



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
H05H 1/00 (2013.01)

(21)(22) Заявка: 2018127865, 30.07.2018

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
30.07.2018

Дата регистрации:
13.06.2019

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 30.07.2018

(45) Опубликовано: 13.06.2019 Бюл. № 17

Адрес для переписки:
107045, Москва, Сретенский б-р, 5, а/я 97, для
Мазур Н.З.

(72) Автор(ы):

Росляков Игорь Алексеевич (RU),
Старцев Сергей Анатольевич (RU),
Вихрев Виктор Викторович (RU),
Додулад Эмиль Игоревич (RU),
Фролов Алексей Юрьевич (RU),
Дулатов Али Каюмович (RU),
Лемешко Борис Дмитриевич (RU),
Михайлов Юрий Владимирович (RU),
Прокуратов Илья Александрович (RU),
Андреев Дмитрий Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Акционерное общество "Концерн
воздушно-космической обороны "Алмаз -
Антей" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2634849 C2, 17.11.2017. US
7679025 B1, 16.03.2010. US 2016314855 A1,
04.02.2010. US 2015216028 A1, 30.07.2015.

(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ УСКОРЕНИЯ И СЖАТИЯ ПЛАЗМЫ

(57) Реферат:

Полезная модель относится к плазменной технике. Достигается уменьшение вероятности возникновения паразитных шунтирующих токов в межэлектродном промежутке, и, как следствие, повышение стабильности работы устройства и увеличение конечной скорости плазмы на выходе из ускорителя. Устройство для ускорения и сжатия плазмы включает в себя ускоритель плазмы, содержащий внешний электрод и внутренний электрод, расположенный внутри внешнего электрода таким образом, что их центральные оси совпадают и между ними образуется канал для ускорения и сжатия проходящей по нему плазмы; и источник питания, электрически связанный с ускорителем, который генерирует ток, протекающий в ускорителе и создающий толкающий магнитный поток, достаточный для

проталкивания плазмы от переднего по ходу конца до заднего по ходу конца вплоть до выхода из ускорителя. Технический результат достигается тем, что устройство для ускорения и сжатия плазмы, включающее в себя ускоритель плазмы, содержащий внешний электрод и внутренний электрод, расположенный внутри внешнего электрода таким образом, что совпадающие с высотами электродов центральные оси электродов совпадают, и между электродами образуется межэлектродный промежуток для ускорения и сжатия проходящей по нему плазмы; и источник питания, электрически связанный с ускорителем плазмы и выполненный с возможностью возбуждения электрического импульса, который генерирует ток, протекающий в ускорителе плазмы, площадь

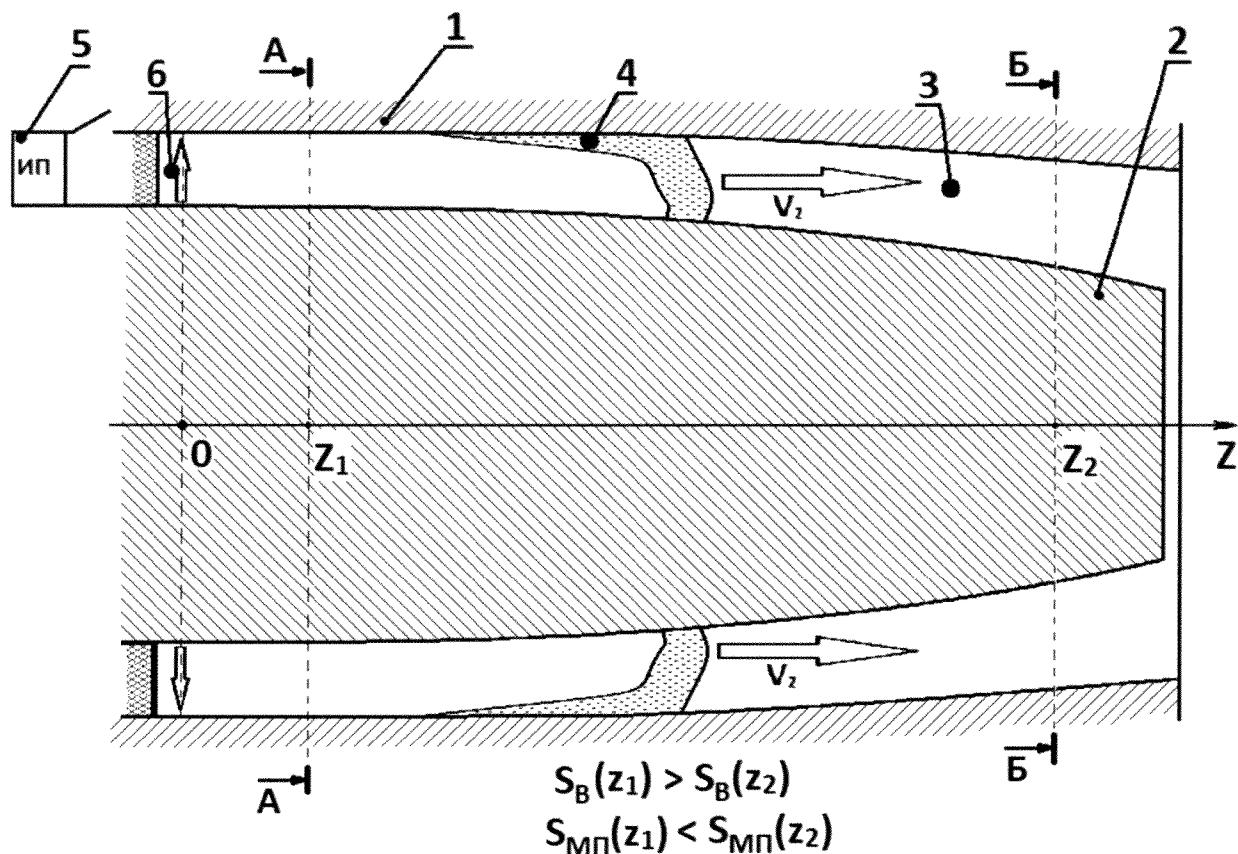
189967 U1

RU 189967 U1

R U 1 8 9 9 6 7 U 1

перпендикулярного сечения фигуры $S_B(z)$, ограниченной внешней поверхностью внутреннего электрода устройства, представляет собой такую монотонно убывающую функцию, зависящую от расстояния от заданного начального места образования плазмы, что площадь перпендикулярного сечения

межэлектродного промежутка $S_{M\Pi}(z)$, в котором ускоряется и сжимается плазма, представляет собой монотонно возрастающую функцию, зависящую от расстояния от заданного начального места образования плазмы, где за направление оси Z принято направление движения ускоряемой плазмы.



Фиг.1

R U 1 8 9 9 6 7 U 1

Полезная модель относится к плазменной технике и может быть использована, например, в качестве импульсного источника проникающих излучений и направленных потоков заряженных частиц.

Известен ряд устройств, предназначенных для ускорения и сжатия плазмы, с 5 электродной системой, состоящей из двух, находящихся один в другом, электродов между которыми генерируется плазменное образование, которое в дальнейшем ускоряется вдоль электродов под действием собственного магнитного поля тока, протекающего в разрядном контуре устройства.

К подобным устройствам относятся, например: плазменные ускорители, описанные 10 в работе «Разбрывгивание вольфрама при воздействии интенсивного потока плазмы», Н.С. Климов и др., ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2009, вып. 2, стр. 52-61, состоящие из трубчатого внешнего электрода, внутреннего электрода, расположенного внутри внешнего, между которыми образуется и ускоряется плазма, и источника питания.

Недостатком данного типа устройств является то, что при движении и взаимодействии 15 с внешним электродом часть плазмы оказывается «размазанной» вдоль поверхности внешнего электрода, что приводит к появлению паразитных шунтирующих токов в межэлектродном промежутке.

Нецилиндрические Z-пинчи, описанные в работе «A review of the dense Z-pinch», M G Haines, Plasma Phys. Control. Fusion 53 (2011) 093001 состоят из внешнего электрода, 20 внутреннего электрода, соосно расположенного внутри внешнего, между которыми образомается токово-плазменная оболочка, и источника питания особенность их работы заключается в том, что на заключительном этапе движения плазменная оболочка 25 сходится на оси устройства, и в результате развития неустойчивости типа «перетяжка» происходит сжатие и разогрев плазмы.

Недостаток устройств на основе нецилиндрических Z-пинчей заключается в том, что 25 эффективность сжатия плазмы резко снижается, если через образующуюся перетяжку течет не весь ток установки.

В качестве прототипа к данной полезной модели выбрано устройство для ускорения и сжатия плазмы (патент РФ 2634849 С2, МПК H05H 1/54, опубликован 07.11.2017), 30 включающее в себя следующие элементы:

ускоритель плазмы, содержащий трубчатый внешний электрод и трубчатый внутренний электрод, расположенный внутри внешнего электрода таким образом, что между ними образуется кольцевой канал распространения плазмы для ускорения и сжатия проходящего по нему тора плазмы; при этом ускоритель содержит вход для 35 приема тора плазмы из генератора плазмы, выход для разрядки ускоренного и сжатого тора плазмы и канал распространения плазмы с продольно вытянутым участком, который характеризуется наличием переднего по ходу конца, сообщающегося по текучей среде с входом, и заднего по ходу конца, сообщающегося по текучей среде с выходом; при этом поперечный кольцевой зазор, определяемый как радиальное 40 расстояние между внутренним и внешним электродами, сужается нелинейно в направлении движения тора плазмы вдоль вытянутого участка; и

источник питания, электрически связанный с ускорителем, который генерирует ток, протекающий в ускорителе и создающий магнитный толкающий поток за тором плазмы, достаточный для проталкивания тора плазмы от переднего по ходу конца через 45 вытянутый участок до заднего по ходу конца вплоть до выхода ускорителя;

при этом указанное устройство выполнено с возможностью обеспечивать индуктивность перед вытянутым участком, достаточную для ускорения и сжатия тора плазмы при его прохождении по всему указанному участку за счет расширения

магнитного толкающего потока; при этом выбраны такие размеры канала распространения плазмы, чтобы при выбранной индуктивности в пределах вытянутого участка и выбранной индуктивности перед вытянутым участком величина тока, протекающего по вытянутому участку у заднего по ходу конца, была меньше величины тока у переднего по ходу конца вытянутого участка, а давление тора плазмы у заднего по ходу конца превышало давление тора плазмы у переднего по ходу конца вытянутого участка.

Недостатком прототипа является высокая вероятность возникновения паразитных шунтирующих токов в межэлектродном промежутке, и, как следствие, нестабильная работа устройства и недостаточно высокая скорость плазмы на выходе из ускорителя. Это происходит, потому что при работе устройства, в силу диамагнитных свойств плазмы, вещество из ускоряемого плазменного образования выталкивается в направлении внешнего электрода (в сторону уменьшения магнитного поля). При взаимодействии с внешним электродом выброшенная плазма теряет часть осевой составляющей скорости, замедляется относительно остальной плазмы и оказывается «размазанной» вдоль поверхности внешнего электрода на всем пути движения ускоряемого плазменного образования. Наличие не собранной плазмы может приводить к появлению паразитных шунтирующих токов в межэлектродном промежутке. Это, в свою очередь, приведет к уменьшению величины напряженности магнитного поля, ускоряющего плазму, и понизится конечная скорость плазмы и ухудшится стабильность работы устройства.

Техническая проблема заявленной полезной модели заключается в повышении стабильности работы устройства с достижением технического результата, заключающегося в уменьшении вероятности возникновения паразитных шунтирующих токов в межэлектродном промежутке за счет увеличения скорости плазмы.

Технический результат достигается тем, что устройство для ускорения и сжатия плазмы, включающее в себя ускоритель плазмы, содержащий внешний электрод и внутренний электрод, расположенный внутри внешнего электрода таким образом, что совпадающие с высотами электролов центральные оси электролов совпадают, и между электролами образуется межэлектродный промежуток для ускорения и сжатия проходящей по нему плазмы; и источник питания, электрически связанный с ускорителем плазмы и выполненный с возможностью возбуждения электрического импульса, который генерирует ток, протекающий в ускорителе плазмы, при этом устройство выполнено с возможностью увеличения объема плазменного образования за счет увеличения площади перпендикулярного сечения межэлектронного промежутка в котором ускоряется и сжимается плазма, при этом указанное увеличение выполнено в соответствии с монотонно возрастающей функцией $S_{МП}(Z)$, зависящей от расстояния от заданного начального места образования плазмы, а площадь перпендикулярного сечения внутреннего электрода, уменьшена в соответствии с монотонно убывающей функцией $S_B(Z)$, зависящей от расстояния от заданного начального места образования плазмы, где упомянутые функции представляют собой соотношения:

$$\begin{cases} S_{МП}(z_2) > S_{МП}(z_1) \\ S_B(z_2) < S_B(z_1) \end{cases}, \quad z_2 > z_1$$

в которых $S_{МП}(z_1)$ и $S_{МП}(z_2)$ - площади перпендикулярного сечения межэлектродного промежутка в точках z_1 и z_2 в начале и на выходе устройства соответственно, $S_B(z_1)$ и

$S_B(z_2)$ - площади перпендикулярного сечения внутреннего электрода в точках z_1 и z_2 в начале и на выходе соответственно, где за направление оси Z принято направление движения ускоряемой плазмы.

На фиг. 1 представлена схема устройства для ускорения и сжатия плазмы в продольном разрезе.

На фиг. 2 представлены примеры вариантов формы перпендикулярного сечения электродов устройства для ускорения и сжатия плазмы.

На фиг. 3 представлена схема устройства для ускорения и сжатия плазмы, использованная при численном моделировании.

На фиг. 4 представлен график зависимости массы рабочего вещества (в относительных единицах), выброшенного на внешний электрод вещества, от угла при вершине конуса (в градусах), образующего поверхность внутреннего электрода.

Принятые обозначения.

1 - Внешний электрод.

2 - Внутренний электрод.

3 - Межэлектродный промежуток.

4 - Ускоряемое плазменное образование.

5 - Источник питания.

6 - Заданное начальное место образования плазмы.

Устройство состоит из внешнего электрода 1 и внутреннего электрода 2, высоты которых являются центральными осями и совпадают. Электроды 1 и 2 разделены межэлектродным промежутком 3, по которому движется ускоряемое плазменное образование 4, изначально образующееся в заранее заданном месте 6 (например, у поверхности изолятора или возле устройства предионизации) и источника питания 5.

Ось Z на фиг. 1 параллельна являющимся высотами центральным осям электродов, и направление оси Z совпадает с направлением движения ускоряемого плазменного образования 4. Начало координат $z=0$ задается точкой пересечения оси Z с плоскостью, проходящей через заданное начальное место образования плазмы 6. А-А и Б-Б - перпендикулярные сечения устройства для ускорения и сжатия плазмы, проведенные в произвольных точках z_1 и z_2 . Примеры форм этих перпендикулярных сечений

представлены на фиг. 2. Площадь перпендикулярного сечения межэлектродного промежутка 3 плоскостями А-А либо Б-Б является функцией от координаты z , и в дальнейшем обозначается $S_{MP}(z)$, площадь перпендикулярного сечения плоскостями

А-А либо Б-Б внутреннего электрода 2 также является функцией от координаты z , и в дальнейшем обозначается $S_B(z)$.

Устройство работает следующим образом. После подачи в разрядную цепь электрического импульса от источника питания 5 в заранее заданном месте 6 межэлектродного промежутка 3 между внешним 1 и внутренним 2 электродами формируется плазменное образование 4. Далее под давлением магнитного поля:

$$P = \frac{B^2}{8\pi\mu_0}, \quad (1)$$

где B - величина магнитной индукции поля, μ_0 - магнитная постоянная, плазменное образование 4 начинает ускоренное движение по направлению к заднему по ходу концу ускорителя. По ходу движения плазменного образования 4 его масса увеличивается за счет сграбания газа, находящегося в межэлектродном промежутке 3, и за счет эрозии материала электродов 1 и 2. В силу диамагнитных свойств плазмы, вещество из плазменного образования 4 выталкивается в направлении внешнего электрода 1 (в

сторону уменьшения магнитного поля). При взаимодействии с внешним электродом 1 вытолкнутая плазма теряет часть осевой составляющей скорости, замедляется относительно плазменного образования 4 и оказывается «размазанной» вдоль поверхности внешнего электрода 1 на всем пути движения плазменного образования

5 4. Наличие не собранной плазмы может приводить к появлению паразитных токов в межэлектродном промежутке 3, шунтирующих основной ток, текущий через ускоряемое плазменное образование 4. Это, в свою очередь, приведет к уменьшению величины индукции магнитного поля B , ускоряющего плазму:

$$10 B \sim \frac{I}{R}, \quad (2)$$

где I - рабочая величина силы тока, текущего через плазменное образование 4, R - расстояние от оси устройства до точки пространства с искомой величиной индукции магнитного поля. Таким образом, понижается конечная скорость плазмы и ухудшается 15 стабильность работы устройства.

Для минимизации процессов выталкивания рабочего вещества на поверхность внешнего электрода 1 необходимо, чтобы одновременно с увеличением массы плазменного образования 4 за счет сграбания газа увеличивался объем плазменного образования 4 (пропорциональный его характерной толщине и площади 20 перпендикулярного сечения межэлектродного промежутка 3). Толщина плазменного образования 4 зависит от элементного состава плазмообразующего вещества и температуры плазмы, и существенно увеличить ее для конкретно взятой установки с заданными параметрами достаточно проблематично. Поэтому в данном устройстве предложено увеличивать объем плазменного образования 4 за счет увеличения площади 25 перпендикулярного сечения S_{MP} межэлектродного промежутка 3. При заданных габаритах устройства увеличивать площадь перпендикулярного сечения межэлектродного промежутка 3 устройства возможно только за счет уменьшения 30 площади перпендикулярного сечения S_B внутреннего электрода 2 (в случае полого внутреннего электрода 2, это будет площадь перпендикулярного сечения фигуры, ограничивающей внешней поверхностью электрода 2).

К тому же, при уменьшении площади перпендикулярного сечения S_B внутреннего электрода 2 (а, следовательно, при уменьшении его характерного поперечного размера) будет увеличиваться величина индукции магнитного поля вблизи его поверхности (см. формулу (2)). При увеличении величины B будет расти величина магнитного давления 35 (см. формулу (1)), ускоряющего плазму, следовательно, на выходе из устройства будет достигаться еще большая скорость плазмы.

Возможная форма электродов 1 и 2 устройства не ограничивается приведенной на фиг. 1. Также электроды 1 и 2 не обязательно должны обладать осевой симметрией. Примеры вариантов формы перпендикулярного сечения электродов 1,2 и 40 межэлектродного промежутка 3 устройства представлены на фиг. 2.

Теперь рассмотрим перпендикулярные сечения устройства плоскостью, проходящей через точку Z_1 , (А-А) и плоскостью, проходящей через точку Z_2 , (Б-Б) (см. фиг. 1). Из всего вышесказанного следует, что, для любой пары точек $z_2 > z_1$ должно выполняться 45 условие:

$$\begin{cases} S_{MP}(z_2) > S_{MP}(z_1) \\ S_B(z_2) < S_B(z_1) \\ z_2 > z_1 \end{cases} \quad (3),$$

- 5 где $S_{MP}(z_1)$ и $S_{MP}(z_2)$ - площади перпендикулярного сечения межэлектродного промежутка 3 в точках z_1 и z_2 соответственно, $S_B(z_1)$ и $S_B(z_2)$ - площади перпендикулярного сечения внутреннего электрода 2 в точках z_1 и z_2 соответственно. Иными словами, функция $S_B(z)$ представляет собой монотонно убывающую функцию,
- 10 зависящую от расстояния от заданного начального места образования плазмы 6, а функция $S_{MP}(z)$ представляет собой монотонно возрастающую функцию, зависящую от расстояния от заданного начального места образования плазмы 6, где за направление оси Z принято направление движения ускоряемой плазмы.

15 Обоснованность способа достижения технического результата данной полезной модели можно подтвердить с помощью численного моделирования.

При моделировании для простоты (см. фиг. 3) внешний электрод 1 имеет цилиндрическую форму, а внутренний электрод 2 - форму усеченного конуса, большее основание которого имеет координату $z=0$, а меньшее основание - координату $z=z_m$. Высота этого конуса - z_m - величина постоянная, а угол при вершине конуса - α - 20 изменялся в диапазоне от 0 до 30 градусов. В случае $\alpha=0$ внутренний электрод 2 становился цилиндрическим, и условие (3) не выполнялось, так как в таком случае $S_{MP}(z)$ и $S_B(z)$ - постоянные величины. В случаях $\alpha>0$ условие (3), очевидно, выполняется и функции $S_{MP}(z)$ и $S_B(z)$ имеют следующие зависимости:

$$\begin{cases} S_{MP}(z) \sim z^2 \\ S_B(z) \sim \frac{1}{z^2} \end{cases} \quad (4).$$

25 Численное моделирование динамики плазмы в таком устройстве было проведено с использованием модели типа «Снежный плуг» («Snow plough», описана в работе Basque G., Jolas A. and Watteau J.P., Physics of Fluids, v. 11, p. 13 84, 1968). В результате проведенного моделирования была получена зависимость массы (в отн. ед.) выброшенного из плазменного образования 4 на внешний электрод 1 рабочего вещества. Полученная зависимость представлена на фиг. 4. Из графика на фиг. 4 следует, что для 30 случаев $\alpha>0$ масса выброшенного на внешний электрод 1 рабочего вещества меньше, чем в случае $\alpha=0$ (для которого не выполняется условие (3)). Чем меньше масса выброшенного из плазменного образования 4 на внешний электрод 1 рабочего вещества, тем меньше вероятность образования проводящей среды в межэлектродном промежутке 3, позволяющей протекание паразитных шунтирующих токов позади плазменного 35 образования 4, что способствует достижению заявленного технического результата.

40 Для реально созданного устройства для сжатия и ускорения плазмы аналитически вывести оптимальные математические законы изменения площадей перпендикулярного сечения в зависимости от координаты z $S_{MP}(z)=f(z)$ и $S_B(z)=\phi(z)$ представляется крайне затруднительным и, как правило, требует проведения численного моделирования 45 динамики плазмы в каждом конкретном устройстве. Однако можно утверждать, что для каждого отдельно взятого устройства для ускорения и сжатия плазмы эти оптимальные зависимости будут определяться скоростью движения плазменного образования 4, эта скорость, в свою очередь, определяется параметрами источника

питания 5 и геометрией электродов 1 и 2 и элементным составом плазмообразующего вещества в устройстве.

Оптимальная длина электродов 1 и 2 (или, другими словами, максимальная величина координаты z_m) в первую очередь будет определяться условием согласования устройства

⁵ для ускорения и сжатия плазмы по току. Это условие согласования по току означает, что в момент времени окончания ускорения плазменного образования 4 (т.е. момент времени, когда плазменное образование 4 дошло до конца электродов 1 и 2) вся энергия, запасенная в начальный момент в источнике питания 5, была израсходована. Например,

¹⁰ в случае, если источник питания 5 представляет собой конденсаторную батарею, время прохождения плазменного образования 4 вдоль всей длины электродов 1 и 2 должно совпадать с временем полной разрядки конденсаторной батареи. И, следовательно,

¹⁵ оптимальная длина электродов 1 и 2 будет определяться этим временем. На практике длина электродов 1 и 2, как правило, лежит в интервале от 5 до 200 см. Допускаются различия в длинах внешнего 1 и внутреннего 2 электродов, при этом большей длиной

²⁰ может обладать как внешний 1, так и внутренний 2 электрод. Разница длин электродов 1 и 2 будет определяться особенностями ускорения плазменного образования 4 на конечном этапе и формой ускоряемого плазменного образования 4. Внутренний электрод 2 может иметь как «остроконечную» форму (т.е. $S_B(z_m)=0$), так и плоский торец (т.е. $S_B(z_m)>0$), как сказано выше, оптимальная форма внутреннего электрода 2

²⁵ для конкретного устройства для сжатия и ускорения плазмы определяется с помощью численного моделирования динамики плазмы в этом устройстве.

Итак, вызывающее паразитные шунтирующие токи явление вытекания плазмы из ускоряемого плазменного образования 4 можно минимизировать путем увеличения объема плазменного образования 4 по мере его ускорения. Увеличивать объем

³⁰ плазменного образования 4 наиболее рационально за счет увеличения площади перпендикулярного сечения межэлектродного промежутка 3 устройства. Увеличивать площадь перпендикулярного сечения межэлектродного промежутка 3 при заданных габаритах устройства можно за счет уменьшения площади перпендикулярного сечения внутреннего электрода.

³⁵ Кроме того, при увеличении площади перпендикулярного сечения межэлектродного промежутка 3 увеличится расстояние между электродами 1 и 2, что также будет приводить к уменьшению вероятности вторичных шунтирующих пробоев. А уменьшение площади перпендикулярного сечения внутреннего электрода 2 будет приводить согласно формуле (2) к увеличению магнитной индукции поля, ускоряющего плазменное образование 4, что в конечном итоге приведет к достижению им большей скорости.

Вследствие этого, уменьшается масса рабочего вещества, выбрасываемого на внешний электрод, и на конечной стадии развития разряда увеличивается величина тока, текущего непосредственно через ускоряемую плазму, а не в местах паразитных пробоев. Таким образом, уменьшается вероятность возникновения паразитных шунтирующих токов, повышается стабильность работы устройства и увеличивается конечная скорость плазмы на выходе из ускорителя.

⁴⁰ Таким образом, достигается заявленный технический результат, а именно, уменьшается вероятность возникновения паразитных шунтирующих токов в межэлектродном промежутке, и, как следствие, повышается стабильность работы устройства и увеличивается конечная скорость плазмы на выходе из ускорителя.

(57) Формула полезной модели

Устройство для ускорения и сжатия плазмы, включающее в себя ускоритель плазмы,

содержащий внешний электрод и внутренний электрод, расположенный внутри внешнего электрода таким образом, что совпадающие с высотами электродов центральные оси электрода совпадают, и между электродами образуется межэлектродный промежуток для ускорения и сжатия проходящей по нему плазмы; и источник питания, электрически связанный с ускорителем плазмы и выполненный с возможностью возбуждения электрического импульса, который генерирует ток, протекающий в ускорителе плазмы, отличающееся тем, что выполнено с возможностью увеличения объема плазменного образования за счет увеличения площади перпендикулярного сечения межэлектронного промежутка, в котором ускоряется и сжимается плазма, при этом указанное увеличение выполнено в соответствии с монотонно возрастающей функцией $S_{MP}(Z)$, зависящей от расстояния от заданного начального места образования плазмы, а площадь перпендикулярного сечения внутреннего электрода уменьшена в соответствии с монотонно убывающей функцией $S_B(Z)$, зависящей от расстояния от заданного начального места образования плазмы, где упомянутые функции представляют собой соотношения:

$$\begin{cases} S_{MP}(z_2) > S_{MP}(z_1) \\ S_B(z_2) < S_B(z_1) , \\ z_2 > z_1 \end{cases}$$

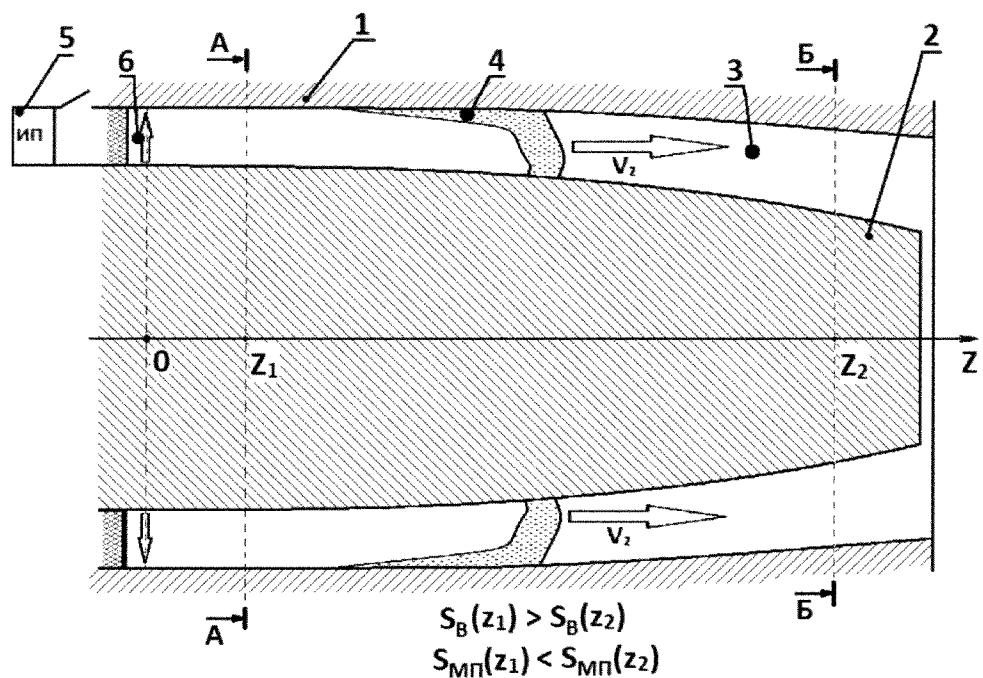
в которых $S_{MP}(z_1)$ и $S_{MP}(z_2)$ - площади перпендикулярного сечения межэлектродного промежутка в точках z_1 и z_2 , где z_1 и z_2 - произвольные точки, причем $z_2 > z_1$, $S_B(z_1)$ и $S_B(z_2)$ - площади перпендикулярного сечения внутреннего электрода в точках z_1 и z_2 в начале и на выходе соответственно, где за направление оси Z принято направление движения ускоряемой плазмы.

30

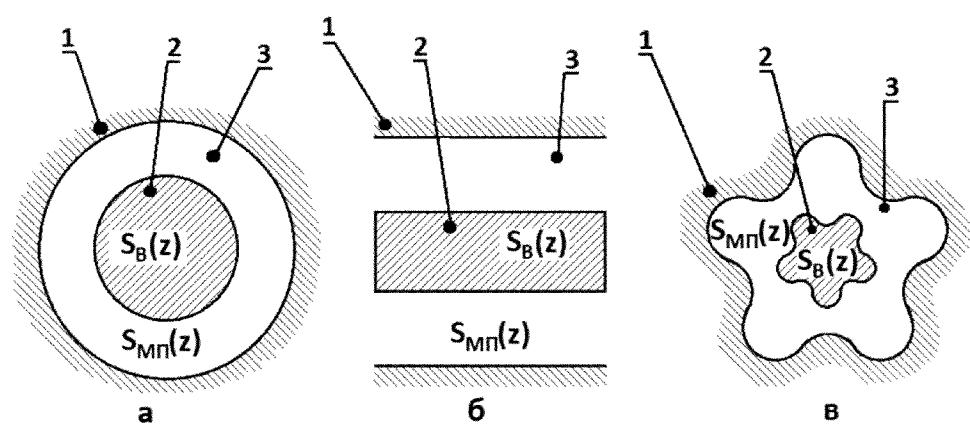
35

40

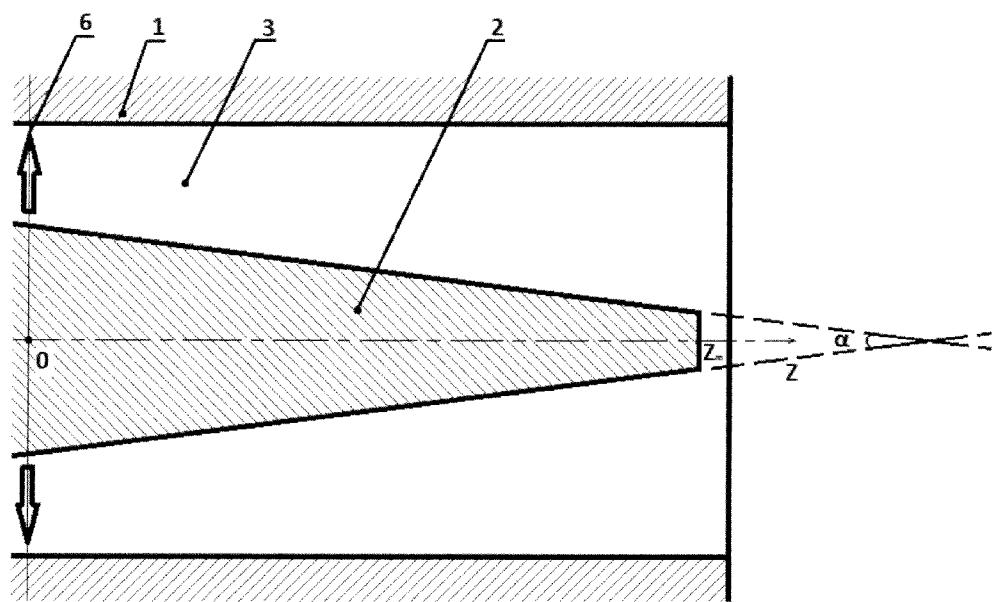
45



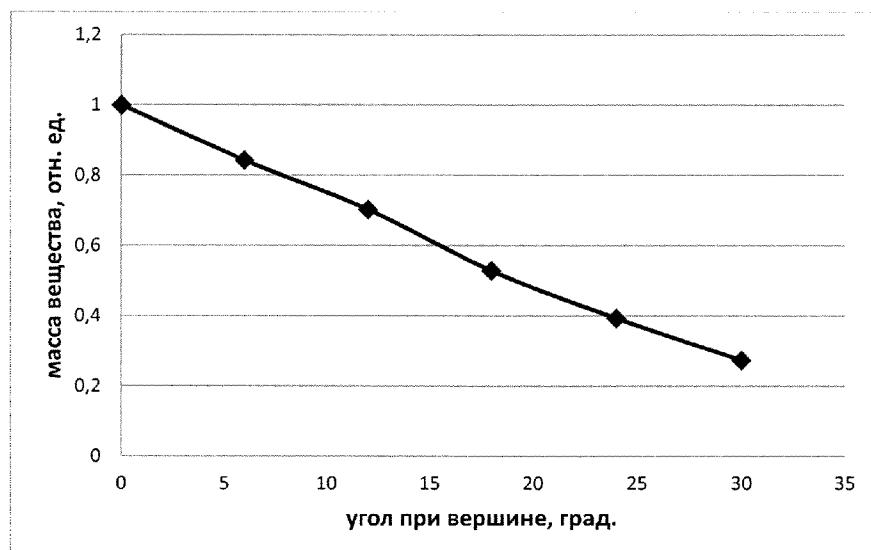
Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4