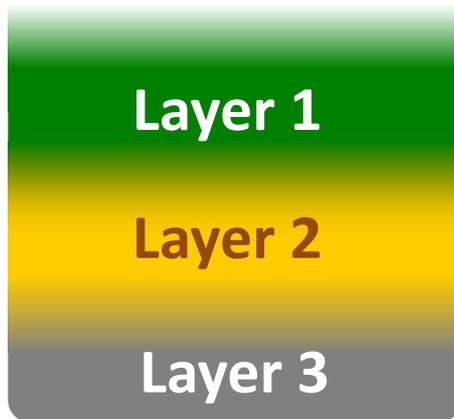
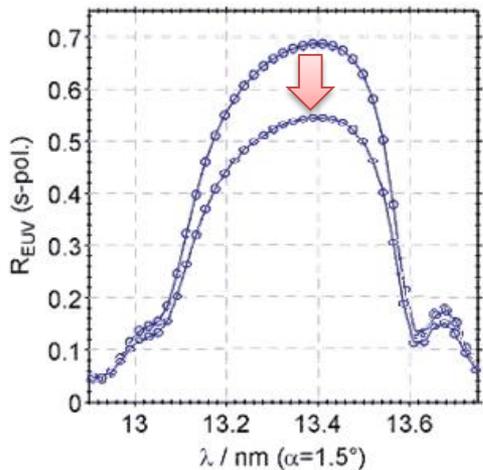




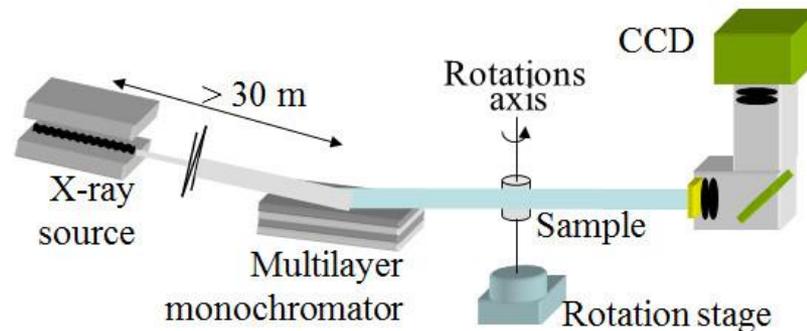
Управление составом и протяженностью межфазных границ в многослойных рентгеновских зеркалах с целью повышения их отражательной способности

Е.О. Филатова, С.С. Сахоненков, А.У. Гайсин, В.Н. Полковников

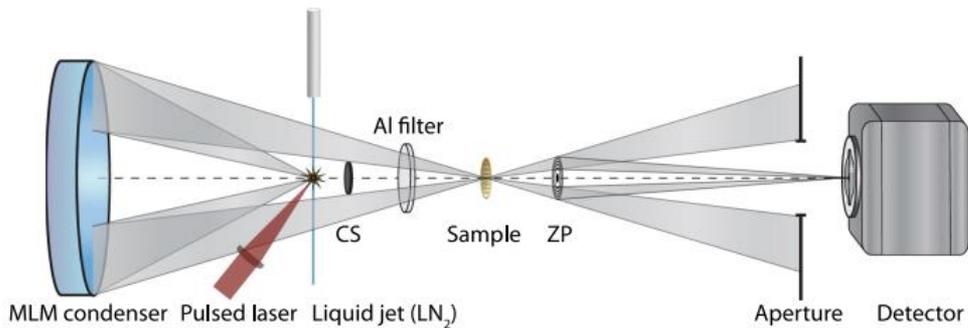
XXVII международный симпозиум «Нанопизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, 13-16 марта 2022



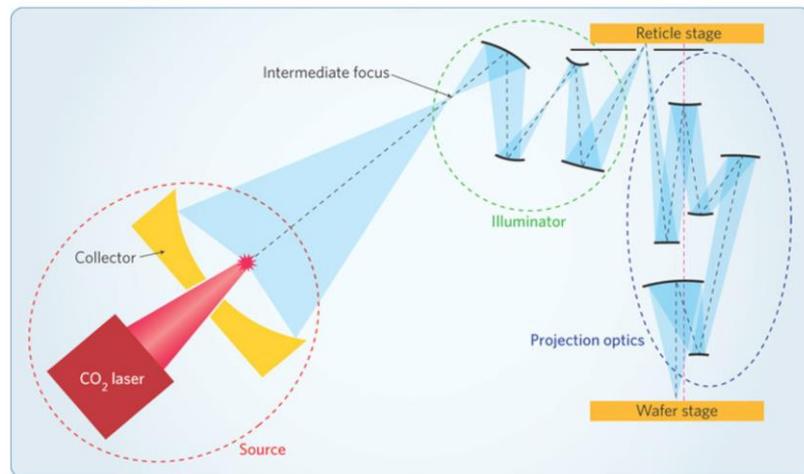
Синхротронное излучение



Микроскоп для «окна прозрачности воды»

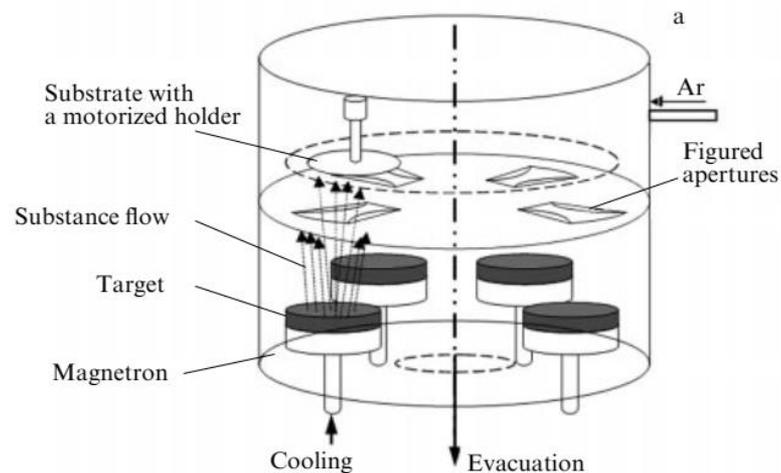
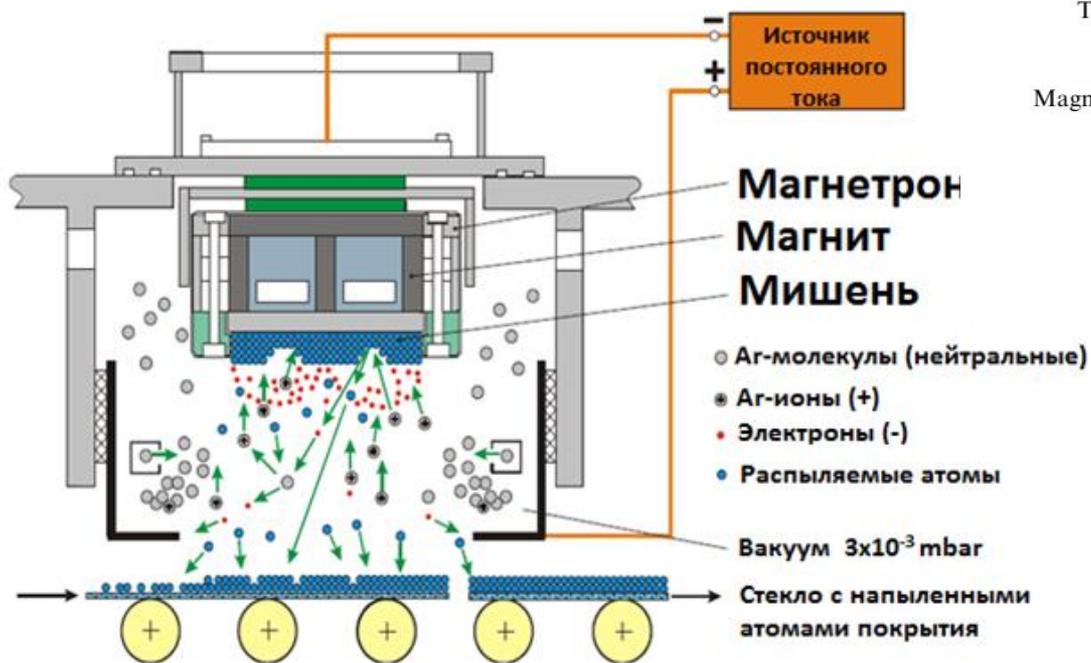


ЭУФ литография





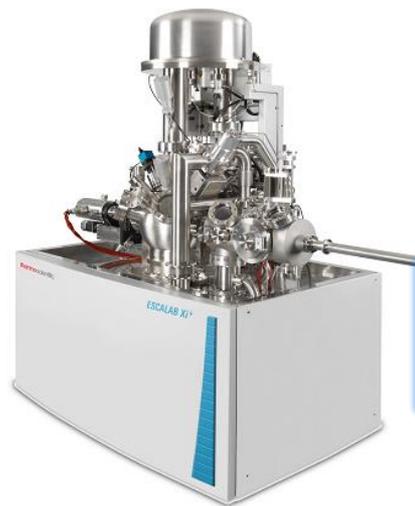
Магнетронное распыление



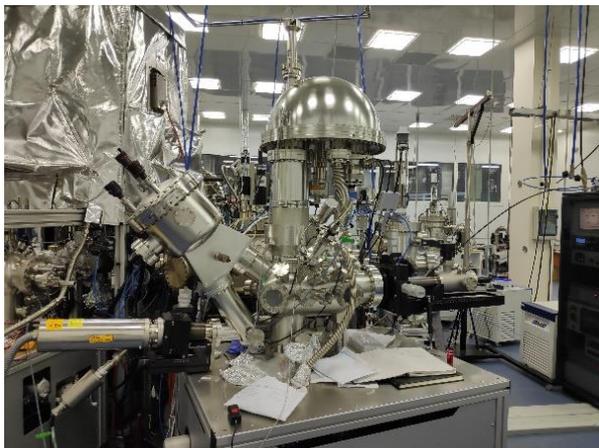
Оборудование ИФМ РАН



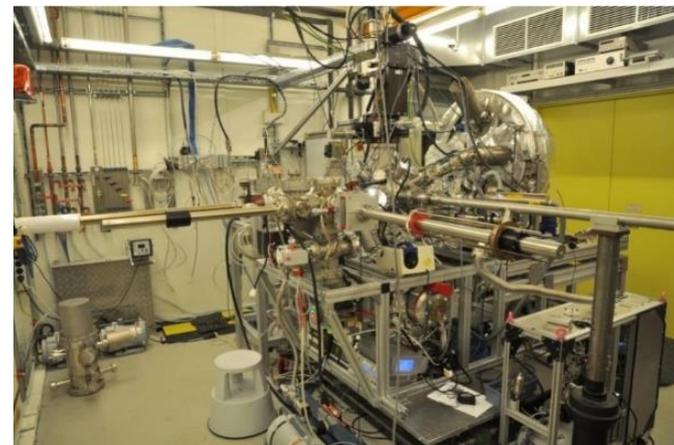
Используемое оборудование: *фотоэлектронная спектроскопия*



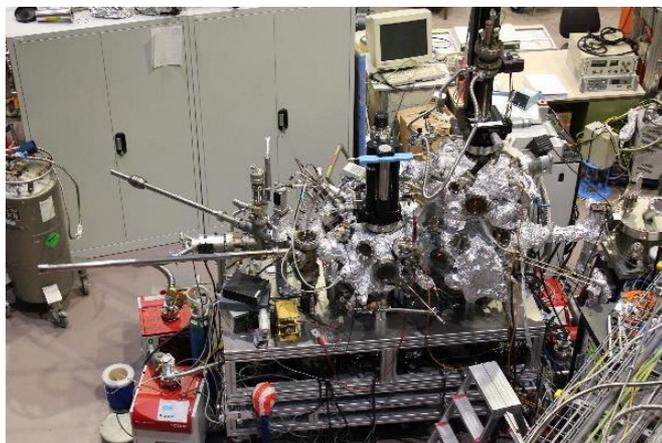
ESCALab 250 Xi
РЦ «ФМИП»
Научный парк СПбГУ



Модуль «ЭСХА»
НИЦ «Курчатовский институт»



P22 HAXPES
PETRA-III



RGL-PES
BESSY-II

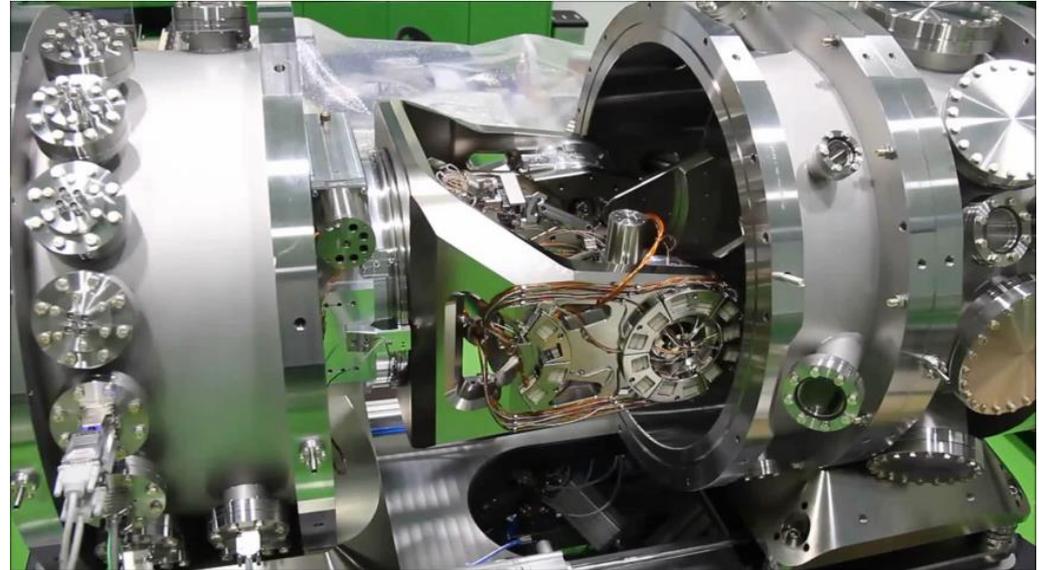


$$h\nu = 8040 \text{ эВ}$$



PANalytical X'Pert PRO
MRD
ИФМ РАН

$$h\nu = 200 - 2000 \text{ эВ}$$



Reflectometer
BESSY-II



Zeiss Libra 200FE
МРЦ по направлению «Нанотехнологии»
Научный парк СПбГУ



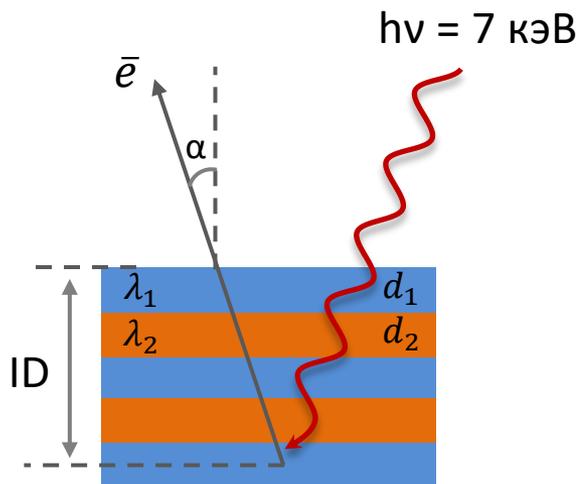
В случае многослойной структуры:

$$n = -\ln(1 - P) / \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} \right) / \cos \alpha$$

$$ID = (d_1 + d_2) \cdot n$$

n – число периодов многослойной структуры, в которых формируется доля P спектра, d – толщина слоя

Расчеты для Be 1s фотоэлектронов



Образец	Структура	d, нм	d_{Be}/d	E_{hv} , кэВ	n	ID, нм
VP-495	W/Be	2.5	0.56	7	11	26.9
PR-454	W/Be	3.2	0.81	7	10	31.5
PR-418	Cr/Be	2.1	0.67	7	15	31.4

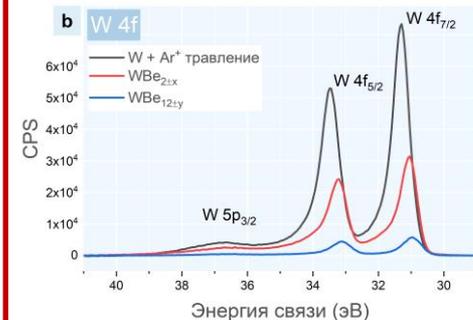
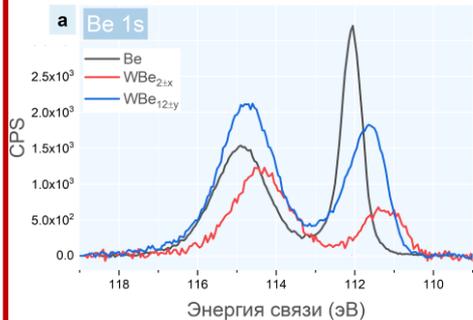


1. Эталонные пленки металлов и их соединений;
2. Модельные структуры (тонкий слой материала, нанесенный на поверхность относительно толстого слоя другого материала; две серии образцов -прямая и инверсная.
3. Модельные структуры прямые [A/S] и инверсные [S/A] с разным числом периодов (одно-, двух-, трех- и четырехпериодные) с тем, чтобы отследить влияние числа периодов на состав и протяженность межфазной границы.
4. Модельные однопериодные структуры прямые [A/B/S] и инверсные [S/B/A] (B-барьерный слой) с целью установления влияния материала барьерного слоя на формирование каждой межфазной границы в отдельности.
5. Модельные образцы возможных соединений, образующихся на межфазных границах.



Пример модельных систем W/Be

Эталонные образцы



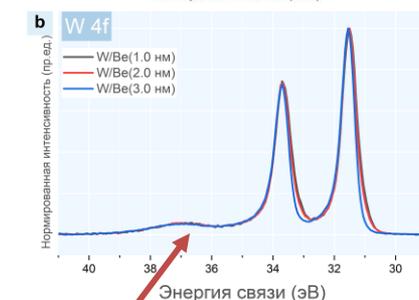
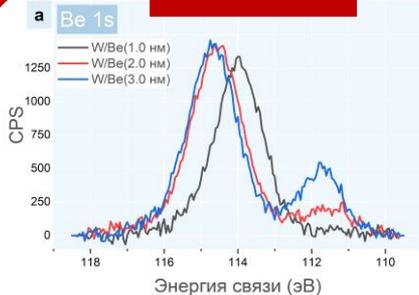
X (40 нм)
Si

	E_b , эВ
Be	112.0
WBe_{12}	111.7
WBe_2	111.2

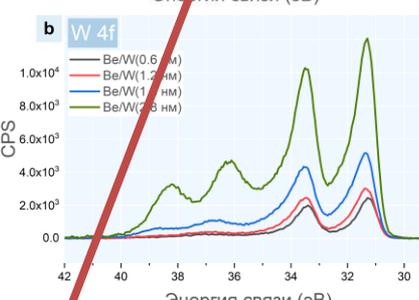
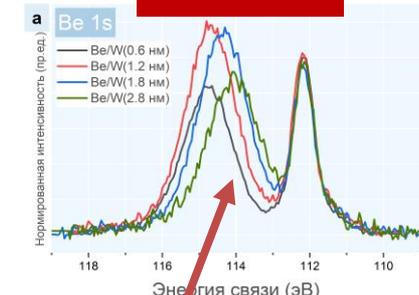
	E_b , эВ
W	31.3
WBe_{12}	31.0
WBe_2	30.9

В бериллидах релаксационная составляющая преобладает над химической составляющей

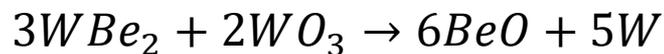
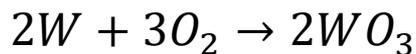
Si/W/Be



Si/Be/W



Сформированный BeO выступает в качестве защитного слоя и препятствует окислению W. Равновесный химический процесс, протекающий до образования толстого BeO_x .

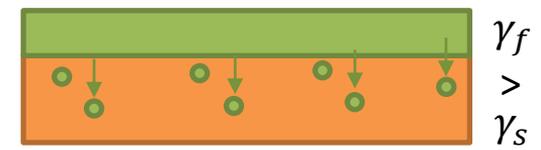
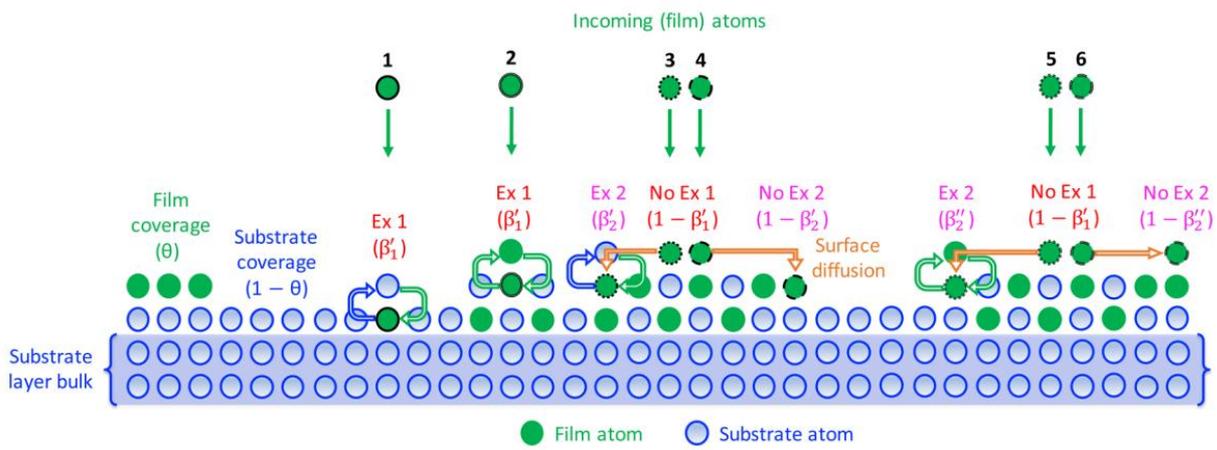




1. Анализ возможных химических реакций между материалами основных слоев и продуктов их взаимодействия.
2. Рассмотрение перемешивания атомов соседних слоев с позиций обменного процесса между атомами пленки и подложки в процессе роста пленки.

Модель формирования перемешанной зоны

Процесс обмена между осаждаемыми атомами и атомами подложки.



Эффективная ширина перемешанного слоя:

$$\sigma = 1.7A(1 + e^{-B(\gamma_s - \gamma_f)})$$

$$\bar{\gamma}_W = 3.34 \text{ Дж/м}^2$$

$$\bar{\gamma}_{Cr} = 3.35 \text{ Дж/м}^2$$

$$\bar{\gamma}_{Be} = 1.9 \text{ Дж/м}^2$$

Процесс обмена включает два механизма:

- баллистические столкновения между налетающими и поверхностными атомами;
- минимизация свободной поверхностной энергии системы за счет обмена позициями поверхностных и приповерхностных атомов.



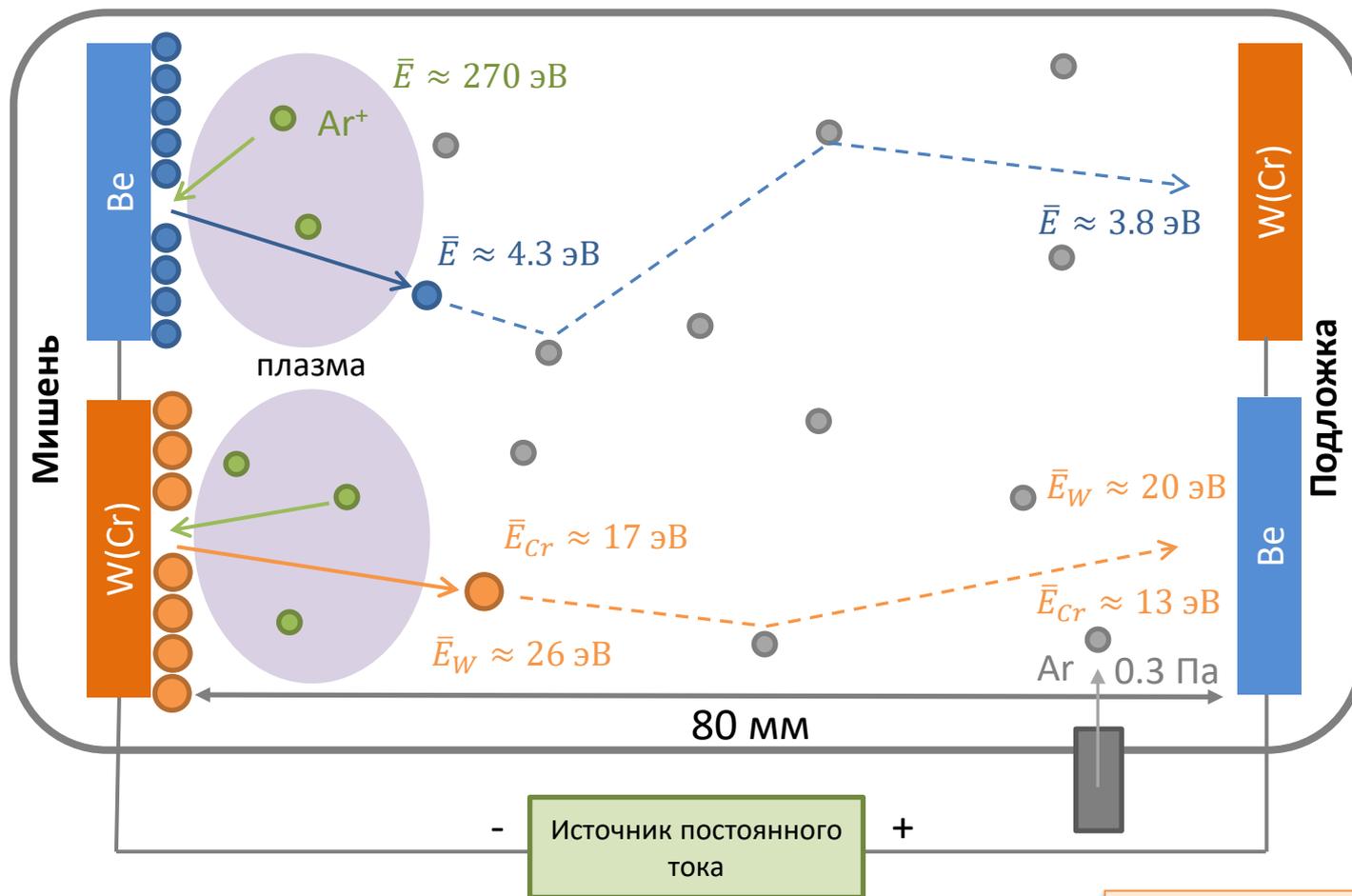
Механизмы образования переходных областей

Оценка баллистических столкновений

1. Распыление мишени

2. Движение распыленных атомов в газе

3. Осаждение



	\bar{d} , нм
$Be \rightarrow W$	≈ 0.5
$Be \rightarrow Cr$	≈ 0.5
$Cr \rightarrow Be$	≈ 0.7
$W \rightarrow Be$	≈ 1.5

При малых энергиях осаждаемых атомов перемешивание уменьшается, однако возрастает межслоевая шероховатость.

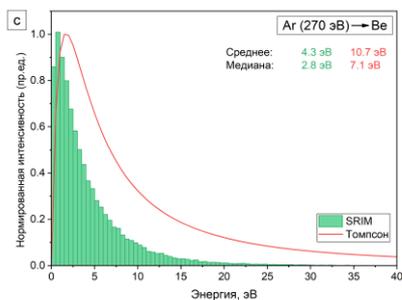
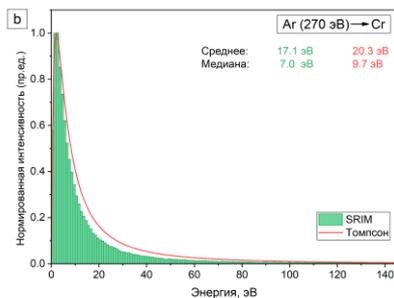
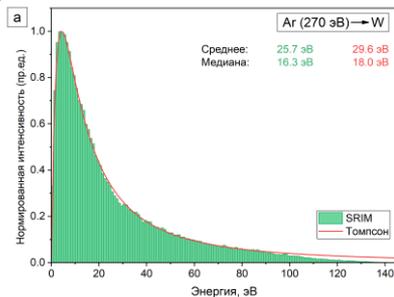
The **S**topping and **R**ange of **I**ons in **M**atter
Simulation of **M**etal **T**RAnsport



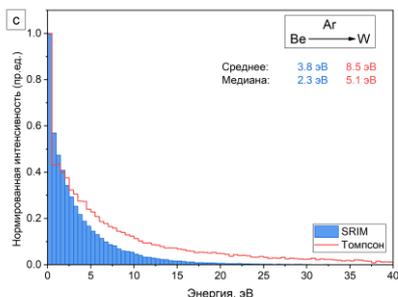
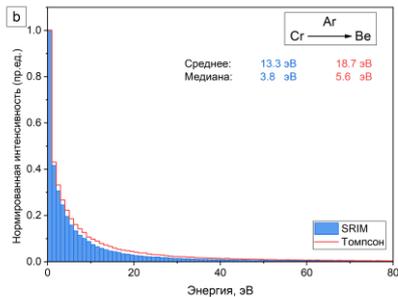
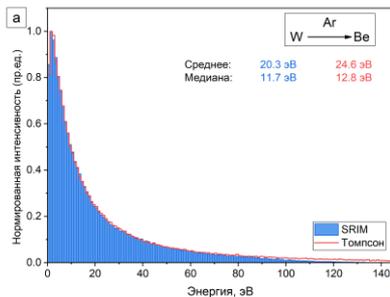
Механизмы образования переходных областей

Расчет баллистических столкновений

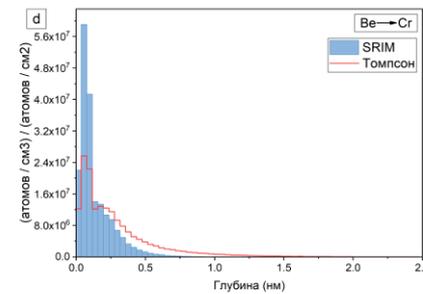
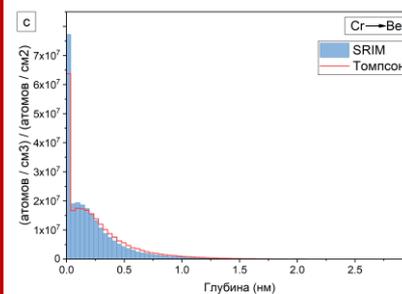
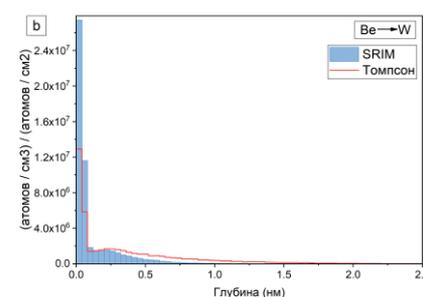
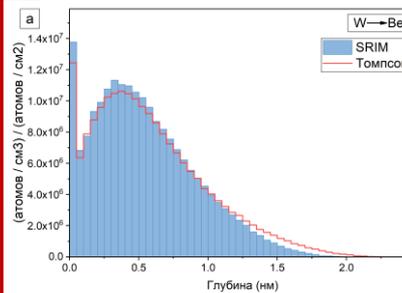
1



2



3

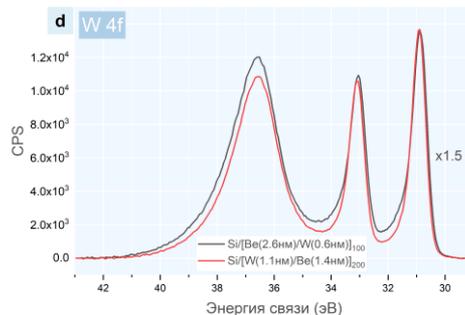
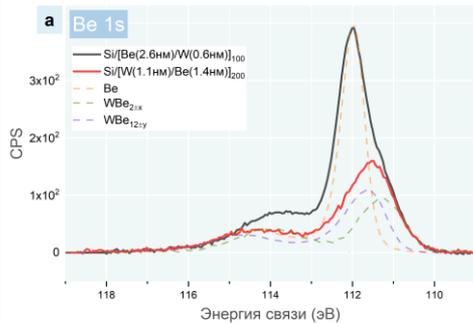


Осаждение **W-на-Be** приводит к сильному механическому перемешиванию с проникновением атомов в пленку на глубину до **2 нм**. В случае атомов **Cr** проникновение происходит на глубину до **1 нм**. Осаждаемые атомы **Be** проникают на глубину около **1-2 монослоя**.

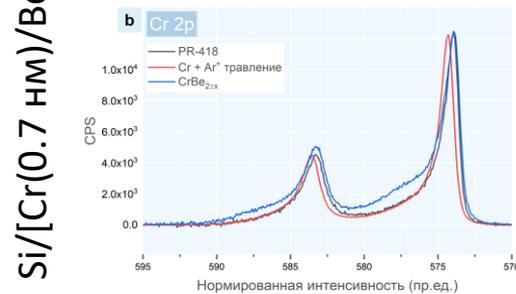
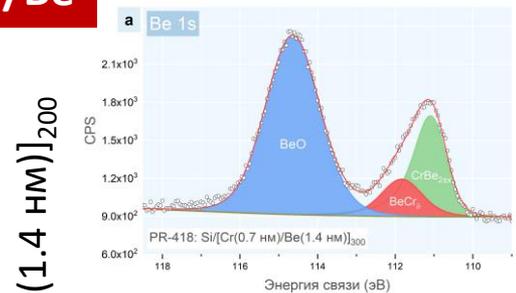


Многослойные зеркала Si/[W(Cr)/Be]

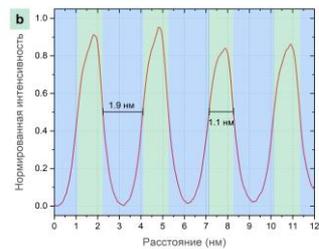
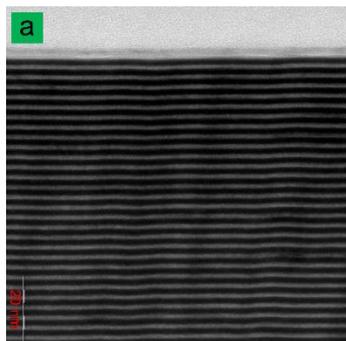
M3 W/Be



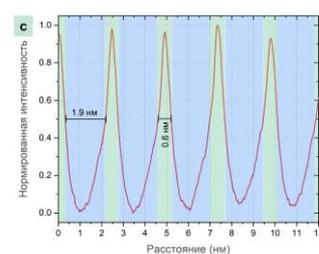
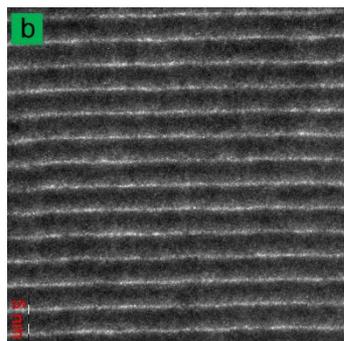
M3 Cr/Be



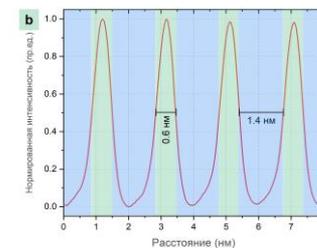
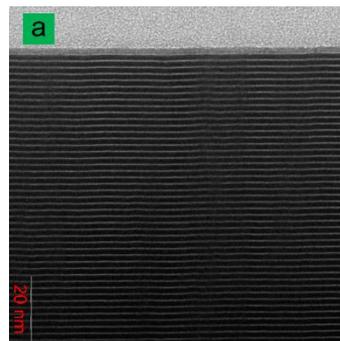
Si/[Be(2.6 nm)/W(0.6 nm)]₁₀₀



Si/[W(1.1 nm)/Be(1.4 nm)]₂₀₀



Si/[Cr(0.7 nm)/Be(1.4 nm)]₂₀₀

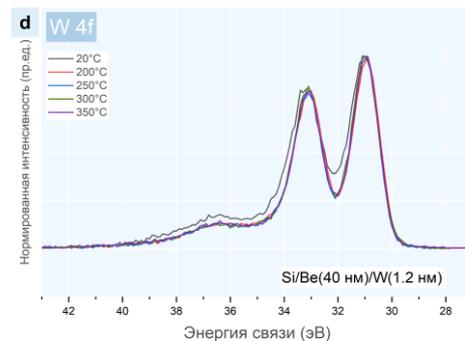
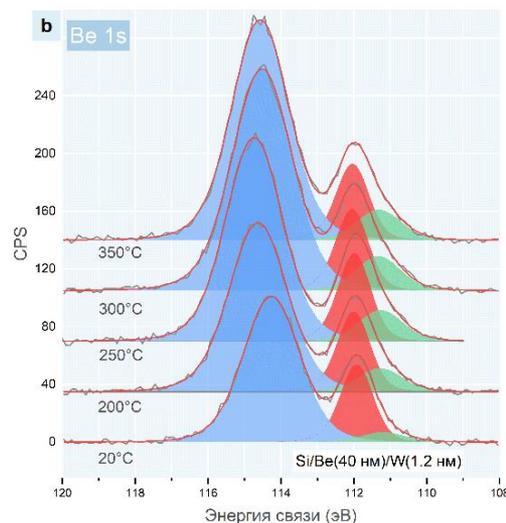
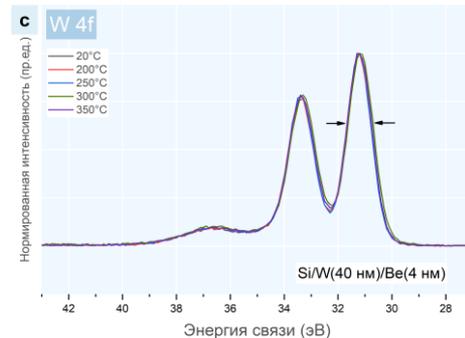
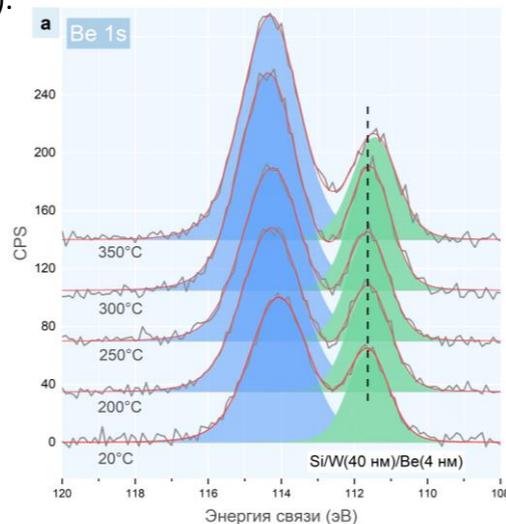
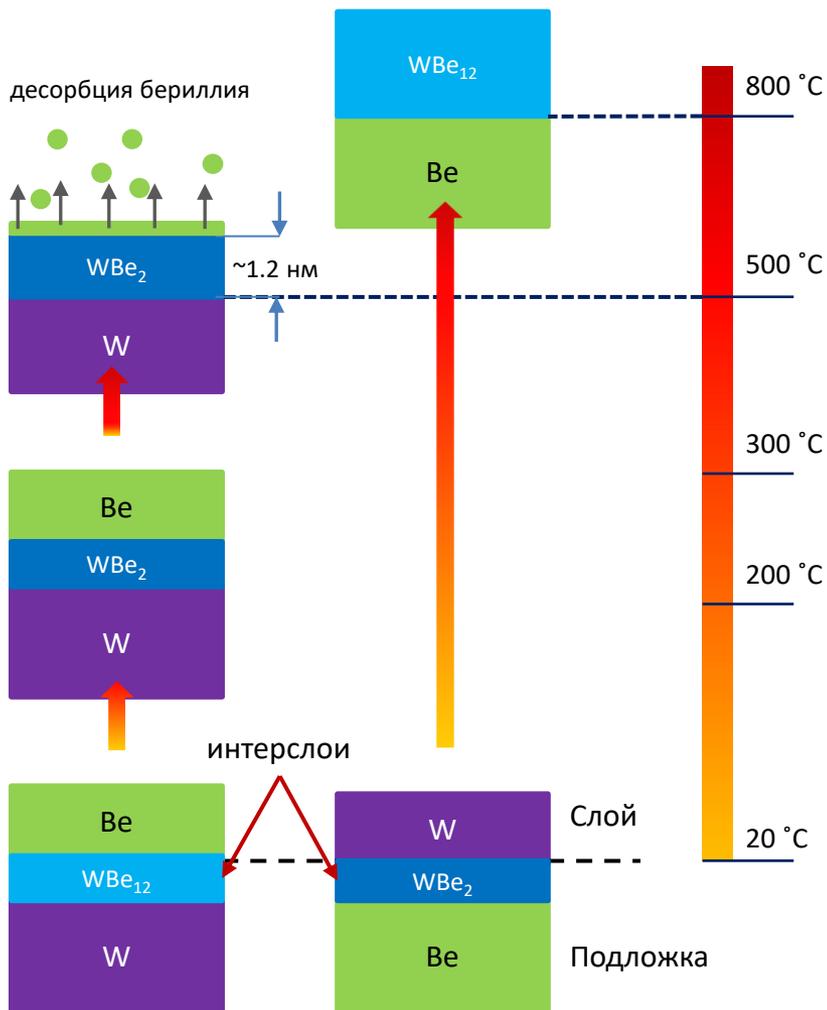




Отжиг модельных систем Si/W/Be и Si/Be/W

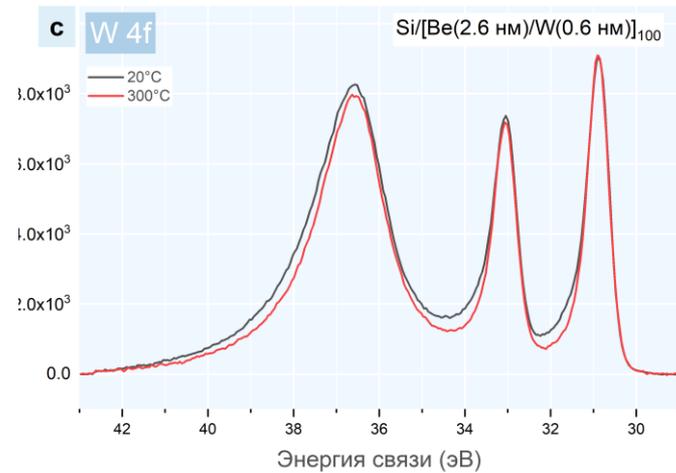
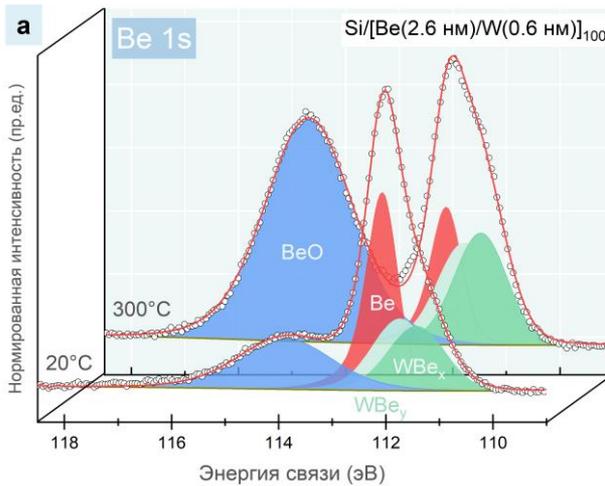
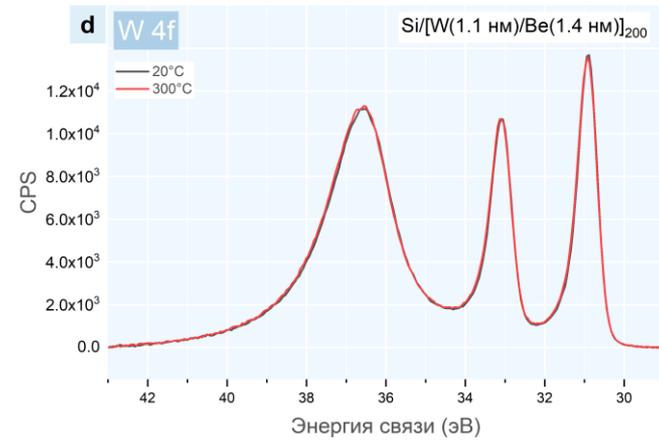
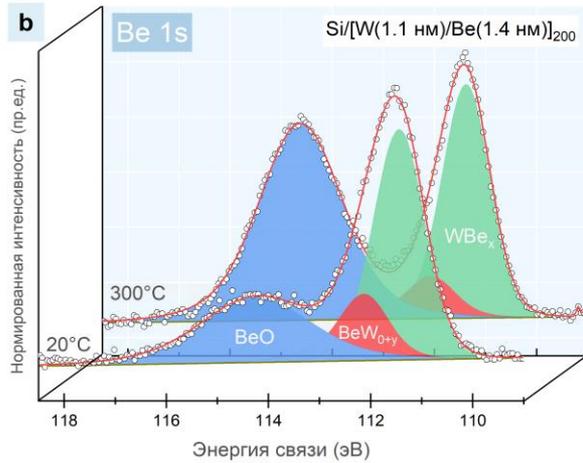
A. Wiltner, Ch. Linsmeier // New Journal of Physics, V. 8, 181 (2006).

A. Wiltner, F. Kost // Physica Scripta, T128, 133-136 (2007).



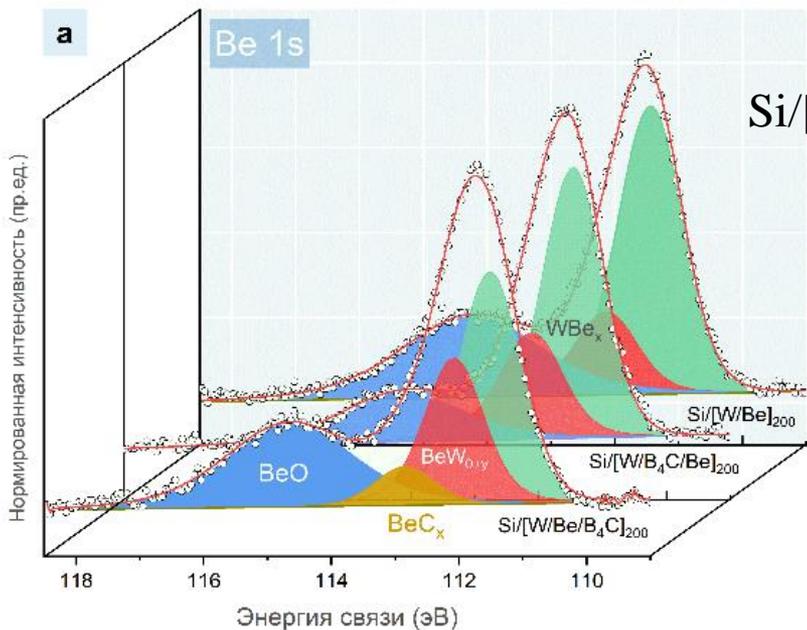


Отжиг при 300°C в течение 1200 минут



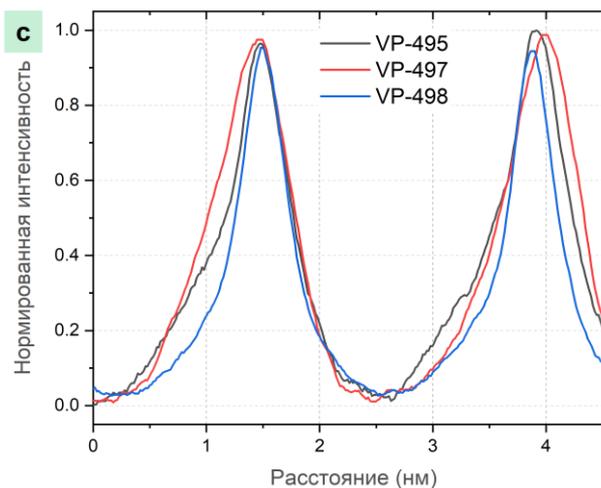
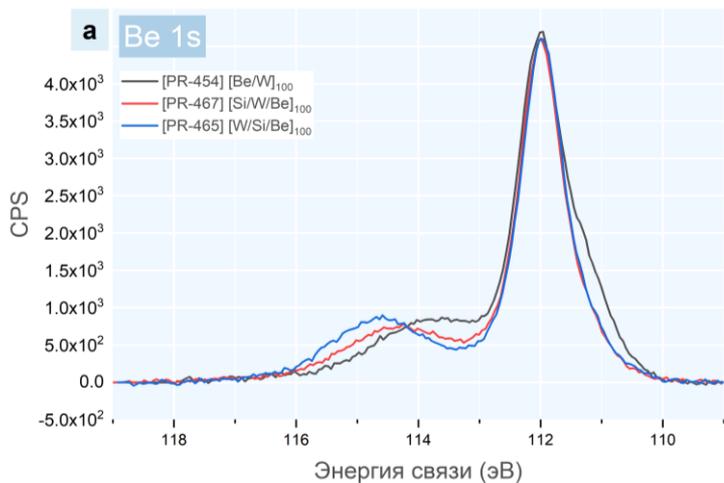
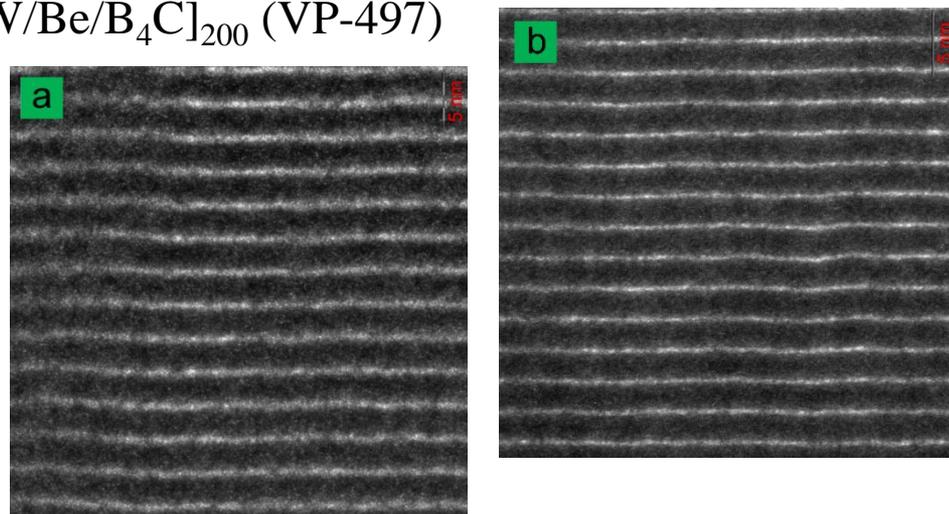


Использование барьерных слоев B_4C (Si) в системе W/Be



Si/[W/Be/B₄C]₂₀₀ (VP-497)

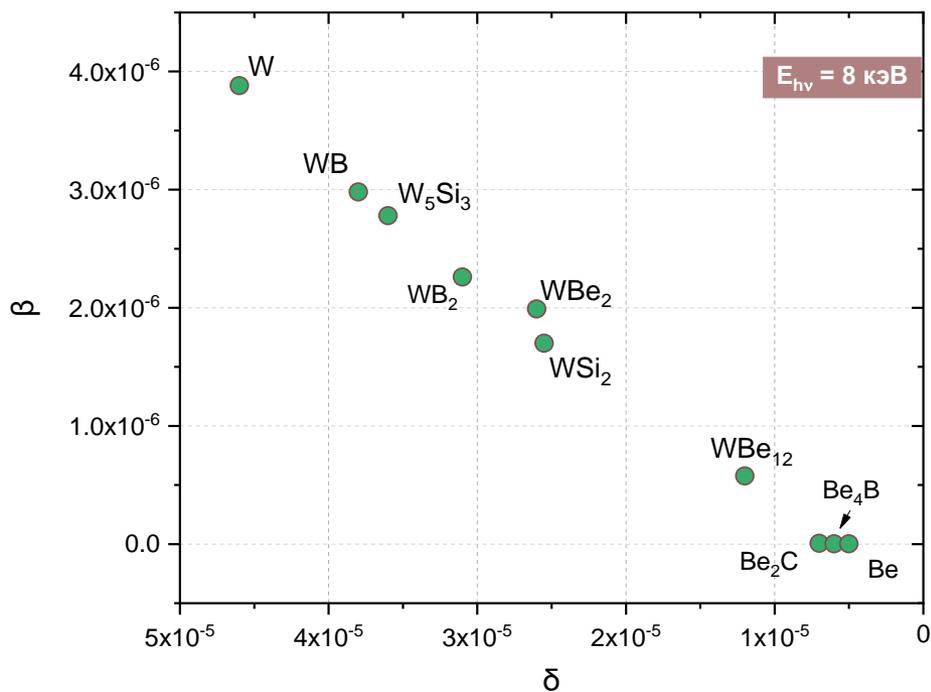
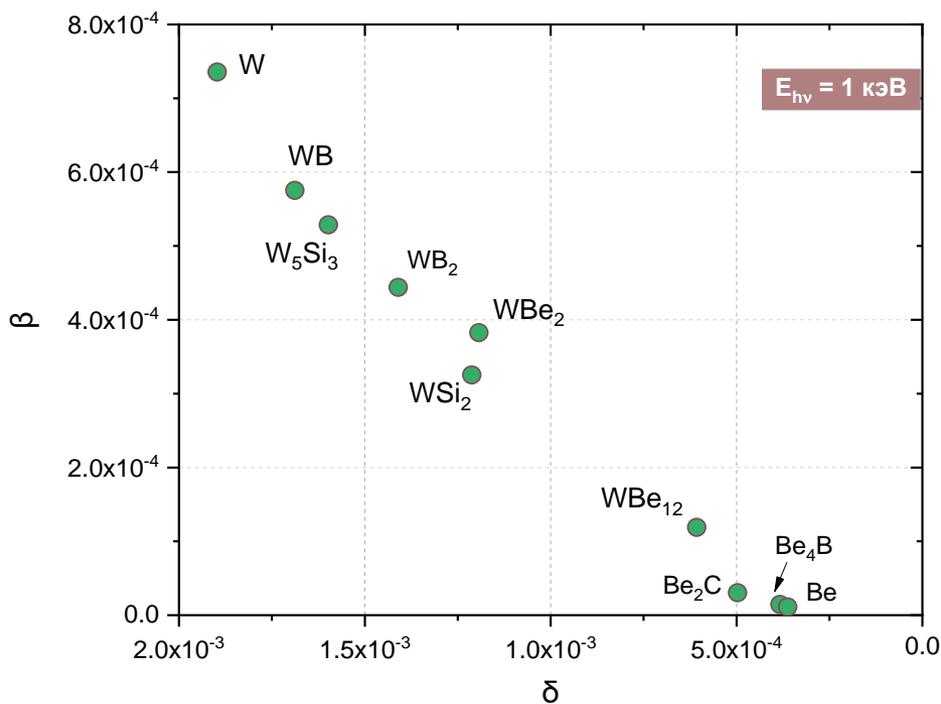
Si/[W/B₄C/Be]₂₀₀ (VP-498)





Оценка влияния соединений на оптические характеристики

$$\tilde{n} = 1 - \delta - i\beta = 1 - \left(\frac{N_a r_e \lambda^2}{2\pi} \right) (f_1 + if_2)$$



$$\frac{\delta_a - \delta_s}{\beta_a}$$



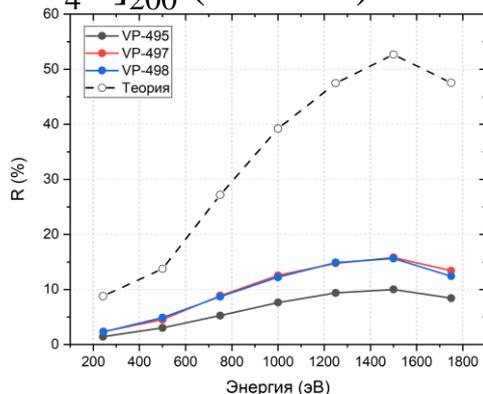
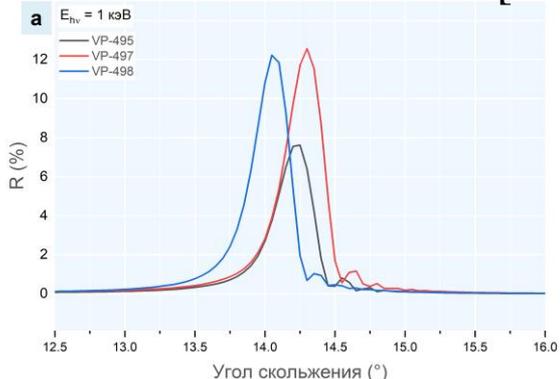
Отражательные характеристики зеркал

W/Be (d = 2.5 нм)

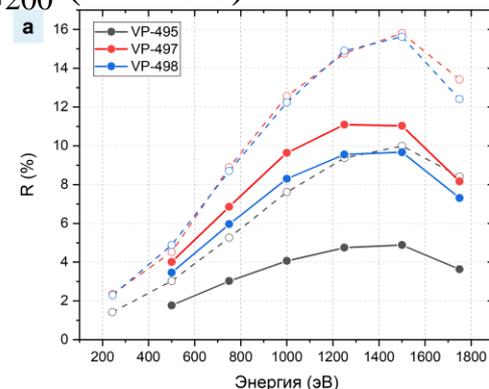
Введение W_4C улучшает отражательные характеристики

Si/[W/Be/ W_4C]₂₀₀ (VP-497)

Si/[W/ W_4C /Be]₂₀₀ (VP-498)

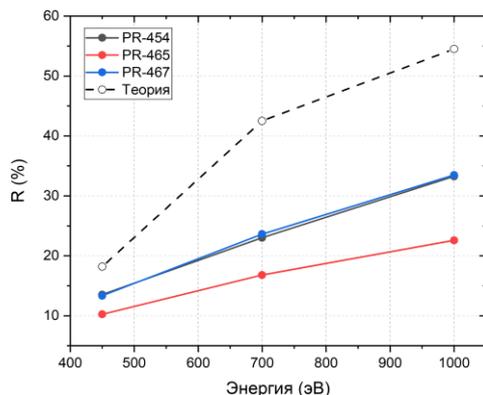
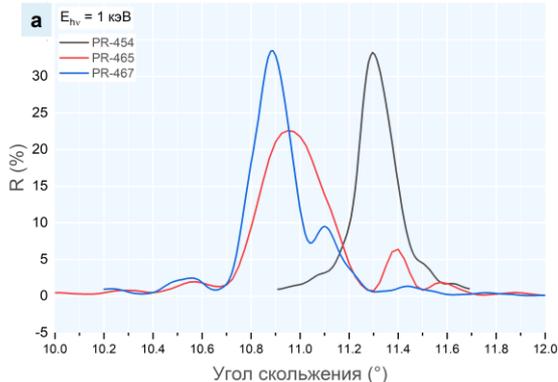


300°C
1200 мин

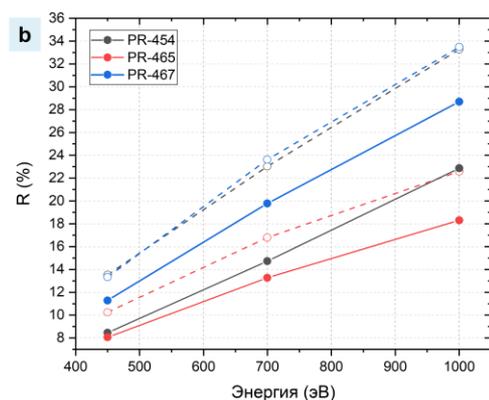


Введение W_4C и Si улучшает термическую стабильность систем W/Be, в большей степени при нанесении W_4C барьерного слоя на бериллий.

W/Be (d = 3.2 нм)

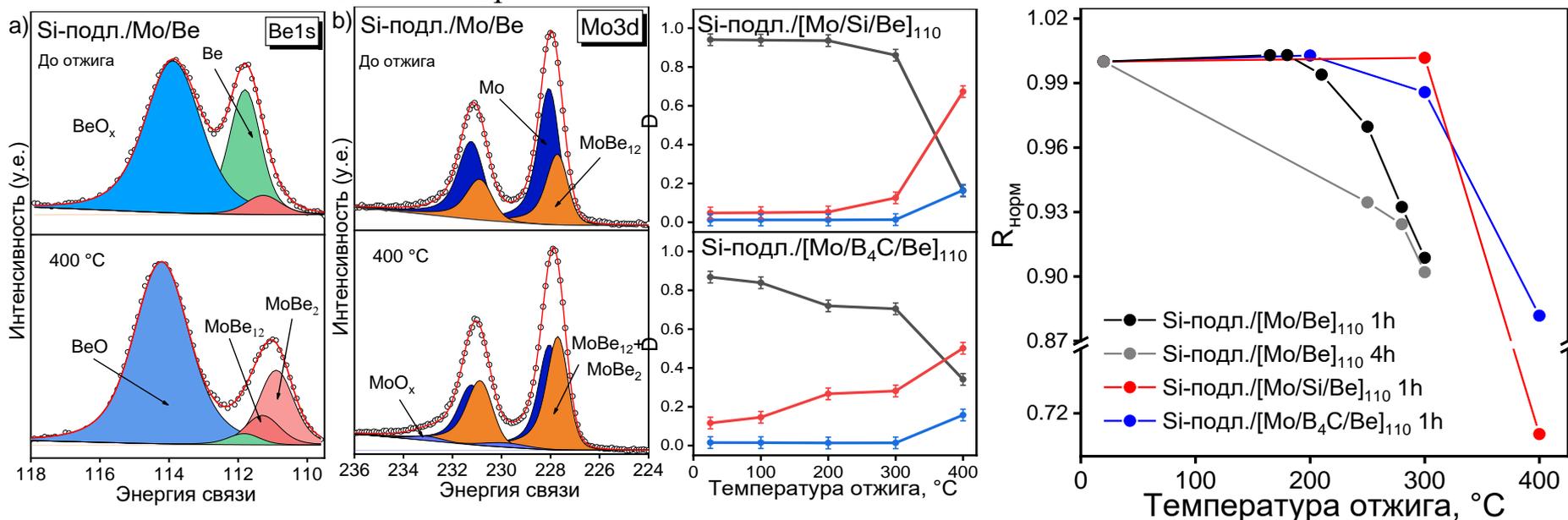


300°C
1200 мин





для бислюа Si/[Mo/Be]₁



Зависимость отношения интегральных интенсивностей компонентов Be, MoBe₁₂ и MoBe₂ и суммы компонентов Be, MoBe₁₂ и MoBe₂ от температуры отжига в течение одного часа для Si/[Mo/Si/Be]₁₁₀ и Si/[Mo/B₄C/Be]₁₁₀.

серая линия - чистый Be, красная линия - MoBe₁₂, синяя линия - MoBe₂.

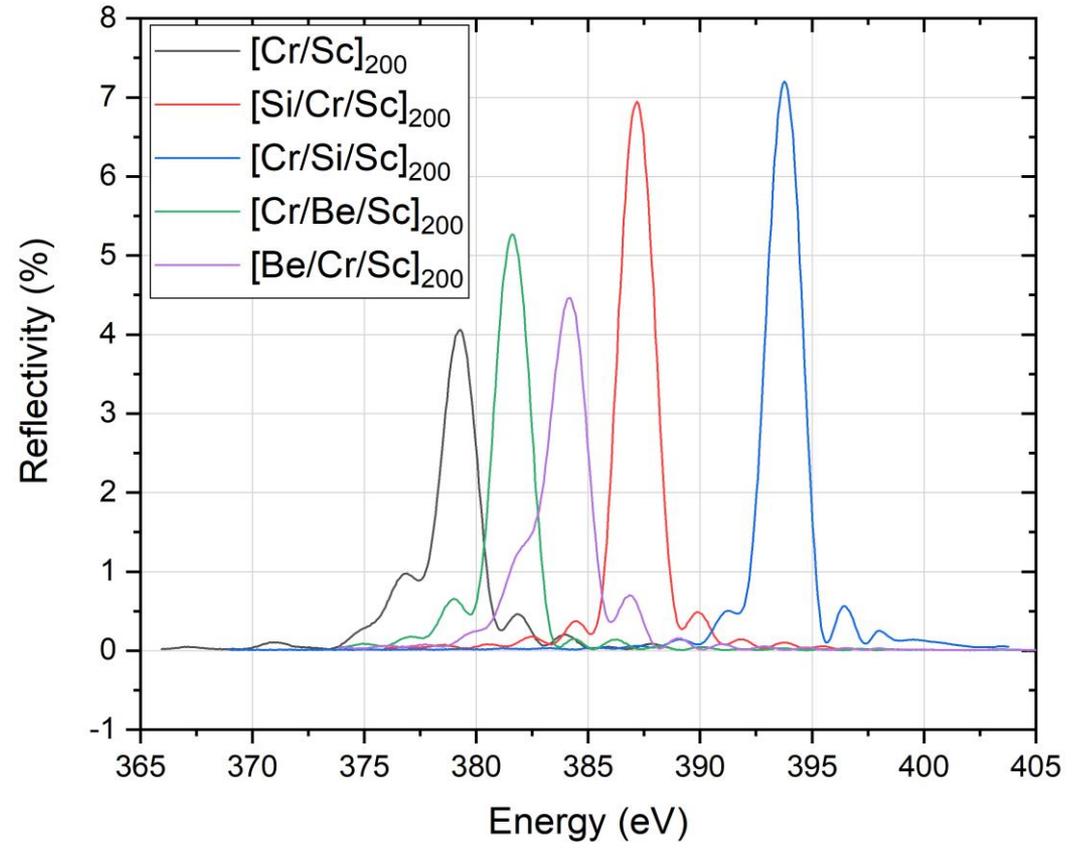


Экспериментальные и теоретические коэффициенты отражения МЗ $[Mo/Be]_{110}$ с/без барьерными слоями

Структура	Период, nm	Толщины слоев, nm	$R_{\text{эксп}}$, %	$R_{\text{теор}}$
$[Mo/Be]_{110}$	5.67	Be: 3,44	69.7	76.3
		Mo: 2,23		
$[Mo/Be/B_4C]_{110}$	5.75	Be: 3.34	67.6	75.7
		Mo: 2.05		
		B_4C : 0.36		
$[Mo/Be/Si]_{110}$	5.85	Be: 3.04	66.5	75.2
		Si: 0.48		
		Mo: 2.33		
$[Mo/B_4C/Be]_{110}$	5.6	Be: 3	70.2	76.8
		Mo: 2.3		
		B_4C : 0.3		
$[Mo/Si/Be]_{110}$	5.74	Be: 3.0	57.3	64.5
		Si: 0.33		
		Mo: 2.4		



Si/[Cr/Sc] на длине волны 3,12 нм



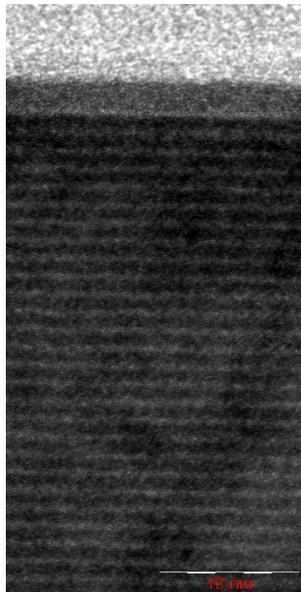
Доклад Соломонов А.В.



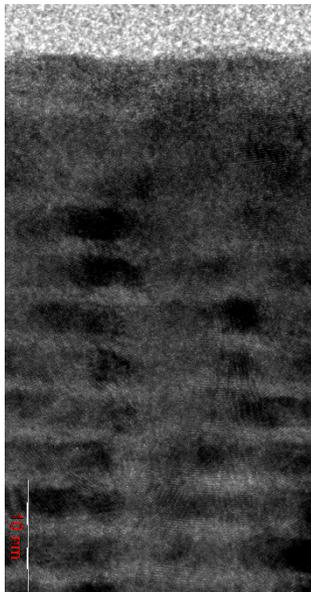
Si/[Cr /Ti] ($\lambda = 2.74$ nm)

TEM

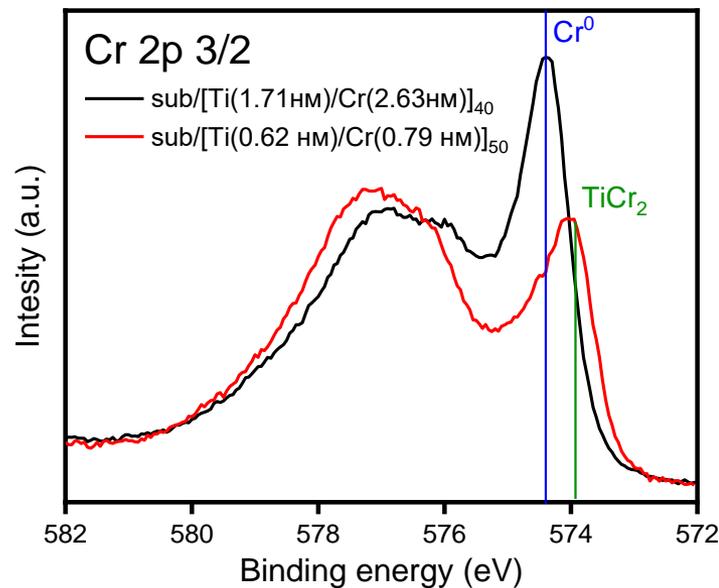
sub/[Ti(0.62 nm)/Cr(0.79 nm)]₅₀



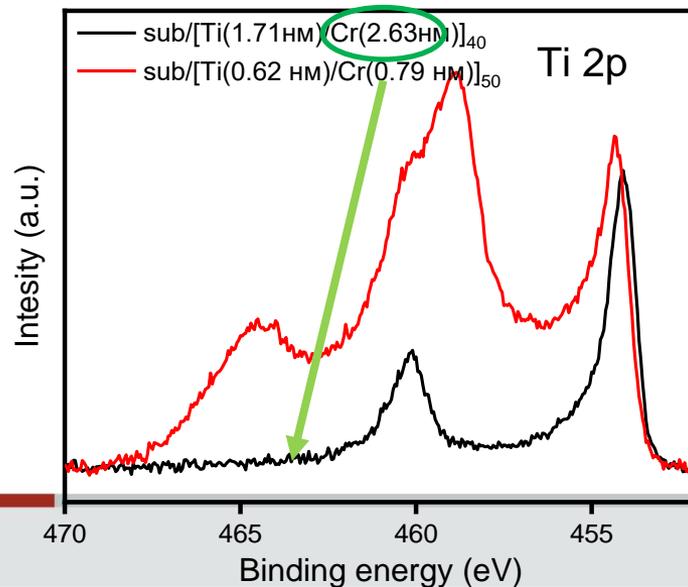
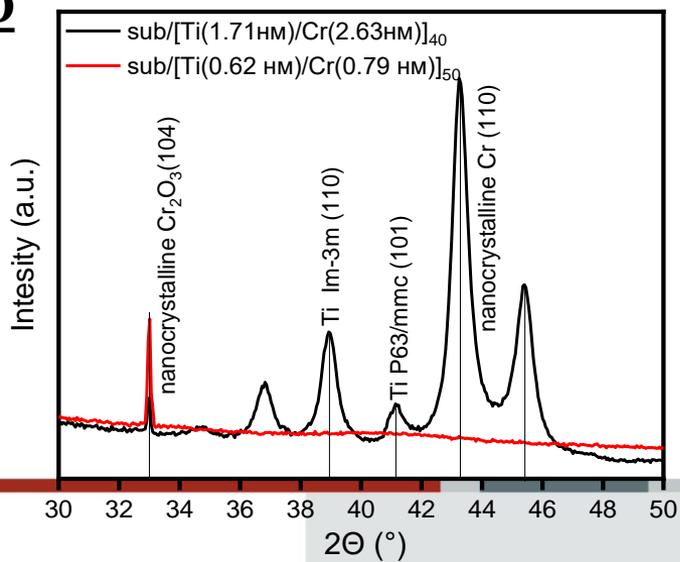
sub/[Ti(1.71 nm)/Cr(2.63 nm)]₄₀



XPS

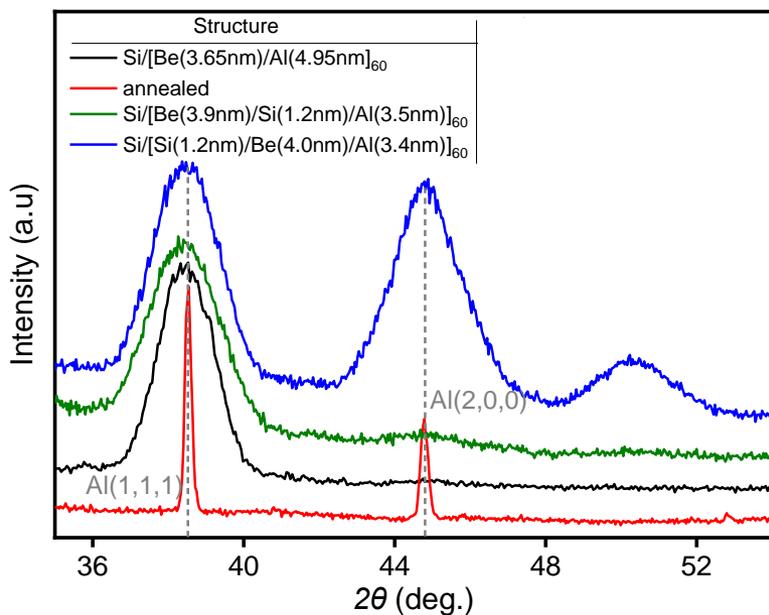


GIXRD

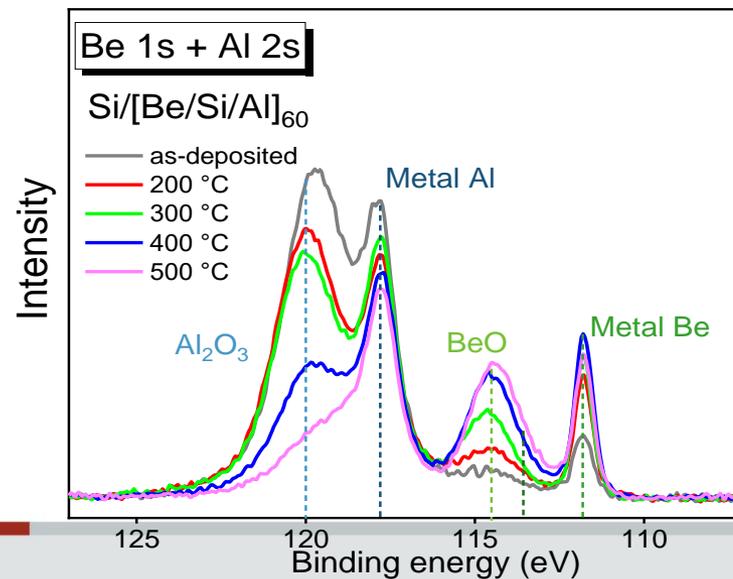
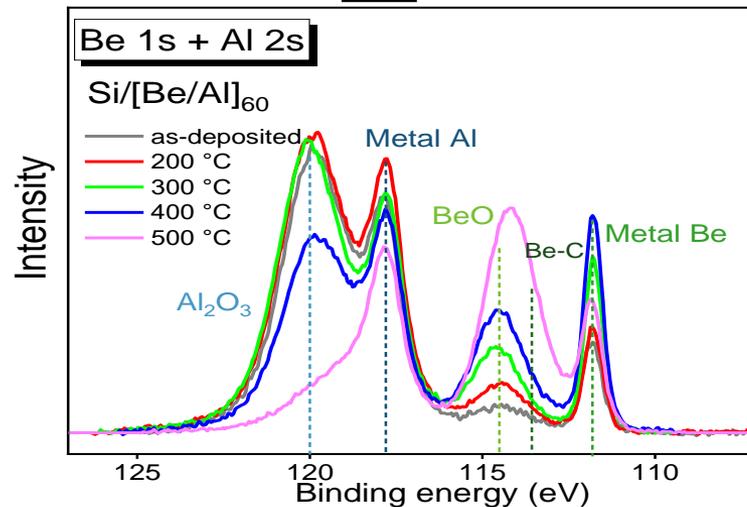




GIXRD



XPS





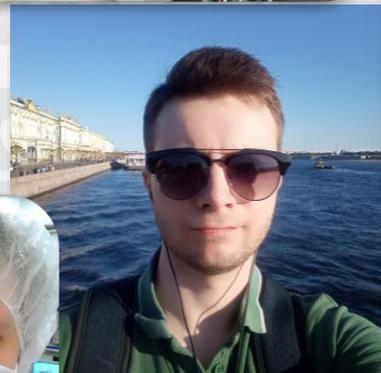
1. Установлено сильное перемешивание слоев Sr и Ru в структуре. Удалось получить значение пикового коэффициента отражения 37% на длине волны 11.4 нм (теоретически рассчитанный максимум равен 70%), однако наблюдается сильная деградация отражательных характеристик, что приводит к падению коэффициента отражения до значений ниже 1% в течение двух недель.
2. Использование рутения толщиной до 2.5 нм не позволяет снизить окисление стронция; дальнейшее увеличение толщины рутения не является целесообразным ввиду большого поглощения данного материала.
3. Верхний слой V_4C/Ru с номинальными толщинами 0.4 нм и 1.9 – 2.5 нм, соответственно.
4. Появляется вклад металлического стронция, на фоне пиков SrO и $SrCO_3$, что говорит об ограничении окисления слоев стронция.
5. Введение в структуру V_4C существенно улучшает ее временную стабильность.



imec



HZB Helmholtz
Zentrum Berlin



CNRS CENTRE NATIONAL
DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE





Российский
научный
фонд

Проект №19-72-20125



Институт Физики Микроструктур
Российской Академии Наук

д. ф.-м. н. Чхало Н.И.,
к. ф.-м. н. Полковников В.Н.,
Смертин Р.М., Плешков Р.С.



Санкт-Петербургский
Государственный
Университет
Научный Парк

Королева А.В.



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

к. ф.-м. н. Чумаков Р.Г.,
к. ф.-м. н. Лебедев А.М.



Санкт-Петербургский
Государственный
университет



Спасибо за внимание!