(19)

# (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

- (45) Дата публикации и выдачи патента 2022.01.28
- (51) Int. Cl. *H05H 3/02* (2006.01) *G21K 1/00* (2006.01)

(21) Номер заявки
 201890602
 (22) Дата подачи заявки

2013.09.04

# (54) ИНЖЕКТОР ПУЧКА НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

(56)

- (31) 2012137795; 61/775,444
- **(32)** 2012.09.04; 2013.03.08
- (33) RU; US
- (43) 2019.03.29
- **(62)** 201590506; 2013.09.04
- (71)(73) Заявитель и патентовладелец: ТАЭ ТЕКНОЛОДЖИЗ, ИНК. (US)
- (72) Изобретатель:
  Бельченко Юрий И., Бурдаков Александр В., Давыденко Владимир И., Димов Геннадий И., Иванов Александр А., Кобец Валерий В. (RU), Смирнов Артем Н., Биндербауэр Михль В., Севиер Дональд Л., Ричардсон Теренс Э. (US)
- (74) Представитель: Медведев В.Н. (RU)

RU-C2-2429591 SU-A-818366 US-A1-4581195 US-A1-4093858

- )39453
- B
- (57) Инжектор пучка нейтральных частиц на основе отрицательных ионов, содержащий источник отрицательных ионов, ускоритель и нейтрализатор для того, чтобы формировать пучок нейтральных частиц приблизительно в 5 МВт с энергией приблизительно 0,50-1,0 МэВ. Ионы, сформированные посредством источника ионов, предварительно ускоряются перед инжекцией в ускоритель высокой энергии посредством электростатического предускорителя на основе многоапертурной сетки, который используется для того, чтобы вытягивать пучки ионов из плазмы и ускорять до некоторой доли требуемой энергии пучка. Пучок из источника ионов проходит через пару отклоняющих магнитов, которые предоставляют возможность пучку смещаться по оси перед поступлением в ускоритель высокой энергии. После ускорения до полной энергии пучок поступает в нейтрализатор, в котором он частично преобразуется в пучок нейтральных частиц. Оставшиеся виды ионов разделяются посредством магнита и направляются в преобразователи электростатической энергии. Пучок нейтральных частиц проходит через запорный клапан и поступает в плазменную камеру.



### 039453

# Область техники

Предмет изобретения, описанный в данном документе, в общем, относится к инжекторам пучка нейтральных частиц, а более конкретно, к инжектору пучка нейтральных частиц на основе отрицательных ионов.

#### Предшествующий уровень техники

Фактически, до сегодняшнего дня пучки нейтральных частиц, используемые при исследованиях в области термоядерного синтеза, обработки материалов, травлении, стерилизации и в других вариантах применения, образуются из положительных ионов. Положительные ионы изотопа водорода вытягиваются и ускоряются из газоразрядной плазмы посредством электростатических полей. Сразу после заземленной плоскости ускорителя они поступают в газовый элемент, в котором они подвергаются обеим реакциям перезарядки для получения реакций на основе ионизации электронами и ударной ионизации для дополнительного сдерживания. Поскольку сечение перезарядки падает намного быстрее с увеличением энергии, чем сечение ионизации, доля равновесных нейтральных частиц в толстом газовом элементе начинает быстро падать при энергиях, превышающих 60 кэВ, для частиц водорода. Для вариантов применения пучка нейтральных частиц на основе ионов изотопа водорода, требующих энергий значительно выше этой, необходимо формировать и ускорять отрицательные ионы и затем преобразовывать их в нейтральные частицы в тонком газовом элементе, что может приводить к доле нейтральных частиц приблизительно в 60% в широком диапазоне энергий вплоть до нескольких МэВ. Даже еще более высокие доли нейтральных частиц могут быть получены, если плазменный или фотонный элемент используется для того, чтобы преобразовывать пучки отрицательных ионов высокой энергии в нейтральные частицы. В случае фотонного элемента, в котором энергия фотона превышает электронное сродство водорода, доли нейтральных частиц могут составлять почти 100%. Необходимо отметить, что в первый раз идея применения отрицательных ионов в физике ускорителей сформулирована Alvarez более 50 лет назад [1].

Поскольку пучки нейтральных частиц для возбуждения и нагрева током в больших термоядерных устройствах будущего, а также некоторые варианты применения в современных устройствах требуют энергий, существенно превышающих рамки, доступные при использовании положительных ионов, в последние годы разрабатываются пучки нейтральных частиц на основе отрицательных ионов. Тем не менее токи пучка, достигаемые к настоящему моменту, значительно меньше токов пучка, формируемых вполне обычным способом посредством источников положительных ионов. Физической причиной меньшей производительности источников отрицательных ионов в отношении тока пучка является низкое электронное сродство водорода, которое составляет только 0,75 эВ. Следовательно, гораздо труднее формировать отрицательные ионы водорода, чем их положительные эквиваленты. Для новорожденных отрицательных ионов также довольно трудно достигать области вытягивания без столкновений с электронами большой энергии, которые с очень высокой вероятностью приводят к потерям избыточного слабосвязанного электрона. Вытягивание ионов Н<sup>-</sup> из плазмы для того, чтобы образовывать пучок, аналогично является более сложным, чем для ионов Н<sup>+</sup>, поскольку отрицательные ионы сопровождаются гораздо большим током электронов, если только не применяются меры по сдерживанию. Поскольку сечение для столкновительной обдирки электрона из иона Н<sup>-</sup> для того, чтобы формировать атом, значительно превышает сечение для ионов Н<sup>+</sup> для того, чтобы получать электрон из молекулы водорода, доля ионов, преобразованных в нейтральные частицы во время ускорения, может быть значительной, если плотность газопровода в пути ускорителя не минимизируется посредством работы источника ионов при низком давлении. Ионы, преждевременно нейтрализованные во время ускорения, образуют остаток низкой энергии и, в общем, имеют большую дивергенцию, чем ионы, которые испытывают потенциал полного ускорения.

Нейтрализация пучка ускоренных отрицательных ионов может выполняться в газовой мишени с эффективностью приблизительно в 60%. Использование плазменных и фотонных мишеней предоставляет возможность дополнительного повышения эффективности нейтрализации отрицательных ионов. Общая эффективность использования энергии инжектора может быть повышена посредством рекуперации энергии видов ионов, остающихся в пучке после прохождения нейтрализатора.

Принципиальная схема инжектора пучка нейтральных частиц с высоким уровнем мощности для ITER-токамака, который также является типичным для других рассматриваемых систем магнитного удержания плазмы в реакторе, показана на фиг. 3 [2]. Базовыми компонентами инжектора являются сильноточный источник 31 отрицательных ионов, ускоритель 32 ионов, нейтрализатор 33 и магнитный разделитель заряженного компонента перезаряженного пучка с приемниками/рекуператорами ионов. Дополнительно инжектор может содержать криогенный насос 34, сброс 35 остаточных ионов, калориметр 36, затвор 37 и клапан 38.

Чтобы поддерживать требуемые вакуумные условия в инжекторе, типично используется система высоковакуумной откачки с крупными запорными клапанами, отсекающими поток пучка от плазменного устройства и/или предоставляющими доступ к главным элементам инжектора. Параметры пучка измеряются посредством использования выдвижных калориметрических мишеней, а также посредством неразрушающих оптических способов. Формирование мощных пучков нейтральных частиц требует использования соответствующего источника питания.

Согласно принципу формирования источники отрицательных ионов могут быть разделены на сле-

дующие группы:

источники объемного формирования (плазменные), в которых ионы формируются в объеме плазмы; источники поверхностного формирования, в которых ионы формируются на поверхности электродов или специальных мишеней;

поверхностно-плазменные источники, в которых ионы формируются на поверхностях электродов, взаимодействующих с плазменными частицами, которые разработаны Новосибирской группой [3]; и

источники перезарядки, в которых отрицательные ионы формируются вследствие перезарядки пуч-ков ускоренных положительных ионов на различных мишенях.

Чтобы формировать плазму в современных объемных источниках ионов Н<sup>-</sup>, аналогичных источнику положительных ионов, используются дуговые разряды с термоэлектронными нитями накала или полыми катодами, а также радиочастотные разряды в водороде. Для улучшения удержания электронов при разряде и для снижения плотности водорода в газоразрядной камере, что представляет важность для источников отрицательных ионов, используются разряды в магнитном поле. Широко используются системы с внешним магнитным полем (т.е. с геометрией Пеннинга или магнетронной геометрией электродов, с колебанием электронов в продольном магнитном поле "отражательного" разряда) и системы с периферийным магнитным полем (многополюсные). Вид в сечении разрядной камеры с периферийным магнитным полем, разработанным для струйного инжектора пучка нейтральных частиц JET, показан на фиг. 4 [3]. Магнитное поле на периферии плазменной камеры формируется посредством постоянных магнитов, установленных на его внешней поверхности. Магниты размещаются в рядах, в которых направление намагничивания является постоянным или изменяется в порядке со смещением, так что линии магнитного поля имеют геометрию линейных выступов 41 или заостренных в шахматном порядке выступов 42 около стенки. Дополнительно упомянутая камера содержит термоэлектронный катод 43. Вследствие магнитов с линейными выступами возникает дополнительное поле 44 "фильтра".

Применение систем с многополюсным магнитным полем на периферии плазменных камер, в частности, дает возможность системам поддерживать плотную плазму в источнике при сниженном рабочем давлении газа в камере до 1-4 Па (без цезия) и до 0,3 Па в системах с цезием [4]. Такое уменьшение плотности водорода в разрядной камере, в частности, представляет важность для сильноточных многоапертурных гигантских источников ионов, которые разрабатываются для применений в ходе исследований в области термоядерного синтеза.

В настоящее время источники ионов на основе поверхностно-плазменного формирования считаются наиболее подходящими для формирования сильноточных пучков отрицательных ионов.

В источниках ионов на основе поверхностно-плазменного формирования ионы формируются во взаимодействии между частицами, имеющими достаточную энергию и поверхность с низкой работой выхода. Этот эффект может повышаться посредством щелочного покрытия поверхности, подвергаемой бомбардировке. Предусмотрено два основных процесса, а именно термодинамически равновесная поверхностная ионизация, при которой медленный атом или молекула, сталкивающаяся с поверхностью, испускается обратно в качестве положительного или отрицательного иона после среднего времени пребывания, и неравновесное (кинетическое) атомно-поверхностное взаимодействие, при котором отрицательные ионы формируются посредством распыления, ударной десорбции (в отличие от термодесорбции, при которой десорбируются тепловые частицы) или отражения при наличии покрытия из щелочных металлов. В процессе термодинамически равновесной ионизации адсорбированные частицы отрываются от поверхности в условиях теплового равновесия. Коэффициент ионизации частиц, уходящих с поверхности, определяется посредством формулы Саха и предположительно составляет очень небольшие ~0,02%.

Процесс неравновесной кинетической поверхностной ионизации предположительно является намного более эффективными на поверхности и имеет достаточно низкую работу выхода, сравнимую с электронным сродством отрицательного иона. В ходе этого процесса отрицательный ион отрывается от поверхности, преодолевая подповерхностный барьер с использованием кинетической энергии, полученной из первичной частицы. Около поверхности энергетический уровень дополнительного электрона ниже верхнего уровня Ферми электронов в металле, и этот уровень может очень легко заниматься посредством туннелирования электронов из металла. Во время ионного перемещения с поверхности он преодолевает потенциальный барьер, сформированный посредством зеркального заряда

$$U_{image} = -\frac{e^2}{4x}$$

Поле картины распределения зарядов усиливает энергетический уровень дополнительного электрона относительно энергетических уровней электронов в металле. Начиная с некоторого критического расстояния, уровень дополнительного электрона становится выше верхнего энергетического уровня электронов в металле, и резонансное туннелирование возвращает электрон от уходящего иона обратно в металл. В случае, если частица отрывается достаточно быстро, коэффициент отрицательной ионизации предположительно является довольно высоким для поверхности с низкой работой выхода, которая может предоставляться посредством нанесения покрытия из щелочного металла, в частности цезия. Экспериментально показано, что степень отрицательной ионизации частиц водорода, отрывающихся от этой поверхности с пониженной работой выхода, может достигать

$$\beta^{-} = \frac{j^{-}}{j^{-} + j^{0} + j^{+}} = 0,67$$

Следует отметить, что работа выхода на вольфрамовых поверхностях имеет минимальное значение с покрытием Cs в 0,6 монослоев (на поверхности вольфрамового кристалла 110).

Для разработки источников отрицательных ионов водорода важно, чтобы интегральный выход отрицательных ионов был достаточно высоким, К<sup>\*</sup>=9-25%, для столкновений атомов водорода и положительных ионов с энергиями 3-25 эВ с поверхностями с низкой работой выхода, таких как Mo+Cs, W+Cs [5]. В частности (см. фиг. 5), при бомбардировке цезированной молибденовой поверхности посредством атомов Франка-Кондона с энергией, превышающей 2 эВ, интегральная эффективность преобразования в ионы Н<sup>\*</sup> может достигать К<sup>\*</sup>~8%.

В поверхностно-плазменных источниках (SPS) [3] формирование отрицательных ионов реализуется за счет кинетической поверхностной ионизации, а именно процессов распыления, десорбции или отражения на электродах, контактирующих с газоразрядной плазмой. Электроды специальных эмиттеров с пониженной работой выхода используются в SPS для улучшения формирования отрицательных ионов. Как правило, добавление небольшого количества цезия в разряд дает возможность получать повышение яркости и интенсивности в коллекторе пучков Н<sup>°</sup>. Введение атомов цезия в разряд значительно снижает сопутствующий поток электронов, вытягиваемых с отрицательными ионами.

В SPS газоразрядная плазма выполняет несколько функций, а именно она формирует интенсивные потоки частиц, бомбардирующих электроды; плазменная оболочка, смежная с электродом, формирует ускорение ионов, тем самым повышая энергию бомбардирующих частиц; отрицательные ионы, которые формируются в электродах с отрицательным потенциалом, ускоряются посредством потенциала плазменной оболочки и проникают через плазменный слой в область вытягивания без существенной деструкции. Интенсивное формирование отрицательных ионов с довольно высокими эффективностями использования мощности и газа получено в различных модификациях SPS при условиях "грязного" газового разряда и интенсивной бомбардировки электродов.

Несколько источников SPS разработаны для больших термоядерных устройств, таких как LHD, JT-60U и для международного (ITER) токамака.

Типичные признаки этих источников могут пониматься при рассмотрении инжектора стелларатора LHD [4], который показан на фиг. 6 [4, 6]. Плазма дугового разряда формируется в большой магнитной многополюсной лопастной ограждающей камере объемом ~100 л. 24 вольфрамовые нити 62 накала поддерживают дугу в 3 кА, ~80 В при давлении водорода приблизительно в 0,3-0,4 Па. Внешний магнитный фильтр 63 с максимальным полем в центре ~50 Гс предоставляет плотность электронов и снижение температуры в области вытягивания около плазменного электрода. Положительное смещение плазменного электрода 61 (~10 В) снижает сопутствующий поток электронов. Отрицательные ионы формируются на плазменном электроде 61, покрытом посредством оптимального слоя цезия. Внешние цезиевые печи (три для одного источника), оснащенные пневматическими клапанами, подают распределенное введение атомов цезия. Формирование отрицательных ионов достигает максимума при оптимальной температуре плазменного электрода 200-250°С. Плазменный электрод 61 термически изолируется, и его температура определяется посредством плазменного разряда силовых нагрузок. Дополнительно упомянутый инжектор содержит HV-изолятор 64.

Четырехэлектродная многоапертурная ионно-оптическая система, которая используется в источнике ионов LHD, показана на фиг. 7 [6]. Отрицательные ионы вытягиваются через 770 апертур для излучения с диаметром по 1,4 см. Апертуры занимают область 25×125 см<sup>2</sup> на плазменном электроде. Небольшие постоянные магниты встраиваются в вытягивающую сетку 73 между апертурами, установленную позади плазменной сетки 72, чтобы отклонять совместно вытягиваемые электроны из пучка 71 на стенку вытягивающего электрода. Дополнительная электронная задерживающая сетка 74, установленная позади вытягивающей сетки 73, задерживает вторичные электроны, обратно рассеиваемые или испускаемые из стенок вытягивающих электродов. Многощелевая заземленная сетка 75 с высокой прозрачностью используется в источнике ионов. Это уменьшает область пересечения пучков 71, тем самым повышая способность удержания напряжения и понижая давление газа в промежутках на коэффициент 2,5 с соответствующим уменьшением потерь на обдирку пучка 71. Как вытягивающий электрод, так и заземленный электрод имеют водяное охлаждение.

Введение атомов цезия в многоострийный источник предоставляет 5-кратное увеличение тока вытягиваемых отрицательных ионов и линейный рост выхода ионов Н<sup>-</sup> в широком диапазоне мощностей разряда и давлений при заполнении водородом. Другими важными преимуществами введения атомов цезия являются ~10-кратное снижение совместно вытягиваемого электронного тока и существенное снижение давления водорода при разряде до 0,3 Па.

Многоострийные источники в LHD обычно предоставляют ток ионов приблизительно в 30 A с плотностью тока 30 мA/см<sup>2</sup> в импульсах длительностью 2 с [6]. Главными проблемами для источников

ионов LHD являются блокирование цезия, который вводится в дуговую камеру, посредством вольфрама, распыляемого из нитей накала, и снижение способности удержания высокого напряжения при работе в режиме длительных импульсов с высоким уровнем мощности.

Инжектор пучка нейтральных частиц на основе отрицательных ионов LHD имеет два источника ионов, взаимодействующих с водородом при номинальной энергии пучка 180 кэВ. Каждый инжектор достигает номинальной мощности инжекции в 5 МВт в течение импульса в 128 с, так что каждый источник ионов предоставляет пучок нейтральных частиц в 2,5 МВт. Фиг. 8А и 8В показывают инжектор пучка нейтральных частиц LHD. Упомянутый инжектор, как правило, содержит: источник 810 отрицательных ионов, запорный клапан 811, вакуумный резервуар 812 для источника ионов, криосорбционный насос 813, нейтрализатор 814, вакуумный резервуар 815 для сброс пуска, отклоняющий магнит 816 для ионов, сброс 817 пучка, калориметр 818, дрейфовую трубку 819, порт для инжекции 820, крупное винтовое устройство 821 и основание 822. Фокусное расстояние источника ионов составляет 13 м, а точка поворота двух источников находится на 15,4 м ниже. Порт для инжекции имеет длину приблизительно 3 м, причем самая узкая часть имеет диаметр 52 см и длину 68 см.

Источники ионов с радиочастотными плазменными формирователями и формирование отрицательных ионов на плазменном электроде, покрытом цезием, разработаны в IPP Garching. Радиочастотные формирователи формируют более чистую плазму, так что в этих источниках нет блокирования цезия посредством вольфрама. Вытягивание в установившемся режиме импульса пучка отрицательных ионов с током пучка 1 А, энергией ~20 кВ и длительностью 3600 с продемонстрировано IPP в 2011 году.

В настоящее время инжекторы пучка нейтральных частиц высокой энергии, которые разрабатываются для термоядерных устройств следующей ступени развития, таких как, например, ITER-токамак, не демонстрируют устойчивую работу при требуемой энергии в 1 МэВ и работу в установившемся режиме или в режиме незатухающей волны (CW) при достаточно высоком токе. Следовательно, существует необходимость разрабатывать практически осуществимые решения, если можно разрешать проблемы, мешающие достижению целевых параметров пучка, таких как, например, энергия пучка в диапазоне 500-1000 кэВ, эффективная плотность тока в нейтральных частицах главного порта резервуара 100-200 А/м<sup>3</sup>, мощность в расчете на один инжектор пучка нейтральных частиц приблизительно 5-20 МВт, длительность импульса 1000 с и газовые нагрузки, вводимые посредством инжектора пучка, меньше 1-2% тока пучка. Следует отметить, что достижение этой цели становится гораздо менее затратным, если ток отрицательных ионов в модуле инжектора уменьшается до вытягивающего ионного тока до 8-10 А по сравнению с вытягивающим током ионов в 40 А для ITER-пучка. Ступенчатое снижение вытягиваемого тока и мощности пучка должно приводить к сильным изменениям конструкции ключевых элементов источника ионов в форме инжектора и ускорителя высокой энергии, так что становятся применимыми намного более тщательно проработанные технологии и подходы, что повышает надежность инжектора. Следовательно, в ситуации на данный момент предлагается вытягиваемый ток в 8-10 А в расчете на один модуль при допущении, что требуемая выводимая мощность инжекции может быть получена с использованием нескольких модулей инжектора, формирующих пучки с малой расходимостью и высокой плотностью тока.

Производительность поверхностно-плазменных источников достаточно хорошо задокументирована, и работающие на сегодняшний день несколько источников ионов формируют непрерывные масштабируемые пучки ионов сверх 1 А или выше. До сих пор основные параметры инжекторов пучка нейтральных частиц, такие как мощность пучка и длительность импульса, довольно далеки от требуемых для рассматриваемого инжектора. Текущее состояние разработки этих инжекторов можно понять из таблицы.

	TAE	ITER	JT-60U	LHD	IPP	CEA-
						JAERI
Плотность тока		200 D-	100 D-	350 H-	230 D-	216 D-
(A/m <sup>2</sup> )		280 H-			330 H-	195 H-
Энергия пучка	1000 H-	1000 D-	365	186	9	25
(кэВ)		100 H-				
Длительность	≥1000	3600 D-	19	10	<6	5
импульса (сек)		3 H-				1000
Отношение числа		1	~0,25	<1	<1	<1
электронов к						
числу ионов						
Давление (па)	0,3	0,3	0,26	0,3	0,3	0,35

Комментарии	Комбини	1-		Источник		Источ-		Радио-	Источ-
	рованны	le		в	виде	ник	в	частотный	ник
	числа	еще	не	нит	и	виде		источник,	Kamaboko
	достигн	нуты,		нак	ала	нити		неполное	III
	проводя	нтся				накал	a	вытягива-	(JAERI)
	полно-							ние,	на
	масштаб	бные						испыта-	MANTIS
	экспери	имент	ы					тельный	(CEA)
	в		IPP					стенд,	
	Garchir	ng	-					известный	
	источни	1K						как	
	длителн	-ных						BATMAN,	
	импуль-	сов						работает	
	(MANITU	J)	на					при 2 Л/20	
	сегодня	чшний						кВ в	
	день							течение ~б	
	обеспеч	иивае	т					сек	
	1 A/20	) кВ	в						
	течение	e 3	600						
	сек при	1 D-							

Следовательно, желательно предоставлять улучшенный инжектор пучка нейтральных частиц.

# Краткое изложение сущности изобретения

Варианты осуществления, предусмотренные в данном документе, направлены на системы и способы для инжектора пучка нейтральных частиц на основе отрицательных ионов. Инжектор пучка нейтральных частиц на основе отрицательных ионов содержит источник ионов, ускоритель и нейтрализатор для того, чтобы формировать пучок нейтральных частиц приблизительно в 5 МВт с энергией приблизительно в,50-1,0 МэВ. Источник ионов находится в вакуумном баке и формирует пучок отрицательных ионов на 9 А. Ионы, сформированые посредством источника ионов, предварительно ускоряются до 120 кэВ перед инжекцией в ускоритель высокой энергии посредством электростатического предускорителя на основе многоапертурной сетки в источнике ионов, который используется для того, чтобы вытягивать пучки ионов из плазмы и ускорять до некоторой доли требуемой энергии пучка. Пучок в 120 кэВ из источника ионов проходит через пару отклоняющих магнитов, которые предоставляют возможность пучку смещаться по оси перед поступлением в ускоритель высокой энергии. После ускорения до полной энергии пучок поступает в нейтрализатор, в котором он частично преобразуется в пучок нейтральных частиц. Оставшиеся виды ионов разделяются посредством магнита и направляются в преобразователи электростатической энергии. Пучок нейтральных частиц проходит через запорный клапан и поступает в плазменную камеру.

Поддерживается повышенная температура плазменных формирователей и внутренних стенок плазменной камеры источника ионов (150-200°С), чтобы предотвращать накопление цезия на их поверхностях. Распределительный коллектор предоставляется для того, чтобы подавать цезий непосредственно на поверхность плазменных решеток, а не в плазму. Это представляет собой отличие от существующих источников ионов, которые подают цезий непосредственно в плазменную разрядную камеру.

Магнитное поле, используемое для того, чтобы отклонять совместно вытягиваемые электроны в областях вытягивания и предварительного ускорения ионов, формируется посредством внешних магнитов, а не посредством магнитов, встроенных в корпус сетки, как выполнено в предшествующих конструкциях. Отсутствие встроенных "низкотемпературных" магнитов в сетках предоставляет возможность их нагрева до повышенных температур. Предшествующие конструкции зачастую используют магниты, встроенные в корпус сетки, что часто приводит к значительному снижению тока вытягиваемого пучка и препятствует работе в режиме повышенной температуры, а также надлежащей производительности нагрева/охлаждения.

Ускоритель высокого напряжения не связан непосредственно с источником ионов, а отделен от источника ионов посредством переходной зоны (линии транспортировки пучка низкой энергии - LEBT) с отклоняющими магнитами, вакуумными насосами и цезиевыми ловушками. Переходная зона перехватывает и удаляет большинство совместно протекающих частиц, включающих в себя электроны, фотоны и нейтральные частицы из пучка, откачивает газ, выделяющийся из источника ионов, и предотвращает достижение им ускорителя высокого напряжения, предотвращает вытекание цезия из источника ионов и проникновение в ускоритель высокого напряжения, предотвращает поступление электронов и нейтральных частиц, производимых посредством обдирки отрицательных ионов, в ускоритель высокого напряжения. В предшествующих конструкциях источник ионов непосредственно соединен с ускорителем высокого напряжения, что зачастую приводит к подверженности ускорителя высокого напряжения тому, что газ, заряженные частицы и цезий вытекают из источника ионов и втекают в него.

Отклоняющие магниты в LEBT отклоняют и фокусируют пучок по оси ускорителя и тем самым

компенсируют все смещения и отклонения пучка во время транспортировки через магнитное поле источника ионов. Смещение между осями предускорителя и ускорителя высокого напряжения уменьшает поступление совместно протекающих частиц в ускоритель высокого напряжения и предотвращает обратное протекание сильноускоренных частиц (положительных ионов и нейтральных частиц) в предускоритель и источник ионов. Фокусировка пучка также способствует гомогенности пучка, поступающего в ускоритель, по сравнению с системами на основе многоапертурной сетки.

Нейтрализатор включает в себя плазменный нейтрализатор и нейтрализатор фотонов. Плазменный нейтрализатор основан на многоострийной системе удержания плазмы с постоянными магнитами сильных магнитных полей на стенках. Фотонный нейтрализатор является фотонной ловушкой на основе цилиндрического резонатора со стенками с высокой степенью отражения и откачки с помощью лазеров с высокой эффективностью. Эти технологии нейтрализаторов никогда не рассматривались для применений в серийных инжекторах пучка нейтральных частиц.

Другие системы, способы, признаки и преимущества примерных вариантов осуществления должны становиться очевидными специалистам в данной области техники после изучения прилагаемых чертежей и подробного описания.

#### Краткое описание чертежей

Подробности примерных вариантов осуществления, включающие в себя структуру и режим работы, могут быть выявлены частично посредством изучения прилагаемых чертежей, на которых аналогичные ссылки с номерами ссылаются на аналогичные части. Компоненты на чертежах необязательно должны быть выполнены в масштабе, вместо этого акцент делается на иллюстрацию принципов изобретения. Более того, все иллюстрации предназначены для того, чтобы передавать общие идеи, при этом относительные размеры, формы и другие подробные атрибуты могут иллюстрироваться схематично, а не буквально или точно.

Фиг. 1 является видом сверху схемы инжектора пучка нейтральных частиц на основе отрицательных ионов.

Фиг. 2 является изометрическим видом в сечении инжектора пучка нейтральных частиц на основе отрицательных ионов, показанного на фиг. 1.

Фиг. 3 является видом сверху инжектора с высоким уровнем мощности нейтральных частиц для ITER-токамака.

Фиг. 4 является изометрическим видом в сечении разрядной камеры с периферийным многополюсным магнитным полем для струйного инжектора пучка нейтральных частиц.

Фиг. 5 является диаграммой, показывающей интегральный выход отрицательных ионов, образуемых посредством бомбардировки поверхности Mo+Cs нейтральными атомами H и положительным молекулярным H в качестве функции от энергии падающего потока. Выход повышается посредством использования цезирования постоянным током по сравнению только с предварительным цезированием поверхности.

Фиг. 6 является видом сверху источника отрицательных ионов для LHD.

Фиг. 7 является схематическим видом многоапертурной ионной оптической системы для источника LHD.

LIID.

Фиг. 8А и 8В являются видами сверху и сбоку инжектора пучка нейтральных частиц LHD.

Фиг. 9 является видом в сечении источника ионов.

Фиг. 10 является видом в сечении источника атомов водорода низкой энергии.

Фиг. 11 является графиком, показывающим траектории ионов Н в тракте низкой энергии.

Фиг. 12 является изометрическим видом ускорителя.

Фиг. 13 является диаграммой, показывающей траектории иона в ускоряющей трубке.

Фиг. 14 является изометрическим видом триплета квадрупольных линз.

Фиг. 15 является диаграммой, показывающей вид сверху (a) и вид сбоку (b) траекторий иона в ускорителе линии транспортировки пучка высокой энергии.

Фиг. 16 является изометрическим видом компоновки плазменных мишеней.

Фиг. 17 является диаграммой, показывающей результаты двумерных вычислений замедления пучка ионов в рекуператоре.

Следует отметить, что элементы аналогичных структур или функций, в общем, представляются посредством аналогичных ссылок с номерами для целей иллюстрации на всех чертежах. Также следует отметить, что чертежи предназначены только для того, чтобы упрощать описание предпочтительных вариантов осуществления.

#### Описание предпочтительных вариантов изобретения

Каждый из дополнительных признаков и идей, раскрытых ниже, может быть использован отдельно или в сочетании с другими признаками и идеями, чтобы предоставлять новый инжектор пучка нейтральных частиц на основе отрицательных ионов. Далее подробнее описаны характерные примеры вариантов осуществления, описанных в данном документе, причем эти примеры используют многие из этих дополнительных признаков и идей как отдельно, так и в комбинации, со ссылкой на прилагаемые чертежи. Это подробное описание предназначено только для того, чтобы обучать специалистов в области техники дополнительным подробностям для использования на практике предпочтительных аспектов идей настоящего изобретения, и не предназначено для того, чтобы ограничивать объем изобретения. Следовательно, комбинации признаков и этапов, раскрытых в последующем подробном описании, могут быть необязательными для того, чтобы использовать изобретение на практике в самом широком смысле, а вместо этого изучаются просто для того, чтобы конкретно описывать типичные примеры настоящих идей.

Более того, различные признаки типичных примеров и зависимые пункты формулы изобретения могут быть комбинированы способами, которые не перечислены конкретно и явно, чтобы предоставлять дополнительные полезные варианты осуществления настоящих идей. Помимо этого, следует явно отметить, что все признаки, раскрытые в описании и/или формуле изобретения, имеют намерение раскрытия отдельно и независимо друг от друга для целей исходного раскрытия сущности, а также для целей ограничения заявленного предмета изобретения, независимо от компоновок признаков в вариантах осуществления и/или в формуле изобретения. Также следует отметить, что все диапазоны значений или указатели групп объектов раскрытия каждое возможное промежуточное значение или промежуточный объект для целей исходного раскрытия сущности, а также для целей ограничения.

Варианты осуществления, предусмотренные в данном документе, направлены на новый инжектор пучка нейтральных частиц на основе отрицательных ионов с энергией предпочтительно приблизительно 500-1000 кэВ и высокой общей энергетической эффективностью. Предпочтительная компоновка варианта осуществления инжектора 100 пучка нейтральных частиц на основе отрицательных ионов проиллюстрирована на фиг. 1 и 2. Как проиллюстрировано, инжектор 100 включает в себя источник 110 ионов, запорный клапан 120, отклоняющие магниты 130 для отклонения линии пучка низкой энергии, опорный изолятор 140, ускоритель 150 высокой энергии, запорный клапан 160, трубку-нейтрализатор (показана схематично) 170, разделительный магнит (показан схематично) 180, запорный клапан 190, панели 200 и 202 для откачки, вакуумный бак 210 (который является частью вакуумного резервуара 250, поясненного ниже), криосорбционные насосы 220 и триплет квадрупольных линз 230. Инжектор 100, как отмечено выше, содержит источник 110 ионов, ускоритель 150 и нейтрализатор 170 для того, чтобы формировать пучок нейтральных частиц приблизительно в 5 МВт с энергией приблизительно 0,50-1,0 МэВ. Источник 110 ионов находится в вакуумном баке 210 и формирует пучок отрицательных ионов на 9 А. Вакуумный бак 210 смещается к -880 кВ, т.е. относительно земли, и установлен на изоляционных опорах 140 внутри бака 240 большего диаметра, заполненного газом SF<sub>6</sub>. Ионы, сформированные посредством источника ионов, предварительно ускоряются до 120 кэВ перед инжекцией в ускоритель 150 высокой энергии посредством электростатического предускорителя 111 на основе многоапертурной сетки (см. фиг. 9) в источнике 110 ионов, который используется для того, чтобы вытягивать пучки ионов из плазмы и ускорять до некоторой доли требуемой энергии пучка. Пучок в 120 кэВ из источника 110 ионов проходит через пару отклоняющих магнитов 130, которые предоставляют возможность пучку сдвигаться с оси перед поступлением в ускоритель 150 высокой энергии. Панели 202 для откачки, показанные между отклоняющими магнитами 130, включают в себя перегородку и цезиевую ловушку.

Допускается, что эффективность использования газа источника 110 ионов составляет приблизительно 30%. Планируемый ток пучка отрицательных ионов в 9-10 А соответствует напуску газа 6-7 1. Торр/с в источнике 110 ионов. Нейтральный газ, вытекающий из источника 110 ионов, повышает свое среднее давление в предускорителе 111 приблизительно до  $2 \times 10^{-4}$  Topp. При этом давлении нейтральный газ приводит к ~10%-ным потерям на обдирку пучка ионов в предускорителе 111. Между отклоняющими магнитами 130 предусмотрены сбросы (не показаны) для нейтральных частиц, которые являются следствием первичного пучка отрицательных ионов. Также предусмотрены сбросы (не показаны) для положительных ионов, обратно протекающих из ускорителя 150 высокой энергии. Область 205 линии транспортировки пучка низкой энергии с дифференциальной откачкой из панелей 200 для откачки используется сразу после предварительного ускорения, чтобы снижать давление газа до ~10<sup>-6</sup> Торр до того, как он достигает ускорителя 150 высокой энергии. Это вводит дополнительные потери пучка в ~5%, но поскольку это происходит при низкой энергии предварительного ускорения, потери мощности являются относительно небольшими. Потери на перезарядку в ускорителе 150 высокой энергии ниже 1% при фоновом давлении 10<sup>-6</sup> Торр.

После ускорения до полной энергии в 1 МэВ пучок поступает в нейтрализатор 170, в котором он частично преобразуется в пучок нейтральных частиц. Оставшиеся виды ионов разделяются посредством магнита 180 и направляются в преобразователи электростатической энергии (не показаны). Пучок нейтральных частиц проходит через запорный клапан 190 и поступает в плазменную камеру 270.

Вакуумный резервуар 250 разбивается на две секции. Одна секция содержит предускоритель 111 и линию 205 пучка низкой энергии в первом вакуумном баке 210. Другая секция размещает линию 265 пучка высокой энергии, нейтрализатор 170 и преобразователи/рекуператоры энергии заряженных частиц во втором вакуумном баке 255. Секции вакуумного резервуара 250 соединяются через камеру 260 с трубкой-ускорителем 150 высокой энергии внутри.

Первый вакуумный бак 210 является вакуумной границей предускорителя 111 и линии 205 пучка

низкой энергии, и в баке или внешнем резервуаре 240 большего диаметра создается повышенное давление  $SF_6$  для изоляции высокого напряжения. Вакуумные баки 210 и 255 выступают в качестве опорной конструкции для внутреннего оборудования, такого как магниты 130, криосорбционные насосы 220 и т.д. Отвод тепла из внутренних переносящих тепло компонентов должен осуществляться с помощью охлаждающих трубок, которые должны иметь разрывы изоляции в случае первого вакуумного бака 210, который смещается до -880 кВ.

Источник ионов.

Принципиальная схема источника 110 ионов показана на фиг. 9. Источник ионов включает в себя электростатические многоапертурные предварительно ускоряющие сетки 111, керамические изоляторы 112, радиочастотные плазменные формирователи 113, постоянные магниты 114, плазменную камеру 115, каналы и коллекторы 116 для охлаждающей воды и газовые клапаны 117. В источнике 110 ионов цезированная молибденовая поверхность плазменных предварительно ускоряющих сеток 111 используется для того, чтобы преобразовывать положительные ионы и нейтральные атомы, образуемые посредством плазменных формирователей 113, в отрицательные ионы в объеме расширения плазмы (объеме между формирователями 113 и сетками 111, указываемом посредством скобки с меткой "PE" на фиг. 9) с удержанием в форме магнитной многополюсной лопасти, как обеспечивается посредством постоянных магнитов 114.

Напряжение положительного смещения для приема электронов в плазменных предварительно ускоряющих сетках 111 применяется к оптимизированным условиям для формирования отрицательных ионов. Придание геометрических форм апертурам 111В в плазменных предварительно ускоряющих сетках 111 используется для того, чтобы фокусировать ионы Н в апертуры 111В вытягивающей сетки. Небольшой поперечный магнитный фильтр, сформированный посредством внешних постоянных магнитов 114, используется для того, чтобы снижать температуру электронов, рассеиваемых из области формирователя или области РЕ плазменного эмиттера плазменной камеры 115 в область ЕR вытягивания плазменной камеры 115. Электроны в плазме отражаются от области ER вытягивания посредством поля небольшого поперечного магнитного фильтра, сформированного посредством внешних постоянных магнитов 114. Ионы ускоряются до 120 кэВ перед инжекцией в ускоритель 150 высокой энергии посредством плазменных сеток 111 электростатического многоапертурного предускорителя в источнике 110 ионов. Перед ускорением до высокой энергии пучок ионов имеет диаметр приблизительно 35 см. Источник 110 ионов, следовательно, должен формировать 26 мА/см<sup>2</sup> в апертурах 111В при условии 33%-ной прозрачности в плазменных сетках 111 предускорителя.

Плазма, которая поступает в плазменную камеру 115, формируется посредством решетки плазменных формирователей 113, установленных на заднем фланце 115А плазменной камеры, которой предпочтительно является цилиндрическая медная камера с водяным охлаждением (700 мм в диаметре на 170 мм в длину). Открытый конец плазменной камеры 115 ограничивается посредством плазменных сеток 111 предускорителя системы ускорения и вытягивания.

Предполагается, что отрицательные ионы должны формироваться на поверхности плазменных сеток 111, которые покрыты тонким слоем цезия. Цезий вводится в плазменную камеру 115 посредством использования системы подачи цезия (не показана на фиг. 9).

Источник 110 ионов окружен постоянными магнитами 114 так, что он образует конфигурацию с линейными остриями для удержаний плазмы и первичных электронов. Колонки 114А магнитов на цилиндрической стенке плазменной камеры 115 соединяются в заднем фланце 115А посредством рядов магнитов 114В, которые также имеют линейно-заостренную конфигурацию. Магнитный фильтр около плоскости плазменных сеток 111 разделяет плазменную камеру 115 на плазменный эмиттер PE и область ER вытягивания. Магниты 114C в фильтре устанавливаются во фланце 111А рядом с плазменными сет-ками 111, чтобы предоставлять поперечное магнитное поле (В=107 Гс в центре), которое служит для того, чтобы предотвращать достижение области ER вытягивания посредством первичных электронов большой энергии, исходящих из формирователей 113 ионов. Тем не менее положительные ионы и электроны низкой энергии могут рассеиваться через фильтр в области ER вытягивания.

Система 111 вытягивания и предварительного ускорения на основе электродов содержит пять электродов 111С, 111D, 111E, 111F и 111G, каждый из которых имеет 142 отверстия или апертуры 111B, образованные ортогонально в них и используемые для того, чтобы предоставлять пучок отрицательных ионов. Вытягивающие апертуры 111В имеют диаметр 18 мм, так что общая площадь вытягивания ионов этих 142 вытягивающих апертур составляет приблизительно 361 см<sup>2</sup>. Плотность отрицательного ионного тока составляет 25 мA/см<sup>2</sup>, и требуется формировать пучок ионов на 9 А. Магнитное поле магнитов 114C в фильтре поступает в промежутки между электростатическими вытягивающими и предварительно ускоряющими сетками 111, чтобы отклонять совместно вытягиваемые электроны на пазы во внутренней поверхности апертур 111B в вытягивающих электродах 111C, 111D и 111E. Магнитное поле магнитов в магнитном фильтре 114C вместе с магнитным полем дополнительных магнитов 114D предоставляет отклонение и перехват электронов, совместно вытягиваемых с отрицательными ионами. Дополнительные магниты 114D включают в себя решетку магнитов, установленных между держателями электродов 111F и 111G ускорителя ускоряющей сетки, расположенной ниже от вытягивающей сетки, содержащей вытягивающей вытягивающей сетки,

гивающие электроды 111С, 111D и 111Е. Третий сетчатый электрод 111Е, который ускоряет отрицательные ионы до энергии 120 кэВ, положительно смещается от заземленного сетчатого электрода 111D, чтобы отражать обратно протекающие положительные ионы, поступающие в предварительно ускоряющую сетку.

Плазменные формирователи 113 включают в себя две альтернативы, а именно радиочастотный плазменный формирователь и атомарный формирователь на основе дугового разряда. Разработанный BINP плазменно-дуговой генератор на основе дугового разряда используется в атомарном формирователе. Признак плазменного генератора на основе дугового разряда состоит в образовании направленной плазменной струи. Ионы в расширяющейся струе перемещаются без столкновений и вследствие ускорения посредством падения амбиполярного плазменного потенциала получают энергии ~5-20 эВ. Плазменная струя может быть направлена на наклонную молибденовую или танталовую поверхность преобразователя (см. 320 на фиг. 10), на которой в результате нейтрализации и отражения струи формируется поток атомов водорода. Энергия атомов водорода может быть увеличена за рамки начальных 5-20 эВ посредством отрицательного смещения преобразователя относительно плазменной камеры 115. Эксперименты по получению интенсивных потоков атомов с таким преобразователем проведены в Институте Budker в 1982-1984 гг.

На фиг. 10 разработанная компоновка источника атомов 300 низкой энергии показана как включающая в себя газовый клапан 310, катодную вставку 312, электрический вывод в нагреватель 314, коллекторы 316 охлаждающей воды, электронный эмиттер 318 LaB6 и ионно-атомный преобразователь 320. В экспериментах сформированы поток атомов водорода с эквивалентным током в 20-25 A и энергия, варьирующаяся в диапазоне от 20 до 80 эВ, с эффективностью больше 50%.

Такой источник может быть использован в источнике отрицательных ионов, чтобы снабжать атомы энергией, оптимизированной для эффективного формирования отрицательных ионов на цезированной поверхности плазменных сеток 111.

Линия транспортировки пучка низкой энергии.

Ионы Н<sup>-</sup>, сформированные и предварительно ускоренные до энергии 120 кэВ посредством источника 110 ионов при прохождении вдоль линии 205 транспортировки пучка низкой энергии, смещаются перпендикулярно своему направлению движения на 440 мм с отклонением посредством периферийного магнитного поля источника 110 ионов и посредством магнитного поля двух специальных клиновидных отклоняющих магнитов 130. Это смещение пучка отрицательных ионов в линии 205 транспортировки пучка низкой энергии (как проиллюстрировано на фиг. 11) предоставляется с тем, чтобы разделять области источника 110 ионов и ускорителя 150 высокой энергии. Это смещение используется для того, чтобы не допускать проникновения быстрых атомов, появившихся в результате обдирки пучка H<sup>-</sup>, на остаточном водороде в ускоряющей трубке 150, уменьшать потоки цезия и водорода из источника 110 ионов в ускоряющую трубку 150, а также для задерживания потока вторичных ионов И<sup>-</sup> в линии транспортировки пучка низкой энергии.

Тракт для пучка высокой энергии.

Пучок низкой энергии, исходящий из линии пучка низкой энергии, поступает в традиционный электростатический многоапертурный ускоритель 150, показанный на фиг. 12.

Результаты вычисления ускорения пучка отрицательных ионов на 9 A с учетом доли пространственного заряда показаны на фиг. 13. Ионы ускоряются от энергии 120 кэВ до 1 МэВ. Ускоряющий потенциал на трубке 150 составляет 880 кВ, а шаг потенциала между электродами составляет 110 кВ.

Вычисления показывают, что напряженность поля не превышает 50 кВ/см в оптимизированной ускоряющей трубке 150 на электродах в зонах возможного протекания электронного разряда.

После ускорения пучок проходит через триплет 230 промышленных традиционных квадрупольных линз 231, 232 и 233 (фиг. 14), которые используются для того, чтобы компенсировать незначительную расфокусировку пучка на выходе ускоряющей трубки 150 и образовывать пучок с предпочтительным размером на выходном порте. Триплет 230 устанавливается в вакуумном баке 255 линии 265 транспортировки пучка высокой энергии. Каждая из квадрупольных линз 231, 232 и 233 включает в себя традиционный набор квадрупольных электромагнитов, которые формируют обычные магнитные фокусирующие поля, обеспечиваемые во всех современных традиционных ускорителях частиц.

Вычисленные траектории пучка отрицательных ионов на 9 A с поперечной температурой 12 эВ в ускоряющей трубке 150, квадрупольных линзах 230 и линии 265 транспортировки пучка высокой энергии показаны на фиг. 15. Вычисление соответствует пучку за пределами его фокусирующей точки.

Вычисленный диаметр пучка нейтральных частиц с эквивалентным током 6 А после нейтрализатора на расстоянии 12,5 м на полувысоте радиального профиля составляет 140 мм, и 95% тока пучка находятся в окружности диаметром в 180 мм.

Нейтрализация.

Нейтрализатор 170 на основе фотоотщепления, выбранный для системы пучка, позволяет достигать более чем 95%-ной обдирки пучка ионов. Нейтрализатор 170 содержит решетку ксеноновых ламп и цилиндрическую световую ловушку со стенками с высокой степенью отражения, чтобы предоставлять требуемую плотность фотонов. Охлаждаемые зеркала с коэффициентом отражения, превышающим 0,99, используются для того, чтобы обеспечивать поток мощности на стенках приблизительно в 70 кВт/см<sup>2</sup>. В альтернативе, вместо этого может быть использован плазменный нейтрализатор с использованием традиционной технологии, но за счет незначительного снижения эффективности. Однако эффективность нейтрализации в ~85% плазменного элемента является вполне достаточной, если система восстановления энергии имеет эффективность >95%, в соответствии с прогнозами.

Плазма в плазменном нейтрализаторе удерживается в цилиндрической камере 175 с многополюсным магнитным полем на стенках, которое формируется посредством решетки постоянных магнитов 172. Общий вид удерживающего устройства показан на фиг. 16. Нейтрализатор 170 включает в себя коллекторы 171 охлаждающей воды, постоянные магниты 172, катодные сборки 173 и катоды 174 LaB6.

Цилиндрическая камера 175 имеет длину 1,5-2 м и имеет отверстия на концах для прохождения пучка. Плазма формируется посредством использования нескольких катодных сборок 173, установленных в центре удерживающей камеры 175. Рабочий газ подается около центра устройства 170. В экспериментах с прототипом такого плазменного нейтрализатора 170, следует отметить, что удержание электронов посредством многополюсных магнитных полей 172 на стенках является достаточно хорошим и значительно лучше удержания ионов плазмы. Чтобы выравнивать потери ионов и электронов, в плазме развивается значительный отрицательный потенциал, так что ионы эффективно удерживаются посредством электрического поля.

Достаточно длительное удержание плазмы приводит к относительно низкому уровню мощности разряда, требуемого для того, чтобы поддерживать плотность плазмы приблизительно в 10<sup>13</sup> см<sup>-3</sup> в нейтрализаторе 170.

Рекуперация энергии.

Существуют объективные причины достижения высокой эффективности использования мощности в наших условиях. Прежде всего, это следующее: относительно небольшой ток пучка ионов и рассеяние при низкой энергии. В схеме, описываемой в данном документе, при использовании плазменных или парообразных металлических мишеней можно ожидать, что остаточный ток ионов должен составлять ~3 А после нейтрализатора. Эти потоки отведенных ионов с положительным либо с отрицательным зарядом должны отклоняться через отклоняющий магнит 180 к двум рекуператорам энергии, по одному для положительных и отрицательных ионов соответственно. Проведены численные моделирования замедления этих остаточных пучков отведенных ионов типично с энергией 1 МэВ и 3А в прямых преобразователях в рекуператорах без компенсации пространственного заряда. Прямой преобразователь преобразует существенную часть энергии, содержащейся в остаточном пучке отведенных ионов, непосредственно в электричество и подает остальную часть энергии в качестве высококачественного тепла для включения в тепловой цикл. Прямые преобразователи соответствуют конструкции электростатического многоапертурного замедлителя, вследствие чего последовательные секции заряженных электродов формируют продольные пробойные поля и поглощают кинетическую энергию ионов.

Фиг. 17 показывает результаты двумерных вычислений замедления пучка ионов в преобразователе. Из представленных вычислений следует, что замедление пучка ионов с энергией 1 МэВ до энергии 30 кэВ вполне осуществимо, так что может быть получено значение коэффициента рекуперации 96-97%.

Предыдущие попытки разработки инжекторов пучка нейтральных частиц с высоким уровнем мощности на основе отрицательных ионов проанализированы, чтобы раскрывать критические проблемы, до сих пор мешающие достижению инжекторов со стабильной работой в установившемся режиме ~1 МэВ и мощностью в несколько МВт. Из самых важных выделим следующие:

управление слоем цезия, а также потерями и повторным осаждением (управление температурой и т.д.);

оптимизация поверхностного формирования отрицательных ионов для вытягивания;

разделение совместно протекающих электронов;

негомогенность профиля ионного тока в плазменной сетке вследствие внутренних магнитных полей;

низкая плотность ионного тока;

ускорители усложняются, и множество новых технологий по-прежнему разрабатывается (способность удержания низкого напряжения, крупные изоляторы и т.д.);

обратное протекание положительных ионов;

усовершенствованные технологии нейтрализаторов (плазмы, фотонов) не демонстрируются в релевантных условиях;

преобразование энергии не проработано в достаточной степени;

Блокирование пучка в тракте.

Инновационные решения проблем, предусмотренных в данном документе, могут быть сгруппированы согласно системе, с которой они соединяются, а именно источник отрицательных ионов, вытягивание/ускорение, нейтрализатор, энергетические преобразователи и т.д.

1.0. Источник 110 отрицательных ионов.

1.1. Поддерживается повышенная температура внутренних стенок плазменной камеры 115 и плаз-

менных формирователей 113 (150-200°С), чтобы предотвращать накопление цезия на их поверхностях. Повышенная температура:

предотвращает неуправляемое высвобождение цезия вследствие десорбции/распыления и снижения его проникновения в ионную оптическую систему (сетки 111),

уменьшает абсорбцию и рекомбинацию атомов водорода в слое цезия на стенках,

уменьшает потребление и отравление цезия.

Чтобы достигать этого, высокотемпературная текучая среда циркулирует через все компоненты. Температура поверхностей дополнительно стабилизируется через управление с активной обратной связью, т.е. тепло отводится или добавляется в ходе работы в СW-режиме и в переходных режимах. В отличие от этого подхода, все другие существующие и запланированные инжекторы пучка используют пассивные системы с водяным охлаждением и тепловыми пробоями между охлаждающими трубками и корпусами горячего электрода.

1.2. Цезий подается через распределительный коллектор непосредственно на поверхность плазменных сеток 111, а не в плазму. Подача цезия через распределительный коллектор:

обеспечивает управляемую и распределенную подачу цезия в течение всего времени активации пучка,

предотвращает недостаток цезия типично вследствие блокирования посредством плазмы,

снижает высвобождение цезия из плазмы после его накопления и разблокировки в ходе длительных импульсов.

В отличие от этого, существующие источники ионов подают цезий непосредственно в разрядную камеру.

2.0. Предускоритель 111 (100 кэВ).

2.1. Магнитное поле, используемое для того, чтобы отклонять совместно вытягиваемые электроны в областях вытягивания и предварительного ускорения ионов, формируется посредством внешних магнитов, а не посредством магнитов, встроенных в корпус сетки, как выполнено в предшествующих конструкциях:

линии магнитного поля в промежутках высокого напряжения между сетками являются полностью вогнутыми в направлении отрицательно смещенных сеток, т.е. в направлении плазменной сетки в вытягивающем промежутке и в направлении вытягивающей сетки в предварительно ускоряющем промежутке. Вогнутость линий магнитного поля в направлении отрицательно смещенных сеток предотвращает появление локальных ловушек Пеннинга в промежутках высокого напряжения и улавливание/размножение совместно вытягиваемых электронов, что может происходить в конфигурациях со встроенными магнитами;

электроды ионной оптической системы (IOS) (сетки 111) без встроенных "низкотемпературных" NIB-магнитов могут быть нагреты до повышенной температуры (150-200°С) и обеспечивают возможность отвода тепла в ходе длительных импульсов посредством использования горячей (100-150°С) жидкости;

отсутствие встроенных магнитов оставляет свободное место между апертурами излучения сеток и разрешает введение каналов для более эффективного нагрева/охлаждения электродов.

В отличие от этого, предшествующие конструкции используют магниты, встроенные в тело сетки. Это приводит к созданию статических магнитоэлектрических ловушек в промежутках высокого напряжения, которые улавливают и увеличивают совместно вытягиваемые электроны. Это может приводить к значительному снижению тока вытягиваемого пучка. Это также препятствует работе в режиме повышенной температуры, как и надлежащей производительности нагрева/охлаждения, что является критичным для работы в режиме длительных импульсов.

2.2. Всегда поддерживается повышенная температура всех электродов ионной оптической системы (сетки 111) (150-200°С), чтобы предотвращать накопление цезия на их поверхностях и повышать интенсивность высокого напряжения вытягивающих и предварительно ускоряющих промежутков. В отличие от этого, в традиционных конструкциях электроды охлаждаются посредством воды. Электроды имеют повышенные температуры, поскольку существуют тепловые пробои между охлаждающими трубками и телами электрода, и отсутствует активная обратная связь.

2.3. Начальный прогрев сеток 111 при запуске и отвод тепла в течение фазы активации пучка выполняется посредством пропускания горячей жидкости с управляемой температурой через внутренние каналы в сетках 111.

2.4. Газ дополнительно накачивается из предварительно ускоряющего промежутка через пространство сбоку и большие отверстия в держателях сетки, чтобы снижать давление газа вдоль линии пучка и задерживать обдирку отрицательных ионов и формирование/размножение вторичных частиц в промежутках.

2.5. Включение положительно смещенных сеток 111 используется для того, чтобы отталкивать обратно протекающие положительные ионы.

3.0 Ускоритель 150 высокого напряжения (1 МэВ).

3.1. Ускоритель 150 высокого напряжения не связан непосредственно с источником ионов, а отде-

лен от источника ионов посредством переходной зоны (линии транспортировки пучка низкой энергии - LEBT 205) с отклоняющими магнитами 130, вакуумными насосами и цезиевыми ловушками. Переходная зона:

перехватывает и удаляет большинство совместно протекающих частиц, включающих в себя электроны, фотоны и нейтральные частицы из пучка,

откачивает газ, выделяющийся из источника 110 ионов, и предотвращает достижение им ускорителя 150 высокого напряжения,

предотвращает вытекание цезия из источника 110 ионов и проникновение в ускоритель 150 высокого напряжения,

предотвращает поступление электронов и нейтральных частиц, формируемых посредством обдирки отрицательных ионов, в ускоритель 150 высокого напряжения.

В предшествующих конструкциях источник ионов непосредственно соединен с ускорителем высокого напряжения. Это приводит к подверженности ускорителя высокого напряжения тому, что газ, заряженные частицы и цезий вытекают из источника ионов и втекают в него. Эти сильные помехи уменьшают способность удержания напряжения ускорителя высокого напряжения.

3.2. Отклоняющие магниты 130 в LEBT 205 отклоняют и фокусируют пучок по оси ускорителя. Отклоняющие магниты 130:

компенсируют все смещения и отклонения пучка во время транспортировки через магнитное поле источника 110 ионов,

смещение между осями предускорителя и ускорителя 111 и 150 высокого напряжения уменьшает поступление совместно протекающих частиц в ускоритель 150 высокого напряжения и предотвращает обратное протекание сильноускоренных частиц (положительных ионов и нейтральных частиц) в предускоритель 111 и источник 110 ионов.

В отличие от этого, предшествующие системы не имеют физического разделения между стадиями ускорения и, как следствие, не предоставляют возможность осевых смещений, как показано в данном документе.

3.3. Магниты линии 205 пучка низкой энергии фокусируют пучок на входе одноапертурного ускорителя 150.

Фокусировка пучка способствует гомогенности пучка, поступающего в ускоритель 150, по сравнению с системами на основе многоапертурной сетки.

3.4. Применение одноапертурного ускорителя:

упрощает системное совмещение и фокусировку пучка,

способствует откачке газа и удалению вторичных частиц из ускорителя 150 высокой энергии,

уменьшает потери пучка на электродах ускорителя 150 высокой энергии.

3.5. Магнитные линзы 230 используются после ускорения, чтобы компенсировать перефокусировку в ускорителе 150 и образовывать квазипараллельный пучок.

В традиционных конструкциях нет средств для фокусировки пучка и отклонения, за исключением самого ускорителя.

4.0. Нейтрализатор 170.

4.1. Плазменный нейтрализатор на основе многоострийной системы удержания плазмы с постоянными магнитами сильных полей на стенках;

повышает эффективность нейтрализации,

минимизирует общие потери инжектора пучка нейтральных частиц.

Эти технологии никогда не рассматривались для применения в серийных инжекторах пучка нейтральных частиц.

4.2. Фотонный нейтрализатор - фотонная ловушка на основе цилиндрического резонатора со стенками с высокой степенью отражения и откачки с помощью лазеров с высокой эффективностью:

дополнительно повышает эффективность нейтрализации,

дополнительно минимизирует общие потери инжектора пучка нейтральных частиц.

Эти технологии никогда не рассматривались для применения в серийных инжекторах пучка нейтральных частиц.

5.0. Рекуператоры.

5.1. Применение рекуператора(ов) остаточной энергии ионов:

повышает общую эффективность инжектора.

В отличие от этого, рекуперация вообще не предвидится в традиционных конструкциях.

### 039453

#### Библиографический список

[1.] L. W. Alvarez, Rev. Sci. Instrum. 22, 705 (1951 год)

[2.] R.Hemsworth et al., Rev. Sc. Instrum., том 67, стр. 1120 (1996 год)

[3.] Capitelli M. и Gorse C., IEEE Trans on Plasma Sci, 33, номер 6, стр. 1832-1844 (2005 год)

[4.] Hemsworth R. S., Inoue T., IEEE Trans on Plasma Sci, 33, номер 6, стр. 1799-1813 (2005 год)

[5.] B. Rasser, J. van Wunnik и J. Los, Surf. Sci. 118 (1982), стр. 697 (1982 год)

[6.] Y. Okumura, H. Hanada, T. Inoue et al. AIP Conf. Proceedings # 210, Нью-Йорк, стр. 169-183 (1990 год)

[7.] O. Kaneko, Y. Takeiri, K. Tsumori, Y. Oka μ M. Osakabe et al., "Engineering prospects of negative-ion-based neutral beam injection system from high power operation for the large

helical device", Nucl. Fus., том 43, стр. 692-699, 2003 год

Хотя изобретение допускает различные модификации и альтернативные формы, его конкретные примеры показаны на чертежах и подробно описаны в данном документе. Все ссылки определенно полностью содержатся в данном документе. Тем не менее следует понимать, что изобретение не ограничено конкретными раскрытыми формами или способами, а наоборот, изобретение должно охватывать все модификации, эквиваленты и альтернативы, попадающие в пределы сущности и объема прилагаемой формулы изобретения.

## ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Инжектор пучка на основе отрицательных ионов содержит

источник ионов, выполненный с возможностью формировать пучок отрицательных ионов, причем источник ионов включает в себя предускоритель, имеющий электростатическую сетку, включающую в себя множество электродов, причем по меньшей мере один из множества электродов положительно смещен, чтобы отталкивать обратно протекающие положительные ионы; и

ускоритель, пространственно отделенный от предускорителя.

2. Инжектор по п.1, в котором нейтрализатор взаимосвязан с ускорителем высокой энергии.

3. Инжектор по п.1, в котором каждый из множества электродов имеет множество отверстий.

4. Инжектор по п.3, в котором множество отверстий выполнены с возможностью фокусировки и прохождения отрицательных ионов для формирования пучка отрицательных ионов.

5. Инжектор по пп.3 и 4, в котором по меньшей мере один из множества электродов положительно смещен для предварительного ускорения отрицательных ионов в пучке отрицательных ионов.

 Инжектор по пп.1-5, дополнительно содержащий переходную зону, размещенную между предускорителем и ускорителем.

7. Инжектор по п.6, в котором переходная зона содержит линию транспортировки пучка низкой энергии.

8. Инжектор по п.6, в котором переходная зона содержит пару отклоняющих магнитов, при этом пара отклоняющих магнитов позволяет пучку отрицательных ионов из предускорителя смещаться ортогонально направлению его перемещения перед входом в ускоритель.

9. Инжектор по пп.1-8, в котором источник ионов включает в себя плазменный контейнер и плазменные формирователи.

10. Инжектор по п.9, в котором внутренние стенки плазменного контейнера выполнены с возможностью поддерживать повышенные температуры 150-200°С.

11. Инжектор по пп.1-8, дополнительно содержащий распределительный коллектор для непосредственной подачи цезия на электростатическую сетку предускорителя.

12. Инжектор по пп.1-11, в котором предускоритель включает в себя внешние магниты для отклонения совместно вытягиваемых электронов в области вытягивания и предварительного ускорения ионов.

13. Инжектор по пп.1-12, дополнительно содержащий систему откачки для откачки газа из промежутка предварительного ускорения.

14. Инжектор по п.7, в котором линия транспортировки пучка низкой энергии включает в себя цезиевые ловушки.

15. Инжектор по пп.7 и 14, в котором линия транспортировки пучка низкой энергии включает в себя отклоняющие магниты, которые отклоняют ортогонально его направлению движения и фокусируют пучок по оси ускорителя.



Фиг. 1







Фиг. 3





Фиг. 5



Фиг. 6

039453







Фиг. 8В



Фиг. 9













Фиг. 12





- 18 -



Фиг. 14





- 19 -



Фиг. 16

ESAM\_V1.6 25-09-2009 14:59 1mev\_3a\_ion\_beam\_deaccelerating\_tube\_v6



Евразийская патентная организация, ЕАПВ Россия, 109012, Москва, Малый Черкасский пер., 2