

(19)



Евразийское  
патентное  
ведомство

(21) 202491612 (13) A1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки  
2024.10.08

(51) Int. Cl. G21B 1/05 (2006.01)  
G21B 1/11 (2006.01)

(22) Дата подачи заявки  
2023.01.24

(54) ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЙ IN SITU ЭЛЕКТРОД ДЛЯ СИСТЕМЫ УДЕРЖИВАНИЯ ПЛАЗМЫ Z-ПИНЧ

(31) 63/303,473; 63/303,477

(32) 2022.01.26

(33) US

(86) PCT/US2023/061196

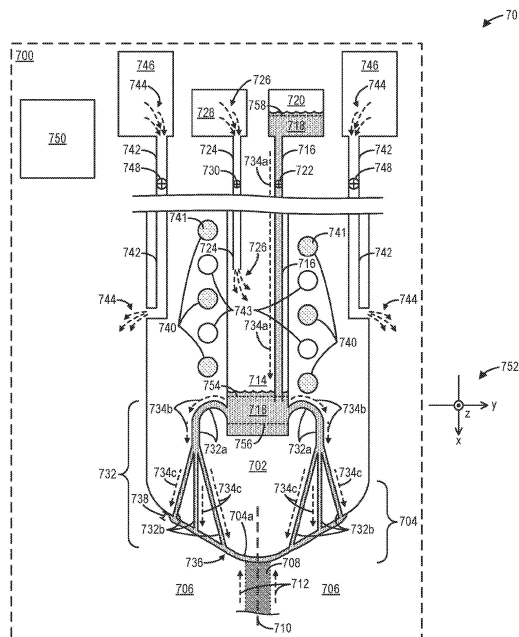
(87) WO 2023/147316 2023.08.03

(71) Заявитель:  
ЗЭП ЭНЕРДЖИ, ИНК. (US)

(72) Изобретатель:  
Томпсон Мэттью Колин, Левитт  
Бенджамин Джозеф (US)

(74) Представитель:  
Билык А.В., Поликарпов А.В.,  
Соколова М.В., Путинцев А.И.,  
Черкас Д.А., Игнатъев А.В., Дмитриев  
А.В., Бельтюкова М.В. (RU)

(57) Предложены способы и системы удерживания плазмы Z-пинчем и другими методами с использованием различных композиций и конфигураций. В одном примере система удерживания плазмы содержит множество электродов, при этом каждый электрод из множества электродов расположен соосно относительно области сборки системы удерживания плазмы и расположен таким образом, чтобы быть открытым для области сборки, при этом один или более электродов из множества электродов содержат электродный материал, который выполнен с возможностью высвобождения газообразного водорода выше пороговой температуры. В дополнительном или альтернативном примере система удерживания плазмы включает в себя корпус электрода, включающий в себя носовой конус и жидкий металл, при этом часть жидкого металла образует защитную пленку между поверхностью носового конуса и наружной частью носового конуса во время работы системы удерживания плазмы.



202491612  
A1

202491612  
A1

## **ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЙ *IN SITU* ЭЛЕКТРОД ДЛЯ СИСТЕМЫ УДЕРЖИВАНИЯ ПЛАЗМЫ Z-ПИНЧ**

### **ПЕРЕКРЕСТНАЯ ССЫЛКА НА РОДСТВЕННЫЕ ЗАЯВКИ**

[001]. Настоящая заявка испрашивает приоритет по каждой из предварительной заявки на патент США № 63/303,473 под названием «ЭЛЕКТРОД И РАЗЛАГАЕМЫЙ ЭЛЕКТРОДНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ СИСТЕМЫ УДЕРЖИВАНИЯ ПЛАЗМЫ Z-ПИНЧ», поданной 26 января 2022 года, и предварительной заявки на патент США № 63/303477 под названием «ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЙ *IN SITU* ЭЛЕКТРОД ДЛЯ СИСТЕМЫ УДЕРЖИВАНИЯ ПЛАЗМЫ Z-PINCH», поданной 26 января 2022 года. Для всех целей полное содержание каждой из вышеуказанных заявок включено в настоящий документ посредством ссылки.

### **ЗАЯВЛЕНИЕ О ФИНАНСИРУЕМЫХ ГОСУДАРСТВОМ ИССЛЕДОВАНИЯХ ИЛИ РАЗРАБОТКАХ**

[002]. Настоящее изобретение по меньшей мере частично было осуществлено при государственной поддержке в рамках грантов № DE-AR001010 и DE-AR001260, присужденных Министерством энергетики США. Государство имеет определенные права на настоящее изобретение.

### **ОБЛАСТЬ ТЕХНИКИ**

[003]. Варианты осуществления объекта изобретения, раскрытого в данном документе, относятся к способам и системам удерживания плазмы для индуцирования реакций термоядерного синтеза и, более конкретно, к электродным композициям и конфигурациям для системы удерживания плазмы Z-пинч (Z-pinch).

### **УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ**

[004]. Экономичная, эффективная и самоподдерживаемая термоядерная энергетика оказалась труднодостижимой. Даже при непрерывном прогрессе величина электрической мощности, подаваемой в термоядерный реактор, почти неизменно превышает

электрическую мощность, выдаваемую термоядерным реактором, особенно в промышленных масштабах. На выработку самоподдерживающейся, захватываемой энергии синтеза или «зажигания синтеза» влияют ряд факторов. Например, конфигурации термоядерного реактора могут обсуждаться с точки зрения качества удерживания плазмы в термоядерном реакторе, которое может быть количественно определено с помощью тройного произведения плотности плазмы, времени удерживания плазмы и температуры плазмы. Максимизация одного или более факторов этого тройного произведения для получения чистого выхода энергии синтеза является особенно сложной.

[005]. Одним примером реакции, которую можно использовать, является слияние ядер дейтерия и трития, которое может быть задано в виде:



Одним усложняющим аспектом реакции синтеза дейтерия-трития, является появление побочного продукта n в виде свободных нейтронов. В комбинации с токами электрических разрядов (которые создают поток высокоэнергетических ионов во время работы термоядерного реактора) свободные нейтроны могут разрушать материал на поверхностях электродов, взаимодействующих с камерой для удерживания плазмы. Хотя уменьшения тока разряда или скорости повторения тока разряда могут соответственно уменьшать эрозию электрода, чистая выработка электрической энергии также может страдать таким образом, что зажигание синтеза может оставаться недостижимым.

## КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ

[006]. Различные варианты осуществления и методики будут описаны со ссылкой на сопроводительные чертежи, на которых:

[007]. ФИГ. 1 показывает схематический вид в разрезе системы удерживания плазмы, содержащей множество электродов, в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[008]. ФИГ. 2 показывает блок-схему способа работы системы удерживания плазмы, например, путем инициирования и управления потоком ионов со сдвиговой скоростью для стабилизации разряда Z-пинч в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[009]. ФИГ. 3А-3F показывает схематические виды в разрезе процесса инициирования и управления системы удерживания плазмы, например, путем инициирования и управления потоком ионов со сдвиговой скоростью по ФИГ. 1 для стабилизации разряда Z-пинч в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[0010]. ФИГ. 4 показывает схематический вид в разрезе системы удерживания плазмы, включающей в себя множество электродов, согласно по меньшей мере одному варианту осуществления;

[0011]. ФИГ. 5 показывает блок-схему способа образования электрода и работы с ним системы удерживания плазмы в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[0012]. ФИГ. 6 показывает график множества значений глубины имплантации иона в титан в зависимости от энергии иона, например, ионов;

[0013]. ФИГ. 7 показывает график множества изотермических давлений в зависимости от атомного соотношения H:Ti в примере гидридов титана;

[0014]. ФИГ. 8А показывает схематический вид в разрезе электрода в камере для удерживания плазмы термоядерного реактора во время его работы в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления;

[0015]. ФИГ. 8В показывает схематический вид в разрезе электрода по ФИГ. 8А до или после работы термоядерного реактора в соответствии с по меньшей мере одним вариантом осуществления; и

[0016]. ФИГ. 9А и 9В показывают блок-схемы способа работы системы удерживания плазмы, включающей в себя возобновляемый *in situ* электрод в соответствии по меньшей мере с одним вариантом осуществления.

### ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

[0017]. Методы, описанные и предложенные в данном документе, включают в себя систему удерживания плазмы, которая включает в себя множество электродов, при этом каждый электрод из множества электродов расположен соосно относительно области сборки системы удерживания плазмы и расположен так, что открыт для области сборки,

при этом один или более электродов из множества электродов содержат электродный материал, который выполнен с возможностью высвобождения газообразного водорода выше пороговой температуры.

[0018]. В некоторых вариантах осуществления реактор термоядерного синтеза включает в себя камеру для удерживания плазмы, внутренний электрод и наружный электрод, по меньшей мере частично окружающий внутренний электрод, при этом один или оба из внутреннего электрода или наружного электрода включают в себя в себя гидрид металла для высвобождения топливного газа между внутренним электродом и наружным электродом для внесения плазмы в процесс работы термоядерного реактора. Например, один или оба из внутреннего электрода или наружного электрода могут включать в себя секцию, состоящую из гидрида металла.

[0019]. В некоторых примерах способ включает генерирование реакции термоядерного синтеза в реакторе термоядерного синтеза путем по меньшей мере нагрева электрода, образованного из объемного материала, и металлического слоя, испаренного на него, при этом металлический слой заполнен дейтерием и/или тритием, чтобы принуждать электрод к высвобождению газообразного водорода, образуя с использованием газообразного водорода плазму внутри термоядерного реактора, и используя электрический ток, направленный в плазму через электрод, для сжатия плазмы с получением реакции термоядерного синтеза. Например, металлический слой может состоять из гидрида металла (например, дейтерида металла или тритида металла, или их комбинации). Гидрид металла может быть образован после напыления испарением металлического слоя на объемный материал и загрузки металлического слоя дейтерием и/или тритием.

[0020]. По меньшей мере в одном варианте осуществления система удерживания плазмы включает в себя камеру для удерживания плазмы и корпус электрода, включающий в себя носовой конус, расположенный таким образом, что он открыт для камеры для удерживания плазмы, внутренний резервуар, соединенный по текучей среде с источником жидкого металла, в котором хранится по меньшей мере часть жидкого металла, и/или который подает жидкий металл во внутренний резервуар во время работы системы удерживания плазмы, и множество внутренних каналов для потока жидкости, проходящих к поверхности носового конуса таким образом, чтобы соединять по текучей среде внутренний резервуар с камерой для удерживания плазмы.

[0021]. Реактор термоядерного синтеза согласно различным вариантам осуществления включает в себя камеру для удерживания плазмы, электрод, по меньшей мере частично заключенный внутри камеры для удерживания плазмы, при этом электрод включает в себя носовой конус, который пересекается с осью плазменной дуги, удерживаемой внутри камеры для удерживания плазмы во время работы термоядерного реактора, и жидкометаллический мениск, образованный на поверхности носового конуса, при этом жидкометаллический мениск непосредственно взаимодействует с удерживаемой плазменной дугой во время работы термоядерного реактора.

[0022]. Способ согласно различным вариантам осуществления включает в себя протекание жидкого металла из внутреннего резервуара электрода к наружной поверхности электрода с расходом жидкого металла, генерирование удерживаемой плазменной дуги для абляции жидкого металла с наружной поверхности со скоростью абляции жидкого металла, и, в ответ на расход жидкого металла, отклоняющийся от скорости абляции жидкого металла на величину, которая больше пороговой величины, регулировка расхода жидкого металла путем регулировки одного или более из уровня жидкого металла во внутреннем резервуаре, давления инертного газа во внутреннем резервуаре или температуры жидкого металла.

[0023]. Эти, а также другие аспекты, преимущества и альтернативы станут очевидными специалистам в данной области техники по прочтении следующего подробного описания со ссылкой, при необходимости, на прилагаемые сопроводительные чертежи. Кроме того, следует понимать, что описания и фигуры чертежей, представленные в данном документе, предназначены для иллюстрации настоящего изобретения только в качестве примера и, таким образом, что возможны множество изменений.

[0024]. Например, следующее описание относится к различным вариантам осуществления систем и способов для удерживания плазмы в термоядерном реакторе с достаточной температурой и достаточной плотностью в течение достаточной продолжительности для индуцирования термоядерного синтеза. В некоторых вариантах осуществления выход термоядерного синтеза может использоваться для выработки/хранения энергии. Однако для раскрытых вариантов осуществления или их изменений предусмотрены другие случаи применения, такие как движитель (например, для космических транспортных средств, летательных аппаратов, гидроциклов и подводных аппаратов и т. п.), исследования и т. п. В экстремальных средах (например, средах с пониженной гравитацией на борту космических транспортных средств) могут быть сделаны определенные изменения,

например, для поддержания производительности. Например, хотя жидкометаллический мениск может удерживаться на поверхности носового конуса за счет поверхностного натяжения и/или капиллярного действия, могут быть реализованы дополнительные компоненты для предотвращения создания помех для аблированного металла с удерживаемой плазменной дугой. В качестве примера может быть включен механический плунжер, который может индуцировать поток жидкого металла из внутреннего резервуара к поверхности носового конуса, а также в обратном направлении (от поверхности носового конуса во внутренний резервуар, в соответствии с принципом работы, подобным таковому для шприца для подкожных инъекций). Однако в определенных вариантах осуществления сохранение более жестких допусков для механического плунжера может быть осложнено более высокими температурами и набуханием из-за нейтронного потока.

[0025]. В одном приведенном для примера варианте осуществления удерживание плазмы может быть достигнуто посредством конфигурации Z-пинч, в которой электрический ток (также известный как «ток разряда Z-пинч» или «пинч-ток») проходит через плазму для генерирования магнитного поля, которое сжимает или «обжимает» плазму вдоль оси (например, вдоль линейного пути через область сборки камеры для удерживания плазмы). Электрический ток протекает между парой электродов, которые могут подвергаться значительной ионной, электронной и/или нейтронной бомбардировке во время работы термоядерного реактора. В результате один или более электродов внутри камеры для удерживания плазмы могут разрушаться или эродировать (например, терять массу) в течение всего срока использования термоядерного реактора.

[0026]. В производственных масштабах скорость повторения электрического разряда внутри камеры для удерживания плазмы может составлять порядка десятков герц. В одном примере, исходя из известных скоростей эрозии искрового промежутка (который может приблизительно эродировать в конфигурациях Z-пинч), токи разряда, достаточные для индуцирования желаемого удерживания плазмы при частоте повторения 10-11 Гц, могут привести к сотням граммов эрозии угольного электрода в час. Такая тяжелая эрозия электрода может ограничивать срок службы непрерывно работающего термоядерного реактора до лунок в течение месяца.

[0027]. В частности, неограниченный интерес вызывает поддержание стабильных (например, с незначительной заметной деградацией или без нее) границ раздела между электродами и удерживаемой плазменной дугой внутри камеры для удерживания плазмы

и/или улучшение общей эффективности термоядерного реактора. В данном документе предусмотрены по меньшей мере две стратегии, которые могут быть реализованы по отдельности в некоторых вариантах осуществления и в комбинации в других вариантах осуществления: (i) образование неподвижного твердого электрода из электродного материала, который поддерживает или улучшает характеристики термоядерного реактора (например, по сравнению с углеродом); и (ii) образование возобновляемого *in situ* электрода для предотвращения разрушения объемной внутренней части электрода.

[0028]. Что касается образования неподвижного твердого электрода, повышение производительности электродных материалов, выбранных только для сопротивления разложению, может быть ограничено подпорядками величины. Таким образом, могут быть желательными электродные материалы, которые обеспечивают дополнительные преимущества или иным образом улучшают условия внутри камеры для удерживания плазмы для термоядерного синтеза. В приведенном для примера варианте осуществления электрод или по меньшей мере его часть могут быть образованы из одного или более металлических гидридов. Данный металлический гидрид можно рассматривать как двухфазную систему в обратимом равновесии, что регулируется следующим:



где  $n$  - отношение атомов водорода к ионам металлов  $\text{M}$  в твердой фазе. Когда  $\text{M}$  подвергается воздействию со стороны  $\text{H}_2$ , гидрид металла  $\text{MH}_n$  может быть спонтанно образован в экзотермическом процессе. При поступлении тепла  $\text{MH}_n$  может разлагаться обратно на  $\text{M}$  и  $\text{H}_2$ . Таким образом,  $\text{MH}_n$  может обеспечивать внутренний источник газа в условиях удерживания плазмы, который может дополнять или полностью заменять клапаны (так называемые «продувочные клапаны»), вводящие дополнительное газообразное топливо в камеру для удерживания плазмы.

[0029]. Более того, поскольку  $\text{MH}_n$  может быть образован с дейтерием ( $^2\text{H}$  или  $\text{D}$ ) и/или тритием ( $^3\text{H}$  или  $\text{T}$ ) (например, посредством реакции  $\text{M}$  с  $\text{D}_2$  и/или  $\text{T}_2$ ), электроды, образованные из дейтеридов металлов и/или тритидов металлов (например,  $\text{MD}_l\text{T}_m$ , где  $l + m = n$ ), могут непосредственно участвовать в реакциях термоядерного синтеза (например, реакции (1)) в камере для удерживания плазмы при ионной бомбардировке электродов. Таким образом,  $\text{MH}_n$  может обеспечивать дополнительный источник термоядерных нейтронов (например, в качестве побочного продукта синтеза дейтерий-третий).



[0030]. В определенных вариантах осуществления  $MH_n$  может сам потреблять свободные нейтроны для обеспечения внутреннего источника трития. Например, дейтерид лития ( ${}^6\text{LiD}$ ) может быть использован в качестве источника трития («воспроизводство трития»):



В некоторых вариантах осуществления тритий, получаемый в результате реакции (3), может обеспечивать внутреннее дополнение к внешнему источнику трития (например, бланкет для воспроизводства трития, такой как литий-содержащая керамика, или циркулирующая жидко-металлическая стенка, такая как свинцовый литий; такие конфигурации могут также функционировать в качестве электрода, например, заменяя наружный электрод 304 по ФИГ. 1).

[0031]. Таким образом, одним техническим эффектом использования одного или более гидридов металлов (например, дейтеридов металлов и/или тритидов металлов) в качестве электродного материала является то, что сам электрод может взаимодействовать с удерживаемой плазменной дугой для дополнения или увеличения термоядерного синтеза внутри камеры для удерживания плазмы термоядерного реактора.

[0032]. Дополнительно или альтернативно регулированию состава или приготовлению неподвижного твердого объемного корпуса или составного корпуса электрода, граница раздела, где электрод и область сборки непосредственно соединены (например, без каких-либо промежуточных компонентов или объемов) друг с другом, может быть непрерывно обновлена с образованием возобновляемого *in situ* электрода (в контексте данного документа «граница раздела» или «граница раздела с» может относиться к границе фаз твердого вещества и газа или жидкости и газа, в которой твердая фаза или жидкая фаза находится в непосредственном контакте с газовой фазой). В качестве примера граница раздела может включать в себя непрерывно подаваемое (например, подаваемое без перерыва или без заметной задержки во время работы термоядерного реактора) или динамически подаваемое (например, подаваемое в ответ для поддержания заданной толщины на границе раздела) твердое вещество на поверхности электрода. В качестве другого примера граница раздела может содержать непрерывно подаваемый или динамически подаваемый жидкий мениск на поверхности электрода. В качестве другого примера газ может непрерывно или динамически регенерироваться между поверхностью электрода и областью сборки.

[0033]. В приведенном для примера варианте осуществления пленка жидкого металла может удерживаться на носовом конусе электрода с заданной толщиной в ответ на регулировки частоты повторения тока разряда и/или скорости выработки электрической энергии. Более конкретно, заданная толщина может динамически поддерживаться посредством регулировки расхода жидкого металла из внутреннего резервуара в корпусе электрода к поверхности носового конуса. В качестве примера, расход может поддерживаться на уровне, меньшем, чем верхнее пороговое значение расхода, выше которой избыток жидкого металла может образовывать капли и отделяться от поверхности носового конуса, что может отрицательно влиять на удерживаемую плазменную дугу. В качестве дополнительного или альтернативного примера, расход может поддерживаться на уровне, превышающем более низкое пороговое значение расхода, ниже которого может присутствовать недостаточное количество жидкого металла на поверхности носового конуса, и может возникнуть заметная эрозия электрода. В приведенном для примера варианте осуществления каждое из верхнего и нижнего пороговых значений расхода может зависеть от частоты повторения тока разряда и/или скорости выработки электрической энергии, так что расход жидкого металла, поддерживаемый между верхним и нижним пороговыми значениями расхода, может соответствовать скорости абляции жидкого металла с поверхности носового конуса.

[0034]. Таким образом, одним из технических эффектов подачи и динамической подпитки жидкого металла на носовой конус является то, что жидкий металл может эродировать и может быть заменен во время работы термоядерного реактора, так что эрозия корпуса электрода может быть уменьшена или полностью устранена, а термоядерный реактор, содержащий электрод, может непрерывно работать в течение года или более без замены электрода.

[0035]. Хотя приведенные для примера варианты осуществления, подробно описанные ниже со ссылкой на ФИГ. 1-9В, могут включать в себя отдельные обсуждения неподвижного твердого электрода, содержащего гидрид металла, или возобновляемого *in situ* электрода, содержащего пленку жидкого металла, в других вариантах осуществления электрод (например, внутренний электрод, наружный электрод или промежуточный электрод), включающий в себя корпус неподвижного твердого электрода, включающий в себя гидрид металла, может быть образован с пленкой из жидкого металла, динамически подпитываемой на носовом конусе корпуса электрода. В альтернативных вариантах

осуществления первый электрод (например, наружный электрод или промежуточный электрод) термоядерного реактора может представлять собой статический твердый электрод, содержащий гидрид металла, а другой, второй электрод (например, внутренний электрод) термоядерного реактора может представлять собой возобновляемый *in situ* электрод, содержащий носовой конус или другую поверхность, и пленку жидкого металла, динамически подпитываемой на носовом конусе или другой поверхности. В таких вариантах осуществления второй электрод может пересекаться с удерживаемой плазменной дугой, при этом пленка жидкого металла предусмотрена на носовом конусе или другой поверхности второго электрода для уменьшения или полного устранения эрозии корпуса второго электрода.

[0036]. Более того, в дополнительных, альтернативных или иным образом измененных вариантах осуществления по сравнению с вариантами осуществления, подробно описанными ниже со ссылкой на ФИГ. 1-9В, один или более компонентов системы удерживания плазмы могут быть добавлены, удалены, заменены, изменены или взаимно заменены для адаптации системы удерживания плазмы для данного случая применения. В качестве примера, плазму можно непосредственно инжектировать в камеру для удерживания плазмы системы удерживания плазмы, например, в дополнение к превращению топливного газа в плазму или вместо него внутри камеры. Кроме того, хотя различные варианты осуществления, описанные в данном документе, обсуждаются со ссылкой на удерживание плазмы с помощью Z-пинч, различные варианты осуществления с изменением или без него могут быть применимы к другим типам реакторов термоядерного синтеза и систем удерживания плазмы, которые сжимают, вступают в реакцию или иным образом используют плазму.

[0037]. Обратимся теперь к ФИГ. 1, который показывает схематический вид в разрезе системы 300 удерживания плазмы, такой как система, которая может быть включена в реактор термоядерного синтеза. Система 300 удерживания плазмы может генерировать плазменную дугу в области 326 сборки камеры 340 для удерживания плазмы, при этом плазменная дуга удерживается, сжимается и поддерживается осесимметричным магнитным полем. Осесимметричное магнитное поле может быть стабилизировано потоком ионов со сдвиговой скоростью, возбуждаемым электрическим разрядом между парой электродов, взаимодействующих с камерой 340 для удерживания плазмы. ФИГ. 2-3F иллюстрируют дополнительные рабочие подробности системы 300 удерживания плазмы. Один или более

аспектов системы 300 удерживания плазмы могут быть без затруднений перенесены в другие конфигурации удерживания плазмы, такие как система 900 удерживания плазмы, подробно описанная ниже со ссылкой на ФИГ. 4.

[0038]. В одном варианте осуществления по меньшей мере один из пары электродов представляет собой неподвижный твердый электрод, включающий в себя электродный материал 346, который дополняет или увеличивает термоядерный синтез внутри камеры 340 для удерживания плазмы во время генерирования плазменной дуги. Например, электродный материал 346 может высвобождать газообразный водород выше пороговой температуры, например, для подачи топливного газа для плазменной дуги. В качестве приведенной для примера композиции, электродный материал 346 может представлять собой гидрид металла, такой как дейтерид металла и/или тритид металла, содержащий одно или более из титана (Ti), циркония (Zr), скандия (Sc), магния (Mg), ванадия (V), лития-6 ( ${}^6\text{Li}$ ) или сплавов, образованных любой комбинацией одного или более из предыдущих металлов. Способ образования такого содержащего гидрид металла электрода и управления системой удерживания плазмы с ним подробно рассмотрен ниже со ссылкой на ФИГ. 5. Кривые ионной имплантации и изотермы для приведенного для примера гидрида металла представлены на ФИГ. 6 и 7 соответственно.

[0039]. В дополнительном или альтернативном варианте осуществления по меньшей мере один из пары электродов может представлять собой возобновляемый *in situ* электрод, содержащий защитную пленку из текущего жидкого металла, который может подвергаться абляции с наружной поверхности электрода при взаимодействии с плазменной дугой и, таким образом, уменьшать эрозию наружной поверхности при сильном разряде. Дополнительные признаки такого возобновляемого *in situ* электрода подробно обсуждаются ниже со ссылкой на ФИГ. 8А и 8В, а способ эксплуатации системы удерживания плазмы, содержащей возобновляемый *in situ* электрод, подробно рассмотрен ниже со ссылкой на ФИГ. 9А и 9В.

[0040]. На ФИГ. 1 показан набор декартовых координатных осей 152 для контекстуализации положений различных компонентов системы 300 удерживания плазмы и для сравнения между различными видами по ФИГ. 1 и 3А-3F. В частности, обеспечены оси x, y и z, которые взаимно перпендикулярны друг другу, где оси x и y определяют плоскость схематического вида в разрезе, показанного на ФИГ. 1, и ось z перпендикулярна ей. В некоторых вариантах осуществления направление силы тяжести может быть

параллельным любому направлению в плоскости схематического вида в разрезе по ФИГ. 1 и может совпадать с ним. Например, направление силы тяжести может быть параллельным положительному направлению оси  $x$  и совпадать с ним. В дополнительных или альтернативных вариантах осуществления направление силы тяжести может находиться в плоскости, образованной осями  $y$  и  $z$  (например, параллельной отрицательному направлению оси  $y$  и совпадающей с ним).

[0041]. В одном представленном в качестве примера варианте осуществления система 300 удерживания плазмы может включать в себя внутренний электрод 302 и наружный электрод 304, который по существу окружает внутренний электрод 302 (когда термин «по существу» используется в данном документе, подразумевается, что упомянутая характеристика, параметр или значение не обязательно должна быть достигнута точно, но что отклонения или изменения, включая, например, допуски, ошибку измерения, ограничения по точности измерения и другие факторы, известные специалистам в данной области техники, могут иметь место в количествах, которые не исключают возможность эффекта, предназначенного для обеспечения этой характеристики). Например, внутренний электрод 302 может быть по меньшей мере частично окружен по окружности наружным электродом 304, так что один конец внутреннего электрода 302 (например, первый конец 318) может быть частично или полностью окружен наружным электродом 304. Согласно некоторым вариантам осуществления внутренний электрод 302 может иметь длину (например, параллельно оси  $y$  между первым концом 318 и противоположным вторым концом 320) в диапазоне от 25 см до 1 м или более и радиус (например, параллельно оси  $x$ ) в диапазоне от 2 см до 1 м, а наружный электрод 304 может иметь длину (например, параллельно оси  $y$  между первым концом 322 и противоположным вторым концом 324) в диапазоне от 50 см до 6 м, радиус (например, параллельно оси  $x$ ) в диапазоне от 6 см до 2 м или более, и кольцевую толщину (например, вдоль оси  $x$ ) в диапазоне от 6 мм до 12 мм.

[0042]. В определенных вариантах осуществления и как показано на ФИГ. 1, система 300 удерживания плазмы также может включать в себя промежуточный электрод 303, который обращен к внутреннему электроду 302. В других вариантах осуществления, как подробно описано ниже со ссылкой на ФИГ. 4, промежуточный электрод 303 может по существу окружать внутренний электрод 302, а наружный электрод 304 может по существу окружать промежуточный электрод 303. Например, внутренний электрод 302 может быть по меньшей мере частично окружен по окружности промежуточным электродом 303, а промежуточный

электрод 303 может быть по меньшей мере частично окружен по окружности наружным электродом 304, так что один конец внутреннего электрода 302 (например, первый конец 318) может быть частично или полностью окружен промежуточным электродом 303, а один конец промежуточного электрода 303 может быть частично или полностью окружен наружным электродом 304.

[0043]. В некоторых вариантах осуществления камера 340 для удерживания плазмы может представлять собой физическую структуру, включающую объем, ограниченный одним или более электродами, изоляторами и внутренними компонентами системы 300 удерживания плазмы. Таким образом, в определенных вариантах осуществления камера 340 для удерживания плазмы может включать в себя один или более электродов, изоляторов и внутренних компонентов системы 300 удерживания плазмы, которые ограничивают объем камеры 340 для удерживания плазмы.

[0044]. В одном приведенном для примера варианте осуществления наружный электрод 304 может образовывать радиальную внешнюю границу камеры 340 для удерживания плазмы. В одном примере радиальная внешняя граница может быть цилиндрической и иметь круглое поперечное сечение, проходящее вдоль оси  $x$ , причем круглое поперечное сечение параллельно плоскости, образованной осями  $y$  и  $z$ . Камера 340 для удерживания плазмы может быть разбита (например, без какого-либо физического разделения) на: область 310 ускорения между внутренним электродом 302 и наружным электродом 304 и область 326 сборки между первым концом 318 внутреннего электрода 302 и промежуточным электродом 303. Альтернативно, в вариантах осуществления, где промежуточный электрод 303 по меньшей мере частично окружает внутренний электрод 302, область 310 ускорения может находиться между внутренним электродом 302 и промежуточным электродом 303, а область 326 сборки может находиться между первым концом 318 внутреннего электрода 302 и противоположным концом наружного электрода 304. В любом случае система 300 удерживания плазмы может включать в себя множество электродов (например, внутренний электрод 302, промежуточный электрод 303 и наружный электрод 304), каждый электрод из множества электродов расположен соосно относительно области 326 сборки (например, параллельно оси  $x$ ) и таким образом, что является открытым для области 326 сборки (например, каждый данный электрод из множества электродов может взаимодействовать с объемом области 326 сборки без каких-либо промежуточных компонентов или объемов, так что электрический ток может

проходить непосредственно из удерживаемой плазмы к данному электроду). Более конкретно, наружный электрод 304 может быть расположен таким образом, что образует по меньшей мере часть наружной границы области 326 сборки, внутренний электрод 302 может быть расположен в одном конце области 326 сборки (например, совпадает с первым концом 318 внутреннего электрода 302), а промежуточный электрод 303, при его наличии, может быть расположен в том же конце области 326 сборки относительно внутреннего электрода 302 или в противоположном конце области 326 сборки относительно внутреннего электрода 302. Система 300 удерживания плазмы может быть выполнена с возможностью поддержания Z-пинча плазмы (например, плазменной дуги) внутри области 326 сборки, как описано ниже. В некоторых вариантах осуществления область 310 ускорения может иметь длину (например, параллельную оси  $u$  между вторым концом 324 наружного электрода 304 и первым концом 318 внутреннего электрода 302) в диапазоне от 25 см до 1,5 м и кольцевую толщину в диапазоне от 2 см до 10 см, а область 326 сборки может иметь длину (например, параллельную оси  $u$  между первым концом 318 внутреннего электрода 302 и первым концом 322 наружного электрода 304) в диапазоне от 25 см до 3 м.

[0045]. Система 300 удерживания плазмы может включать в себя один или более первых клапанов 306, выполненных с возможностью направления газа из внутренней части внутреннего электрода 302 в область 310 ускорения, и один или более вторых клапанов 312, выполненных с возможностью направления газа с наружной стороны наружного электрода 304 в область 310 ускорения. Газ может представлять собой топливный газ, который может быть использован для образования плазменной дуги при выпуске газа в камеру 340 для удерживания плазмы и подаче тока разряда. В контексте данного документа термин «топливный газ» может относиться к любым соединениям, используемым для образования плазменной дуги. Таким образом, топливный газ может содержать нейтральные газообразные соединения, такие как дигидроген [например, водород ( $H_2$ ), дейтерий ( $D_2$ ) и/или тритий ( $T_2$ )],  $^3He$ ,  $^6Li$ ,  $^{11}B$  и т. п., и/или предварительно ионизированные газообразные соединения (например, такие как введенные посредством конфигураций «прямой инъекции плазмы» или «инъекции плазмы»).

[0046]. Система 300 удерживания плазмы может включать в себя первый источник 314 питания, выполненный с возможностью подачи напряжения (например, в диапазоне от 2 кВ до 50 кВ в некоторых примерах или от 1 кВ до 40 кВ в других примерах) между внутренним электродом 302 и наружным электродом 304. В некоторых вариантах осуществления

система 300 удерживания плазмы также может содержать второй источник 315 питания, выполненный с возможностью подачи напряжения (например, в диапазоне от 2 кВ до 50 кВ в некоторых примерах или от 1 кВ до 40 кВ в других примерах) между внутренним электродом 302 и промежуточным электродом 303. В определенных вариантах осуществления система 300 удерживания плазмы может работать только с одним из первого и второго источников 314, 315 питания. В других вариантах осуществления система 300 удерживания плазмы может работать как с первым, так и со вторым источниками 314, 315 питания. В некоторых вариантах осуществления один или оба из первого и второго источников 314, 315 питания могут содержать переключающий импульсный источник питания постоянного тока (переключающий импульсный постоянный ток), содержащий источник энергии (например, батарея конденсаторов), переключатель (например, искровой промежуток, воспламенитель или полупроводниковый переключатель) и сеть формирования импульсов (включая, например, индукторы, резисторы, диоды и т. п.). В некоторых вариантах осуществления один или оба из первого и второго источников 314, 315 питания могут быть регулируемы по напряжению. В других вариантах осуществления один или оба из первого и второго источников 314, 315 питания могут быть регулируемы по току. В некоторых вариантах осуществления в качестве одного или обоих из первого и второго источников 314, 315 питания могут использоваться другие подходящие типы источников питания, включая источники питания постоянного тока и переменного тока (АС) (например, сети постоянного тока, преобразователи источников напряжения, униполярные генераторы и т. п.).

[0047]. Внутренний электрод 302 может включать в себя электропроводящую (например, нержавеющей сталь) оболочку, имеющую измененный цилиндрический корпус 316 (например, по существу цилиндрический корпус с сужающимся закругленным основанием в первом конце 318). В частности, внутренний электрод 302 может содержать первый конец 318 (например, сужающееся закругленное основание) и противоположный второй конец 320 (например, по существу плоское круглое основание). Например, внутренний электрод 302 может содержать носовой конус 344, расположенный на первом конце 318, при этом носовой конус 344 открыт для области 326 сборки таким образом, что пересекается осью удерживаемой плазменной дуги, соосной с каждым электродом из множества электродов (например, параллельной оси  $x$ ). В одном приведенном для примера варианте осуществления носовой конус 344 может включать в себя электродный материал 346, который дополняет или повышает термоядерный синтез внутри камеры 340 для



удерживания плазмы во время генерирования плазменной дуги (например, посредством высвобождения газообразного водорода для питания удерживаемой плазменной дуги). Однако в других вариантах осуществления электродный материал 346 не ограничен носовым конусом 344 и дополнительно может быть включен в другой участок внутреннего электрода 302 и/или в любой другой электрод (электроды) из множества электродов (соответствующим образом в определенных вариантах осуществления электродный материал 346 может быть вообще не включен в носовой конус 344). В любом случае электродный материал 346 может занимать только участок одного или более электродов из множества электродов, а остальная часть (например, все участки на множестве электродов, за исключением участка, занятой электродным материалом 346) может не содержать электродный материал 346. Соответственно, когда электродный материал 346 включен, топливный газ может быть вытеснен в область 310 ускорения в ответ на нагревание одного или более из внутреннего электрода 302, промежуточного электрода 303 или наружного электрода 304 (например, таким образом, что электродный материал 346 термически разлагается для высвобождения топливного газа). Внутренний электрод 302 также может содержать один или более проходов или каналов 342 для направления газа (например, топливного газа) из одного или более первых клапанов 306 в область 310 ускорения, например, во время работы системы 300 удерживания плазмы для генерирования термоядерного синтеза.

[0048]. В дополнительных или альтернативных вариантах осуществления электродный материал 346 может присутствовать в виде нити, отделенной от любого из электродов в системе 300 удерживания плазмы. В таких вариантах осуществления электродный материал 346 при его нагреве и термическом разложении может обеспечивать по меньшей мере часть топливного газа в камере 340 для удерживания плазмы.

[0049]. Наружный электрод 304 может включать в себя электропроводящую (например, из нержавеющей стали) оболочку, имеющую по существу цилиндрический корпус 328. В частности, наружный электрод 304 может включать в себя первый конец 322 (например, по существу плоское круглое основание) и противоположный второй конец 324 (например, по существу плоское круглое основание). Наружный электрод 304 может окружать большую часть (например, основную часть) внутреннего электрода 302. В приведенном для примера варианте осуществления внутренний электрод 302 и наружный электрод 304 могут быть концентрическими и иметь радиальную симметрию относительно оси x. Первый конец 318

внутреннего электрода 302 может находиться между первым концом 322 наружного электрода 304 и вторым концом 324 наружного электрода 304. Наружный электрод 304 также может включать в себя один или более проходов или каналов (не показаны на ФИГ. 1) для направления газа (например, топливного газа) из одного или более вторых клапанов 312 в область 310 ускорения, например, во время работы системы 300 удерживания плазмы для генерирования термоядерного синтеза.

[0050]. Промежуточный электрод 303 может включать в себя электрически проводящий материал (например, нержавеющую сталь). В некоторых вариантах осуществления промежуточный электрод 303 может иметь по существу дискообразную форму. В других вариантах осуществления промежуточный электрод может иметь по существу цилиндрический корпус, концентрический с каждым из внутреннего электрода 302 и наружного электрода 304 и иметь радиальную симметрию относительно оси  $x$ .

[0051]. Один или более первых клапанов 306 могут иметь форму так называемых «напускных клапанов» (например, выполненных с возможностью обеспечения топливного газа для образования плазмы или повышения плотности генерируемой плазменной дуги посредством напуска газа) или плазменных инжекторов. В дополнительных или альтернативных вариантах осуществления один или более первых клапанов 306 могут включать в себя по меньшей мере один клапан с электрическим приводом, такой как клапан с электромагнитным приводом. Однако один или более первых клапанов 306 не ограничены такими конфигурациями и могут включать в себя клапан любого типа, выполненный с возможностью направления газа (например,  $H_2$ ,  $D_2$ ,  $T_2$ ) из внутренней части внутреннего электрода 302 в область 310 ускорения.

[0052]. В некоторых вариантах осуществления один или более первых клапанов 306 могут включать в себя по меньшей мере один газоструйный клапан (например, для подачи нейтрального газа в область 310 ускорения) и/или по меньшей мере один плазменный инжектор (например, для подачи предварительно ионизированного газа в область 310 ускорения), установленный в виде регулярного массива или массивов вдоль внутреннего электрода 302 (например, равномерно распределенного вокруг центральной оси области 310 ускорения). Как показано на ФИГ. 1, один или более первых клапанов 306 могут быть расположены (например, расположены в осевом направлении) между первым концом 318 внутреннего электрода 302 и вторым концом 320 внутреннего электрода 302. Альтернативно один или более первых клапанов 306 могут быть расположены в первом

конце 318 внутреннего электрода 302 (например, непосредственно рядом с ним) или втором конце 320 внутреннего электрода 302. На ФИГ. 1 каждый из одного или более первых клапанов 306 расположен внутри (например, расположен внутри и на внутренней поверхности) внутреннего электрода 302, но возможны другие примеры (например, расположен снаружи и на наружной поверхности внутреннего электрода 302). Один или более первых клапанов 306 могут быть выполнены с возможностью электрического приведения в действие в том смысле, что один или более первых клапанов 306 могут быть приведены в действие путем обеспечения одного или более первых клапанов 306 с управлением по напряжению, как описано ниже. В определенных вариантах осуществления, в которые включен электродный материал 346, первые клапаны 306 могут отсутствовать (например, электродный материал 346 может подавать по меньшей мере некоторое количество газа при своем разложении).

[0053]. В приведенном для примера варианте осуществления область 310 ускорения может иметь по существу кольцевое поперечное сечение, образованное формами внутреннего электрода 302 и наружного электрода 304. В частности, внутренний электрод 302 может определять радиальную внутреннюю границу области 310 ускорения, а наружный электрод 304 может определять радиальную внешнюю границу области 310 ускорения. В одном примере каждая из радиальной внутренней границы и радиальной внешней границы может быть цилиндрической и иметь круглое поперечное сечение, проходящее вдоль оси  $x$ , причем круглое поперечное сечение параллельно плоскости, образованной осями  $y$  и  $z$ . В других вариантах осуществления по существу кольцевое поперечное сечение области 310 ускорения может быть определено формами внутреннего электрода 302 и промежуточного электрода 303 (например, внутренний электрод 302 может определять радиальную внутреннюю границу, а промежуточный электрод 303 может определять радиальную внешнюю границу).

[0054]. Аналогично одному или более первым клапанам 306 один или более вторых клапанов 312 могут иметь форму «напускных клапанов» или плазменных инжекторов. В дополнительных или альтернативных вариантах осуществления один или более вторых клапанов 312 могут включать в себя по меньшей мере один клапан с электрическим приводом, такой как клапан с электромагнитным приводом. Однако один или более вторых клапанов 312 не ограничены такими конфигурациями и могут включать клапан любого типа, выполненный с возможностью направления газа (например,  $H_2$ ,  $D_2$  и/или  $T_2$ ) с

наружной стороны наружного электрода 304 (или промежуточного электрода 303) в область 310 ускорения.

[0055]. В некоторых вариантах осуществления один или более вторых клапанов 312 могут включать в себя по меньшей мере один газоструйный клапан (например, для подачи нейтрального газа в область 310 ускорения) и/или по меньшей мере один плазменный инжектор (например, для подачи предварительно ионизированного газа в область 310 ускорения), установленный в виде регулярного массива или массивов вдоль наружного электрода 304 (например, равномерно распределенного вокруг области 310 ускорения). Как показано на ФИГ. 1, один или более вторых клапанов 312 могут быть расположены (например, расположены в осевом направлении) между первым концом 322 наружного электрода 304 и вторым концом 324 наружного электрода 304. Альтернативно один или более вторых клапанов 312 могут быть расположены в первом конце 322 наружного электрода 304 или втором конце 324 наружного электрода 304 (например, непосредственно рядом с ним). На ФИГ. 1 каждый из одного или более вторых клапанов 312 расположен вокруг (например, расположен снаружи и на наружной поверхности) наружного электрода 304, но возможны другие примеры (например, расположен внутри камеры 340 для удерживания плазмы, например, на внутренней поверхности наружного электрода 304 или на внутренней поверхности промежуточного электрода 303). Более того, на ФИГ. 1 каждый из одного или более первых клапанов 306 выровнен в осевом направлении с каждым из одного или более вторых клапанов 312, но возможны и другие примеры. Один или более вторых клапанов 312 могут быть выполнены с возможностью электрического приведения в действие в том смысле, что один или более вторых клапанов 312 могут быть приведены в действие путем обеспечения одного или более вторых клапанов 312 с управлением по напряжению, как описано ниже. В определенных вариантах осуществления, в которые включен электродный материал 346, вторые клапаны 312 могут отсутствовать (например, электродный материал 346 может подавать по меньшей мере некоторое количество газа при своем разложении).

[0056]. В некоторых вариантах осуществления газоструйные клапаны и/или плазменные инжекторы, включенные в один или более первых клапанов 306 и/или один или более вторых клапанов 312, могут быть с электронным запуском для независимой доставки «напуска» наполняющего нейтрального и/или предварительно ионизированного газа в течение периода времени, длящегося до нескольких сотен мкс (например, до 1 мс).

Доставляемым количеством наполняющего газа (также называемого в данном документе «топливным газом») (например, в «напуске») также можно управлять регулировками давления наполняющего газа, подаваемого к газоструйным клапанам и/или плазменным инжекторам (отдельным или всем газоструйным клапанам и/или плазменным инжекторам, или их поднаборам). Кроме того, в различные газоструйные клапаны и/или плазменные инжекторы (или различные комбинации множества газоструйных клапанов и/или плазменных инжекторов) могут быть поданы различные смеси наполняющих газов, имеющие, например, различные элементные соотношения наполняющих газов и/или различные изотопные соотношения (например, регулируемые молекулярные соотношения  $D_2/T_2$ ). В некоторых вариантах осуществления газоструйные клапаны и/или плазменные инжекторы могут быть унифицированными (например, все одного и того же типа/размера по существу с одинаковыми рабочими настройками). В других вариантах осуществления различные газоструйные клапаны газа и/или плазменные инжекторы могут быть использованы в разных местах. В дополнительных или альтернативных вариантах осуществления газоструйные клапаны и/или плазменные инжекторы могут управлять потоком газа в область 310 ускорения через коллектор, включающий в себя множество отверстий, обеспечивающих проход в область 310 ускорения. В таких вариантах осуществления отверстия коллектора могут быть унифицированными или могут варьироваться по конфигурации (например, для доставки различных количеств газа в различные местоположения области 310 ускорения, когда открыт соответствующий газоструйный клапан или плазменный инжектор).

[0057]. Подобно инъекции нейтрального газа через газоструйные клапаны, (предварительно) ионизированный газ или плазму можно инжектировать с использованием комбинаций коллекторов расположенных в разных местах плазменных инжекторов, соединенных по текучей среде с соответствующими плазмогенераторами или пушками, которые генерируют плазму перед инъекцией в область 310 ускорения. В некоторых вариантах осуществления плазма может быть получена из газоинжекторной плазменной пушки и/или плазменного напорного устройства (например, напорного устройства на эффекте Холла или магнитогидродинамического напорного устройства), или, если плазма намагничена, из высокомоощного спирального источника плазмы, радиочастотного источника плазмы, плазменного факела и/или лазерного источника плазмы. Также могут быть созданы и инжектированы способом, аналогичным инъекции нейтрального газа, плазмы, образованные из газовых смесей. Инжекция плазмы может обеспечивать более

точное управление возможным осевым распределением плазмы, а также ее профилем сдвигового потока, что, в свою очередь, может обеспечивать возможность более точного управления устойчивостью и долговечностью плазмы. Дополнительное управление инъекцией плазмы может быть обеспечено благодаря частицам плазмы, которые представляют собой заряженные частицы и могут быть ускорены электрическими полями, создаваемыми изменяемым электрическим смещением (или напряжением) на инъекционных электродах. Таким образом, скоростью инжектируемой плазмы можно точно управлять для обеспечения возможности точной регулировки и оптимизации пробоя любого присутствующего нейтрального газа (например, в области 310 ускорения). Кроме того, инжектируемая плазма может перемещаться с более высокими скоростями, чем инжектируемый нейтральный газ, который может перемещаться почти статически (относительно инжектируемой плазмы) во время импульсов разряда Z-пинча. Таким образом, по сравнению с инъекцией нейтрального газа, инъекция плазмы может обеспечивать предварительно ионизированное топливо «по требованию» (например, более оперативно), например, для подпитки топливного газа во время импульсов разряда Z-пинча.

[0058]. В некоторых вариантах осуществления предварительно ионизированный газ может быть сгенерирован в виде ненамагниченной плазмы, например, чтобы избежать взаимодействия между магнитным полем предварительно ионизированного газа и магнитным полем области 310 ускорения. В других вариантах осуществления предварительно ионизированный газ может быть сгенерирован в виде намагниченной плазмы, например, для выравнивания магнитного поля предварительно ионизированного газа таким образом, чтобы оно было параллельно магнитному полю области 310 ускорения и/или было регулируемым для обеспечения требуемого профиля магнитного потока в точке инъекции предварительно ионизированного газа.

[0059]. В некоторых вариантах осуществления плазма, подлежащая инъекции в область 310 ускорения, может быть сгенерирована путем предварительной ионизации нейтрального газа с помощью свечи зажигания или посредством индукционной ионизации. В более широком смысле газоструйные клапаны и/или плазменные инжекторы могут включать в себя один или более электродных плазменных инжекторов и/или один или более безэлектродных плазменных инжекторов. В примерах, включающих в себя указанные один или более электродных плазменных инжекторов, плазма, подлежащая инъекции в область 310 ускорения, может быть сгенерирован по меньшей мере частично посредством

электродного разряда. В дополнительных или альтернативных примерах, в которые включены указанные один или более безэлектродных плазменных инжекторов, плазма, подлежащая инъекции в область 310 ускорения, может быть сгенерирована по меньшей мере частично посредством индуктивного разряда, вырабатываемого окном наружной катушки (например, радиочастотной антенной, работающей на частотах 400 кГц, 13,56 МГц, 2,45 ГГц и/или других частотах, разрешенных для использования в данной локальной юрисдикции, например, в пределах частотных диапазонов, разрешенных Федеральной комиссией по связи). В некоторых вариантах осуществления нейтральный газ для предварительной ионизации может быть ограничен конфигурацией резервуара для нейтрального газа (например, источником 330 газа) и/или проводимостью нейтрального газа для выбранной конфигурации плазменного инжектора.

[0060]. В некоторых вариантах осуществления осевое распределение инжектируемой плазмы может быть обеспечено посредством осесимметричной конфигурации плазменного инжектора. По меньшей мере в одном варианте осуществления восемь плазменных инжекторов могут быть расположены в восьми равномерно распределенных отверстиях коллектора соответственно. Каждое из восьми отверстий может быть выполнено под углом наклона (например, от  $5^\circ$  до  $90^\circ$  относительно центральной оси области 310 ускорения) относительно окрестности области 310 ускорения (например, окружающей наружный электрод 304). В одном примере такой угол наклона может составлять  $45^\circ$  относительно центральной оси области 310 ускорения. В некоторых вариантах осуществления восемь отверстий могут быть выполнены в одном осевом положении вдоль центральной оси области 310 ускорения (то есть восемь отверстий могут быть равномерно распределены по окружности или другому периметру области 310 ускорения в этом осевом положении). В других вариантах осуществления отверстия могут включать в себя множество наборов из восьми отверстий, причем каждый набор из восьми отверстий равномерно распределен относительно различного осевого положения вдоль центральной оси области 310 ускорения. В приведенном для примера варианте осуществления наборы из восьми отверстий могут быть выполнены в виде чередующихся пар наборов, причем первый набор из восьми отверстий может быть расположен в первом осевом местоположении, а второй набор из восьми отверстий может быть расположен во втором различающемся осевом местоположении и повернут относительно первого набора таким образом, что каждое отверстие второго набора расположено между парой отверстий первого набора относительно окружности области 310 ускорения. В частности, в таком варианте

осуществления каждое отверстие из первого набора из восьми отверстий может быть расположено на расстоянии по окружности области 310 ускорения через каждые  $45^\circ$ , а каждое отверстие из второго набора из восьми отверстий может быть расположено на расстоянии по окружности области 310 ускорения через каждые  $45^\circ$  со смещением (поворотом) относительно первого набора отверстий на  $22,5^\circ$  таким образом, что по окружности области 310 ускорения через каждые  $22,5^\circ$  обеспечено одно отверстие из первого и второго наборов. В дополнительных или альтернативных вариантах осуществления для создания азимутального потока внутри области 310 ускорения инжекция плазмы может быть выполнена азимутально, например, вдоль хорды, перпендикулярной центральной оси области 310 ускорения. В некоторые варианты осуществления могут быть включены дополнительные газоструйные клапаны и/или плазменные инжекторы для обеспечения возможности инжекции большего количества топливного газа (например, для более продолжительных разрядов пинча) и управления осевым распределением давления топливного газа в области 310 ускорения (например, для дополнительного увеличения продолжительности потока ионов со сдвиговой скоростью). В дополнительных или альтернативных вариантах осуществления клапаны могут быть расположены различным образом (например, асимметрично распределены по азимуту и/или с различными угловыми распределениями) с другими изменениями для достижения по существу эквивалентного профиля путем компенсации эффектов этих изменений.

[0061]. В некоторых вариантах осуществления инжекция предварительно ионизированного газа в область 310 ускорения может приводить к тому, что температура плазм будет находиться в диапазоне от 1 до 10 эВ. Температура плазмы может быть снижена (например, путем уменьшения количества энергии, вводимой в технологический газ, используемый для генерирования предварительно ионизированного газа) с целью повышения удельного электрического сопротивления предварительно ионизированного газа и полученной плазмы. В частности, увеличение удельного электрического сопротивления может снизить тенденцию предварительно ионизированного газа противодействовать изменениям магнитного потока и, таким образом, тенденцию противодействовать перемещению в магнитном поле, присутствующем в области 310 ускорения.

[0062]. Как отмечено выше, поскольку скорость инжекции предварительно ионизированного газа может быть значительно выше, чем нейтрального газа, скорость



плазмы в области 310 ускорения может составлять до  $50 \times 10^3$  м/с. В некоторых вариантах осуществления инъекция предварительно ионизированного газа может обеспечивать гибкость количества инжектируемых частиц. В частности, в приведенном для примера варианте осуществления количество частиц предварительно ионизированного газа может быть инжектировано за 1/50 времени, используемого для инъекции такого же количества частиц нейтрального газа. Например, количество времени, используемого для инъекции 10 Торр L частиц нейтрального газа (где 1 Торр L пропорционален  $2,5 \times 10^{19}$  молекул при 273°K), может составлять то же самое количество времени, используемого для инъекции 500 Торр L частиц предварительно ионизированного газа. Подобным образом, в некоторых вариантах осуществления скорость инъекции (или массовый расход) предварительно ионизированного газа может изменяться в соответствии с током и напряжением источника питания (т.е. с формой волны импульса инъекции). Например, повышение напряжения источника питания (например, до значений в диапазоне от 100 В до 500 В) может совокупно увеличивать скорость инъекции. В качестве другого примера, увеличение тока источника питания (например, до значений в диапазоне от 1 А до 500 А) может совокупно увеличивать скорость инъекции. В некоторых вариантах осуществления напряжение блока питания может быть увеличено до значений в диапазоне от 750 В до 5 кВ.

[0063]. Как обсуждалось выше, газоструйные клапаны и/или плазменные инжекторы могут быть активированы либо по отдельности, либо группами. Начальная газовая нагрузка внутри области 310 ускорения, имеющая требуемые осевые и азимутальные профили, может быть достигнута путем синхронизации отдельных клапанов и/или групп клапанов. Такие клапаны (или их группы) могут быть синхронизированы таким образом, чтобы выравнивать поступление нейтрального и/или предварительно ионизированного газа, и/или их смесей до требуемого начального профиля. Источники питания (например, источники питания 314 и 315 или отдельные специализированные источники питания) могут быть синхронизированы для достижения ионизации в требуемом осевом местоположении и использования начальной газовой нагрузки для создания и поддержания сдвигового потока. В некоторых вариантах осуществления источники питания могут включать в себя батарею конденсаторов и переключатель. В других вариантах осуществления могут использоваться другие подходящие типы источников питания, включая источники питания с маховиком.

[0064]. Различные комбинации (нейтрального газа) газоструйных клапанов с

плазменными инжекторами могут быть активированы для достижения требуемого уровня выходной энергии. Кроме того, плазма может быть инжектирована в область 310 ускорения значительно (например, ~100x) быстрее, чем напускной нейтральный газ. Комбинация таких различных скоростей инжекции, обеспечиваемое ускорением инжекции плазмы с инжекцией нейтрального газа, обеспечивает еще большее пространство параметров для оптимизации. Кроме того, плазменные инжекторы могут служить для инжекции массы и точного управления местоположениями ионизации нейтрального газа.

[0065]. В приведенном для примера варианте осуществления первый источник 314 питания и второй источник 315 питания могут иметь форму соответствующих батарей конденсаторов, каждая из которых способна хранить до 10 МДж (например, от 0,1 до 10 МДж). В одном варианте осуществления первый источник 314 питания и второй источник 315 питания имеют форму соответствующих батарей конденсаторов, способных хранить до 100-200 кДж и 3-4 МДж соответственно.

[0066]. Система 300 удерживания плазмы может включать в себя источник 330 газа (например, резервуар для хранения под давлением) и один или более первых регуляторов 332, соответственно выполненных с возможностью управления потоком газа из источника 330 газа через один или более первых клапанов 306. Соответствующие соединения (например, трубопроводы) между одним или более первыми регуляторами 332 и одним или более первыми клапанами 306 для ясности на ФИГ. 1 отсутствуют.

[0067]. Подобным образом, система 300 удерживания плазмы может включать в себя один или более вторых регуляторов 334, соответственно выполненных с возможностью управления потоком газа из источника 330 газа через один или более вторых клапанов 312. Соответствующие соединения (например, трубопроводы) между одним или более вторыми регуляторами 334 и одним или более вторыми клапанами 312 для ясности отсутствуют на ФИГ. 1.

[0068]. В некоторых вариантах осуществления система 300 удерживания плазмы может включать в себя первый изолятор 336 (например, имеющий кольцевое поперечное сечение) между внутренним электродом 302 и наружным электродом 304 для поддержания электрической изоляции между внутренним электродом 302 и наружным электродом 304. В других вариантах осуществления, в которых внутренний электрод 302 по меньшей мере частично окружен промежуточным электродом 303, первый изолятор 336 может быть

расположен между внутренним электродом 302 и промежуточным электродом 303 для поддержания электрической изоляции между внутренним электродом 302 и промежуточным электродом 303. В приведенном для примера варианте осуществления первый изолятор 336 может быть выполнен из электроизоляционного материала, такого как стекло, керамика или стеклокерамический материал. В некоторых вариантах осуществления один или более клапанов (например, газоструйных клапанов и/или плазменных инжекторов) могут проходить через первый изолятор 336 или могут быть обеспечены вместо него для инъекции нейтрального газа и/или предварительно ионизированного газа в конце области 310 ускорения, противоположном первому концу 318 внутреннего электрода 302.

[0069]. Подобным образом, система 300 удерживания плазмы может содержать второй изолятор 337 (например, имеющий кольцевое поперечное сечение) между промежуточным электродом 303 и наружным электродом 304 для поддержания электрической изоляции между промежуточным электродом 303 и наружным электродом 304. В приведенном для примера варианте осуществления второй изолятор 337 может быть выполнен из электроизоляционного материала, такого как стекло, керамика или стеклокерамический материал.

[0070]. Система 300 удерживания плазмы может включать в себя вакуумную камеру 338, которая по меньшей мере частично окружает внутренний электрод 302, промежуточный электрод 303 и/или наружный электрод 304. В приведенном для примера варианте осуществления по ФИГ. 1 вакуумная камера 338 полностью окружает каждый из внутреннего электрода 302, промежуточного электрода 303 и наружного электрода 304 (и, таким образом, камеру 340 для удерживания плазмы). В приведенном для примера варианте осуществления вакуумная камера 338 может быть выполнена в виде сосуда высокого давления из нержавеющей стали. В некоторых вариантах осуществления давление внутри вакуумной камеры 338 может находиться в диапазоне от  $10^{-9}$  Торр до 20 Торр (например, от  $10^{-9}$  Торр до  $10^{-3}$  Торр).

[0071]. Система 300 удерживания плазмы может включать в себя контроллер или другое вычислительное устройство 348, которое может включать в себя долговременное запоминающее устройство, в котором могут храниться исполняемые инструкции. Исполняемые инструкции могут быть исполнены одним или более процессоров контроллера 348 для осуществления различных функциональных возможностей системы

300 удерживания плазмы. Соответственно, исполняемые инструкции могут включать в себя различные подпрограммы для эксплуатации, технического обслуживания и тестирования системы 300 удерживания плазмы. Контроллер 348 также может включать в себя пользовательский интерфейс, с помощью которого оператор системы 300 удерживания плазмы может вводить команды или иным образом изменять работу системы 300 удерживания плазмы. Пользовательский интерфейс может включать в себя различные компоненты для упрощения использования оператором системы 300 удерживания плазмы и для приема вводов от оператора (например, запросов на создание плазменных дуг для термоядерного синтеза и т.п.) такие как один или более дисплеев, устройств ввода (например, клавиатур, сенсорных экранов, компьютерных манипуляторов типа мышь, нажимаемых кнопок, механических переключателей или других механических исполнительных элементов и т.п.), световых индикаторов и т.п. Контроллер 348 может быть соединен с возможностью осуществления связи с различными компонентами (например, клапанами, источниками питания и т.п.) системы 300 удерживания плазмы для управления ее приведением в действие и использованием (проводные и/или беспроводные линии связи между контроллером 348 и различными компонентами на ФИГ. 1 опущены для ясности).

[0072]. На ФИГ. 2-3F проиллюстрированы рабочие аспекты системы удерживания плазмы, такой как система 300 удерживания плазмы, подробно описанная выше со ссылкой на ФИГ. 1. В частности, на ФИГ. 2 показана блок-схема способа 200 работы системы удерживания плазмы, а на ФИГ. 3A-3F показаны схематические виды в разрезе части 350 системы 300 удерживания плазмы по ФИГ. 1 и ее функциональные средства соответственно. Соответственно, ФИГ. 1 и 3A-3F, если их рассматривать вместе, иллюстрируют по меньшей мере некоторые из аспектов способа 200, как описано ниже. В приведенном для примера варианте осуществления работа системы удерживания плазмы (например, системы 300 удерживания плазмы) может включать в себя инициирование и направление потока со скоростью сдвига ионов в ней для стабилизации Z-пинча.

[0073]. В некоторых вариантах осуществления способ 200 или его часть могут быть реализованы в виде исполняемых инструкций, хранящихся в долговременном запоминающем устройстве вычислительного устройства, такого как контроллер, соединенный с возможностью осуществления связи с устройством для удерживания плазмы. Кроме того, в некоторых вариантах осуществления дополнительные или альтернативные последовательности этапов могут быть реализованы в виде исполняемых

инструкций, расположенных на таком вычислительном устройстве, в котором могут быть добавлены, удалены, замещены, модифицированы или взаимозаменены отдельные этапы, обсуждаемые со ссылкой на способ 200.

[0074]. На этапе 902 способ 200 может включать направление газа посредством одного или более первых клапанов из внутренней части электрода в область ускорения камеры для удерживания плазмы. В приведенном для примера варианте осуществления область ускорения может быть расположена между внутренним электродом и наружным электродом, который по существу окружает внутренний электрод. В других вариантах осуществления область ускорения может быть расположена между внутренним электродом и промежуточным электродом, который по существу окружает внутренний электрод, при этом наружный электрод по существу окружает промежуточный электрод.

[0075]. Например, как показано на ФИГ. 3А и 3В, один или более первых клапанов 306 могут направлять газ 912 из внутренней части внутреннего электрода 302 в область 310 ускорения между внутренним электродом 302 и наружным электродом 304, который по существу окружает внутренний электрод 302. В частности, ФИГ. 3А иллюстрирует начальное количество газа 912, поступающего в область 310 ускорения, а ФИГ. 3В иллюстрирует дополнительное количество газа 912, поступающего в область 310 ускорения. Как показано на ФИГ. 3А, область 310 ускорения может быть включена вместе с областью 326 сборки в камеру 340 для удерживания плазмы.

[0076]. В некоторых вариантах осуществления направление газа 912 через один или более первых клапанов 306 может включать в себя обеспечение (например, посредством блока питания, такого как конденсаторная батарея, которая не показана на ФИГ. 3А-3F) первого напряжения питания клапана для одного или более первых клапанов 306 (например, на клеммах одного или более первых клапанов 306) с последующей подачей второго напряжения питания клапана [например, посредством источника питания постоянного тока] к одному или более первых клапанов 306. В приведенном для примера варианте осуществления первое напряжение питания клапана может быть больше чем второе напряжение питания клапана, а второе напряжение питания клапана может быть обеспечено немедленно (например, по существу немедленно) после обеспечения первого напряжения питания клапана.

[0077]. На этапе 904 способ 200 может включать направление газа через один или более

вторых клапанов с наружной стороны наружного электрода в область ускорения.

[0078]. Например, как показано на ФИГ. 3А и 3В, один или более вторых клапанов 312 могут направлять часть газа 912 в область 310 ускорения.

[0079]. В некоторых вариантах осуществления направление газа 912 через один или более вторых клапанов 312 может включать в себя обеспечение (например, посредством блока питания, такого как конденсаторная батарея, которая не показана) третьего напряжения питания клапана для одного или более вторых клапанов 312 (например, на клеммах одного или более вторых клапанов 312) с последующей подачей четвертого напряжения питания клапана (например, посредством источника питания постоянного тока) к одному или более вторых клапанов 312. В приведенном для примера варианте осуществления третье напряжение питания клапана может быть больше четвертого напряжения питания клапана, а четвертое напряжение питания клапана может быть обеспечено немедленно (например, по существу немедленно) после подачи третьего напряжения питания клапана.

[0080]. После работы одного или более первых клапанов 306 и одного или более вторых клапанов 312 давление газа, например, непосредственно рядом (при высвобождении) или в пределах (например, в пределах напорной камеры, при ее наличии) каждого из одного или более первых клапанов 306 и одного или более вторых клапанов 312 может составлять до 5800 Торр, например, в диапазоне от 1000 Торр до 5800 Торр (например, от 5450 Торр до 5550 Торр), перед подачей напряжения между внутренним электродом 302 и наружным электродом 304 посредством первого источника 314 питания. Соответственно, после работы одного или более первых клапанов 306 и одного или более вторых клапанов 312 давление газа внутри области 310 ускорения может составлять до 5800 Торр, например, в диапазоне от 1000 Торр до 5800 Торр (например, от 5450 Торр до 5550 Торр), перед подачей напряжения между внутренним электродом 302 и наружным электродом 304 посредством первого источника 314 питания. В приведенном для примера варианте осуществления давление газа внутри области 310 ускорения может уменьшаться с увеличением расстояния от точки введения газа и с прохождением времени после прекращения ввода газа в область 310 ускорения.

[0081]. На этапе 906 способ 200 может включать приложение посредством первого источника питания напряжения между внутренним электродом и наружным электродом для преобразования по меньшей мере части направленного газа в плазму, имеющую по

существу кольцевое поперечное сечение, при этом плазма протекает в осевом направлении внутри области ускорения к первому концу внутреннего электрода и первому концу наружного электрода.

[0082]. Например, как показано на ФИГ. 3С и 3D, первый источник 314 питания может подавать напряжение между внутренним электродом 302 и наружным электродом 304 для преобразования по меньшей мере части газа 912 в плазму 916, имеющую по существу кольцевое поперечное сечение. Напряжение, подаваемое первым источником 314 питания, между внутренним электродом 302 и наружным электродом 304 может привести к радиальному электрическому полю внутри области 310 ускорения до 500 кВ/м (например, в диапазоне от 30 кВ/м до 500 кВ/м). Благодаря магнитному полю, генерируемому током, проходящим через плазму 916, плазма 916 может протекать в осевом направлении внутри области 310 ускорения в направлении к первому концу 318 внутреннего электрода 302 и первому концу 322 наружного электрода 304 (как показано на ФИГ. 3С и 3D).

[0083]. На этапе 908 способ 200 может включать приложение посредством второго источника питания напряжения между внутренним электродом и промежуточным электродом для создания плазменной дуги (например, плазмы Z-пинч), которая протекает между промежуточным электродом и первым концом внутреннего электрода. В приведенном для примера варианте осуществления промежуточный электрод может быть расположен в первом конце наружного электрода. В других вариантах осуществления, как обсуждалось выше, промежуточный электрод может по существу окружать внутренний электрод, а наружный электрод может по существу окружать промежуточный электрод.

[0084]. Например, как показано на ФИГ. 3Е и 3F, второй источник питания (например, второй источник 315 питания, как подробно описано выше со ссылкой на ФИГ. 1, для ясности не показан на ФИГ. 3А-3F) может подавать напряжение между внутренним электродом 302 и промежуточным электродом 303 для удерживания плазмы 916 и создания плазменной дуги 918 (также называемой в данном документе плазмой 918 Z-пинч), которая протекает между промежуточным электродом 303 и первым концом 318 внутреннего электрода 302. Как показано, плазменная дуга 918 может быть образована, когда плазма 916 перемещается за пределы области 310 ускорения. В частности, плазменная дуга 918 может протекать в область 326 сборки между первым концом 318 внутреннего электрода 302 и промежуточным электродом 303. В некоторых вариантах осуществления, например, когда внутренний электрод 302 функционирует в качестве катода, а промежуточный электрод 303

функционирует в качестве анода, каждое из тока разряда, образующего плазменную дугу 918, и сдвигающего осевого (со скоростью ионов) потока, стабилизирующего ток разряда, может протекать от первого конца 318 внутреннего электрода 302 к промежуточному электроду 303. В других вариантах осуществления, например, когда внутренний электрод 302 функционирует в качестве анода, а промежуточный электрод 303 функционирует в качестве катода, ток разряда может протекать от промежуточного электрода 303 к первому концу 318 внутреннего электрода 302, а сдвигаемый осевой поток может протекать от первого конца 318 внутреннего электрода 302 к промежуточному электроду 303. В некоторых вариантах осуществления для увеличения профиля сдвигового потока, создаваемого путем инъекции нейтрального газа, можно совместно использовать инъекцию предварительно ионизированного газа с использованием плазменных инжекторов, плазменных пушек или источников ионов. Соответственно, в таких вариантах осуществления инъекция плазмы может происходить быстро и в том же масштабе, что и на этапах 902 и 904, и может быть использована для управления формированием/инициализацией и динамикой плазменной дуги 918.

[0085]. В приведенном для примера варианте осуществления плазменная дуга 918 может демонстрировать сдвиговый осевой поток и иметь радиус до 5 мм (например, от 0,05 мм до 5 мм), температуру ионов до 100000 эВ, такую как от 900 эВ до 30000 эВ (например, от 900 эВ до 2000 эВ), температуру электрона более 500 эВ, плотность ионного числа более  $1 \times 10^{23}$  ионов/м<sup>3</sup> и/или плотность электронного числа более  $1 \times 10^{23}$  электронов/м<sup>3</sup>, и/или магнитное поле свыше 8 Т, и/или может быть стабильным в течение по меньшей мере 1 мкс, например, от 5 мкс до 10 мкс, или до 1 мс. Следует отметить, что такие диапазоны являются примерными и могут быть изменены в зависимости от режима работы системы 300 удержания плазмы или на основании изменений размера, функции, конфигурации и т.п. системы 300 удерживания плазмы. Например, при увеличении размера системы 300 удерживания плазмы такие диапазоны могут быть пропорционально (например, линейно, экспоненциально и т.п.) масштабированы.

[0086]. Следует отметить, что этапы 906 и 908 могут быть реализованы другими средствами управления: (а) напряжением между внутренним электродом 302 и наружным электродом 304; и (б) напряжением между внутренним электродом 302 и промежуточным электродом 303, как будет понятно специалисту в данной области техники. Например, источник питания может обеспечивать напряжение между промежуточным электродом 303



и наружным электродом 304, а не между внутренним электродом 302 и промежуточным электродом 303.

[0087]. Со ссылкой на ФИГ. 4, на котором показан схематический вид в разрезе системы 900 удерживания плазмы, такой как которая может быть включена в реактор термоядерного синтеза. Система 900 удерживания плазмы может генерировать плазменную дугу в области 630 сборки камеры 610 для удерживания плазмы, при этом плазменная дуга удерживается, сжимается и поддерживается осесимметричным магнитным полем. Осесимметричное магнитное поле может быть стабилизировано потоком ионов со сдвиговой скоростью, возбуждаемым электрическим разрядом между парой электродов, взаимодействующих с камерой 610 для удерживания плазмы.

[0088]. Система 900 удерживания плазмы может быть собрана и выполнена аналогично системе 300 удерживания плазмы и может работать по существу аналогично при практическом использовании. Основные различия между системой 300 удерживания плазмы, изображенной на ФИГ. 1, и системой 900 удерживания плазмы, изображенной на ФИГ. 4, включают в себя относительное расположение и пространственную конфигурацию промежуточного электрода 303 (на ФИГ. 1) и относительное расположение и пространственную конфигурацию промежуточного электрода 920 (на ФИГ. 4), которые будут более подробно описаны ниже. За исключением определенных сборочных и рабочих аспектов, которые могут возникать в результате таких различий, описание, представленное выше со ссылкой на ФИГ. 1-3F, может быть дополнительно применено к варианту осуществления, изображенному на ФИГ. 4. В определенных вариантах осуществления в систему 900 удерживания плазмы также могут быть включены дополнительные подсистемы и/или функциональные средства, которые не были подробно описаны выше со ссылкой на ФИГ. 1-3F и которые могут быть дополнительно применены к вариантам осуществления, изображенным ФИГ. 1-3F.

[0089]. Таким образом, в одном варианте осуществления по меньшей мере один из пары электродов, приводящих в действие поток со скоростью сдвига ионов, представляет собой неподвижный твердый электрод, включающий в себя электродный материал, который дополняет или повышает термоядерный синтез внутри камеры 610 для удерживания плазмы во время генерирования плазменной дуги. В дополнительном или альтернативном варианте осуществления по меньшей мере один из пары электродов может представлять собой возобновляемый *in situ* электрод, включающий в себя защитную пленку из

протекающего жидкого металла, который может подвергаться абляции с наружной поверхности электрода при взаимодействии с плазменной дугой и, таким образом, уменьшать сильноразрядную эрозию наружной поверхности.

[0090]. Набор осей 452 декартовых координат показан на ФИГ. 4 для контекстуализации положений различных компонентов системы 900 удерживания плазмы. В частности, предусмотрены оси  $x$ ,  $y$  и  $z$ , которые взаимно перпендикулярны друг другу, где оси  $x$  и  $y$  определяют плоскость схематического вида в разрезе, показанного на ФИГ. 4, а ось  $z$  перпендикулярна ей. В некоторых вариантах осуществления направление силы тяжести может быть параллельным любому направлению в плоскости схематического вида в разрезе по ФИГ. 4 и может совпадать с ним. Например, направление силы тяжести может быть параллельным положительному направлению оси  $x$  и совпадать с ним. В дополнительных или альтернативных вариантах осуществления направление силы тяжести может находиться в плоскости, образованной осями  $y$  и  $z$  (например, параллельной отрицательному направлению оси  $y$  и совпадающей с ним).

[0091]. В приведенном для примера варианте осуществления система 900 удерживания плазмы может включать в себя наружный электрод 650, отделенный физически и функционально от наружной границы 910 вакуума, причем наружная граница 910 вакуума вместе с частями внутреннего электрода 660 образует вакуумный сосуд 640 в качестве контейнера низкого давления, включающего в себя камеру 610 для удерживания плазмы. Промежуточный электрод 920 может быть расположен таким образом, что его радиус находится между радиусом внутреннего электрода 660 и радиусом наружного электрода 650. В частности, промежуточный электрод 920 может по существу окружать внутренний электрод 660, а наружный электрод 650 может по существу окружать промежуточный электрод 920. Например, внутренний электрод 660 может включать в себя один конец 665, который по меньшей мере частично окружен промежуточным электродом 920, а промежуточный электрод 920 может включать в себя один конец 965, который по меньшей мере частично окружен наружным электродом 650.

[0092]. Система 900 удерживания плазмы может содержать по меньшей мере два функционально раздельных источника питания, например, по меньшей мере один основной источник 930 питания, в основном расположенный и управляемый для возбуждения тока 950 ( $I_{pinch}$ ) (разряда) Z-пинча, и по меньшей мере один дополнительный источник 940 питания, в основном расположенный и управляемый для возбуждения остаточного тока

867. В некоторых вариантах осуществления указанный по меньшей мере один основной источник 930 питания может представлять собой устройство (устройства) подачи питания, отдельное от указанного по меньшей мере одного дополнительного источника 940 питания. В других вариантах осуществления указанный по меньшей мере один основной источник 930 питания и указанный по меньшей мере один дополнительный источник 940 питания могут представлять собой компоненты одного и того же устройства подачи питания.

[0093]. Например, по меньшей мере в одном варианте осуществления одно устройство подачи питания может иметь множество выводов, которые по отдельности обеспечивают количество энергии для обеспечения возможности выполнения соответствующей функции (например, возбуждения тока 950 Z-пинча, возбуждения остаточного тока 867 и т.п.). Такая компоновка может быть основана по меньшей мере на двух источниках питания (например, одном основном источнике 930 питания и одном дополнительном источнике 940 питания) и может обеспечивать возможность дополнительного управления током 950 Z-пинча и его стабилизацией сдвиговым потоком. В принципе, указанные по меньшей мере два источника питания могут быть масштабированы, заряжены и могут управляться таким образом, что ток 950 Z-пинча и его стабилизация могут поддерживаться в течение соразмерных периодов времени перед тем, как любой из указанных по меньшей мере двух источников питания преждевременно истощится, или закончится накопленная в нем энергия.

[0094]. В определенных вариантах осуществления система 900 удерживания плазмы может иметь конфигурацию «сужающихся электродов», характеризующуюся расширением зазора между внутренним электродом 660 и промежуточным электродом 920 за счет сужения вдоль оси  $x$  конца 965 промежуточного электрода 920 в наружном направлении для увеличения объема по меньшей мере части области 620 ускорения, например, в направлении (неподдерживаемых) концов 665 и 965. В одном примере конусность может иметь угол от 0 до 15 градусов от центральной оси системы 900 удерживания плазмы (например, параллельной оси  $x$ ). Такое расположение может способствовать переносу импульса от плазмы, нагреваемой остаточным током 867, к нейтральному газу, например, вдоль положительного направления оси  $x$ , тем самым создавая и поддерживая стабилизацию сдвиговым потоком. Перенос импульса может быть описан и смоделирован с использованием методологии, применимой для проектирования/оптимизации «сопел Лаваля», известных в области реактивного движения.

[0095]. Хотя методы, описанные в настоящем документе, обсуждаются в связи с

термоядерным синтезом и, например, использованием вырабатываемой с его помощью энергии, методы, описанные в данном документе, могут быть использованы для других целей, таких как выработка тепла (например, для производства с использованием относительно высоких температур) и приведение в движение. Например, система 300 удерживания плазмы по ФИГ. 1 или система 900 удерживания плазмы по ФИГ. 4 могут быть изменены по меньшей мере путем удаления вакуумной камеры 338 или наружной границы 910 вакуума соответственно, а также выполнением отверстия в одном конце наружного электрода 650 для обеспечения возможности выхода продуктов синтеза (например, параллельно оси x). В одном варианте осуществления магнитное сопло (не показано на ФИГ. 4) расположено ниже по потоку относительно наружного электрода 650, например, справа от наружного электрода 650 относительно оси x для коллимации плазмы для уменьшения любого расхождения шлейфа выходящих газов.

[0096]. Система 900 удерживания плазмы может включать в себя контроллер или другое вычислительное устройство 948, которое может включать в себя долговременное запоминающее устройство, в котором могут храниться исполняемые инструкции. Исполняемые инструкции могут быть исполнены одним или более процессоров контроллера 948 для реализации различных функциональных возможностей системы 900 удерживания плазмы. Соответственно, исполняемые инструкции могут включать в себя различные подпрограммы для эксплуатации, технического обслуживания и тестирования системы 900 удерживания плазмы. Контроллер 948 также может содержать пользовательский интерфейс, с помощью которого оператор системы 900 удерживания плазмы может вводить команды или иным образом изменять работу системы 900 удерживания плазмы. Пользовательский интерфейс может включать в себя различные компоненты для упрощения использования оператором системы 900 удерживания плазмы и приема вводов от оператора (например, запросов на генерацию плазм для термоядерного синтеза и т.п.), такие как один или более дисплеев, устройств ввода (например, клавиатур, сенсорных экранов, компьютерной мыши, нажимаемых кнопок, механических переключателей или других механических исполнительных элементов и т.п.), световых индикаторов и т.п. Контроллер 948 может быть соединен с возможностью осуществления связи с различными компонентами (например, клапанами, источниками питания и т.п.) системы 900 удерживания плазмы для управления ее приведением в действие и использованием (проводные и/или беспроводные линии связи между контроллером 948 и различными компонентами опущены на ФИГ. 4 для ясности).

[0097]. На ФИГ. 5 показана блок-схема способа 400 работы системы удерживания плазмы, такой как любая из систем удерживания плазмы, подробно описанных выше со ссылкой на ФИГ. 1-4, и создания электрода для нее, где электрод может быть образован с помощью электродного материала, который дополняет или повышает термоядерный синтез во время работы системы удерживания плазмы. В приведенном для примера варианте осуществления электродный материал может представлять собой гидрид металла, такой как дейтерид и/или тритид, содержащий одно или более из Ti, Zr, Sc, Mg, V или  ${}^6\text{Li}$  (например,  $\text{TiD}_2$ ,  ${}^6\text{LiD}$  и т.п.), или любой сплав, образованный любой комбинацией одного или более из предыдущих металлов. Гидрид металла может разлагаться с обеспечением жидкостного топливного газа (например,  $\text{H}_2$ ,  $\text{D}_2$ ,  $\text{T}_2$ ) под воздействием рабочих температур системы удерживания плазмы (например, во время подачи тока разряда Z-пинч для создания плазменной дуги) и может подавать свободные нейтроны при ионной бомбардировке (например, дейтерием и/или тритием) и/или свободные атомы трития при нейтронной бомбардировке.

[0098]. В некоторых вариантах осуществления способ 400 или его часть могут быть реализованы в виде исполняемых инструкций, хранящихся в долговременном запоминающем устройстве вычислительного устройства, такого как контроллер, соединенный с возможностью осуществления связи с устройством для удерживания плазмы. Кроме того, в определенных вариантах осуществления дополнительные или альтернативные последовательности этапов могут быть реализованы в виде исполняемых инструкций, расположенных на таком вычислительном устройстве, в котором могут быть добавлены, удалены, замещены, изменены или взаимозаменены отдельные этапы, обсуждаемые со ссылкой на способ 400.

[0099]. На этапе 402 способ 400 может включать напыление испарением металлического слоя-предшественника на объемный материал. В некоторых вариантах осуществления объемный материал может включать в себя металл, такой как медь (Cu), вольфрам (W) или Ti. В дополнительных или альтернативных вариантах осуществления металлический слой-предшественник может содержать одно или более из Ti, Zr, Sc, Mg, V,  ${}^6\text{Li}$  или любого сплава, образованного любой комбинацией одного или более из предыдущих металлов. Металлический слой-предшественник может быть образован так, чтобы его толщина была меньше или находилась в пределах порогового диапазона заданной толщины. В приведенном для примера варианте осуществления заданная толщина может составлять

миллиметр (например, порядка сотен микрон).

[00100]. В приведенном для примера варианте осуществления варианте осуществления объемный материал может образовывать стержень (например, по существу цилиндрический корпус), заканчивающийся носовым конусом. В одном примере металлический слой-предшественник может быть нанесен испарением только на носовой конус. Для ограничения металлического слоя-предшественника таким образом, чтобы он покрывал только часть (например, носовой конус) объемного материала, объемный материал может быть маскирован таким образом, что металлический слой-предшественник может быть нанесен испарением только на открытый, немаскированный участок (например, носовой конус) объемного материала.

[00101]. На этапе 404 способ 400 может включать загрузку в металлический слой-предшественник дейтерия и/или трития, генерируемых посредством источника ионного пучка, с образованием электрода для системы удерживания плазмы. В приведенном для примера варианте осуществления источник ионного пучка может быть внешним относительно системы удерживания плазмы и отдельным от нее. Хотя в других вариантах осуществления металлический слой-предшественник может быть загружен во время работы системы удерживания плазмы (например, плазменной дугой, генерируемой посредством приложения тока разряда Z-пинча), и, таким образом, загрузка может дополнительно или альтернативно происходить после этапа 406 (см. ниже), внешний источник ионного луча может загружать дейтерий и/или тритий со значительно более высокой скоростью. Например, внешний источник ионного луча может представлять собой источник ионов дейтерия с напряжением 10-100 кВ, который при необходимости также может загружать ионы трития. В других примерах ионы трития могут быть загружены посредством дополнительного внешнего источника ионного пучка. Приведенные для примера значения глубины имплантации ионов в Ti (которые могут в некоторых примерах образовывать металлический слой-предшественник) представлены на ФИГ. 6 для ионов H, D, T,  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$ .

[00102]. В приведенном для примера варианте осуществления при загрузке металлического слоя-предшественника дейтерием и/или тритием на объемном материале может быть образован слой электродного материала (например, металлический слой, заполненный дейтерием и/или тритием). Слой электродного материала может включать в себя гидрид металла, имеющий формулу  $\text{MH}_n$  (например, дейтерид металла, имеющий формулу  $\text{MH}_n$ ,

и/или тритид металла, имеющий формулу  $MH_n$ ), где  $n$  - молярное отношение атомов водорода (например, любого из различных гидридов, включая D и/или T) к ионам металла M в твердой фазе. Например,  $n$  может быть равно 2, как, например, в  $TiH_2$  (например,  $TiD_2$  и/или  $TiT_2$ ). Продолжая пример  $TiH_2$ , для данной массы Ti  $m_{Ti}$  в слое электродного материала количество атомов Ti  $N_{Ti}$  можно определить как:

$$N_{Ti} = m_{Ti} \frac{6.02 \times 10^{23} \text{ моль}^{-1}}{48 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}} \quad (4)$$

где константа Авогадро приблизительно равна  $6,02 \times 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ , а атомная масса Ti приблизительно равна  $48 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$ . Применяя уравнение (4) к  $TiH_2$ , включая  $m_{Ti}=1 \text{ г}$ , получаем  $N_{Ti} \approx 1,25 \times 10^{22}$ , а число атомов H равно  $2N_{Ti} \approx 2,5 \times 10^{22}$ .

[00103]. На этапе 406 способ 400 может включать размещение электрода таким образом, чтобы он был открыт для камеры для удерживания плазмы системы удерживания плазмы. В приведенном для примера варианте осуществления камера для удерживания плазмы может быть разбита на область ускорения и область сборки, при этом электрод может быть расположен таким образом, что является открытым как для области ускорения, так и для области сборки. В качестве примера, электрод может представлять собой внутренний электрод, соосный с камерой для удерживания плазмы, так что он проходит через область ускорения таким образом, что конец внутреннего электрода может быть открыт для области сборки. В качестве дополнительного или альтернативного примера электрод может представлять собой наружный электрод, которым по меньшей мере частично окружен внутренний электрод, и который по меньшей мере частично образует внешнюю границу каждой из области ускорения и области сборки. В качестве другого примера электрод может представлять собой промежуточный электрод, которым по меньшей мере частично окружен внутренний электрод, и который по меньшей мере частично образует внешнюю границу области ускорения, проходящую таким образом, что конец промежуточного электрода может быть открыт для области сборки.

[00104]. На этапе 408 способ 400 может включать генерирование запроса на инициализацию системы удерживания плазмы, согласно которому может быть инициирована фаза инициализации системы удерживания плазмы. В приведенном для примера варианте осуществления варианте осуществления запрос может быть сгенерирован в ответ на прием пользовательского ввода, например, от оператора системы удерживания плазмы. Например, инициализация системы удерживания плазмы может быть запущена или иным образом

инициирована оператором, взаимодействующего с пользовательским интерфейсом, например, кнопочным переключателем, тумблерным переключателем или другим механическим исполнительным элементом, клавиатурой, сенсорным экраном, курсором ввода и т.п.

[00105]. На этапе 410 способ 400 может включать инициирование фазы генерирования плазменной дуги системы удерживания плазмы, например, после фазы инициализации. В частности, в приведенном для примера варианте осуществления фаза генерирования плазменной дуги может быть инициирована по меньшей мере путем подачи питания к системе удерживания плазмы (например, один или более источников питания могут подавать питание к различным компонентам, используемым во время фазы генерирования плазменной дуги), и подачи топливного газа для образования плазмы в камеру для удерживания плазмы путем увеличения одного или более отверстий клапана. В приведенном для примера варианте осуществления топливный газ может содержать одно или более из  $D_2$  или  $T_2$ .

[00106]. На этапе 412 способ 400 может включать генерирование плазменной дуги в камере для удерживания плазмы, например, во время фазы генерирования плазменной дуги. В приведенном для примера варианте осуществления ток разряда Z-пинч может подаваться с частотой повторения между электродом, содержащим слой электродного материала, и другим электродом для генерирования плазменной дуги. Соответственно, во время работы системы удерживания плазмы электрод может функционировать либо как катод в некоторых вариантах осуществления, либо как анод в других вариантах осуществления. Ток разряда Z-пинча может быть стабилизирован потоком со скоростью сдвига, создаваемым и поддерживаемым посредством подаваемого остаточного тока. В результате образования плазменной дуги электрод может быть нагрет, и/или электрод может быть подвергнут бомбардировке дейтерием, тритием и свободными нейтронами (например, полученными в результате термоядерного синтеза внутри плазменной дуги). Количество тепла, генерируемого на электроде и/или при ионной/нейтронной бомбардировке, может зависеть от положения электрода относительно плазменной дуги (например, от того, взаимодействует ли плазменная дуга непосредственно с электродом).

[00107]. В приведенном для примера варианте осуществления гидрид металла, содержащийся в слое электродного материала, может разлагаться на металл и топливный газ (например, согласно уравнению (2)), когда электрод нагрет до температуры разложения



во время работы системы удерживания плазмы для генерирования плазменной дуги. Приведенные для примера изотермические давления для разложения различных частиц TiH<sub>n</sub> представлены на ФИГ. 7.

[00108]. В дополнительном или альтернативном варианте осуществления гидрид металла, содержащийся в слое электродного материала, может высвобождать или выбрасывать свободные нейтроны при ионной бомбардировке гидрида металла. В частности, дейтерий и/или тритий из плазменной дуги могут взаимодействовать с гидронами в гидриде металла по реакции термоядерного синтеза (например, реакции (1)) с получением <sup>4</sup>He и свободных нейтронов.

[00109]. В дополнительном или альтернативном варианте осуществления, в котором гидрид металла содержит <sup>6</sup>Li, гидрид металла, содержащийся в слое электродного материала, может высвобождать или выталкивать свободные атомы трития при нейтронной бомбардировке гидрида металла. В частности, свободные нейтроны из плазменной дуги могут взаимодействовать с <sup>6</sup>Li в гидриде металла (например, по реакции (3)) с образованием трития, а также дейтерия и <sup>4</sup>He.

[00110]. В определенных вариантах осуществления гидрид металла может быть подпитан после его расходования в течение продолжительного использования системы удерживания плазмы. Например, продолжительность использования может составлять 1000 часов.

[00111]. На ФИГ. 6 показан график 500 глубины имплантации ионов в Ti в зависимости от энергии ионов для различных примеров ионов. Ti может быть включен, например, в объемный материал или в относительно тонкий слой или пленку, расположенную на объемном материале. На графике 500 абсцисса указывает энергию ионов (в кэВ), а ордината указывает глубину имплантации ионов (в мкм). Глубины имплантации ионов H, D, T, <sup>3</sup>He и <sup>4</sup>He в Ti нанесены на кривые 502, 504, 506, 508 и 510 соответственно. Как показано, для данной энергии ионов, нанесенной на график 500, глубина имплантации ионов может увеличиваться в последовательном порядке <sup>3</sup>He, <sup>4</sup>He, H, D и T. Соответственно, при данной глубине имплантации ионов для имплантации D и T в Ti могут быть использованы ионные пучки с более высокими энергиями по сравнению с ионными пучками, используемыми для H, <sup>3</sup>He и <sup>4</sup>He.

[00112]. Со ссылкой на ФИГ. 7, на котором показан график 600 изотермического давления

в зависимости от атомного соотношения Н:Тi  $n$  для различных примеров гидридов титана (TiH $_n$ ). На графике 600 абсцисса обозначает атомное соотношение Н:Тi на линейной шкале, а ордината обозначает изотермическое давление (в Торр) на логарифмической шкале. Значения изотермического давления нанесены на график для разложения TiH $_n$  в равновесном состоянии при различных фиксированных температурах, включая 200°C (точки 602), 225°C (точки 604), 250°C (точки 606), 275°C (точки 608) и 300°C (точки 610). Как показано, для заданного атомного соотношения Н:Тi на графике 600 изотермическое давление может увеличиваться с повышением температуры. Более того, при заданной температуре изотермическое давление может иметь тенденцию к повышению вверх с увеличением атомного соотношения Н:Тi. Соответственно, более высокие температуры и более высокие атомные соотношения Н:Тi могут создавать более высокие давления в результате разложения TiH $_n$  на Ti и H $_2$ .

[00113]. Со ссылкой на ФИГ. 8А и 8В, показаны схематические виды в разрезе электрода 702 (также называемого в данном документе корпусом 702 электрода или возобновляемым *in situ* электродом 702) в камере 706 для удерживания плазмы системы 700 удерживания плазмы для реактора 701 термоядерного синтеза соответственно. В частности, схематический вид в разрезе по ФИГ. На 8А изображает электрод 702 и камеру 706 для удерживания плазмы во время работы реактора 701 термоядерного синтеза, а схематический вид в разрезе по ФИГ. 8В изображает электрод 702 и камеру 706 для удерживания плазмы до и после работы реактора 701 термоядерного синтеза. Во время работы реактора 701 термоядерного синтеза плазменная дуга 708 может быть сгенерирована, а затем может быть удержана, сжата и устойчиво поддержана осесимметричным магнитным полем. Осесимметричное магнитное поле может быть стабилизировано потоком ионов со сдвиговой скоростью, возбуждаемым электрическим разрядом между электродом 702 и по меньшей мере одним дополнительным электродом, взаимодействующим с камерой 706 для удерживания плазмы.

[00114]. Электрод 702 может называться возобновляемым *in situ* электродом 702 в том смысле, что электрод 702 может включать в себя защитную пленку 736 (также называемую в данном документе мениском 736) жидкого металла 718, который может протекать непрерывно (например, без прерывания или без заметной задержки) и который может быть удален абляцией с наружной поверхности 704а электрода 702 при взаимодействии с плазменной дугой 708, генерируемой во время работы реактора 701 термоядерного синтеза.

Поскольку часть электрода 702, взаимодействующая с плазменной дугой 708, может непрерывно подпитываться протекающим жидким металлом 718, эрозия наружной поверхности 704а (и, таким образом, электрода 702 в целом) во время работы реактора 701 термоядерного синтеза может быть уменьшена или полностью исключена.

[00115]. Хотя электрод 702 описан ниже в контексте камеры 706 для удерживания плазмы, электрод 702 может быть размещен в любой из систем удерживания плазмы, описанных выше в данном документе, в качестве замены в ней электрода. В качестве примера, электрод 702 может заменять внутренний электрод 302, включенный в систему 300 удерживания плазмы, подробно описанную выше со ссылкой на ФИГ. 1 и 3А-3F. В качестве другого примера, электрод 702 может заменять внутренний электрод 660 системы 900 удерживания плазмы, подробно описанной выше со ссылкой на ФИГ. 4. Более того, на ФИГ. 8А и 8В показана только часть системы 700 удерживания плазмы (и, таким образом, реактора 701 термоядерного синтеза), при этом могут быть добавлены, удалены, замещены, изменены или взаимозаменены другие компоненты (например, дополнительные электроды, блоки питания, изоляторы и т.п.), такие как один или более компонентов системы 300 удерживания плазмы и/или системы 900 удерживания плазмы.

[00116]. Набор декартовых осей 752 координат показан на ФИГ. 8А и 8В для контекстуализации положений различных компонентов реактора 701 термоядерного синтеза и для сравнения схематических видов в разрезе по ФИГ. 8А и 8В. В частности, обеспечены оси  $x$ ,  $y$  и  $z$ , которые взаимно перпендикулярны друг другу, при этом оси  $x$  и  $y$  определяют плоскость каждого из схематических видов в разрезе по ФИГ. 8А и 8В, а ось  $z$  перпендикулярна ей. В некоторых вариантах осуществления направление силы тяжести может быть параллельным любому направлению в плоскости схематических видов в разрезе по ФИГ. 8А и 8В и совпадать с ним. В одном примере, и как обсуждается в примерах, описанных ниже в данном документе, направление силы тяжести может быть параллельным положительному направлению оси  $x$  и совпадать с ним. В дополнительных или альтернативных вариантах осуществления направление силы тяжести может находиться в плоскости, образованной осями  $y$  и  $z$  (например, параллельной отрицательному направлению оси  $y$  и совпадающей с ним).

[00117]. В приведенном для примера варианте осуществления электрод 702 может иметь по существу цилиндрическую форму с сужающимся закругленным основанием или носовым конусом 704. Дополнительно или альтернативно электрод 702 может быть удлинен вдоль

оси  $x$ , так что длина электрода 702 вдоль оси  $x$  больше длины электрода 702 вдоль осей  $y$  и  $z$ .

[00118]. В приведенном для примера варианте осуществления электрод 702 может быть образован из материала относительно высокой чистоты, например, для предотвращения образования (неожиданных) продуктов активации во время нейтронной бомбардировки. Дополнительно или альтернативно электрод 702 (например, его носовой конус 704) может быть отлит или изготовлен с помощью аддитивной технологии из материала, выбранного для относительно высокого сопротивления повреждению нейтронами, такого как карбид кремния. В некоторых вариантах осуществления электрод 702 может включать в себя одно или более из металла (например,  $Cu$  и/или  $W$ ), графита или полупроводника (например, карбида кремния).

[00119]. В некоторых вариантах осуществления электрод 702 может быть образован как цельный компонент, включающий носовой конус 704. В других вариантах осуществления носовой конус 704 может быть прикреплен с возможностью снятия или прочно приклеен к другой части/поверхности электрода 702. Соответственно, в некоторых примерах могут быть обеспечены одно или более креплений или других фиксирующих конструкций для съемного крепления носового конуса 704 на месте. В других примерах носовой конус 704 может быть прикреплен сваркой или иным образом приклеен (например, с помощью клея) на месте. В дополнительных или альтернативных вариантах осуществления носовой конус 704 может быть электрически соединен с другой частью/поверхностью электрода 702 посредством электрических линий/проводов или путем образования компонентов электрода 702 (включая носовой конус 704) из одного или более электрически проводящих материалов, которые передают электрический ток между компонентами, когда данные компоненты находятся в физическом контакте друг с другом.

[00120]. Электрод 702 может быть по меньшей мере частично заключен или иным образом размещен внутри камеры 706 для удерживания плазмы. Например, основная часть электрода 702 может быть охвачена по окружности камерой 706 для удерживания плазмы с одним концом электрода 702 (не показан на ФИГ. 8А и 8В), проходящим из камеры 706 для удерживания плазмы в отрицательном направлении оси  $x$  и/или образующим одну стенку камеры 706 для удерживания плазмы.

[00121]. Во время работы реактора 701 термоядерного синтеза плазменная дуга 708 может

быть сгенерирована путем подачи тока разряда между электродом 702 и по меньшей мере одним дополнительным электродом (не показан на ФИГ. 8А и 8В). В результате осесимметричного магнитного поля, генерируемого током разряда, плазменная дуга 708 может быть удерживаема и сжимаема таким образом, что протекает в направлении к электроду 702 вдоль центральной оси 710 (например, параллельно оси x, при этом плазменная дуга 708 протекает в ее отрицательном направлении), как показано стрелками 712.

[00122]. Электрод 702 может быть расположен таким образом, что центральная ось по существу цилиндрической формы совпадает с центральной осью 710 плазменной дуги 708. Соответственно, наружная поверхность 704а электрода 702, более конкретно, на носовом конусе 704, может пересекаться с центральной осью 710 плазменной дуги 708 во время ее генерирования и удерживания. Таким образом, камера 706 для удерживания плазмы может полностью окружать наружную часть носового конуса 704.

[00123]. Электрод 702 может включать в себя внутренний резервуар 714, заключенный или иным образом содержащийся в нем. В приведенном для примера варианте осуществления внутренний резервуар 714 может занимать сердцевинную область электрода 702, например, проходящую вдоль его центральной оси и радиально симметричную вокруг нее. Как описано ниже, электрод 702 может включать в себя множество каналов, содержащих первую часть для протекания жидкого металла 718 во внутренний резервуар 714, вторую часть для протекания инертного газа 726 во внутренний резервуар 714, третью часть для протекания жидкого металла 718 из внутреннего резервуара 714 наружу из носового конуса 704 и четвертую часть для протекания теплообменной текучей среды 741 для поддержания или регулировки (например, увеличения или уменьшения, в зависимости от рабочего режима или одного или более условий системы 700 удерживания плазмы) температуры электрода 702 и/или температуры жидкого металла 718.

[00124]. Внутренний резервуар 714 может содержать по меньшей мере часть жидкого металла 718, при этом жидкий металл 718 подается во внутренний резервуар 714 через канал 716 подачи жидкого металла (например, выполненный в виде трубопровода или трубки), как указано стрелкой 734а. В частности, канал 716 для подачи жидкого металла может соединять по текучей среде внутренний резервуар 714 с источником 720 жидкого металла (например, резервуаром для хранения под давлением), при этом источник 720 жидкого металла расположен снаружи камеры 706 для удерживания плазмы. Источник 720

жидкого металла может содержать по меньшей мере часть жидкого металла 718, которая может быть регулируемым образом подана во внутренний резервуар 714 (см. стрелку 734а) посредством приведения в действие клапана 722 (например, управляемого соответствующим регулятором; не показан на ФИГ. 8А и 8В). Клапан 722 показан на ФИГ. 8А в открытом положении для обеспечения по существу свободного протекания жидкого металла 718 во внутренний резервуар 714, хотя клапан 722 также может быть расположен в закрытом положении (см. ФИГ. 8В) для предотвращения протекания жидкого металла 718 из источника 720 жидкого металла во внутренний резервуар 714. В некоторых вариантах осуществления клапан 722 может быть непрерывно регулируемым, так что клапан 722 может принимать ряд частично открытых положений, которые обеспечивают больший поток, чем закрытое положение, и меньший поток, чем открытое положение.

[00125]. В приведенном для примера варианте осуществления жидкий металл 718 может включать в себя любой металл, который может присутствовать в жидком состоянии при рабочих температурах реактора 701 термоядерного синтеза. Дополнительно или альтернативно жидкий металл 718 может быть выбран таким образом, чтобы он обладал относительно высоким сопротивлением повреждению нейтронами (в определенных вариантах осуществления жидкий металл 718 может быть более устойчивым к повреждению нейтронами, чем композиция электрода 702). Кроме того, потери на излучение могут зависеть от количества и атомного номера загрязняющих веществ. Соответственно, жидкий металл 718 может включать в себя, например, литий (Li). В дополнительных или альтернативных примерах может быть включена добавка, например, для изменения вязкости, поверхностного натяжения и т.п. В определенных примерах добавка может быть выбрана для снижения токсичности и воспламеняемости. В качестве одного примера, жидкий металл 718 может включать в себя висмут (Bi) и/или свинец (Pb), например, в форме соединения/композита/сплава Li, включая Bi и/или Pb. В других вариантах осуществления жидкий гидрид лития может замещать некоторую часть или весь жидкий металл 718 для аналогичных целей, например, для образования защитной пленки 736 на наружной поверхности 704а.

[00126]. Внутренний резервуар 714 также может содержать по меньшей мере часть инертного газа 726, причем инертный газ 726 подается во внутренний резервуар 714 через канал 724 подачи инертного газа (например, образован в виде трубопровода или трубки). В частности, канал 724 подачи инертного газа может соединять по текучей среде внутренний

резервуар 714 с источником 728 инертного газа (например, резервуаром для хранения под давлением), причем источник 728 инертного газа расположен снаружи камеры 706 для удерживания плазмы. Инертный газ 726 изображен стрелками на ФИГ. 8А, стрелки указывают в направлении потока инертного газа 726, когда инертный газ 726 подается во внутренний резервуар 714 во время работы реактора 701 термоядерного синтеза. Источник 728 инертного газа может содержать любую оставшуюся часть инертного газа 726 (например, любой оставшийся инертный газ 726, за исключением части, содержащейся в источнике 728 инертного газа), которая может быть регулируемым образом подана во внутренний резервуар 714 посредством приведения в действие клапана 730 (например, управляемого соответствующим регулятором; не показан на ФИГ. 8А и 8В). Клапан 730 показан на ФИГ. 8А в открытом положении для обеспечения по существу свободного протекания инертного газа 726 во внутренний резервуар 714, хотя клапан 730 также может быть переведен в закрытое положение (см. ФИГ. 8В) для предотвращения протекания инертного газа 726 из источника 728 инертного газа во внутренний резервуар 714. В некоторых вариантах осуществления клапан 730 может быть непрерывно регулируемым, так что клапан 730 может принимать ряд частично открытых положений, которые обеспечивают больший поток, чем закрытое положение, и меньший поток, чем открытое положение.

[00127]. В приведенном для примера варианте осуществления инертный газ 726 может включать в себя любой газ, который не вступает в существенную реакцию или иным образом не разрушает жидкий металл 718 и электрод 702. Например, инертный газ 726 может включать в себя гелий (He). В дополнительных или альтернативных примерах инертный газ 726 может включать в себя один или более благородных газов [неон (Ne), аргон (Ar), криптон (Kr), ксенон (Xe), радон (Rn) и т.п.].

[00128]. Во время работы реактора 701 термоядерного синтеза жидкий металл 718 во внутреннем резервуаре 714 может поддерживаться на уровне 754 жидкого металла, выше или в пределах порогового диапазона уровня 754 жидкого металла, причем уровень 754 жидкого металла предварительно выбран для поддержания расхода жидкого металла для образования и поддержания защитной пленки 736. Соответственно, в некоторых вариантах осуществления уровень 754 жидкого металла может быть отрегулирован таким образом, чтобы поддерживать расход жидкого металла. Дополнительно или альтернативно уровень 754 жидкого металла может быть отрегулирован в ответ на уровень 758 жидкого металла,

соответствующий количеству жидкого металла 718, оставшегося в источнике 720 жидкого металла (например, уровень 754 жидкого металла может постепенно уменьшаться в ответ на постепенное уменьшение уровня 758 жидкого металла). Датчики, расположенные внутри внутреннего резервуара 714 и источника 720 жидкого металла (не показаны на ФИГ. 8А и 8В) могут отслеживать уровни 754 и 758 жидкого металла соответственно.

[00129]. Электрод 702 может содержать множество внутренних каналов 732 для потока жидкости, соединяющих по текучей среде внутренний резервуар 714 с наружной частью носового конуса 704. Каждый из множества внутренних каналов 732 для потока жидкости может включать в себя: основной канал 732а для потока жидкости, соединенный по текучей среде с внутренним резервуаром 714 и проходящий от него, и множество капилляров 732b для потока жидкости, которые соединяют по текучей среде основной канал 732а для потока жидкости с наружной частью носового конуса 704.

[00130]. В приведенном для примера варианте осуществления центральная ось электрода 702 может быть соосной с направлением силы тяжести, при этом направление силы тяжести совпадает с положительным направлением оси x. Соответственно, носовой конус 704 может быть расположен под внутренним резервуаром 714 относительно направления силы тяжести. Более того, при прохождении от внутреннего резервуара 714 каждый из множества внутренних каналов 732 для потока жидкости (например, его основной канал 732а для потока жидкости) может быть изначально ориентирован вверх и противоположно носовому конусу 704. После ориентирования вверх каждый из множества внутренних каналов 732 для потока жидкости (например, его основной канал 732а для потока жидкости) может проходить дугой вниз в направлении к носовому конусу 704. Таким образом, суммарное усилие от количества жидкого металла 718, подаваемого во внутренний резервуар 714 (соответствующего уровню 754 жидкого металла) и давления инертного газа во внутреннем резервуаре 714 может преодолеть гравитационную силу для протекания жидкого металла 718 через первоначально направленную вверх ориентацию множества внутренних каналов 732 для потока жидкости, после чего гравитационная сила может способствовать увеличению расхода жидкого металла.

[00131]. По меньшей мере часть жидкого металла 718 может быть подана из внутреннего резервуара 714 вдоль множества внутренних каналов 732 для потока жидкости на наружную поверхность 704а. В частности, для каждого из множества внутренних каналов 732 для потока жидкости жидкий металл 718 может протекать вдоль основного канала 732а



для потока жидкости, как указано стрелками 734b, к множеству капилляров 732b для потока жидкости и вдоль множества капилляров для потока жидкости к наружной поверхности 704a, как указано стрелками 734c. Хотя множество капилляров 732b для потока жидкости изображены ФИГ. 8А и 8В соединенными по текучей среде с наружной поверхностью 704a переднего конуса 704 по обе стороны от центральной оси 710 плазменной дуги 708 относительно оси у, в других вариантах осуществления по меньшей мере часть из множества капилляров 732b для потока жидкости может быть соединена по текучей среде с наружной поверхностью 704a на переднем конусе 704 таким образом, чтобы пересекаться с центральной осью 710, и/или по меньшей мере часть из множества капилляров 732b для потока жидкости может быть соединена по текучей среде с другими частями наружной поверхности 704a, за исключением переднего конуса 704 в целом.

[00132]. При протекании к наружной поверхности 704a по меньшей мере часть жидкого металла 718 может образовывать защитную пленку 736 между наружной поверхностью 704a и наружной частью носового конуса 704. Защитная пленка 736 может быть удержана (например, закреплена, приклеена или иным образом удержана) на наружной поверхности 704a по меньшей мере за счет капиллярного действия, вызванного множеством капилляров 732b для потока жидкости. Защитная пленка 736, удерживаемая на переднем конусе 704 и по существу симметричная относительно центральной оси электрода 702, может быть расположена таким образом, чтобы непосредственно взаимодействовать с плазменной дугой 708 во время работы реактора 701 термоядерного синтеза (т.е. защитная пленка 736 может быть расположена таким образом, что плазменная дуга 708 физически вступает во взаимодействие с защитной пленкой 736 без каких-либо промежуточных компонентов или объемов).

[00133]. По существу, часть жидкого металла 718 может быть подана (например, из источника 720 жидкого металла) во внутренний резервуар 714 и вдоль множества внутренних каналов 732 для потока жидкости к наружной поверхности 704a. Оставшаяся часть жидкого металла 718 (например, любой оставшийся жидкий металл 718, за исключением части, содержащейся в корпусе 702 электрода и подаваемой на наружную поверхность 704a) может образовывать защитную пленку 736 на наружной поверхности 704a.

[00134]. Во время работы реактора 701 термоядерного синтеза части защитной пленки 736 могут подвергаться абляции с наружной поверхности 704a со скоростью абляции жидкого

металла при взаимодействии с плазменной дугой 708 и сильным током разряда, поддерживающим плазменную дугу 708. Части защитной пленки 736, аблированные с наружной поверхности 704а, могут непрерывно (например, без прерывания или без заметной задержки) подпитываться жидким металлом 718, протекающим к наружной поверхности 704а из внутреннего резервуара 714 с расходом жидкого металла.

[00135]. В вариантах осуществления, в которых направление силы тяжести не параллельно положительному направлению оси x, защитная пленка 736 может проходить по меньшей мере частично вниз по наружной поверхности 704а и ниже носового конуса 704 вдоль отрицательного направления оси x. В таких вариантах осуществления на электроде 702 или внутри системы 700 удерживания плазмы могут быть обеспечены различные конструкции, так что протекающий жидкий металл 718 не может препятствовать работе системы 700 удерживания плазмы. Например, порты/отверстия вдоль наружной поверхности 704а (например, для одного или более каналов 742 подачи топливного газа) могут проходить от наружной поверхности 704а параллельно плоскости, образованной осями y и z, и/или дренаж/желоб могут быть обеспечены в основании электрода 702, противоположном носовому конусу 704, относительно оси x для сбора избытка жидкого металла 718. В дополнительных или альтернативных вариантах осуществления, в которых направление силы тяжести не параллельно положительному направлению оси x, защитная пленка 736 может быть асимметричной относительно центральной оси 710 плазменной дуги 708. Однако в любом из предыдущих вариантов осуществления защитная пленка 736 все еще может пересекаться с центральной осью 710 плазменной дуги 708 во время работы системы 700 удерживания плазмы с сохранением положения между плазменной дугой 708 и наружной поверхностью 704а.

[00136]. Электрод 702 может включать в себя один или более каналов 740 для потока теплообменной текучей среды, содержащих теплообменную текучую среду 741. В приведенном для примера варианте осуществления теплообменная текучая среда 741 может поддерживать температуру жидкого металла 718 (например, защитной пленки 736, образующей часть жидкого металла 718) и/или части или по существу всего электрода 702. В некоторых вариантах осуществления множество каналов 740 для потока теплообменной текучей среды может быть включено в электрод 702, например, с тем, что каждый канал 740 для потока теплообменной текучей среды поддерживает температуру другой части или компонента электрода 702. В других вариантах осуществления в электрод 702 может быть

включен только один канал 740 для потока теплообменной текучей среды, например, свернутый вокруг его центральной оси таким образом, чтобы проходить вдоль части или по существу по всей длине электрода 702 вдоль оси x. В приведенном для примера варианте осуществления один или более каналов 740 для потока теплообменной текучей среды могут быть отделены и отсоединены по текучей среде от камеры 706 для удерживания плазмы и внутреннего резервуара 714, а также от множества внутренних каналов 732 для потока жидкости между ними. В дополнительных или альтернативных вариантах осуществления внутренний нагревательный элемент/устройство 743 (например, изображенные на ФИГ. 8А и 8В в виде внутренней нагревательной катушки, например, кабеля с минеральной изоляцией, чередующейся с одним или более каналами 740 для потока теплообменной текучей среды, хотя возможны и другие конфигурации) может быть термически соединен (например, расположен внутри) с внутренним резервуаром 714 таким образом, чтобы выделять тепло и, таким образом, обеспечивать улучшенное управление поддержанием/модулированием температуры (например, функции нагрева и охлаждения могут быть разделены между внутренним нагревательным элементом/устройством 743 и одним или более каналами 740 для потока теплообменной текучей среды). В дополнительных или альтернативных вариантах осуществления дополнительный нагревательный элемент/устройство (не показаны на ФИГ. 8А и 8В) могут быть термически соединены с источником 720 жидкого металла. В таких вариантах осуществления приведение в действие дополнительного нагревательного элемента/устройства может регулировать температуру жидкого металла 718 внутри источника 720 жидкого металла, например, для плавления/сжижения жидкого металла 718 или иной регулировки расхода жидкого металла перед протеканием жидкого металла 718 во внутренний резервуар 714.

[00137]. В приведенном для примера варианте осуществления теплообменная текучая среда 741 может содержать одно или более из жидкого металла (например, жидкого лития или смесей с ним), расплавленной соли (например, в виде изолирующей текучей среды), воды или инертного газа. Соответственно, в определенных вариантах осуществления одно или оба из жидкого металла 718 и теплообменной текучей среды 741 могут представлять собой жидкий литий.

[00138]. Во время работы реактора 701 термоядерного синтеза камера 706 для удерживания плазмы может содержать по меньшей мере часть топливного газа 744, при этом топливный газ 744 подается в камеру 706 для удерживания плазмы через один или более каналов 742

подачи топливного газа (например, образованных в виде одного или более трубопроводов или труб). В частности, один или более каналов 742 подачи топливного газа могут соединять по текучей среде камеру 706 для удерживания плазмы с одним или более источниками 746 топливного газа (например, одним или более резервуарами для хранения под давлением) соответственно, при этом один или более источников 746 топливного газа расположены снаружи камеры 706 для удерживания плазмы. Топливный газ 744 изображен стрелками на ФИГ. 8А, стрелки указывают в направлении потока топливного газа 744, когда топливный газ 744 подается в камеру 706 для удерживания плазмы во время работы реактора 701 термоядерного синтеза. Один или более источников 746 топливного газа могут содержать любые оставшиеся части топливного газа 744 (например, любой оставшийся топливный газ 744, за исключением части, содержащейся в одном или более источниках 746 топливного газа), которые могут быть регулируемым образом поданы в камеру 706 для удерживания плазмы посредством приведения в действие одного или более клапанов 748 соответственно (например, соответственно управляемых одним или более соответствующими регуляторами; не показаны на ФИГ. 8А и 8В). Каждый из одного или более клапанов 748 показан на ФИГ. 8А в открытом положении для обеспечения по существу свободного протекания топливного газа 744 в камеру 706 для удерживания плазмы, хотя каждый из одного или более клапанов 748 также может быть независимо переведен в закрытое положение (см. ФИГ. 8В) для предотвращения протекания топливного газа 744 из одного или более источников 746 топливного газа в камеру 706 для удерживания плазмы. В некоторых вариантах осуществления каждый из одного или более клапанов 748 может быть непрерывно изменяемым, так что каждый из одного или более клапанов 748 может принимать ряд частично открытых положений, которые обеспечивают больший поток, чем закрытое положение, и меньший поток, чем открытое положение.

[00139]. В приведенном для примера варианте осуществления топливный газ 744 может включать в себя любой газ, который может быть ионизирован с образованием плазмы и который включает в себя нуклоны, которые могут подвергаться термоядерному синтезу в практических условиях (например, условиях, которые могут быть достигнуты в лаборатории или на электростанции). Например, топливный газ 744 может содержать одно или более из  $D_2$  или  $T_2$  (например, которые могут быть ионизированы с образованием нуклонов, которые могут подвергаться термоядерному синтезу посредством реакции (1)).

[00140]. Расход жидкого металла может быть предварительно выбран и/или динамически

отрегулирован для поддержания заданной толщины 738 защитной пленки 736, например, в ответ на ее абляцию. Например, расход жидкого металла может отклоняться от скорости абляции жидкого металла во время работы реактора 701 термоядерного синтеза, например, расход жидкого металла может уменьшаться в результате набухания электрода 702 вследствие суммарного повреждения нейтронами, скорость абляции жидкого металла может уменьшаться/увеличиваться в ответ на соответствующее уменьшение/увеличение тока разряда или интенсивности плазменной дуги 708 и т.п. Соответственно, для поддержания заданной толщины 738 расход жидкого металла и его изменения могут быть предварительно выбраны и/или динамически отрегулированы для соответствия скорости абляции жидкого металла. В некоторых вариантах осуществления расход жидкого металла может быть предварительно выбран в виде одного значения, которое может динамически регулироваться во время работы реактора 701 термоядерного синтеза. В других вариантах осуществления расход жидкого металла может быть предварительно выбран в виде ряда значений, которые следуют за ожидаемой работой реактора 701 термоядерного синтеза.

[00141]. В приведенном для примера варианте осуществления расход жидкого металла может быть отрегулирован в ответ на отклонение от скорости абляции жидкого металла на величину, превышающую пороговую величину. Дополнительно или альтернативно давление инертного газа во внутреннем резервуаре 714 может быть отрегулировано в ответ на расход жидкого металла, отклоняющийся от расхода жидкого металла из-за расхода жидкого металла, определяемого скоростью абляции, на величину, превышающую пороговое значение, при этом уменьшение/повышение давления инертного газа соответствует уменьшению/увеличению расхода жидкого металла. В определенных вариантах осуществления давление инертного газа может иметь тенденцию к повышению (например, повышению в среднем) на протяжении всего срока использования реактора 701 термоядерного синтеза для преодоления повышенного сопротивления потоку во множестве внутренних каналов 732 для потока жидкости, когда корпус 702 электрода набухает из-за суммарного повреждения нейтронами.

[00142]. Например, в ответ на то, что расход жидкого металла ниже, чем скорость абляции жидкого металла, на величину, превышающую пороговое значение, расход жидкого металла может быть увеличен посредством одного или более из регулировки клапана 722 из частично открытого положения или закрытого положения в направлении к открытому положению для подачи большего количества жидкого металла 718 из источника 720

жидкого металла, регулировки клапана 730 из частично открытого положения или закрытого положения в направлении к открытому положению для подачи большего количества инертного газа 726 из источника 728 инертного газа, увеличения расхода теплообменной текучей среды в одном или более каналов 740 для потока теплообменной текучей среды или повышения нагрева внутренним нагревательным элементом/устройством 743. Дополнительно или альтернативно, в ответ на то, что расход жидкого металла ниже, чем скорость абляции жидкого металла, на величину, превышающую пороговое значение, скорость абляции жидкого металла может быть уменьшена одним или более из уменьшения давления топливного газа путем регулировки по меньшей мере одного из одного или более клапанов 748 из открытого положения или частично открытого положения в направлении к закрытому положению или уменьшения тока разряда.

[00143]. В качестве другого примера, в ответ на то, что расход жидкого металла выше, чем скорость абляции жидкого металла, на величину, превышающую пороговое значение, расход жидкого металла может быть уменьшен посредством одного или более из регулировки клапана 722 из открытого положения или частично открытого положения в направлении к закрытому положению для подачи меньшего количества жидкого металла 718 из источника 720 жидкого металла, регулировки клапана 730 из открытого положения или частично открытого положения в направлении к закрытому положению для подачи меньшего количества инертного газа 726 из источника 728 инертного газа, уменьшения расхода теплообменной текучей среды в одном или более каналах 740 для потока теплообменной текучей среды или уменьшении тепла, получаемого от внутреннего нагревательного элемента/устройства 743. Дополнительно или альтернативно, в ответ на то, что расход жидкого металла ниже, чем скорость абляции жидкого металла, на величину, превышающую пороговое значение, скорость абляции жидкого металла может быть уменьшена одним или более из уменьшения давления топливного газа путем регулировки по меньшей мере одного из одного или более клапанов 748 из открытого положения или частично открытого положения в направлении к закрытому положению или уменьшения тока разряда.

[00144]. В некоторых вариантах осуществления дренаж или желоб (не показаны на ФИГ. 8А и 8В) могут быть соединены по текучей среде с камерой 706 для удерживания плазмы. При абляции жидкого металла 718 с наружной поверхности 704а по меньшей мере часть

аблированного жидкого металла 718 может падать каплями или протекать в дренаж или желоб.

[00145]. До или после работы реактора 701 термоядерного синтеза, как показано на ФИГ. 8В, каждый из клапанов 722, 730 и 748 может находиться в закрытом положении. В частности, клапан 722 может находиться в закрытом положении для предотвращения протекания жидкого металла 718 из источника 720 жидкого металла во внутренний резервуар 714, клапан 730 может находиться в закрытом положении для предотвращения протекания инертного газа 726 из источника 728 инертного газа во внутренний резервуар 714, и каждый из одного или более клапанов 748 может находиться в закрытом положении для предотвращения соответственно протекания топливного газа 744 из каждого из одного или более источников 746 топливного газа в камеру 706 для удерживания плазмы.

[00146]. В некоторых вариантах осуществления жидкий металл 718 может быть не способен протекать из внутреннего резервуара 714 на наружную поверхность 704а, когда уровень 754 жидкого металла достигает порогового уровня 756 или падает ниже него. Соответственно, и как показано на ФИГ. 8А, уровень 754 жидкого металла может поддерживаться выше порогового уровня 756 во время работы реактора 701 термоядерного синтеза. Однако, как показано на ФИГ. 8В, в ответ на достижение или падение уровня 754 жидкого металла ниже порогового уровня 756, реактор 701 термоядерного синтеза может прекратить работу, и защитная пленка 736 не может быть образована.

[00147]. Реактор 701 термоядерного синтеза может включать в себя контроллер или другое вычислительное устройство 750, которое может включать в себя долговременное запоминающее устройство, в котором могут храниться исполняемые инструкции. Исполняемые инструкции могут быть исполнены одним или более процессоров контроллера 750 для реализации различных функциональных возможностей реактора 701 термоядерного синтеза. Соответственно, исполняемые инструкции могут включать в себя различные подпрограммы для эксплуатации, технического обслуживания и тестирования реактора 701 термоядерного синтеза. Контроллер 750 также может включать в себя пользовательский интерфейс, посредством которого оператор реактора 701 термоядерного синтеза может вводить команды или иным образом изменять работу реактора 701 термоядерного синтеза. Пользовательский интерфейс может включать в себя различные компоненты для упрощения использования оператором реактора 701 термоядерного синтеза и для приема вводов от оператора (например, запросов на создание плазм для

термоядерного синтеза и т.п.), такие как один или более дисплеев, устройств ввода (например, клавиатуры, сенсорные экраны, компьютерные манипуляторы типа мышь, нажимаемые кнопки, механические переключатели или другие механические исполнительные элементы и т.п.), световые индикаторы и т.п. Контроллер 750 может быть соединен с возможностью осуществления связи с различными компонентами (например, клапанами, источниками питания и т.п.) реактора 701 термоядерного синтеза для управления его приведением в действие и использованием (проводные и/или беспроводные линии связи между контроллером 750 и различными компонентами опущены на ФИГ. 8А и 8В для ясности). Например, динамическая регулировка расхода жидкого металла может быть основана на одном или более вводов (например, скорости абляции жидкого металла и т.п.), принятых в контроллере 750, при этом один или более вводов могут быть коррелированы друг с другом и/или расходом жидкого металла (например, посредством одной или более нейронных сетей, хранящихся в долговременном запоминающем устройстве). На основании корреляции контроллер 750 может выдавать регулировку расхода жидкого металла, которая может быть выполнена посредством приведения в действие различных компонентов реактора 701 термоядерного синтеза (например, для регулировки количества жидкого металла 718, подаваемого во внутренний резервуар 714, для регулировки количества инертного газа 726, подаваемого во внутренний резервуар 714, для регулировки расхода теплообменной текучей среды, для регулировки тепла, получаемого от внутреннего нагревательного элемента/устройства 743 и т.п.).

[00148]. Источник 720 жидкого металла, источник 728 инертного газа и источники 746 топливного газа могут быть расположены вместе с различными клапанами (например, клапанами 722, 730 и 748), системами управления (например, контроллером 750) и другими чувствительными или сложными компонентами на достаточном расстоянии от камеры 706 для удерживания плазмы для уменьшения разложения компонентов вследствие высокого потока нейтронов во время термоядерного синтеза. Таким образом, длинные трубопроводы (например, каналы 716, 724 и 742 подачи), провода, кабели и другие соединения или линии связи могут быть проложены между камерой 706 для удерживания плазмы (и электродом 702, по меньшей мере частично заключенным в ней) и различными чувствительными и сложными компонентами, описанными выше.

[00149]. Как обсуждалось выше в данном документе, электрод 702 может иметь по существу цилиндрическую форму, имеющую сужающийся закругленный носовой конус



704. По существу цилиндрическая форма (включая носовой конус 704) может быть радиально симметричной относительно оси  $x$  с поперечным сечением по ФИГ. 8А и 8В, взятым в самой широкой части по существу цилиндрической формы вдоль оси  $y$ . Более того, компоненты, изображенные на схематических видах в разрезе по ФИГ. 8А и 8В, могут быть воспроизведены вокруг оси  $x$  так, чтобы были радиально симметричными в одной или более плоскостях, содержащих ось  $x$ . Например, множество внутренних каналов 732 для потока жидкости и/или один или более каналов 742 подачи топливного газа могут быть равномерно разнесены вокруг оси  $x$  (например, под углом, таким как  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  и т.п., относительно друг друга).

[00150]. Со ссылкой на ФИГ. 9А и 9В, показаны блок-схемы способа 800 работы системы удерживания плазмы термоядерного реактора, такой как любая из систем удерживания плазмы, подробно описанных выше со ссылкой на ФИГ. 1-4, 8А и 8В. В приведенном для примера варианте осуществления система удерживания плазмы может включать в себя возобновляемый *in situ* электрод, включающий в себя защитную пленку из протекающего жидкого металла, который может аблировать с наружной поверхности электрода при взаимодействии с плазменной дугой, генерируемой системой удерживания плазмы и удерживаемой в ней. В частности, как описано ниже, защитная пленка может непрерывно (например, без прерывания или существенной задержки) подпитываться в ответ на абляцию, так что сильноразрядная эрозия наружной поверхности электрода, возникающая в результате взаимодействия с плазменной дугой, может быть уменьшена или полностью исключена.

[00151]. В некоторых вариантах осуществления способ 800 или его часть могут быть реализованы в виде исполняемых инструкций, хранящихся в долговременном запоминающем устройстве вычислительного устройства, такого как контроллер, соединенный с возможностью осуществления связи с устройством для удерживания плазмы. Кроме того, в определенных вариантах осуществления дополнительные или альтернативные последовательности этапов могут быть реализованы в виде исполняемых инструкций, расположенных на таком вычислительном устройстве, в котором могут быть добавлены, удалены, замещены, изменены или взаимозаменены отдельные этапы, обсуждаемые со ссылкой на способ 800.

[00152]. Со ссылкой на ФИГ. 9А, на этапе 802 способ 800 может включать генерирование запроса на инициализацию системы удерживания плазмы, согласно которому может быть

инициирована фаза инициализации системы удерживания плазмы. В приведенном для примера варианте осуществления запрос может быть сгенерирован в ответ на прием пользовательского ввода, например, от оператора системы удерживания плазмы. Например, инициализация системы удерживания плазмы может быть запущена или иным образом инициирована оператором, взаимодействующим с пользовательским интерфейсом, например, кнопочным переключателем, тумблерным переключателем или другим механическим исполнительным элементом, клавиатурой, сенсорным экраном, курсором ввода и т.п.

[00153]. На этапе 804 способ 800 может включать протекание жидкого металла из внутреннего резервуара электрода на наружную поверхность электрода с расходом жидкого металла, например, во время фазы инициализации. В приведенном для примера варианте осуществления жидкий металл при достижении наружной поверхности может образовывать защитную пленку или мениск между наружной поверхностью и камерой для удерживания плазмы, содержащей электрод (например, на центральной оси камеры для удерживания плазмы и вокруг нее, где плазменная дуга после генерирования может взаимодействовать с электродом).

[00154]. Расход жидкого металла может быть предварительно выбран, например, оператором системы удерживания плазмы, на основании одного или более условий работы системы удерживания плазмы. Например, одно или более условий работы могут включать в себя давление инертного газа во внутреннем резервуаре, уровень жидкого металла во внутреннем резервуаре, температуру жидкого металла, количество топливного газа, подаваемого в камеру для удерживания плазмы, величину тока разряда Z-пинча, подаваемого в плазму (см. этап 814 ниже), и т.п. В частности, на этапе 806 жидкий металл может быть подаваем во внутренний резервуар до уровня жидкого металла. Например, первое отверстие клапана может быть увеличено для обеспечения возможности протекания жидкого металла во внутренний резервуар из источника жидкого металла. На этапе 808 инертный газ может быть подаваем во внутренний резервуар до тех пор, пока не будет достигнуто давление инертного газа. Например, отверстие второго клапана может быть увеличено для обеспечения возможности протекания инертного газа во внутренний резервуар из источника инертного газа. На этапе 810 температура жидкого металла может поддерживаться, например, во внутреннем резервуаре. Например, теплообменная текучая среда может протекать через электрод, например, через канал потока, который может быть

расположен для передачи тепла к жидкому металлу и от него, и/или регулировки тепла, получаемого от внутренней нагревательной катушки электрода, например, который может быть расположен во внутреннем резервуаре. В некоторых вариантах осуществления теплообменная текучая среда может протекать через электрод, и/или внутренняя нагревательная катушка может быть нагрета перед протеканием жидкого металла и генерированием плазменной дуги для предварительного нагрева электрода для использования. Каждое из уровня жидкого металла, давления инертного газа и температуры жидкого металла может быть предварительно выбрано при запуске системы удерживания плазмы (например, в соответствии с запросом на инициализацию системы удерживания плазмы) и/или динамически отрегулировано во время работы системы удерживания плазмы. В приведенном для примера варианте осуществления уровень жидкого металла, давление инертного газа и температура жидкого металла могут быть обоснованно сбалансированы друг с другом для достижения и поддержания расхода жидкого металла.

[00155]. На этапе 812 способ 800 может включать инициирование фазы генерирования плазменной дуги системы удерживания плазмы, например, после фазы инициализации. В частности, в приведенном для примера варианте осуществления фаза генерирования плазменной дуги может быть инициирована по меньшей мере путем подачи питания к системе удерживания плазмы (например, один или более источников питания могут подавать питание к различным компонентам, используемым во время фазы генерирования плазменной дуги) и подачи топливного газа для образования плазмы в камеру для удерживания плазмы путем увеличения одного или более отверстий третьих клапанов. В приведенном для примера варианте осуществления топливный газ может содержать одно или более из  $D_2$  или  $T_2$ .

[00156]. Продолжение ссылки на ФИГ. 9В, на этапе 814 способ 800 может включать генерирование плазменной дуги в камере для удерживания плазмы, например, во время фазы генерирования плазменной дуги. В приведенном для примера варианте осуществления ток разряда Z-пинча может подаваться с частотой повторения между парой электродов, причем пара электродов содержит возобновляемый *in situ* электрод, для генерирования плазменной дуги. Соответственно, во время работы системы удерживания плазмы возобновляемый *in situ* электрод может функционировать либо в качестве катода в некоторых вариантах осуществления, либо в качестве анода в других вариантах осуществления. Плазменная дуга может быть удерживаема, сжата и поддерживаема

посредством осесимметричного магнитного поля, генерируемого током разряда Z-пинча, при этом ток разряда Z-пинча стабилизирован потоком ионов со сдвиговой скоростью, создаваемым и поддерживаемым посредством подаваемого остаточного тока. В результате образования плазменной дуги пару электродов можно нагревать и бомбардировать дейтерием, тритием и свободными нейтронами (например, в результате термоядерного синтеза внутри плазменной дуги). Более конкретно, по мере увеличения тока разряда Z-пинча температура электрода может быть увеличена, а увеличенное количество дейтерия, трития и свободных нейтронов может, например, бомбардировать электрод. Однако возобновляемый *in situ* электрод может уменьшать или полностью устранять эрозию наружной поверхности электрода во время такой бомбардировки путем непрерывной подпитки наружной поверхности электрода.

[00157]. В частности, на этапе 816 способ 800 может включать абляцию жидкого металла с наружной поверхности электрода (например, вместо наружной поверхности самого электрода) со скоростью абляции жидкого металла через плазменную дугу. В частности, приложение тока разряда Z-пинча к электроду в дополнение к нейтронной бомбардировке плазменной дугой в некоторых случаях может привести к абляции жидкого металла с наружной поверхности электрода. Жидкий металл может непрерывно (например, без прерывания или без заметной задержки) подпитываться на наружную поверхность из внутреннего резервуара.

[00158]. На этапе 818 способ 800 может включать определение того, является ли уровень жидкого металла меньше порогового уровня или равен ему. В приведенном для примера варианте осуществления пороговый уровень может представлять собой уровень во внутреннем резервуаре, при котором жидкий металл может больше не подаваться на наружную поверхность при желаемом расходе жидкого металла. Таким образом, в некоторых примерах пороговый уровень может быть динамически отрегулирован на основании желаемой работы системы удерживания плазмы.

[00159]. Если уровень жидкого металла выше порогового уровня, способ 800 может переходить к этапу 820, при этом способ 800 может включать определение того, следует ли регулировать скорость повторения тока разряда Z-пинча, например, в соответствии с запросом, сгенерированным в системе удерживания плазмы.

[00160]. Если индицирована регулировка скорости повторения, способ 800 может

переходить к этапу 822, на котором способ 800 может включать регулировку скорости повторения тока разряда Z-пинча. В приведенном для примера варианте осуществления скорость повторения может быть отрегулирована на основании желаемой выработки энергии, например, как указано в запросе на регулировку скорости повторения. В качестве примера, скорость повторения может быть увеличена в ответ на запрос регулировки скорости повторения, указывающий на увеличенную выработку энергии. В качестве другого примера, скорость повторения может быть уменьшена в ответ на запрос регулировки скорости повторения, указывающий на уменьшенную выработку энергии. Таким образом, в таких примерах запрос на регулировку частоты повторения может указывать на регулировку выработки энергии (например, запрос может быть сгенерирован для регулировки выработки энергии, что может привести к соответствующей регулировке частоты повторения).

[00161]. Кроме того, скорость абляции жидкого металла может быть отрегулирована в результате регулировки скорости повторения. Например, скорость абляции жидкого металла может увеличиваться (например, меньше жидкого металла может удерживаться на наружной поверхности электрода) в результате увеличения скорости повторения. В качестве другого примера, скорость абляции жидкого металла может уменьшаться (например, больше жидкого металла может удерживаться на наружной поверхности электрода) в результате уменьшения скорости повторения. Таким образом, запрос на регулировку скорости повторения может указывать на регулировку скорости абляции из жидкого металла (например, может быть сгенерирован запрос на регулировку скорости абляции жидкого металла, что может привести к соответствующей регулировке скорости повторения).

[00162]. На этапе 824 способ 800 может включать регулировку расхода жидкого металла. В качестве примера, расход жидкого металла может быть отрегулирован в ответ на отрегулированную скорость повторения (см. этап 822 выше). В качестве другого примера, расход жидкого металла может быть отрегулирован в ответ на расход жидкого металла, отклоняющийся от скорости абляции жидкого металла на пороговую величину (см. этап 826 ниже). Расход жидкого металла может быть ненулевым до и после регулировки расхода жидкого металла, например, поскольку система удерживания плазмы может работать непосредственно до и непосредственно после этапа 824. Соответственно, перед регулировкой расход жидкого металла может представлять собой первое ненулевое

значение, а после регулировки расход жидкого металла может представлять собой второе ненулевое значение, при этом второе ненулевое значение отличается от первого ненулевого значения.

[00163]. В приведенном для примера варианте осуществления регулировка расхода жидкого металла может включать регулировку одного или более из уровня жидкого металла во внутреннем резервуаре, давления инертного газа во внутреннем резервуаре или температуры жидкого металла. Например, увеличение расхода жидкого металла может включать повышение одного или более из уровня жидкого металла, давления инертного газа или температуры жидкого металла. Например, уменьшение расхода жидкого металла может включать уменьшение одного или более из уровня жидкого металла, давления инертного газа или температуры жидкого металла. В определенных вариантах осуществления регулировка давления инертного газа может включать повышение в среднем (например, повышение на чистую величину) давления инертного газа в течение всего срока использования электрода, например, в ответ на совокупное набухание электрода из-за повреждения нейтронами. В определенных вариантах осуществления расход жидкого металла может быть отрегулировано упреждающим образом, так что могут быть учтены динамические изменения в системе удерживания плазмы, обнаруженные во время предыдущих сеансов использования или более раннего разряда во время того же сеанса использования (например, после короткой задержки, такой как 0,5 с). Способ 800 может возвращаться к этапу 814 для продолжения генерирования плазменной дуги в камере для удерживания плазмы.

[00164]. Если регулировка скорости повторения не указана (см. этап 820 выше), способ 800 может переходить к этапу 826, при этом способ 800 может включать определение того, отклонился ли расход жидкого металла от скорости абляции жидкого металла на величину, превышающую пороговую величину.

[00165]. В приведенном для примера варианте осуществления расход жидкого металла может соответствовать скорости абляции жидкого металла, так что может поддерживаться постоянная толщина защитной пленки или мениска на наружной поверхности электрода. Соответственно, если расход жидкого металла отклоняется от скорости абляции жидкого металла на величину, превышающую пороговую величину, способ 800 может перейти к этапу 824, на котором способ 800 может включать регулировку расхода жидкого металла (как описано выше).

[00166]. Если расход жидкого металла поддерживается в пределах пороговой величины скорости абляции жидкого металла, способ 800 может перейти к этапу 828, на котором способ 800 может включать определение того, следует ли прекращать генерирование плазменной дуги, например, согласно запросу, сгенерированному в системе удерживания плазмы. Если прекращение генерирования плазменной дуги не указано, способ 800 может вернуться к этапу 814 для продолжения генерирования плазменной дуги в камере для удерживания плазмы.

[00167]. Если указано прекращение генерирования плазменной дуги или если уровень жидкого металла меньше порогового уровня или равен ему (см. этап 818 выше), способ 800 может переходить к этапу 830, на котором способ 800 может включать прекращение генерирования плазменной дуги. В частности, может быть прекращена подача тока разряда Z-пинча в плазму, и одно или более отверстий третьих клапанов могут быть уменьшены или полностью закрыты для уменьшения или прекращения подачи топливного газа в камеру для удерживания плазмы, так что плазменная дуга может стать неустойчивой и может быть прекращена.

[00168]. На этапе 832 способ 800 может включать прекращение потока жидкого металла, например, из внутреннего резервуара на наружную поверхность электрода. Например, отверстие первого клапана может быть закрыто для прекращения подачи жидкого металла во внутренний резервуар и, таким образом, на наружную поверхность. В некоторых вариантах осуществления жидкий металл после прекращения его потока может быть вычищен из внутреннего резервуара и одного или более внутренних каналов, соединенных с ним по текучей среде, посредством продувки газом, например, инертным газом.

[00169]. На этапе 834 способ 800 может включать удаление по меньшей мере части жидкого металла с наружной поверхности электрода, например, относительно количества жидкого металла, присутствующего во время фазы генерирования плазменной дуги. В приведенном для примера варианте осуществления жидкий металл может быть удален путем повышения температуры жидкого металла (например, путем увеличения потока теплообменной текучей среды через электрод и/или путем увеличения тепла, получаемого от внутренней нагревательной катушки), так что расход жидкого металла может быть увеличен на наружной поверхности (даже при отсутствии плазменной дуги, взаимодействующей с наружной поверхностью). Таким образом, после генерирования плазменной дуги и прекращения потока жидкого металла к наружной поверхности жидкий металл может

стекать с наружной поверхности и собираться внутри камеры для удерживания плазмы, например, в желобе, и/или выходить из камеры для удерживания плазмы, например, через дренаж.

[00170]. После удаления жидкого металла в некоторых вариантах осуществления меньшее количество жидкого металла может оставаться на наружной поверхности электрода по сравнению с количеством жидкого металла, присутствующего на наружной поверхности во время работы системы удерживания плазмы. В одном варианте осуществления весь или по существу весь жидкий металл удален с наружной поверхности после удаления жидкого металла. Например, после удаления жидкого металла ни один из жидких металлов не может быть виден (например, глазом человека) на наружной поверхности. В дополнительном или альтернативном варианте осуществления малая часть жидкого металла может присутствовать (например, визуально присутствовать) на наружной поверхности после удаления жидкого металла, но не в количестве, достаточном для практического влияния на будущую работу системы удерживания плазмы. В других вариантах осуществления часть жидкого металла может присутствовать на наружной поверхности после удаления жидкого металла, например, для защиты корпуса электрода от эрозии во время дальнейшей работы системы удерживания плазмы.

[00171]. Варианты осуществления настоящего изобретения могут быть описаны с учетом следующих пунктов:

1. Система удерживания плазмы, включающая в себя:  
множество электродов, при этом каждый электрод из множества электродов расположен соосно относительно области сборки системы удерживания плазмы и расположен с тем, чтобы быть открытым для области сборки,  
при этом один или более электродов из множества электродов включают в себя электродный материал, который выполнен с возможностью высвобождения газообразного водорода выше пороговой температуры.
2. Система удерживания плазмы по пункту 1, в которой множество электродов включает в себя:  
первый электрод, расположенный так, что образует по меньшей мере часть наружной границы области сборки; и  
второй электрод, расположенный с образованием одного конца области



сборки.

3. Система удерживания плазмы по пункту 2, в которой множество электродов также включает в себя третий электрод, расположенный на том же конце области сборки, образованном вторым электродом, или на конце области сборки, противоположном концу области сборки, образованной вторым электродом.

4. Система удерживания плазмы по любому из пунктов 2 или 3, в которой второй электрод содержит носовой конус, открытый для области сборки, так что пересекается осью плазменной дуги, соосной с каждым электродом из множества электродов, при этом носовой конус включает в себя электродный материал.

5. Система удерживания плазмы по любому из пунктов 1-4, в которой электродный материал включает в себя одно или более из дейтерида металла или тритида металла.

6. Система удерживания плазмы по пункту 5, в которой одно или более из дейтерида металла или тритида металла включает в себя одно или более из Ti, Zr, Sc, Mg, V,  ${}^6\text{Li}$  или любого сплава, образованного любой комбинацией одного или более из Ti, Zr, Sc, Mg, V или  ${}^6\text{Li}$ .

7. Система удерживания плазмы по любому из пунктов 1-6, в которой электродный материал выполнен с возможностью высвобождения свободных нейтронов при ионной бомбардировке электродного материала.

8. Система удерживания плазмы по любому из пунктов 1-7, в которой электродный материал выполнен с возможностью высвобождения свободных атомов трития при нейтронной бомбардировке электродного материала.

9. Система удерживания плазмы по любому из пунктов 2, 3, 5, 6, 7 или 8, в которой второй электрод включает в себя:

носовой конус, открытый для области сборки таким образом, чтобы пересекаться осью плазменной дуги, соосной с каждым электродом из множества электродов, при этом необязательно носовой конус включает в себя электродный материал;  
и

жидкий металл, при этом часть жидкого металла образует защитную пленку

между поверхностью носового конуса и областью сборки во время работы системы удерживания плазмы.

10. Реактор термоядерного синтеза, включающий в себя:  
камеру для удерживания плазмы;  
внутренний электрод;  
наружный электрод, по меньшей мере частично окружающий внутренний электрод; и

при этом один или оба из внутреннего электрода и наружного электрода включают в себя гидрид металла для высвобождения топливного газа между внутренним электродом и наружным электродом для введения плазмы в процесс термоядерного синтеза термоядерного реактора.

11. Реактор термоядерного синтеза по пункту 10, в котором один или оба из внутреннего электрода и наружного электрода содержат один или более клапанов, которые направляют дополнительный топливный газ в камеру для удерживания плазмы во время работы термоядерного реактора.

12. Реактор термоядерного синтеза по любому из пунктов 10 или 11, в котором гидрид металла разлагается на металл и топливный газ при нагревании до температуры разложения.

13. Реактор термоядерного синтеза по пункту 12, в котором металл содержит одно или более из Ti, Zr, Sc, Mg, V,  ${}^6\text{Li}$  или любого сплава, образованного любой их комбинацией, и при этом топливный газ содержит одно или более из  $\text{D}_2$  или  $\text{T}_2$ .

14. Реактор термоядерного синтеза по любому из пунктов 10-13, в котором гидрид металла выполнен с возможностью выталкивания свободных нейтронов при ионной бомбардировке дейтерием и/или тритием.

15. Реактор термоядерного синтеза по любому из пунктов 10-14, в котором гидрид металла выполнен с возможностью выталкивания свободных атомов трития при нейтронной бомбардировке.

16. Способ, включающий:  
получение реакции термоядерного синтеза в реакторе термоядерного синтеза

путем:

нагрева электрода, образованного из объемного материала и металлического слоя, нанесенного на него испарением, причем металлический слой загружен дейтерием и/или тритием, чтобы вызвать высвобождение электродом газообразного водорода;

образование с использованием газообразного водорода плазмы внутри термоядерного реактора; и

использование электрического тока, направляемого в плазму через электрод, для сжатия плазмы с получением реакции термоядерной синтеза.

17. Способ по пункту 16, согласно которому металлический слой наносят испарением на объемный материал путем маскирования объемного материала для нанесения испарением металлического слоя только на немаскированную часть объемного материала.

18. Способ по любому из пунктов 16 или 17, согласно которому объемный материал образует стержень, заканчивающийся в носовом конусе, при этом металлический слой наносят испарением только на носовой конус.

19. Способ по любому из пунктов 16-18, согласно которому металлический слой включает в себя Ti, Zr, Sc и/или  ${}^6\text{Li}$ .

20. Способ по любому из пунктов 16-19, согласно которому толщина металлического слоя меньше миллиметра.

21. Система удерживания плазмы, включающая в себя:

камеру для удерживания плазмы; и

корпус электрода, включающий в себя:

носовой конус, расположенный таким образом, чтобы быть открытым для камеры для удерживания плазмы;

внутренний резервуар, соединенный по текучей среде с источником жидкого металла, который подает жидкий металл во внутренний резервуар во время работы системы удерживания плазмы; и

множество внутренних каналов для потока жидкости, проходящих к поверхности носового конуса таким образом, чтобы соединять по текучей среде

внутренний резервуар с камерой для удерживания плазмы.

22. Система удерживания плазмы по пункту 21, в которой первая часть жидкого металла образует защитную пленку между поверхностью носового конуса и камерой для удерживания плазмы во время работы системы удерживания плазмы, и при этом оставшаяся вторая часть жидкого металла подается из источника жидкого металла во внутренний резервуар и вдоль множества внутренних каналов для потока жидкости в направлении к поверхности носового конуса во время работы системы удерживания плазмы.

23. Система удерживания плазмы по пункту 22, в которой защитная пленка поддерживается с заданной толщиной во время работы системы удерживания плазмы.

24. Система удерживания плазмы по любому из пунктов 21-23, в которой корпус электрода образован из одного или более из металла, графита или полупроводника.

25. Система удерживания плазмы по любому из пунктов 21-24, в которой корпус электрода соосен с направлением силы тяжести, при этом носовой конус расположен под внутренним резервуаром относительно направления силы тяжести, и затем проходит от внутреннего резервуара, каждый внутренний канал для потока жидкости из множества внутренних каналов для потока жидкости изначально ориентирован вверх и противоположно носовому конусу, причем каждый внутренний канал для потока жидкости из множества внутренних каналов для потока жидкости проходит дугой вниз в направлении к носовому конусу.

26. Система удерживания плазмы по любому из пунктов 22-25, в которой:  
каждый внутренний канал для потока жидкости из множества внутренних каналов для потока жидкости включает в себя:

основной канал для потока жидкости, соединенный по текучей среде с внутренним резервуаром и проходящий от него; и

множество капилляров для потока жидкости, которые соединяют по текучей среде основной канал для потока жидкости с камерой для удерживания плазмы, при этом защитная пленка удерживается на поверхности носового конуса за счет капиллярного действия, вызванного множеством капилляров для потока жидкости.

27. Система удерживания плазмы по любому из пунктов 21-26, при этом корпус

электрода образует один электрод из множества электродов, расположенный таким образом, чтобы быть открытым для камеры для удерживания плазмы, при этом один или более электродов из множества электродов включают в себя электродный материал, который выполнен с возможностью высвобождения газообразного водорода, используемый при генерации плазмы, выше пороговой температуры.

28. Реактор термоядерного синтеза, включающий в себя:

камеру для удерживания плазмы;

электрод, по меньшей мере частично заключенный внутри камеры для удерживания плазмы, при этом электрод содержит носовой конус, который пересекается с осью дуги плазмы, удерживаемой внутри камеры для удерживания плазмы, во время работы термоядерного реактора; и

жидкометаллический мениск, образованный на поверхности носового конуса, при этом жидкометаллический мениск непосредственно взаимодействует с удерживаемой плазменной дугой во время работы термоядерного реактора.

29. Реактор термоядерного синтеза по пункту 28, в котором электрод включает в себя множество внутренних каналов и внутренний резервуар, при этом внутренний резервуар сообщается по текучей среде с жидкометаллическим мениском по меньшей мере через первую часть множества внутренних каналов.

30. Реактор термоядерного синтеза по пункту 29, в котором вторая часть множества внутренних каналов выполнена с возможностью подачи топливного газа в камеру для удерживания плазмы.

31. Реактор термоядерного синтеза по любому из пунктов 29 или 30, в котором третья часть множества внутренних каналов содержит теплообменную текучую среду, которая поддерживает температуру электрода и/или жидкометаллического мениска.

32. Реактор термоядерного синтеза по любому из пунктов 29-31, также включающий в себя первый канал подачи, соединяющий по текучей среде внутренний резервуар с источником жидкого металла, при этом источник жидкого металла расположен снаружи камеры для удерживания плазмы.

33. Реактор термоядерного синтеза по пункту 32, также содержащий второй канал подачи, соединяющий по текучей среде внутренний резервуар с источником

инертного газа, при этом источник инертного газа расположен снаружи камеры для удерживания плазмы.

34. Способ, включающий:

протекание жидкого металла из внутреннего резервуара электрода на наружную поверхность электрода с расходом жидкого металла;

генерацию удерживаемой плазменной дуги для абляции жидкого металла с наружной поверхности со скоростью абляции жидкого металла; и

регулировку расхода жидкого металла путем регулировки одного или более из уровня жидкого металла во внутреннем резервуаре, давления инертного газа во внутреннем резервуаре или температуры жидкого металла в ответ на расход жидкого металла, отклоняющийся от скорости абляции жидкого металла на величину, превышающую пороговое значение.

35. Способ по пункту 34, согласно которому протекание жидкого металла с расходом жидкого металла включает:

подачу жидкого металла во внутренний резервуар до уровня жидкого металла; и

подачу инертного газа во внутренний резервуар до достижения давления инертного газа.

36. Способ по любому из пунктов 34 или 35, согласно которому протекание жидкого металла с расходом жидкого металла включает поддержание температуры жидкого металла путем протекания теплообменной текучей среды через электрод и/или регулировки тепла, получаемого от внутренней нагревательной катушки электрода.

37. Способ по любому из пунктов 34-36, согласно которому регулировка давления инертного газа включает повышение в среднем давления инертного газа в течение всего срока использования электрода.

38. Способ по любому из пунктов 34-37, согласно которому расход жидкого металла является ненулевым до и после регулировки расхода жидкого металла.

39. Способ по любому из пунктов 34-38, также включающий:  
в ответ на то, что уровень жидкого металла меньше порогового уровня или равен ему:

прекращение потока жидкого металла из внутреннего резервуара; и удаление по меньшей мере части жидкого металла с наружной поверхности путем повышения температуры жидкого металла.

40. Способ по любому из пунктов 34-39, также включающий регулировку скорости абляции жидкого металла путем регулировки скорости повторения тока разряда, удерживающего удерживаемую плазменную дугу.

[00172]. Описание и чертежи следует рассматривать в иллюстративном, а не ограничительном смысле. Однако будет очевидно, что в них могут быть выполнены различные модификации и изменения без отступления от более широкой сущности и объема предмета, изложенного в формуле изобретения.

[00173]. Другие вариации находятся в пределах сущности настоящего изобретения. Таким образом, хотя раскрытые методики подвержены различным модификациям и альтернативным конструкциям, некоторые проиллюстрированные варианты осуществления показаны на чертежах и были подробно описаны выше. Однако следует понимать, что нет намерения ограничить предмет, изложенный в формуле изобретения, конкретной раскрытой формой или формами, напротив, намерение состоит в том, чтобы охватывать все модификации, альтернативные конструкции и эквиваленты, находящиеся в пределах сущности и объема настоящего изобретения, как определено в прилагаемой формуле изобретения.

[00174]. Использование грамматических показателей единственного числа и подобных им референтов в контексте описания раскрытых вариантов осуществления (особенно в контексте последующей формулы изобретения) следует истолковывать как охватывающее как единственное, так и множественное число, если в данном документе не указано иное или явно не противоречит контексту. Аналогично, использование термина «или» следует истолковывать как означающее «и/или», если это не противоречит явно или по контексту. Термины «содержащий», «имеющий», «включающий» и «имеющий в своем составе» следует истолковывать как неограничивающие термины (то есть, подразумевающие «включающий в себя среди прочего»), если не указано иное. Термин «соединенный», если он неизменен и относится к физическим соединениям, следует истолковывать как частично или полностью содержащийся в, присоединенный к или соединенный вместе, даже если присутствует что-нибудь промежуточное. Перечисление диапазонов значений в данном

документе предназначено только для использования в качестве сокращенного способа индивидуальной ссылки на каждое отдельное значение, находящееся в пределах этого диапазона, если в данном документе не указано иное, и каждое отдельное значение включено в описание, как если бы оно было указано здесь индивидуально. Использование термина «набор» (например, «набор элементов») или «поднабор», если не указано иное или не противоречит контексту, должно истолковываться как непустая совокупность, состоящая из одного или нескольких элементов. Кроме того, если не указано иное или не противоречит контексту, термин «поднабор» соответствующего набора не обязательно обозначает правильный поднабор соответствующего набора, но поднабор и соответствующий набор могут быть равными. Использование фразы «на основе», если явно не указано иное или не ясно из контекста, означает «по меньшей мере частично на основе» и не ограничивается «только на основе».

[00175]. Союзные выражения, такие как фразы в виде «по меньшей мере одно из А, В, и С» или «по меньшей мере одно из А, В и С» (т.е. одинаковая фраза с оксфордской запятой или без нее), если специально не указано иное или иным образом явно противоречит контексту, иначе понимаются в контексте как используемые в целом для представления того, что элемент, термин и т.п. может быть либо А, либо В, либо С, любым непустым поднабором набора А и В и С или любым набором, не противоречащим контексту или иным образом не исключающим, что содержит по меньшей мере один А, по меньшей мере один В или по меньшей мере один С. Например, в иллюстративном примере набора, имеющего три элемента, союзные выражения «по меньшей мере один из А, В, и С» и «по меньшей мере один из А, В и С» относятся к любому из следующих наборов: {А}, {В}, {С}, {А, В}, {А, С}, {В, С}, {А, В, С} и, если это не противоречит явно или по контексту, любой набор, имеющий {А}, {В} и/или {С} в качестве поднабора (например, наборы с множеством «А»). Таким образом, такая соединительная лексика, как правило, не подразумевает, что в некоторых вариантах осуществления требуется присутствие каждого из следующего: по меньшей мере одно из А, по меньшей мере одно из В и по меньшей мере одно из С. Подобным образом, такие выражения, как «по меньшей мере одно из А, В, или С» и «по меньшей мере одно из А, В или С» относятся к тому же, что и «по меньшей мере одно из А, В, и С» и «по меньшей мере одно из А, В и С» относятся к любому из следующих наборов: {А}, {В}, {С}, {А, В}, {А, С}, {В, С}, {А, В, С}, если иное значение явно не указано или не ясно из контекста. Кроме того, если не указано иное или не противоречит контексту, термин «множество» указывает на состояние множественного числа (например, термин



«множество элементов» указывает на множество элементов). Количество элементов во множестве составляет по меньшей мере два, но может быть больше, если это указано либо явно, либо по контексту.

[00176]. Операции процессов, описанных в данном документе, могут выполняться в любом подходящем порядке, если в данном документе не указано иное или иное явно не противоречит контексту. В одном варианте осуществления процесс, такой как описанные в данном документе процессы (или их варианты и/или комбинации), выполняют под управлением одной или более компьютерных систем, сконфигурированных исполняемыми инструкциями, и реализуют в виде кода (например, исполняемых инструкций, одной или более компьютерных программ или одного или более приложений), исполняемого совместно одним или более процессоров, при помощи аппаратного обеспечения или их комбинациями. В одном варианте осуществления код хранится на машиночитаемом носителе данных, например, в виде компьютерной программы, содержащей множество инструкций, исполняемых одним или более процессоров. В одном варианте осуществления машиночитаемый носитель данных представляет собой энергонезависимый машиночитаемый носитель данных, который исключает временные сигналы (например, распространяющуюся кратковременную электрическую или электромагнитную передачу), но содержит схемы для энергонезависимого хранения данных (например, буферы, кэш и очереди) в приемопередатчиках временных сигналов. В одном варианте осуществления код (например, исполняемый код или исходный код) хранится на наборе из одного или более энергонезависимых машиночитаемых носителей данных, содержащих сохраненные на нем исполняемые инструкции, которые при исполнении (то есть, в результате исполнения) одним или более процессоров компьютерной системы вызывают выполнение компьютерной системой операций, описанных в данном документе. В одном варианте осуществления набор энергонезависимых машиночитаемых носителей данных содержит множество энергонезависимых машиночитаемых носителей данных, причем один или более отдельных энергонезависимых носителей данных из указанного множества энергонезависимых машиночитаемых носителей данных не имеют всего кода, тогда как указанное множество энергонезависимых машиночитаемых носителей данных совместно хранят весь код. В одном варианте осуществления исполняемые инструкции исполняют таким образом, что различные команды исполняют посредством различных процессоров, например, в одном варианте осуществления долговременный машиночитаемый носитель данных хранит инструкции, а основной процессор исполняет некоторые из этих

инструкций, тогда как графический процессорный блок исполняет другие инструкции. В другом варианте осуществления различные компоненты компьютерной системы имеют отдельные процессоры, и различные процессоры исполняют различные поднаборы этих инструкций.

[00177]. Соответственно, в одном варианте осуществления компьютерные системы выполнены с возможностью реализации одной или более служб, которые по отдельности или совместно выполняют операции процессов, описанных в данном документе, и такие компьютерные системы выполнены с применимым аппаратным и/или программным обеспечением, обеспечивающим возможность выполнения этих операций. Кроме того, в одном варианте осуществления настоящего изобретения компьютерная система представляет собой одно устройство, а в другом варианте осуществления представляет собой распределенную компьютерную систему, содержащую множество устройств, работающих различным образом, так что распределенная компьютерная система выполняет операции, описанные в данном документе, и так, что одно устройство не выполняет все операции.

[00178]. Использование любых и всех примеров или приведенной для примера лексики (например, термина «такой как»), предусмотренных в данном документе, предназначено только для лучшего освещения различных вариантов осуществления и не налагает ограничения на объем формулы изобретения, если не указано иное. Никакие формулировки в настоящем описании не должны быть истолкованы как указывающие на любой незаявленный элемент как существенный для осуществления настоящего изобретения, раскрытого в данном документе.

[00179]. Варианты осуществления настоящего изобретения описаны в данном документе, включая лучший способ, известный авторам изобретения, для осуществления концепций изобретения, описанных в данном документе. Вариации этих вариантов осуществления могут стать очевидными для специалистов в данной области техники после прочтения вышеизложенного описания. Авторы изобретения ожидают, что специалисты в данной области техники будут использовать такие вариации при необходимости, а также авторы изобретения предполагают, что варианты осуществления настоящего изобретения будут применяться на практике иначе, чем конкретно описано в настоящем документе. Соответственно, объем настоящего изобретения включает в себя все модификации и эквиваленты предмета изобретения, изложенные в формуле изобретения, прилагаемой к

настоящему изобретению, в соответствии с применимым законодательством. Кроме того, любая комбинация вышеописанных элементов во всех ее возможных вариациях охватывается объемом настоящего изобретения, если в данном документе не указано иное или иное явно не противоречит контексту.

[00180]. Все ссылки, включая публикации, патентные заявки и патенты, цитируемые в данном документе, тем самым включены посредством ссылки в той же степени, как если бы каждая ссылка была отдельно и конкретно указана как включенная посредством ссылки и была изложена в данном документе во всей своей полноте.

## ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Система удерживания плазмы, содержащая:

камеру для удержания плазмы; и

корпус электрода, содержащий:

носовой конус, расположенный таким образом, чтобы быть открытым для камеры для удерживания плазмы;

внутренний резервуар, соединенный по текучей среде с источником жидкого металла, который подает жидкий металл во внутренний резервуар во время работы системы удерживания плазмы; и

множество внутренних каналов для потока жидкости, проходящих к поверхности носового конуса таким образом, что соединяют по текучей среде внутренний резервуар с камерой для удерживания плазмы.

2. Система удерживания плазмы по п. 1, в которой первая часть жидкого металла образует защитную пленку между поверхностью носового конуса и камерой для удерживания плазмы во время работы системы удерживания плазмы, и при этом оставшаяся вторая часть жидкого металла подается из источника жидкого металла во внутренний резервуар и вдоль множества внутренних каналов для потока жидкости в направлении к поверхности носового конуса во время работы системы удерживания плазмы.

3. Система удерживания плазмы по п. 2, в которой защитная пленка поддерживается с заданной толщиной во время работы системы удерживания плазмы.

4. Система удерживания плазмы по любому из предыдущих пунктов, в которой корпус электрода образован из одного или более из металла, графита или полупроводника.

5. Система удерживания плазмы по любому из предыдущих пунктов, в которой корпус электрода соосен с направлением силы тяжести, при этом носовой конус расположен под внутренним резервуаром относительно направления силы тяжести, и затем проходит от внутреннего резервуара, причем каждый внутренний канал для потока жидкости из множества внутренних каналов для потока жидкости изначально ориентирован вверх и противоположно носовому конусу, вследствие чего каждый внутренний канал для потока жидкости из множества внутренних каналов для потока жидкости проходит дугой вниз в направлении к носовому конусу.

6. Система удерживания плазмы по любому из пп. 2-5, в которой:

каждый внутренний канал для потока жидкости из множества внутренних каналов для потока жидкости содержит:

основной канал для потока жидкости, соединенный по текучей среде с внутренним резервуаром и проходящий от него; и

множество капилляров для потока жидкости, которые соединяют по текучей среде основной канал для потока жидкости с камерой для удерживания плазмы, при этом защитная пленка удерживается на поверхности носового конуса за счет капиллярного действия, вызванного множеством капилляров для потока жидкости.

7. Система удерживания плазмы по любому из предыдущих пунктов, в которой корпус электрода образует один электрод из множества электродов, расположенный таким образом, что он открыт для камеры для удерживания плазмы, при этом один или более электродов из множества электродов содержат электродный материал, который выполнен с возможностью высвобождения газообразного водорода, используемый при генерации плазмы, выше пороговой температуры.

8. Реактор термоядерного синтеза, содержащий:

камеру для удерживания плазмы;

электрод, по меньшей мере частично заключенный внутри камеры для удерживания плазмы, при этом электрод содержит носовой конус, который пересекается с осью дуги плазмы, удерживаемой внутри камеры для удерживания плазмы, во время работы термоядерного реактора; и

жидкометаллический мениск, образованный на поверхности носового конуса, при этом жидкометаллический мениск непосредственно взаимодействует с удерживаемой плазменной дугой во время работы термоядерного реактора.

9. Реактор термоядерного синтеза по п. 8, в котором электрод содержит множество внутренних каналов и внутренний резервуар, при этом внутренний резервуар находится в сообщении по текучей среде с жидкометаллическим мениском через по меньшей мере первую часть множества внутренних каналов.

10. Реактор термоядерного синтеза по п. 9, в котором вторая часть множества внутренних каналов выполнена с возможностью подачи топливного газа в камеру для удерживания плазмы.

11. Реактор термоядерного синтеза по любому из п. 9 или 10, в котором вторая часть множества внутренних каналов содержит теплообменную текучую среду, которая поддерживает температуру электрода и/или жидкометаллического мениска.

12. Реактор термоядерного синтеза по любому из пп. 9-11, также содержащий первый канал подачи, соединяющий по текучей среде внутренний резервуар с источником жидкого металла, при этом источник жидкого металла расположен снаружи камеры для удерживания плазмы.

13. Реактор термоядерного синтеза по п. 12, также содержащий второй канал подачи, соединяющий по текучей среде внутренний резервуар с источником инертного газа, при этом источник инертного газа расположен снаружи камеры для удерживания плазмы.

14. Способ, включающий:

протекание жидкого металла из внутреннего резервуара электрода на наружную поверхность электрода с расходом жидкого металла;

генерацию удерживаемой плазменной дуги для абляции жидкого металла с наружной поверхности со скоростью абляции жидкого металла; и

регулировку расхода жидкого металла путем регулировки одного или более из уровня жидкого металла во внутреннем резервуаре, давления инертного газа во внутреннем резервуаре или температуры жидкого металла в ответ на расход жидкого металла, отклоняющийся от скорости абляции жидкого металла на величину, превышающую пороговое значение.

15. Способ по п. 14, согласно которому протекание жидкого металла с расходом жидкого металла включает:

подачу жидкого металла во внутренний резервуар до уровня жидкого металла; и

подачу инертного газа во внутренний резервуар до достижения давления инертного газа.

16. Способ по любому из п. 14 или 15, согласно которому протекание жидкого металла с расходом жидкого металла включает поддержание температуры жидкого металла путем протекания теплообменной текучей среды через электрод и/или регулировки тепла, получаемого от внутренней нагревательной катушки электрода.

17. Способ по любому из пп. 14-16, согласно которому регулировка давления инертного газа включает повышение в среднем давления инертного газа в течение всего срока использования электрода.

18. Способ по любому из пп. 14-17, согласно которому расход жидкого металла является ненулевым до и после регулировки расхода жидкого металла.

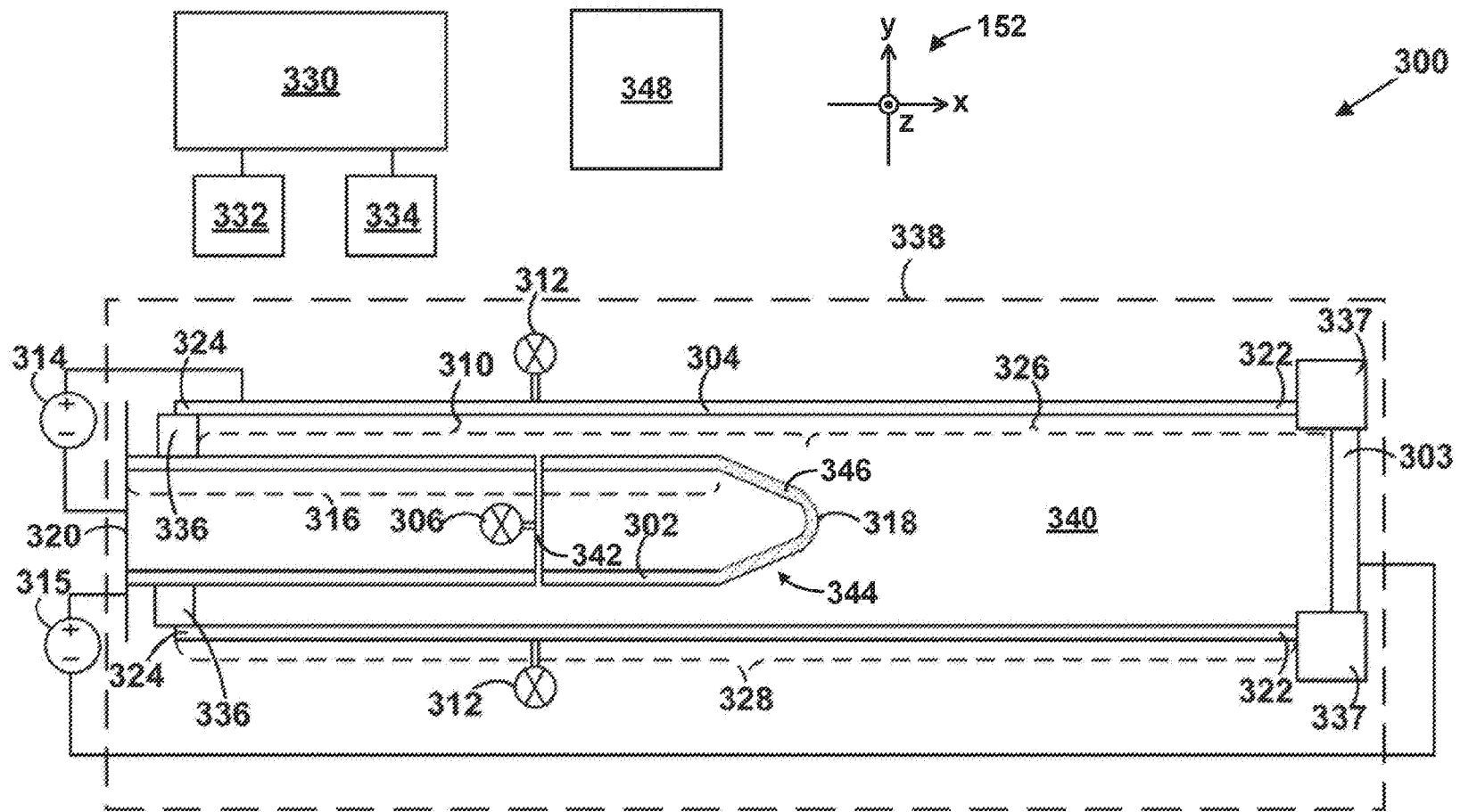
19. Способ по любому из пп. 14-18, также включающий:

в ответ на то, что уровень жидкого металла меньше порогового уровня или равен ему:

прекращение потока жидкого металла из внутреннего резервуара; и

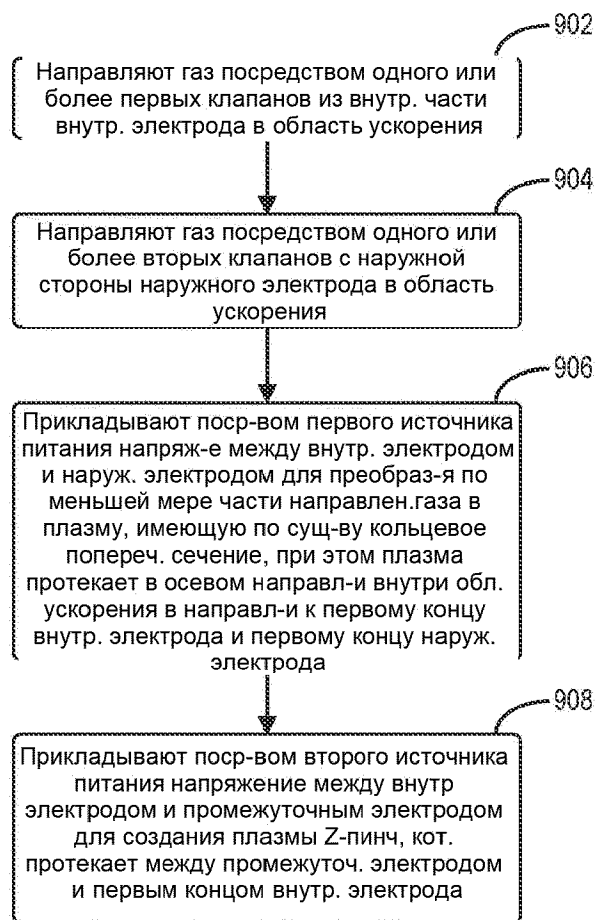
удаление по меньшей мере части жидкого металла с наружной поверхности путем повышения температуры жидкого металла.

20. Способ по любому из пп. 14-19, также включающий регулировку скорости абляции жидкого металла путем регулировки скорости повторения тока разряда, удерживающего удерживаемую плазменную дугу.

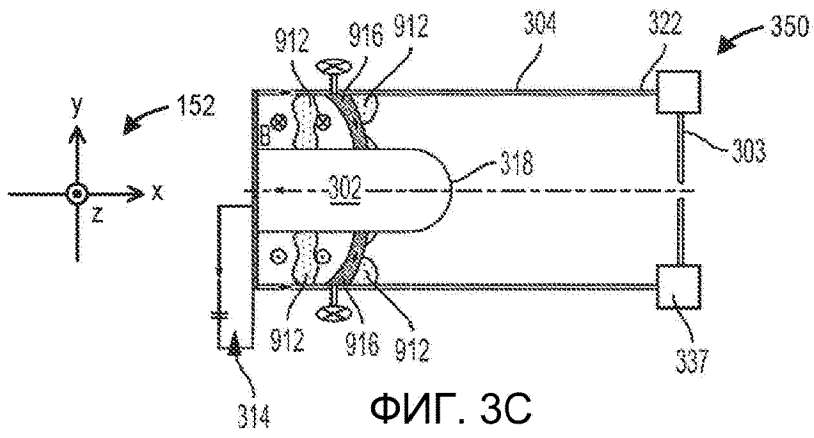
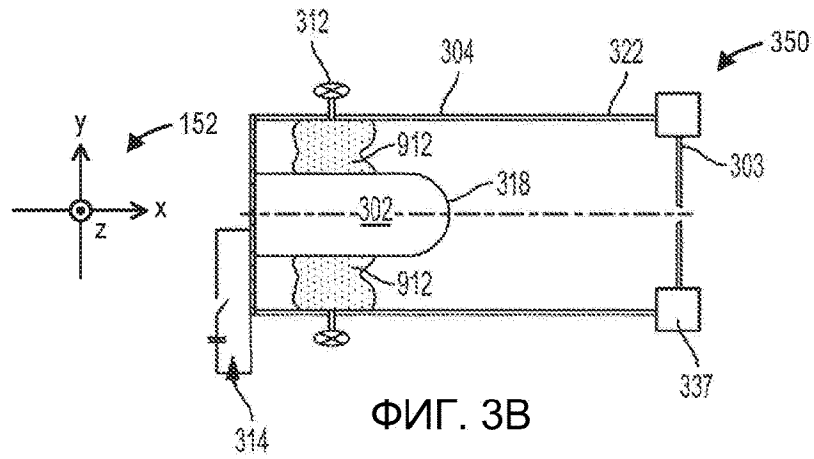
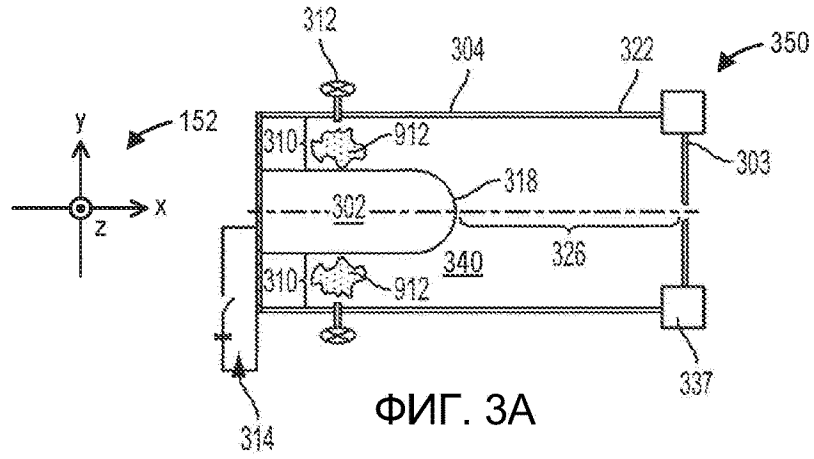


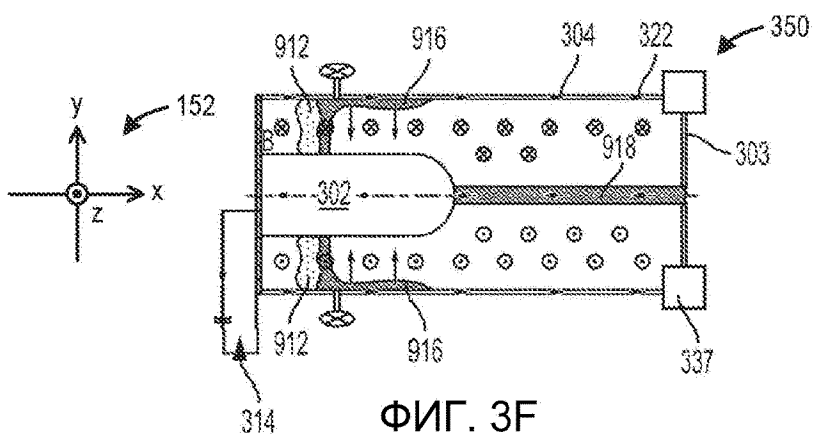
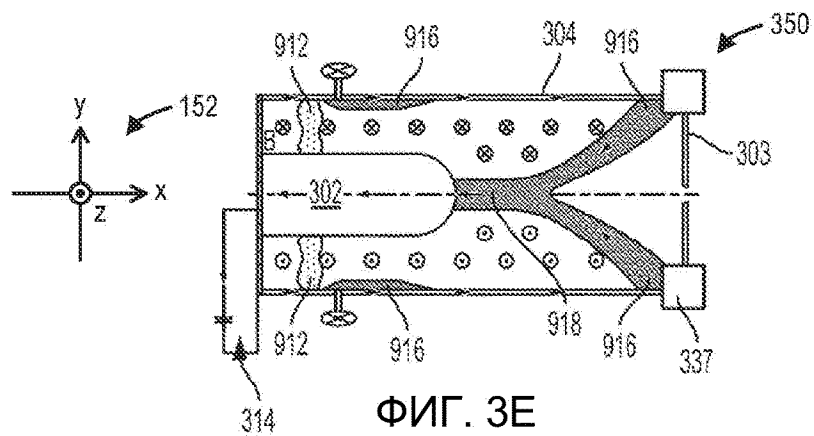
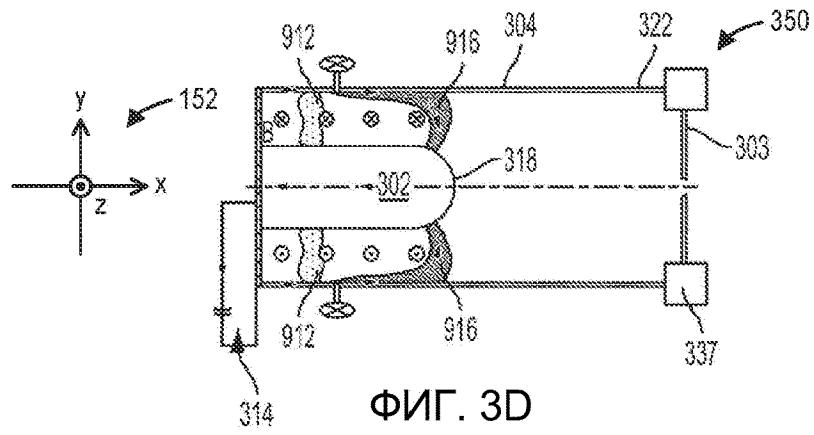
ФИГ. 1

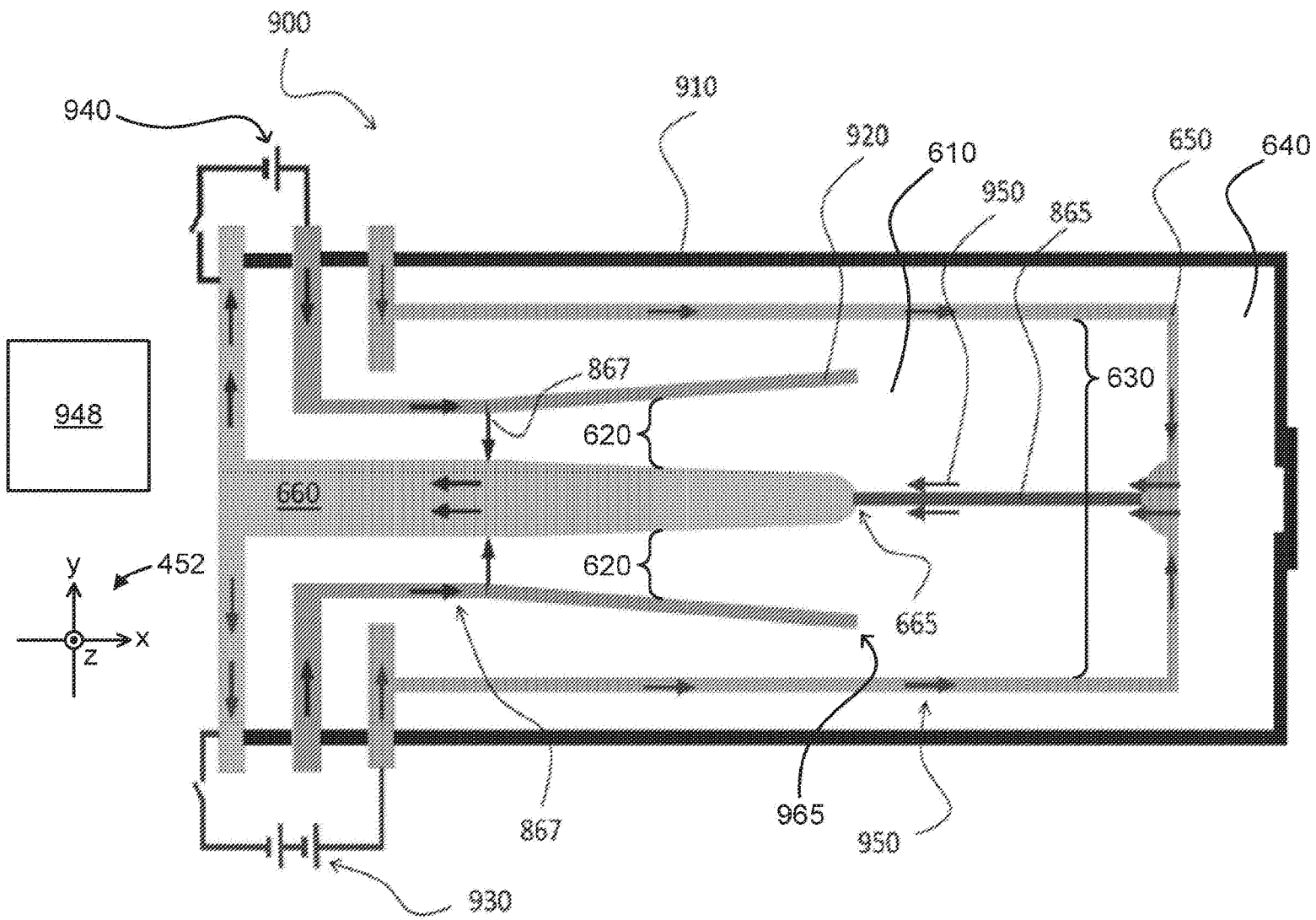




ФИГ. 2

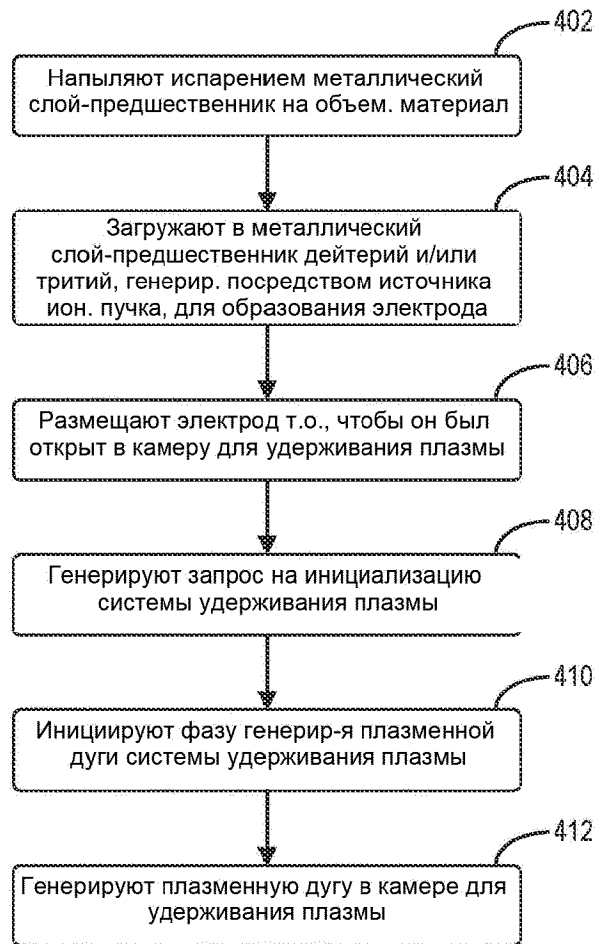




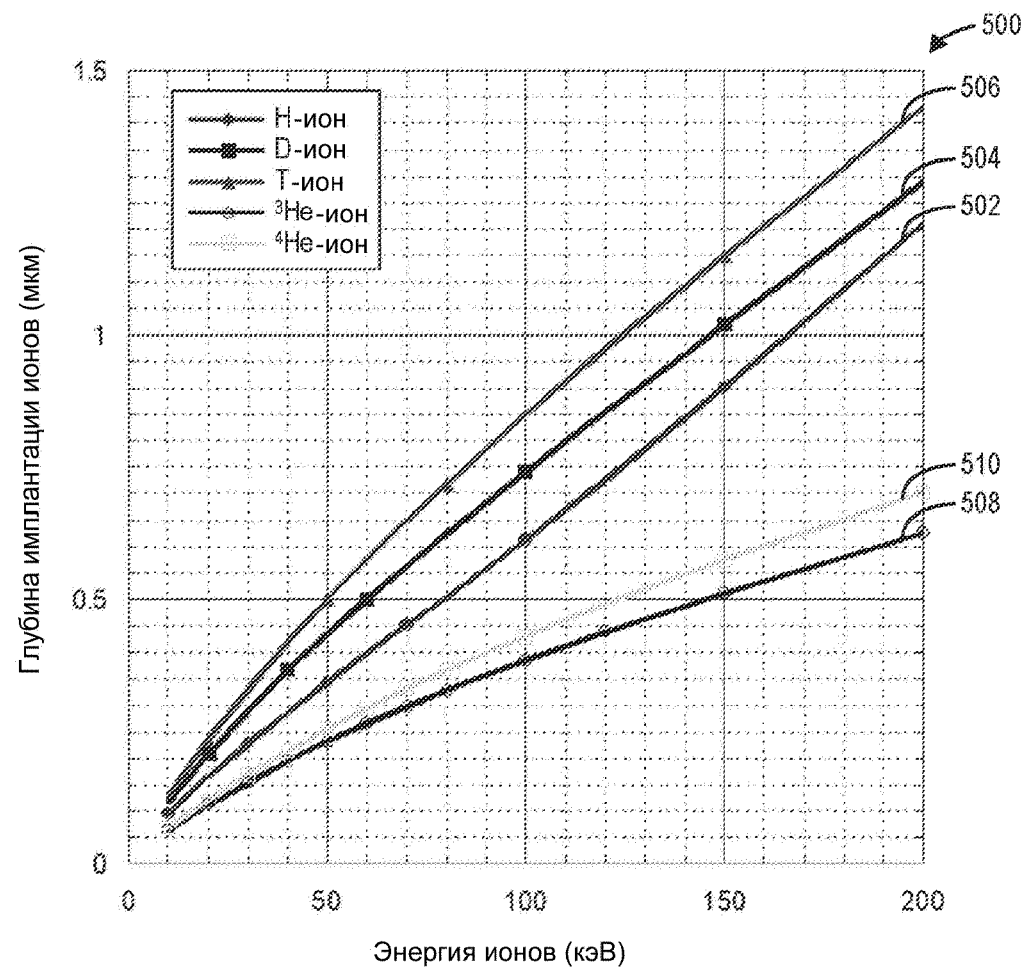


ФИГ. 4

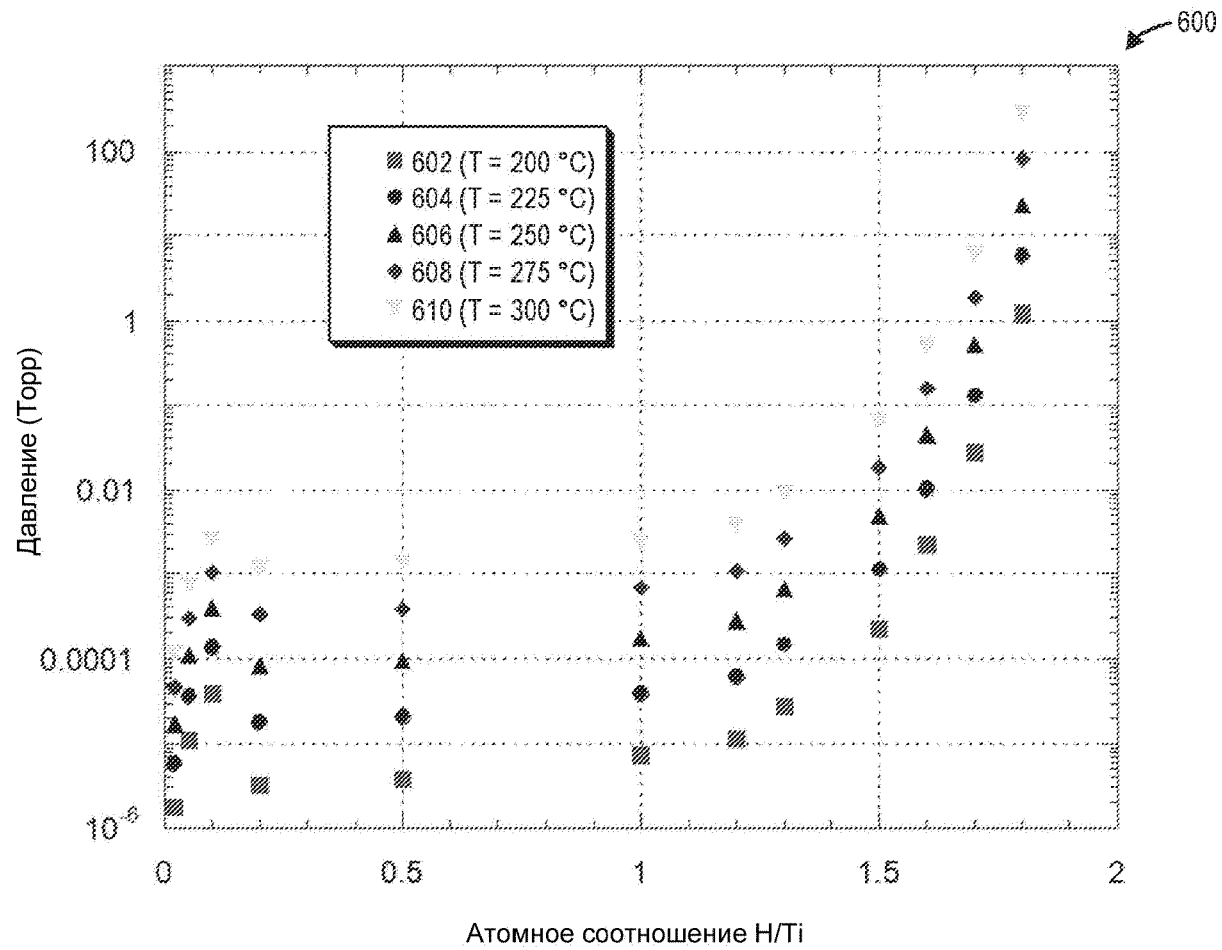
400



ФИГ. 5

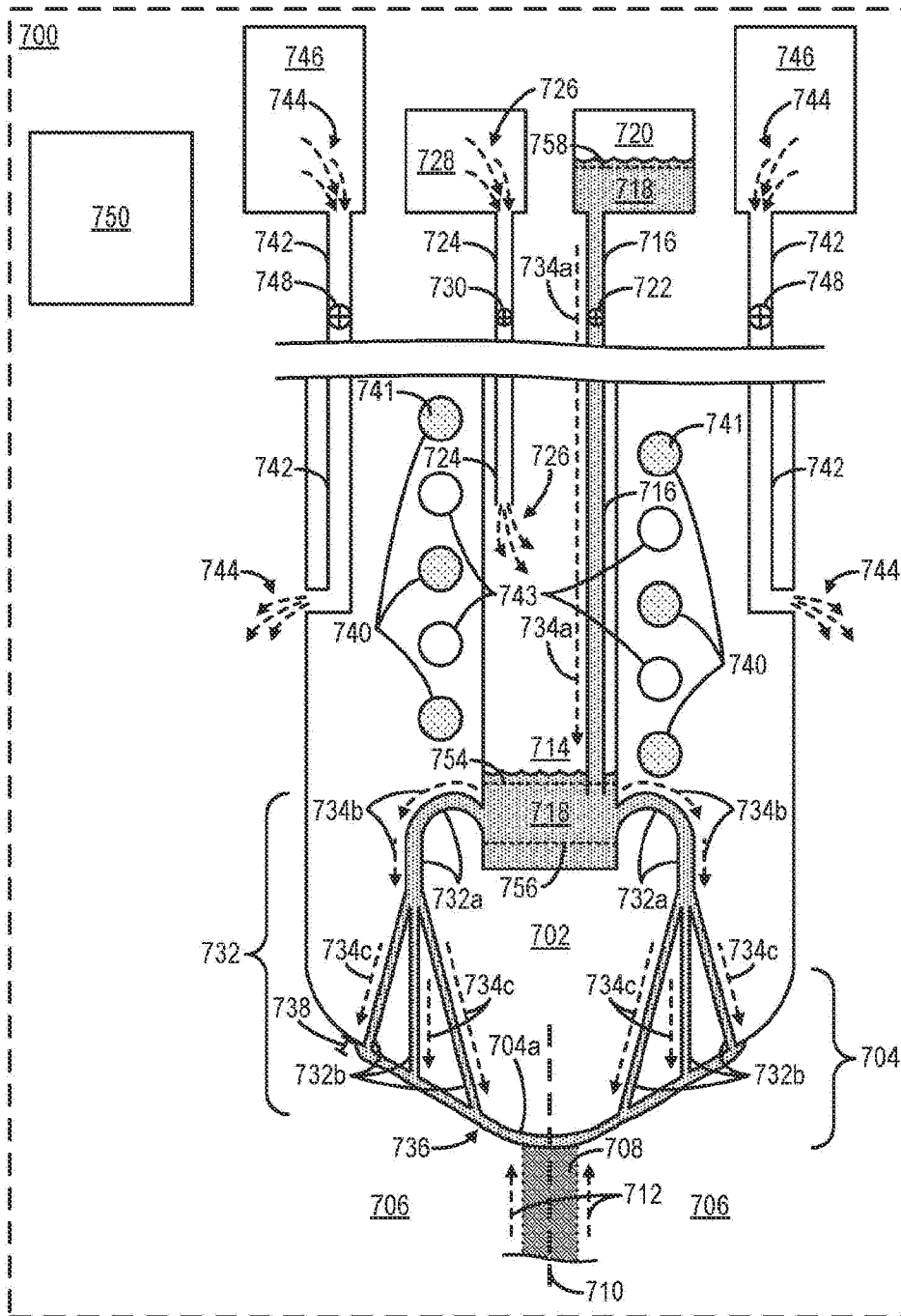


ФИГ. 6



ФИГ. 7

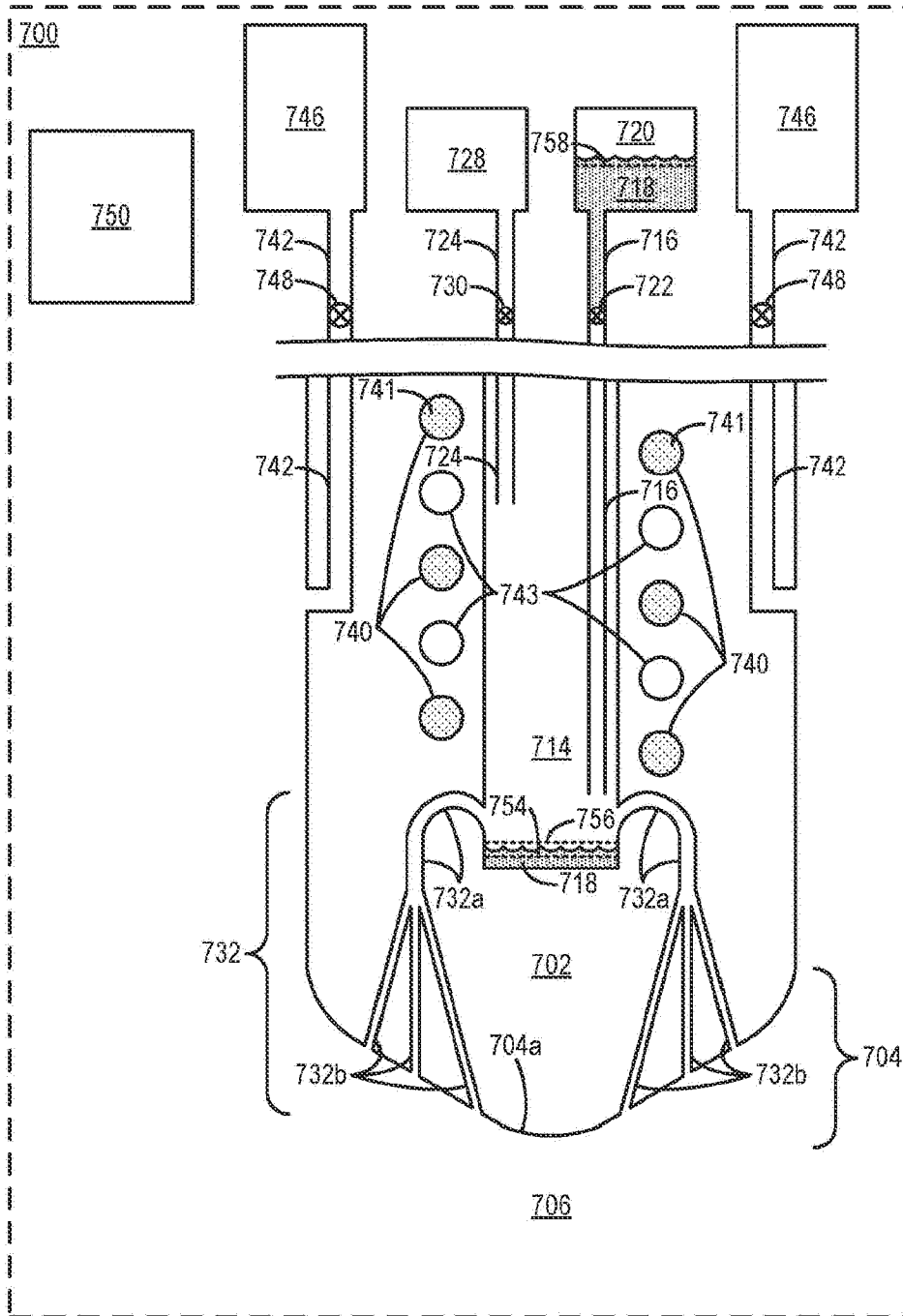
701



ФИГ. 8А



701

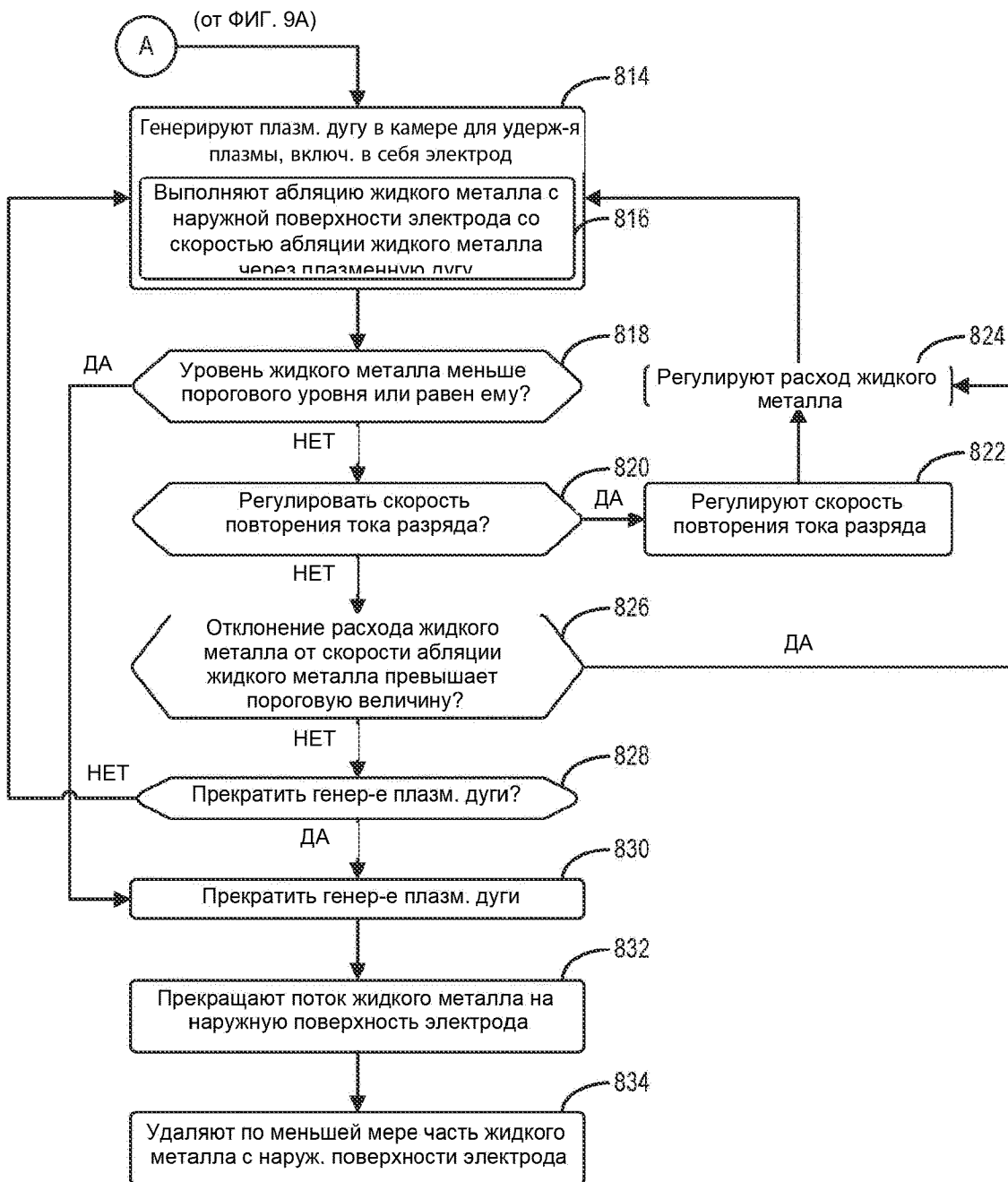


ФИГ. 8В

800



ФИГ. 9А



ФИГ. 9В