

**GDPA 2023
UFA, RUSSIA**

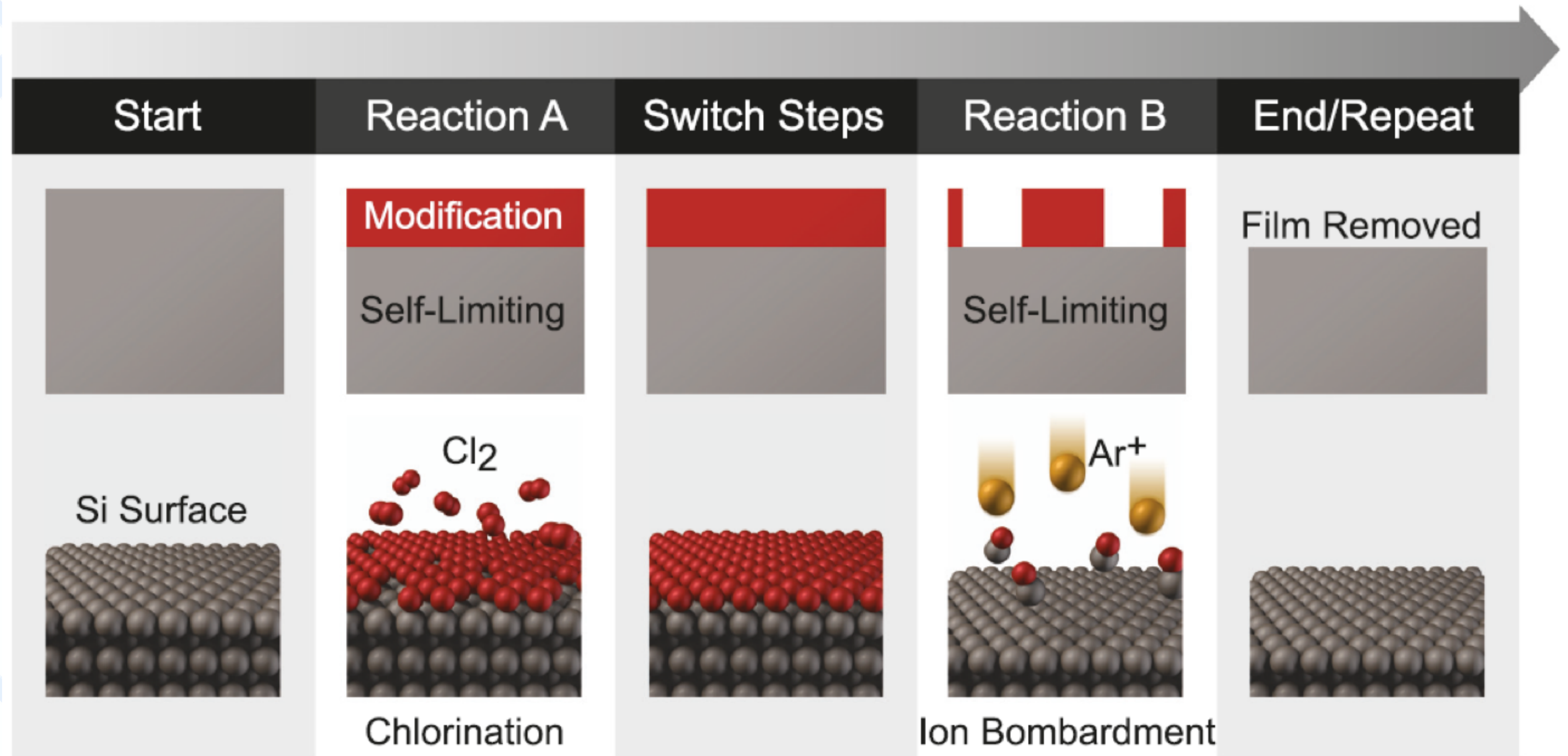


Sputtering of amorphous Si and SiO₂ by low-energy Ar⁺, Kr⁺ and Xe⁺ ions

**D.R. Shibano, D.V. Lopaev, S.M.
Zyryanov, A.I. Zotovich, A.T. Rakhimov**

Lomonosov Moscow State University,
Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics
(SINP MSU), Moscow, Russia

Atomic Layer Etching



K. Kanarik, T. Lill, E. Hudson et al., "Overview of atomic layer etching in the semiconductor industry", J. of Vac. Sci. & Tech. A, 2015

2-й шаг: бомбардировка ионами

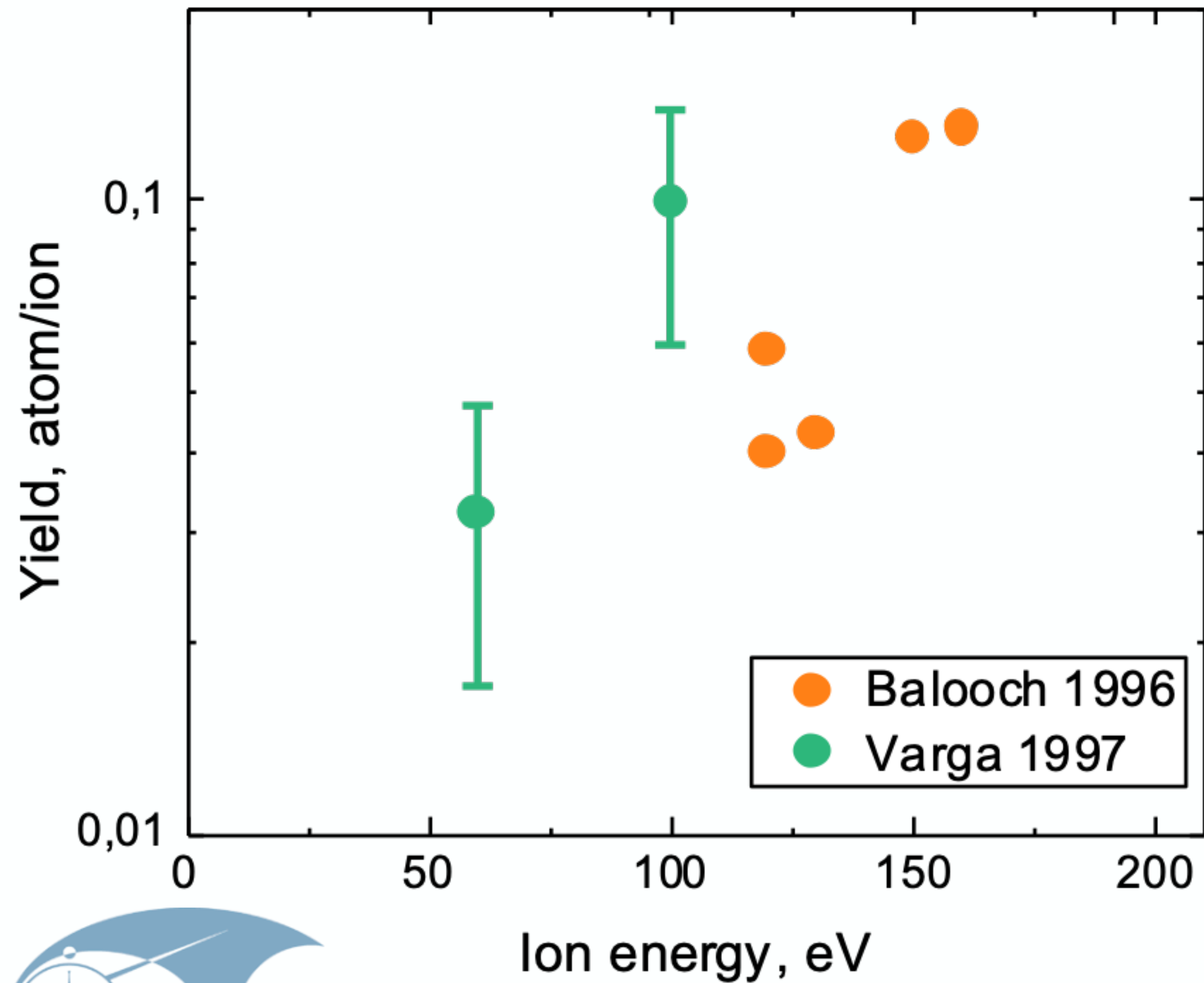
Необходим **точный подбор диапазона энергий ионов, чтобы:**

- а) приносимой энергии было **достаточно для удаления** модифицированного слоя;
 - б) при этом **ионы не распыляли** немодифицированный материал;
 - с) вклад **имплантации ионов** в структуру материала был **минимален**.
-
- Важно учитывать **влияние плазмы на материал**, т.к. **поток ВУФ-фотонов и метастабильных атомов** могут влиять как на процесс удаления модифицированного слоя так и на немодифицированный материал.

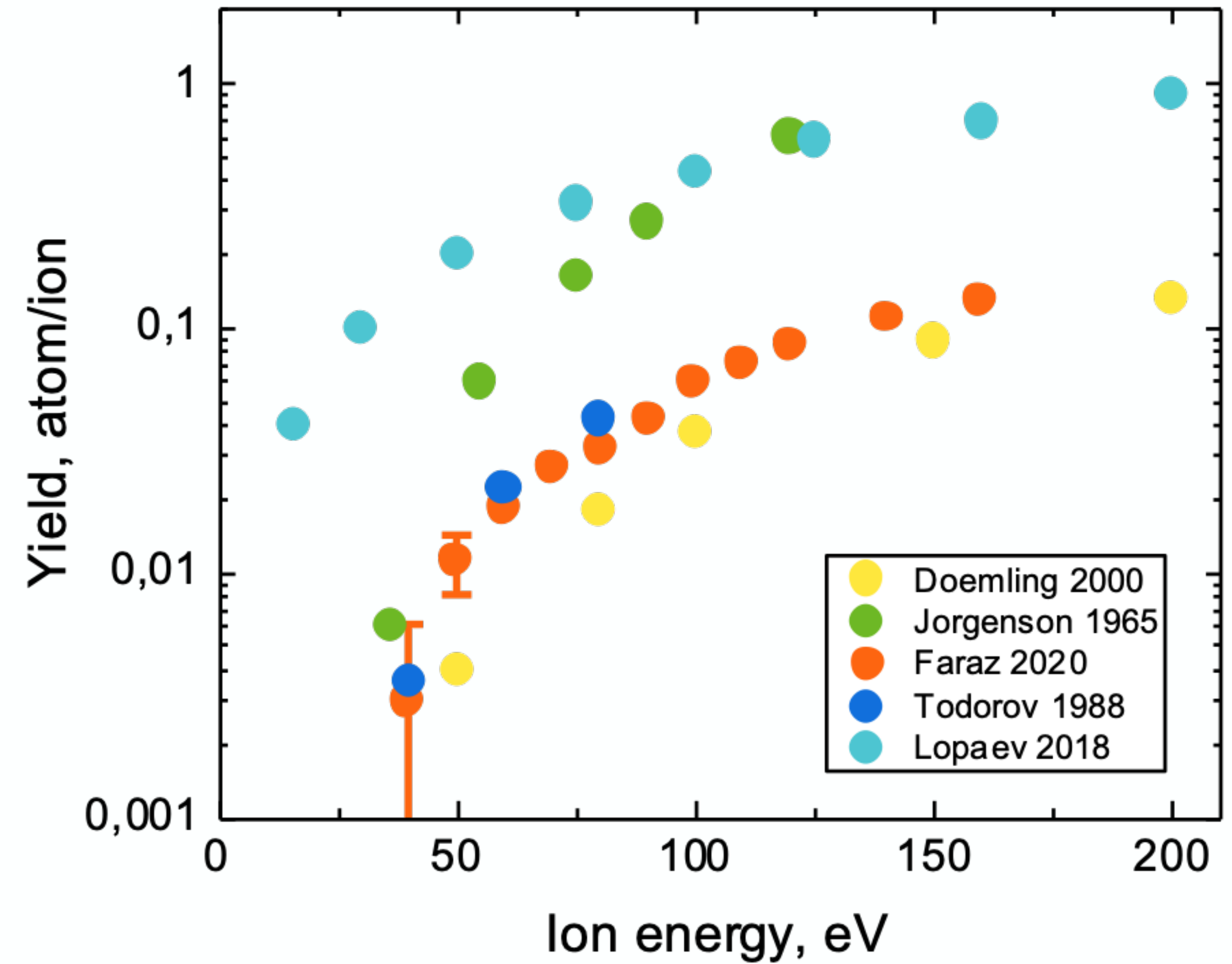


Обзор существующих экспериментов

Si sputtering yields by Ar^+ ions

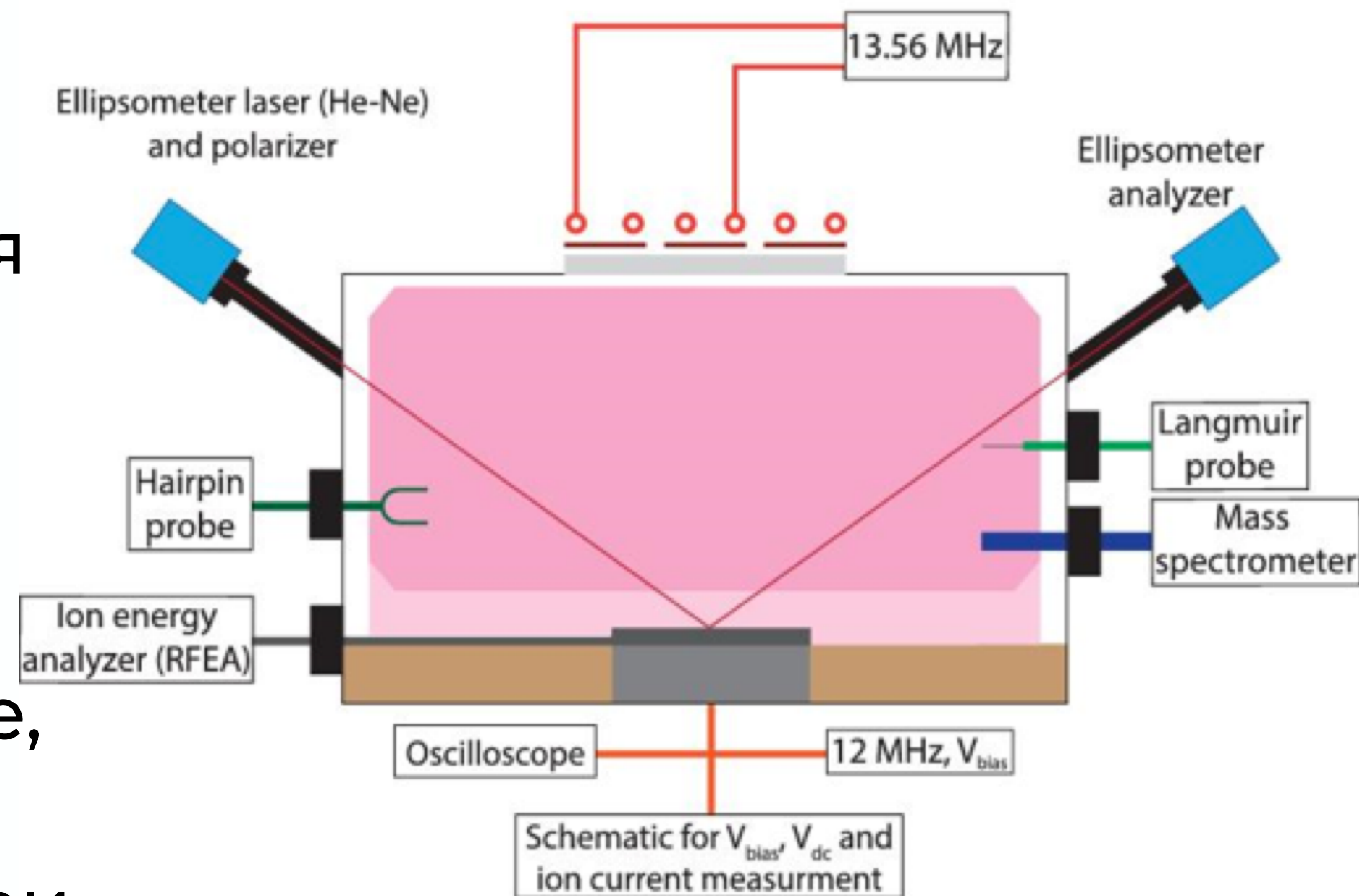


SiO_2 sputtering yields by Ar^+ ions

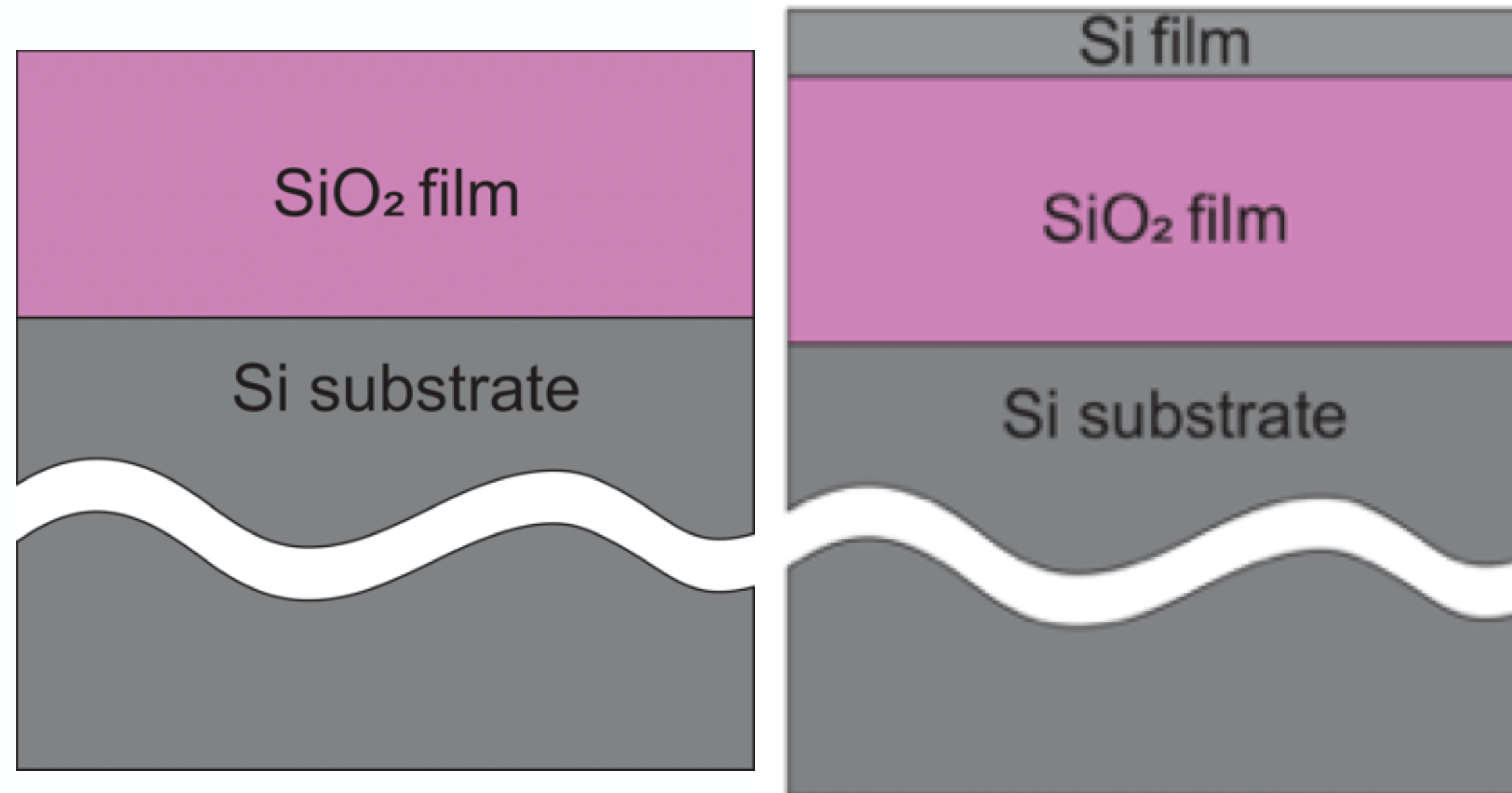


Экспериментальные условия

- ICP плазма в чистых Ar, Kr и Xe на частоте **13,56 МГц**
- Давление в камере **10 мТорр** для Ar и Kr, и **5 мТорр** для Xe
- Электронная плотность плазмы $\sim 1,2 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$
- Энергии ионов: **18 эВ** для Kr и Xe, **22 эВ** для Ar без смещения, и **25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200 эВ** при приложенном напряжении смещения на частоте **12 МГц**

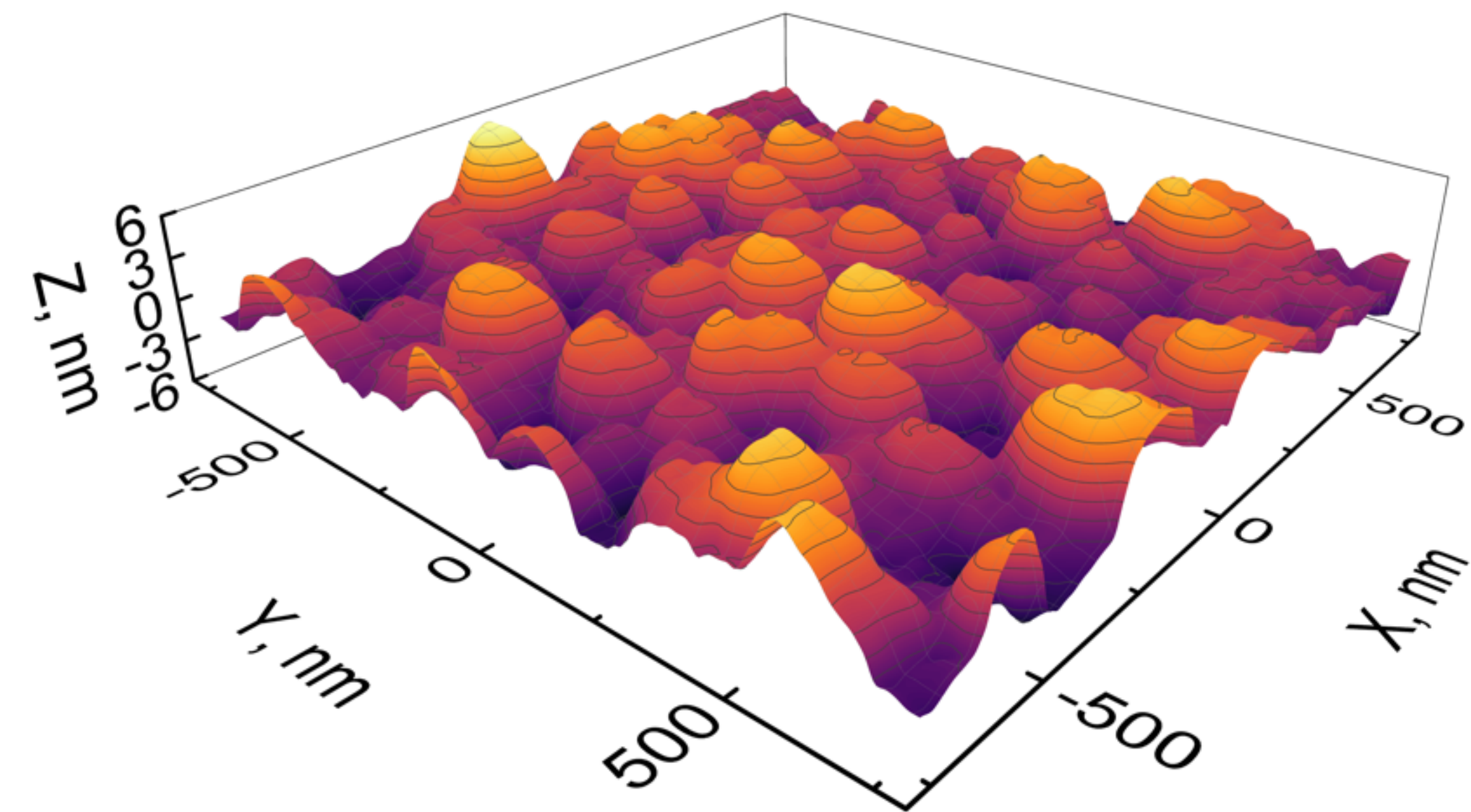


Образцы



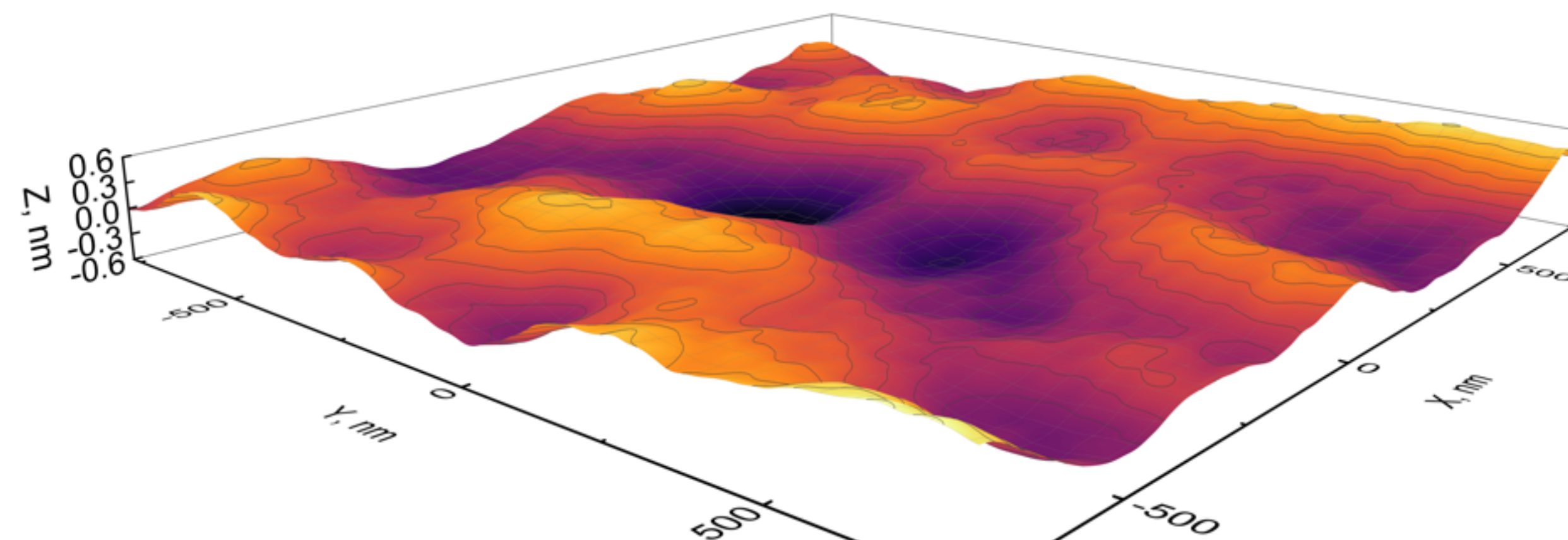
- ▶ **Образец SiO₂:** плёнка толщиной ~600 нм, PECVD осаждённая из TEOS на кремниевую подложку
- ▶ **Образец Si:** плёнка толщиной ~150 нм, напылённая на образец SiO₂ в магнетроне
- ▶ **Измерение толщины плёнки:**
в реальном времени – лазерный эллипсометр
контроль до и после распыления – спектрографический эллипсометр

АСМ (AFM) Si

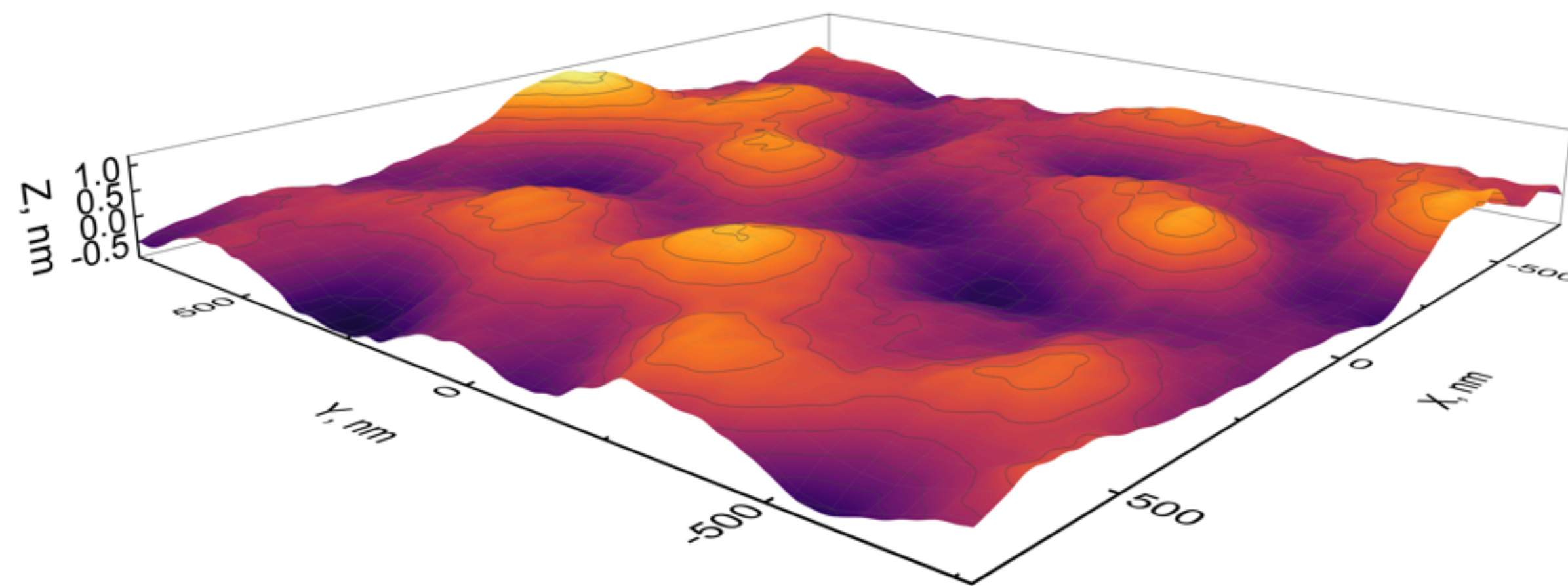


До распыления

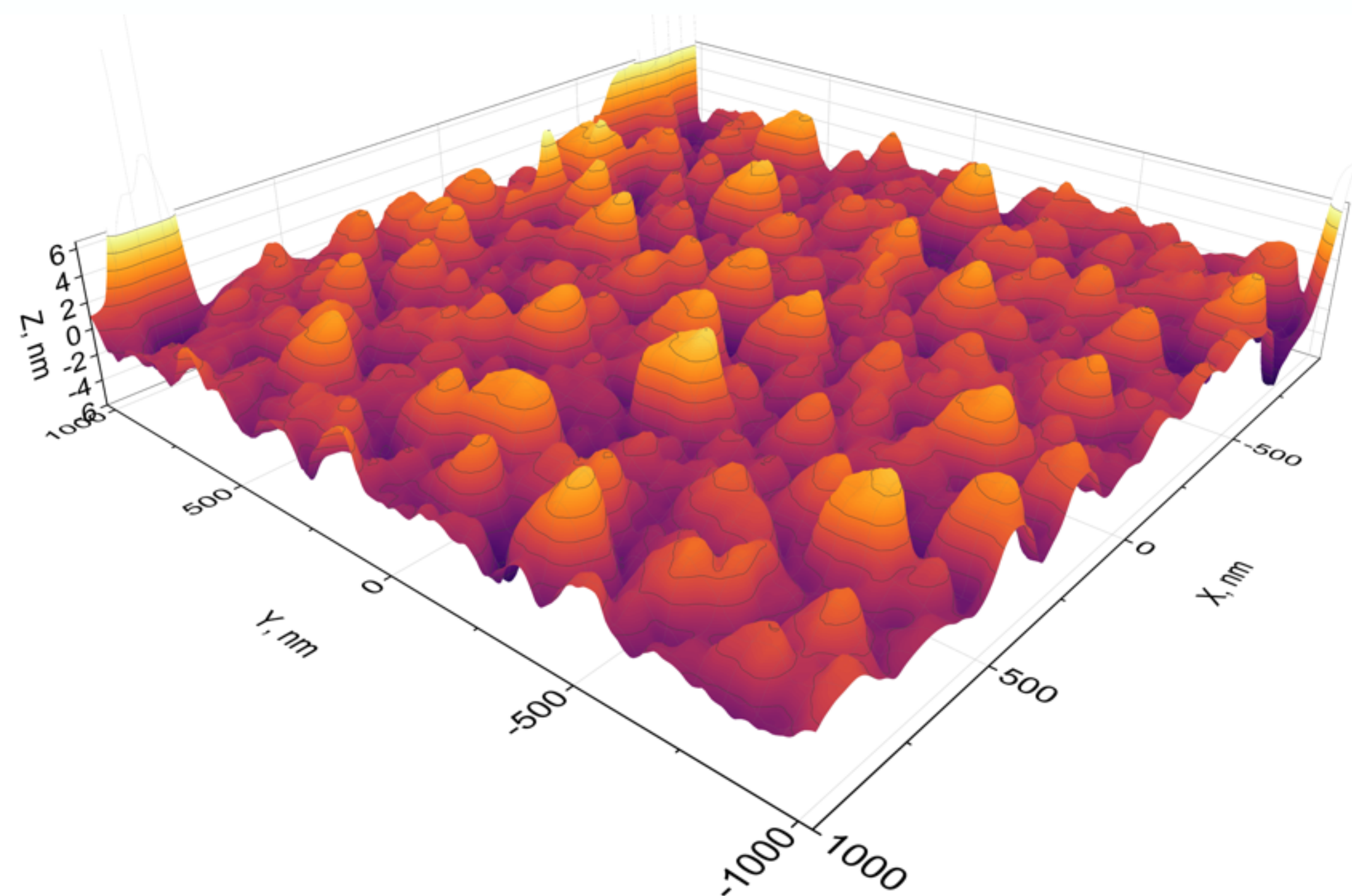
После распыления 200 эВ ионами Ar⁺



После распыления 200 эВ ионами Хе⁺

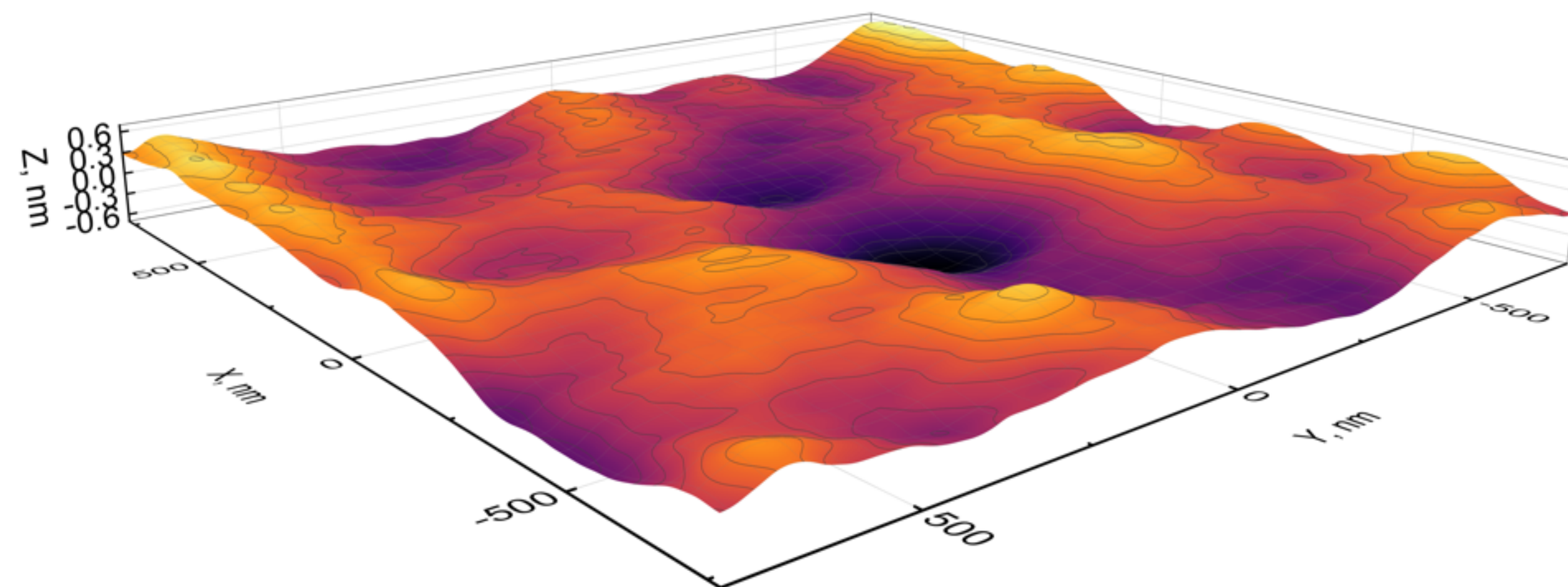


АСМ (AFM) SiO_2

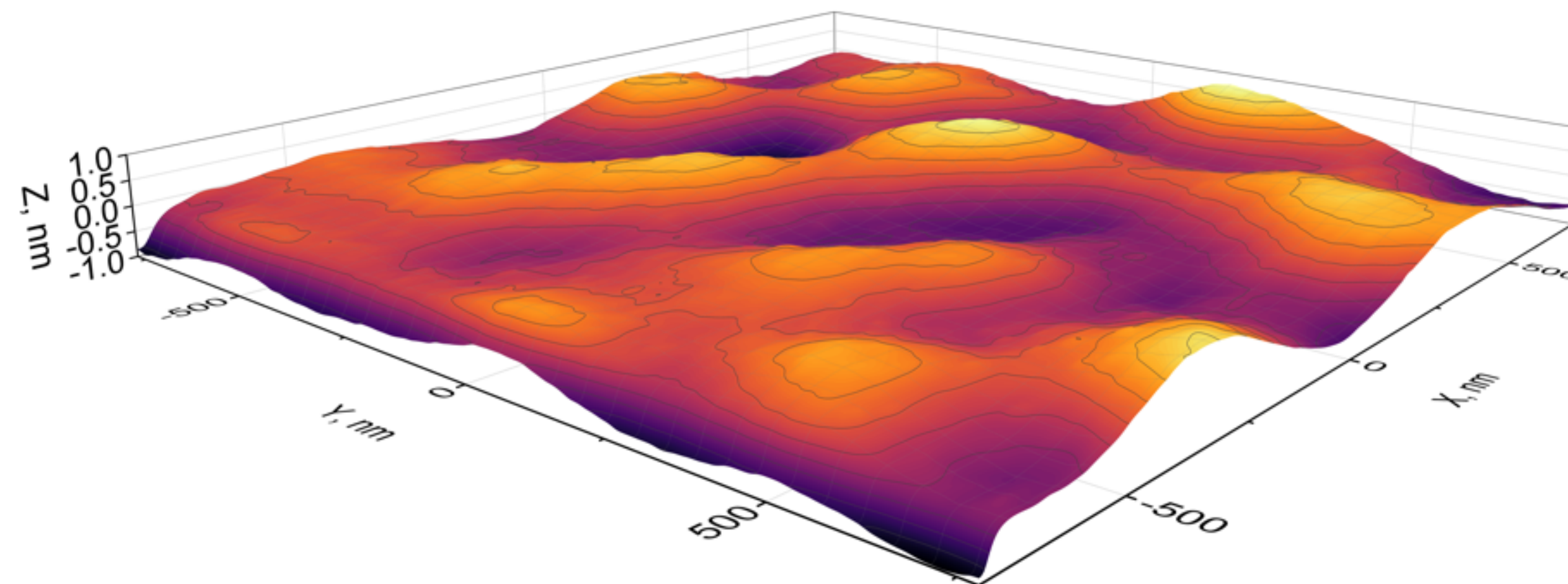


До распыления

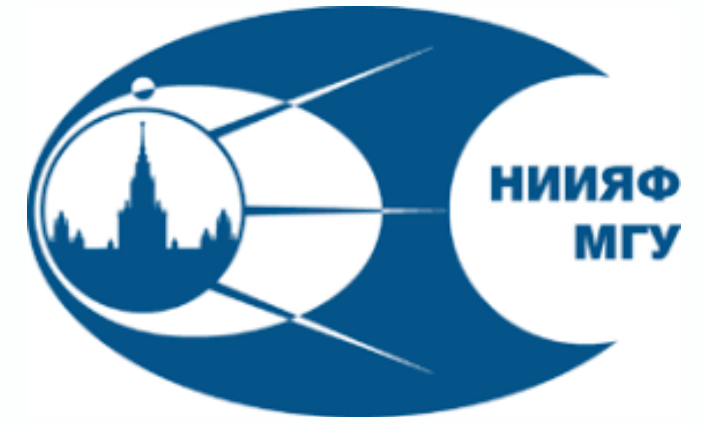
После распыления 200 эВ ионами Ar^+



После распыления 200 эВ ионами Xe^+

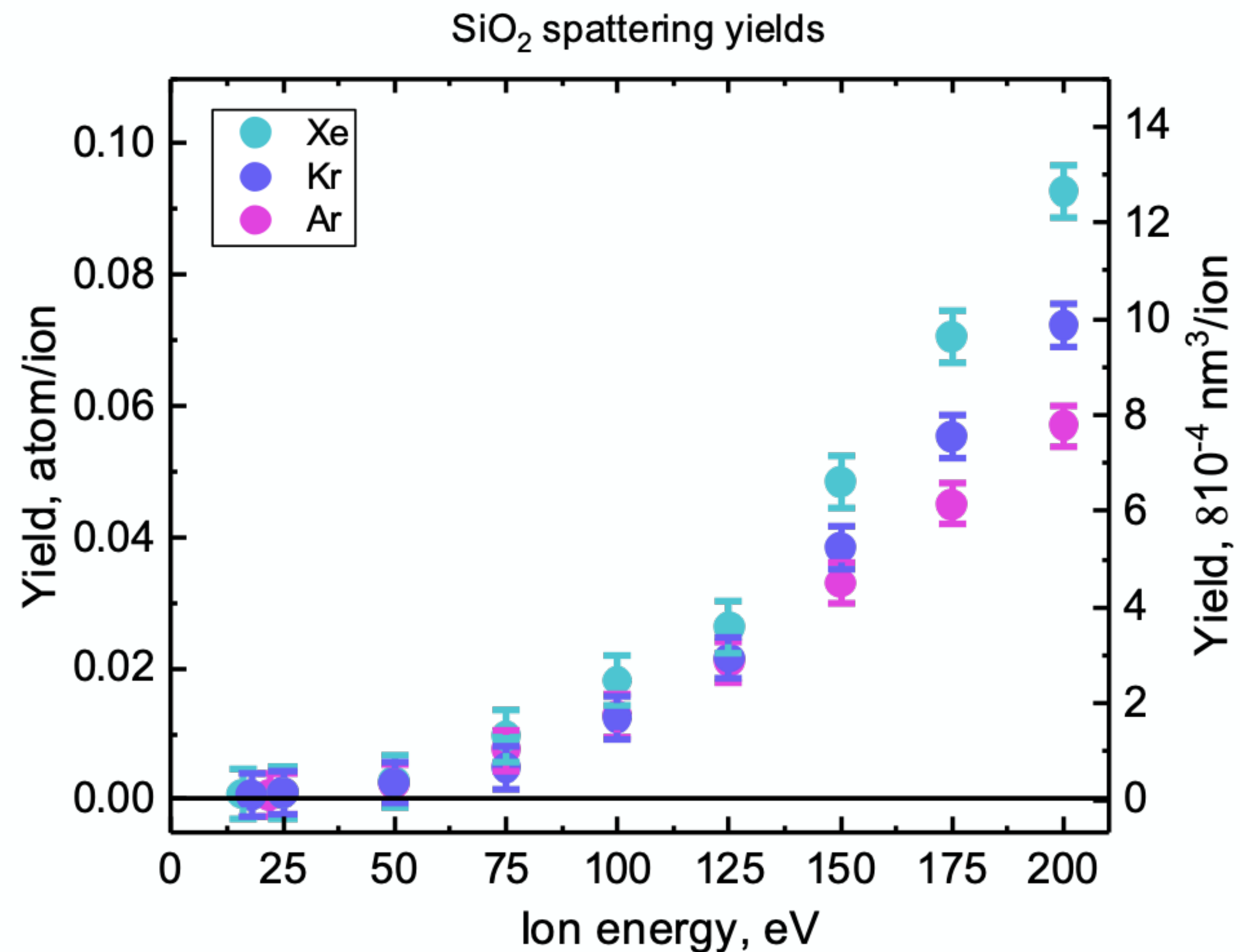
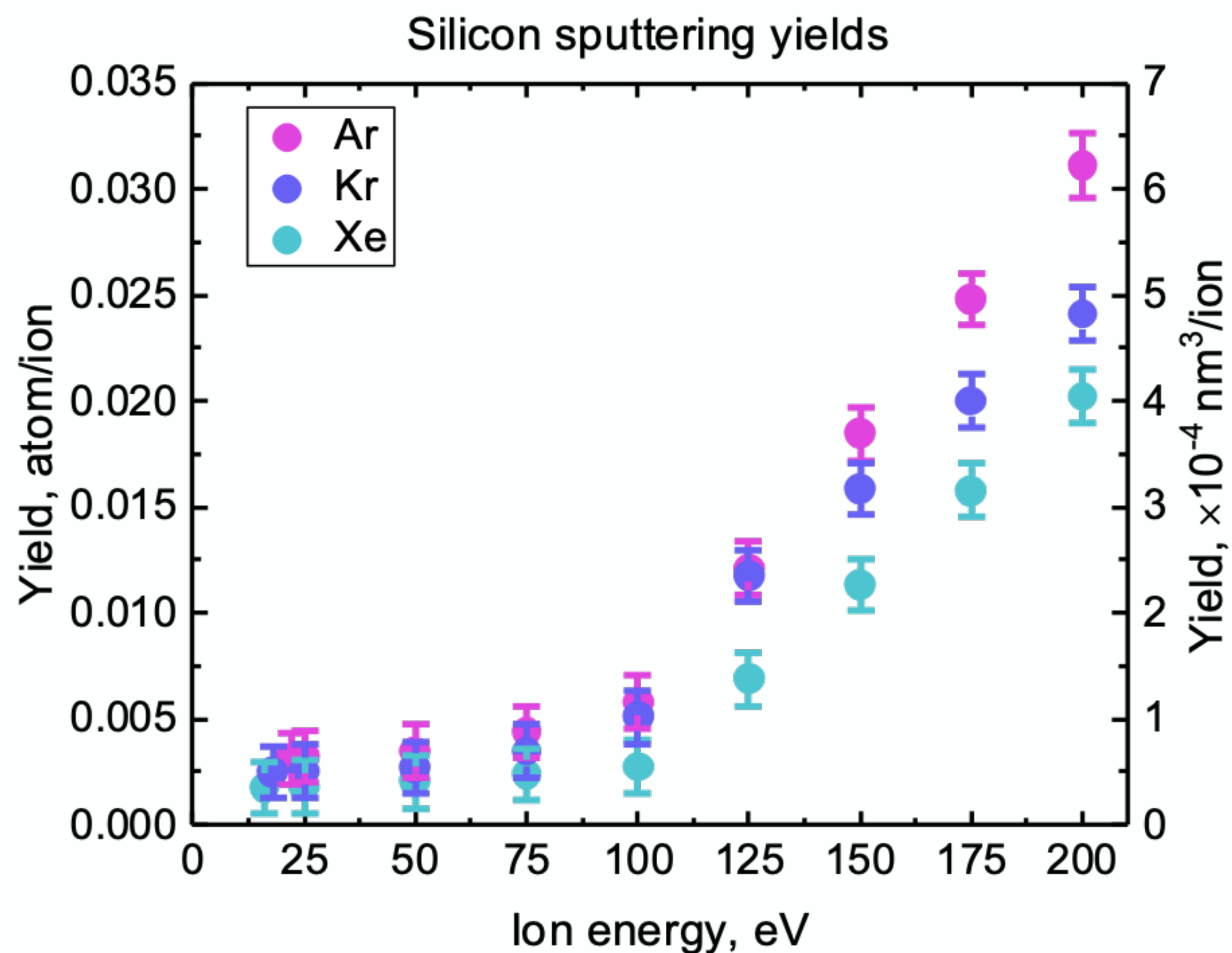


АСМ (AFM): средняя шероховатость



	Si	SiO2
До распыления	± 4 нм	± 4 нм
После распыления ионами Ar^+	$\pm 0,6$ нм	$\pm 0,5$ нм
После распыления ионами Xe^+	$\pm 0,75$ нм	$\pm 0,5$ нм

Вероятности распыления (sputtering yields) $Y(E_{ion})$



$Y(E_{ion})$ для SiO_2 при малой плотности плазмы

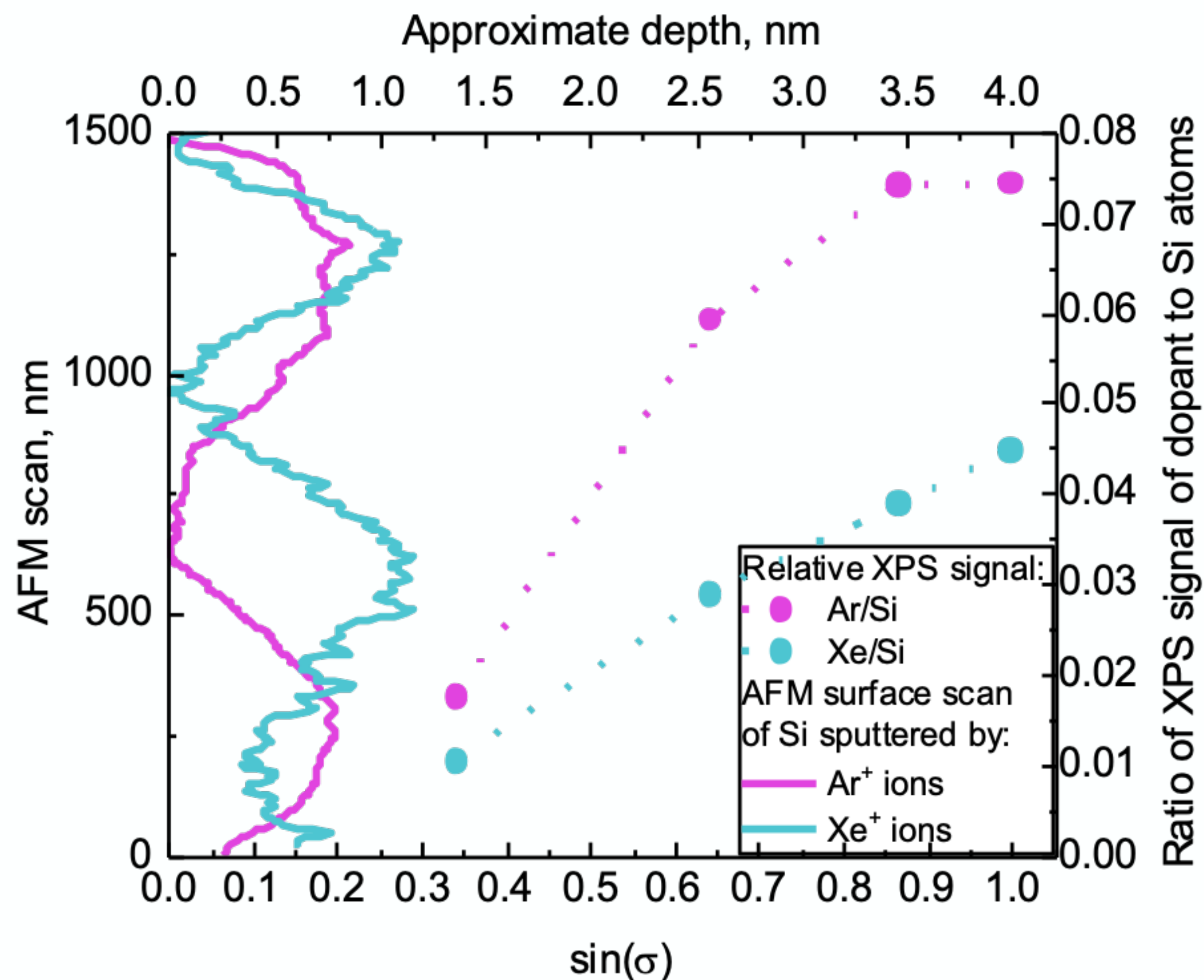
	$E_{ion}, \text{ eV}$	$Y(E_{ion}), \text{ atom/ion at}$ $n_e \approx 2 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$	$Y(E_{ion}), \text{ atom/ion at}$ $n_e \approx 1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$	$Y(E_{ion}), \text{ atom/ion}$ by SRIM 2003
Ar $P = 10 \text{ mTorr}$	100	0.074	0.012	0.050
	200	0.146	0.057	0.148
Xe $P = 5 \text{ mTorr}$	100	0.071	0.018	0.005
	200	0.209	0.092	0.044



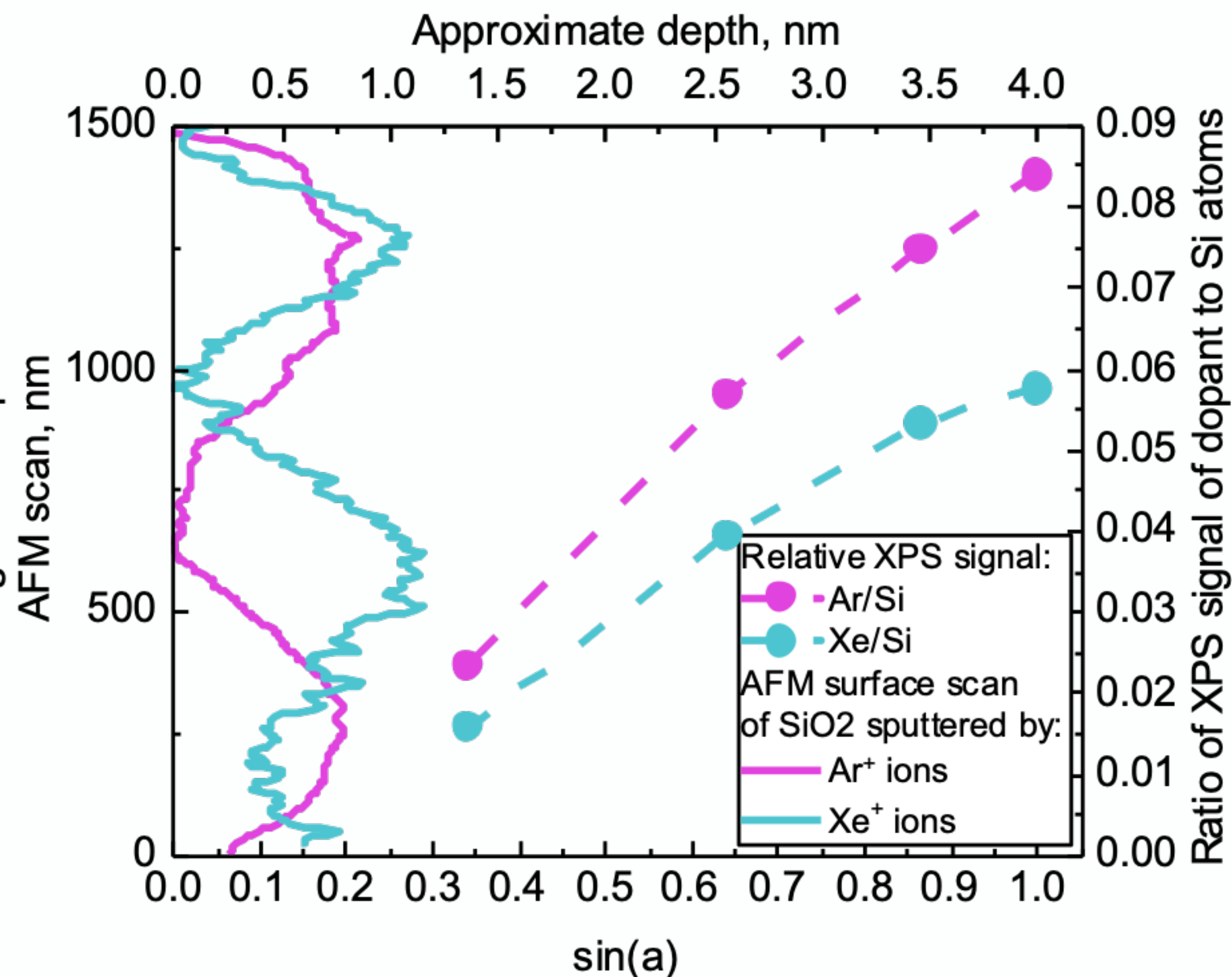
РФЭС (XPS): имплантация Ar и Xe



Si



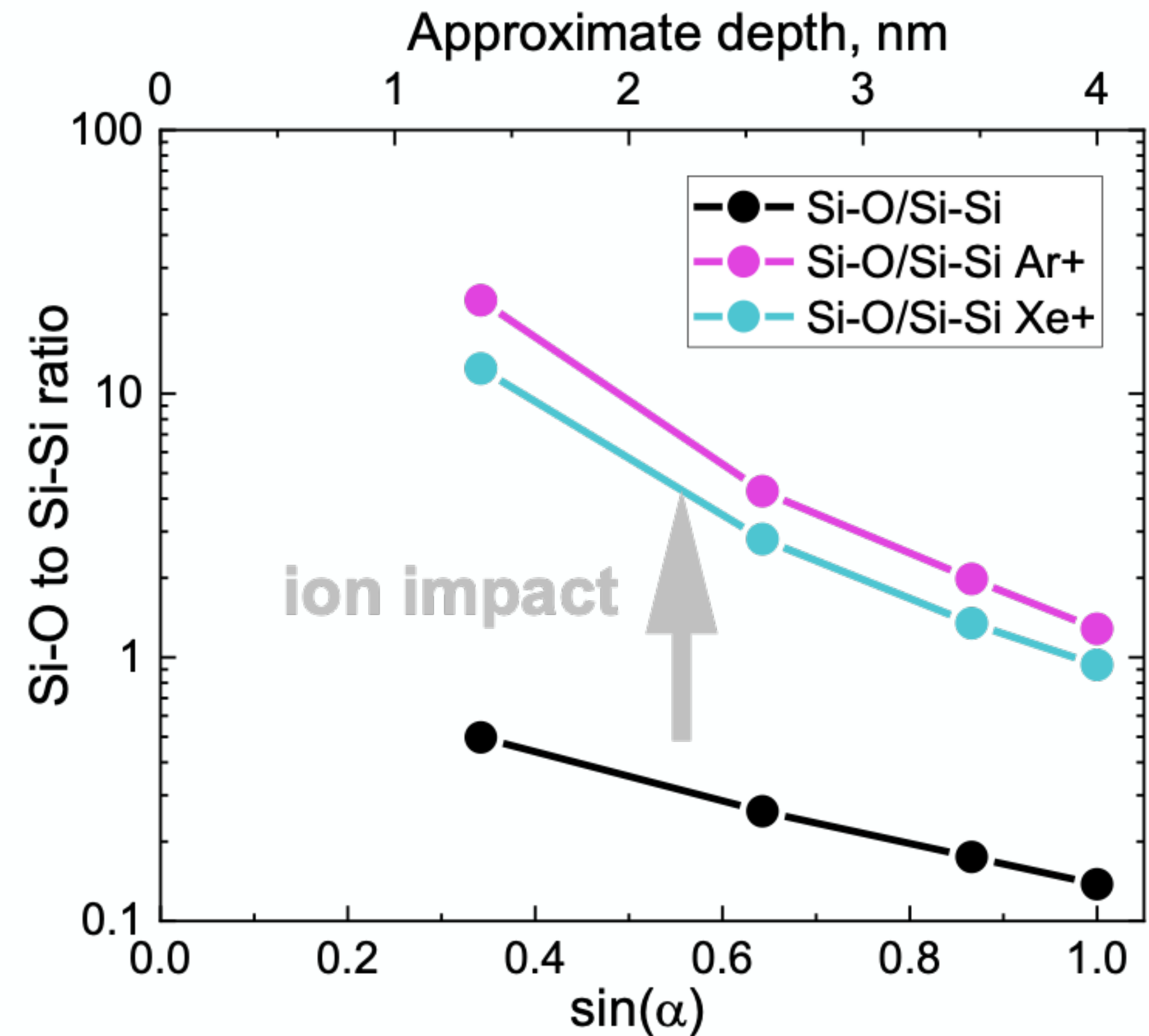
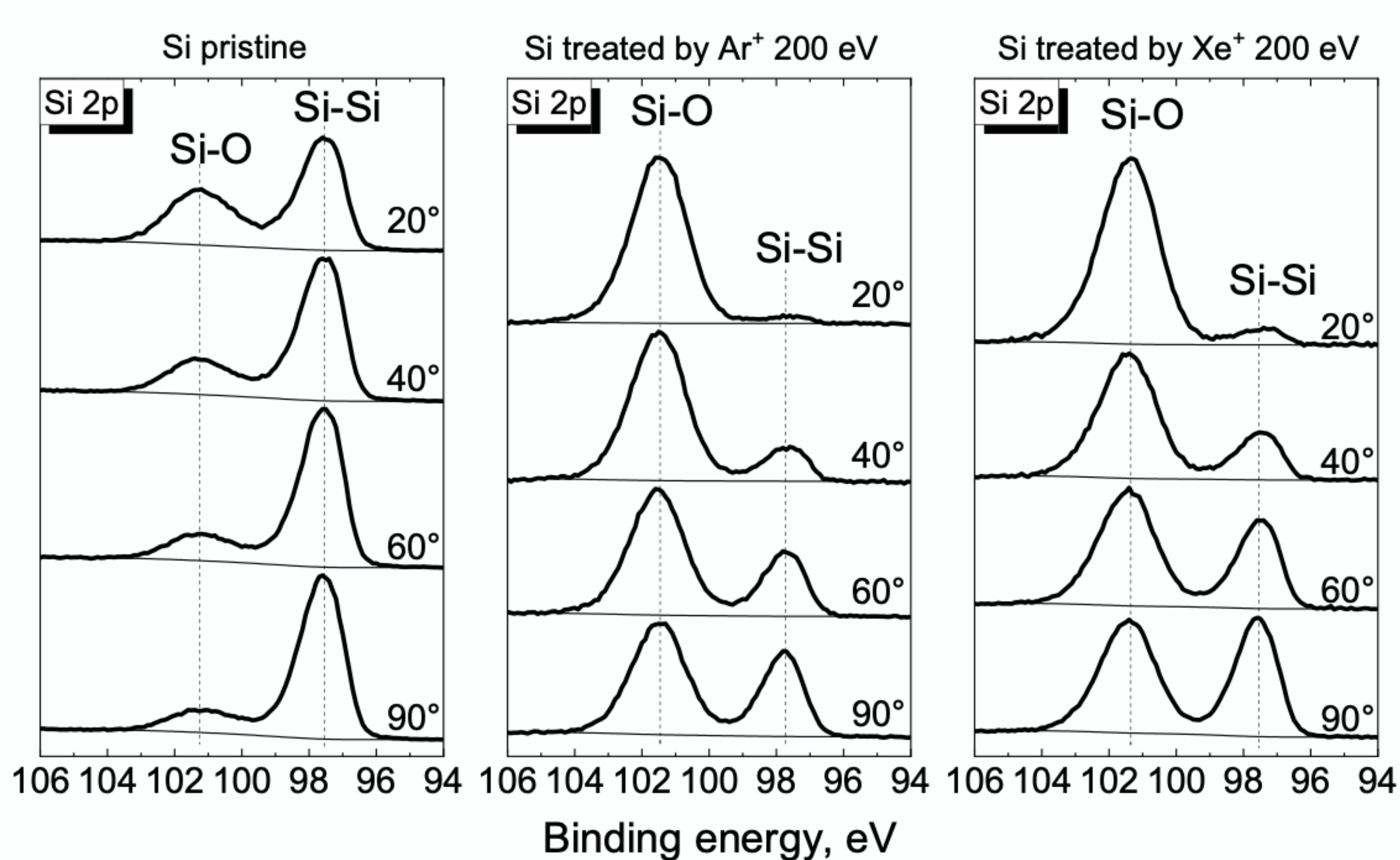
SiO₂



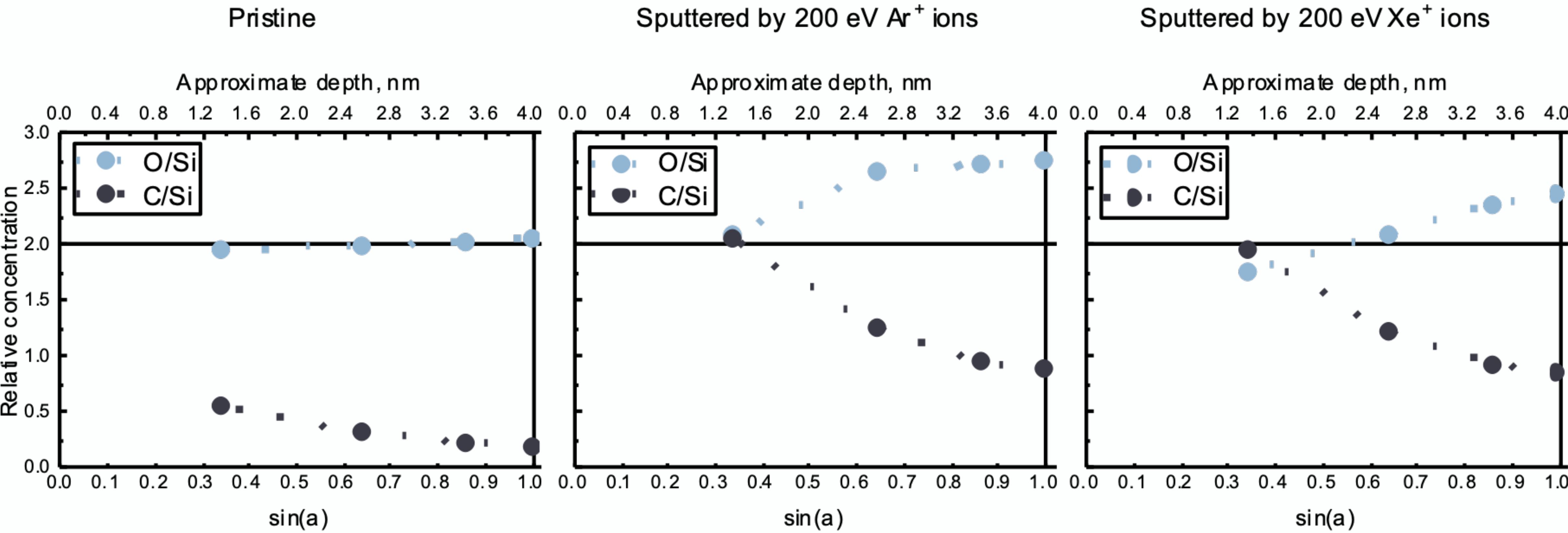
РФЭС (XPS): поверхностная плотность Ar и Xe

	Si	SiO2
После распыления ионами Ar ⁺	$\sim 9,2 \times 10^{14}$ атом/см ²	$\sim 1,12 \times 10^{15}$ атом/см ²
После распыления ионами Xe ⁺	$\sim 5,4 \times 10^{14}$ атом/см ²	$\sim 5,7 \times 10^{14}$ атом/см ²

РФЭС (XPS): модификация «поверхности» Si



РФЭС: модификация «поверхности» SiO_2



Основные результаты

- Получены зависимости $Y(E_{\text{ion}})$ для кремния и диоксида кремния в диапазоне энергий 20–200 эВ ионами Ar, Kr и Xe.
- $Y(E_{\text{ion}})$ при энергиях ионов < 75 эВ демонстрируют «неклассическое» распыление, вызванное влиянием потоков ВУФ-фотонов и метастабильных атомов.
- Реальная структура SiO_2 может заметно отличаться от общих теоретических представлений и значительно влиять на процесс распыления.



**GDPA 2023
UFA, RUSSIA**



Sputtering of amorphous Si and SiO₂ by low-energy Ar⁺, Kr⁺ and Xe⁺ ions

**D.R. Shibano, D.V. Lopaev, S.M.
Zyryanov, A.I. Zotovich, A.T. Rakhimov**

Lomonosov Moscow State University,
Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics
(SINP MSU), Moscow, Russia

Дополнительные материалы



Контроль за параметрами разрядов

В ходе эксперимента в реальном времени измерялись:

- Плазменный и плавающий потенциалы, ФРЭЭ, температура электронов – зондом Ленгмюра;
- Электронная плотность плазмы – СВЧ-зондом (Hairpin-probe);
- Химический состав плазмы и ионов – квадрупольным масс-спектрометром;
- Распределение ионов по энергии – задерживающим анализатором энергии (RFEA);



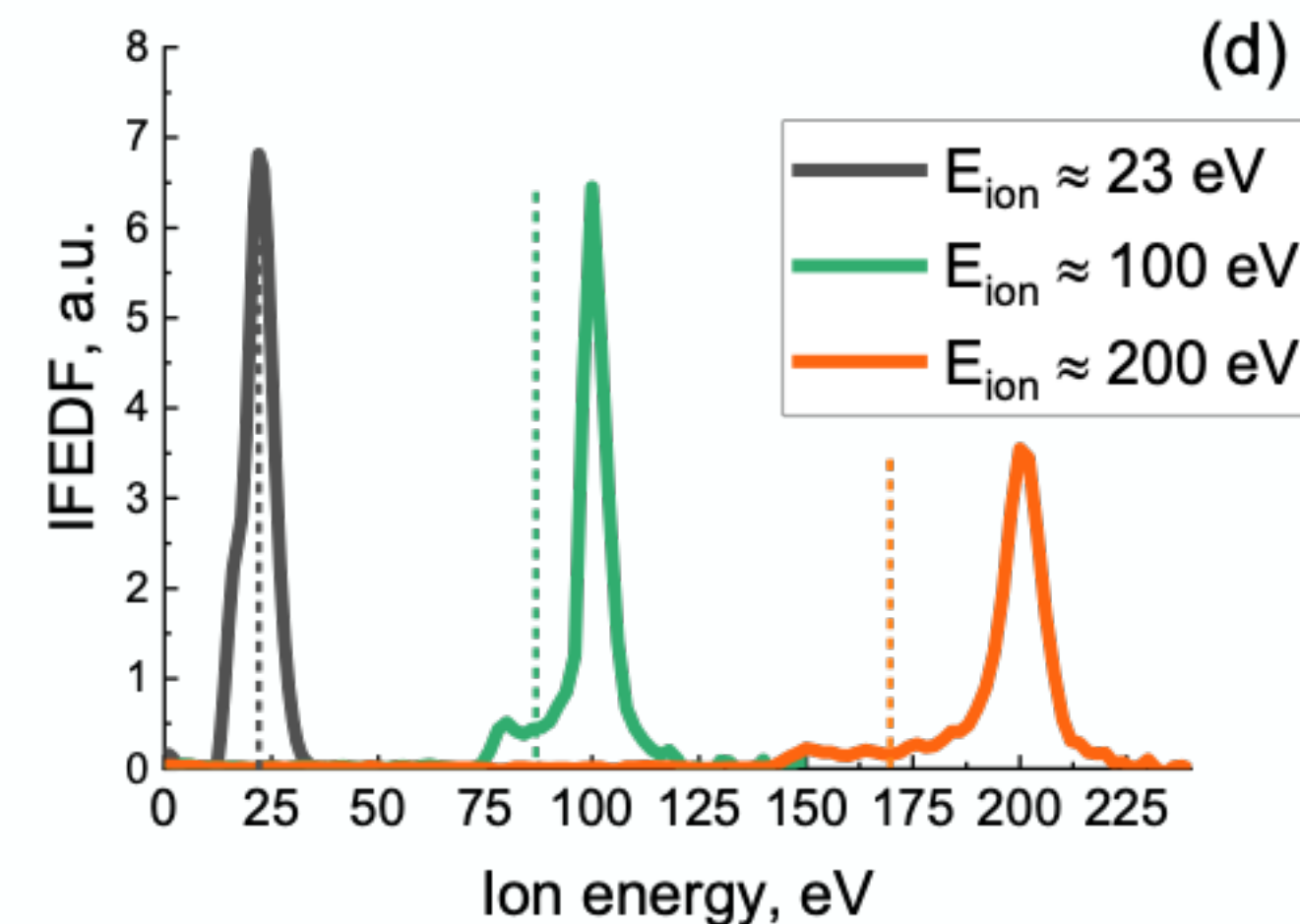
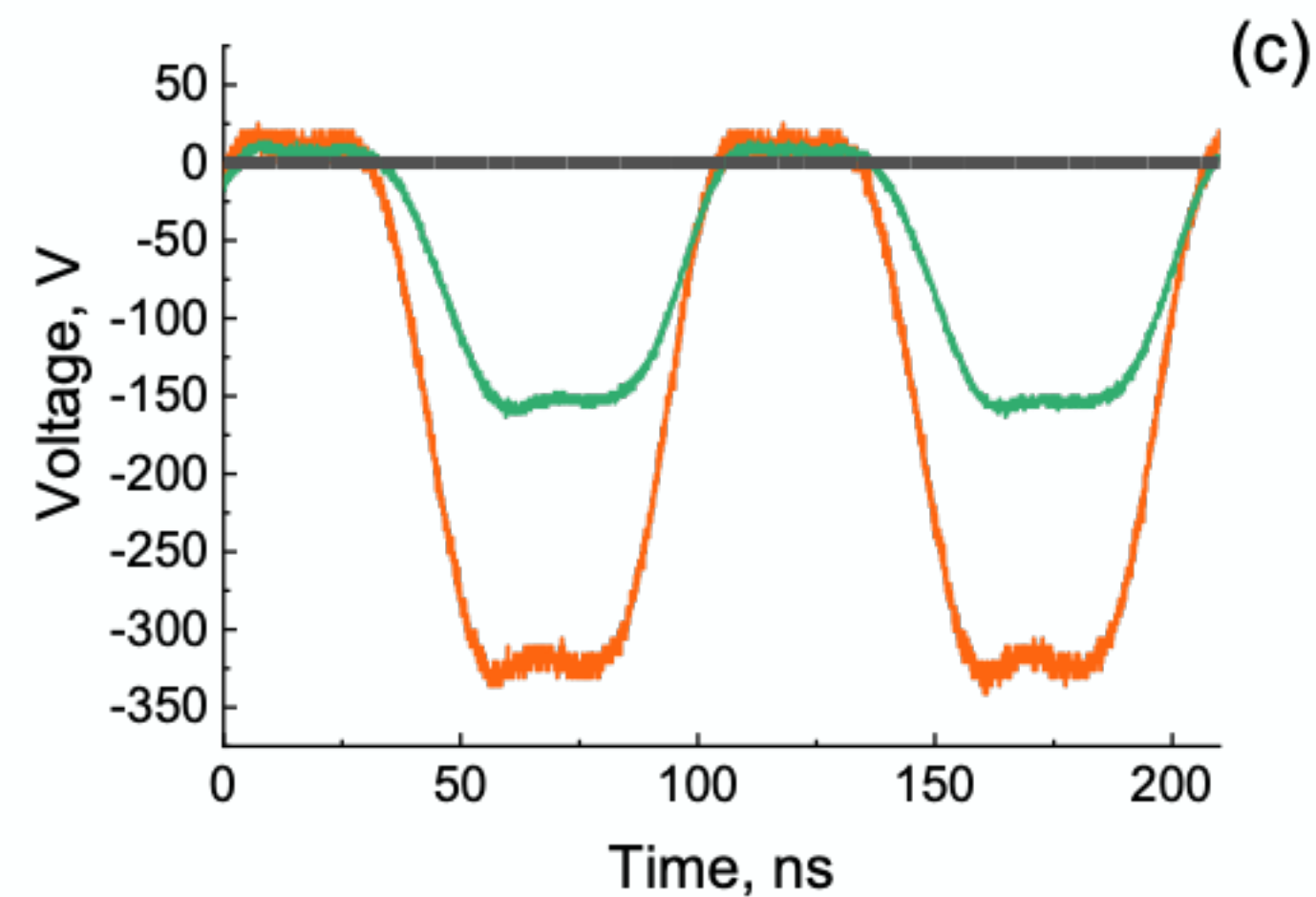
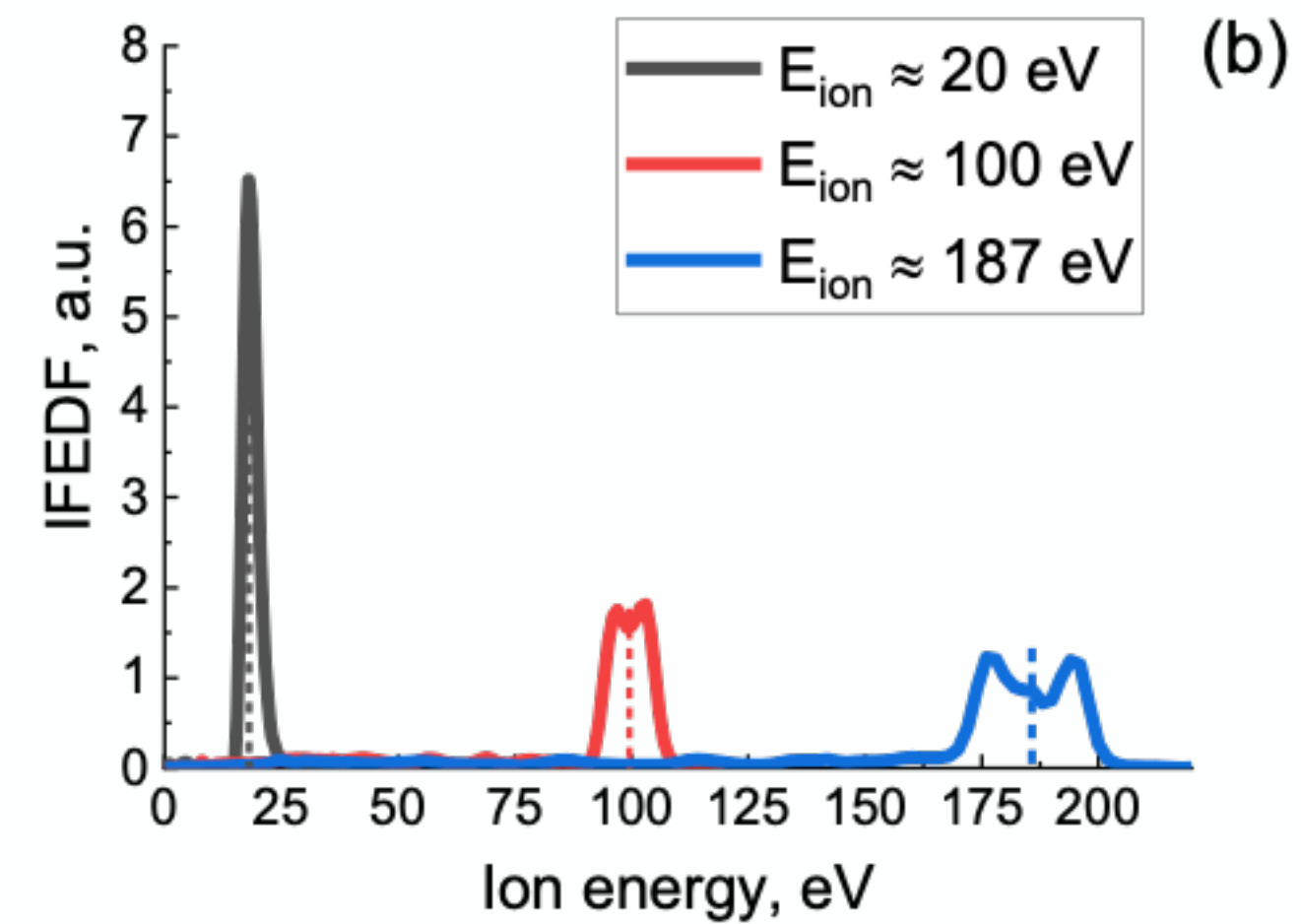
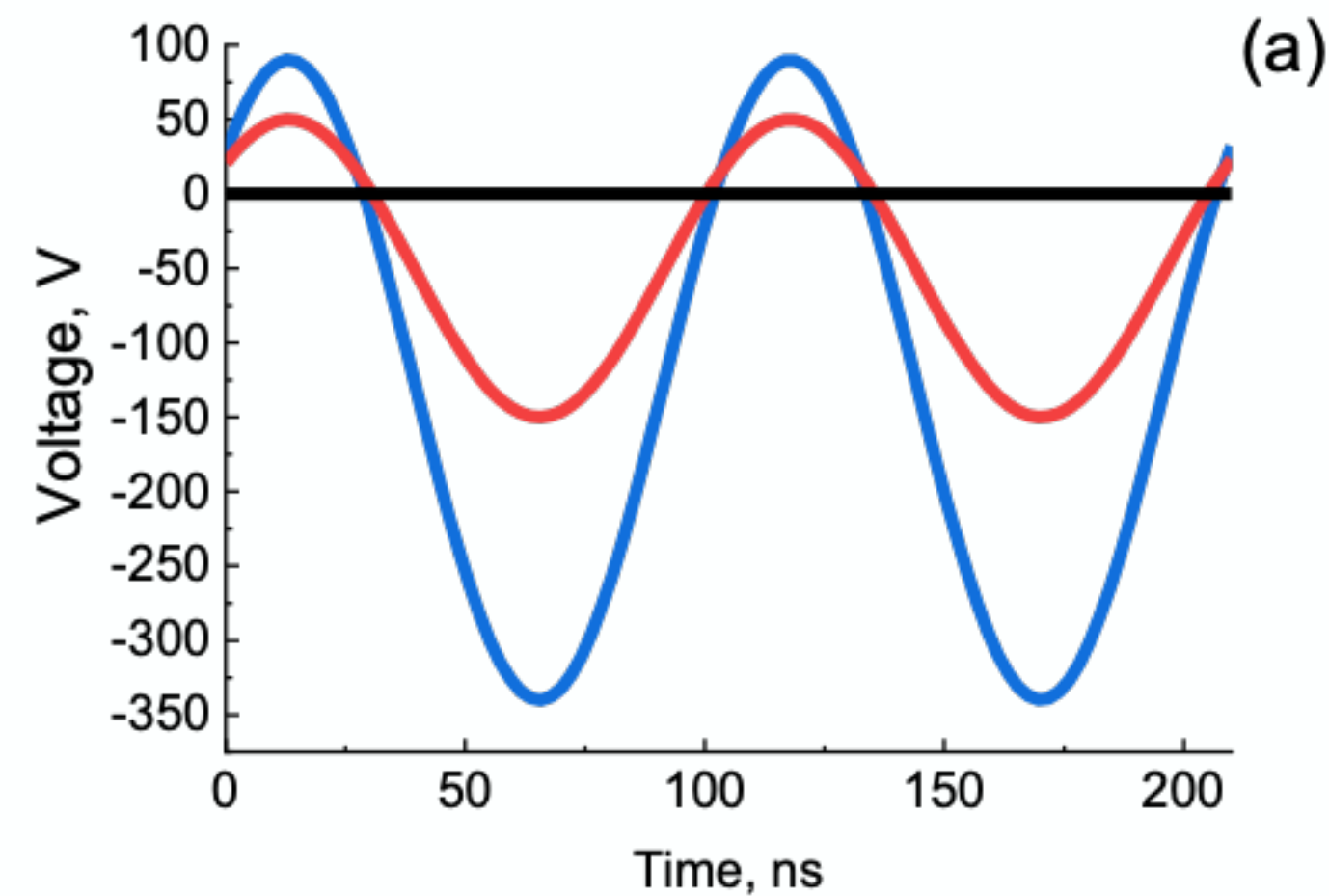
Контроль за параметрами разрядов

В ходе эксперимента в реальном времени измерялись:

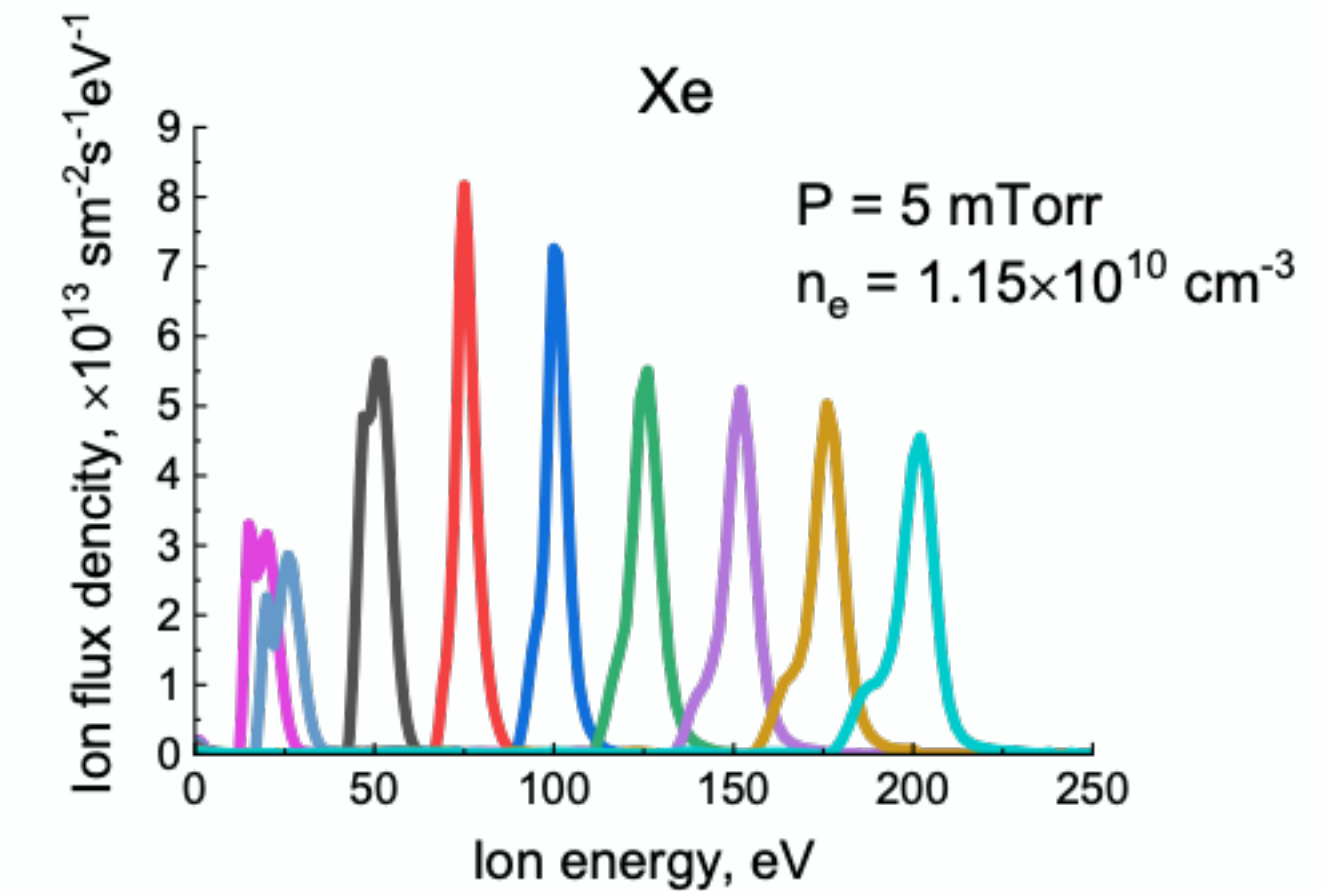
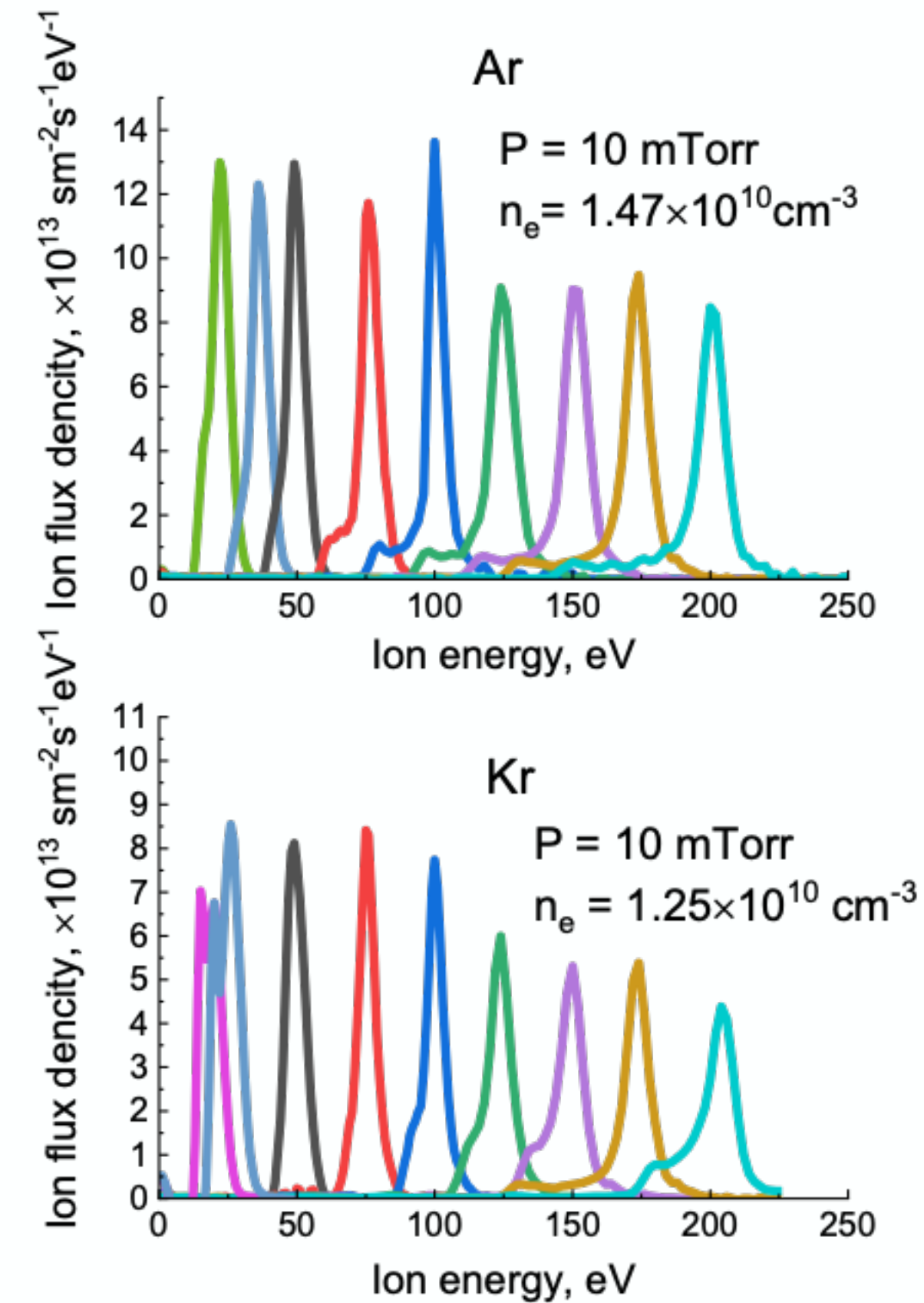
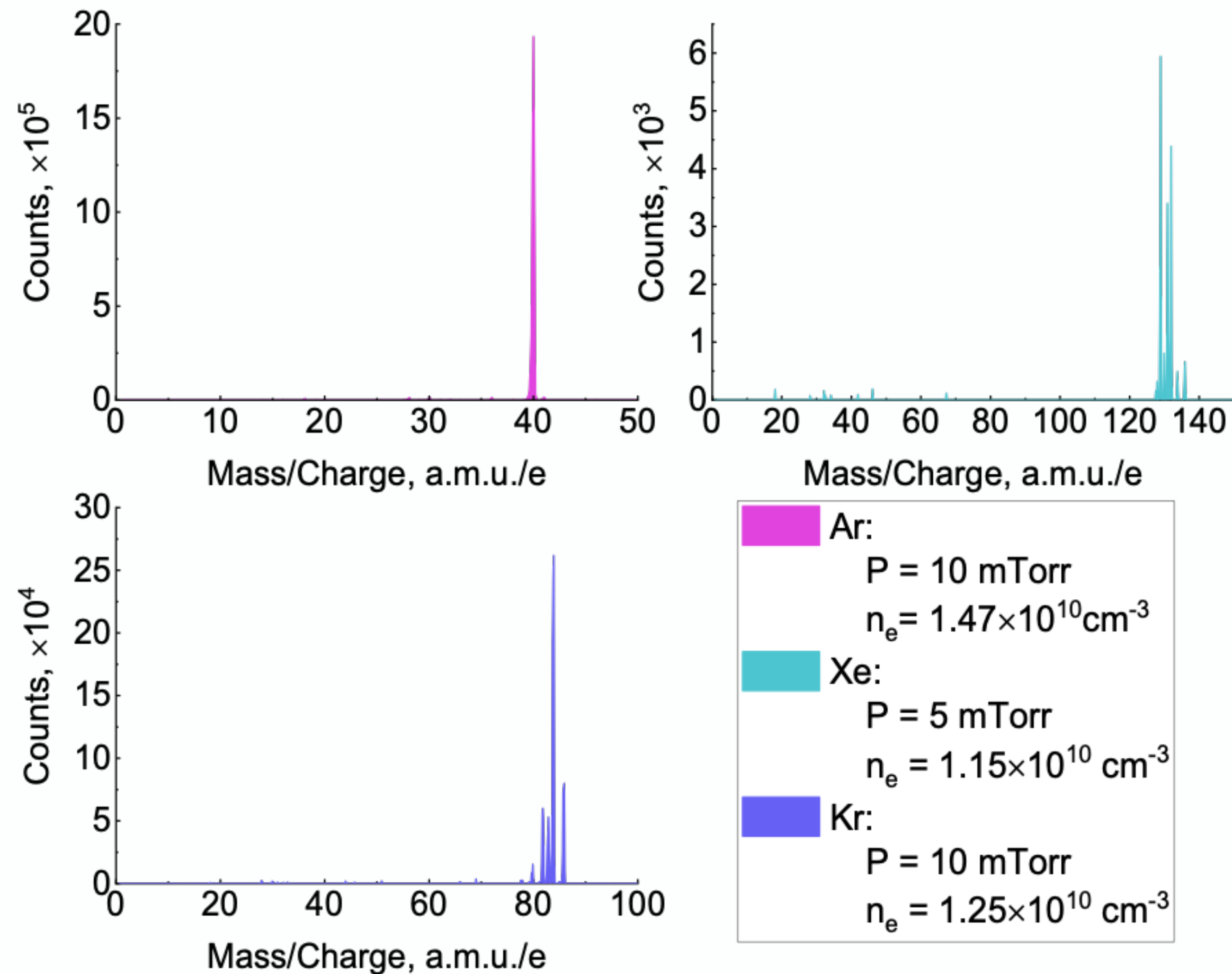
- Поток ионов – методом самосмещения;
- Давление в камере, проток рабочего газа, напряжения смещения и самосмещения;
- Осциллографом контролировалась форма напряжения смещения;
- Было рассчитано влияние образца на результирующую энергию ионов и угловое распределение ионов.

Все эти данные были необходимы, чтобы обеспечить постоянство разряда в ходе эксперимента, и использовались при расчёте вероятности распыления (*sputtering yield*).

Особенность напряжения смещения в используемом разряде

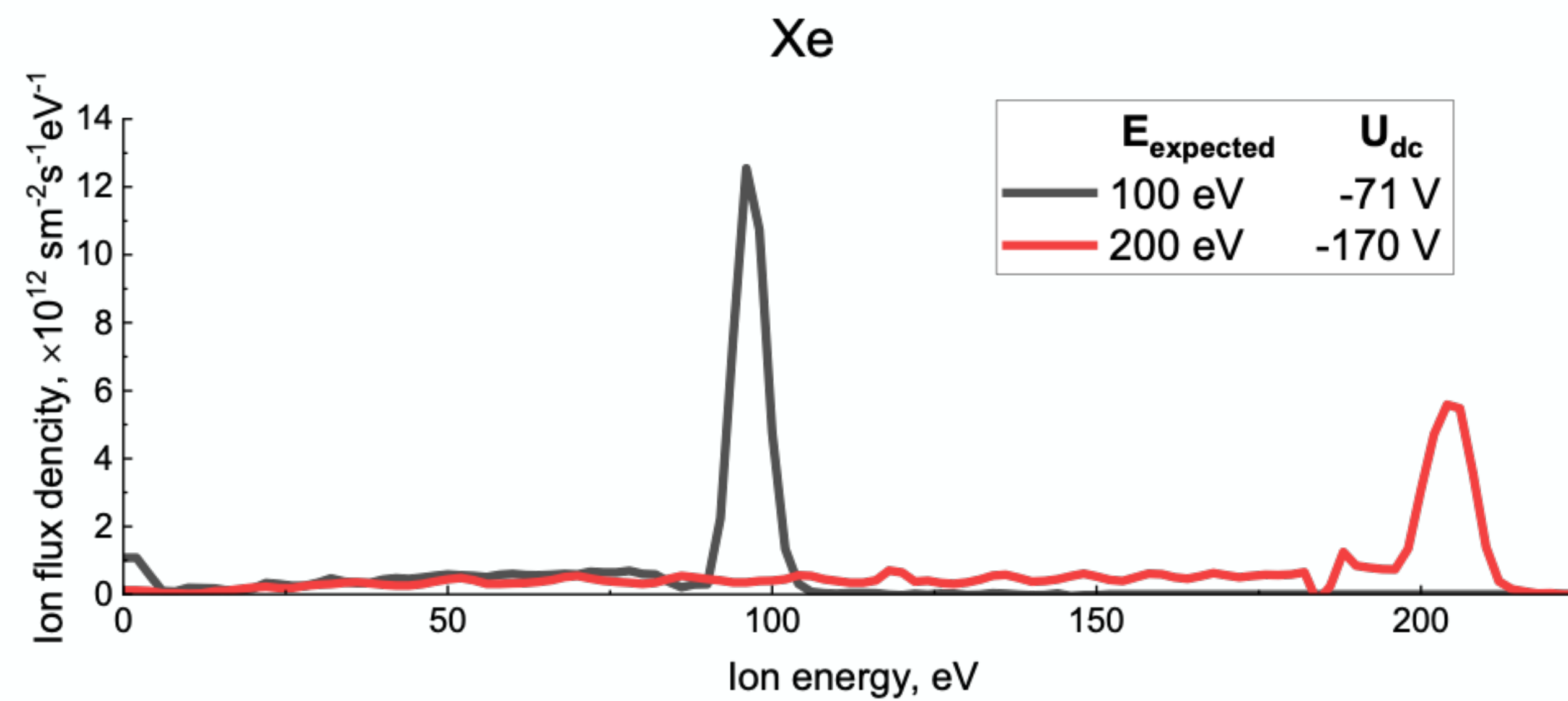
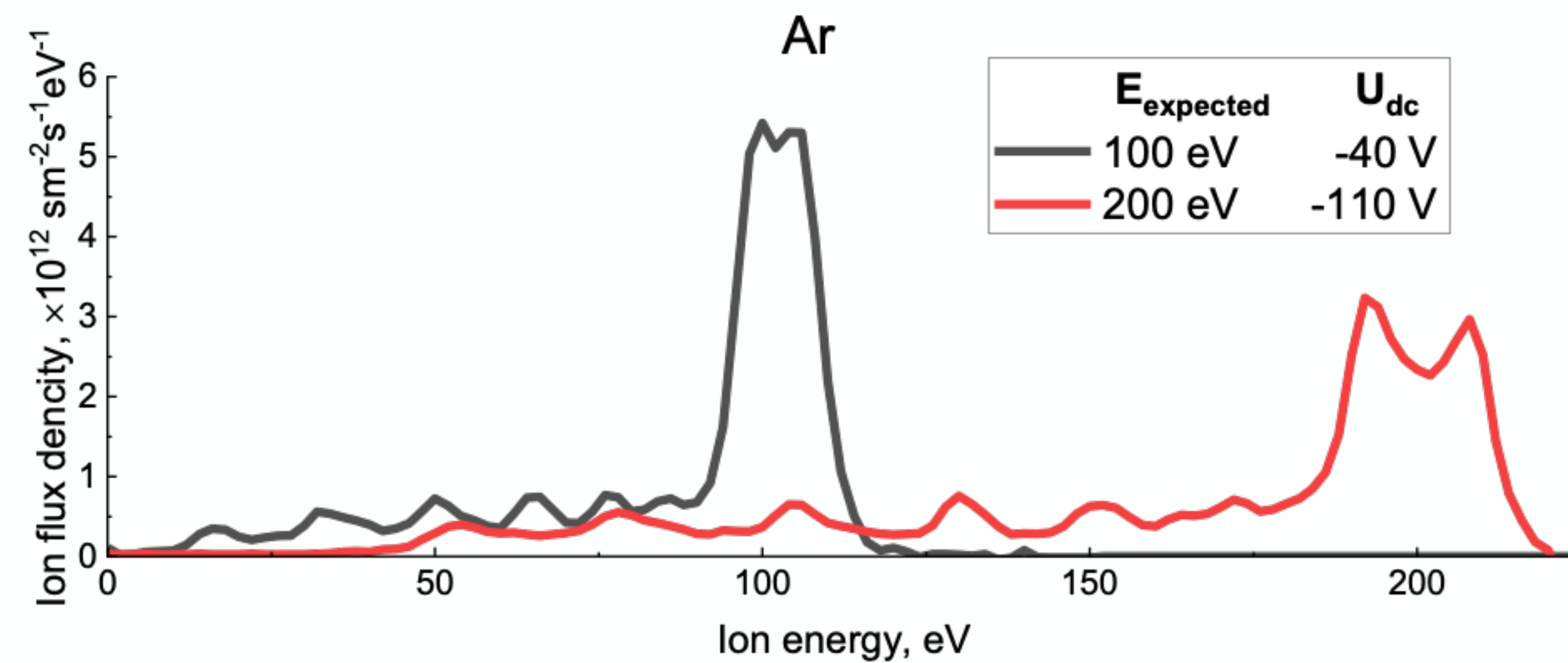


Ионные спектры



E_{peak}	Ar U_{dc}	Xe U_{dc}	Kr U_{dc}
18 eV	-	0	1 V
22 eV	3 V	-	-
25 eV	-1 V	-4 V	-3 V
50 eV	-28 V	-31 V	-30 V
75 eV	-53 V	-59 V	-57 V
100 eV	-75 V	-84 V	-81 V
125 eV	-98 V	-109 V	-105 V
150 eV	-120 V	-135 V	-129 V
175 eV	-140 V	-166 V	-154 V
200 eV	-163 V	-184 V	-180 V

	Ar $P = 10 \text{ mTorr}$ $n_e = 1.47 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$			Xe $P = 5 \text{ mTorr}$ $n_e = 1.15 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$			Kr $P = 10 \text{ mTorr}$ $n_e = 1.25 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$		
$E_{ion}, \text{ eV}$	$U_{dc}, \text{ V}$	$F_{ion}, \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$U_{pl}, \text{ V}$	$U_{dc}, \text{ V}$	$F_{ion}, \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$U_{pl}, \text{ V}$	$U_{dc}, \text{ V}$	$F_{ion}, \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$U_{pl}, \text{ V}$
18	-	-	-	0	5.29×10^{14}	11.5	1	6.61×10^{14}	12
22	3	1.01×10^{15}	15.5	-	-	-	-	-	-
25	-1	1.01×10^{15}	15.5	-4	5.30×10^{14}	11.5	-3	6.63×10^{14}	12
50	-28	1.07×10^{15}	15.5	-31	5.34×10^{14}	12.5	-30	6.67×10^{14}	13.5
75	-53	1.14×10^{15}	16	-59	5.53×10^{14}	13.5	-57	6.86×10^{14}	14.5
100	-75	1.22×10^{15}	16.5	-84	5.72×10^{14}	14.5	-81	7.05×10^{14}	15.5
125	-98	1.26×10^{15}	17	-109	5.91×10^{14}	15.5	-105	7.24×10^{14}	16
150	-120	1.29×10^{15}	17.5	-135	6.10×10^{14}	16	-129	7.43×10^{14}	17
175	-140	1.31×10^{15}	18	-166	6.29×10^{14}	17.5	-154	7.51×10^{14}	18
200	-163	1.33×10^{15}	19	-184	6.48×10^{14}	18	-180	7.62×10^{14}	18.5



	Ar $P = 10 \text{ mTorr}$ $n_e = 2.2 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$			Xe $P = 5 \text{ mTorr}$ $n_e = 2.6 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$		
E_{ion}, eV	U_{dc}, V	$F_{ion}, \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	U_{pl}, V	U_{dc}, V	$F_{ion}, \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	U_{pl}, V
100	-45	1.2×10^{14}	24.5	-71	1.2×10^{14}	25
200	-135	1.3×10^{14}	30	-170	1.3×10^{14}	27.5

