

1.2 Ионные источники

Ионный источник — устройство для получения в вакууме ионного пучка — пространственно сформированного потока ионов, скорость направленного движения которых много больше их тепловых скоростей. Ионный источник — неотъемлемая часть ускорителей, инжекторов быстрых атомов для термоядерных систем, установок электромагнитного разделения изотопов, масс-спектрометров, технологических установок различного назначения и др.

Ионный источник состоит из собственно источника ионов и устройства их экстракции. Атомы ускоряемых элементов могут вводиться в ионный источник либо напуском (в виде газа), либо испарением (жидкой или твердой примеси). В ионном источнике они ионизируются и вытягиваются соответствующим потенциалом в ускоритель, где приобретают нужную энергию. К источнику ионов предъявляются следующие требования: стабильность пучка во времени; получение ионов с определенным зарядом, нужной плотности тока при низких экстрагирующих напряжениях; простота перестройки с одного ускоряемого элемента на другой и замены самого источника.

Известны различные типы источников ионов: с горячим, холодным и полым катодами; дуоплазмотроны; источники с ВЧ- и СВЧ-возбуждением; с поверхностной ионизацией.

Ионный источник обеспечивает возбуждение атомов рабочего газа до энергии, превышающей потенциал ионизации атома, для образования положительно заряженных ионов. Обычно источники включают следующие конструктивные элементы: разрядную или ионизационную камеру, которая является несущей конструкцией источника; анод, предназначенный для создания электрического поля внутри разрядной камеры; источник электронов (термокатод), инжектирующий электроны для ионизации газа; магнитную систему, повышающую эффективность ионизации и плотность плазмы; электроды, экстрагирующие ионы, и электроды первичной фокусировки пучка. Работу источника ионов обеспечивают вспомогательные устройства: система подачи газа; устройство испарения вещества; источники питания. Простые источники с горячим катодом исполняются в различных конструктивных вариантах. Источником электронов является катод прямого или косвенного накала, электроны эмиттируются перпендикулярно поверхности нити накала с плотностью тока порядка 1 А/см^2 .

Важнейшие параметры ионного источника: полный ток и плотность тока ионного пучка; энергия ионов; характерный поперечный размер пучка; мера интенсивности пучка — первеанс — отношение полного тока к ускоряющему напряжению в степени $3/2$; мощность пучка — произведение полного тока на энергию ионов; качество пучка, его сформированность пространственная и скоростная — эффективный угол расходимости и энергетический разброс ионов; компонентный состав пучка — положительные и отрицательные ионы, атомарные, молекулярные, многозарядные ионы; энергетическая эффективность ионного источника — отношение мощности пучка к мощности потребляемой ионным источником от сети; газовая эффективность — отношение потока сформированных ионов к потоку газа, подаваемого в ионный источник. По временным характеристикам ионные источники делятся на импульсные, квазистационарные и стационарные.

Ионный источник состоит из двух основных узлов: эмиттера ионов и электростатической системы, с помощью которой ионы извлекаются, ускоряются и формируются в направленный поток — ионно-оптическая система (ИОС). В простейшем виде ионный источник состоит из эмиттера и ускоряющего электрода — экстрактора с отверстием для выхода ионного пучка. Для дополнительной фокусировки ускоренного пучка используются электростатические и магнитные линзы. ИОС различных ионных источников строятся по единому принципу, и главным фактором, определяющим тип ионный источник, является метод создания эмиттера ионов.

В зависимости от физической природы эмиттера ионов различают несколько типов ионных источников: 1) Ионный источник с поверхностной ионизацией, где эмиттером ионов служит поверхность накаливаемого материала, работа выхода которого превышает потенциал ионизации падающих на него атомов; 2) плазменные, в которых ионы отбираются с поверхности плазмы, образуемой в большинстве случаев с помощью газового разряда; 3) «полевые», в которых ионы образуются благодаря действию сильного электрического поля ($\sim 10^8 \text{ В/см}$) на и вблизи поверхности твердого тела: за счёт полевого испарения вещества и полевой ионизации атомов окружающей газовой среды. В последние годы получили распространение вместо твердых жидкометаллические эмиттеры.

Поверхностные ионные источники. Один из известных способов получения ионов состоит в том, что поток атомов, направленный па поверхность твердого тела, выбивает из неё положит, и отрицательные ионы. Так, например, интенсивные пучки положит, ионов Cs с плотностью до $0,1 \text{ А/см}^2$ получают при диффузии атомов Cs через накаливаемый пористый W. Десорбируемый с нагретой поверхности атом Cs удаляется преим. в ионизованном состоянии, как ион Cs⁺, потому что для его ионизации надо затратить меньше энергии, чем работа выхода электрона из W, и, следовательно, более вероятным является захват «общего» электрона металлом, а не отделяющейся от поверхности частицей. Если энергия сродства к электрону больше работы выхода, то в системе атом — поверхность твердого тела «общий» электрон

захватывается не твёрдым телом, а атомом и образуются отрицательные ионы. Так, например, на поверхности бориды лантана получены отрицательные ионы йода с плотностью тока от 1 до 10 мА/см². Интенсивными источниками отрицательных ионов являются плазменно-поверхностные.

Плазменные ионные источники получили широкое распространение, особенно для создания интенсивных пучков положительных и отрицательных ионов, а также пучков многозарядных ионов. Эмиттером ионов служит плазма, создаваемая дуговым разрядом низкого давления в газоразрядной камере (ГРК). Для лучшего удержания ионов и быстрых катодных электронов в объёме разряда используется магнитное поле, что повышает одновременно энергетическую и газовую эффективности ионного источника. Однако применение магнитного поля приводит к ухудшению однородности плазмы на эмиссионной границе и наличию высокого уровня шумов в плазме и колебаний в извлекаемом ионном пучке. Этих недостатков нет в ионных источниках без внешнего магнитного поля (ИБМ), но они обладают значительно меньшими эффективностями.

В 80-е гг. большое распространение получили весьма эффективные ионные источники с периферийным магнитным полем (ИПМ), окружающим ГРК. Существует несколько различных систем плазменных эмиттеров, а в основу ИОС положен единый для всех типов ионных источников принцип — создание многоапертурной электростатической системы, состоящей из 3-4 электродов, в каждом из которых содержится большое количество (десятки и сотни) идентичных апертур круглой или щелевой формы. Профили и размеры апертур отвечают оптимальному формированию элементарного пучка (луча). Каждая ячейка функционирует независимо. Общий поток (пучок) складывается из отдельных лучей, направление и угол расходимости которых определяют геометрию всего потока. Поэтому необходимо тщательное согласование параметров газоразрядной плазмы (концентрации ионов и температуры по всей поверхности эмиттера) с характеристиками ИОС — геометрией электродов и напряжённостью электрического поля. Однородность эмиссии ионов по всей поверхности необходима потому, что граница плазмы не является «жёсткой» (в отличие от поверхности катода в электронных системах), а изменяет своё положение и кривизну поверхности (т. н. мениск) при изменении концентрации плазмы или напряжённости ускоряющего электрического поля. Были разработаны мощные И. и. (для термоядерных целей) с большими поверхностями плазм, эмиттеров (в сотни см³) и многоапертурными ИОС, обеспечивающими получение пучков мощностью в несколько МВт.

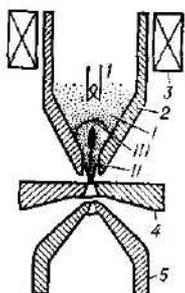


Рис.3. Схема дуоплазматрона: 1 — катод; 2 — промежуточный электрод; 3 — катушка электромагнита; 4 — анод; 5 — экстрактор; I — катодная плазма; II — анодная плазма; III — двойной слой, ускоряющий и фокусирующий электроны.

К широко распространённым плазм. И. и. относится дуоплазматрон, в котором для увеличения степени ионизации столб разряда подвергается механическому и магнитному, сжатию с помощью диафрагм и магн. поля, нарастающего к анодному отверстию малого диаметра. Сжатие разрядной дуги в узком канале промежуточного электрода 2 (**Рис. 1**) сопровождается возникновением плазм, «пузыря» со скачком потенциала в слое, отделяющем катодную плазму I от более плотной анодной плазмы II. Слой III ускоряет и фокусирует электроны, выходящие из плазмы I в плазму II. Вблизи анода 4 плотная плазма ещё сжимается сильным неоднородным магнитным полем, сечение плазмы вблизи выходного отверстия уменьшается, а концентрация возрастает до 10^{14} — 10^{15} см⁻³. Такая плазма эмитирует ионы с плотностью в десятки А/см², т. е. образуется «точечный» эмиттер. Однако ИОС не способна формировать пучок с такими плотностями тока и потребовалось создание расширителя плазмы за анодным отверстием и дополнит. камеры с антикатодом. Это позволило получить разряд с осциллирующими электронами и создать плазменный эмиттер с большой поверхностью и умеренной плотностью тока.

Использование многоапертурной ИОС позволило формировать пучки с током ~10А. Эта модификация наз. дуоплазматроном. Относительно прост плазменный эмиттер с большой поверхностью в ионном источнике без внеш. магнитного поля (ИБМ). Плазма создаётся в ГРК с помощью диффузного разряда низкого давления между распределённым катодом в виде большого количества накаливаемых нитей и анодным фланцем. Размеры эмиссионной поверхности достигают 12x50 см² с хорошей однородностью эмиссии. Величина тока пучка, формируемого многоапертурной ИОС, более 100 А. Недостаточные энергетическая и газовая эффективности привели к созданию ионных источников с периферийным магнитным полем (ИПМ), в котором магнитное поле, уменьшающее потери ионов из плазмы, локализовано вблизи стенок ГРК («магнитная стенка») и отсутствует в центре. В результате сохраняется хорошая однородность плазмы на эмиссионной границе, и повышаются энергетическая и газовая эффективности. При использовании 4-электродной, многоапертурной ИОС достигнут ток пучка св. 70 А при энергии ионов водорода (дейтерия) до 120 кэВ. Указанные выше ионные пучки работают в квазистационарных режимах.

Для генерации пучков отрицательных ионов разработано два метода: метод двойной перезарядки положит, ионов и метод непосредственного извлечения отрицательных ионов из плазмы. Методом двойной перезарядки пучки отрицательных ионов получаются при проведении сформированных пучков положит, ионов низкой энергии через мишени из паров щелочных металлов (Na, Cs). Эффективность выхода ионов H^- составляет от 10 до 30% в зависимости от выбора паров металла и энергии первичного пучка. Использование ионных источников типа ИБМ и ИПМ позволило получить пучки ионов H^- в несколько ампер и ионов He^- до 1 А. Современные плазменные ионные источники с непосредственным извлечением отрицательных ионов основываются на двух способах их образования: поверхностно-плазменном (ППИ) и объёмно-плазменном (ОПИ). Отрицательные ионы в ППИ образуются в результате взаимодействия положит, ионов газоразрядной плазмы с активированной поверхностью катода, работа выхода которой понижена адсорбцией атомов щелочного металла, добавляемого в ГРК. Часть первичных ионов отражается от поверхности катода, а др. часть выбивает атомы, адсорбированные на поверхности. Значит, доля тех и других уходит с катода, захватив электрон, в виде отрицательных ионов, которые ускоряются прикатодным потенциалом, проходят через плазму, попадают в область эмиссии и ускоряются с помощью ИОС. Различной модификации ионные источники такого типа работают в магнитном поле, притом извлечение ионов происходит поперёк магнитного поля. При извлечении и ускорении отрицательных ионов возникают определенные трудности, поскольку из плазмы одновременно извлекаются и электроны. В лучших конструкциях ионных источников токи этих частиц одинаковы, в большинстве случаев электронные токи значительно превышают ионные. В 80-е гг. токи H^- достигают 10 А.

В основе объёмно-плазменного источника лежит создание газоразрядной плазмы с высокой концентрацией отрицательных ионов. Основную роль в образовании отрицательных ионов играют два процесса: возбуждение молекул водорода на высшие колебательные уровни и затем диссоциативное присоединение электрона к колебательно возбуждённой молекуле. Исследуются нескольких конструкций ионного источника двухкамерного типа. В первой камере в газ металла, используют для получения паров бомбардировку поверхности мощным электронным пучком, вызывающим распыление металла. Современные импульсные плазменные источники ионов позволяют получать в течение десятков наносекунд ионные пучки с током до 10^6 А, объёмный заряд которых автоматически компенсируется захватываемыми электронами.

Принципиальная трудность создания эффективных импульсных ионных источников связана с необходимостью подавления электронного потока, неизбежно распространяющегося внутри высоковольтного разделительного промежутка навстречу формируемому ионному пучку. Она успешно преодолевается в отражательных триодах и диодах с поперечным магнитным полем. Отражательный диод состоит из двух катодов и находящегося между ними тонкоплёночного анода, на который подаётся

короткий импульс высокого напряжения. Образующиеся электроны многократно пронизывают анод и осциллируют между катодами, испаряя и ионизируя вещество анода. Нейтрализуя объёмный заряд ионов, можно получить ионные потоки с высокой плотностью и общим током порядка сотен кА. Иногда роль одного из катодов играет т. п. виртуальный катод.

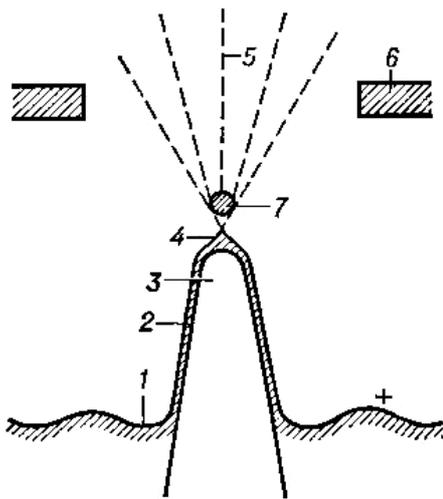


Рис. 4. Схема жидкометаллического источника ионов: 1 и 2 — жидкий металл; 3 — металлическая игла; 4 — жидкометаллическое остриё; 5 — ионы металла; 6 — экстрактор; 7 — область свечения.

Ионный источник с полевым испарением. Особое значение в 80-е гг. приобретают жидко-металлические ионные источники, которые вследствие большой начальной плотности ионного тока позволяют формировать плотные ионные зонды — пучки субмикронного диаметра. Эмиттером в жидкометаллическом ионном источнике (Рис. 2) является небольшая часть поверхности жидкого металла, смачивающая металлическую иглу и покрывающая её тонким слоем. Перед эмиттером находится электрод — экстрактор, создающий вблизи острия сильное ускоряющее ионы электрическое поле $\sim 10^8$ В/см и имеющий отверстие для вывода формируемого ионного пучка. Режим полевого испарения с жидкой фазы отличается большим током эмиссии ($\sim 10^{-6} — 10^{-3}$ А); существованием на поверхности иглы жидко-металлического острия; действием механизма саморазогрева эмитирующей области; характерным свечением вблизи острия. К такому режиму приходят или повышением температуры металла внешним нагревом при фиксированном достаточно большом потенциале U , или увеличением U до некоторого порогового значения, при котором происходит скачок ионного тока на несколько порядков величины. Одним из возможных объяснении

эмиттером в жидкометаллическом ионном источнике (Рис. 2) является небольшая часть поверхности жидкого металла, смачивающая металлическую иглу и покрывающая её тонким слоем. Перед эмиттером находится электрод — экстрактор, создающий вблизи острия сильное ускоряющее ионы электрическое поле $\sim 10^8$ В/см и имеющий отверстие для вывода формируемого ионного пучка. Режим полевого испарения с жидкой фазы отличается большим током эмиссии ($\sim 10^{-6} — 10^{-3}$ А); существованием на поверхности иглы жидко-металлического острия; действием механизма саморазогрева эмитирующей области; характерным свечением вблизи острия. К такому режиму приходят или повышением температуры металла внешним нагревом при фиксированном достаточно большом потенциале U , или увеличением U до некоторого порогового значения, при котором происходит скачок ионного тока на несколько порядков величины. Одним из возможных объяснении

высоких плотностей тока ($\sim 10^8$ А/см²) является концепция остроконечного эмиттера с несбалансированным давлением на поверхности (гидродинамический эмиттер, образующийся вследствие неустойчивости поверхности жидкометаллического острия). Конфигурация и положение фронта такого эмиттера определяются равенством числа приходящих атомов и эмитируемых ионов.

Источники многозарядных ионов. Многозарядные ионы могут образоваться как путём однократных электрон-атомных столкновений, так и в результате ряда последовательных столкновений. Ступенчатый механизм образования многозарядных ионов более эффективен. Однако в обоих случаях для получения многозарядных попов необходимы высокие энергии электронов и высокие плотности электронных потоков. Для достижения высокой плотности ионизации необходимо как можно дольше удерживать ион в области интенсивной ионизации, для чего в источниках многозарядных ионов используют разряды с осцилляцией электронов в магнитное поле, ВЧ-разряды и условиях электронно-циклотронного резонанса, создающие электростатические ловушки для ионов. При использовании электронно-лучевых ионных источников однозарядные ионы, оказавшиеся в интенсивном электронном пучке с большой энергией, не могут покинуть создаваемую здесь объёмным зарядом и торцевыми электродами глубокую потенциальную яму и постепенно лишаются всё большего количества своих электронов при столкновениях с быстрыми электронами пучка.

Наибольшие успехи в получении ионов с высокой кратностью заряда, в частности 25-зарядных ионов Со, «голых» тяжёлых ядер, достигнуты при воздействии на твёрдое тело мощным лазерным излучением, создающим плотную нагретую плазму с многозарядными ионами.