

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

9-98-322

На правах рукописи  
УДК 621.3.038.612

Б-744

**БОГОМОЛОВ**  
Сергей Леопольдович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ЦИКЛОТРОННОГО ИСТОЧНИКА  
ПЕННИНГОВСКОГО ТИПА  
С ПОДОГРЕВНЫМ КАТОДОМ  
С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ПУЧКОВ  
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ ГАЗОВ  
И ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ**

Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных  
частиц и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Дубна 1998

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им.Г.Н.Флерова  
Объединенного института ядерных исследований.

## Общая характеристика работы.

**Научный руководитель**  
кандидат технических наук  
старший научный сотрудник

В.Б. Кутнер

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук

И.А. Шелаев

доктор физико-математических  
наук

И.А. Косый

**Ведущая научная организация:**

Российский научный центр "Курчатовский институт"  
Институт общей и ядерной физики, г.Москва

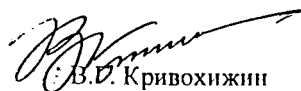
Защита диссертации состоится " " 1999 г. в " " часов  
на заседании специализированного совета Д-047.01.06 при Лаборатории  
сверхвысоких энергий Объединенного института ядерных исследований,  
г.Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " " 1998 г.

**Ученый секретарь**  
специализированного совета

кандидат физико-математических  
наук

  
В.В. Кривохижин

### Актуальность проблемы.

Достижения атомной и ядерной физики, физики элементарных частиц неразрывно связаны с разработкой и совершенствованием методов и техники получения интенсивных потоков ускоренных частиц. За последнее время потоки ускоренных частиц стали незаменимым инструментом также для физики плазмы и исследований по управляемому термоядерному синтезу, физики твердого тела, химии, биологии, медицины, важнейших областей новой техники и технологии.

В ядерной физике широкое применение нашли ускоренные пучки тяжелых ионов. Исследования с тяжелыми ионами имеют исключительные возможности как в области изучения фундаментальных проблем, так и в решении прикладных и технологических задач. Возможности решения тех или иных фундаментальных и прикладных задач с помощью пучков тяжелых ионов определяются уровнем развития ускорительной техники.

Более 40 лет назад в Лаборатории ядерных реакций для решения проблемы получения ускоренных тяжелых ионов был выбран циклотронный метод ускорения. В 1955 году на 150 см циклотроне ИАЭ были получены пучки ионов углерода, азота и кислорода с интенсивностью до  $10^{12}$  частиц/сек и энергией до 6 МэВ/нуклон<sup>1</sup>. Для получения многозарядных ионов был использован дуговой источник с подогревным катодом, разработанный Б.Н.Маковым, П.А.Морозовым и М.С.Иоффе<sup>2</sup>. В дальнейшем, при развитии ускорительной базы ЛЯР - строительстве циклотронов У-300, У-150, У-200, У-400, ИЦ-100, У-400М - за основу была принята эта конструкция источника.

В результате более чем 30-летнего совершенствования источника были найдены существенные возможности повышения интенсивности и заряда ионов (импульсный режим работы источника, использование катодов из тантала и другие) а также создания различных модификаций конструкции, позволяющих получать интенсивные пучки ионов редких изотопов таких как <sup>48</sup>Ca, <sup>50</sup>Ti, <sup>54</sup>Cr, <sup>58</sup>Fe и других, используя исходное вещество непосредственно в твердой фазе<sup>3</sup>.

Источник данного типа был применен на циклотронах и имплантаторах Франции, США, Японии. На ускорительном комплексе GSI (Darmstadt) дуговой источник с подогревным катодом продолжает использоваться для проведения экспериментов, требующих высокой интенсивности ускоренного пучка. Ведутся интенсивные работы по его усовершенствованию, чтобы обеспечить следующий этап модернизации Национального ускорительного комплекса тяжелых ионов Германии.

Однако в последние годы существенный прогресс достигнут в развитии источников многозарядных ионов, основанных на явлении нагрева электронов на частоте электронно-циклотронного резонанса (ECR).

<sup>1</sup> Л.М.Неменов и др. Полугораметровый циклотрон с постоянной частотой  
Атомная энергия 1957, т.2, N1, стр.36 - 41

<sup>2</sup> П.М.Морозов, Б.Н.Маков, М.С.Иоффе Источник многозарядных ионов для циклотрона  
Атомная энергия 1957, т.2, N3, стр.272 - 275

<sup>3</sup> G.N.Flerov et al. Acceleration of <sup>48</sup>Ca ions and new possibilities of synthesizing superheavy elements.  
Nuclear Physics 1976, A267, N2, p.359 - 364

Объединенный институт  
ядерных исследований  
Библиотека

Сравнение характеристик дугового источника с подогретым катодом (PIG) и ECR источника, а также других источников многозарядных ионов показано на Рис.1, где приведена диаграмма заряд-интенсивность<sup>4</sup>. Видно, что в области относительно низких зарядов (отношение  $A/Z > 10$ ) источник PIG существенно превосходит ECR по интенсивности, хотя ECR источник несомненно имеет ряд преимуществ, таких как продолжительность непрерывной работы, временная стабильность и качество пучка. Источники PIG и ECR дополняют друг друга. Таким образом, для решения фундаментальных и прикладных задач физики тяжелых ионов с использованием широкого диапазона масс и энергий ускоренных пучков необходимо применение различных типов ионных источников. Например, для циклотронного комплекса ЛЯР - PIG, ECR; для ускорительного комплекса GSI - PIG, MEVVA, CHORDIS, ECR. Поэтому проблема исследования и усовершенствования ионных источников типа PIG остается весьма актуальной.

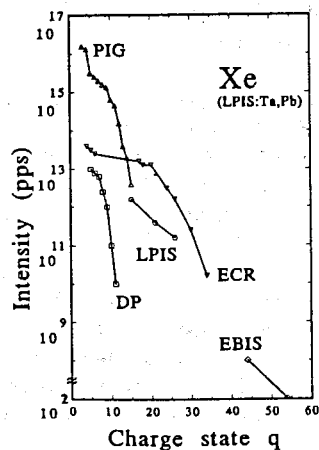


Рис.1 Интенсивность пучков ионов Xe, получаемых из источников типа PIG, дуоплазматрон (DP), лазерный (LPIS), ECR, и электронно-лучевого (EBIS).

#### Цель работы -

1. Исследование режимов работы источника и изучение условий увеличения интенсивности извлекаемых пучков.
2. Получения интенсивных пучков ионов газов и твердых веществ в циклотронном источнике многозарядных ионов с дополнительным анодом.
3. Получение интенсивных пучков многозарядных ионов обогащенных изотопов на циклотроне У-400.

#### Научная новизна:

1. Проведены исследования зарядового состава ионов при извлечении пучков с развитой эмиссионной поверхности.
2. Разработана конструкция дугового источника для получения многозарядных ионов тугоплавких металлов.

<sup>4</sup> V.B.Kutner Intense high charge state ion sources. Rev. Sci. Instr. 1994, v.65, N4, p.1039 - 1064

3. Исследовано получение многозарядных ионов твердых веществ в циклотронном источнике с дополнительным анодом.
4. Впервые предложен способ получения селективного по зарядам пучка ионов из циклотронного источника многозарядных ионов с дополнительным анодом.
5. Предложен метод получения пучков ионов твердых веществ из дуговых источников с мультипольным магнитным полем.

#### Практическая ценность работы:

1. Результаты исследований, полученные в диссертации, использованы при совершенствовании дуговых источников многозарядных ионов с косвенным подогревом катода.
2. Проведенные исследования показывают, что увеличение интенсивности извлекаемых из плазмы циклотронного дугового источника многозарядных ионов без ухудшения зарядового состава возможно как за счет геометрического развития эмиссионной поверхности плазмы разряда, так и за счет дополнительного притока ионов из объема плазмы при создании скрещенных электрического и магнитного полей.
3. Предложены конструкции интенсивных источников ионов тугоплавких металлов.

**Апробация работы.** Результаты исследований, положенных в основу диссертации, докладывались на XVIII International Conference on Phenomena on Ionized Gases (Swansea, U.K., 1987), XIV Summer School and International Symposium on Physics of Ionized Gases (Saraevo, Yugoslavia, 1988), на IV (Bensheim, Germany, 1991), VI (Whistler, Canada, 1995) и VII (Taormina, Italy, 1997) International Conferences on Ion Sources, на I International Symposium on Beam Technologies (Dubna, Russia, 1995), на XIII International Conference on Electromagnetic Isotope Separators (Bad Durkheim, Germany, 1996).

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в 11 работах.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы; содержит 104 страницы машинописного текста, в том числе 66 рисунков, 10 таблиц и список цитируемой литературы из 118 наименований.

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

1. В циклотронном источнике многозарядных ионов с косвенным подогревом катода извлечение ионов с развитой эмиссионной поверхности позволяет увеличить интенсивность пучка и не приводит к ухудшению его зарядового состава.
2. Конструкция циклотронного источника многозарядных ионов с антикатодом, приближенным к эмиссионной щели, позволяет получать пучки ионов тугоплавких металлов с интенсивностями, превышающими интенсивность пучков, получаемых из источника с распыляемым электродом в 2 - 10 раз в зависимости от заряда иона.
3. Конструкция циклотронного источника многозарядных ионов с дополнительным анодом позволяет увеличить интенсивность пучков ионов твердых веществ и газов в 2 - 3 раза в зависимости от режима разряда и заряда ионов.

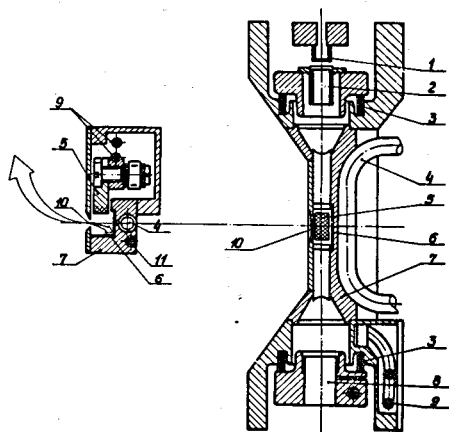
4. Метод получения пучков многозарядных ионов малой длительности из источника с дополнительным анодом позволяет увеличить величину извлекаемого импульсного тока многозарядных ионов.
5. Способ получения селективного по зарядам пучка ионов из источника с дополнительным анодом.
6. Разработка двухкамерного источника многозарядных ионов с транспортировкой плазмы из камеры предварительной ионизации в камеру экстракции.
7. Метод получения пучков ионов металлов из дуговых источников с мультипольным магнитным полем с использованием техники магнетронного распыления.

#### Содержание работы.

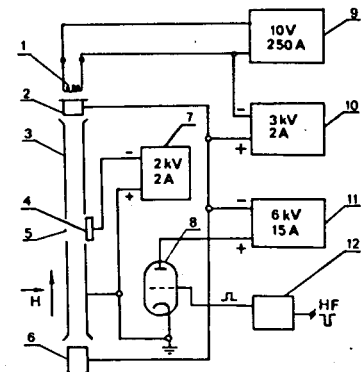
Во **введении** показана актуальность исследования дугового источника многозарядных ионов с косвенным подогревом катода, приводится краткое содержание диссертации.

В **первой главе** сделан обзор интенсивных и высокозарядных источников ионов для ускорителей тяжелых ионов: дуоплазматрона, циклотронного дугового источника, источников с мультипольным магнитным полем, электронно-лучевого источника, лазерного ионного источника и источника с нагревом электронов на частоте электронно-циклотронного резонанса.

Во **второй главе** приведено описание дугового источника многозарядных ионов циклотрона У-400 для получения пучков ионов газов и твердых веществ. Приведены параметры пучков многозарядных ионов, полученных в стендовых испытаниях. Схематичный разрез газоразрядной камеры источника и блок-схема питания представлены на Рис.2 и Рис.3.



**Рис.2** Схематичный разрез газоразрядной камеры ионного источника: 1 - нить накала; 2 - катод; 3 - кольцевой изолятор; 4 - охлаждение; 5 - распыляемый электрод; 6 - вставка для сбора распыленного вещества; 7 - разрядная камера; 8 - антикатод; 9 - охлаждение; 10 - эмиссионная щель; 11 - подача газа.



**Рис.3** Блок-схема системы питания ионного источника: 1 - нить накала; 2 - катод; 3 - разрядная камера; 4 - распыляемый электрод; 5 - эмиссионная щель; 6 - антикатод; 7 - питание распыляемого электрода; 8 и 12 - модулятор; 9 - питание нити накала; 10 - питание подогрева катода; 11 - питание разряда.

Исследованы режимы работы источника многозарядных ионов пеннинговского типа с подогревным катодом и зарядовые распределения ионов при извлечении пучков с развитой эмиссионной поверхности. Схема одного из экспериментов представлена на Рис.4.

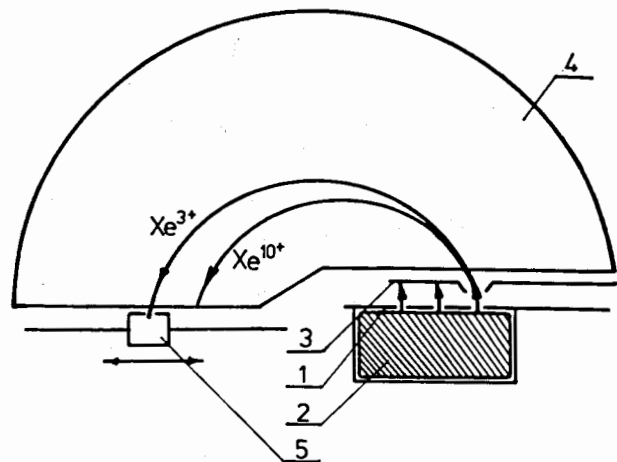
Установлено, что извлечение ионов из дополнительных эмиссионных щелей не приводит к ухудшению зарядового распределения ионов при увеличении общего извлекаемого тока.

Проведен анализ экспериментальных данных по пространственному распределению компонент плазмы разряда в циклотронном дуговом источнике многозарядных ионов с точки зрения возможности увеличения эмиссионной поверхности плазмы. На основе анализа сделан вывод о том, что возможности увеличения размеров эмиссионной щели в продольном направлении ограничены размерами зоны разряда, свободной от ионов материала катода и антикатада.

На основе анализа результатов спектроскопических измерений плотности ионов Mo в зависимости от расстояния от антикатада<sup>5</sup> и результатов<sup>6</sup> экспериментов по получению ионов W из газового ионного источника в диссертации предложена конструкция источника для получения многозарядных ионов тугоплавких металлов

<sup>5</sup> Н.П.Романов, А.П.Стриганов Спектр Mo VI в области 6800 - 2200 А. Оптика и спектроскопия 1969, т.27, N1, стр.17 - 24

<sup>6</sup> А.С.Пасюк и др. Получение многозарядных ионов аргона, криптона, ксенона и вольфрама из дугового источника на стенде. Атомная энергия 1968, т.24, N1, стр.21 - 25

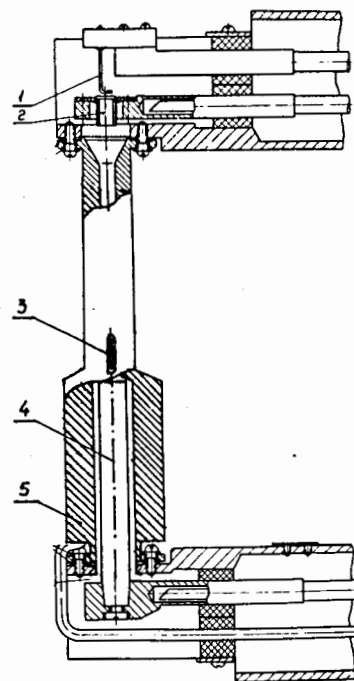


**Рис.4** Схема экстракции и анализа ионного пучка из источника с увеличенным катодом и несколькими эмиссионными щелями: 1 - подвижная пластина с эмиссионными щелями; 2 - плазма разряда; 3 - подвижный вытягивающий электрод; 4 - дуант; 5 - подвижный коллектор.

Схематично конструкция источника показана на Рис.5. Расстояние между медианной плоскостью и рабочей поверхностью антикатада было выбрано для получения оптимального выхода ионов  $W^{10+}$ . Ионный источник был испытан на стенде, где исследовалось зарядовое распределение извлеченных ионов. Ионы извлекались из эмиссионной щели  $1 \times 20 \text{ мм}^2$ . Для получения ионов Mo и W разряд в ионном источнике зажигался на Kг или Хе. Ионные токи, полученные при работе с Mo и W антикатадами, представлены в Таблице 1. Для сравнения приведены интенсивности пучков, полученных из источника с распыляемым электродом. Видно, что используя распыление антикатада, можно получать более интенсивные пучки, причем максимум в зарядовом распределении смещен в сторону более высоких зарядов по сравнению с источником с распыляемым электродом.

**Таблица 1.** Токи ионов Mo и W полученные из источника с антикатодом у эмиссионной щели и из источника с распыляемым электродом (\*).

Металл	Режим разряда		Ток, мА в импульсе									
	$I_d, A$	$U_d, V$	1+	2+	3+	4+	5+	6+	7+	8+	9+	10+
Mo	14	530		24				10	9	2.4	0.6	0.0
*	9.5	380		24	24	23	16	9.4	2.0	0.4		5
W	14	500					5	18	36	30	13	9
*	9	360			20	17	13	6.8	3.3	0.7	0.12	



**Рис.5** Схематичный разрез источника ионов тугоплавких металлов: 1 - нить накала; 2 - катод; 3 - эмиссионная щель; 4 - антикатод; 5 - анод.

В третьей главе приведены результаты исследования циклотронного дугового источника многозарядных ионов со стационарным электрическим полем в плазме разряда (источник с дополнительным анодом). Метод создания в плазменном столбе разряда стационарного электрического поля, перпендикулярного магнитному полю, был предложен Б.Н.Маковым<sup>7</sup>.

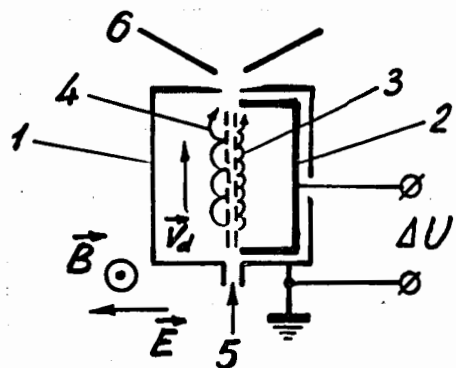
Целью проведенных в диссертации исследований являлось развитие этого метода для применения его в импульсном циклотронном источнике для получения многозарядных ионов твердых веществ и газов.

В разрядную камеру вводится дополнительный анод с потенциалом, отличающимся от потенциала основного анода. Известно, что плазма разряда принимает потенциал близкий к потенциалу анода. Следовательно, в случае разряда с двумя анодами с различными потенциалами области плазмы, прилегающие к анодам, имеют различные потенциалы. Так как плазменные электроны замагничены, между граничными силовыми линиями магнитного поля образуется электрическое поле. В этом случае под действием скрещенных электрического и магнитного полей при соответствующей их

<sup>7</sup> Б.Н.Маков Источник многозарядных ионов с подогревным катодом  
В: Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 21-23 октября 1986.  
ТП, стр.3-13. ОИЯИ Д9-87-105, Дубна 1987.

ориентации создается поток заряженных частиц из объема плазмы к эмиссионной щели.

Схематично газоразрядная камера показана на Рис.6, где также показаны направления силовых линий магнитного ( $B$ ) и электрического ( $E$ ) полей и направление дрейфового движения частиц плазмы ( $V_d$ ). Штриховыми линиями условно показаны границы областей плазмы, примыкающих к основному и дополнительному анодам.



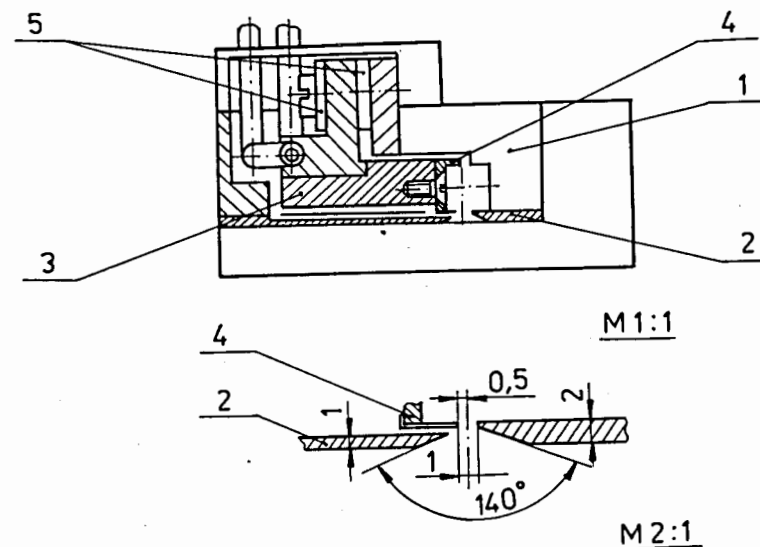
**Рис.6** Схематичный вид газоразрядной камеры ионного источника с дополнительным анодом: 1 - разрядная камера (анод); 2 - дополнительный анод; 3, 4 - траектории электронов и ионов; 5 - подача газа; 6 - вытягивающий электрод.

В диссертации исследовались следующие аспекты использования дополнительного анода в циклотронном источнике многозарядных ионов:

- влияние потенциала дополнительного анода на режим разряда;
- влияние потенциала дополнительного анода на интенсивность и зарядовый состав извлекаемого ионного пучка;
- особенности использования дополнительного анода в источнике многозарядных ионов с распыляемым электродом;
- пространственное распределение частиц, эмиттируемых из разряда.

Исследования были проведены на стенде ионных источников и на циклотроне У-400. Поперечное сечение газоразрядной камеры ионного источника с дополнительным анодом для циклотрона У-400 показано на Рис.7.

Установлено, что с ростом положительного потенциала дополнительного анода (дрейфовая скорость частиц плазмы направлена к эмиссионной щели) происходит уменьшение тока разряда и рост напряжения разряда. При потоке газа близком к оптимальному для получения многозарядных ионов (при нулевом потенциале дополнительного анода) происходит срыв разряда при увеличении положительного потенциала дополнительного анода. При отрицательном потенциале дополнительного анода изменение режима разряда незначительно.



**Рис.7** Поперечное сечение разрядной камеры ионного источника циклотрона У-400: 1 - корпус разрядной камеры (анод); 2 - накладка с эмиссионной щелью; 3 - держатель дополнительного анода; 4 - дополнительный анод; 5 - изоляторы.

Зондовые измерения показали наличие интенсивных потоков плазмы из эмиссионной щели источника при положительном потенциале дополнительного анода. Этим фактом объясняется изменение режима разряда при положительном потенциале дополнительного анода.

В экспериментах на стенде наблюдалось увеличение общего извлекаемого тока и тока различных зарядов в 2-5 раз. Зарядовое распределение ионов Ag при двух потенциалах дополнительного анода показано на Рис.8.

Было исследовано получение ионов твердых веществ из источника с дополнительным анодом и катодным распылением рабочего вещества. Исследовались две конструкции ионного источника с различным расположением распыляемого электрода. В первой конструкции распыляемый электрод вводится в разрядную камеру напротив эмиссионной щели, во второй - через боковую стенку газоразрядной камеры. Боковой ввод распыляемого электрода используется в источнике циклотрона У-400. Дополнительный анод должен быть расположен с той-же стороны, что и распыляемый электрод. Поперечное сечение разрядной камеры стендового источника с боковым расположением распыляемого электрода показано на Рис.9.

В этой конструкции не наблюдалось влияния потенциала дополнительного анода на режим распыляемого электрода. Зарядовые распределения ионов Al, полученные из источника с боковым расположением распыляемого электрода при различных потенциалах дополнительного анода показаны на Рис. 10.

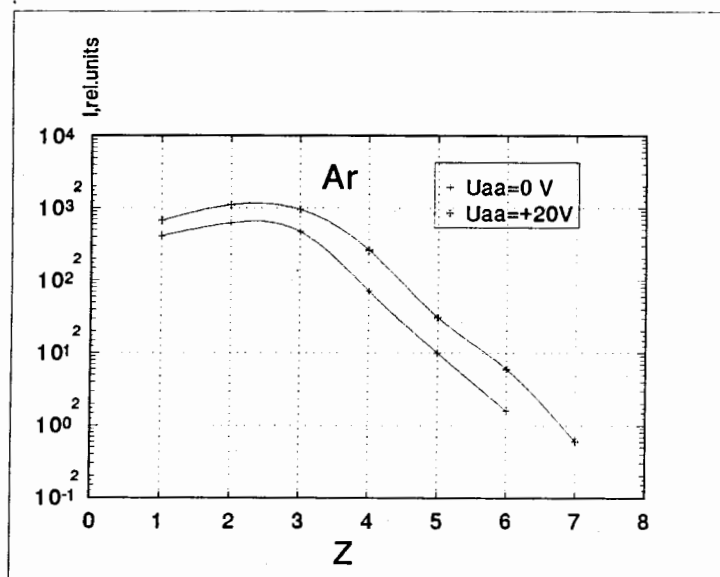


Рис.8 Зарядовые распределения ионов Ag при различных потенциалах дополнительного анода.

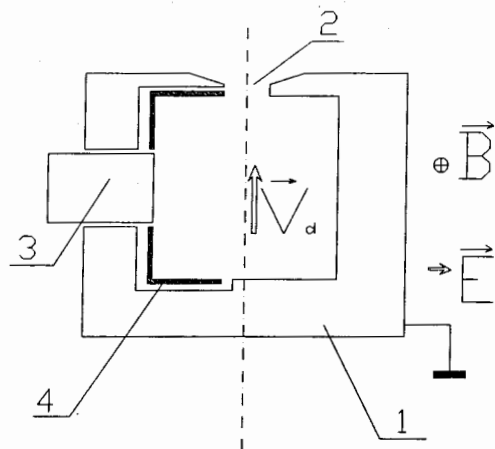


Рис.9 Поперечное сечение газоразрядной камеры ионного источника с дополнительным анодом и боковым расположением распыляемого электрода: 1 - разрядная камера; 2 - эмиссионная щель; 3 - распыляемый электрод; 4 - дополнительный анод.

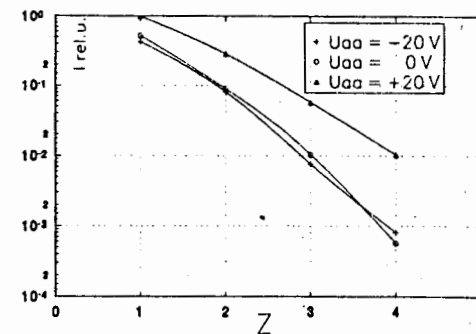


Рис.10 Зарядовые распределения ионов Al, извлеченных из источника с боковым расположением распыляемого электрода при различных потенциалах дополнительного анода.

С целью исследования возможности увеличения зарядности ионов, извлекаемых из источника с дополнительным анодом разработана и испытана конструкция двухкамерного источника с транспортировкой плазмы из камеры предварительной ионизации в камеру экстракции с помощью скрещенных  $E \times B$  полей. Конструкция основана на результатах экспериментов с источником с увеличенным катодом (глава 2) и результатах измерений эмиссии плазмы из источника с дополнительным анодом

Поперечное сечение источника схематично показано на Рис.11. Катод имеет сечение  $7 \times 14 \text{ мм}^2$ , сечение каждой камеры  $8 \times 8 \text{ мм}^2$ . Камеры разделены молибденовой пластиной толщиной 2 мм, имеющей вертикальную щель  $45 \times 1 \text{ мм}^2$ . Потенциалы на дополнительные аноды каждой камеры подаются от независимых источников питания. Газ также может подаваться в каждую камеру отдельно. В экспериментах газ (Ar) подавался только в камеру предварительной ионизации.

Были проведены эксперименты по извлечению ионов из обеих камер двумя отдельными извлекающими электродами. Эти эксперименты показали, что ток, извлекаемый из второй камеры (камера экстракции) в значительной степени определяется потоком плазмы из первой камеры (камера предварительной ионизации), создаваемым первым дополнительным анодом.

Для измерения зарядовых распределений ионов извлеченных из камеры предварительной ионизации и из камеры экстракции на корпусе источника была установлена подвижная пластина, позволявшая производить извлечение ионов поочередно из каждой камеры. При этом также производилось регулировка положения вытягивающего электрода для обеспечения экстракции и анализа ионов из соответствующей камеры.

Зарядовые распределения ионов Ag, извлеченных из камеры предварительной ионизации и из камеры экстракции при различных потенциалах дополнительного анода камеры предварительной ионизации ( $U_{aa1}$ ) представлены на Рис.12.

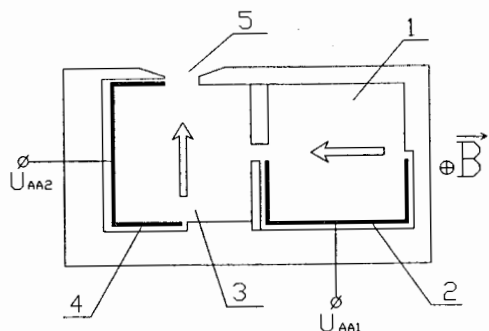


Рис.11 Поперечное сечение двухкамерного источника с транспортировкой плазмы скрещенными  $E \times B$  полями: 1 - первая разрядная камера; 2 - первый дополнительный анод; 3 - вторая разрядная камера; 4 - второй дополнительный анод; 5 - молибденовая пластина с вертикальной щелью; 6 - эмиссионная щель. Стрелками указаны направления потоков плазмы, образованных действием дополнительных анодов.

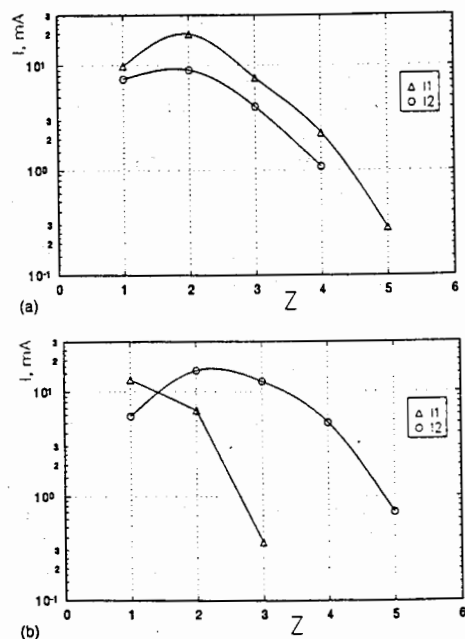


Рис.12 Зарядовые распределения ионов Ag извлеченных из первой (I1) и второй (I2) камер при различных потенциалах первого дополнительного анода: (a)  $U_{AA1} = 0$  V; (b)  $U_{AA1} = +30$  V.

Предложен и испытан способ получения импульсных ионных пучков короткой длительности (10 - 100 мкс) из ионного источника с дополнительным анодом. Уменьшение длительности импульса извлекаемого ионного тока путем уменьшения длительности импульса разряда приводит к изменению теплового режима катода. Поэтому для стабильного зажигания разряда в источнике, работающем с большой скважностью, необходимо изменять конструкцию катодного узла (термоизоляция катода от держателя, уменьшение высоты катода).

Предложенный метод заключается в том, что к дополнительному аноду прикладывается отрицательный потенциал, что приводит к уменьшению извлекаемого ионного тока. В необходимый момент импульса разряда на дополнительный анод подается короткий импульс положительного потенциала для получения импульса извлеченного ионного тока.

Измеренные временные диаграммы импульсов полного вытянутого тока при различных формах импульса потенциала дополнительного анода показаны на Рис.13.

В результате эксперимента показана возможность получения коротких импульсов ионного тока при подаче импульсного потенциала на дополнительный анод. Длительность импульсов ионного тока могла быть уменьшена до 10 мкс (предел используемой электронной схемы). В эксперименте получено отношение амплитуды ионного тока в коротком импульсе к основному импульсу равное примерно 4.

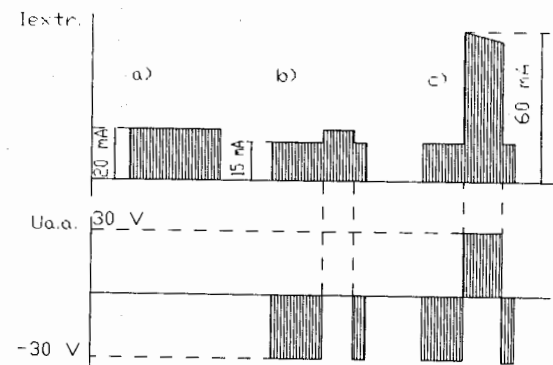


Рис.13 Временные диаграммы импульсов полного вытянутого тока при различных формах импульса потенциала дополнительного анода.

Зондовые измерения показали, что при изменении направления электрического поля (отрицательный потенциал дополнительного анода) происходит возрастание потока частиц плазмы в направлении, противоположном направлению к эмиссионной щели, и уменьшение потока, направленного к эмиссионной щели. Этот факт позволил сделать предположение, что путем создания в плазме разряда периодического электрического поля  $E(t)$  можно селективно воздействовать на движение различных частиц плазмы.

Рассмотрим плазменный столб, состоящий из двух соприкасающихся областей с потенциалами  $\Phi_1 = 0$  и  $\Phi_2$ , который осциллирует в соответствии с некоторым периодическим законом. Рассмотрим движение одного иона, предполагая что



электрическое поле действует на ион только в момент пересечения двойного слоя между областями плазмы. Время движения иона в двойном слое примем равным 0, т.к. толщина двойного слоя составляет несколько ларморовских радиусов электрона, что много меньше длины траектории иона.

В начальный момент времени  $t_1$  электрическое поле направлено так, что скорость дрейфового движения иона направлена к эмиссионной щели. Вне двойного слоя ион движется по круговой траектории под действием магнитного поля.

Совершив половину оборота (момент времени  $t_2$ ) ион входит в двойной слой, где существует электрическое поле. Очевидно, что направление дрейфового движения иона не изменится, если в момент времени  $t_2$  величина и направление электрического поля будут такими же, как и в момент  $t_1$ . Это условие можно записать в виде:

$$0.5 \cdot T_i = n \cdot T_{ef} \quad (1)$$

$T_i$  - период обращения иона в магнитном поле;

$T_{ef}$  - период колебаний электрического поля;

$n$  - целое число.

Ионы, для которых выполнено условие (1), будут дрейфовать так же, как и в случае постоянного электрического поля, остальные - другим образом. В качестве примера на Рис.14 приведены расчетные траектории ионов  $^{24}\text{Mg}^{1+}$ . Расчет проведен с учетом приведенных выше предположений, условие (1) выполнено для иона  $^{26}\text{Mg}^{1+}$ . Ось X совпадает с положением двойного слоя, и направлена в сторону эмиссионной щели. Потенциал дополнительного анода был взят в виде  $\Phi = \Phi_0 \sin(\omega t)$ . Расчет проведен для двух значений стартовых фаз. Видно, что во время движения иона величина и направление его дрейфовой скорости не являются постоянными.

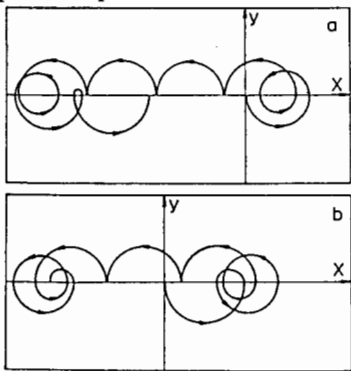


Рис.14 Расчетные траектории  $^{24}\text{Mg}^{1+}$  для различных стартовых фаз: а)  $0.25\pi$ ; б)  $0.5\pi$ ;

Упрощенное рассмотрение движения ионов в периодическом электрическом поле на границе двух областей плазмы показывает возможность селективного воздействия на движение ионов. Несомненно, что для корректного рассмотрения эффекта периодического электрического поля необходимо принять во внимание ионные столкновения и другие процессы.

Проведено исследование системы извлечения и формирования пучка внешнего инжектора циклотрона У-200 с дуговым источником ионов. Схематичное изображение ионно-оптической системы и распределение магнитного поля по радиусу электромагнита источника показано на Рис.15. В ионно-оптической системе использован фильтр Вина для компенсации отклоняющего действия магнитного поля.

При изменении магнитного поля вдоль траектории частицы электрическое поле должно меняться таким образом, чтобы обеспечивалось постоянство отношения  $E/V$ . Таким образом, по известному распределению магнитного поля можно рассчитать профиль пластин, создающих электрическое поле.

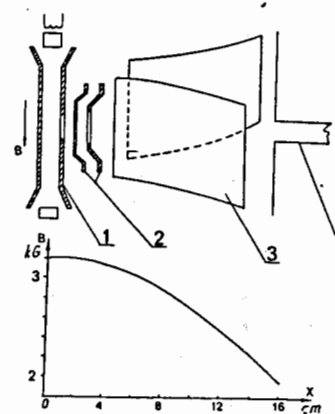


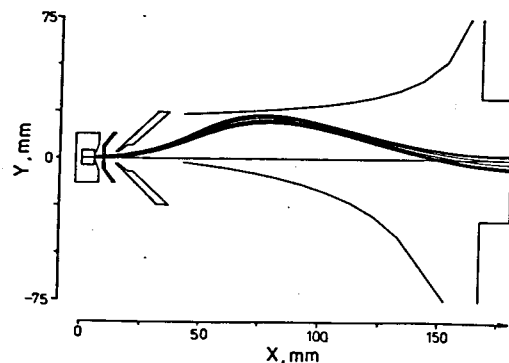
Рис.15 Ионно-оптическая система с фильтром Вина и распределение магнитного поля вдоль оси системы: 1-ионный источник; 2-электроды извлекающей оптики; 3-пластины фильтра Вина; 4-ионопровод.

Исследования формирования и транспортировки пучка ионов  $\text{He}^{1+}$  показали, что при настройке на максимум тока после анализирующего магнита, на входе в ионопровод пучок смещен относительно оси, что снижает эффективность транспортировки пучка.

Расчет траекторий ионов в ионно-оптической системе показал, что смещение пучка на выходе из фильтра Вина вызвано действием магнитного поля на участке извлечения.

Было показано, что гиперболическое распределение потенциала между пластинами фильтра обеспечивает получение пучка ионов с минимальным отклонением от оси на входе в ионопровод.

На Рис.16 показана геометрия ионно-оптической системы с фильтром Вина с гиперболическим распределением потенциала и расчетные траектории ионов с  $A/Z=3$ . Был проведен также расчет траекторий ионов с  $A/Z=3-5$  при значениях магнитного поля в центре магнита 0,2 - 0,4 Т. Расчеты показали, что при неизменном профиле пластин фильтра путем варьирования потенциалов пластин фильтра для указанного диапазона  $A/Z$  и магнитного поля возможно получение ионного пучка, имеющего смещение и отклонение от оси в пределах  $\pm 1$  мм и  $\pm 1^\circ$  соответственно.



**Рис.16** Геометрия ионно-оптической системы и траектории частиц с  $A/Z=3$ . Потенциал инжекции 19 кВ, потенциал вытягивающего электрода (-5) кВ, потенциалы верхней и нижней пластин фильтра +15,1 кВ и (-0,5) кВ соответственно.

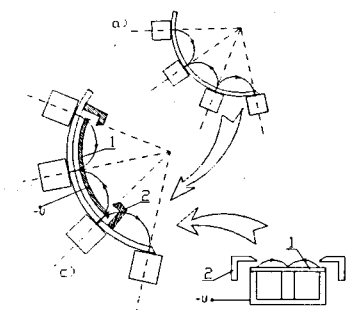
В четвертой главе приведено описание предложенного способа получения пучков ионов металлов из дуговых источников с мультипольным магнитным полем с использованием магнетронного распыления, и результаты предварительных экспериментов.

Сущность предложенного способа иллюстрируется Рис.17. Планарный магнетрон образован катодом, имеющим отрицательный потенциал по отношению к разрядной камере источника и анодом, имеющим потенциал камеры. Распыленное в магнетроне вещество поступает в разряд.

По сравнению с обычным катодным распылением планарные магнетроны обеспечивают большую скорость распыления, и значительная часть распыленного вещества ионизуется в магнетронном разряде. Это позволяет увеличить эффективность использования рабочего вещества в источнике с мультипольным магнитным полем.

Эксперименты по получению ионов металлов с помощью предложенного способа были проведены с источником типа CHORDIS<sup>8</sup>. Магнетронный катод был установлен на выходном фланце источника. Были изучены условия зажигания магнетронного разряда в магнитной системе источника и проведены эксперименты по получению ионов Al.

<sup>8</sup> R.Keller High current ion sources for ion implantation Nucl. Instr. & Meth. 1989, B40/41, p.518 -521



**Рис.17** Установка магнетронной распылительной системы в источнике ионов с мультипольным магнитным полем: а) фрагмент магнитной системы источника; б) схематичный вид планарного магнетрона; в) фрагмент магнитной системы источника с магнетронной распылительной системой; 1 - катод магнетрона; 2 - анод магнетрона; стрелками обозначены силовые линии магнитного поля.

Источник работал в импульсном режиме с частотой повторения 50 Гц, длительность импульса 2 мс. Средний ток разряда 1А, напряжение разряда 150В. Рабочий газ - Ar. Давление на входе в источник  $5 \times 10^{-2}$  тор. Напряжение экстракции 19 кВ. При напряжении на магнетронном катоде 700 В (ток выпрямителя 250 мА) получен ток ионов  $Al^+$  до 1 мА в импульсе при общем извлекаемом токе 20 мА в импульсе.

В пятой главе приведены результаты экспериментов по получению интенсивных пучков многозарядных ионов обогащенных изотопов газообразных и твердых веществ на циклотроне У-400 и стенде ионных источников.

Для экспериментов по синтезу 108 элемента с массой 267 необходимо было получить пучки ионов изотопов серы ( $^{34}S$ ,  $^{36}S$ ), при этом полная доза пучка на мишени за время эксперимента должна была составить  $\geq 10^{19}$  частиц. Поскольку изотопы  $^{34}S$  и  $^{36}S$  являются дорогими ( содержание в естественной смеси 4,2% и 0,02% соответственно), были проведены специальные исследования с целью получения максимальной интенсивности ускоренного пучка при минимальном расходе рабочего вещества.

Было исследовано получение ионов  $^{32}S^{4+}$  из газов  $SO_2$ ,  $H_2S$ ,  $SF_6$  и твердого вещества  $ZnS$ . Получено следующее соотношение токов ускоренного пучка  $SF_6 : ZnS : SO_2 : H_2S = 1:2:4:5$ . Поскольку  $H_2S$  вызывает коррозию элементов тракта подачи газа, то в качестве рабочего вещества был выбран газ  $SO_2$ .

Для минимизации расхода  $SO_2$  в качестве балластного газа в разряд подавался Xe в количестве  $\sim 0.2$  см<sup>3</sup>/мин. Интенсивность выведенного пучка ионов  $^{34}S$  составила 30-50 ерА ( $1.6 \times 10^{13}$  частиц/сек) при среднем расходе  $SO_2$  около 0.7 см<sup>3</sup>/часерА.

Пучок ионов  $^{36}S^{4+}$  был получен из источника с распылением, в качестве рабочего вещества использовался  $ZnS$  ( обогащение изотопа  $^{36}S$  - 23,6%). Интенсивность

внутреннего пучка составила  $\sim 2$  ерА ( $3 \times 10^{12}$  частиц/сек). Средний расход вещества составлял 6 мг/часх ерА.

По окончании эксперимента производился сбор распыленного в камере источника вещества и его регенерация. Эффективность сбора и регенерации составила 60 %.

В рамках подготовки к экспериментам по синтезу сверхтяжелых элементов на пучке ионов  $^{48}\text{Ca}$  было проведено исследование режимов источника ионов циклотрона У-400 с катодным распылением рабочего вещества с целью получения максимального выхода ионов  $\text{Ca}^{5+}$  и  $\text{Ca}^{6+}$  при минимальном расходе рабочего вещества. В экспериментах использовались распыляемые электроды из металлического Са и электроды из СаHg, который является химически стабильным и электропроводящим соединением. Токи ионов Са и Аг, полученные в стендовых испытаниях, представлены в Таблице 2.

**Таблица 2.** Токи ионов Са и Аг (част/сек), полученные в стендовых испытаниях.

Рабочее вещество	4+	5+	6+	7+
Са, металл	$2,7 \times 10^{15}$	$9,6 \times 10^{14}$	$2,6 \times 10^{14}$	
СаHg	$2,4 \times 10^{15}$	$7,2 \times 10^{14}$	$8 \times 10^{13}$	$1,7 \times 10^{13}$
Аг	$1,25 \times 10^{16}$	$3,6 \times 10^{15}$	$6,6 \times 10^{14}$	

В экспериментах на циклотроне У-400 были получены выведенные пучки ионов  $\text{Ca}^{5+}$  с интенсивностью 3 -  $6 \times 10^{12}$  част/сек при использовании металлического Са и  $1,3 \times 10^{12}$  част/сек при использовании СаHg. В экспериментах на стенде и на циклотроне расход рабочего вещества составил 5 - 15 мг/час в пересчете на Са.

В заключении сформулированы основные результаты исследований и разработок:

1. Исследованы режимы работы и зарядовые распределения ионов источника многозарядных ионов пеннинговского типа с косвенным подогревом катода при извлечении пучков с развитой эмиссионной поверхностью.

Установлено, что извлечение ионов из дополнительных эмиссионных щелей не приводит к ухудшению зарядового распределения ионов при увеличении общего извлекаемого тока.

2. Предложена конструкция циклотронного источника многозарядных ионов с антикатодом, приближенным к эмиссионной щели, для получения пучков ионов тугоплавких металлов. Интенсивности пучков ионов Мо и W, полученные из этого источника, превышают интенсивности, полученные из источника с распыляемым электродом в 2 - 10 раз в зависимости от заряда иона.

3. Исследованы режимы работы циклотронного источника многозарядных ионов с дополнительным анодом. Показано, что интенсивность пучков ионов твердых веществ и газов возрастает в 2 - 3 раза в зависимости от режима разряда и заряда ионов.

4. Исследовано получение пучков многозарядных ионов малой длительности (10 - 100 мкс) из импульсного (1 мс) разряда источника с дополнительным анодом. Установлен

эффект увеличения тока извлекаемых ионов при подаче импульсного потенциала на дополнительный анод.

5. Впервые предложен способ получения селективного по зарядам пучка ионов из источника многозарядных ионов с дополнительным анодом.

6. Проведено исследование двухкамерного источника многозарядных ионов с транспортировкой плазмы из камеры предварительной ионизации в камеру экстракции. Показано, что спектр ионов, извлеченных из камеры экстракции обогащен многозарядными ионами по сравнению со спектром ионов, извлеченных из камеры предварительной ионизации.

7. Предложен способ получения пучков ионов металлов из дуговых источников с мультипольным магнитным полем с использованием техники магнетронного распыления.

8. В результате проведенных исследований и разработок на циклотроне У-400 получены пучки ионов изотопов  $^{34}\text{S}$  и  $^{36}\text{S}$  с интенсивностями  $1,6 \times 10^{13}$  (при расходе рабочего вещества  $\text{SO}_2$  0,7 см<sup>3</sup>/часхерА) и  $3 \times 10^{12}$  част./сек (при расходе рабочего вещества ZnS 6 мг/часхерА) соответственно, что позволило провести эксперименты по синтезу 108 элемента.

#### Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- S.L.Bogomolov, V.B.Kutner, Yu.P.Tretyakov  
Investigation of discharge in a cyclotron arc multiply charged ion source with two anodes.  
In: Proc. of the XVIII Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases.  
13 - 17 July 1987, Swansea, U.K.  
Contributed Papers 2, p. 448 - 449.
- S.L.Bogomolov, V.B.Kutner, Yu.P.Tretyakov  
Investigation of the effect of an additional anode on the characteristics of the arc multiple-charged ion source.  
In: Proc. of the XIV Summer School and Intern. Symp. on the Physics of Ionized Gases  
Contributed Papers, p. 436 - 440. Sarajevo, Yugoslaviya, 1988.
- С.Л.Богомолов, Ю.П.Трегьяков  
Способ получения селективного по зарядам пучка ионов.  
Авторское свидетельство N 1444904, ОИ 1988, N46, стр.271
- Biri S., Bogomolov S.L., Koos I.  
A method for radial extraction of ions from a PIG ion source using an asymmetrical Wien filter.  
Nucl. Instr. & Meth. 1991, A306, N1,2 p.56 - 60.
- Biri S., Bogomolov S.L., Kutner V.B., Tretyakov Yu.p.  
Investigation of an injector with an arc multicharged ion source.  
Rev. Sci. Instr. 1992, v.63, N4, p. 2902 - 2903.
- S.L.Bogomolov, V.B.Kutner  
Multiply charged heavy ion source for gaseous and solid materials.  
JINR Communications E9-96-96, Dubna 1996.

7. S.L.Bogomolov, V.B.Kutner, Yu.P.Tretyakov  
The production of ions of solids from the PIG source with an additional anode.  
Rev. Sci. Instr. 1996, v.67, N3, p. 1381 - 1383.
8. S.L.Bogomolov, V.B.Kutner, Yu.A.Lazarev, V.Ya.Lebedev, Yu.Ts.Oganessian,  
Yu.P.Tretyakov, S.L.Voronov, A.B.Yakushev  
Production of high current  $^{34}\text{S}$  and  $^{36}\text{S}$  ion beams on the U-400 cyclotron.  
JINR E7-95-227, Scientific Report 1993 - 1994, Heavy Ion Physics, p.242
9. S.L.Bogomolov, V.B.Kutner, N.Yu.Yazvitskiy  
Pulsed emission of ions from the PIG ion source with an additional anode.  
Nucl. Instr. & Meth. 1997, B126, p. 63 - 65.
10. V.B.Kutner, S.L.Bogomolov, V.Ya.Lebedev, A.B.Yakushev  
Investigation of  $\text{Ca}^{5+}$  and  $\text{Ca}^{6+}$  ion yields from the cyclotron PIG ion source.  
JINR FLNR Scientific Report 1995 - 1996. E7-97-206, Dubna 1997, p.282-283.
11. S.L.Bogomolov, V.B.Kutner  
Dual chamber PIG ion source with plasma transport by crossed ExB fields.  
Rev. Sci. Instr. 1998, v.69, N2, p.1048 - 1050.

Рукопись поступила в издательский отдел  
18 ноября 1998 года.