

На правах рукописи

**Турчин Владимир Иванович**

**Генерация пучков ионов с большой фазовой плотностью тока для  
ускорителей заряженных частиц**

01.04.20 - физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

**АВТОРЕФЕРАТ**

Диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Автор:



Москва 2004

Работа выполнена в ФГУП ГНЦ РФ Институт Теоретической и Экспериментальной Физики, Москва.

Научный руководитель

Доктор технических наук,  
ведущий научный сотрудник ИТЭФ  
Плотников С. В.

Официальные оппоненты

Доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник МИФИ  
Татарина Н. В.  
Кандидат технических наук,  
ГКНПЦ им «Хруничева» КБ «Салют»  
Владимиров А. Н.

Ведущая организация

Федеральное государственное унитарное  
предприятие Московский радиотехнический  
институт РАН, Москва

Защита состоится 7 февраля 2005 года в 14 00 на заседании  
диссертационного совета Д212 130 01 в аудитории КОНФ.301 Московском  
инженерно-физическом институте (Государственный университет) по адресу  
Москва, Каширское шоссе 31, телефон 324-84-98, 323-91-67

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ

Автореферат разослан 3 " \_\_\_\_\_ 2005 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре,  
заверенном печатью организации

Ученый секретарь

диссертационного совета Д212 130 01

КТН



И С Шедрин

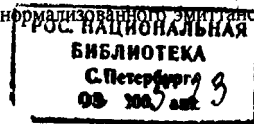
## Общая характеристика работы

### 1.1 Актуальность темы

Сильноточные пучки ионов нашли широкое применение в современной науке и технике {1}. В технологиях, связанных с медициной {2}, производством новых материалов {3}, обнаружением и мониторингом делящихся веществ {4}, исследованием космоса {5} требуются сильноточные ускорители, способные ускорять ионы до высоких энергий.

При построении подобных установок необходимо решать задачи как по обеспечению большой пропускной способности ускоряющих структур, так и по достижению высокого темпа ускорения заряженных частиц. Во многом трудности, связанные с увеличением пропускной способности ускоряющих секций сильноточных ускорителей, удалось решить с открытием принципа пространственно-однородной квадрупольной фокусировки (ПОКФ) {6}. Наиболее высокий темп ускорения достигнут в ускорителях с фазопеременной фокусировкой (ФПФ). Применение многолучевых ускорителей такого типа позволяет ускорять сильноточные пучки ионов {7}. Из теории линейных ускорителей известно, что рост интенсивности частиц в потоках ионов, ускоренных в ускорителе, связан с повышением фазовой плотности тока ускоряемых пучков и с уменьшением их фазового объёма {8}. Эти требования актуальны для всех типов ускорителей заряженных частиц.

В ИТЭФ были разработаны и эксплуатируются линейный ускоритель (ЛУ) протонов И-2 с ускоряюще-фокусирующей системой «Альварец», являющийся инжектором протонного синхротрона {9}, ускоритель тяжёлых ионов ТИПр-1 с ПОКФ, рассчитанный на ускорение ионов с отношением массы к заряду 60-65 и предназначенный для изучения проблем инерционного управляемого термоядерного синтеза [1], и ускорители с ФПФ [2], {10}. Генерируются ионы газов в этих установках дуоплазматронами с безнакальным катодом {11}, [3]. В настоящее время потребовался источник ионов (ИИ), позволяющий увеличивать ток ионного пучка, ускоряемого в ускорителях и обеспечивающий получение ионов различных металлов. Для решения этой задачи необходим был универсальный источник, генерирующий ионы газов и металлов, и на действующей установке показать, что эта разработка позволяет увеличить ток ионного пучка, ускоряемого в линейных ускорителях, по сравнению с применяемыми дуоплазматронами. Особенностью формирования пучка ионов, предназначенного для ускорения в ускорителях заряженных частиц, является то, что плотность тока в пучке должна соответствовать техническим параметрам ускоряющего канала, а увеличение фазовой плотности тока  $J$  (являющейся отношением величины тока пучка  $I_p$  к его фазовому объёму  $V_\phi$ ) достигается за счёт уменьшения фазового объёма (нормализованного эмиттенса, в дальнейшем просто эмиттенса) пучка.



## ***1.2 Цель диссертации***

Целью диссертации является разработка физических способов и технических решений, позволяющих увеличивать фазовую плотность тока и уменьшать фазовый объём пучка на выходе плазматронных источников ионов с электрическим разрядом и генерировать в них сильнооточные пучки ионов газов и металлов. Для достижения этой цели необходимо:

- разработать физические способы и реализующие их конструкции анодов и катодов, применение которых позволяет уменьшать поток неионизированного газа на выходе источников ионов, генерирующих импульсные и непрерывные во времени пучки ионов;
- разработать физические способы и на их основе универсальный ИИ, инжектирующий сильнооточные пучки ионов газов и металлов со стабильными по амплитуде и форме импульсами тока и малой величиной фазового объема;
- показать на действующих ускорителях, что предложенные разработки способствуют увеличению фазовой плотности и величины тока ионов, ускоряемого в этих установках.

## ***1.3 Научная новизна разработок заключается в следующем***

- Впервые разработан способ разделения в канале эмиссии ИИ потоков заряженных частиц и нейтрального газа, с последующим удалением нейтралов из этого канала. Этот способ позволяет уменьшать поток газа из ИИ, работающих с импульсными и непрерывными во времени пучками ионов.
- Разработан новый способ повышения эмиссионной способности полых катодов путём формирования магнитного поля в полости этих катодов.
- Предложен оригинальный физический способ стабилизации амплитуды и формы импульсов тока пучков ионов металлов, инжектируемых плазмой электрических разрядов MEVVA, путем преобразования этих разрядов в многоступенчатые электрические разряды.
- Разработан новый физический способ получения низкотемпературной плазмы с большой плотностью заряженных частиц в многоступенчатых электрических разрядах, в плазме конечной ступени которых отсутствует магнитное поле, а плотность плазмы в их начальных ступенях увеличивается за счёт удержания в ней заряженных частиц при помощи мультипольного магнитного поля, величина которого максимальна вблизи стенок разрядной камеры и стремится к нулю на её центральной оси и за счёт радиального электрического поля, не проникающих в плазму разряда.

## ***1.4 Практическая ценность***

- Разработаны физические способы усиления эффекта полого катода, которые были реализованы в различных конструкциях безнакальных катодов. Применение таких катодов позволи-

ло в 2 - 4 раза понизить рабочее давление газа в ИИ и обеспечило устойчивую генерацию дуоплазматроном непрерывного во времени пучка протонов с током 20 мА [4]. Модернизация дуоплазматрона ЛУ И-2, в процессе которой в ИИ был установлен один из таких катодов, позволила в 1,4 раза увеличить ток ионного пучка в инжекторе ускорителя, и способствовала росту тока протонов, ускоренных линейным ускорителем И-2 [5].

- Разработаны аноды, применение которых в ИИ позволяет до 7 раз уменьшить поток неионизированного газа на выходе источников, генерирующих импульсные и непрерывные во времени пучки ионов. Источник ионов с таким анодом и регулировкой потока газа в магистрале запуска рабочего газа в разрядную камеру применяется в ускорителе тяжёлых ионов [6]. Разработанный анод с вращающейся заслонкой в канале эмиссии является базовой конструкцией ИИ ускорительного комплекса нейтронного генератора ИТЭФ [12].
- Разработан и создан универсальный ИИ плазматронного типа с мультипольным магнитным полем, в котором используются многоступенчатые электрические разряды различного типа. Этот ИИ, получивший название МП-дуоплазматрон, позволяет оперативно переходить от генерации ионов газов к получению ионов металлов и обратно без изменения конструкции. Пучки ионов на выходе МП-дуоплазматрона отличаются высокой фазовой плотностью тока, малой величиной эмиттанса, стабильностью амплитуды и формы импульсов тока как в период горения электрического разряда, так и от импульса к импульсу. Применение в многоручевом ускорителе с ФФФ МП-дуоплазматрона позволило в 6 раз увеличить ток ускоренного пучка протонов по сравнению с ИИ, аналогичным дуоплазматрону ЛУ И-2 [7].
- Разработаны оригинальные приёмы увеличения фазовой плотности тока пучка другими способами и реализующие их конструкции источников, позволяющих генерировать сильноточные пучки ионов с малой величиной эмиттанса. Один из таких ИИ применялся в ускорителе ТИПр-1 при ускорении ионов ксенона [8].

Эти разработки и возможность их совместного применения в одной конструкции расширяют перспективу создания универсальных источников ионов различных веществ.

### ***1.5 Защита представляются***

- Разработанные физические способы и технические решения, позволяющие уменьшать поток остаточного газа на выходе ИИ.
- Разработанный способ формирования низкотемпературной плазмы с большой плотностью заряженных частиц в многоступенчатых электрических разрядах, в конечной ступени которых отсутствует магнитное поле и реализующий этот способ ИИ, МП-дуоплазматрон, генерирующий импульсные пучки протонов с фазовой плотностью тока 6 А/см-мрад и фазовым объёмом 0,09 см-мрад, а также сильноточные пучки ионов различных газов и металлов.

- Разработан оригинальный безнакальный катод, применение которого позволяет формировать в плазматронных источниках ионов многоступенчатые электрические разряды различного типа, получать на выходе источника стабильные по амплитуде и форме импульсы тока пучков ионов газов и металлов и уменьшать поток газа, вытекающего из ИИ.
- Результаты ускорения в многолучевом линейном ускорителе с ФПФ пучка протонов, генерируемого МП-дуоплазматроном.

### ***1.6 Аprobация работы и публикации***

Основные разработки, результаты и выводы, включённые в диссертацию, докладывались и обсуждались на международных и всесоюзных конференциях и семинарах по ионным источникам и ускорителям заряженных частиц и других совещаниях. Работы были представлены на Всесоюзном семинаре по физике быстротекущих процессов в плазме (г. Гродно, октябрь, 1986 г.), 10-м Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц (г. Дубна, октябрь, 1986 г.), на 11-м Всесоюзном семинаре по линейным ускорителям (г. Харьков, июнь, 1989 г.), на 10-м Всесоюзном семинаре по физике и технике интенсивных источников и ионных пучков (г. Киев, май, 1990 г.), на 12-м Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц (г. Москва, ИТЭФ, октябрь 1990 г.), на Международной конференции по ускорителям заряженных частиц (Канада, г. Ванкувер, май, 1997 г.), на 51-й Международной конференции по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Нижегородская область, г. Саров, сентябрь, 2001 г.). Представленные в диссертации разработки защищены 13-ю авторскими свидетельствами и патентами РФ на изобретение. Диссертация состоит из введения, 4-х глав и заключения. Общий объём диссертации составляет 110 страниц, в том числе 28 рисунков и библиография, включающая 69 наименований, 32 из которых посвящены теме диссертации.

## **2. Краткое содержание диссертации**

Для увеличения тока пучка ионов, ускоренных ускорителем, в диссертации проведён анализ факторов, влияющих на величину фазовой плотности тока и фазового объёма пучка, генерируемого ИИ. Показано, что фазовая плотность тока и эмиттанс пучка, экстрагируемого из плазмы, зависят от температуры и плотности ионов в плазме и от величины потока неионизированного газа, вытекающего из ИИ. Учитывая эти факторы, разработка методов увеличения фазовой плотности тока и уменьшения фазового объёма генерируемого источником пучка ионов проведена по двум направлениям: за счёт формирования на выходе ИИ плазмы с высокой плотностью и низкой температурой ионов и путём уменьшения потока неионизи-

рованного газа, вытекающего из ИИ. Сочетание этих методов в одном ИИ облегчает достижение цели диссертации. В диссертации разработаны ИИ, в которых используются другие физические способы получения сильноточных пучков ионов с малой величиной эмиттанса.

В первой главе диссертации на основе анализа современного состояния методов генерации сильноточных пучков ионов с малым фазовым объёмом разработаны физические принципы образования плазменного эмиттера, способного инжектировать пучки ионов с большой фазовой плотностью тока и малым эмиттансом. Поскольку ИИ с многоступенчатым электрическим разрядом отличаются высокой эффективностью использования газа и электрической мощности, а наличие магнитного поля в плазме увеличивает ее температуру, предложено генерировать плазму, ионы которой формируют пучок на выходе ИИ в конечной ступени многоступенчатого электрического разряда, в которой отсутствует магнитное поле, а начальные ступени такого разряда использовать для создания потока электронов, ионизирующих газ на выходе ИИ. Для увеличения плотности этого потока разработан способ повышения плотности плазмы в начальных ступенях электрического разряда за счёт удерживания её заряженной компоненты в разряде при помощи мультипольного магнитного поля сложной конфигурации и при помощи радиального электрического поля, возникающего между стенками ИИ и плазмой электрического разряда. Особенностью предложенного метода является то, что эти поля не проникают в плазму разряда и не влияют на её температуру и уровень плазменных шумов. Проведенный математический анализ разработанной физической модели плазменного эмиттера показал возможность его практической реализации и то, что плазма такого эмиттера способна инжектировать сильноточный пучок ионов водорода, фазовая плотность тока в котором более чем в 3 раза превосходит аналогичный параметр пучка, генерируемого дуоплазматроном ускорителя И-2, и этот пучок может иметь фазовый объём в несколько раз меньший, чем пучок, генерируемый дуоплазматроном ускорителя И-2. Поскольку работа дуоплазматронов с безнакальным катодом характеризуется высокой надёжностью и способностью инжектировать сильноточные пучки ионов, удовлетворяющие требованиям ускорения в ускорителях различного типа, в диссертации сравниваются возможности и параметры разрабатываемого ИИ с аналогичными характеристиками дуоплазматрона, который в течение нескольких десятков лет успешно обеспечивает работу ЛУ И-2.

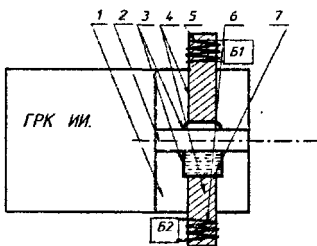
Поскольку плазма разрядов МЕВА отличается высоким уровнем собственного шума, нестабильностью состава и плотности и инжектируемые ею импульсы тока пучков ионов металлов нестабильны по амплитуде и форме. Для их стабилизации в диссертации предложено преобразовать эти разряды из одноступенчатых в многоступенчатые. Плазма конечной ступени таких многоступенчатых разрядов используется для формирования пучка ионов, а начальная ступень с нестабильной плазмой применяется для заполнения ИИ парами металла.

Во второй главе диссертации на основе экспериментов, проведённых на ускорителе И-2 [11, 13], и при помощи математических расчётов показано, что влияние потока неионизированного газа, вытекающего из ИИ, на фазовую плотность тока и фазовый объём инжектируемого ионного пучка сопоставимо с влиянием температуры и плотности ионов в плазме, эмитирующей этот пучок. Уменьшение газового потока на выходе ИИ достигается в настоящей работе как путём понижения газовой проводимости канала эмиссии в аноде, так и за счёт уменьшения давления рабочего газа в генераторе заряженных частиц.

Для уменьшения потока газа, вытекающего из дуоплазматронов с холодным катодом, применяемых в ускорителях с ФПФ, ТИПр-1, И-2, канал эмиссии в этих источниках перекрывается подвижной металлической заслонкой электромагнитного клапана, совершающей поступательное движение и открывающей канал только для выпуска ионов [2,3], [11,13].

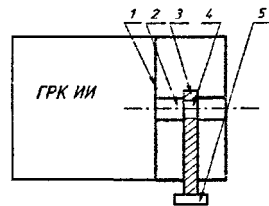
В диссертации разработано шесть конструкций анодов, газовая проводимость канала эмиссии в которых регулируется различными способами. На рисунке 1 показан анод с электромагнитным клапаном, в котором металлическая заслонка заменена магнитной жидкостью [9]. Как видно на рис. 1, электромагнитные катушки 5 и 6 создают в магнитопроводе 4 магнитное поле, перемещающее магнитную жидкость 7, открывая и закрывая канал эмиссии 2. Замена металлической заслонки магнитной жидкостью позволила увеличить быстродействие клапана, повысить степень уплотнения канала эмиссии и увеличить срок службы клапана, поскольку заслонка из магнитной жидкости не подвержена деформации при ударах о корпус ИИ и при попадании в неё струи плазмы. Применение такого клапана в дуоплазматроне позволило в два раза уменьшить поток остаточного газа на выходе ИИ по сравнению с дуоплазматроном ускорителя И-2 и в несколько раз повысить быстродействие клапана [9].

Для ИИ ускорительного комплекса нейтронного генератора ИТЭФ, генерирующего импульсные пучки ионов с частотой 25 Гц, был разработан анод, в котором поступательное движение клапанной заслонки, характеризующееся большими ударными нагрузками, заменено её равномерным вращением [10]. Анод с таким клапаном показан на рисунке 2.



**Рис. 1. Анод с жидкостной заслонкой**

1- анод 2- канал эмиссии 3- пятачки 4- магнитопровод  
5,6- электромагнитные катушки 7- магнитная жидкость  
Б1, Б2- блоки электропитания



**Рис. 2. Анод с роторной заслонкой**

1- анод 2- канал эмиссии 3- заслонка  
4- отверстие эмиссии 5- электропривод



Как видно на этом рисунке, заслонка 3 выполнена в виде круглого стержня, вращаемого вокруг своей продольной оси электромотором 5. На другом конце стержня, перекрывающего канал эмиссии 2, имеется сквозное отверстие 4. Генерация ионов в источнике синхронизована по времени с положением этого отверстия в канале эмиссии. Высокая скорость вращения заслонки 3 позволяет использовать аноды такого типа в ИИ, инжектирующих пучки заряженных частиц с большой частотой посылок импульсов, и до 7 раз уменьшить поток балластного газа по сравнению с дуоплазматроном ускорителя И-2.

Особое место в диссертации занимает вопрос уменьшения потока газа из ИИ, инжектирующих непрерывные во времени пучки. В таких источниках перекрывать канал эмиссии какими-либо заслонками нельзя. Для ИИ такого типа был разработан анод, конструкция которого позволяет увеличивать на входе канала эмиссии различие угловых скоростей движения потоков заряженных и незаряженных частиц, с последующим разделением этих потоков в канале эмиссии и удалением неионизированных молекул разработанным методом дифференциальной откачки газа [11]. Такой анод показан на рисунке 3.

Ионы и электроны из плазмы источника могут пройти на его выход только в том случае, если они не попадут на корпус анода. Нейтральные молекулы газа, сталкиваясь со стенками анода в конусном сужении 2 на входе канала эмиссии 3, увеличивают радиальную составляющую скорости своего движения. Значительная часть из них, попав в канал эмиссии 3, выходит за рамки, ограниченные размером его апертуры на выходе. Испытыв серию соударений, такие молекулы будут удалены через канал откачки 4 при помощи вакуумного насоса 5. И только те из них, которые обладают малой радиальной составляющей движения, пройдут на выход источника. В диссертации выведена формула, показывающая зависимость потока газа  $Q$  на выходе ИИ с таким анодом от отношения радиусов,  $r$  - канала эмиссии 3 к  $R_2$  - канала откачки газа 4, рис.3.

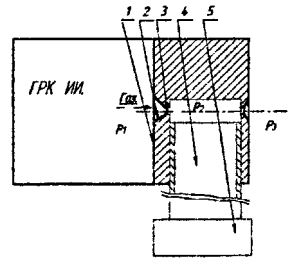


Рис 3 Анод для непрерывного пучка  
1- анод 2- конус 3- канал эмиссии 4- канал откачки 5- вакуумный насос

$$Q = \frac{r^2}{R_2^2} \cdot \frac{\pi \cdot P_1 \cdot P_2 \cdot \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/k} \cdot \left(\frac{P_2}{P_3}\right)^{1/k} \cdot \sqrt{\left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{k-1/k}\right] \cdot \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_3}\right)^{k-1/k}\right] \cdot \left(\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot \frac{R \cdot T}{M}\right)^2 \cdot 16 \cdot l \cdot \eta}}{(P_2 + P_3)},$$

где:  $k$  - показатель адиабаты газа;  $R$  - универсальная газовая постоянная;  $T$  - температура газа;  $M$  - молекулярная масса газа;  $P_1, P_2, P_3$  - давление газа на входе, внутри и на выходе канала эмиссии;  $l$  - длина канала;  $\eta$  - динамическая вязкость газа.

Ярко выраженная в формуле зависимость потока газа от отношения радиусов этих каналов демонстрирует перспективу предложенного метода. Такой анод позволяет уменьшать поток газа из ИИ, работающих в любом частотном диапазоне генерации импульсов тока пучка. Применение этого анода в дуоплазматроне, генерирующем непрерывный во времени пучок протонов, позволило в 3,5 раза сократить величину потока водорода на его выходе [12].

Кроме этих конструкций, в диссертации разработаны и другие аноды, позволяющие уменьшать поток остаточного газа из генераторов заряженных частиц.

В диссертации разработаны физические способы уменьшения потока газа на выходе ИИ путем понижения давления рабочего газа в источнике. Возникающее при этом уменьшение плотности молекул газа в электрическом разряде компенсируется либо за счет увеличения тока эмиссии электронов с катода, либо путем повышения эффективности ионизации рабочего газа электронами.

На рисунке 4 показан разработанный многоцилиндровый безнакальный катод, эмиссионная способность которого увеличена за счет усиления эффекта полого катода [13]. Применение такого катода в дуоплазматроне, генерирующем непрерывный во времени пучок протонов с током 15 мА, обеспечило двукратное уменьшение потока газа на выходе этого ИИ [12].

В полом безнакальном катоде, показанном на рисунке 5, эффект полого катода усилен путем формирования магнитного поля в полости цилиндра. Магнитное поле способствует увеличению длины траекторий электронов, осциллирующих между стенками полости [14]. Конструкция катода, усиливающего магнитное поле в зоне эмиссии электронов, была использована в дуоплазматроне ЛУ И-2 и способствовала увеличению в 1,4 раза тока пучка протонов в инжекторе на входе ускоряющей структуры ускорителя И-2 [5].

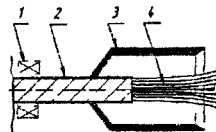


Рис 5 Катод с магнитным полем  
внутри цилиндра  
1- магнитная катушка 2- магнетрон  
3- цилиндр 4- силовые линии магнитного поля

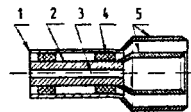


Рис 6 Катод с внутренним  
электрическим разрядом  
1- держатель 2- штаб 3- канал  
4- изоляторы 5- цилиндры

Рис 4. Многоцилиндровый катод

Поскольку предварительное возбуждение молекул и атомов газа облегчает процесс зажигания в нем электрического разряда, был разработан безнакальный катод с двумя электрически изолированными друг от друга электродами цилиндрической формы, показанный на рисунке 6. Каждый цилиндр катода соединён с отдельным источником электропитания. Такой катод обеспечивает возбуждение газа в ИИ перед зажиганием основного разряда путем фор-

мирования короткого во времени электрического пробоя промежутка между цилиндрами. Применение этих катодов позволило в пять раз уменьшить поток газа на выходе дуоплазматрона [15]. Разработанный катод универсален, т. к. возможность формирования независимого электрического разряда между электродами позволяет использовать его для получения в источнике не только ионов газов, но и ионов металлов [16].

Совместное применение разработанных анодов и катодов в ИИ позволяет получить дополнительное уменьшение потока остаточного газа на его выходе, способствуя увеличению фазовой плотности тока и уменьшению фазового объёма инжектируемого пучка ионов.

*В третьей главе* диссертации показаны разработанные способы создания ИИ, в котором реализованы физические принципы, описанные в первой главе настоящей работы. Описано устройство и работа созданного универсального ИИ газов и металлов. Поскольку это ИИ плазматронного типа и в нём используется мультипольное магнитное поле, в диссертации он получил название МП-дуоплазматрон. Показано, что такой ИИ может генерировать стабильные по амплитуде и форме импульсные пучки ионов широкого спектра металлов. Исследовано влияние конструкции его отдельных элементов на параметры инжектируемого пучка ионов и на примере сравнения основных параметров МП-дуоплазматрона с характеристиками дуоплазматрона ЛУ И-2. Показано, что этот ИИ по всем показателям в несколько раз превосходит возможности дуоплазматрона ускорителя И-2. Разработан инжектор 19-ти канального ускорителя протонов, и экспериментальным путём показано, что использование в инжекторе МП-дуоплазматрона позволяет в 6 раз увеличить ускоренный ускорителем ток пучка по сравнению с ИИ, имеющим конструкцию аналогичную дуоплазматрону ЛУ И-2.

На фотографии рисунка 7 показан разработанный универсальный источник ионов со снятым наружным магнитопроводом. На рисунке 8 показана схема, поясняющая работу МП-дуоплазматрона. Как видно из этого рисунка, в ИИ установлен разработанный холодный двухцилиндровый катод 1, с электрически изолированными друг от друга электродами, каждый из которых соединен с отдельным блоком электропитания *Б1*, *Б2* соответственно. Имеется цилиндрической формы промежуточный электрод 2.

Первый анод 6 источника выполнен в виде конуса, раскрывающегося в сторону катода. Промежуточный электрод и первый анод соединены с блоками электропитания *Б3*, *Б4* соответственно. Для уменьшения потока газа, вытекающего из ИИ, во втором аноде 7 установлен электромагнитный клапан 9,



Рис 7. МП-дуоплазматрон

подвижная заслонка которого открывает канал эмиссии 8 только для выпуска ионов {15}.

Генерация ионов газов начинается с короткого во времени (1-3 мкс) электрического пробоя между цилиндрическими электродами катода. Этот разряд возбуждает, частично ионизируя молекулы и атомы рабочего газа в области катода, и облегчает процесс формирования основного электрического разряда. Основной разряд загорается между

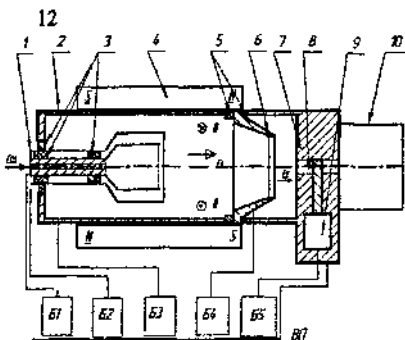


Рис. 8. Конструкция МП-2 дуоплазматрона

1- катод, 2- промеж. эл-д, 3-5 изоляторы, 4- магниты, 6- перв. анод, 7- втор. анод, 8- канал эмиссии, 9- клапан, 10- эжектор, Б1- Б4 блоки электропитания

катодом 1 и вторым анодом 7 после подачи импульсов электрического напряжения от блоков электропитания Б2, Б3, Б4 на соединённые с ними электроды ИИ. Плазма основного разряда контрагируется электрическим полем, возникающим в конусном сужении первого анода 6, аналогично процессу, происходящему в конусном сужении промежуточного электрода дуоплазматрона [16]. Электроны, поступающие через апертуру в первом аноде источника в область второго анода, в которой отсутствует магнитное поле, ускоряются электрическим полем между первым и вторым анодами, ионизируют газ на выходе ИИ и образуют вторую ступень электрического разряда. Из плазмы этой ступени производится отбор ионов в пучок. Для повышения плотности плазмы на выходе ИИ приняты меры по увеличению плотности потока электронов, приходящих из начальной ступени электрического разряда. Это увеличение достигается за счёт радиального сжатия плазмы в начальной ступени разряда радиальным электрическим полем, возникающим под действием разности электрических потенциалов между плазмой разряда и боковыми стенками промежуточного электрода и за счёт действия мультипольного магнитного поля, формируемого магнитами, установленными на промежуточном электроде 2. Конфигурация силовых линий магнитного поля и распределение напряжённости этого поля в промежуточном электроде показаны на рисунке 9

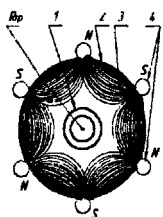
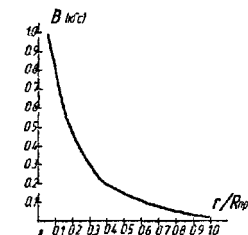


Рис. 9. Форма магнитного поля  $B$  промежуточного электроде  
1- катод, 2- боковая стенка промежуточного электрода, 3- магнитное поле, 4- магниты.



Изменение напряжённости магнитного поля  $B$  в промежуточном электроде от расстояния до боковой стенки  $r$  отнесённого к радиусу этого электрода  $R_p$

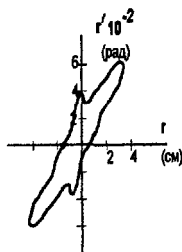
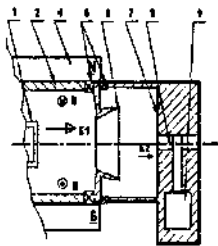


Рис. 10. Параметры пучка  $N^+$  МП-дуоплазматрона

$V_{\phi} = 0.44$  см мрад  $I_p = 2.6$  А,  $J = 6.0$  А/см мрад

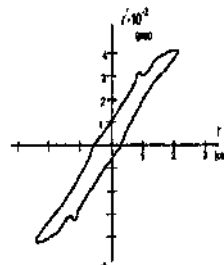
В диссертации исследовано влияние конструкции катода источника, величины электрического потенциала на промежуточном электроде и влияние формы и величины мультипольного магнитного поля в прикатодной области промежуточного электрода на параметры пучка ионов, инжектируемого МП-дуоплазмотроном. По результатам этих исследований создана конструкция ИИ, показанная на рис. 8. В такой архитектуре МП-дуоплазмотрон обеспечил получение импульсного пучка протонов, ускоренного электрическим напряжением  $V=50$  кВ, с величиной амплитудного тока  $I_p=2,6$  А и фазовой плотностью тока  $J=6$  А/см-мрад, параметры которого приведены на рисунке 10. Конструкция ИИ, показанная на рис.8, рассматривается в диссертации как основная. Этот ИИ позволил получать импульсные пучки ионов не только водорода, но и других газов: He с  $I_p=2,3$  А, Ar с  $I_p=1,7$  А, Xe с  $I_p=2,3$  А

Для адаптации созданного ИИ к работе в ускорителях, имеющих малый акцептанс ускоряющих каналов, найдена конструкция первого анода, позволяющая уменьшать фазовый объём генерируемых источником пучков ионов при сохранении их высокой фазовой плотности тока. Форма такого первого анода и параметры пучка протонов на выходе модифицированного МП-дуоплазмотрона с этим электродом показаны на рисунке 11.



**Рис. 11.** 1-й анод МП-дуоплазмотрона для пучков с малым эмиттансом.

1-катод, 2-промежуточный электрод, 4-магнит, 5-изоляторы, 6- первый анод, 7-второй анод, 8-канал эмиссии, 9-клапан.



Параметры пучка  $H^+$  МП-дуоплазмотрона с первым анодом для мелких эмиттансов.

$V_{\phi}=0,09$  см мрад,  $i=0,12$  А,  $J=1,3$  А/см мрад,  $V=50$  кВ.

В диссертации показано, что МП-дуоплазмотрон способен в несколько раз уменьшить нагрузку неионизированным газом внешних систем ускорителя по сравнению с дуоплазмотроном ЛУ И-2. Используя параметры ионных пучков, полученные в МП-дуоплазмотронах с различной конструкцией первого анода, см. рис.8, рис.10, рис.11, в диссертации было проведено сравнение характеристик плазмы и пучков ионов, генерируемых МП-дуоплазмотроном и дуоплазмотроном ЛУ И-2. Результаты сравнительного анализа показаны в таблице 1.

В последней колонке приведены минимальные значения давлений водорода, при которых МП-дуоплазмотроны и дуоплазмотрон линейного ускорителя И-2 сохраняют свою работоспособность.

Таблица!. Параметры дуоплазматрона ускорителя И-2 и МП-дуоплазматрона

Тип ИИ (протоны)	Плотность плазмы см <sup>-3</sup>	Температура плазмы эВ	Эмиттанс пучка см-мрад	Фазовая плотн, тока пучка А/см-мрад	Min. раб "Р" газа ммрт. ст.
Дуоплазматрон ускорителя И-2	7,2-10 <sup>12</sup>	19	0,5	2,0	1,0
МП-дуоплазматроны 1-й анод-рис.8, 1-й анод-рис. 11	3,8-10 <sup>13</sup> 3,6-10 <sup>13</sup>	1,8 0,3	0,44 0,09	6,0 1,3	0,6

В таб.1 видно, что по своим характеристикам плазма МП-дуоплазматрона превосходит аналогичные параметры плазмы дуоплазматрона ускорителя И-2 и способна инжектировать пучки ионов с фазовой плотностью тока в три раз большей, чем дуоплазматрон.

При получении ионов металлов в МП-дуоплазматроне формируется трёхступенчатый электрический разряд, первой ступенью которого является сильноточный разряд МЕВА, создаваемый посредством прямого пробоя в вакууме промежутка между цилиндрами катода. Примененный вариант зажигания электрического разряда отличается от работы известных источников МЕВА, в которых электрический разряд возникает в результате пробоя промежутка между электродами по поверхности изолятора [14,17]. Предложенный способ формирования разряда МЕВА путём прямого пробоя вакуумного промежутка и применённая конструкция катода, в которой изоляторы 3 в катоде 1, рис. 8, закрыты от прямого излучения плазмы, уменьшают повреждение поверхности изолятора электрическим разрядом и напылением на неё металла, увеличивая срок службы катода. Первая ступень электрического разряда МЕВА используется для заполнения ИИ парами испаряемого металла катодных цилиндров. Последующие две ступени разряда формируются в МП-дуоплазматроне аналогично процессам, происходящим при получении ионов газа. Такое изменение типа электрического разряда обеспечило стабилизацию амплитуды и формы импульсов тока пучка при получении ионов металлов. На выходе ИИ, показанного на рис. 9, были получены пучки ионов различных металлов с токами  $I_p = 1,8$  А,  $Mo - I_p = 1,2$  А,  $Bi - I_p = 1,5$  А. Для изменения сорта генерируемых ионов достаточно заменить материал цилиндров в катоде источника. При переходе к получению ионов газов ИИ заполняют рабочим газом и изменяют режим электропитания его электродов. Параметры пучков ионов газов и металлов, полученных на выходе модифицированного варианта конструкции МП-дуоплазматрона с первым анодом, показанным на рис. 11, приведены в таблице 2. Для оценки эффективности работы ИИ с различными веществами в таб.2 приведён эквивалентный протонный ток этих пучков  $I_p = \sqrt{A/\xi}$ , где:  $A$  - масса иона в атомных единицах массы;  $\xi$  - зарядовое состояние иона).

Таблица 2. Параметры пучков ионов на выходе модифицированного МП-дуоплазматрона

Вещество	He	Ar	Xe	Al	Cu	Mo	Ta	Bi
Ток пучка $I_p=1,8$ А (мА)	95	32	20	65	48	35	27	23
Фазовая плотность тока (А/сммрад)	1,36	1,3	2,9	2,17	1,9	1,95	3,0	2,9
Эмиттанс пучка (сммрад)	0,07	0,025	0,07	0,03	0,025	0,018	0,009	0,008
Эквивалентный? протонный ток $I_p$ (мА)	190	200	230	340	380	340	360	330

Результаты проведённых экспериментов показали, что разработанные физические принципы, использованные в МП-дуоплазматроне, позволяют генерировать как пучки ионов газов и металлов с большим током и стабильными по амплитуде и форме импульсами, так и пучки этих элементов, отличающиеся малой величиной эмиттанса при сохранении высокой фазовой плотности тока. Данные таб.2 показывают, что эффективность разработанного источника в режиме генерации ионов металлов выше, чем при получении ионов газов. По-видимому, это связано с более низким потенциалом ионизации металлов, чем газов.

В диссертации разработан инжектор для 19-ти канального ускорителя с асимметричной фазопеременной ускоряюще-фокусирующей системой (АФПФ). Для изучения влияния параметров пучка, генерируемого ИИ, на величину тока ускоренных в ускорителе ионов, МП-дуоплазматрон и дуоплазматрон, аналогичный дуоплазматрону ускорителя И-2, поочередно устанавливались в многолучевой ускоритель протонов, структурная схема которого показана на рисунке 12.

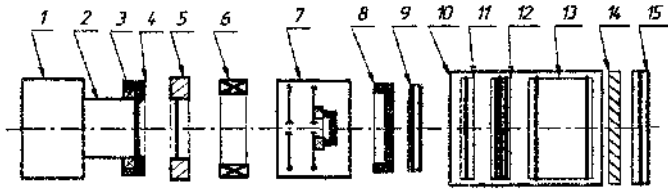


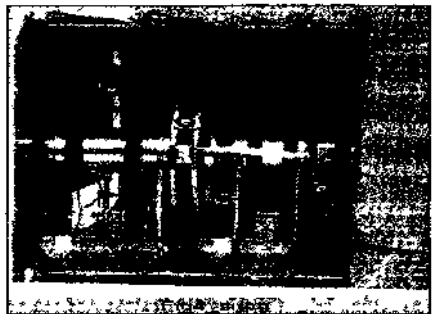
Рис. 12. Многолучевой ускоритель протонов.

1- генератор плазмы 2- экспандер, 3- изолятор, 4- плазменный электрод, 5- ускоряющий эл-д, 6- индукционный датчик, 7- измерительная камера, 8- цилиндр Феррадея, 9- 1<sup>й</sup> блок измерителей тока пучка, 10- ускоряющая система, 11- группирователь, 12- согласующий канал, 13- ускоряющая структура, 14- металлическая фольга, 15- 2<sup>й</sup> блок измерителей тока пучка.

В ускорителе генераторами ионов служили дуоплазматрон и МП-дуоплазматрон поочередно (рис.12 поз.1). На выходе этих генераторов устанавливался один и тот же экспандер 2, позволяющий согласовывать диаметр инжектируемого источниками пучка протонов с размером первой трубки дрейфа ускоряющей структуры, имевшей радиус 35 мм. Для формирования пучка ионов с малым углом расходимости на входе ускоряющей структуры в ионной пушке использовалась двухэлектродная ИОС. Апертура электродов ИОС была затянута мел-

коячейстой сеткой из вольфрама согласно методике формирования пучков с малым углом расходимости [18] Первый электрод 4 ионной оптики был размещен на экспандере, электрически изолирован от него керамическим изолятором 3 и соединён с отдельным блоком электропитания (на рисунке этот блок не показан) Другой электрод 5 мог перемещаться вдоль продольной оси ускорителя и электрически был заземлён Источники ионов и блоки их электропитания размещались на подиуме (на рис 12 он не показан), имевшем электрический потенциал положительной полярности относительно земли, величину которого можно было регулировать в диапазоне от 0 до 70 кВ с шагом 2 кВ Ток ионного пучка на выходе ИОС измерялся при помощи индукционного датчика 6, не перекрывающего пучок Фазовые характеристики пучка регистрировались известным методом двух подвижных пластин со щелями и токоприемником, размещенных в камере 7 Величина полного тока пучка перед входом в ускоряющую структуру измерялась при помощи цилиндра Фарадея 8 Ток пучка, попадавший в каждый канал ускорителя, измерялся при помощи первого блока измерителей тока пучка 9, который состоял из 19-ти цилиндров Фарадея, диаметр каждого цилиндра был равен диаметру ускоряющего канала ВЧ структуры Цилиндр Фарадея 8 и 1-й блок измерителей тока пучка 9 могли выдвигаться на траекторию движения пучка ионов и вводиться с нее Ускорение протонов производилось в 19-ти каналах ускоряющей системы 10 Ускоряющая система имела длину 0,7 м и состояла из группирователя 11, согласующего канала 12, ускоряющей структуры 13, в которой возбуждалось электрическое поле с рабочей частотой 148,42 МГц, ускорявшее протоны до энергии 530 кэВ [2] Внешний вид ускоряющей структуры в корпусе показан на рисунке 13

Ток протонов, ускоренных в каждом ускоряющем канале, измерялся при помощи второго блока измерителей тока пучка 15, аналогичного по конструкции первому блоку 9 Для выделения на выходе ускоряющей структуры ионов с требуемой энергией между ускоряющей системой 10 и блоком 15 размещалась тонкая металлическая фольга 14 Эксперименты по ускорению ионов, генерируемых дуоплазмотроном и МП-дуоплазмотроном в многолучевом ускорителе, описаны в [7] Характеристики ускорителя и результаты ускорения протонов приведены в таблице 3



*Рис. 13. 19-ти канальная ускоряющая структура*



Таблица 3. Рабочие параметры многолучевого ускорителя

Энергия ускоренных протонов	530 кэВ
Рабочая частота ускорения	148,6 МГц
Энергия инъекции $H^+$ в структуру	64 кэВ
Ток пучка $H^+$ в инжекторе установленным дуоплазматроном	0,65 А
Ускоренный ускорителем ток $H^+$ с применением дуоплазматрона	7 мА
Ток пучка $H^+$ в инжекторе с установленным МП-дуоплазматроном	0,45 А
Ускоренный ускорителем ток $H^+$ с применением МП-дуоплазматрона	42 мА

Из таб.3 видно, что применение в ускорителе МП-дуоплазматрона позволило в 6 раз увеличить ускоренный ток протонов по сравнению с дуоплазматроном, конструкция которого аналогична ИИ, применяемому на ускорителе И-2.

*В четвертой главе* диссертации разработаны технические решения, использующие другие физические способы генерации сильноточных пучков ионов с малым фазовым объемом.

На рисунке 14 показано устройство дуоплазматрона, в котором нет магнитного поля. Увеличение плотности плазмы на выходе такого ИИ производится путём удержания плазменных электронов радиальным электрическим полем, создаваемым в области между плазмой электрического разряда и внутренней поверхностью трубки 3. Эта трубка установлена между промежуточным электродом 2 и анодом 5 ИИ и соединена с блоком электропитания БП [17].

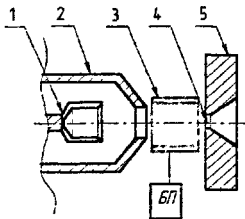


Рис. 14 Дуоплазматрон без магнитного поля

1- катод, 2- промежуточный электрод, 3- вставка, 4- канал эмиссии, 5- анод, БП- блок электропитания

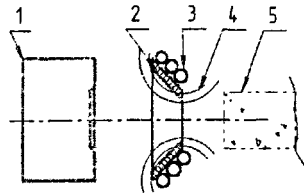


Рис. 15 ИОС с магнитной защитой электродов

1- источник ионов, 2- ускоряющий электрод, 3- электромагнитная катушка, 4- силовые линии магнитного поля, 5- пучковая плазма

На рисунке 15 приведена схема генератора ионов, электроды ИОС которого защищены от попадания в них ионов пучка. Электроны, приходящие из пучковой плазмы канала дрейфа замагничиваются на силовых линиях магнитного поля, конфигурация которого показана на рис. 15. Их пространственное распределение образует электрическое поле, отклоняющее ионы пучка к центральной продольной оси источника [18]. Фазовая плотность тока на выходе

такой ионной пушки увеличивается за счёт уменьшения концентрации частиц распыляемого пучком металла электродов ИОС на траектории движения ионов пучка.

На рисунке 16 показан источник заряженных частиц, позволяющий увеличивать в пучке на входе ускоряющей структуры процентное содержание ионов требуемого сорта. Это увеличение достигается путём разделения ионов в пучке по массе и заряду в процессе пролёта ими канала дрейфа [19]. Особенностью такого источника является то, что в нём отбор ионов из плазмы производится при помощи электрода 3, обладающего постоянным во времени электрическим потенциалом отрицательной полярности. Такой способ экстракции ионов из плазмы сохраняет стационарное положение границы плазмы при формировании модулирующим электродом 4 коротких во времени (0,3-1,0 нс) импульсов тока пучка, см. [20]. Этот ИИ использовался для диагностики и улучшения качества пучка при ускорении ионов  $\text{Xe}^{+3}$  в ускорителе тяжелых ионов ТИПр-1 [8].

На рисунке 17 показан дуоплазматрон, у которого фазовая плотность тока инжектируемого пучка ионов увеличивается за счет удержания заряженных частиц в плазменном эмиттере ионов на выходе ИИ при помощи мультипольного магнитного поля сложной конфигурации [21]. Как видно на рис. 17, это поле формируется на периферии электрического разряда и не проникает в область плазмы, из которой производится отбор ионов в пучок.

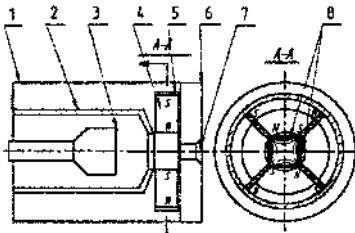


Рис. 17 Дуоплазматрон с осесимметричным магнитным полем

1- дуоплазматрон, 2- прожекторный электрод, 3- катод, 4- магнит, 5- модулирующий электрод, 6- анод, 7- канал эмиттера, 8- линза магнитного поля

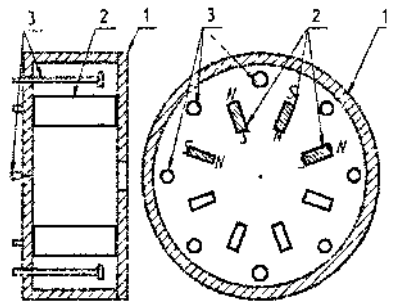


Рис. 18 Источник ионов с магнитным фильтром электронов в плазме

1- корпус источника, 2- магнит, 3- катоды

Формирование однородной по составу низкотемпературной плазмы с высокой плотностью заряженных частиц на выходе источника ионов, показанного на рисунке 18, достигается за счёт отделения магнитным полем (магнитного фильтра) быстрых электронов прикатодной плазмы от области плазмы на выходе источника. Кроме того, для формирования плазмы

на выходе этого ИИ используются одновременно несколько электрических разрядов, горящих с катодов, которые максимально приближены к каналу эмиссии ионов, что повышает плотность ионов в плазме на выходе источника [22].

### 3. Основные результаты работы

1. Реализована конструкция дуоплазматрона, применение которого позволяет уменьшать поток газа на выходе ИИ в несколько раз по сравнению с дуоплазматроном ЛУ И-2, в результате установки в него разработанных анодов. Применение в этом дуоплазматроне анода с электромагнитным клапаном, использующим магнитную жидкость, позволило в 2 раза понизить величину потока газа, вытекающего из ИИ по сравнению с дуоплазматроном ускорителя И-2.
2. Разработана оригинальная конструкция другого электромагнитного клапана, предназначенного для генерации ионных пучков с большой частотой следования, в котором поступательное движение заслонки канала эмиссии заменено ее равномерным вращением вокруг собственной оси. Применение такого клапана в ИИ инжектора ускорительного комплекса нейтронного генератора ИТЭФ позволяет в несколько раз уменьшить нагрузку систем установки потоком газа, вытекающего из ИИ.
3. Впервые разработан способ разделения потоков заряженных и незаряженных частиц в канале эмиссии ионов с последующим удалением остаточного газа из этой области, позволяющий уменьшать поток газа, вытекающего из ИИ, работающих с любой частотой следования импульсов тока пучка, в т.ч. и в режиме генерации непрерывного во времени пучка ионов.
4. Разработаны оригинальные безнакальные одно и многоцилиндровые катоды, эмиссионная способность которых увеличена путем усиления эффекта полого катода. Применение такого катода в дуоплазматроне позволило, устойчиво генерировать непрерывный во времени пучок протонов с током до 20 мА, и в два раза уменьшить поток остаточного газа на выходе ИИ. Другой предложенный способ усиления эффекта полого катода, использующий магнитное поле в катодном узле и реализованный в дуоплазматроне, обеспечил трёхкратное уменьшение потока газа на выходе ИИ, позволил в 1,4 раза увеличить ток пучка в инжекторе ЛУ И-2.
5. Разработана оригинальная конструкция безнакального многоцилиндрового катода, состоящего из электрически изолированных друг от друга электродов, применение которого в дуоплазматроне позволило в 5 раз уменьшить давление рабочего газа в разрядной камере (соответственно понизить поток газа на выходе ИИ) и генерировать в источнике не только ионы газов, но и ионы металлов.
6. Разработан новый физический способ формирования низкотемпературной плазмы с большой плотностью заряженных частиц в многоступенчатых электрических разрядах, в конеч-

ной ступени которых отсутствует магнитное поле. Предложена методика удерживания заряженных частиц в плазме начальных ступеней этих разрядов при помощи периферийного мультипольного магнитного и радиального электрического полей, непроникающих в разряд.

7. Впервые разработан способ, позволивший стабилизировать амплитуду и форму импульсов тока пучка ионов металлов, генерируемых в электрических разрядах MEVVA, путем преобразования этих разрядов из одноступенчатых в многоступенчатые.

8. Изготовлен универсальный источник ионов, МП-дуоплазматрон, инжектирующий высоко-точные пучки ионов газов и металлов с малой величиной фазового объема и со стабильными по амплитуде и форме импульсами тока пучка. При получении ионов газов применение МП-дуоплазматрона позволило получить пучки протонов с фазовой плотностью тока 6 А/см-мрад и фазовым объёмом 0,09 см-мрад, а также ионы других газов с величиной  $I_f$  более 1 А, в режиме генерации ионов металлов, были получены пучки с токами от  $I_f=1,2$  А до  $I_f=1,8$  А.

Эксперименты, проведённые на ускорителях, И-2, ТИПр-1, многолучевом ускорителе с ФПФ и электростатических ускорителях ИТЭФ показали, что разработанные в диссертации физические способы и технические решения позволяют повышать фазовую плотность тока и уменьшать фазовый объём пучков ионов, генерируемых в источниках плазматронного типа и увеличивать ток ионов, ускоренных ускорителями различной конструкции.

9. Например, применение МП-дуоплазматрона в 19-ти канальном ускорителе с ФПФ позволило ускорить до энергии 530 кэВ пучок протонов с током 42 мА, что в 6 раз превышает ток ускоренных в этой установке ионов  $H^+$ , полученных в дуоплазматроне.

## 1. Список основных публикаций по теме диссертации.

- [1] В.С. Артемов, А.И. Балабин, В.А. Баталин, А.Б. Зарубин, И.М. Капчинский, Б.К. Кондратьев, В.В. Кушин, В.И. Турчин и др. Ускоритель тяжелых малозарядных ионов с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой на частоте 6 МГц // Вопросы Атомной Науки и Техники Серия техника физического эксперимента -1987 - Вып 3(34)-С. 5-7
- [2] В.С. Артемов, НН Виноградский, В.Л. Ганелия, А.Ю. Дядин, АБ Зарубин, Б К Кондратьев, Г Н Кропачев, В В Кушин, С Б Манусаджян, Н Н Миусов, И О Паршин, В И Турчин Многолучевой ускоритель протонов Препринт 22-96, ИТЭФ, Москва, 1996
- [3] В.А. Баталин, Ю. Н. Волков, Б.К. Кондратьев, В.И. Турчин Дуоплазматрон как источник малозарядных тяжелых ионов для инжектора линейного ускорителя Труды Десятого Всесоюзного Совещания по Ускорителям Заряженных частиц ГК по ИАЭ СССР ОИЯИ Д 9-87-105 1987 г - Дубна -Том 2 -С 61-64
- [4] A. A. Kolomiets, V. K. Kondratiev, V. I. Turchin Test of Duoplasmatron with cold Cathode at G W Operation Proceedings of the Partical Accelerator Conference Canada, Vancouver, May, 1997 IEEE - 1998 -P 2735
- [5] Б. К. Кондратьев, В. С. Столбунов, В. И. Турчин Модернизация дуоплазматрона линейного ускорителя И-2//Приборы и техника эксперимента - 2004 -№1 —С 39-42
- [6] В. А. Баталин, Ю. Н. Волков, Б. К. Кондратьев, В. И. Турчин Источник ионов А С 1394271 СССР, 1988 ОИ Бюлл №17 1988
- [7] Б. К. Кондратьев, В. В. Кушин, С. В. Плотников, А. В. Турчин, В. И. Турчин Инжектор для многолучевого ускорителя протонов // Приборы и техника эксперимента - 2004 - № 4 - С 5-13
- [8] В. А. Баталин, Б. К. Кондратьев, А.П. Першуков, В. И. Турчин Ионно-оптическая система источника тяжёлых ионов для времяпролетных измерений // Приборы и техника эксперимента -1987 -№4 -С 34
- [9] Б. К. Кондратьев, В. И. Турчин А.С №1384097 СССР, 1987
- [10] Б. К. Кондратьев, В. И. Турчин Уменьшение газового потока из дуоплазматрона // Приборы и техника эксперимента -2000 -№1 -С 144
- [11] Б. К. Кондратьев, В. И. Турчин Дуоплазматрон с малым потоком газа на выходе Патент на изобретение РФ № 2170988,2001 Сборник Открытия Изобретения (ОИ) Бюлл №20 2001
- [12] Б. К. Кондратьев, В. И. Турчин Получение непрерывных ионных пучков в дуоплазматроне с безнакальным катодом // Приборы и техника эксперимента - 2000 № 6 - С 68

- [13]. Б.К. Кондратьев, В.И. Турчин. Источник протонов для ускорителя. Препринт 51-92, ИТЭФ, Москва, 1992.
- [14]. Б.К. Кондратьев, В.И. Турчин. Источник ионов с эффектом полого катода. Патент на изобретение РФ №2231163,2004.
- [15]. Б.К. Кондратьев, В.И. Турчин. Универсальный источник ионов с безнакальным катодом // Приборы и техника эксперимента. - 2002. - № 2. - С. 106.
- [16]. Б.К. Кондратьев, В.В. Кушин, В.И. Турчин. Получение ионов металлов в источниках дуоплазмотронного типа // Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: ядерно-физические исследования. -1989. - Вып. 5(5). - С. 96.
- [17]. Б.К. Кондратьев, В.И. Турчин. Дуоплазмотрон. Патент на изобретение РФ №2045103,1995. ОИ. Бюлл. №27.1995.
- [18]. А.А. Коломиец, В.И. Турчин. Ионно-оптическая система с магнитной защитой электродов. Патент на изобретение РФ №2087986,1997. ОИ. Бюлл. №23.1997.
- [19]. В.А. Баталин, Б.К. Кондратьев, А.Л. Першуков, В.И. Турчин. Импульсный источник ионов дуоплазмотронного типа. А.С. №1484183 СССР, 1989.
- [20]. В.А. Баталин, Б.К. Кондратьев, А.Л. Першуков, В.И. Турчин. Времяпролётный метод контроля характеристик области формирования пучка и параметров пучка в ионном источнике линейного ускорителя. Препринт №148, ИТЭФ, Москва, 1982.
- [21]. В.И. Турчин. Мультикасповый источник ионов с 2-х ступенчатым электрическим разрядом. Патент на изобретение РФ №2214016, 2003. ОИ. Бюлл. №28.2003.
- [22]. А.А. Коломиец, В.И. Турчин, А.А. Хромов. Источник ионов с периферийным магнитным полем. Патент на изобретение РФ №2114482, 1998. ОИ. Бюлл. №18. 1998.

## 5. Список цитируемой литературы.

- {1}. В.М. Быстрицкий, А.Н. Диденко. Мощные ионные пучки. - М.: Энергоатомиздат, 1984.
- {2}. М.Ф. Ворогушин, А.Г. Гальчук, В.В. Кушин и др.. Особенности источников нейтронов для ВNST на основе компактных линейных и циклических ВЧ ускорителей // Мед. Физика. Техника, биология, клиника. Журнал ассоциации мед. Физики в России. - 1995. - №2. - С. 48.
- {3}. Г.Н. Флеров, П.Ю. Апель, А.Ю. Дидык и др.. Использование ускорителей тяжёлых ионов для изготовления трековых мембран // Атомная энергия. - 1989. - Вып. 4. - Т. 67. - С. 274.
- {4}. М.М. Данилов, Ю.Д. Катаржнов, В.В. Кушин и др.. Эксперименты для разработки метода дистанционной идентификации делящихся и других веществ // Атомная энергия. - 1994. - Вып. 6. - т. 77. - С. 424.

- {5}. Л.И. Аристов, А.Н. Владимиров, В.В. Кушин и др.. Радиационный мониторинг космического пространства пучками заряженных частиц // Инженерная экология. - 2001. - №3. С. 11.
- {6}. В.В. Владимирский, И.М. Капчинский, В.А. Тепляков. Линейный ускоритель ионов. А.С. №265312 СССР. Бюлл. ОИПТЗ. 1970. № 10. С. 75.
- {7}. В.В. Кушин, Б.П. Мурин, П.А. Федотов. Многопучковый ускоритель тяжёлых ионов с фазопеременной фокусировкой // Приборы и техника эксперимента. - 1981. - №2. - С.25.
- {8}. И.М. Капчинский. Теория линейных резонансных ускорителей. - М.: Энергоиздат, 1982. - С. 5-7.
- {9}. В.А. Баталии, Б.К. Кондратьев, В.И. Могучев и др.. Линейный ускоритель протонов И-2, подготовка форинжектора к пуску и основные характеристики пучка на выходе форинжектора//Приборы и техника эксперимента. - 1967. - № 5. - С. 60.
- {10}. И.Б. Барсуков, А.И. Балабин, В.А. Бомко и др.. Ускорительный комплекс тяжёлых ионов для промышленного производства трековых мембран. - Труды 14 Совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, Аннотации докладов, 1994, с. 154.
- {11}. В.А. Баталии, Б.К. Кондратьев, А.А. Коломиец и др.. Дуоплазматрон с холодным катодом // Приборы и техника эксперимента. - 1975. - № 2. - С. 21-23.
- {12}. Ускорительный комплекс нейтронного генератора ИТЭФ. Техно-рабочий проект, том П, сборочные чертежи, раздел 6.1., И10547000СБ. Источник ионный. ГНЦ РФ ИТЭФ, Москва.
- {13}. В.А. Баталии, А.А. Коломиец, Б.К. Кондратьев. Препринт №97, ИТЭФ, Москва, 1979.
- {14}. Я. Браун. Физика и технология источников ионов. - М.: Мир, 1998. С.163-175.
- {15}. В.А. Баталии, А.А. Коломиец, Б.К. Кондратьев и др.. Импульсный источник ионов. А.С. №431576 СССР, бюл. ОИПТЗ, №21, с. 174,1974.
- {16}. М.Д. Габович. Физика и техника плазменных источников ионов. М.: Атомиздат, 1972. - С. 304.
- {17}. Вакуумные дуги; под ред. Дж. Лафферти. - М.: Мир, 1982. С. 163-165.
- {18}. А.Т. Форрестер. Интенсивные ионные пучки. - М.: Мир, 1992. С. 73.

№ - - 5 5 2

Подписано в печать 24.12.2004 г.  
Формат 60 x 90/16. Объем 1 п.л. Тираж 70 экз. Заказ № 2211041

Оттиражировано на ризографе в «ИП Гурбанов Сергей Талыбович»  
Св. о регистрации № 304770000207759 от 09 июня 2004 года  
Москва, Доброслободская ул., 10, стр. 5