

ПУЧКИ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ – НОВЫЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ

В.С. Черныш, Ю.А.Ермаков, А.Е. Иешкин

**Совместная лаборатория «Ионно-пучковые нанотехнологии»
Физический факультет МГУ, НИИЯФ МГУ и ОАО «ТЕНЗОР»**

Москва, 2013

УСКОРИТЕЛЬ ПРОТОНОВ И ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НА ВСТРЕЧНЫХ ПУЧКАХ



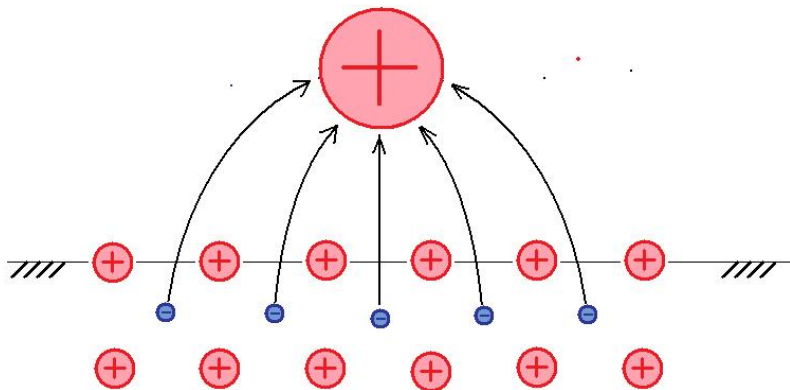
LHC
Large Hadron Collider



НОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИОНОВ С ВЕЩЕСТВОМ

МНОГОЗАРЯДНЫЕ ИОНЫ

Xe^{45+} $E_0 = 10$ кэВ, $E_n = 150$ кэВ

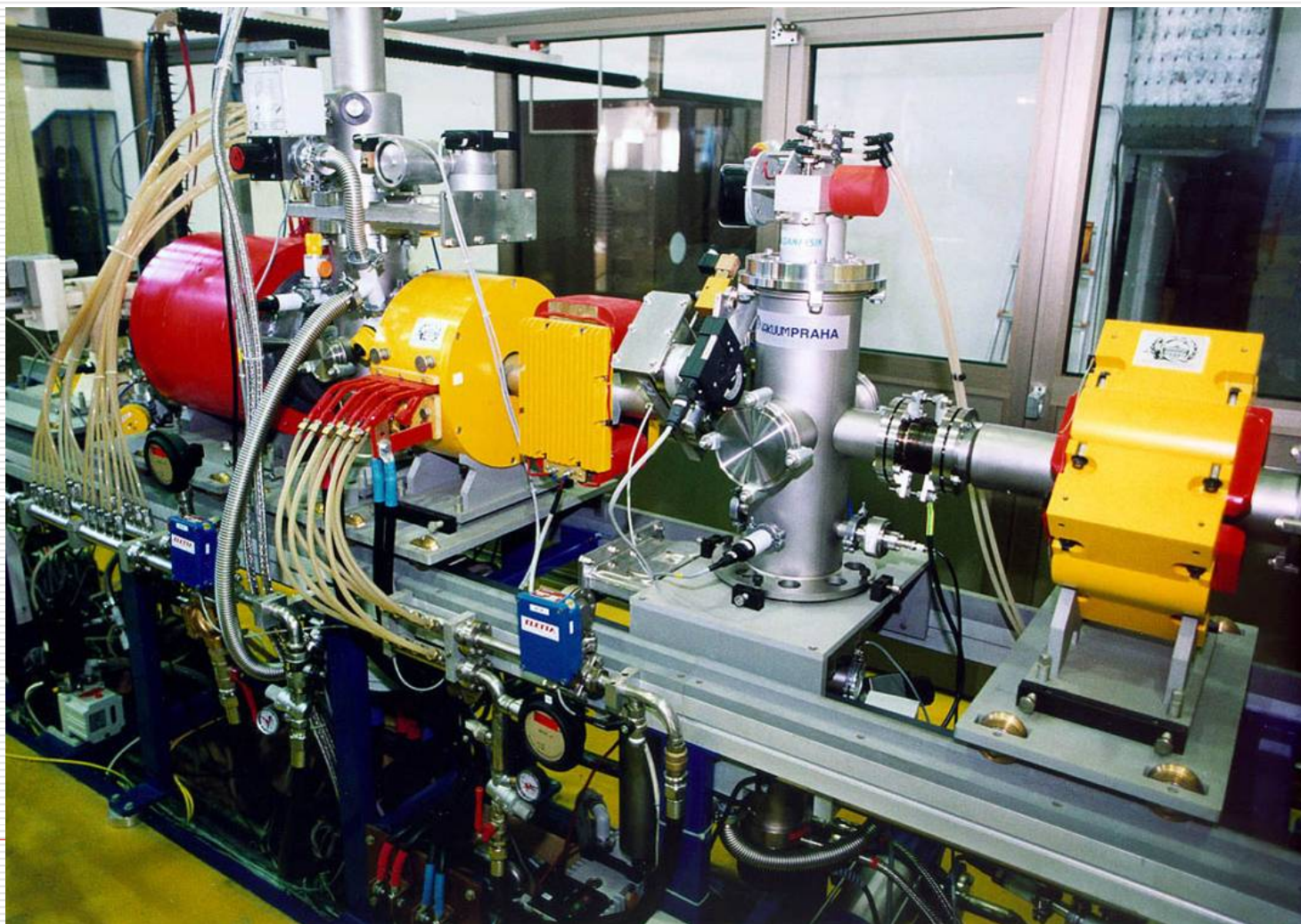


УСКОРИТЕЛЬ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ НАУК ВИНЧА (СЕРБИЯ)



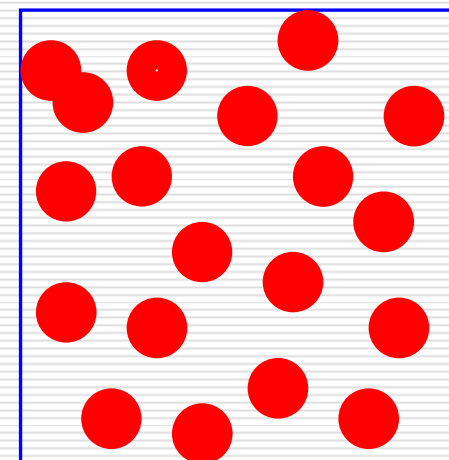
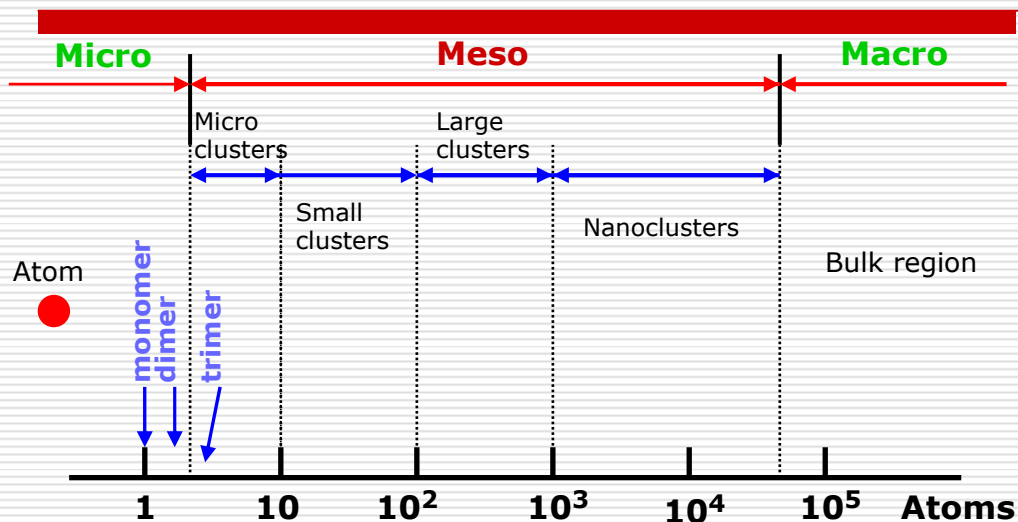
ИСТОЧНИК МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ



ION YIELDS FOR SELECTED ELEMENTS

| Element | Atomic no. /Atomic mass | P _{shf} [W] | Charge state | I [eμA] | Element | Atomic no. /Atomic mass | P _{shf} [W] | Charge state | I [eμA] |
|---------|----------------------------|-------------------------|-----------------|---------|---------|----------------------------|-------------------------|-----------------|---------|
| He | 2/4 | 50 | 1+ | 760 | Zn | 30/64,66,68 | 175 | 7+ | 77 |
| | | 100 | 2+ | 410 | | | | 9+ | 46 |
| C | 6/12 | 280 | 2+ | 230 | | | | 10+ | 32 |
| | | | 4+ | 128 | Kr | 36/86 | 330 | 12+ | 95 |
| N | 7/14 | 400 | 4+ | 490 | | | | 13+ | 88 |
| | | | 5+ | 470 | | | | 14+ | 60 |
| O | 8/16 | 370 | 5+ | 660 | Xe | 54/136 | 240 | 15+ | 28 |
| | | | 6+ | 432 | | | | 19+ | 43 |
| | | | 7+ | 37 | | | | 20+ | 41 |
| Ne | 10/20 | 390 | 5+ | 560 | Pb | 82/207 | 200 | 21+ | 37 |
| | | | 6+ | 290 | | | | 22+ | 27 |
| | | | 7+ | 120 | | | | 23+ | 25 |
| | | | 8+ | 48 | | | | 24+ | 17 |
| Ar | 18/40 | 390 | 8+ | 660 | | | | 16+ | 31 |
| | | | 9+ | 340 | | | | 18+ | 15 |
| | | | 11+ | 130 | | | | 19+ | 12 |
| | | | 12+ | 36 | | | | 20+ | 10 |

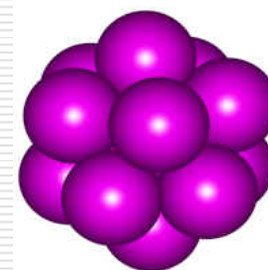
КЛАСТЕРНЫЕ ИОНЫ



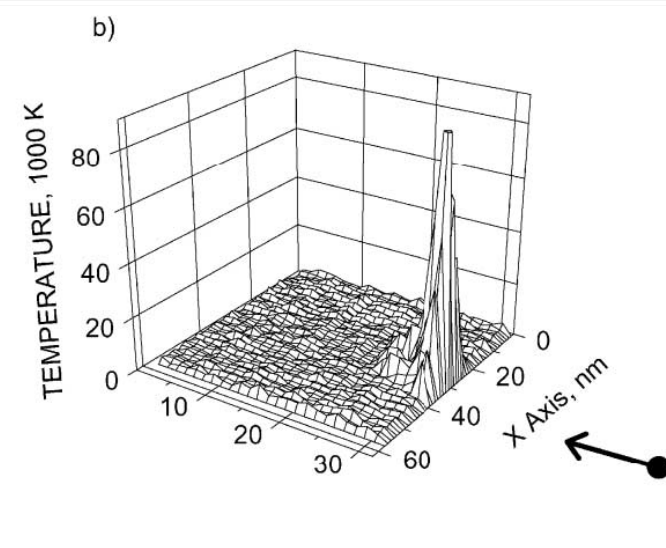
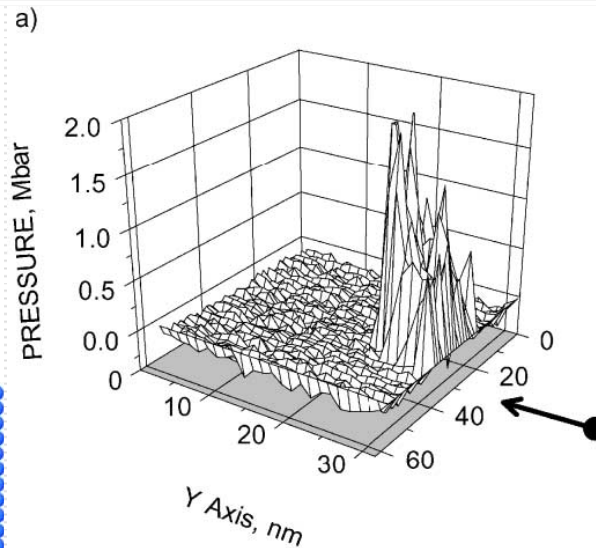
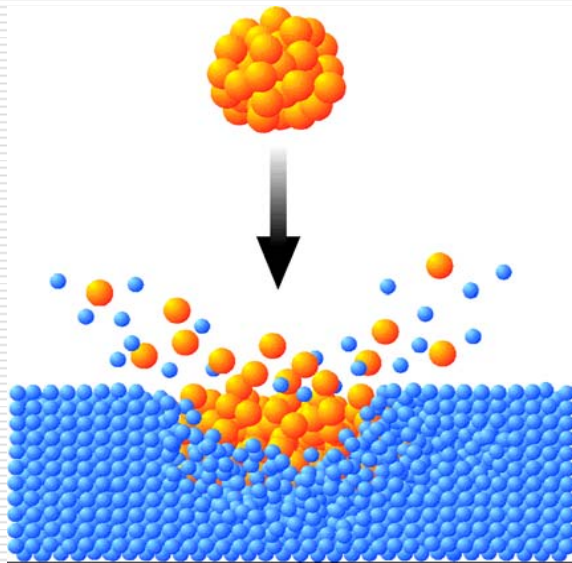
?

Кластеры инертных газов, $(N_2)_n$, $(CO_2)_n$ и т.д.
Энергия связи $< 10 \text{ meV}$

Кластеры металлов
Энергия связи $\sim 0,5 \div 3 \text{ eV}$



ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ТВЁРДЫХ ТЕЛ



МД расчёты взаимодействия 50 кэВ Ar_{349} кластера с поверхностью Si показали, что через 362 фсек локальная температура может достигать 10^4 - 10^5 K, а давление – несколько Мбар. Ударная волна может приводить к новым физическим явлениям, которые не наблюдаются при взаимодействии атомных ионов с поверхностью.

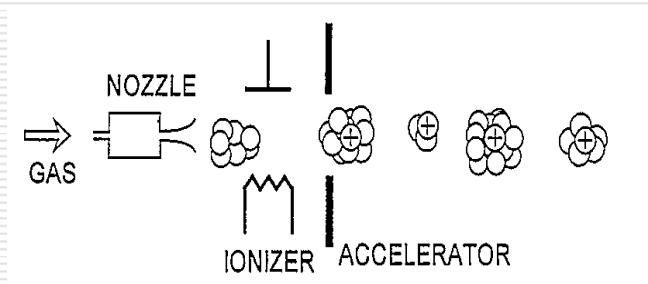
КРАТКИЙ ЭКСКУРС В ИСТОРИЮ

-1951 Кантровиц и Грей теоретически показали, что при динамическом расширении газа через сопло интенсивность атомного или молекулярного пучка значительно возрастает по сравнению с эффузионным истечением через диафрагму

-1956 Беккер и др. экспериментально продемонстрировали, что газ в генерируемой коническим соплом струе конденсируется в кластеры, размеры которых в зависимости от условий истечения изменяются от димеров или тримеров до, предположительно, микрокристаллов, состоящих из нескольких тысяч частиц

-1961 Хенкес и Бентли установили, что в сверхзвуковых струях формируются кластеры $(\text{CO}_2)_n$, где $n = 1 \div 26$

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКОВ ГАЗОВЫХ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ



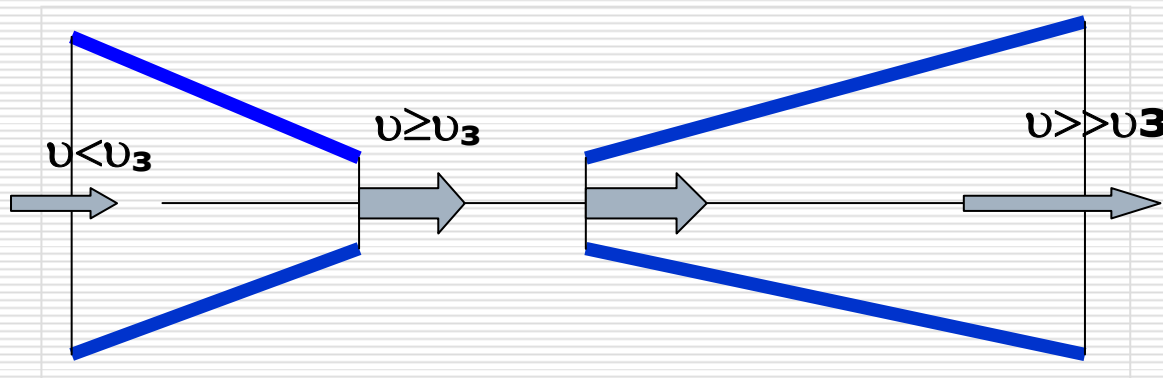
$$h + \frac{v^2}{2} = \text{const} \quad - \text{интеграл Бернулли} \quad (\text{a})$$

$$\rho v S = \text{const} \quad - \text{закон сохранения массы} \quad (\text{b})$$

$$\frac{p}{\rho T} = \frac{R}{\mu} \quad - \text{уравнение состояния} \quad (\text{c})$$

$$\frac{p}{\rho^\gamma} = \text{const} \quad - \text{уравнение адиабаты} \quad (\text{d})$$

Звуковые и сверхзвуковые сопла



$$\frac{dS}{S} = \frac{dv}{v} (M^2 - 1)$$

Гюгонио, 1887 г.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКОВ ГАЗОВЫХ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ

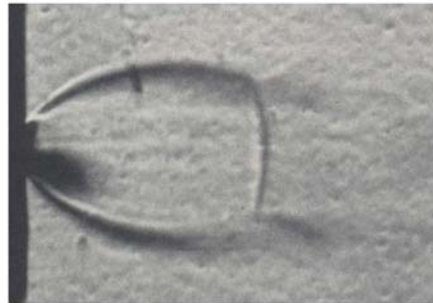
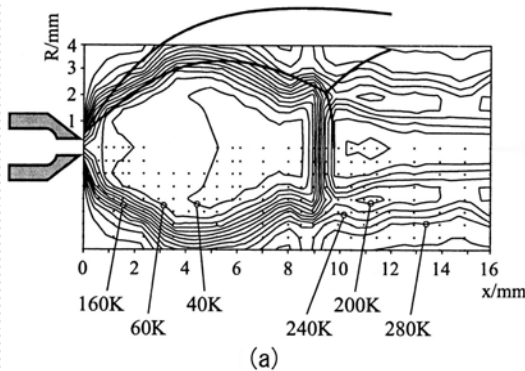
Для достижения скорости звука на срезе звукового сопла необходимо, чтобы:

$$\frac{p_0}{p_1} \equiv \alpha \geq \alpha_{kp} = \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}$$

Для большинства газов $p_0/p_1 \sim 2$.

Экспериментально установлено, что:

$$\frac{x_M}{d_n} = 0,67 \sqrt{\frac{p_0}{p_1}}$$



$$\frac{T}{T_0} = \left[1 + \frac{1}{2}(\gamma - 1)M^2 \right]^{-1}$$

СВОЙСТВА ПУЧКОВ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ

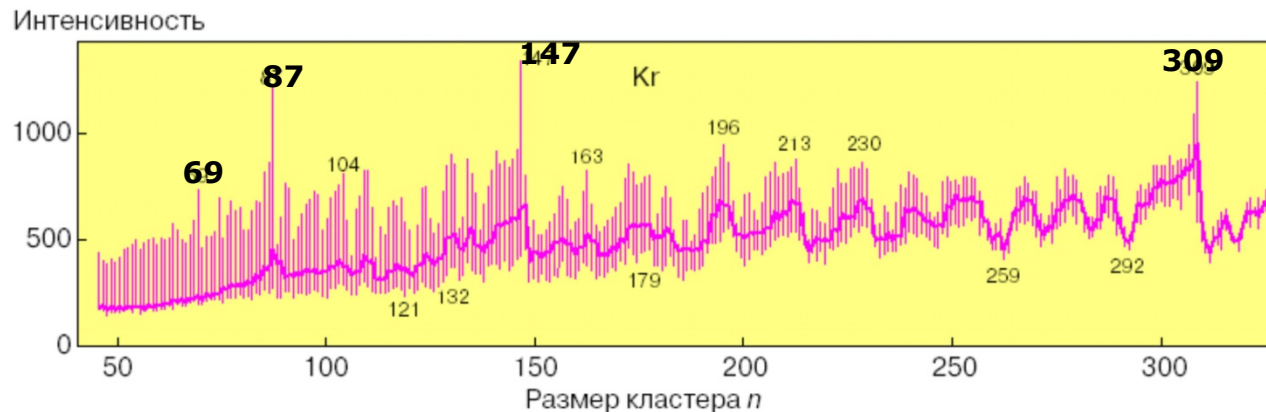
РАЗМЕР КЛАСТЕРОВ

Магические числа:

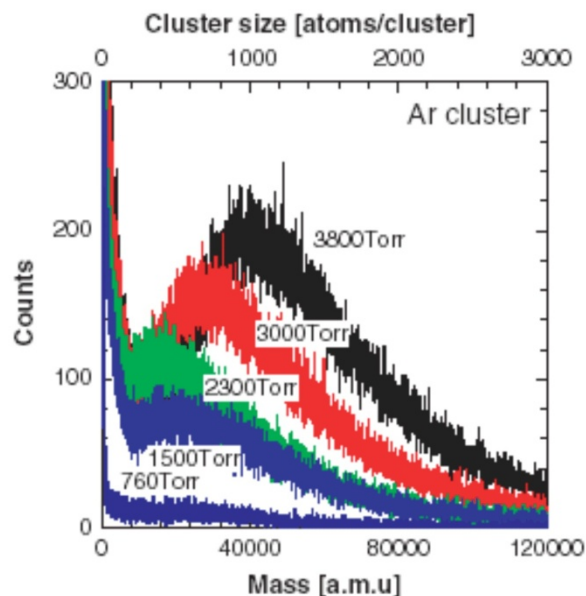
икосаэдр $-n=1/3 (10N^3-15N^2+11N-3) \rightarrow n=1, 13, 55, 147, 309...$

додекаэдр $-n=1/2 N(15N-1) \rightarrow n=7, 29, 66, 118, 185$

Kr_n⁺: $n=14, 16, 19, 22, 27, 29, 75, 87...$



СВОЙСТВА ПУЧКОВ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ



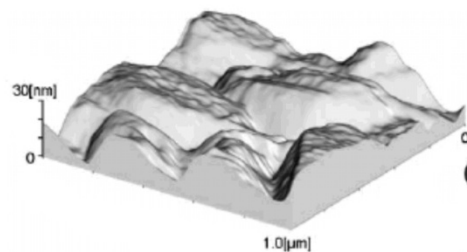
СОСТАВ ПУЧКА

| | 2+ | 3+ | 4+ |
|----------------|----|-----|-----|
| Ar | 91 | 226 | |
| Kr | 73 | | |
| Xe | 51 | 114 | 208 |
| N ₂ | 99 | 215 | |
| O ₂ | 92 | | |

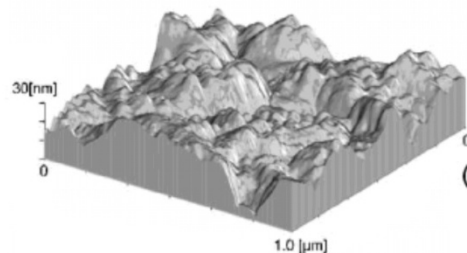
ЗАРЯДОВОЕ СОСТОЯНИЕ

Для интенсивного пучка кластеров аргона с о средней массой 10400 а.е.м. и энергией 64 кэВ средний заряд составляет 3,2

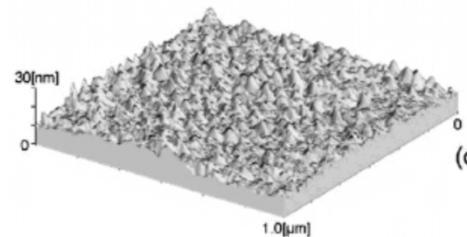
ПРИМЕНЕНИЕ ПУЧКОВ ГАЗОВЫХ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ: СГЛАЖИВАНИЕ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ



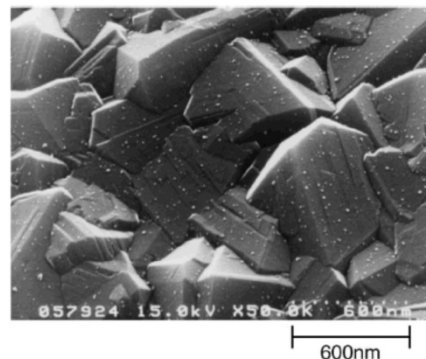
(a) Before irradiation
 $R_a = 5.8\text{nm}$



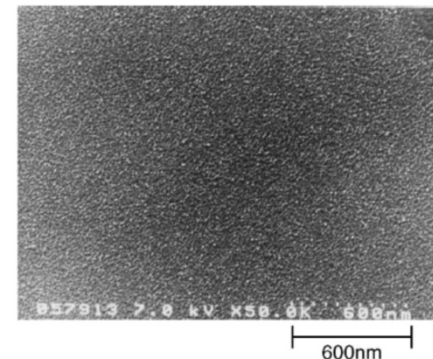
(b) Ar monomer ion irradiation
20keV, 1.2×10^{16} ions/cm²
 $R_a = 4.9\text{nm}$



(c) Ar cluster ion irradiation
20keV, 8.0×10^{15} ions/cm²
 $R_a = 1.3\text{nm}$

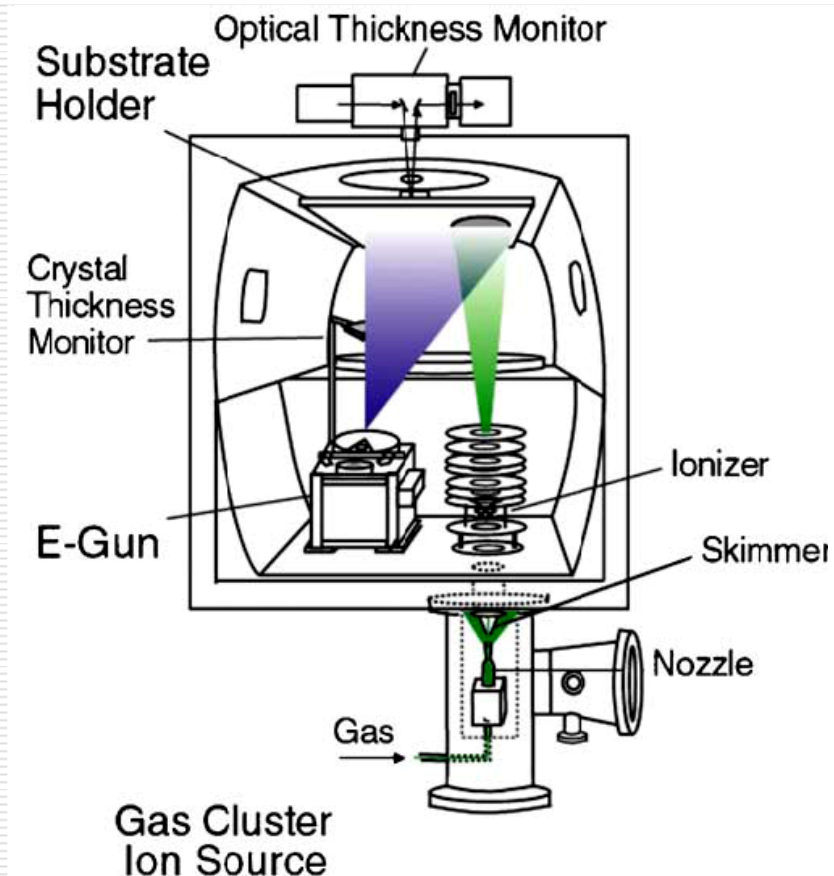


(a) Before irradiation
of CVD diamond film



(b) Ar₂₀₀₀ cluster ion irradiation
20keV, 1×10^{17} ions/cm²

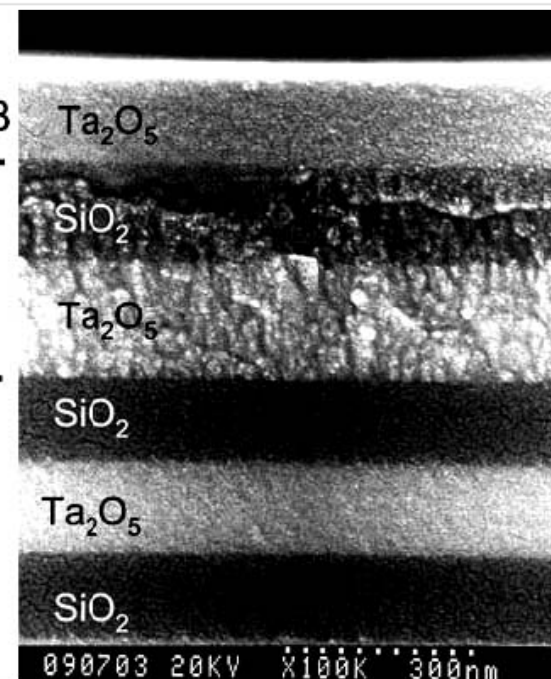
ПРИМЕНЕНИЕ ПУЧКОВ ГАЗОВЫХ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ: ИОННО-АССИСТИРОВАННОЕ ОСАЖДЕНИЕ ПЛЁНОК



With O_2 -GCIB

Without
 O_2 -GCIB

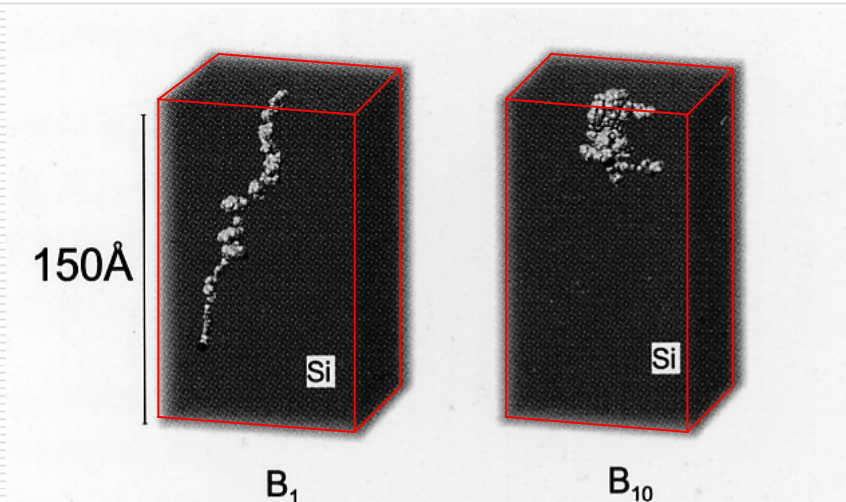
With
 O_2 -GCIB



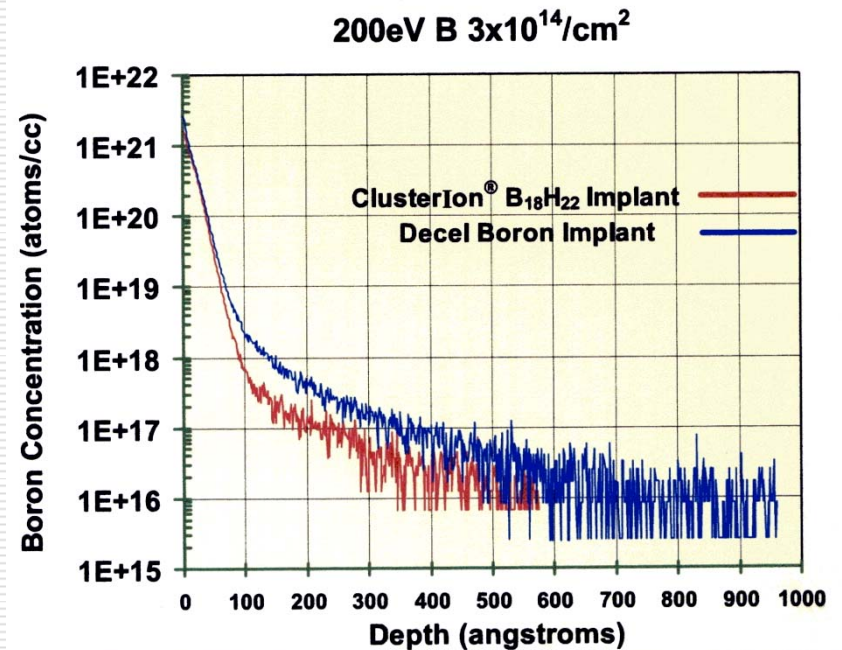
ПРИМЕНЕНИЕ ПУЧКОВ ГАЗОВЫХ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ: ИМПЛАНТАЦИЯ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ

ПРОФИЛИ КОНЦЕНТРАЦИИ

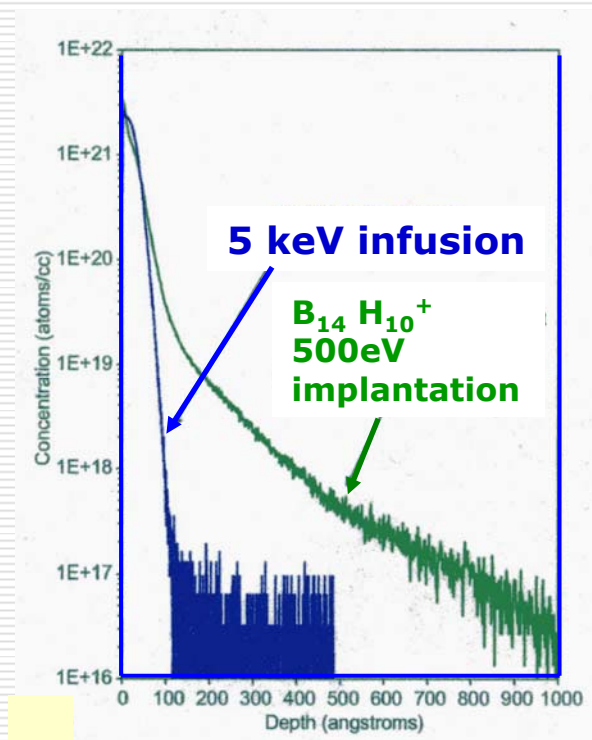
МД расчёт



Эксперимент



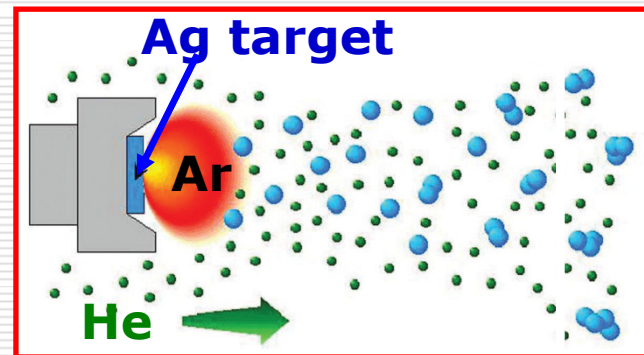
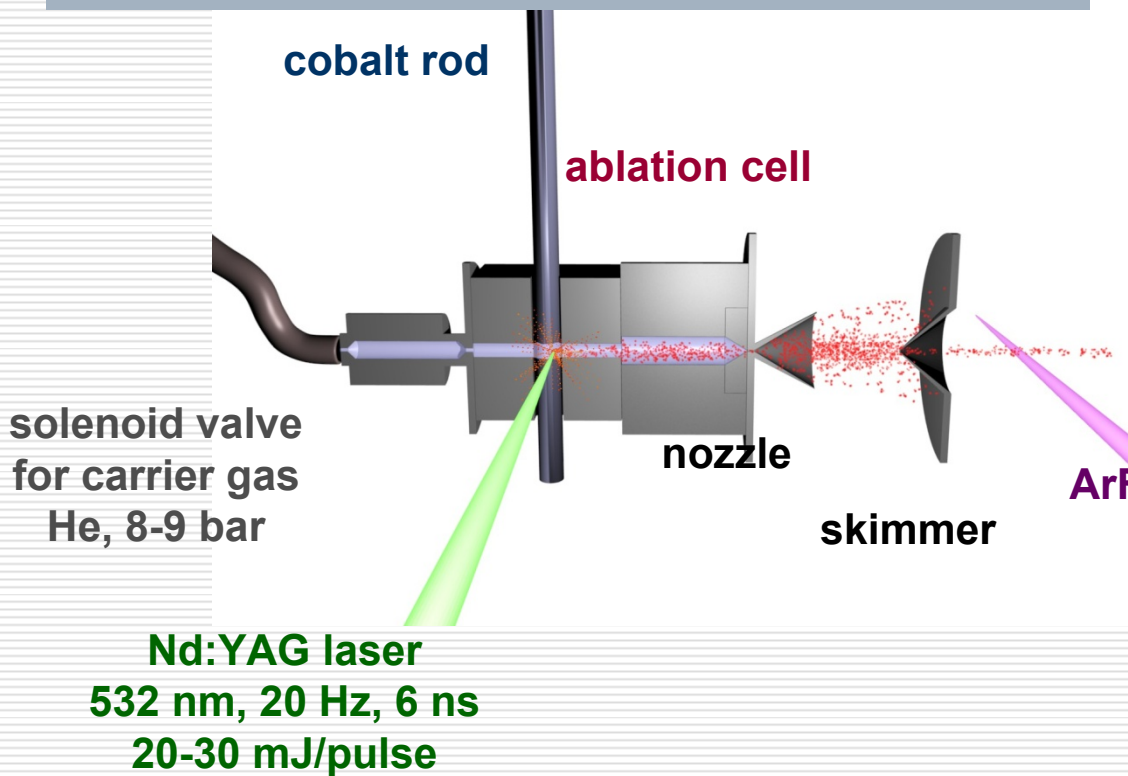
ПРИМЕНЕНИЕ ПУЧКОВ ГАЗОВЫХ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ: ИМПЛАНТАЦИЯ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ



Имплантация кластерными ионами: смесь Ar и B_2H_6

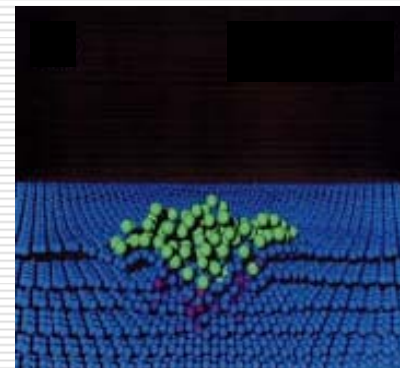
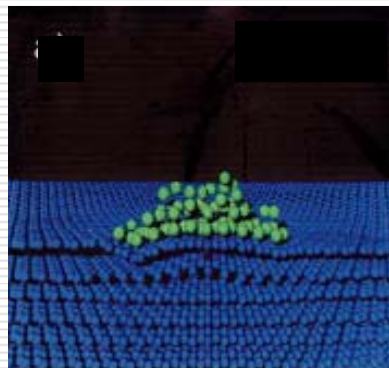
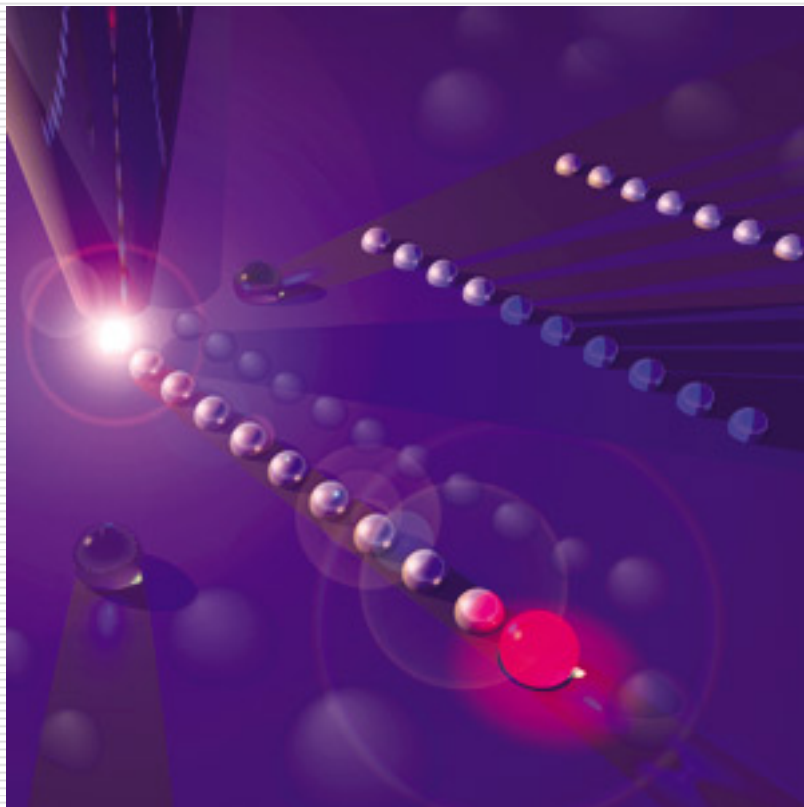
ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ КЛАСТЕРНЫЕ ИОНЫ

Laser Ablation Cluster Source (LACS)



Palmer et.al., 2003

ПРОБЛЕМА ЗАКРЕПЛЕНИЯ КЛАСТЕРОВ: «PINNING»



Palmer et.al., Phys.Rev.,B73(2006)125429

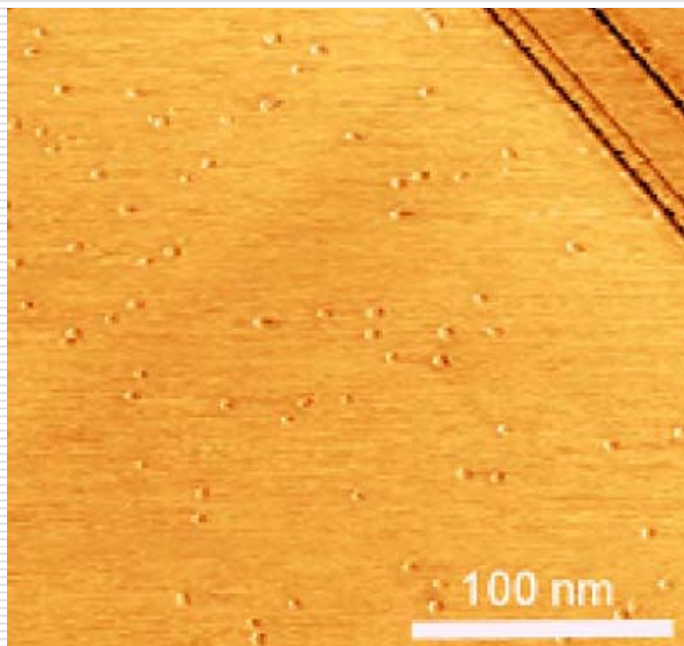
$$E_{\text{отд}} = \frac{4M_{\text{п}}M_{\text{кл}}}{(M_{\text{п}}+M_{\text{кл}})^2} E_{\text{кл}}$$

$$M_{\text{п}} = nM_{\text{с}}, \quad M_{\text{кл}} = NM_{\text{cl}}, \quad \text{а} \quad E_{\text{отд}} = E_{\text{d}}$$

$$nM_{\text{с}} \ll NM_{\text{cl}}$$

$$E_{\text{p}} \approx \frac{E_{\text{d}}}{4nM_{\text{с}}} NM_{\text{cl}}$$

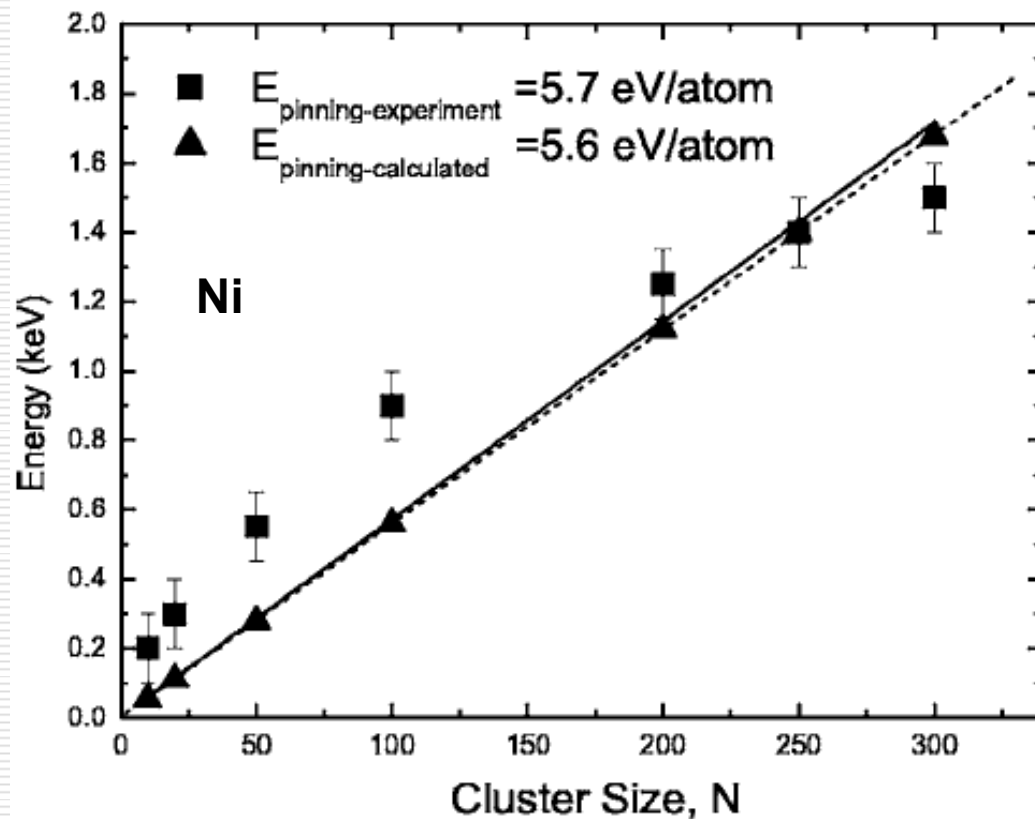
ПРОБЛЕМА «PINNING»



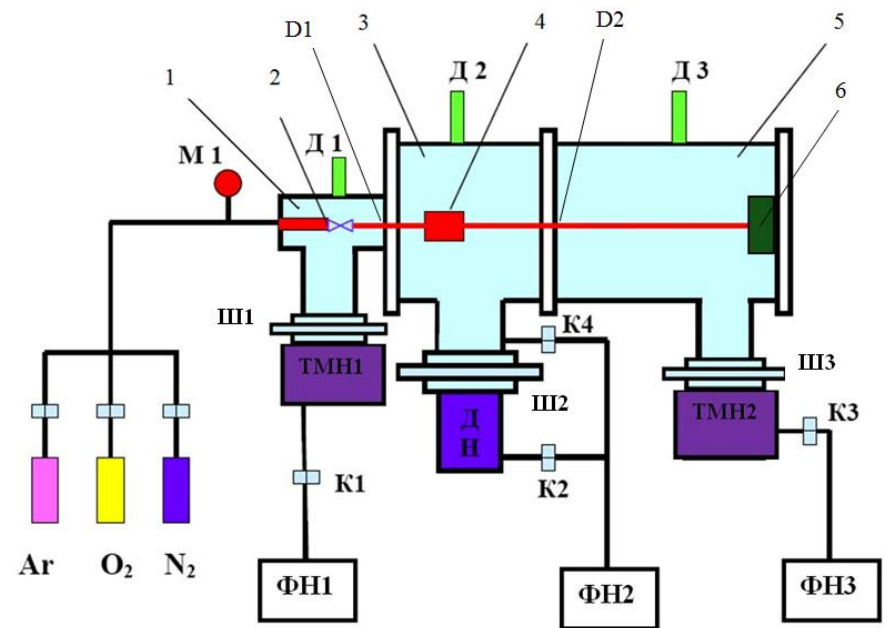
Au₇₀ 1.20 keV → графит

M. Di Vece et al.

Phys. Rev. B 72 (2005) 073407

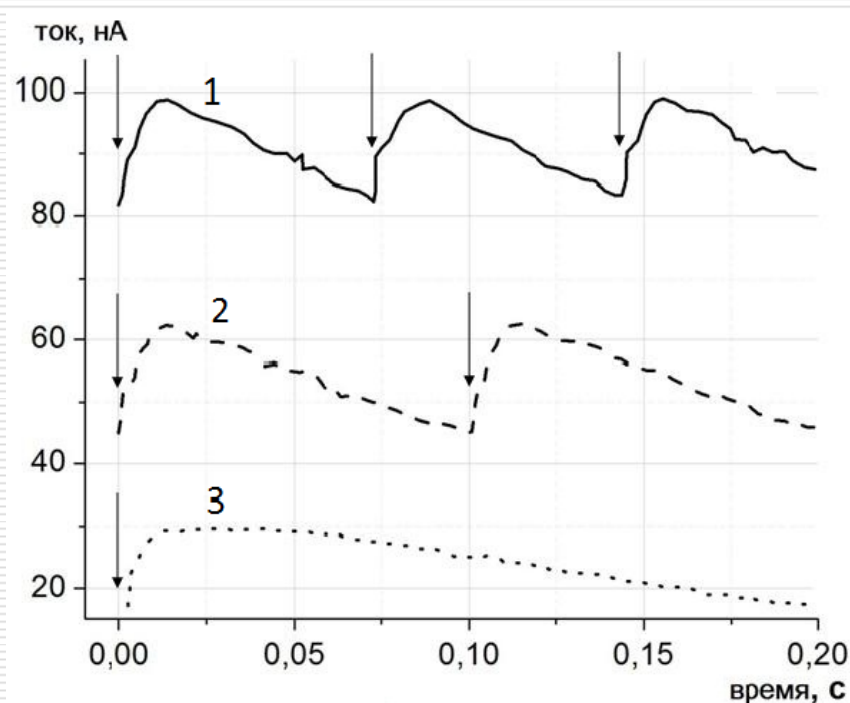


УСКОРИТЕЛЬ ГАЗОВЫХ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ



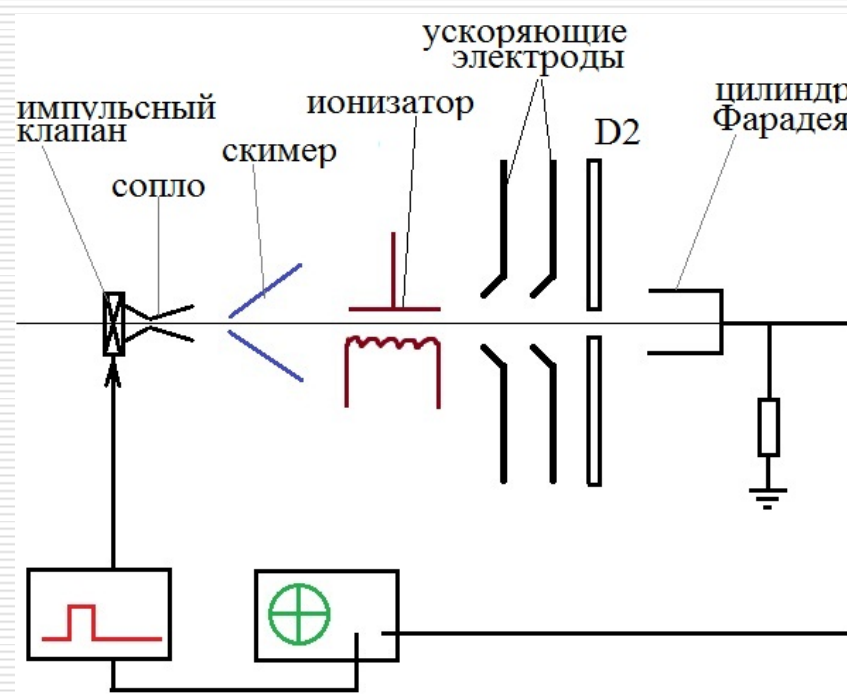
Зависимость тока пучка от времени

Осциллограммы

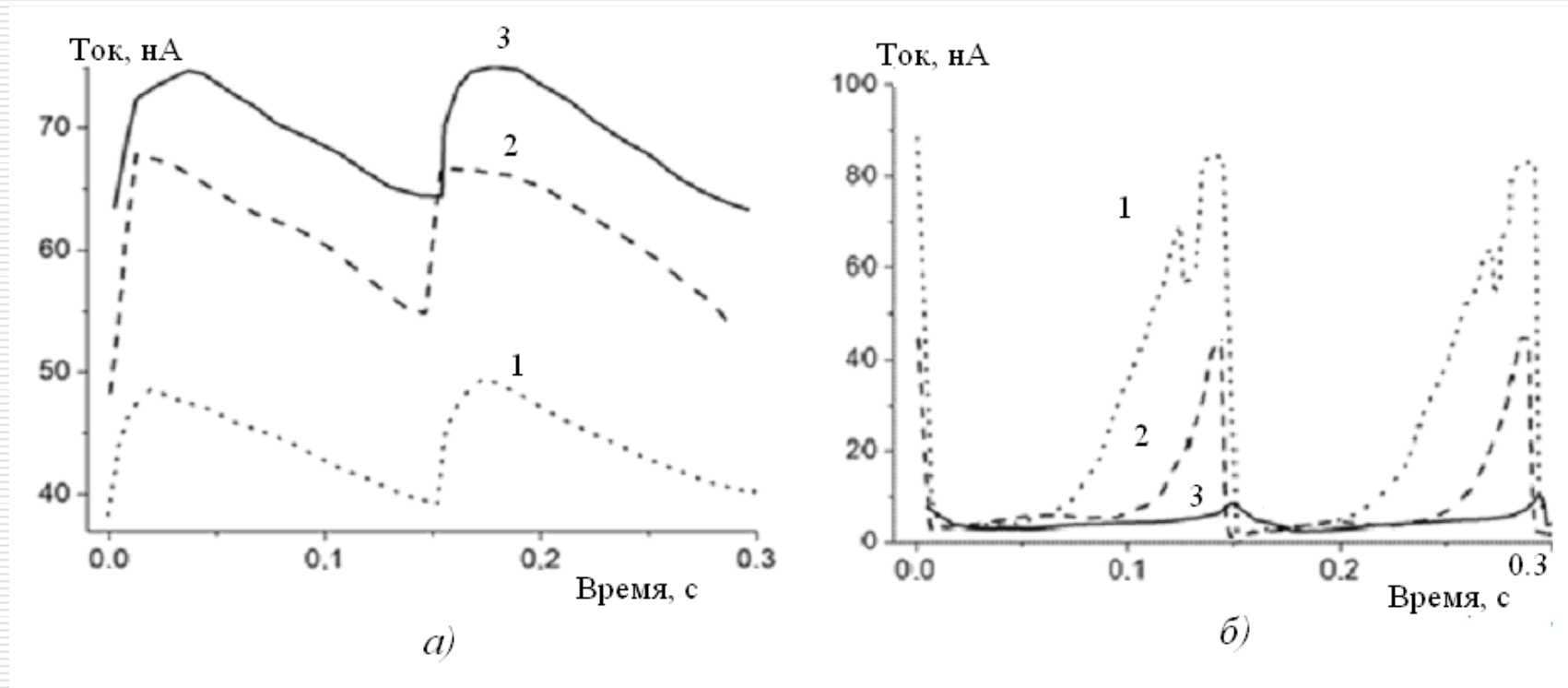


Длительность открывающего импульса составляла 2 мс, а период повторения:
1 - 70 мс; 2 - 100 мс и 3 - 200 мс.

Схема измерений



Зависимость тока пучка от времени при различных давлениях p_0

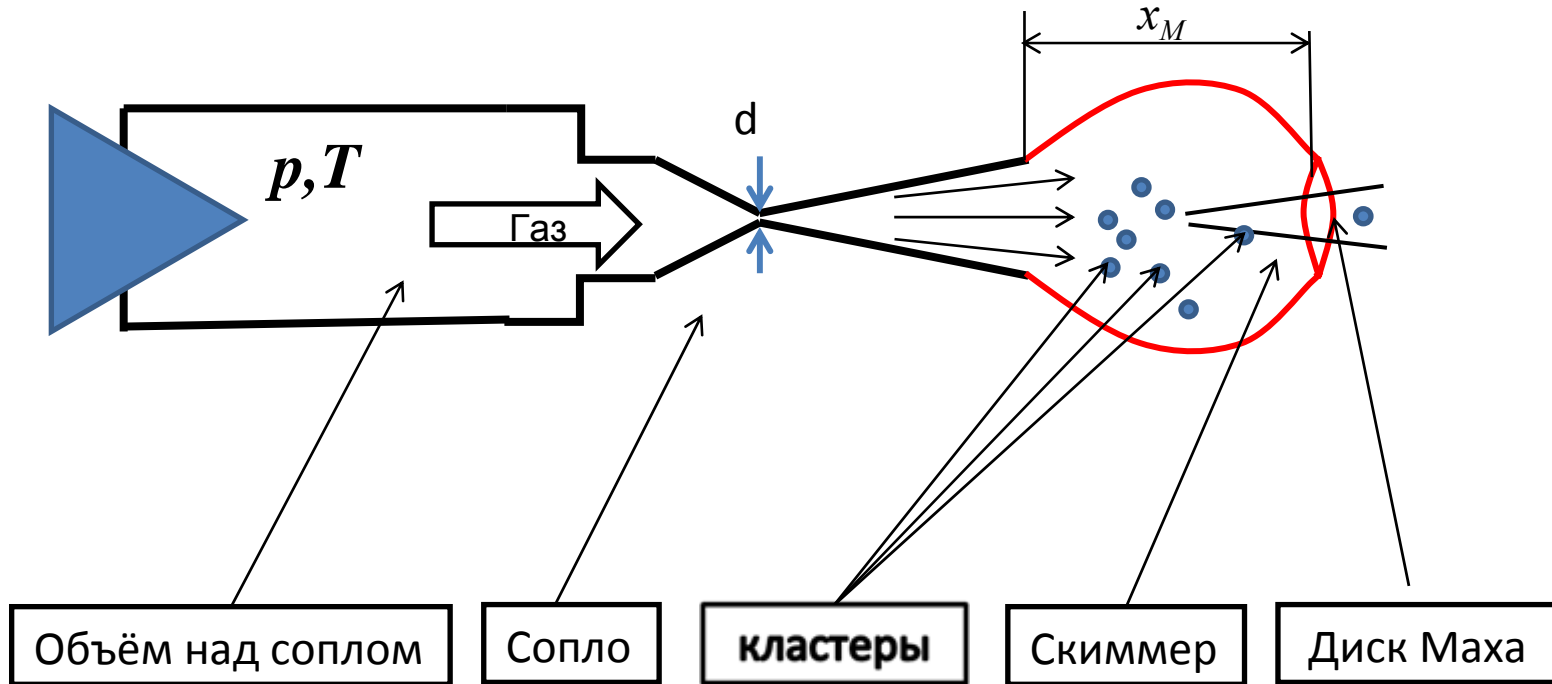


Ток пучка при различных давлениях p_0 :

а) - 1,5 бар (1), - 2,0 бар (2) и - 2,25 бар (3);

б) - 3,1 бар (1), - 3,5 бар (2) и - 3,75 бар (3).

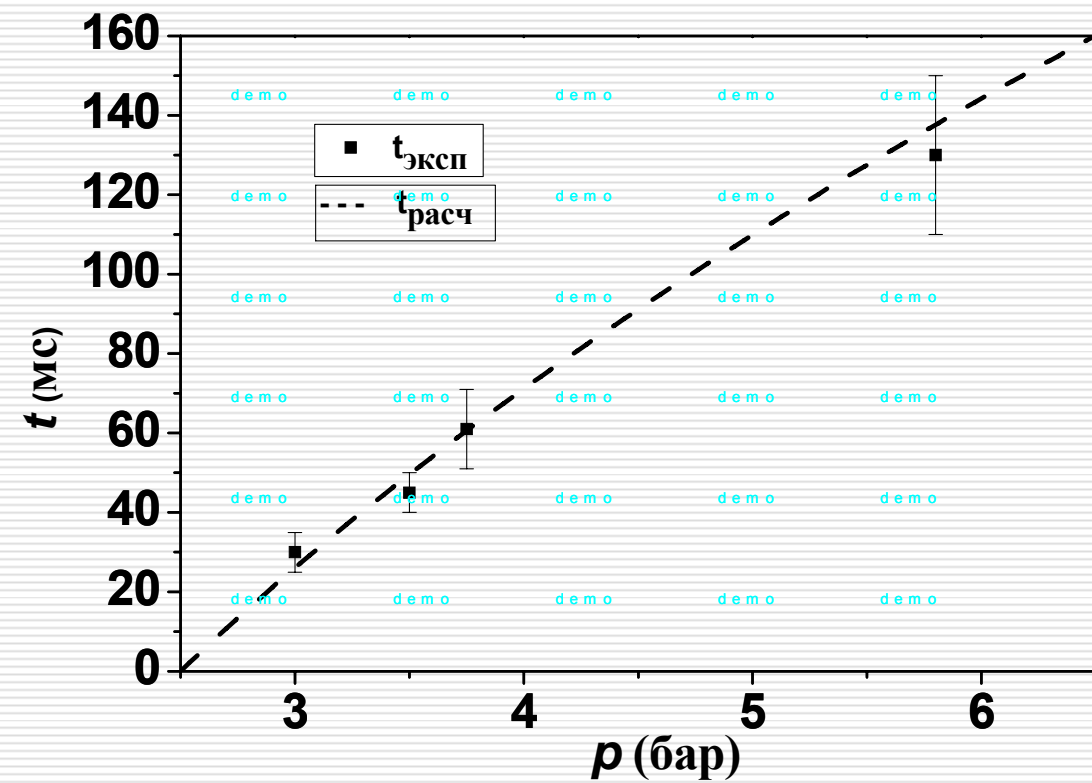
МОДЕЛЬ



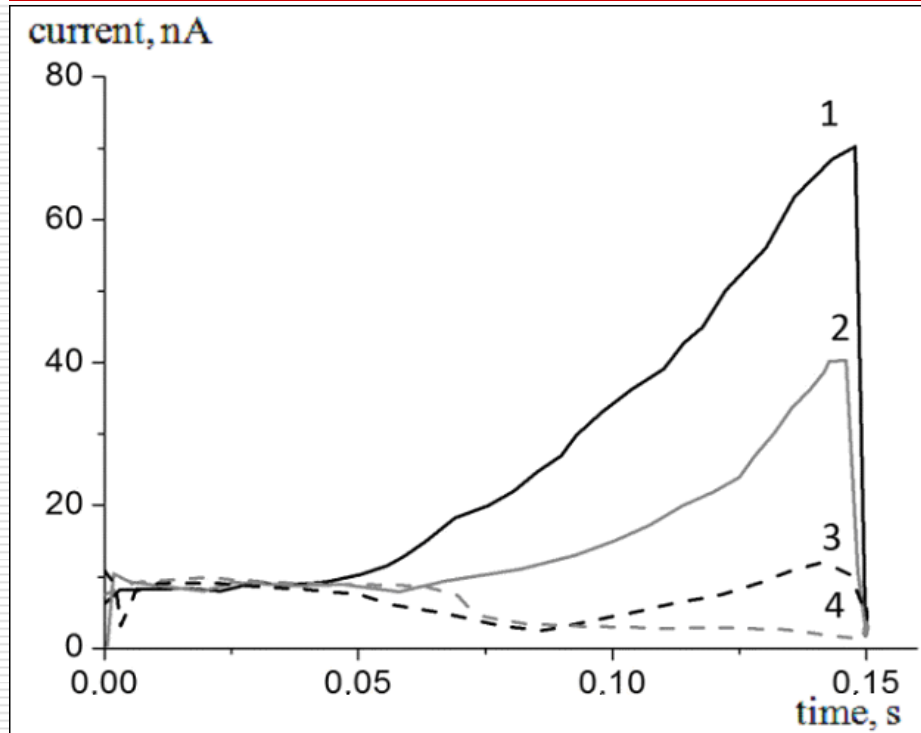
Ранее экспериментально установлено, что:

$$\frac{1}{\sqrt{1 - M^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - M^2}}$$

ПРОВЕРКА МОДЕЛИ



СЕПАРАЦИЯ ПУЧКА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ



Импульсы тока пучка на коллектор при различных отклоняющих магнитных полях:
1 - 0 Тл, 2 – 4,5 мТл, 3 – 8,7 мТл и 4 - 260 мТл.