

## УСКОРИТЕЛЬ ГАЗОВЫХ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ МГУ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

А.Е. Иешкин<sup>1)</sup>, Ю.А. Ермаков<sup>2)</sup>, В.С. Черныш<sup>1, 2)</sup>

<sup>1)</sup>Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, Москва, 119991, Россия, [ieshkin@physics.msu.ru](mailto:ieshkin@physics.msu.ru), [chernysh@phys.msu.ru](mailto:chernysh@phys.msu.ru)

<sup>2)</sup>НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова, 119991, Ленинские горы, Москва, Россия, [yuriermak@yandex.ru](mailto:yuriermak@yandex.ru)

Представлен созданный в МГУ имени М.В. Ломоносова ускоритель газовых кластерных ионов. Ускоритель позволяет получать пучки газовых кластеров с энергиями 1 - 15 кэВ и током до 2 мкА в импульсном режиме. В качестве рабочих газов использовались аргон, ксенон, азот, причем размеры генерируемых кластеров составляют до 5000 атомов. Для оптимизации системы формирования кластеров применялась реализованная нами методика визуализации потока газа из сверхзвукового сопла с помощью газового разряда. Ускоритель позволяет проводить эксперименты по облучению поверхности твердых тел ускоренными кластерными ионами, в том числе, исследование процесса сглаживания поверхности.

### Введение

В последние десятилетия в области взаимодействия ускоренных ионов с поверхностью твердого тела активно развивается направление, связанное с кластерными ионами. Газовые кластеры, состоящие из нескольких сотен или тысяч атомов, связанных ван-дер-ваальсовыми силами, несущие заряд в несколько единиц элементарного заряда и ускоренные напряжением в несколько десятков киловольт, обладают уникальными свойствами для обработки поверхности материалов. Они уже нашли применение для высокоточной полировки поверхности, имплантации вещества на сверхмалые глубины, ассистирования при нанесении тонких пленок, увеличения эффективности химических реакций на поверхности. При этом многие аспекты их формирования и взаимодействия с мишенями остаются неисследованными [1].

Для изучения процессов взаимодействия ускоренных газовых кластерных ионов с поверхностью твердых тел нами был создан ускоритель газовых кластерных ионов [2].

### Ускоритель кластерных ионов

Ускоритель состоит из трех вакуумных систем: камера формирования нейтральных кластеров, камера ионизации и ускорения, камера образца (рис. 1). Каждая камера откачивается собственной системой откачки.



Рис. 1. Ускоритель газовых кластерных ионов.

Нейтральные кластеры формируются при адиабатическом расширении рабочего газа в вакуум через сверхзвуковое сопло. Известно, что на выходе сопла в этих условиях формируется так называемая бочка Маха. Для предотвращения разрушения кластеров при прохождении через ударную волну, образующую границу бочки Маха, используется скиммер. Скиммер представляет собой тонкостенный конус с отверстием в вершине, прорезающий ударную волну и позволяющий образованным внутри бочки Маха кластерам пройти в следующую вакуумную камеру. Для оптимизации геометрических параметров сопла и скиммера, а так же их взаимного расположения, необходима информация о структуре газового потока на выходе из сопла. Однако на сегодняшний день эта структура в условиях, используемых в системах формирования газовых кластеров, не исследована.

Информация о структуре потока может быть получена с помощью разработанной нами системы визуализации газовым разрядом [3]. Разряд зажигается между двумя плоскими электродами, расположенными симметрично вдоль оси системы, либо между кольцевым электродом и соплом. Полученная таким способом фотография представлена на рис. 2. Видно, что бочка Маха сужается при удалении от среза сопла, формируя X-образную структуру. Это говорит о необходимости тщательной юстировки системы формирования газовых кластеров.



Рис. 2. Пример визуализации потока газа из сверхзвукового сопла с помощью газового разряда.

Проходя через скиммер, нейтральные кластеры попадают в следующую вакуумную камеру, где ионизируются электронным ударом и ускоря-

ются до энергий 1 – 15 кэВ. Камера образца отделена от камеры ионизации и ускорения диафрагмой. В этой камере расположены электростатическая линза, система отклонения легких частиц в магнитном поле и держатель образца с возможностью его перемещения в плоскости, перпендикулярной оси пучка. С помощью время-пролетной системы измерений, сопряженной с камерой образца, было обнаружено, что в пучках присутствуют кластеры с размерами до 5000 атомов, а максимум распределения по массам приходится на значение 500 – 1000 атомов в кластере.

Для получения газовых кластеров рабочий газ подается в сопло под давлением, составляющим несколько атмосфер. Для уменьшения нагрузки на откачную систему камеры формирования кластеров использован импульсный режим подачи рабочего газа. Таким образом, пучок кластерных ионов генерируется в течение некоторых промежутков времени. Типичное значение тока пучка в импульсе составляет 2 мкА при скважности следования импульсов 0,25.

### Планаризация поверхности газовыми кластерными ионами

На описанном ускорителе были проведены эксперименты по сглаживанию рельефа поверхности твердых тел с помощью кластерных ионов. В качестве мишеней были использованы металлы простого и сложного состава (Cu, Mo, NiPd), полупроводники (Si, Ge) и диэлектрики (природный алмаз, ситалл). Перед облучением мишени шлифовались механическим абразивом или посредством химико-механической планаризации. Топография поверхности перед облучением и после облучения контролировалась атомно-силовым микроскопом (АСМ). Облучение проводилось кластерами аргона с энергией 10 кэВ и дозами  $10^{16}$  –  $5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup>.

Во всех случаях отмечено значительное уменьшение шероховатости поверхности. В качестве примера на рис. 3 приведены изображения поверхности меди до и после облучения. При облучения удалены царапины, оставшиеся от абразива. Среднеквадратичная шероховатость уменьшилась от 6,77 нм до 0,86 нм.

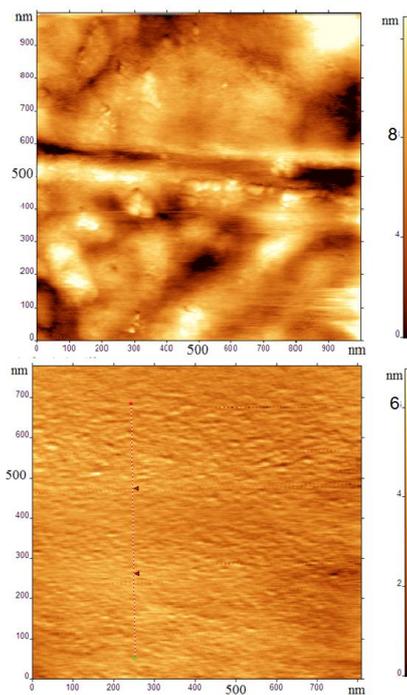


Рис. 3. АСМ изображения поверхности меди до (сверху) и после облучения (внизу).

### Заключение

Создан ускоритель газовых кластерных ионов, позволяющий получать пучки частиц с энергиями 1-15 кэВ и током кластерных ионов 2 мкА. С помощью разработанной системы визуализации потока изучена структура потока газа из сверхзвукового сопла в условиях формирования кластерных ионов. Обнаружено, что бочка Маха сужается при удалении от сопла, образуя X-образную структуру. Проведены эксперименты по сглаживанию рельефа поверхности большого количества веществ, показавшие перспективность применения технологии кластерных ионов для финишной полировки и очистки поверхности.

### Список литературы

1. Yamada I. // Appl. Surf. Sci. 2014. V. 310. P. 77–88.
2. Andreev A.A., Chernysh V.S., Ermakov Yu.A., Ieshkin A.E. // Vacuum. 2013 V. 91. P. 47–53.
3. Ieshkin A., Ermakov Y, Chernysh V. et. al. Computer Simulation and Visualization of Supersonic Jets for Gas Cluster Equipment // Nucl. Instr. Meth. A. 2015. In press.

## GAS CLUSTER ION BEAM ACCELERATOR OF LOMONOSOV MOSCOW STATE UNIVERSITY

Alexei Ieshkin<sup>1)</sup>, Yuri Ermakov<sup>2)</sup>, Vladimir Chernysh<sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup>Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University,

Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, ieshkin@physics.msu.ru

<sup>2)</sup>Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University,  
Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia

We present gas cluster ion beam accelerator crated at Moscow State University. The accelerator operates in pulse regime and is capable of producing gas cluster beams with energies in range 1 – 15 keV and current up to 2 uA. Argon, xenon and nitrogen were used as working gases, and sizes of the clusters generated are up to 5000 atoms. For optimization of the cluster formation system we used a gas discharged technique of supersonic flow visualization developed by us. This technique revealed the structure of gas jet downstream of a supersonic nozzle under the conditions of a gas cluster equipment. The accelerator makes it possible to perform experiments on bulk surface irradiation with gas cluster ion beams, including investigation of surface smoothing processes.