

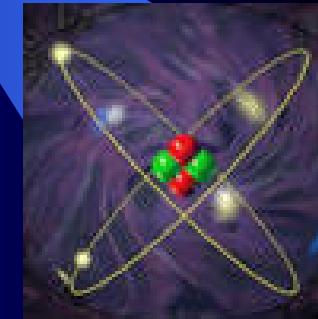
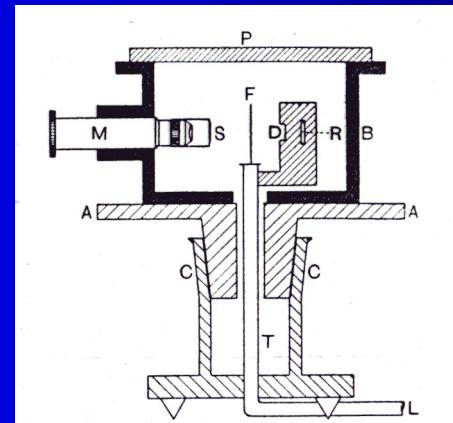
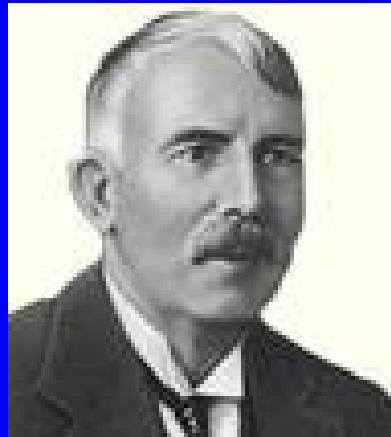
МИР ИОННЫХ ПУЧКОВ

В.С. ЧЕРНЫШ

Лаборатория ионно-пучковых нанотехнологий

Сегодня трудно представить наш мир без ионных пучков. Многие из фундаментальных открытий, направленных на развитие представлений о строении материи, были сделаны с использованием ионных пучков.

В 1909 году Резерфорда выполнил свои знаменитые эксперименты по изучению структуры атома.



19th INTERNATIONAL MEETING ON ION BEAM ANALYSIS

University of Cambridge, UK

7-11 September, 2009

Celebrating 100 years of Rutherford Backscattering

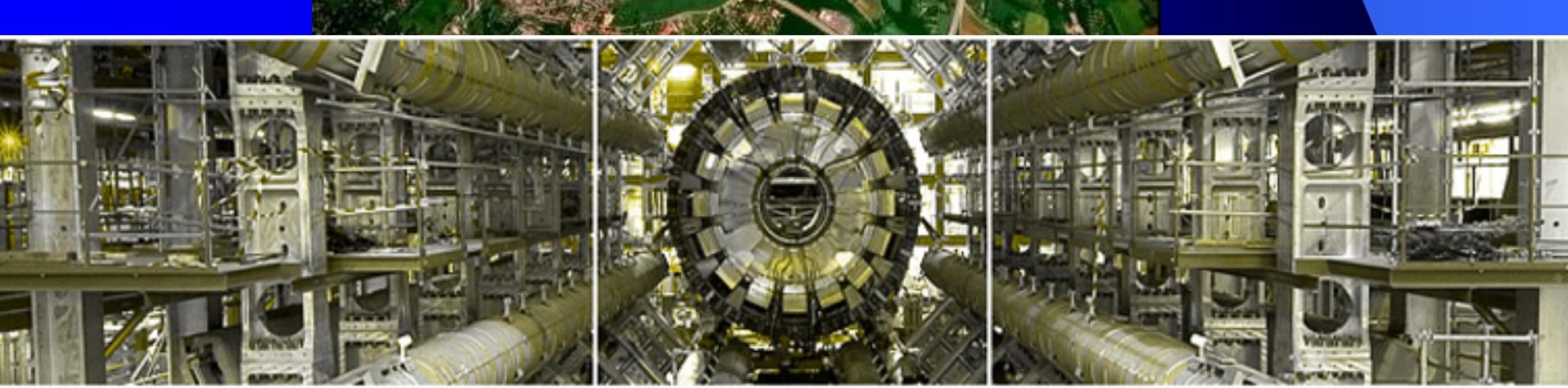
10.11.2009²

БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР

УСКОРИТЕЛЬ ПРОТОНОВ И ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НА ВСТРЕЧНЫХ ПУЧКАХ



Предполагается, что на LHC удастся достичь энергии столкновения пучков протонов до энергий порядка 7 ТэВ на 7 ТэВ



ЧТО ТАКОЕ ИОННЫЙ ПУЧОК?

-атомный или молекулярный ион, например, Ar^+ , N_2^+ и т.д.

Параметры ионных пучков

-энергия (эВ): от нескольких эВ до ТэВ

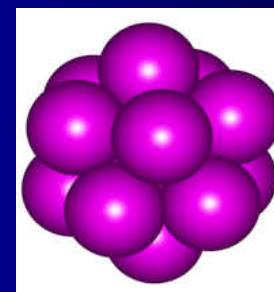
-зарядовое состояние и тип иона (Z_1):
ионы любого элемента, зарядовое состояние до +45!

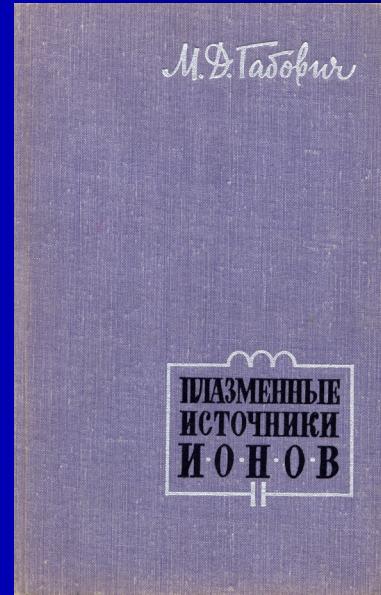
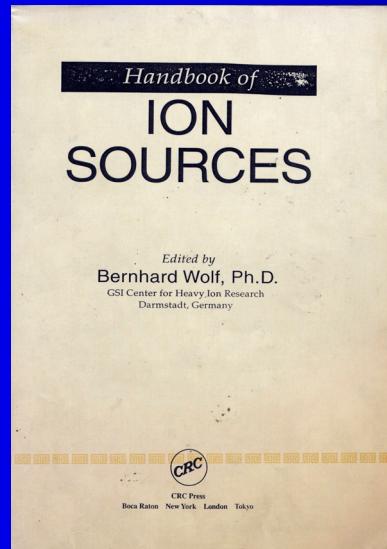
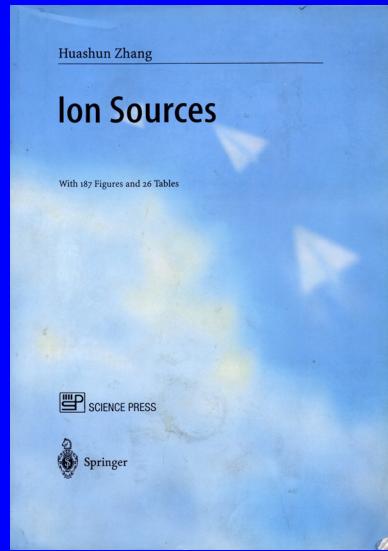
-плотность тока: от $\text{pA}/\text{см}^2$ до $\text{A}/\text{см}^2$

-размер пучка: от 30 нм до 1 м

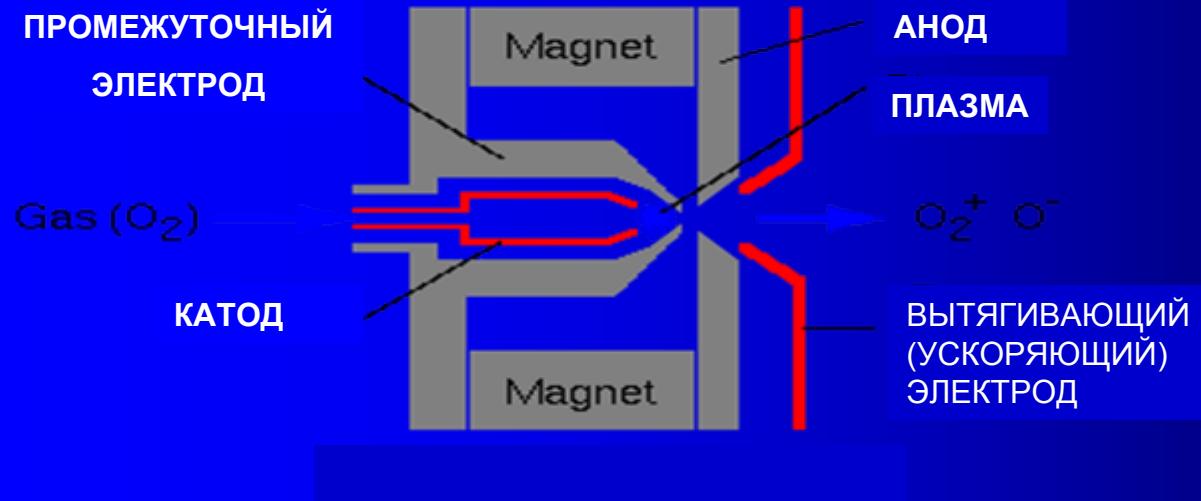
КЛАСТЕРНЫЕ ИОНЫ: Ar_N , Me_N

$$N \rightarrow 3 \div 20000$$

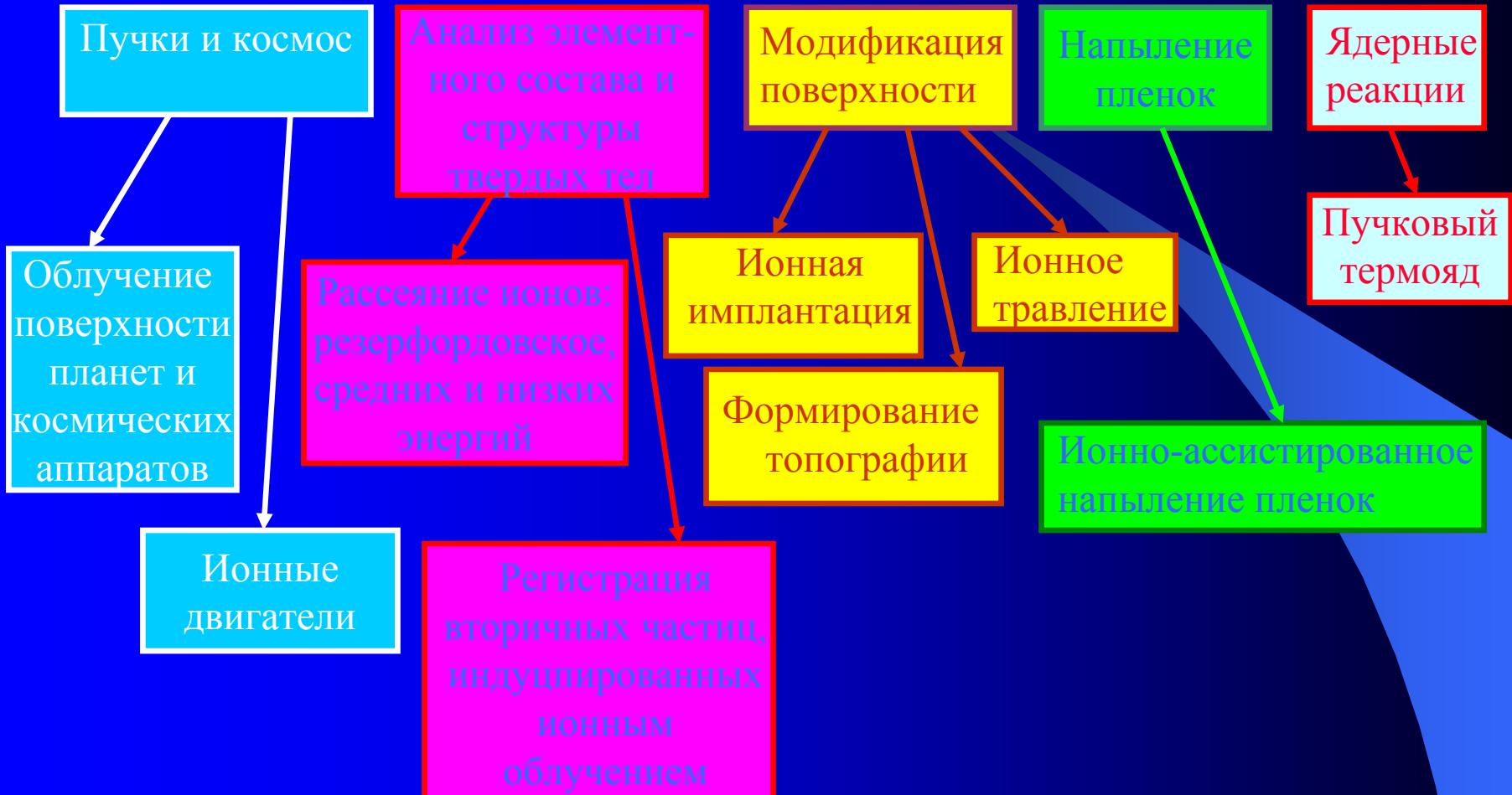




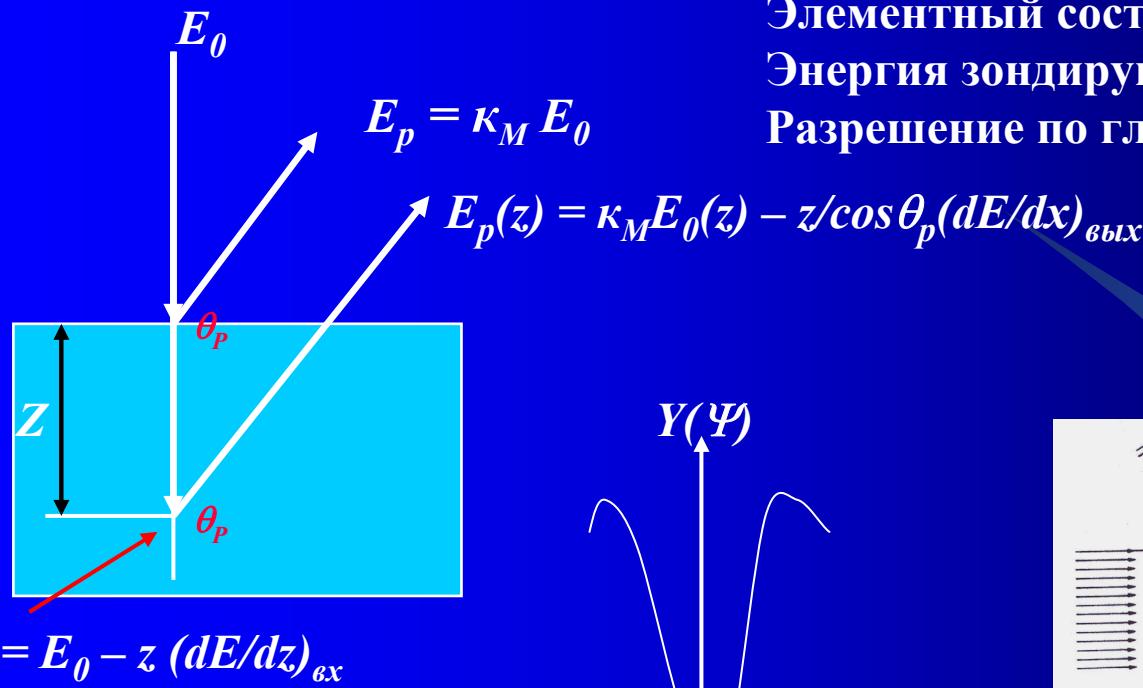
ДУОПЛАЗМАТРОН



НЕКОТОРЫЕ СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИОННЫХ ПУЧКОВ

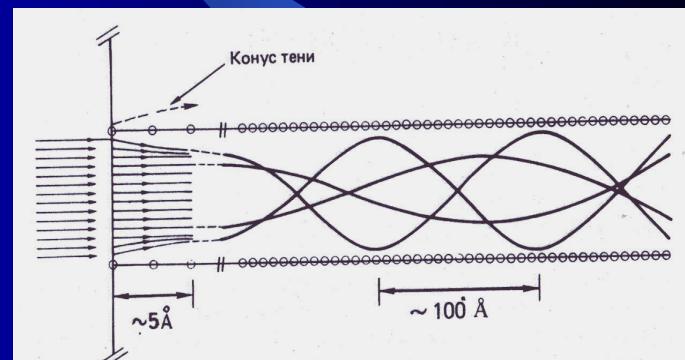
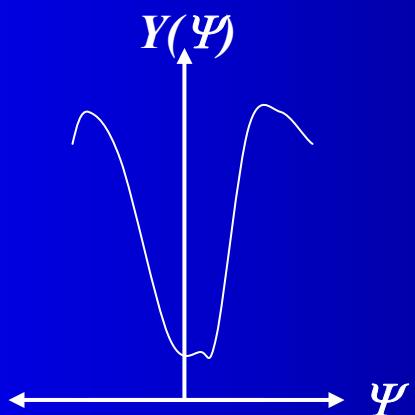


СПЕКТРОСКОПИЯ РЕЗЕРФОРДОВСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

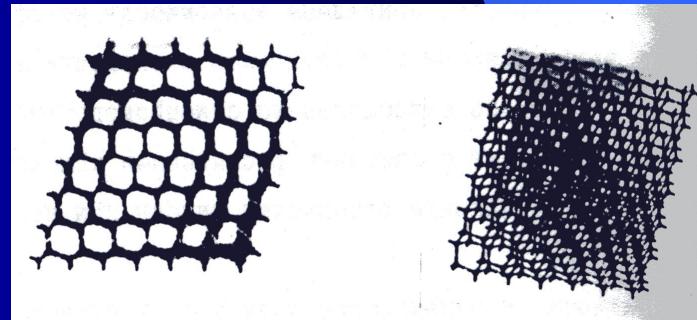


Элементный состав слоя ~ мкм
Энергия зондирующего пучка 1 - 2 МэВ
Разрешение по глубине 60 Å

$$\sigma \sim 10^{-24} \text{ см}^2$$



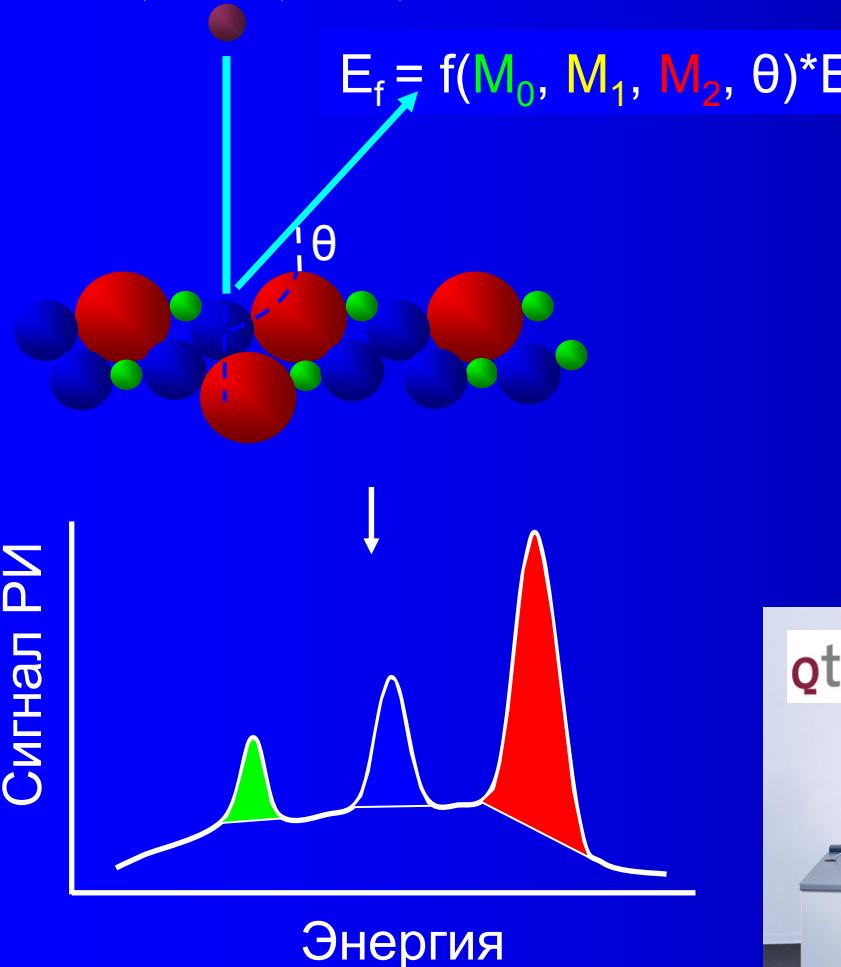
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАНАЛИРОВАНИЯ И БЛОКИРОВКИ ПОЗВОЛЯЕТ:
-ОПРЕДЕЛЯТЬ МЕСТОПОЛОЖЕНИЕ ВНЕДРЕННЫХ АТОМОВ
-ИЗУЧИТЬ РЕЛАКСАЦИЮ ПОВЕРХНОСТИ
-ИССЛЕДОВАТЬ ПОЛИМОРФНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ
-ОПРЕДЕЛЯТЬ ДЕФЕКТНОСТЬ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ



РАССЕЯНИЕ ИОНОВ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ

Элементный состав верхнего слоя!
Энергия зондирующего пучка 0,5 - 5 кэВ
Латеральное разрешение 0,01 – 1 мм

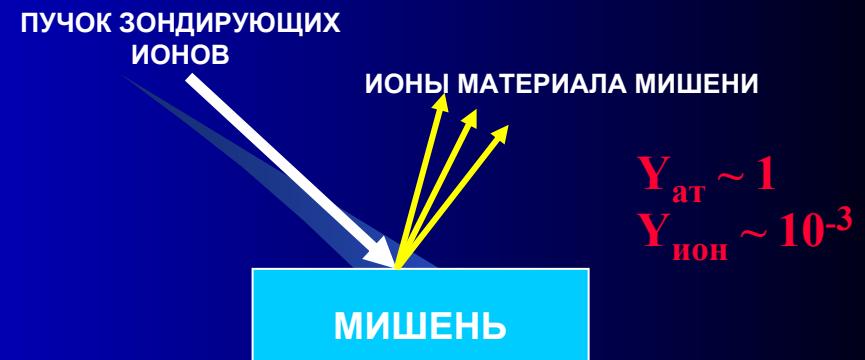
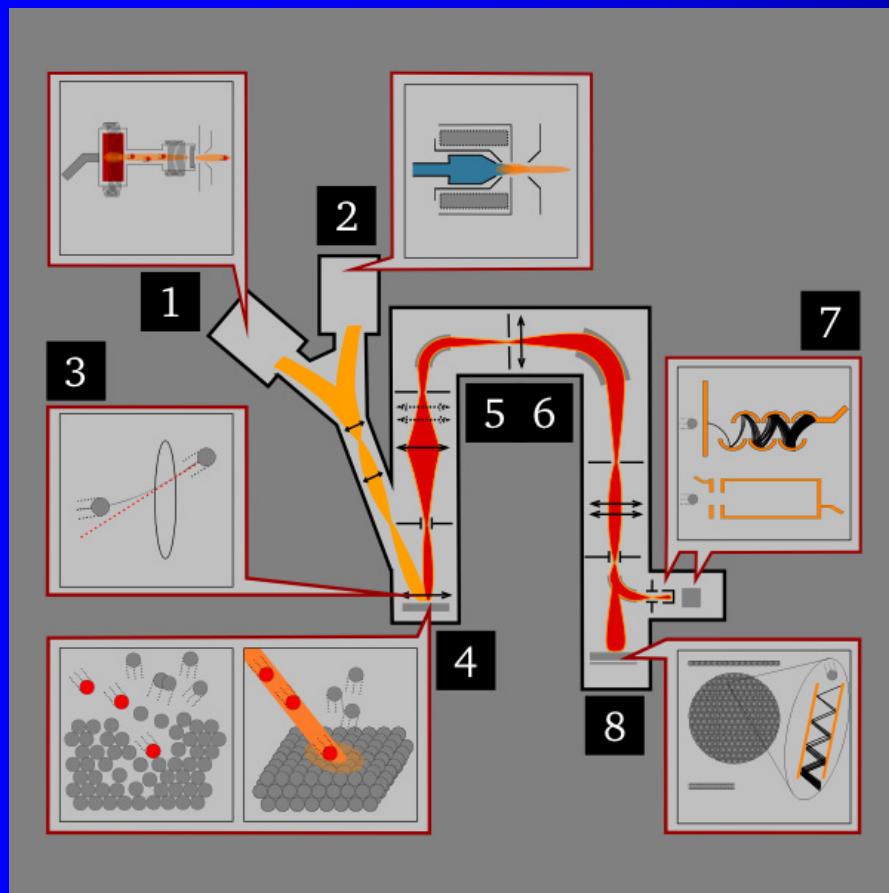
${}^3\text{He}^+$, ${}^4\text{He}^+$, Ne^+ , Ar^+



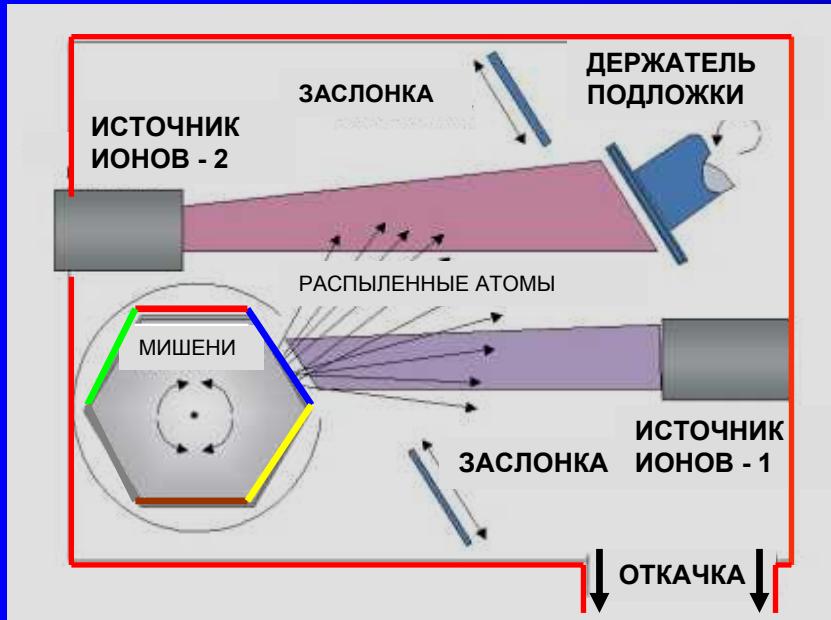
МАСС СПЕКТРОМЕТРИЯ ВТОРИЧНЫХ ИОНОВ

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ВСЕХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ИЗОТОПНОМ УРОВНЕ, НАЧИНАЯ С ВОДОРОДА

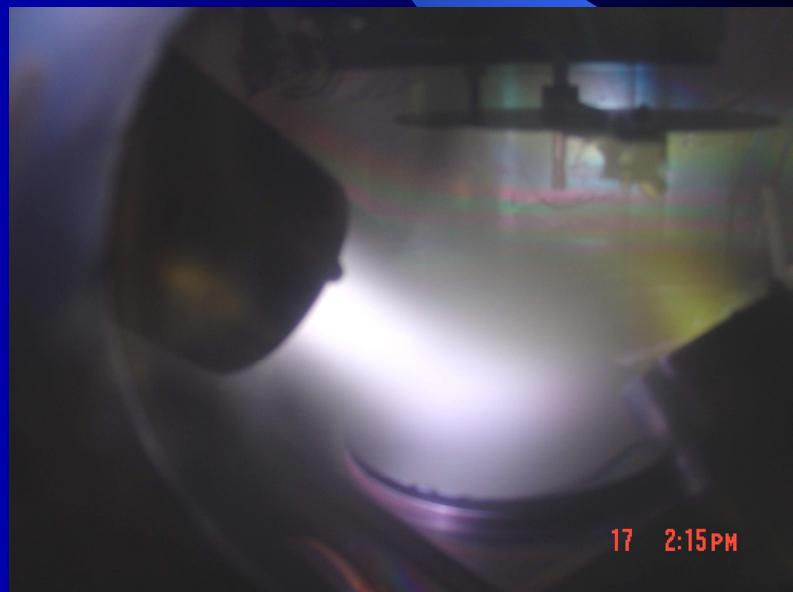
РЕКОРДНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ – 10^{-9} !



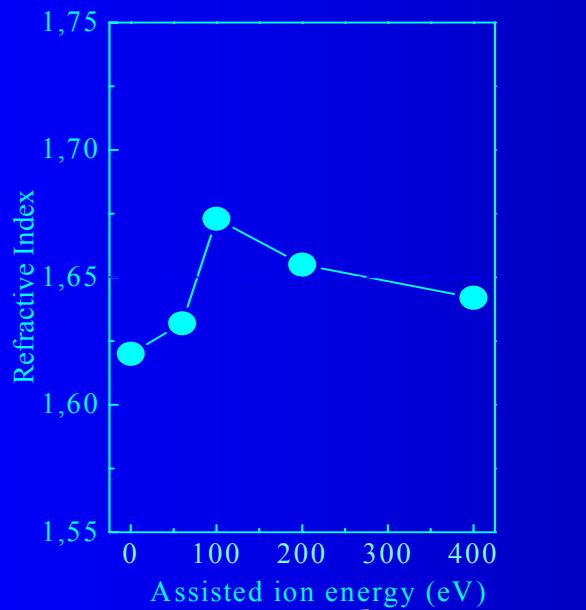
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИОННЫХ ПУЧКОВ ПРИ НАПЫЛЕНИИ ПЛЕНОК



1. Создание потока распыленных атомов
2. Предварительное облучение подложки
3. Ионно-ассистированное осаждение



ИОННО-АССИСТИРОВАННОЕ ОСАЖДЕНИЕ ПЛЁНОК



В.С. Черныш, неопубл. данные

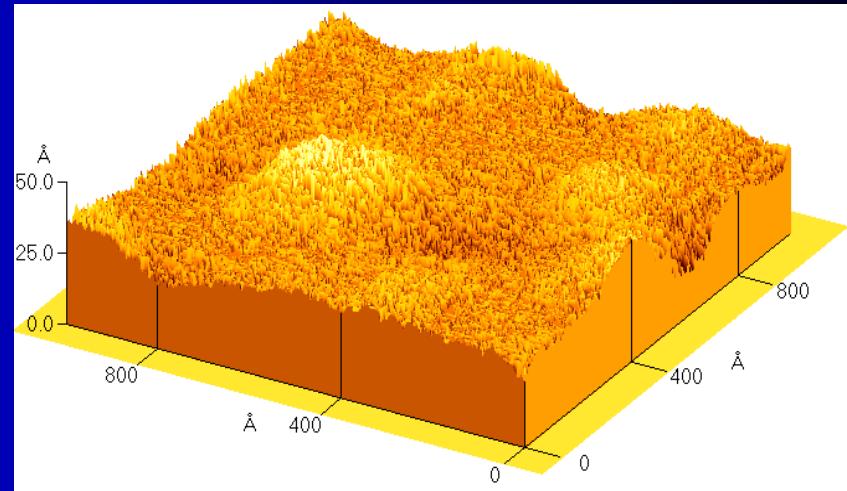
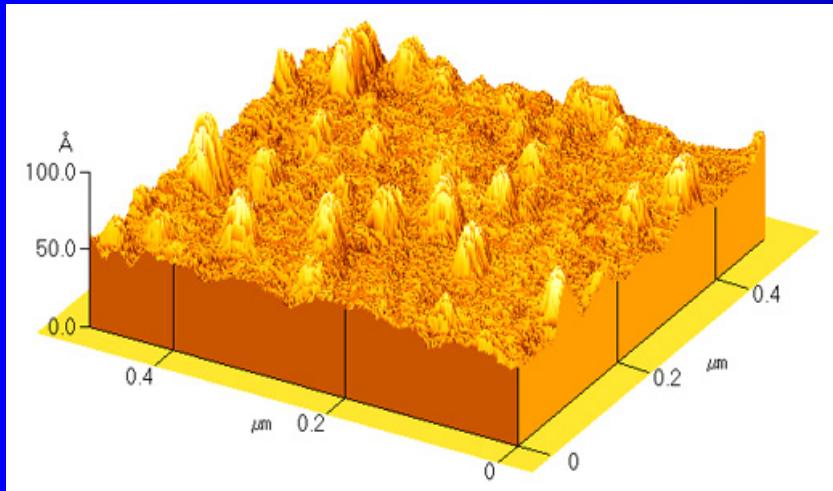


SPECTOR Ion Beam Deposition System
<http://vecco.com>

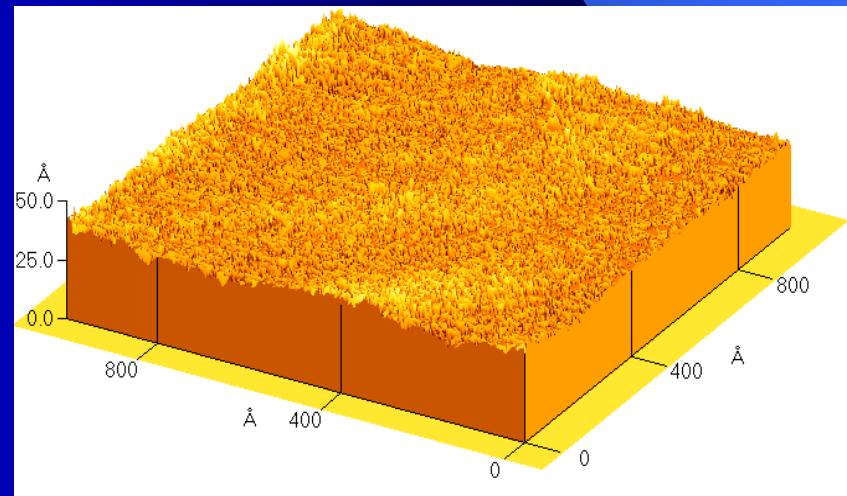
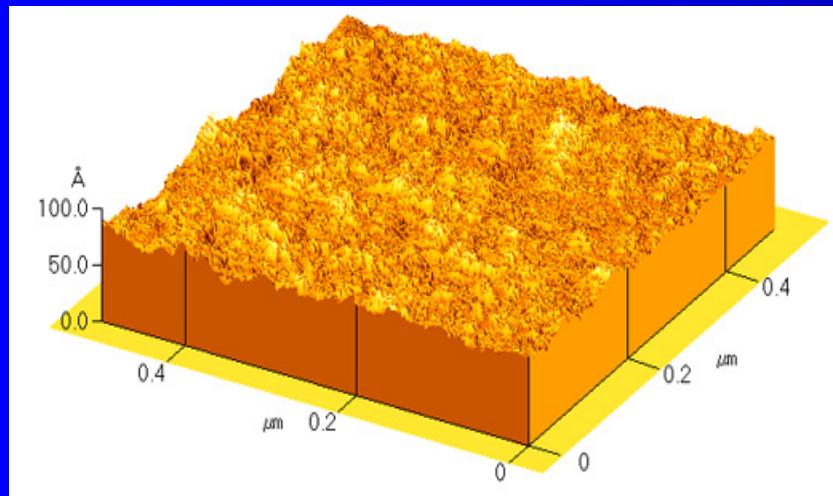


NEXUS LDD-IBD Ion Beam
deposition System
<http://vecco.com>

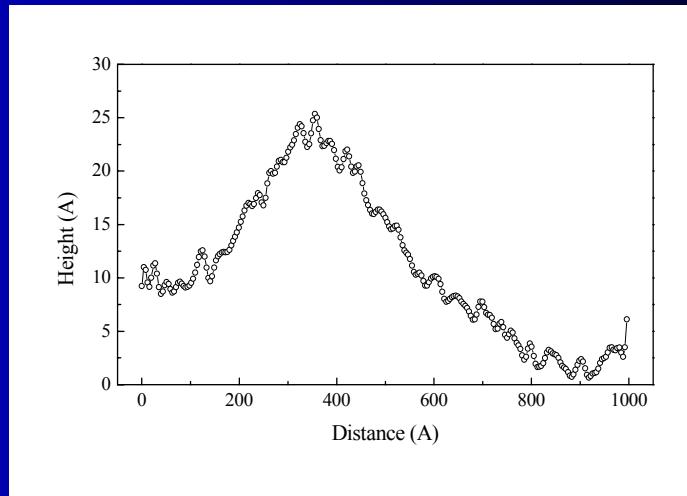
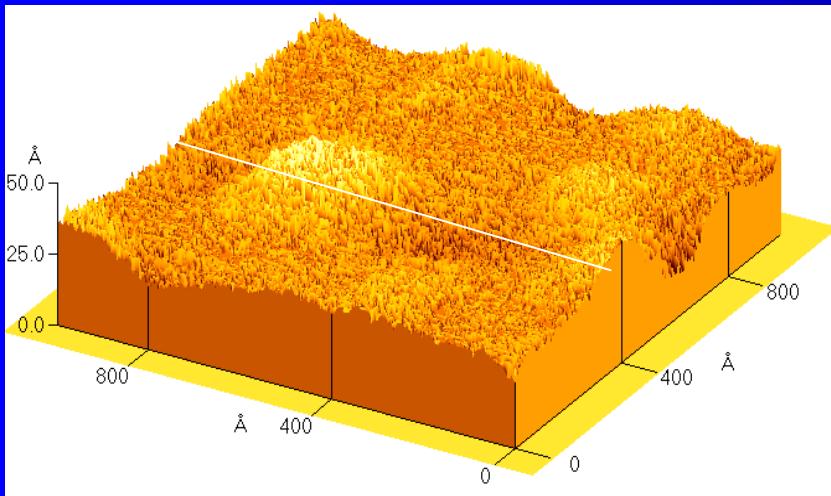
ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛЖКИ ИОННЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ НА ОСАЖДЕНИЕ ПЛЕНОК



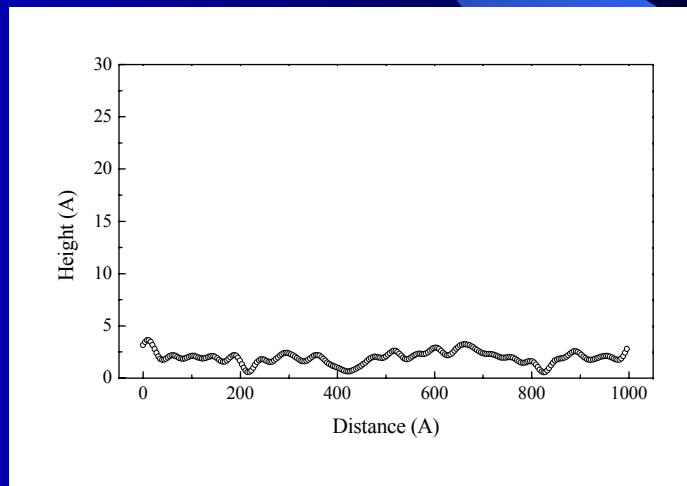
5 nm пленка In_2O_3 , осажденная на необлученный РС



5 nm пленка In_2O_3 , осажденная на облученный ионами Ar^+ РС

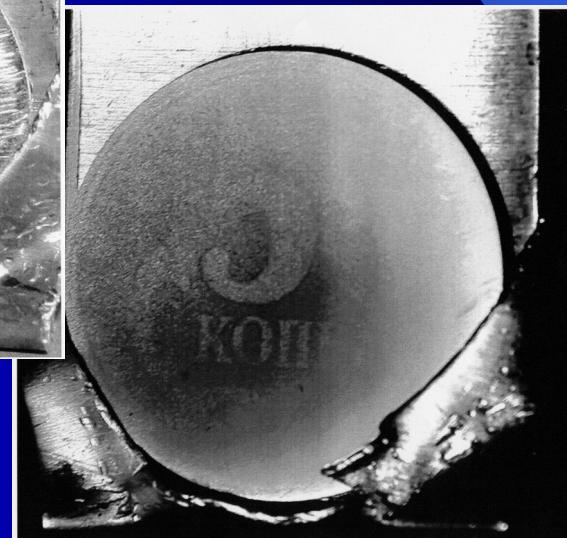
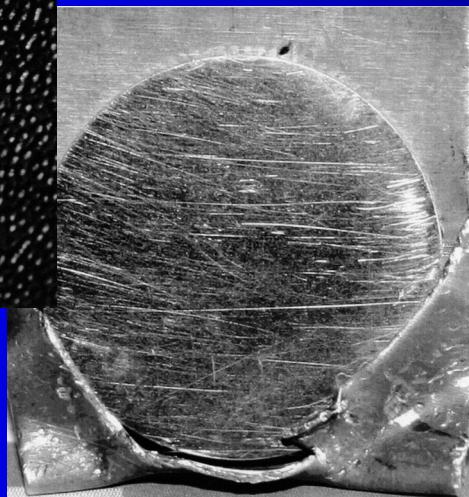


5 nm пленка In₂O₃, осажденная на необлученный РС



5 nm пленка In₂O₃, осажденная на облученный ионами Ar⁺ РС

ИОННОЕ ТРАВЛЕНИЕ



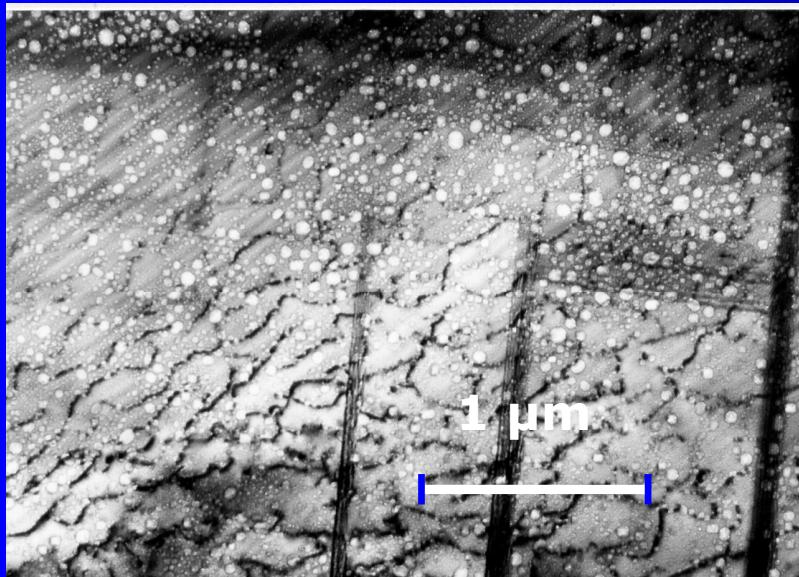
ИОННЫЙ
ПУЧОК

МИШЕНЬ

*В.Е. Юрасова. Взаимодействие ионов с поверхностью. Избранные труды.
-М.: 1999. -640 с.; илл.*

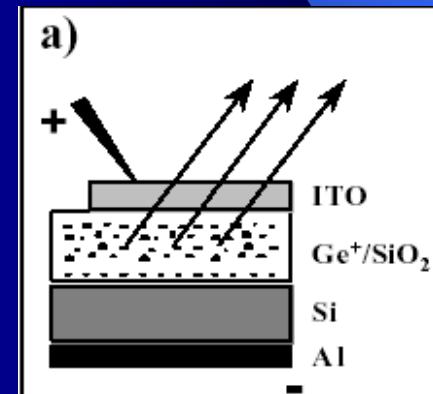
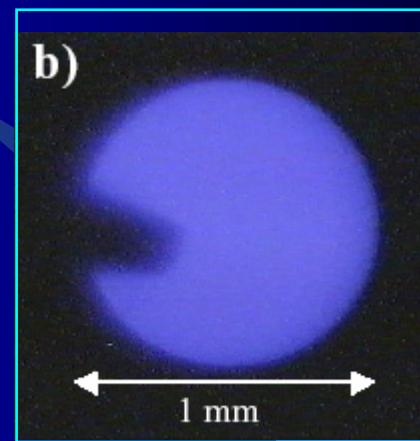
ФОРМИРОВАНИЕ НАНОКЛАСТЕРОВ ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

Ar^+ 80 keV → поликристалл Со



Нанокластеры 20÷50 нм

V.S. Chernysh, L.Sarholt-Kristensen,
A.Johansen, E.Johnson.
Nucl. Instr. and Meth.,
1983(209/210)543



$\text{Ge}^+ \rightarrow \text{SiO}_2$
L. Rebohle et al., 2001

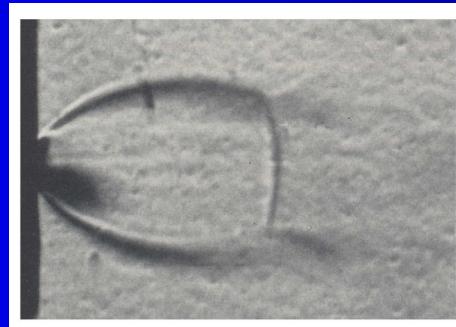
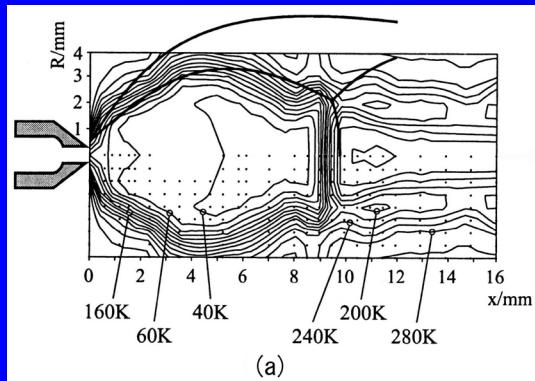
ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКОВ ГАЗОВЫХ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ

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:



V.K.Bayer et al,
Z.Angew.Phys.,
1961(13)493

Phys.Rev.Lett., 76(1996)34

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

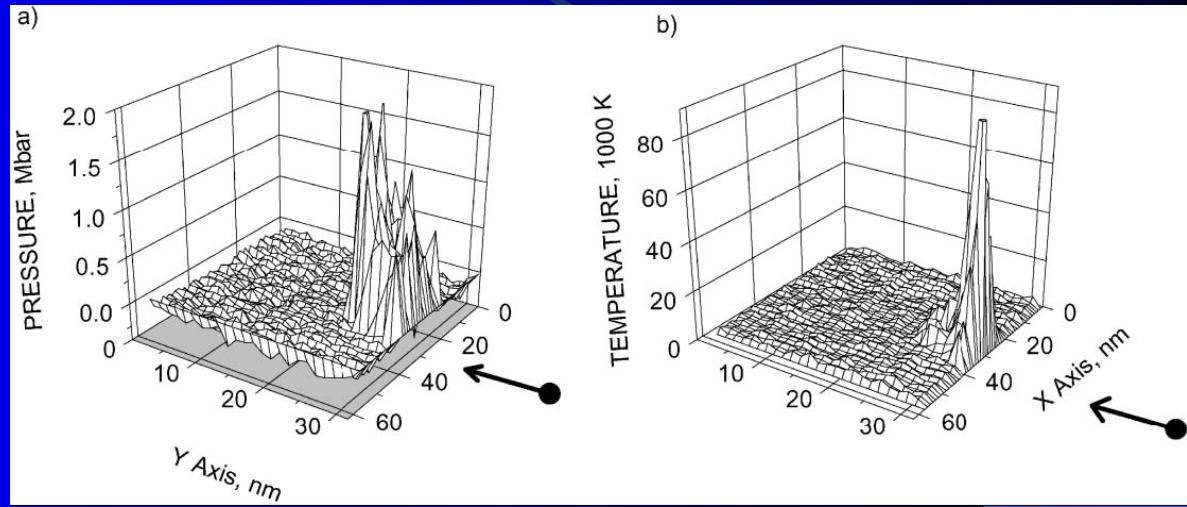
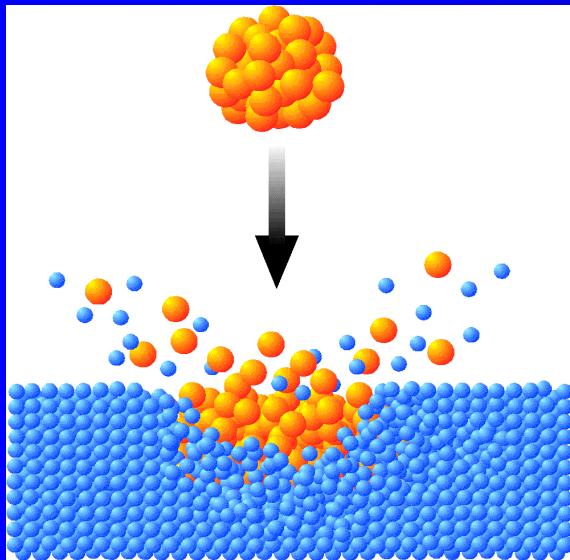
$$\frac{T}{T_0} = \left[1 + \frac{1}{2}(\gamma - 1)M^2 \right]^{-1}$$

УСКОРИТЕЛЬ ГАЗОВЫХ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ



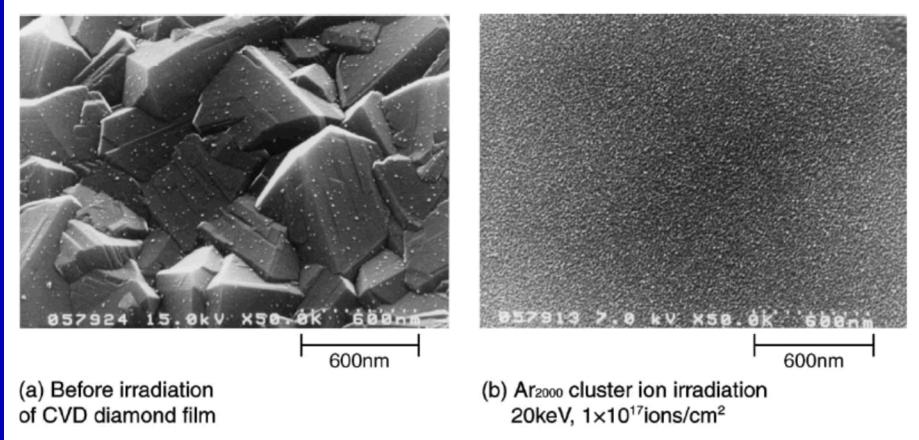
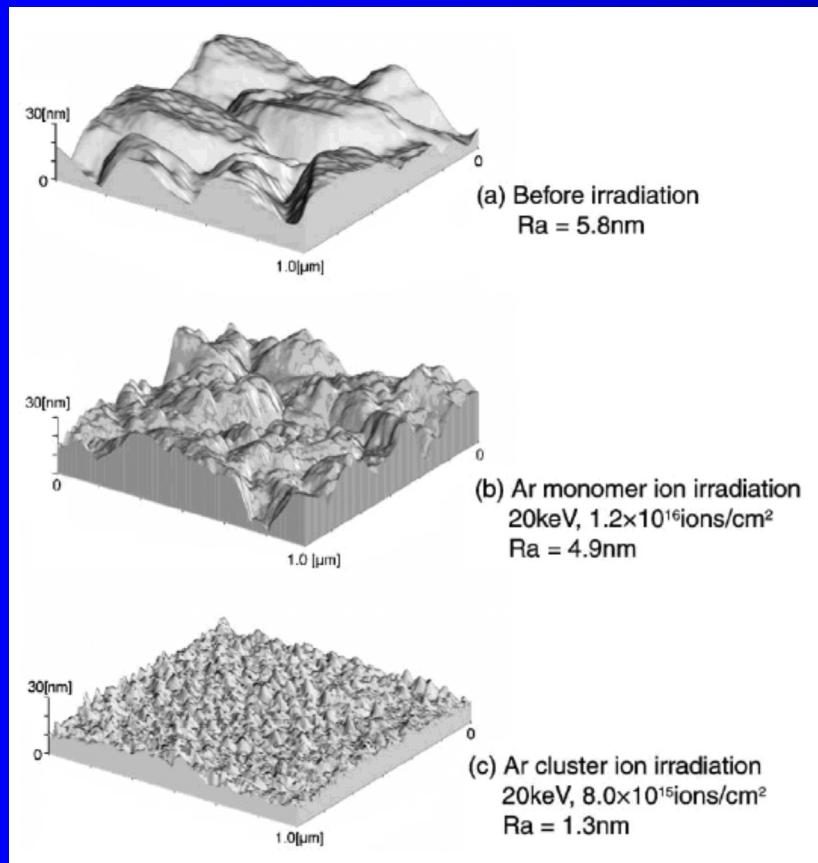
Ускоритель газовых кластерных ионов, разработанный в
Лаборатории ионно-пучковых нанотехнологий НИИЯФ МГУ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ТВЁРДЫХ ТЕЛ



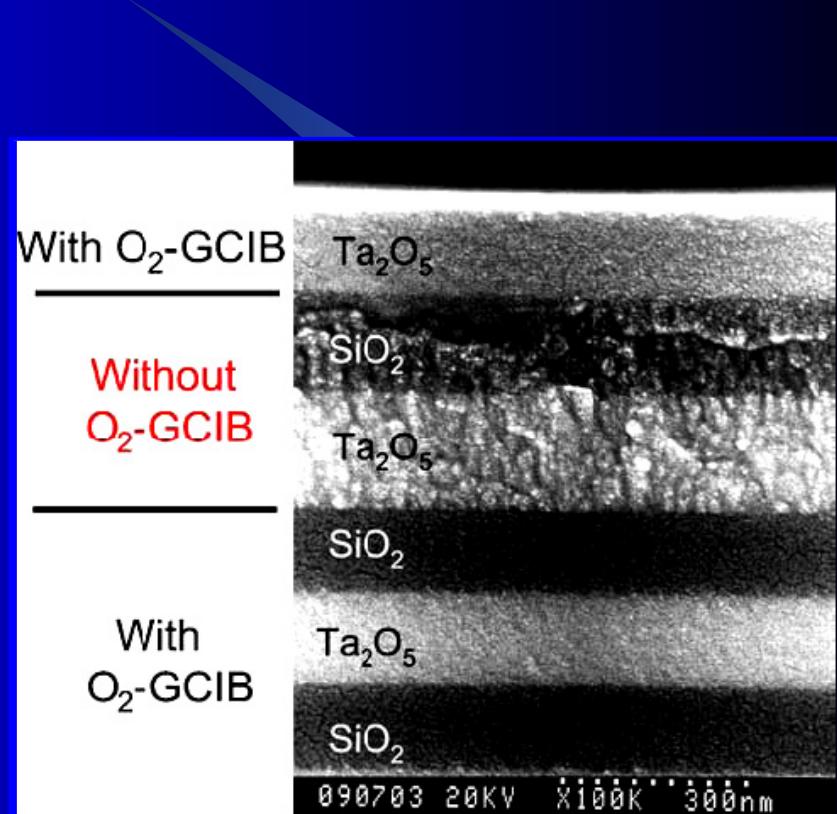
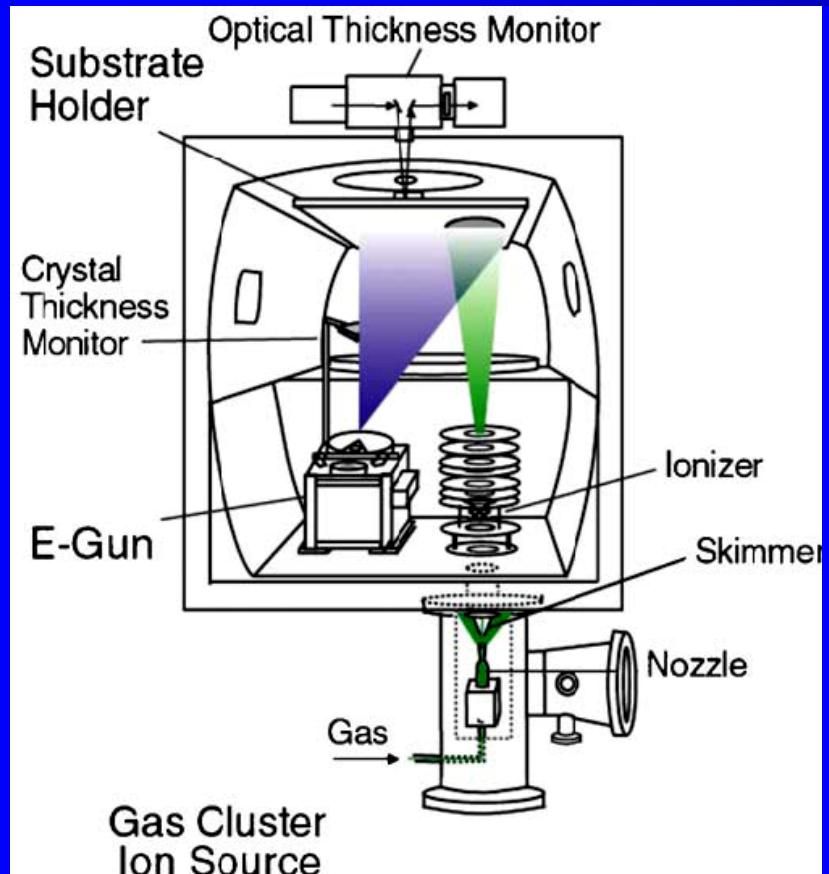
МД расчёты взаимодействия 50 кэВ Ar_{349} кластера с поверхностью Si показали, что через 362 фсек локальная температура может достигать $10^4\text{-}10^5$ К, а давление – несколько Мбар. Ударная волна может приводить к новым физическим явлениям, которые не наблюдаются при взаимодействии атомных ионов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

СГЛАЖИВАНИЕ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ



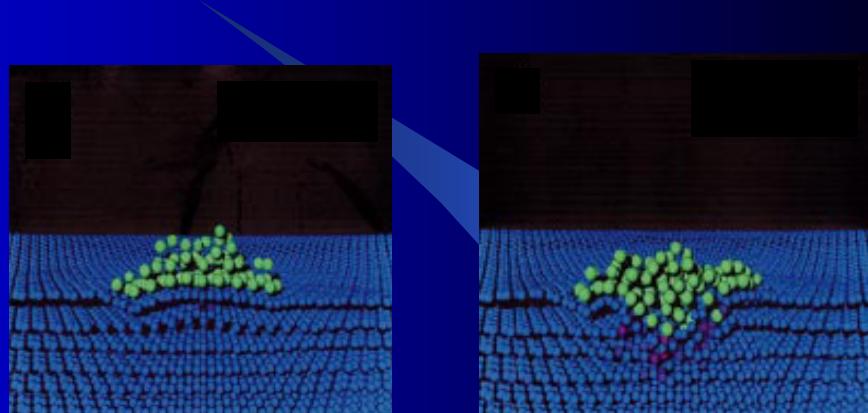
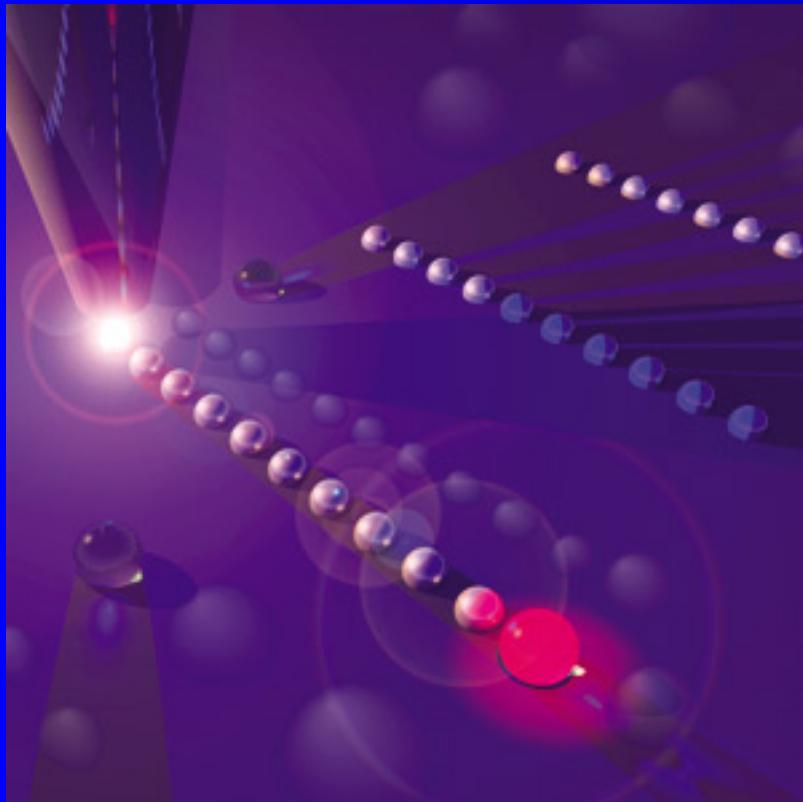
I.Yamada et. al., Mat. Sci. and Engineer.,
2001(R34)231

ИОННО-АССИСТИРОВАННОЕ ОСАЖДЕНИЕ ПЛЁНОК



Y.Fujiwara et al., NIMB, 2003(206)870

ПРОБЛЕМА ЗАКРЕПЛЕНИЯ КЛАСТЕРОВ: «PINNING»



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

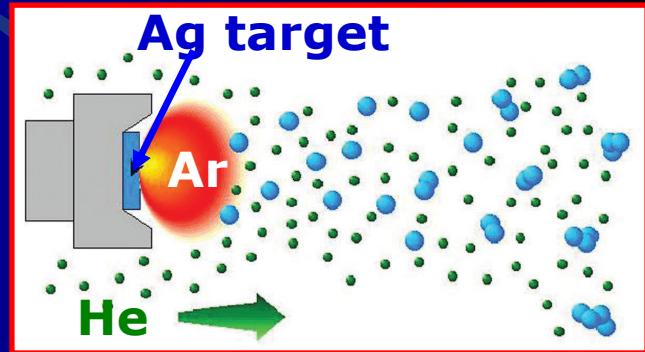
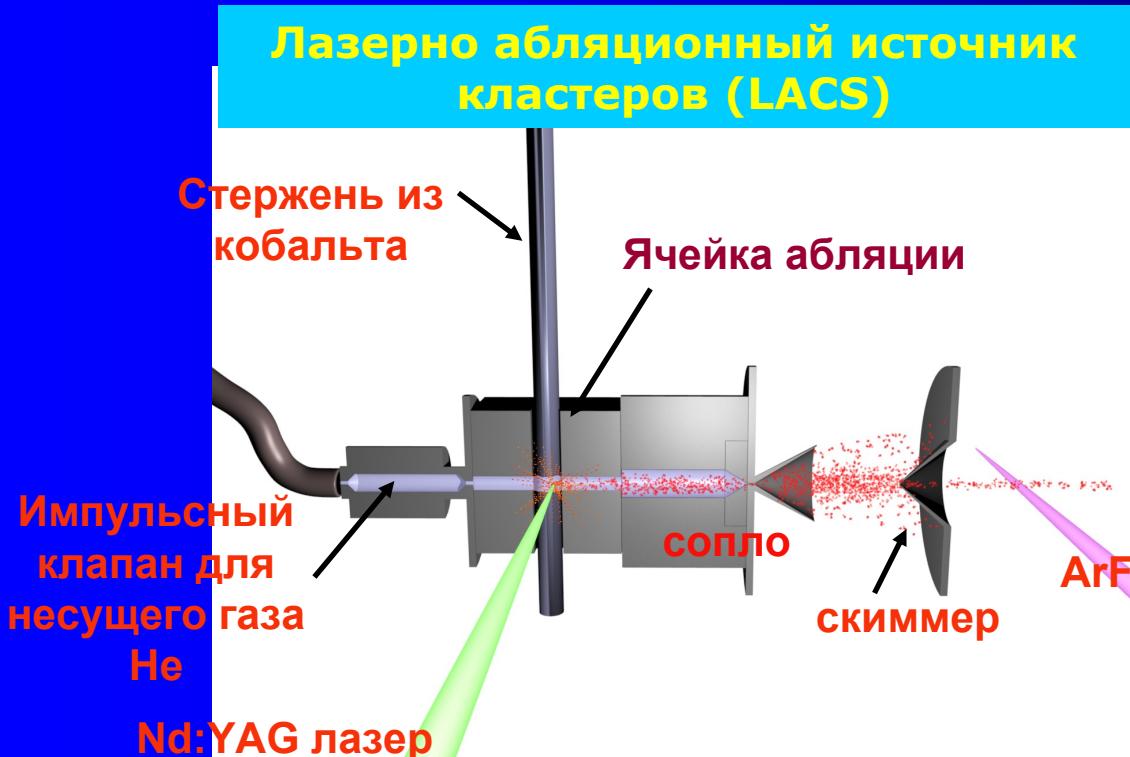
$$E_{\text{отд}} = \frac{4M_n M_{\text{кл}}}{(M_n + M_{\text{кл}})^2} E_{\text{кл}}$$

$$M_n = nM_s, M_{\text{кл}} = NM_{\text{cl}}, \text{ а } E_{\text{отд}} = E_d$$

$$nM_s \ll NM_{\text{cl}}$$

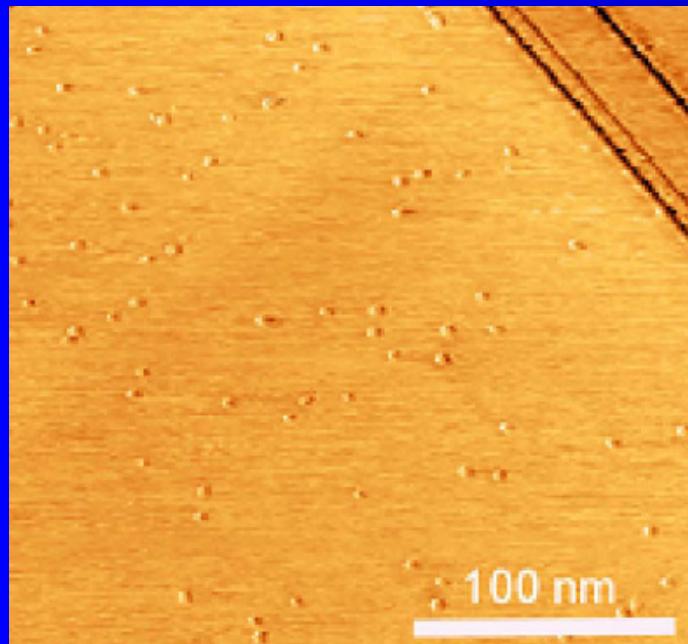
$$E_p \approx \frac{E_d}{4nM_s} NM_{\text{cl}}$$

ИСТОЧНИКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ



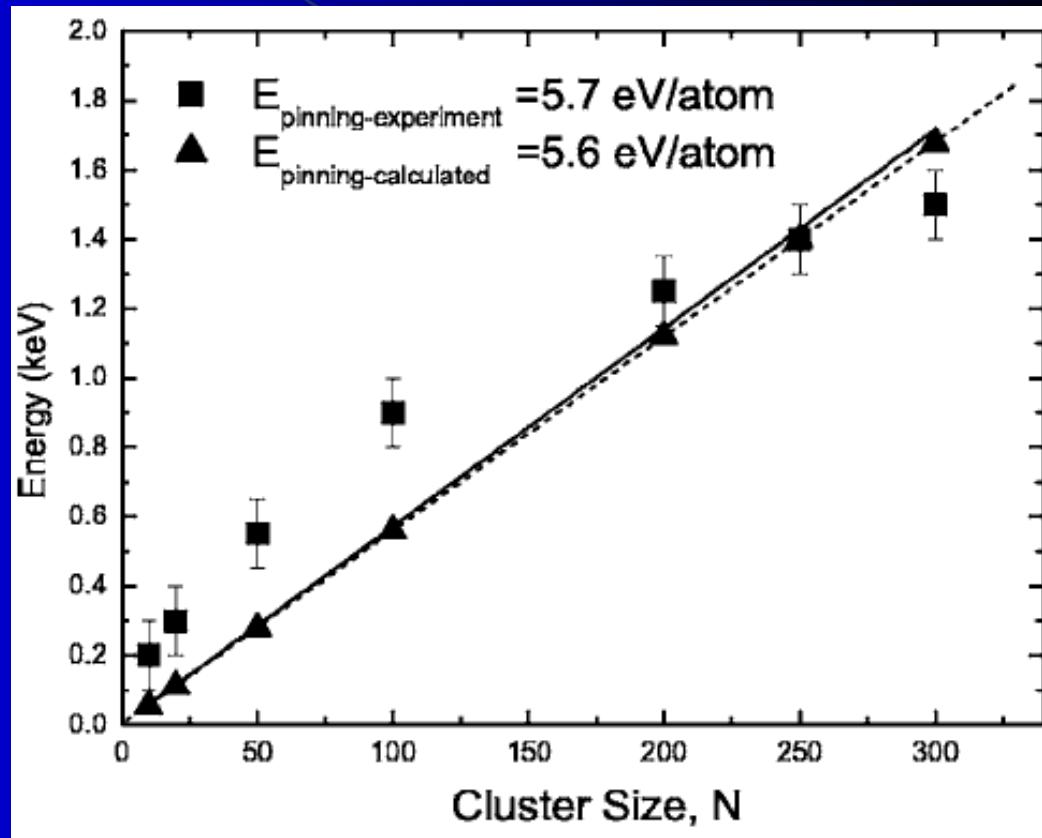
Palmer et.al., 2003

ПРОБЛЕМА «PINNING»



Au₇₀ 1.20 keV → графит

M. Di Vece et al.
Phys. Rev. B 72 (2005) 073407



Этот краткий экскурс в мир ионных пучков демонстрирует широту сфер применения ионных пучков в современной науке и технике. Здесь представлен далеко не полный обзор областей применения ионных пучков. Я отразил лишь те области, в разработке которых принимал в той или иной мере непосредственное участие. Однако даже этот краткий обзор показывает, что ионный пучок представляет собой не только мощный инструмент для создания уникальных твердотельных структур, но, и не менее мощный и гибкий инструмент для изучения свойств этих структур.