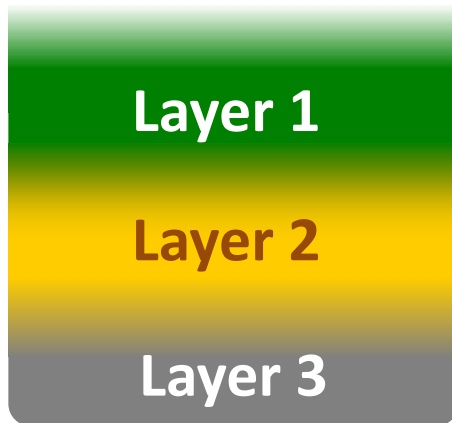
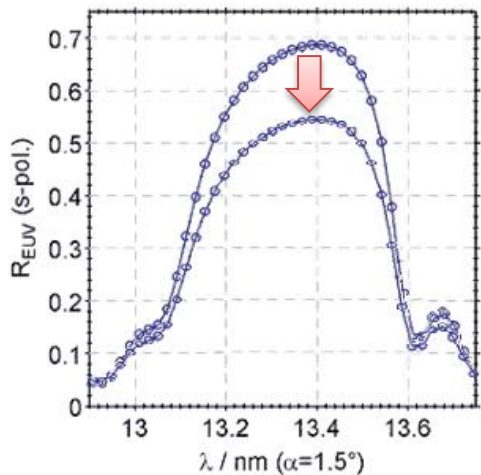




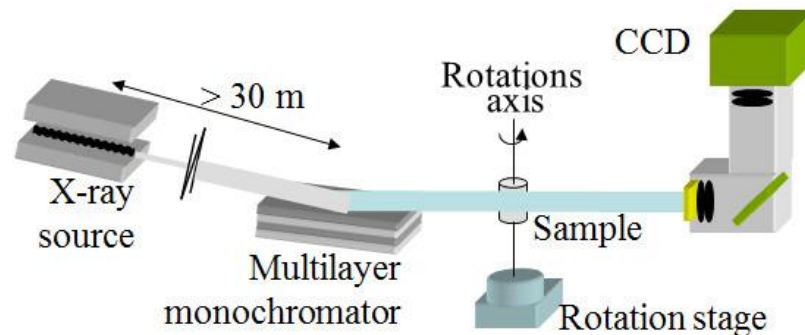
## **Управление составом и протяженностью межфазных границ в многослойных рентгеновских зеркалах с целью повышения их отражательной способности**

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

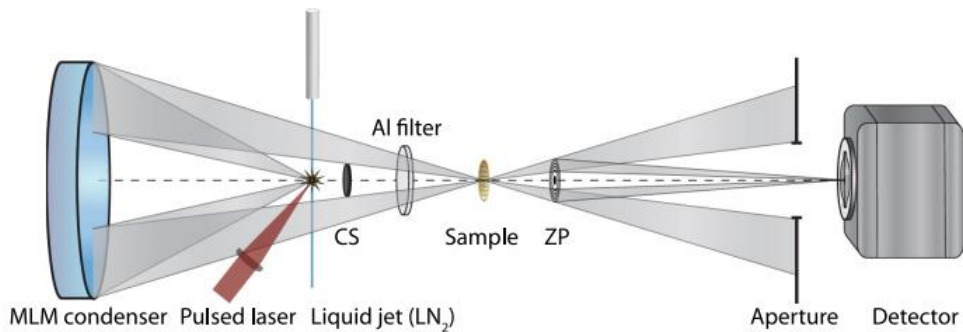
**XXVII международный симпозиум «Нанопфизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, 13-16 марта 2022**



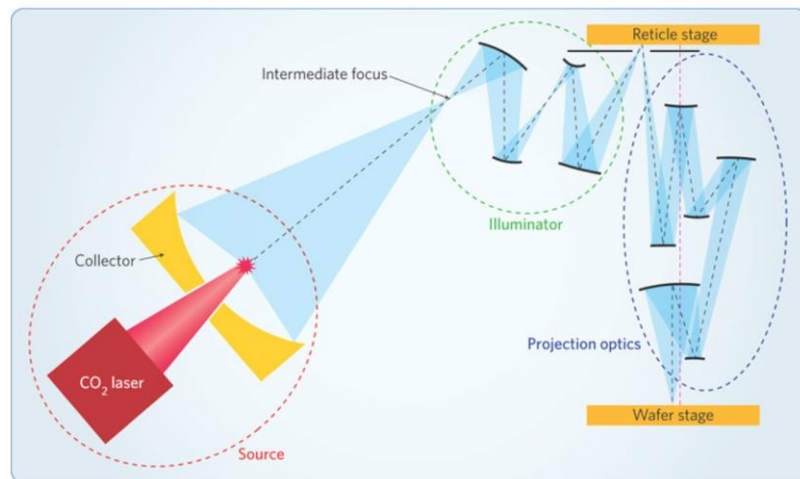
## Синхротронное излучение



## Микроскоп для «окна прозрачности воды»

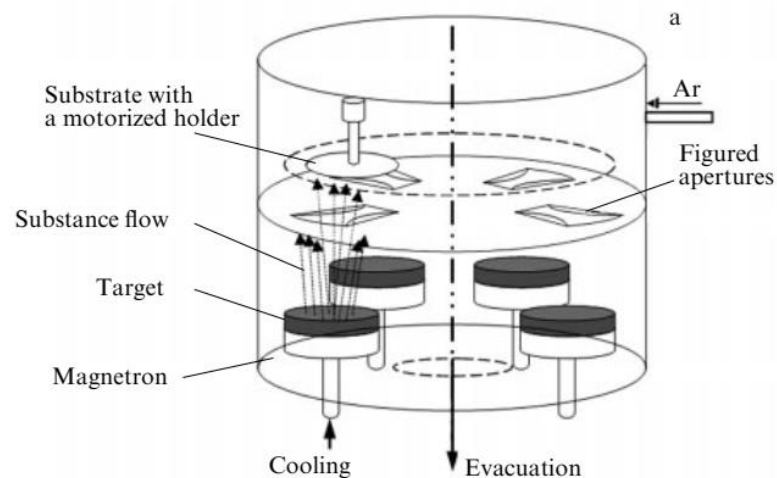


## ЭУФ литография





## Магнетронное распыление

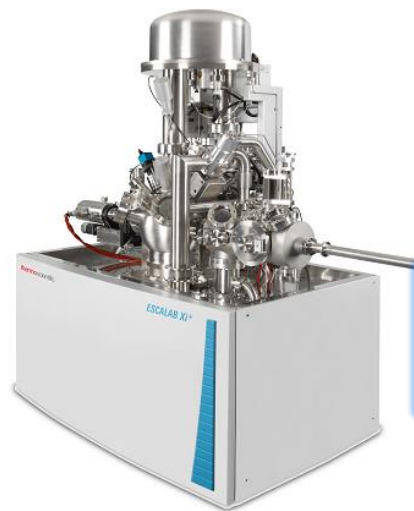


## Оборудование ИФМ РАН

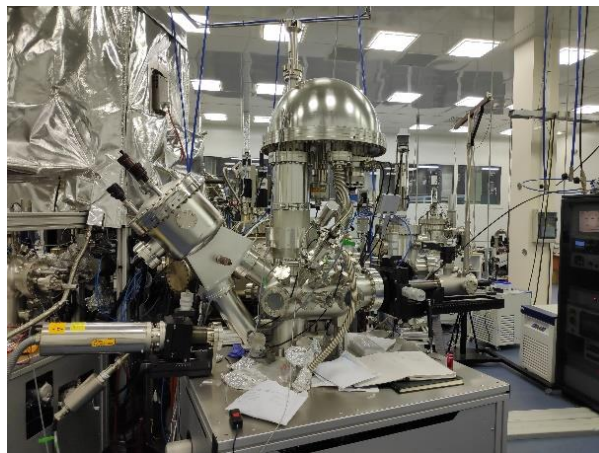




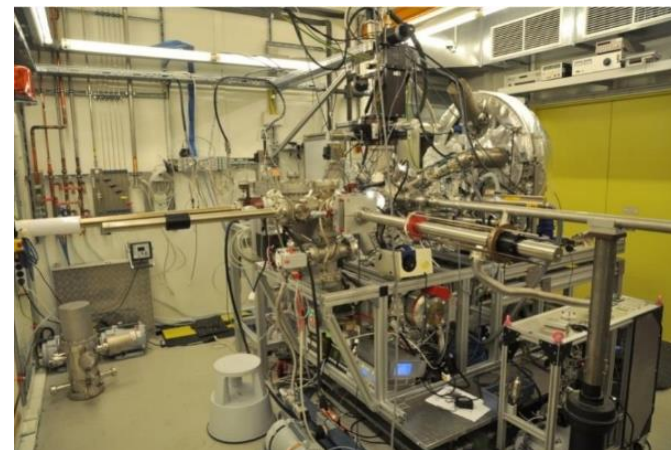
# Используемое оборудование: *фотоэлектронная спектроскопия*



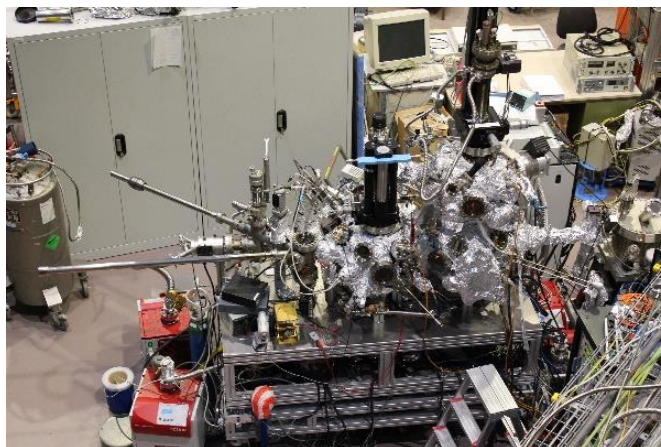
ESCALab 250 Xi  
РЦ «ФМИП»  
Научный парк СПбГУ



Модуль «ЭСХА»  
НИЦ «Курчатовский институт»



P22 HAXPES  
PETRA-III



RGL-PES  
BESSY-II

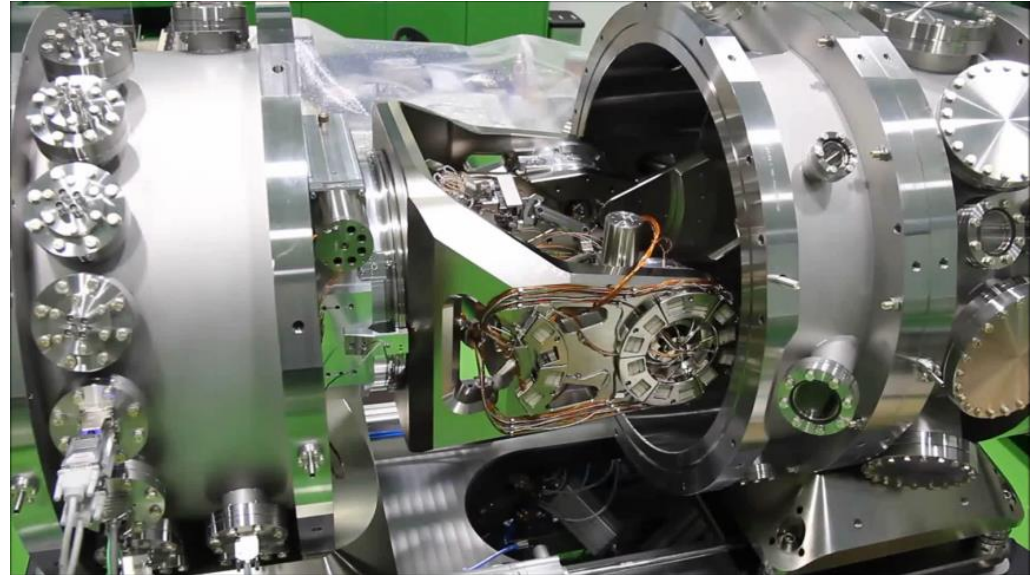


$$h\nu = 8040 \text{ эВ}$$



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





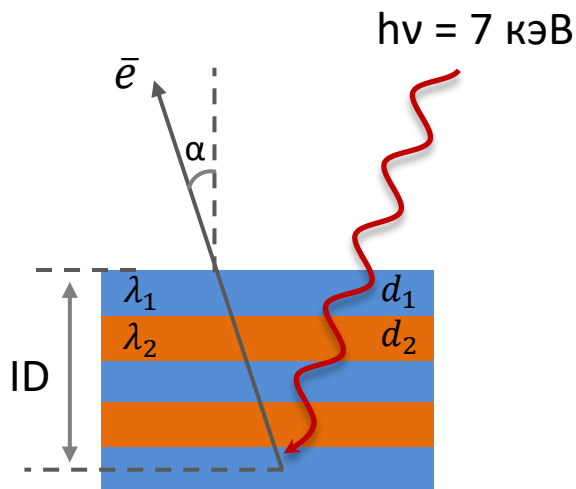
В случае многослойной структуры:

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

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

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

Расчеты для Be 1s фотоэлектронов



Образец	Структура	d, нм	$d_{\text{Be}}/d$	$E_{\text{hv}}$ , 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



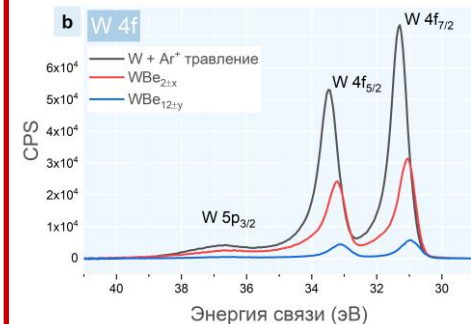
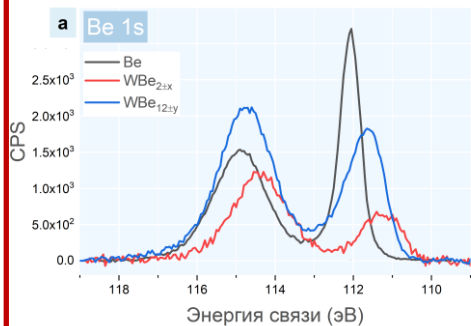
1. Эталонные пленки металлов и их соединений;
2. Модельные структуры (тонкий слой материала, нанесенный на поверхность относительно толстого слоя другого материала; две серии образцов -прямая и инверсная.
3. Модельные структуры прямые [A/S] и инверсные [S/A] с разным числом периодов (одно-, двух-, трех- 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



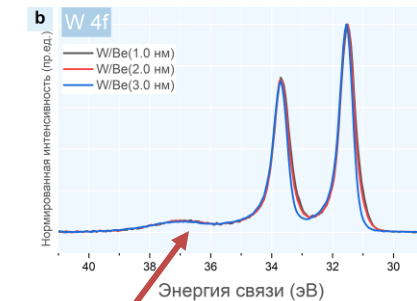
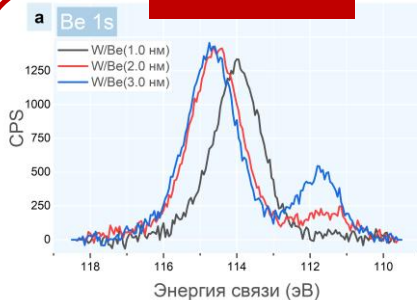
X (40 нм)  
Si

	E <sub>b</sub> , эВ
Be	112.0
WBe <sub>12</sub>	111.7
WBe <sub>2</sub>	111.2

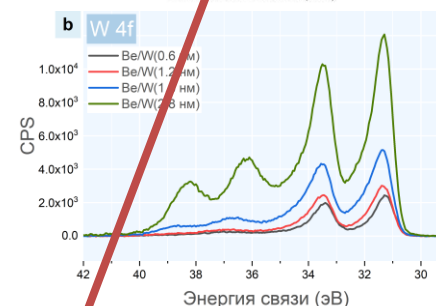
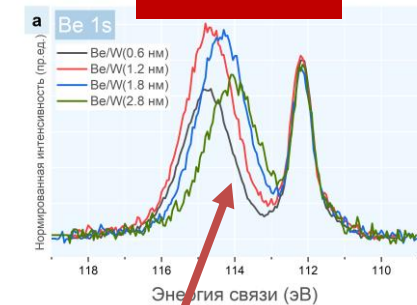
	E <sub>b</sub> , эВ
W	31.3
WBe <sub>12</sub>	31.0
WBe <sub>2</sub>	30.9

В бериллидах релаксационная составляющая преобладает над химической составляющей

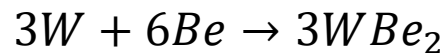
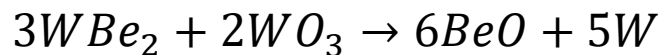
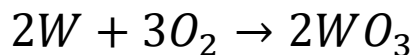
## Si/W/Be



## Si/Be/W



Сформированный BeO выступает в качестве защитного слоя и препятствует окислению W. Равновесный химический процесс, протекающий до образования толстого BeO<sub>x</sub>.

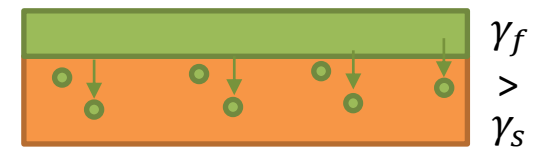
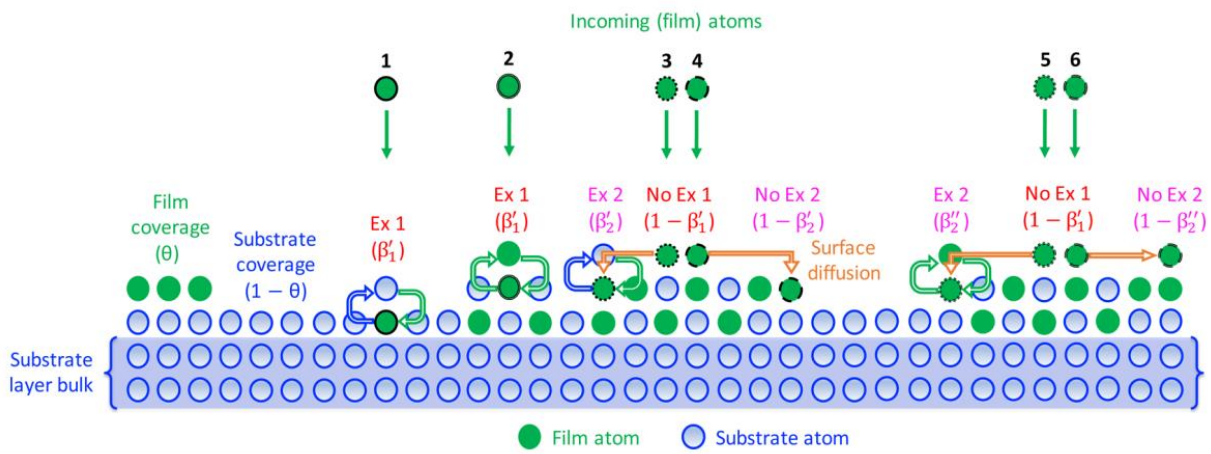




1. Анализ возможных химических реакций между материалами основных слоев и продуктов их взаимодействия.
2. Рассмотрение перемешивания атомов соседних слоев с позиций обменного процесса между атомами пленки и подложки в процессе роста пленки.

## 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.



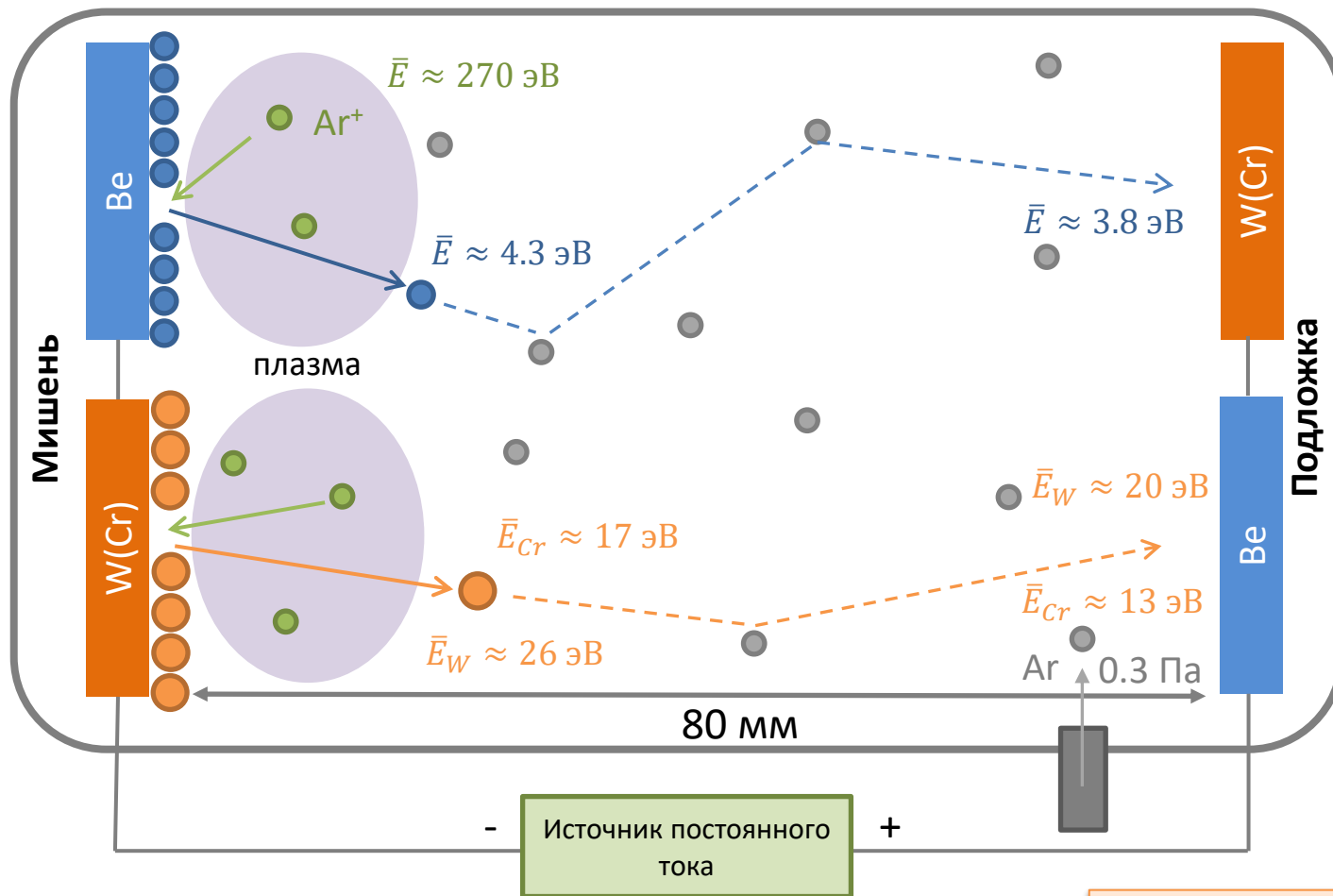
# Механизмы образования переходных областей

## Оценка баллистических столкновений

1. Распыление мишени

2. Движение распыленных атомов в газе

3. Осаждение



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

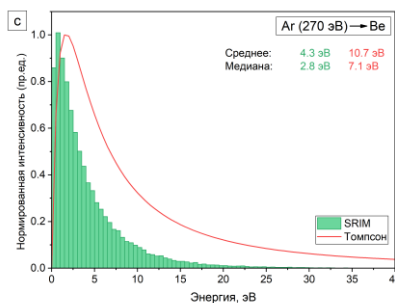
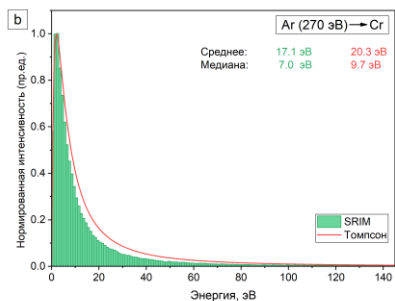
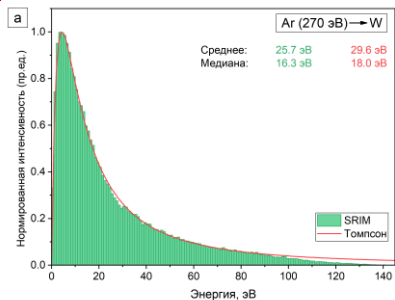




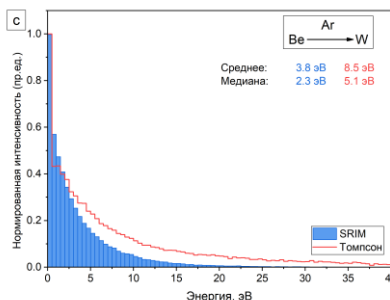
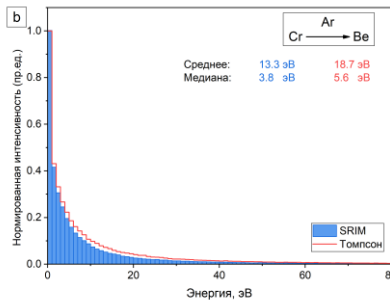
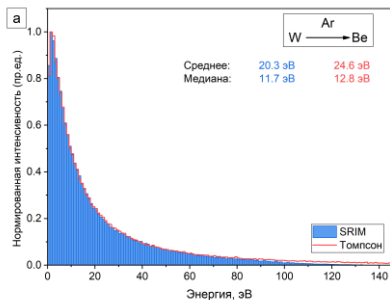
# Механизмы образования переходных областей

## Расчет баллистических столкновений

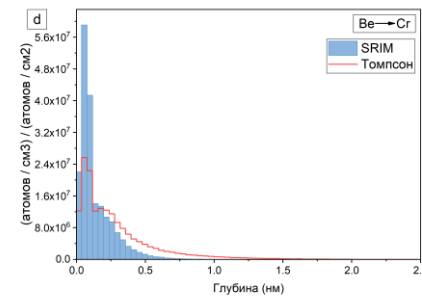
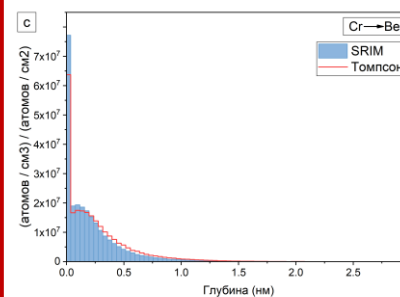
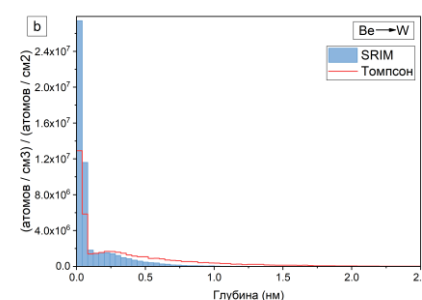
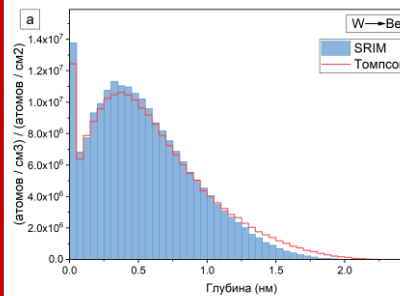
1



2



3

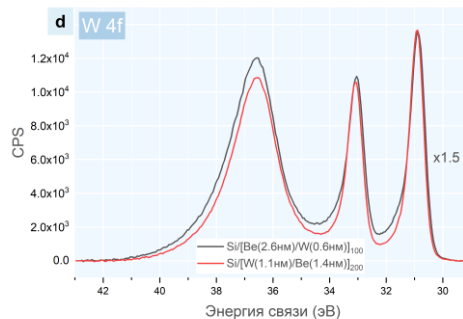
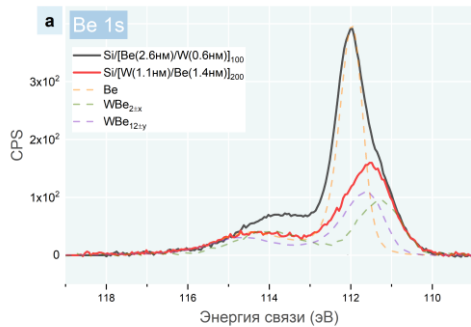


Осаждение **W-на-Be** приводит к сильному механическому перемешиванию с проникновением атомов в пленку на глубину до **2** нм. В случае атомов **Cr** проникновение происходит на глубину до 1 нм. Осаждаемые атомы **Be** проникают на глубину около **1-2** монослоя.

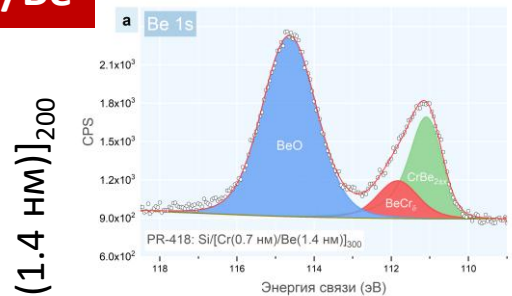


# Многослойные зеркала Si/[W(Cr)/Be]

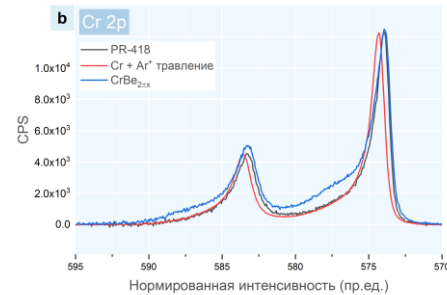
## M3 W/Be



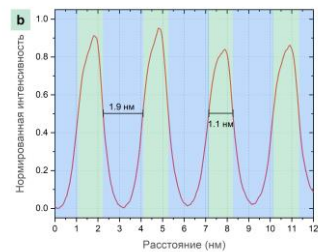
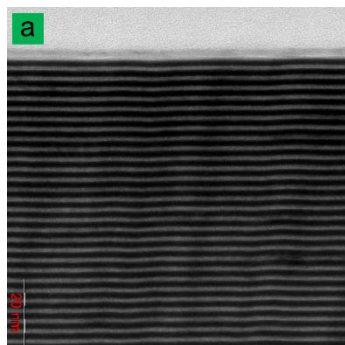
## M3 Cr/Be



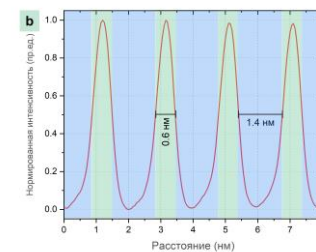
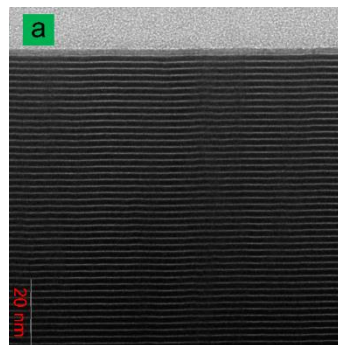
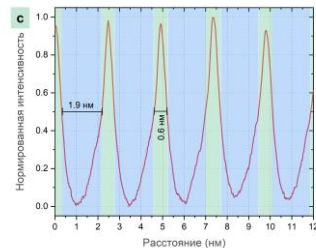
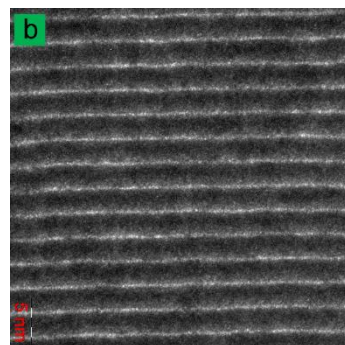
Si/[Cr(0.7 nm)/Be(1.4 nm)]<sub>200</sub>



Si/[Be(2.6 nm)/W(0.6 nm)]<sub>100</sub>



Si/[W(1.1 nm)/Be(1.4 nm)]<sub>200</sub>

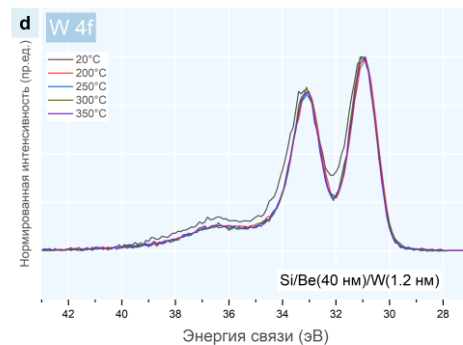
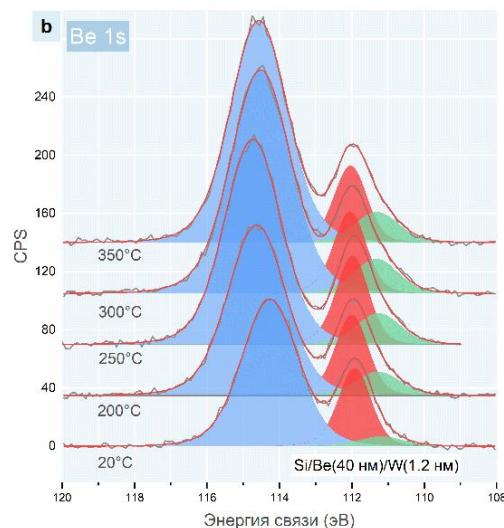
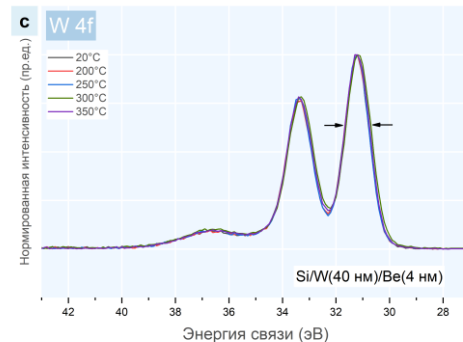
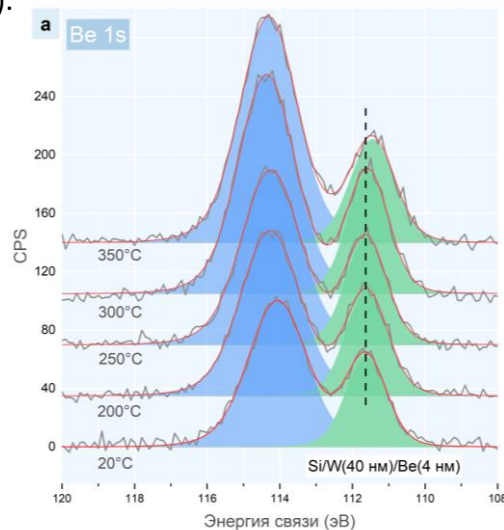
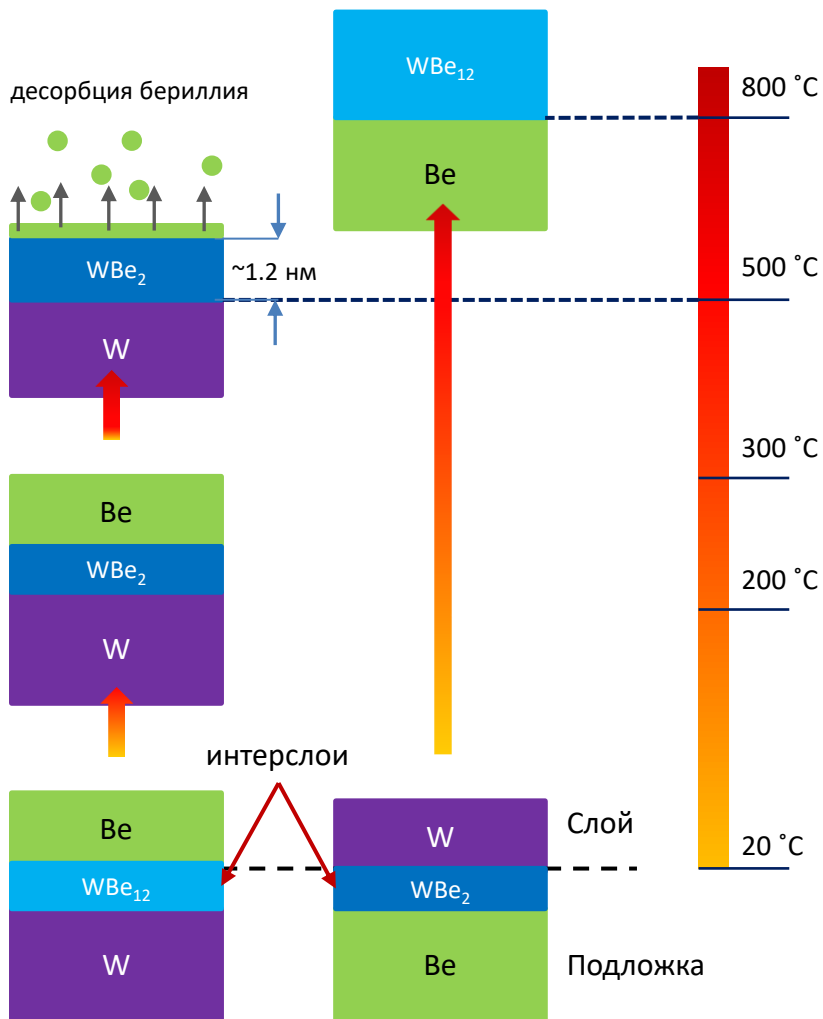




# Отжиг модельных систем Si/W/Be и Si/Be/W

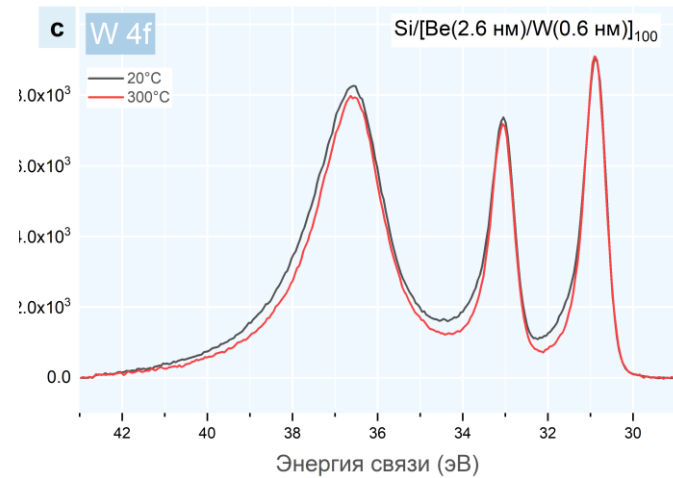
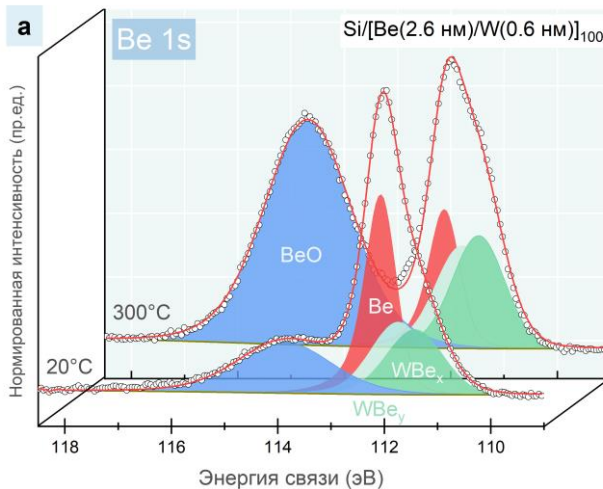
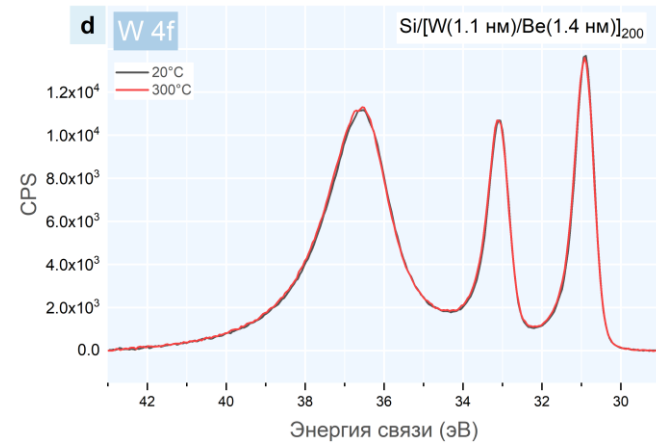
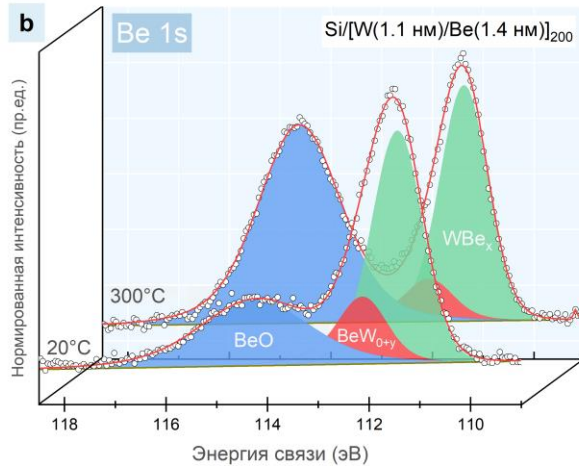
A. Wiltner, Ch. Linsmeier // New Journal of Physics, V. 8, 181 (2006).

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





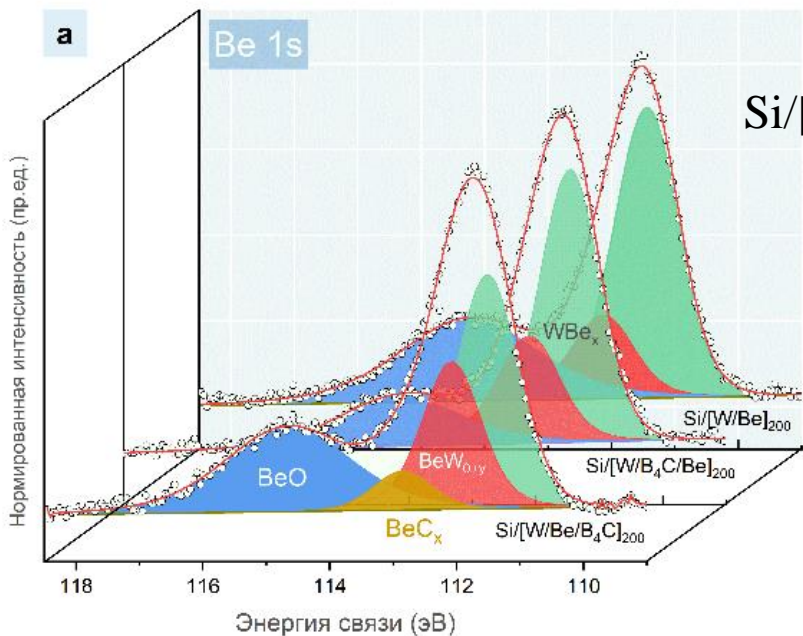
## Отжиг при 300°C в течение 1200 минут





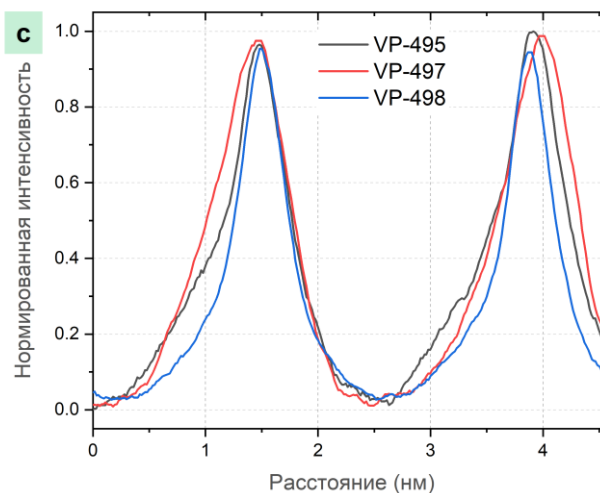
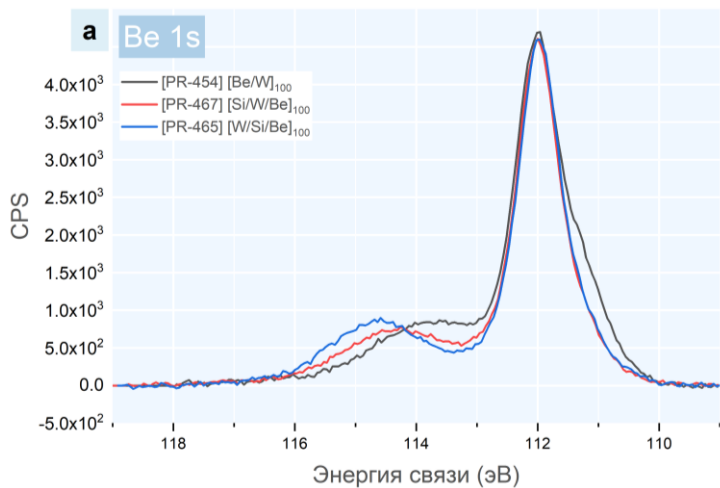
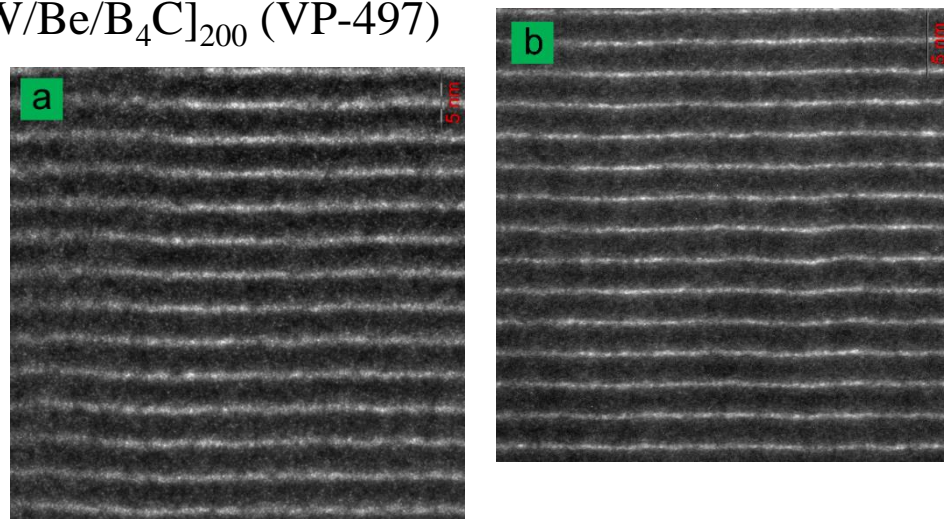


# Использование барьерных слоев $B_4C$ (Si) в системе W/Be



Si/[W/Be/B<sub>4</sub>C]<sub>200</sub> (VP-497)

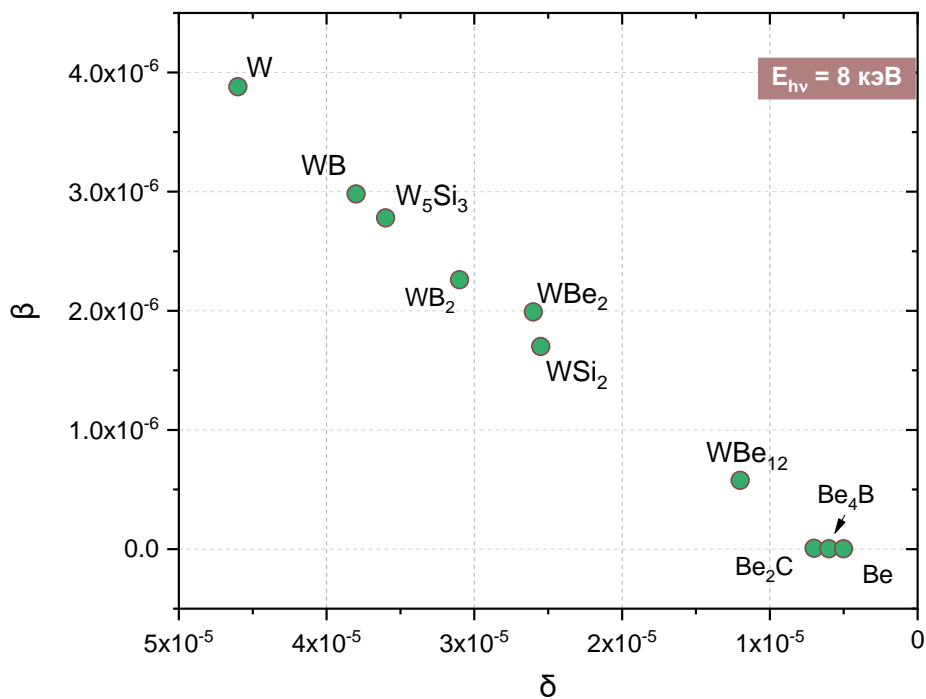
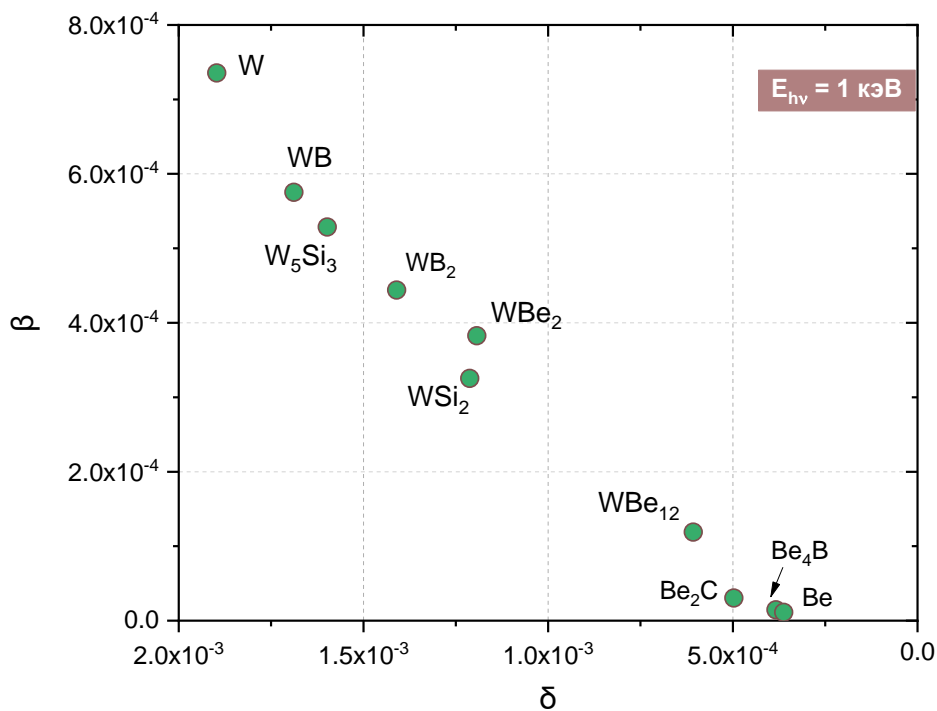
Si/[W/B<sub>4</sub>C/Be]<sub>200</sub> (VP-498)





# Оценка влияния соединений на оптические характеристики

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



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



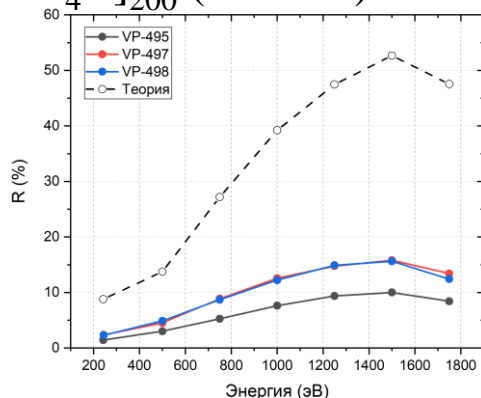
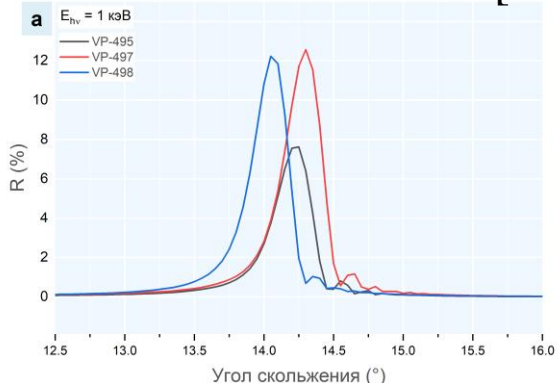
# Отражательные характеристики зеркал

**W/Be (d = 2.5 нм)**

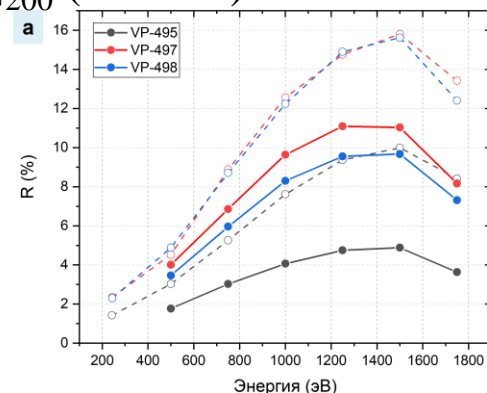
Введение  $W_4C$  улучшает отражательные характеристики

Si/[W/Be/ $W_4C$ ]<sub>200</sub> (VP-497)

Si/[W/ $W_4C$ /Be]<sub>200</sub> (VP-498)

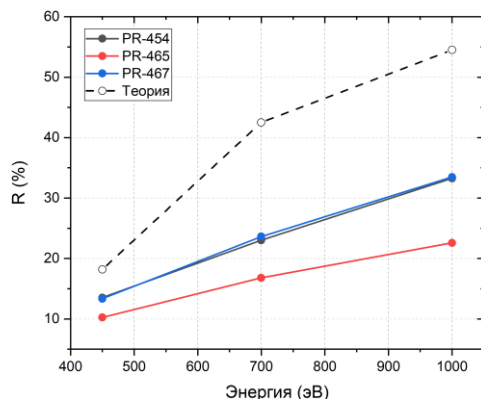
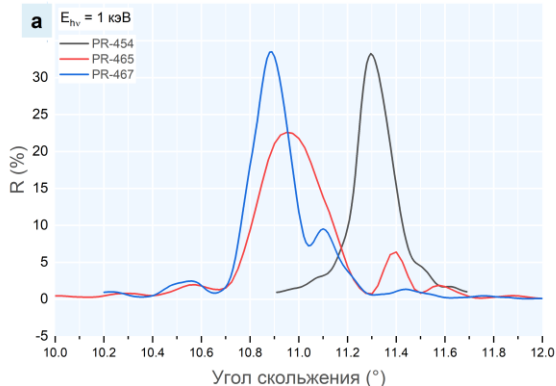


300°C  
1200 мин

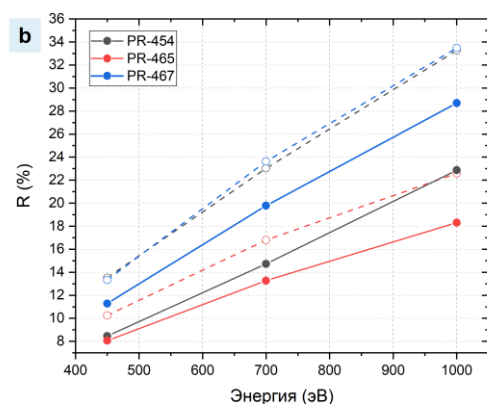


Введение  $W_4C$  и Si улучшает термическую стабильность систем W/Be, в большей степени при нанесении  $W_4C$  барьерного слоя на бериллий.

**W/Be (d = 3.2 нм)**



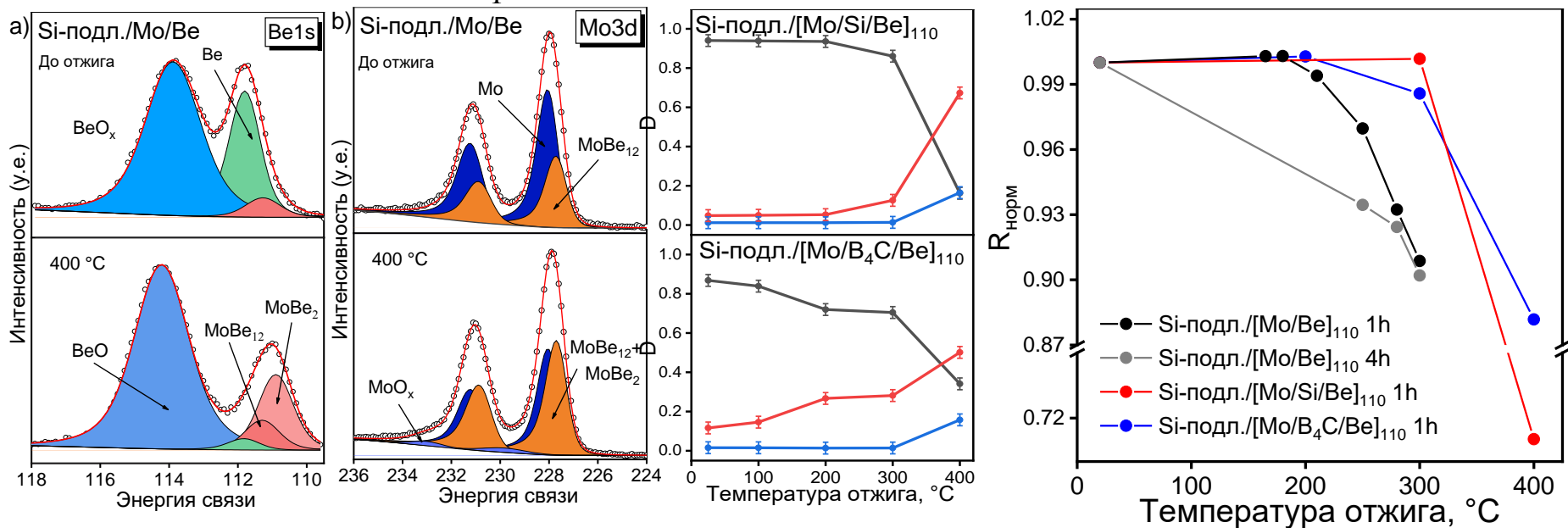
300°C  
1200 мин





# Si/[Mo/Si(B<sub>4</sub>C)/Be]<sub>110</sub> на длину волны ≈11,3 нм

для бислюа Si/[Mo/Be]<sub>1</sub>



Зависимость отношения интегральных интенсивностей компонентов Be, MoBe<sub>12</sub> и MoBe<sub>2</sub> и суммы компонентов Be, MoBe<sub>12</sub> и MoBe<sub>2</sub> от температуры отжига в течение одного часа для Si/[Mo/Si/Be]<sub>110</sub> и Si/[Mo/B<sub>4</sub>C/Be]<sub>110</sub>.

серая линия - чистый Be, красная линия - MoBe<sub>12</sub>, синяя линия - MoBe<sub>2</sub>.



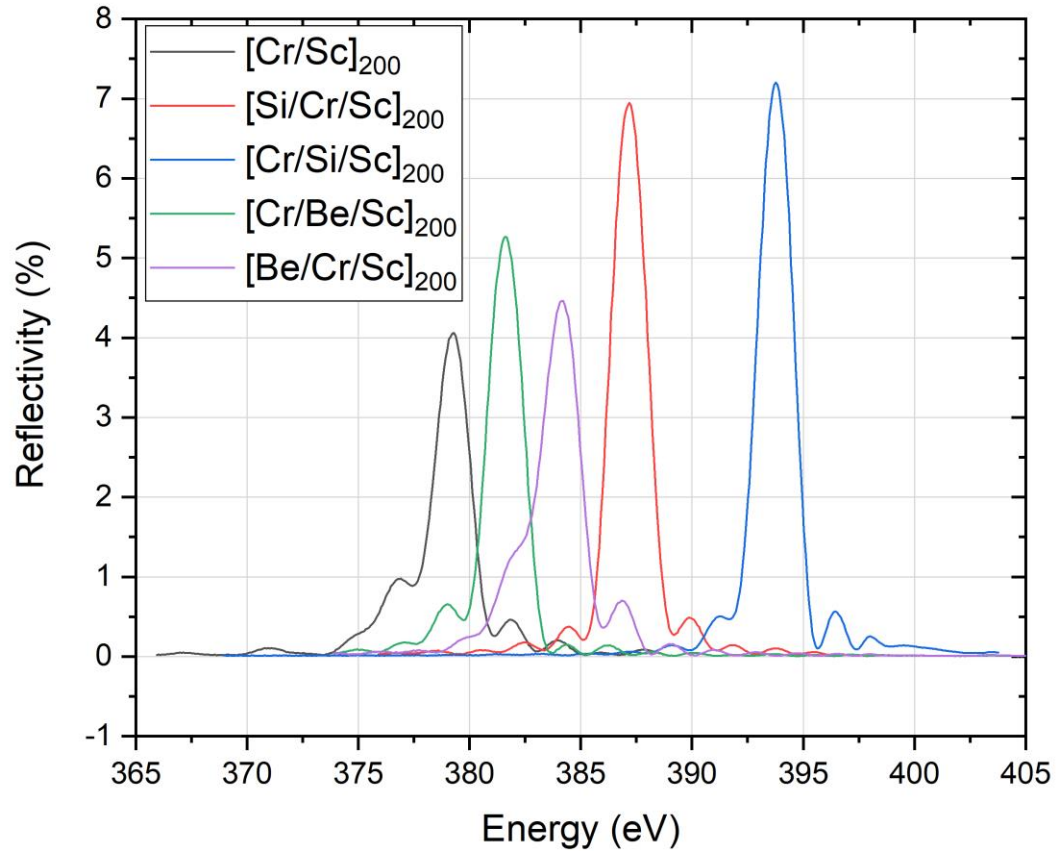


# Экспериментальные и теоретические коэффициенты отражения МЗ $[Mo/Be]_{110}$ с/без барьерными слоями

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	<b>70.2</b>	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



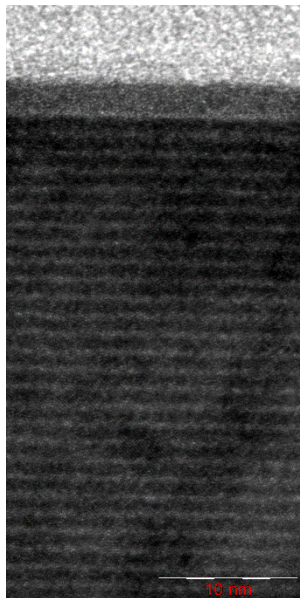
*Доклад Соломонов А.В.*



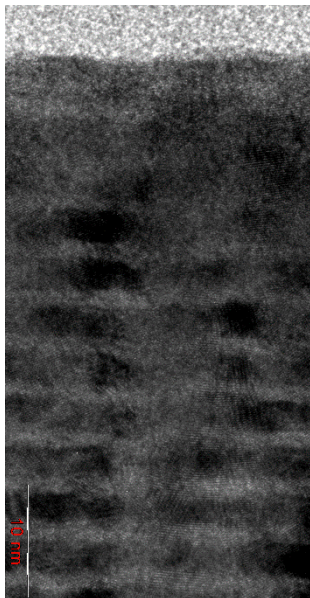
# Si/[Cr /Ti] ( $\lambda = 2.74$ nm)

## TEM

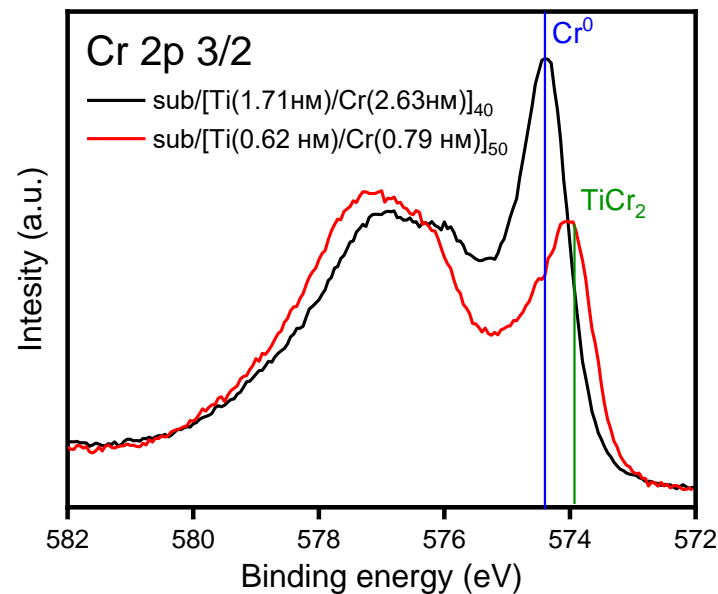
sub/[Ti(0.62 nm)/Cr(0.79 nm)]<sub>50</sub>



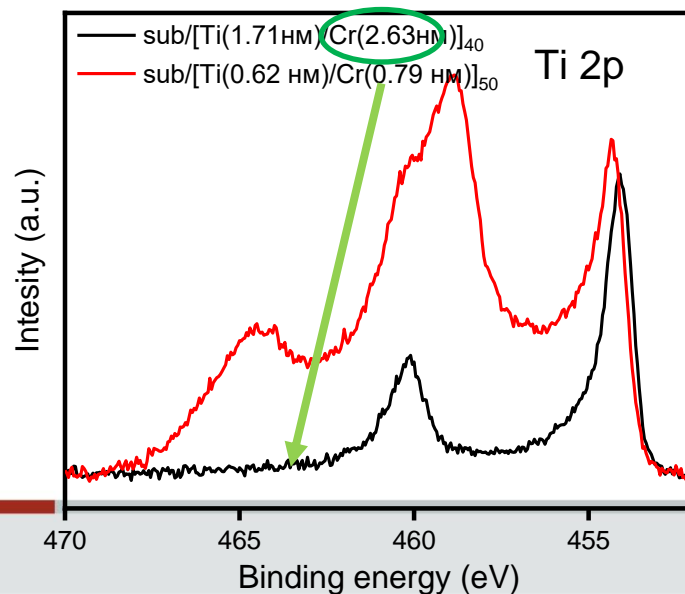
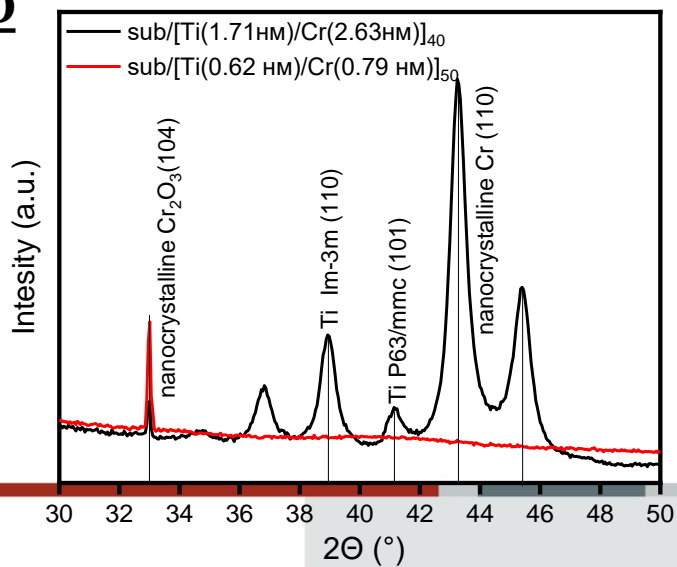
sub/[Ti(1.71 nm)/Cr(2.63 nm)]<sub>40</sub>



## XPS

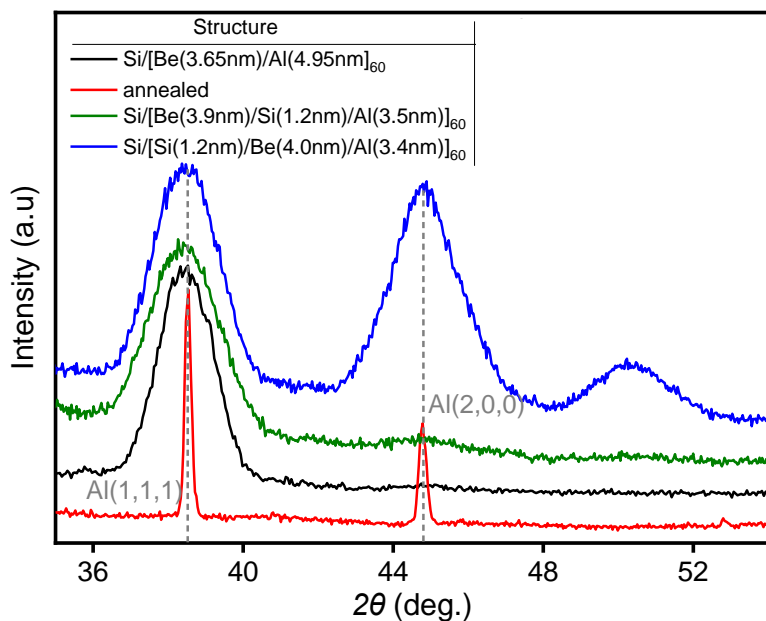


## GIXRD

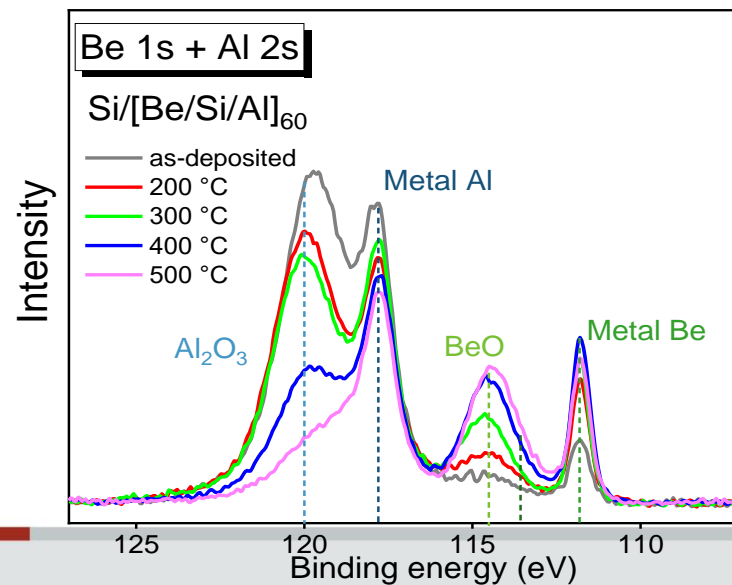
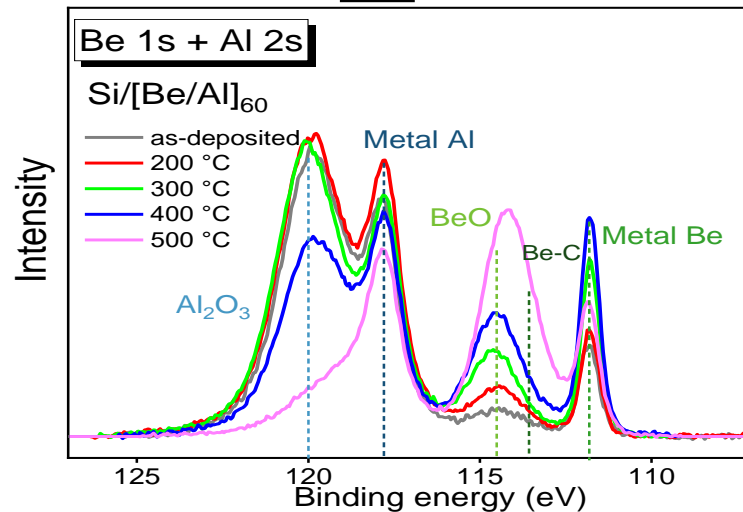




## GIXRD



## 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.

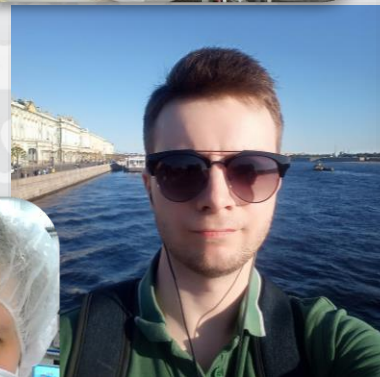




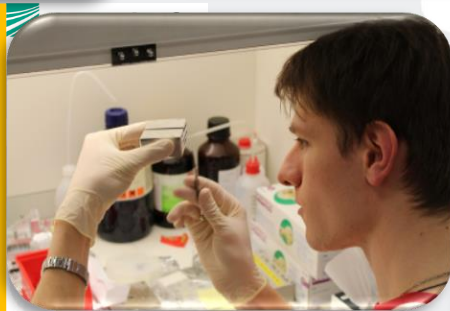
imec



**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!**