

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

К - 95

7-83-728

КУТНЕР

Владимир Борисович

ИССЛЕДОВАНИЕ  
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ  
ПОЛУЧЕНИЯ ИНТЕНСИВНЫХ  
И ВЫСОКОЗАРЯДНЫХ ПУЧКОВ  
ИЗ ЦИКЛОТРОННОГО ДУГОВОГО ИСТОЧНИКА  
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

Специальность: 01.04.13 - электрофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Дубна 1983

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований

Научные руководители:

академик

Георгий Николаевич  
ФЛЁРОВ

кандидат технических наук  
старший научный сотрудник

Анатолий Степанович  
ПАСЮК

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук  
старший научный сотрудник

Борис Николаевич  
МАКОВ

доктор физико-математических наук  
профессор

Константин Саввич  
ГОЛОВАНОВСКИЙ

Ведущая организация: Институт атомной энергии  
им. И.В.Курчатова, Москва.

Защита диссертации состоится "8" декабря 1983 г. в "11" часов на заседании специализированного совета Д-047.01.02 при Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан "1" ноября 1983 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета

*Лихачев*

М.Ф.ЛИХАЧЁВ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность проблемы. Исследования с тяжелыми ионами имеют исключительные возможности как в области изучения фундаментальных проблем современной физики, так и в решении важных научно-технических задач.

Реакции с тяжелыми ионами позволяют принципиально новым способом синтезировать тяжелые и сверхтяжелые элементы, а также исследовать их свойства.

С помощью тяжелых ионов были синтезированы изотопы  $102-107$  элементов. В настоящее время в СССР, ФРГ и США проводятся эксперименты по синтезу  $108$ ,  $109$  и  $116$  элементов.

С получением уникальных пучков тяжелых ионов связан значительный прогресс в области физики деления ядер, изучении свойств ядер вблизи границы устойчивости, исследовании механизма взаимодействия сложных ядер.

Исключительное значение имеют интенсивные пучки тяжелых ионов для решения актуальных научно-технических и народно-хозяйственных задач. Тяжелые ионы позволили найти новые подходы к решению проблем производства ядерных фильтров и изучения радиационной стойкости материалов.

С помощью интенсивных пучков тяжелых ионов ( $10^{13}$  ионов в секунду) могут быть изготовлены ядерные фильтры с диаметрами пор от  $0,01$  до  $10$  мкм и числом отверстий до  $10^9$  на  $1$  см<sup>2</sup>.

Исключительно важным является то, что тяжелые ионы обладают в  $10^5 + 10^6$  раз более высокой по сравнению с нейтронами деструктивной способностью. Причем время облучения за счет большой интенсивности ионного пучка может быть сокращено до нескольких часов по сравнению с годами на нейтронных потоках.

Интенсивные пучки ускоренных тяжелых ионов открывают перспективы и для исследований свойств вещества при экстремально высоких давлениях и температурах, инициировании управляемой реакции термоядерного синтеза.

Вместе с тем решение как фундаментальных, так и практических аспектов современной ядерной физики и энергетики связано и определяется прогрессом развития мощных ускорительных комплексов интенсивных и высокозарядных пучков тяжелых ионов.

В конце 70-х годов вступили в строй действующих два уникальных ускорителя тяжелых ионов: UNILAS ( GSI, Дармштадт, ФРГ ) и в 1978 году У-400 ( ОИЯИ, Дубна, СССР ). В конце 1982 года получен ускоренный пучок на 3-х циклотронном комплексе тяжелых ионов GANIL во Франции.

В СССР и ряде стран Запада в настоящее время разрабатываются и осуществляются разнообразные проекты ускорительных комплексов ядер легких элементов и тяжелых ионов вплоть до урана на энергии  $10^2 - 10^3$  МэВ/нуклон и с интенсивностями  $10^7 + 10^{14}$  част./с.\*\*\*

Получение пучков тяжелых ионов высокой интенсивности в широком диапазоне масс и энергий является сложнейшей научно-технической задачей. Вместе с тем, за исключением коллективного ускорителя ионов, параметры ускорительных комплексов существенно зависят и во многом определяются зарядностью и интенсивностью пучков, полученных из ионного источника.

В настоящее время, учитывая преимущества циклотронного метода ускорения ионов до средних энергий, являются актуальными вопросы развития циклотронного ионного источника дугового типа.

Цель работы - увеличение интенсивности и расширение диапазона ускоряемых частиц:

1. Исследование режимов работы источника и изучение условий увеличения интенсивности извлекаемых из источников пучков ионов и получение ускоренных пучков с током до  $10^{14}$  ионов в секунду.

2. Исследование условий повышения зарядности извлекаемых из источников ионных пучков.

3. Получение интенсивных ионных пучков твердых веществ.

#### Научная новизна.

1. Впервые проведены исследования влияния материалов катодов ионного источника и характеристик магнитного поля на интенсивность ускоренного пучка.

2. Впервые получены из источника и ускорены на циклотронах интенсивные пучки многозарядных тяжелых ионов твердых веществ.

3. Обнаружен и изучен эффект повышения зарядности и интенсивности ионных пучков из источника при импульсной подаче газа в разряд.

#### Практическая ценность работы.

1. Создание высокоинтенсивного источника многозарядных ионов для крупнейшего в мире изохронного циклотрона тяжелых ионов и получение ускоренных пучков с интенсивностью до  $10^{14}$  ионов в секунду, позволяющих приступить к исследованиям процессов взаимодействия сложных ядер на рекордном уровне чувствительности, соответствующем поперечным сечениям реакций порядка  $10^{-35} + 10^{-36}$  см<sup>2</sup>.

2. Повышение эффективности использования циклотронов для физических экспериментов, что имеет исключительное значение при работе

с дорогостоящими разделенными изотопами элементов, применяемыми в ионном источнике в качестве рабочего вещества.

3. Создание ионного источника многозарядных тяжелых ионов, работающего на парах металлов.

4. Создание источника ионов с импульсной подачей рабочего газа, позволяющего снизить газовую нагрузку в циклотрон и достичь возможность получить более высокий вакуум в зоне ускорителя.

5. Использование результатов исследований для создания ионных источников для разрабатываемого в настоящее время многоцелевого циклотрона У-250.

Апробация работы. Результаты исследований, положенных в основу диссертации, докладывались на II Международной конференции по ионным источникам (Вена, Австрия, 1972г.), на XV (Минск, 1981г.) и XVI (Дюссельдорф, ФРГ, 1983г.) Международных конференциях по явлениям в ионизованных газах, на Международном семинаре по технике изохронных циклотронов (Краков, ПНР, 1978г.), на I и IV Всесоюзных семинарах по физике и технике интенсивных источников ионов и ионных пучков (Киев, 1978 и 1981 гг.), на Всесоюзном совещании по ускорителям низких и средних энергий (Киев, 1981г.), на VII Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1981г.), в Обществе по исследованию с тяжелыми ионами (Дармштадт, ФРГ, 1982г.).

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 13 работах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы; содержит 120 страниц машинописного текста, в том числе 38 рисунков, 9 таблиц и список цитируемой литературы из 117 наименований.

#### На защиту выносятся следующие положения, результаты, разработки.

1. Применение катодов из тугоплавких материалов с малыми коэффициентами катодного распыления и теплопроводности при сравнительно высокой работе выхода (  $T_a$  ) позволяет выбрать режим работы ионного источника, при котором существенно увеличивается интенсивность и зарядность извлекаемых ионных пучков.

2. Использование тяжелых добавочных газов при работе на редких изотопах легких элементов позволяет достигнуть устойчивое горение разряда и обеспечить стабильность ускоренного пучка.

3. Выход высокозарядных ионов из дугового источника имеет резкую зависимость от точности ориентации оси газоразрядной камеры относительно направления силовых линий магнитного поля.

Слабое неоднородное поле при  $1 \leq N_k/N_o \leq 1,3$  (  $N_k$  и  $N_o$  - поля в области катода и эмиссионной щели соответственно ) не приводит

к снижению интенсивности. При сильной неоднородности магнитного поля ( $N_x/N_0 = 2,3$ ) выход высокозарядных ионов резко снижается.

4. При импульсном напуске рабочего газа в разряд наблюдается эффект повышения интенсивности и зарядности извлекаемого из источника пучка.

5. Наиболее интенсивные пучки высокозарядных ионов твердых веществ могут быть получены из источника, работающего на парах металлов.

6. Сформулирована модель описания процессов ионообразования и потерь ионов в дуговом источнике многозарядных ионов.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность исследований с источниками многозарядных ионов дугового типа, сформулирована цель работы, кратко изложено содержание диссертации.

В первой главе сделан обзор интенсивных и высокозарядных источников ионов для ускорителей тяжелых ионов и ядер: циклотронного дугового источника (PIG), лазерного источника (ИМЗИЛ), дуоплазматрона (DP), электронно-лучевого источника (EBIS) и источника с нагревом электронов на частоте электронно-циклотронного резонанса (ECR). Проведена классификация ионных источников с точки зрения внутренней и внешней инжекции в циклотрон. Систематизированы и сравниваются основные характеристики ионных источников и получаемых из них пучков многозарядных ионов. Обсуждены перспективы развития новых источников для циклотронов. На рис.1 све-

даны для сравнения данные по интенсивностям и зарядностям ионных пучков из различных типов источников. Показано, что с учетом преимуществ циклотронного метода ускорения тяжелых ионов до средних энергий, дальнейшее развитие дугового источника многозарядных ионов позволяет получать наиболее интенсивные пучки.

Во второй главе проведено изучение условий получения интенсивных и высокозарядных пучков ионов из циклотронного дугового источника, схема которого представлена на рис.2. Принцип действия источника состоит в следующем: подогреваемый электронным потоком с нити (1) катод (2) эмиттирует электроны, которые осциллируют вдоль магнитного поля между катодом и охлаждаемым антикатодом (6), находящемся под потенциалом катода. Электронный поток ионизирует газ, поступающий в газоразрядную камеру-анод (3) по специальному каналу в области катода, антикатада и эмиссионной щели. Ионный пучок извлекается из эмиссионной щели (5) в области средней части анода. Источник работает в импульсном режиме ( $f_{имп.} = 100 + 200$  Гц,  $\tau_{имп.} = 1 + 2$  мс.) в сильном магнитном поле ( $0,6 + 2,1$  Т). Длина разрядного промежутка составляет  $45 + 220$  мм, величина импульсного тока и напряжения разряда  $15 + 20$  А и  $500 + 1000$  В соответственно.

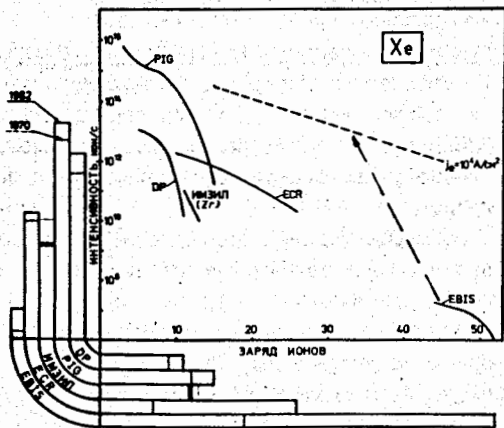


Рис.1. Выход ионов и темп получения интенсивных и высокозарядных пучков ионов Хе и Zr из различных источников.

Рис.2. Блок-схема циклотронного дугового источника и систем питания. 1 — нить, 2 — катод, 3 — анод, 4 — расширяемый электрод, 5 — эмиссионная щель, 6 — антикатод, 7 — выпрямитель расширяемого электрода, 8 — модулятор, 9 — выпрямитель нити, 10 — выпрямитель подогрева, 11 — выпрямитель дуги, 12 — усилительно-выпрямительный блок.

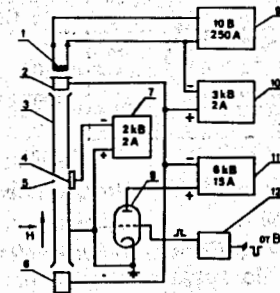


Рис.2. Блок-схема циклотронного дугового источника и систем питания. 1 — нить, 2 — катод, 3 — анод, 4 — расширяемый электрод, 5 — эмиссионная щель, 6 — антикатод, 7 — выпрямитель расширяемого электрода, 8 — модулятор, 9 — выпрямитель нити, 10 — выпрямитель подогрева, 11 — выпрямитель дуги, 12 — усилительно-выпрямительный блок.

На стенде ионных источников и на циклотронах У-200, У-300 и У-400 ИЯИ исследованы режимы работы ионных источников с катодами из вольфрама, вольфрама с присадками окиси алюминия, вольфрама с добавкой рения (27%), а также из молибдена, рения, тантала, карбидов ниобия и циркония.

Установлено, что применение катода из тантала приводит к увеличению выхода многозарядных ионов и достижению более высокозарядных состояний. На рис.3 приводятся сравнительные данные токов многозарядных ионов, полученных из источников с катодами из тантала и вольфрама. Источник ионов с катодами из тантала по сравнению с источником ионов с катодами из вольфрама позволяет увеличить интенсивность ио-

нов  $Ar^{8+}$  в 2 раза,  $Kr^{10+}$  - в 6 раз,  $Xe^{12+}$  - в 7 раз. На стенде ионных источников получены ионы  $Xe^{15+}$ , ток в импульсе составлял 10 мкА.

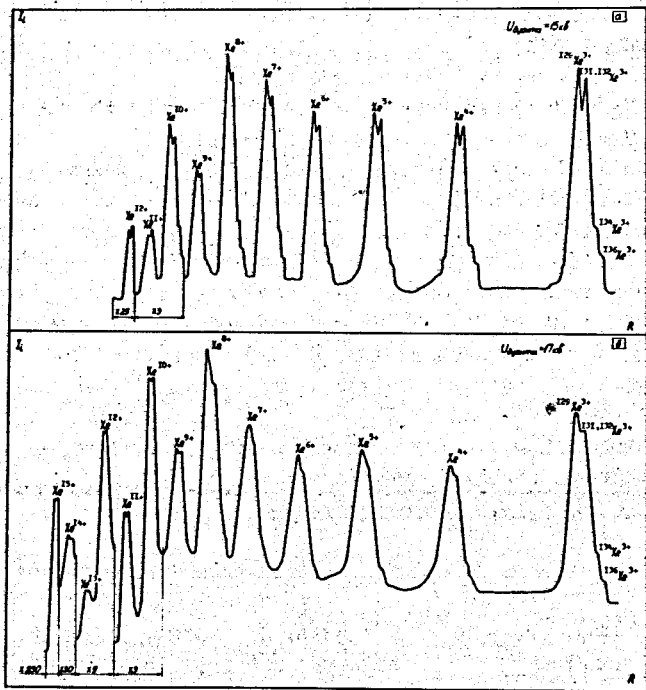


Рис.3. Диаграммы токов различных ионов ксенона из источников с вольфрамовым (а) и танталовым (б) катодами.

На диаграмме отмечено, во сколько раз изменено усиление для высокозарядных ионов по сравнению с низкозарядными. По горизонтальной оси отложено расстояние от источника ионов вдоль линии фокусов, по вертикальной - относительный выход различных ионов.

В результате применения катодов из тантала и выбора режима работы источника в 1,5 + 2 раза увеличена интенсивность ускоренных пучков  $Ne^{5+}$  (циклотрон У-200);  $Ar^{7+}$ ,  $Ca^{7+}$ ,  $Sc^{7+}$ ,  $Ti^{7+}$  (циклотрон У-300);  $Mg^{3+}$ ,  $Ar^{4+}$ ,  $Ti^{6+}$ ,  $Cr^{6+}$ ,  $Fe^{6+}$  (циклотрон У-400). Значительное увеличение интенсивности (на порядок) было достигнуто на циклотроне У-300 при ускорении ионов  $Fe^{9+}$ .

На стенде и на циклотронах (У-200, У-300) проведено изучение влияния добавочных газов (водорода, гелия, воздуха, инертных газов)

на выход из источника интенсивных и высокозарядных ускоренных пучков ионов азота, неона, аргона и ксенона.

В опытах на стенде установлено, что добавочный газ оказывает наибольшее влияние на высокозарядную часть спектра полученных ионов (рис.4). На рис.5 показано влияние различных добавочных газов на выход высокозарядных ионов  $Xe^{10+}$ . При подмешивании в источник ионов на циклотроне У-200 таких тяжелых газов, как криптон и ксенон к легким (кислороду, неону) достигается устойчивость горения разряда, стабильность ускоренных пучков, а также экономия дорогостоящих изотопов.

На циклотронах У-200 и У-300 при ускорении ионов  $O^{4+}$ ,  $Ne^{4+}$ ,  $Ne^{5+}$ ,  $Ar^{6+}$ ,  $Ar^{7+}$ ,  $Ar^{8+}$  и  $Zn^{10+}$  добавочный газ приводил к снижению интенсивности пучков.

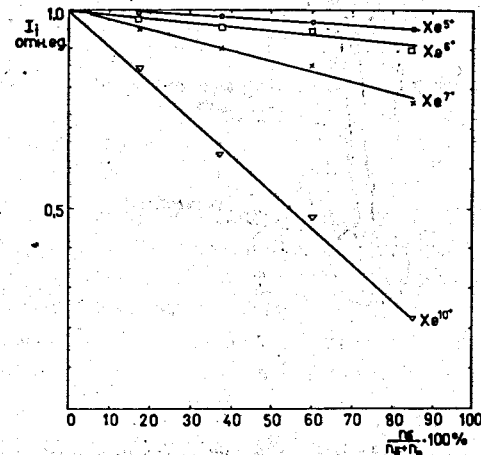


Рис.4. Влияние примеси водорода на выход высокозарядных ионов ксенона.

В результате изучения влияния характеристик магнитного поля на выход многозарядных ионов показано, что для получения интенсивных пучков высокозарядных ионов необходимы магнитные поля более 0,4 Т. Установлено, что незначительные отклонения оси разрядной камеры (длиной 220 мм) источника ионов от направления силовых линий магнитного поля (рис.6) приводит к снижению выхода тока ионов  $Ar^{8+}$  в 10 раз. В результате исследований работы источника в неоднородном магнитном поле показано, что увеличение напряженности магнитного поля

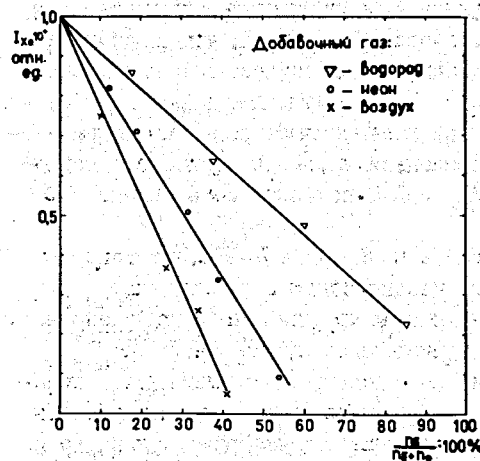


Рис.5. Влияние добавочных газов на выход ионов  $Xe^{10+}$ .

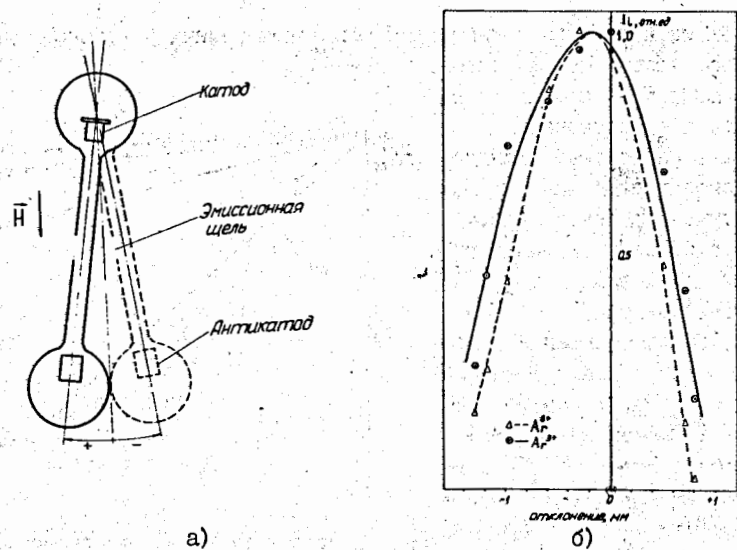


Рис.6. а) Схема опыта по определению выхода многозарядных ионов в зависимости от величины отклонения оси разрядной камеры от направления силовых линий магнитного поля. б) Выход ионов аргона в зависимости от величины отклонения оси разрядной камеры от направления силовых линий магнитного поля.

в области катода и антикатада ( $H_K$ ) по сравнению с напряженностью в области эмиссионной щели ( $H_0$ ) приводит к значительному уменьшению выхода высокозарядных ионов. Исследования показали, что наибольший выход ионов достигается в случае однородного магнитного поля. Неоднородное магнитное поле при  $H_K/H_0 = 1,3$  не приводит к резкому снижению интенсивности, но требует определенной юстировки положения катода относительно накладки с эмиссионной щелью. В случае сильной неоднородности магнитного поля  $H_K/H_0 = 2,3$  получить ионы аргона с  $Z > 6$  из источника не удается.

В исследованиях, проведенных на циклотроне У-300, из ионного источника с локально создаваемыми неоднородностями магнитного поля в областях, близких к катодам (магнитные пробки), было получено некоторое увеличение интенсивности ускоренного пучка ионов  $Ar^{7+}$ .

В результате исследования ионного источника с импульсной подачей газа (рис.7) обнаружен эффект увеличения интенсивности и зарядности ионных пучков. За счет осуществления режима работы ионного источника с импульсной подачей газа интенсивность ионов  $Ar^{8+}$  увеличена в 2 раза,  $Kr^{10+}$  - в 2,5 раза,  $Xe^{15+}$  - в 5 раз.

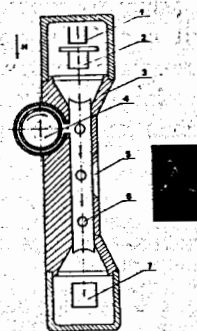


Рис.7. Схема источника ионов с импульсной подачей газа. 1 - нить накала, 2 - катод, 3 - разрядная камера, 4 - модулятор, 5 - эмиссионная щель, 6 - фотодиод, 7 - антикатод. На вставке: совмещенные осциллограммы импульса тока тлеющего разряда (опережает) и импульса с фотодиода.

Сравнение типичных спектров ионов ксенона из источников с непрерывным и импульсным напуском рабочего газа представлено на рис.8. При импульсной подаче Kr и Xe в разряд в спектрах обнаруживаются пики соответственно двенадцати и шестнадцатизарядных ионов. В случае работы источника ионов в режиме с импульсной подачей газа снижается в  $1,5 \pm 2$  раза расход рабочего газа.

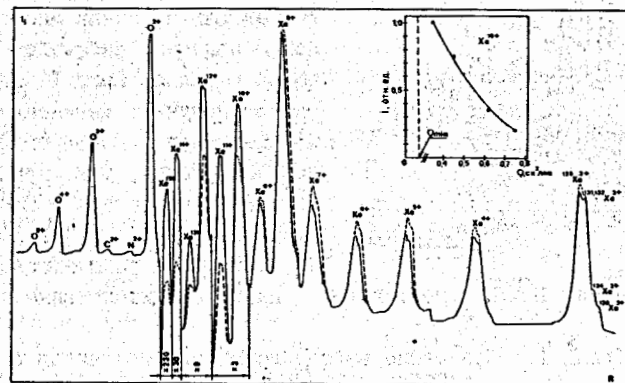
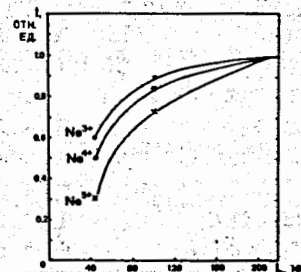


Рис.8. Спектр ионного пучка из источника при импульсном (сплошная линия) и непрерывном напуске газа в источник.

На рис.9 представлены результаты стендовых исследований выхода многозарядных ионов Ne из источников ионов

Рис.9. Относительный выход многозарядных ионов неона из источников с различной длиной газоразрядной камеры.



циклотрона У-200, У-400 и У-300, имеющих различную длину газоразрядной камеры (расстояние между катодом и антикатодом) соответственно 45, 100 и 220 мм. Показано, что использование источника с короткой камерой на циклотроне У-200 приводит к снижению интенсивности пучка ионов  $Ne^{5+}$  в несколько раз по сравнению с источниками для циклотронов У-300 и У-400.

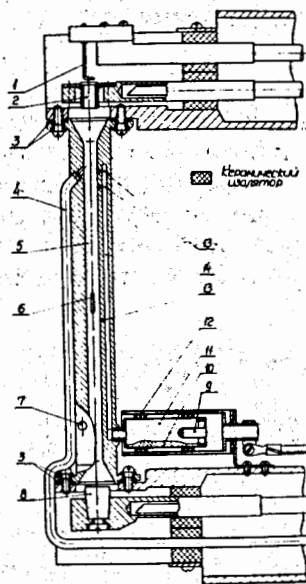


Рис. 10. Схематическое изображение ионного источника с испарением рабочего вещества. 1 - нить накала, 2 - катод, 3 - теплоизолирующие шайбы, 4 - трубки подачи газа, 5 - камера, 6 - эмиссионная щель, 7 - термопара камеры, 8 - антикатод, 9 - термопара тигля, 10 - испаряемое вещество, 11 - тигель, 12 - нагреватель, 13 - отверстия напуска пара, 14 - паропровод.

Для получения ускоренных пучков ионов твердых веществ разработан и исследован источник многозарядных ионов с подачей рабочего газа в виде паров металлов (рис. 10). Источник позволяет получать интенсивные пучки ионов металлов и ионов различных твердых соединений, у которых при температурах в интервале  $100+900^{\circ}C$  достигается упругость паров  $10^{-1} + I \text{ Тор}$ . Из источника, работающего на парах, как видно из табл. I, достигаются наиболее интенсивные ионные пучки,

Таблица I. Сравнение выхода ионов из источников с испарением и катодным распылением (ж) рабочего вещества.

Иониз. элемент	Ток в импульсе по зарядам, мА									
	I+	2+	3+	4+	5+	6+	7+	8+	9+	10+
Si	23	38	26	16	2,6					
" ж	12	45	34	12	1,6	0,2	0,02			
Ca	7	32	33	29	12,0	3,0	0,7	0,2	0,01	
" ж	3	23	22	14	4,5	1,0	0,2	0,04		
Zn		18	33	30	16,0	8,0	3,6	1,4	0,2	0,001
" ж		64	54	29	10,0	4,2	0,8	0,2	0,03	

поскольку в этом случае по сравнению с источником с катодным распылением не используется вспомогательный газ. Из источника получены ионы кальция до девятизарядного, а цинка - до десятизарядного. На циклотроне У-300 получены ускоренные пучки ионов  $31P^{5+}$ ,  $40Ca^{7+}$  и  $Zn^{10+}$ . Средний расход вещества в источнике составляет 50 мг/час.

Проведены опыты по исследованию возможностей получения интенсивных пучков ионов методом катодного распыления тугоплавких веществ из антикатада.

В третьей главе проводится теоретическое рассмотрение влияния различных процессов ионообразования и потерь на выход многозарядных ионов из источника дугового типа. Проведено обобщение ранее известных подходов для оценок выхода многозарядных ионов из различных ионных источников.

На основе выбранной для циклотронного источника физической модели проведено описание процессов ионообразования и потерь ионов He и N:

$$\frac{dn_0}{dt} = F_0 + \sum_{i=1}^Z \frac{n_i}{\tau_i} - a_0 n_0 n - n_0 G_0 j + \alpha_1 n_1 n - n_0 \sum_{k=2}^Z \beta_{ok} n_k$$

$$\frac{dn_i}{dt} = -\frac{n_i}{\tau_i} + a_{i-1} n_{i-1} n - a_i n_i n + n_{i-1} G_{i-1} j - n_i G_i j - \alpha_i n_i n + \alpha_{i+1} n_{i+1} n + n_{i+1} \beta_{o,i+1} n_0 - n_i \beta_{io} n_0$$

$$\frac{dn_z}{dt} = -\frac{n_z}{\tau_z} + a_{z-1} n_{z-1} n + n_{z-1} G_{z-1} j - \alpha_z n_z n - n_z \beta_{zo} n_0$$

$$n = \sum_{i=1}^Z i \cdot n_i$$

- где  $n_i(t)$  - концентрация ионов i-ой зарядности,
- $n(t)$  - концентрация электронов плазмы,
- $\tau_i$  - время дрейфа ионов i-ой зарядности на стенки камеры,
- $a_i$  - коэффициент ударной ионизации электронами,
- $j$  - поток первичных электронов,
- $\alpha_i$  - коэффициенты скорости рекомбинации i-зарядного иона,
- $\beta_{io}$  - константа скорости перезарядки i-зарядных ионов с нейтральными атомами.



Для оценки вклада перезарядки использована зависимость  $G_{i,i-k} = A_k i^{\alpha_k} I^{\beta_k}$ , где  $I$  - потенциал ионизации атома,  $k$  - число передаваемых электронов,  $A_k, \alpha_k, \beta_k$  - экспериментальные константы.

По разработанной программе на ЭВМ БЭСМ-6 проведено фитирование параметров модели, исходя из экспериментальных данных и выполнены численные расчеты. На рис. II представлены результаты расчета в сравнении с экспериментальными данными. Расчетная кривая попадает в экспериментальный диапазон при следующих параметрах:  $T_e = 30 \text{ эВ}$ ,  $\tau_1 = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ ,  $\alpha_1 = 1,2 \cdot 10^{-11} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ .

Выполненные оценки удовлетворительно объясняют имеющиеся экспериментальные данные по выходу многозарядных ионов из дугового ионного источника.

В заключении сформулированы основные результаты исследований и разработок источника дугового типа для циклотронов.

1. Показано, что в случае циклотронного метода ускорения пучков тяжелых ионов развитие источника дугового типа позволило получить на циклотроне У-400 в широком диапазоне масс ( $0 + \text{Fe}$ ) ускоренные пучки ионов с интенсивностью  $10^{13} + 10^{14}$  частиц в секунду.

2. Установлено, что в дуговом источнике многозарядных ионов с катодом и антикатодом из тантала, по сравнению с катодами из вольфрама, вольфрама с присадками окиси алюминия, вольфрама с добавкой рения, молибдена, рения, карбидов ниобия и циркония, могут быть реализованы режимы разряда, приводящие к увеличению выхода многозарядных ионов и достижению более высокозарядных состояний.

При исследовании режимов работы источника с использованием танталового катода при токах разряда до 15 А удалось обеспечить относительно высокое напряжение разряда до 1100 В.

При этом интенсивность пучков ионов  $\text{Ar}^{8+}$  увеличена в 2 раза,  $\text{Kr}^{10+}$  - в 6 раз,  $\text{Xe}^{12+}$  - в 7 раз; получен ток ионов  $\text{Xe}^{15+}$ , равный 10 мкА в импульсе.

В результате исследований режимов работы ионного источника с катодами из различных материалов и достигнутого увеличения интенсивности ускоренных пучков в  $2 + 10$  раз уменьшено время использования циклотронов Лаборатории ядерных реакций (У-200, У-300, У-400) для проведения физических экспериментов, что имеет особенно важное значение при работе с дорогостоящими разделенными изотопами такими, как  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{50}\text{Tl}$ ,  $^{54}\text{Cr}$ ,  $^{58}\text{Fe}$  и другими.

3. Обнаружен и изучен эффект повышения интенсивности и зарядности ионных пучков, извлекаемых из ионного источника, при импульсном напуске газа.

На основе проведенных исследований разработан источник ионов с импульсной подачей газа в разряд, позволивший увеличить интенсивность пучков ионов  $\text{Ar}^{8+}$  в 2 раза,  $\text{Kr}^{10+}$  - в 2,5 раза,  $\text{Xe}^{15+}$  - в 5 раз, при этом в спектре извлекаемых из источника ионов обнаруживаются  $\text{Kr}^{12+}$  и  $\text{Xe}^{16+}$ .

Источник с импульсной подачей газа позволяет при работе на Хе снизить в 2 раза газовую нагрузку в ускоряющей зоне вакуумной камеры циклотрона.

4. Проведено экспериментальное изучение влияния характеристик магнитного поля на выход многозарядных ионов из источника.

Показано, что для получения интенсивных пучков высокозарядных ионов необходимы магнитные поля выше 0,4 Т.

Экспериментально установлено, что при монотонном увеличении магнитного поля от области эмиссионной щели к катоду выход многозарядных ионов снижается. В случае слабого неоднородного поля ( $I \leq H_K / H_0 = 1,3$ ) потери интенсивности пучка можно исключить за счет выбора положения оси катода относительно плоскости расположения эмиссионной щели. При сильной неоднородности магнитного поля ( $H_K / H_0 = 2,3$ ) выход ионов  $\text{Ar}^{6+}$  снижается более, чем в 100 раз, и ионы с зарядом  $Z > 6$  получить из источника не удается.

Экспериментально исследована зависимость выхода высокозарядных ионов от величины отклонения оси разрядной камеры источника ионов циклотрона У-300 (расстояние между катодом и антикатодом 220 мм) от направления силовых линий магнитного поля. Установлено: незначительные отклонения ( $\sim 1 \text{ мм}$ ) оси камеры от направления силовых линий магнитного поля приводят к снижению интенсивности ионного пучка  $\text{Ar}^{8+}$  в 10 раз.

5. Изучено влияние добавочных газов (водорода, гелия, воздуха,

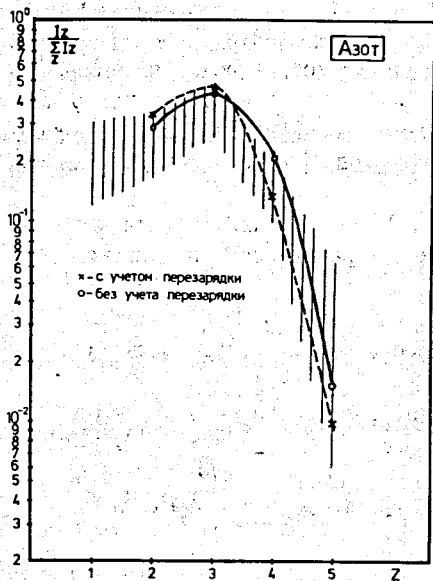


Рис. II. Сравнение результатов расчета с выходом ионов из источника. Заштрихованная область соответствует экспериментальным данным.

инертных газов) на выход многозарядных ионов неона, аргона и ксенона из дугового источника в экспериментах на стенде и циклотронах У-200 и У-300.

При получении ионов  $O^{4+}$ ,  $Ne^{4+}$ ,  $Ne^{5+}$ ,  $Ar^{6+}$ ,  $Ar^{7+}$ ,  $Ar^{8+}$  и  $Zn^{10+}$  использование добавочного газа приводит к снижению интенсивности ускоренного пучка.

При добавлении (<10%) таких тяжелых газов, как криптон и ксенон к легким (кислород, неон) достигается устойчивость разряда в источнике, стабильность ускоренных пучков на циклотроне У-200, а также экономия дорогостоящих изотопов.

6. Разработан и исследован на стенде и циклотроне У-300 источник многозарядных ионов с испарением твердого рабочего вещества из тигля. Из источника получены ионы кальция до девятизарядного, а цинка - до десятизарядного.

Создание источников ионов с испарением рабочего вещества позволило впервые в мире получить пучки ионов фосфора, кальция и цинка и ускорить их ( $^{31}P^{5+}$ ,  $^{40}Ca^{7+64}$ ,  $Zn^{10+}$ ) на циклотроне У-300, где была начата широкая программа синтеза и изучения закономерностей образования трансфермиевых элементов.

В результате исследований источника ионов с катодным распылением рабочего вещества из антикатада получены наиболее интенсивные пучки многозарядных ионов Мо и W.

7. Проведено обобщение ранее используемых подходов по описанию процессов образования и потерь ионов, включая ион-атомную перезарядку в ионных источниках. В результате моделирования и расчетов для Ne и N получено количественное согласие с экспериментальными данными.

8. В результате проведенных исследований и выполненных разработок в области физики и техники ионного источника дугового типа достигнут прогресс в увеличении интенсивности и зарядности пучков тяжелых ионов, который представлен на рис. 12. Получение пучка ионов  $He^{15+}$  с интенсивностью 50 мкА в импульсе расширяет диапазон ускоряемых на циклотроне У-400 элементов Периодической системы Д.И. Менделеева вплоть до Хе с энергией, превышающей кулоновский барьер (> 5 МэВ/нукл.).

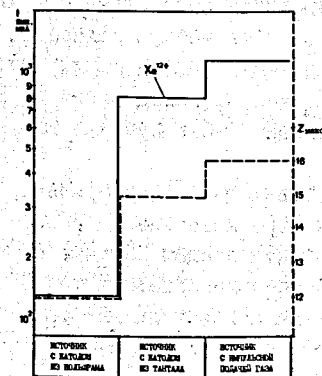


Рис. 12. Развитие дугового источника многозарядных ионов для циклотронов ЛЯР. Сплошная линия - интенсивность 12-зарядных ионов He; пунктирная - максимальный заряд ионов He, получаемых из источника.

делеева вплоть до Хе с энергией, превышающей кулоновский барьер (> 5 МэВ/нукл.).

Полученные результаты положены в основу создания новых ионных источников для разрабатываемого в настоящее время многоцелевого циклотрона тяжелых ионов У-250 и малогабаритных циклотронов для прикладных исследований.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Кутнер В.Б. Источники высокозарядных и интенсивных пучков тяжелых ионов. - Дубна, 1981. - 15с. (Препринт/Объед. ин-т ядер. исслед.: P9-81-139).
2. Пасяк А.С., Воробьев Е.Д., Иванников Р.И., Кузнецов В.И., Кутнер В.Б., Третьяков Ю.П. Источник многозарядных ионов кальция и цинка. - Атомная энергия, 1970, т.28, в.1, с.75-78.
3. Pasyuk A.S., Kutner V.B. Production of Multiply Charged Ions from a Pulse Arc Discharge. - In: Proceedings of the XV International Conference on Phenomena in Ionised Gases. Minsk, July 14-18, 1981. Москва, ВИНТИ, 1981, Part II, p.641-642.
4. Пасяк А.С., Кутнер В.Б., Третьяков Ю.П. Источник многозарядных ионов для изохронного циклотрона У-400. - В: Трудах международного семинара по технике изохронных циклотронов. (Краков, 13-18 ноября, 1978). Краков: ИЯФ, 1979, с.432-438.
5. Пасяк А.С., Кутнер В.Б., Кузнецова И.П. Влияние добавочного газа на выход многозарядных ионов из циклотронного источника. - Дубна, 1978. - 11с. (Препринт/Объед. ин-т ядер. исслед.: 9 - II280).
6. Веников Н.И., Кутнер В.Б., Пасяк А.С. Источники многозарядных ионов для циклотронов. - В кн.: Ускорители ионов низких и средних энергий; Труды Всесоюзного совещания. Киев, Наукова думка. 1982, с.39 - 46.
7. Пасяк А.С., Кутнер В.Б. Источник многозарядных ионов с импульсной подачей рабочего газа. - В кн.: Ускорители ионов низких и средних энергий; Труды Всесоюзного совещания. Киев, Наукова думка, 1982, с. 229 - 231.
8. Пасяк А.С., Кузнецова И.П., Кутнер В.Б. Влияние некоторых характеристик магнитного поля на выход многозарядных ионов. - Атомная энергия, 1975, т.39, в.2, с. 139 - 141.
9. Пасяк А.С., Кутнер В.Б., Третьяков Ю.П. О влиянии материала катода на параметры разряда и выход многозарядных ионов. - Приборы и техника эксперимента, 1980, №1, с. 41-44.

10. Кутнер В.Б., Кочкин В.И., Пасжк А.С., Третьяков Ю.П. Исследование процессов образования и потерь ионов  $He^+$  и  $N$  в циклотронном источнике многозарядных ионов. - Журнал технической физики, 1980, т.50, в.7, с. 1427-1430.
11. Пасжк А.С., Кутнер В.Б. О получении многозарядных ионов ксенона. - Дубна, 1979. - 7с. (Препринт/Объед.ин-т ядер. исслед.: P7-4289).
12. Кутнер В.Б., Кочкин В.И. Оценка влияния перезарядки на выход ионов азота из циклотронного источника. - Дубна, 1979. - 7с. (Препринт/Объед. ин-т ядер. исслед.: P7-12707).
13. Pasyuk A.S., Kutner V.B., Bogomolov S.I., Study of a Pulsed Arc Discharge Ion Source with a Pulsed Gas Feed.-In: Proceedings of the XVI International Conference on Phenomena in Ionised Gases. Msseldorf, 1983, Vol.5, p.770-771.

---

\* Flerov G.N., Ter-Akopian G.M. Superheavy Nuclei. - Reports on Progress in Physics, 1983, Vol.46, No.7, p.817-875.

\*\* Флеров Г.Н., Оганесян Ю.Ц. Перспективы научных и прикладных исследований с помощью ускоренных тяжелых ионов. - Вестник АН СССР, 1980, № 12, с. 28-45.

\*\*\* Оганесян Ю.Ц. Перспективы исследований с помощью тяжелых ионов и развитие ускорительных установок ЛЯР ОИЯИ. - Дубна, 1979 - 39 с. (Препринт/Объед. ин-т ядер. исслед.: P9-12843).

Рукопись поступила в издательский отдел  
20 октября 1983 года