

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **044281**(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2023.08.11

(21) Номер заявки
201991680

(22) Дата подачи заявки
2018.02.23

(51) Int. Cl. **H05H 1/06** (2006.01)
H05H 5/02 (2006.01)
G21B 1/05 (2006.01)

(54) СИСТЕМА УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ И СПОСОБЫ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

(31) **62/462,779**

(32) **2017.02.23**

(33) **US**

(43) **2020.01.28**

(86) **PCT/US2018/019364**

(87) **WO 2018/156860 2018.08.30**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**ЮНИВЕРСИТИ ОФ ВАШИНГТОН
(US)**

(72) Изобретатель:
**Шумлак Ури, Нельсон Брайан А.,
Голинг Реймонд (US)**

(74) Представитель:
Нилова М.И. (RU)

(56) GOLINGO et al, 'Formation of a sheared flow Z pinch', Physics of Plasmas, volume 12, article 062505, 27 May 2005 (27.05.2005), pg 1-9.

ROSS, 'Exploring plasma stability and confinement with high resolution density measurements on the ZaP-HD Flow Z-Pinch', PhD dissertation, University of Washington, published 14 February 2017 (14.02.2017), [retrieved 28 June 2018 (28.06.2018) via the internet at <<http://hdl.handle.net/1773/38055>>], pg 1, 15-19, 25, 31-39.
US-B2-7372059

SHUMLAK et al., 'High energy density Z-pinch plasmas using flow stabilization', AIP Conference Proceedings, volume 1639, issue 1,17 February 2015 (17.02.2015), pg 76-79.

(57) Пример способа включает этапы, согласно которым: направляют газ через один или более первых клапанов от внутренней части внутреннего электрода к области ускорения между внутренним электродом и внешним электродом, который по существу окружает внутренний электрод; направляют газ через два или более вторых клапанов от внешней части внешнего электрода к области ускорения; и прикладывают, посредством источника питания, напряжение между внутренним электродом и внешним электродом, что обеспечивает преобразование по меньшей мере части направляемого газа в плазму, имеющую по существу круглое сечение и протекающую в осевом направлении внутри области ускорения в сторону первого конца внутреннего электрода и первого конца внешнего электрода, с последующим получением Z-пинч-плазмы, которая протекает между первым концом внешнего электрода и первым концом внутреннего электрода. В настоящем изобретении раскрыты и другие схожие системы удержания плазмы и способы управления такими системами.

B1**044281****044281****B1**

Перекрестная ссылка на родственную заявку

Настоящая заявка испрашивает приоритет по предварительной патентной заявке США № 62/462779, которая опубликована 23 февраля 2017 и содержание которой полностью включено в настоящую заявку посредством ссылки.

Заявление об исследованиях или разработках, финансируемых из федерального бюджета

Настоящее изобретение было создано благодаря правительственной помощи в виде грантов №№ DE-AR0000571, DE-FG02-04ER54756 и DE-NA0001860, предоставленных Министерством энергетики (Department of Energy, DOE). Правительство имеет определенные права на настоящее изобретение.

Предпосылки создания изобретения

Если в настоящем изобретении не указано иное, то материалы, описанные в данном разделе, не являются известными из уровня техники по отношению к формуле изобретения в настоящем изобретении и не признаются известными из уровня техники вследствие включения в данный раздел.

Ядерный синтез представляет собой процесс слияния двух ядер. При слиянии двух ядер элементов с атомными номерами, меньшими, чем у железа, происходит выделение энергии. Выделение энергии объясняется некоторой разностью масс между реагирующими компонентами с одной стороны и продуктами реакции синтеза с другой стороны и выражается формулой $\Delta E = \Delta mc^2$. Выделение энергии также зависит от притягивающего сильного ядерного взаимодействия между реагирующими ядрами с преодолением силы электростатического отталкивания между реагирующими ядрами.

Реакция синтеза, требующая наименьшей температуры плазмы, происходит между дейтерием (ядрами водорода с одним протоном и одним нейтроном) и тритием (ядрами водорода, имеющими один протон и два нейтрона). Эта реакция дает на выходе ядро гелия-4 и нейтрон.

Один из подходов достижения ядерного синтеза состоит в возбуждении газа, содержащего реагирующие компоненты синтеза, внутри реакционной камеры. Благодаря ионизации происходит преобразование возбужденного газа в плазму. Для достижения условий по температурам и плотностям, подходящим для синтеза, необходимо удерживать плазму.

Раскрытие сущности изобретения

Первый аспект настоящего изобретения относится к системе удержания плазмы, которая содержит внутренний электрод; внешний электрод, который по существу окружает внутренний электрод; один или более первых клапанов, выполненных с возможностью направления газа от внутренней части внутреннего электрода к области ускорения; два или более вторых клапанов, выполненных с возможностью направления газа от внешней части внешнего электрода к области ускорения; и источник питания, выполненный с возможностью прикладывания напряжения между внутренним электродом и внешним электродом. Второй аспект настоящего изобретения относится к способу управления системой удержания плазмы. Способ включает этапы, согласно которым: направляют газ через один или более первых клапанов от внутренней части внутреннего электрода к области ускорения между внутренним электродом и внешним электродом, который по существу окружает внутренний электрод; направляют газ через два или более вторых клапанов от внешней части внешнего электрода к области ускорения; и прикладывают, посредством источника питания, напряжение между внутренним электродом и внешним электродом, что обеспечивает преобразование по меньшей мере части направляемого газа в плазму, имеющую по существу круглое сечение и протекающую в осевом направлении внутри области ускорения в сторону первого конца внутреннего электрода и первого конца внешнего электрода, с последующим получением Z-пинч-плазмы, которая протекает между первым концом внешнего электрода и первым концом внутреннего электрода.

Третий аспект настоящего изобретения относится к системе удержания плазмы, которая содержит: внутренний электрод; промежуточный электрод, который по существу окружает внутренний электрод; внешний электрод, который по существу окружает промежуточный электрод; один или более первых клапанов, выполненных с возможностью направления газа от внутренней части внутреннего электрода к области ускорения между внутренним электродом и промежуточным электродом; два или более вторых клапанов, выполненных с возможностью направления газа от внешней части промежуточного электрода к области ускорения; первый источник питания, выполненный с возможностью прикладывания напряжения между внутренним электродом и промежуточным электродом; и второй источник питания, выполненный с возможностью прикладывания напряжения между внутренним электродом и внешним электродом.

Четвертый аспект настоящего изобретения относится к способу управления системой удержания плазмы. Способ включает этапы, согласно которым: направляют газ через один или более первых клапанов от внутренней части внутреннего электрода к области ускорения между внутренним электродом и промежуточным электродом, который по существу окружает внутренний электрод; направляют газ через два или более вторых клапанов от внешней части промежуточного электрода к области ускорения; прикладывают, посредством первого источника питания, напряжение между внутренним электродом и промежуточным электродом, что обеспечивает преобразование по меньшей мере части направляемого газа в плазму, имеющую по существу круглое сечение и протекающую в осевом направлении внутри области ускорения в сторону первого конца внутреннего электрода и первого конца внешнего электрода; и при-

кладывают, посредством второго источника питания напряжение между внутренним электродом и внешним электродом для получения Z-пинч-плазмы, которая протекает между первым концом внешнего электрода и первым концом внутреннего электрода.

Пятый аспект настоящего изобретения относится к системе удержания плазмы, которая содержит: внутренний электрод; внешний электрод, который по существу окружает внутренний электрод; промежуточный электрод, который обращен к внутреннему электроду; один или более первых клапанов, выполненных с возможностью направления газа от внутренней части внутреннего электрода к области ускорения между внутренним электродом и внешним электродом; два или более вторых клапанов, выполненных с возможностью направления газа от внешней части внешнего электрода к области ускорения; первый источник питания, выполненный с возможностью прикладывания напряжения между внутренним электродом и внешним электродом; и второй источник питания, выполненный с возможностью прикладывания напряжения между внутренним электродом и промежуточным электродом.

Шестой аспект настоящего изобретения относится к способу управления системой удержания плазмы. Способ включает этапы, согласно которым: направляют газ через один или более первых клапанов от внутренней части внутреннего электрода к области ускорения между внутренним электродом и внешним электродом, который по существу окружает внутренний электрод; направляют газ через два или более вторых клапанов от внешней части внешнего электрода к области ускорения; прикладывают, посредством первого источника питания напряжение между внутренним электродом и внешним электродом, что обеспечивает преобразование по меньшей мере части направляемого газа в плазму, имеющую по существу круглое сечение и протекающую в осевом направлении внутри области ускорения в сторону первого конца внутреннего электрода и первого конца внешнего электрода; и прикладывают напряжение с помощью второго источника питания между внутренним электродом и промежуточным электродом для получения Z-пинч-плазмы, которая протекает между промежуточным электродом и первым концом внутреннего электрода, причем промежуточный электрод размещен на первом конце внешнего электрода. При использовании в данном документе термина "по существу" или "приблизительно" подразумевается, что названные характеристика, параметр или значение не обязательно должны быть достигнуты в точности, и могут иметь место отклонения или вариации, включая, например, допуски, ошибку измерения, пределы точности измерения и другие факторы, известные специалистам в данной области техники, причем их величина не мешает эффекту, достижение которого призвана обеспечить данная характеристика. В некоторых примерах, раскрытых в данном документе, "по существу" или "приблизительно" означает $\pm 5\%$ от названной величины.

Эти, а также другие аспекты, преимущества и альтернативы станут понятны специалистам в данной области техники при прочтении нижеследующего подробного описания со ссылками, там где это необходимо, на сопроводительные чертежи. Кроме того, следует понимать, что данный раздел "Раскрытие сущности изобретения" и другие описания и фигуры предназначены лишь для иллюстрации настоящего изобретения на примерах и, следовательно, возможны различные вариации.

Краткое описание чертежей

На фиг. 1 схематически показан вид в разрезе системы удержания плазмы согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 2 схематически показан вид в разрезе системы удержания плазмы согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 3 схематически показан вид в разрезе системы удержания плазмы согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 4 показана блок-схема способа управления системой удержания плазмы согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 5A показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 5B показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 5C показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 5D показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 5E показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 5F показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 6 показаны формы сигналов напряжения, относящихся к способу управления системой удержания плазмы, согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 7 показаны профили давления газа, относящиеся к способу управления системой удержания плазмы, согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 8 показана блок-схема способа управления системой удержания плазмы согласно примеру

варианта осуществления.

На фиг. 9А показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 9В показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 9С показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 9D показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 9Е показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 9F показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 10 показаны формы сигналов напряжения, относящихся к способу управления системой удержания плазмы, согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 11 показаны профили давления газа, относящиеся к системе удержания плазмы, согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 12 показана блок-схема способа управления системой удержания плазмы согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 13А показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 13В показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 13С показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 13D показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 13Е показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 13F показаны некоторые аспекты системы удержания плазмы и способа управления ею согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 14 показаны формы сигналов напряжения, относящихся к способу управления системой удержания плазмы, согласно примеру варианта осуществления.

На фиг. 15 показаны профили давления газа, относящиеся к способу управления системой удержания плазмы, согласно примеру варианта осуществления.

Осуществление изобретения

В данном документе раскрыты различные варианты осуществления систем удержания плазмы и способов их использования. Раскрытые варианты осуществления, по сравнению с существующими системами и способами, обеспечивают возможность содействия повышению стабильности плазмы, повышению устойчивости срезанного плазменного потока, уменьшению радиуса Z-пинч-плазмы, повышению магнитных полей и/или повышению температуры плазмы. Некоторые из раскрытых вариантов осуществления также обеспечивают возможность независимого управления ускорением плазмы и сжатием плазмы.

На фиг. 1 схематически показан вид в разрезе системы 100 удержания плазмы. Система 100 удержания плазмы содержит внутренний электрод 102 и внешний электрод 104, который по существу окружает внутренний электрод 102. Система 100 удержания плазмы также содержит один или более первых клапанов 106, выполненных с возможностью направления газа от внутренней части внутреннего электрода 102 к области 110 ускорения между внутренним электродом 102 и внешним электродом 104; и два или более вторых клапанов 112, выполненных с возможностью направления газа от внешней части внешнего электрода 104 к области 110 ускорения. Система 100 удержания плазмы также содержит источник 114 питания, выполненный с возможностью прикладывания напряжения между внутренним электродом 102 и внешним электродом 104.

Внутренний электрод 102 в целом имеет форму электропроводной оболочки (например, из нержавеющей стали), имеющей по существу цилиндрический корпус 116. Внутренний электрод 102 имеет первый конец 118 (например, закругленный конец) и противоположный второй конец 120 (например, по существу круглый конец). Более конкретно, первый конец 118 может иметь коническую форму с закругленной вершиной. Внутренний электрод 102 может содержать один или более трактов или каналов (не показаны) для прохождения газа от указанных одного или более первых клапанов 106 к области 110 ускорения.

Внешний электрод 104 также имеет в целом форму электропроводной оболочки (например, из нержавеющей стали), имеющей по существу цилиндрический корпус 128. Внешний электрод 104 имеет первый конец 122 (например, по существу дискообразный конец) и противоположный второй конец 124

(например, по существу круглый конец). Как показано на фиг. 1, первый конец 118 внутреннего электрода 102 расположен между первым концом 122 внешнего электрода 104 и вторым концом 124 внешнего электрода 104. Внешний электрод 104 окружает большую часть внутреннего электрода 102. Внутренний электрод 102 и внешний электрод 104 могут быть концентричными и обладать радиальной симметрией относительно одной и той же оси. Внешний электрод 104 может содержать один или более трактов или каналов (не показаны) для прохождения газа от указанных двух или более вторых клапанов 112 к области 110 ускорения.

Один или более первых клапанов 106 могут иметь форму "газоструйных клапанов", однако они могут включать любые типы клапанов, выполненных с возможностью направления газа (например, водорода или дейтерия) от внутренней части внутреннего электрода 102 к области 110 ускорения между внутренним электродом 102 и внешним электродом 104. Как показано на фиг. 1, один или более первых клапанов 106 размещены в осевом направлении между первым концом 118 внутреннего электрода 102 и вторым концом 120 внутреннего электрода 102. В качестве альтернативы один или более первых клапанов могут быть размещены на первом конце 118 или на втором конце 120 внутреннего электрода 102. Согласно фиг. 1, один или более первых клапанов 106 размещены внутри внутреннего электрода 102, но возможны и другие примеры. Один или более первых клапанов 106 могут управляться путем подачи управляющего напряжения на указанные один или более первых клапанов 106, как описано ниже.

Область 110 ускорения имеет по существу круглое сечение, определяемое формами внутреннего электрода 102 и внешнего электрода 104.

Один или более вторых клапанов 112 могут иметь форму "газоструйных клапанов", однако они могут включать любые типы клапанов, выполненных с возможностью направления газа (например, водорода или дейтерия) от внешней части внешнего электрода 104 к области 110 ускорения. Как показано на фиг. 1, два или более вторых клапанов 112 размещены в осевом направлении между первым концом 122 внешнего электрода 104 и вторым концом 124 внешнего электрода 104. В качестве альтернативы, указанные два или более вторых клапанов могут быть размещены на втором конце 124 или на первом конце 122. Два или более вторых клапанов 112 будут в целом размещены вокруг внешнего электрода 104. Как показано на фиг. 1, один или более первых клапанов 106 выравнены в осевом направлении с указанными двумя или более вторыми клапанами 112, однако возможны и другие примеры. Два или более вторых клапанов 112 могут управляться путем прикладывания на эти два или более вторых клапанов 112 управляющего напряжения, как описано ниже. Источник 114 питания будет в целом иметь форму батареи конденсаторов, способной накапливать энергию, например, до 500 кДж или до 3-4 МДж. Положительный зажим источника 114 питания может быть соединен с внутренним электродом 102 или, в качестве альтернативы, с внешним электродом 104. Система 100 удержания плазмы содержит область 126 собирания внутри внешнего электрода 104 между первым концом 118 внутреннего электрода 102 и первым концом 122 внешнего электрода 104. Система 100 удержания плазмы выполнена с возможностью удержания Z-пинч-плазмы внутри области 126 собирания, как описано ниже.

Система 100 удержания плазмы также содержит источник 130 газа (например, емкость со сжатым газом) и один или более первых регуляторов 132, выполненных с возможностью регулирования расхода газа от источника 130 газа через соответствующие один или более первых клапанов 106. Соединения (например, трубопроводы) между указанными одним или более регуляторами 132 с одной стороны и указанными одним или более первыми клапанами 106 с другой не показаны на фиг. 1 для упрощения.

Система 100 удержания плазмы также содержит два или более вторых регуляторов 134, выполненных с возможностью регулирования расхода газа от источника 130 газа через соответствующие два или более вторых клапанов 112. Соединения (например, трубопроводы) между указанными одним или более регуляторами 132 с одной стороны и указанными двумя или более первыми клапанами 112 с другой не показаны на фиг. 1 для упрощения.

Система 100 удержания плазмы также содержит изолятор 136 между вторым концом 124 внешнего электрода 104 и внутренним электродом 102 для поддержания электрической изоляции между внутренним электродом 102 и внешним электродом 104. Изолятор 136 (например, из керамического материала) в целом имеет круглое сечение.

Система удержания плазмы также содержит вакуумную камеру 138 (например, емкость из нержавеющей стали), которая по меньшей мере частично окружает внутренний электрод 102 и внешний электрод 104, как показано на фиг. 1. На фиг. 2 показан схематичный вид в разрезе системы 200 удержания плазмы. Система 200 удержания плазмы содержит внутренний электрод 202, промежуточный электрод 203, который по существу окружает внутренний электрод 202, и внешний электрод 204, который по существу окружает промежуточный электрод 203. Система 200 удержания плазмы также содержит один или более первых клапанов 206, выполненных с возможностью направления газа от внутренней части внутреннего электрода 202 к области 210 ускорения между внутренним электродом 202 и промежуточным электродом 203. Система 200 удержания плазмы также содержит два или более вторых клапанов 212, выполненных с возможностью направления газа от внешней части промежуточного электрода 203 к области 210 ускорения. Система 200 удержания плазмы также содержит первый источник 214 питания, выполненный с возможностью прикладывания напряжения между внутренним электродом 202 и проме-

жучным электродом 203, и второй источник 215 питания, выполненный с возможностью прикладывания напряжения между внутренним электродом 202 и внешним электродом 204.

Внутренний электрод 202 в целом имеет форму электропроводной оболочки (например, из нержавеющей стали), имеющей по существу цилиндрический корпус 216. Внутренний электрод 202 имеет первый конец 218 (например, закругленный конец) и противоположный второй конец 220 (например, по существу круглый конец). Более конкретно, первый конец 218 может иметь коническую форму с закругленной вершиной. Внутренний электрод 202 в целом сходен с внутренним электродом 102, описанным выше. Внутренний электрод 202 может содержать один или более трактов или каналов (не показаны) для прохождения газа от указанных одного или более первых клапанов 206 к области 210 ускорения.

Внешний электрод 204 также имеет в целом форму электропроводной оболочки (например, из нержавеющей стали), имеющей по существу цилиндрический корпус 228. Первый конец 222 внешнего электрода 204 выполнен по существу дискообразным, а второй конец 224 внешнего электрода выполнен по существу круглым. Внешний электрод 204 окружает большую часть внутреннего электрода 202 и большую часть промежуточного электрода 203. Внутренний электрод 202, промежуточный электрод 203 и внешний электрод 204 могут быть концентричными и обладать радиальной симметрией относительно одной и той же оси. Промежуточный электрод 203 в целом имеет форму электропроводной оболочки (например, из нержавеющей стали), имеющей по существу цилиндрический корпус 229. Промежуточный электрод 203 имеет первый конец 219, который выполнен по существу круглым, и противоположный второй конец 221, который также выполнен по существу круглым. Промежуточный электрод 203 может содержать один или более трактов или каналов (не показаны) для прохождения газа от указанных двух или более вторых клапанов 212 к области 210 ускорения.

Первый конец 218 внутреннего электрода 202 расположен между первым концом 222 внешнего электрода 204 и вторым концом 224 внешнего электрода 204. Первый конец 219 промежуточного электрода 203 расположен между первым концом 222 внешнего электрода 204 и вторым концом 224 внешнего электрода 204. Один или более первых клапанов 206 могут иметь форму "газоструйных клапанов", однако они могут включать любые типы клапанов, выполненных с возможностью направления газа (например, водорода или дейтерия) от внутренней части внутреннего электрода 202 к области 210 ускорения между внутренним электродом 202 и промежуточным электродом 203. Как показано на фиг. 2, указанные один или более первых клапанов 206 размещены в осевом направлении между первым концом 218 внутреннего электрода 202 и вторым концом 220 внутреннего электрода 202. В качестве альтернативы один или более первых клапанов могут быть размещены на первом конце 218 или на втором конце 220 внутреннего электрода 202. Согласно фиг. 2, один или более первых клапанов 206 размещены внутри внутреннего электрода 202, но возможны и другие примеры. Один или более первых клапанов 206 могут управляться путем подачи управляющего напряжения на указанные один или более первых клапанов 206, как описано ниже.

Область 210 ускорения имеет по существу круглое сечение, определяемое формами внутреннего электрода 202 и внешнего электрода 203.

Один или более вторых клапанов 212 могут иметь форму "газоструйных клапанов", однако они могут включать любые типы клапанов, выполненных с возможностью направления газа (например, водорода или дейтерия) от внешней части внешнего электрода 203 к области 210 ускорения. Как показано на фиг. 2, два или более вторых клапанов 212 размещены на втором конце промежуточного электрода 203, но возможны и другие примеры. Эти два или более вторых клапанов 212 размещены, например, за пределами внешнего электрода 204 и за пределами промежуточного электрода 203. В других примерах указанные два или более вторых клапанов 212 могут быть размещены внутри внешнего электрода и за пределами промежуточного электрода. Эти два или более вторых клапанов 212 выполнены с возможностью направления газа между первым изолятором 236 и вторым изолятором 237. Эти два или более вторых клапанов 212 могут управляться путем подачи управляющего напряжения на указанные два или более вторых клапанов 212, как описано ниже.

Первый источник 214 питания и второй источник 215 питания будут в целом иметь форму батарей конденсаторов, способных накапливать энергию, например, до 100-200 кДж или до 3-4 МДж.

Система 200 удержания плазмы содержит область 226 собирания внутри внешнего электрода 204 между первым концом 218 внутреннего электрода 202 и первым концом 222 внешнего электрода 204. Система 200 удержания плазмы выполнена с возможностью удержания Z-пинч-плазмы внутри области 226 собирания, как описано ниже.

Система 200 удержания плазмы также содержит источник 230 газа (например, емкость со сжатым газом) и один или более первых регуляторов 232, выполненных с возможностью регулирования расхода газа от источника 230 газа через соответствующие один или более первых клапанов 206. Соединения (например, трубопроводы) между указанными одним или более первыми регуляторами 232 с одной стороны и указанными одним или более первыми клапанами 206 с другой не показаны на фиг. 2 для упрощения.

Система 200 удержания плазмы также содержит два или более вторых регуляторов 234, выполненных с возможностью регулирования расхода газа от источника 230 газа через соответствующие два или более вторых клапанов 212.

Соединения (например, трубопроводы) между указанными одним или более вторыми регуляторами 234 с одной стороны и указанными двумя или более вторыми клапанами 212 с другой не показаны на фиг. 2 для упрощения.

Система 200 удержания плазмы также содержит первый изолятор 236 между вторым концом 224 внешнего электрода 204 и промежуточным электродом 203. Первый изолятор 236 в целом имеет круглое сечение.

Система 200 удержания плазмы также имеет второй изолятор 237 между вторым концом 221 промежуточного электрода 203 и внутренним электродом 202. Второй изолятор 237 в целом имеет круглое сечение.

Система 200 удержания плазмы также содержит вакуумную камеру 238 (например, стальную емкость), которая по меньшей мере частично окружает внутренний электрод 202, промежуточный электрод 203 и внешний электрод 204, как показано на фиг. 2.

На фиг. 3 схематически показан вид в разрезе системы 300 удержания плазмы. Система 300 удержания плазмы содержит внутренний электрод 302, внешний электрод 304, который по существу окружает внутренний электрод 302, и промежуточный электрод 303, который обращен к внутреннему электроду 302.

Система 300 удержания плазмы также содержит один или более первых клапанов 306, выполненных с возможностью направления газа от внутренней части внутреннего электрода 302 к области 310 ускорения между внутренним электродом 302 и внешним электродом 304, и два или более вторых клапанов 312, выполненных с возможностью направления газа от внешней части внешнего электрода 304 к области 310 ускорения.

Система 300 удержания плазмы также содержит первый источник 314 питания, выполненный с возможностью прикладывания напряжения между внутренним электродом 302 и внешним электродом 304, и второй источник 315 питания, выполненный с возможностью прикладывания напряжения между внутренним электродом 302 и промежуточным электродом 303.

Внутренний электрод 302 в целом имеет форму электропроводной оболочки (например, из нержавеющей стали), имеющей по существу цилиндрический корпус 316. Внутренний электрод 302 имеет первый конец 318 (например, закругленный конец) и противоположный второй конец 320 (например, по существу круглый конец). Более конкретно, первый конец 318 может иметь коническую форму с закругленной вершиной. Внутренний электрод 302 в целом сходен с вышеописанными внутренним электродом 102 и внутренним электродом 202. Внутренний электрод 302 может содержать один или более трактов или каналов (не показаны) для прохождения газа от указанных одного или более первых клапанов 306 к области 310 ускорения. Внешний электрод 304 также имеет в целом форму электропроводной оболочки (например, из нержавеющей стали), имеющей по существу цилиндрический корпус 328. Первый конец 322 внешнего электрода 304 выполнен по существу круглым, и второй конец 324 внешнего электрода также выполнен по существу круглым. Внешний электрод 304 окружает большую часть внутреннего электрода 302. Внутренний электрод 302 и внешний электрод 304 могут быть концентричными и обладать радиальной симметрией относительно одной и той же оси. Первый конец 318 внутреннего электрода 302 расположен между первым концом 322 внешнего электрода 304 и вторым концом 324 внешнего электрода 304. Внешний электрод 304 может содержать один или более трактов или каналов (не показаны) для прохождения газа от указанных двух или более вторых клапанов 312 к области 310 ускорения. Промежуточный электрод 303 также изготовлен из электропроводного материала (например, из нержавеющей стали) и выполнен по существу дискообразным.

Указанные один или более первых клапанов 306 могут иметь форму "газоструйных клапанов", однако они могут включать любые типы клапанов, выполненных с возможностью направления газа (например, водорода или дейтерия) от внутренней части внутреннего электрода 302 к области 310 ускорения между внутренним электродом 302 и внешним электродом 304. Как показано на фиг. 3, указанные один или более первых клапанов 306 размещены в осевом направлении между первым концом 318 внутреннего электрода 302 и вторым концом 320 внутреннего электрода 302. В качестве альтернативы, указанные один или более первых клапанов могут быть размещены на первом конце 318 или на втором конце 320 внутреннего электрода 302. Согласно фиг. 3, указанные один или более первых клапанов 306 размещены внутри внутреннего электрода 302, однако возможны и другие примеры. Указанные один или более первых клапанов 306 могут управляться путем подачи управляющего напряжения на указанные один или более первых клапанов 306, как описано ниже.

Область 310 ускорения имеет по существу круглое сечение, определяемое формами внутреннего электрода 302 и внешнего электрода 304.

Указанные два или более вторых клапанов 312 могут иметь форму "газоструйных клапанов", однако они могут включать любые типы клапанов, выполненных с возможностью направления газа (например, водорода или дейтерия) от внешней части внешнего электрода 304 к области 310 ускорения. Как показано на фиг. 3, указанные два или более вторых клапанов 312 размещены в осевом направлении между первым концом 322 внешнего электрода 304 и вторым концом 324 внешнего электрода 304. В качестве альтернативы, указанные два или более вторых клапанов могут быть размещены на втором конце 324 или на первом конце 322. Указанные два или более вторых клапанов 312 будут в целом размещены

вокруг (например, за пределами) внешнего электрода 304. Как показано на фиг. 3, указанные один или более первых клапанов 306 выравнены в осевом направлении с указанными двумя или более вторыми клапанами 312, но возможны и другие примеры. Указанные два или более вторых клапанов 312 могут управляться путем прикладывания на эти два или более вторых клапанов 312 управляющего напряжения, как описано ниже. Первый источник 314 питания и второй источник 315 питания будет в целом иметь форму соответствующих батарей конденсаторов, способных накапливать энергию, например, до 100-200 кДж или 3-4 МДж.

Система 300 удержания плазмы содержит область 326 собирания внутри внешнего электрода 304 между первым концом 318 внутреннего электрода 302 и промежуточным электродом 303. Система 300 удержания плазмы выполнена с возможностью удержания Z-пинч-плазмы внутри области 326 собирания, как описано ниже.

Система 300 удержания плазмы также содержит источник 330 газа (например, емкость со сжатым газом) и один или более регуляторов 332, выполненных с возможностью регулирования расхода газа от источника 330 газа через соответствующие один или более первых клапанов 306. Соединения (например, трубопроводы) между указанными одним или более регуляторами 332 с одной стороны и указанными одним или более первыми клапанами 306 с другой не показаны на фиг. 3 для упрощения.

Система 300 удержания плазмы также содержит два или более вторых регуляторов 334, выполненных с возможностью регулирования расхода газа от источника 330 газа через соответствующие два или более вторых клапанов 312. Соединения (например, трубопроводы) между указанными двумя или более вторыми регуляторами 334 с одной стороны и указанными двумя или более вторыми клапанами 312 с другой не показаны на фиг. 3 для упрощения.

Система 300 удержания плазмы также содержит первый изолятор 336 (например, имеющий круглое сечение) между внешним электродом 304 и внутренним электродом 302 для поддержания электрической изоляции между внутренним электродом 302 и внешним электродом 304.

Система 300 удержания плазмы также имеет второй изолятор 337 (например, имеющий круглое сечение) между вторым концом 322 внешнего электрода 304 и промежуточным электродом 303 для поддержания электрической изоляции между промежуточным электродом 303 и внешним электродом 304. Система 300 удержания плазмы также содержит вакуумную камеру 338, которая по меньшей мере частично окружает внутренний электрод 302, промежуточный электрод 303 и/или внешний электрод 304.

На фиг. 4 показана блок-схема способа 400 управления системой удержания плазмы (например, системой 100 удержания плазмы). На фиг. 1, 5A-5F, 6 и 7, рассматриваемых в совокупности, показаны некоторые из аспектов способа 400, описанного ниже. На фиг. 5A-5F, показаны упрощенные изображения частей системы 100 удержания плазмы, а также показаны функции системы 100 удержания плазмы. На этапе 402 способа 400 направляют газ через один или более первых клапанов от внутренней части внутреннего электрода к области ускорения между внутренним электродом и внешним электродом, который по существу окружает внутренний электрод.

Например, указанные один или более первых клапанов 106 могут направлять газ 412 (см. фиг. 5A-B) от внутренней части внутреннего электрода 102 к области 110 ускорения между внутренним электродом 102 и внешним электродом 104, который по существу окружает внутренний электрод 102. На фиг. 5A показано первоначальное количество газа 412, поступающего к области 110 ускорения, и на фиг. 5B показано дополнительное количество газа 412, поступающего к области 110 ускорения. На фиг. 6 показаны некоторые другие возможные признаки способа 400. Напряжения, формы сигналов и время, показанные на фиг. 6, необязательно показаны в масштабе. В некоторых вариантах осуществления направление газа 412 через указанные один или более первых клапанов 106 включает подачу (с помощью источника питания, такого как батарея конденсаторов, которая не показана) первого клапанного напряжения 420 на указанные один или более первых клапанов 106 (например, на управляющие зажимы указанных одного или более первых клапанов 106) и последующую подачу второго клапанного напряжения 422 (например, с помощью источника питания постоянного тока) на указанные один или более первых клапанов 106.

В данном контексте первое клапанное напряжение 420 в целом находится в диапазоне от 270 до 330 В, в диапазоне от 290 до 310 В или в диапазоне от 295 до 305 В. Напряжения, приведенные в данном документе, как правило представляют собой напряжения постоянного тока, если не указано иное. Первое клапанное напряжение 420 может подаваться в течение промежутка времени 424 в диапазоне от 90 до 110 мкс, в диапазоне от 95 до 105 мкс или в диапазоне от 98 до 102 мкс. Следует отметить, что соответствующие сигналы первого клапанного напряжения 420 и второго клапанного напряжения 422 в реальности не будут представлять собой сигналы прямоугольной формы, а будут в целом иметь более плавную форму сигнала с переходным участком между первым клапанным напряжением 420 и вторым клапанным напряжением 422, что характерно для RLC-цепи.

Второе клапанное напряжение 422 может находиться в диапазоне от 13,5 до 16,5 В, в диапазоне от 14 до 16 В или в диапазоне от 14,5 до 15,5 В. Например, второе клапанное напряжение 422 может подаваться в течение промежутка времени 426 в диапазоне от 0,5 до 5 мс или в диапазоне от 0,65 до 3,5 мс, или в диапазоне от 0,75 до 2 мс. Обычно первое клапанное напряжение 420 выше, чем второе клапанное напряжение 422, и второе клапанное напряжение 422 подается сразу же после подачи первого клапанно-

го напряжения 420.

После приведения в действие указанных одного или более первых клапанов 106, давление 428 газа (см. фиг. 7) вблизи указанных одного или более первых клапанов 106 может находиться в диапазоне от 1000 до 5800 Торр (от 133322 до 773269,7 Па) (например, от 5450 до 5550 Торр (от 726606,9 до 739939,1 Па)) перед приложением напряжения 414 (см. фиг. 6) между внутренним электродом 102 и внешним электродом 104 с помощью источника 114 питания.

Направление газа 412 через указанные один или более первых клапанов 106 может включать открывание указанных одного или более первых клапанов 106 в течение промежутка времени в диапазоне от 1,1 до 2 мс или в диапазоне от 1,3 до 1,5 мс. Кроме того, направление газа 412 через указанные один или более первых клапанов 106 может включать открывание указанных одного или более первых клапанов 106 в течение промежутка времени от 1,0 до 1,6 мс или от 1,3 до 1,5 мс перед приложением напряжения 414 между внутренним электродом 102 и внешним электродом 104 с помощью источника 114 питания.

На этапе 404 способа 400 направляют газ через два или более вторых клапанов от внешней части внешнего электрода к области ускорения. Например, указанные два или более вторых клапанов 112 могут направлять часть газа 412 к области 110 ускорения, как показано на фиг. 5A-5B.

В некоторых вариантах осуществления направление газа 412 через указанные два или более вторых клапанов 112 включает подачу (с помощью источника питания, такого как батарея конденсаторов, которая не показана) третьего клапанного напряжения 430 (см. фиг. 6) на указанные два или более вторых клапанов 112 (например, на управляющие зажимы указанных двух или более вторых клапанов 112) и последующую подачу четвертого клапанного напряжения 422 (например, с помощью источника питания постоянного тока) на указанные два или более вторых клапанов 112.

В данном контексте третье клапанное напряжение 430 в целом находится в диапазоне от 270 до 330 В, в диапазоне от 290 до 310 В или в диапазоне от 295 до 305 В. Третье клапанное напряжение 430 может подаваться в течение промежутка времени 434 в диапазоне от 90 до 110 мкс, в диапазоне от 95 до 105 мкс или в диапазоне от 98 до 102 мкс. Следует отметить, что соответствующие сигналы третьего клапанного напряжения 430 и четвертого клапанного напряжения 432 в реальности не будут представлять собой сигналы прямоугольной формы, а будут в целом иметь более плавную форму сигнала с переходным участком между третьим клапанным напряжением 430 и четвертым клапанным напряжением 432, что характерно для RLC-цепи.

Четвертое клапанное напряжение 432 в целом находится в диапазоне от 13,5 до 16,5 В, в диапазоне от 14 до 16 В или в диапазоне от 14,5 до 15,5 В. Четвертое клапанное напряжение 432 может подаваться в течение промежутка времени 436 в диапазоне от 0,5 до 5 мс, в диапазоне от 0,65 до 3,5 мс или в диапазоне от 0,75 до 2 мс. Третье клапанное напряжение 430 обычно выше, чем четвертое клапанное напряжение 432. Четвертое клапанное напряжение 432 в целом подается сразу же после подачи третьего клапанного напряжения 430. После приведения в действие указанных двух или более вторых клапанов 112, давление 438 газа (см. фиг. 7) вблизи указанных двух или более вторых клапанов 112 может находиться в диапазоне от 1000 до 5800 Торр (от 133322 до 773269,7 Па) (например, от 5450 до 5550 Торр (от 726606,9 до 739939,1 Па)) перед приложением напряжения 414 между внутренним электродом 102 и внешним электродом 104 с помощью источника 114 питания.

Направление газа 412 через указанные два или более вторых клапанов 112 может включать открывание указанных двух или более вторых клапанов 112 в течение промежутка времени в диапазоне от 0,75 до 1 мс или в диапазоне от 0,8 до 0,95 мс. Кроме того, направление газа 412 через указанные два или более вторых клапанов 112 может включать открывание указанных двух или более вторых клапанов 112 в течение промежутка времени от 0,6 до 1,2 мс или от 0,7 до 0,9 мс перед приложением напряжения 414 между внутренним электродом 102 и внешним электродом 104 с помощью источника 114 питания.

После приведения в действие указанных одного или более первых клапанов 106 и указанных двух или более вторых клапанов 112, давление 440 газа (см. фиг. 7) внутри области 110 ускорения может находиться в диапазоне от 1000 до 5800 Торр (от 133322 до 773269,7 Па) (например, от 5450 до 5550 Торр (от 726606,9 до 739939,1 Па)) перед приложением напряжения между внутренним электродом 102 и внешним электродом 104 с помощью источника 114 питания. Давление газа в области ускорения будет в целом снижаться с увеличением расстояния от точки ввода газа и с течением времени с момента прекращения ввода газа к области ускорения.

На этапе 406 способа 400 прикладывают, посредством источника питания, напряжение между внутренним электродом и внешним электродом, что обеспечивает преобразование по меньшей мере части направляемого газа в плазму, имеющую по существу круглое сечение и протекающую в осевом направлении внутри области ускорения в сторону первого конца внутреннего электрода и первого конца внешнего электрода, с последующим получением Z-пинч-плазмы, которая протекает между первым концом внешнего электрода и первым концом внутреннего электрода. Например, источник 114 питания может подавать напряжение 414 между внутренним электродом 102 и внешним электродом 104, что обеспечивает преобразование по меньшей мере части направляемого газа 412 в плазму 416 (см. фиг. 5C-5D), имеющую по существу круглое сечение. Благодаря магнитному полю, генерируемому под действием своего собственного тока, плазма 416 имеет возможность протекания в осевом направлении в области 110 уско-

рения в сторону первого конца 118 внутреннего электрода 102 и первого конца 122 внешнего электрода 104, как показано на фиг. 5C-5D. При выходе плазмы 416 за пределы области 110 ускорения, образуется Z-пинч-плазма 418 (см. фиг. 5E-F), протекающая между первым концом 122 внешнего электрода 104 и первым концом 118 внутреннего электрода 102. Z-пинч-плазма 418 в целом протекает в области 126 собирания внутри внешнего электрода 104 между первым концом 118 внутреннего электрода 102 и первым концом 122 внешнего электрода 104.

Напряжение 414, подаваемое с помощью источника 114 питания между внутренним электродом 102 и внешним электродом 104, может находиться в диапазоне от 2 до 30 кВ. Напряжение 414 может подаваться в течение промежутка времени 442 (см. фиг. 6) в диапазоне от 50 до 400 мкс.

Напряжение 414, прикладываемое между внутренним электродом 102 и внешним электродом 104, способно создавать радиальное электрическое поле в области 110 ускорения в диапазоне от 30 кВ/м до 300 уВ/м.

Z-пинч-плазма 418 может образовывать срезанный осевой поток и иметь радиус от 0,1 до 3 нм, ионную температуру от 900 до 2000 эВ, электронную температуру более 500 эВ, плотность ионов более 1×10^{23} ионов/м³ или плотность электронов 1×10^{23} электронов/м³, магнитное поле свыше 8 Т, и/или она может быть стабильной в течение по меньшей мере 10 мкс.

На фиг. 8 показана блок-схема способа 800 управления системой удержания плазмы (например, системой 200 удержания плазмы). На фиг. 2, 9A-F, 10 и 11, рассматриваемых в совокупности, показаны некоторые из аспектов способа 800, описанные ниже. Фиг. 9A-F содержат упрощенные схемы частей системы 200 удержания плазмы, а также показывают функции системы 200 удержания плазмы. На этапе 802 способа 800 направляют газ через один или более первых клапанов от внутренней части внутреннего электрода к области ускорения между внутренним электродом и промежуточным электродом, который по существу окружает внутренний электрод.

Например, указанные один или более первых клапанов 206 могут направлять газ 812 от внутренней части внутреннего электрода 202 к области 210 ускорения между внутренним электродом 202 и промежуточным электродом 203, который по существу окружает внутренний электрод 202. На фиг. 9A показано первоначальное количество газа 812, поступающего к области 210 ускорения, и на фиг. 9B показано дополнительное количество газа 812, поступающего к области 210 ускорения.

На фиг. 10 показаны некоторые другие признаки способа 800. Напряжения, формы сигналов и время, показанные на фиг. 10, необязательно показаны в масштабе. В некоторых вариантах осуществления направление газа 812 через указанные один или более первых клапанов 206 включает подачу (с помощью источника питания, такого как батарея конденсаторов, которая не показана) первого клапанного напряжения 820 на указанные один или более первых клапанов 206 (например, на управляющие зажимы указанных одного или более первых клапанов 206) и последующую подачу второго клапанного напряжения 822 (например, с помощью источника питания постоянного тока) на указанные один или более первых клапанов 206. В данном контексте первое клапанное напряжение 820 в целом находится в диапазоне от 270 до 330 В, в диапазоне от 290 до 310 В или в диапазоне от 295 до 305 В. Напряжения, приведенные в данном документе, представляют собой напряжения постоянного тока, если не указано иное. Первое клапанное напряжение 820 может подаваться в течение промежутка времени 824 в диапазоне от 90 до 110 мкс, в диапазоне от 95 до 105 мкс или в диапазоне от 98 до 102 мкс. Следует отметить, что соответствующие сигналы первого клапанного напряжения 820 и второго клапанного напряжения 822 в реальности не будут представлять собой сигналы прямоугольной формы, а будут в целом иметь более плавную форму сигнала с переходным участком между первым клапанным напряжением 820 и вторым клапанным напряжением 822, что характерно для RLC-цепи.

Второе клапанное напряжение 822 может находиться в диапазоне от 13,5 до 16,5 В, в диапазоне от 14 до 16 В или в диапазоне от 14,5 до 15,5 В. Например, второе клапанное напряжение 822 может подаваться в течение промежутка времени 826 в диапазоне от 0,5 до 5 мс, в диапазоне от 0,65 до 3,5 мс или в диапазоне от 0,75 до 2 мс. Обычно первое клапанное напряжение 820 выше, чем второе клапанное напряжение 822, и это второе клапанное напряжение 822 подается сразу же после подачи первого клапанного напряжения 820.

После приведения в действие указанных одного или более первых клапанов 206, давление 828 газа (см. фиг. 11) вблизи указанных одного или более первых клапанов 206 может находиться в диапазоне от 1000 до 5800 Торр (от 133322 до 773269,7 Па) (например, от 5450 до 5550 Торр (от 726606,9 до 739939,1 Па)) перед приложением напряжения 814 (см. фиг. 10) между внутренним электродом 202 и промежуточным электродом 203 с помощью источника 214 питания.

Направление газа 812 через указанные один или более первых клапанов 206 может включать открывание указанных одного или более первых клапанов 206 в течение промежутка времени в диапазоне от 1,1 до 2 мс или в диапазоне от 1,3 до 15 мс. Кроме того, направление газа 812 через указанные один или более первых клапанов 206 может включать открывание указанных одного или более первых клапанов 206 в течение промежутка времени от 1,0 до 1,6 мс или от 1,3 до 1,5 мс перед приложением напряжения 814 между внутренним электродом 202 и промежуточным электродом 203 с помощью источника 214 питания.

На этапе 804 способа 800 направляют газ через указанные два или более вторых клапанов от внешней части промежуточного электрода к области ускорения. Например, указанные два или более вторых клапанов 212 могут направлять часть газа 812 к области 210 ускорения, как показано на фиг. 9А-9В.

В некоторых вариантах осуществления направление газа 812 через указанные два или более вторых клапанов 212 включает подачу (с помощью источника питания, такого как батарея конденсаторов, которая не показана) третьего клапанного напряжения 830 на указанные два или более вторых клапанов 212 (например, на управляющие зажимы указанных двух или более вторых клапанов 212) и последующую подачу четвертого клапанного напряжения 832 (например, с помощью источника питания постоянного тока) на указанные два или более вторых клапанов 212.

В данном контексте третье клапанное напряжение 830 в целом находится в диапазоне от 270 до 330 В, в диапазоне от 290 до 310 В или в диапазоне от 295 до 305 В. Третье клапанное напряжение 830 может подаваться в течение промежутка времени 834 в диапазоне от 90 до 110 мкс, в диапазоне от 95 до 105 мкс или в диапазоне от 98 до 102 мкс. Следует отметить, что соответствующие сигналы третьего клапанного напряжения 830 и четвертого клапанного напряжения 832 в реальности не будут представлять собой сигналы прямоугольной формы, а будут в целом иметь более плавную форму сигнала с переходным участком между третьим клапанным напряжением 830 и четвертым клапанным напряжением 832, что характерно для RLC-цепи.

Четвертое клапанное напряжение 832 в целом находится в диапазоне от 13,5 до 16,5 В, в диапазоне от 14 до 16 В или в диапазоне от 14,5 до 15,5 В. Четвертое клапанное напряжение 832 может подаваться в течение промежутка времени 836 в диапазоне от 0,5 до 5 мс, в диапазоне от 0,65 до 3,5 мс или в диапазоне от 0,75 до 2 мс.

Третье клапанное напряжение 830 обычно выше, чем четвертое клапанное напряжение 832. Четвертое клапанное напряжение 832 в целом подается сразу же после подачи третьего клапанного напряжения 830.

После приведения в действие указанных двух или более вторых клапанов 212, давление 838 газа (см. фиг. 11) вблизи указанных двух или более вторых клапанов 212 может находиться в диапазоне от 1000 до 5800 Торр (от 133322 до 773269,7 Па) (например, от 5450 до 5550 Торр (от 726606,9 до 739939,1 Па)) перед приложением напряжения 814 между внутренним электродом 202 и внешним электродом 203 с помощью источника 214 питания.

Направление газа 812 через указанные два или более вторых клапанов 212 может включать открывание указанных двух или более вторых клапанов 212 в течение промежутка времени в диапазоне от 0,75 до 1 мс или в диапазоне от 0,8 до 0,95 мс. Кроме того, направление газа 812 через указанные два или более вторых клапанов 212 может включать отрывание указанных двух или более вторых клапанов 212 в течение промежутка времени от 0,6 до 1,2 мс или от 0,7 до 0,9 мс перед приложением напряжения 814 между внутренним электродом 202 и промежуточным электродом 203 с помощью источника 214 питания.

После приведения в действие указанных одного или более первых клапанов 206, давление 840 газа (см. фиг. 11) в области 210 ускорения может находиться в диапазоне от 1000 до 5800 Торр (от 133322 до 773269,7 Па) (например, от 5450 до 5550 Торр (от 726606,9 до 739939,1 Па)) перед приложением напряжения 814 между внутренним электродом 102 и промежуточным электродом 203 с помощью источника 214 питания. Давление газа в области ускорения будет в целом снижаться с увеличением расстояния от точки ввода газа и с течением времени с момента прекращения ввода газа к области ускорения.

На этапе 806 способа 800 прикладывают, посредством источника питания, напряжение между внутренним электродом и промежуточным электродом, что обеспечивает преобразование по меньшей мере части направляемого газа в плазму, имеющую по существу круглое сечение и протекающую в осевом направлении в области ускорения в сторону первого конца внутреннего электрода и первого конца внешнего электрода.

Например, первый источник 214 питания может подавать напряжение 814 (см. фиг. 10) между внутренним электродом 202 и промежуточным электродом 203, что обеспечивает преобразование по меньшей мере части направляемого газа 812 в плазму 816 (см. фиг. 9С-9D), имеющую по существу круглое сечение. Благодаря магнитному полю, генерируемому под действием своего собственного тока, плазма 816 имеет возможность протекания в осевом направлении в области 210 ускорения в сторону первого конца 218 внутреннего электрода 202 и первого конца 222 внешнего электрода 204, как показано на фиг. 9С-D.

Напряжение 814, подаваемое с помощью источника 214 питания между внутренним электродом 202 и промежуточным электродом 203, может находиться в диапазоне от 2 кВ до 30 кВ. Напряжение 814 может подаваться в течение промежутка времени 842 (см. фиг. 10) в диапазоне от 50 до 400 мкс.

Напряжение 814, прикладываемое между внутренним электродом 202 и промежуточным электродом 203, способно создавать радиальное электрическое поле в области 210 ускорения в диапазоне от 30 до 500 кВ/м.

На этапе 808 способа 800 с помощью второго источника питания прикладывают напряжение между внутренним электродом и внешним электродом для получения Z-пинч-плазмы, которая протекает между

первым концом внешнего электрода и первым концом внутреннего электрода.

Например, второй источник 215 питания может подавать напряжение 815 (см. фиг. 10) между внутренним электродом 202 и внешним электродом 204 для получения Z-пинч-плазмы 818 (см. фиг. 9E-F), которая протекает между первым концом 222 внешнего электрода 204 и первым концом 218 внутреннего электрода 202. При выходе плазмы 816 за пределы области 210 ускорения, образуется Z-пинч-плазма 818 в области 226 собирания внутри внешнего электрода 204 между первым концом 218 внутреннего электрода 202 и первым концом 222 внешнего электрода 204. Следует отметить, что этапы 806 и 808 также могут быть осуществлены с помощью других средств регулирования (а) напряжения между внутренним электродом 202 и промежуточным электродом 203 и (b) напряжения между промежуточным электродом 203 и внешним электродом 204, как будет понятно специалистам в данной области техники. Например, источник питания может подавать напряжение между промежуточным электродом 203 и внешним электродом 204, а не между внутренним электродом и внешним электродом.

Прикладывание напряжения между внутренним электродом 202 и внешним электродом 204 может включать начало прикладывания напряжения между внутренним электродом 202 и внешним электродом 204 через 17-27 мкс или 19-22 мкс после начала прикладывания напряжения между внутренним электродом 202 и промежуточным электродом 203.

Напряжение 815, подаваемое источником 215 питания между внутренним электродом 202 и внешним электродом 204, в целом находится в диапазоне от 2 кВ до 30 кВ. Напряжение 815 может подаваться в течение промежутка времени 844 в диапазоне 50-400 мкс.

Z-пинч-плазма 818 может образовывать срезанный осевой поток и иметь радиус от 0,1 мм до 5 мм, ионную температуру от 900 до 2000 эВ, электронную температуру более 500 эВ, плотность ионов более 1×10^{23} ионов/м³ или плотность электронов 1×10^{23} электронов/м³, магнитное поле свыше 8 Т, и/или она может быть стабильной в течение по меньшей мере 10 мкс.

На фиг. 12 показана блок-схема способа 900 управления системой удержания плазмы (например, системой 300 удержания плазмы). На фиг. 3, 13A-F, 14 и 15, рассматриваемых в совокупности, показаны некоторые из аспектов способа 900, описанного ниже. На фиг. 13A-F показаны упрощенные схемы частей системы 300 удержания плазмы, а также показаны функции системы 300 удержания плазмы. На этапе 902 способа 900 направляют газ через указанные один или более первых клапанов от внутренней части внутреннего электрода к области ускорения между внутренним электродом и внешним электродом, который по существу окружает внутренний электрод.

Например, указанные один или более первых клапанов 306 могут направлять газ 912 (см. фиг. 13A-B) от внутренней части внутреннего электрода 302 к области 310 ускорения между внутренним электродом 302 и внешним электродом 304, который по существу окружает внутренний электрод 302. На фиг. 13A показано первоначальное количество газа 912, поступающего к области 310 ускорения, и на фиг. 13B показано дополнительное количество газа 912, поступающего к области 310 ускорения. На фиг. 14 показаны некоторые другие возможные признаки способа 900. Напряжения, формы сигналов и время, показанные на фиг. 6, необязательно показаны в масштабе. В некоторых вариантах осуществления направление газа 912 через указанные один или более первых клапанов 306 включает подачу (с помощью источника питания, такого как батарея конденсаторов, которая не показана) первого клапанного напряжения 920 на указанные один или более первых клапанов 306 (например, на управляющие зажимы указанных одного или более первых клапанов 306) и последующую подачу второго клапанного напряжения 922 (например, с помощью источника питания постоянного тока) на указанные один или более первых клапанов 306.

В данном контексте первое клапанное напряжение 920 в целом находится в диапазоне от 270 до 330 В, в диапазоне от 290 до 310 В или в диапазоне от 295 до 305 В. Напряжения, приведенные в данном документе, как правило представляют собой напряжения постоянного тока, если не указано иное. Первое клапанное напряжение 920 может подаваться в течение промежутка времени 924 в диапазоне от 90 до 110 мкс, в диапазоне от 95 до 105 мкс или в диапазоне от 98 до 102 мкс. Следует отметить, что соответствующие сигналы первого клапанного напряжения 920 и второго клапанного напряжения 922 в реальности не будут представлять собой сигналы прямоугольной формы, а будут в целом иметь более плавную форму сигнала с переходным участком между первым клапанным напряжением 920 и вторым клапанным напряжением 922, что характерно для RLC-цепи.

Второе клапанное напряжение 922 может находиться в диапазоне от 13,5 до 16,5 В, в диапазоне от 14 до 16 В или в диапазоне от 14,5 до 15,5 В. Например, второе клапанное напряжение 922 может подаваться в течение промежутка времени 926 в диапазоне от 0,5 до 5 мс, в диапазоне от 0,65 до 3,5 мс, или в диапазоне от 0,75 до 2 мс. Обычно первое клапанное напряжение 920 выше, чем второе клапанное напряжение 922, и второе клапанное напряжение 922 подается сразу же после подачи первого клапанного напряжения 920.

После приведения в действие указанных одного или более первых клапанов 306, давление 928 газа (см. фиг. 15) вблизи указанных одного или более первых клапанов 306 может находиться в диапазоне от 1000 до 5800 Торр (от 133322 до 773269,7 Па) (например, от 5450 до 5550 Торр (от 726606,9 до 739939,1 Па)) перед приложением напряжения 914 (см. фиг. 14) между внутренним электродом 302 и

внешним электродом 304 с помощью источника 314 питания.

Направление газа 912 через указанные один или более первых клапанов 306 может включать открывание указанных одного или более первых клапанов 306 в течение промежутка времени в диапазоне от 1,1 до 2 мс или в диапазоне от 1,3 до 1,5 мс. Кроме того, направление газа 912 через указанные один или более первых клапанов 306 может включать открывание указанных одного или более первых клапанов 306 в течение промежутка времени от 1,0 до 1,6 мс или от 1,3 до 1,5 мс перед приложением напряжения 914 между внутренним электродом 302 и внешним электродом 304 с помощью источника 314 питания. На этапе 904 способа 900 направляют газ через два или более вторых клапанов от внешней части внешнего электрода к области ускорения. Например, указанные два или более вторых клапанов 312 могут направлять часть газа 912 к области 310 ускорения, как показано на фиг. 13А-В.

В некоторых вариантах осуществления направление газа 912 через указанные два или более вторых клапанов 312 включает подачу (с помощью источника питания, такого как батарея конденсаторов, которая не показана) третьего клапанного напряжения 930 (см. фиг. 14) на указанные два или более вторых клапанов 312 (например, на управляющие зажимы указанных двух или более вторых клапанов 312) и последующую подачу четвертого клапанного напряжения 932 (например, с помощью источника питания постоянного тока) на указанные два или более вторых клапанов 312.

В данном контексте третье клапанное напряжение 930 в целом находится в диапазоне от 270 до 330 В, в диапазоне от 290 до 310 В или в диапазоне от 295 до 305 В. Третье клапанное напряжение 930 может подаваться в течение промежутка времени 934 в диапазоне от 90 до 110 мкс, в диапазоне от 95 до 105 мкс или в диапазоне от 98 до 102 мкс. Следует отметить, что соответствующие сигналы третьего клапанного напряжения 930 и четвертого клапанного напряжения 932 в реальности не будут представлять собой сигналы прямоугольной формы, а будут в целом иметь более плавную форму сигнала с переходным участком между третьим клапанным напряжением 930 и четвертым клапанным напряжением 932, что характерно для RLC-цепи.

Четвертое клапанное напряжение 932 в целом находится в диапазоне от 13,5 до 16,5 В, в диапазоне от 14 до 16 В или в диапазоне от 14,5 до 15,5 В. Четвертое клапанное напряжение 932 может подаваться в течение промежутка времени 936 в диапазоне от 0,5 до 5 мс, в диапазоне от 0,65 до 3,5 мс или в диапазоне от 0,75 до 2 мс. Третье клапанное напряжение 930 обычно выше, чем четвертое клапанное напряжение 932. Четвертое клапанное напряжение 932 в целом подается сразу же после подачи третьего клапанного напряжения 930.

После приведения в действие указанных двух или более вторых клапанов 312, давление 938 газа (см. фиг. 15) вблизи указанных двух или более вторых клапанов 312 может находиться в диапазоне от 1000 до 5800 Торр (от 133322 до 773269,7 Па) (например, от 5450 до 5550 Торр (от 726606,9 до 739939,1 Па)) перед приложением напряжения 914 между внутренним электродом 302 и внешним электродом 304 с помощью источника 314 питания.

Направление газа 912 через указанные два или более вторых клапанов 312 может включать открывание указанных двух или более вторых клапанов 312 в течение промежутка времени в диапазоне от 0,75 до 1 мс или в диапазоне от 0,8 до 0,95 мс. Кроме того, направление газа 912 через указанные два или более вторых клапанов 312 может включать открывание указанных двух или более вторых клапанов 312 в течение промежутка времени от 0,6 до 1,2 мс или от 0,7 до 0,9 мс перед приложением напряжения 914 между внутренним электродом 302 и внешним электродом 304 с помощью источника 314 питания.

После приведения в действие указанных одного или более первых клапанов 306 и указанных двух или более вторых клапанов 312, давление 940 газа (см. фиг. 15) в области 310 ускорения может находиться в диапазоне от 1000 до 5800 Торр (от 133322 до 773269,7 Па) (например, от 5450 до 5550 Торр (от 726606,9 до 739939,1 Па)) перед приложением напряжения 914 между внутренним электродом 302 и внешним электродом 304 с помощью источника 314 питания. Давление газа в области ускорения будет в целом снижаться с увеличением расстояния от точки ввода газа и с течением времени с момента прекращения ввода газа к области ускорения.

На этапе 906 способа 900 с помощью источника питания прикладывают напряжение между внутренним электродом и внешним электродом, что обеспечивает преобразование по меньшей мере части направляемого газа в плазму, имеющую по существу круглое сечение и протекающую в осевом направлении в области ускорения в сторону первого конца внутреннего электрода и первого конца внешнего электрода. Например, источник 314 питания может подавать напряжение 914 между внутренним электродом 302 и внешним электродом 304, что обеспечивает преобразование по меньшей мере части направляемого газа 912 в плазму 916 (см. фиг. 13С-Д), имеющую по существу круглое сечение. Благодаря магнитному полю, генерируемому под действием своего собственного тока, плазма 916 имеет возможность протекания в осевом направлении в области 310 ускорения в сторону первого конца 318 внутреннего электрода 302 и первого конца 322 внешнего электрода 204, как показано на фиг. 13С-Д.

Напряжение 914, подаваемое источником 314 питания между внутренним электродом 302 и внешним электродом 304, может находиться в диапазоне от 2 кВ до 30 кВ. Напряжение 914 может подаваться в течение промежутка времени 942 (см. фиг. 14) в диапазоне от 50 до 400 мкс. Напряжение 914, прикладываемое между внутренним электродом 302 и внешним электродом 304, способно создавать радиальное

электрическое поле в области 310 ускорения в диапазоне от 30 до 500 кВ/м.

На этапе 908 способа 900 с помощью источника питания прикладывают напряжение между внутренним электродом и промежуточным электродом для получения Z-пинч-плазмы, которая протекает между промежуточным электродом и первым концом внутреннего электрода. В данном контексте промежуточный электрод расположен на первом конце внешнего электрода.

Например, второй источник 315 питания может подавать напряжение 915 между внутренним электродом 302 и промежуточным электродом 303 для получения Z-пинч-плазмы 918, которая протекает между промежуточным электродом 303 и первым концом 318 внутреннего электрода 302. Z-пинч-плазма 918 образуется при выходе плазмы 916 за пределы области 310 ускорения. Z-пинч-плазма 918 протекает в области 326 собирания внутри внешнего электрода 304 между первым концом 318 внутреннего электрода 302 и промежуточным электродом 303.

Прикладывание напряжения между внутренним электродом 302 и промежуточным электродом 303 может включать начало прикладывания напряжения между внутренним электродом 302 и промежуточным электродом 303 через 17-27 мкс или 19-22 мкс после начала прикладывания напряжения между внутренним электродом 302 и промежуточным электродом 304.

Следует отметить, что этапы 906 и 908 также могут быть осуществлены с помощью других средств регулирования (а) напряжения между внутренним электродом 302 и внешним электродом 304 и (b) напряжения между внутренним электродом 302 и промежуточным электродом 303, как будет понятно специалистам в данной области техники. Например, источник питания может подавать напряжение между промежуточным электродом 303 и внешним электродом 304, а не между внутренним электродом и промежуточным электродом. Напряжение 915, подаваемое источником 315 питания между внутренним электродом 302 и промежуточным электродом 303, может находиться в диапазоне от 2 до 30 кВ. Напряжение 915 может подаваться в течение промежутка времени 942 (см. фиг. 14) в диапазоне от 50 до 400 мкс.

Z-пинч-плазма 918 может образовывать срезанный осевой поток и иметь радиус от 0,1 мм до 5 мм, ионную температуру от 900 до 2000 эВ, электронную температуру более 500 эВ, плотность ионов более 1×10^{23} ионов/м³ или плотность электронов 1×10^{23} электронов/м³, магнитное поле свыше 8 Т, и/или она может быть стабильной в течение по меньшей мере 10 мкс.

Хотя в данном документе были раскрыты различные примеры аспектов и вариантов осуществления, другие аспекты и варианты осуществления также будут понятны специалистам в данной области техники. Различные примеры аспектов и вариантов осуществления, раскрытые в данном документе, предназначены для иллюстративных целей и не предназначены для ограничения, а истинные объем и идея настоящего изобретения изложены в нижеследующей формуле изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Система удержания плазмы, содержащая:
 - внутренний электрод;
 - внешний электрод, по существу окружающий внутренний электрод;
 - промежуточный электрод, который обращен к внутреннему электроду;
 - один или более первых клапанов, выполненных с возможностью направления газа от внутренней части внутреннего электрода к области ускорения между внутренним электродом и внешним электродом;
 - два или более вторых клапанов, выполненных с возможностью направления газа от внешней части внешнего электрода к области ускорения;
 - первый источник питания, выполненный с возможностью прикладывания напряжения между внутренним электродом и внешним электродом; и
 - второй источник питания, выполненный с возможностью прикладывания напряжения между внутренним электродом и промежуточным электродом, при этом система удержания плазмы выполнена таким образом, что обеспечена возможность протекания Z-пинч-плазмы в области собирания внутри внешнего электрода между первым концом внутреннего электрода и промежуточным электродом.
2. Система удержания плазмы по п.1, в которой промежуточный электрод выполнен по существу дискообразным.
3. Система удержания плазмы по любому из предшествующих пунктов, в которой первый конец внутреннего электрода расположен между первым концом внешнего электрода и вторым концом внешнего электрода, при этом внутренний электрод в дополнение к первому концу имеет противоположный второй конец, а система удержания плазмы также содержит указанную область собирания внутри внешнего электрода между первым концом внутреннего электрода и промежуточным электродом.
4. Система удержания плазмы по любому из пп.1 и 2, в которой указанные один или более первых клапанов размещены в осевом направлении между первым концом внутреннего электрода и вторым концом внутреннего электрода.
5. Система удержания плазмы по любому из предшествующих пунктов, в которой указанные один или более первых клапанов размещены внутри внутреннего электрода.
6. Система удержания плазмы по любому из предшествующих пунктов, в которой указанные два

или более вторых клапанов размещены за пределами внешнего электрода.

7. Система удержания плазмы по любому из предшествующих пунктов также содержащая первый изолятор между внешним электродом и внутренним электродом.

8. Система удержания плазмы по любому из предшествующих пунктов, также содержащая изолятор между концом внешнего электрода и промежуточным электродом.

9. Способ управления системой удержания плазмы, включающий этапы, согласно которым:

направляют газ через один или более первых клапанов от внутренней части внутреннего электрода к области ускорения между внутренним электродом и внешним электродом, который по существу окружает внутренний электрод;

направляют газ через два или более вторых клапанов от внешней части внешнего электрода к области ускорения;

прикладывают, посредством источника питания, напряжение между внутренним электродом и внешним электродом, что обеспечивает преобразование по меньшей мере части направляемого газа в плазму, имеющую по существу круглое сечение и протекающую в осевом направлении в области ускорения в сторону первого конца внутреннего электрода и первого конца внешнего электрода; и

прикладывают напряжение с помощью второго источника питания между внутренним электродом и промежуточным электродом для получения Z-пинч-плазмы, которая протекает между промежуточным электродом и первым концом внутреннего электрода, причем промежуточный электрод размещен на первом конце внешнего электрода, а Z-пинч-плазма протекает в области собирания внутри внешнего электрода между первым концом внутреннего электрода и промежуточным электродом.

10. Способ по п.9, согласно которому промежуточный электрод выполнен по существу дискообразным.

11. Способ по п.9 или 10, согласно которому указанные один или более первых клапанов размещены в осевом направлении между первым концом внутреннего электрода и вторым концом внутреннего электрода.

12. Способ по любому из пп.9-11, согласно которому направление газа через указанные один или более первых клапанов включает подачу первого клапанного напряжения на указанные один или более первых клапанов и последующую подачу второго клапанного напряжения на указанные один или более вторых клапанов.

13. Способ по любому из пп.9-12, согласно которому направление газа через указанные два или более вторых клапанов включает подачу третьего клапанного напряжения на указанные два или более вторых клапанов и последующую подачу четвертого клапанного напряжения на указанные два или более вторых клапанов.

14. Способ по любому из пп.9-13, согласно которому Z-пинч-плазма имеет радиус от 0,1 до 5 мм.

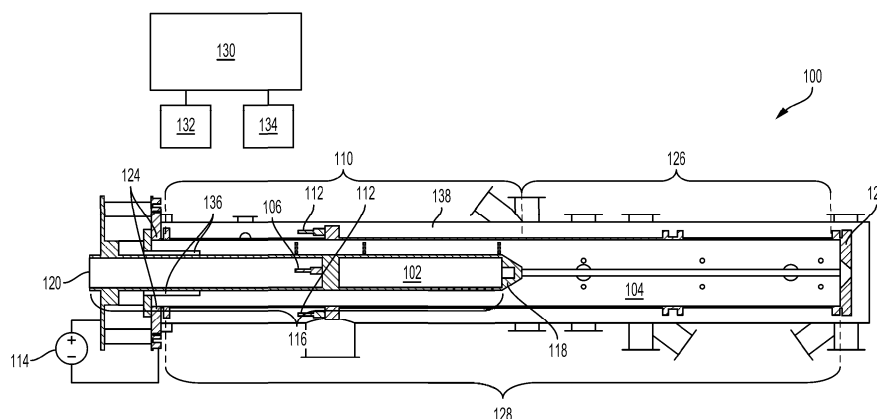
15. Способ по любому из пп.9-14, согласно которому Z-пинч-плазма имеет ионную температуру от 900 до 2000 эВ и электронную температуру более 500 эВ.

16. Способ по любому из пп.9-15, согласно которому Z-пинч-плазма имеет плотность ионов более 1×10^{23} ионов/м³ или плотность электронов более 1×10^{23} электронов/м³.

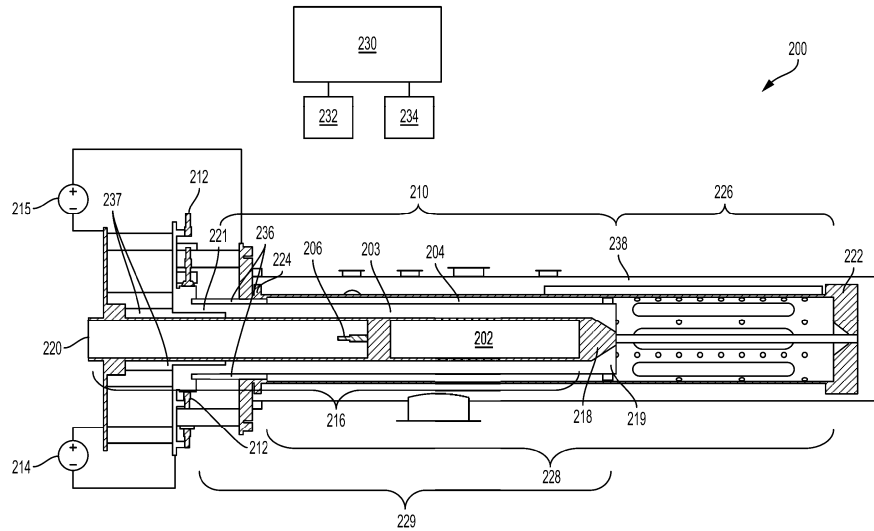
17. Способ по любому из пп.9-16, согласно которому Z-пинч-плазма образует срезанный поток.

18. Способ по любому из пп.9-17, согласно которому Z-пинч-плазма демонстрирует магнитное поле свыше 8 Т.

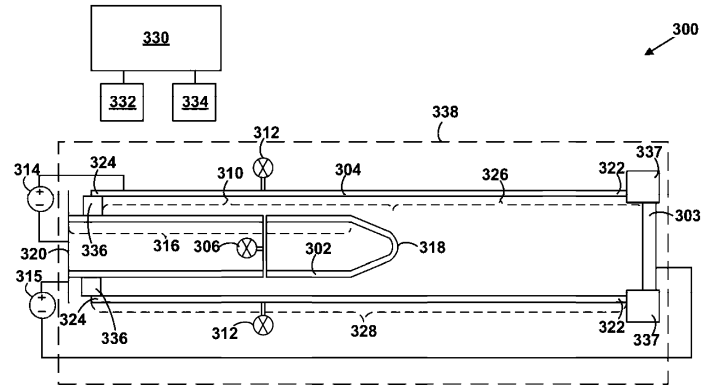
19. Способ по любому из пп.9-18, согласно которому Z-пинч-плазма демонстрирует стабильность в течение по меньшей мере 10 мкс.



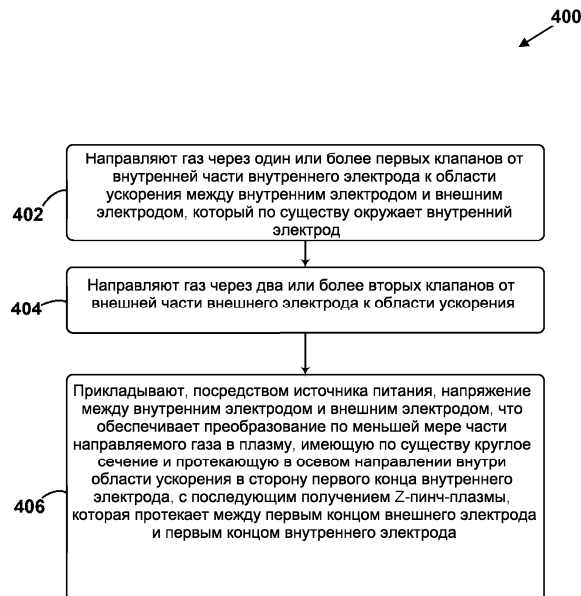
Фиг. 1



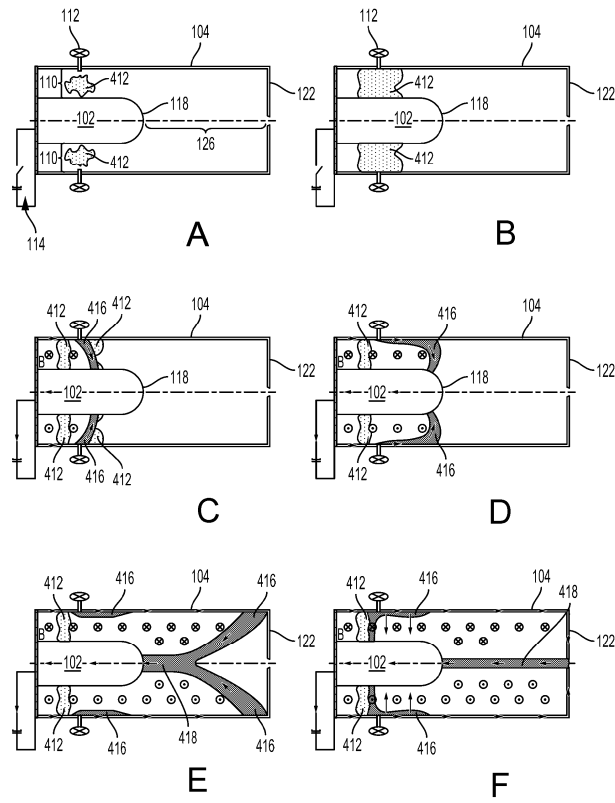
Фиг. 2



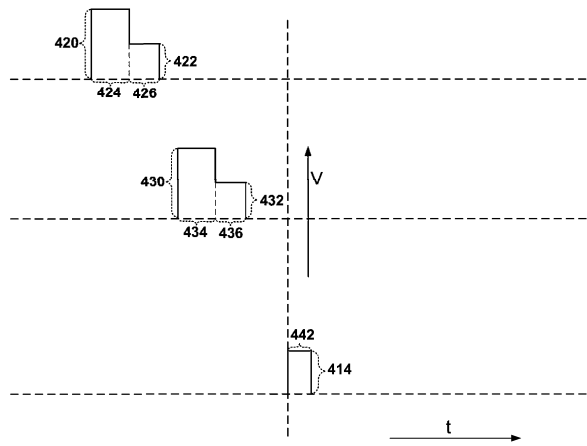
Фиг. 3



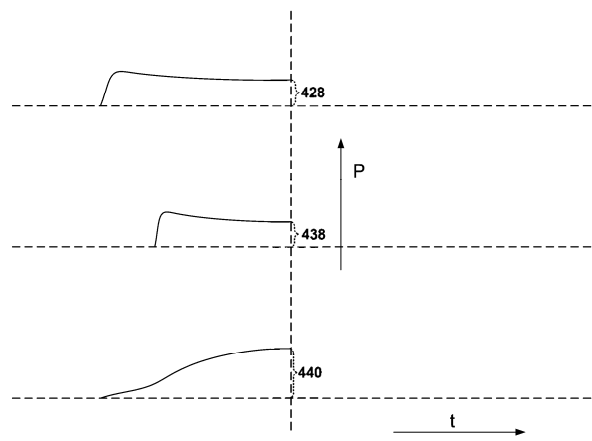
Фиг. 4



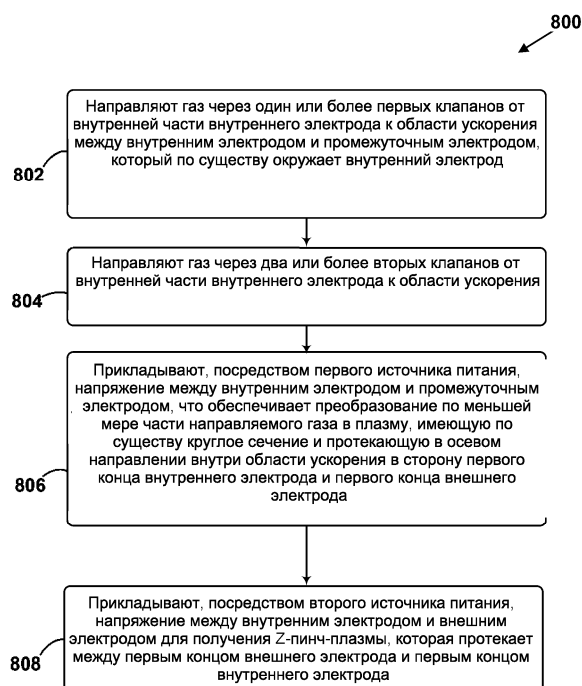
Фиг. 5А-Е



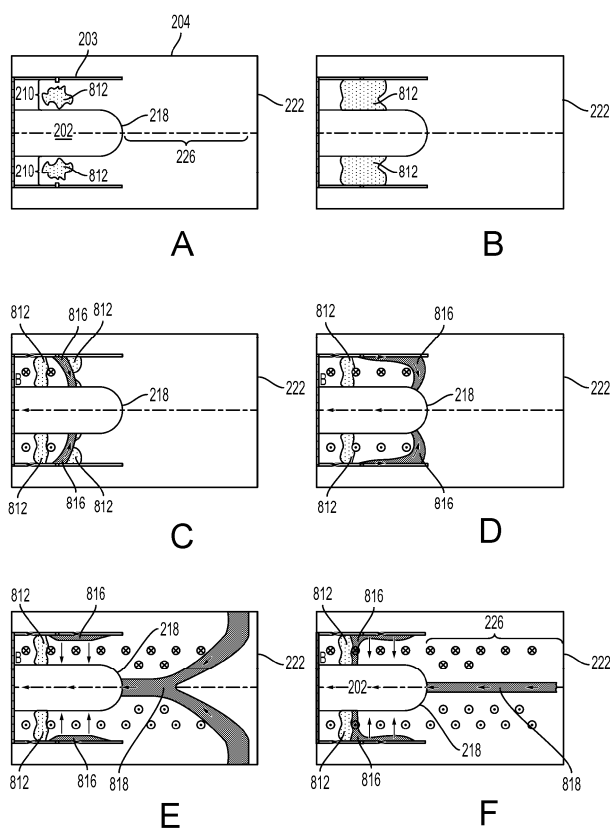
Фиг. 6



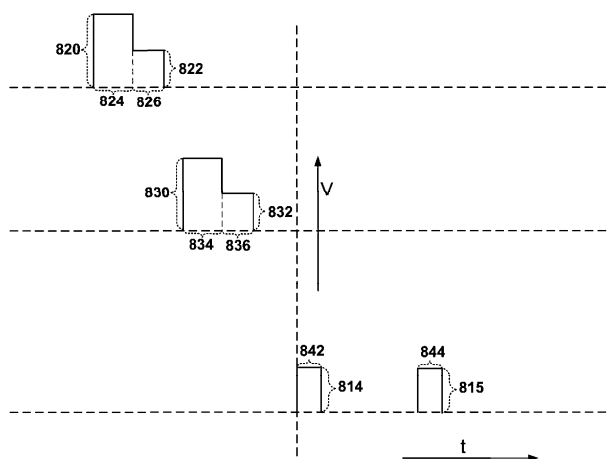
Фиг. 7



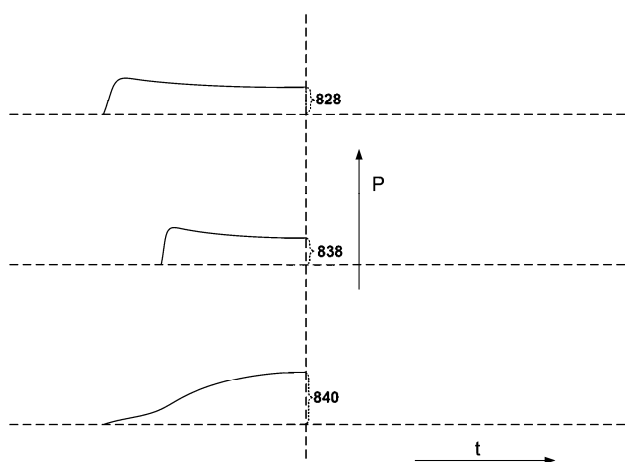
Фиг. 8



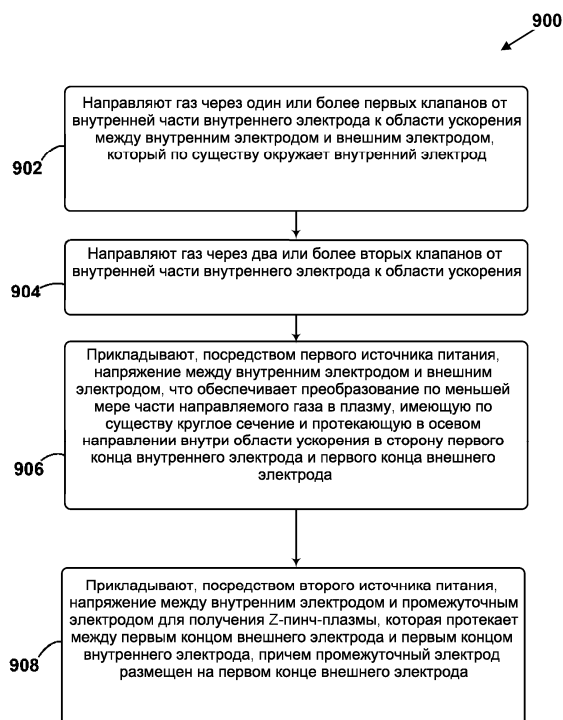
Фиг. 9A-F



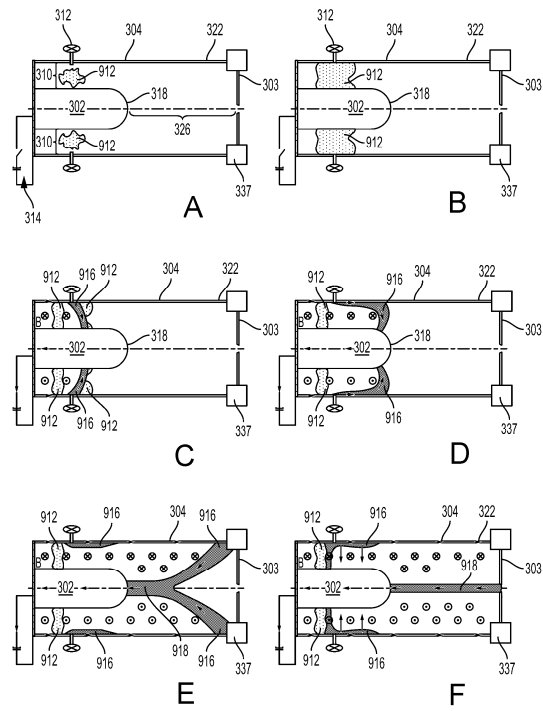
Фиг. 10



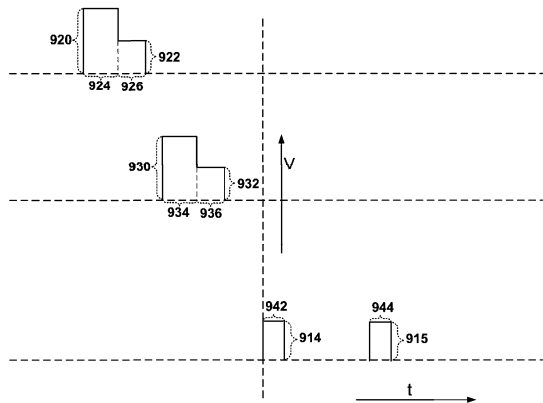
Фиг. 11



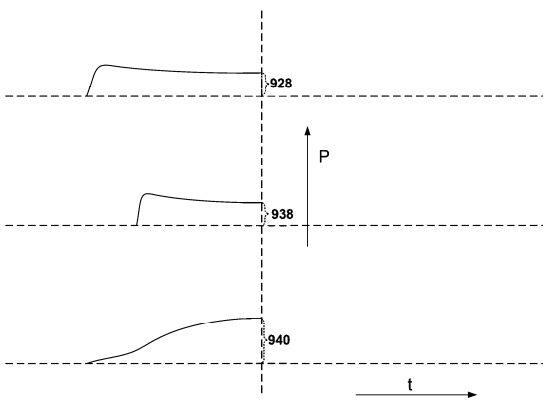
Фиг. 12



Фиг. 13А-В



Фиг. 14



Фиг. 15

