Область техники, к которой относится изобретение

Данное изобретение относится к области физики плазмы, и в частности к способам и устройствам для удержания плазмы с целью проведения ядерного синтеза и для преобразования энергии продуктов ядерного синтеза в электрическую энергию.

Предшествующий уровень техники

Ядерный синтез представляет собой процесс, при котором два легких ядра образуют более тяжелое. В процессе ядерного синтеза высвобождается огромное количество энергии в форме быстрых частиц. Так как атомные ядра заряжены положительно благодаря входящим в их состав протонам - между ними существуют отталкивающие электростатические, или кулоновские, силы. Для того чтобы два ядра слились, указанный отталкивающий барьер должен быть преодолен, что происходит при подходе двух ядер друг к другу на достаточно близкую дистанцию, когда короткодействующие ядерные силы становятся достаточно сильными для преодоления кулоновских сил и слияния ядер. Энергия, необходимая ядрам для преодоления кулоновского барьера, обеспечивается энергией их теплового движения, и она должна быть значительной. Например, скорость реакции синтеза будет приемлемой при температуре, по меньшей мере, порядка 10^4 эВ, что грубо соответствует 100 млн градусов по Кельвину. Скорость реакции ядерного синтеза является функцией температуры и характеризуется величиной, называемой реактивностью. Реактивность реакции D-T, например, имеет широкий пик между 30 и 100 кэВ.

Типичные реакции ядерного синтеза могут быть представлены в следующем виде:

$D+D \rightarrow He^3(0{,}8\ МэВ)+n(2{,}5\ МэВ)$,

$D+T \rightarrow \alpha(3{,}6\ МэВ)+n(14{,}1\ МэВ)$,

$D+He^3 \rightarrow \alpha(3{,}7\ МэВ)+p(14{,}7\ МэВ)$ и

$p+B^{11} \rightarrow 3\alpha(8{,}7\ МэВ)$,

где D обозначает дейтерий, T обозначает тритий, α обозначает ядро гелия, n обозначает нейтрон, p обозначает протон, He обозначает гелий и B^{11} обозначает бор-11. Числа в круглых скобках в каждом уравнении соответствуют кинетической энергии продуктов реакции синтеза.

Первые две реакции, приведенные выше - реакции D-D и D-T - являются нейтронными, что означает, что большая часть энергии, выделяемой в данных реакциях ядерного синтеза, переносится нейтронами. Недостатки нейтронных реакций заключаются в том, что (1) поток быстрых нейтронов создает много проблем, связанных со структурными повреждениями стенок реактора и высокими уровнями радиоактивности для большинства конструкционных материалов; и (2) энергия быстрых нейтронов собирается путем преобразования их тепловой энергии в электроэнергию, что является очень неэффективным (КПД менее чем 30%). Преимущества нейтронных реакций заключаются в том, что (1) пики их реактивности находятся при относительно низкой температуре; и (2) их потери, связанные с излучением, относительно низки благодаря тому, что атомные номера дейтерия и трития равны 1.

Реактанты в двух других уравнениях - D-He^3 и p-B^{11} - называются перспективными топливами. Вместо образования быстрых нейтронов, как в нейтронных реакциях, продуктами их реакции синтеза являются заряженные частицы. Одним из преимуществ перспективных топлив является то, что они образуют гораздо меньше нейтронов и, таким образом, гораздо меньше подвержены связанным с ними недостаткам. В случае D-He^3, некоторое количество быстрых нейтронов образуется во вторичных реакциях, но на эти нейтроны приходится всего лишь около 10% энергии продуктов реакции синтеза. Реакция p-B^{11} свободна от быстрых нейтронов, хотя в ее процессе все же образуется некоторое количество медленных нейтронов в результате вторичных реакций, но они создают гораздо меньше проблем. Другим преимуществом перспективных топлив является то, что продукты их слияния составляют заряженные частицы, чья кинетическая энергия может быть напрямую преобразована в электрическую. С подходящим процессом прямого преобразования энергии энергия продуктов слияния перспективных топлив может быть собрана с высокой эффективностью, возможно, превосходящей 90%.

Перспективное топливо также имеет недостатки. Например, атомные номера перспективных топлив являются более высокими (2 для He^3 и 5 для B^{11}). Следовательно, их радиационные потери выше, чем в нейтронных реакциях. Также гораздо сложнее заставить перспективные топлива вступить в реакцию синтеза. Их пик реактивности достигается при гораздо более высоких температурах и не является таким же большим, как пик реактивности для D-T. Инициация реакции синтеза с перспективными топливами, таким образом, требует, чтобы они были приведены в высокоэнергетичное состояние, при котором их реактивность является значительной. Соответственно, перспективным топливам требуется существенно больший период времени удержания, в течение которого они могут быть доведены до условий, требуемых для реакции синтеза.

Время удержания для плазмы $\Delta t=r^2/D$, где r является минимальным размером плазмы, а D является коэффициентом диффузии. Классическое значение коэффициента диффузии $D_c=a_i^2/\tau_{ie}$, где a_i является гирорадиусом иона, а τ_{ie} является временем ион-электронных столкновений. Диффузия согласно классическому коэффициенту диффузии называется классическим переносом. Коэффициент диффузии Бома, связанный с коротковолновыми неустойчивостями, дается соотношением $D_B=(1/16)a_i^2\Omega_i$, где Ω_i является гирочастотой иона. Диффузия в соответствии с этим соотношением называется аномальным переносом.

Поскольку при условиях реакции синтеза $D_B/D_C=(1/16)\ \Omega_i\tau_{ie}\cong 10^8$ аномальный перенос приводит к гораздо более короткому времени удержания, чем классический перенос. Это отношение определяет, насколько велики должны быть размеры плазмы в термоядерном реакторе, исходя из требования, что время удержания для данного количества плазмы должно быть больше, чем время, требуемое для протекания реакции ядерного синтеза в плазме. Таким образом, условие классического переноса является более предпочтительным в термоядерном реакторе, допуская меньшее количество начальной плазмы.

В ранних экспериментах с тороидальным удержанием плазмы наблюдалось время удержания $\Delta t\cong r^2/D_B$. Прогресс, достигнутый за последние 40 лет, позволил увеличить время удержания до $\Delta t\cong 1000r^2/D_B$. Одной из существующих концепций термоядерного реактора является токамак. Магнитное поле токамака 68 и типичные орбиты 66 частиц приведены на фиг.5. За последние 30 лет усилия в области ядерного синтеза были сфокусированы на реакторе токамак с использованием топлива D-T. Эти усилия достигли своей кульминации в Международном Термоядерном Экспериментальном Реакторе (МТЭР), изображенном на фиг. 7. Недавние эксперименты с токамаками свидетельствуют, что классический перенос $\Delta t\cong r^2/D_C$ возможен, в этом случае минимальные размеры плазмы могут быть уменьшены от метров до сантиметров. Эти эксперименты включают в себя инжекцию пучков высокой энергии (от 50 до 100 кэВ), для нагревания плазмы до температуры от 10 до 30 кэВ. См. W. Heidbrink & G.J. Sadler, 34 Nuclear Fusion 535 (1994). В этих экспериментах наблюдалось замедление энергичных пучков ионов и их классическая диффузия, в то время как термальная плазма продолжала диффундировать аномально быстро. Причиной этого является то, что ионы пучка высокой энергии имеют большой гирорадиус и, по существу, являются не чувствительными к флуктуациям с длиной волны короче, чем гирорадиус иона ($\lambda<a_i$). Коротковолновые флуктуации обычно усредняются за один цикл и, таким образом, исчезают. Электроны, тем не менее, имеют гораздо меньший гирорадиус, и поэтому они реагируют на флуктуации и переносятся аномально.

Из-за аномального переноса минимальный размер плазмы должен быть по меньшей мере 2,8 м. Благодаря таким размерам ИТЭР проектировался высотой 30 м и 30 м в диаметре. Это наименьший D-T реактор типа токамак, в котором возможна реакция ядерного синтеза. Для перспективных топлив, таких как $D\text{-}He^3$ и $p\text{-}B^{11}$, реактор типа токамак был бы значительно больше, так как время, необходимое для того, чтобы ионы топлива вступили в ядерную реакцию, является существенно большим. Реактор токамак, использующий топливо D-T, имеет дополнительные проблемы, заключающиеся в том, что большая часть энергии продуктов реакции синтеза переносится 14 Мэв нейтронами, что вызывает, из-за нейтронного потока, радиационные повреждения и наведенную активность практически во всех конструкционных материалах. К тому же преобразование их энергии в электрическую должно производится через тепловые процессы, имеющие эффективность не выше 30%.

Другой предложенной конфигурацией реактора является реактор со сталкивающимися пучками. В реакторе со сталкивающимися пучками фоновая плазма бомбардируется пучками ионов. Пучки состоят из ионов с энергией гораздо большей, чем у термальной плазмы. Генерирование требуемых реакций синтеза в реакторах этого типа невозможно из-за того, что фоновая плазма замедляет ионные пучки. Был выдвинут ряд предложений с целью уменьшения этого эффекта и максимального увеличения количества реакций ядерного синтеза.

Например, в патенте США № 4,065,351, выданном Jassby и др., описан способ образования противоположно направленных сталкивающихся пучков дейтронов и тритонов в тороидальной удерживающей системе. В патенте США № 4,057,462, выданном Jassby и Др., вводится электромагнитная энергия для противодействия эффектам торможения одного из типов ионов в объемно-равновесной плазме. Тороидальная удерживающаяся система определена как токамак. В патенте США № 4,894,199, выданном Rostoker, пучки дейтерия и трития инжектируются и захватываются с одинаковой средней скоростью в токамаке, пробкотроне или конфигурации с обращенным полем. Холодная фоновая плазма низкой плотности присутствует исключительно с целью захвата пучков. Пучки вступают в реакцию, т.к. они имеют высокую температуру, а замедление вызвано, главным образом, электронами, которые сопровождают инжектируемые ионы. Электроны нагреваются ионами, поэтому в этом случае замедление минимально.

Тем не менее, ни в одном из этих устройств равновесное электрическое поле не играет никакой роли. Более того, отсутствует не только попытка уменьшить, но даже рассмотреть аномальный перенос.

В других патентах рассматривается электростатическое удержание ионов и, в некоторых случаях, магнитное удержание электронов. В их числе патент США № 3,258,402, выданный Farnsworth, и патент США № 3,386,883, выданный Farnsworth, в которых описаны электростатическое удержание ионов и инерционное удержание электронов; патент США № 3,530,036, выданный Hirsch и др., патент США № 3,530,497, выданный Hirsch и др., патенты, аналогичные патенту, выданному Farnsworth; патент США № 4,233,537, выданный Limpaecher, в котором описан процесс электростатического удержания ионов и магнитного удержания электронов с помощью магнитных мультипольных отражающих стенок с каспами; и патент США № 4,826,646, выданный Bussard, сходный с патентом, выданным Limpaecher, и описывающий точечные каспы. Ни один из этих патентов не рассматривает электростатическое удержание электронов и магнитное удержание ионов. Несмотря на большое число исследовательских проектов по

электростатическому удержанию ионов, ни один из них не позволил решить проблему образования электростатического поля, требуемого для получения достаточной плотности ионов в реакторе синтеза. В конечном счете, ни в одном из цитируемых выше патентов не была раскрыта магнитная топология конфигурации с обращенным полем.

Конфигурация с обращенным полем (КОП) была открыта случайно около 1960 года в Naval Research Laboratory во время экспериментов, связанных с тета-пинч эффектом. Традиционная топология КОП, в которой внутреннее магнитное поле имеет обратное направление, изображена на фиг. 8 и 10, а орбиты частиц в КОП показаны на фиг. 11 и 14. Многие исследовательские программы, имеющие отношение к КОП, были поддержаны в США и Японии. Имеется всесторонний обзор публикаций по теории и экспериментам в области исследований КОП с 1960 по 1988гг., см. M. Tuszewski, 28 Nuclear Fusion 2033, (1988). Описание исследований в 1996г. и рекомендации для дальнейших исследований приведены в материалах по развитию КОП. См. L.C. Steinhauer et al., 30 Fusion Technology 116 (1996). До настоящего времени в КОП экспериментах КОП формировалась на основе метода, связанного с тета-пинч эффектом. Следствие применения этого метода формирования заключается в том, что и ионы, и электроны переносят половину тока, что дает в результате пренебрежимо малое электростатическое поле в плазме и отсутствие электростатического удержания. Ионы и электроны в указанных КОП удерживаются при помощи магнитного поля. Практически во всех КОП экспериментах допускается аномальный перенос. См., напр. Tuszewski, начало раздела 1.5.2, на стр. 2072.

Таким образом, имеется потребность в системе ядерного синтеза, которая способна к значительному уменьшению или устранению аномального транспорта ионов или электронов, и системе преобразования энергии, которая с высокой эффективностью преобразует энергию продуктов синтеза в электрическую.

Раскрытие изобретения

Настоящее изобретение ориентировано на системы, которые обеспечивают контролируемую реакцию ядерного синтеза в магнитном поле, имеющем обращенную топологию, и прямое преобразование энергии продуктов реакции синтеза в электроэнергию. Система, упоминаемая в настоящем описании как плазмо-электрическая генераторная (ПЭГ) система, предпочтительно включает в себя термоядерный реактор, имеющий систему удержания, которая обычно значительно уменьшает или устраняет аномальный перенос ионов и электронов. Дополнительно ПЭГ система включает в себя систему преобразования энергии, совмещенную с реактором, которая совершает прямое преобразование энергии продуктов реакции синтеза в электрическую с высокой эффективностью.

Одним из инновационных аспектов настоящего изобретения является то, что аномальный перенос как для ионов, так и для электронов, обычно значительно уменьшен или исключен. Аномальный транспорт ионов обычно исключается при помощи магнитного удержания ионов в магнитном поле конфигурации с обращенным полем (КОП). Для электронов аномальный перенос энергии исключается при помощи настройки внешнего магнитного поля, служащего для формирования сильного электрического поля, которое удерживает электроны электростатически в глубокой потенциальной яме. В результате плазмы термоядерных топлив, которые могут быть применены с данными устройством и способом удержания, не ограничены нейтронными топливами, но также, преимущественно, включают в себя перспективные или безнейтронные топлива. Для безнейтронных топлив энергия реакции синтеза выделяется практически полностью в форме заряженных частиц, т.е. ионов высокой энергии, которые могут быть управляемы в магнитном поле и, в зависимости от топлива, создают мало радиоактивности либо не вызывают ее совсем.

Другим инновационным аспектом данного изобретения является система прямого преобразования энергии, используемая для преобразования кинетической энергии продуктов реакции синтеза непосредственно в электроэнергию при помощи замедления заряженных частиц в электромагнитном поле. В качестве преимущества система прямого преобразования энергии настоящего изобретения обладает эффективностью, устойчивостью к воздействию частиц и энергии и способностью к преобразованию частоты и фазы выходной мощности реакции синтеза, составляющей примерно 5 МГц, таким образом, чтобы она совпадала с частотой и фазой внешней 60 Гц электросети.

В предпочтительном варианте осуществления изобретения система удержания плазмы термоядерного реактора состоит из камеры, генератора магнитного поля для наложения магнитного поля, главным образом, в направлении вдоль главной оси, и кольцеобразного слоя плазмы, состоящего из циркулирующих пучков ионов. Ионы пучков кольцеобразного слоя плазмы, главным образом, удерживаются на орбитах в камере при помощи магнитного поля, а электроны, главным образом, удерживаются в электростатической потенциальной яме. Одним из аспектов одного из предпочтительных вариантов осуществления изобретения является то, что генератор магнитного поля состоит из токовой катушки. Предпочтительно, чтобы система дополнительно содержала пробочные катушки, расположенные около концов камеры, которые увеличивают силу приложенного магнитного поля у концов камеры. Система может также включать в себя инжектор пучка для инжекции нейтрализованного пучка ионов в приложенное магнитное поле, причем пучок попадает на орбиту благодаря силе, вызываемой приложенным магнитным полем. Другим аспектом одного из предпочтительных вариантов осуществления изобретения является то, что система, формирующая магнитное поле, имеет топологию поля с обращенной конфигурацией.

В другом предпочтительном варианте осуществления изобретения система преобразования энергии состоит из обратных циклотронных преобразователей (ОЦП), расположенных на противоположных концах термоядерного реактора. ОЦП имеет геометрию полого цилиндра, образованного множеством, предпочтительно четырьмя или более, одинаковых полуцилиндрических электродов с небольшими прямыми промежутками между ними. Во время работы к электродам попеременно прикладывается осциллирующий потенциал. Электрическое поле E внутри ОЦП имеет мультипольную структуру и исчезает на оси симметрии и линейно возрастает с радиусом, с максимальным значением в промежутке.

Дополнительно ОЦП включает в себя генератор магнитного поля для приложения однородного однонаправленного магнитного поля в направлении, главным образом, противоположном к направлению поля в удерживающей системе термоядерного реактора. На конце, более удаленном от активной зоны термоядерного реактора, ОЦП включает в себя коллектор ионов. Между активной зоной и ОЦП расположен симметричный касп магнитного поля, в котором магнитное поле системы удержания встречается с магнитным полем ОЦП. Коллектор электронов кольцеобразной формы позиционирован около каспа (точки возврата) магнитного поля и электрически соединен с коллектором ионов.

Еще в одном предпочтительном варианте осуществления изобретения ядра-продукты реакции и электроны, нейтрализующие заряд, появляются в виде кольцеобразных пучков на обоих концах центра активной зоны реактора с плотностью, при которой касп магнитного поля разделяет электроны и ионы по разнице в их энергии. Электроны следуют вдоль линии магнитного поля на коллектор электронов, а ионы приходят через точку возврата, где траектория ионов изменяется таким образом, что они следуют примерно по спиральному пути вдоль длины ОЦП. Энергия извлекается из ионов, в то время как они проходят по спирали мимо электродов, соединенных с резонансным контуром. Потеря энергии перпендикулярного движения, в общем, является большей для ионов с более высокой энергией, которые изначально проходят ближе к электронам, где электрическое поле является более сильным.

Краткое описание чертежей

В дальнейшем изобретение поясняется описанием приведенных в качестве примеров вариантов его осуществления со ссылками на фигуры сопровождающих чертежей, в числе которых

фиг. 1 изображает пример камеры удержания настоящего изобретения;

фиг. 2 - магнитное поле КОП;

фиг. 3A и 3B изображают, соответственно, диамагнитное и контрдиамагнитное направление в КОП;

фиг. 4 изображает систему сталкивающегося пучка настоящего изобретения;

фиг. 5 - бетатронную орбиту;

фиг. 6A и 6B изображают, соответственно, магнитное поле и направление градиентного дрейфа в КОП;

фиг. 7A и 7B - соответственно электрическое поле и направление $\vec{E} \times \vec{B}$ дрейфа в КОП;

фиг. 8A, 8B и 8C - дрейфовые орбиты ионов;

фиг. 9A и 9B - силу Лоренца на концах КОП;

фиг. 10A и 10B - настройку электрического поля и электрического потенциала в системе сталкивающегося пучка;

фиг. 11 изображает распределение Максвелла;

фиг. 12A и 12B изображают переходы с бетатронных орбит на орбиты дрейфа вследствие ион-ион столкновений под большими углами;

фиг. 13 изображает бетатронные орбиты A, B, C и D при рассмотрении электронно-ионных столкновений под малыми углами;

фиг. 14 - нейтрализованный пучок ионов, электрически поляризованный перед вводом в камеру удержания;

фиг. 15 - вид сверху нейтрализованного пучка ионов, вступающего во взаимодействие с плазмой в камере удержания;

фиг. 16 - вид сбоку схемы камеры удержания согласно предпочтительному варианту осуществления процедуры запуска;

фиг. 17 - вид сбоку схемы камеры удержания согласно другому предпочтительному варианту осуществления процедуры запуска;

фиг. 18 - развертки отсчетов точечного магнитного зонда, указывающие на формирование КОП;

фиг. 19A - частично плазмо-электрическую генераторную систему, состоящую из термоядерного реактора со сталкивающимся пучком, соединенного с обратным циклотронным преобразователем с прямым преобразованием энергии;

фиг. 19B - вид с торца обратного циклотронного преобразователя согласно фиг. 19A;

фиг.19C - орбиту иона в обратном циклотронном преобразователе;

фиг. 20A - частично плазмо-электрическую генераторную систему, состоящую из термоядерного реактора со сталкивающимся пучком, соединенного с альтернативным вариантом осуществления обратного циклотронного преобразователя;

фиг. 20B - вид с торца обратного циклотронного преобразователя фиг. 20A;

фиг. 21A - орбиту частицы внутри обычного циклотрона;

фиг. 21B - переменное электрическое поле;

фиг. 21C - изменение энергии ускоряющей частицы;

фиг. 22 - азимутальное электрическое поле в щелях между электродами ОЦП, который воздействует на ионы с угловой скоростью;

фиг. 23 - фокусирующие двойные квадрупольные линзы;

фиг. 24A и 24B изображают систему с катушкой для создания осевого магнитного поля;

фиг. 25 изображает 100 MB реактор;

фиг. 26 - оборудование для обслуживания реактора;

фиг. 27 - плазменную реактивную двигательную установку.

Описание предпочтительных вариантов осуществления изобретения

Как проиллюстрировано на фигурах, система плазмоэлектрической генерации энергии по настоящему изобретению предпочтительно включает в себя термоядерный реактор со сталкивающимся пучком, соединенный с системой прямого преобразования энергии. Как уже упоминалось выше, идеальный термоядерный реактор решает проблему аномального перенос, как для ионов, так и для электронов. Решение проблемы аномального переноса, раскрытое в настоящей заявке, использует удерживающую систему с магнитным полем, имеющим конфигурацию с обращенным полем (КОП). Аномальный перенос ионов исключается при помощи магнитного удержания в КОП таким образом, что большинство ионов имеют широкие неадиабатические орбиты, что делает их нечувствительными к коротковолновым флуктуациям, вызывающим аномальный перенос адиабатических ионов. В частности, существование области в КОП, в которой магнитное поле исчезает, делает возможным существование плазмы, содержащей, в основном, неадиабатические ионы. Для электронов аномальный перенос энергии исключается при помощи настройки внешнего приложенного магнитного поля для образования сильного электрического поля, которое удерживает их электростатически в глубокой потенциальной яме.

Плазмы термоядерного топлива, которые могут применяться с настоящим устройством и способом удержания, не ограничены нейтронными топливами, такими как D-D (дейтерий-дейтерий) или D-T (дейтерий-тритий), но также в качестве преимущества включают в себя перспективные или безнейтронные топлива, такие как $D\text{-}He^3$ (дейтерий-гелий 3) или $p\text{-}B^{11}$ (водород-бор 11). (Обзор перспективных топлив см. R. Feldbacher & M. Heindler, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A271(1988)JJ-64 (North Holland Amsterdam).) Для таких безнейтронных топлив энергия выделяется практически полностью в форме заряженных частиц, т.е. ионов высокой энергии, которыми можно управлять в магнитном поле и которые в зависимости от топлива вызывают небольшую радиоактивность либо не вызывают ее вовсе. Продуктами реакции $D\text{-}He^3$ являются ион H и ион He^4 с энергией 18,2 МэВ, тогда как продуктами реакции $p\text{-}B^{11}$ являются три иона He^4 с суммарной энергией 8,3 МэВ. Для теоретически смоделированного устройства ядерного синтеза, использующего безнейтронные топлива, эффективность преобразования выходной энергии может достигать примерно 90%, как это описано, например, K. Yoshikawa, T. Noma и Y. Yamamoto в Fusion Technology, 19, 870 (1991). Такая эффективность существенно улучшает перспективы для безнейтронного ядерного синтеза в масштабируемой (1-1000 МВт), компактной, недорогостоящей конфигурации.

В способе прямого преобразования энергии по настоящему изобретению заряженные частицы - продукты реакции синтеза - могут быть замедлены и их кинетическая энергия преобразована непосредственно в электрическую энергию. В качестве преимущества система прямого преобразования энергии по настоящему изобретению обладает эффективностью, устойчивостью к воздействию частиц и энергии и способностью к преобразованию частоты и фазы выходной мощности реакции синтеза, составляющей примерно 5 МГц, таким образом, чтобы она совпадала с частотой и фазой внешней 60 Гц электросети.

Термоядерная удерживающая система

На фиг. 1 показан предпочтительный вариант реализации удерживающей системы 300 согласно настоящему изобретению. Удерживающая система 300 состоит из стенки камеры 305, которая определяет здесь удерживающую камеру 310. Предпочтительно, камера 310 имеет цилиндрическую форму с главной осью 315 по центру камеры 310. Для применения данной удерживающей системы в составе термоядерного реактора необходимо создать вакуум либо достаточно разряженную атмосферу внутри камеры 310. Внутри камеры 310 находится бетатронная индукционная катушка 320, расположенная концентрически относительно главной оси 315. Бетатронная индукционная катушка 320 состоит из среды, проводящей электрический ток, организованной для направления тока вокруг длинной катушки, как это показано на фиг. 1, которая предпочтительно состоит из набора отдельных катушек с параллельными обмотками и, наиболее предпочтительно, из четырех отдельных катушек в виде параллельных обмоток, для формирования длинной катушки. Для специалиста в данной области техники должно быть понятным, что ток через бетатронную катушку 320 в результате создает магнитное поле внутри бетатронной катушки 320, направленное, в основном, по главной оси 315.

Вокруг внешней области стенки камеры 305 находится внешняя катушка 325. Внешняя катушка 325 образует относительно постоянное магнитное поле с потоком, практически параллельным главной оси 315. Данное магнитное поле является азимутально-симметричным. Предположение о примерном посто-

янстве магнитного поля внешней катушки и его параллельности оси 315 наиболее сильно нарушается на концах камеры 310. На каждом конце камеры 310 расположена пробочная катушка 330. Пробочные катушки 330 приспособлены для создания увеличенного магнитного поля внутри камеры 310 на каждом ее конце, изгибая, таким образом, линии магнитного поля внутрь на каждом конце (см. фиг. 8 и 10). Как уже пояснялось выше, изгибание внутрь линий поля помогает удерживать плазму 335 в области удержания внутри камеры 310, в целом, между пробочными катушками 330, отталкивая ее от концов, где она может выйти из системы удержания 300. Пробочные катушки 330 могут быть приспособлены для образования увеличенного магнитного поля многими способами, известными в настоящей области техники, включая увеличение числа витков в пробочных катушках 330, увеличение тока через пробочные катушки 330 или расположение пробочных катушек 330 под внешней катушкой 325.

Внешняя катушка 325 и пробочные катушки 330 показаны на фиг. 1 как расположенные с внешней стороны стенки камеры 305; тем не менее, они могут быть расположены внутри камеры 310. В случае, когда стенка камеры выполнена из проводящего материала, такого как металл, может быть полезным размещение катушки 325, 330 с внутренней стороны стенки камеры, так как время, требуемое магнитному полю для диффундирования через стенку 305, может быть относительно большим, что может привести к замедленной реактивности системы 300. Таким же образом, камера 310 может иметь форму пустотелого цилиндра, со стенками 305 камеры, образующими удлиненный, кольцеобразный обод. В этом случае бетатронная индукционная катушка 320 может быть размещена вне стенки 305 камеры, в центре этого обода. Внутренняя стенка, формирующая центр обода, предпочтительно может состоять из непроводящего материала, такого как стекло. Как станет понятно в дальнейшем, камера 310 должна иметь достаточный размер и подходящую форму для того, чтобы дать возможность циркулирующему плазменному пучку или слою 335 вращаться вокруг главной оси 315 на заданном радиусе.

Стенка 305 камеры может быть сформирована из материала, имеющего высокую магнитную проницаемость, такого как сталь. В этом случае стенка камеры 305, благодаря индуцированным в материале противотокам, помогает удерживать магнитный поток от выхода из камеры 310, "сжимая" его. Если стенка камеры должна быть изготовлена из материала с низкой магнитной проницаемостью, такого как плексиглас, может потребоваться другое приспособление для удержания магнитного поля. В этом случае может быть предусмотрена последовательность замкнутых, плоских металлических колец. Эти кольца, известные в данной области техники как ограничители потока, могут быть предусмотрены внутри наружных катушек 325, но вне циркулирующего пучка 335 плазмы. Кроме того, такие ограничители потока могут быть пассивными или активными, причем активные ограничители потока могут быть активированы начальным током для лучшего удержания магнитного потока внутри камеры 310. В качестве альтернативы, сами наружные катушки 325 могут выступать в качестве ограничителей потока.

Как было показано выше, циркулирующий пучок 335 плазмы, состоящий из заряженных частиц, может удерживаться в камере 310 силой Лоренца, вызываемой магнитным полем, создаваемым внешней катушкой 325. В этом случае, ионы в пучке 335 плазмы удерживаются магнитно на широких бетатронных орбитах вокруг линий потока внешней катушки 325, параллельных главной оси 315. Также предусмотрены один или более портов 340 инжекции пучка для добавления ионов плазмы к циркулирующему пучку 335 плазмы в камере 310. В предпочтительном варианте осуществления изобретения инжекторные порты 340 приспособлены для инжекции пучков ионов в примерно то же радиальное положение, в котором находится циркулирующий пучок 335 плазмы (т.е. около нулевой поверхности). Дополнительно, инжекторные порты 340 приспособлены для инжекции пучков ионов 350 (см. фиг. 16) тангенциально и в направлении бетатронной орбиты удерживаемого пучка 335 плазмы.

Также предусмотрены один или несколько источников 345 фоновой плазмы для инжекции облака плазмы малой энергии в камеру 310. В предпочтительном варианте осуществления изобретения источники 345 фоновой плазмы приспособлены для направления плазмы 335 в сторону центральной оси камеры 310. Было установлено, что такое направление плазмы помогает лучше удерживать плазму 335 и имеет следствием более высокую плотность плазмы 335 в области удержания внутри камеры 310.

Заряженные частицы в КОП

На фиг. 2 изображено магнитное поле КОП 70. Система обладает цилиндрической симметрией относительно ее оси 78. В КОП существуют две области линий магнитного поля: разомкнутых 80 и замкнутых 82. Поверхность, разделяющая две области, называется сепаратрисой 84. КОП формирует цилиндрическую нулевую поверхность 86, на которой магнитное поле исчезает. В центральной части 88 КОП не меняется заметно в осевом направлении. На концах 90 меняется довольно значительно в осевом направлении. Магнитное поле меняет свое направление вдоль центральной оси 78 в КОП, что является причиной появления понятия "Обращенный" в термине Конфигурация с Обращенным Полем (КОП).

На фиг. 3А магнитное поле вне нулевой поверхности 94 ориентировано по направлению 96. Магнитное поле внутри нулевой поверхности 94 ориентировано по направлению 98. Если ион движется в направлении 100, сила 30 Лоренца, действующая на него, направлена в сторону нулевой поверхности 94. Это легко понять исходя из правила правой руки. Для частиц, движущихся в направлении 102, называемом диамагнитным, сила Лоренца всегда направлена в сторону нулевой поверхности 94. Это явление имеет следствием орбиту частицы, называемую бетатронной орбитой, как будет показано ниже.

На фиг. 3В изображен ион, движущийся в контрдиамагнитном направлении 104. В этом случае сила Лоренца направлена от нулевой поверхности 94. Это явление имеет следствием орбиту частицы, называемую дрейфовой орбитой, как будет показано ниже. Диамагнитное направление для ионов является контрдиамагнитным для электронов, и наоборот.

На фиг. 4 изображен кольцевой или кольцеобразный слой плазмы 106, вращающийся в направлении 102, диамагнитном для ионов. Кольцо 106 расположено вокруг нулевой поверхности 86. Магнитное поле 108, образуемое кольцевым слоем 106 плазмы, в сочетании с приложенным извне магнитным полем 110, формирует магнитное поле с топологией КОП (топология показана на фиг. 2).

Пучок ионов, формирующий слой 106 плазмы, имеет некоторую температуру, следовательно, скорости ионов образуют распределение Максвелла в системе отсчета, вращающейся со средней угловой скоростью пучка ионов. Столкновения ионов с различными скоростями приводят к реакциям синтеза. Поэтому слой 106 пучка плазмы называется столкновительной пучковой системой.

На фиг. 5 изображен основной тип орбит ионов в столкновительной пучковой системе, называемый бетатронной орбитой 112. Бетатронная орбита 112 может быть описана как синусная волна с центром на нулевой окружности 114. Как указано выше, магнитное поле на нулевой окружности 114 исчезает. Плоскость орбиты 112 перпендикулярна оси 78 КОП. Ионы на орбите 112 движутся в диамагнитном для них направлении 102 от начальной точки 116. Ионы на бетатронной орбите совершают два типа движения: осцилляция в радиальном направлении (перпендикулярно нулевой окружности 114) и поступательное движение вдоль нулевой окружности 114.

Фиг. 6А представляет собой график магнитного поля 118 в КОП. Горизонтальная ось графика представляет расстояние в сантиметрах от оси 78 КОП. Магнитное поле дано в килогауссах. Как видно из графика, магнитное поле 118 исчезает на нулевой окружности 120.

Как показано на фиг. 6В, частица, движущаяся около нулевой окружности, находится в градиенте 126 магнитного поля, направленного от нулевой поверхности 86. Магнитное поле вне нулевой окружности ориентировано в первом направлении 122, тогда как магнитное поле внутри нулевой окружности ориентировано во втором направлении 124, противоположном первому. Направление градиентного дрейфа дается векторным произведением $\vec{B}\times\nabla B$, где ∇B является градиентом магнитного поля; таким образом, по правилу правой руки, видно, что направление градиентного дрейфа является контрдиамагнитным направлением для ионов как вне, так и внутри нулевой окружности 128.

Фиг. 7А является графиком электрического поля 130 в КОП. Горизонтальная ось графика представляет собой расстояние в сантиметрах от оси 78 КОП. Электрическое поле дано в В/см. Как видно из графика, электрическое поле 130 исчезает в окрестности радиуса нулевой окружности 120.

Как показано на фиг. 7В, электрическое поле не является удерживающим для ионов; оно ориентировано в направлениях 132, 134 от нулевой поверхности 86. Магнитное поле, как и в предыдущем случае, ориентировано в направлениях 122, 124 внутри и снаружи нулевой поверхности 86. По правилу правой руки, видно, что направление $\vec{E}\times\vec{B}$ дрейфа является диамагнитным направлением 102 для ионов как вне, так и внутри нулевой поверхности 136.

На фиг. 8А и 8В изображен другой тип обычной орбиты в КОП, называемый дрейфовой орбитой 138. Дрейфовая орбита 138 может находиться вне нулевой поверхности 114, как это показано на фиг. 8А, или внутри нее, как показано на фиг. 8В. Дрейфовые орбиты 138 вращаются в диамагнитном направлении, если доминирующим является $\vec{E}\times\vec{B}$ дрейф, или в контрдиамагнитном направлении, если доминирующим является градиентный дрейф. Дрейфовые орбиты 138, показанные на фиг. 8А и 8В, вращаются в диамагнитном направлении 102 от начальной точки 116.

Как показано на фиг. 8С, дрейфовая орбита может быть представлена в виде малой окружности, катящейся по большей окружности. Малая окружность 142 вращается вокруг своей оси в направлении стрелки 144. Она также катится по большой окружности 146 в направлении 102. Точка 140 описывает в пространстве путь, подобный 138.

На фиг. 9А и 9В показано направление силы Лоренца на концах КОП 151. На фиг. 9А показан ион, движущийся в диамагнитном направлении 102 со скоростью 148 в магнитном поле 150. Применяя правило правой руки, можно заметить, что сила 152 Лоренца, в основном, толкает ион в обратном направлении в область замкнутых линий поля. Следовательно, в этом случае сила 152 Лоренца является удерживающей для ионов. На фиг. 9В показан ион, движущийся в контрдиамагнитном направлении со скоростью 148 в магнитном поле 150. Применяя правило правой руки, можно заметить, что сила 152 Лоренца, в основном, выталкивает ион в область разомкнутых линий поля. Следовательно, в этом случае сила 152 Лоренца не является удерживающей для ионов.

Магнитное и электростатическое удержание в КОП

Слой 106 плазмы (см. фиг. 4) может быть сформирован в КОП инжекцией пучка энергичных ионов около нулевой поверхности 86 в направлении 102, диамагнитном для ионов. (Детальное обсуждение различных способов формирования КОП и кольца плазмы следует ниже.) В слое 106 вращающейся плазмы большинство ионов имеют бетатронные орбиты 112 (см. фиг. 5), являются ионами высокой энергии и

неадиабатическими; таким образом, они являются не чувствительными к коротковолновым флуктуациям, вызывающим аномальный перенос.

При изучении слоя 106 плазмы в КОП и при равновесных условиях, как было показано выше, было обнаружено, что из сохранения момента следует соотношение между угловой скоростью ионов ω_i и угловой скоростью электронов ω_e. Соотношение имеет вид

$$\omega_e = \omega_i\left[1-\frac{\omega_i}{\Omega_0}\right], \quad \text{где} \quad \Omega_0 = \frac{ZeB_0}{m_i c} \qquad (1)$$

В уравнении 1 Z является атомным номером, m_i является массой иона, e является зарядом электрона, B_0 является величиной приложенного магнитного поля и c является скоростью света. В соотношении присутствуют три свободных параметра: приложенное магнитное поле B_0, угловая скорость электрона ω_e и угловая скорость иона ω_i. Если два из них известны, третий может быть определен из уравнения 1.

Так как слой 106 плазмы формируется инжекцией пучка ионов в КОП, угловая скорость ионов ω_i определяется кинетической энергией пучка W_i, что задается выражением

$$W_i = \frac{1}{2}m_i V_i^2 = \frac{1}{2}m_i(\omega_i r_0)^2 \qquad (2)$$

Здесь $V_i=\omega_i r_0$, где V_i является скоростью инжекции ионов, ω_i является циклотронной частотой ионов и r_0 является радиусом нулевой поверхности 86. Кинетическая энергия электронов в пучке не учитывается, так как масса электрона m_e много меньше массы иона m_i.

Для фиксированной скорости инжекции (фиксированная ω_i) приложенное магнитное поле B_0 может быть подобрано таким образом, что могут быть получены различные значения ω_e. Как будет показано выше, настройка внешнего магнитного поля B_0 также приводит к получению различных значений электростатического поля внутри слоя плазмы. Данный отличительный признак изобретения проиллюстрирован на фиг. 10A и 10B. На фиг. 10A приведены три зависимости электрического поля (в В/см), полученные для одной и той же скорости инжекции, $\omega_ш = 1{,}35\times10^7 s^{-1}$, но при трех различных значениях приложенного магнитного поля B_0.

График	Приложенное магнитное поле (B_0)	Угловая скорость электрона (ω_e)
154	B_0 = 2,77 кГс	$\omega_e=0$
156	B_0 = 5,15 кГс	$\omega_e = 0{,}625\times10^7 s^{-1}$
158	B_0 = 15,5 кГс	$\omega_e = 1{,}11\times10^7 s^{-1}$

Значения ω_e в приведенной выше таблице были определены согласно уравнению 1. Можно заметить, что $\omega_e>0$ означает, что в уравнении 1 $\Omega_0>\omega_i$, т.е. электроны вращаются в контрдиамагнитном для них направлении. На фиг. 10B приведен электрический потенциал (в вольтах) для одного и того же набора B_0 и ω_e. Горизонтальные оси на фиг. 10A и 10B представляют расстояние от оси 78 КОП, приведенное на диаграммах в сантиметрах. Электрическое поле и электрический потенциал сильно зависят от ω_e.

Приведенные выше результаты можно объяснить исходя из простых физических принципов. Когда ионы вращаются в диамагнитном направлении, ионы магнитно удерживаются благодаря силе Лоренца. Это показано на фиг. 3A. Для электронов, вращающихся в том же направлении, что и ионы, сила Лоренца имеет противоположную направленность, поэтому электроны не удерживаются. Электроны покидают плазму, и, в результате, создается избыточный положительный заряд. При этом образуется электрическое поле, препятствующее другим электронам покидать плазму. Направление и величина этого электрического поля в случае равновесия определяются сохранением момента количества движения.

Электрическое поле играет существенную роль в переносе как электронов, так и ионов. Соответственно, важным аспектом настоящего изобретения является то, что внутри слоя 106 плазмы создается сильное электростатическое поле, и величина этого электростатического поля управляется величиной приложенного магнитного поля B_0, которая может легко регулироваться.

Как уже указывалось, электростатическое поле является удерживающим для электронов, если $\omega_e>0$. Как показано на фиг. 10B, глубина потенциальной ямы может быть увеличена настройкой приложенного магнитного поля B_0. За исключением очень узкой области около нулевой окружности, электроны всегда имеют малый гирорадиус. Следовательно, электроны реагируют на коротковолновые флуктуации аномально высокой скоростью диффузии. Эта диффузия, фактически, помогает поддерживать потенциальную яму при текущей термоядерной реакции. Ионы-продукты термоядерной реакции, обладающие гораздо большей энергией, покидают плазму. Для поддержания зарядовой квазинейтральности продукты термоядерной реакции должны вытягивать из плазмы вместе с собой и электроны, главным образом, за-

бирая электроны с поверхности слоя плазмы. Плотность электронов на поверхности плазмы очень низка, и электроны, покидающие плазму вместе с продуктами термоядерной реакции, должны замещаться; в противном случае, потенциальная яма исчезнет.

На фиг. 11 приведено распределение 162 Максвелла электронов. Только электроны очень высокой энергии из хвоста 160 распределения Максвелла могут достичь поверхности плазмы и покинуть ее вместе с ионами реакции синтеза. Хвост 160 распределения 162, соответственно, непрерывно пополняется электрон-электронными столкновениями в области с высокой плотностью около нулевой поверхности. Электроны высокой энергии по-прежнему имеют малый гирорадиус, так что аномальная диффузия позволяет им достигать поверхности достаточно быстро для компенсации вылета ионов-продуктов термоядерного синтеза. Электроны высокой энергии теряют свою энергию, выходя из потенциальной ямы, и вылетают с очень низкой энергией. Хотя благодаря аномальному переносу электроны могут быстро пересекать магнитное поле, потерь энергии, связанных с аномальным переносом, удается избежать, так как переносится малое количество энергии.

Другим следствием наличия потенциальной ямы является механизм сильного охлаждения для электронов, подобный испарительному охлаждению. Например, для испарения воды ей требуется сообщить скрытую теплоту испарения. Источником этой теплоты является оставшаяся жидкая вода и окружающая среда, которые затем быстро термализуются в направлении более низких температур, быстрее, чем процессы переноса теплоты могут возместить энергию. Аналогично, в случае электронов, глубина потенциальной ямы является эквивалентом скрытой теплоты испарения воды. Электроны получают энергию, требуемую для выхода из потенциальной ямы, благодаря процессам термализации, которые возобновляют энергию в хвосте распределения Максвелла таким образом, что электроны могут вылетать. Соответственно, процесс термализации имеет следствием понижение температуры электронов, так как он гораздо быстрее любого процесса нагревания. Из-за различия в массах между электронами и протонами время передачи энергии от протонов примерно в 1800 раз меньше, чем время термализации электронов. Данный механизм охлаждения также снижает радиационные потери для электронов. Это является особенно важным для перспективных топлив, для которых радиационные потери повышены благодаря ионам топлива с атомным номером Z больше, чем 1; Z>1.

Электростатическое поле также влияет на перенос ионов. Большая часть орбит частиц в слое 106 плазмы являются бетатронными орбитами 112. Столкновения под большими углами, то есть столкновения с углами рассеяния между 90 и 180°, могут изменить бетатронную орбиту на дрейфовую орбиту. Как описано выше, направление вращения дрейфовой орбиты определяется конкуренцией между $\vec{E}\times\vec{B}$ дрейфом и градиентным дрейфом. Если $\vec{E}\times\vec{B}$ дрейф является доминирующим, дрейфовая орбита вращается в диамагнитном направлении. Если является доминирующим градиентный дрейф, дрейфовая орбита вращается в контрдиамагнитном направлении. Это показано на фиг. 12A и 12B. На фиг. 12A показан переход с бетатронной орбиты на дрейфовую орбиту, вызванный столкновением под углом 180°, произошедшим в точке 172. Дрейфовая орбита продолжает вращаться в диамагнитном направлении, так как $\vec{E}\times\vec{B}$ дрейф является доминирующим. На фиг. 12B показано другое столкновение под углом 180°, но в этом случае электрическое поле является слабым и доминирующим является градиентный дрейф. Соответственно, дрейфовая орбита вращается в контрдиамагнитном направлении.

Направление вращения дрейфовой орбиты определяет, является ли она удерживаемой или нет. Частица, движущаяся по дрейфовой орбите, может также иметь скорость, параллельную оси КОП. Время, требуемое частице для прохождения от одного конца КОП до другого, в результате ее движения, параллельного оси, называется временем прохождения; таким образом, дрейфовые орбиты достигают конца КОП за время порядка времени прохождения. Как показано со ссылкой на фиг. 9A, сила Лоренца на концах КОП является удерживающей только для дрейфовых орбит, вращающихся в диамагнитном направлении. Следовательно, по прошествии времени прохождения ионы на дрейфовых орбитах, вращающихся в контрдиамагнитном направлении, будут потеряны.

Это явление определяет механизм потери ионов, который, как ожидается, присутствует во всех экспериментах с КОП. Фактически, в этих экспериментах ионы переносят половину тока, а электроны переносят другую половину. В этих условиях электрическое поле в плазме является пренебрежимо малым, и градиентный дрейф всегда доминирует над $\vec{E}\times\vec{B}$ дрейфом. Отсюда, все дрейфовые орбиты, образованные в столкновениях под большими углами, будут потеряны по прошествии времени прохождения. Эти эксперименты дают скорость диффузии ионов большую, чем скорость, предсказанную по результатам оценок, основанных на классической диффузии.

В присутствии сильного электростатического поля, $\vec{E}\times\vec{B}$ дрейф доминирует над градиентным дрейфом, и дрейфовые орбиты вращаются в диамагнитном направлении. Это было показано выше со ссылкой на фиг. 12A. Когда такие орбиты достигают концов КОП, они отражаются в обратном направлении силой Лоренца в область с замкнутыми линиями поля; таким образом, они остаются удерживаемыми в системе.

Электростатическое поле в столкновительной пучковой системе может быть достаточно сильным, таким, что $\vec{E}\times\vec{B}$ дрейф доминирует над градиентным дрейфом. Таким образом, электростатическое поле системы позволяет избежать переноса ионов, исключая этот механизм потери ионов, аналогичный конусу потерь в устройстве с магнитными пробками.

Другой аспект диффузии ионов можно понять при рассмотрении эффекта малоугловых ион-электронных столкновений на бетатронных орбитах. Фиг. 13A показывает бетатронную орбиту 112; фиг. 13B показывает ту же самую орбиту 112 при наличии малоугловых ион-электронных столкновений 174; фиг. 13C показывает орбиту фиг. 13B с временем следования по ней, в 10 раз большим 176, фиг. 13D показывает орбиту фиг. 13B с временем следования по ней, в 20 раз большим 178. Можно видеть, что вследствие малоугловых ион-электронных столкновений топология бетатронных орбит не меняется, однако амплитуда их радиальных осцилляции растет со временем. Фактически, орбиты, показанные на фиг. 13A-13D, утолщаются со временем, что указывает на классическую диффузию.

Формирование КОП

Традиционные операции, применяемые для формирования КОП, главным образом, используют тета-пинч эффект обращения поля. В этом стандартном способе при помощи внешних катушек, окружающих камеру, предварительно заполненную нейтральным газом, прикладывается магнитное поле смещения. После этого газ ионизируется, и магнитное поле смещения оказывается захваченным плазмой. Затем ток во внешних катушках быстро инвертируется, и линии магнитного поля с противоположной ориентацией соединяются с предварительно захваченными линиями, формируя замкнутую топологию КОП (см. фиг. 2). Такой процесс формирования является в большой мере эмпирическим, и практически не существует средств контроля формирования КОП. Как результат, способ имеет низкую воспроизводимость и отсутствует возможность его настройки.

Напротив, способы образования КОП по настоящему изобретению допускают достаточный контроль и предоставляют гораздо более прозрачный и воспроизводимый процесс. Фактически, КОП, сформированная способами по настоящему изобретению, может быть настроена и на ее форму так же, как и на другие свойства, можно оказывать воздействие, манипулируя магнитным полем, приложенным при помощи внешних катушек 325 электромагнитов. Формирование КОП способами по настоящему изобретению в результате приводит также к образованию электрического поля и потенциальной ямы, как это было показано выше. Более того, настоящие способы могут быть с легкостью расширены так, чтобы довести КОП до уровня параметров реактора и высокоэнергичных потоков топлива, и, в качестве преимущества, допускают классическое удержание ионов. Кроме того, методика может применяться в компактных устройствах и является настолько же устойчивой, насколько и технологичной, что является особенно актуальным в случае реакторных систем.

В заявленных способах формирование КОП имеет отношение к циркулирующему пучку 335 плазмы. Легко видеть, что циркулирующий пучок 335 плазмы, являясь током, создает полоидальное магнитное поле, подобно электрическому току в кольцевом проводнике. Внутри циркулирующего пучка 335 плазмы собственное магнитное поле, которое оно индуцирует, противоположно приложенному извне магнитному полю, образованному внешней катушкой 325. Вне пучка 335 плазмы собственное магнитное поле ориентировано в том же направлении, что и приложенное магнитное поле. Когда ток ионов плазмы становится достаточно большим, собственное поле превосходит приложенное поле, и внутри циркулирующего пучка 335 плазмы поле меняется на противоположное, формируя, таким образом, топологию КОП, как показано на фиг. 2 и 4.

Требования для обращения поля могут быть рассмотрены на простой модели. Рассмотрим электрический ток I_p, текущий по кольцу с большим радиусом r_0 и меньшим радиусом $a<<r_0$. Магнитное поле в центре кольца, нормальное к кольцу, равно $B_p=2\pi I_p/(cr_0)$. Допустим, что кольцевой ток $I_p=N_p e(\Omega_0/2\pi)$ переносится N_p ионами, имеющими угловую скорость Ω_0. Для одного иона, циркулирующего по радиусу $r_0=V_0/\Omega_0$, $\Omega_0=eB_0/m_ic$ является циклотронной частотой для внешнего магнитного поля B_0. Допустим, что V_0 является средней скоростью ионов пучка. Обращение поля определяется, как

$$B_p=\frac{N_p e\Omega_0}{r_0 c}\geq 2B_0, \qquad (3)$$

что подразумевает, что $N_p>2r_0/a_i$ и

$$I_p\geq\frac{eV_0}{\pi a_i} \qquad (4)$$

где $a_i=e^2/m_ic^2=1{,}57\text{x}10^{-16}$ см и энергия ионов пучка $\frac{1}{2}m_iV_0^2$. В одномерной модели магнитное поле тока плазмы $B_p=(2\pi/c)i_p$, где i_p является током на единицу длины. Для обращения поля требуется $i_p>eV_0/\pi r_0 a_i=0{,}225$ кА/см, где $B_0=69{,}3$ Гс и $\frac{1}{2}m_iV_0^2=100$ эВ. Для модели с периодическими кольцами и B_z, являющейся усредненным по осевой координате $\langle B_z\rangle=(2\pi/c)(I_p/s)$ (s - расстояние между кольцами), при $s=r_0$, эта модель дает такое же среднее магнитное поле, что и одномерная модель с $i_p=Ip/s$.

Комбинированная пучковая/бетатронная методика формирования

Предпочтительный способ формирования КОП в удерживающей системе 300, описанный выше, в данном описании назван комбинированной пучковой/бетатронной методикой. Этот подход комбинирует пучки ионов плазмы низкой энергии с бетатронным ускорением с применением бетатронной индукционной катушки 320.

Первым этапом в данном способе является инжекция облака фоновой плазмы примерно в виде кольцевого слоя в камеру 310 с использованием источников 345 фоновой плазмы. Внешняя катушка 325 генерирует магнитное поле внутри камеры 310, которое намагничивает фоновую плазму. Через короткие интервалы в камеру 310 через порты 340 инжектируются пучки ионов низкой энергии примерно в поперечном направлении к приложенному внешнему магнитному полю в камере 310. Как было показано выше, пучки ионов захватываются данным полем внутри камеры 310 на широкие бетатронные орбиты. Ионные пучки могут генерироваться ускорителем ионов, таким как ускоритель, состоящий из ионного диода и генератора Маркса. (См. R.B. Miller, An Introduction to the Physics of Intense Charged Particle Beams, (1982).) Для специалистов в данной области техники представляется очевидным, что приложенное извне магнитное поле вызывает силу Лоренца, действующую на инжектированный пучок ионов, как только он входит в камеру 310; однако является желательным, чтобы пучок не отклонялся и, следовательно, не попадал на бетатронную орбиту до того, как пучок ионов достигнет циркулирующего пучка 335 плазмы. Для решения этой проблемы пучки ионов нейтрализуются электронами и направляются через, в основном, постоянное однонаправленное магнитное поле перед вхождением в камеру 310. Как показано на фиг. 14, при прохождении пучка 350 через подходящее магнитное поле положительно заряженные ионы и отрицательно заряженные электроны разделяются. Пучок 350 ионов, таким образом, приобретает, благодаря магнитному полю, собственную электрическую поляризацию. Такое магнитное поле может генерироваться при помощи, например, постоянного магнита или электромагнита, расположенного вдоль пути пучка ионов. При последующем вхождении в камеру 310 удержания равнодействующее электрическое поле уравновешивает магнитную силу, действующую на частицы пучка, позволяя пучку ионов двигаться без отклонения. Фиг. 15 показывает вид сверху пучка 350 ионов в момент его касания плазмы 335. Как показано, электроны из плазмы 335 движутся вдоль линий магнитного поля внутрь пучка 350 или из него, что, таким образом, снимает электрическую поляризацию пучка. Когда пучок уже не является поляризованным, он присоединяется к циркулирующему пучку 335 плазмы на бетатронной орбите вокруг главной оси 315, как показано на фиг. 1 (см. также фиг. 4).

При прохождении пучка 335 плазмы по его бетатронной орбите движущиеся ионы создают ток, который, в свою очередь, образует собственное полоидальное магнитное поле. Для образования топологии КОП внутри камеры 310 необходимо увеличить скорость пучка 335 плазмы, таким образом, увеличив величину собственного магнитного поля, генерируемого пучком 335 плазмы. В случае, если собственное магнитное поле достаточно велико, направление магнитного поля на радиальном расстоянии от оси 315 внутри пучка 335 плазмы обращается, приводя к КОП (см. фиг. 2 и 4). Легко заметить, что для поддержания радиального расстояния циркулирующего пучка 335 плазмы на бетатронной орбите необходимо увеличить приложенное магнитное поле от внешней катушки 325 при увеличении скорости пучка 335 плазмы. Соответственно, предусмотрена система управления, поддерживающая соответствующее приложенное магнитного поле, определяемое током через внешнюю катушку 325. В качестве альтернативы, может применяться вторая внешняя катушка для обеспечения дополнительного приложенного магнитного поля, требуемого для поддержания радиуса орбиты пучка плазмы при его ускорении.

Для увеличения скорости циркулирующего пучка 335 плазмы на его орбите предусмотрена бетатронная индукционная катушка 320. На фиг. 16 легко видеть, что при увеличении тока через бетатронную индукционную катушку 320, по закону Ампера, индуцируется азимутальное электрическое поле E внутри камеры 310. Положительно заряженные ионы в пучке 335 плазмы ускоряются этим индуцированным электрическим полем, что ведет, как было показано выше, к обращению поля. При присоединении пучков ионов к циркулирующему пучку 335 плазмы пучок 335 плазмы, как было показано выше, деполяризует пучки ионов.

Для обращения поля циркулирующий пучок 335 плазмы предпочтительно должен быть ускорен до вращательной энергии около 100 эВ, и предпочтительно в диапазоне примерно от 75 до 125 эВ. Для достижения условий, необходимых для реакции синтеза, циркулирующий пучок 335 плазмы предпочтительно должен быть ускорен до энергии около 200 кэВ, и предпочтительно в диапазоне примерно от 100 кэВ до 3,3 МэВ.

Формирование КОП было успешно продемонстрировано с применением комбинированной пучковой/бетатронной методики формирования. Комбинированная пучковая/бетатронная методика формирования экспериментально осуществлялась в камере с диаметром 1 м и длинной 1,5 м с использованием внешнего приложенного магнитного поля до 500 Гс, магнитного поля бетатронной индукционной катушки 320 до 5 кГс и вакуума $1{,}2 \times 10^{-5}$ тор. В эксперименте фоновая плазма имела плотность 10^{13} $см^{-3}$ и пучок ионов представлял собой нейтрализованный пучок водорода с плотностью $1{,}2 \times 10^{13}$ $см^{-3}$, скоростью 2×10^{7} см/с и длительностью импульса около 20 мкс (на полувысоте). Наблюдалось обращение поля.

Методика бетатронного формирования

Другим предпочтительным способом формирования КОП внутри удерживающей системы названа методикой бетатронного формирования. Эта методика основана на использовании индуцированного бетатронного тока непосредственно для ускорения циркулирующего пучка 335 плазмы с применением бетатронной индукционной катушки 320. В предпочтительной реализации данной методики применяется удерживающая система 300, изображенная на фиг. 1, за исключением того, что в инжекции пучков ионов низкой энергии нет необходимости.

Как указывалось выше, главным компонентом методики бетатронного формирования является бетатронная индукционная катушка 320, расположенная в центре и соосно камере 310. Благодаря конструкции катушки в виде отдельных параллельных обмоток катушка 320 обладает очень малой индуктивностью и, в сочетании с подходящим источником питания, имеет малую постоянную времени LC, что позволяет быстро наращивать ток в индукционной катушке 320.

Предпочтительно начинать формирование КОП с подачи мощности на внешние катушки 325, 330 электромагнитов. Это позволяет сформировать осевое направляющее поле, так же как и радиальные компоненты магнитного поля, около концов для осевого удержания плазмы, инжектированной в камеру 310. Как только образовано достаточное магнитное поле, на источники 345 фоновой плазмы подается мощность от собственных источников питания. Плазма истекает из пушек-источников вдоль осевого направляющего поля и слегка расширяется из-за своей температуры. Как только плазма достигает средней плоскости камеры 310, образуется непрерывный, вытянутый в осевом направлении, кольцеобразный слой холодной, медленно движущийся плазмы.

В этот момент подается мощность на бетатронную индукционную катушку 320. Быстро нарастающий ток в катушке 320 создает быстро изменяющийся осевой поток внутри катушки. В силу эффектов индукции данное быстрое нарастание осевого потока приводит к генерации азимутального электрического поля E (см. фиг. 17), пронизывающего пространство вокруг катушки потока. Согласно уравнениям Максвелла данное электрическое поле E прямо пропорционально изменению магнитного потока внутри катушки, т.е. более быстрое нарастание тока в бетатронной катушке приводит к более сильному электрическому полю.

Созданное индукционным способом электрическое поле E взаимодействует с заряженными частицами в плазме и вызывает пондеромоторную силу, ускоряющую частицы в кольцевом слое плазмы. Электроны, благодаря своей меньшей массе, первыми испытывают ускорение. Начальный ток, формируемый данным процессом, создается, таким образом, электронами. Однако по прошествии достаточного времени ускорения (около сотен микросекунд), в итоге начинается ионный ток. Согласно фиг. 17 данное электрическое поле ускоряет электроны и ионы в противоположных направлениях. По достижении обоими типами частиц их предельной скорости, ток переносится примерно поровну ионами и электронами.

Как было показано выше, ток, переносимый вращающейся плазмой, вызывает собственное магнитное поле. Образование реальной топологии КОП наступает, когда собственное магнитное поле, образованное током в слое плазмы, становится сравнимым с приложенным магнитным полем от внешних катушек 325, 330 электромагнитов. В этот момент происходит магнитное переключение и разомкнутые линии поля начального, образованного внешними источниками, магнитного поля становятся замкнутыми и формируют поверхности потока КОП (см. фиг. 2 и 4).

Базовая КОП, создаваемая данным способом, демонстрирует небольшое магнитное поле и энергии частиц, не являющиеся обычными операционными параметрами реактора. Однако индуктивное электрическое ускоряющее поле будет продолжать действовать до тех пор, пока ток в бетатронной индукционной катушке 320 будет продолжать нарастать с высокой скоростью. Следствием этого процесса является то, что энергия и величина общего магнитного поля КОП продолжают расти. Продолжительность этого процесса, следовательно, главным образом, ограничена источником питания катушек потока, так как продолжение поддержания тока требует массивных энергетических хранилищ. Однако это, в принципе, является прямым путем к ускорению системы до условий, требуемых для реактора.

Для обращения поля циркулирующий пучок 335 плазмы предпочтительно должен быть ускорен до вращательной энергии около 100 эВ, и предпочтительно в диапазоне примерно от 75 до 125 эВ. Для достижения условий, необходимых для реакции синтеза, циркулирующий пучок 335 плазмы предпочтительно должен быть ускорен до энергии около 200 кэВ, и предпочтительно в диапазоне примерно от 100 кэВ до 3,3 МэВ. При присоединении пучков ионов к циркулирующему пучку 335 плазмы пучок 335 плазмы, как было показано выше, деполяризует пучки ионов.

Формирование КОП с применением бетатронной методики формирования было успешно продемонстрировано при следующих значениях параметров:

размеры вакуумной камеры: диаметр около 1 м, длина около 1,5 м;

радиус бетатронной катушки 10 см;

радиус орбиты пучка плазмы 20 см.

среднее внешнее магнитное поле, образованное в вакуумной камере, составляло до 100 Гаусс, с периодом нарастания 150 мкс и отношением поля в магнитных пробках к главному полю как 2 к 1 (источник: внешние катушки и бетатронные катушки);

фоновая плазма (главным образом, газообразный водород) характеризовалась средней плотностью около 10^{13} $см^{-3}$, кинетической температурой менее 10 эВ;

время жизни конфигурации было ограничено общим количеством энергии, накапливаемой в эксперименте, и обычно составляло около 30 мкс.

Эксперименты проводились путем первоначальной инжекции слоя фоновой плазмы двумя наборами коаксиальных кабельных пушек, расположенных по кругу внутри камеры. Каждый набор из 8 пушек был закреплен на одной из двух сборок пробочных катушек. Пушки были расположены азимутально и эквидистантно, со сдвигом относительно другого набора. Такое расположение позволяло пушкам работать одновременно и, таким образом, образовывать кольцевой слой плазмы.

После образования данного слоя подавалась мощность на бетатронную индукционную катушку. Возрастание тока в обмотках бетатронной катушки вызывало возрастание потока внутри катушки, что приводило к появлению азимутального электрического поля вокруг бетатронной катушки. Быстрое нарастание и большая величина тока в обмотках бетатронной катушки генерировали сильное магнитное поле, ускоряющее кольцевой слой плазмы, и, таким образом, индуцировали значительный ток. Достаточно сильный ток плазмы генерировал собственное магнитное поле, которое обращало поддерживаемое извне поле и приводило к образованию конфигурации с обращенным полем. Детальные измерения при помощи петлевых магнитных зондов дали размеры, величину и время существования КОП.

Пример стандартных данных приведен на фиг. 18 в виде развертки отсчетов точечного магнитного зонда. Кривая данных A представляет абсолютную величину аксиального компонента магнитного поля на средней плоскости оси (75 см от каждой конечной плоскости) экспериментальной камеры и радиальном положении 15 см. Кривая данных B представляет абсолютную величину аксиального компонента магнитного поля на средней плоскости оси экспериментальной камеры и радиальном положении 30 см. Следовательно, набор данных кривой A соответствует силе магнитного поля внутри слоя плазменного топлива (между бетатронной катушкой и плазмой), тогда как набор данных кривой B соответствует силе магнитного поля вне слоя плазменного топлива. Данные четко показывают, что внутреннее магнитное поле меняет ориентацию (становится отрицательным) между 23 и 47 мкс, тогда как внешнее поле остается положительным, т.е. не меняет ориентацию. Время обращения ограничено нарастанием тока в бетатронной катушке. Как только ток в бетатронной катушке достигает пика, индуцированный ток в слое плазменного топлива начинает уменьшаться и КОП быстро распадается. До настоящего времени время жизни КОП ограничивалось количеством энергии, которое возможно запасти в эксперименте. Как и в случае экспериментов с инжекцией и захватом, система может быть усовершенствована для обеспечения более длительного времени жизни КОП и ускорения до величины параметров, требуемых для реактора.

Подводя итог сказанному, данная методика не только образует компактную КОП, но также стабильна и открыта для применения. Что более важно, базовая КОП, полученная данным способом, может быть легко ускорена до любого желаемого уровня вращательной энергии и величины магнитного поля. Это является критичным для приложений в области термоядерного синтеза и классического удержания пучков топлива высокой энергии.

Ядерный синтез

Показательно, что данные две методики формирования КОП внутри описанной выше удерживающей системы 300 или ей подобной могут в результате привести к получению плазмы, имеющей свойства, необходимые для прохождения в ней реакции ядерного синтеза. Более точно, КОП, сформированная данными способами, может быть ускорена до любого желаемого уровня вращательной энергии и величины магнитного поля. Это является критичным в случае применения в термоядерном синтезе и в случае классического удержания пучков топлива высокой энергии. Таким образом, в удерживающей системе 300 становятся возможными захват и удержание пучков плазмы высокой энергии в течение периода времени, достаточного для инициации посредством этого реакции термоядерного синтеза.

Для создания условий реакции синтеза КОП, сформированная данными способами, предпочтительно должна быть ускорена до подходящего уровня вращательной энергии и величины магнитного поля при помощи бетатронного ускорения. Однако реакция синтеза обычно требует определенного набора физических условий для каждой имеющей место реакции. К тому же для достижения эффективного выгорания топлива и получения положительного энергетического баланса топливо должно поддерживается в этом состоянии, в целом, без изменений, в течение длительных периодов времени. Это является важным фактором, так как высокая кинетическая температура и/или энергия характеризуют состояние, необходимое для реакции синтеза. Вследствие этого, время удержания топлива должно быть больше, чем время его горения. Это ведет к положительному энергетическому балансу и, следовательно, выходу полезной энергии.

Значительным преимуществом настоящего изобретения является то, что удерживающая система и плазма, описанные в настоящей заявке, обладают большими временами удержания, т.е. временами удержания, превышающими времена горения топлива. Обычное состояние для реакции синтеза, таким образом, характеризуется следующими физическими условиями (которые могут меняться в зависимости от вида топлива и режима работы):

средняя ионная температура: в диапазоне примерно от 30 до 230 кэВ, и предпочтительно в диапазоне примерно от 80 до 230 кэВ;

средняя электронная температура: в диапазоне примерно от 30 до 100 кэВ, и предпочтительно в диапазоне примерно от 80 до 100 кэВ;

когерентная энергия пучков топлива (инжектированных пучков ионов и циркулирующего пучка плазмы): в диапазоне примерно от 100 кэВ до 3,3 МэВ, и предпочтительно в диапазоне примерно от 300 кэВ до 3,3 МэВ;

полное магнитное поле: в диапазоне примерно от 47,5 до 120 кГс, и предпочтительно в диапазоне примерно от 95 до 120 кГс (с приложенным внешним полем в диапазоне примерно от 2,5 до 15 кГс, и предпочтительно в диапазоне примерно от 5 до 15 кГс);

классическое время удержания: более чем время горения топлива, и предпочтительно в диапазоне примерно от 10 до 100 с;

плотность ионов топлива: в диапазоне примерно от 10^{14} до менее чем 10^{16} $см^{-3}$, и предпочтительно в диапазоне от 10^{14} до 10^{15} $см^{-3}$;

полная мощность реакции синтеза: предпочтительно в диапазоне примерно от 50 до 450 кВт/см (мощность на см длины камеры).

Для того чтобы удовлетворять условиям протекания реакции синтеза, описанным выше, КОП предпочтительно должна ускоряться до уровня когерентной вращательной энергии предпочтительно в диапазоне примерно от 100 кэВ до 3,3 МэВ, и более предпочтительно в диапазоне примерно от 300 кэВ до 3,3 МэВ, и уровня величины магнитного поля предпочтительно в диапазоне примерно от 45 до 120 кГс, и более предпочтительно в диапазоне примерно от 90 до 115 кГс. При этих уровнях в КОП могут инжектироваться пучки ионов высокой энергии и захватываться для формирования слоя плазменного пучка, в котором ионы плазменного пучка удерживаются магнитным полем и электроны плазменного пучка удерживаются электростатическим полем.

Предпочтительно, электронная температура удерживается настолько низкой, насколько это возможно для уменьшения уровня тормозного излучения, которое может, в противном случае, привести к радиационным потерям энергии. В настоящем изобретении электростатическая потенциальная яма предоставляет для достижения этого эффективное средство.

Ионная температура предпочтительно поддерживается на уровне, обеспечивающем эффективное выгорание, так как течение реакции синтеза является функцией ионной температуры. Высокая энергия пучков ионов топлива является необходимой для обеспечения классического переноса, как было показано в данной патентной заявке. Это также минимизирует эффекты нестабильности в плазме топлива. Магнитное поле согласуется с вращательной энергией пучка. Оно частично образуется пучком плазмы (собственное поле) и, в свою очередь, служит для удержания пучка плазмы на желаемой орбите.

Продукты реакции синтеза

Продукты реакции синтеза образуются преимущественно около нулевой поверхности, откуда они продвигаются, диффундируя в направлении сепаратриссы 84 (см. фиг. 2 и 4). Это происходит благодаря столкновениям с электронами (так как столкновения с ионами не меняют центра масс и, следовательно, не вызывают смены ими магнитных линий). Благодаря их высокой кинетической энергии (ионы-продукты реакции имеют гораздо более высокую энергию, чем ионы топлива) продукты реакции синтеза могут легко пересекать сепаратриссу 84. Как только они оказываются за сепаратриссой 84, они могут продвигаться вдоль разомкнутых линий 80, что обеспечивает им возможность испытывать рассеяние в ион-ионных столкновениях. Хотя данный процесс столкновений не ведет к диффузии, он может изменить направление вектора скорости иона таки образом, что он окажется параллельным магнитному полю. Данные разомкнутые линии 80 поля соединяют топологию КОП ядра с однородным приложенным полем, определяющим топологию поля вне КОП. Ионы-продукты реакции появляются на различных линиях поля, которым они следуют с неким распределением по энергиям. Преимущественно ионы-продукты реакции и нейтрализующие заряд электроны выходят в форме вращающихся кольцеобразных пучков с обеих сторон топливной плазмы. Например, для конструкции с мощностью 50 МВт и реакцией $p\text{-}B^{11}$ эти пучки имеют радиус около 50 см и толщину около 10 см. В сильных магнитных полях, находящихся вне сепаратриссы 84 (обычно около 100 кГс), ионы-продукты реакции имеют соответствующее распределение гирорадиусов, варьирующихся от минимального значения около 1 см до максимума около 3 см для ионов-продуктов реакции с высокой энергией.

Изначально ионы-продукты реакции обладают продольной, так же, как и вращательной энергией, определяемой $½M(v_{par})^2$ и $½M(v_{perp})^2$. v_{perp} является азимутальной скоростью, связанной с вращением вокруг линии поля в качестве центра орбиты. Поскольку линии поля выходят наружу при выходе из области, непосредственно прилегающей к топологии КОП, вращательная энергия, в основном, уменьшается тогда, как полная энергия остается постоянной. Это является следствием адиабатической инвариантности магнитного момента ионов-продуктов реакции. В данной области техники хорошо известно, что заряженные частицы, движущиеся по орбитам в магнитном поле, обладают магнитным моментом, связанным с их движением. В случае частиц, движущихся вдоль слабо изменяющегося магнитного поля, также присутствует адиабатический инвариант движения, даваемый $½M(v_{perp})^2/B$. Ионы-продукты, двигаясь по

орбитам вокруг соответствующих линий поля, обладают магнитным моментом и адиабатическим инвариантом, связанным с их движением. Поскольку B уменьшается на коэффициент, равный примерно 10 (что показывается расхождением магнитных линий), соответственно, v_{perp} также уменьшится примерно в 3,2 раза. Таким образом, к тому времени, как ионы-продукты достигнут области однородного поля, их вращательная энергия будет составлять менее чем 5% от их полной энергии; другими словами, практически вся энергия будет у продольной компоненты движения.

Преобразование энергии

Система прямого преобразования энергии по настоящему изобретению содержит обратный циклотронный преобразователь (ОЦП) 420, показанный на фиг. 19A и 20A, связанный (показано частично) с активной зоной 436 термоядерного реактора со сталкивающимся пучком (ТРСП) 410 для формирования плазмоэлектрической системы 400 генерации мощности. Второй ОЦП (не показан) может быть расположен симметрично слева от ТРСП 410. Касп или точка перегиба 486 магнитного поля расположена между ТРСП 410 и ОЦП 420 и формируется при взаимодействии магнитных полей ТРСП 410 и ОЦП 420.

Перед тем как детально будет описываться ОЦП 420 и его функционирование, дано общее описание стандартного циклотронного ускорителя. В стандартных циклотронных ускорителях ионы высокой энергии вращаются по окружностям со скоростями, направленными перпендикулярно к магнитному полю. Радиус орбиты энергичного иона определяется силой магнитного поля и отношением заряда иона к его массе и увеличивается с увеличением энергии. Однако частота вращения ионов является не зависимой от их энергии. Этот факт используется при проектировании циклотронных ускорителей.

Согласно фиг. 21A стандартный циклотронный ускоритель 700 включает в себя два зеркально расположенных электрода 710 C-образной формы, образующих две зеркально расположенные D-образные полости, помещенные в однородное магнитное поле 720 с линиями поля, перпендикулярными плоскости симметрии электродов, т.е. плоскости чертежа. Между C-образными электродами прикладывается переменный электрический потенциал (см. фиг. 21B). Ионы I испускаются источником, расположенным в центре циклотрона 700. Магнитное поле 720 подбирается таким, что частота вращения ионов совпадает с частотой электрического потенциала и связанного с ним электрического поля. Если ион I пересекает промежуток 730 между C-образными электродами 710 в направлении, совпадающем с направлением электрического поля, он ускоряется. При ускорении иона I его энергия и радиус орбиты увеличиваются. После прохождения ионом полуокружности (без увеличения энергии) он снова пересекает промежуток 730. Теперь электрическое поле между C-образными электродами 710 имеет обратное направление. Ион I ускоряется снова, и его энергия дополнительно возрастает. Этот процесс повторяется каждый раз при пересечении ионом промежутка 730, обеспечивая совпадение его частоты вращения с частотой переменного электрического поля (см. фиг. 21C). Если, с другой стороны, частица пересекает промежуток 730, когда электрическое поле имеет противоположную направленность, она будет замедляться и возвратится к источнику в центре. Ускоряются только частицы с начальными скоростями, перпендикулярными магнитному полю 720, и пересекающие промежуток 730 при подходящей фазе переменного электрического поля. Таким образом, наличие подходящей фазы является необходимым для ускорения.

В принципе, циклотрон может быть использован для извлечения кинетической энергии тонкого пучка одинаковых энергичных ионов. Замедление ионов в циклотроне, но без извлечения энергии, наблюдалось для протонов и описано Bloch и Jeffries в Phys. Rev. 80, 305 (1950). Ионы могут инжектироваться в полость таким образом, что они приводятся к замедляющей фазе по отношению к переменному полю. Затем все ионы проходят в обратном направлении по траектории T ускоряемых ионов, показанной на фиг. 21A. В то время как ионы замедляются при взаимодействии с электрическим полем, их кинетическая энергия преобразуется в энергию колебаний электрического тока в электрической цепи, частью которой является циклотрон. При этом достигается прямое преобразование энергии, причем с очень высокой эффективностью.

На практике ионы ионного пучка попадают в циклотрон со всеми возможными фазами. За исключением случая, когда различные фазы компенсируются конструкцией циклотрона, половина ионов будет ускоряться, а другая половина замедляться. В результате, максимальная эффективность преобразования будет эффективно составлять 50%. Более того, кольцеобразные пучки ионов-продуктов реакции синтеза, описанные выше, имеют геометрию, не подходящую для традиционного циклотрона.

Как будет более подробно показано ниже, ОЦП по настоящему изобретению согласует кольцеобразный характер пучков ионов-продуктов реакции синтеза, выходящих из КОП активной зоны термоядерного реактора, и случайные относительные фазы ионов в пучке и распределение их энергий.

Вернемся к фиг. 19A, где часть активной зоны 436 ТРСП 410 показана с левой стороны, причем ядро 435 плазменного топлива удерживается в КОП 470 частично сформированной магнитным полем, приложенным при помощи внешних катушек 425 электромагнитов. КОП 470, которая, как указывалось выше, определяет свойства кольцеобразного пучка 437 продуктов реакции синтеза, включает в себя замкнутые линии поля 482, сепаратриссу 484 и разомкнутые линии поля 480. Разомкнутые линии 470 поля простираются от активной зоны 436 в направлении магнитного каспа 486. Как указывалось выше, продукты реакции синтеза выходят из активной зоны 436 вдоль разомкнутых линий 480 поля в виде кольцеобразного пучка 437, содержащего ионы высокой энергии и электроны, нейтрализующие заряд.

Геометрия ОЦП 420 подобна пустотелому цилиндру длиной примерно в 5 м. Предпочтительно, чтобы поверхность цилиндра была составлена из четырех или более одинаковых электродов 494 в виде полуцилиндра, с небольшими прямолинейными промежутками 497. При работе к электродам 494 попеременно прикладывается осциллирующий потенциал. Электрическое поле E в преобразователе имеет квадрупольную структуру, как это показано на виде с торца, фиг. 19B. Электрическое поле E исчезает на оси симметрии и линейно возрастает с радиусом; максимальное значение достигается в промежутке 497.

Дополнительно ОЦП 420 включает в себя внешние катушки 488 электромагнитов для формирования однородного поля в геометрии пустотелого цилиндра ОЦП. Так как ток через катушки 488 электромагнитов ОЦП протекает в направлении, противоположном току через катушки 425 электромагнитов ТРСП, линии 496 поля ОЦП 420 имеют направление, противоположное направлению разомкнутых линий 480 ТРСП 410. На конце, дальнем от активной зоны 436 ТРСП 410, ОЦП 420 включает в себя коллектор 492 ионов.

Между ТРСП 410 и ОЦП 420 находится симметричный касп 486 магнитного поля, в котором разомкнутые линии 480 поля ТРСП 410 встречаются с линиями 496 поля ОЦП 420. Коллектор 490 электронов кольцевой формы расположен вокруг каспа 486 магнитного поля и соединен электрически с коллектором 492 ионов. Как будет показано ниже, магнитное поле каспов 486 магнитного поля с высокой эффективностью преобразует скорость аксиального движения пучка 437 в скорость вращательного движения. Фиг. 19C иллюстрирует типичную орбиту 422 иона в преобразователе 420.

ТРСП 410 имеет цилиндрическую симметрию. В его центре расположена активная зона 436 с ядром 435 термоядерной топливной плазмы удерживаемого в топологии магнитного поля КОП 470, в котором протекает реакция синтеза. Как указывалось выше, ядра-продукты реакции и нейтрализующие заряд электроны выходят в виде кольцеобразного пучка 437 из обоих концов топливной плазмы 435. Например, для 50 МВт проекта с реакцией p-B^{11} эти пучки имеют радиус около 50 см и толщину около 10 см. Кольцеобразный пучок имеет плотность $n \cong 10^7$-10^8 $см^3$. При такой плотности касп 486 магнитного поля разделяет электроны и ионы. Электроны следуют магнитным линиям на коллектор 490 электронов, а ионы проходят через касп 486, в котором траектории ионов преобразуются таким образом, что они следуют, в целом, по спирали вдоль длинны ОЦП 420. Энергия извлекается из ионов при их прохождении по спирали мимо электродов 494, соединенных с резонансным контуром (не показано). Потери перпендикулярной энергии являются наибольшими для ионов с большей энергией, которые изначально циркулируют ближе к электродам 494, где электрическое поле сильнее.

Ионы попадают в касп 486 магнитного поля с вращательной энергией, приблизительно равной общей начальной энергии, т.е. $\frac{1}{2} Mv_p^2 \cong \frac{1}{2} Mv_0^2$. Когда ионы достигают каспа 486 магнитного поля, существует некоторое распределение ионов по энергиям и начальным радиусом r_0. Однако начальные радиусы r_0 обычно примерно пропорциональны начальной скорости v_0. Радиальное магнитное поле и радиальная скорость пучка создают силу Лоренца в азимутальном направлении. Магнитное поле в каспе 486 не изменяет энергию частицы, но преобразует начальную аксиальную скорость $v_p \cong v_0$ в остаточную аксиальную скорость v_z и азимутальную скорость v_1, причем $v_0^2 = v_z^2 + v_1^2$. Значение азимутальной скорости v_1 может быть определено, исходя из принципа сохранения канонического момента

$$P_\theta = Mr_0 v_\perp - \frac{qB_0 r_0^2}{2c} = \frac{qB_0 r_0^2}{2c} \qquad (5)$$

Пучок ионов входит в касп 486 с его левой стороны с $B_z = B_0$, $v_z = v_0$, $v_1 = 0$ и $r = r_0$. Он появляется из каспа 486 справа с $r = r_0$, $B_z = -B_0$, $v_1 = qB_0 r_0^2 / Mc$ и $v_z = \sqrt{v_0^2 - v_\perp^2}$.

$$\frac{v_z}{v_0} = \sqrt{1 - \left(\frac{r_0 \Omega_0}{v_0} \right)^2} \qquad (6)$$

где $\Omega_0 = \frac{qB_0}{Mc}$ является циклотронной частотой. Частота вращения ионов находится в границах примерно 1-10 МГц, и предпочтительно в границах примерно 5-10 МГц, что является частотой, с которой происходит генерация мощности.

Для того чтобы ионы проходили через касп 486, эффективный гирорадиус иона должен быть больше, чем ширина каспа 486 на радиусе r_0. Вполне реально в эксперименте уменьшить аксиальную скорость на коэффициент 10 таким образом, что остаточная аксиальная энергия будет уменьшена на коэффициент 100. При этом 99% энергии ионов преобразуются во вращательную энергию. Пучок ионов имеет некоторое распределение значений v_0 и r_0. Тем не менее, так как r_0 является пропорциональным v_0, исходя из свойств реактора, основанного на ПОК, как было указано выше, эффективность преобразования во вращательную энергию обычно составляет 99% для всех ионов.

Как показано на фиг. 19B, симметричная структура электродов ОЦП 420 по настоящему изобретению предпочтительно включает в себя четыре электрода 494. Колебательный контур (не показан) соединен со структурами 494 электродов таким образом, что мгновенные напряжения и электрические поля являются такими, как они изображены. Напряжение и колебательный контур осциллируют на частоте

$\omega=\Omega_0$. Азимутальное электрическое поле E в промежутках 497 показано на фиг. 19B и 22. Фиг. 22 показывает электрическое поле в промежутках 497 между электродами 494 и поле, действующее на ион при его вращении с угловой скоростью Ω_0. Очевидно, что, совершая полный оборот, частица испытывает попеременно ускорение и замедление в порядке, определяемом начальной фазой. В дополнение к азимутальному электрическому полю E_θ существует также радиальное электрическое поле E_r. Азимутальное поле E_θ максимально в промежутках 497 и уменьшается с возрастанием радиуса. Предполагается, что на фиг. 22 частица вращается, сохраняя постоянный радиус. Из-за градиента электрического поля замедление всегда доминирует над ускорением. Фаза ускорения увеличивает радиус орбит ионов таким образом, что ион входит в замедляющее электрическое поле в следующий раз, имея больший радиус орбиты иона. Фаза замедления будет доминировать независимо от начальной фазы иона, т.к. радиальный градиент азимутального электрического поля E_θ везде положителен. В результате эффективность преобразования энергии не ограничена 50% из-за проблемы начальной фазы, как это происходит в традиционных циклотронах. Также является важным электрическое поле E_r. Оно также осциллирует и создает общий эффект в радиальном направлении, возвращающий траекторию пучка к начальному радиусу с нулевой скоростью плоскости, перпендикулярной оси, как это показано на фиг. 19C.

Процесс, при помощи которого ионы всегда тормозятся, является похожим на принцип сильной фокусировки, который является главной отличительной чертой современных ускорителей, как это описано в патенте США № 2,736,799. Комбинация положительных (фокусирующих) и отрицательных (дефокусирующих) линз является положительной, если магнитное поле имеет положительный градиент. Квадрупольные двойные линзы сильной фокусировки показаны на фиг. 23. Первая линза является фокусирующей в направлении x и дефокусирующей в направлении y. Вторая линза является аналогичной, но свойства для x и y направлений взаимно заменены. Магнитное поле исчезает на оси симметрии и имеет положительный радиальный градиент. Общим результатом для пучка ионов, проходящего через обе линзы, является фокусировка во всех направлениях, независимо от порядка прохождения. Похожие результаты были достигнуты для пучка, проходящего через объемный резонатор с сильным аксиальным магнитным полем, и функционирующий в режиме TE_{111} (см. Yoshikawa и др.). Такое устройство называется пениотроном. В режиме TE_{111} в объемном резонаторе существуют стоячие волны, в которых электрическое поле имеет квадрупольную симметрию. Результаты являются качественно похожими на некоторые результаты, приведенные в данном описании. Существуют количественные различия, заключающиеся в том, что объемный резонатор имеет гораздо большие размеры (длина 10 м) и работает с гораздо большей частотой (155 МГц) и магнитным полем (10 Тл). Для отбора энергии от высокочастотных волн требуется антенна-выпрямитель. Энергетический спектр пучка уменьшает эффективность преобразования. Наличие двух видов ионов является более серьезной проблемой, но эффективность преобразования является приемлемой для D-He^3 реактора, генерирующего протоны с энергией 15 МэВ.

Одночастичная орбита 422 для частицы внутри ОЦП 420 показана на фиг. 19C. Этот результат был получен при помощи компьютерного моделирования, и такой же результат был получен для протона. Ион, входящий с некоторым радиусом r_0, движется по спирали по длине ОЦП и после потери начальной вращательной энергии сходит к некоторой точке на окружности того же радиуса r_0. Начальные условия являются асимметричными; конечное состояние отражают данные асимметрии, но оно является не зависимым от начальной фазы, так что все частицы замедляются. Пучок на коллекторе ионов в конце ОЦП является опять кольцеобразным и имеет примерно те же размеры. Аксиальная скорость уменьшается на коэффициент 10, а плотность соответственно возрастает. Для одной частицы возможна эффективность извлечения энергии 99%. Однако различные факторы, такие как энергия перпендикулярного вращения кольцеобразного пучка перед его вхождением в преобразователь, могут уменьшить эту эффективность примерно на 5%. Извлечение электрической мощности происходит на частоте около 1-10 МГц, и предпочтительно на частоте примерно 5-10 МГц, с дополнительным уменьшением эффективности преобразования, связанным с преобразованием мощности к стандартным параметрам для соединения с энергосетью.

Как показано на фиг. 20A и 20B, альтернативные варианты структур 994 электродов в ОЦП 420 могут включать в себя два симметричных электрода в форме полуокружности и/или конических электродов 494, которые сходятся в направлении коллектора 492 ионов.

Подстройка динамики ионов в главном магнитном поле ОЦП 420 может быть осуществлена с использованием двух аксиальных наборов 500 и 510 катушек, как показано на фиг. 24A и 24B. Оба набора 500 и 510 катушек включают в себя подстрочные проводники с противоположно направленными токами, таким образом, что магнитные поля имеют небольшие размеры. Градиент магнитного поля, как схематично показано на фиг. 24A, изменяет частоту вращения иона и фазу. Мультипольное магнитное поле, как схематично показано на фиг. 24B, производит группировку, как в линейном ускорителе.

Реактор

Фиг. 25 иллюстрирует 100 МВт реактор. Разрез генератора показывает область генерации энергии ядерного синтеза, имеющую сверхпроводящие катушки для приложения однородного магнитного поля и индукционную катушку для формирования магнитного поля с топологией обращенного поля. Около противоположных концов области генерирования энергии ядерного синтеза находятся преобразователи

энергии ОЦП для прямого преобразования кинетической энергии продуктов реакции синтеза в электроэнергию. Вспомогательное оборудование для такого реактора проиллюстрировано на фиг. 26.

Двигательная установка

На фиг. 27 показана плазменная реактивная двигательная установка 800. Установка включает в себя КОП активной зоны 386, в которой удерживается ядро 835 термоядерного топлива и из обоих концов которой выходят продукты реакции синтеза в форме кольцеобразного пучка 837. Преобразователь 820 ОЦП присоединен к одному концу активной зоны. Магнитное сопло 850 расположено около другого конца активной зоны. Кольцеобразный пучок 837 продуктов реакции синтеза истекает из одного конца области генерации энергии ядерного синтеза вдоль линии поля в ОЦП для преобразования энергии и из другого конца активной зоны вдоль линий поля наружу через сопла в виде выхлопа Т.

Хотя данное изобретение может быть подвергнуто различным модификациям и изменено по форме, в данном описании были показаны на чертежах и рассмотрены в деталях отдельные его примеры. Однако следует учесть, что данное изобретение не ограничивается отдельными описанными вариантами выполнения, а охватывает все модификации, эквиваленты и альтернативы, соответствующие смыслу и объему прилагаемой формулы изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ преобразования энергии продуктов ядерного синтеза в электрическую энергию, согласно которому

инжектируют ионы вдоль спиральной траектории внутрь, по существу, цилиндрической полости, образованной множеством электродов, которые размещены относительно друг друга с интервалами,

формируют в полости электрическое поле, имеющее мультипольную структуру более чем с двумя полюсами, для

замедления ионов в результате их взаимодействия с электрическим полем и преобразования по меньшей мере части кинетической энергии ионов в осциллирующую электрическую энергию.

2. Способ по п.1, согласно которому прикладывают переменный потенциал к множеству электродов.

3. Способ по п.1 или 2, согласно которому на этапе формирования электрического поля формируют азимутальное электрическое поле через множество промежутков.

4. Способ по одному из пп.1-3, согласно которому на этапе инжекции преобразуют, по существу, всю аксиальную энергию ионов в энергию вращения.

5. Способ по одному из пп.1-4, согласно которому ионы инжектируются в форме кольцеобразного пучка.

6. Способ по одному из пп.1-5, согласно которому направляют кольцеобразный пучок через касп магнитного поля.

7. Способ по п.6, согласно которому производят сбор нейтрализующих заряд электронов кольцеобразного пучка при следовании электронов по линиям магнитного поля каспа магнитного поля.

8. Способ по одному из пп.1-7, согласно которому производят сбор ионов после того, как значительная часть их энергии преобразована в электрическую энергию.

9. Способ по п.8, согласно которому параметры электрической энергии, полученной из энергии ионов, приводят в соответствие с параметрами электросети.

10. Способ по одному из пп.1-9, согласно которому используют по меньшей мере четыре электрода.

11. Обратный циклотронный преобразователь энергии, содержащий множество размещенных с интервалами относительно друг друга электродов таким образом, что пространство, заключенное между множеством электродов, представляет собой, по существу, цилиндрическую полость для формирования в ней мультипольного электрического поля, имеющего более двух полюсов, и генератор магнитного поля, окружающий множество электродов.

12. Преобразователь по п.11, дополнительно содержащий коллектор ионов, расположенный на одном конце множества электродов.

13. Преобразователь по п.12, дополнительно содержащий коллектор электронов, расположенный около другого конца множества электродов.

14. Преобразователь по п.13, в котором коллектор электронов имеет кольцеобразную форму.

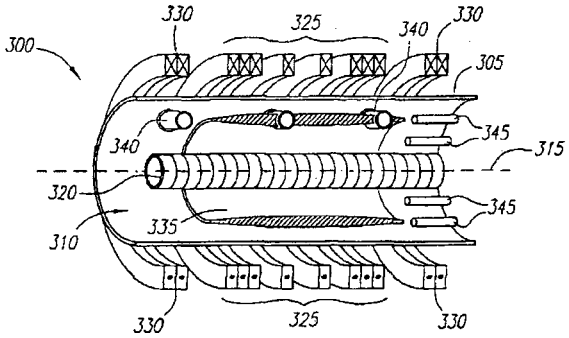
15. Преобразователь по п.13 или 14, в котором коллектор электронов и коллектор ионов соединены электрически.

16. Преобразователь по одному из пп.11-15, дополнительно содержащий колебательный контур, соединенный с множеством электродов.

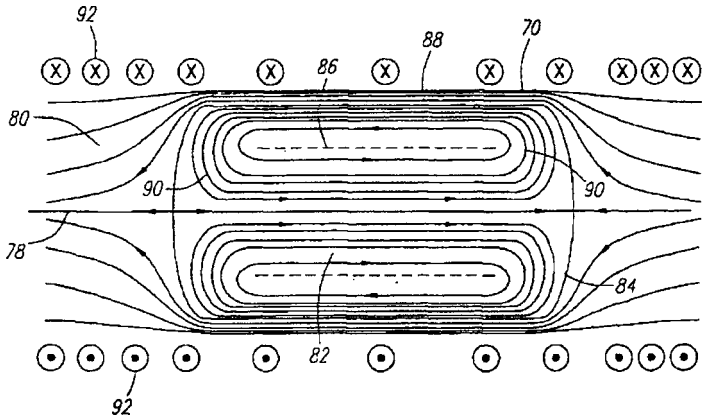
17. Преобразователь по одному из пп.11-16, в котором генератор магнитного поля содержит множество катушек электромагнита, расположенных вокруг множества электродов.

18. Преобразователь по одному из пп.11-17, в котором множество электродов является симметричным.

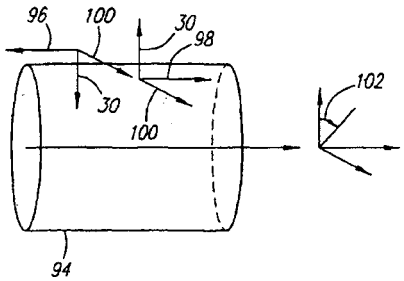
19. Преобразователь по одному из пп.11-18, в котором множество электродов включают в себя четыре четверть цилиндрических электрода, формирующих вытянутую полость, причем электроды размещены с интервалами в виде четырех удлиненных промежутков между ними.



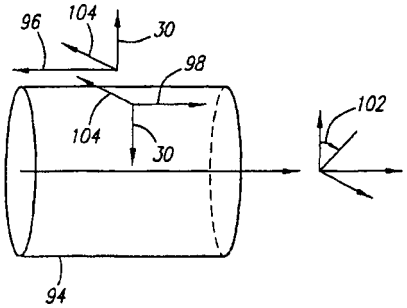
Фиг. 1



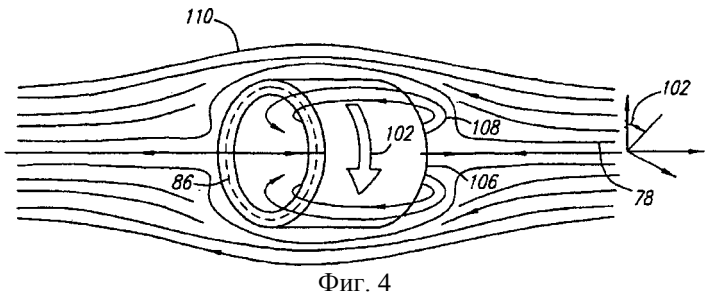
Фиг. 2



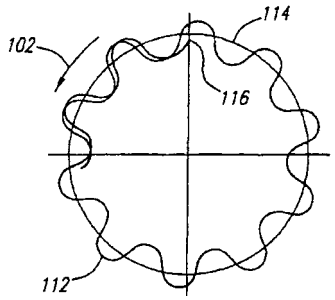
Фиг. 3А



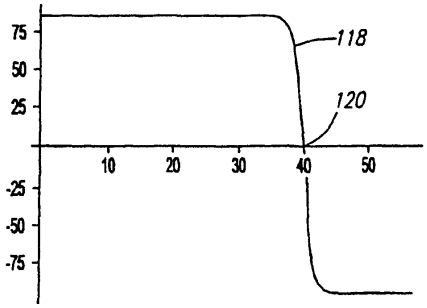
Фиг. 3В



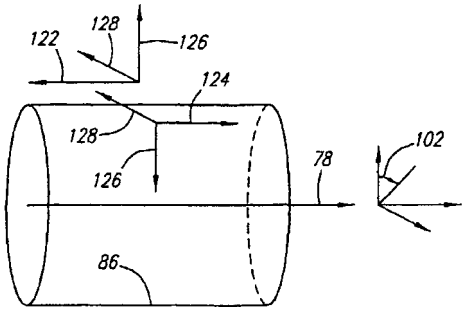
Фиг. 4



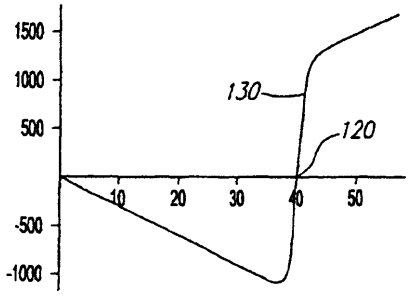
Фиг. 5



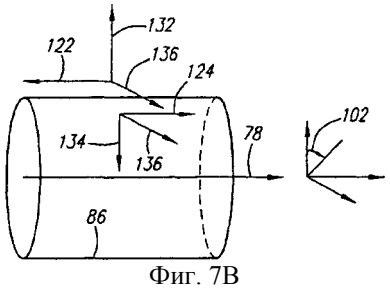
Фиг. 6A



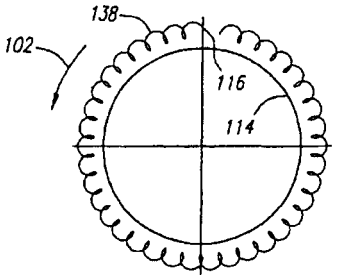
Фиг. 6B



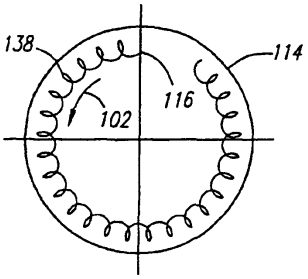
Фиг. 7A



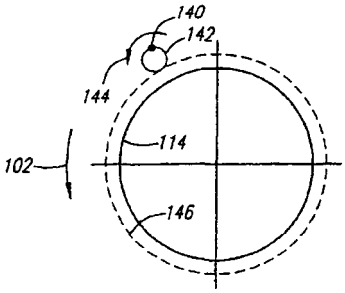
Фиг. 7B



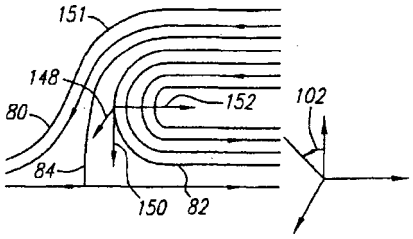
Фиг. 8A



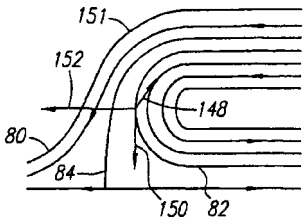
Фиг. 8B



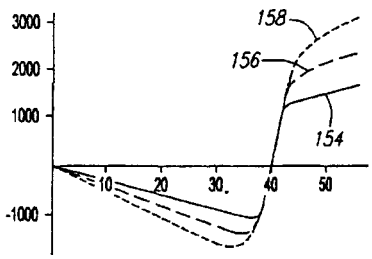
Фиг. 8C



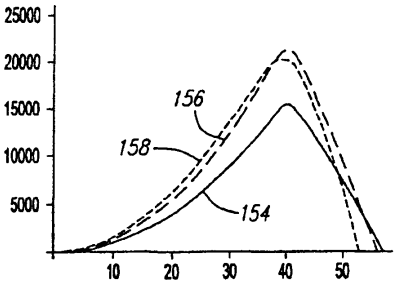
Фиг. 9A



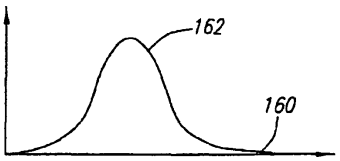
Фиг. 9B



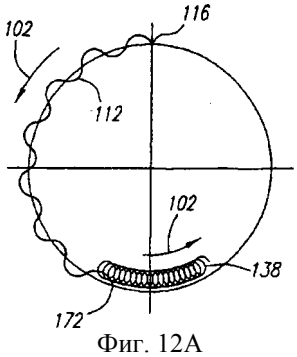
Фиг. 10A



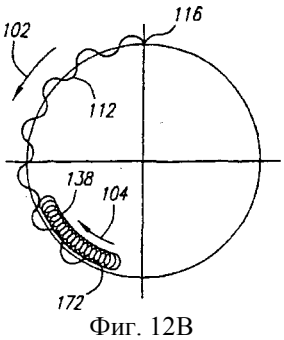
Фиг. 10B



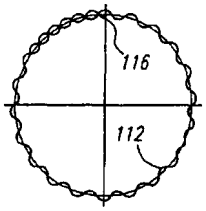
Фиг. 11



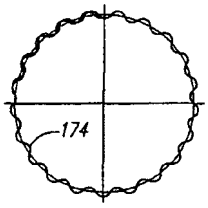
Фиг. 12A



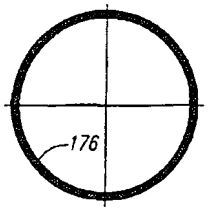
Фиг. 12B



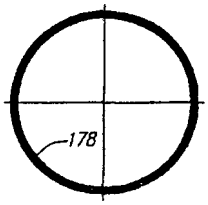
Фиг. 13A



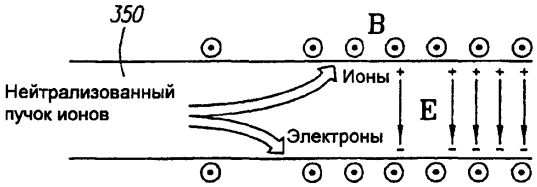
Фиг. 13B



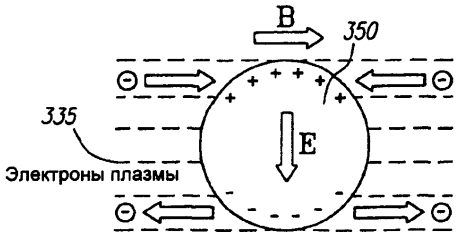
Фиг. 13C



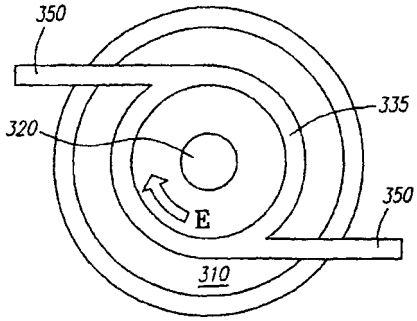
Фиг. 13D



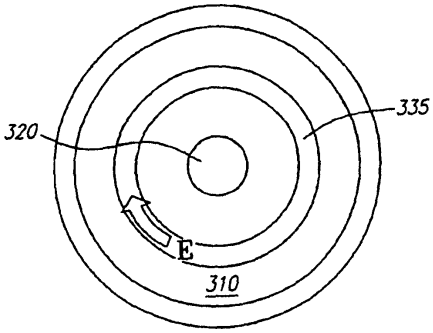
Фиг. 14



Фиг. 15



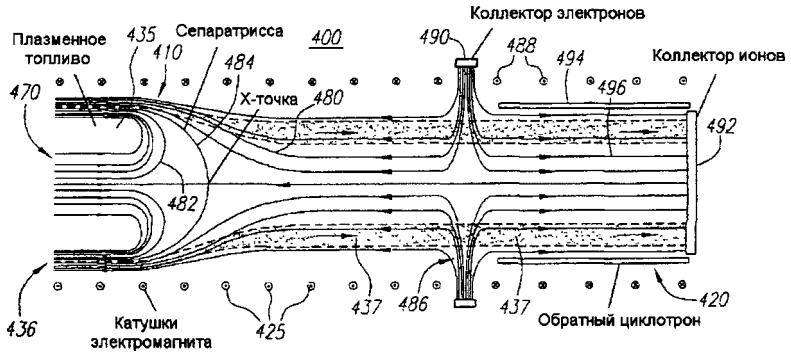
Фиг. 16



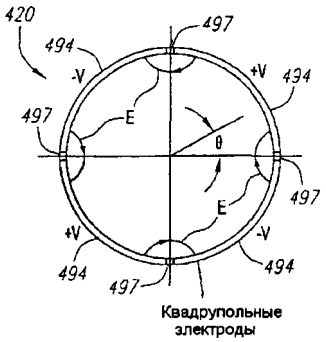
Фиг. 17



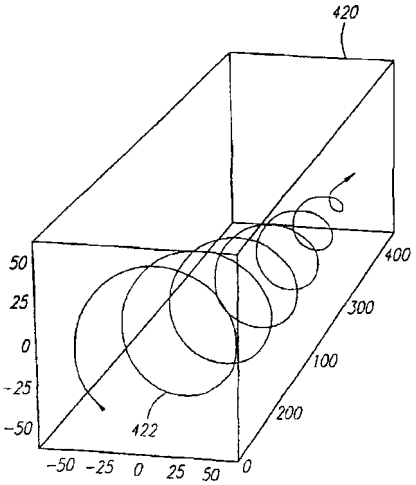
Фиг. 18



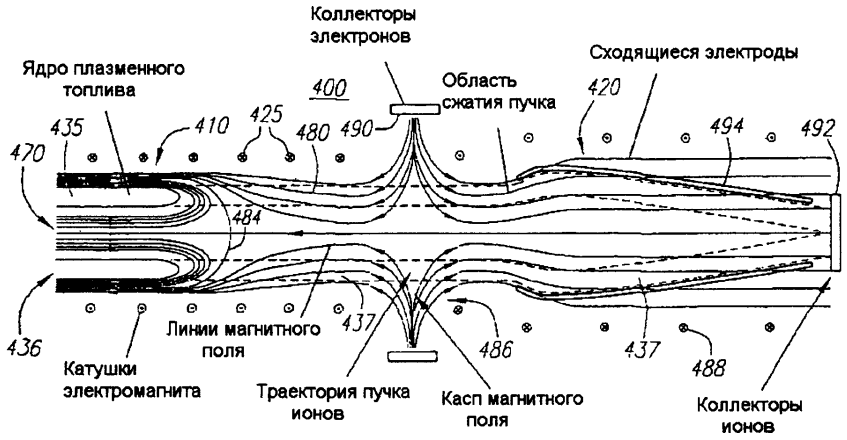
Фиг. 19A



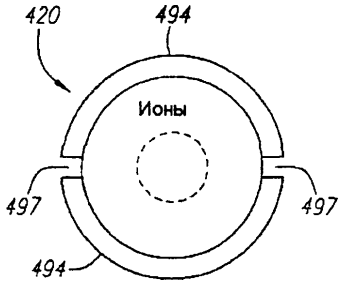
Фиг. 19B



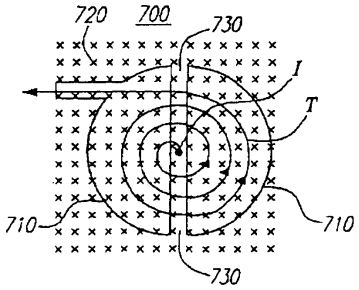
Фиг. 19C



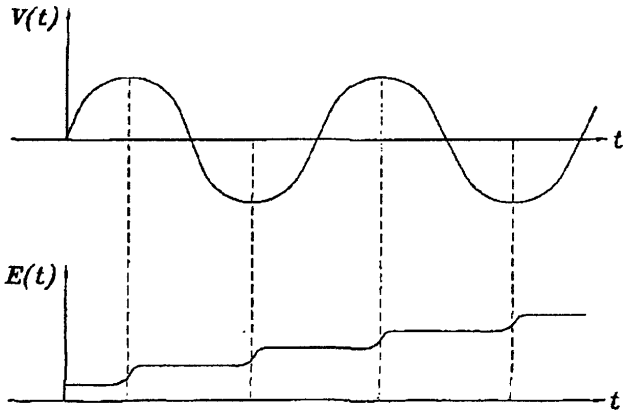
Фиг. 20A



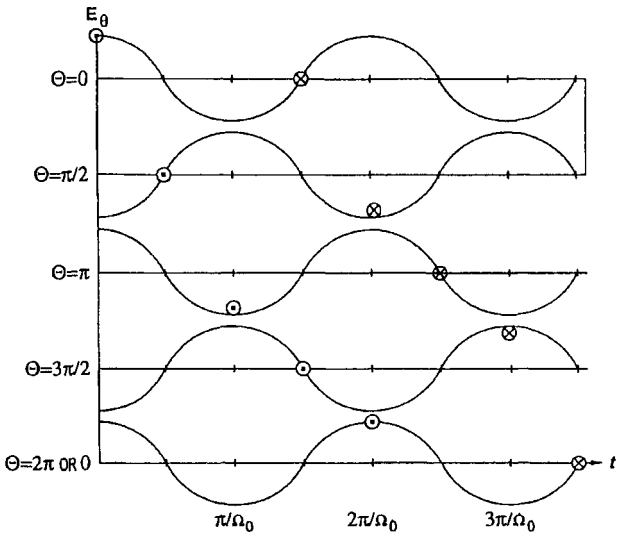
Фиг. 20B



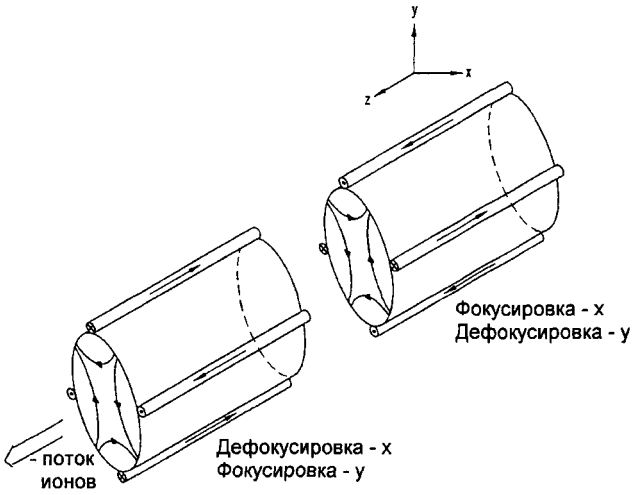
Фиг. 21A



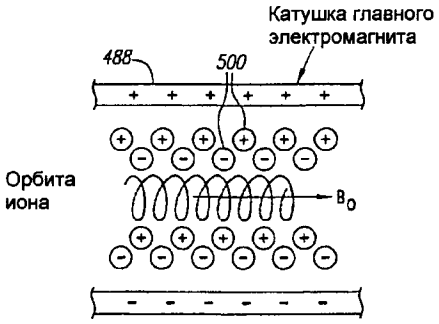
Фиг. 21B, фиг. 21C



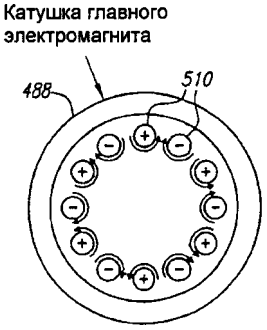
Фиг. 22



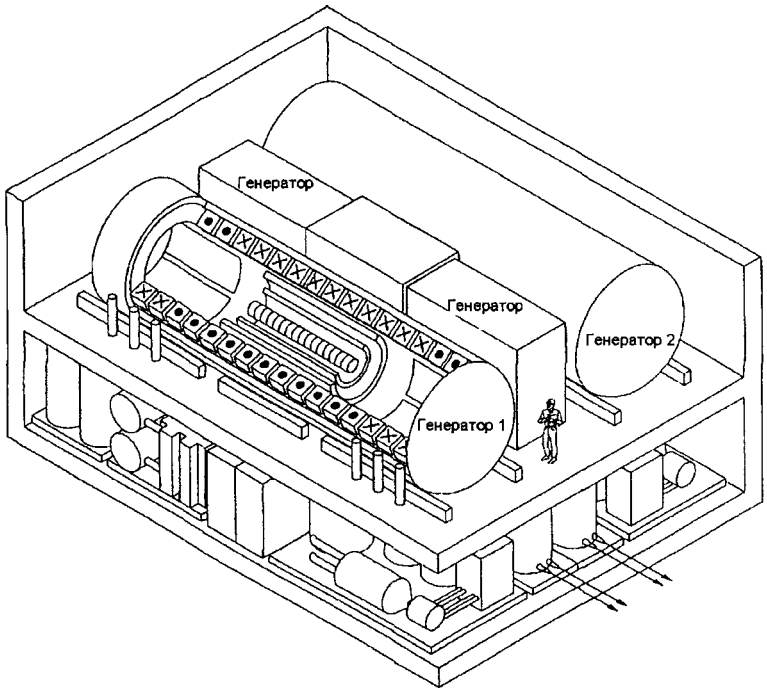
Фиг. 23



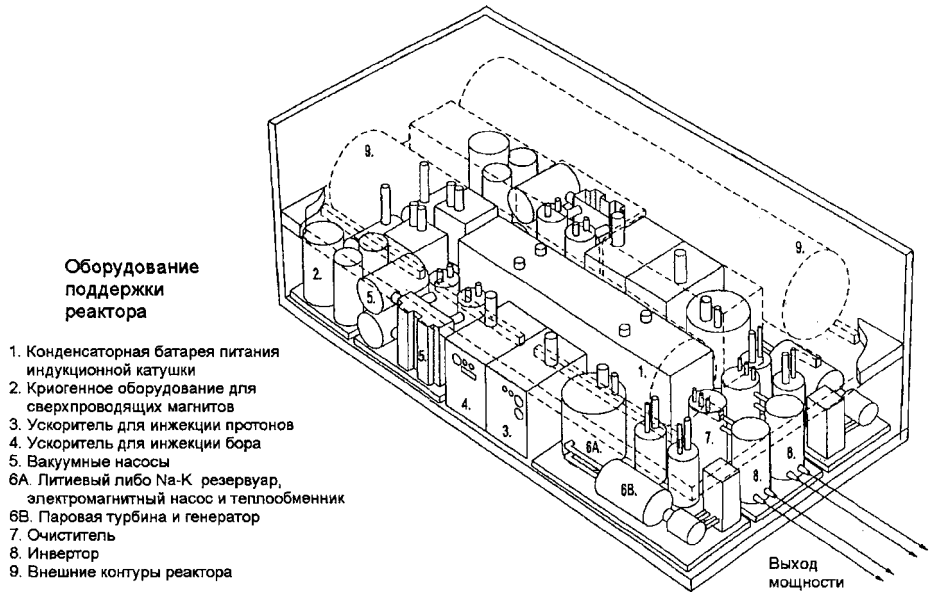
Фиг. 24A



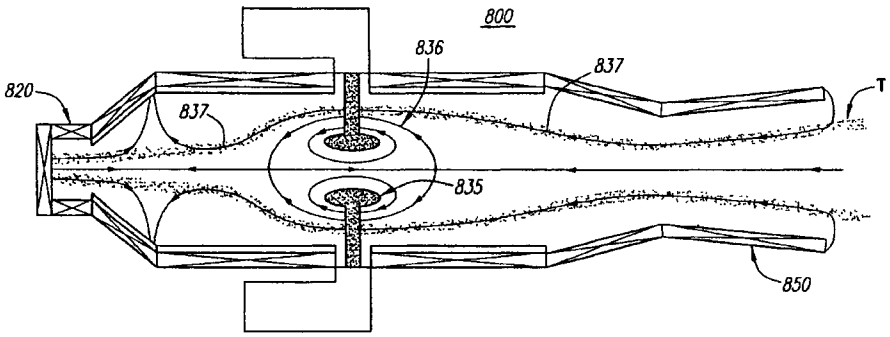
Фиг. 24B



Фиг. 25



Фиг. 26



Фиг. 27