## Процессы формирования ускоренных газовых кластерных ионов в импульсном режиме

Доклад по материалам диссертации Ю.А. Ермаков Научный руководитель доктор физ.-мат. наук, профессор В.С. Черныш

## Актуальность темы

• Взаимодействие ускоренных атомных ИЛИ молекулярных ионов с поверхностью твердых тел активно исследуется во многих лабораториях и научных центрах нашей страны и за рубежом. В последние полтора десятилетия в этой области быстро развивалось новое направление: исследование взаимодействия кластерных ионов с поверхностью твердых тел. Кластер представляет собой ансамбль, содержащий от нескольких единиц до десятков тысяч атомов или молекул. Изучение свойств кластеров, их взаимодействия с различными частицами, излучениями и веществом переживает в последние годы относительный бум.

Об этом свидетельствует резкое увеличение числа публикаций как обзорных, так и посвящённых частным проблемам. Опубликованы, например, обзоры по изучению свойств кластеров, ПО экстремальным процессам в кластерах при столкновении с твердой поверхностью. Обсуждалась возможность использования кластерных ионов в инструмента для модификации качестве поверхности, проблема закрепления металлических кластеров на поверхности подложки («pinning) и т.д.

## Цель работы

- Целью настоящей работы являлось получение пучков ускоренных газовых кластерных ионов и исследование их характеристик. Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:
- Обобщить разноплановые исследования по принципам формирования пучков кластерных ионов и их применения в современных нанотехнологиях.
- Создать экспериментальную установку для получения ускоренных газовых кластерных ионов.
- Разработать методы измерения параметров пучков кластерных ионов в условиях импульсного режима подачи рабочего газа.
- Исследовать процессы формирования пучков газовых кластерных ионов в импульсном режиме работы ускорителя.

# Научная и практическая значимость работы.

- Проведён обзор работ по применению газовых кластерных ионов в современных нанотехнологиях.
- Создан ускоритель пучков газовых кластерных ионов, который может быть использован для решения широкого класса задач, связанных с исследованием модификации свойств поверхности твердотельных структур под действием ионного облучения.
- Разработаны методики исследования характеристик пучка газовых кластерных ионов в импульсном режиме подачи рабочего газа.
- Впервые детально изучены процессы формирования пучков газовых кластерных ионов в импульсном режиме подачи рабочего газа.

## Апробация работы.

- По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, 3 из них в реферируемых журналах.
- Результаты работы докладывались на:
- 7-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом», 2007, Минск, Беларусь.
- XVII Международной конференции по электростатическим ускорителям и пучковым технологиям, 2008, Обнинск, Россия.
- XLI международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, , 2011, Москва, Россия.
- XLII международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, 2012, Москва, Россия.
- 25<sup>th</sup> International Conference on Atomic Collisions in solids ICACS-25, October 21-25, 2012, Kyoto, Japan.

### На защиту выносятся следующие

### положения:

- 1. Спроектирован и создан ускоритель газовых кластерных ионов.
- При импульсной подаче рабочего газа в ускоритель существует экспериментально установленное пороговое значение давления газа над импульсным клапаном, ниже которого в пучке присутствуют только мономеры, а выше появляются кластеры вплоть до относительного размера 5000 атомов/число элементарных зарядов.
- Физическая модель, основанная на динамике потока газа, истекающего из буферного объёма через сопло и объясняющая существование описанного выше порога.
- 4. В полученном кластерном потоке зафиксированы кластеры с относительным размером до (7000±420) ат./кратность заряда.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.

Глава 1. Газовые кластерные ионы как новый инструментарий в физике поверхности и нанотехнологиях (обзор литературы).

Глава 2. Ускоритель газовых кластерных ионов и методы исследования пучка кластерных ионов.

Глава 3. Исследование параметров ускорителя газовых кластерных ионов и пучка кластерных ионов. Обсуждение результатов.

Заключение.

## Общий вид и схема ускорителя





## Общий вид и схема системы формирования кластерного потока



# Общий вид и схема системы ионизации и ускорения



## Общий вид рабочей камеры



## Приборная стойка ускорителя



## СИСТЕМЫ АНАЛИЗА ПУЧКА КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ

- 1. Магнитная система сепарации
- 2. Времяпролётная система

### Принцип и схема магнитной сепарации



## Схема времяпролётной системы





Зависимость тока пучка от времени при разных продолжительностях закрытого состояния клапана. Стрелкой указан момент открытия клапана: 1 клапан закрыт в течение 70 мс; 2 - клапан закрыт в течение 100 мс; 3 - клапан закрыт в течение 200 мс

Давление – 2 бар; уск. напряжение 2 кВ

# Вид импульса тока пучка при различных давлениях над клапаном



a) (1) – 1,5 бар; (2) – 2,0 бар; (3) – 2,25 бар б) (1) – 3,1 бар; (2) – 3,5 бар; (3) – 3,75 бар

### Редукция тока при кластеризации









Эксперименты G. Tejeda, B. Maté, J. M. Fernández-Sánchez, and S. Montero. Phys.Rev.Lett. 76 (1996) 34 показали, что распределение давления и температуры газа за соплом определяется сложным переходом от сверхзвукового потока вблизи среза к равновесному состоянию газа внутри вакуумной камеры



#### МОДЕЛЬ



Ранее экспериментально установлено, что:

$$= \sqrt{1}$$

#### Основные уравнения модели

Изменение давления в буферном объёме:

$$\dot{p} = \dot{n}k_{\rm B}T + nk_{\rm B}\dot{T}$$

Считаем, что *n* меняется за счёт истечения газа через перетяжку сопла со скоростью, равной местной скорости звука, а изменение температуры происходит адиабатически. Тогда после ряда преобразований получим дифференциальное уравнение

$$p^{\frac{1-3\gamma}{2\gamma}}dp = -\frac{\gamma s}{V}\sqrt{\frac{\gamma R}{M}}T_0(p_0)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}dt,$$

решая которое, получим для времени перехода от давления  $p_0$  до давления p

$$t = \tau \Big[ (p_0/p)^{(\gamma-1)/2\gamma} - 1 \Big]$$
, где  $\tau = 2D^2 l/d^2 (\gamma-1) \sqrt{M/\gamma RT_0}$   
величина задающая временной масштаб процесса. Для нашей  
геометрии сопла в случае аргона получаем = 300 мс . Это

уравнение допускает экспериментальную проверку 22

# Сравнение эксперимента с предсказаниями модели



### Время достижения критического давления в буферном объёме в зависимости от расстояния между соплом и скиммером при разных давлениях над клапаном



## Магнитный масс-анализатор с широким коллектором



#### Анализ пучка с помощью магнитной сепарации



Импульсы тока пучка при различных отклоняющих магнитных полях (давление $p_0 < p_{\rm cr}$ ) (1) 0 мТл; (2) 17 мТл; (3) 26 мТл; (4) >35 мТл

# Отклонение аргонового кластера относительного размера N/n, ускоренного напряжением 2 кВ в магнитном поле 35 мTл при $L_1 = 180$ мм и $L_2 = 100$ мм



N/n

Анализ импульса тока пучка на плоский коллектор шириной 50 мм с помощью магнитного поля. 1 – 0 Тл, 2 – 17 мТл, 3 – 26 мТл, 4 – 35-260 мТл



# Магнитная сепарация с тройным коллектором



## Анализ импульса тока пучка на плоский коллектор шириной 5 мм с помощью магнитного поля. (1) 0 Тл, (2) 4.5 мТл; (3) 8.7 мТл; (4) >35 мТл – 260 мТл.



# Отклонение аргонового кластера относительного размера N/n, ускоренного напряжением 2 кВ в магнитном поле 260 мТл при $L_1 = 180$ мм и $L_2 = 100$ мм.



N/n

### Осциллограмма сигнала на цилиндр Фарадея при времяпролётных измерениях



Снимок

Оцифровка

## Сравнение масс-спектров, полученных в работе [1] с нашими результатами



[1] Yamada I., Matsuo J., Insepov Z., Aoki T., Seki T., Toyoda N. Nanoprocessing with gas cluster ion beams. - Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, 2000, v. 164-165, p. 944

33

## Заключение

- В результате проведённой работы спроектирован и создан ускоритель газовых кластерных ионов, снабжённый магнитной и времяпролётной системами анализа пучка.
- Изучен режим работы ускорителя при импульсной подаче рабочего газа.
- Выявлены особенности формирования кластерного потока при различных давлениях газа над импульсным клапаном. Оказалось, что время существования ионного потока значительно превышает время, в течение которого клапан открыт.

## Заключение

- Установлен пороговый по давлению характер появления в потоке тяжёлых кластеров: при давлениях ниже порога в потоке присутствуют в основном мономеры, а при давлениях выше порога в потоке появляются кластеры с относительными размерами до 7000 ат/эл. заряд.
- Построена газодинамическая модель истечения газа, которая объясняет основные особенности формирования кластеров при импульсной подаче газа. Основные предсказания этой модели нашли как качественное, так и количественное подтверждение в эксперименте.

## Заключение

- Обнаружено, что при импульсной подаче газа возможен такой подбор временных характеристик импульса подачи, при котором поток кластерных ионов становится почти непрерывным.
- Разработанная для импульсного режима работы ускорителя времяпролётная методика позволила определить распределение кластеров в потоке по относительным размерам.

### Благодарю за внимание