

*Институт физики
микроструктур РАН*

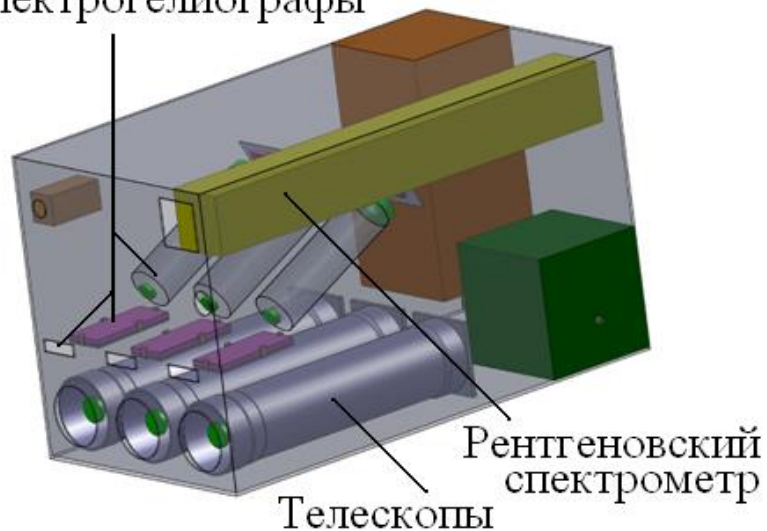
ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА, СИНТЕЗ И АТТЕСТАЦИЯ АПЕРИОДИЧЕСКИХ МНОГОСЛОЙНЫХ ЗЕРКАЛ

Семинар аспирантов и студентов 21 марта 2019

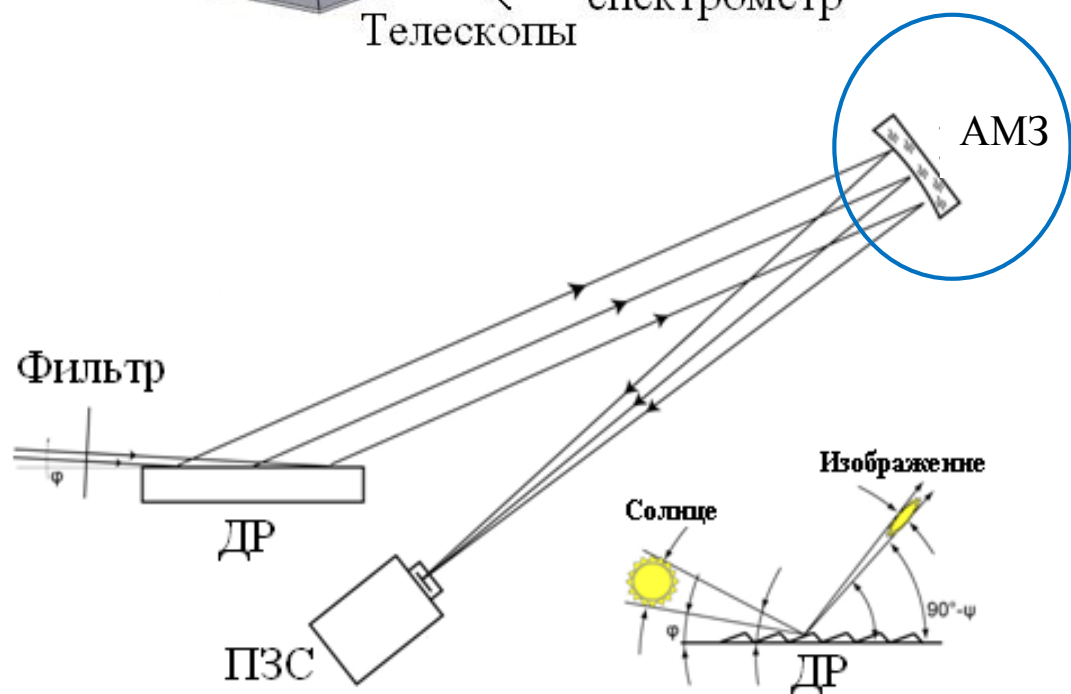
Гарахин Сергей

Интерес к аperiodическим рентгеновским зеркалам

Спектрогелиографы



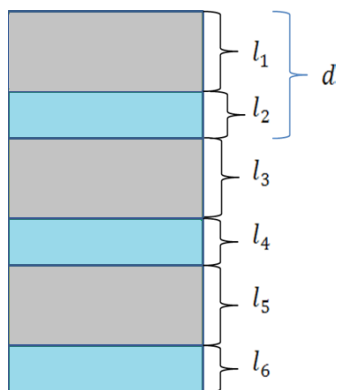
Аппаратура «Кортес» для исследования короны Солнца в EUV диапазоне с размещением на МКС.



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 аperiodические рентгеновские зеркала

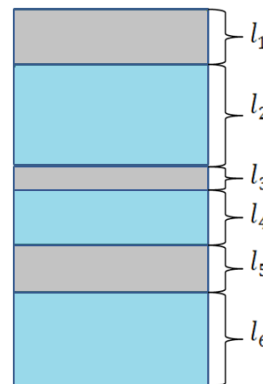
Характеристика ПМЗ



Строгая периодичность
структуры

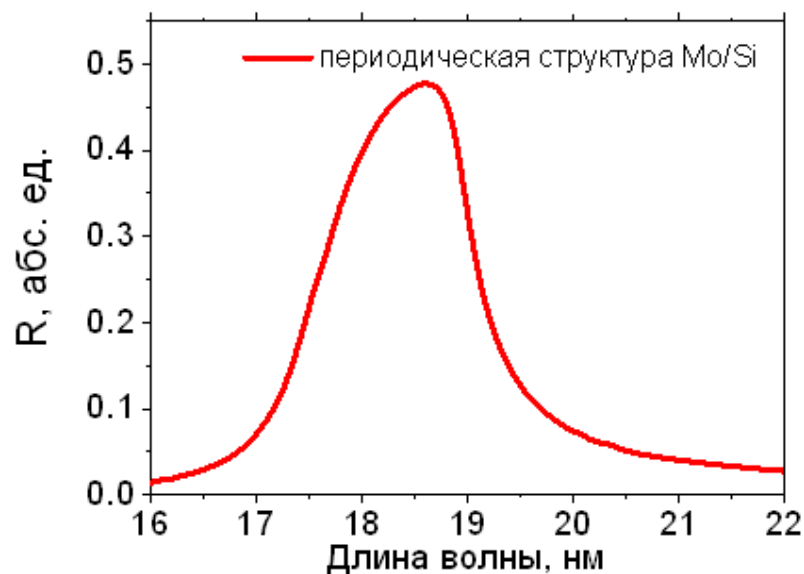
$$l_1 + l_2 = l_3 + l_4 = l_5 + l_6 = l_{N-1} + l_N = d$$

Характеристика АМЗ



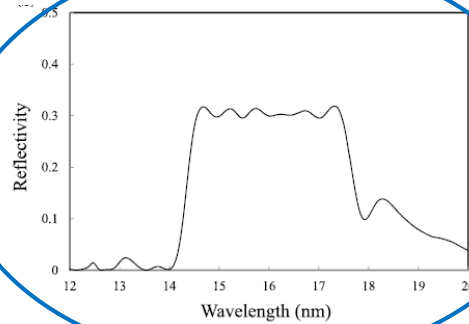
Понятие периода в
принципе некорректно!

$$l_1 + l_2 \neq l_3 + l_4 \neq l_5 + l_6 \neq l_{N-1} + l_N$$

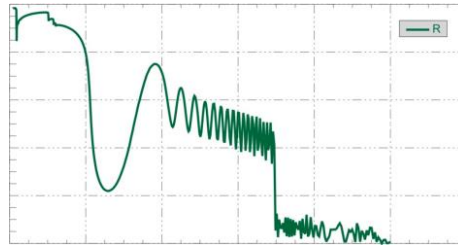


Апериодические зеркала

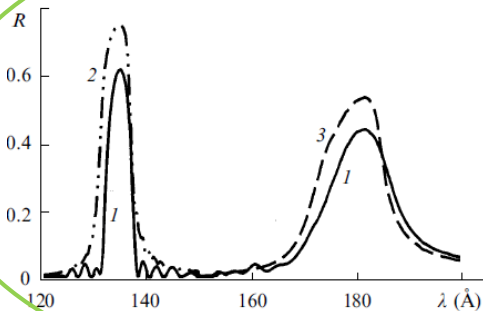
«Стандартная»
полка



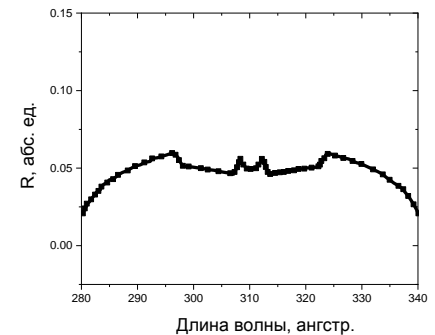
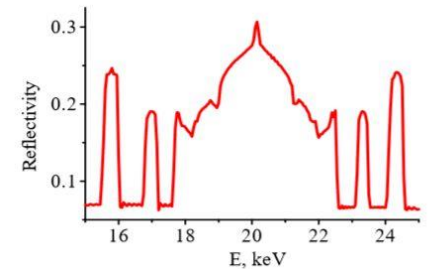
«Супер»-
зеркала



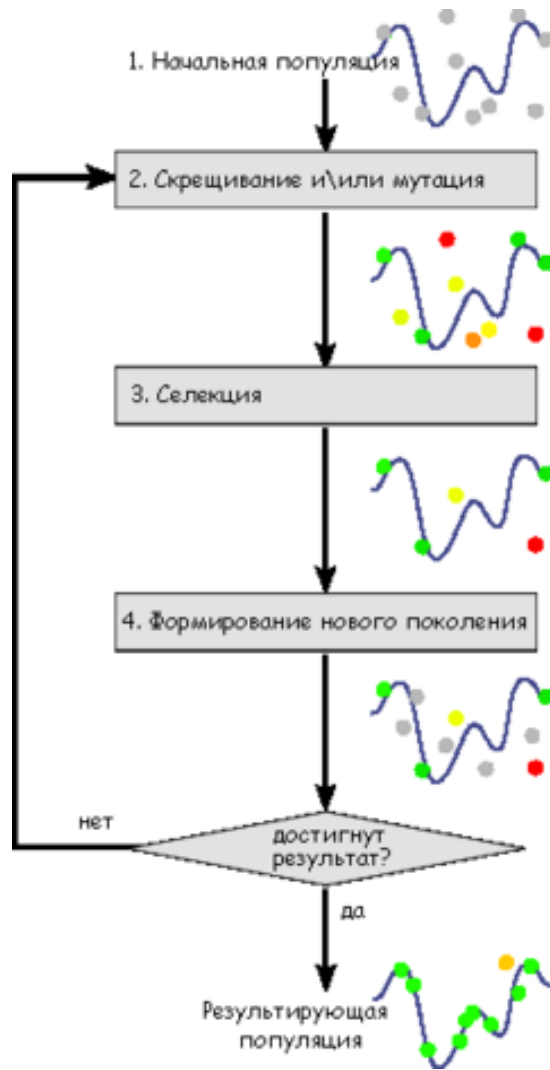
«Периодика
+ периодика»



Экзотика:
«Тадж-Махал»
И
«Бэтмен»



Генетический алгоритм



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

Целевая
функция

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

Задача - минимизировать F

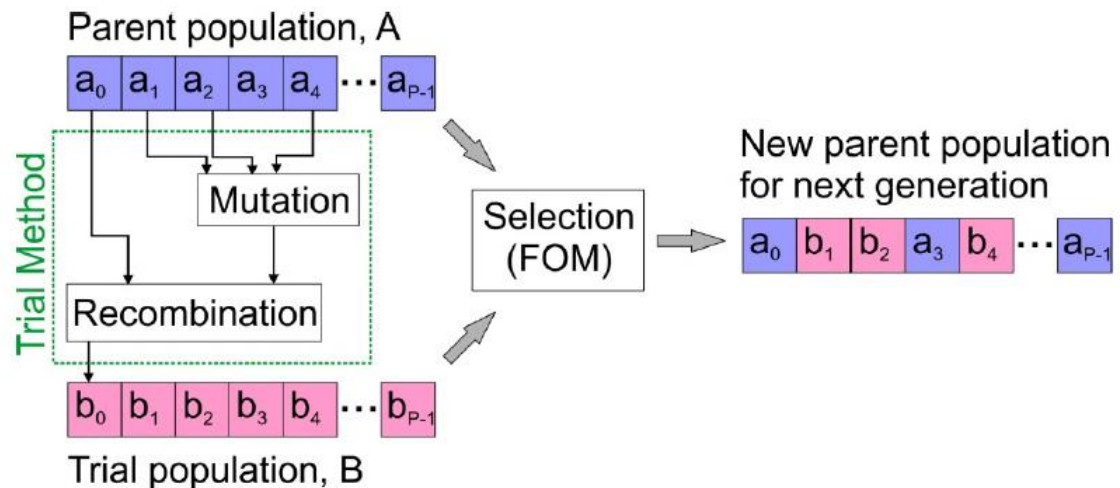
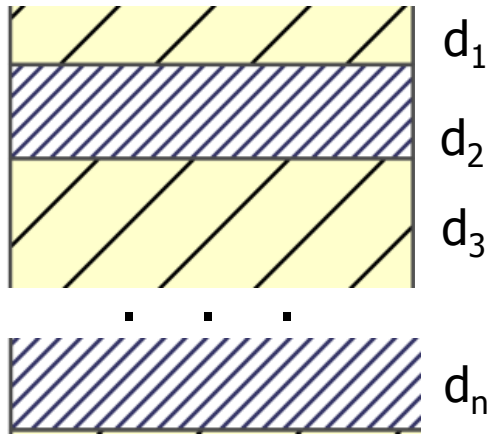


Схема отбора оптимального АМЗ



$$M_0 \begin{pmatrix} d_1^0 \\ d_2^0 \\ d_3^0 \end{pmatrix} \quad M_1 \begin{pmatrix} d_1^1 \\ d_2^1 \\ d_3^1 \end{pmatrix} \quad M_2 \begin{pmatrix} d_1^2 \\ d_2^2 \\ d_3^2 \end{pmatrix} \quad \dots \quad M_{\dots} \begin{pmatrix} \dots \\ \dots \\ \dots \end{pmatrix}$$

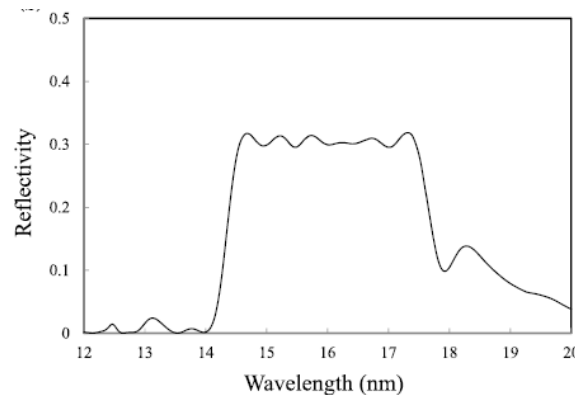
$$\frac{\Delta_{\text{уст.}}}{10} \leq |\delta d_1| \leq \Delta_{\text{уст.}}$$

$$|\delta d_2|$$

$$|\delta d_3|$$

Проверка на жизнеспособность

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



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

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

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

.....



Синтез



Генетический алгоритм

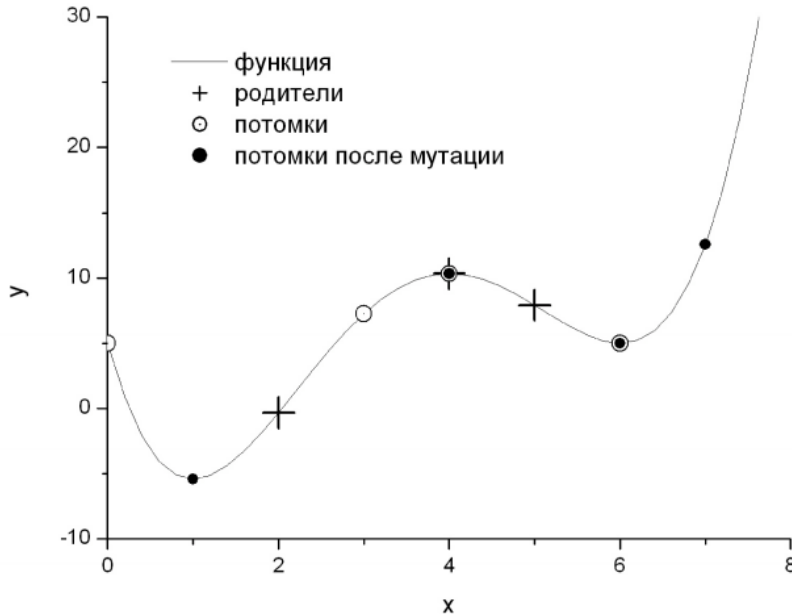
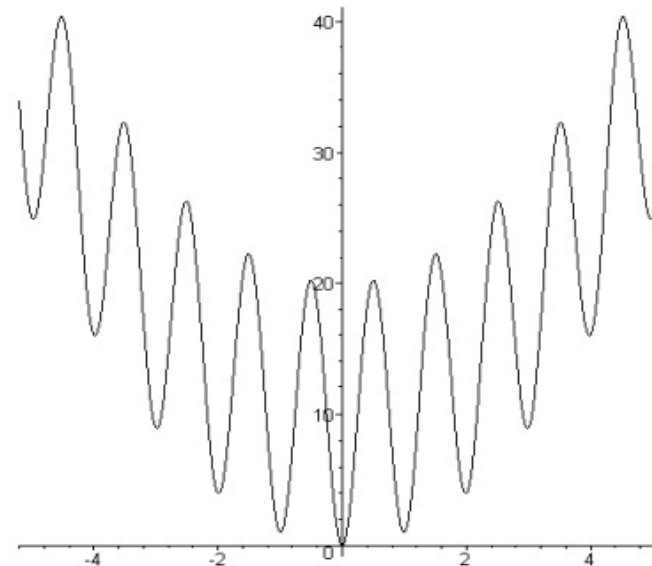


График целевой функции с
выбранными значениями
пробных решений

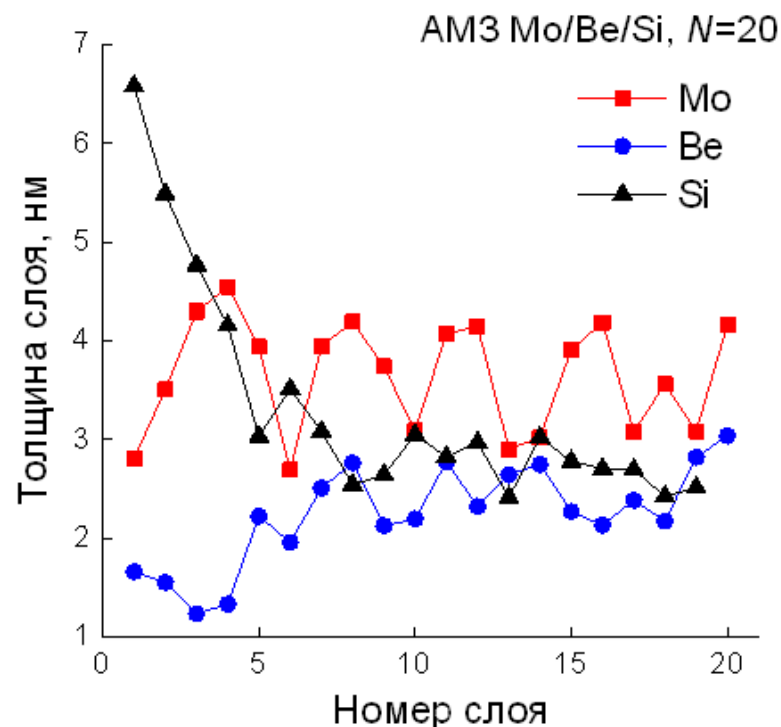
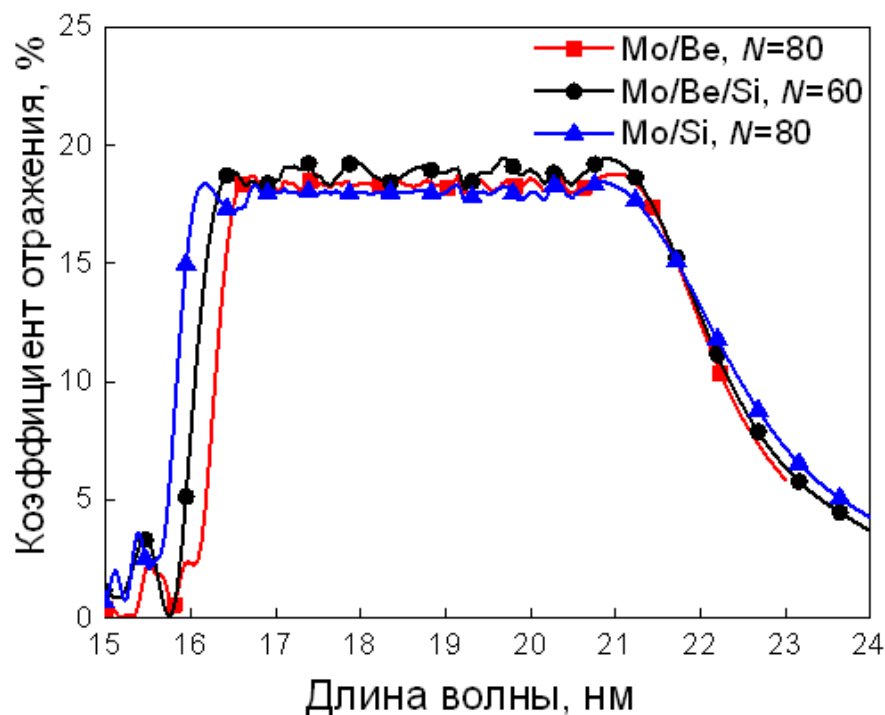
Функция Растригина



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

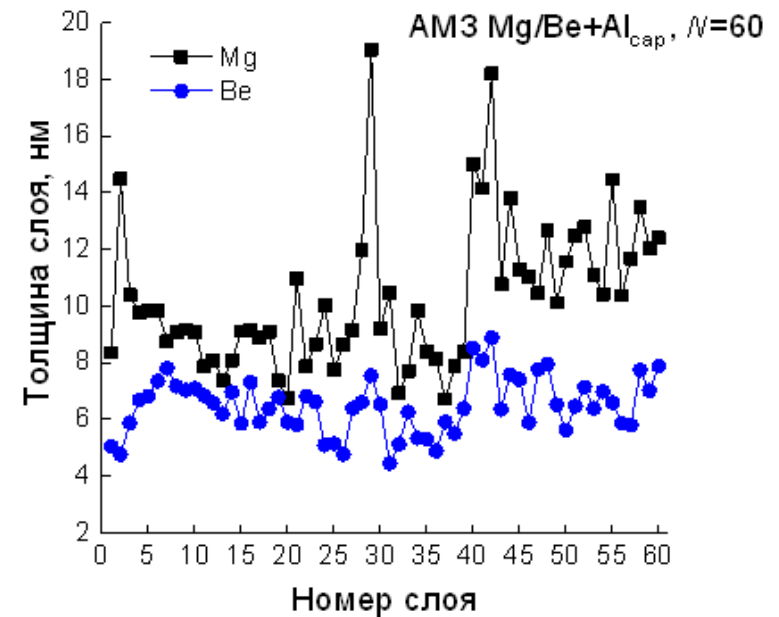
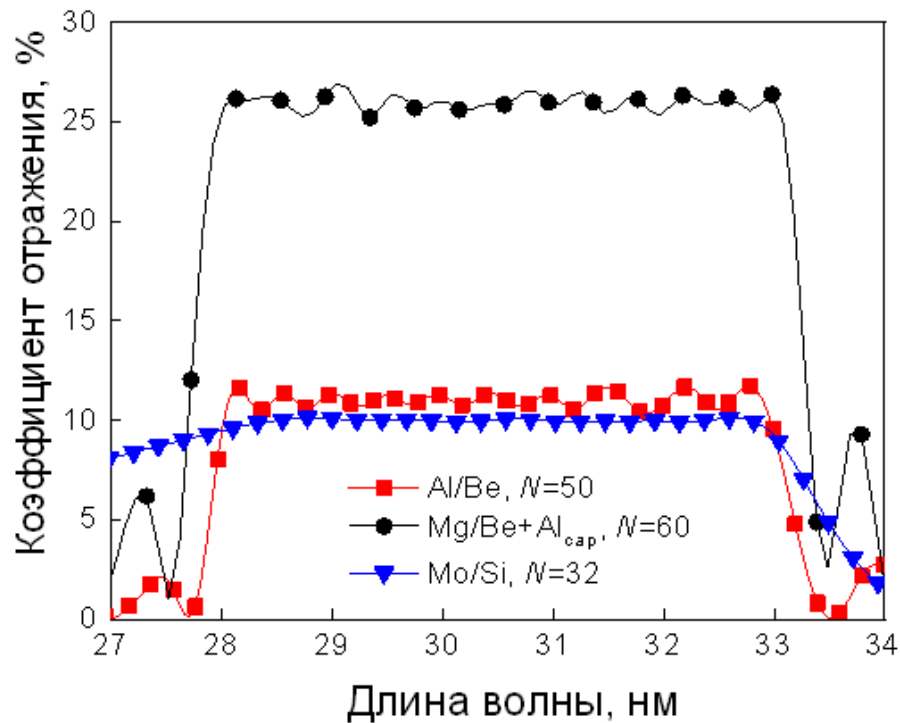
Апериодические зеркала для солнечной астрономии



АМЗ для
диапазона
17– 21 нм

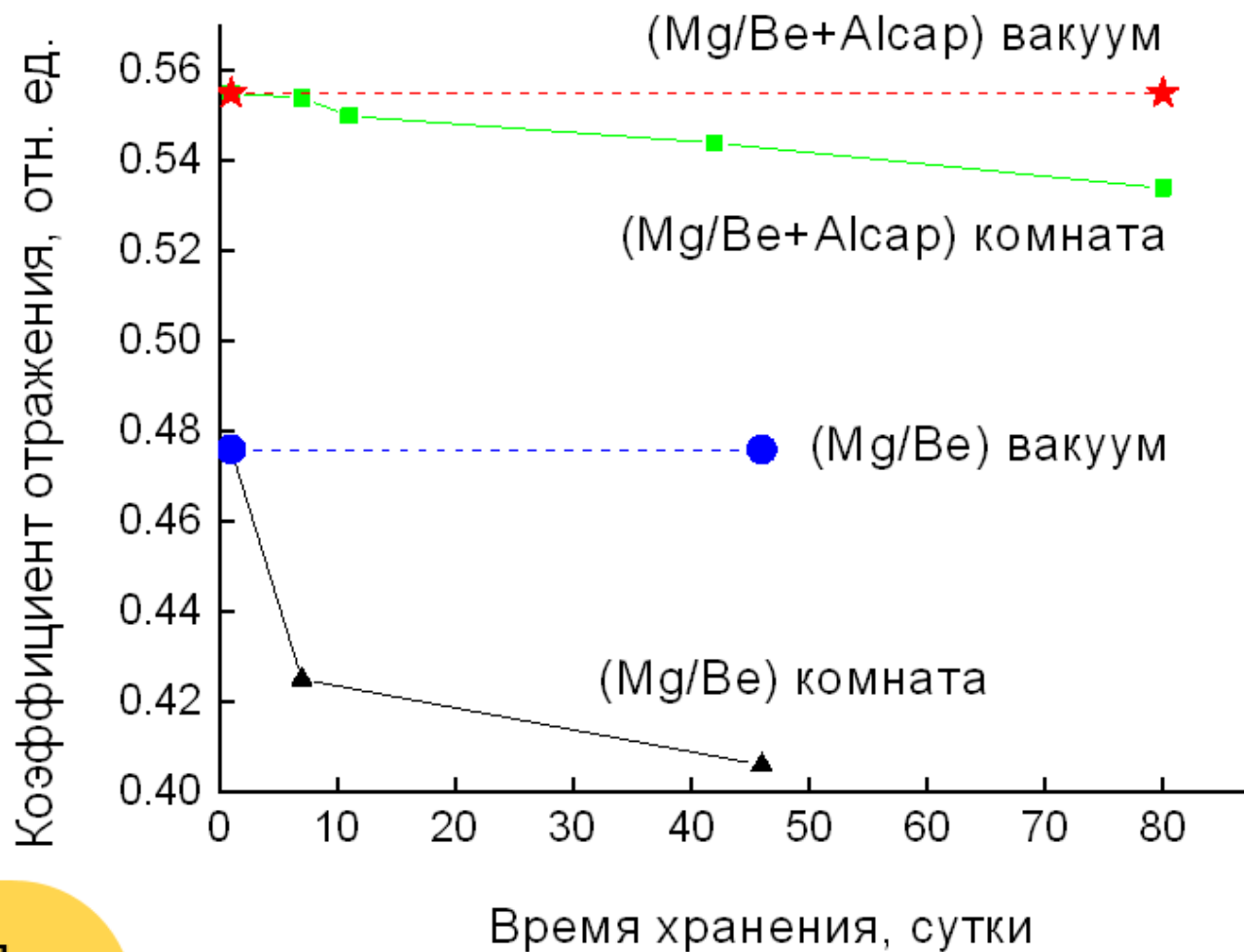
Структура	σ_{Mo} , нм	σ_{Si} , нм	σ_{Be} , нм
Mo/Si	0.6	1.2	-
Mo/Be	0.7	-	0.35
Mo/Be/Si	0.27	0.6	0.6

Апериодические зеркала для солнечной астрономии



АМЗ для диапазона
28– 33 нм

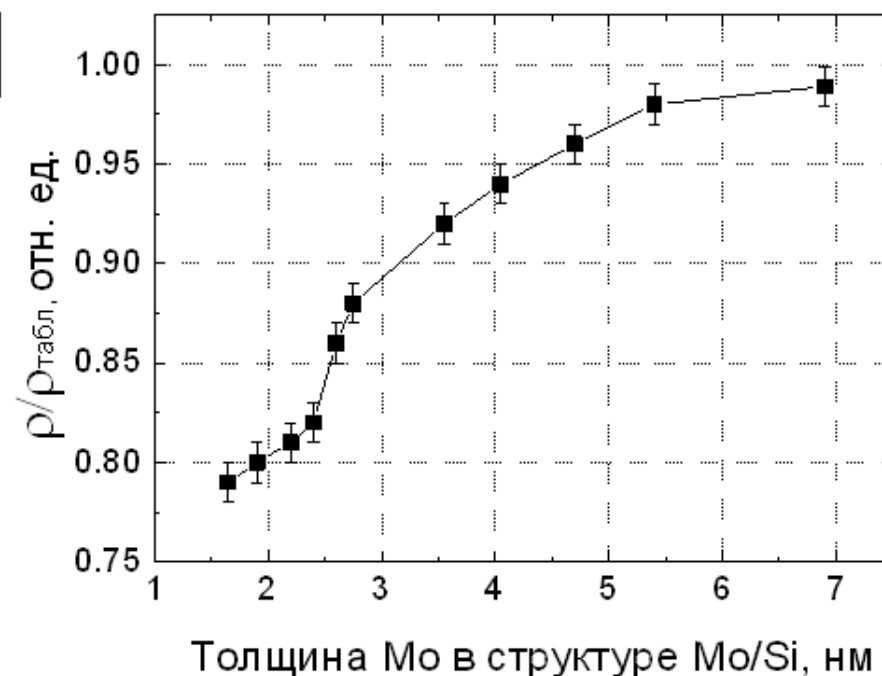
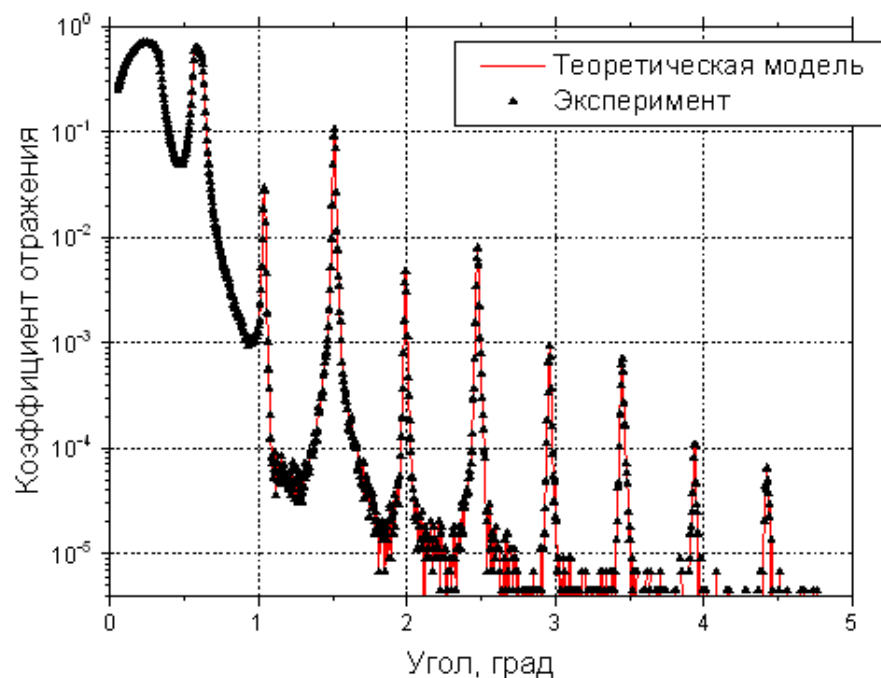
Апериодические зеркала для солнечной астрономии



Что с
Mg?

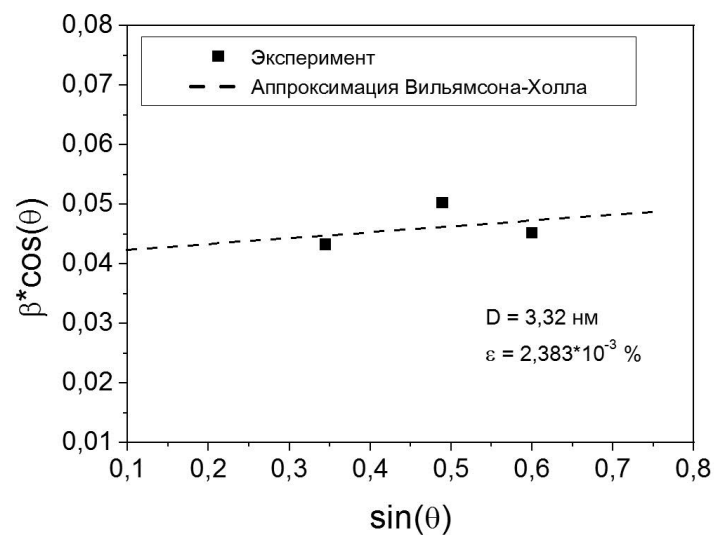
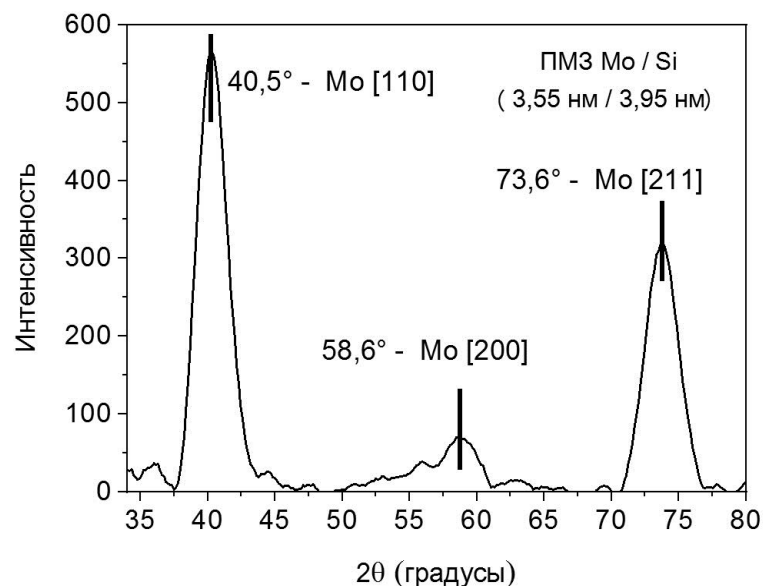
АМЗ для
диапазона
28– 33 нм

Плотность Мо в ПМЗ Мо/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



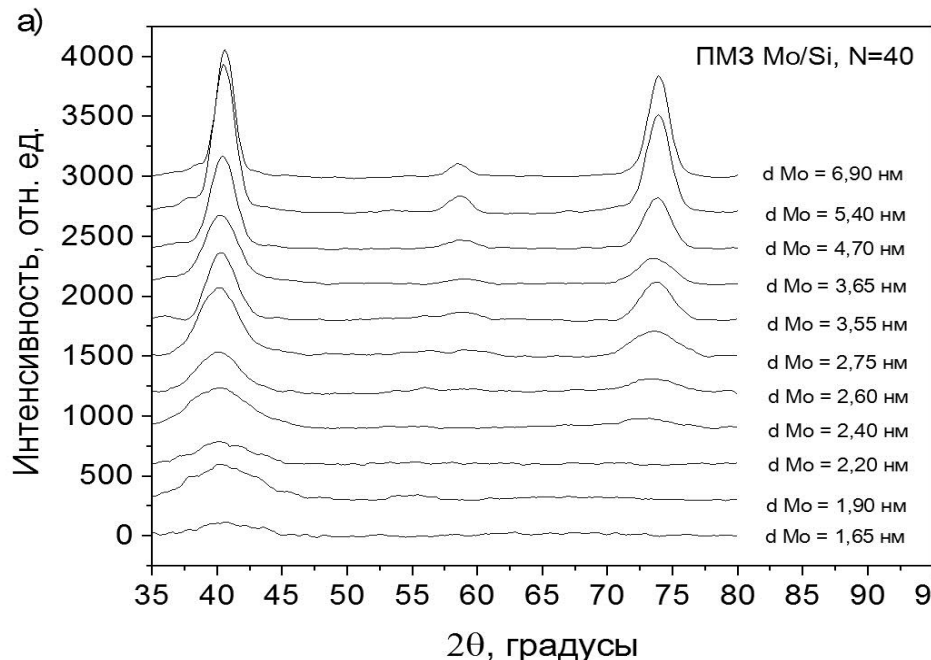
$$\beta \cos \theta = \frac{\lambda}{D} + 4 \varepsilon \sin \theta$$

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

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

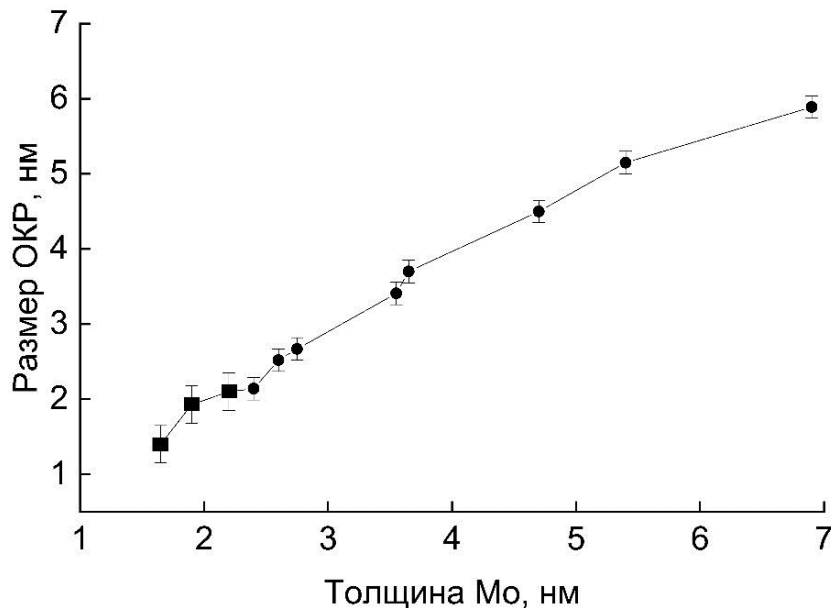
D – эффективный размер кристаллита, который зависит от его формы и направления $[hkl]$ и связан с истинным размером через константу, β – интегральная ширина линии.

Оценка размеров ОКР

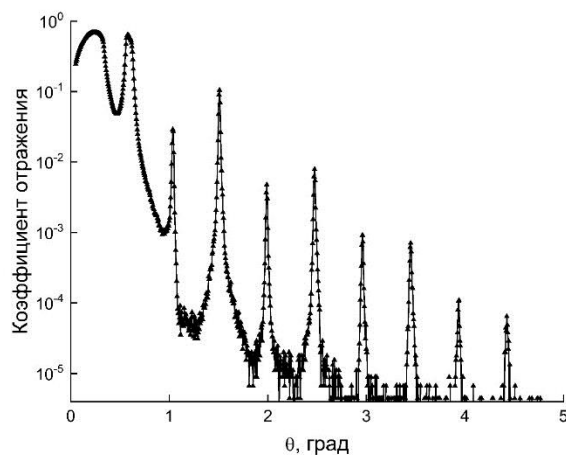
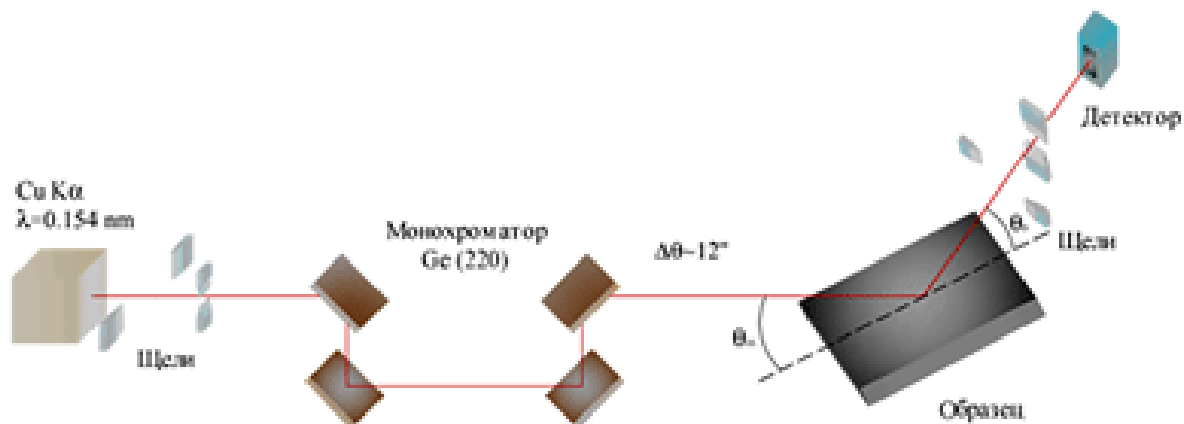


Оценка размеров ОКР по построению Вильямсона-Холла и формуле Шеррера для многослойных структур Mo/Si (толщина Si = 4 нм, толщины Mo = 1,65 – 6,9 нм)

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

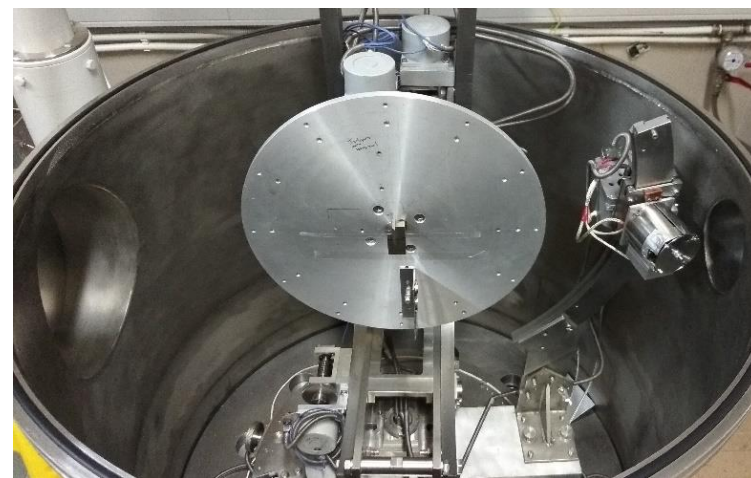
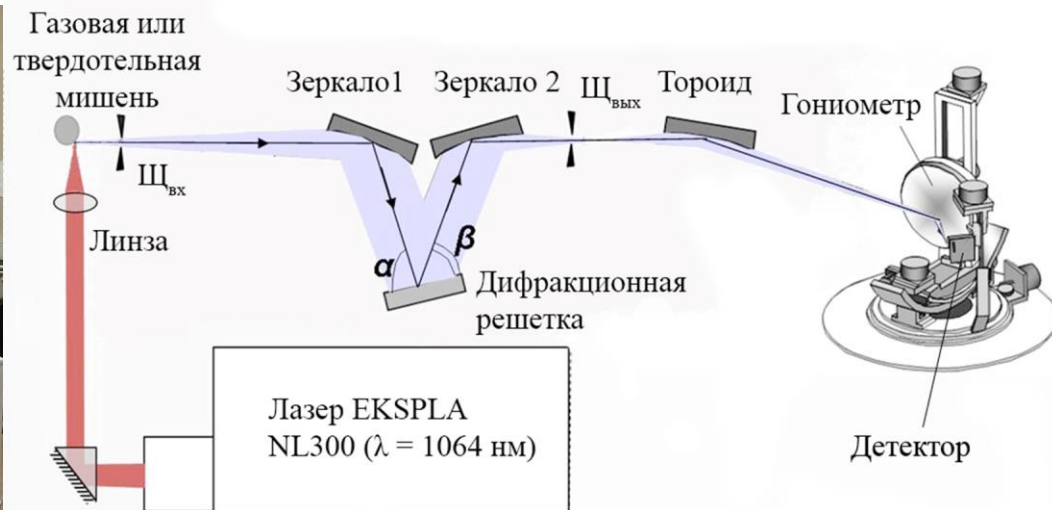


ЧЕТЫРЕХКРИСТАЛЬНЫЙ ДИФРАКТОМЕТР PANALYTICAL X'PERT PRO

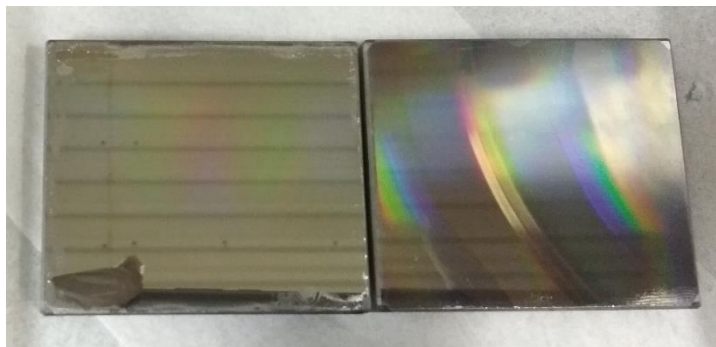


Для изучения строения многослойных зеркал применялся метод малоугловой дифракции рентгеновских лучей. Измерения проводились в диапазоне углов падения излучения на образец $\theta=0-5^\circ$ с использованием четырехкристального высокоразрешающего дифрактометра PANalytical X'Pert Pro на длине волны 0,154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

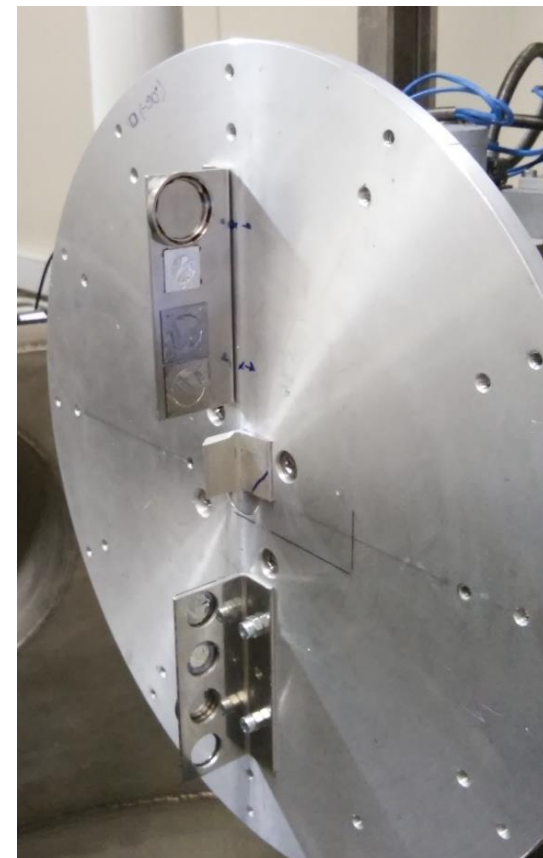
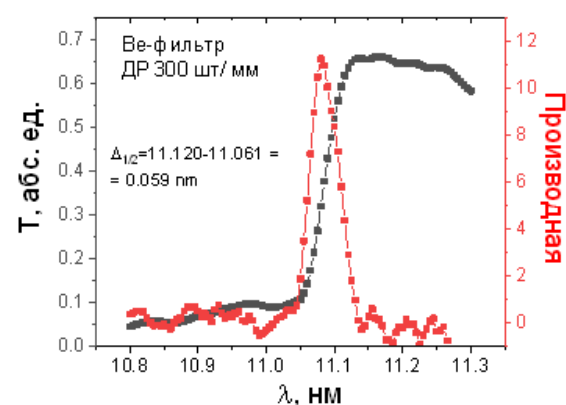
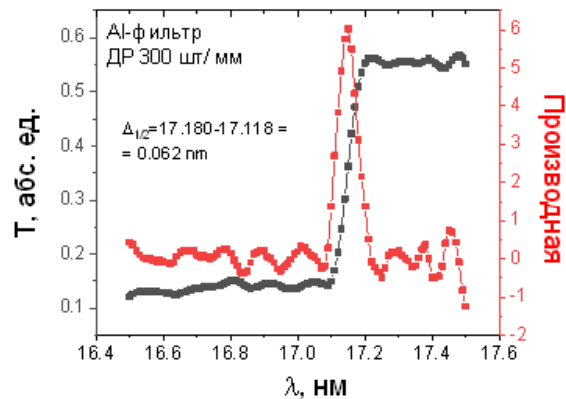
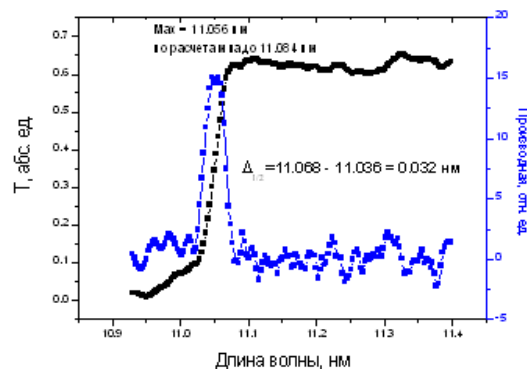
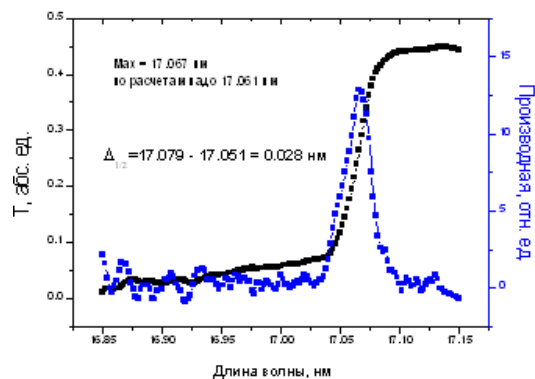
Лабораторный рефлектометр для исследования оптических элементов в диапазоне длин волн 4-50 нм



Определение спектрального разрешения прибора по краям поглощения свободновисящих фильтров



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

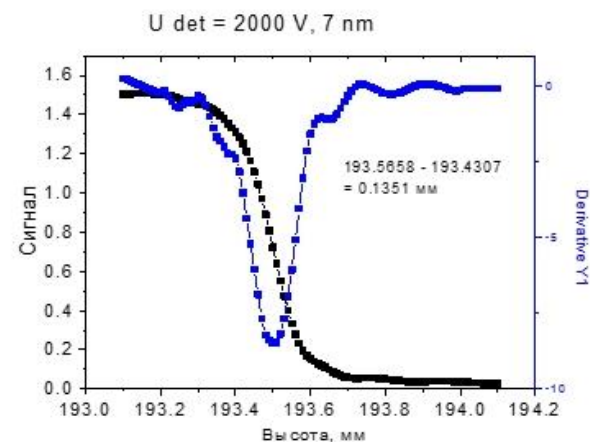
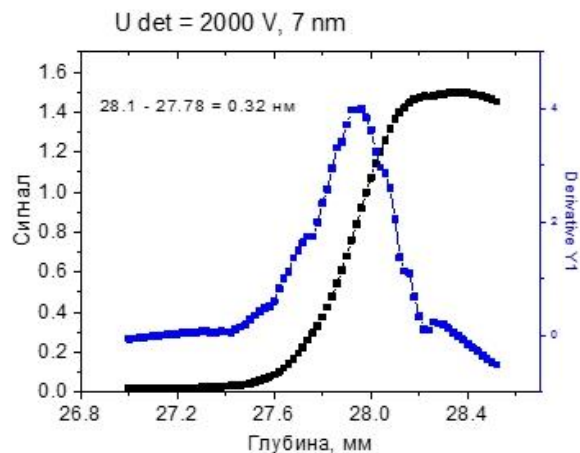


Лабораторный рефлектометр для исследования оптических элементов в диапазоне длин волн 4-50 нм

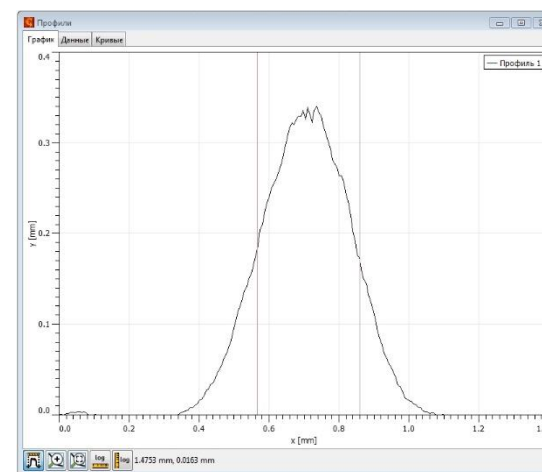
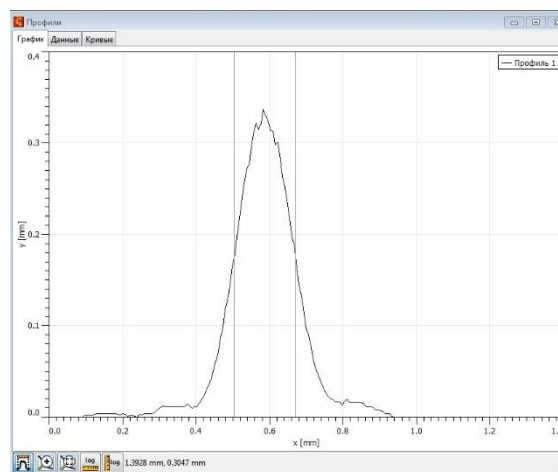
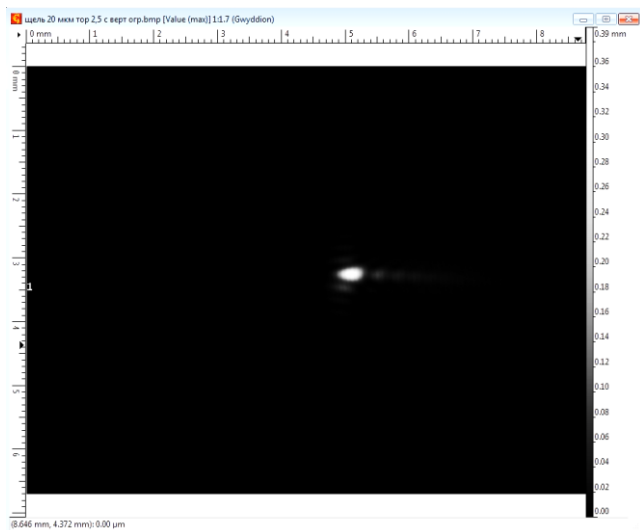
ПЗС камера



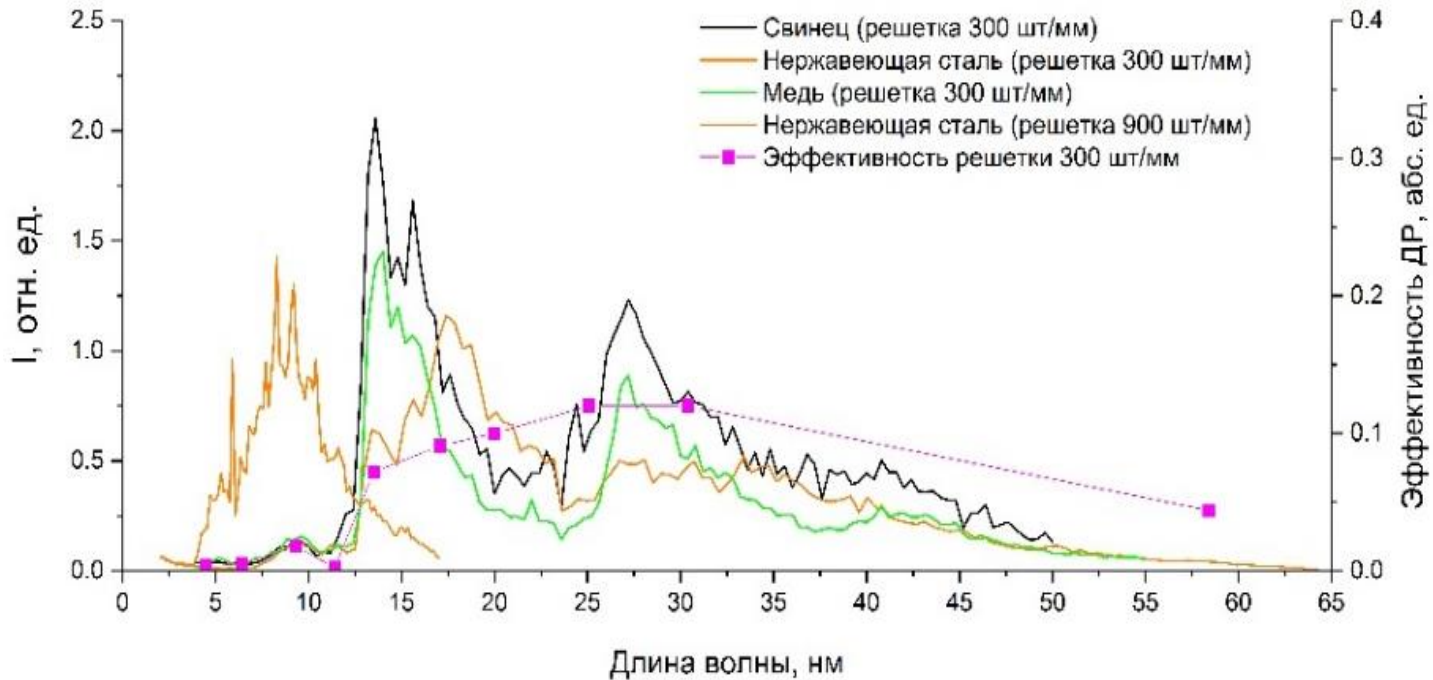
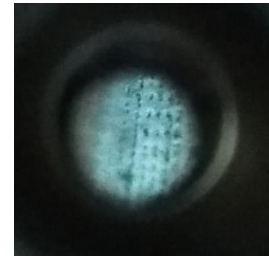
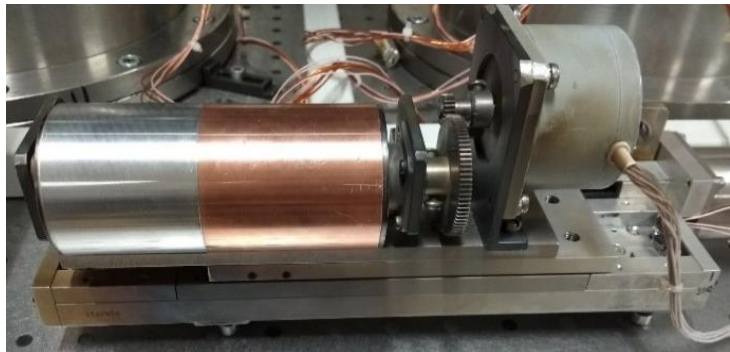
Исследование размера рентгеновского пучка «ножевым методом»



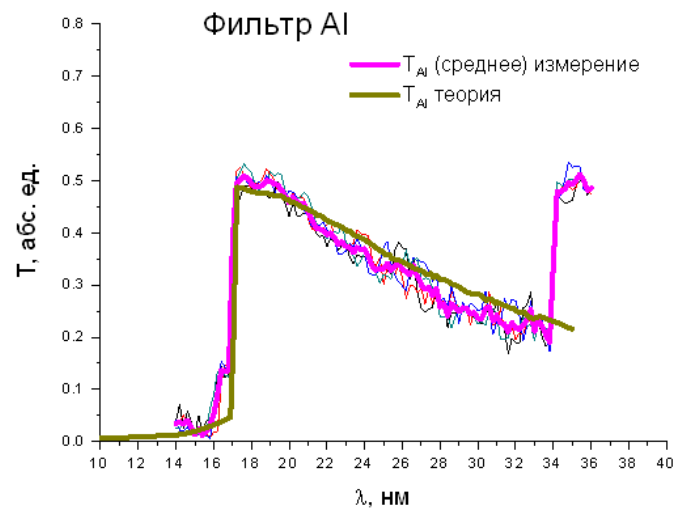
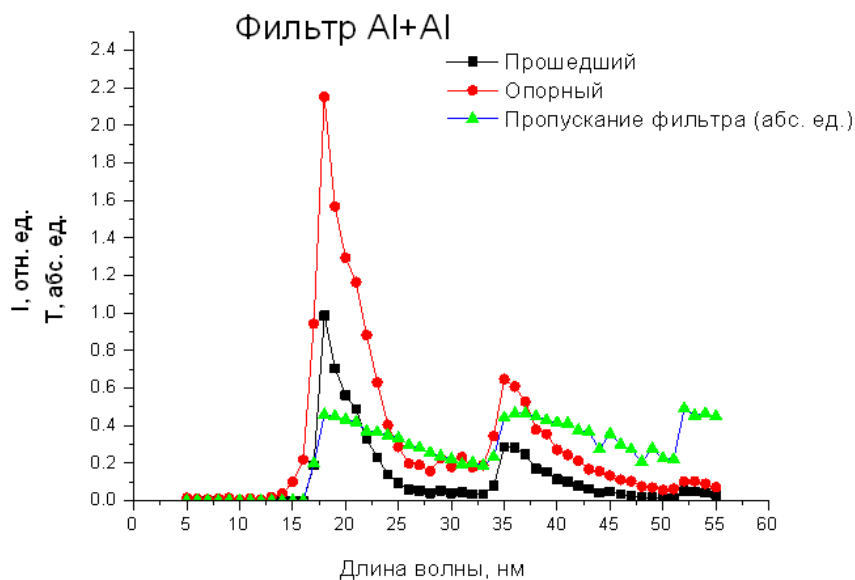
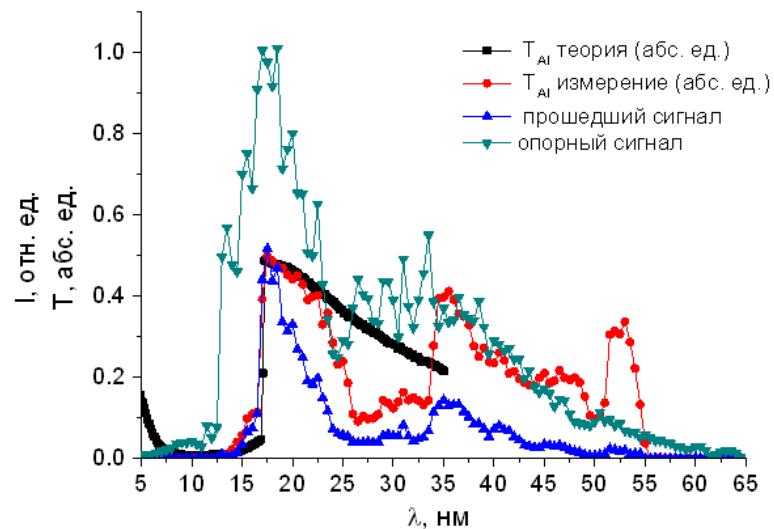
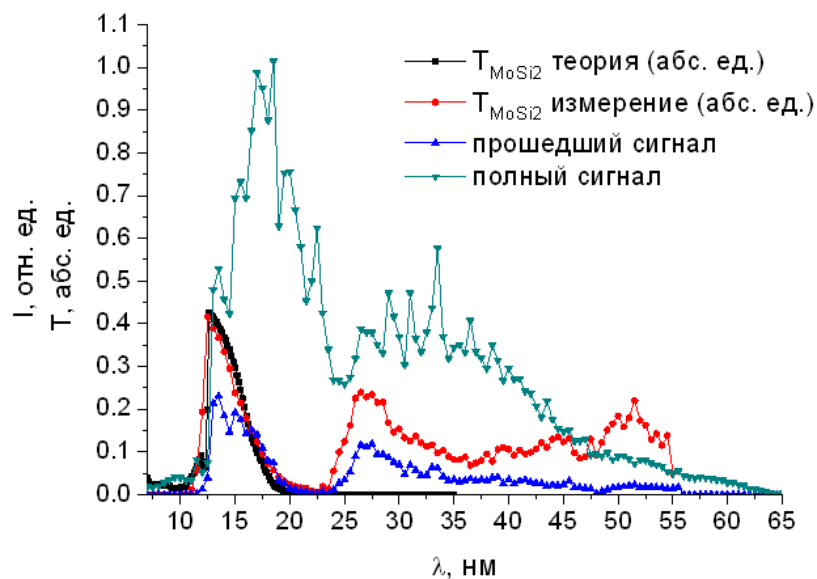
0.32 × 0.135 мм



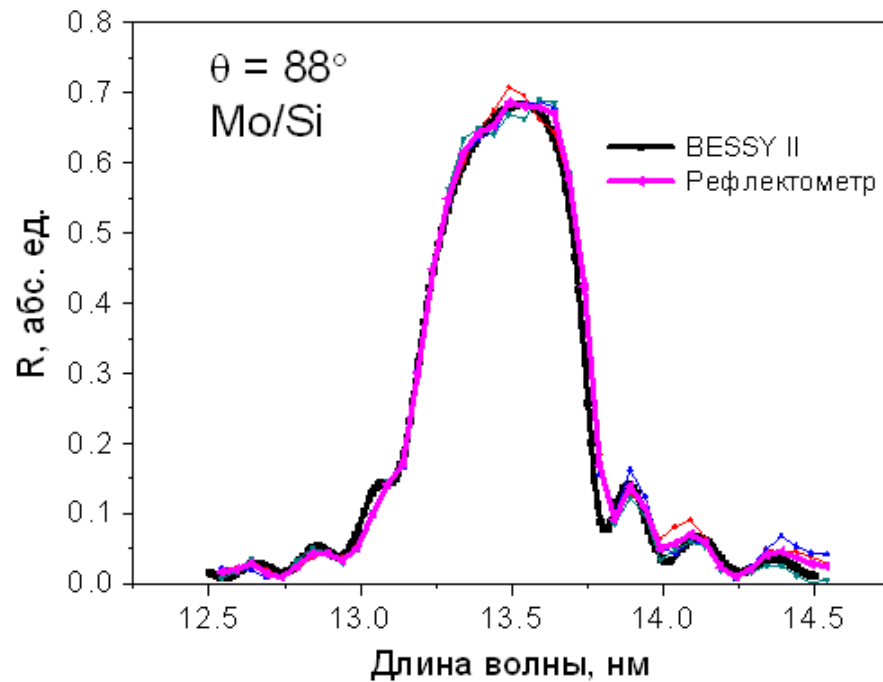
Лабораторный рефлектометр для исследования оптических элементов в диапазоне длин волн 4-50 нм



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

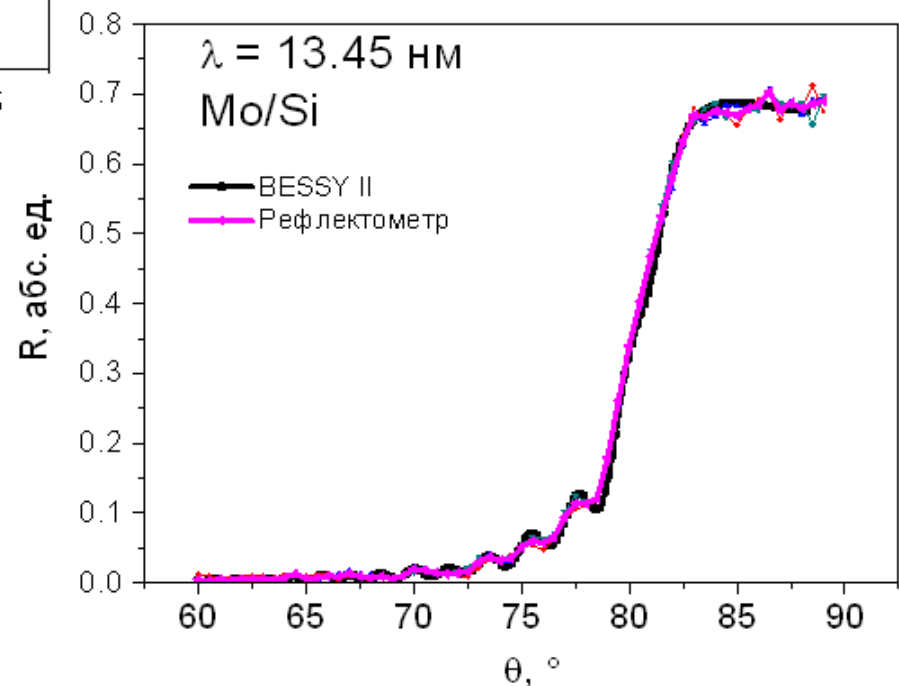


Примеры съемки угловых и спектральных характеристик



Как проверить правильность работы?
Сравнение с эталоном.

Совпадение с синхротронными измерениями достаточно для лабораторных исследований



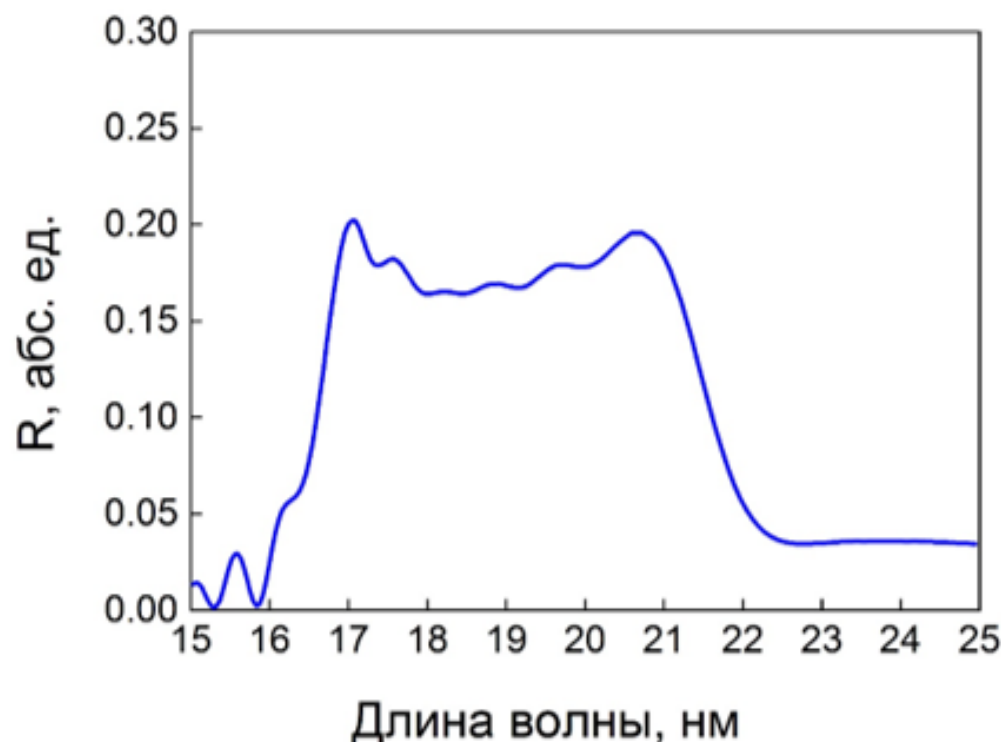
Минусы «классических» АМЗ

Невозможность полной калибровки толщин

Неоднозначность восстановленных параметров

Корректировка крайне затруднена

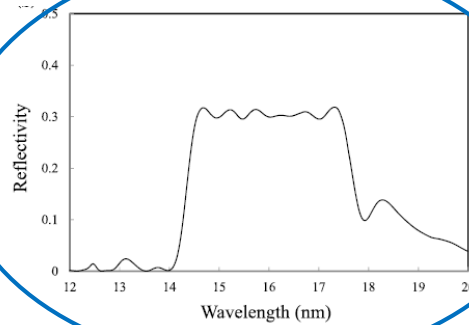
Трудность воспроизводимости



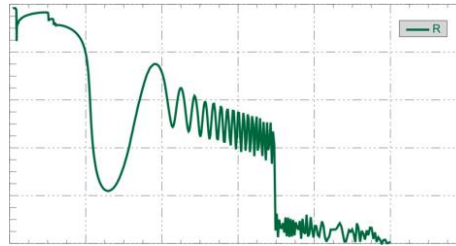
Как сделать удобнее?

Апериодические зеркала

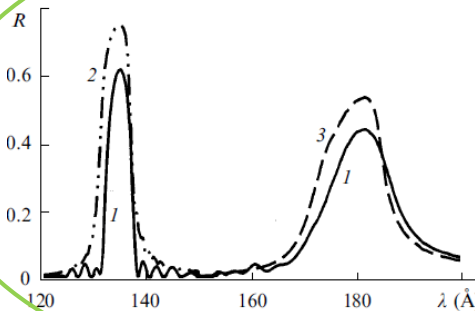
«Стандартная»
полка



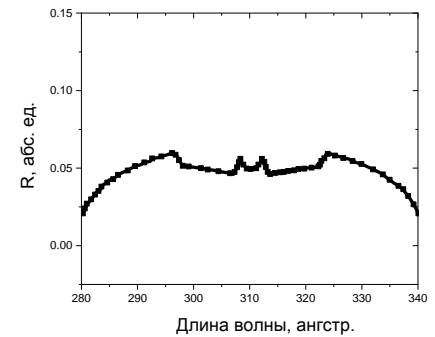
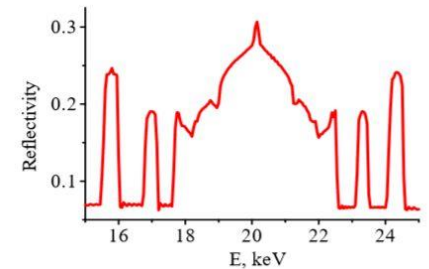
«Супер»-
зеркала



«Периодика
+ периодика»

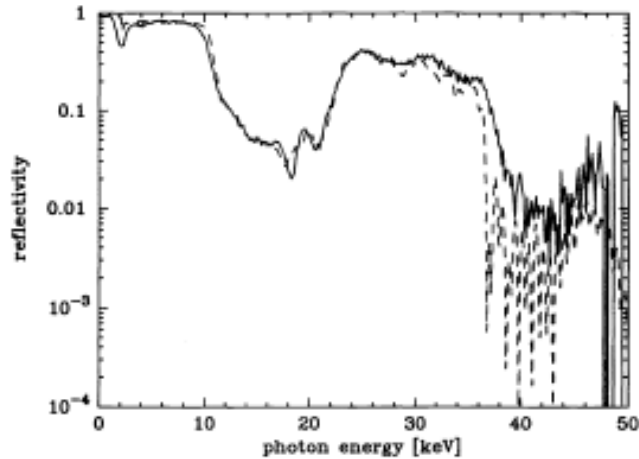


Экзотика:
«Тадж-Махал»
И
«Бэтмен»

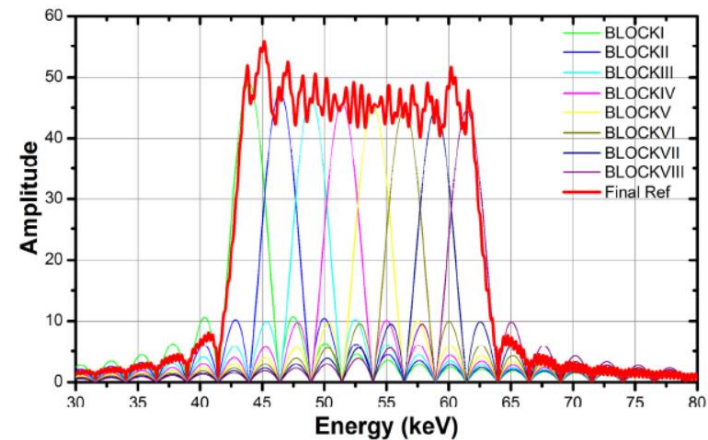


Блок-структуры

Pt/C

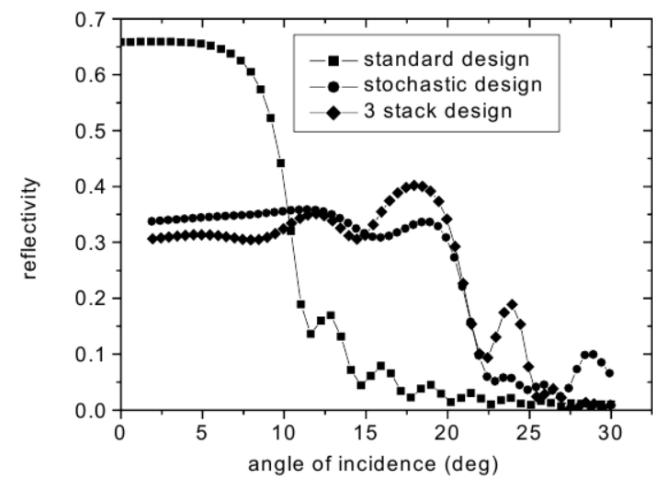
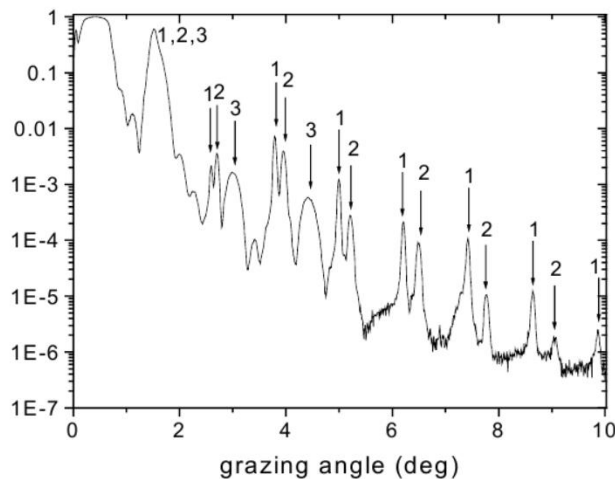
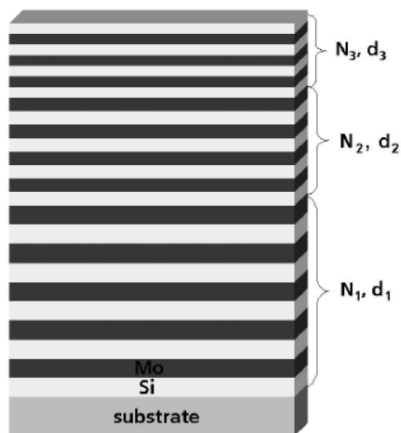


Yamashita K., Kunieda H., Tawara Y. et al. Proc. SPIE, 3766, 327(1999)



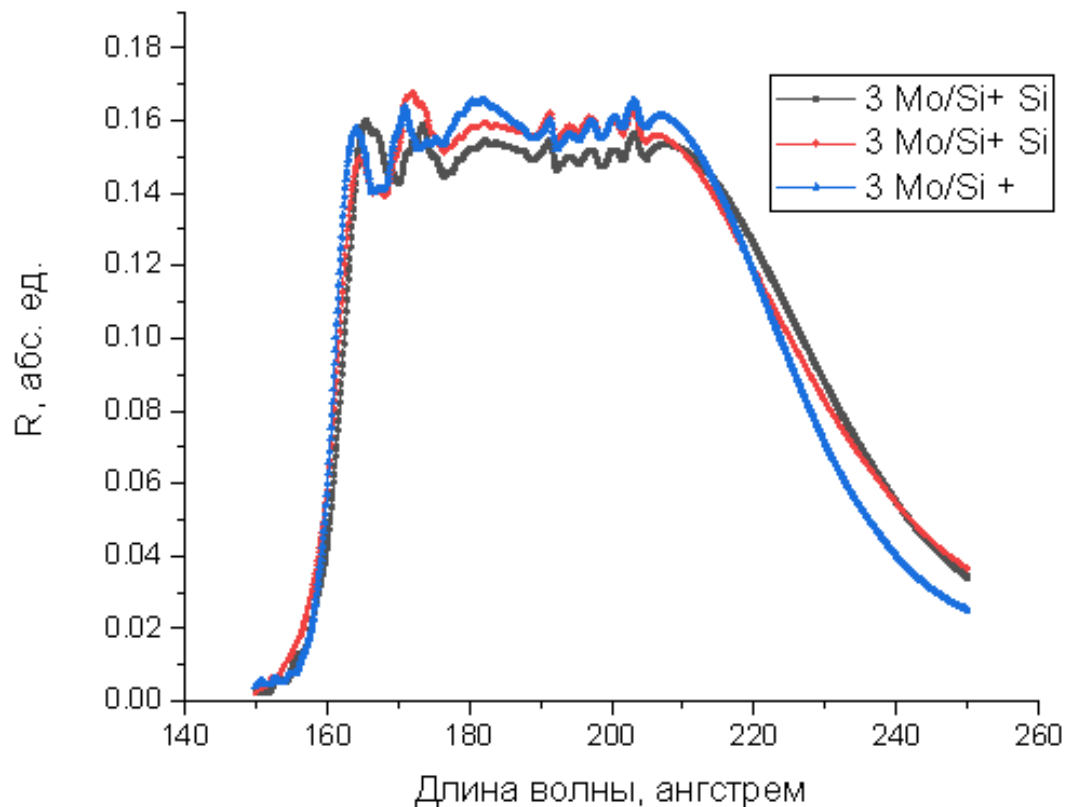
Yao Y., Kunieda H. and Z. Wang. Optics Express, 21, 7, 8638 (2013)

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 +

$d(\text{Si}) = 1.5\text{nm}$

$N1 = 3, d1 = 10.84\text{nm}, 0.38$

$d(\text{Mo}) = 13.5\text{nm}$

$N2 = 3, d2 = 8.14\text{ nm}, 0.35$

$d(\text{Si}) = 1.3\text{nm}$

$N3 = 50, d3 = 8.9\text{nm}, 0.44$

3 Mo/Si+ Si

$d(\text{Si}) = 1.4\text{nm}$

$N1 = 3, d1 = 11.1\text{nm}, 0.35$

$N2 = 3, d2 = 8.77\text{nm}, 0.36$

$N3 = 35, d3 = 9.12\text{nm}, 0.52$

3 Mo/Si+ Si

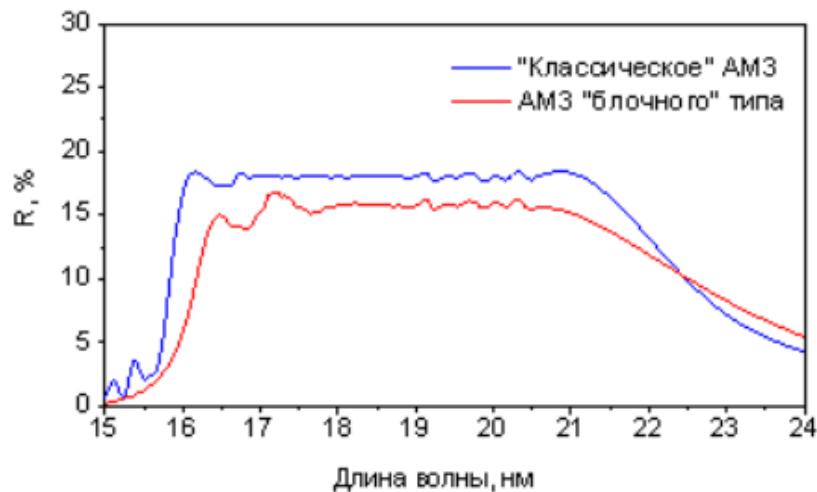
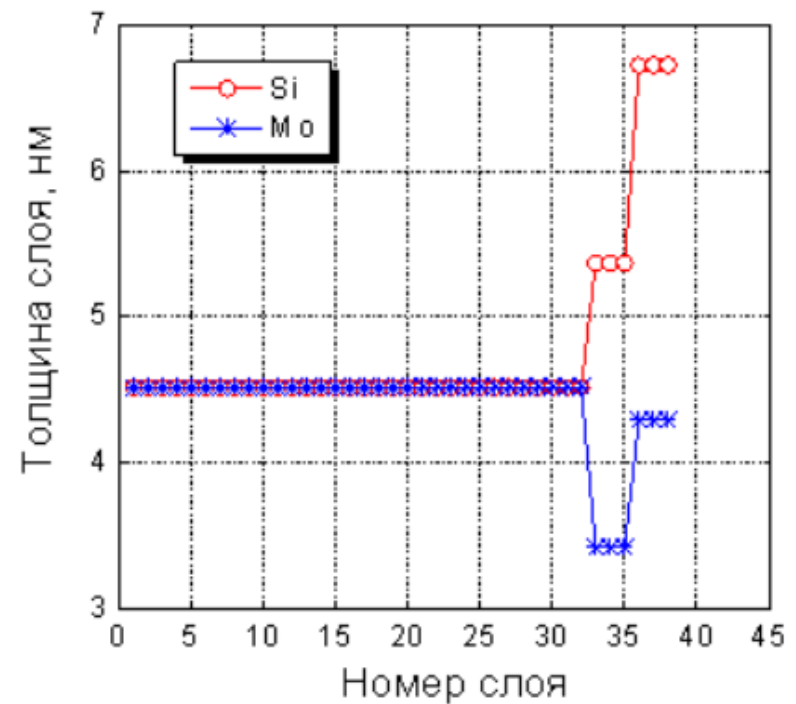
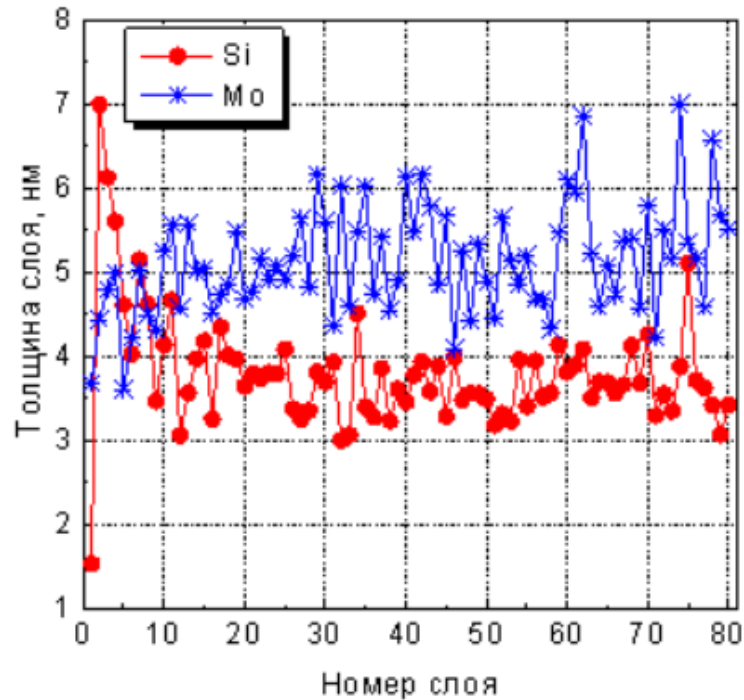
$d(\text{Si}) = 1.4\text{nm}$

$N1 = 3, d1 = 11.02\text{nm}, 0.39$

$N2 = 3, d2 = 8.8\text{ nm}, 0.39$

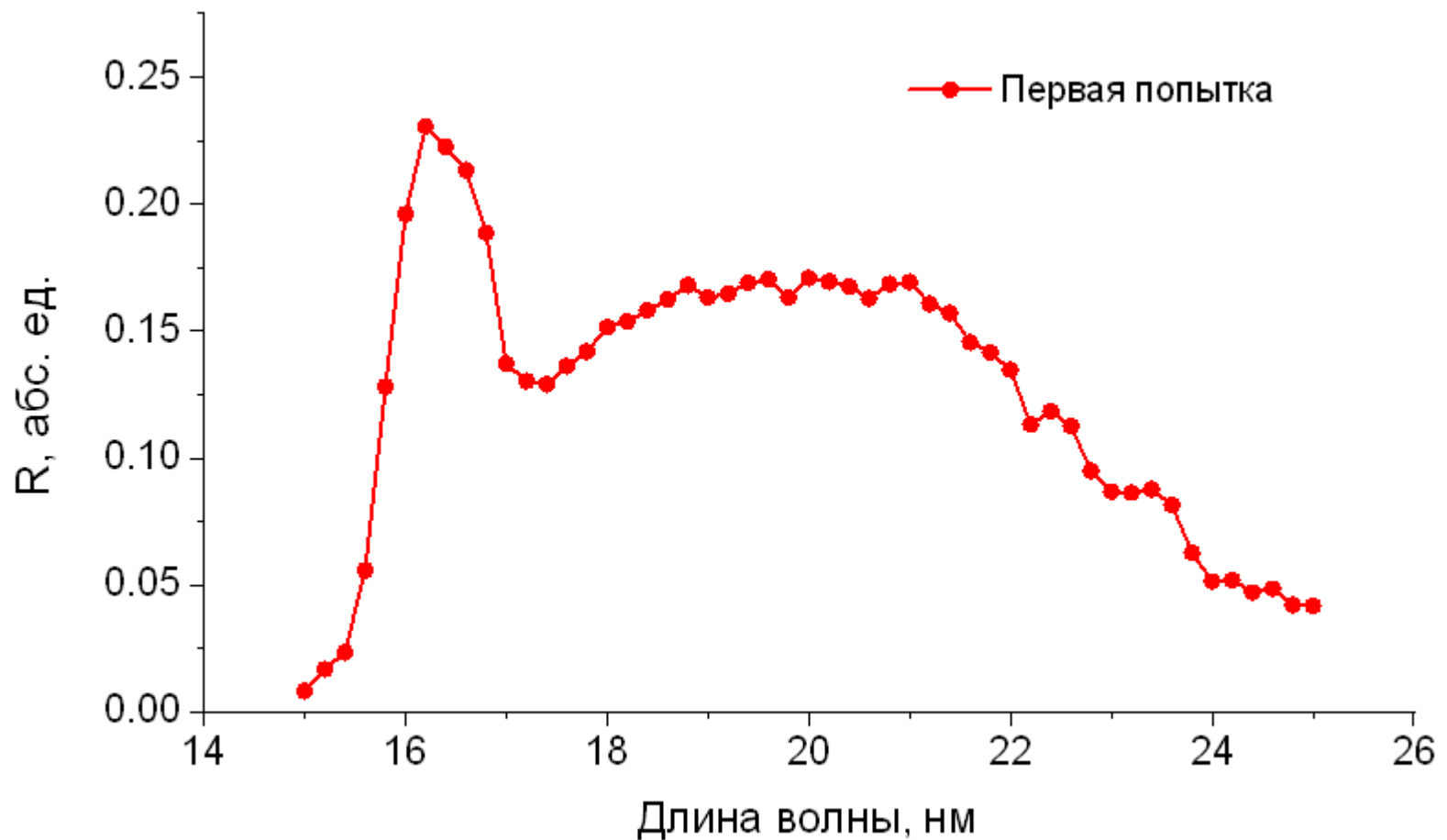
$N3 = 32, d3 = 9.04\text{nm}, 0.5$

Классическое и «блочное» АМЗ



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

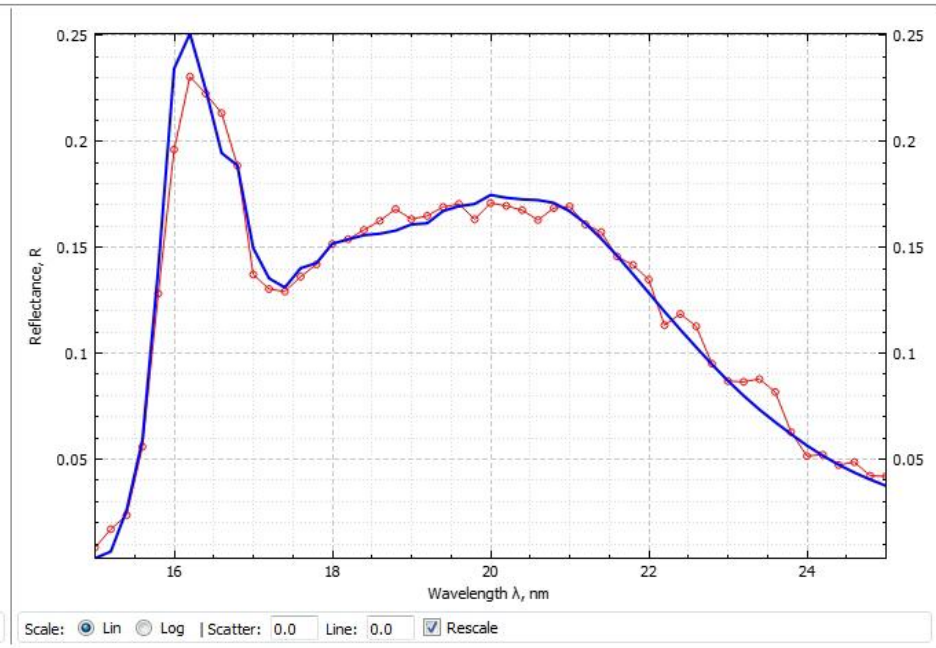
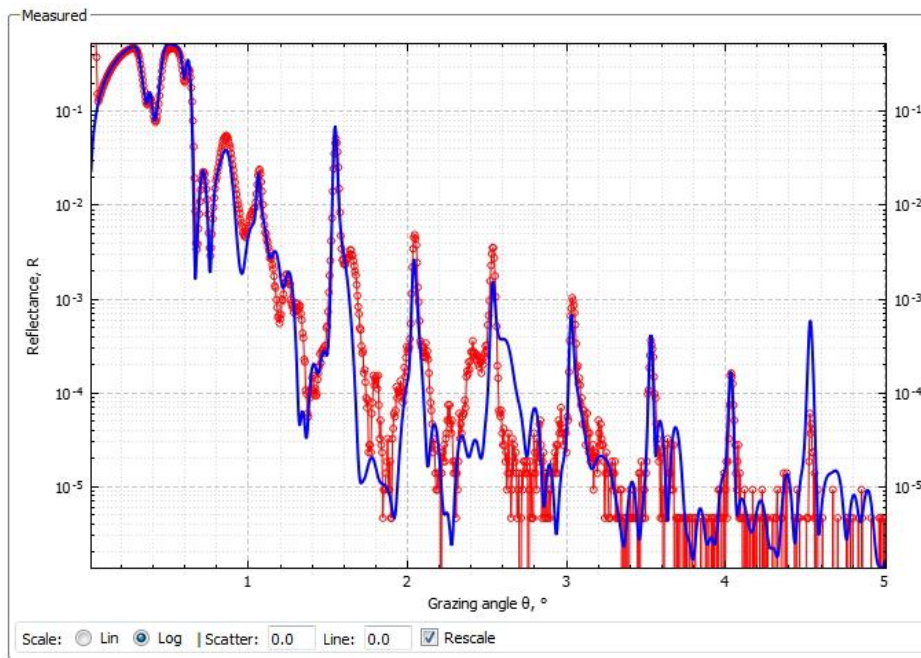
Первая итерация...



Что дальше?

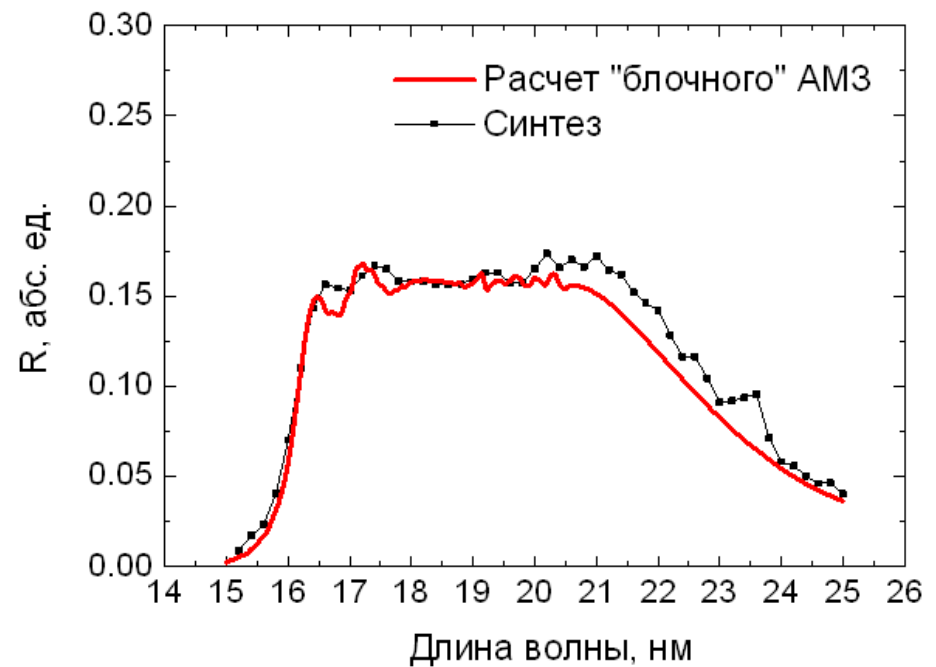
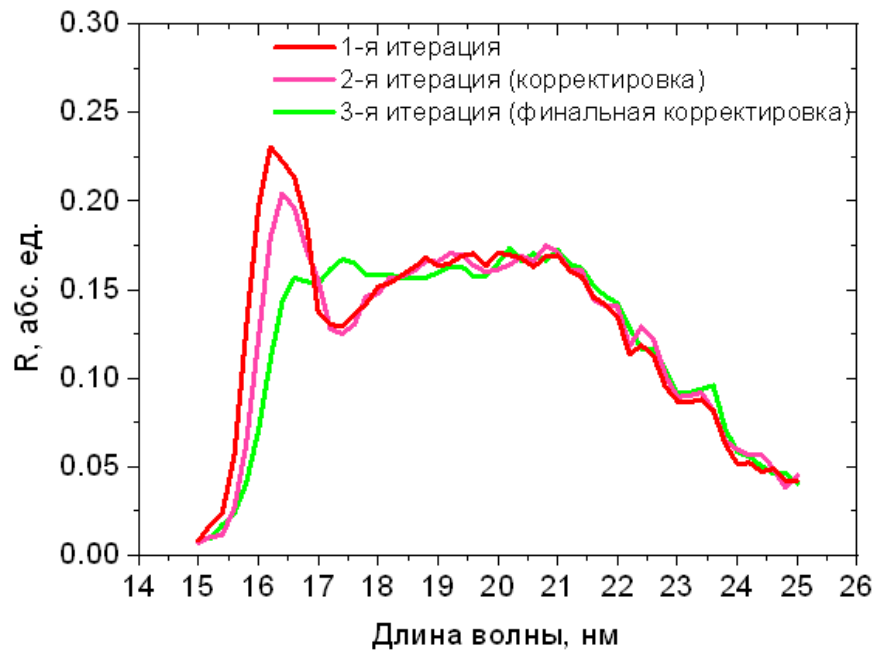
Обратная задача

Восстановление параметров стековой Mo/Si структуры программа «Multifitting»



Обратная задача

Процесс корректировки параметров стековой Mo/Si структуры

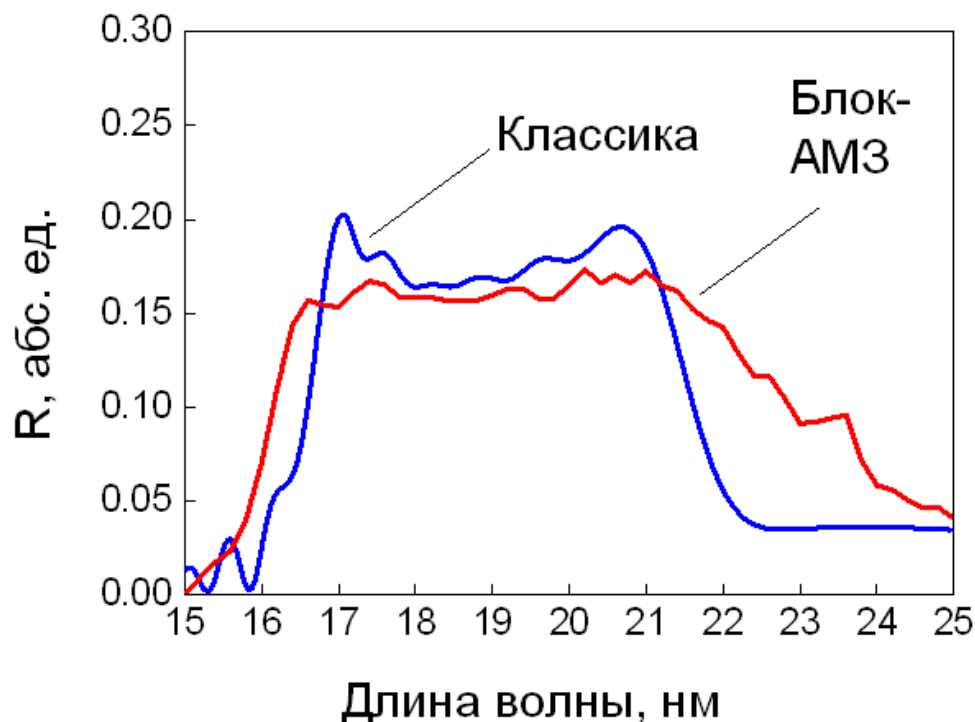


Обратная задача

Таблица. Восстановленные параметры
стековой Mo/Si структуры

Номер стека от подложки	N	Расчет	Первичная структура	1-я коррекция	Финальная коррекция
пленка Si	1	$h_{Si} = 1.40 \text{ нм}$	$h_{Si} = 1.40 \text{ нм}$	$h_{Si} = 1.40 \text{ нм}$	$h_{Si} = 1.40 \text{ нм}$
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	$h_{Mo} = 4.50 \text{ нм}$	$h_{Mo} = 4.30 \text{ нм}$	$h_{Mo} = 4.40 \text{ нм}$	$h_{Mo} = 4.52 \text{ нм}$
		$h_{Si} = 4.50 \text{ нм}$	$h_{Si} = 4.30 \text{ нм}$	$h_{Si} = 4.40 \text{ нм}$	$h_{Si} = 4.52 \text{ нм}$

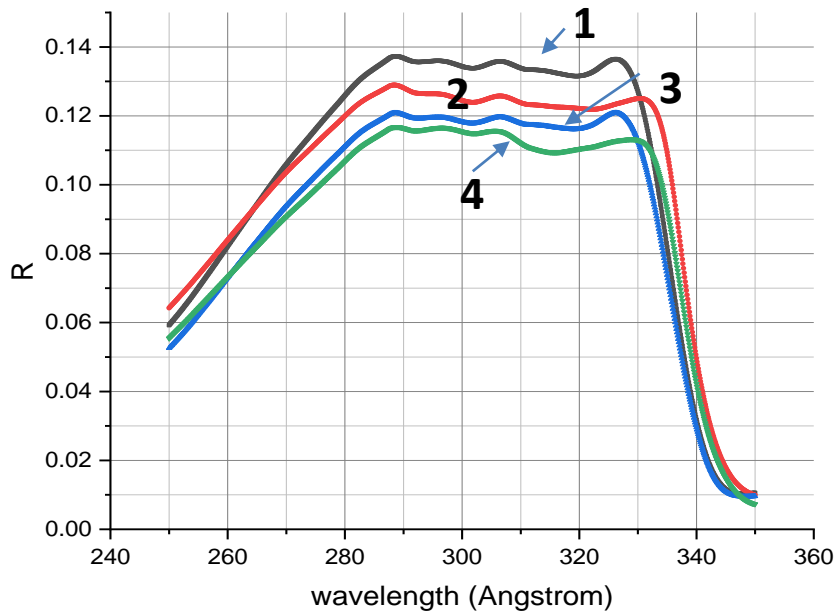
Сравнение подходов



Измеренные спектральные зависимости коэффициента отражения классической апериодической и стековой структуры

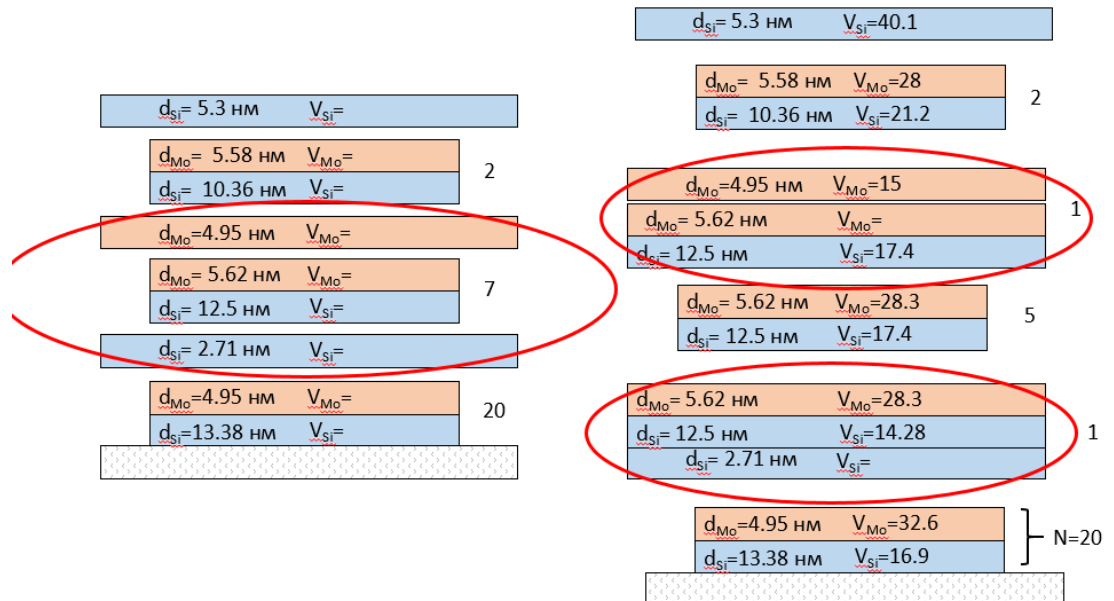
Для стековых структур удастся достичь равномерного отражения на уровне 16% при хорошей воспроизводимости результата. Незначительно проигрывая в теории апериодической структуре в величине R , стековое зеркало оказывается намного более выигрышным с точки зрения скорости изготовления и аттестации!

Блок-АМЗ Мо/Si 28-33 нм

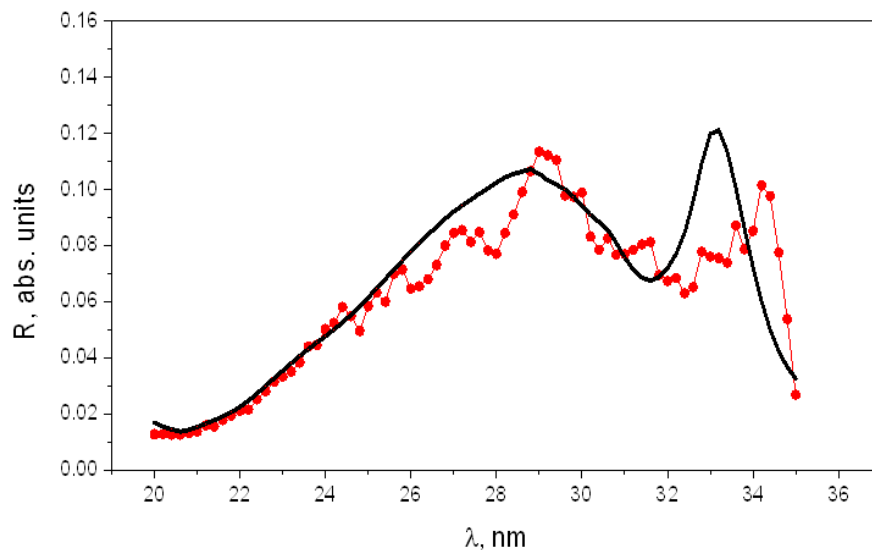
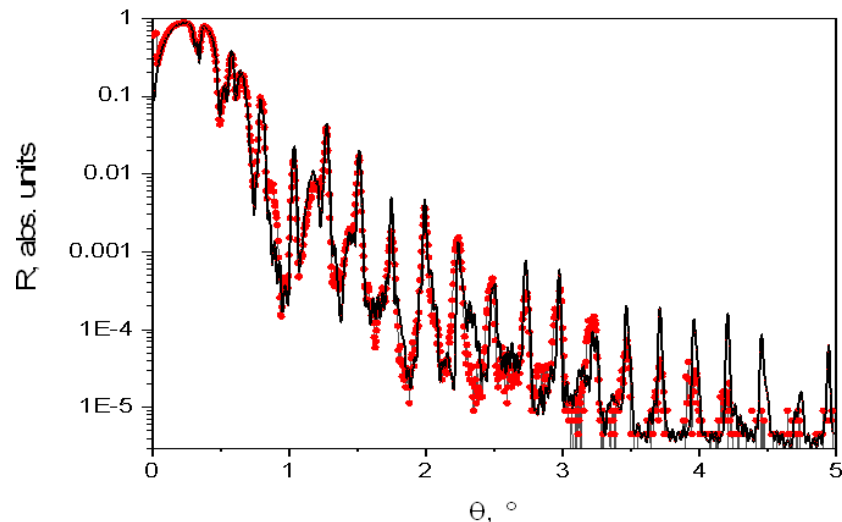


Линия 1 соответствует оптимизированной аperiodической Мо/Si структуре с нулевыми толщинами переходных областей, 3 – та же самая структура, для которой введены реальные значения ширин переходных областей 1.2 нм Мо – на – Si и 0.6 нм Si- на- Мо. Линия 2 – Блок-структура Мо/Si, оптимизированная при нулевых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

На практике удобно объединить прослойки с соседним слоем соответствующего материала



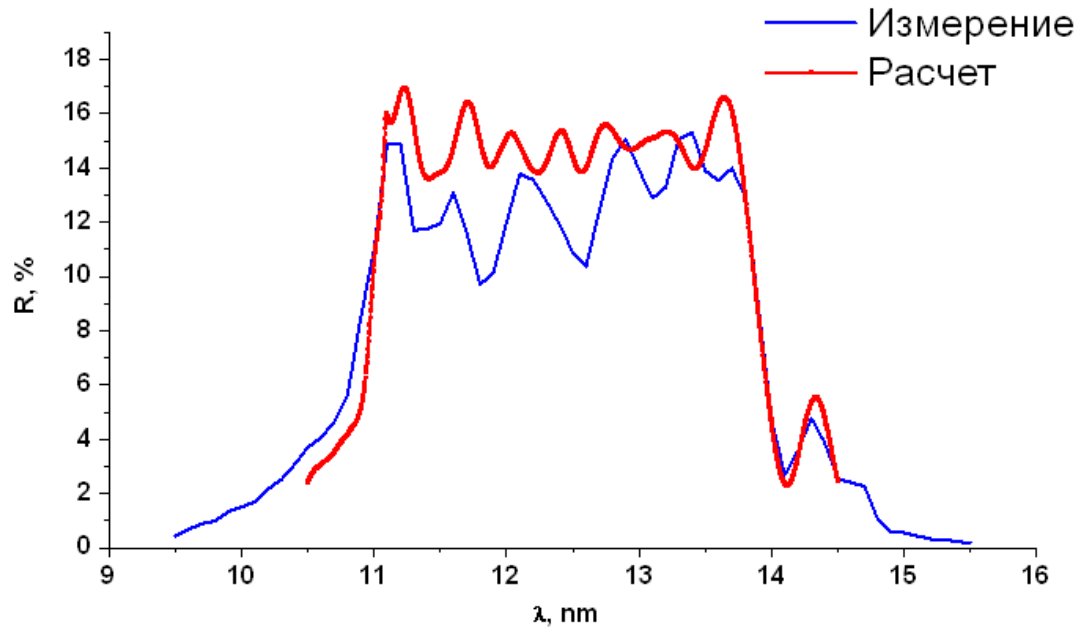
Блок-АМЗ 28-32 нм – первая проба



Номер ПМЗ от поверхности	Число периодов, N	Материал	Толщины слоев ПМЗ, nm	
			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

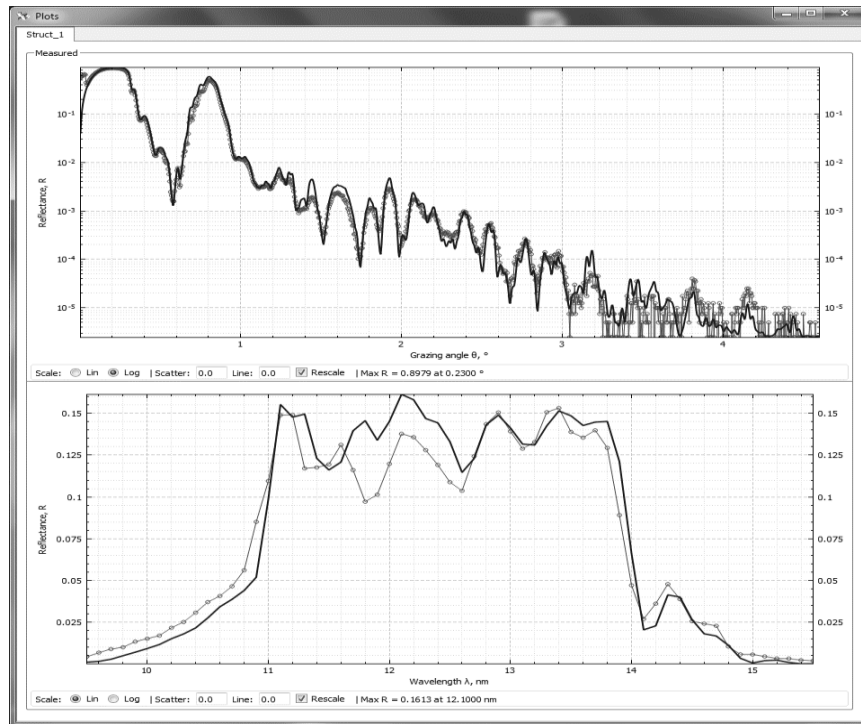
Блок-АМЗ Мо/Ве

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



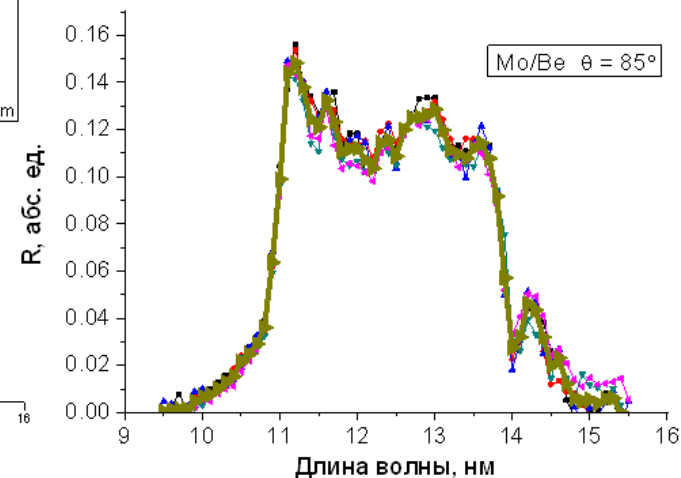
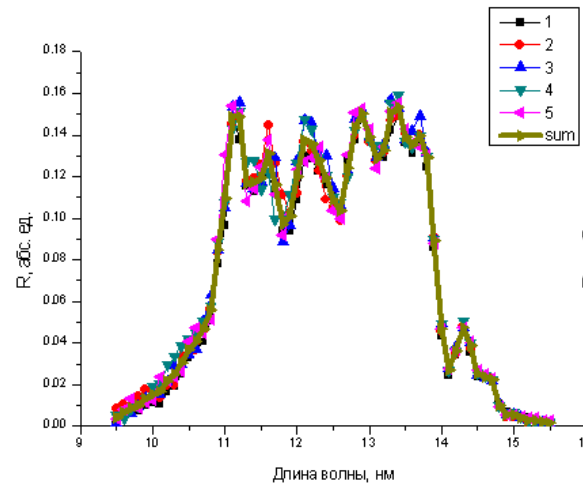
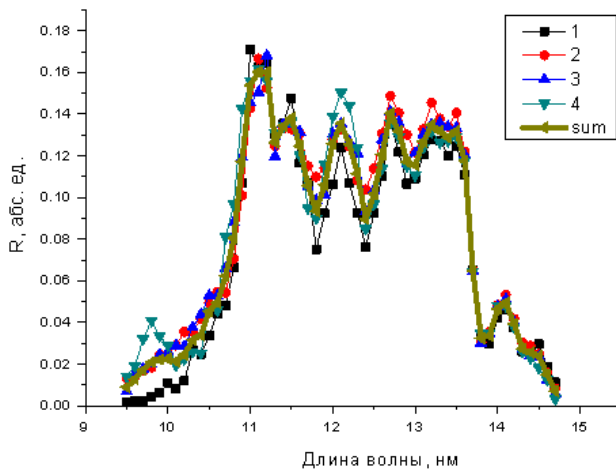
№	N	Толщины слоев ПМЗ, nm		
		Материал	Расчет	Эксперимент
1	2	Be	2.72	BeO: 1.43
		Mo	2.22	Be: 2.93
		Be		Mo: 2.22
		Mo		Be: 26.8
		Be		Mo: 2.26
		Mo		
2	4	Be	3.38	3.32
		Mo	2.25	2.31
3	6	Be	2.95	2.87
		Mo	3.07	3.19
4	8	Be	3.08	3.02
		Mo	3.33	3.41
5	1	Be	3.20	3.18
		Mo	3.75	3.82
6	0	Be	3.05	2.93
		Mo	4.38	4.54

Блок-АМЗ Мо/Ве



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

Дальнейшая корректировка:



Спасибо за внимание!