

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ЭФФУЗИИ, ПОВЕРХНОСТНОЙ И
ЛАЗЕРНОЙ ИОНИЗАЦИИ В
МИШЕННО-ИОННОМ УСТРОЙСТВЕ
ДЛЯ ПРОЕКТА ИРИНА.**

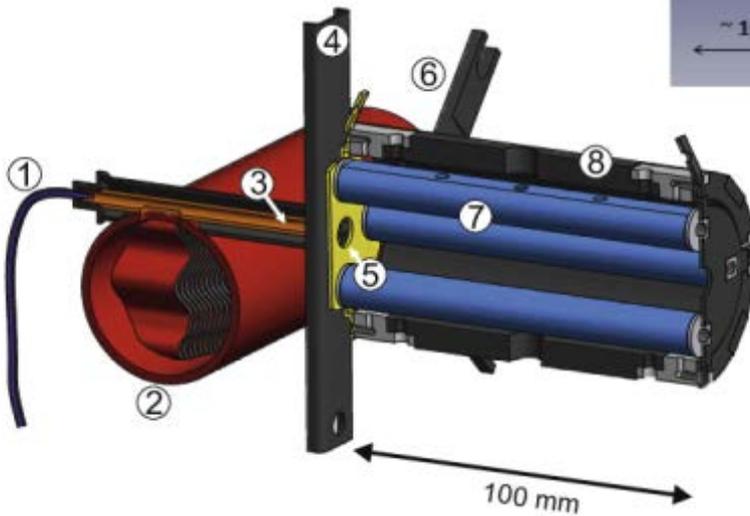
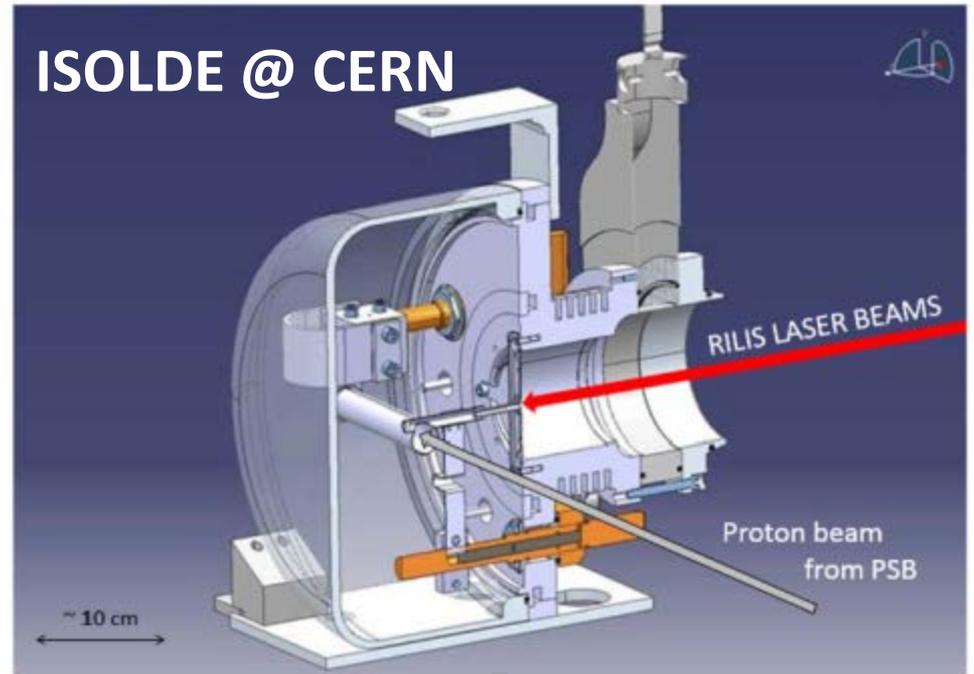
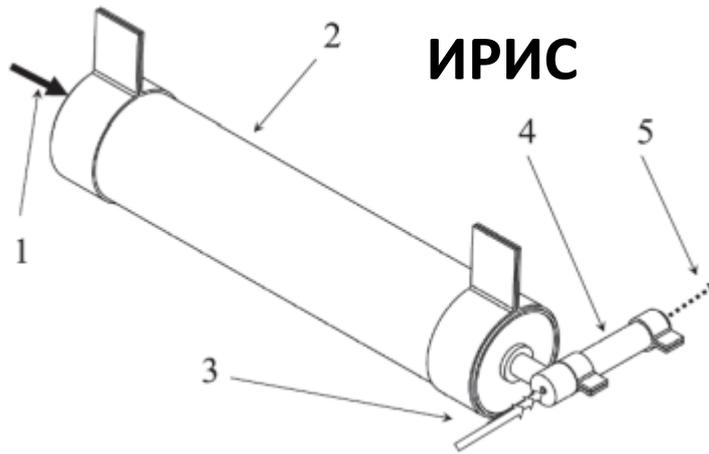
М.Д. Селиверстов

11.04.2023

Расчёты и оценка характеристик мишенно-ионного устройства ИРИНА методом Монте-Карло

- Интегрированное мишенно-ионное устройство для проекта ИРИНА (ПИК)
- Характеристики, зависящие только от геометрии (количество соударений со стенками, распределение концентрации атомов и др.). Сравнение с теоретическими оценками
- Время задержки атомов в полости.
- Эффективность поверхностной ионизации
- Эффективность лазерной ионизации
- Селективность

«Стандартные» мишенно-ионные устройства



ISAC @ TRIUMF

«Стандартные» мишенно-ионные устройства

+ Универсальность

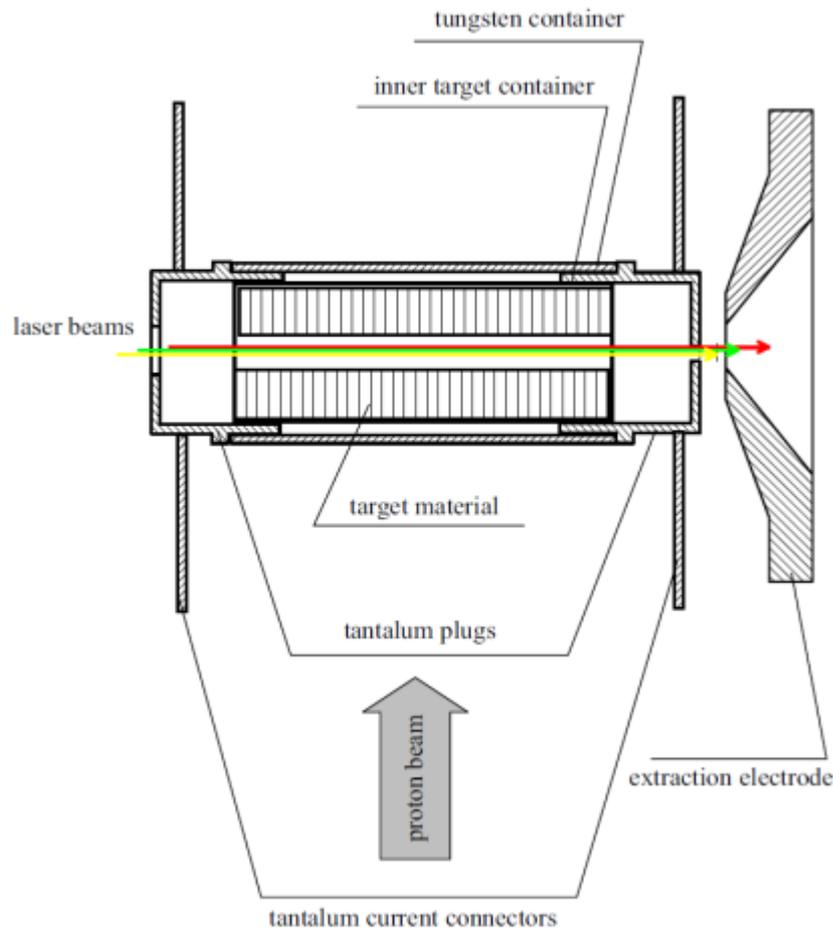
– Время выделения нуклидов

(–) Размеры



Интегрированное мишенно-ионное устройство

Интегрированное мишенно-ионное устройство (ИРИС)



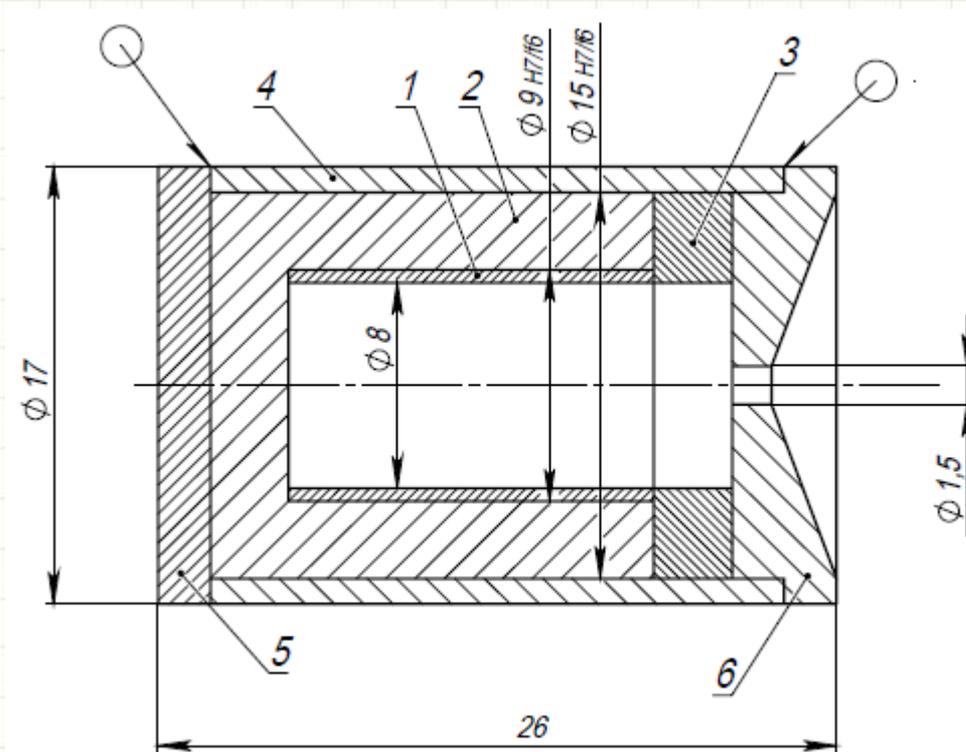
$$\epsilon_{las}(\text{Eu}) = 7\%$$

ITIS

Integrated target-ion source unit for on-line production of radioactive short-lived isotopes

V.N. Pantelev et al, EPJ, 2005

Интегрированное мишенно-ионное устройство (ИРИНА)



$L = 17 \text{ мм}$
 $D = 8 \text{ мм}$
 $d_0 = 1.5 \text{ мм}$

Интегрированное мишенно-ионное устройство (ИРИНА)

???:

- Ионизатор в виде полости, а не тонкой трубки *эффективность ионизации-??*
- Отсутствие резистивного нагрева *эффективность вытягивания ионов -??*
- Карбид урана как материал для ионизатора - *эффективность вытягивания ионов -??*

Схема метода Монте-Карло

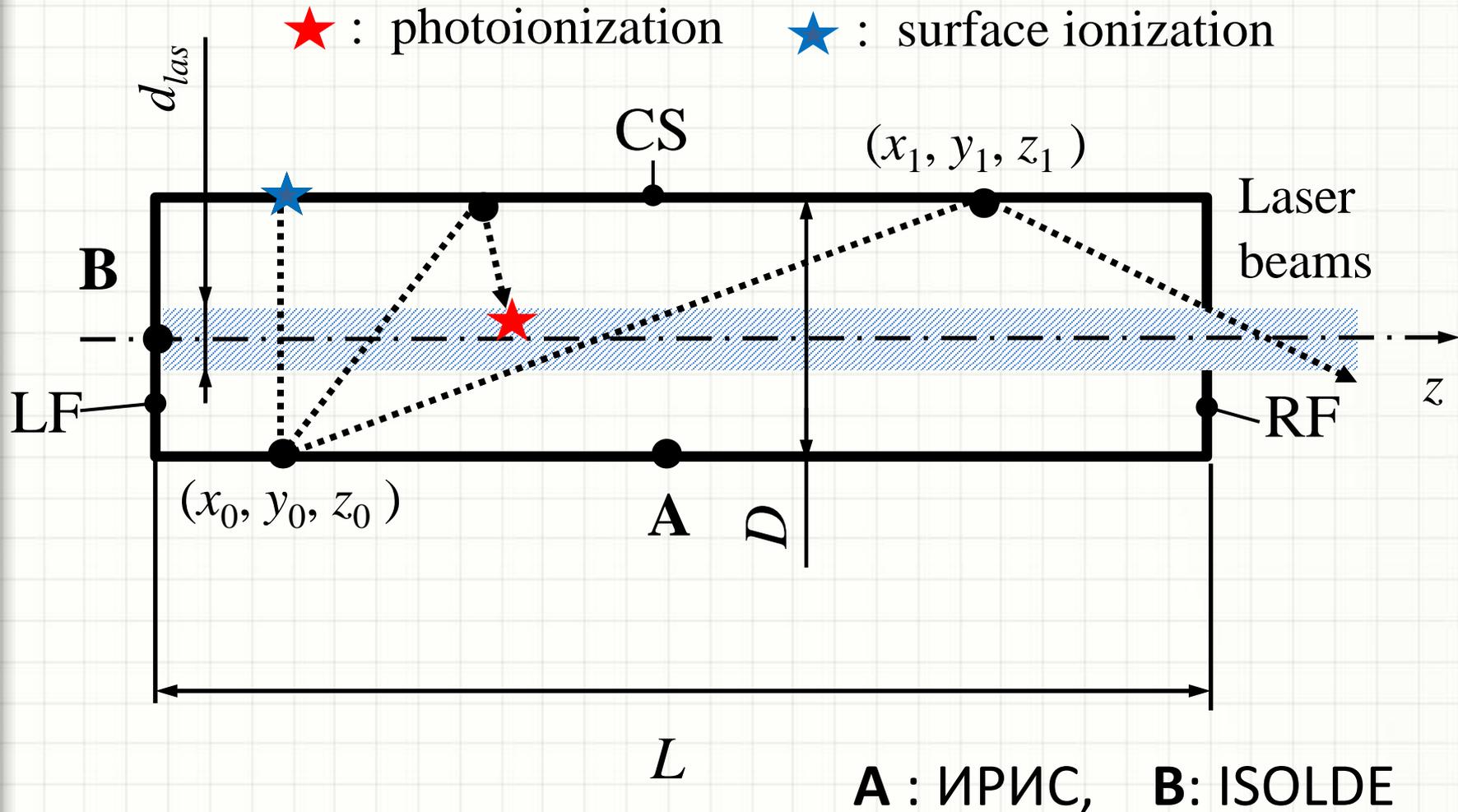


Схема метода Монте-Карло

★ : photoionization ★ : surface ionization

☆ : recombination

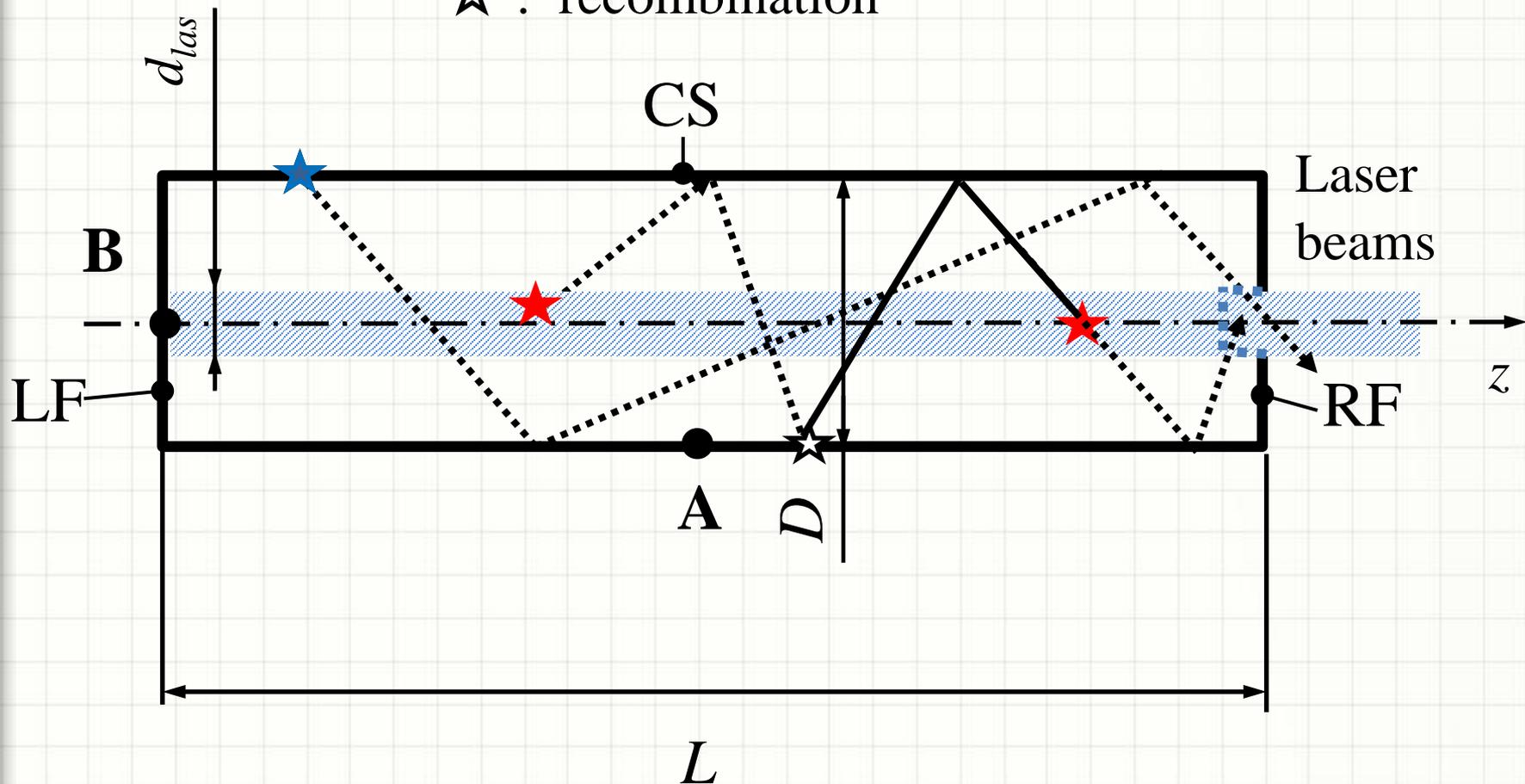
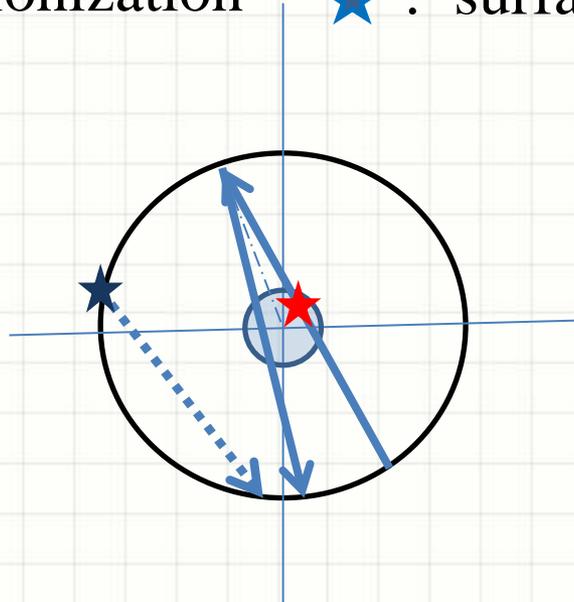


Схема метода Монте-Карло

★ : photoionization ★ : surface ionization



Результаты расчётов

Базовые параметры

$$L = 17 \text{ mm}$$

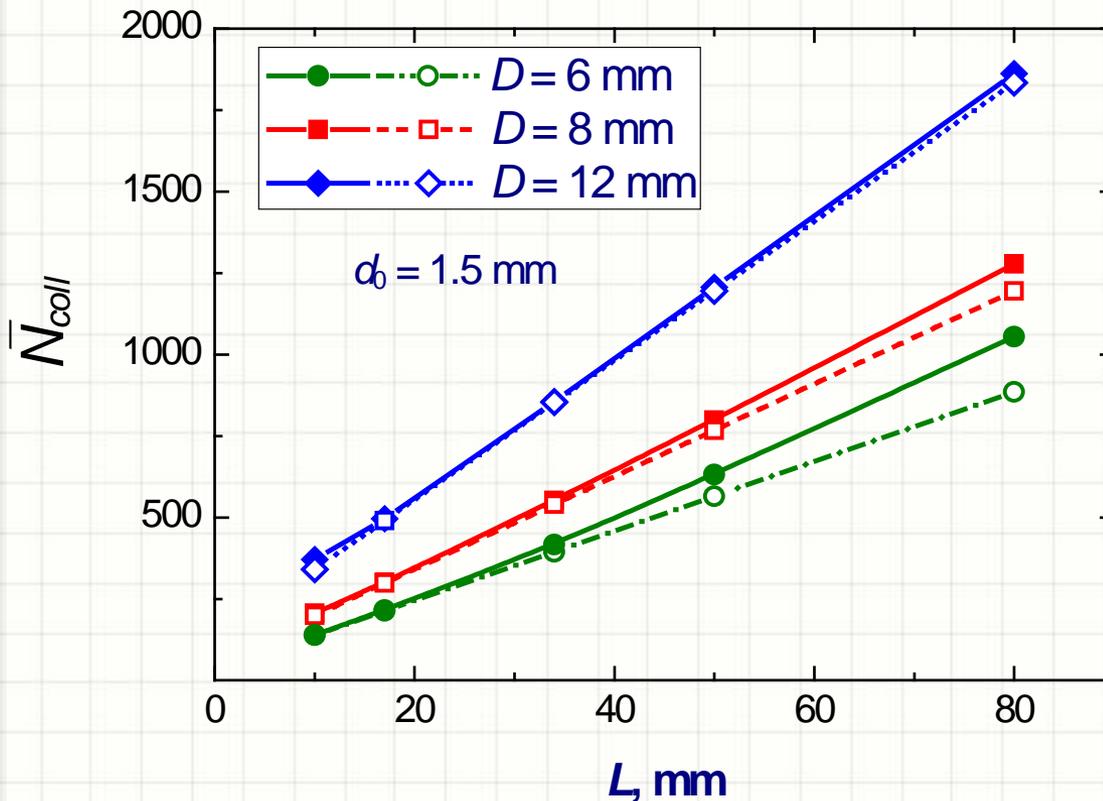
$$D = 8 \text{ mm}$$

$$d_0 = 1.5 \text{ mm}$$

$$A = 150$$

$$T = 2000\text{K}$$

«Геометрические» характеристики



$$\bar{N}_{coll}^{theor} \approx \frac{S_{\Sigma}}{S_0} = \frac{4\pi DL + 2\pi D^2}{\pi d_0^2}$$

$$N^{MCC} = 300$$

$$N^{theor} = 299.$$

$$N^{MCC} (CS) = 243,$$

$$N^{MCC} (LF) = 29$$

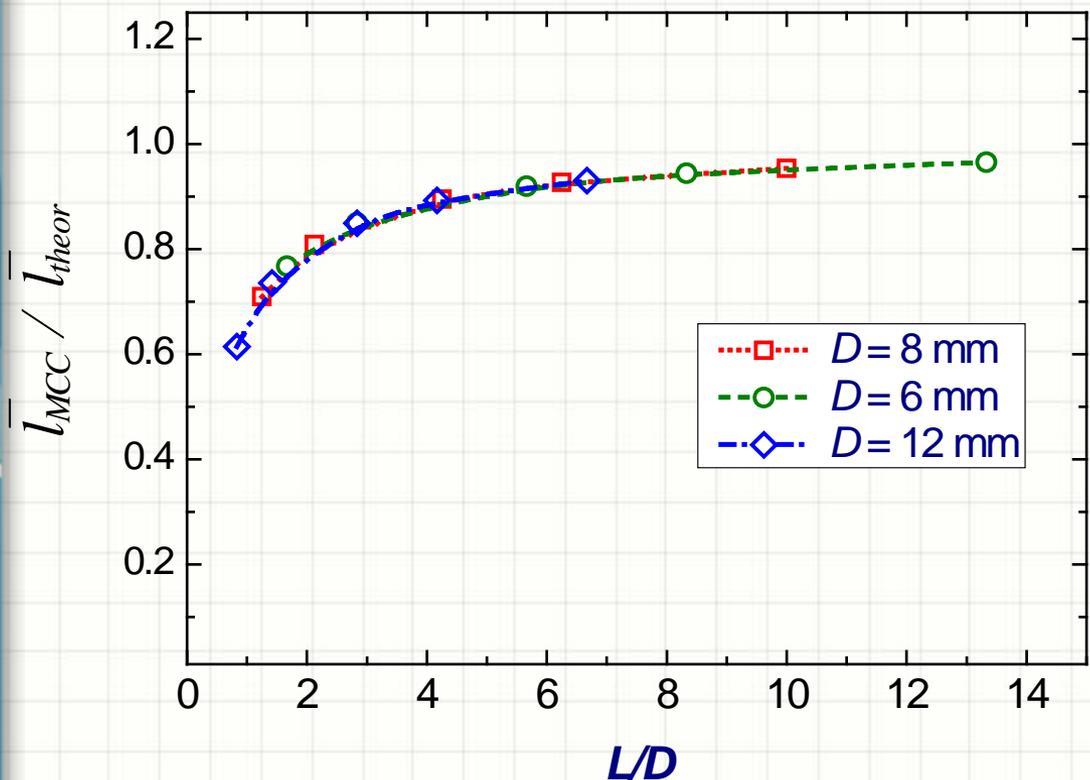
$$N^{MCC} (RF) = 28$$

○ «theory»

● MCC

Зависимость среднего количества соударений от длины полости мишенно-ионного устройства

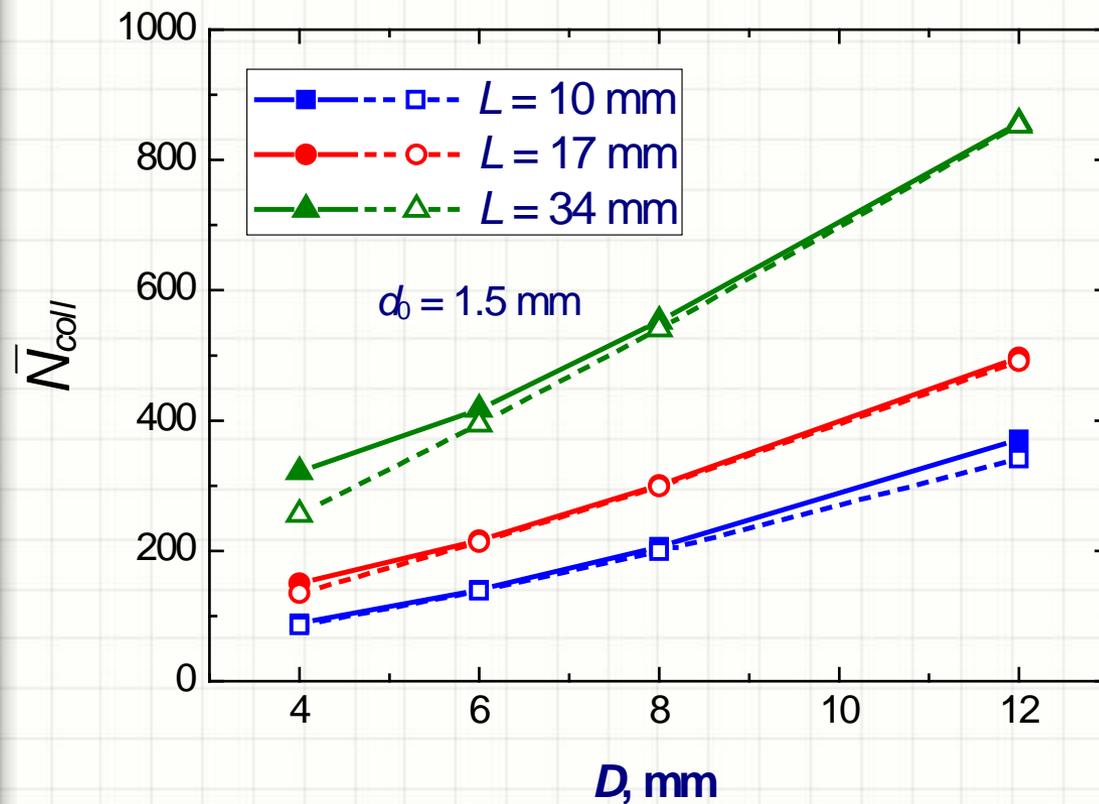
«Геометрические» характеристики



$$\bar{l}_{theor} = D$$

Зависимость расхождения между «теоретическим» значением средней длины пробега и Монте-Карло расчётами от параметра L/D

«Геометрические» характеристики

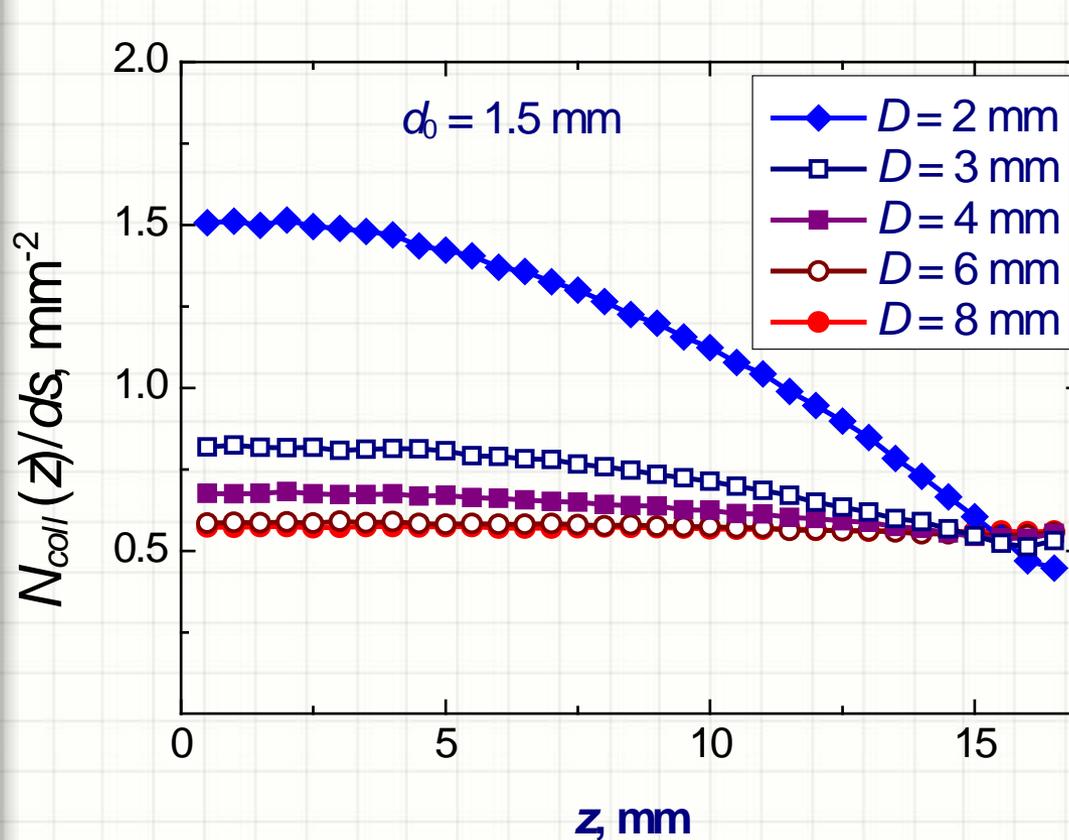


$$\bar{N}_{coll}^{theor} \approx \frac{S_{\Sigma}}{S_0} = \frac{4\pi DL + 2\pi D^2}{\pi d_0^2}$$

- «theory»
- MCC

Зависимость среднего количества соударений от диаметра полости мишенно-ионного устройства

«Геометрические» характеристики

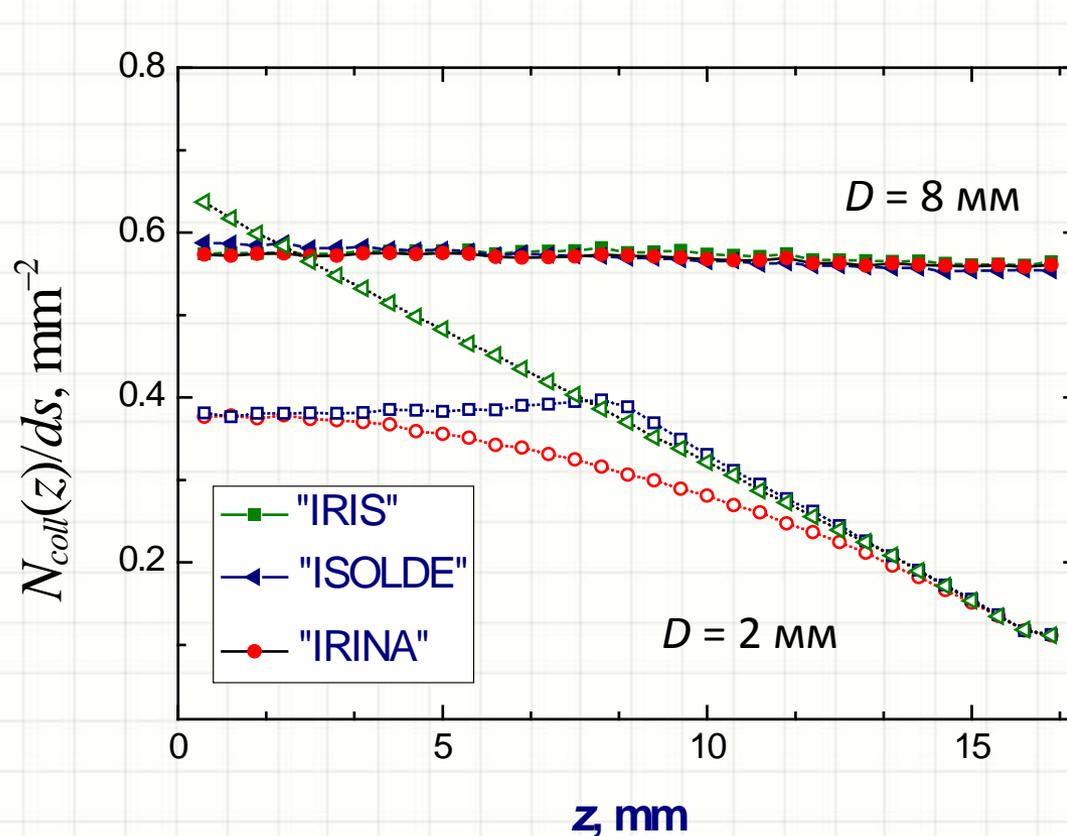


$$\Phi = -D_{diff} \frac{dn_a}{dz}$$

$$\frac{N_{coll}}{ds} \propto P \propto$$

Распределение среднего количества соударений (с единичной площадью) вдоль оси полости мишенно-ионного устройства

«Геометрические» характеристики



$$\Phi = -D_{diff} \frac{dn_a}{dz}$$

Распределение среднего количества соударений (с единичной площадью) вдоль оси полости для различных вариантов геометрии мишенно-ионного устройства (ИРИС, ISOLDE, ИРИНА).



Время задержки атомов в полости мишенно-ионного устройства (время эффузии):

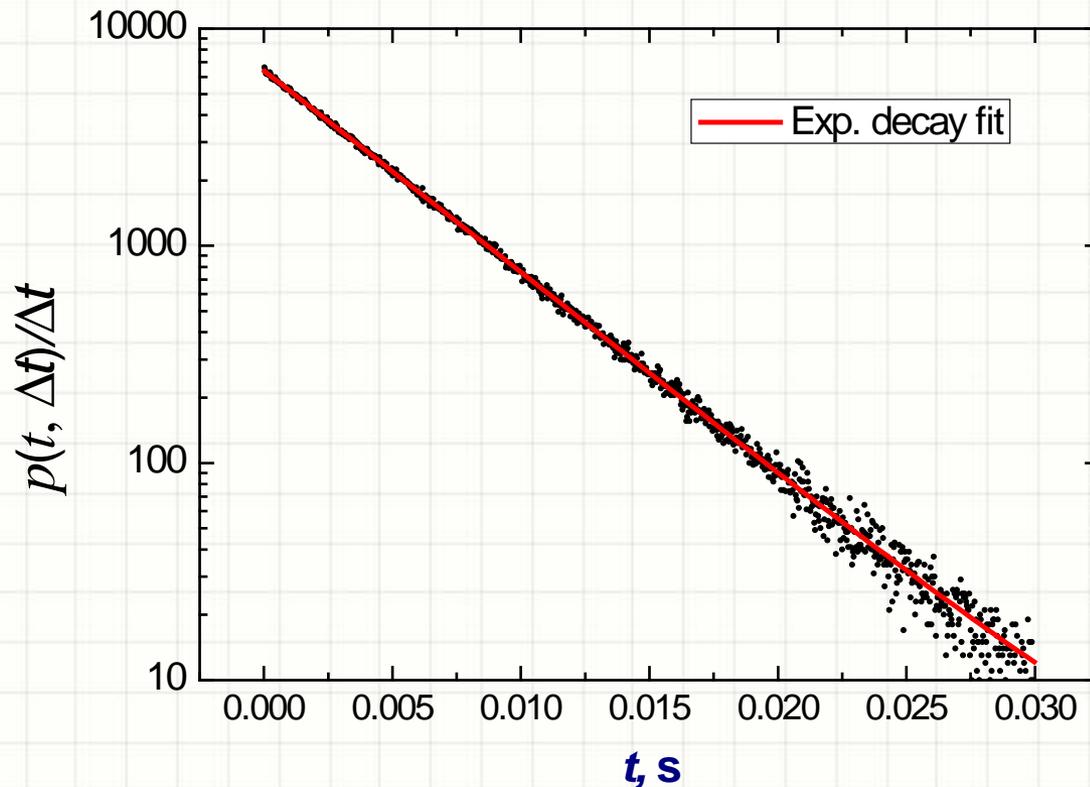
- Время полета атомов
- Время «сидения» атомов на стенке (время десорбции)

Время задержки атомов в мишенно-ионном устройстве (время эффузии)

$$\langle t_{fit}^{fl} \rangle = \langle N_{coll} \rangle \langle t_0^{fl} \rangle = \langle N_{coll} \rangle \langle l^{fl} \rangle \langle v^{-1} \rangle$$

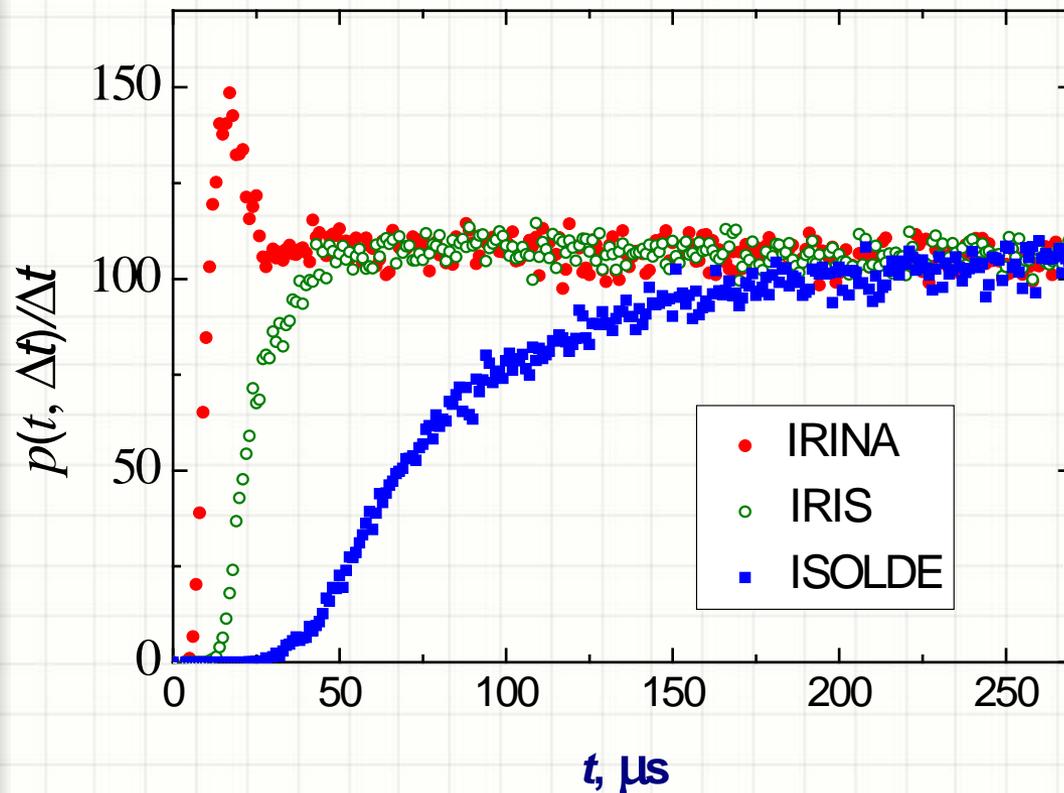
$$\langle t_{fit}^{fl} \rangle = 4.7 \text{ мс}$$

$$\langle t^{fl} \rangle = 15.6 \text{ мкс}$$



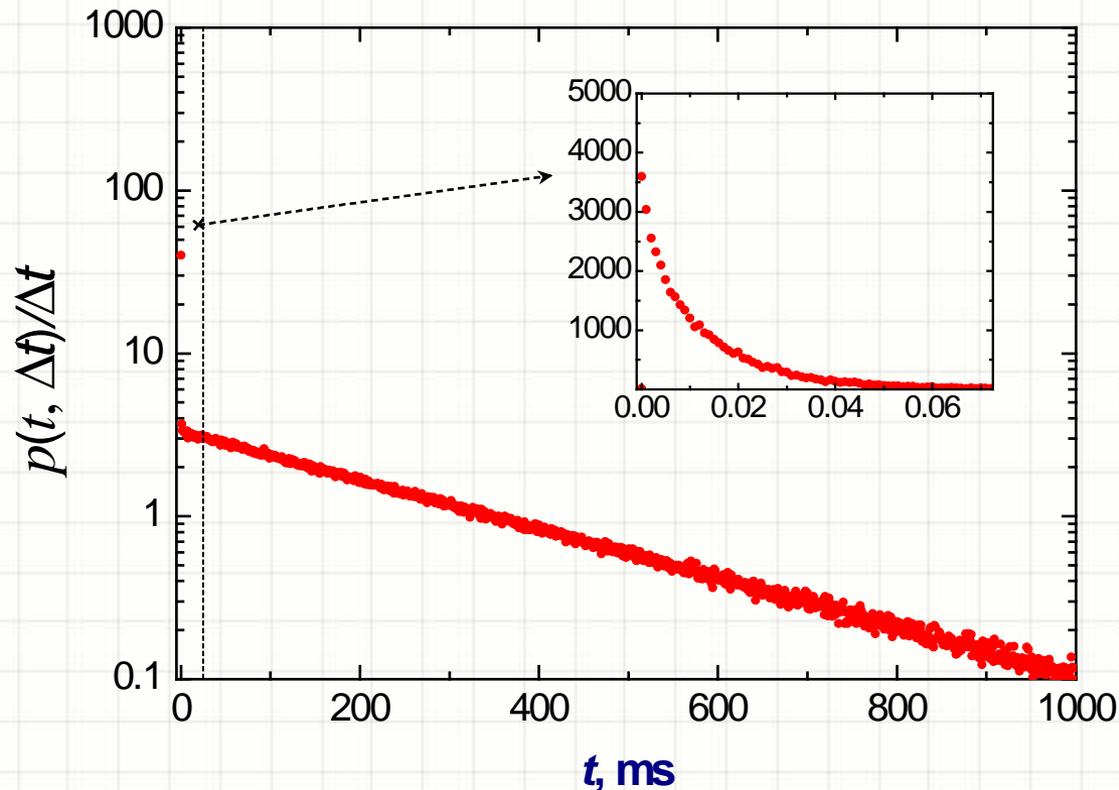
Распределение времени полёта атомов внутри полости ($A = 150$, $T = 2000\text{K}$).

Время задержки атомов в мишенно-ионном устройстве (время эффузии)



Различие в распределении времени полёта атомов внутри полости для различных вариантов геометрии мишенно-ионного устройства.

Время задержки атомов в мишенно-ионном устройстве (время эффузии)



$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_d}{kT}\right)$$

Уравнение Френкеля

$$\tau_0 = 10^{-12} - 10^{-13} \text{ с}$$

Sn:

$$\tau(\text{УСХ}) = \tau(\text{С}) = 10^{-5} - 10^{-6} \text{ с}$$

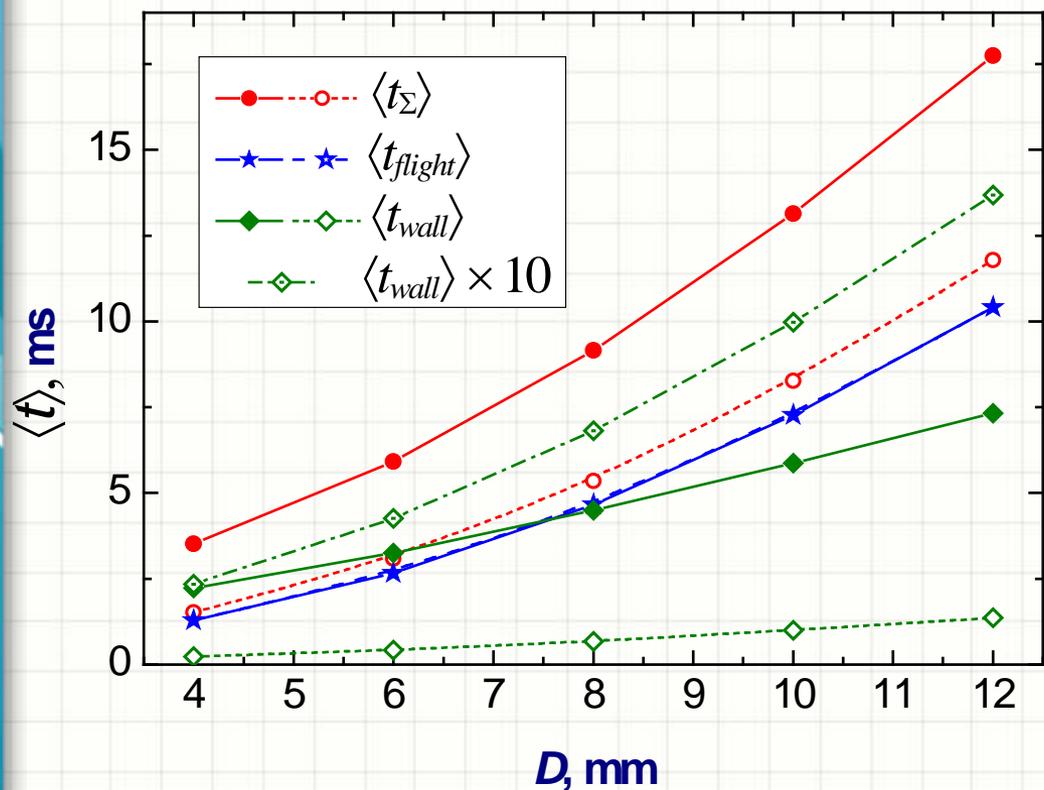
$$\tau(\text{W}) = 10^{-2} \text{ с}$$

При $T = 2000\text{K}$

Среднее время 290 мс

Распределение времени десорбции атомов Sn
внутри полости ($A = 150$, $T = 2000\text{K}$).

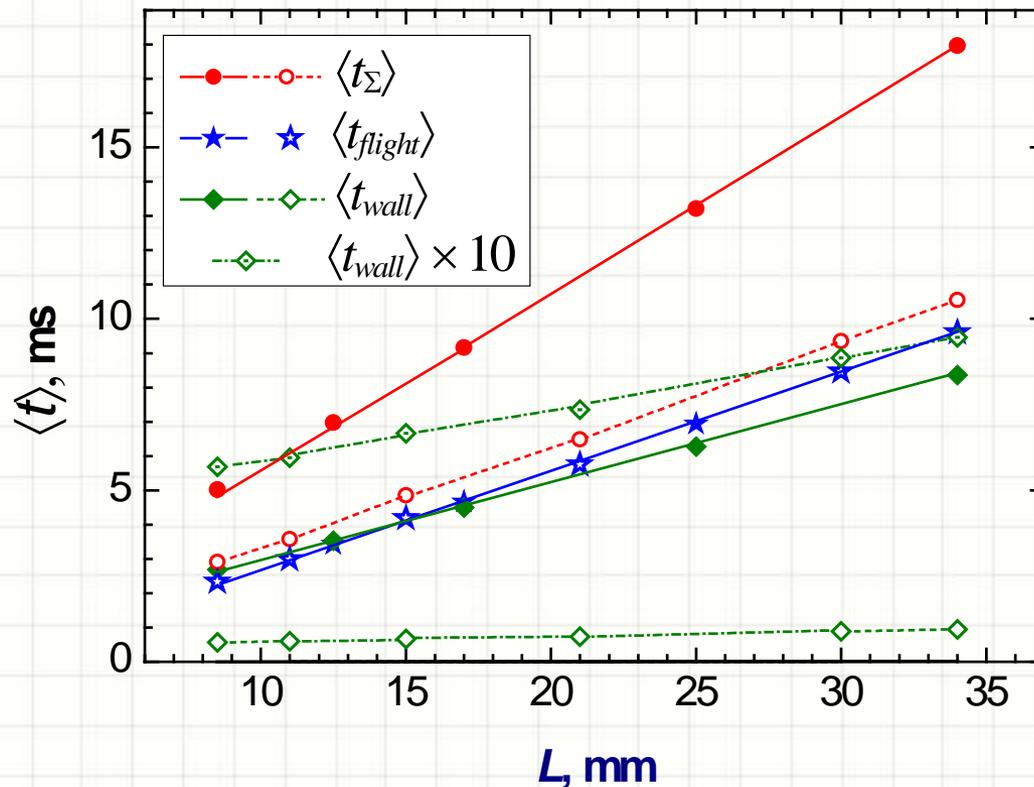
Время задержки атомов в мишенно-ионном устройстве (время эффузии)



● :
 $\tau(\text{LF}) = \tau(\text{RF}) = \tau(\text{SC}) = 15 \text{ мкс}$
○ :
 $\tau(\text{LF}) = \tau(\text{SC}) = 1 \text{ мкс}$
 $\tau(\text{RF}) = 15 \text{ мкс}$

Зависимость времени эффузии атомов от диаметра полости).

Время задержки атомов в мишенно-ионном устройстве (время эффузии)



● :
 $\tau(\text{LF}) = \tau(\text{RF}) = \tau(\text{SC}) = 15 \text{ мкс}$
○ :
 $\tau(\text{LF}) = \tau(\text{SC}) = 1 \text{ мкс}$
 $\tau(\text{RF}) = 15 \text{ мкс}$

Зависимость времени эффузии атомов от длины полости).

Ионизация в мишенно-ионном устройстве

Ионизация в горячей полости:

- Поверхностная
- Лазерная

Поверхностная ионизация

- Стефепенъ ионизации (уравнение Саха-Ленгмюра)

$$\alpha = \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_0} \right) \exp \left(\frac{\varphi - W_i}{kT} \right),$$

- Вероятность ионизации при единичном столкновении со стенкой

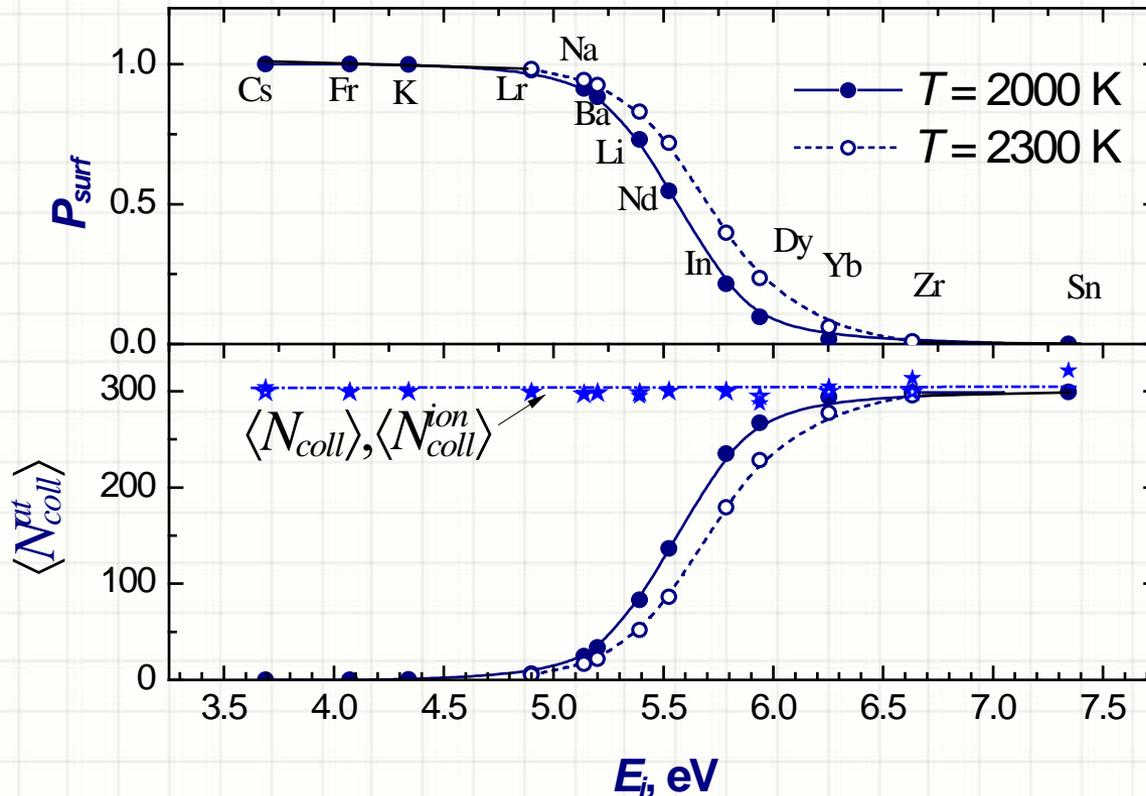
$$p_{surf} = \frac{\alpha}{(1 + \alpha)}$$

- Работа выхода:
- φ (W) = 4.57 эВ, φ (C) = 4.62 эВ,
- φ (UC) = 3.3 эВ (зависит от температуры)

Поверхностная ионизация

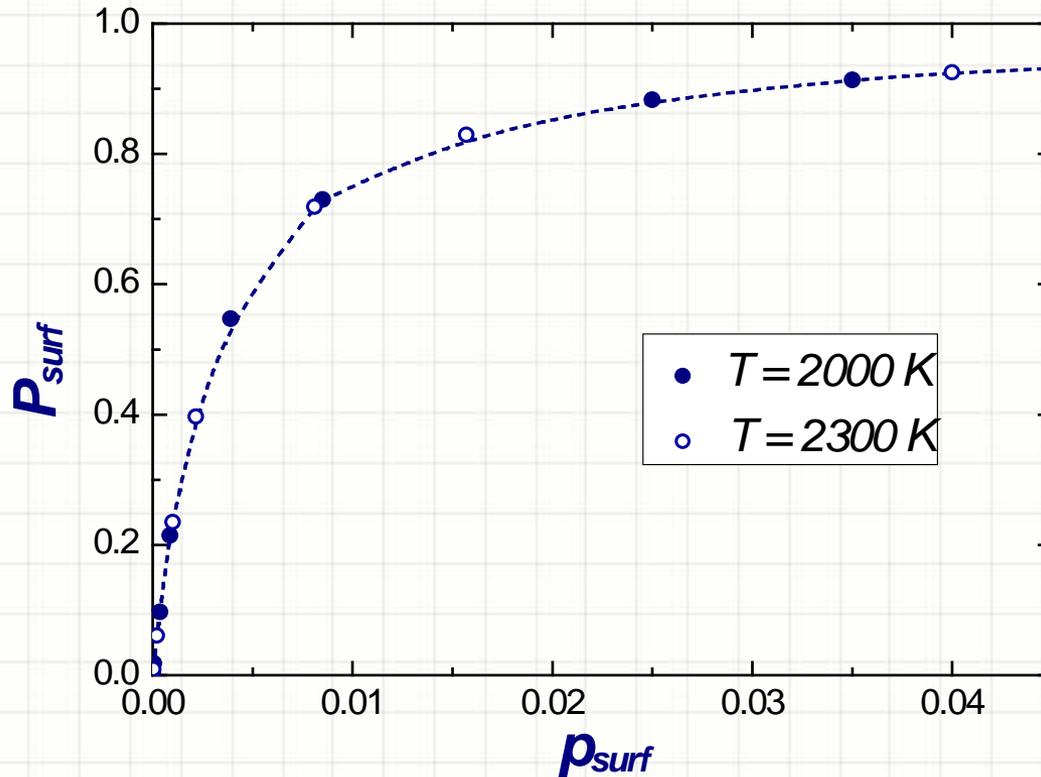
$\varphi = 4.5 \text{ eV}$

Без учёта
статвесов



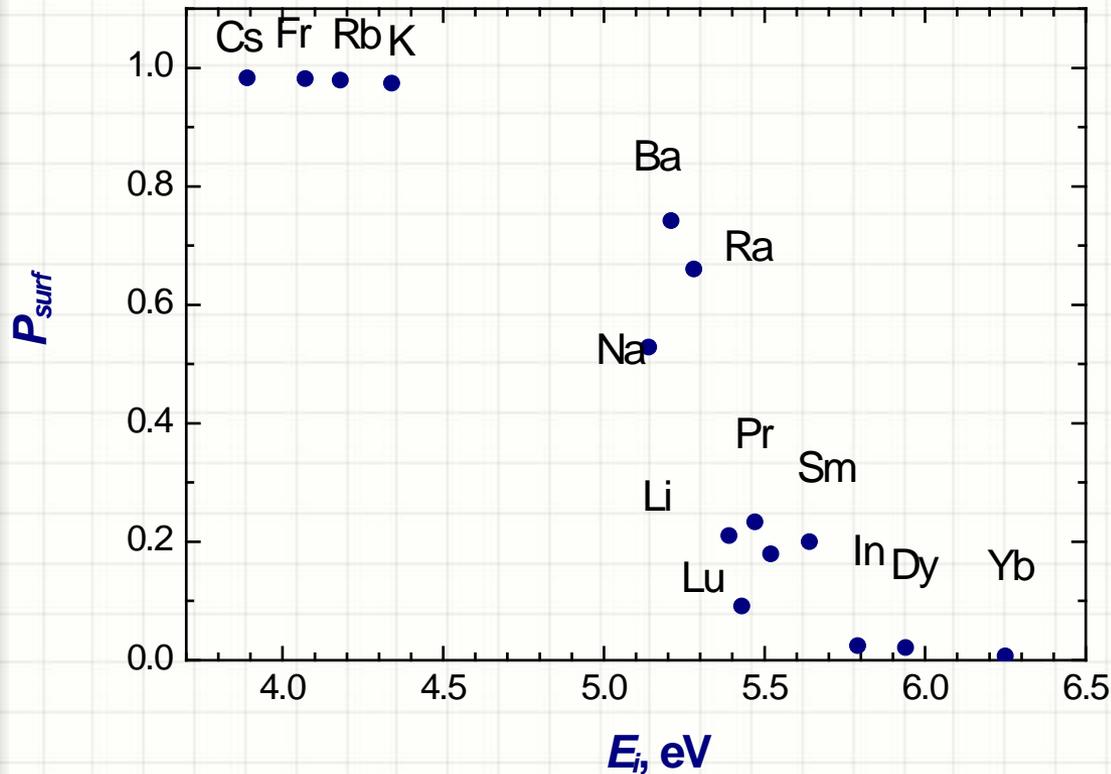
Зависимость эффективности поверхностной ионизации и количества соударений атомов со стенками от потенциала ионизации.

Поверхностная ионизация



Зависимость эффективности поверхностной ионизации от вероятности ионизации при единичном столкновении.

Поверхностная ионизация

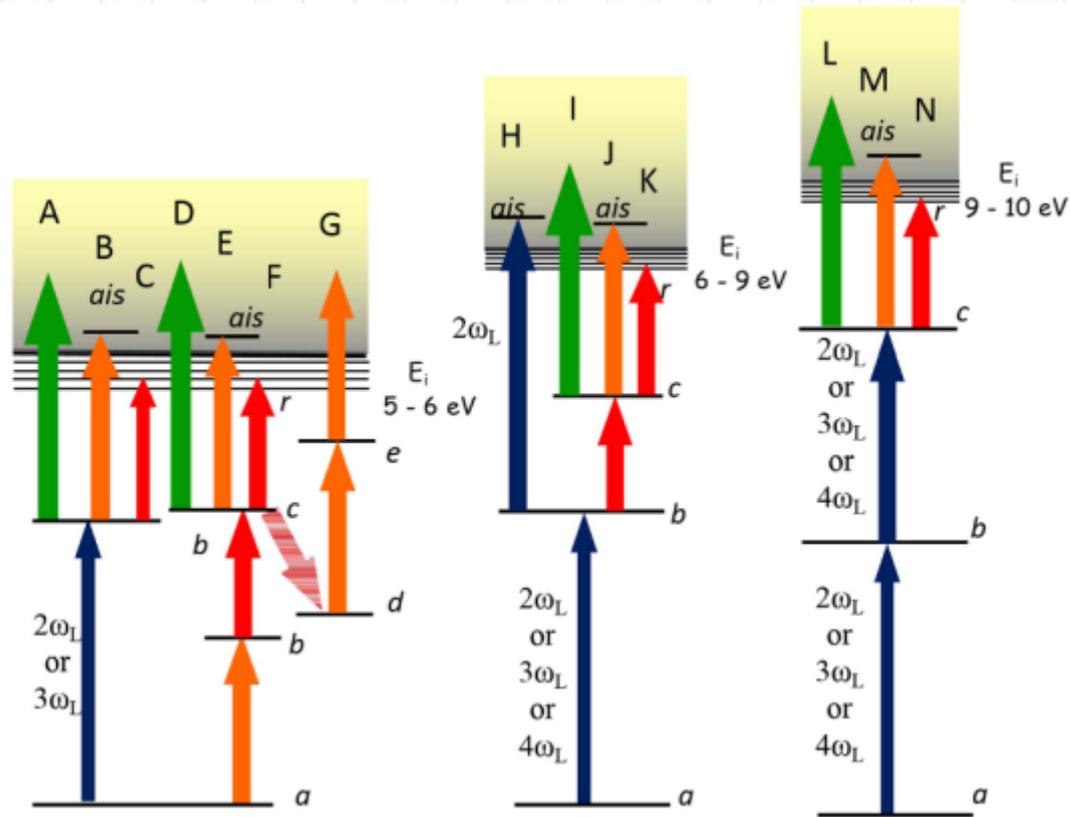


С учётом
статвесов

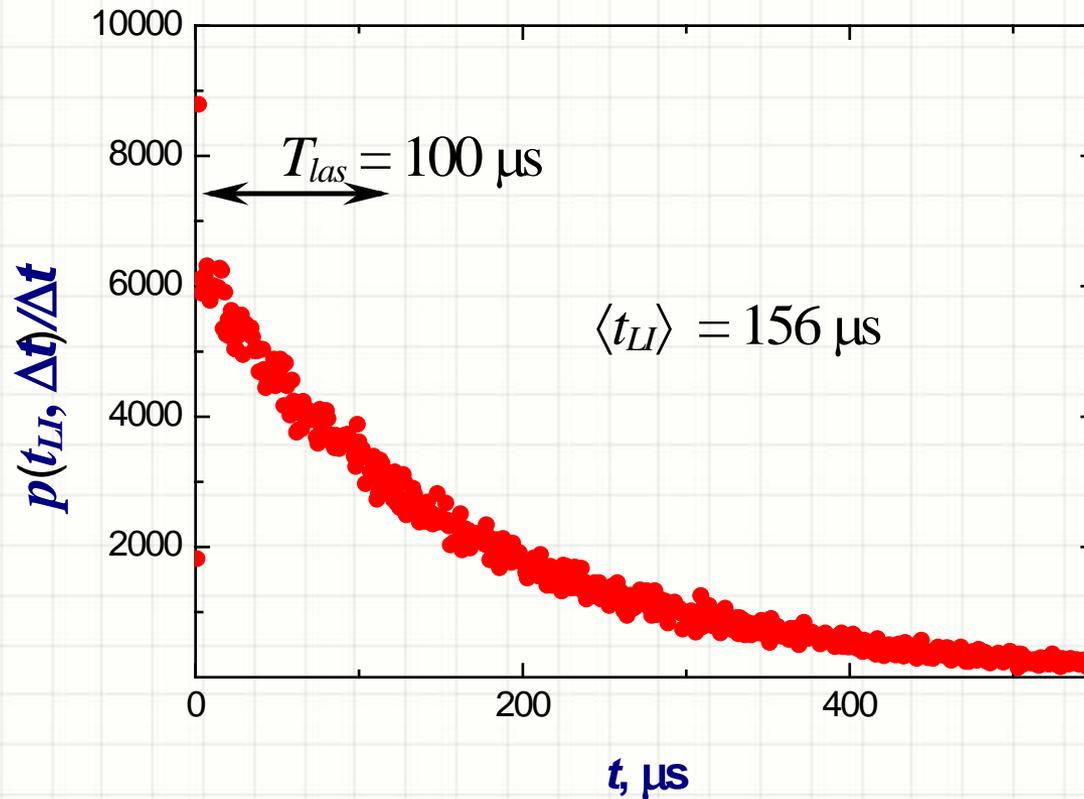
Зависимость эффективности поверхностной ионизации от потенциала ионизации.

Лазерная ионизация

Многоступенчатая резонансная лазерная фотоионизация

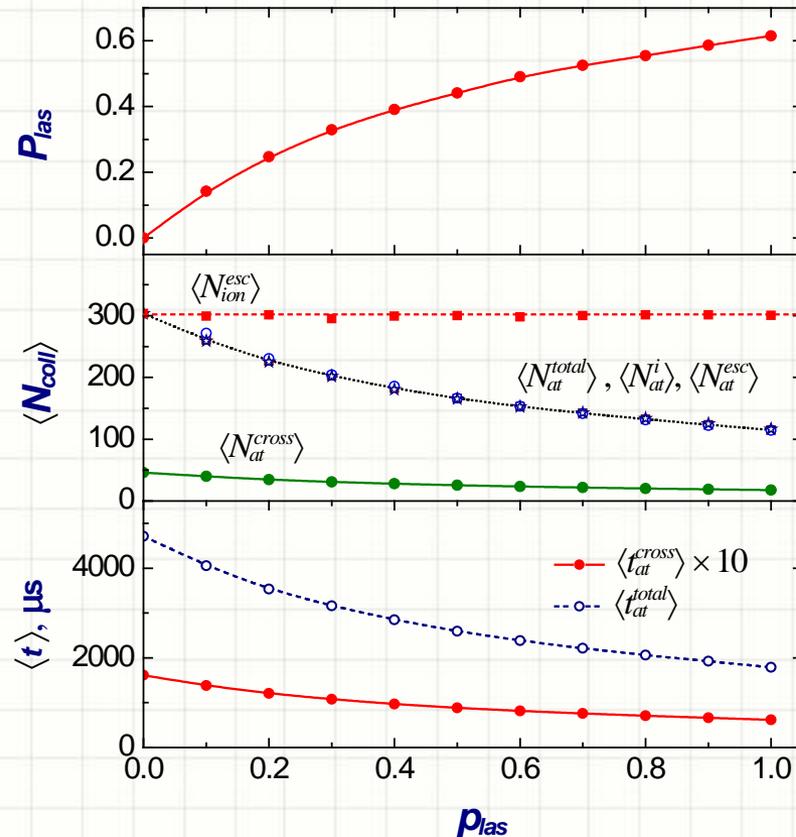


Лазерная ионизация



Распределение атомов по времени пребывания
в зоне, облучаемой лазерами (LI)

Лазерная ионизация



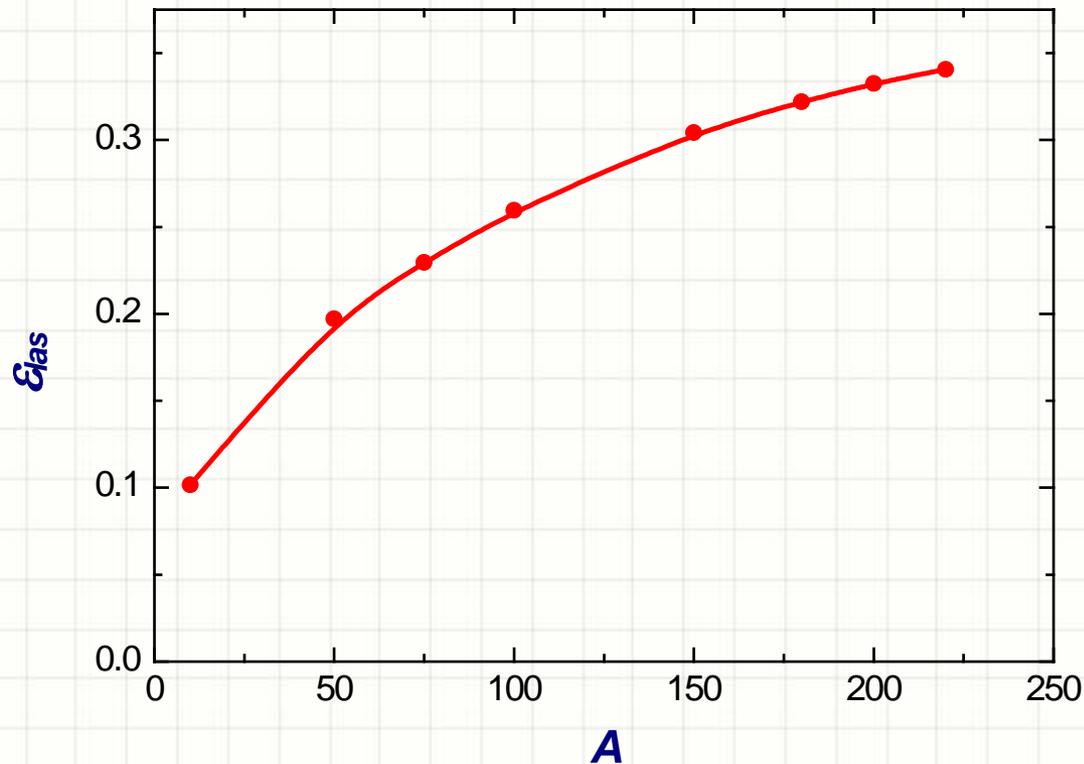
Зависимость вероятности ионизации в полости P_{las} , среднего количества столкновений атомов со стенкой до ионизации N_i или вылета N_{esc} , средних времен пребывания атома в полости и в зоне, облучаемой лазерами (t_{cross}) от вероятности ионизации при однократном облучении p_{las} .

Лазерная ионизация

| | | | |
|-----------------|-----|-----------------|------------------|
| Li | | In ^e | |
| Be | >7 | Sn | 0.2 |
| Mg | 10 | | 9 |
| Al | >20 | Sb | 2.7 |
| Ca | | Te | >18 |
| Sc | 15 | Ba | |
| Cr | ~20 | Ba ⁺ | 1.2 ^c |
| Mn | 19 | Pr | |
| Fe | | Nd | |
| Co | >4 | Sm | |
| Ni | >6 | Tb | |
| Cu ^e | 6.6 | Dy | 20 |
| | >7 | | |
| Zn | 5 | Ho | >20 |
| Ga | 21 | Tm | >2 |
| Ge | >2 | Yb | 15 |
| Y | | | |
| Mo | | Au ^e | >3 |
| Ag ^e | 14 | Hg ^e | 6 |
| | | Tl ^e | 27 |
| Cd | 10 | Pb ^e | 3 |

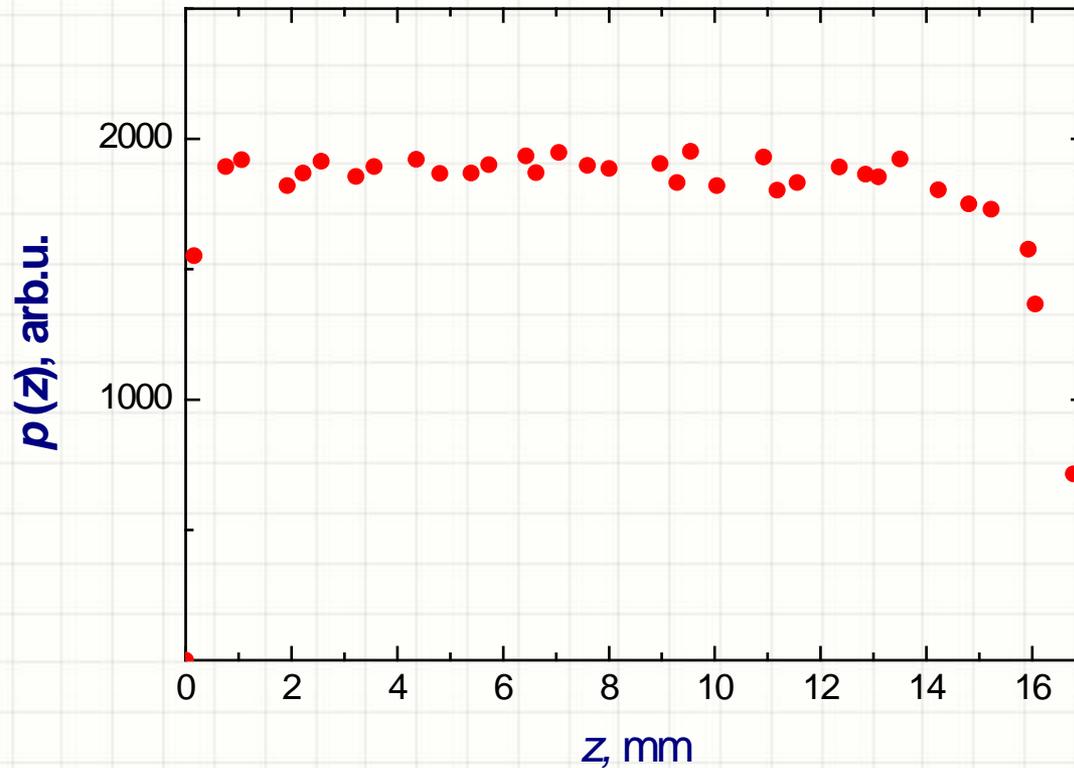
Измеренные значения эффективности лазерного ионного источника ISOLDE

Лазерная ионизация



Зависимость эффективности лазерной ионизации
от массы элемента

Лазерная ионизация



Распределение атомов в приосевой зоне

$$L = 17, D = 8$$

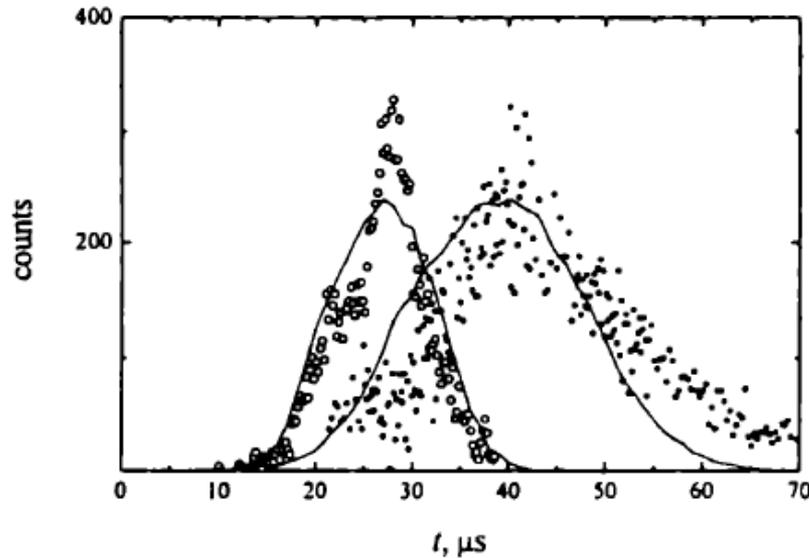
Эффективность лазерного ионного источника

- $\varepsilon = P_{las} \eta_{extr}$
- Пристеночный скачок потенциала

$$U_p = kT \ln \frac{AT^2}{\frac{I_{total}}{S} \sqrt{\frac{M}{2\pi m_e}}} - \varphi,$$

- Вероятность рекомбинации:
- $P_{recomb} = \exp\left(\frac{U_p}{kT}\right)$

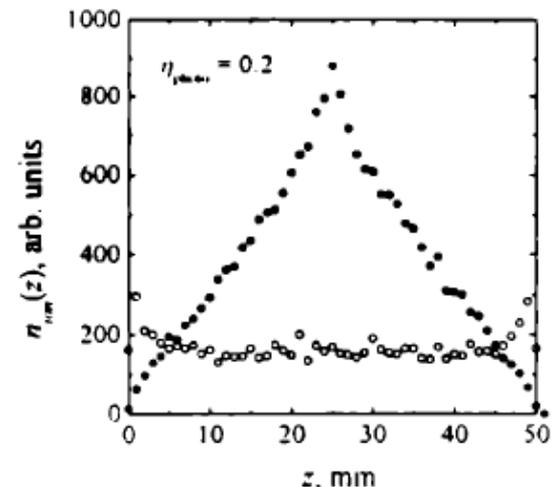
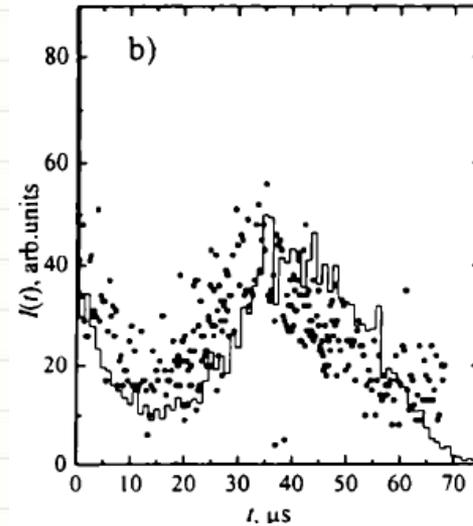
Эффективность лазерного ионного источника



- $U_{heat} = 2.6 \text{ V}, T = 1900 \text{ K}$
- $U_{heat} = 5.4 \text{ V}, T = 1800 \text{ K}$

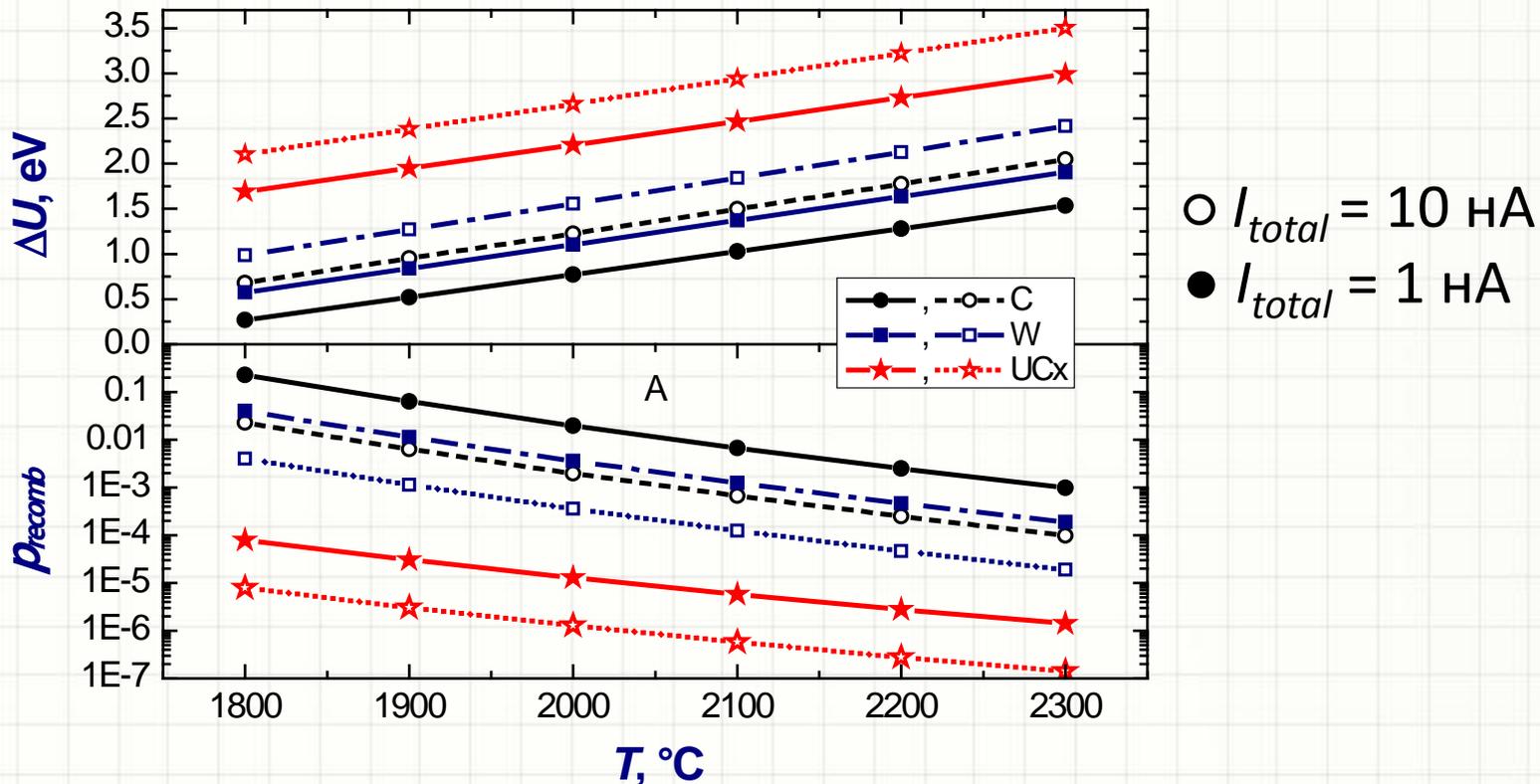
$(d = 1.5 \text{ mm}, d_{las} = 0.7 \text{ mm}, L = 50 \text{ mm})$

Временная структура фотоионного тока



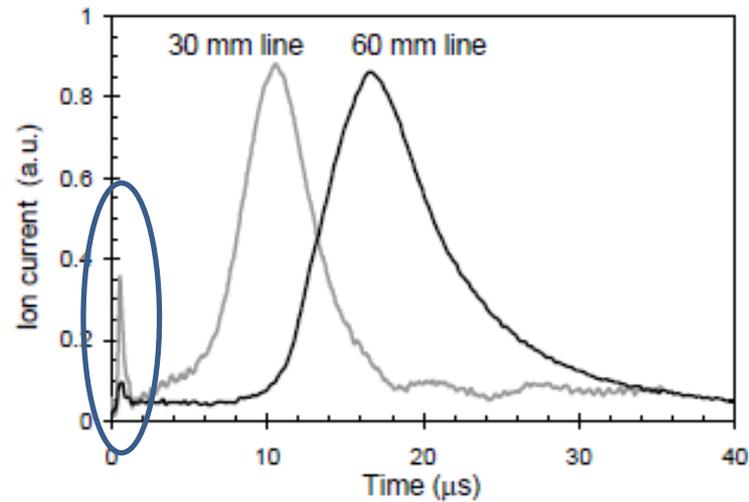
- $L = 50 \text{ mm}; d = 1.5 \text{ mm}; D = 5 \text{ mm}$
- $L = 50 \text{ mm}; d = 1.5 \text{ mm};$

Лазерная ионизация



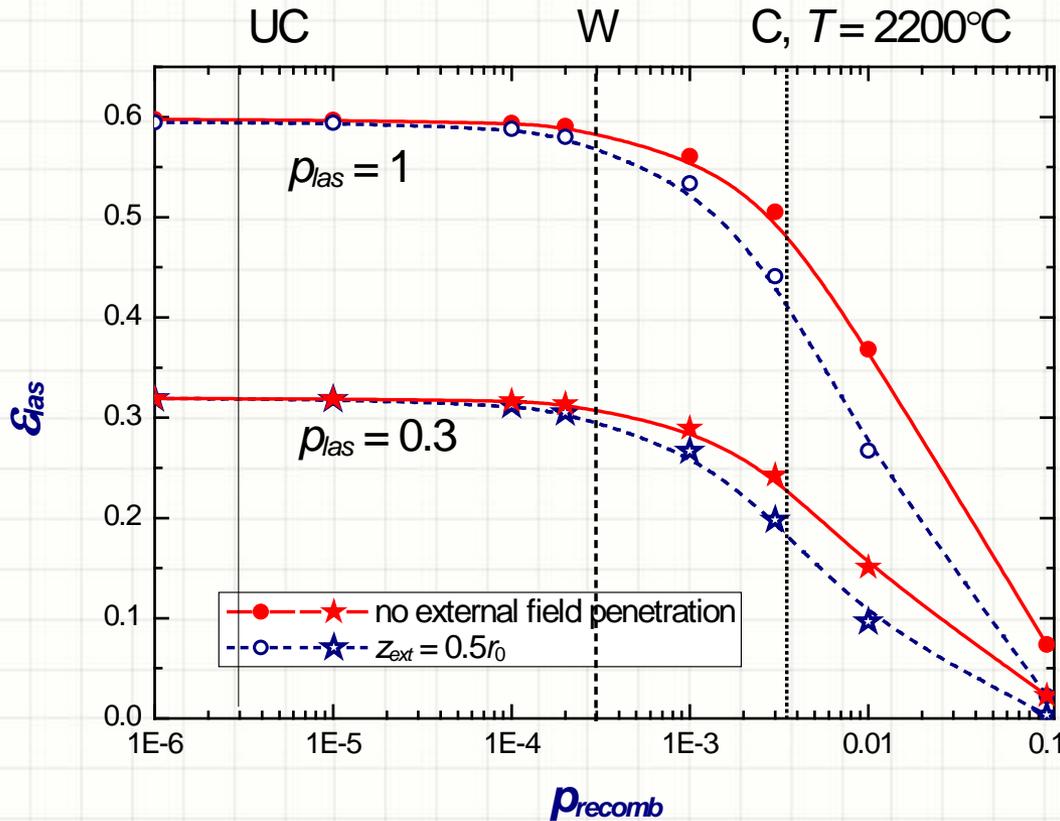
Зависимость величины пристеночного потенциала ΔU и вероятности рекомбинации при однократном соударении со стенкой полости p_{recomb} от температуры полости мишенно-ионного устройства

Лазерная ионизация



Временная структура фотоионного тока

Лазерная ионизация



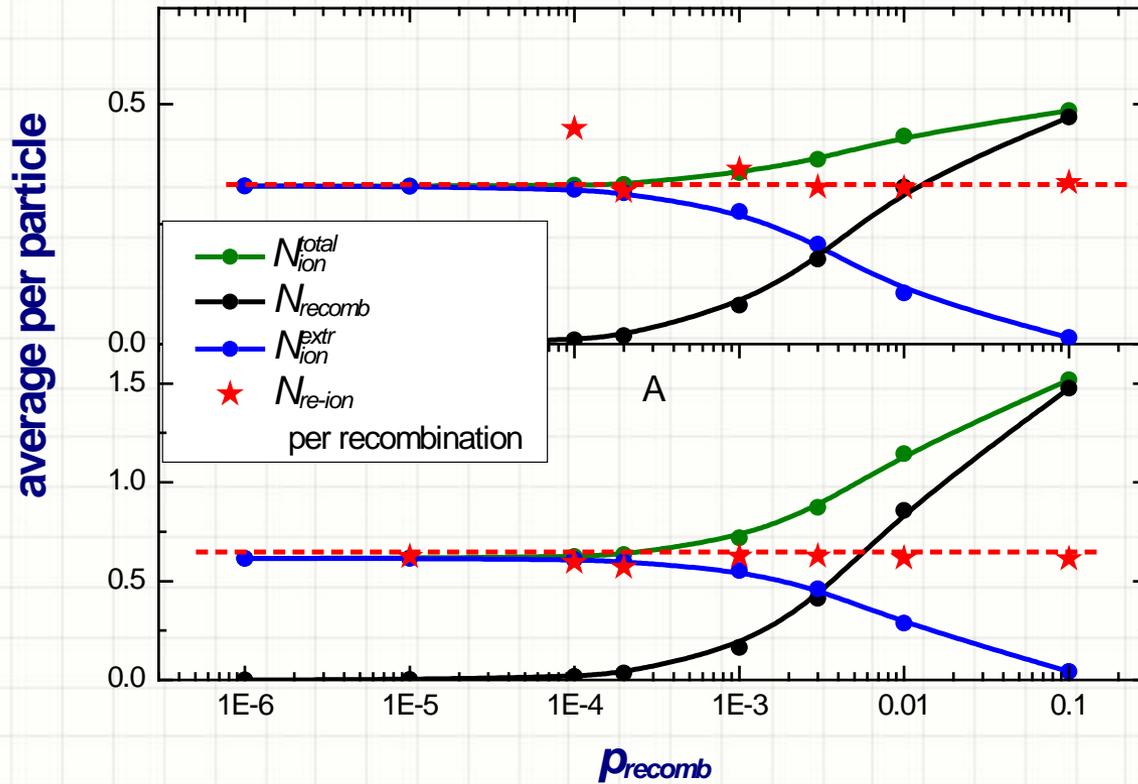
$$p_{recomb}(\text{RF}) =$$

$$p_{recomb}(\text{LF}) =$$

$$p_{recomb}(\text{CS})$$

Зависимость эффективности лазерного источника от вероятности рекомбинации при однократном «соударении» иона со стенкой полости

Лазерная ионизация



$$\rho_{las} = 0.3$$

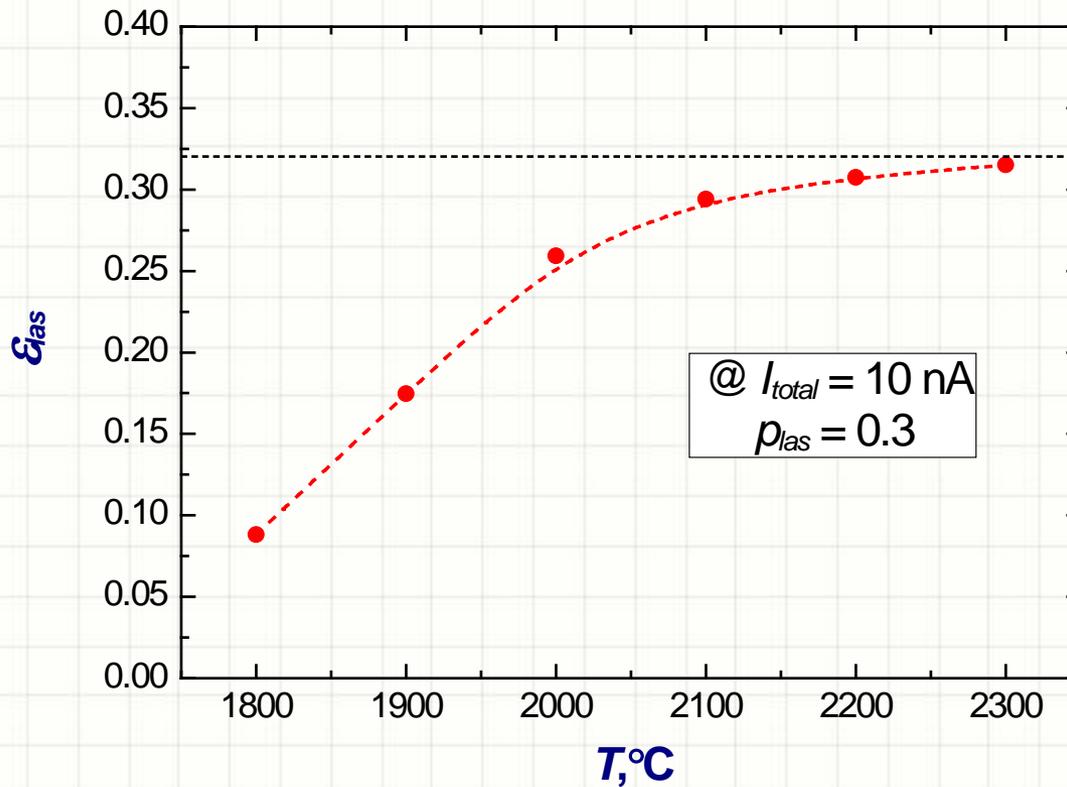
$$\rho_{las} = 1$$

$$\rho_{re-ion} = \rho_{las}$$

(per recombination)

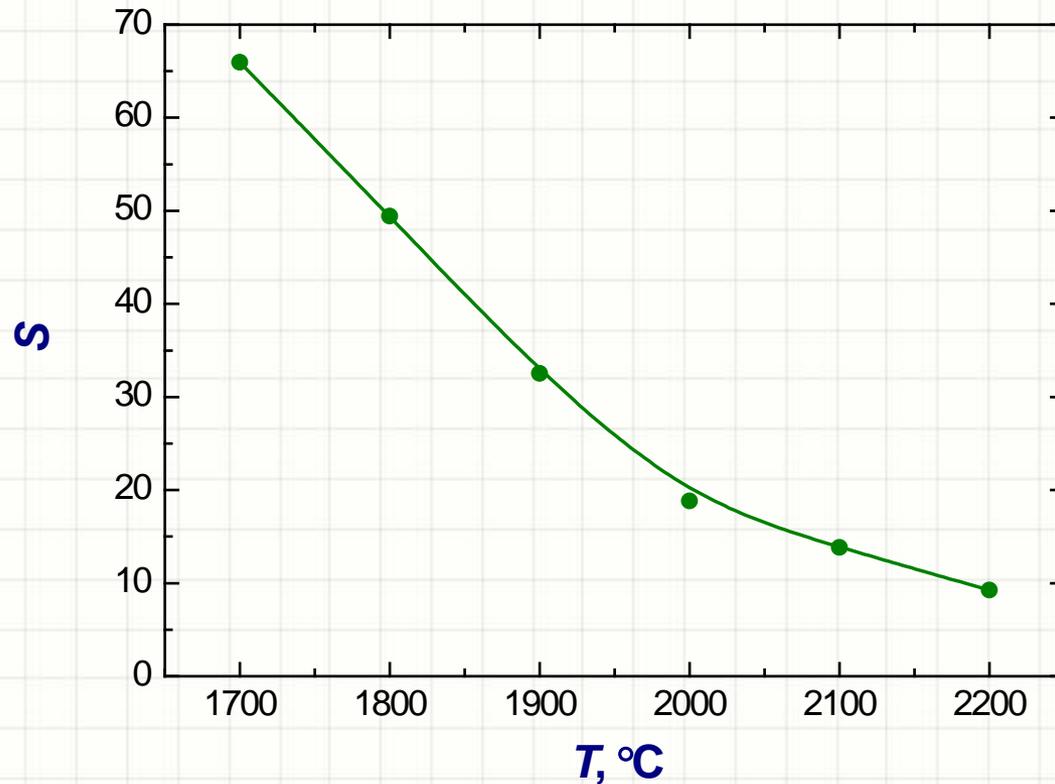
Зависимость количества рекомбинаций и реионизаций от вероятности рекомбинации при однократном «соударении» иона со стенкой полости

Лазерная ионизация



Зависимость количества рекомбинаций и реионизаций от температуры полости

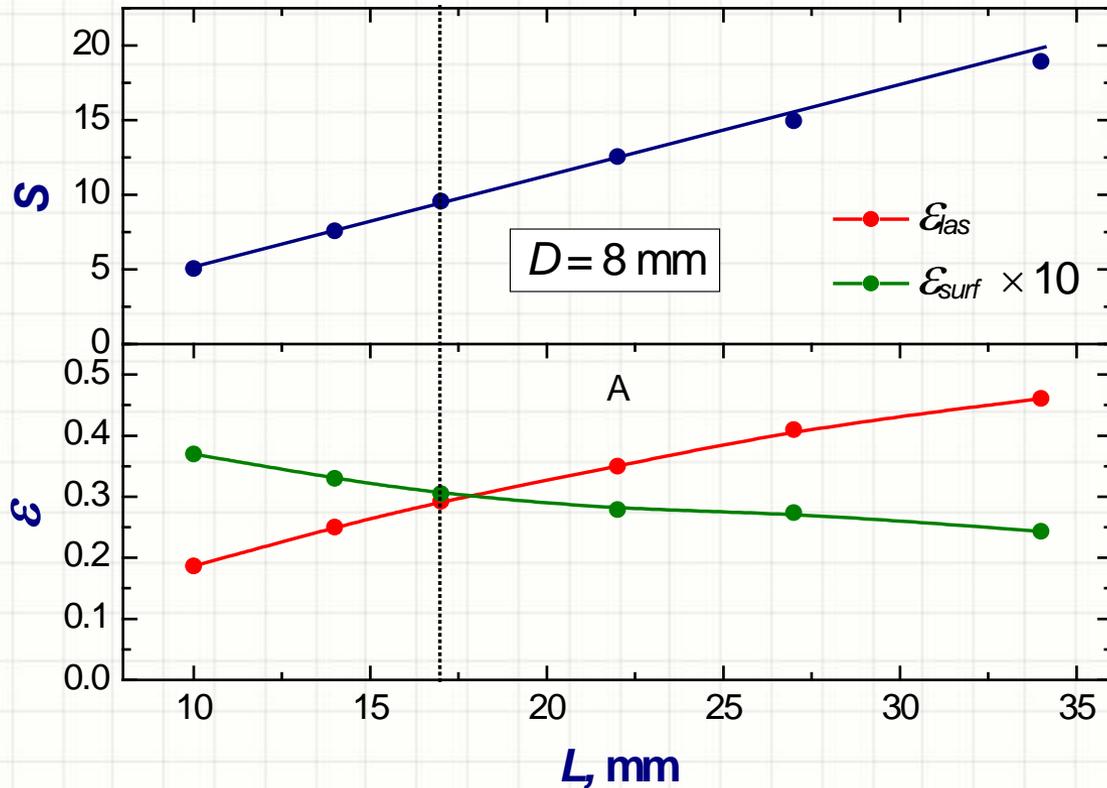
Селективность ионизации



$$S = \frac{\varepsilon_{las}}{\varepsilon_{surf}}$$

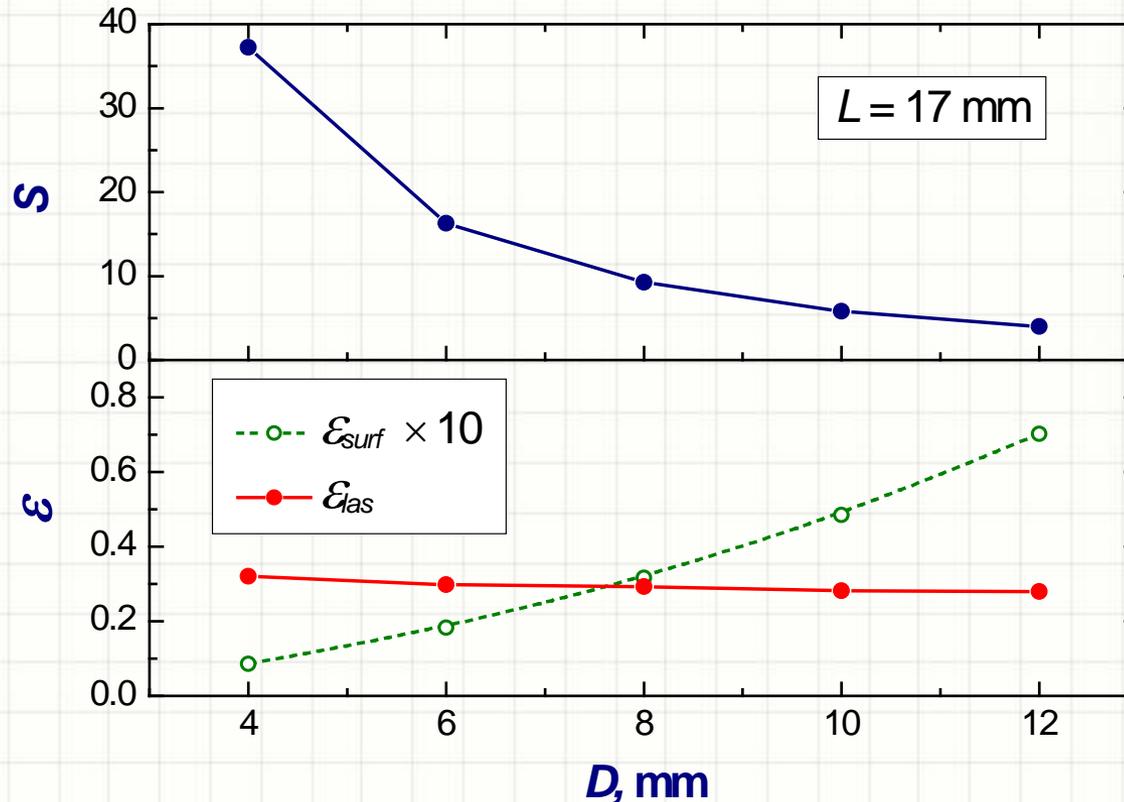
Зависимость селективности лазерной ионизации S , от температуры полости мишенно-ионного устройства

Селективность ионизации



Зависимость селективности лазерной ионизации S , эффективности лазерной (ϵ_{las}) и поверхностной (ϵ_{surf}) ионизации от длины полости мишенно-ионного устройства

Селективность ионизации



Зависимость селективности лазерной ионизации S , эффективности лазерной (ϵ_{las}) и поверхностной (ϵ_{surf}) ионизации от диаметра полости мишенно-ионного устройства

Выводы

- Предложенный вариант мишенно-ионного устройства представляется работоспособным:
- Малое время эффузии
- Высокая эффективность



Спасибо за внимание