

Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова

Физический факультет

Кафедра физической электроники

Исследование массового состава потоков  
ускоренных кластерных ионов

Выполнил студент 4 курса

Беляев Максим Евгеньевич

Научный руководитель:

с.н.с., к.ф.-м.н. Иешкин А.Е.

МГУ 2021

## Введение

Кластерные ионы представляют собой ансамбль, содержащий от нескольких единиц до десятков тысяч атомов или молекул. Такие образования могут существовать в вакууме в виде отдельных частиц или их пучков. Кластерные ионы применяются, например, для распыления поверхности твердых тел, сглаживания рельефа, напыления тонких пленок.

Научная проблема: Процесс взаимодействия кластера с веществом зависит от массы кластера. Например, при взаимодействии тяжелых кластеров с поверхностью распыление не происходит, кластеры средних размеров распыляют поверхность, а максимум распыления реализуется при размерах кластера порядка десятков атомов. Из литературы известно, что масс-спектр зависит от условий формирования кластеров. Например, на графике показано, как различные условия ионизации влияют на масс-спектр кластеров аргона [1].

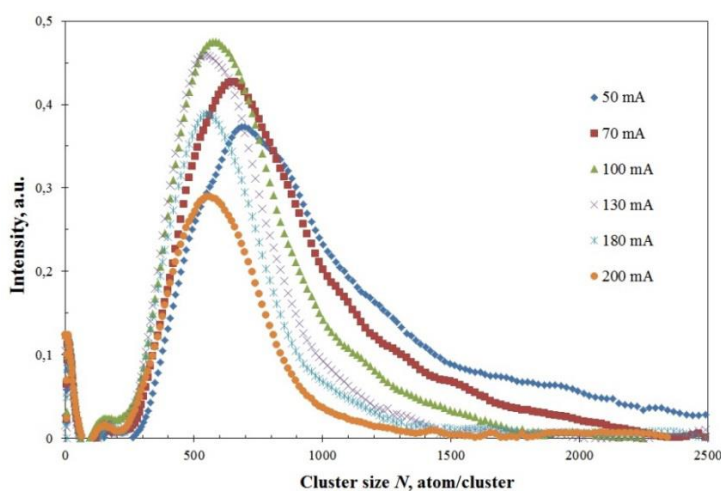


Рис.1 Масс-спектр кластерных ионов аргона при различных токах ионизации.

То есть для интерпретации результатов эксперимента необходимо знать распределение кластерных ионов по массам.

## Описание установки

Эксперименты проводились на ускорителе газовых кластерных ионов МГУ им. М.В. Ломоносова.

Ускоритель газовых кластерных ионов можно условно разделить на три камеры, как показано на рисунке. Каждая камера откачивается до вакуума с помощью насосов: ДН-диффузионный насос, ТМН- турбомолекулярный насос, ФН- форвакуумный насос.

Рабочий газ поступает под давлением в сопло(2) и расширяется в вакуум с помощью импульсного клапана(1). При расширении газ адиабатически охлаждается, и в струе истекающего газа образуются нейтральные кластеры [2]. Вытекая из сопла, газ формирует бочкообразную структуру, ограниченную нормальным скачком — так называемым диском Маха. Для экстракции кластеров используется конический скиммер(3), проникающий сквозь диск Маха и вырезающий часть кластерного потока, позволяя ему проходить в следующую вакуумную камеру [3]. Частицы, прошедшие сквозь скиммер, ионизируют электронным ударом с помощью ионизатора(4) и ускоряют до необходимой энергии в блоке ионизации и ускорения.

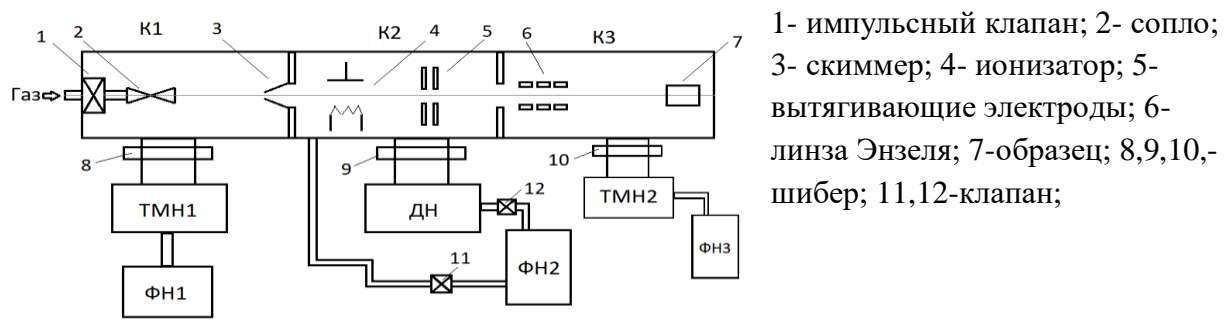


Рис. 2. Принципиальная схема установки.

## Методики измерения распределения кластеров по массам

### 1) Магнит

Заряженные частицы в магнитном поле летят по окружности. Радиус окружности зависит от массы кластера. После прохождения магнитного поля кластеры летят по прямой. Чем кластер легче, тем сильнее его отклонение. В зависимости от того, в какую точку (оси  $y$  на рисунке) после прохождения магнитного поля прилетит кластер, можно узнать его массу. Но при увеличении массы кластера разрешение системы сильно падает.

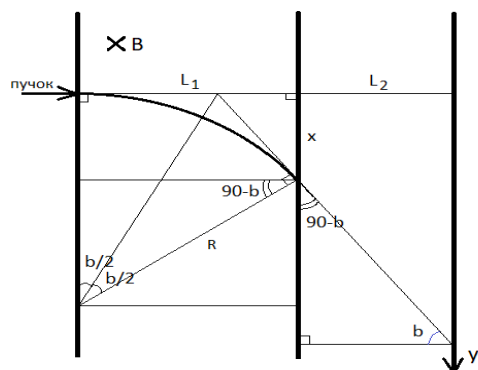


Рис. 3. Магнит

Сила Лоренца, действующая на заряженную частицу со стороны магнитного поля:  
 $\vec{F} = q[\vec{v} \times \vec{B}]$ . Радиус окружности:  $R = \frac{mv}{qB}$ . На оси  $y$ :

$$y = x + L_2 \operatorname{tg}(b) = \frac{L_1}{\sqrt{R^2 - L_1^2}} (L_1^2 - R (R - (\sqrt{R^2 - L_1^2}))) + L_2$$

### 2) фильтр Вина

Прибор для фильтрации заряженных частиц в скрещенном магнитном и электрическом поле [5].

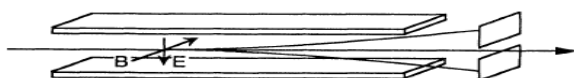


Рис.4. фильтр Вина

Сила Лоренца, действующая на заряженную частицу со стороны магнитного поля:  $\vec{F} = q[\vec{v} \times \vec{B}]$ . Сила, действующая со стороны электрического поля:  $\vec{F} = q\vec{E}$ . Приравняем выражения для сил, чтобы определить, какому соотношению должны удовлетворять частицы, которые не отклоняются в данных полях (угол между  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$  равен 90 градусов),  $v = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{m}}$ , где  $\varepsilon$  - это энергия, с которой кластер влетает в область с полями):  $m = \frac{2\varepsilon B^2}{E^2}$ . Но аналогично магниту при увеличении массы кластера разрешение системы сильно падает.

### 3) RF фильтр (радиочастотный фильтр)

Устройство состоит из двух комплектов электродов, которые создают синусоидальное электрическое поле с одинаковой частотой, но с разными фазами, и используют разницу скоростей кластеров для выбора [4].

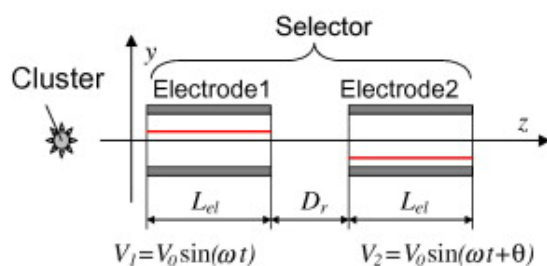
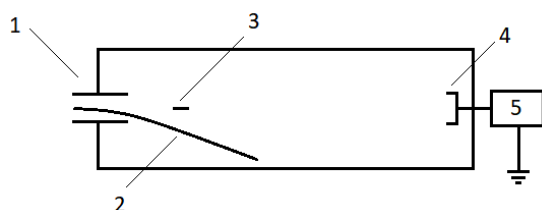


Рис.5. RF фильтр

Когда кластерные ионы пролетают через 1-й электрод, все они отклоняются кулоновской силой. Кластеры выходят параллельно пластинам вдоль оси z, когда правильно выбрана разность фаз  $\theta$  и при условии времени пролета:  $t=kT$  (T период, k-целое). Масса таких кластеров:  $m = \frac{k^2 \cdot 2E}{v^2 \cdot L^2}$ , где E-энергия кластеров, L-длина пластин, v-частота поля.

### 4) Времяпролетная система

#### Времяпролетная методика



1-отклоняющие пластины; 2-отклоненный пучок кластеров; 3- прошедший импульс (сгусток) кластеров; 4-цилиндр Фарадея; 5- осциллограф;

Рис.6. Схема с отклоняющим полем

1)Ионизированный пучок кластеров движется в камере 2. На пластины(1) подается отклоняющее напряжение около 300 В. На промежутки времени порядка 10 мкс напряжение снимается, и короткий импульс кластеров(3) пролетает вперед. Неотклоненный импульс кластеров прилетает на детектор(4), который подключен к осциллографу. На осциллографе получим зависимость напряжения от времени. Затем данный спектр пересчитывается в массовый спектр. Тяжелые кластеры прилетают позже

на детектор, легкие раньше. В данной системе увеличение массы кластера не влияет на разрешение.

2) Выведем выражение, связывающее массу кластера и время, которое пролетает кластер в области без отклоняющего напряжения.

Пройдя область ускоряющего напряжения, каждый кластер приобретает энергию  $Uq$ . Ее можно связать с формулой кинетической энергии:  $\frac{mv^2}{2} = Uq$ . Будем считать, что кластеры однозарядные, то есть  $q=e$ , где  $e$  - элементарный электрический заряд. Выразим скорость:  $v = \sqrt{\frac{2Ue}{m}}$ . Видно, что скорость зависит от массы кластера. Чем больше масса кластера, тем меньше его скорость. Расстояние, которое пролетает кластер в области без ускоряющего напряжения обозначим  $L$ . Выразим  $L$ :  $L = vt$ . Выразим  $t$ :  $t = \frac{L}{v}$ . Подставим выражение для скорости:  $t = \frac{L \cdot \sqrt{m}}{\sqrt{2Ue}}$ . Видно, что время, которое пролетает кластер в области без ускоряющего напряжения пропорционально  $\sqrt{m}$ . Выразим массу:  $m = \frac{2Uet^2}{L^2}$

То есть зная, какое время пролетел кластер в области без отклоняющего напряжения, мы можем получить массу нашего кластера.

3) Необходимо убирать отклоняющее напряжение с пластин на промежуток времени порядка 10 мкс. Для этого будем использовать ключ на транзисторе.

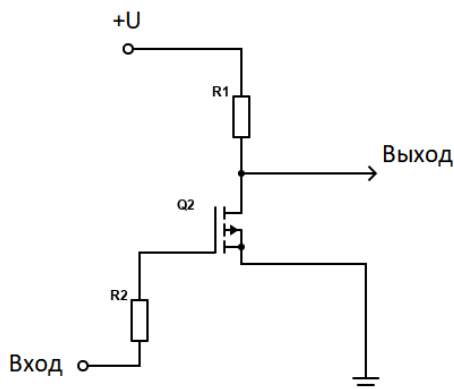


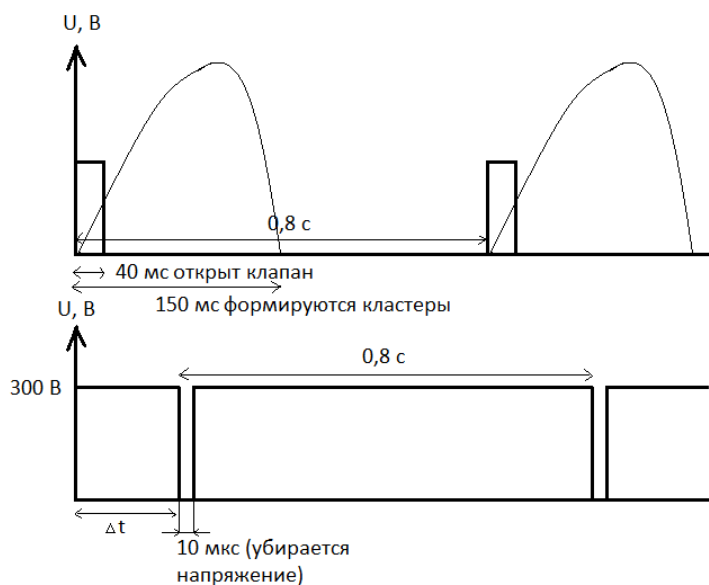
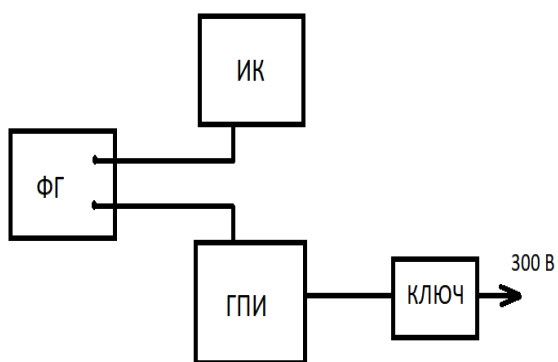
Рис.7. Ключ на транзисторе.

Схема ключа на транзисторе.  $R2=33$  Ом;  $R1=1,2$  кОм;

Используется транзистор р-типа (IRFU9310 MOSFET). Пока импульс около 5 вольт не пришел на затвор транзистора, он закрыт. Значит, у нас разрыв в цепи и все 300 вольт подаются на выход. В тот момент, когда на затвор транзистора пришел импульс 5 вольт, транзистор открывается. Тогда получается соединение напрямую с землей, и все напряжение падает на сопротивлении. То есть на выходе получаем нулевое напряжение.

3) Необходимо подавать импульс на затвор транзистора на 10 мкс.

Импульсный клапан, через который газ подается в сопло открывается обычно на 40 миллисекунд. В течение порядка 150 миллисекунд летят кластеры.



ФГ- Функциональный генератор

Рис.9 Схема импульсов

ИК- блок управления импульсным клапаном

ГПИ- генератор прямоугольных импульсов

КЛЮЧ- ключ на транзисторе

Рис.8. Схема с функциональным генератором.

Функциональный генератор создает импульсы напряжения. У него есть два канала. С одного канала подается импульс на блок управления импульсным клапаном, с другого канала подается импульс на ключ на транзисторе. Функциональный генератор позволяет задавать сдвиг фаз между импульсами. То есть фактически выбирать положение того момента, когда импульсный клапан открывается.

Функциональный генератор выдает импульсы с периодом 0.8 с, а отношение периода к длительности импульса  $T/\tau < 100$ . Нам необходим импульс порядка 10 мкс. Поэтому сначала с функционального генератора подается импульс на генератор прямоугольных импульсов, который, в свою очередь, выдает по этому сигналу прямоугольный импульс нужной длительности на транзисторный ключ.

### Эксперимент. Результаты эксперимента.



Рис. 10. Осциллограмма времяпролетного сигнала

Исследовался массовый спектр кластеров аргона. Ускоряющее напряжение  $U=10$  кэВ. Длина пролетного промежутка  $L=55$  см. По оси абсцисс отложено время, по оси ординат отложено напряжение. Пересчет времени в массу производится по формуле, вывод которой показан выше:  $m = \frac{2Uet^2}{L^2}$

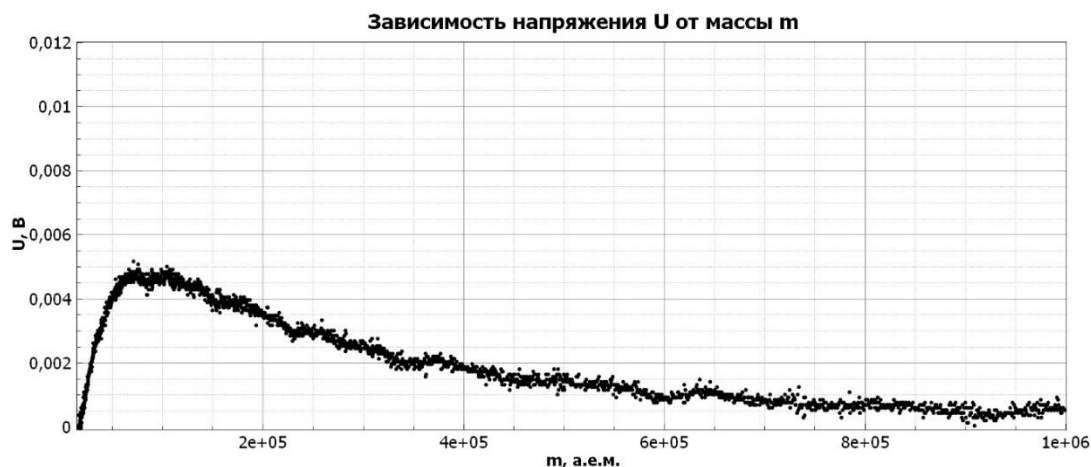


Рис.11. Обработанные результаты

### Заключение

Рассмотрены различные системы масс-спектропии. Создана схема измерений для исследования масс-спектра с помощью времяпролетной методики. Сделаны первые эксперименты. Максимум распределения наблюдается при массе кластера  $7 \cdot 10^4$  а.е.м. В дальнейшем планируется с помощью данной времяпролетной системы получить распределения по массам кластеров азота. Кластерные ионы азота планируется использовать для создания азотосодержащих покрытий, например, нитрида титана, который важен для улучшения биосовместимости титанового импланта в живом организме.

### Литература

- [1] N.G. Korobeishchikov, I.V. Nikolaev and M.A. Roenko /Diagnostics of argon cluster ion beam for materials treatment. //J. Phys.: Conf. Ser. Volume 1115, Issue 3, p.1-5 (2018)
- [2] А.А. Андреев, Ю.А. Ермаков, А.С. Патракеев, В.С. Черныш /Применение газовых кластерных ионов в нанотехнологии. //Нанотехнологии: разработка, применение. Том 1, №1. с.1-11. (2009)
- [3] А.Е. Иешкин, Ю.А. Ермаков, В.С. Черныш /Формирование кластерных ионов различных газов в режиме импульсной подачи газа. //Письма в ЖТФ. Том 41, вып. 22. с.8-14. (2015)
- [4] Kiyoto Ohwaki, Yoshinori Dake, Noriaki Toyoda, Isao Yamada /Development of a new cluster size selector. //NIM B: Beam Interactions with Materials and Atoms. Volume 241, Issues 1-4, p.614-617 (2005)
- [5] [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%80\\_%D0%92%D0%B8%D0%BD%D0%B0](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%80_%D0%92%D0%B8%D0%BD%D0%B0)