

УДК 539.1

М. Б. Маматова, В. Е. Миронов, С. Л. Богомолов**Моделирование потоков газов в ЭЦР-источниках ионов**

После успешных работ по исследованию синтеза новых нуклидов стали активно развиваться методы их идентификации с помощью классических масс-спектрометров. Для одной из таких целей в ЛЯР ОИЯИ был создан масс-спектрометр MASHA. Работа посвящена изучению динамики потоков частиц в горячей ловушке MASHA с целью увеличения эффективности системы «мишень – ЭЦР-источник». Для этого была создана численная 3D модель горячей камеры в программе “MolFlow+”, разрабатываемая в ЦЕРНе с 1990 года.

Ключевые слова: ЭЦР-источник ионов, сепаратор MASHA, горячая ловушка, “MolFlow+”.

Об авторах

Маматова Меруерт Бахыткызы – студент-бакалавр кафедры «Ядерная физика» Государственного университета «Дубна». 141980 Московская обл., г. Дубна, ул. Ленинградская, 10. E-mail: mira2604@mail.ru.

Миронов Владимир Евгеньевич – кандидат технических наук, научно-технологический отдел ускорителей лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований, старший научный сотрудник.

Богомолов Сергей Леопольдович – кандидат технических наук, научно-технологический отдел ускорителей лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований, начальник сектора источников ионов.

Одним из наиболее ярких научных достижений последнего десятилетия явилось открытие новых сверхтяжелых элементов с $Z = 113–118$, а также новых нейтронно-избыточных изотопов элементов 104–112. Для их изучения были разработаны методы идентификации ядер с помощью классических масс-спектрометров. Сепарация новых нуклидов должна проводиться *on line*, т.е. непосредственно в ходе их синтеза на пучках ускоренных тяжелых ионов подобно ISOL методу [1].

ISOL метод основан на том, что в результате бомбардировки ускоренным пучком мишени в ней образуются радиоактивные ядра в широком диапазоне Z и A , которые тормозятся и остаются в веществе мишени. Образовавшиеся ядра затем извлекают из мишени. После извлечения из мишени ионы разделяются с помощью масс-сепаратора. Основным элементом этого метода является мишень, которая может быть толстой, в таком случае первичный пучок в ней полностью останавливается, или относительно тонкой, тогда вторичные частицы вылетают из

мишени и захватываются газовой средой или твердым поглотителем. Преимуществом этого метода является возможность получения довольно интенсивных пучков радиоактивных ядер (до 10^{11} c^{-1}). Существует некоторое ограничение на минимальное время жизни ядер, получаемых ISOL-методом радиоактивных пучков, которое определяется временем их диффузии из мишени и, как правило, составляет не менее 0,5 с. Производящая мишень совмещена с ионным источником масс-спектрометра, который позволяет выделить нужные продукты ядерной реакции и в комплексе с системой транспорта ионов транспортировать их в постускоритель для достижения необходимых энергий [3].

Объектом исследования данной работы является горячая камера установки MASHA и система транспортировки продуктов реакции в ЭЦР-источник однозарядных ионов.

Установка MASHA (*Mass Analyzer of Super Heavy Atoms*) является масс-спектрометром, который позволяет захватить продукты реакций, транспортировать полученные атомы из горячей камеры в ЭЦР-источник однозарядных ионов и провести масс-анализ радиоактивных сверхтя-

желых элементов. Особенность масс-спектрометра заключается в том, что он обладает способностью измерять массы синтезируемых изотопов сверхтяжелых элементов и одновременно регистрировать их альфа-распады или спонтанное деление.

Общая схема масс-спектрометра MASHA представлена на рис. 1. Установка состоит из ми-

шенного узла с горячей ловушкой, ЭЦР-источника ионов, магнитооптической анализирующей части на основе четырех дипольных магнитов (D1, D2, D3a, D3b), трех квадрупольных линз (Q1, Q2, Q3), двух секstupольных линз (S1, S2) и системы регистрации в фокальной плоскости [1].

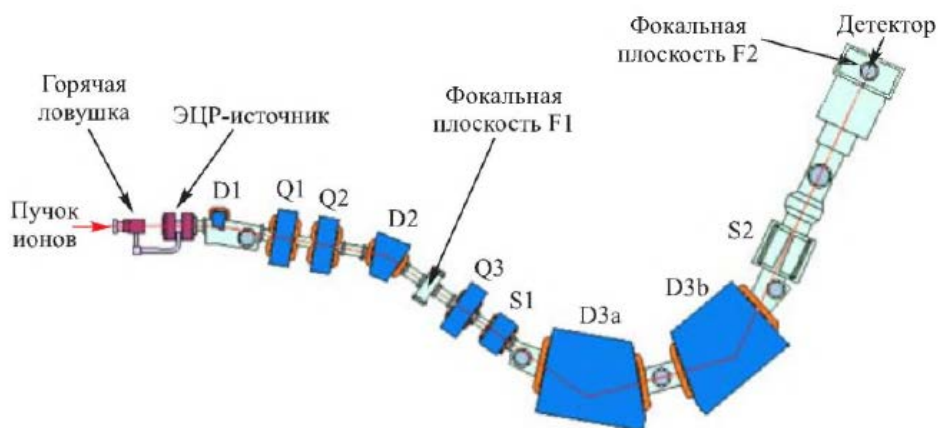


Рис. 1. Общая схема масс-спектрометра MASHA

Вначале первичный пучок тяжелых ионов, пройдя через ионопровод, попадает в систему диагностики, состоящей из разрезной диафрагмы и измерительной фольги (рис. 2). Разрезная диафрагма разделена на четыре сектора, каждый из которых измеряет часть тока пучка, не попавшего в отверстие диафрагмы. Эта система позволяет контролировать положение пучка относительно оси ионопровода. После системы диагностики расположена неподвижная мишень, которая крепится между двумя решетками, охлаждаемыми водой и имеющими сотую структуру с прозрачностью 85%. Продукты ядерных реакций, включая ядра сверхтяжелых элементов, вылетают из мишени под углами $\pm 8^\circ$, проходят разделительную фольгу 4 и останавливаются в графитовом поглотителе, который нагревается до 1500–2000 К. Далее атомы изото-

пов синтезируемых элементов, двигаясь из камеры горячей ловушки 7, через патрубок 8 попадают в разрядную камеру ЭЦР-источника 9, где происходит их ионизация до заряда (1+).

Затем ионы сверхтяжелых элементов ускоряются до энергии 40 кэВ и анализируются по массе, проходя через специально сформированное магнитное поле. Масса иона определяется по величине постоянного магнитного поля, соответствующего определенной координате в фокальной плоскости. Оценки показывают, что полное время диффузии из поглотителя и доставка атомов в объем источника не будет превышать 0,3 секунды. Для легколетучих элементов успешно используется ЭЦР-источник 2,45 ГГц. Эффективность при получении пучка однозарядных ионов инертных газов для такого источника достигает 90% [2].

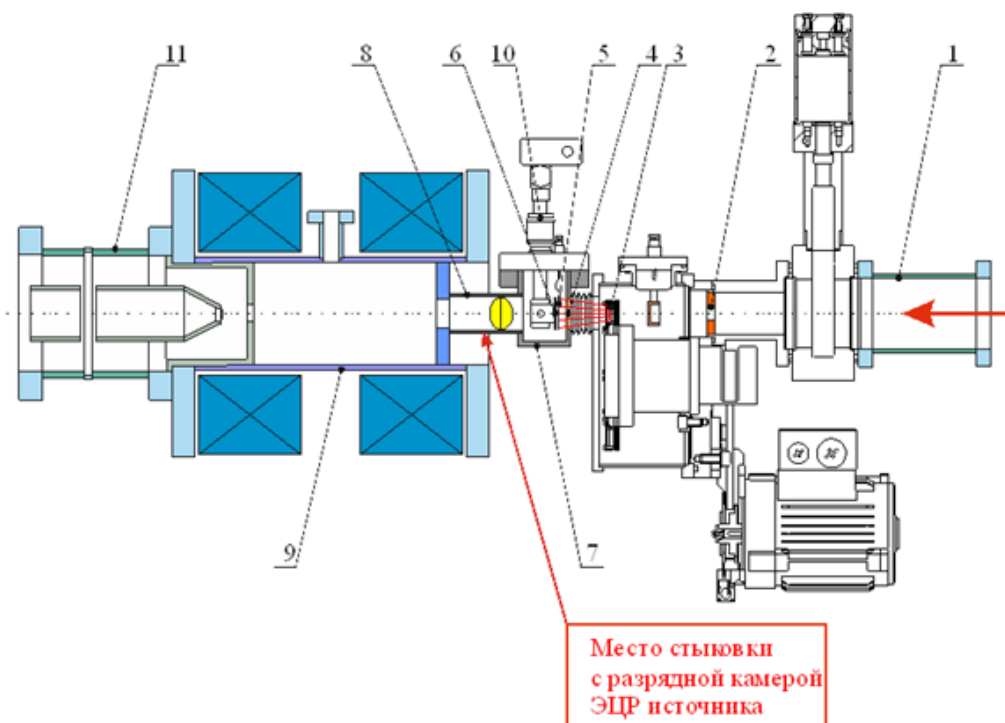


Рис. 2. Схема комплекса из мишенного узла, горячей ловушки и ЭЦР-источника ионов:
 1 – изолятор; 2 – коллиматор; 3 – сектор мишени на Ti фольге; 4 – разделительная фольга; 5 – графитовая фольга; 6 – графитовый нагреватель; 7 – камера горячего поглотителя; 8 – патрубок; 9 – разрядная камера ЭЦР-источника ионов; 10 – электрический вакуумный ввод; 11 – двойной полый керамический изолятор

В ходе данной работы была создана численная 3D модель узла горячей камеры установки, соединенной с ЭЦР-источником ионов (рис. 3). Для подготовки элементов модели горячей камеры использовалась программа Cloud Compare [4]. Затем данная модель была импортирована в формате STL файла в программу “MolFlow+”.

“MolFlow+” – программа для Windows [5], позволяющая рассчитывать стационарное давление в любой произвольно сложной геометрии. Расчеты проводятся в предположении, что длина свободного пробега частиц много больше размеров камеры, так что столкновениями частиц друг

с другом можно пренебречь. Программа использует для симуляции динамики газа метод Монте-Карло столкновений крупных частиц (PIC-MCC), отслеживая движение большого количества частиц в камере, принимая во внимание их отражение и рассеивание на поверхностях камеры.

На рис. 4 показана созданная численная модель в рабочем виде, где линиями изображены траектории движения частиц. Каждую секунду отображаемые результаты обновляются. Чем дольше длится симуляция частиц, тем меньше становятся статические флуктуации.

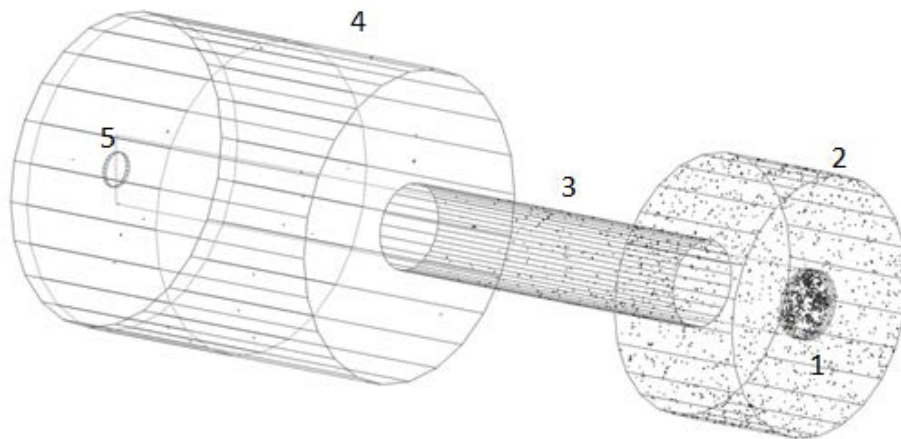


Рис. 3. Численная модель горячей камеры установки MASHA: 1 – мишенный узел; 2 – горячая камера; 3 – линия транспортировки; 4 – камера ЭЦР-источника; 5 – экстракционное отверстие

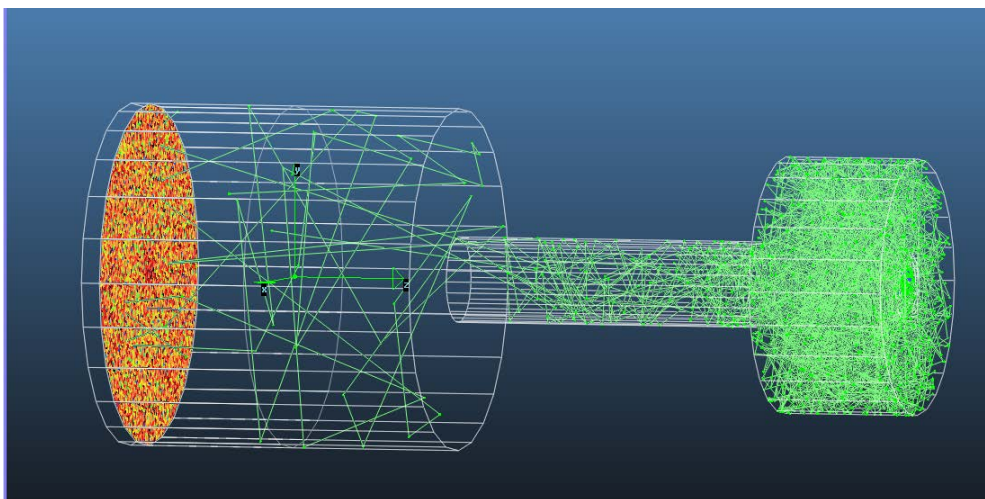


Рис. 4. Эволюция движения частиц в “MolFlow +”

В результате моделирования было получено распределение давления газа вдоль оси симметрии установки (рис. 5). Как видно из рисунка, давление вблизи мишенного узла (источника термализованных радиоактивных атомов) максимально и спадает по мере транспортировки атомов в источник ионов. Атомы покидают камеру через экстракционное отверстие источника ионов. Размеры горячей камеры оптимизируются так, чтобы достичь максимальной концентрации частиц в центре камеры источника.

На рис. 6 показаны кривые зависимости давления в центре камеры ЭЦР-источника от радиуса горячей камеры при разных временах жизни частиц и при разных положениях кэтчера соответствуют: а) правому краю положения кэтчера (сплошные линии, заполненные символы), б) левому краю (пунктирные линии, открытые символы). Данные для частиц, время жизни которых бесконечно большое, обозначены черными квадратными символами. Видно, что от размеров горячей камеры давление таких частиц практически не зависит – концентрация частиц

полностью определяется балансом между потоком частиц, десорбируемых из мишени, и потерями частиц через экстракционное отверстие.

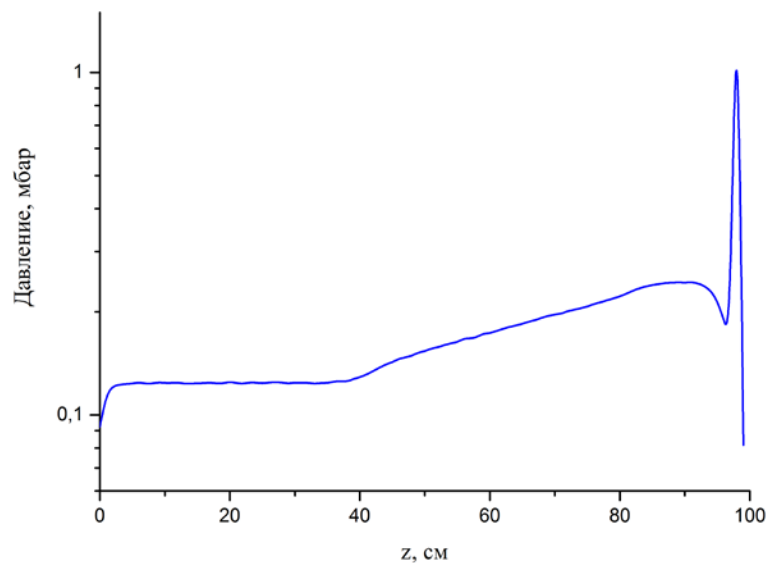


Рис. 5. Давление вдоль оси симметрии камеры

Размеры горячей камеры влияют на время диффузии частиц от кэтчера до центра камеры ЭЦР-источника. Программа “MolFlow+” не вычисляет время диффузии напрямую, для определения этой величины необходимо проводить вычисления с учетом конечного времени жизни частиц в результате радиоактивного распада. На

рис. 6 показаны результаты расчетов для частиц с временами жизни $\tau = 1, 0.5$ и 0.05 секунд. С увеличением радиуса горячей камеры давление в центре камеры ЭЦР-источника уменьшается, т.к. увеличивается время транспортировки частиц в камеру источника.

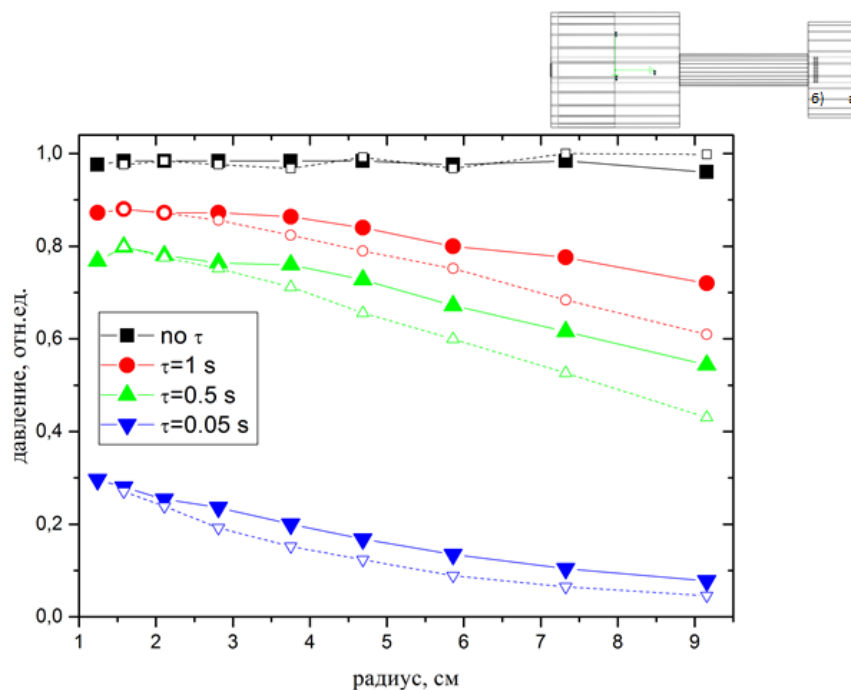


Рис. 6. Кривые зависимости давления в центре камеры ЭЦР-источника от радиуса горячей камеры при разных временах жизни частиц и при разных положениях кэтчера

Из результатов, показанных на рис. 6, можно сделать вывод, что эффективность транспортировки частиц в горячей камере установки MASHA увеличивается при уменьшении размеров камеры до величин, лишь ненамного превышающих диаметр кэтчера. Оптимальным положением кэтчера является положение *a*, близкое к входному окну камеры.

Разработанная численная модель камеры установки MASHA может быть использована для оптимизации геометрии камеры с целью повышения эффективности регистрации редких сверхтяжелых элементов.

Библиографический список

1. Родин А.М., Белозеров А.В., Ванин Д.В., Дмитриев С.Н., Иткис М.Г., Климан Я., Крупа Л., Лебедев А.Н., Оганесян Ю.Ц., Саламатин В.С., Сивачек

И., Чернышева Е.В., Юхимчук С.А. Масс-спектрометр – MASHA – результаты тестов на пучке тяжелых ионов // Препринт ОИЯИ. 2011. Р. 15–47.

2. Efremov A., Bekhterev V., Bogomolov S., Gulbekyan G., Lebedev A.N., Loginov V.N., Smirnov Yu.I., Leporis M. The 2.45 GHz ECR ion source for the first stage of the DRIBs project // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 204. 2003. P. 368–371.

3. Lindroos M. Review of ISOL-type radioactive beam facilities // Proceedings of EPAC. CERN, Lucerne, Switzerland. 2004. P. 45–49.

4. Сайт разработчиков программного продукта «Cloud Compare». – URL: <http://cloudcompare.org> (режим доступа: свободный. Дата обращения: 01.04.2017).

5. Сайт разработчиков программного продукта “MolFlow +”. URL: <http://molflow.web.cern.ch/content/about-molflow> (режим доступа: свободный. Дата обращения: 01.04.2017).