

Д-321



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

13-91-469

**ДЕМЬЯНОВ**  
Александр Васильевич

УДК 621.384.8, 539.12.537.534.2

**ИСТОЧНИКИ ИОНОВ ДЛЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
И РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Специальность: 01.04.01 – Техника физического эксперимента, физика приборов, автоматизация физических исследований

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Работа выполнено в Институте ядерных исследований АН УССР и в  
Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследо-  
ваний.

**Официальные оппоненты:**

- |   |                                    |
|---|------------------------------------|
| 1. Академик АН УССР,<br>доктор физ.-мат. наук,<br>профессор | Немец Олег Федорович               |
| 2. Доктор физ.-мат. Наук,<br>профессор                      | Прокопец Геннадий Александрович    |
| 3. Доктор физ.-мат. наук                                    | Калинников Владимир<br>Геннадьевич |

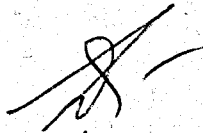
Ведущее научно-исследовательское учреждение:  
Харьковский физико-технический институт АН УССР

Защита диссертации состоится " 01 " 1991 г.  
в "     " часов на заседании Специализированного совета при  
Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных  
исследований, г. Дубна, Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "29" XI 1991 г.

Ученый секретарь  
Специализированного совета



**Общая характеристика работы**

В диссертационной работе изложены результаты исследований и раз-  
работок источников ионов и инжекторов для ускорительной техники, тех-  
нологий и методики ядерно-физических экспериментов, выполненных автором  
в ИЯИ АН УССР (г. Киев) и в ЛЯР ОИЯИ (г. Дубна).

**Актуальность работы**

Некоторые свойства тяжелых ядер, такие как: большая масса, сложная  
многоуклонная структура, большой заряд, кластерная структура некоторых  
ядер, участие в ядерных превращениях той или иной части нуклонов либо  
всего ядра в целом, обусловили большой интерес к исследованиям с ними  
и технологическим применениям. Ускоренные тяжелые ионы позволили про-  
двинуться в область сверхтяжелых ядер ( $Z \sim 110 \pm 126$ ), синтезировать но-  
вые элементы и изотопы, исследовать процессы глубоконеупругих столкно-  
вений, реакции слияния и передач и т.д.

Решение задачи ускорения тяжелых ионов на Киевском изохранном  
циклотроне У-240, разработка и создание быстродействующих источников  
ионов для электромагнитных масс-сепараторов, работающих на пучке и  
предназначенных для исследования свойств короткоживущих ядер - продук-  
тов ядерных реакций, разработка инжекторов ионов для ускорителей и  
имплантаторов, обусловили актуальность представленных в диссертации  
исследований и разработок.

**Цель работы**

1. Разработка и создание источника многозарядных ионов (МЗИ)  
газообразных и твердых веществ, пригодного для использования в режиме  
длительной эксплуатации на Киевском изохранном циклотроне У-240.
2. Разработка и создание на основе безотходной технологии метода-  
ми порошковой металлургии катодных узлов для этого источника из спе-  
ченого порошкового вольфрама и молибдена с добавками в катод и антика-  
тод рабочих веществ в количестве до 20% по объему и без добавок.
3. Ускорение на изохранном циклотроне У-240 ионов  $C^{+3}$ ,  $O^{+4}$ ,  $N^{+4}$   
до энергий 70, 85, 150 МэВ соответственно.
4. Исследование диффузии продуктов ядерных реакций, выбитых из  
тонких мишеней ускоренными тяжелыми ионами и внедренных в различные  
материалы в условиях сильных радиационных повреждений (под пучком) -  
как способа быстрой доставки их в область эффективной ионизации.

5. Разработка, исследование и создание быстродействующих газоразрядного источника и источника ионов с поверхностной термоионизацией для электромагнитных масс-сепараторов на пучке с использованием методов доставки продуктов ядерных реакций в ионный источник за счет быстрой диффузии их из некоторых тугоплавких материалов.

6. Разработка и исследование внешних инжекторов ионов с высокой эффективностью извлечения их из плазмы (газовый разряд, лазерная плазма, электрическая искра ...) и фокусировки для ускорителей и имплантаторов.

#### Научная новизна

1. При помощи научнообоснованной, целенаправленной технологии впервые разработаны и созданы катоды и антикатоды для дугового источника МЗИ из спеченого порошкового вольфрама с добавками рабочих веществ таких, как  $Al_2O_3$ ,  $B$ ,  $LiAlO_2$ , в которых не происходит преждевременное обеднение поверхностного слоя катода или антикатода рабочими веществами при рабочих температурах в источнике ( $\sim 2500$  К) вплоть до разрушения ионами из плазмы газового разряда.

2. Впервые проведены исследования диффузии продуктов ядерных реакций, выбитых из тонких мишеней ускоренными тяжелыми ионами и внедренных в разогретые пластинки из тугоплавких материалов в условиях интенсивных радиационных повреждений (под пучком).

3. Разработан и впервые создан быстродействующий газоразрядный ионный источник продуктов ядерных реакций совместно с мишенью и системой доставки их в область эффективной ионизации, основанной на явлении быстрой диффузии ядер отдачи, внедренных в тугоплавкие пластины при высокой температуре в условиях сильных радиационных повреждений. Источник создан для электромагнитного масс-сепаратора на пучке ускоренных тяжелых ионов (ЛЯР ОИЯИ циклотрон У-300). Впервые проведены исследования поведения в газоразрядном источнике ультрамалых количеств радиоактивных атомов.

4. Впервые разработан и создан быстродействующий высокотемпературный источник с поверхностной термоионизацией для электромагнитного масс-сепаратора на пучке тяжелых ионов на основе источников типа "горячая полость" и исследованы его характеристики. Источник использовался в составе масс-сепаратора БЭМС-2 на выведенном пучке ускоренных на циклотроне У-300 тяжелых ионов (ЛЯР ОИЯИ). В этих исследованиях идентифицированы и изучены новые быстрораспадающиеся изотопы, в том числе излучатели запаздывающих протонов, в области щелочных и редкозе-

мельных элементов, полученные в реакциях с ускоренными тяжелыми ионами.

5. Впервые разработан высокоэффективный внешний инжектор сепарированных ионов с ионным источником, работающим в однородном магнитном поле совместно с магнитным анализатором и магнитными экранами. Инжектор отличается от других тем, что на выходе пучка из магнитного поля электромагнитного источника создаются условия для двойной (горизонтальной и аксиальной) фокусировки пучка и согласования эмиттанса источника и акселератора магнитного анализатора. Угол захвата ионов из источника в данном инжекторе увеличивается примерно в 3 раза, а полная эффективность в несколько раз за счет фокусировки пучка в поле магнита источника и на выходе из него, более близкого расположения источника ко входу в магнитный анализатор.

6. Впервые разработан и исследован на макете инжектор ионов, в том числе многозарядных, с высокой эффективностью извлечения их из плазмы газового разряда, искры, лазерной плазмы и т.д. Инжектор фокусирует собранные в телесном угле  $\sim 1$  стерadians и более ионы в пятно небольшого размера и может быть использован как внешний источник для ускорителей и промышленных имплантаторов.

#### Научная и практическая ценность

Источник МЗИ газообразных и твердых веществ с катодными узлами из спеченого порошкового вольфрама и молибдена используется на Киевском изохронном циклотроне У-240. Созданное в ОКБ ИПМ АН УССР на основе наших разработок и исследований промышленное производство катодных узлов методами порошковой металлургии способно обеспечить этими узлами тяжелоионные циклотроны нашей страны и зарубежных стран. В частности, эти катодные узлы проходят испытание на циклотроне У-120 в ЦИЯИ в Росендорфе.

Широкое применение катодные узлы из спеченого порошкового вольфрама и молибдена с добавками рабочих веществ, особенно таких, которые в нормальных условиях не имеют газообразных соединений, и без них, могут найти на промышленных имплантаторах, используемых на заводах, производящих современную полупроводниковую электронную продукцию. В целях рекламы этой разработки выпущен рекламный ролик: "Источник МЗИ газообразных и твердых веществ" - 1986 г., "Реклама", Киев.

Быстродействующие источники ионов совместно с системой доставки продуктов ядерных реакций в область эффективной ионизации применяются на масс-сепараторах в линии с тяжелоионным ускорителем. С их помощью, в частности, в опытах на пучке циклотрона У-300 (Дубна, ОИЯИ ЛЯР)

открыто явление испускания запаздывающих протонов и обнаружено более 30 новых изотопов -  $\rho$ -излучателей.

Внешний инжектор ЛИВИ-2, разработка, исследование и создание которого проводились в соответствии с Общесоюзной научнотехнической программой 1986-1990 гг., предназначен для использования на ускорителях тяжелых ионов, масс-сепараторах и промышленных имплантаторах, также как и инжектор ЛИВИ-1 и внешний инжектор сепарированных ионов, отличающиеся значительно более высокой эффективностью экстракции ионов и транспортировки пучка, благодаря разработанным и созданным системам широкопертурных экстрагирующих и фокусирующих электродов и магнитным фокусирующим системам.

### Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на Международном рабочем совещании по масс-сепараторам и их применению в ядерной физике в Дубне, 19-22 мая 1965 г., на Международной конференции по масс-спектропии в Киото, Япония, 1969 г., на XI Совещании по ядерной спектропии в Дубне, 1969 г., на 25 Совещании по ядерной спектропии и структуре атомного ядра в Ленинграде, 1975 г., на Всесоюзном совещании "Ускорители ионов низких и средних энергий" в Киеве в 1982 г., на IX, X, XII Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц в 1985-1990 гг., а также на семинарах в ЛЯР ОИЯИ, ИЯИ АН УССР, ЦИЯИ АН ГДР.

По теме диссертации опубликовано 23 печатных работ.

### Объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 205 наименований на 20 страницах, всего 249 страниц, включая 86 рисунков, 13 таблиц.

### На защиту выносятся:

1. Разработка и исследование катодов и антикатодов для дугового источника МЗИ из спеченого порошкового вольфрама и молибдена с добавками рабочих веществ в твердом виде, таких как, например:  $Al_2O_3$ , В,  $LiAlO_2$  и др. и без них, в которых не происходит обеднение горячего поверхностного слоя рабочим веществом при температурах в источнике  $\sim 2500$  К вплоть до разрушения его ионами из плазмы газового разряда.

2. Разработка и создание источника МЗИ газообразных и твердых веществ с катодными узлами из спеченого порошкового W и Mo.

3. Разработка, создание и исследование быстродействующего газоразрядного источника ионов - продуктов ядерных реакций, совместно с мишенью и системой быстрой доставки их в область эффективной ионизации для электромагнитного масс-сепаратора на пучке ускоренных тяжелых ионов ЛЯР ОИЯИ.

4. Исследование поведения в газоразрядном источнике ультромалых количеств радиоактивных атомов и оптимальных режимов его работы.

5. Разработка и создание быстродействующего высокотемпературного источника ионов с поверхностной термоионизацией для электромагнитного масс-сепаратора на пучке тяжелых ионов (БЭСМ-2) на основе источника типа "горячая полость" и исследование его характеристик.

6. Разработка высокоэффективного внешнего инжектора сепарированных ионов с ионным источником, расположенным в однородном магнитном поле, совместно с магнитным анализатором с магнитными экранами, формирующими кривое магнитное поле так, чтобы обеспечить двойную фокусировку экстрагированного из источника пучка ионов и согласование эмиттанса источника и акцептанса магнитного анализатора.

7. Разработка и исследование на макете инжектора ионов с высокой эффективностью экстракции их из плазмы, в котором применяются широкопертурные сеточные электроды, обеспечивающие извлечение ионов в широком угле захвата ( $\sim 1$  ст. рад.) и фокусировку пучка в пятно небольшого размера у входа в ускоряющий промежуток.

### Содержание диссертации

Во введении дается краткое обоснование актуальности разработок и исследований источников, инжекторов тяжелых ионов, предназначенных для использования на ускорителях заряженных частиц, на быстродействующих масс-сепараторах на пучке тяжелых ионов, на промышленных имплантаторах. Кратко изложены рассматриваемые в диссертации вопросы и основные положения, отмечается их научное и практическое значение.

В первой главе дается описание опытов по улучшению экстракции ионов  $C^{+2}$  и  $C^{+3}$ , проведенных на изохронном циклотроне У-240 с аксиальным источником легких ионов, на котором был установлен дополнительный электрод. На основе проведенных исследований делается вывод о необходимости разработки и создания для циклотрона У-240 универсального дугового источника МЗИ с катодом прямого и косвенного накала /1/.

Для испытания и исследования источников ионов создан испытательный стенд. Стенд создан на основе электромагнита М-20, ранее служившего моделью циклотрона У-240, и представляет собой 180-градусный масс-сепаратор с однорадным полем. Диаметр полюсов магнита увеличен до 1000 мм, а зазор между полюсами до 240 мм<sup>1/4</sup>.

На основе современных полупроводниковых устройств и теоретических представлений разработана и создана система высоковольтного силового импульсного питания дуги (СИПД) и другие системы питания источника ионов. СИПД осуществляет модуляцию тока дуги импульсами длительностью 0,2-10 мс с частотой повторения 50 гц и обеспечивает амплитуду импульсного напряжения до 3 кВ при токе до 15 А. На стенде проведены исследования работы универсального дугового источника с катодами прямого и косвенного накала. Для дугового источника МЗИ с катодом косвенного накала разработаны и созданы по безотходной технологии методами порошковой металлургии катодные узлы из спеченого порошкового W и Mo. Это существенно упростило и удешевило трудоемкий процесс изготовления катодов из металлического вольфрама. На основе разработанной технологии в ОКБ ИПМ АН УССР создан производственный участок для промышленного изготовления таких катодных узлов, способный обеспечить ими дуговые источники МЗИ тяжелоионных ускорителей и имплантаторов нашей страны и зарубежных стран. Вопрос возможного использования таких катодов изучается в настоящее время в Центральном институте ядерных исследований в Россендорфе (Германия).

С целью расширения диапазона использования газоразрядных источников тяжелых ионов, например, для получения ионов твердых веществ, были разработаны и созданы катоды и антикатоды из спеченого порошкового вольфрама с добавками рабочих веществ, работающие в условиях высоких температур ( $\geq 2500$  К) без обеднения поверхностного слоя рабочим веществом вплоть до разрушения его бомбардирующими ионами из разряда. Это достигается плотной упаковкой рабочего вещества в вольфрамовой ячейке, состоящей из спаянных диффузионной сваркой микронных зерен вольфрама. По мере распыления катода (антикатада) в течение действия импульса тока в разряд подается дозированное количество рабочего вещества. Этим достигается экономное расходование вещества в случае использования дефицитных, редких, дорогостоящих или агрессивных веществ а также веществ, не имеющих газообразных соединений в нормальных условиях. Таким способом были изготовлены и испытаны на стенде катоды и антикатоды с добавкой  $Al_2O_3$  в количестве 5%, 10%, 20% по объему; бор - 5%, 10%, 20% по объему;  $LiAlO_2$  - 5%, 10%, 20% по объему (см. таблицу № 1)<sup>5-6/</sup>.

В связи с реконструкцией и существенной модернизацией радиальных

источников МЗИ для изохронного циклотрона У-240 была разработана, сконструирована новая заземленная рамка с направляющими для перемещения радиального источника и точной его фиксации в заданном положении. Выбор положения выходной щели источника, фазовое движение при ускорении тяжелых ионов, центровка орбит производились на ЭВМ методом численного интегрирования уравнений движения заряженных частиц с использованием реальных, экспериментально измеренных распределений магнитного и электрического полей. В результате проведенных исследований и разработок на Киевском изохронном циклотроне У-240 ускорены ионы:<sup>2,3/</sup>

$C^{+3}$  - энергия 70 МэВ, ток 1,5 мкА;  
 $O^{+4}$  - энергия 87 МэВ, ток  $0,3 \pm 0,5$  мкА;  
 $N^{+4}$  - энергия 150 МэВ, ток  $0,1 \pm 0,3$  мкА.

Эти работы отмечены Государственной Республиканской премией УССР 1985 г., дипломом и медалью ВДНХ Украины.

На циклотроне У-300 ЛЯР ОИЯИ при помощи катодов и антикатодов, содержащих  $Al_2O_3$  в количестве 10% по объему, получен выделенный пучок ускоренных ионов  $Al^{+6}$  ( $\sim 2$  нА).

На циклотроне У-120 в Россендорфе в Центральном институте ядерных исследований при использовании в дуговом источнике приближенного к щели антикатада, содержащего соединения  $LiAlO_2$  в количестве 20% по объему, получен выведенный пучок ионов  $Li^{+3}$  ( $\sim 2$  нА).

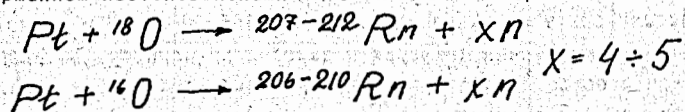
Во второй главе дается описание быстродействующего газоразрядного источника для электромагнитного масс-сепаратора на пучке тяжелых ионов циклотрона У-300 в ЛЯР ОИЯИ. Магнитный анализатор масс-сепаратора создан на базе электромагнита СП-57 промышленного изготовления. Двойная фокусировка пучка ионов осуществляется в однородном магнитном поле и в поле рассеяния на входе и выходе магнита при пересечении им эффективной границы магнитного поля под косым углом. Для формирования линейного спада рассеянного поля у входной и выходной границ полюсных наконечников установлены магнитные экраны. Основные характеристики магнитного анализатора:

$R = 70$  см;  $\phi = 90^\circ$ ;  $l_1 = 130$  см;  $l_2 = 81$  см;  $\epsilon_1 = 0^\circ$ ;  
 $\epsilon_2 = 45^\circ$ ;  $D = 11,6$  мм на 1% изменения массы, где  $R$  - радиус центральной траектории,  $\phi$  - угол поворота центральной частицы;  
 $l_{1,2}$  - входное и выходное плечо анализатора;  $\epsilon_{1,2}$  - угол входа и выхода главной частицы<sup>17-9/</sup>.

Разрешающая способность  $\sim 400$  достаточно для надежной идентификации масс изотопов - продуктов ядерных реакций вплоть до самых тяжелых. Для начальной проверки магнитной оптики масс-сепаратора использовался коллимированный пучок  $\alpha$  - частиц, источником которых служил  $Cm^{244}$ ,

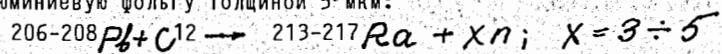
рической формы с радиусом кривизны  $R = 11$  мм изготовлен из листового тантала толщиной 0,2 мм. Анод изготовлен из вольфрамовой проволоки диаметром 1 мм, изоляторы - из нитрида бора. Держатели мишени выполнены из меди и охлаждаются водой. <sup>1121</sup>

В опытах на пучке разряд в источнике горел на аргоне. Ускоренные на циклотроне У-300 ЛЯР ОИЯИ тяжелые ионы бомбардируют тонкую мишень (стрелка А), выбивая из нее продукты ядерных реакций. Выбитые атомы внедряются в нагретый до  $T \sim 2500^\circ\text{C}$  катод-стопор на глубину до нескольких микрон. Внедренные атомы диффундируют к поверхности катада-стопора и испаряются, попадая непосредственно в газовый разряд. Тщательное исследование режимов работы этого источника проводилось на смеси газов 5% Хе и 95% Аг. Они показали высокую эффективность ионизации ксенона  $\sim 22\%$ , стабильность и надежность источника в работе (рис. 4). Другие характеристики источника и масс-сепаратора в целом были изучены в опытах на выведенном пучке ускоренных ионов циклотрона У-300 по идентификации радиоактивных изотопов радона  $^{206-212}\text{Rn}$ , которые получались путем облучения 5-микронной платиновой фольги с природным содержанием изотопов ионами  $^{16}\text{O}$  и  $^{18}\text{O}$  с энергией 80-90 МэВ:



Как показали эксперименты "на пучке", эффективность сепарации изотопов радона оказалась равной  $40 \pm 60\%$ .

Для проверки быстроты действия ионного источника при работе на пучке были проведены опыты по наблюдению короткоживущих изотопов радия и радона. Изотопы радия получались путем бомбардировки ускоренными ионами  $^{12}\text{C}$  ( $E \sim 80$  МэВ) мишени из окиси свинца, нанесенной на алюминиевую фольгу толщиной 5 мкм:



Альфа-распад продуктов этих реакций приводил к образованию изотопов радона  $^{209-213}\text{Rn}$ . Быстроту действия источника ионов характеризует факт наблюдения среди разделенных продуктов ядерных реакций  $^{213}\text{Rn}$  с периодом полураспада 20,5 мс и  $^{215}\text{Ra}$  с периодом полураспада 1,6 мс.

Примером использования ЭМСНАПТИ с разработанным источником ионов могут служить опыты, проведенные на выведенном из циклотрона У-300 ЛЯР ОИЯИ пучке ускоренных тяжелых ионов, по идентификации и использованию радиоактивных свойств изотопов висмута, франция, радона и др. элементов.

В третьей главе, посвященной разработке и созданию быстродействующего источника ионов с поверхностной термоионизацией щелочных и редкоземельных элементов - продуктов ядерных реакций для масс-сепаратора на пучке (БЭСМ-2), дается описание конструкции и приводятся результаты исследования источника на пучке тяжелых ионов, ускоренных на циклотроне У-300 ЛЯР ОИЯИ. Источник отличается простотой конструкции и систем питания, надежностью в работе и простотой управления. Он состоит из ионизатора (рис. 5), выполненного из вольфрама в виде полого цилиндра - стакана (5) диаметром 19 мм и протяженностью 25 мм, в доннышке которого имеется отверстие диаметром 1 мм. Внутри ионизатора вплотную ко дну стакана крепится стопор (6) ядер отдачи. Входное окно ионизатора со стороны мишени (3) закрыто танталовой фольгой диаметром 18 мм и толщиной 1,4 мкм. Электронным пучком, формируемым нитью накала (4), ионизатор разогревается до рабочей температуры ( $2500\text{ K}$ ).

Способ доставки продуктов ядерных реакций в источник аналогичен ранее описанному. Выбитые из мишени и внедренные в стопор на небольшую глубину (несколько микрон) ядра отдачи диффундируют к поверхности и испаряются во внутреннюю полость источника. Соударяясь со стенками ионизатора, разогретыми до  $T \sim 2500\text{ K}$ , атомы с вероятностью, соответствующей закону Саха-Ленгlera  $\varrho \sim \exp[(E-\varphi)/kT]$ , ионизируются и после некоторого числа соударений со стенками попадают в район выходного отверстия  $\varnothing 1$  мм, где на них действует поле вытягивающего электрода. Продолжительность непрерывной работы на пучке при  $T \sim 2200^\circ\text{C}$  составляла 15 часов и определялась, главным образом, сроком службы входной фольги из тантала или вольфрама.

Температурная зависимость выхода  $\text{Eu}, \text{Dy}, \text{La}$  и  $\text{Ba}$  дана на рис. 6. Использовался стопор из тантала и вольфрама. В опытах на пучке эффективность источника оценивалась по выходу радиоактивных изотопов  $^{127}\text{Cs}$  ( $T_{1/2} = 6,2$  часа) и  $^{126}\text{Ba}$  ( $T_{1/2} = 97$  мин.), образующихся в реакции  $^{102}\text{Pd} + {}^{22}\text{F}$ .

Разделение изотопов проводилось при температуре ионизатора  $2100^\circ\text{C}$ . Установлено, что эффективность источника лежит в пределах для цезия от 50% до 80%, для берия от 30% до 50%. Температурная зависимость эффективности сепарации  $^{140}\text{Eu}$ ,  $^{150}\text{Dy}$ ,  $^{126}\text{La}$  (рис. 6), образующихся в мишенях из  $^{112}\text{Sn}$ ,  $^{124}\text{Sn}$ ,  $^{98}\text{Ru}$  соответственно при облучении их ускоренными ионами  $^{32}\text{S}$  (190 МэВ), была изучена с помощью модернизированного источника, показанного на рис. 7. Изменение формы ионизатора произведено с целью увеличения надежности и продолжительности работы источника в режиме на пучке; т.к. в этом случае фольга, закрывающая входное окно, будет иметь более низкую температуру.

Сравнительно высокая эффективность источника для редких земель обусловлена, на наш взгляд, провисанием электрического поля внутри ионизатора и отбором ионов из глубины объема, где потенциал электрического поля  $U$  отвечает условию:  $e(U-U_0) \gg E$ . Здесь  $U_0$  - потенциал ионизатора,  $E$  - тепловая энергия иона.

Быстрота действия источника, обусловленная главным образом скоростью диффузии воитых в стопор ядер отдачи, определялась в опытах на пучке для изотопов  $^{150}\text{Dy}$ ,  $^{134}\text{Pm}$ ,  $^{131}\text{Pr}$ ,  $^{122}\text{Ba}$ ,  $^{77}\text{Rb}$  (рис. 8). В этих опытах пучок бомбардирующих частиц периодически перекрывался заслонкой, и измерялось накопление активности на фокальной плоскости сепаратора в зависимости от времени. Измеренное время выхо- ионов для вышеуказанных изотопов редкоземельных элементов, а также бария и рубидия при температуре ионизатора 2500-2700 К составляло  $5 \pm 10$  сек.

Разработанная и созданная методика физического эксперимента на пучке циклотрона У-300 ЛЯР ОИЯИ позволила провести исследования, следствием которых явилось открытие новых изотопов - излучателей за- паздывающих протонов и более тщательное и полное изучение некоторых других, наблюдавшихся ранее.

В четвертой главе дается описание внешних инжекторов МЗИ для ускорителей и промышленных имплантаторов.

Проект внешнего инжектора сепарированных ионов (ВИСИ) был разработан в связи с созданием на циклотроне У-240 системы аксиальной инжекции пучка ионов от внешнего источника. Инжектор состоит из дугового источника МЗИ 4, магнита источника 5, магнитного экрана 2 и магнитного анализатора 1 (рис. 9). Повышение эффективности извлечения ионов из внешнего дугового источника, и тем самым, повышение интенсивности пучка на выходе инжектора достигается за счет радиальной фокусировки экстрагированного из источника пучка в поле магнита источника и аксиальной фокусировки при пересечении им под углом выходной границы рассеянного поля, сформированного при помощи магнитного экрана. Согласование эмиттанса источника ионов и аксептанса магнитного анализатора достигается тем, что выходная эффективная граница магнитного поля источника ионов формируется так, чтобы касательные к траекториям ионов, достигших эффективной границы, пересекались с главной траекторией магнитного анализатора на расстоянии, равном входному плечу магнитного анализатора  $l_1$ . Угол поворота ионов в магнитном поле источника  $\phi$  и угол наклона эффективной границы  $\epsilon_{20}$ , определяющий фокусировку и согласование пучка в вертикальной плоскости, рассчитываются по формулам:

$$\text{tg } \psi_{1,2} = \text{tg } \epsilon_{1,2} + R/l_{1,2}; \quad \psi_1 + \psi_2 = \phi; \quad \omega_1 + \omega_2 = \phi$$

$$\omega_1 = [\text{tg } \epsilon_1 - c(1 + \sin^2 \epsilon_1) / 3R \cos^2 \epsilon_1]^{-1}$$

$$\omega_2 = [\text{tg } \epsilon_2 - c(1 + \sin^2 \epsilon_2) / 3R \cos^2 \epsilon_2 - R/l_2]^{-1}$$

где  $\epsilon_{1,2}$  и  $l_{1,2}$  - угол и плечо на входе и выходе магнитного анализатора;

$2c$  - протяженность краевого магнитного поля.

Увеличение угла захвата ионов ( $2\omega$ ) в предлагаемом инжекторе до  $15^\circ$  (вместо обычных  $6^\circ$ ) достигается за счет более близкого расположения выходной щели источника ко входу в магнитный анализатор и фокусирующего действия однородного магнитного поля источника на расходящийся пучок. В качестве магнитного анализатора используется разработанный нами ранее магнитный анализатор мосс-сепаратора ЭМСНАПТИ, выполненный в масштабе 1:2. Таким образом, реализация фокусировки ионов, экстрагированных из дугового источника в пределах более широкого угла захвата с использованием магнитного анализатора, позволяет получить пучок сепарированных по заряду (массе) ионов в несколько десятков раз более интенсивный, чем без фокусировки: <sup>123/</sup>

Анализ современных методов ионизации атомов и источников ионов показывает, что весьма перспективным направлением может быть использование высокотемпературной лазерной плазмы, в которой идентифицированы двадцати и более высокозарядные ионы тяжелых элементов, а также полностью ободанные ядра некоторых легких элементов <sup>\*)/19, 20/</sup>.

Задача получения пучка МЗИ в этом случае сводится к примерению лазерной установки соответствующей мощности для производства лазерной плазмы, разработке и созданию систем эффективного извлечения ионов из плазмы и формирования пучка. В связи с этим нами были проведены опыты по исследованию лазерной плазмы, в частности, изучению влияния кратера на поверхности твердотельной мишени, возникающего под действием сфокусированного лазерного излучения, на выход МЗИ из лазерной плазмы. Опыты проводились на стенде источников ионов с использованием лазера ЛТИПЧ-7 промышленного изготовления.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при образовании кратера на поверхности мишени падает выход ионов, особенно МЗИ (рис. 10). Эти результаты указывают на необходимость использования в конструкции источника устройства сканирования мишени,

\*) Ананьин О.Б. Получение ядер углерода и алюминия в лазерном источнике МЗИ. Письма в ЖЭТФ - 1972, - 16 - с. 518.

либо пытаться использовать в качестве мишени газовую или жидкую струю, истекающую в вакуум.

Телесный угол использования ионов разлетающейся лазерной плазмы в случае применения диафрагм или длинной трубы обычно очень мал ( $10^{-3}$  ст.рад.). Кроме того, характерной особенностью МЗИ-лазерной плазмы является большой энергетический разброс ионов, величина которого может достигать 5 и более КэВ. Большой энергетический разброс является серьезным препятствием для инжекции и ускорения. Улучшить эффективность использования МЗИ, образующихся в плазменном факеле, можно оптимизацией условий отбора и фокусировки пучка ионов непосредственно вблизи образования, а также за счет монохроматизации частиц в пучке изменяющимся со временем электрическим полем. С этой целью вблизи мишени М (рис. 11), облучаемой лазерным излучением, располагается фокусирующий сферический электрод с отверстием напротив мишени и конусный электрод с системой стандартных фокусирующих электродов. Напряженность электрического поля между электродами выбирается и регулируется в необходимых пределах величиной соответствующих потенциалов на них. На расстоянии  $L$  от заземленного электрода располагается два индукционных кольца с электрическими обмотками. Эффект монохроматизации быстро изменяющимся электрическим полем обусловлен временной и пространственной дисперсией частиц в пучке за счет разлета (растяжки) немонахроматичных ионов на базе пролета. Коэффициент усиления инжектора равен отношению телесных углов  $\Omega_2 / \Omega_1$  и может составлять величину порядка нескольких десятков. Инжектор может быть использован на ускорителях заряженных частиц и промышленных имплантаторах. Однако, для данной системы электродов с растом угла захвата ионов  $\Omega_1$  быстро растут aberrации, что не позволяет реализовать большой коэффициент усиления [21, 22].

В связи с этим нами был разработан и создан инжектор высокозарядных ионов, в котором применялись широкоапертурные безабберационные сеточные электроды сферической формы (рис. 12). Инжектор состоит из корпуса 1, мишени М, двух соленоидов 6 и 7 и двух систем сеточных сферических электродов I и II. Сеточные электроды I и II соответственно состоят из 2 и 3 тонких вольфрамовых сеток с ячейками  $130 \text{ мкм} \times 130 \text{ мкм}$  [21].

В качестве мишени предполагается использовать тонкую газовую или жидкую струю, в которых при определенных параметрах лазерного излучения осуществляется оптический пробой и образование лазерной плазмы. Электроды I и II экстрагируют ионы из плазмы и фокусируют в пределах телесного угла до 1 ст.рад. и более. Действие инжектора ясно из рисунка 12. Для уменьшения потерь ионов вследствие поперечного движения разлетающейся плазмы используется аксиальная компрессия плазмы импульс-

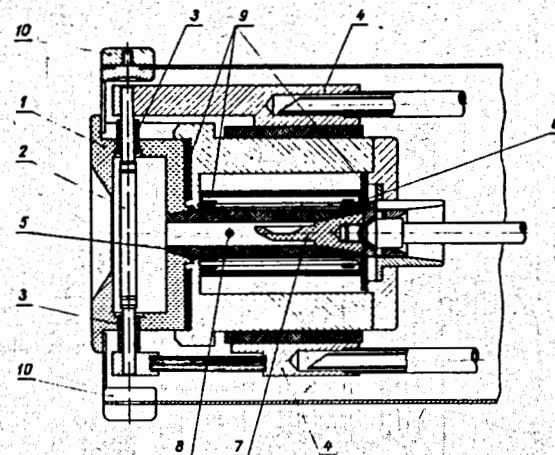


Рис. 1. Схематический чертеж ионного источника.

1. Разрядная камера, 2. Катод, 3. Изоляторы (нитрид бора), 4. Токоподводы, 5. Тигель, 6. Нагреватель, 7. Загрузочная ложка, 8. Газ, 9. Тепловые экраны, 10. Полюсные наконечники.

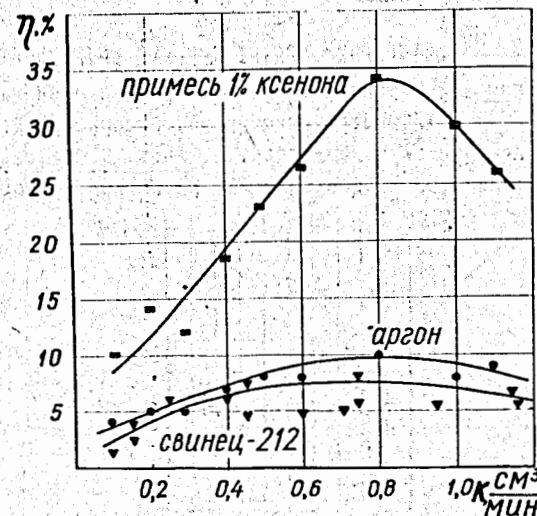


Рис. 2. Эффективность источника в зависимости от скорости натекания газа: ● - аргон, □ - примесь 1% ксенона, ▼ - свинец 212.



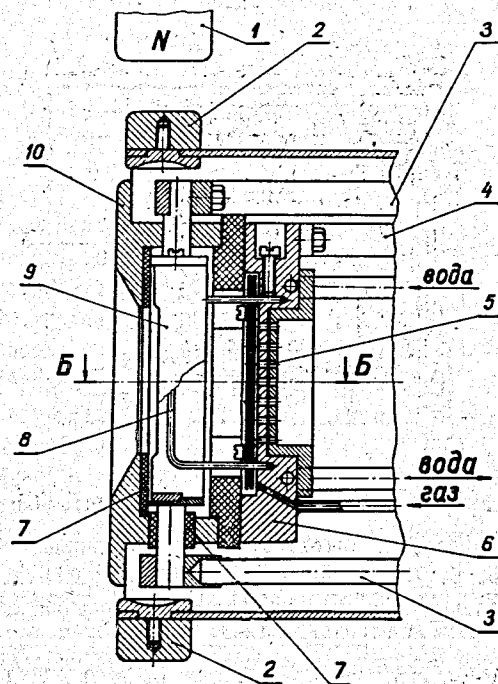


Рис. 3. Схематический чертеж ионного источника.

1. Электромагнит. 2. Промежуточные полюсные наконечники.
3. Токосные шины. 4. Держатель мишени. 5. Мишень. 6. Корпус мишени.
7. Электрические изоляторы. 8. Анод. 9. Катод, он же - стопор продуктов ядерных реакций. 10. Разрядная камера.

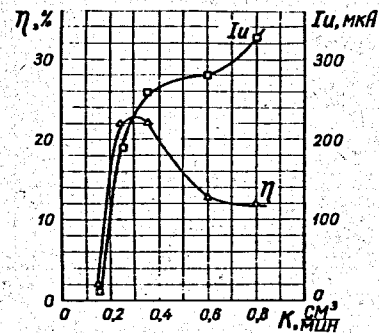


Рис. 4. Ток ионов ксенона  $I_u$  (□) и эффективность сепарации ксенона  $\eta$  (Δ) при работе на смеси  $5\% \text{ Xe} + 95\% \text{ Ar}$  в зависимости от скорости поступления газа  $K$  при оптимальных параметрах разряда.

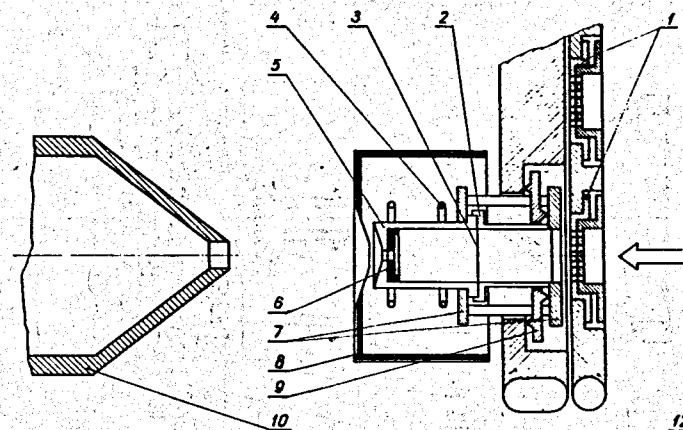


Рис. 5. Конструкция ионного источника с внешней мишенью.

1. Держатель мишени. 2. Опорный цилиндр. 3. Фольга из Ta или W.
4. Нить канала. 5. Ионизатор из вольфрама. 6. Стопор.
7. Танталовые кольца. 8. Экран. 9. Кольцо из титана.
10. Вытягивающий электрод.

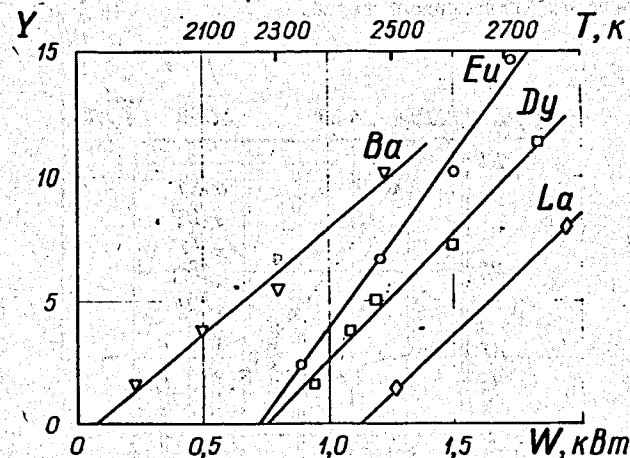


Рис. 6. Зависимость эффективности сепарации  $Dy, Eu$  и  $La$  (в отн. ед.) от мощности электронного пучка, нагревающего ионизатор. Для сравнения приведен выход  $Ba$ ,  $T_{пор}$  для которого существенно ниже, чем для редких земель.

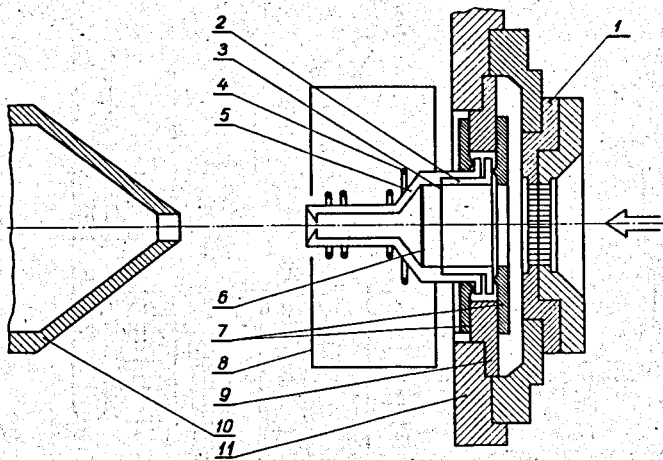


Рис. 7. Схематический вид ионного источника.

1. Кассета с мишенью.
2. Цилиндр из тантала.
3. Фольга, Та.
4. Нить накала.
5. Ионизатор,  $W$ .
6. Стопор, Та.
7. Кольца, Та.
8. Экран.
9. Кольцо, Та.
10. Вытягивающий электрод.
11. Держатель, охлаждаемый водой.

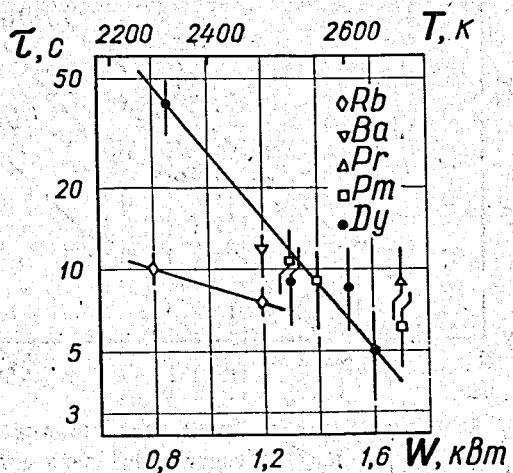


Рис. 8. Зависимость времени удержания  $Dy$ ,  $Pm$ ,  $Pr$ ,  $Ba$ ,  $Rb$  в ионном источнике от мощности подгрева ионизатора.

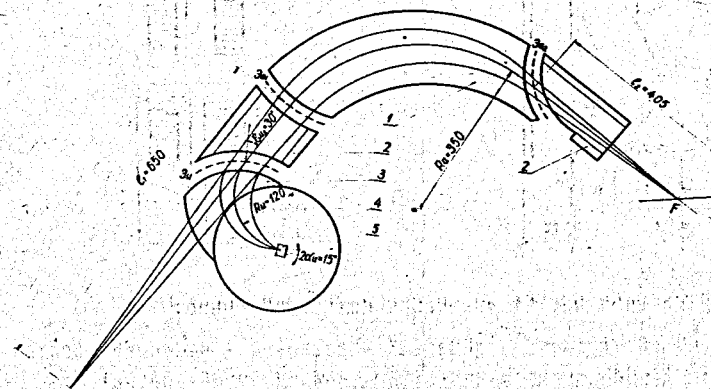


Рис. 9. Внешний инжектор сепарированных ионов.

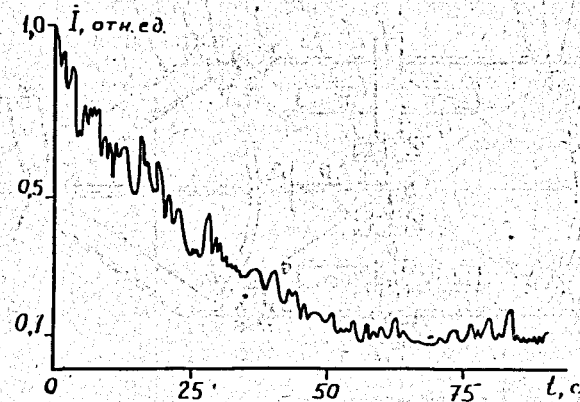


Рис. 10. Изменение тока ионов, извлекаемых из источника, при образовании кратера на поверхности мишени;  $t$  — время, прошедшее после перемещения лазерного луча на новый участок мишени.

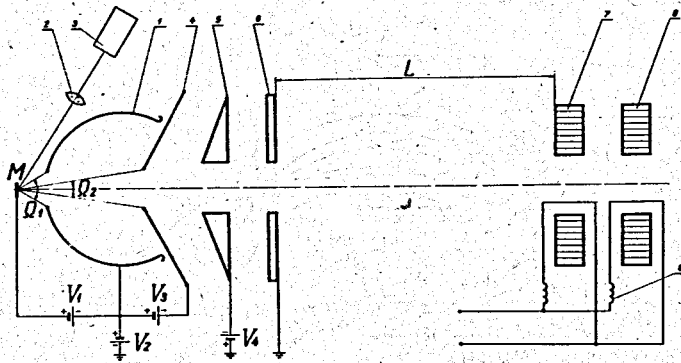


Рис. 11. Схематический чертёж лазерного источника ионов:

- 1 - сферический электрод; 2 - линза; 3 - лазер; 4 - конусный электрод;  
5, 6 - электроды формирования пучка; 7, 8 - индукционные кольца;  
9 - обмотка индукционных колец.

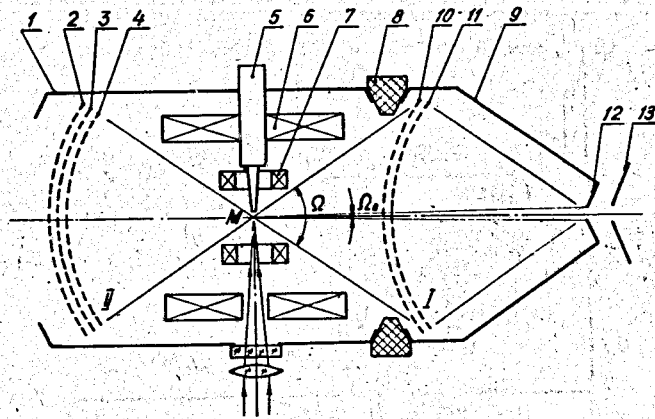


Рис. 12. Схематический чертёж ЛИВИ.

- I-II - Сеточные электроды сферической формы, I, 9 - стальной корпус, 2 - отражающий электрод, 3, II - экстрагирующий электрод, 4, 10 - электрод, формирующий границу плазмы, 5 - газовый клапан, 6, 7 - соленоиды, 8 - изолятор, 12, 13 - электроды, фокусирующие пучок ионов.

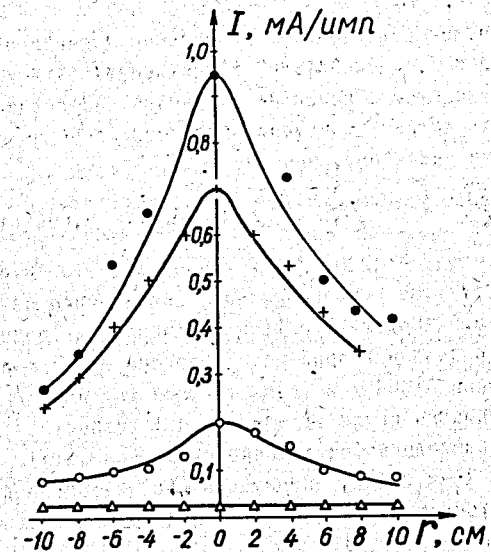


Рис. 13. Распределение тока ионов на ламелях детектора ( $\Gamma$  - расстояние ламели от оси ионного пучка) для сеточного электрода I при различных значениях потенциала  $U_{11}$ .

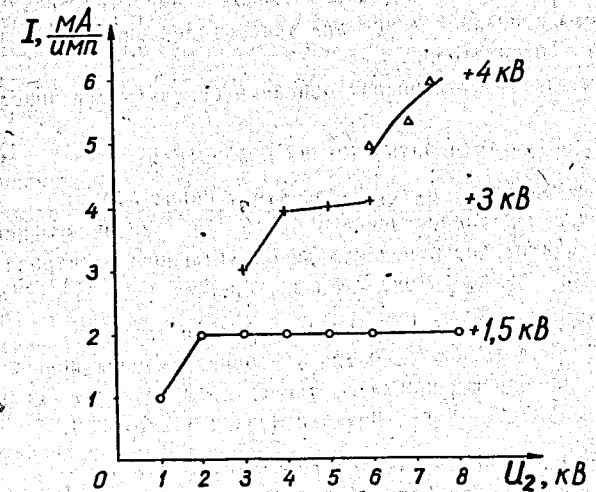


Рис. 14. Зависимость суммарного тока ионов для сеточного электрода II от потенциала  $U_2$  при различных значениях потенциала  $U_3$ .

ным магнитным полем соленоида 6. Поперечное магнитное поле, создаваемое соленоидом 7, способствует эффективному торможению лазерной плазмы и, как следствие, приводит к сужению энергетического спектра ионов плазмы вследствие уменьшения разброса ионов по энергиям. Коэффициент усиления инжектора, равный

$$K = K_1 + K_2 = P^2 \frac{\Omega_1}{\Omega_2} + P^2 \frac{\Omega_1'}{\Omega_2'} \quad \text{при} \quad \Omega_2 = 0,004 \text{ ст. рад и}$$

$\Omega_1 = 0,85 \text{ ст. рад, } K \sim 200$ , где  $P$  - прозрачность сеток (0,9).

Для изучения структуры ионного пучка, извлекаемого из лазерной плазмы и формируемого электродами I и II цилиндрической формы, на стенде был изготовлен многоканальный пробник, состоящий из 32-х ламелей. В экспериментах с лазером СТИПЧ-7 и твердотельной мишенью с ростом экстрагирующего потенциала на сетке II электрода I возрастал ток на центральную ламель и наблюдалась фокусировка пучка (рис. 13).

Зависимость тока ионов, принимаемых на 32 ламели детектора, от потенциала на отражающей сетке 2 при разных значениях потенциала на сетке 4 приведена на рис. 14.

Работы на ЛИВИ-2 были включены в общесоюзную научно-техническую программу 1986-1990 гг. в соответствии с Постановлением ГК НТ и АН СССР № 573/137 от 10.11.85, а также Приложением к распоряжению Президиума АН УССР № 2799 от 26.12.85 г.

ЛИВИ-2 предназначен для использования в качестве внешнего источника высокозарядных ионов для ускорителей заряженных частиц и промышленных имплантаторов.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

Основные результаты опубликованы в работах:

1. Демьянов А.В., Линев А.Ф., Кулиш А.Н., Папаш А.И. Исследование экстракции ионов  $^{12}\text{C}^{+2}$  и  $^{12}\text{C}^{+3}$  из аксиального источника циклотрона с помощью дополнительного электрода. Препринт КИЯИ-82-6, - 1982 - с. 38, Киев.
2. Безрук А.И., Вальков А.Е., Демьянов А.В. и др. Подготовка циклотрона У-240 для ускорения тяжелых ионов. Труды Всесоюзного Совещания по ускорителям низких и средних энергий. - 1982, г. Киев, Наукова Думка, - стр. 200.
3. Безрук А.И., Вальков А.Е., Демьянов А.В. и др. Подготовка режима ускорения тяжелых ионов на циклотроне У-240. В сборнике: Комплекс основных работ, выполненных на изохронном циклотроне У-240 в области физики ускорителей и техники ядерного эксперимента. - 1982, Киев. Препринт КИЯИ-82-15, - 1982.

4. Демьянов А.В., Линев А.Ф., Папаш А.И. и др. Стенд для испытания источника МЗИ. - 1983. Препринт КИЯИ 83-21. - 17 с.
5. Демьянов А.В. и др. Исследование выхода МЗИ из дугового циклотронного источника с катодами, изготовленными методами порошковой металлургии. Аннотация докладов на XI Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц. - 1985, с. 104-108. Депонированная статья ОИЯИ № Б 1-9-86-36, 1986.
6. Демьянов А.В. и др. Применение композиционных катодов для получения МЗИ твердых веществ. Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. - Дубна, 1986, с. 65.
7. Tarantin N.I., Demyanov A.V. et al. The Electromagnetic Isotope Separator of the Laboratory of Nuclear Reactions JINR // Nucl. Instr. Meth. - 1965. - 38. - p. 103.
8. Демьянов А.В., Тарантин Н.И. и др. Описание электромагнитного масс-сепаратора и его характеристика. ПТЭ - 1966, № 2, стр. 28.
9. Тарантин Н.И., Демьянов А.В. и др. Электромагнитный масс-сепаратор Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Дубна, 1965. - Препринт 2377. - с. 9.
10. Tarantin N.I., Kabachenko A.P., Demyanov A.V. et al. Gas Discharge Ion Source for an Electromagnetic Mass-Separator on-line with Heavy Ion Cyclotron // Proc. Intern. Conf. on Mass-Spectroscopy. - 1970. - Kyoto Japan. - p. 548.
11. Демьянов А.В. и др. Исследование возможности применения ионного источника магнетронного типа в электромагнитном сепараторе в линии с циклотроном. Атомная энергия, - 1969, - т. 27, в. 4. - с. 308. Препринт - Дубна, ОИЯИ, P13-3953. - 1968.
12. Тарантин Н.И., Демьянов А.В., Иванов Н.С., Кобаченко А.П. газоразрядный ионный источник для электромагнитного масс-сепаратора на пучке циклотрона тяжелых ионов. Атомная энергия. - 1969. - т. 27. - в. 4. - с. 304-308; Препринт - Дубна ОИЯИ-1968 P13-4061.
13. Карнаухов В.А., Демьянов А.В. и др. Масс-сепаратор БЭСМ-2 на пучке тяжелых ионов. Препринт - Дубна, ОИЯИ, P13-7657. - 1974.
14. Богданов Д.Д., Демьянов А.В. и др. БЭСМ-2 масс-сепаратор на пучке тяжелых ионов. 25-е Совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. - Ленинград. - 1975. - с. 441.

15. Karnaukhov V.A., Bogdanov D.D., Demyanov A.V. et al. The BESM-2 on-line Isotope Separator at the JINR Heavy Ion Cyclotron // Nucl. Instr. Meth. - 1974, -120. - p. 69.
16. Богданов Д.Д., Воборжил И., Демьянов А.В. Ионный источник с поверхностной ионизацией для БЭСМ-2 - масс-сепаратора на пучке тяжелых ионов. ПТЭ. - 1977. - 1 1. - с. 22.
17. Bogdanov D.D., Voboril J., Demyanov A.V. et al. A Surface-Ionization Ion Source Designed for In-Beam Operation with the BESM-2 Isotope Separator // NIM-1976. - 136. - p. 433.
18. Богданов Д.Д., Воборжил И., Демьянов А.В. и др. Ионный источник с поверхностной ионизацией для БЭСМ-2 масс-сепаратора на пучке тяжелых ионов. Дубна, Препринт ОИЯИ. - P13-8691. - 1975.
19. Демьянов А.В. и др. Влияние кратера на поверхности мишени на выход ионов из лазерной плазмы. Препринт КИЯИ-86-34, - Киев. - 1988.
20. Демьянов А.В. и др. Перспективы работ с тяжелыми ионами на изохронном циклотроне У-240. Препринт КИЯИ-83-23, ИЯИ АН УССР, Киев, - 1983.
21. Авдеев С.В., Демьянов А.В. и др. Лазерный источник высокозарядных ионов на основе электроионизационного CO<sub>2</sub>-лазера. Препринт НИИ ЭФА п-К-0832, Москва, ЦНИИАТОМИНФОРМ. - 1989.
22. Демьянов А.В., Линев А.Ф. Инжектор МЗИ. Труды Всесоюзного совещания "Ускорители ионов низких и средних энергий" - Киев, 1982, с. 266.
23. Демьянов А.В., Линев А.Ф. Внешний инжектор сепарированных ионов (ВИСИ). Аннотация к докладу и доклад на XII Всесоюзном Советании по ускорителям заряженных частиц. - 1990. - Москва.