

Plasma enhanced atomic layer etching of SiO_2 in $\text{Ar}/\text{C}_4\text{F}_8$ inductively coupled plasma with O_2 cleaning step

D.R. Shibano¹, D.V. Lopaev¹, Y.G. Zaseev²,
G.Y. Pavlov², A.T. Rakhimov¹

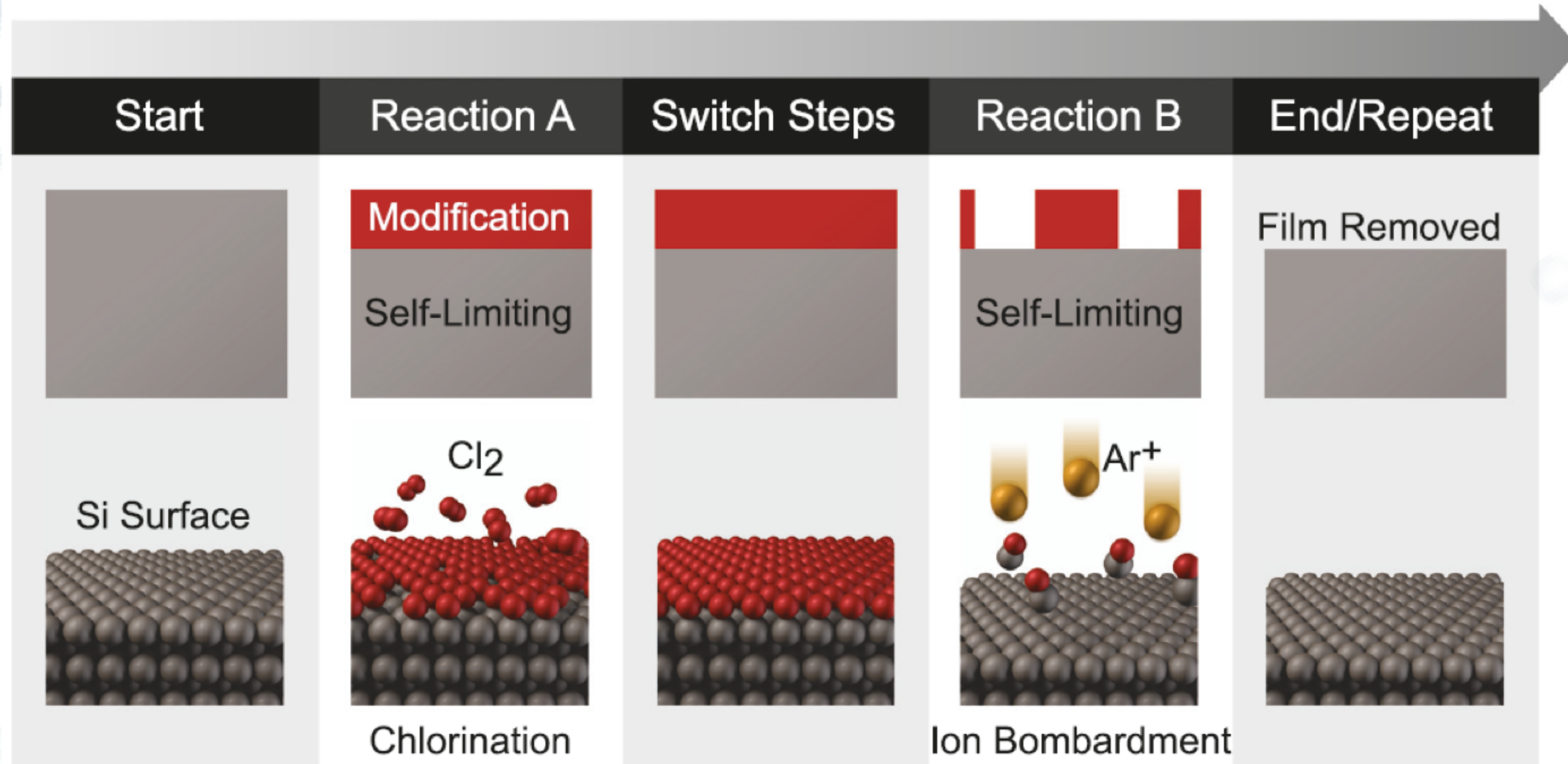
¹ Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (SINP MSU), Moscow, Russia

² JSC Research Institute of Precision Machine Manufacturing, Zelenograd, Moscow, Russia

GDPA 2023
UFA, RUSSIA



Atomic Layer Etching



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

Преимущества ALE

- Возможность **удалять материал** сверхтонкими слоями, в пределе – **отдельными атомными слоями**.
- Более **точный контроль** за **толщиной удаляемого материала** в сравнении с классическими методами травления.
- **Сглаживание шероховатости поверхности**.

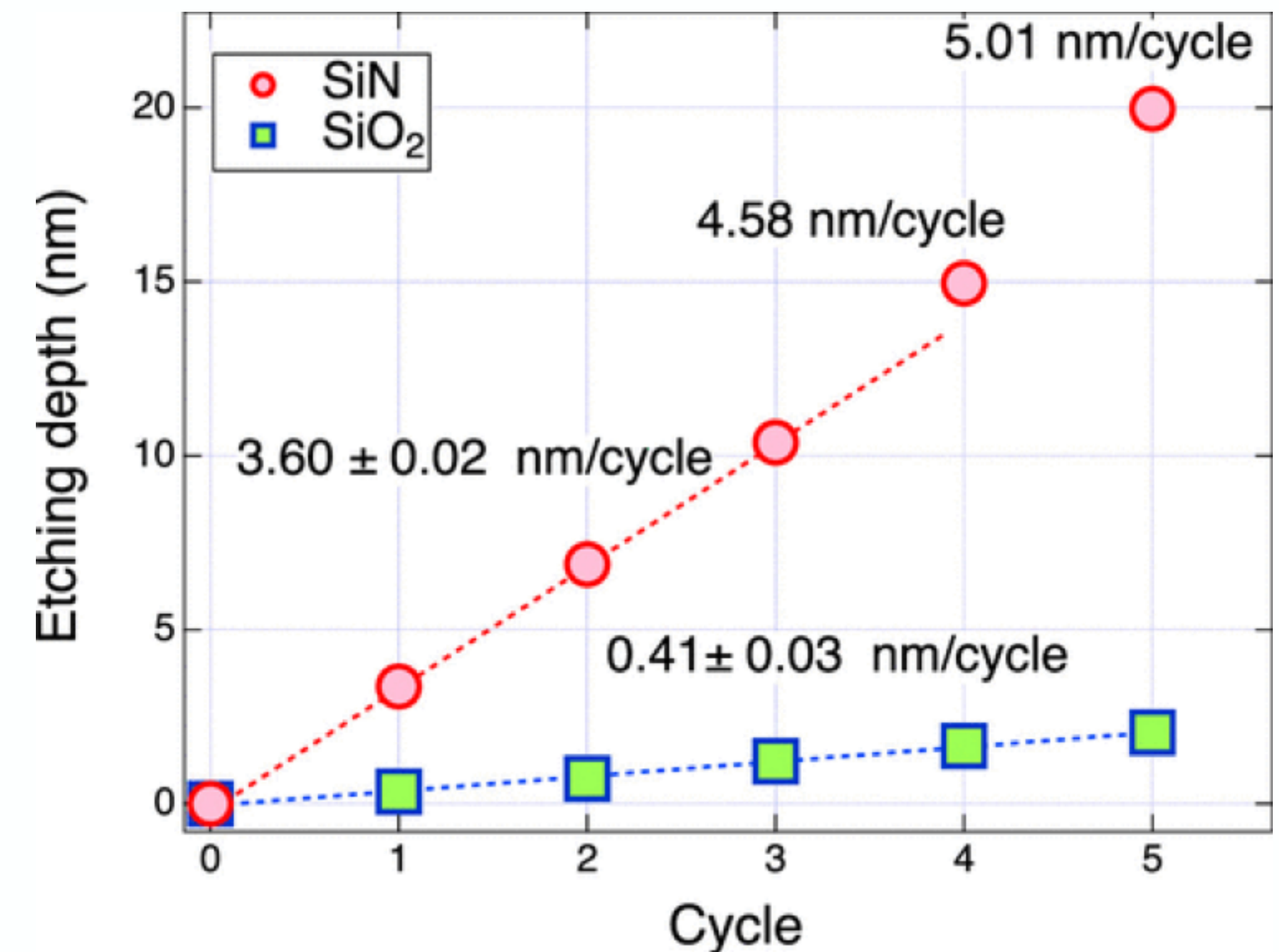
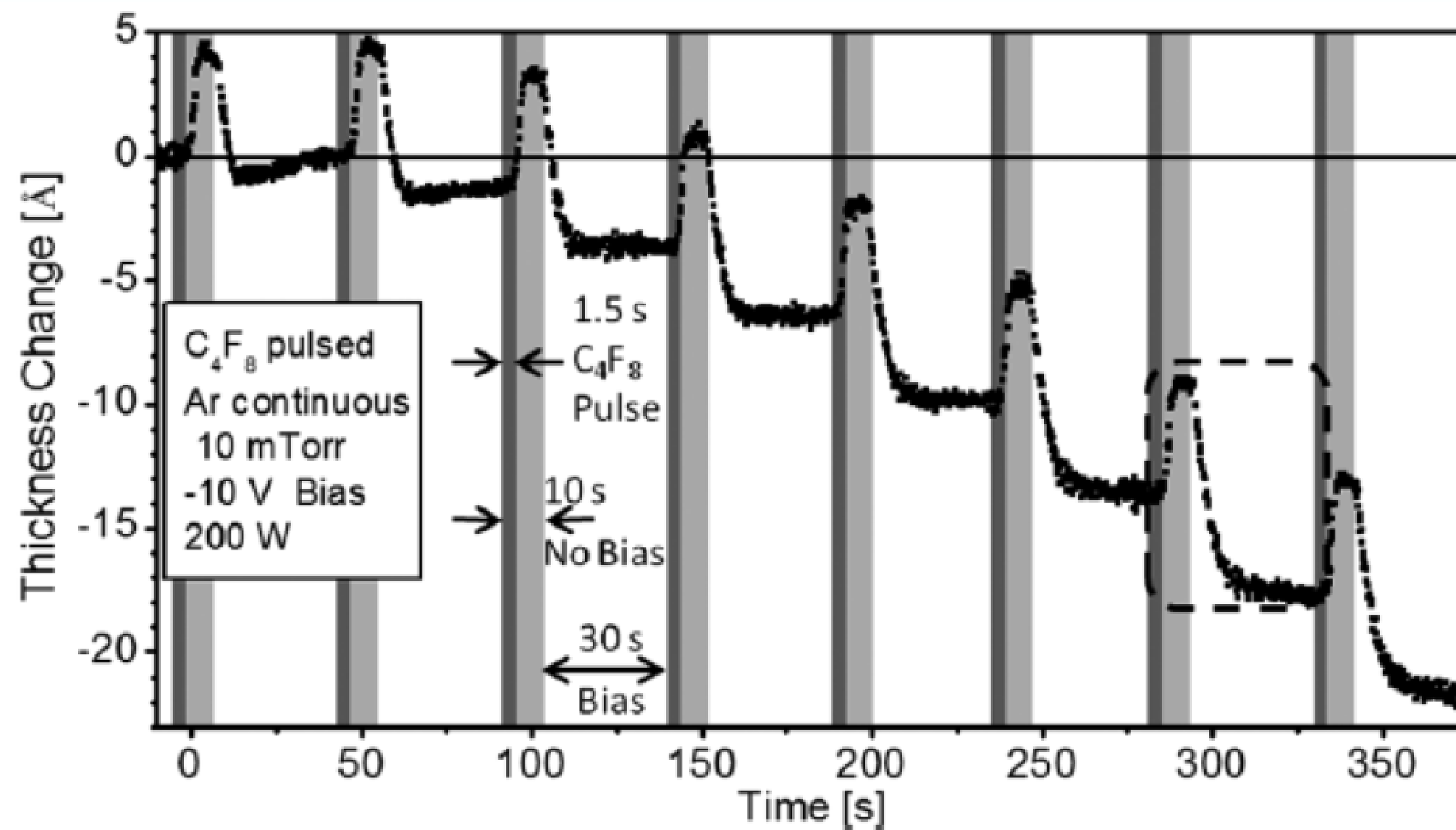


Проблемы

- Плохая повторяемость процесса от итерации к итерации. Что связано с загрязнением реактора химически активными радикалами.
- Плохая повторяемость процесса от пластины к пластине.
- Большая продолжительность процесса. Одна итерация может занимать несколько минут.



Повторяемость процесса



Ryan J. Gasvoda, Zhonghao Zhan, Scott Wang et al., "Etch selectivity during plasma-assisted etching of SiO₂ and SiN_x: Transitioning from reactive ion etching to atomic layer etching", J. Vac. Sci. Technol., 2020

Shih-Nan Hsiao, Makoto Sekine, and Masaru Hori, "In situ monitoring of etching characteristic and surface reactions in atomic layer etching of SiN using cyclic CF₄/H₂ and H₂ plasmas", ACS Appl. Mater. Interfaces, 2023

ALE с точки зрения технологии

Это последовательная работа в двух противоположных режимах: **осаждение** и ион-стимулированное **травление**.

- Для **осаждения** требуются **большие потоки** химически активных **радикалов**, из которых формируется новый материал, и **низкие энергии и потоки ионов**.
- Для **травления** необходимы **высокие потоки ионов** с **достаточной энергией** для удаления материала.



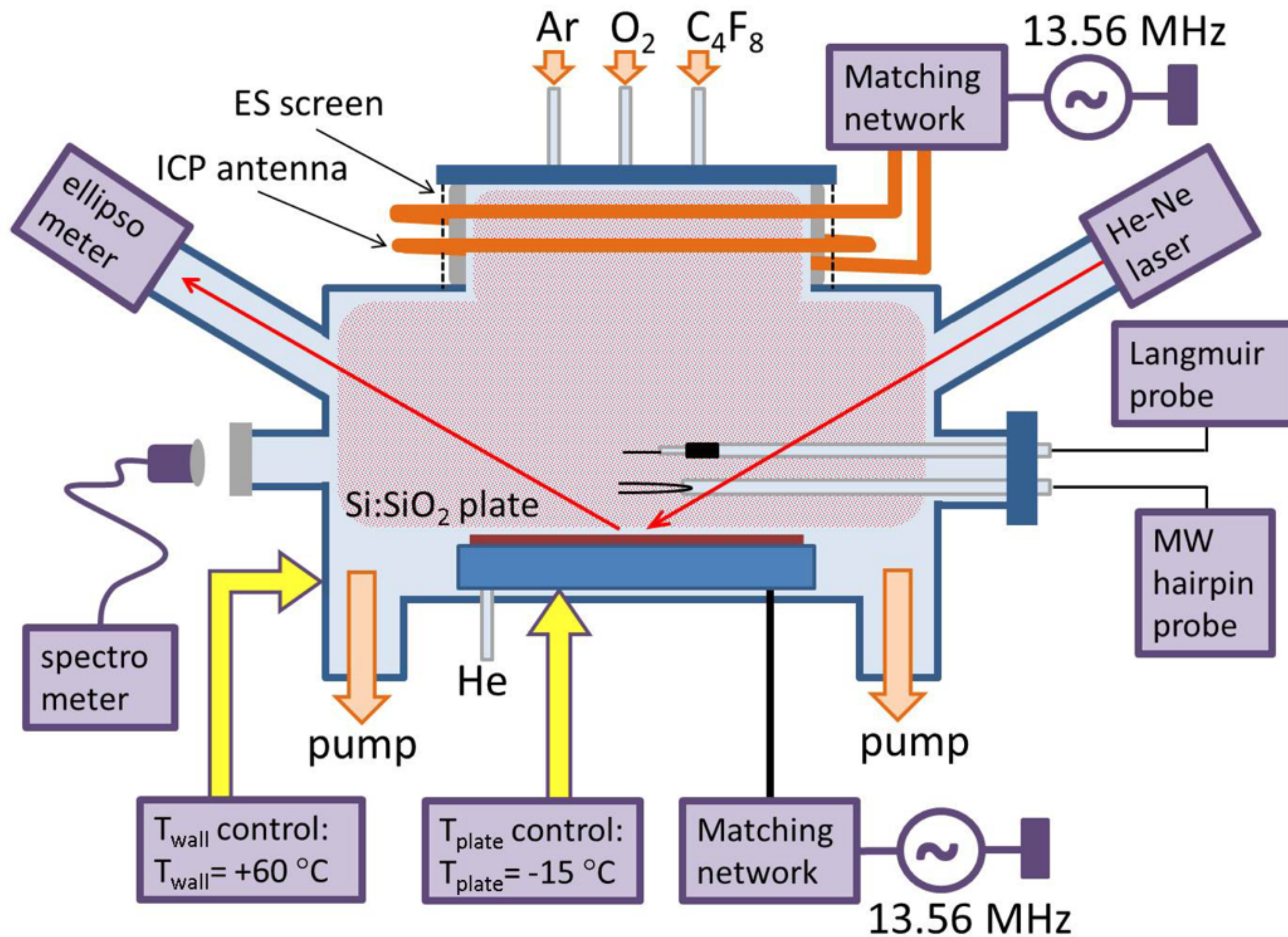
Методы преодоления проблем



- Большой градиент температур между стенками камеры и пластиной.
- Этап **очистки реактора** и поверхности образца от остатков радикалов **в кислородной плазме**.
- Работа в непрерывном **разряде аргона с большим расходом** ($>1300 \text{ см}^3/\text{м}$) без перестройки мощности генератора и изменения электрического согласования при добавлении химически активных газов.

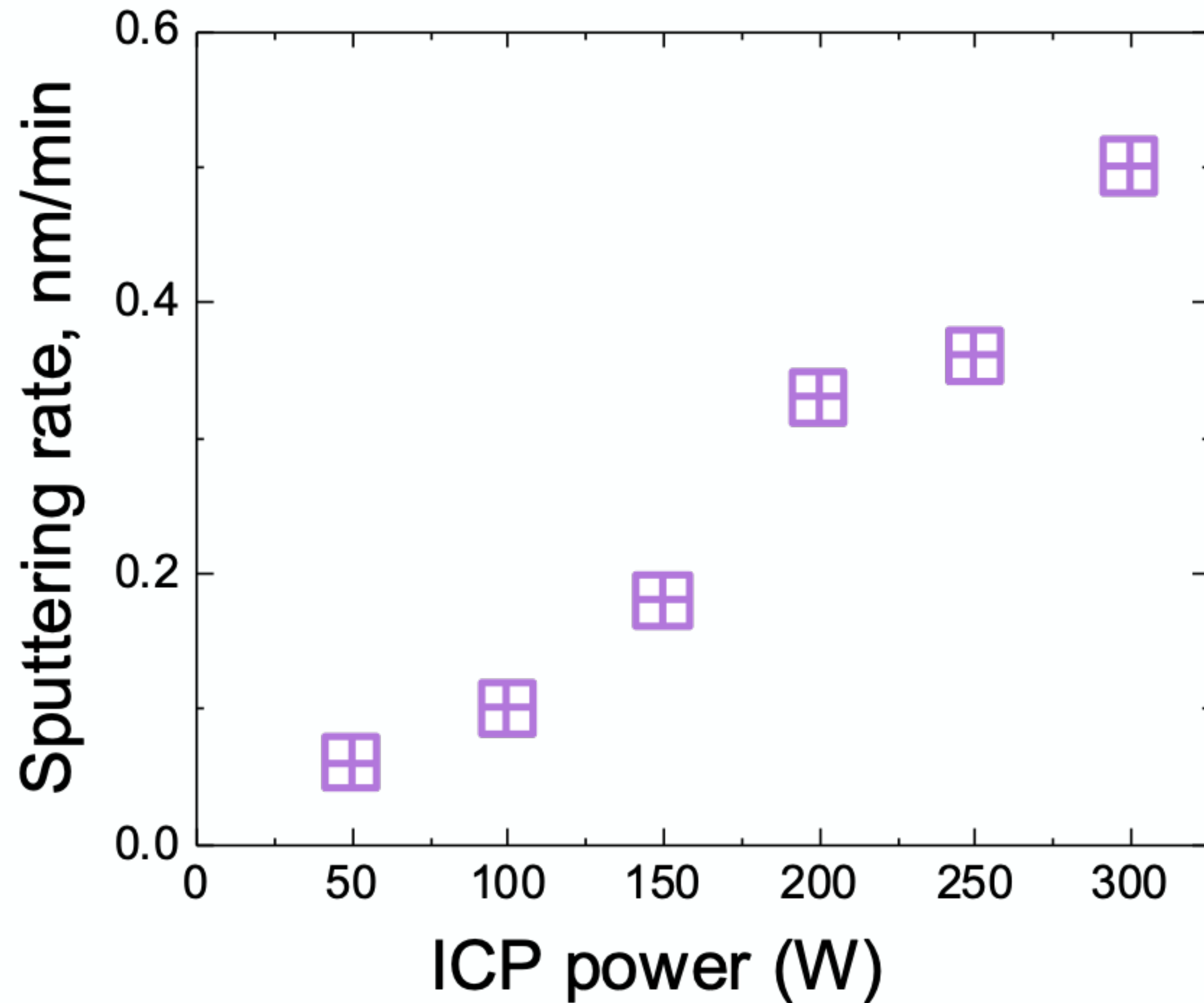


Экспериментальные условия

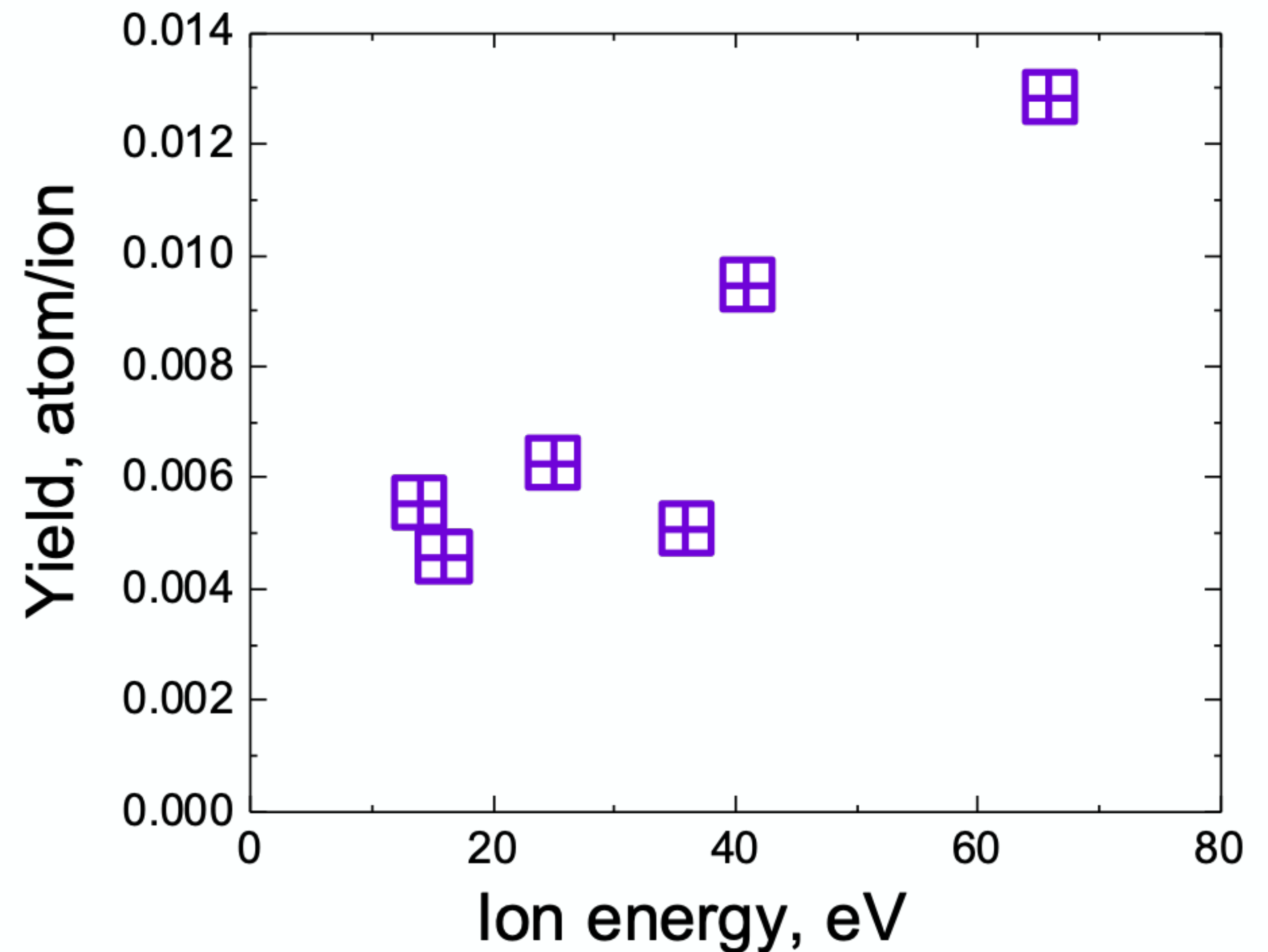


- Температура стенок: +60 ° C
- Температура стола: -15 ° C
- Газы: Ar, C₄F₈, O₂
- Полное давление: 3 Pa.
- ICP плазма в трубке на частоте 13,56 МГц
- Напряжение смещения на частоте 13,56 МГц

Скорость распыления в чистой Ar плазме

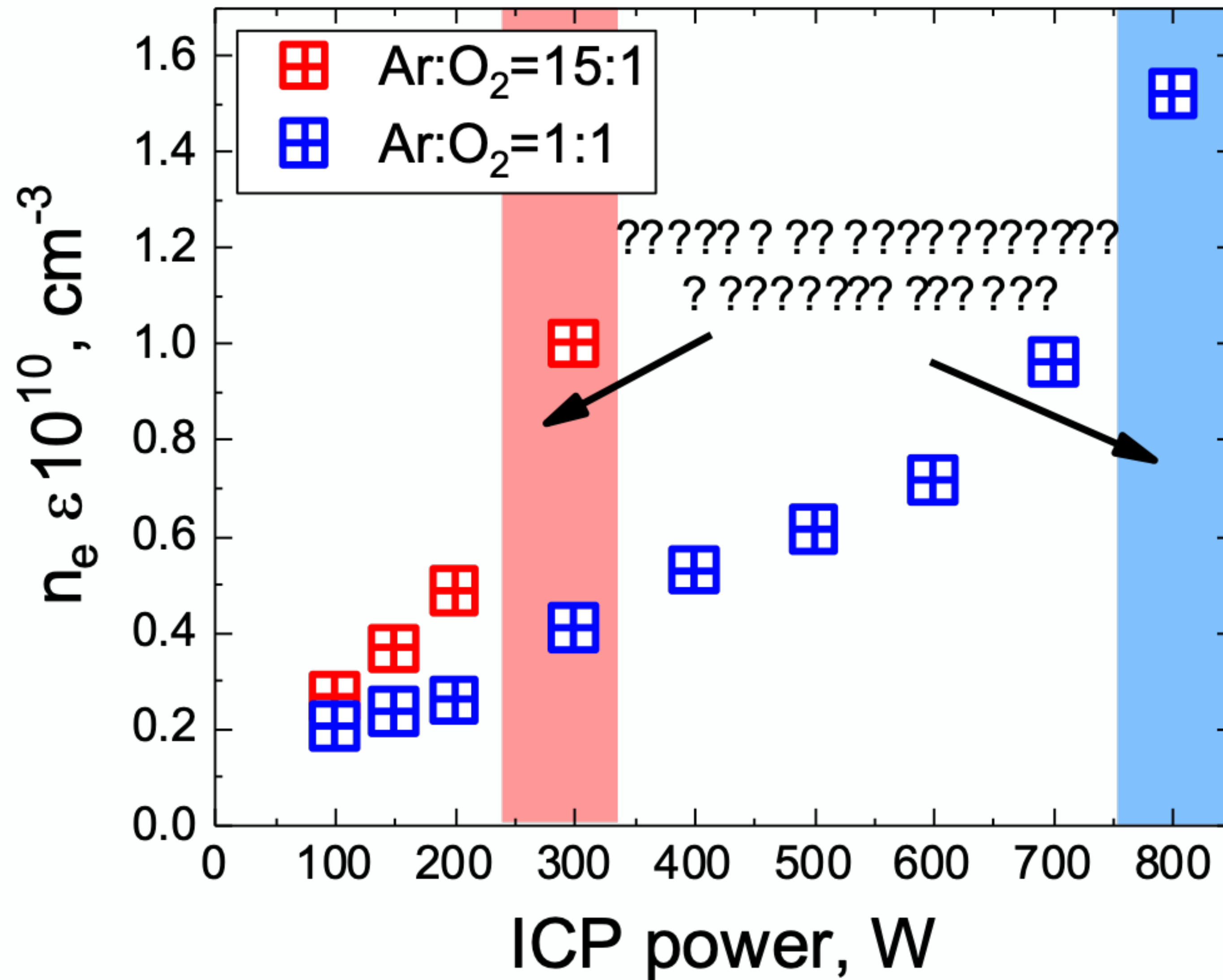


Скорость распыления от мощности разряда при минимальной энергии ионов $E_{\text{ion}} \approx 7 - 8$ эВ.

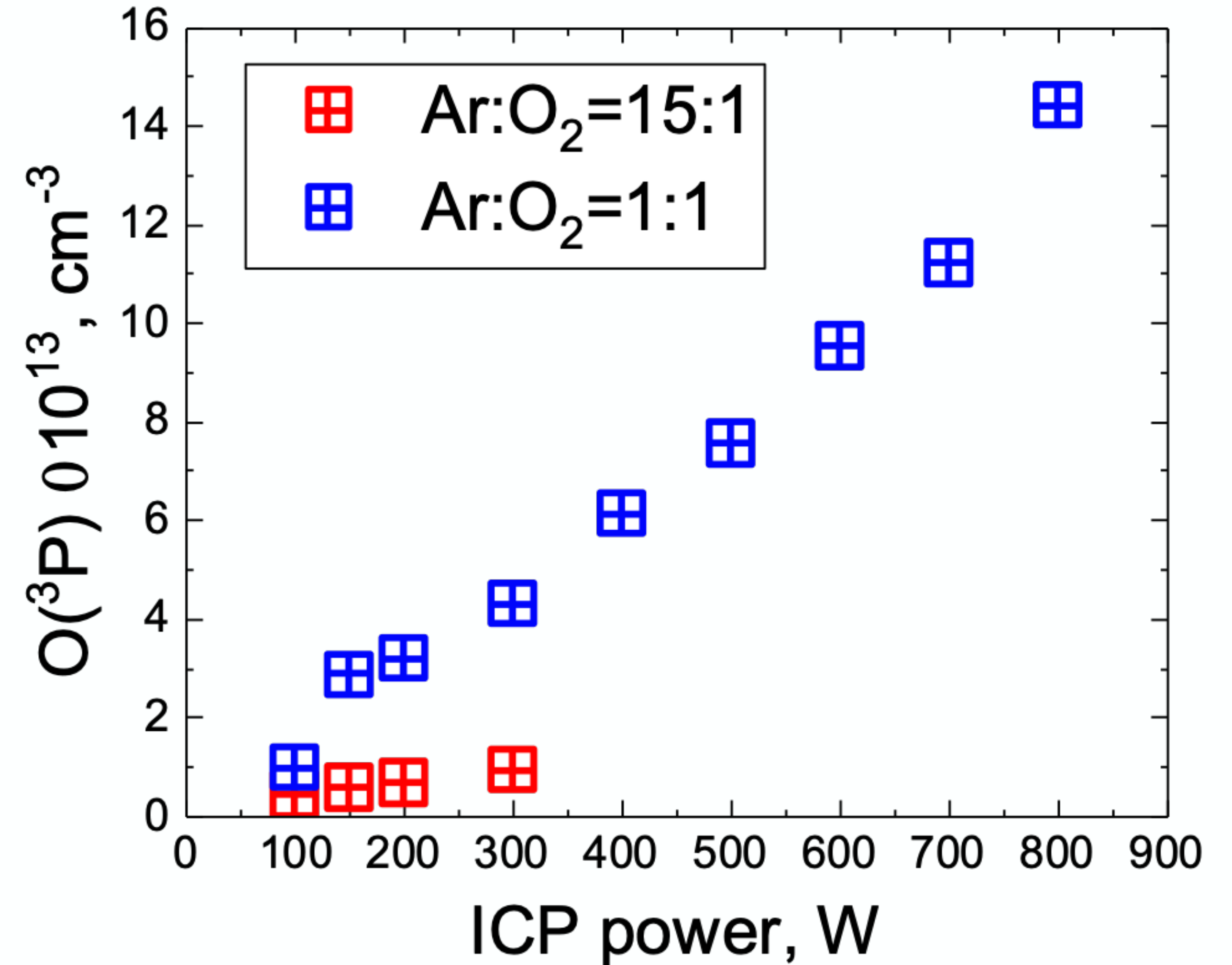
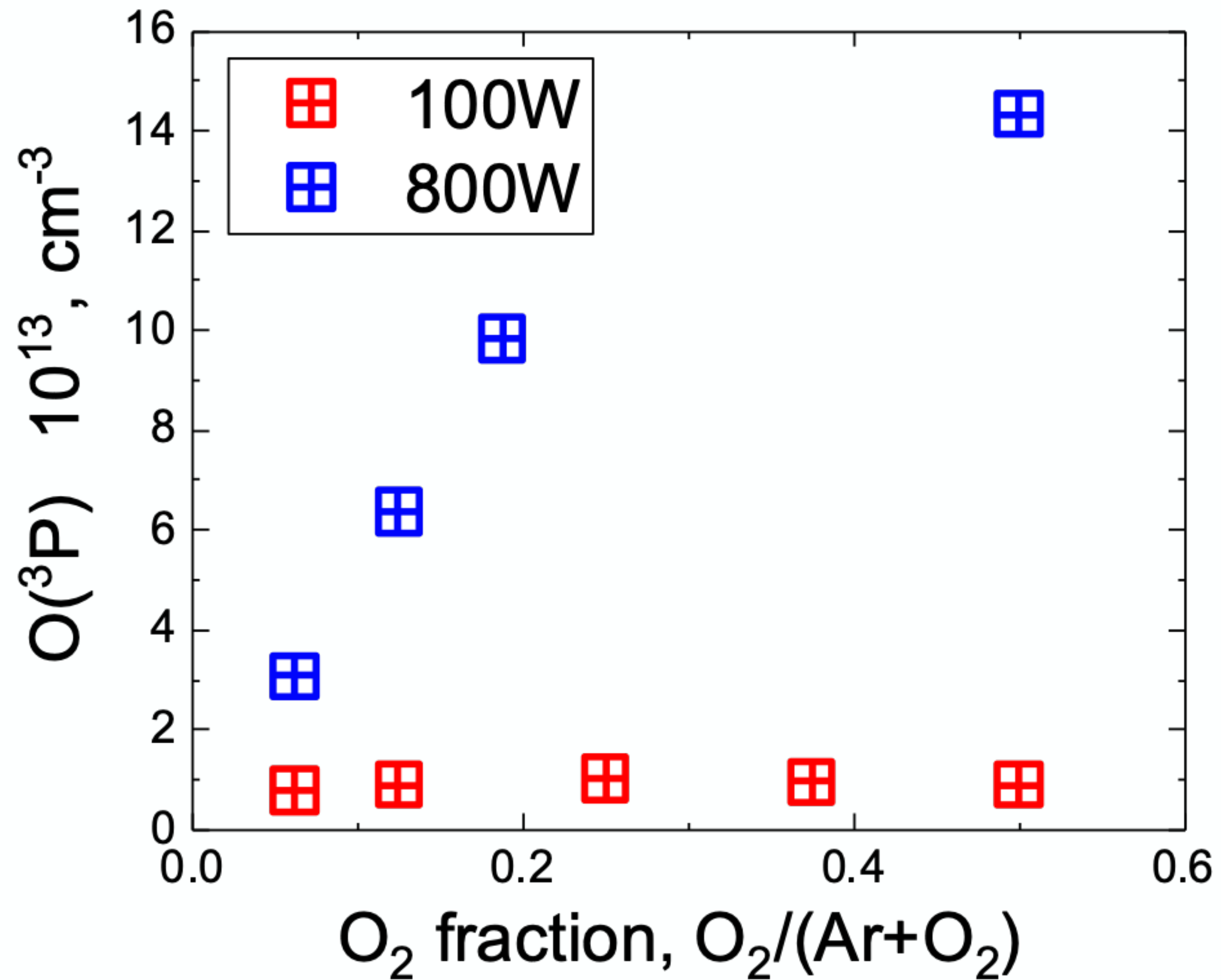


Вероятность распыления на один ион Ar^+ от энергии ионов

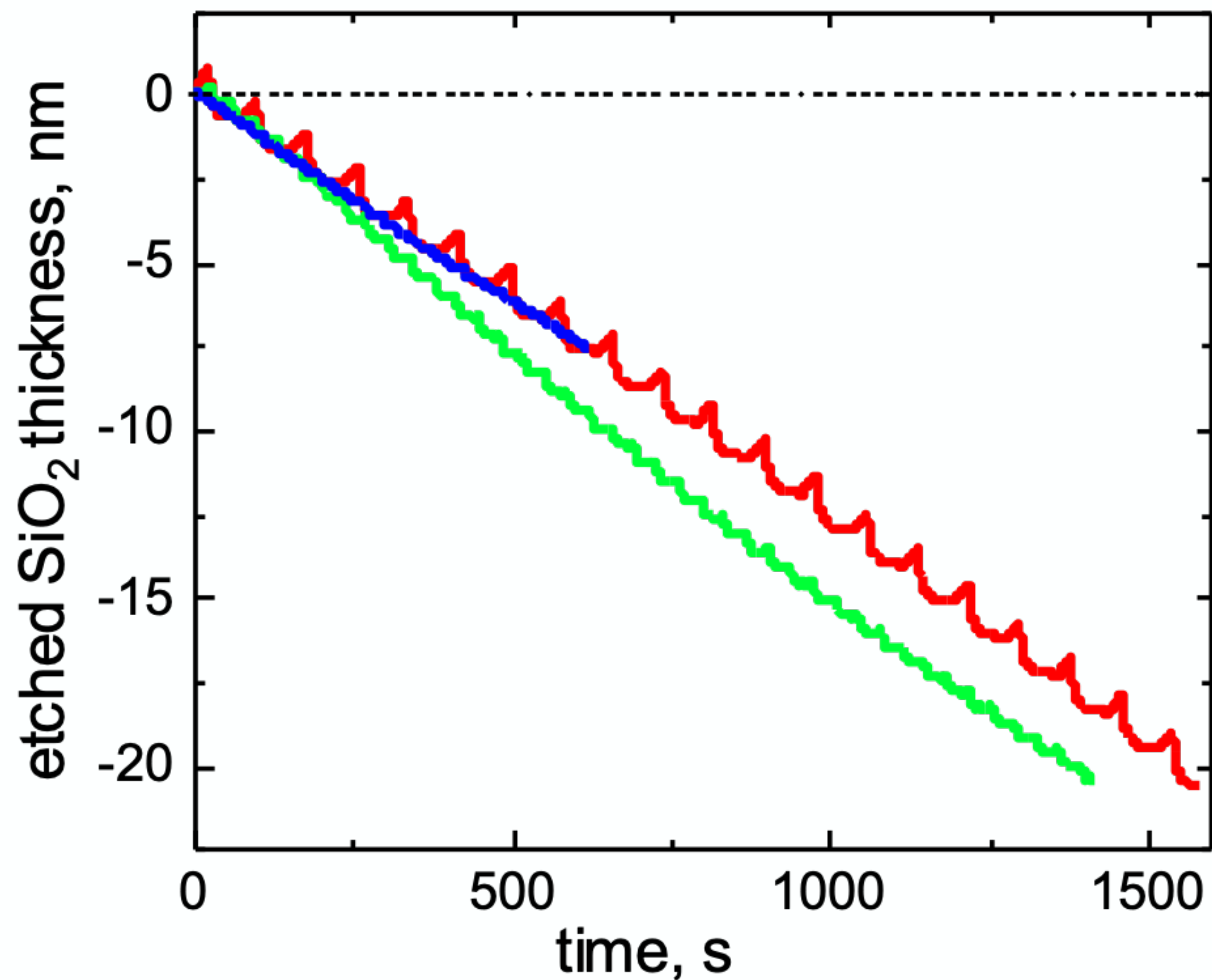
Анализ плазмы Ar/O₂ для цикла очистки



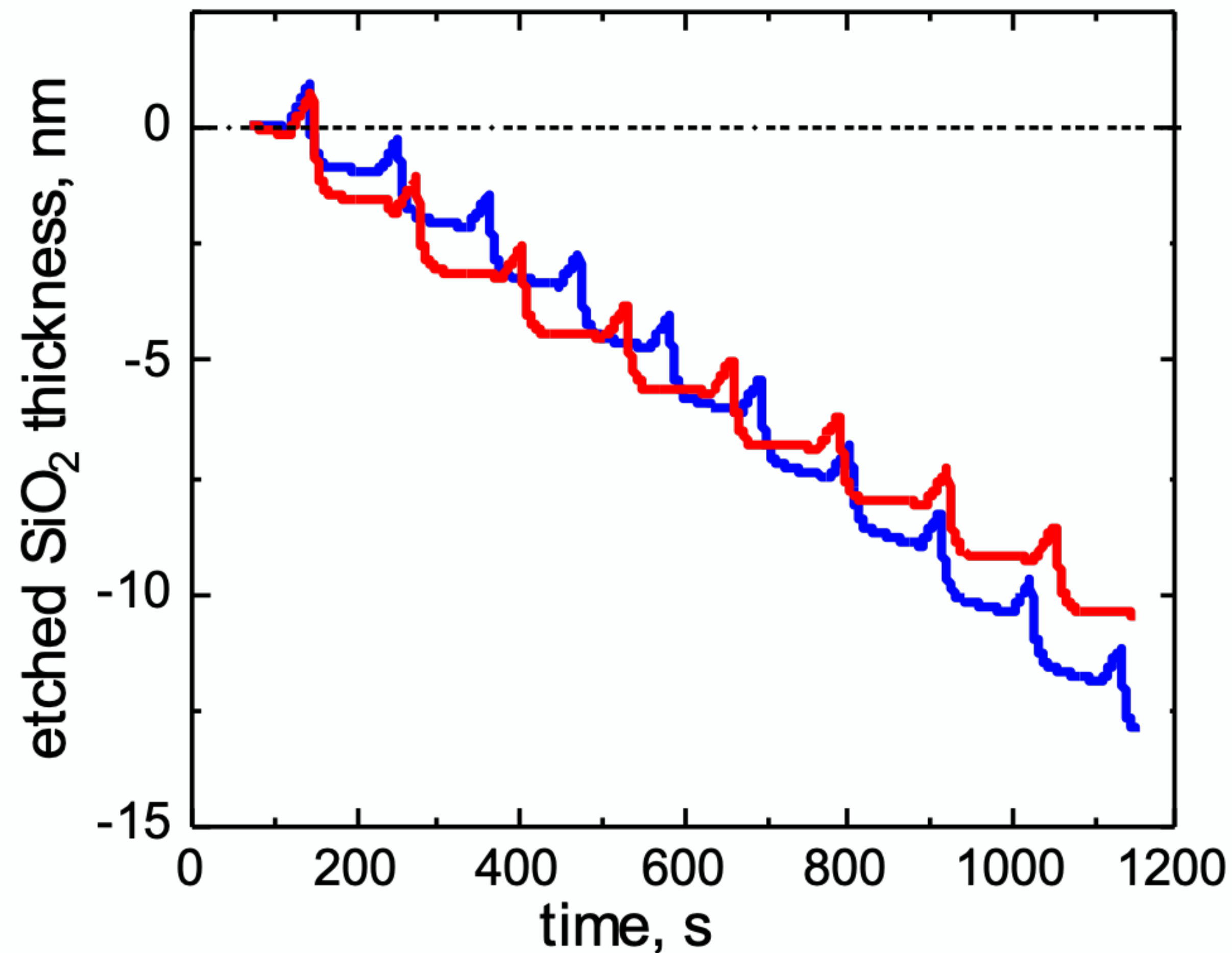
Концентрация атомов кислорода $O(^3P)$



Результаты ALE

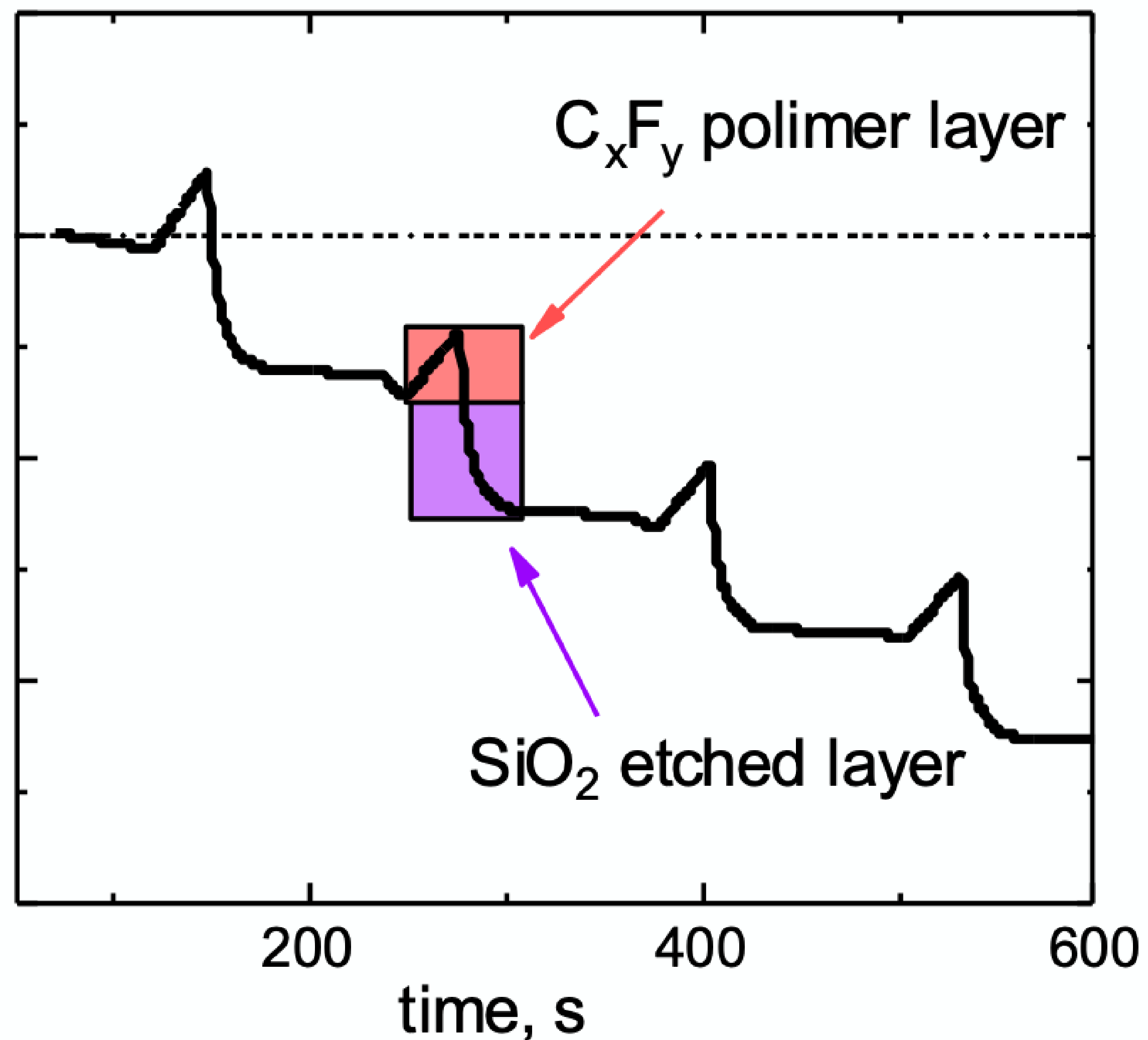
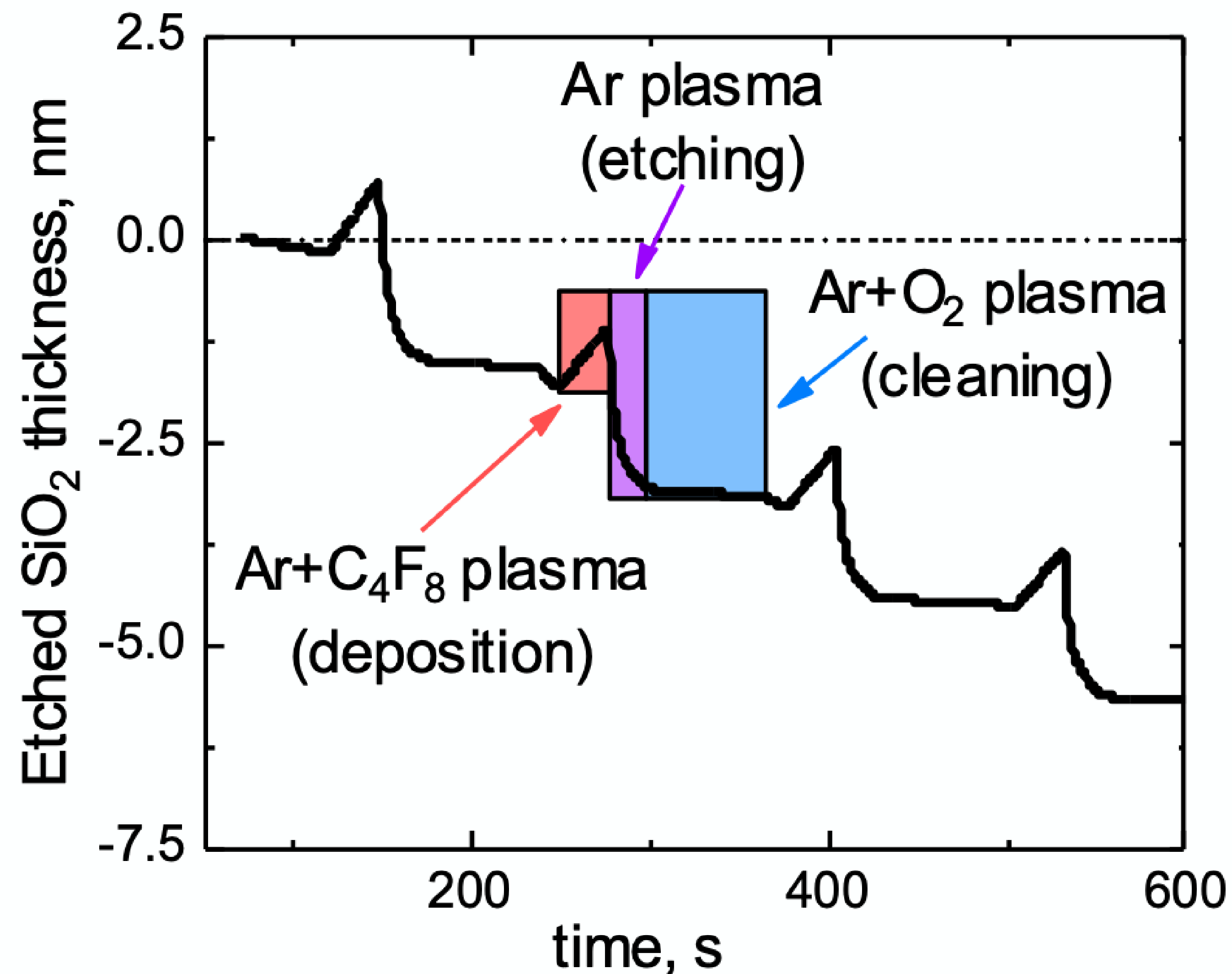


- 4 atomic layers per step; 20 cycles
- 2 atomic layers per step; 40 cycles
- 1 atomic layer per step; 40 cycles

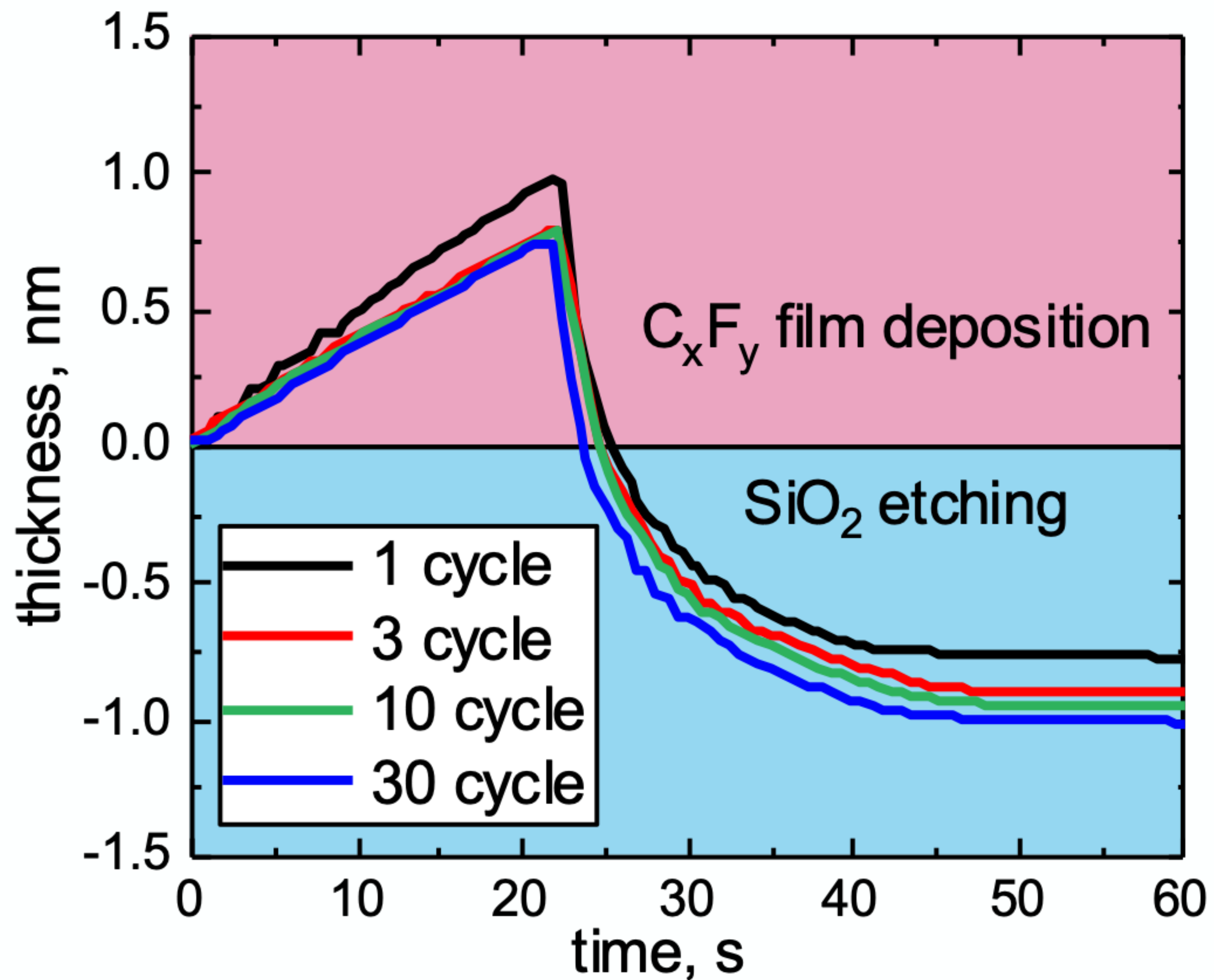


- 10 cycles without O₂ plasma cleaning
- 10 cycles with O₂ plasma cleaning

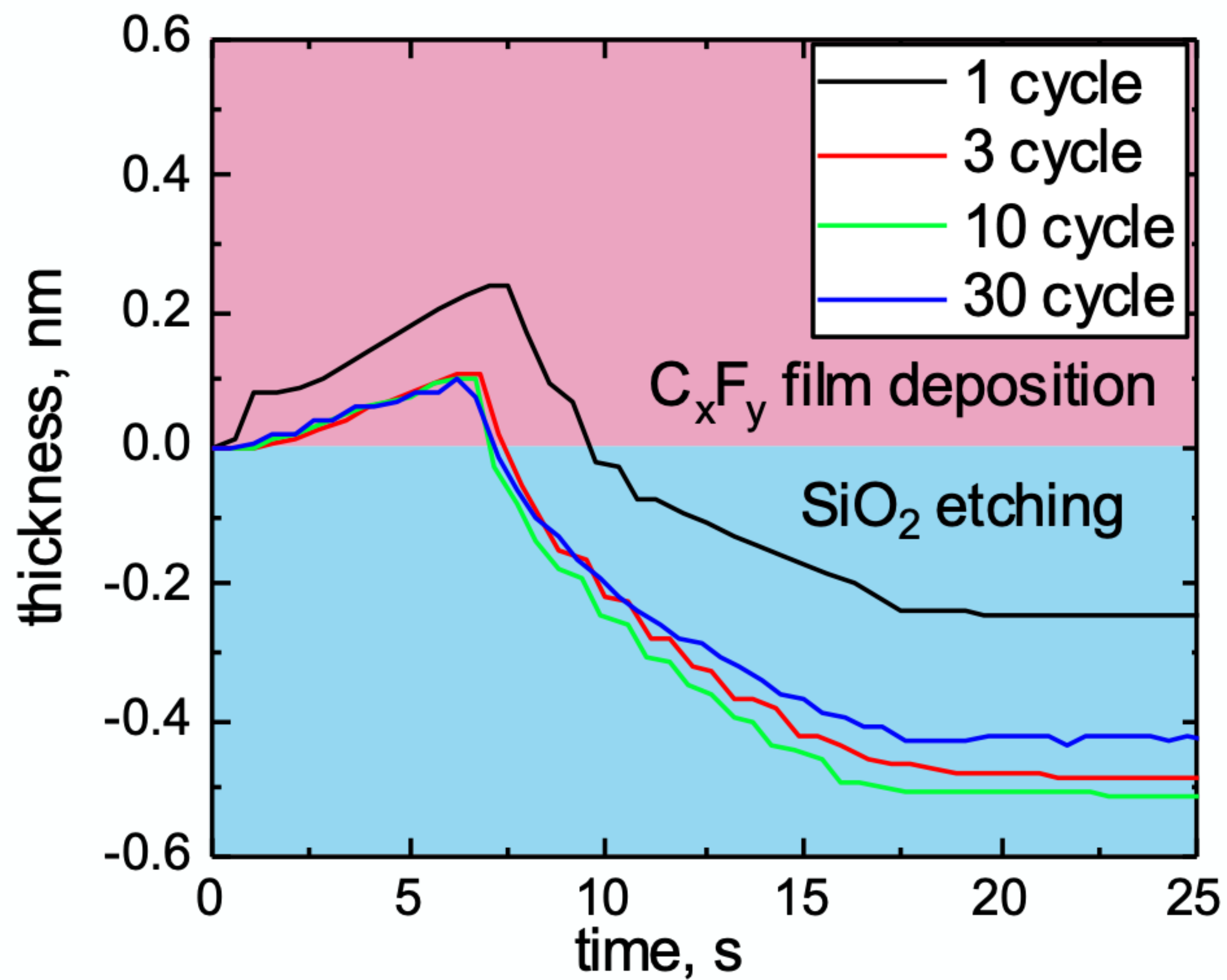
Динамика толщины плёнки



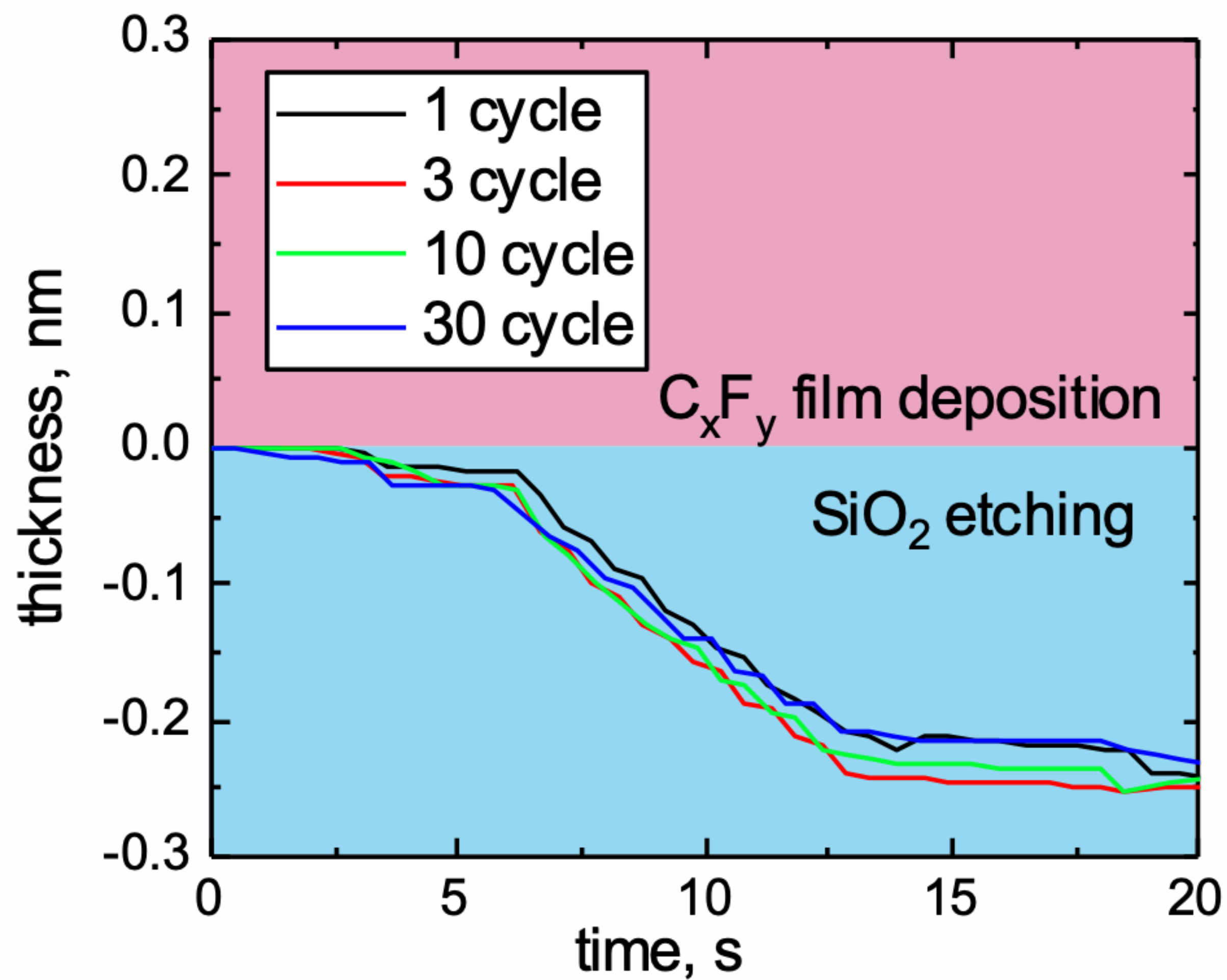
4 атомных слоя за цикл



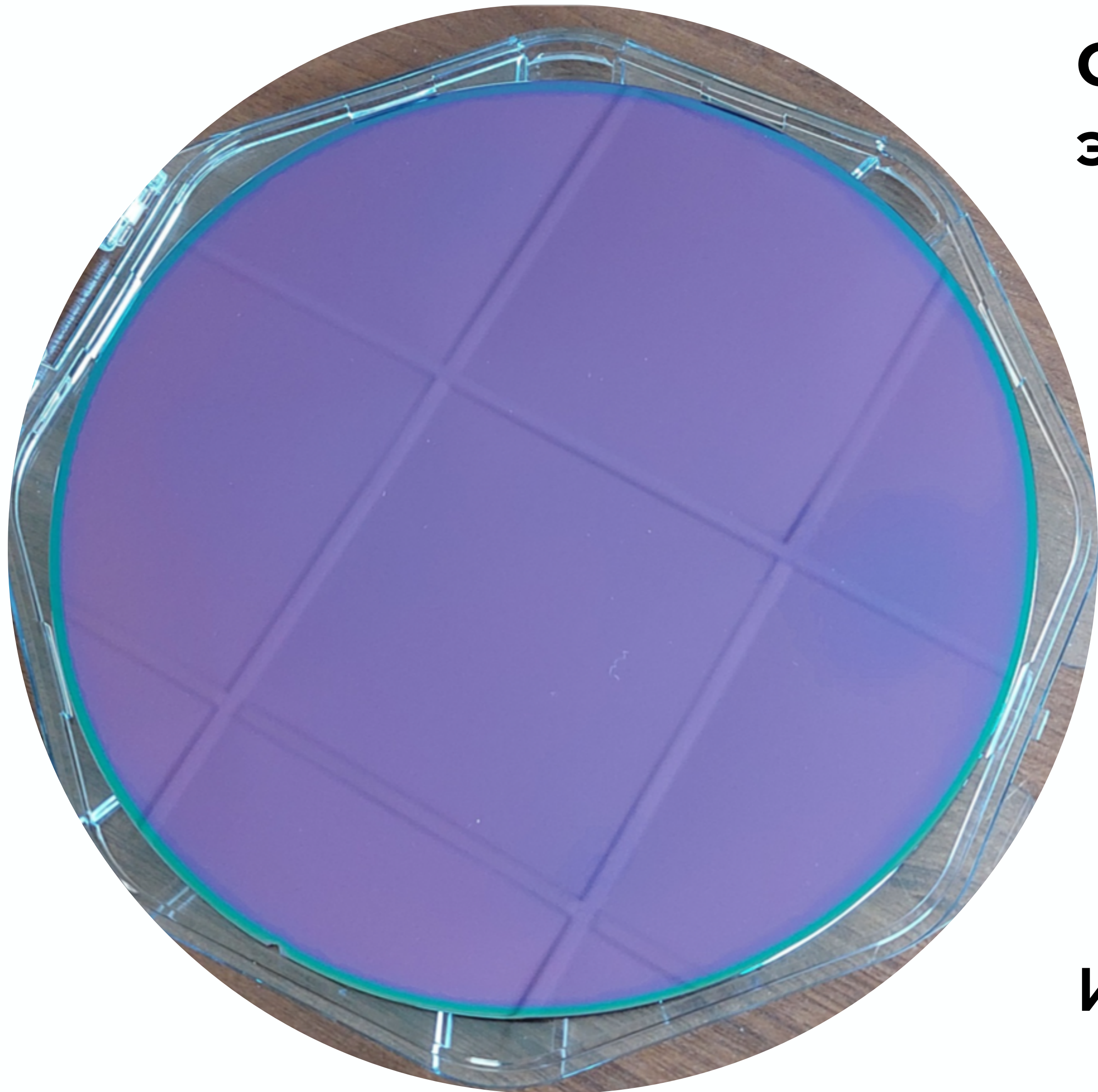
2 атомных слоя за цикл



1 атомный слой за цикл



Экспериментальные условия



Спектроскопическая эллипсометрия:

- Исходная толщина плёнки в центре – 560 нм
- Сходная толщина плёнки на краю – 530 нм
- Конечная толщина плёнки в центре – 470 нм
- Конечная толщина плёнки на краю – 440 нм

Инструментальная ошибка: ± 2 нм

Основные результаты



- Получены технологические рецепты для ALE SiO_2 в $\text{Ar}/\text{C}_4\text{F}_8$ плазме с шагом отчистки в плазме O_2 .
- Достигнута высокая повторяемость процесса на протяжении десятков циклов.
- Высокая однородность процесса по пластине.
- Хорошая повторяемость процесса от пластины к пластине.

Plasma enhanced atomic layer etching of SiO_2 in $\text{Ar}/\text{C}_4\text{F}_8$ inductively coupled plasma with O_2 cleaning step

D.R. Shibano¹, D.V. Lopaev¹, Y.G. Zaseev²,
G.Y. Pavlov², A.T. Rakhimov¹

¹ Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (SINP MSU), Moscow, Russia

² JSC Research Institute of Precision Machine Manufacturing, Zelenograd, Moscow, Russia

GDPA 2023
UFA, RUSSIA

