

Настоящее изобретение относится к ионно-плазменным технологиям, а более конкретно – к ускорителю плазмы с замкнутым дрейфом электронов.

Известен ускоритель плазмы с замкнутым дрейфом электронов (С.Д. Гришин, Л.В. Лесков "Электрические ракетные двигатели космических аппаратов" (Москва), Машиностроение, 1989, с. 143), предназначенный для создания реактивной тяги на борту космического аппарата.

Указанный ускоритель содержит кольцеобразную разрядную камеру, имеющую боковые стенки, выполненные из диэлектрического материала, и канал, в котором расположен коробчатый анод, выполненный за одно целое с газораспределителем.

Кроме того, ускоритель содержит магнитную систему, имеющую магнитные полюсы, установленные по обе стороны разрядной камеры и соединенные между собой магнитопроводами с катушками намагничивания, и катод-нейтронизатор.

Указанное конструктивное выполнение известного ускорителя обеспечивает ионизацию подводимого рабочего газа электронным ударом дрейфующими в скрещенных радиальном магнитном и продольном электрическом полях электронами. После ионизации часть образовавшихся ионов ускоряется в электрическом поле, образованном созданной между катодом и анодом разностью потенциалов. Ускоренный ионный поток компенсируется на выходе из ускорителя электронами, истекающими из катода-нейтронизатора.

Однако в процессе ионизации и ускорения значительная часть ионов испытывает столкновения с боковыми стенками разрядной камеры, что приводит к рекомбинации ионов и, следовательно, к энергетическим потерям. Кроме того, столкновение ускоренных ионов со стенками на выходе из разрядной камеры приводит к распылению материала стенок и следовательно, уменьшению ресурса работы ускорителя.

Известен также ускоритель плазмы с замкнутым дрейфом электронов (ЕР, А1, 0541309), содержащий кольцеобразную разрядную камеру, образованную внутренней и наружной кольцеобразными боковыми стенками и имеющую канал, включающий зону ионизации рабочего газа и зону ускорения ионов этого газа. В канале разрядной камеры установлен коробчатый анод-газораспределитель на расстоянии от ее выходной стороны не ближе расстояния между ее боковыми стенками. Кроме того, ускоритель включает магнитную систему, имеющую внутренний и наружный магнитный полюсы, связанные между собой магнитопроводами с установленными на них источниками магнитного поля, внутренний и наружный магнитные экраны, установленные с внешней стороны разрядной камеры вблизи соответственно ее внутренней и наружной боковых стенок с зазорами относительно соответствующих магнитных полюсов, и катод-нейтронизатор.

Наличие магнитных экранов позволило организовать в канале разрядной камеры такую конфигурацию магнитного поля, при которой существенно повышается градиент ее радиальной составляющей. Это позволило сократить протяженность зоны ионизации и зоны ускорения и, соответственно, уменьшить протяженность боковых стенок разрядной камеры, взаимодействующих с ионизированным рабочим газом, и несколько повысить фокусирующее воздействие на ускоряемый ионный поток более вогнутыми на входе в зону ускорения силовыми линиями магнитного поля.

Однако, как и в описанном выше ускорителе, максимальная концентрация ионов рабочего газа образуется в центре разрядной камеры на входе в зону ускорения и вызванные перепадом концентраций ионов в центре разрядной камеры и ее пристеночных областях радиальные электрические поля выталкивают значительную часть ионов на боковые стенки разрядной камеры. Очевидно, что энергетические потери на стенках в зоне ионизации разрядной камеры будут уменьшаться по мере уменьшения отношения площади поверхности боковых стенок к заключенному между этими стенками объему плазмы. Однако указанное конструктивное выполнение разрядной камеры не позволяет уменьшить это отношение.

Кроме того, уменьшить среднемассовый угол расходимости ускоренного ионного пучка и снизить долю частично ускоренных ионов, сталкивающихся с боковыми стенками разрядной камеры в зоне ускорения и приводящих к их значительной эрозии, возможно при выравнивании концентрации ионов по ширине разрядной камеры на входе в зону ускорения. Однако указанное выше конструктивное выполнение анода в указанном ускорителе, то есть его равная и значительная удаленность от зоны ионизации, не дает возможности выравнивания концентрации ионов по ширине разрядной камеры на входе в зону ускорения. Вследствие этого, имеющийся градиент концентрации ионов на входе в зону ускорения обуславливает значительный поток ионов на боковые стенки разрядной камеры, что является фактором, снижающим коэффициент полезного действия ускорителя. При этом образованные этим градиентом радиальные электрические поля во входной части зоны ускорения оказывают расфокусирующее воздействие на ускоряемый ионный поток.

В основу изобретения поставлена задача создать ускоритель плазмы с замкнутым дрейфом электронов с такой разрядной камерой, взаимное расположение элементов которой позволило бы уменьшить протяженность ее боковых стенок, контактирующих с плазмой и в значительной мере выровнять концентрацию ионов по ширине канала разрядной камеры на входе в зону ускорения, что позволило бы повысить коэффициент полезного действия и ресурс ускорителя, улучшив фокусировку ускоренного ионного пучка.

Поставленная задача решена созданием ускорителя плазмы с замкнутым дрейфом электронов, содержащего кольцеобразную разрядную камеру, имеющую наружную боковую стенку и внутреннюю боковую стенку и канал, образованный внутренними поверхностями этих стенок, имеющий зону ионизации рабочего газа и зону ускорения ионов этого газа, расположенные в районе выходной части разрядной камеры, в канале которой со стороны, противоположной ее выходной части, установлен кольцеобразный анод, за которым расположен кольцеобразный газораспределитель, имеющий, по меньшей мере, один канал подвода к нему рабочего газа и, по меньшей мере, один канал подачи рабочего газа в зону ионизации канала разрядной камеры, связанной с магнитной системой, имеющей наружный магнитный полюс, установ-

ленный с наружной стороны наружной боковой стенки разрядной камеры в районе ее выходной части, и внутренний магнитный полюс, установленный с наружной стороны внутренней боковой стенки разрядной камеры в районе ее выходной части, связанные между собой магнитопроводом магнитной системы, имеющей, по меньшей мере, один источник магнитного поля для создания определенной конфигурации магнитных силовых линий, образующих магнитные силовые поверхности в разрядной камере, снаружи и внутри которой коаксиально установлены кольцеобразные магнитные экраны, связанные между собой магнитопроводом и размещенные соответственно вблизи ее наружной и внутренней боковых стенок с зазорами относительно соответствующих магнитных полюсов, при этом ускоритель имеет по меньшей мере один катод-нейтрализатор ускоренных ионов рабочего газа, причем, согласно изобретению, по меньшей мере частично внутренние поверхности наружной и внутренней боковых стенок разрядной камеры, находящиеся в зоне ионизации, выполнены под углом к продольной оси А-А ускорителя, а поверхность анода, обращенная к зоне ионизации со стороны выходной части разрядной камеры, имеет вогнутую форму, охватывающую магнитные силовые поверхности зоны ионизации, при этом края вогнутой поверхности анода расположены в районе внутренних поверхностей наружной и внутренней боковых стенок разрядной камеры.

Принципиальная возможность уменьшения протяженности поверхности стенок разрядной камеры в зоне ионизации связана с тем, что ширина этой зоны, определяемая расстоянием между магнитной силовой поверхностью начала зоны ускорения ионов и магнитной силовой поверхностью, за которой напряженность магнитного поля уже достаточно слаба для эффективного замыкания электронов на анод, не одинакова по всему объему этой зоны. Это определяется непосредственно конфигурацией магнитной линзы: в центральной части это расстояние максимально, а по мере приближения к пристеночным участкам, то есть к магнитным полюсам, оно уменьшается. При этом указанное выполнение анода, имеющего поверхность, охватывающую зону ионизации, позволяет существенно уменьшить длину боковых стенок разрядной камеры в этой зоне. Причем указанное конструктивное выполнение анода не препятствует свободному дрейфу электронов вдоль силовых поверхностей магнитного поля в зоне ионизации и позволяет им замыкаться на анод на более выгодных энергетических участках. Ввиду того, что такая конструктивная схема разрядной камеры позволяет разнести участки подачи рабочего газа и участки замыкания электронов на анод, появляется возможность осуществлять подачу газа в удаленных от центральной части анода участках, где ширина зоны ионизации меньше чем в центре и становится предельно узкой в пристеночных участках этой зоны. При этом организация подачи рабочего газа на участках анода, которые расположены в зоне ионизации, где ширина достаточно мала, позволяет влиять на расположение концентрации ионов на выходе из зоны ионизации.

Таким образом, предлагаемая конструкция разрядной камеры позволяет в несколько раз сократить протяженность ее боковых стенок, контактирующих с плазмой в зоне ионизации, и повысить концентрацию плазмы в пристеночных областях на входе в зону ускорения, что соответственно приводит к снижению пристеночных энергетических потерь в плазме, улучшает фокусировку ускоренного ионного потока и увеличивает коэффициент полезного действия ускорителя.

В ускорителях, характерные размеры которых позволяют использовать разрядную камеру с оптимальной геометрией, целесообразно, чтобы угол между внутренними поверхностями наружной и внутренней боковых стенок разрядной камеры, находящихся в зоне ионизации, составлял от 45 до 135 градусов.

Очевидно, что при таких значениях указанного угла протяженность боковых стенок в зоне ионизации является минимальной, при этом в наибольшей степени проявляются описанные выше положительные эффекты. Выбор конкретного угла из приведенного диапазона связан в каждом конкретном случае с целым рядом факторов, например, таких, как выбор рабочего газа, требование к плотности плазменного пучка и тому подобное. Причем, если угол будет больше 135 градусов или меньше 45 градусов, то длину боковых стенок необходимо будет увеличить, в результате чего увеличатся пристеночные энергетические потери, которые приведут к снижению эффективности ускорителя.

В ускорителях с небольшими характерными размерами желательнее, чтобы магнитопровод, связывающий между собой кольцеобразные магнитные экраны, представлял собой магнитопроводящую перемычку, непосредственно соединяющую концы экранов, расположенные со стороны, противоположной выходной части разрядной камеры, при этом магнитные экраны должны быть электрически изолированы от элементов магнитной системы.

В ускорителях с небольшими характерными размерами может возникнуть ситуация, когда ширина зоны ионизации в пристеночной области соизмерима, или даже меньше, длины фактической ионизации поступающих в эту зону нейтральных атомов рабочего газа. Поэтому для того, чтобы расширить эту зону целесообразно разместить поверхность анода как можно ближе к магнитным экранам, которые конструктивно лимитируют возможность увеличения ширины разрядной камеры. В этом плане предлагаемое техническое решение является вариантом, когда сами магнитные экраны являются частью корпуса разрядной камеры и могут поэтому находиться под анодным либо плавающим анодным потенциалом.

Благоприятно, чтобы газораспределитель содержал три изолированные секции, каждая из которых имела бы канал для подвода рабочего газа и канал для подачи рабочего газа в зону ионизации, а анод имел бы четыре канала для прохода рабочего газа в зону ионизации, два канала из которых расположены вблизи краев вогнутой поверхности анода и сообщены с каналом соответствующей каждому из них изолированной секции, а два других канала расположены в области вогнутой поверхности анода, удаленной от входной части разрядной камеры, и сообщены с каналом третьей изолированной секции газораспределителя.

Использование дополнительных каналов подачи рабочего газа в разрядную камеру позволяет обеспечить оптимальное распределение плотности плазмы по ширине разрядной камеры на входе в зону уско-

рения, при котором достигается максимальный коэффициент полезного действия и наилучшая фокусировка ускоренного потока ионов. Оптимальное распределение концентрации плазмы становится возможным за счет получения суперпозиции ионных потоков из центрального и периферийного участков зоны ионизации, где размещены соответствующие каналы подачи рабочего газа, путем подбора соотношений расхода рабочего газа, подаваемого в каналы подвода газа к соответствующим секциям газораспределителя. Использование такого конструктивного выполнения особенно эффективно в многорежимном ускорителе, где необходимо оптимизировать его работу.

Таким образом, использование предлагаемого изобретения позволяет уменьшить протяженность боковых стенок разрядной камеры, контактирующих с плазмой и, в значительной степени, выравнивать концентрацию ионов по ширине канала разрядной камеры на входе в зону ускорения, что позволяет повысить коэффициент полезного действия и ресурс ускорителя, улучшив фокусировку ускоренного ионного пучка.

Преимущества настоящего изобретения станут понятны из следующего примера его осуществления и прилагаемого чертежа, на котором схематично изображен ускоритель плазмы с замкнутым дрейфом электронов, выполненный согласно изобретению, продольный разрез.

Ускоритель плазмы с замкнутым дрейфом электронов, выполненный согласно изобретению и изображенный на чертеже, содержит несущий фланец 1, на котором смонтированы все элементы магнитной системы 2 и разрядной камеры 3. К центральной части фланца 1 прикреплен сердечник 4 центральной катушки 5 намагничивания, являющейся внутренним источником магнитного поля, а на периферийной части фланца 1 установлены четыре равноудаленные друг от друга сердечника 6 наружных катушек 7 намагничивания, являющихся наружными источниками магнитного поля. Фланец 1, сердечник 4 и сердечники 6 являются составными частями магнитопровода 8, соединяющего между собой внутренний магнитный полюс 9 и наружный магнитный полюс 10, и представляют собой единый силовой каркас. Центральная катушка 5 намагничивания последовательно соединена с наружными катушками 7 намагничивания, и они представляют собой источник магнитного поля в разрядной камере 3. С внутренней и наружной стороны разрядная камера 3 закреплена на фланце 1 посредством силовых колец 11. Несущими силовыми элементами в разрядной камере 3 являются внутренний магнитный экран 12 и наружный магнитный экран 13, соединенные между собой магнитопроводящей перемычкой 14, являющейся магнитопроводом. К внутреннему магнитному экрану 12 прикреплена внутренняя боковая стенка 15 разрядной камеры 3, расположенная снаружи внутреннего магнитного полюса 9, между которым и внутренним магнитным экраном 12 имеется определенный зазор. Аналогично к наружному магнитному экрану 13 прикреплена наружная боковая стенка 16 разрядной камеры 3, расположенная с внутренней стороны наружного магнитного полюса 10, между которым и наружным магнитным экраном 13 также имеется определенный зазор. Таким образом, внутренний магнитный экран 12, наружный магнитный экран 13 и связывающая их магнитопроводящая перемычка 14 являются одновременно как несущим корпусом разрядной камеры 3, так и составной частью магнитной системы 2, обеспечивая необходимую для эффективной работы ускорителя плазмы топологию силовых линий магнитного поля в разрядной камере 3.

Непосредственно между внутренним магнитным экраном 12 и наружным магнитным экраном 13 установлен анод 18, поверхность 19 которого со стороны выходной части разрядной камеры 3 имеет вогнутую форму, при этом края вогнутой поверхности 19 анода 18 расположены в районе внутренних поверхностей 20 внутренней боковой стенки 15 и наружной боковой стенки 16 разрядной камеры 3. Эти поверхности 20 и вогнутая поверхность 19 анода 18 образуют канал 21 разрядной камеры 3, в котором непосредственно и происходит ионизация и ускорение рабочего газа. При этом зона 22 ионизации расположена в канале 21 со стороны анода 18 и ограничена вогнутой поверхностью 19 анода 18, внутренними поверхностями 20 боковых стенок 15, 16, расположенными в этой зоне 22 ионизации под углом, например, 100 градусов к продольной оси А-А ускорителя, и границей с зоной 23 ускорения ионов, которая условно представлена эквипотенциалью 24 электрического поля, базирующейся на определенной магнитной силовой поверхности 25, образованной силовыми линиями 17 магнитного поля.

Данная конфигурация канала 21 в зоне 22 ионизации позволяет предельно сократить протяженность внутренних поверхностей 20 боковых стенок 15, 16 разрядной камеры 3 в канале 21 и, соответственно, снизить энергетические потери, связанные с рекомбинацией ионов на этих поверхностях 20. Кроме того, указанная конфигурация канала 21 позволяет повысить концентрацию ионов в пристеночных участках эквипотенциали 24 электрического поля, граничащей с зоной 23 ускорения, что приводит к улучшению фокусировки ускоренного ионного пучка.

При этом внутренние поверхности 20 наружной и внутренней стенок 16, 15 разрядной камеры 3, находящиеся в зоне 22 ионизации, могут быть выполнены под любым углом к продольной оси А-А ускорителя. Величина этого угла зависит от целого ряда факторов, например, от выбора рабочего газа, от требований к плотности плазменного пучка и тому подобного. Причем, наиболее оптимальными с точки зрения эффективности ускорителя являются углы от 45 до 135 градусов.

Зона 23 ускорения ионов расположена в выходной части разрядной камеры 3 и ограничена с одной стороны условно эквипотенциалью 24 электрического поля и внутренними поверхностями 20 внутренней и наружной боковых стенок 15, 16, являющимися границами канала 21, которые в этой зоне 23 ускорения выполнены цилиндрическими и расположены коаксиально относительно друг друга. Между анодом 18 и магнитопроводящей перемычкой 14 установлен газораспределитель 26 с тремя независимыми секциями 27, жестко связанный с анодом 18. Каждая секция 27 газораспределителя 26 имеет каналы 28 подвода в каждую из них рабочего газа, выполненные в виде металлических трубок, электрически изолированных от элементов магнитной системы 2 посредством керамических втулок 29, и каналы 30 подачи рабочего газа в зону 22 ионизации. При этом в аноде 18 выполнены два канала 31 для прохода рабочего газа в зону 22 иони-

зации, расположенные на участке анода 18, удаленном от выходной части разрядной камеры 3. Каждый из каналов 31 для прохода рабочего газа сообщен с каналом 30 подачи рабочего газа соответствующей каждому из них секции 27 газораспределителя 26.

Описанная схема подачи рабочего газа в зону 22 ионизации позволяет управлять суперпозицией распределения ионов на входе в зону 23 ускорения, поступающих как из глубины канала 21, так и со стороны пристеночных участков зоны 22 ионизации. Это позволяет регулировать фокусировку ускоренного ионного пучка при различных режимах работы ускорителя плазмы.

За пределами разрядной камеры 3 со стороны выходной ее части на ускорителе плазмы установлен катод-нейтрализатор 33.

В другом варианте выполнения настоящего изобретения газораспределитель может быть не разделен на секции, при этом он может иметь по меньшей мере один канал для подвода к нему рабочего газа и по меньшей мере один канал подачи рабочего газа в зону 22 ионизации разрядной камеры 3.

Предлагаемый ускоритель плазмы с замкнутым дрейфом электронов работает следующим образом.

Так как принцип работы предлагаемого ускорителя плазмы аналогичен принципу работы ранее известных ускорителей такого типа, то в описании работы предлагаемого ускорителя детально остановится только на влиянии на его работу предлагаемых в настоящем изобретении технических решений.

Магнитный поток, созданный включенными последовательно центральной катушкой 5 намагничивания и четырьмя наружными катушками 7 намагничивания, последовательно замыкаясь через внутренний магнитный полюс 9, сердечник 4, фланец 1, сердечник 6 и наружный магнитный полюс 10, а, также, частично через наружный магнитный экран 13, магнитопроводящую перемычку 14 и внутренний магнитный полюс 12, создает в канале 21 разрядной камеры 3 оптимальную для работы ускорителя плазмы топологию распределения магнитного поля, направленного преимущественно в радиальном направлении. Приложенная между анодом 18 и катодом-нейтрализатором 33 разность потенциалов создает осевое электрическое поле в канале 21 ускорителя. Рабочий газ (в качестве которого может быть использован любой газ, предназначенный для аналогичных целей) через каналы 28 подвода поступает в секционный газораспределитель 26, причем с определенным массовым расходом в каждую секцию 27.

На выходе из секций 27, равномерно распределившись в азимутальном направлении, через каналы 30 подачи, каналы 31 и каналы 32 прохода через анод 18 газ поступает в зону 22 ионизации разрядной камеры 3.

Для простоты изложения опишем поочередно динамику электронной и ионной компоненты плазмы, начиная с момента запуска ускорителя.

В процессе запуска ускорителя эмитируемые катодом-нейтрализатором 33 электроны поступают под действием электрического поля в разрядную камеру 3, где попадают в область магнитного поля. В скрещенных радиальном магнитном и осевом электрическом полях электроды начинают действовать в азимутальном направлении в канале 21, осуществляя диффузию к аноду, рассеиваясь на поверхностях 20 внутренней боковой стенки 15 и наружной боковой стенки 16 разрядной камеры 3. В процессе диффузии, проходя разность потенциалов между анодом 18 и катодом-нейтрализатором 33, электроны набирают энергию, достаточную для ионизации электронным ударом поступающих в зону 22 ионизации нейтральных атомов рабочего газа. В процессе стационарной работы ускорителя основная часть эмитируемых катодом-нейтрализатором 33 электронов нейтрализует объемный разряд ускоренных в канале 21 ионов, а порядка 10–20% электронов осуществляют диффузию к аноду, принимая участие в ионизационных процессах. Ввиду того, что поверхности 20 в зоне 22 ионизации по мере приближения к аноду 18 из-за того, что они расположены под углом к продольной оси А–А ускорителя, оказываются в области достаточно сильного поля, то, связанный с этим эффект "магнитной пробки" затрудняет попадание электронов на поверхность 20 боковых стенок 15, 16 и снижает пристеночную диффузию электронов. Это приводит к уменьшению обратного диффузионного потока электронов, который составляет часть энергетических потерь в ускорителе.

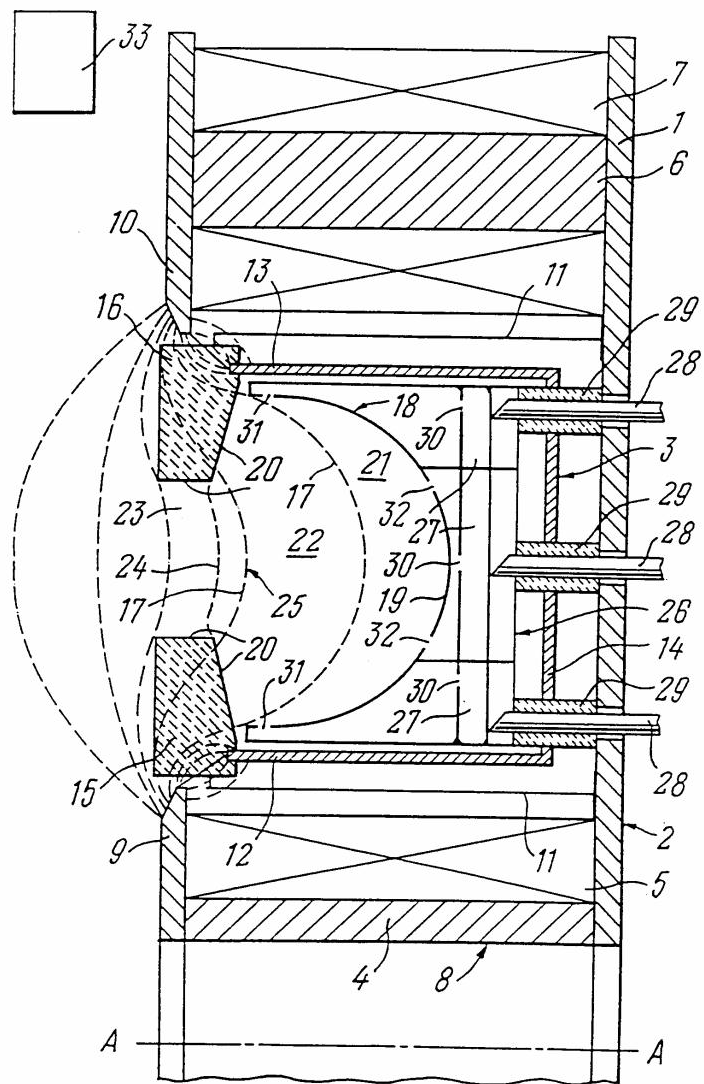
Образовавшиеся в зоне ионизации ионы рабочего газа под действием электронного давления разлетаются к границам этой зоны. При попадании ионов на поверхности 20 стенок 15, 16 первые, как правило, рекомбинируют и требуют повторных энергетических затрат на ионизацию, а так как протяженность указанных поверхностей 20 значительно уменьшена, то, соответственно, уменьшаются и связанные с этим энергетические потери в ускорителе. Та часть ионов, которая попадает в зону 23 ускорения, ускоряется в ней и покидает ускоритель.

Очевидно, что процент ионов, попадающих на поверхности 20 стенок 15, 16, находящихся в зоне 23 ускорения, будет тем ниже, чем равномернее будет распределена концентрация ионов на входе в зону 23 ускорения по ширине канала 21. Именно это и достигается дополнительной подачей рабочего газа в пристеночных участках зоны 22 ионизации через каналы 31.

Таким образом, перераспределяя расход рабочего газа в каналы 28 подвода к секциям 27 газораспределителя 26 и, соответственно, его подачу в пристеночные области зоны 22 ионизации через каналы 31, а также в центральную часть зоны 22 ионизации через каналы 32, можно подобрать оптимальный режим работы ускорителя с наибольшим коэффициентом полезного действия и ресурсом работы.

Кроме того, возможность автономного управления подачей рабочего газа в различные участки зоны 22 ионизации позволяет изменять режим фокусировки ионного пучка, что особенно важно в технологических процессах, а также поддерживать оптимальную фокусировку пучка ионов и коэффициент полезного действия при изменении режима работы в многорежимных ускорителях.

Настоящее изобретение наиболее эффективно может быть использовано в электрореактивных двигательных установках космических аппаратов в качестве движителей для создания тяги с высокими удельными импульсами, а также в области технологии плазменной обработки материалов, например, в процессах ионной очистки поверхности сухого травления, напыления и тому подобных. Кроме того, возможно применение этого изобретения в различных областях прикладного использования плазменных ускорителей, например, в астрофизических экспериментах в качестве высокоэффективного источника искусственного плазмообразования.



Тираж 50 екз.

Відкрите акціонерне товариство «Патент»  
 Україна, 88000, м. Ужгород, вул. Гагаріна, 101  
 (03122) 3 – 72 – 89 (03122) 2 – 57 – 03