

04;10;12

## Исследование ионного источника, предназначенного для пучковых технологий

© Л.П. Вересов, О.Л. Вересов, П.А. Литвинов

Сухумский физико-технический институт АН Республики Абхазия,  
384914 Сухуми, Абхазия

(Поступило в Редакцию 28 декабря 1998 г.)

Описывается ионный источник с холодным катодом, из которого были получены пучки круглого сечения различных газовых и твердотельных ионов для технологических целей.

### Введение

Нарастающий интерес к пучковым технологиям побудил авторов к созданию и исследованию источника для получения тяжелых ионов. Вначале источник работал в импульсном режиме ( $\tau_{\text{imp}} = 0.1-1 \text{ ms}$ ,  $F = 1-50 \text{ Hz}$ ), а позднее был переведен в стационарный режим. Пучки, получаемые из источника, являются смешанными, так как они состоят из ионов рабочего газа и ионов распыляемого твердого вещества. Поэтому в зависимости от требования технологического процесса использовались как смешанные, так и разделенные пучки. Конструкция источника позволила изменять энергию пучков в широких пределах от 200 eV до 100 keV. Ток пучка зависел от режима работы источника и веществ, из которых состоял пучок. Ток смешанных пучков в стационарном режиме работы источника достигал величин от 0.1 до 10 mA. В импульсном режиме работы из источника извлекали пучки с током в десятки миллиампер.

### Конструкция ионного источника

Конструкция источника, показанная на рис. 1, состоит из двух основных узлов: генератора плазмы и ионно-оптической системы. Генератор плазмы представляет собой цилиндрическую газоразрядную камеру, расположенную между плоским катодным блоком и конусообразным анодом с центральным эмиссионным отверстием. Эта газоразрядная ячейка (ГРЯ) помещена в осевое в сечении магнитное поле с пробочным отношением 2000/120 Gs, силовые линии которого расходятся от катода к аноду. Катодный блок 2 включает в себя: контейнер-держатель 3, находящийся в центре катодного блока и выдвинутый в глубь газоразрядной камеры; диск ("шайбу") из распыляемого рабочего вещества 5, вставляемый в контейнер; систему напуска рабочего газа 4 и измерения вакуума в камере источника. Изолятор 1, изолирующий катод от анода, защищен экраном 6 от покрытия пленками распыляемого вещества.

К аноду (эмиссионному электроду) 7 газоразрядной ячейки пристыкована отъюстированная ионно-оптическая система ускорения-замедления (ИОС-УЗ). Анод и первый электрод ИОС-УЗ 9 образуют ускоряю-

щий зазор (высоковольтный промежуток). Используемая трехэлектродная ИОС-УЗ состоит из четырех элементов в виде металлических дисков, собранных на диэлектрических стержнях 8. Первый диск является ускоряющим электродом 9, второй — замедляющим электродом 10. Он также выполняет роль первого крайнего электрода одиночной электростатической линзы. Третий диск является центральным (фокусирующим) электродом 11 одиночной электростатической линзы. Четвертый диск — последний крайний электрод 12 этой линзы.

Такая ИОС позволяет изменять энергию частиц в пучке в широких пределах от  $10^3$  до  $10^6$  eV без заметного изменения тока пучка, фокусировать ионный пучок, отделять газоразрядную плазму от пучковой плазмы.

Экран 13, помещенный между последним электродом линзы и мишенью, разделяет вакуумную камеру на две области с целью уменьшения влияния обратных потоков газа и распыляемых частиц. Применение экрана значительно уменьшило пробой в ионно-оптическом тракте. Электрическая схема подключения источника и диаграмма напряжений приведены на рис. 2.

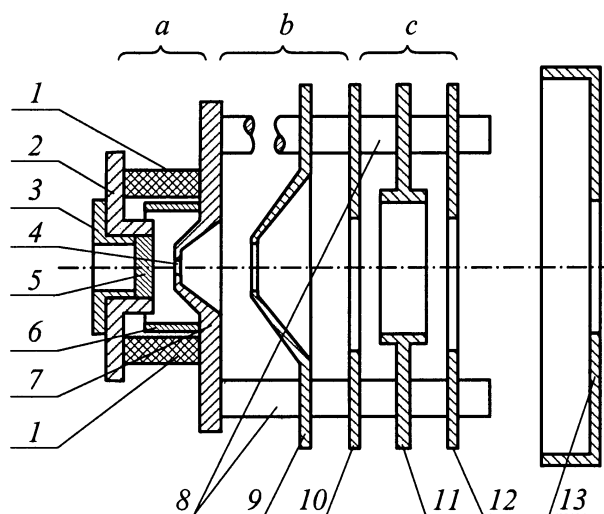


Рис. 1. Конструкция ионного источника: а — газоразрядная ячейка, б — ионно-оптическая система ускорения-замедления, в — линза.

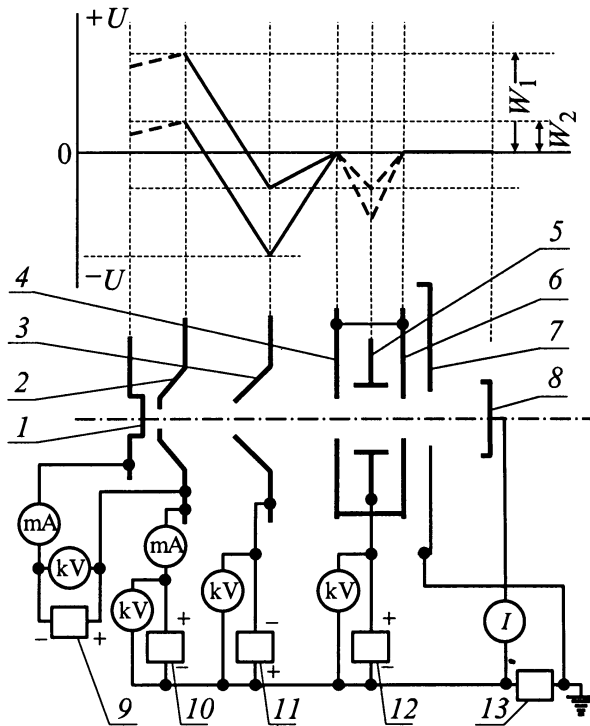
## Диагностика

Для измерения параметров пучка, отбираемого из ионного источника, использовалась следующая измерительная и диагностическая аппаратура. Ток пучка измерялся цилиндром Фарадея (ЦФ) с входным отверстием  $\varnothing = 60$  mm. Радиальное распределение плотности тока в пучке измерялось поперечным передвижением малого ЦФ. В зависимости от диаметра пучка использовался малый ЦФ с варьируемым входным отверстием  $\varnothing = 11, 5, 1.1$  mm.

Для определения соотношения компонентов газовых и твердотельных ионов применялся косвенный метод измерения при помощи ЦФ с входной прямоугольной щелью  $3 \times 2$  mm и масс-индикатора, которым вырезалась струйка пучка того же сечения. Масс-индикатор с поперечным магнитным полем  $B = 0.49$  T и пролетной длиной 80 mm разделял компоненты смешанного пучка, что позволяло видеть след разделенных компонентов на легированном кварцевом стекле [1] и затем измерять их ток. Измерение тока струек пучка в одном и другом при-

боре позволяло определить соотношение компонентов в смешанном пучке.

Инертные газы, используемые в источнике в качестве рабочих, имели примеси, которые можно было принять за твердотельные ионы. Это заставило усомниться в правильности измерений сделанных косвенным методом. Поэтому был создан и применен компактный многоканальный масс-анализатор, позволивший определять массовый состав пучка. Особенность прибора заключается в том, что магнитное поле у него постоянное и в этом поле выбрано 10 магнитных дорожек с заданными радиусами, каждая со своим приемным коллектором. Поэтому переменными являются только две величины: масса частиц и их энергия. Меняя энергию частиц, можно принимать струйку пучка и измерять ее ток в разных коллекторах, тем самым определяя массу частиц в пучке или при фиксированной энергии пучка искать его компоненты с различными массами в разных коллекторах, что позволяло анализировать состав пучка, не меняя режим работы исследуемого ионного источника. Этим прибором были точно измерены соотношения компонент газовых и твердотельных ионов в пучке.



**Рис. 2.** Электрическая схема подключения источника и диаграмма напряжений: 1 — катодный блок; 2 — анод (эмиссионный электрод); 3 — ускоряющий электрод; 4 — замедляющий электрод — первый электрод электростатической линзы; 5 — центральный (фокусирующий) электрод электростатической линзы; 6 — последний электрод электростатической линзы; 7 — экран; 8 — коллектор; 9 — блок питания разряда БП-100; 10 — высоковольтный блок питания,  $U = 110$  kV; 11 — высоковольтный блок питания,  $U = 50$  kV; 12 — высоковольтный блок питания,  $U = 50$  kV; 13 — катушка токового реле. При равном напряжении отбора (ускоряющем) извлекаются пучки разных энергий ( $W_1 > W_2$ ).

## Экспериментальные результаты

В ходе работы с плазменным источником, предназначенным для получения отрицательных ионов, было обнаружено сильное распыление локальной области одного из электродов. При этом весь процесс проходил при сравнительно слабом токе разряда (единицы–десятки миллиампер). Это послужило отправной точкой для начала целенаправленной работы над новым ионным источником для технологических целей, простым по конструкции, но, как оказалось, сложным по протекаемым в нем физическим процессам. Было установлено, что в пучке, отбираемом из источника, имеются ионы распыляемого материала, которые при бомбардировке пучком стеклянной мишени покрывали ее пленкой.

В экспериментах использовались следующие рабочие газы:  $H^2$ ;  $N^2$ ;  $O^2$ ; атмосферный воздух; все инертные газы, кроме Rn, а в качестве распыляемых веществ — В, С (графит), Al, Ti, Fe, Ni, Cu, Y, Zr, Nb, Mo, Ta, W и Pb.

1. Работа источника в импульсном режиме ( $\tau_{им.} = 0.1-1$  ms;  $F = 1-50$  Hz). Импульсный режим работы источника реализовывался импульсным напуском газа и импульсным питанием разряда. Ускоряющее, замедляющее и фокусирующее напряжения были постоянными.

Из источника с эмиссионным отверстием  $\varnothing 3$  mm при ускоряющем напряжении в районе 40 kV отбирались пучки газовых ионов с токами водорода до 60 mA, гелия до 40 mA, аргона до 30 mA, ксенона до 10 mA, азота до 20 mA, кислорода до 20 mA. В зависимости от рода рабочего газа, распыляемого вещества и режима работы источника отношение распыляемых ионов твердого вещества к общему току пучка составляло от 1 до 30%.

Например, были получены такие результаты. В источнике 1 распыляемый материал — тантал, рабочий газ — гелий. В пучке был зафиксирован ток ионов гелия 16 мА, ток ионов тантала 1.5 мА и ток тяжелых частиц 2 мА. Авторы считают, что тяжелыми частицами являются заряженные группы атомов (кластеры) тантала. Можно сделать вывод, что тантала в пучке было 7%. Если же просуммировать его долю и вклад тяжелых частиц, то отношение в пучке распыленных частиц к газовым будет 17%. В источнике 2 распыляемый материал — молибден, рабочий газ — водород и гелий. В случае водорода был зафиксирован общий ток пучка 20 мА, ток ионов молибдена 4 мА, ток тяжелых частиц 2 мА. Отсюда отношение тока ионов молибдена к общему току пучка составило 20%, а соотношение тока распыляемых частиц к общему току пучка 30%. В случае гелия общий ток пучка достигал 30 мА, ток ионов молибдена 8–10 мА, ток тяжелых частиц 2 мА. Отсюда соотношение тока ионов молибдена к общему току пучка 27–33%, а соотношение тока распыляемых частиц к общему току пучка 33–40%.

В источнике 3 распыляемый материал — медь, рабочий газ — гелий. Был зафиксирован общий ток пучка 28 мА, ток ионов меди 2 мА, ток тяжелых частиц 3.5 мА. Отсюда соотношение ионов меди к общему току пучка 7%, соотношение распыленных частиц к общему току пучка 19%.

В источнике 4 распыляемый материал — титан, рабочий газ — водород и аргон. Был получен общий ток пучка 10 мА, ток ионов титана 1.2 мА, тока тяжелых частиц не наблюдалось. Отсюда соотношение токов ионов титана и водорода составило 12%. При рабочем газе аргоне общий ток пучка достигал 2–3 мА, ток ионов титана 0.4–0.6 мА, ток тяжелых частиц не наблюдался. Отсюда соотношение токов титана и аргона было 20%.

Указанные выше общие токи пучков, извлекаемых из источника, сильно отличаются друг от друга не только потому, что использовались разные рабочие газы и распыляемые материалы. Главным образом различие между ними объясняется тем, что источник работал в разных режимах по давлению газа, параметрам разряда и т.д. Следует отметить, что импульсный режим работы источника интересен тем, что обрабатываемый образец нагревается значительно меньше, чем в непрерывном режиме.

2. Работа источника в стационарном (непрерывном) режиме. В технологических экспериментах стационарный режим работы источника оказался более предпочтительным, чем импульсный, поскольку в таком режиме работы источника доза имплантируемых ионов набирается быстрее. Поэтому источник был переведен в стационарный режим и полномасштабные исследования его были проведены именно в этом режиме. Поскольку в источник не было введено охлаждение, то отбираемый ток пучка ограничивался тремя миллиамперами, но кратковременно доводился до десяти миллиампер.

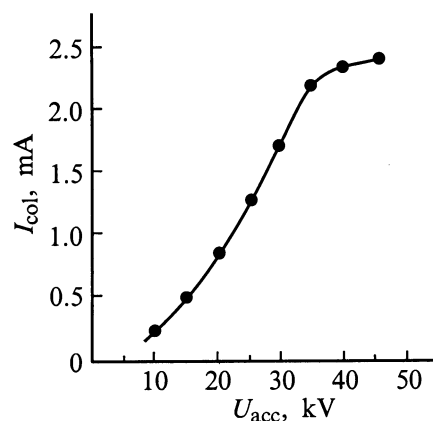


Рис. 3. Зависимость отбираемого ионного тока от ускоряющего напряжения в Ar при фиксированных  $U_{ch} = 3$  кВ,  $p = 3 \cdot 10^{-5}$  Торр.

Разрядный ток в источнике в качестве параметра нами не приводится по той причине, что разряд в нем, отбор и формирование пучка в ускоряющем зазоре — единый процесс, в котором происходит сложный токоперенос положительных и отрицательных частиц по трем цепям: катод–анод, анод–ускоряющий электрод, катод–ускоряющий электрод. Поэтому за основной параметр был принят общий ток пучка.

На рис. 3 показана характерная зависимость полного отбираемого ионного тока от ускоряющего напряжения, которая практически не отличается от подобных характеристик плазменных ионных источников (например, дуоплазматрона). Она имеет продолжительный, нарастающий, близкий к линейному участок, плавно переходящий в насыщение.

Зависимость полного отбираемого ионного тока от давления в камере, измеряемого вблизи ускоряющего зазора, показана на рис. 4. Начальный участок характеристики с большой крутизной показывает рост плотности плазмы за счет нарастания в ней процессов ионизации. Далее характеристика переходит в довольно широкий

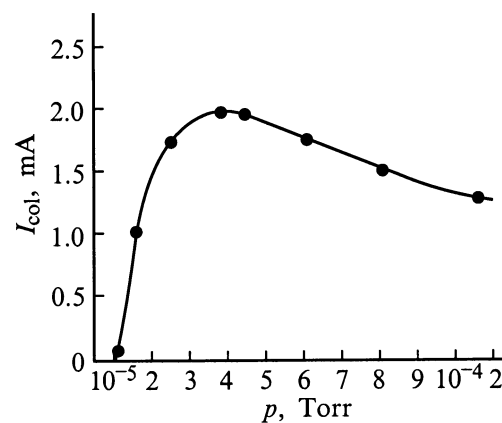


Рис. 4. Зависимость отбираемого ионного тока от давления при фиксированных  $U_{ch} = 3.4$  кВ,  $U_{acc} = 40$  кВ в Ar.

оптимальный участок с дальнейшим постепенным спадом, объясняемый снижением ионизационных процессов и увеличением пристеночной рекомбинации частиц.

На рис. 5 показаны зависимости отбора полного ионного тока от напряжения на разряде в газоразрядной ячейке при различных давлениях и ускоряющих напряжениях. Наложение разрядных токов в газоразрядной ячейке и ускоряющем зазоре приводит к сложному процессу генерации плазмы, где может преобладать один ток над другим. Отсюда возникает трудность интерпретации наблюдаемых процессов. Кривые 1 и 2 для разных ускоряющих напряжений (21 и 25 кВ) и одинаковых давлений  $5 \cdot 10^{-5}$  Торг имеют плавный подъем с намечающимися изгибами и соответствуют отбору слаботочных пучков. Вид кривых 3 и 4, снятых при одинаковом ускоряющем напряжении 30 кВ, но разных давлениях ( $4 \cdot 10^{-5}$  и  $7 \cdot 10^{-5}$  Торг), указывает на нарастание интенсивности горения разряда и увеличение отбираемого тока. Кривая 5, снятая при оптимальном давлении  $2.2 \cdot 10^{-5}$  Торг и ускоряющем напряжении 45 кВ, указывает на более интенсивный отбор тока пучка. На кривых 3–5 видны характерные "горбы", характеризующие область интенсивной работы источника. Наблюдались режимы с двумя и тремя "горбами". Провал между ними в характеристике не превышал половины тока пучка от соответствующего максимума. Объяснение этого явления связано с изменяющейся интенсивностью горения высоковольтного разряда в ускоряющем зазоре. Высокая интенсивность горения этого разряда характеризуется "горбом", а низкая — провалом.

Радиальное распределение плотности тока в сфокусированном (кривая 1) и расфокусированном (кривая 2) пучке, показанное на рис. 6, измерялось ЦФ с вертикальной щелью  $2 \times 3$  мм. Он передвигался горизонтально

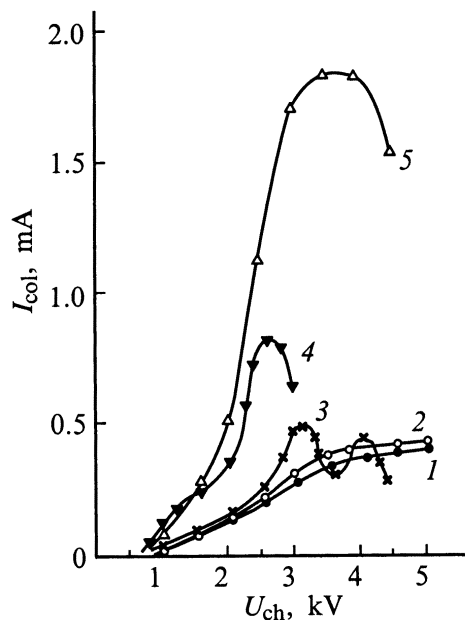


Рис. 5. Зависимости отбора ионного тока от напряжения на разряде в газоразрядной ячейке.

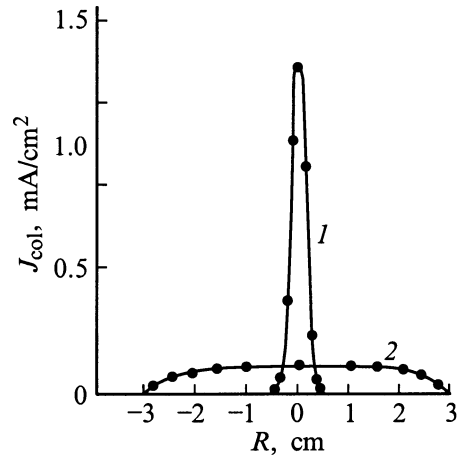


Рис. 6. Радиальное распределение плотности тока в сфокусированном и расфокусированном пучке.

поперек пучка и находился на расстоянии 15 см от последнего электрода оптики. Общий ток пучка, измеренный большим ЦФ, составлял 0.48 мА.

Наиболее точно отношения токов твердотельных и газовых ионов в пучке были измерены масс-анализатором и в зависимости от рода рабочего газа, распыляемого материала и режима работы источника, составляли от 1 до 10%.

Интересно отметить результат, полученный при разных напряжениях на разряде, но неизменных других параметрах источника, когда рабочим газом в нем был кислород, а распыляемым веществом — медь. При напряжении на разряде, равном 1 кВ, был получен ток ионов меди  $66 \mu\text{A}$  при общем токе пучка 1 мА, т.е. отношение токов твердотельных ионов к газовым составляло 6.6%. При напряжении на разряде, равном 2 кВ, ток ионов меди снизился до  $30 \mu\text{A}$ , общий же ток вырос до  $1.5 \mu\text{A}$ , т.е. отношение токов твердотельных ионов к газовым было 2%. Этот эффект объясняется разной степенью ионизации твердотельных и газовых ионов. Было замечено, что при меньших напряжениях на разряде лучше происходит ионизация металлических ионов, а при увеличении напряжения на разряде ионизация твердотельных ионов падает, а газовых резко растет. Когда напряжение на разряде не превышало 1 кВ, напуск газа в источник был минимальным и отбирались слаботочные пучки ионов, не превышающие величину тока, равную  $250 \mu\text{A}$ , то отношение твердотельных ионов в этих пучках доходило до 43%. Причем труднораспыляемые металлы ионизовались лучше, чем легкораспыляемые. Сравнивались тантал, ниобий, молибден с медью. Например, ток ионов тантала достигал  $110 \mu\text{A}$ . Неметаллы, такие как бор и углерод, плохо ионизируются и их отношение к газовым ионам в пучке составляло порядка 1%.

Важно отметить, что газовая составляющая пучков, полученных из этого источника, на 70% состояла из молекулярных ионов, что объясняется малыми разрядными токами.

В импульсном режиме работы источника токи пучка твердотельных ионов были значительно больше по величине, чем в стационарном. Это связано с более интенсивной работой источника в импульсном режиме и лучшими условиями по ионизации распыленных частиц.

Для увеличения выхода отбираемого тока ионов из источника были опробованы многоапертурные эмиссионные электроды (аноды) с тремя и пятью отверстиями, диаметром три миллиметра каждое. В таком варианте источник показал стабильную работу, но требовал значительно большего расхода газа. Причем струйки пучка из каждого эмиссионного отверстия, хорошо наблюдаемые визуально, стягивались к оси и на расстоянии 1–2 см от эмиссионного электрода объединялись в общий пучок сечением в кроссовере, примерно равным диаметру одного эмиссионного отверстия. Исследования этого варианта источника не проводились.

Так же был опробован вариант источника с целевой геометрией. Размер щели составлял  $10 \times 2$  мм. В импульсном режиме работы источника с рабочим газом водородом и распыляемым материалом алюминием была напылена пленка на стеклянную мишень. В этом источнике выбор расстояний катод–анод и анод–ускоряющий электрод, определяющий конфигурацию электрических и магнитных полей, является главным фактором его оптимальной работы. Их значения были найдены экспериментально.

3. Работа ионного источника с одним высоковольтным источником питания. Поскольку в ионном источнике фиксировались малые разрядные токи, сравнимые по порядку величины с током пучка, то было интересно попробовать включать его без выпрямителя питающего разряд (БП-100), только с одним высоковольтным источником питания, отбирая его энергию на зажигание и поддержание разряда. Это осуществлялось подключением катода через балластное сопротивление на "землю". При этом весь процесс работы ионного источника качественно не отличался от его работы при подключении двух источников питания. В таком режиме источник работал гораздо стабильнее, происходило как бы саморегулирование разряда. Зажигание и горение разряда смещались в сторону более низких напряжений. Регулирование напряжений на разряде в широких пределах (от 500 В до 3 кВ) осуществлялось путем измерения величин балластных сопротивлений. Причем при низких напряжениях на разряде увеличивался выход твердотельных ионов в пучке, а при высоких — газовых. В режиме работы с одним высоковольтным источником питания из ионного источника извлекались большие токи пучков, чем при его работе с двумя источниками питания. Это объясняется лучшим согласованием разрядных токов в газоразрядной ячейке и ускоряющем зазоре при отборе и формировании пучков, когда ионный источник работает при подключении одного высоковольтного источника питания.

## Физические процессы происходящего в источнике

При подаче ускоряющего напряжения в начальный момент между анодом источника и ускоряющим электродом ИОС при давлении в этой области  $10^{-4}$ – $10^{-6}$  Торр загорается слаботочный высоковольтный разряд. Электронный поток из этого разряда, ведомый сужающейся "воронкой" магнитного поля, устремляется к центральной части анода. Значительная часть потока электронов пролетает через эмиссионное отверстие в аноде и устремляется против электрического поля, приложенного между катодом и анодом в газоразрядной ячейке, тормозясь в нем, но достигая центральной области катода. Одновременно тормозящиеся электроны взаимодействуют с веерным магнитным полем источника, приобретая сложное вращательное движение, и тем самым удлиняют свой путь. Часть электронов из высоковольтного разряда не достигают катода, поскольку имеют точку отражения в магнитной ловушке. Эти электроны дают особенно большой вклад в ионизацию. Вторичная эмиссия электронов с катода и превичные электроны из разряда в ускоряющем зазоре производят эффективную ионизацию в газоразрядной ячейке, зажигая тлеющий высоковольтный разряд магнетронного типа. Этот разряд в виде "плазменного сгустка" в форме усеченного конуса своим меньшим основанием вращается у распыляемого катода-диска. Ионы из этого разряда, бомбардируя катод, приводят к эффективному распылению вещества, из которого состоит диск, в виде ионов, атомов и кластеров. С зажиганием тлеющего разряда электроны, находящиеся в газоразрядной камере источника, включаются в ионизацию распыленных частиц вещества, увеличивая их ионную концентрацию и газокINETическое давление плазмы разряда, состоящей из газовой и твердотельной фракций.

К процессу, увеличивающему распыление частиц вещества с диска-катода, нужно отнести и локальный разогрев, первичными электронами и ускоряющего зазора, центральной области диска до температуры, приближающейся к плавлению вещества, из которого выполнен диск. Возможно и локальное испарение в небольшой центральной области катода ("кратере"). К такому заключению приводит вид распыленной области катода. Она принимает форму круга с "кратером" в центре. В сечении распыляемая область обычно принимает форму кривой третьего порядка, называемой локоном Аньези, и становится тем рельефней, чем интенсивней распыление. Диаметр "кратера" в 1.2–2 раза превышает диаметр эмиссионного отверстия, а его глубина достигает 0.3–0.7 диаметра "кратера". Диаметр распыляемой области в зависимости от задаваемых условий и режима горения разряда изменялся от 1 до 12 мм. К задаваемым условиям мы относим: конфигурацию магнитного поля в газоразрядной ячейке; конфигурацию электрического поля в газоразрядной ячейке; диаметр эмиссионного отверстия; диаметр отверстия (апертуры) ускоряющего

электрода; различные коэффициенты распыления материалов, из которых изготавливались диски-катоды. Указанные размеры области распыления диска, возникали за 5–6 работы источника, когда в качестве его рабочего вещества использовалась медь.

”Плазменный ступок” тлеющего высоковольтного разряда магнетронного типа, горящий в газоразрядной ячейке в форме усеченного конуса, своим большим основанием охватывает анод. Из прилегающей к эмиссионному отверстию области плазмы осуществляется отбор и первичное формирование положительно заряженных частиц в виде заряженного плазменного потока в сторону ускоряющего электрода. При низкоинтенсивных режимах горения разряда граница плазменного потока находится в районе эмиссионного отверстия, но по мере нарастания интенсивности разряда и увеличения газокинетического давления плазмы плазменный поток выдвигается из эмиссионного отверстия в виде хорошо наблюдаемого визуально ”плазменного языка”. При дальнейшем нарастании газокинетического давления плазмы в газоразрядной ячейке ”плазменный язык” продолжает увеличиваться в длину, при этом почти не расширяясь в диаметре. Газокинетическое давление плазмы можно регулировать напуском рабочего газа и изменением напряжения в разряде. Причем напряжение на разряде меняется в широком диапазоне от 600 В до 5 кВ, а ток разряда при этом изменяется незначительно.

На удлинение ”плазменного языка” сильно влияет и нарастание напряжения в ускоряющем зазоре, которое продвигает его к ускоряющему электроду, и при касании с ним происходит пробой высоковольтного промежутка. Удлинение ”плазменного языка” в этом источнике с нарастанием ускоряющего напряжения в отличие от других типов источников, у которых плазма отжимается к эмиссионному электроду электрическим полем [2], мы объясняем тем, что ускоренные электроны пучковой плазмы из ионно-оптического тракта попадают в ускоряющий зазор и интенсифицируют в нем высоковольтный разряд. ”Воронка” магнитного поля в ускоряющем зазоре не дает расширяться этому разряду, но позволяет продвигаться в длину.

Увеличение длины ”плазменного языка” приводит к росту тока пучка. Рост тока пучка мы объясняем следующими причинами: увеличением концентрации ионов как в разряде в газоразрядной ячейке, так и в разряде ускоряющего зазора (”плазменном языке”); увеличением эмиттирующей площади плазменной поверхности; уменьшением ускоряющего зазора  $d$  (”плазменный язык”–ускоряющий электрод), где  $d$  определяется из уравнения Чайлда  $J = \chi \cdot U^{3/2}/d^2$ .

Все эти факторы обеспечивают высокую эмиссионную способность системы, несмотря на неблагоприятную форму (выпуклая и длинная) эмиттирующей поверхности для формирования пучка. Однако эксперимент показал хорошее формирование и фокусировку пучка, что, видимо, следует объяснять удачным распределением и величиной магнитного поля в ускоряющем зазоре.

При использовании двухэлектродной ИОС (эмиссионный электрод–ускоряющий электрод) в интенсивных режимах источник работал нестабильно, поскольку ”плазменный язык” был плохо управляем, а при касании с ускоряющим электродом приводил к пробое высоковольтного промежутка. Уже при токе пучка 1–2 мА процесс практически был неуправляем. В двухэлектродной ИОС дрейфующие электроны пучковой плазмы ускоряются в высоковольтном промежутке, устремляясь к источнику, существенно ухудшая его эксплуатационные качества. Переход на трехэлектродную ИОС (эмиссионный электрод–ускоряющий электрод–замедляющий электрод) позволил лучше управлять ”плазменным языком”, тем самым стабилизировав работу источника, и извлекать из него пучки с большим током. В такой ИОС происходит отделение плазмы источника от пучковой плазмы за счет образования в ионно-оптическом тракте потенциального барьера для электронов пучковой плазмы, дрейфующих в направлении источника. Трехэлектродная ИОС образует область виртуального катода из электронов, которые компенсируют положительный пространственный заряд ионного пучка.

Для фокусировки ионного пучка была использована электростатическая фокусировка, позволявшая вводить в масс-анализатор параллельный пучок. Фокусировка осуществлялась одиночной электростатической линзой, описанной выше в разделе ”конструкция источника”.

## Заключение

В заключение отметим, что ионный источник обладает следующими свойствами.

1. Источник работает в импульсном и стационарном режимах. При этом в стационарном режиме при токе пучка до 3 мА источник не требует охлаждения из-за малых токов разряда. С увеличением тока пучка свыше 3–5 мА требуется охлаждать эмиссионный электрод (анод источника), поскольку основная тепловая нагрузка от электронной бомбардировки как из разряда в источнике, так и из высоковольтного промежутка обратными ускоренными электронами приходится на него.

2. Источник обладает высокой эмиссионной способностью.

3. Источник имеет холодный катод магнетронного типа, позволяющий ему работать со всеми газами.

4. Из этого источника были получены ионы твердых веществ как металлов, так и неметаллов.

5. Получение ионов твердого вещества не нуждается в предварительном превращении его в парообразное состояние.

6. Время бесперебойной работы источника определяется временем распыления примерно 70–80% вещества катода и составляет сотни часов.

7. Примененная нами ионно-оптическая система позволила управлять энергией пучка от 1 до 100 кэВ без заметного изменения тока в пучке и фокусировать его.

8. Разряд в источнике может зажигаться и поддерживаться при подключении только одного высоковольтного источника питания. При этом он работает стабильнее и из него могут отбираться пучки с несколько большими токами. В то же время упрощается его электропитание.

9. Без рабочего газа твердотельные ионы из источника получить нельзя. В этом плане он ведет себя как классический распылительный источник.

Это источник использовался в технологических экспериментах по ионной имплантации твердотельных и газовых ионов, по очистке поверхностей, по напылению тонких пленок, например при легировании смешанным пучком ионов циркония и кислорода торцов цилиндров дизельных двигателей, при легировании смешанным пучком ионов углерода и азота внутренних поверхностей форсунок дизельных двигателей. Проведен ряд экспериментов по модификации поверхностей лопаток авиационных двигателей.

Авторы выражают благодарность С.В. Григоренко, В.Г. Кузнецову и В.П. Сидорову за внимание к рукописи и ценные замечания.

## Список литературы

- [1] Мелета Е.А., Вересов Л.П., Кижин В.Н. и др. // Физика и химия стекла. 1991. Т. 17. № 3. С. 77-79.
- [2] Порошин О.Ф., Кутан Ж.Ж. Формирование и исследование интенсивных пучков ионов водорода. Изд-во ФТИ ГК ИАЭ СССР, 1963. 102 с.