

04;10;12

## Ионный источник с холодным магнетронным катодом и магнитным сжатием плазмы

© Л.П. Вересов, О.Л. Вересов

Сухумский физико-технический институт АН Республики Абхазия,  
384914 Сухуми, Республика Абхазия  
e-mail: ol\_veres@mail.ru

(Поступило в Редакцию 10 февраля 2003 г.)

Описаны физические процессы, конструкция и характеристики ионного источника с холодным магнетронным катодом и магнитным сжатием плазмы, предназначенного для инжектора линейного ускорителя протонов.

### Введение

Ионный источник дуоплазматрон был создан Ардене в 1949 г. [1]. До сих пор он является одним из самых широко используемых типов ионных источников. Такую долгую жизнь ему обеспечили два фактора: его выдающиеся характеристики (рекордно высокая плотность плазмы, высокая газовая эффективность и высокий КПД) и дальнейшая модернизация, которую проводят уже на протяжении многих десятилетий, существенно улучшая его параметры. Главная особенность дуоплазматрона — двойное контрагирование плазмы: геометрическое — с помощью сужения промежуточного электрода и магнитное — с помощью неоднородного магнитного поля у анода. Этот процесс приводит к сильному сжатию разряда и созданию плотной плазмы, что делает дуоплазматрон по сравнению с другими типами ионных источников наиболее эффективным по эмиссионной способности и расходу плазмообразующего газа.

Существенное видоизменение дуоплазматрона произошло, когда был применен отбор пучка с развитой поверхности плазмы при помощи экспандера [2], позволивший отбирать ионные пучки большей интенсивности. Следующим шагом к повышению тока пучка было введение в дуоплазматрон осцилляции электронов для создания еще более плотной плазмы и большей газовой эффективности, что дало возможность увеличить эмиссионное отверстие [3]. Из дуоплазматрона с осцилляцией электронов удалось отбирать и формировать пучки ионов водорода с током порядка одного ампера благодаря использованию трехэлектродной ионно-оптической системы ускорения–замедления [4]. Формирование магнитного поля в дуоплазматроне с помощью постоянных магнитов взамен электромагнита позволило снизить массу источника и его энергопотребление [5].

Далее модернизация дуоплазматрона проводилась в направлении повышения ресурса его непрерывной работы, который в основном определяется сроком службы накаливаемого катода. С этой целью были предприняты попытки замены термокатода холодным катодом. Применение различных конструкций полых катодов в дуоплаз-

матроне позволило повысить ресурс его работы [6,7], но в то же время выявило ряд серьезных недостатков, таких как низкая газовая эффективность и высокий потенциал поджига разряда. Использование в дуоплазматроне многоострийного катода [8] не решило проблемы высокого потенциала поджига разряда, но добавило проблему высокого содержания примесей в генерируемых ионных пучках, так как ионизация продуктов эрозии катода достигает 90%. Эти проблемы в значительной степени удалось решить в дуоплазматроне с холодным магнетронным катодом [9]. Работа над дуоплазматроном с холодным магнетронным катодом привела авторов к созданию нового типа ионного источника с холодным магнетронным катодом и магнитным сжатием плазмы, который предназначен для инжектора линейного ускорителя протонов [10].

### Физические процессы, происходящие в источнике

Ионный источник с холодным магнетронным катодом и магнитным сжатием плазмы состоит из двух основных узлов: генератора плазмы (рис. 1) и системы отбора и формирования пучка ионов. Генератор плазмы можно условно разделить на три части: магнетронную (область холодного катода), основного разряда (область магнитного сжатия) и экспандер (область расширения плазмы).

Во вторично-эмиссионных холодных катодах зажигается тлеющий разряд, который характеризуется гамма-процессами, происходящими на эмиттирующей металлической поверхности за счет ее бомбардировки главным образом положительными ионами. Этот тип разряда является саморегулирующимся и самоподдерживающимся [11]. При фиксированной подаче плазмообразующего газа и мощности, введенной в него, перестраиваются ток разряда и напряжение на нем за счет эмиттирующей поверхности, т. е. при нехватке электронов, поддерживающих горение разряда, падает ток и растет напряжение на разряде, при избытке электронов, поддерживающих горение разряда, растет ток и понижается напряжение на разряде. Этот эффект позволяет

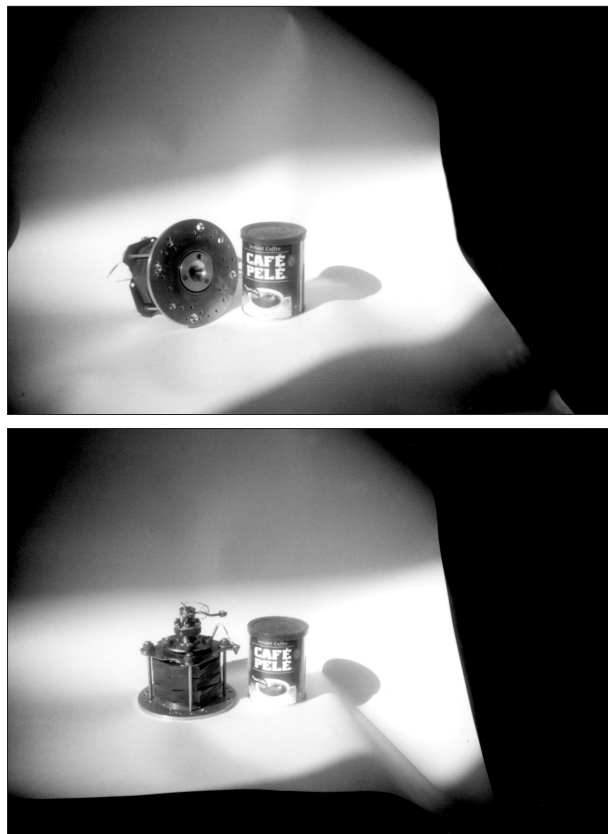


Рис. 1. Внешний вид генератора плазмы.

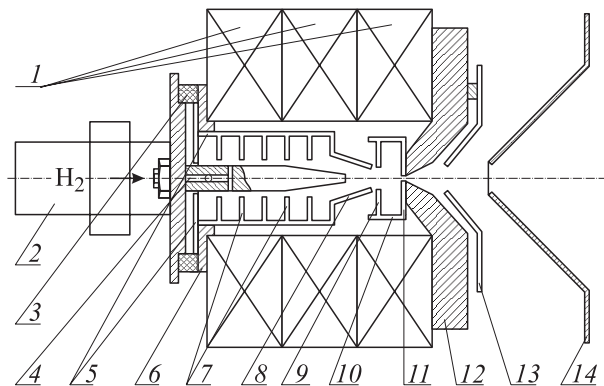
создавать тлеющие разряды как с высоким напряжением на разряде (несколько киловольт), так и достаточно низким (десятки вольт). Чтобы создать ионный источник с низким энергопотреблением нужно стремиться к тому, чтобы напряжение на разряде было минимальным. Для этого есть два пути: увеличивать количество частиц бомбардирующих эмиттирующую поверхность или увеличивать саму эмиттирующую поверхность. Оба этих пути были реализованы в цилиндрическом обращенном магнетронном катоде [12]. Введение в полость цилиндрического обращенного магнетронного катода диафрагм и ее разделение ими на несколько камер позволило увеличить эмиттирующую поверхность, увеличить газовую эффективность и сделать работу катода более стабильной [9]. Сужение в виде усеченного конуса на торце магнетронного катода преобразует плазменный поток из кольцевой формы в цилиндрическую. Это дает возможность решить две задачи: еще больше повысить его газовую эффективность, а также выровнять и увеличить плотность истекающей плазмы из области холодного катода в область основного разряда.

В области основного разряда плазма сжимается в тонкий шнур сильным неоднородным магнитным полем, что позволяет ей через миллиметровое отверстие проникать в экспандер. Надо отметить, что у промежуточного контрагирующего электрода дуоплазматрона образуется

двойной слой в виде плазменного „пузыря“. Он является источником быстрых электронов, поток которых, ускоряясь в его поле, приводит к значительному увеличению плотности плазмы [13]. В источниках с холодным магнетронным катодом плазменного „пузыря“ не образуется. В нем двойной слой возникает у электрода магнетрона с отрицательным потенциалом, в котором ускоряются первичные электроны, образованные с помощью вторичной электронной эмиссии с катода. Поэтому в этом источнике промежуточный контрагирующий электрод за ненадобностью был исключен. Известно, что в условиях плазменных ионных источников с разрядами низкого давления рекомбинация заряженных частиц главным образом происходит на стенках газоразрядной камеры [14]. Уменьшение площади стенок в газоразрядной камере за счет исключения промежуточного электрода привело к повышению плотности плазмы в источнике.

Из области магнитного сжатия плазма проникает в экспандер и расширяется в нем. Из плотной плазмы невозможно отобрать интенсивные ионные пучки хорошего качества, поэтому был применен плазменный расширитель — экспандер [2]. В нем плазма, расширяясь, уменьшает свою плотность. Образуется плазменная граница (мениск), которая формирует извлекаемый пучок. Экспандер является как частью генератора плазмы, так и частью системы отбора и формирования пучка (ионно-оптической системы (ИОС)). В нем происходит согласование потока частиц, выходящих из плазменного генератора с потоком частиц формирующегося ионного пучка. Лучше всего ионные пучки формируются с вогнутой плазменной поверхности и хуже всего с выпуклой. Известно большое количество различных конструкций экспандеров: конусной и цилиндрической геометрий, различных размеров, с сетками, стабилизирующими плазменную границу, с „закрылками“, обрезающими „плазменную шубу“.

В описываемом ионном источнике был применен конусный экспандер с плавно изменяемым углом. В него вставлялась конусная вставка (рис. 2), которая позволила: 1) стабилизировать и сформировать вместе с ускоряющим электрическим полем вогнутую плазменную границу, 2) обрезать „плазменную шубу“, 3) уменьшить площадь плазменного эмиттера ионов и тем самым улучшить эмиттанс пучка. С периферии конусной вставки избыточный газ из экспандера сбрасывался в радиальном направлении, что привело к резкому сокращению пробоев в высоковольтном промежутке. Присутствующее магнитное поле в экспандере порядка 150 Gs затрудняло рекомбинацию электронов на его стенках, благодаря чему в высоковольтном промежутке создавался отрицательный пространственный заряд, компенсирующий положительный пространственный заряд пучка. Такая конструкция экспандера позволила сформировать и извлекать скомпенсированные пучки ионов водорода с током 300 мА двухэлектродной ИОС. Этой же двухэлектродной ИОС отбирались плохо скомпенсированные пучки ионов водорода с током более 1 А.



**Рис. 2.** Конструкция ионного источника: 1 — кольцевые феррит-бариевые магниты, 2 — электромагнитный клапан для импульсного напуска газа, 3 — кольцевой керамический изолятор, 4 — анод магнетрона, 5 — обойма катода магнетрона, 6 — опорное центрирующее кольцо, 7 — катодные диафрагмы, 8 — конусная вставка магнетронного катода, 9 — анодная диафрагма, 10 — защитный экран, 11 — коллимирующая диафрагма, 12 — эмиссионный электрод, 13 — конусная вставка экспандера, 14 — извлекающий электрод.

В ближайшем будущем в этом ионном источнике будут применены трехэлектродная ИОС ускорения—замедления и электростатическая система с двойной фокусировкой пучка. Трехэлектродная ИОС (экспандер—извлекающий электрод—замедляющий электрод) создает в ионно-оптическом тракте потенциальный барьер для электронов пучковой плазмы, дрейфующих в направлении источника. Этот барьер образует область виртуального катода электронов, которые компенсируют положительный пространственный заряд ионного пучка. Благодаря этому удастся сформировать более интенсивные скомпенсированные ионные пучки. Надо заметить, что при использовании двухэлектродной ИОС обратный поток электронов из пучковой плазмы, ускоренный в высоковольтном зазоре, расплавлял медную коллимирующую диафрагму экспандера.

Линза с двойной фокусировкой работает более эффективно, чем одиночная линза. При этом она также запитывается одним источником питания. Преимущество линзы состоит в том, что она представляет собой две спаренные одиночные линзы с различными фокусными расстояниями.

Ниже описываются особенности конструкции ионного источника с холодным магнетронным катодом и магнитным сжатием плазмы, в котором реализованы изложенные идеи.

## Конструкция источника

Исключение промежуточного электрода из конструкции дуоплазматрона с холодным катодом существенно изменило и упростило конструкцию новой модели ионного источника, показанную на рис. 2. Магнитное поле

в нем организовано с помощью трех кольцевых феррит-бариевых магнитов толщиной 16 mm каждый. Два из них с согласной полярностью образуют продольное поле в области магнетронного катода. Третий кольцевой магнит со встречной полярностью создает сильное неоднородное магнитное поле, контрагирующее разряд у эмиссионного отверстия. Холодным катодом в этом ионном источнике является обращенный многокамерный цилиндрический магнетрон [9]. Конструктивно он полностью повторяет последний вариант магнетронного катода дуоплазматрона. Катодный блок представляет собой обойму из нержавеющей стали. В эту обойму вставляются детали катода магнетрона, состоящие из немагнитных металлических шайб и трубок. Шайбы играют роль диафрагм, а трубки — роль распорок. Они делят полость обоймы на шесть ячеек — камер. Обойма заканчивается вставкой, представляющей собой усеченный конус с отверстием в верхнем основании, диаметром 4 mm. Вся обойма вставляется в опорное центрирующее кольцо, изготовленное из немагнитного материала. К этому опорному кольцу через кольцевой керамический изолятор крепится анод магнетрона. Анод выполнен в виде металлического цилиндрического стержня с конусным окончанием. Через него подаются порции плазмообразующего газа с помощью электромагнитного клапана [15]. Весь катодный блок помещен в продольное магнитное поле. Третий кольцевой магнит, соединенный с двумя первыми кольцевыми магнитами встречной полярностью, совместно с железным эмиссионным электродом создает зону магнитного сжатия плазмы. Это позволяет в узком зазоре контрагирования создать сильное неоднородное магнитное поле, назначение которого заимствовано из физической концепции дуоплазматрона. На рис. 3 показано осевое распределение магнитного поля этого ионного источника, сформированного при помощи кольцевых магнитных возбудителей, описанных выше, и железного эмиссионного электрода. Эмиссионный электрод выполняет три функции: 1) как уже отмечалось выше, формирует магнитное поле нужной конфигурации, 2) играет роль основного анода источника, 3) в нем размещена конусная плазменная полость экспандера. Эмиссионный электрод представляет собой железный диск сложной формы, примыкающий к третьему магнитному кольцу. Его центральная конусная часть утоплена в полость этого магнита на 6 mm. С противоположной стороны диска в центральной его части расположена конусная полость экспандера. Диаметр отверстия в вершине конуса эмиссионного электрода составляет 2 mm. К вершине конуса плотно примыкает медная вставка (коллимирующая диафрагма) круглой формы толщиной 1 mm с коллимирующим отверстием диаметром 1 mm, которая выполняет и другую функцию — осуществляет теплоотвод к эмиссионному электроду. С ней соединен цилиндрический металлический экран, прикрывающий магниты от частиц и излучения разряда. В конусную полость экспандера с плавно расширяющимся углом

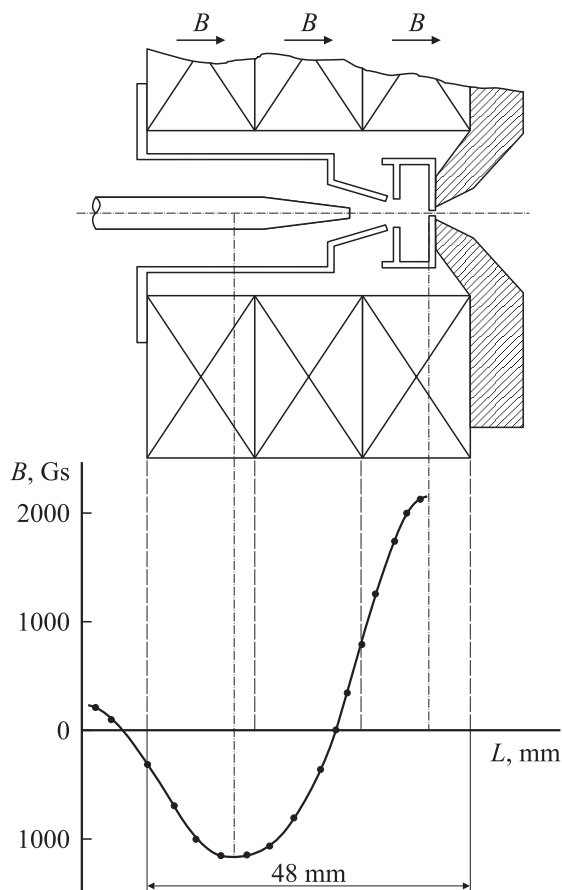


Рис. 3. Осевое распределение магнитного поля в источнике.

помещена конусная вставка. Между полостью и вставкой образована кольцевая щель для сброса части газа, находящегося в экспандере. Конусная вставка крепится тремя ножками к эмиссионному электроду и находится под его потенциалом. Она повторяет форму полости экспандера и затем плавно переходит в плоское кольцо. Отверстие в ней равно  $\varnothing 8$  мм, а длина от ее торца до коллимирующего отверстия в медной вставке составляет 9 мм. Извлекающий электрод крепится на трех керамических изоляторах к эмиссионному электроду генератора плазмы. Диаметр отверстия извлекающего электрода составляет 9 мм. Длина ускоряющего зазора изменялась от 8 до 11 мм.

## Диагностическая аппаратура

В исследованиях источника для измерения различных параметров ионного пучка использовалась специфическая диагностическая аппаратура.

Для оценки эмиттанса пучка применялся угломер следующей конструкции. В секционированный цилиндр Фарадея (ЦФ) [16] с диаметром входного отверстия 60 мм была вставлена металлическая трубка диаметром 15 мм и базовой длиной 350 мм. На вершине заостренного торца трубки, обращенного в сторону источника,

выставлялась щель шириной 0.1 мм, которая вырезала струйку пучка. На другом торце трубки устанавливалась решетка из проволочек толщиной 0.2 мм и зазором между ними 0.2 мм. Таким образом, ее шаг равнялся 0.4 мм. Решетка имела фигурную форму для облегчения визуального отсчета (рис. 4). Она плотно прилегалась к кварцевому стеклу, легированному каким-либо лантаноидом [17]. Стекло выполняло роль оптического детектора ускоренных ионов, под воздействием которых на стекле высвечивались яркие полосы. По их числу и базовой длине определялась угловая расходимость струйки пучка. За легированным кварцевым стеклом устанавливалась оптическая линза для удобства визуального наблюдения и отсчета светящихся полосок.

Ток ионного пучка фиксировался секционированным ЦФ с угломером.

Распределение плотности тока снималось малым ЦФ, у которого диаметр входного отверстия был 1.1 мм.

Портрет пучка наблюдался и измерялся с помощью легированного каким-либо лантаноидом кварце-

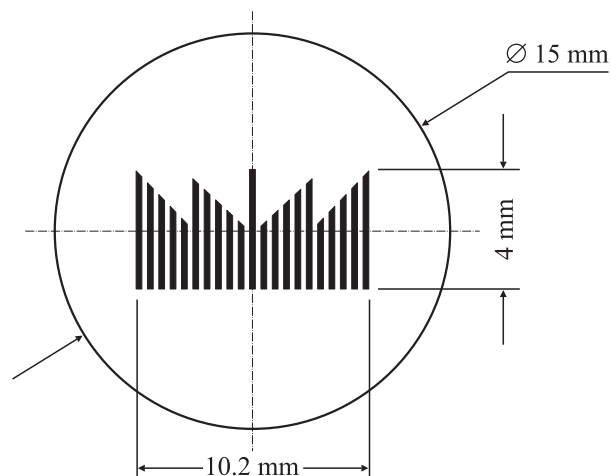


Рис. 4. Вид измерительной линейки на торце угломера: количество щелей — 21, ширина щели 0.2 мм, толщина проволочки решетки 0.2 мм, шаг меандра 0.4 мм.

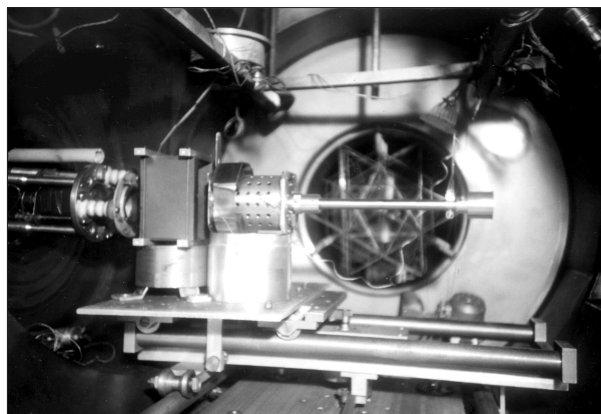


Рис. 5. Расположение источника и угломера в вакуумной камере.

вого стекла, на которое накладывалась сетка для стока заряда.

Массовый состав пучка измерялся с помощью масс-анализатора, построенного по принципу масс-спектрометра Демпстера [18]. Магнитное поле создавалось электромагнитом и могло достигать величины 6000 Gs.

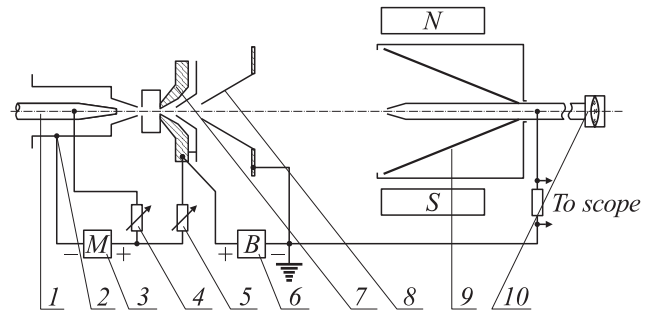
Все диагностические приборы устанавливались в вакуумной камере объемом  $1 \text{ m}^3$  на подвижную платформу, которая могла двигаться вдоль двух осей декартовой системы координат электродвигателями вакуумного исполнения (рис. 5).

## Экспериментальные результаты

Ионный источник с холодным магнетронным катодом и магнитным сжатием плазмы исследовался в импульсном режиме с длительностью импульса от 100 до  $1 \mu\text{s}$  и частотой следования от 1 до 10 Hz.

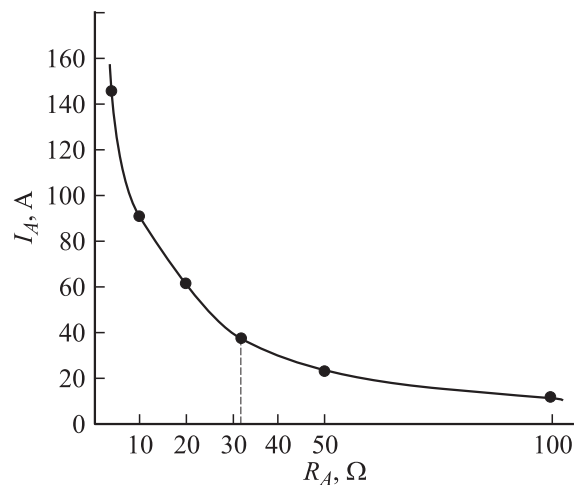
Как видно из вышеописанной конструкции ионного источника, магнетронный катод в нем отличается от магнетронного катода, описанного в работе [9]. Его длина была увеличена вдвое, что позволило увеличить число камер с трех до шести. Продольное магнитное поле создавали не один, а два магнитных возбуждателя. Диаметр катода был увеличен с 19 до 22 mm. Этими действиями удалось значительно увеличить эмиттирующую поверхность катода, а также усилить продольное магнитное поле. Это привело к снижению напряжения на разряде с 400–500 до 250–300 V, а также уменьшению расхода плазмообразующего газа с 10–12 до 7–9 Torr · cm<sup>3</sup>/pulse. Благодаря конусной насадке, являющейся окончанием катодного блока и служащей диафрагмой между магнетронной областью и областью основного разряда, удалось увеличить газовую эффективность с 7–9 до 5–7 Torr · cm<sup>3</sup>/pulse. Газовые измерения были проведены по той же методике, которая описана в работе [9].

На рис. 6 показана схема подключения источника ионов. Модулятор разряда отрицательной полярностью подключался к катоду магнетрона, а положительной полярностью по двум параллельным цепям через регулируемые балластные сопротивления подключался к аноду магнетрона и эмиссионному электроду. Возбуждаемый модулятором разряд имел несколько форм горения в различных областях генератора плазмы. Эмиссионная способность ионного источника зависела исключительно от параметров контрагируемого разряда, характеристики которого в свою очередь зависели от параметров разряда в магнетронном катоде. Поэтому авторы контрагируемый разряд назвали основным, а магнетронный разряд вспомогательным. При изменении соотношений величин сопротивлений балластных резисторов менялось соотношение величин токов вспомогательного и основного разрядов. Как сказано выше, основной разряд определял величину и длительность импульса отбираемого тока

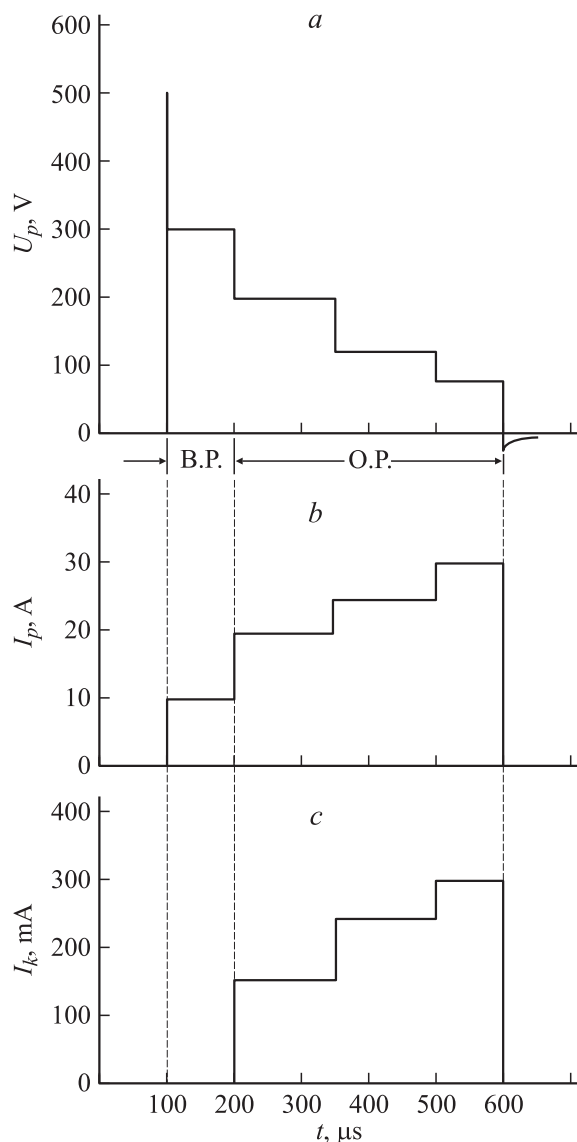


**Рис. 6.** Схема электропитания источника и измерительной цепи: 1 — анод магнетрона, 2 — катод магнетрона, 3 — модулятор питания разряда, 4 — балластное сопротивление вспомогательного разряда, 5 — балластное сопротивление основного разряда, 6 — высоковольтный выпрямитель, 7 — анод источника (эмиссионный электрод), 8 — извлекающий электрод, 9 — секционный конус ЦФ с экраном, 10 — угломер с оптической линзой.

ионного пучка из источника. Изменение токов с помощью резисторов в цепях вспомогательного и основного разрядов влияло на процесс работы источника и параметры ионного пучка. Таким образом, наметилась закономерность: при токе в цепи магнетрона, большем, чем в цепи основного разряда  $I_m > I_{ch}$ , наблюдался спокойный режим горения разряда с токами пучка ионов до 100 mA; для токов пучка более 100 mA оптимальным было условие, когда  $I_m < I_{ch}$ . Поэтому был выбран режим, когда в цепи вспомогательного разряда стоял резистор с номиналом  $R_M = 32 \Omega$ , а в цепи основного разряда сопротивление резистора менялось в широких пределах (рис. 7). Требуемой величине тока пучка 200–300 mA для строящегося инжектора соответствовал диапазон сопротивлений балластных резисторов в цепи основного разряда, номинал которых варьировался от 5 до 20  $\Omega$ .



**Рис. 7.** Зависимость тока основного разряда от балластного сопротивления в цепи основного разряда при фиксированном балластном сопротивлении в цепи вспомогательного разряда.



**Рис. 8.** Осциллограммы напряжения на разряде (а), ток разряда (б), тока ионного пучка (с). В.Р. — вспомогательный разряд, О.Р. — основной разряд.

При минимальной подаче плазмообразующего газа ( $H_2$ ) в магнетроне возбуждался вспомогательный разряд при потенциале поджига 400–600 В. Увеличением подачи плазмообразующего газа ( $H_2$ ) или добавкой в разряд вносимой мощности зажигался основной разряд, изменяющий распределение потенциалов на электродах, т.е. менялась картина распределения напряжений и токов на всем разряде. Только при зажигании основного разряда плазма заполняла экспандер и отбирался ток ионного пучка (рис. 8). Распределение напряжений и токов на всем разряде при отборе интенсивных ионных пучков в начальный момент, как правило, имело ступенчатый вид, что связано с переходом тлеющего разряда из одной его формы горения в другую. Отбор и формирование пучка ионов происходили во всех формах горения основного разряда, которые на осциллограммах (рис. 8)

характеризовались своей „полкой“. При отборе ионного пучка режим работы источника легко перестраивался в нужную форму горения разряда: либо изменением величин сопротивлений балластных резисторов, либо регулировкой подаваемых клапаном порций плазмообразующего газа, либо изменением вводимой в разряд мощности с помощью модулятора. При этом осциллограмма токов разряда и пучка из ступенчатой формы перестраивалась в прямоугольную, т.е. одну „полку“. Ток вспомогательного разряда в магнетроне мог достигать 100 А, однако при оптимальных условиях работы генератора плазмы он находился в интервале 5–30 А. Ток основного разряда мог достигать 200 А, но для пучка ионов с током 200–300 мА он находился в интервале 20–60 А. Для слабых пучков (с током до 50 мА) напряжение на основном разряде удерживалось в диапазоне 250–300 В, а при увеличении токов ионных пучков напряжение основного разряда начинало понижаться, а ток нарастать. С нарастанием тока разряда его свечение менялось от бледно-розового до красно-оранжевого. При токах основного разряда величиной более 100 А напряжение на нем могло падать до 50 В. Это — форма аномального тлеющего разряда, а не дугового. Срыв в дугу магнетронных генераторов всегда сопровождался всполохами ярко-голубого свечения, что почти не наблюдалось при многокамерной конструкции магнетронного катода.

Из многочисленной литературы, посвященной дуоплазмотронам, известно, что с ростом тока разряда растет процентное содержание ионов  $H^+$  и  $H_3^+$ , а процентное содержание ионов  $H_2^+$  падает. На процентное содержание ионов также влияет длина между промежуточным электродом и анодом [19]. В описываемом ионном источнике эта тенденция также соблюдалась. Только влияла длина промежутка между эмиссионным электродом и торцом магнетронного катода, который являлся областью горения основного разряда. При длине 1 мм содержание протонов в пучке достигало 40–45%. При длине 6–8 мм содержание протонов в пучке достигало 75–85%, при этом параметры разряда поддерживались неизменными. Когда расстояние между анодом и магнетронным катодом было не более 3 мм плазма спокойно истекала из магнетронной области в область основного разряда плазменного генератора. При расстояниях более 3 мм между этими электродами истечение плазмы из катодной области источника было затруднено и генератор плазмы работал нестабильно. Этот факт косвенно доказывает, что плазменный „пузырь“ и в конусе магнетронного катода не образуется. Для поддержания стабильной работы ионного источника на расстоянии 1 мм от торца конуса катода магнетрона помещалась диафрагма с внутренним диаметром 4.5 мм, имеющая потенциал анода. Благодаря ей в зазоре между магнетронным катодом и анодной диафрагмой сохранялась достаточная напряженность электрического поля для стабильного истечения плазмы из одной области в другую. Это дало возможность ионному источнику работать стабильно при любом расстоянии между магнетронным катодом и эмиссионным электродом.

Ток основного разряда, А	Ток пучка в ЦФ, mA	Диаметр (профиль) пучка, mm	Количество засвеченных полосок в угломере, штуки	Длина двух противоположащих катетов, mm	Угол расходимости струйки пучка, rad	$\varepsilon$ нормализованный, m · rad
18	120	20	3	1.4	$4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-7}$
22	150	22	4	1.8	$5.1 \cdot 10^{-3}$	$2.85 \cdot 10^{-7}$
40	200	31	8	3.4	$9.7 \cdot 10^{-3}$	$7.5 \cdot 10^{-7}$
60	300	43	11	4.6	$13.1 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-6}$

В некоторых режимах работы источника в основном разряде появлялись релаксационные колебания тока и напряжения с частотой в несколько десятков килогерц и глубиной модуляции, достигающей 10%. Они порождали соответствующие колебания тока пучка с такой же частотой. Эти колебания устранялись перестройкой режима горения основного разряда. Следует отметить, что при расстоянии между катодом магнетрона и эмиссионным электродом более 3 mm горение основного разряда часто было неустойчивым с релаксациями тока. Это следует объяснять изменением величины и конфигурации электрического поля. Установка диафрагмы, описанной выше, способствовала стабилизации горения основного разряда.

Конусный экспандер, применяемый ранее в дуоплазматроне, работал неудовлетворительно. Работа над усовершенствованием различных частей дуоплазматрона, в том числе и над экспандером, привела к созданию нового типа ионного источника. Конструкция модернизированного конусного экспандера и физические принципы его работы описаны выше. Здесь же отметим его преимущество перед экспандером, применяемым ранее в дуоплазматроне. Прежний экспандер не позволял подавать на высоковольтный промежуток напряжение отбора более 45 kV из-за частых и сильных пробоев, этот же в наших условиях позволял подавать на высоковольтный промежуток напряжение отбора до 70 kV. Двухэлектродная система отбора и формирования пучка с прежним экспандером позволяла извлекать сильно расходящиеся пучки, диаметр которых на расстоянии 15 cm от источника доходил до 180 mm. Двухэлектродная система отбора и формирования пучка с новым экспандером позволяла извлекать слабо расходящиеся пучки, диаметр которых на расстоянии 15 cm от источника не превышал 45 mm. Этот факт доказывает, что в этом экспандере удалось сформировать мениск вогнутой формы. Измерение характеристик ионного пучка проводилось в четырех разных режимах работы источника с двухэлектродной ИОС при напряжении отбора, равном 45 kV, с целью оценки его главной характеристики — эмиттанса. Полученные результаты приведены в таблице. Эмиттанс пучка оценивался грубо, с некоторым завышением, потому что вычисление его площади ограничивалось прямоугольником охватывающим эллипс, а не собственно площадью эллипса. В центре пучка в одной поперечной фазовой плоскости щелью вырезалась струйка пучка, измерялись угол ее расходимости и диаметр пучка.

Величина эмиттанса пучка определялась умножением угла расходимости его струйки на диаметр пучка, и это произведение делилось на 4. Таким образом, оценивался эмиттанс полного тока аксиально-симметричного пучка. В таблице указан нормализованный эмиттанс.

Был проведен эксперимент по оценке максимальной эмиссионной способности источника. При токе основного разряда порядка 100 А измерялся ЦФ ток пучка около 2 А, но плохо сформированный, с сильными колебаниями и, как следствие, с мощными пробоями. Проверить этот результат еще предстоит.

При работе ионного источника со скважностью 1000 охлаждения его не требовалось, но при понижении скважности до 100 уже требовалось охлаждать источник.

Описанный генератор плазмы работал также в стационарном режиме без охлаждения, когда токи магнетронного разряда не превышали 500 mA. Генератор запитывался от блока питания БП-100 магнитного электроразрядного насоса. При введении в плазменный генератор большей мощности и соответствующего его охлаждения ионный источник с холодным магнетронным катодом и магнитным сжатием плазмы, видимо, сможет генерировать непрерывные интенсивные ионные пучки.

## Заключение

Разработанный ионный источник с холодным магнетронным катодом и магнитным сжатием плазмы превосходит дуоплазматрон с таким же катодом более простой конструкцией и улучшенными характеристиками, такими как газовая эффективность, эмиссионная способность и качество извлекаемых ионных пучков.

Исследование этого ионного источника еще продолжается. Предстоит испытать его с новой трехэлектродной ИОС ускорения — замедления и линзой с двойной фокусировкой пучка. По нашей оценке, качество отбираемых из источника пучков должно улучшиться, что позволит извлекать из него более интенсивные пучки с вполне удовлетворительными характеристиками. Для отбора более интенсивных пучков, видимо, придется оптимизировать размеры экспандера и конусной вставки. Оптимизация магнитных полей в генераторе плазмы может привести к более стабильной работе источника при извлечении интенсивных ионных пучков.

Авторы выражают благодарность С.В. Григоренко за внимание к рукописи и ценные замечания.

## Список литературы

- [1] *Ardenne M.* // Tabellen der Elektronenphysik. Ionenphysik und Übermikroskopie. Berlin, 1956.
- [2] *Габович М.Д.* Плазменные источники ионов. Киев: Наукова думка, 1964.
- [3] *Демирханов Р.А., Курсанов Ю.В., Благовещенский В.М.* // ПТЭ. 1964. № 1. С. 30.
- [4] *Порошин О.Ф., Кутан Ж.Ж.* // Формирование и исследование интенсивных пучков ионов водорода. Изд-во ФТИ ГК ИАЭ СССР, 1963. С. 102.
- [5] *Christiansen L.J., Zaharis E.J.* // Rev. Sci. Instrum. 1966. Vol. 37. P. 1571.
- [6] *Барченко В.Т., Заграничный С.Н., Соколовский А.Ю.* // Изв. ЛЭТИ. Вып. 303. Л.: ЛЭТИ, 1982. С. 42–47.
- [7] *Нижегородцев В.В.* // Тр. Пятого Всесоюз. совещания по ускорителям заряженных частиц. Т. 1. Протвино, 1978. С. 368–370.
- [8] *Delbarre J.P., Faure J., Noel R., Vienet R.* // C.R. Acad. Sci. B (France). 1966. Vol. 262. N 24. P. 1494–1497.
- [9] *Вересов Л.П., Вересов О.Л., Дзюзя М.И.* и др. // ЖТФ. 2001. Вып. 10. С. 50–53.
- [10] *Аринин Л.В., Кузнецов Г.В., Марколия А.И.* и др. // Тез. докл. Девятого Всероссийского совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. СПб., 1998. С. 122.
- [11] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.
- [12] *Thornton J.A.* // Vac. Sci. Technol. 1978. Vol. 15. N 2. P. 171–177.
- [13] *Demirhanov R.A., Frohlich H., Kursanov U.V., Gutkin T.I.* // Brookhaven Nat. Lab. 1962. BNL-767 (C-36). P. 224.
- [14] *Габович М.Д.* Физика и техника плазменных источников ионов. М.: Атомиздат, 1972.
- [15] *Вересов Л.П., Литвинов П.А., Неустроев Ю.П., Николаев Э.С.* А.с. 1989. № 4364894.
- [16] *Вересов Л.П., Вересов О.Л., Скрипаль Л.П.* // ЖТФ. 1997. Вып. 9. С. 135.
- [17] *Мелета Е.А., Вересов Л.П., Кижин В.Н.* и др. // Физика и химия стекла. 1991. Т. 17. № 3. С. 77–79.
- [18] *Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю.* Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. М.: Наука, 1972.
- [19] *Kellog E.M., Eklund K.E.* // Rev. Sci. Instr. 1962. Vol. 33. P. 1338.