

02;03

Экспериментальное исследование ускоренных ионно-кластерных пучков аргона

© Н.Г. Коробейщиков, В.В. Каляда, А.А. Шмаков, Г.И. Шульженко

Новосибирский государственный университет (НГУ)
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН),
Новосибирск
E-mail: korobei@ci.nsu.ru

Поступило в Редакцию 8 августа 2013 г.

С целью разработки лабораторного стенда для ионно-кластерной модификации материалов выполнены экспериментальные исследования формирования ускоренных газофазных пучков аргона. Получены ускоренные пучки кластеров аргона с энергией до 22 keV и интенсивностью до $6 \cdot 10^{13}$ ions/(cm² · s) при среднем размере кластерных ионов до 10^{13} atoms/cluster. Методом задерживающего потенциала исследованы распределения ионов по размерам в ускоренном ионно-кластерном пучке при различных давлениях торможения. Показано, что массовый состав ионно-кластерного пучка зависит от условий формирования ионного пучка.

В настоящее время ускоренные ионные пучки являются не только универсальным инструментом для научных исследований, но и широко используются в разнообразных технологических процессах: очистка поверхностей, травление материалов, осаждение пленок и покрытий, имплантация [1–2]. Недавно было показано [3], что по сравнению с традиционными потоками атомарных или молекулярных ионов газофазные ионно-кластерные пучки обладают рядом уникальных преимуществ. Одна из отличительных особенностей таких пучков — возможность путем варьирования размерами и энергией кластеров сформировать интенсивный поток с удельной энергией в несколько электронвольт на частицу, что, как известно, весьма затруднительно сделать с помощью традиционного ионного пучка из-за расталкивания ионов. В зависимости от размеров и удельной энергии кластеров возможны различные процессы модификации материалов: сглаживание поверхности практически любых материалов, в том числе сверхтвердых (алмаз, карбид кремния

и др.), до нанометрового уровня без повреждения структуры обрабатываемого материала, низкотемпературное формирование тонких пленок, приповерхностная имплантация с высокими концентрациями [3–4].

Было установлено, что для модификации поверхности необходимы интенсивные потоки с размером кластеров до тысячи единиц с энергией до 30–40 keV и дозами облучения до 10^{15} – 10^{17} ions/cm² [5]. По-видимому, единственным источником, который может обеспечить поток кластеров высокой интенсивности, является молекулярный пучок, сформированный из сверхзвуковой газовой струи. Как известно, при свободном истечении газа из сопла в вакуум кластеры образуются как результат конденсации газа при падении локальной температуры и столкновениях молекул между собой. Подобрав геометрию сопла и исходные параметры газа (давление и температуру торможения, P_0 и T_0 соответственно), можно получить кластеры требуемого размера. Направленный поток (молекулярный пучок) кластеров выделяют из сверхзвуковой струи с помощью скиммера.

Известно, что кинетическая энергия, набираемая кластером при свободном сверхзвуковом истечении, определяется начальной энтальпией покоящегося газа и, как правило, не превышает 0.1 eV на одну частицу кластера (атом или молекулу) [6], что явно недостаточно для обработки поверхности. Для увеличения этой энергии необходимо ионизовать кластеры, а затем ускорить их в электрическом поле до нужной энергии. Таким образом, для технологических приложений необходимо решить задачи формирования ионно-кластерных пучков без существенных потерь в количестве и размерах кластерных ионов по сравнению с потоком нейтральных кластеров, сепарации олигомерных ионов, ускорения и транспортировки пучка к обрабатываемой поверхности. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований формирования ускоренных ионно-кластерных пучков аргона.

Исследования осуществлялись на модернизированном экспериментальном стенде ЛЭМПУС-1 Отдела прикладной физики НГУ [7,8]. Принципиальная схема измерений приведена на рис. 1. Рабочий газ (аргон) истекал через сверхзвуковое коническое сопло (1) с диаметром критического сечения $d = 0.2$ mm и углом раствора конуса $\alpha = 12^\circ$. Давление P_0 варьировалось в диапазоне от $1 \cdot 10^5$ до $7 \cdot 10^5$ Pa. Молекулярный пучок выделялся из сверхзвуковой струи (2) с помощью скиммера (3) с диаметром входного отверстия $d_s = 1$ mm. Газовый

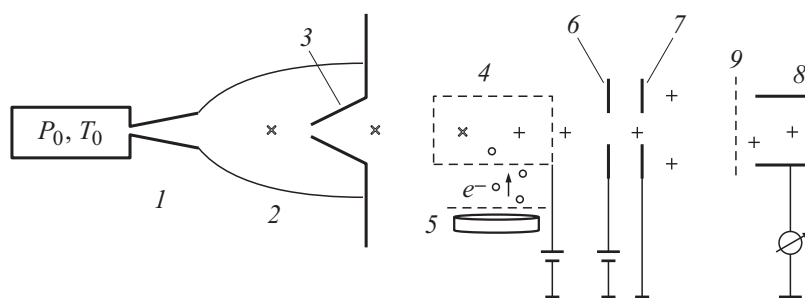


Рис. 1. Принципиальная схема измерений.

источник (сопло) располагался на 3-компонентном координатном механизме, позволявшем настраиваться на ось струи и изменять расстояние сопло–скиммер для выбора оптимальных параметров [8]. Ионизация кластерного пучка осуществлялась в сетчатом ионизаторе (4) электронным ударом. Источником ионизирующих электронов являлась таблетка из гексаборида лантана (5), разогреваемая до температуры $\sim 1800^\circ\text{C}$. Энергия электронов изменялась в диапазоне 100–300 eV, ток эмиссии — до 200 mA. Образующиеся в эквипотенциальном объеме ионизатора ионы дрейфовали к выходной апертуре ионизатора, где с помощью экстрактора (6) с потенциалом U_{ext} формировался ионный пучок. Ионизатор и экстрактор находились под высоким потенциалом U_{HV} , что обеспечивало ускорение ионного пучка относительно ускоряющего (заземленного) электрода (7). Детектирование ионного пучка производилось с помощью коллектора (8).

Известно, что в молекулярном пучке, выделенном из сверхзвуковой струи с конденсацией, присутствуют как мономеры, так и кластеры. Причем кластеры обладают широким распределением по размерам, от димеров до тысячемеров [9]. Для анализа массового состава ускоренного ионного потока в данной работе использовался метод задерживающего потенциала: на сеточный электрод с высокой прозрачностью (9), расположенный на оси пучка, подавался тормозящий положительный потенциал U_{ret} . В результате коллектора достигали только ионы, энергия которых превышала энергию тормозящего поля. Так как частицы в нейтральном сверхзвуковом молекулярном пучке на большом удалении от сопла двигаются практически с одинаковой

скоростью [9], то кинетическая энергия определяется их массой (для кластеров — размерами). Без учета выделения тепла конденсации и в предположении, что скорость кластеров v равна предельной скорости истечения газа, кинетическая энергия кластера размером N определяется начальной энтальпией истекающего газа и равна

$$E_N = \frac{Mv^2}{2} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} kT_0 N,$$

где $M = Nm$ — масса кластера, m — молекулярная масса газа, γ — показатель адиабаты, k — постоянная Больцмана, T_0 — температура торможения. Таким образом, при $T_0 = 295$ К кинетическая энергия мономера составляет 0.064 eV, кластера, состоящего из 10^3 атомов, — 64 eV. Продифференцировав зависимость ионного тока на коллекторе от тормозящего потенциала, можно восстановить распределение ионов по энергии соответственно размерам кластеров. Средний размер кластеров определялся путем выбора тормозящего напряжения, при котором ионный ток уменьшается в два раза относительно максимального тока при $U_{ret} = 0$.

Было установлено, что массовый состав и интенсивность ускоренного ионно-кластерного пучка в значительной мере определяются условиями формирования ионного пучка. На рис. 2, *a* приведены характерные зависимости ионного тока на коллекторе I_k от тормозящего потенциала U_{ret} , измеренные при различных потенциалах на экстракторе ($U_{ext} = 0$ В и 90 В) и фиксированных газодинамических параметрах (расстояние сопло—скиммер 30 мм, $P_0 = 6 \cdot 10^5$ Па). Соответствующие восстановленные распределения ионов по размерам N , выраженные в атомах/кластер, приведены на рис. 2, *b*. $U_{ext} = 90$ В — эмпирически определенное значение вытягивающего потенциала, при котором регистрировался максимальный ионный ток. Видно, что при $U_{ext} = 0$ В в пучке регистрируются ионы преимущественно малых размеров. Напротив, при большом запирающем потенциале U_{ext} отсутствуют самые малые ионы, а средний размер составляет около 10^3 единиц. Как известно, сформированные в ионизаторе ионы-мономеры и кластерные ионы при ускорении фиксированным потенциалом U_{HV} двигаются с разными скоростями, обратно пропорциональными их массе (размеру). При определенных условиях это может приводить к столкновениям ионов в пучке и, как результат, изменению функции распределения ионов по размерам. Максимальные измеренные значения полного ионного

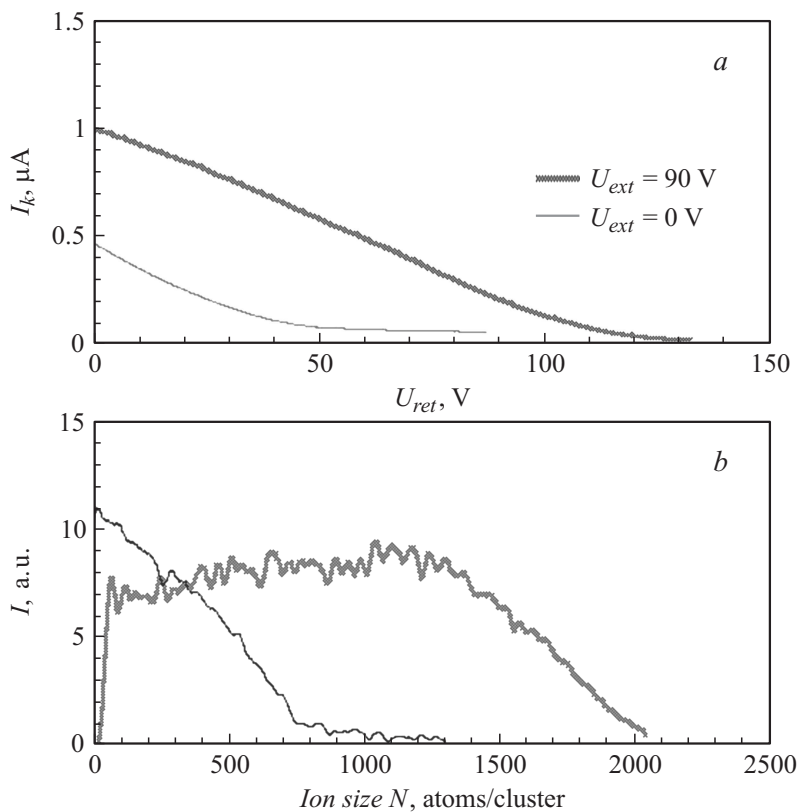


Рис. 2. Зависимости ионного тока I_k от тормозящего потенциала U_{ret} (a) и соответствующие распределения кластерных ионов по размерам (b) при различных потенциалах экстрактора.

тока при малом вытягивающем потенциале заметно ниже, чем при большом (1.8 и 8.7 μA соответственно), что можно объяснить большим рассеянием легких ионов.

Результаты измерений, выполненных при различных давлениях торможения в ионно-кластерном пучке с энергией 22 keV, представлены на рис. 3 в виде зависимостей ионного тока от давления торможения. Точка $P_0 = 0$ соответствует измерениям в фоне в отсутствие молекулярного

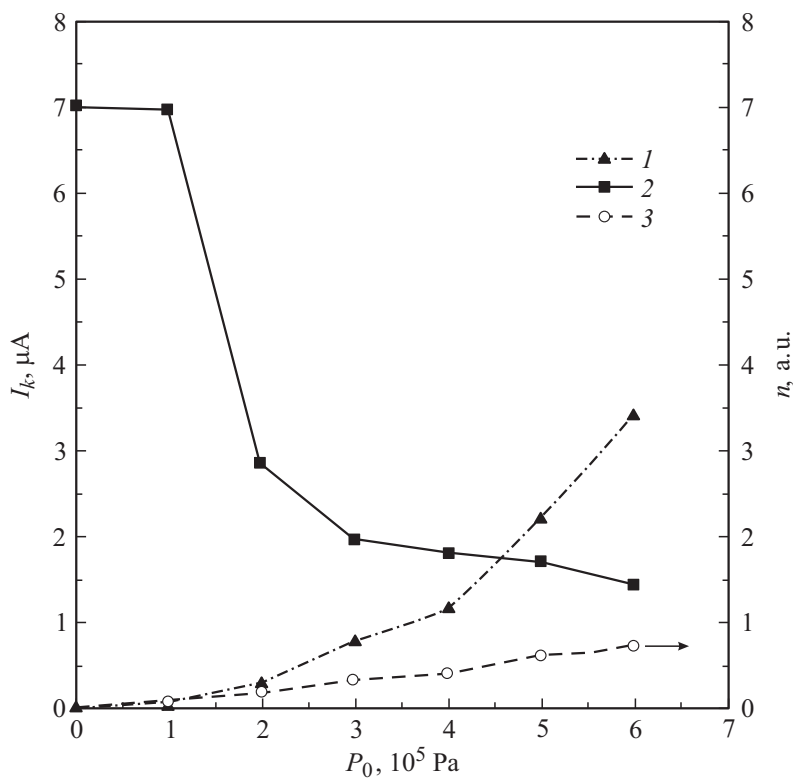


Рис. 3. Зависимости ионного тока и плотности кластеров от давления торможения.

пучка. При $P_0 = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ кластерные ионы в пучке практически отсутствуют. Начиная с давления $P_0 = 2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ в „мономерном“ режиме ($U_{ext} = 0 \text{ V}$, зависимость 2) при увеличении давления торможения ионный ток резко падает, а в „кластерном“ ($U_{ext} = 90 \text{ V}$, зависимость 1) — наоборот, возрастает. Величина ионного тока, пересчитанная на единицу площади коллектора, показывает, что интенсивность ионно-кластерного пучка в выбранных условиях достигает $6 \cdot 10^{13} \text{ ions}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$.

Как и следовало ожидать, с увеличением давления торможения средний размер ионов заметно растет: при $P_0 = 2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ средний размер

кластерных ионов составляет ~ 600 , при $P_0 = 4 \cdot 10^5$ Pa ~ 840 , при $P_0 = 6 \cdot 10^5$ Pa ~ 950 . Необходимо отметить, что зарегистрированные размеры заметно меньше средних размеров кластеров, рассчитанных по эмпирическим формулам, использующим известный параметр Хагены [10,11]. Это может быть объяснено как влиянием пограничного слоя на стенках длинного конического сопла на газодинамику истечения, так и возможными процессами фрагментации нейтральных кластеров при их ионизации и при столкновениях кластеров с фоновым газом в камере ионизатора.

Принимая во внимание, что сечение ионизации кластера увеличивается с ростом его размера как $N^{2/3}$ [12], рост кластерного ионного тока при увеличении давления торможения может быть обусловлен не только увеличением количества нейтральных кластеров в пучке, но и увеличением вероятности ионизации кластеров. Отнормировав ионный ток на $N^{2/3}$, можно оценить изменение плотности нейтральных кластеров в пучке в зависимости от P_0 (n , зависимость 3 на рис. 3). Видно, что с ростом давления торможения число кластеров увеличивается заметно медленнее ионного тока.

Таким образом, в работе экспериментально зарегистрирован ускоренный пучок ионных кластеров аргона с энергией до 22 keV интенсивностью до $6 \cdot 10^{13}$ ions/(cm² · s) при среднем размере 10^3 atoms/cluster. Проанализирован массовый состав ускоренного ионно-кластерного пучка при различных давлениях торможения. Измерения показали, что массовый состав ионно-кластерного потока определяется не только параметрами торможения, но и возможными столкновительными процессами на стадии формирования пучка и может регулироваться потенциалами ионно-оптической системы.

Исследования выполнены при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.В37.21.1860, ГК № 3.749.2011.

Список литературы

- [1] *Material Science with Ion Beams* / Ed. H. Bernas. Berlin: Springer-Verlag, 2010.
- [2] *Schmidt B., Wetzig K. Ion Beams in Materials Processing and Analysis*. Wien: Springer-Verlag, 2013.
- [3] *Yamada I.* // Nucl. Instr. and Meth. B. 2007. V. 257. P. 632–638.

-
- [4] *Toyoda N., Yamada I.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. V. 36. P. 1471–1488.
- [5] *Popok V.N.* // Mater. Sci. Eng. R. 2011. V. 72. P. 137–157.
- [6] *Pauly H.* Atom, Molecule, and Cluster Beams II. Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [7] *Zarvin A.E., Korobeishchikov N.G., Kalyada V.V., Madirbaev V.Zh.* // Eur. Phys. J. D. 2008. V. 49. P. 101–110.
- [8] *Коробейщиков Н.Г., Зарвин А.Е., Каляда В.В., Ходаков М.В.* // Вестник НГУ: Сер. Физ. 2012. Т. 7. В. 2. С. 85–92.
- [9] *Александров М.Л., Куснер Ю.С.* Газодинамические молекулярные, ионные и кластированные пучки. Л.: Наука, 1989.
- [10] *Hagena O.F.* // Rev. Sci. Instrum. 1992. V. 63. P. 2374–2379.
- [11] *Данильченко А.Г., Коваленко С.И., Самоваров В.Н.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 23. С. 88–94.
- [12] *Bottiglioni F., Coutant J., Fois M.* // Phys. Rev. A. 1972. V. 6. N 5. P. 1830–1843.