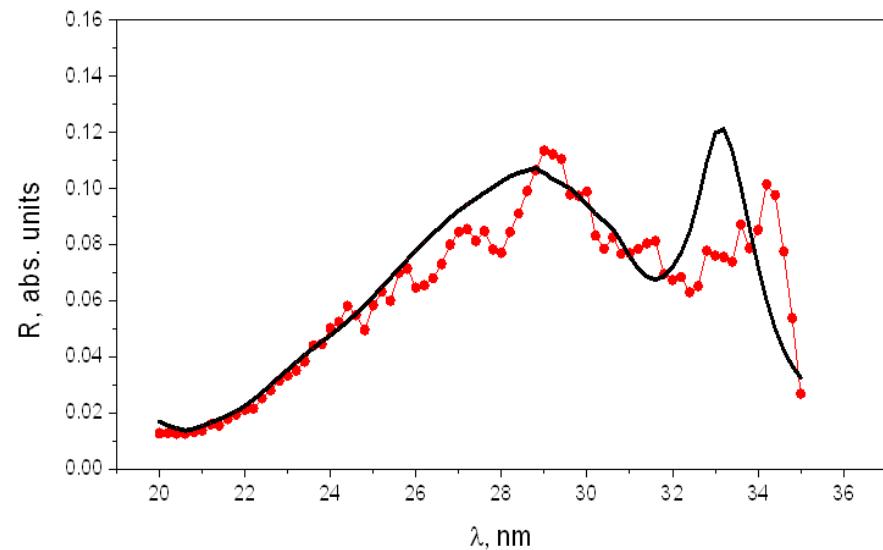
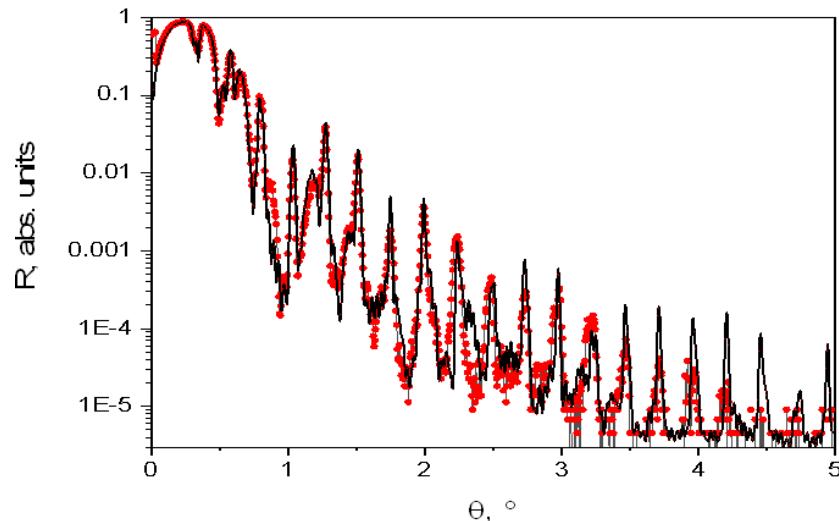


Линия 1 соответствует оптимизированной апериодической Mo/Si структуре с нулевыми толщинами переходных областей, 3 – та же самая структура, для которой введены реальные значения ширин переходных областей 1.2 нм Mo – на – Si и 0.6 нм Si- на- Mo. Линия 2 – Блок-структура Mo/Si, оптимизированная при нулевых переходных областях, линия 4 - при реальных.

На практике удобно объединить прослойки с соседним слоем соответствующего материала



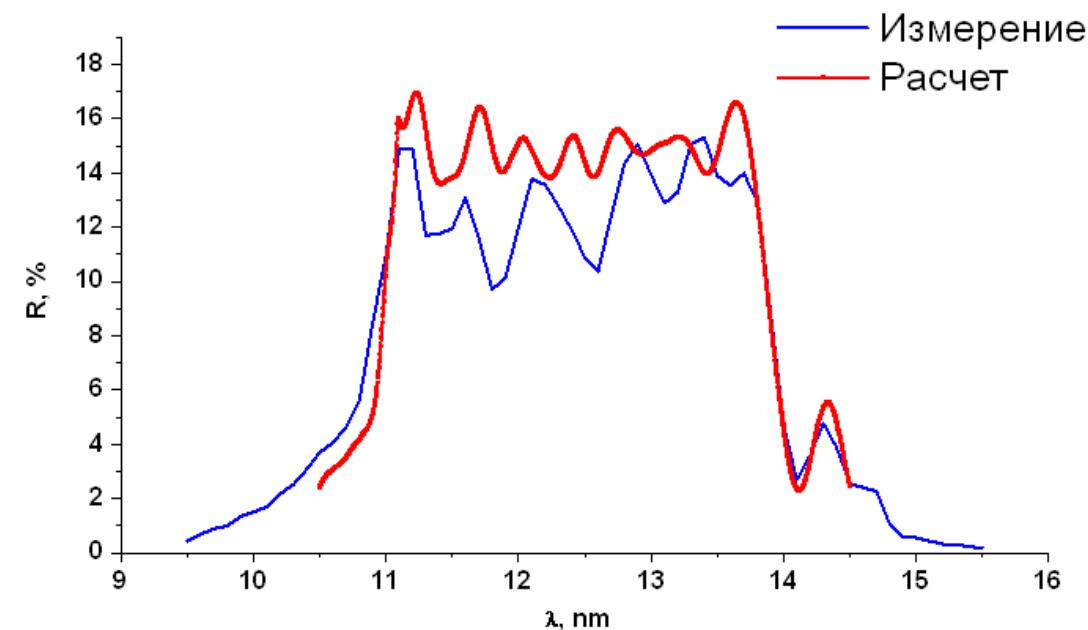
Блок-АМЗ 28-32 нм – первая проба



Номер ПМЗ от поверхности	Число периодов, N	Материал	Толщины слоев ПМЗ, нм	
			Расчет	Эксперимент
пленка Si	1	Si	5.3	7.6
1	2	Mo	5.58	4.81
		Si	10.36	10.99
2	1	Mo	10.57	11.12
		Si	12.5	13.09
2	5	Mo	5.62	5.45
		Si	12.5	12.49
2	1	Mo	5.62	6.63
		Si	15.21	16.49
3	20	Mo	4.95	4.68
		Si	13.38	13.20

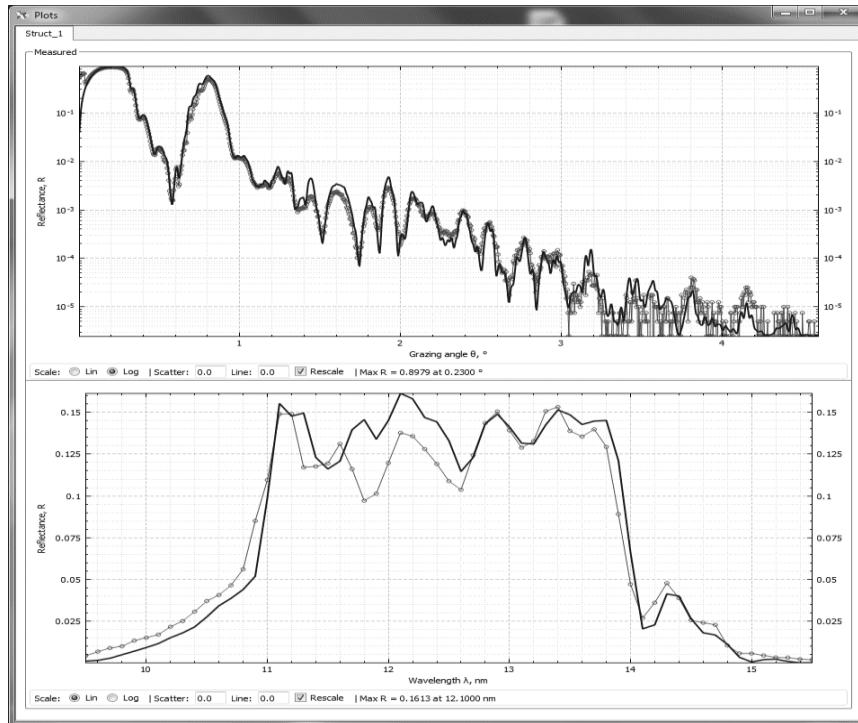
Блок-АМЗ Mo/Be

Экспериментально полученная усреднением по пяти реализациям и расчетная кривые отражения Mo/Be оптимизированных на равномерное отражение в диапазоне 11.1 – 13.8 nm.



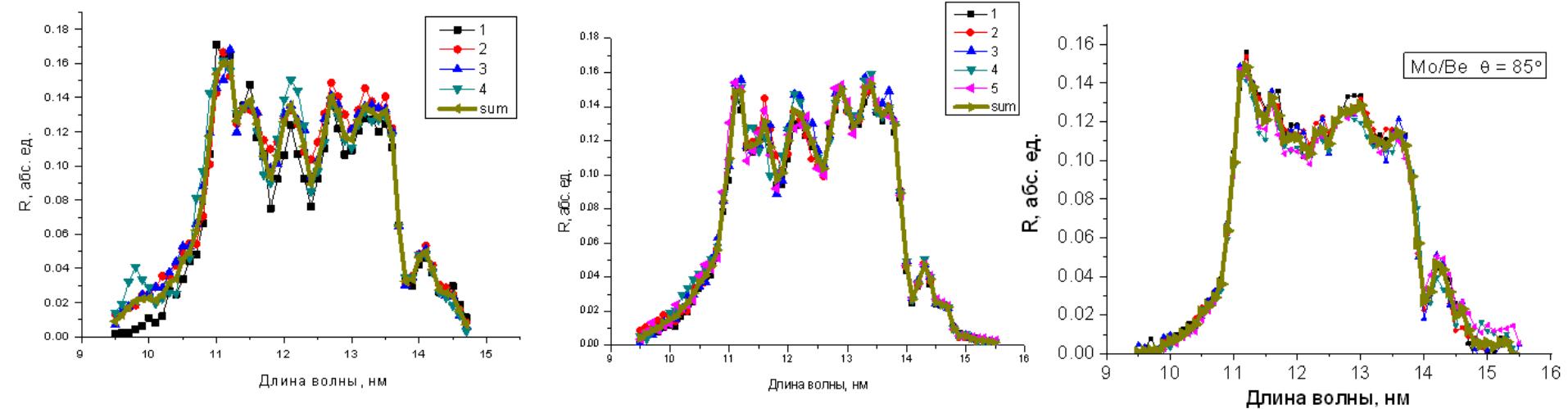
№	N	Толщины слоев ПМЗ, нм		
		Материал	Расчет	Эксперимент
1	2	Be	2.72	BeO: 1.43
		Mo	2.22	Be: 2.93
2	4	Be	3.38	Mo: 2.22
		Mo	2.25	Be: 26.8
3	6	Be	2.95	Mo: 2.26
		Mo	3.07	Be: 3.32
4	8	Be	3.08	Mo: 2.31
		Mo	3.33	Be: 2.87
5	1	Be	3.20	Mo: 3.19
		Mo	3.75	Be: 3.02
6	1	Be	3.05	Mo: 3.41
		Mo	4.38	Be: 3.18
		Mo	4.54	Mo: 3.82

Блок-АМЗ Mo/Be



Окно программы Multifitting:
одновременная подгонка
экспериментальных кривых отражения
при $\lambda = 0.154$ nm и $\lambda = 9.6-15.2$ nm Mo/Be
СМЗ для 11.1-13.8 nm, теоретический
расчет показан сплошной линией.

Дальнейшая корректировка:



Спасибо за внимание!