

(19)



Евразийское  
патентное  
ведомство

(11) 040091

(13) B1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента  
2022.04.19

(51) Int. Cl. *G21B 1/05* (2006.01)  
*H05H 1/11* (2006.01)

(21) Номер заявки  
201892759

(22) Дата подачи заявки  
2017.06.02

---

(54) НЕВОЗМУЩАЮЩИЕ ИЗМЕРЕНИЯ СЛАБОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И  
МАГНИТНОГО НУЛЬ-ПОЛЯ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПЛАЗМАХ

---

(31) 62/345,571

(56) US-B2-7599062  
US-B2-7477718  
WO-A1-2015048092

(32) 2016.06.03

(33) US

(43) 2019.06.28

(86) PCT/US2017/035746

(87) WO 2018/075095 2018.04.26

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:  
ТАЭ ТЕКНОЛОДЖИЗ, ИНК. (US)

(72) Изобретатель:  
Гупта Дипак К., Игнэйс Ричард,  
Нордсик Кеннет Х. (US)

(74) Представитель:  
Медведев В.Н. (RU)

---

(57) Предложены системы и способы, которые облегчают невозмущающие измерения слабого магнитного поля и магнитного нуля-поля в высокотемпературных плазмах.

040091  
B1

040091  
B1

040091  
B1

### Область изобретения

Описываемый здесь предмет изобретения относится в целом к магнитной диагностике, а конкретнее к системам и способам, которые облегчают невозмущающие измерения слабого магнитного поля и магнитного нуля-поля в высокотемпературных плазмах.

### Предпосылки изобретения

Высокотемпературная плазма существенна для достижения термоядерного синтеза, а значит и для генерирования энергии термоядерного синтеза (высокотемпературная определена как ионная температура свыше 100 эВ или 1 млн градусов; плазма, определена как ионизированный газ, состоящий из положительных ионов, свободных электронов и нейтральных атомов в пропорциях, приводящих к более или менее отсутствующему совокупному электрическому заряду, как правило, при очень высоких температурах (например, в звездах и реакторах термоядерного синтеза) и/или при низких давлениях (например, в верхних слоях атмосферы и во флуоресцентных лампах)). Высокая температура запрещает физический контакт любого твердого вещества, искусственного или природного, чтобы удерживать или даже зондировать такую плазму без повреждения самого вещества и серьезного снижения качества плазмы (включая собственно температуру). Высокотемпературные плазмы, как правило, удерживают с помощью конфигураций магнитных полей, создаваемых комбинацией внешних катушек магнитного поля и током, текущим в плазме. Магнитное удержание отдаляет высокотемпературную плазму от стенки. Это необходимо для минимизации загрязнения и снижения добротности высокотемпературной плазмы термоядерного синтеза. Ток, текущий в плазме, генерирует магнитные поля, следовательно, результирующие амплитуда и направление чисто магнитного поля внутри плазмы могут существенно отличаться от таковых для магнитного поля без плазмы (обуславливаемого лишь внешними катушками и известного как вакуумное поле). Измерение внутреннего магнитного поля в высокотемпературной плазме термоядерного синтеза не только обеспечивает ценную информацию об удержании и качестве плазмы, но и может быть использовано также в качестве входного сигнала для активного управления с обратной связью при быстрой коррекции магнитного поля, генерируемого внешними катушками возбуждения, с целью управления положением и неустойчивостями плазмы.

Высокая температура также создает проблемы экспериментальных диагнозов внутри плазмы (например, измерения локальных магнитных полей) ввиду того, что введение любого твердого зонда в плазму вызовет не только повреждение зонда, но и ухудшение свойств плазмы. Диагностика в этих плазмах должна быть невозмущающей. Как следствие, в экспериментальной физике плазмы популярны диагностические методы, основанные на изменениях свойств излучения, либо испускаемого самой плазмой, либо инжектируемого в плазму (например, лазером).

Величина бета ( $\beta$ ), как правило, определяется в физике плазмы как отношение теплового давления плазмы к магнитному давлению, представляя равновесие сил благодаря температуре и магнитному полю. Установки высокотемпературной плазмы с низким значением бета ( $\beta \sim 0,1$ ), подобные токамакам и стеллараторам, работают в сильных магнитных полях ( $\sim 1$  Тл ( $\sim 10^4$  Гс)). В этих установках типичны внутренние магнитные поля с магнитной индукцией порядка 0,1 Тл (килогатса) и выше, и поэтому используются диагностические способы, основанные на физических принципах, например эффекте Зеемана, фарадеевском вращении, динамическом эффекте Штарка и т.п. При этих диагностиках сигнал пропорционален напряженностям магнитного поля, и поэтому измерять сильные поля проще по сравнению со слабыми полями.

Еще одним популярным подходом к исследованию плазмы термоядерного синтеза является использование плазмы с высоким значением бета, где отношение давления плазмы к магнитному давлению близко к единице ( $\beta \sim 1$ ), например, плазм, создаваемых в конфигурациях с обращенным полем (FRC) и с магнитным полем остроугольной геометрии. В конфигурациях, предусматривающих создание плазм с высоким значением бета, напряженность магнитного поля является низкой (составляя  $\sim$  несколько сотен гауссов) и становится нулевой внутри плазмы. Следовательно, для такой плазмы с низким значением бета вышеупомянутые диагностические способы дают ограниченную информацию или вообще не дают ее. Некоторые исследователи предложили расширить границы физики и технологии этих диагностических методов, что позволило достичь лишь ограниченного успеха. Надежные и проверенные система и способ измерения местоположения нуля, обращения поля или слабого магнитного поля в высокотемпературной плазме с высоким значением бета по-прежнему отсутствуют.

Плазма с высоким значением бета обеспечивает экономически эффективный подход к исследованию термоядерного синтеза благодаря существенно сниженным требованиям к магнитным полям. Совершенные недавно прорывы и появление высокотемпературных плазм усовершенствованных FRC с накачкой пучком (см., например, WO 2013/074666 и WO 2015/048092) сделали этот подход еще более привлекательным. Это также еще раз подчеркивает потребность в распространяемой на параметры термоядерного синтеза диагностике внутренних магнитных полей для FRC-плазмы (и других плазм с высоким значением бета).

Поэтому желательно разработать системы и способы, которые облегчают невозмущающие измерения слабого магнитного поля и магнитного нуля-поля в высокотемпературных плазмах.

### Сущность изобретения

Различные варианты осуществления, предлагаемые здесь, в целом направлены на создание систем и способов, которые облегчают невозмущающие измерения слабого магнитного поля и магнитного нуля-поля в высокотемпературных плазмах. Здесь представлен возможный диагностический метод измерения слабого магнитного поля в высокотемпературной плазме, включая такие конфигурации магнитных полей как FRC-конфигурации и конфигурации с магнитным полем остроугольной геометрии. Этот невозмущающий метод позволяет измерять обращение поля, амплитуду, пространственный профиль и направление магнитного поля, а также положение нулевого магнитного поля (нуля) и его форму. Для осуществляемого с обратной связью активного управления положением и неустойчивостями FRC можно использовать измерения магнитного поля в реальном масштабе времени.

Другие системы, способы, признаки и преимущества возможных вариантов осуществления будут очевидны или станут очевидными специалисту в данной области техники после изучения нижеследующих чертежей и подробного описания.

### Краткое описание чертежей

Подробности возможных вариантов осуществления, включая конструкцию и работу, можно почерпнуть, в частности, путем изучения прилагаемых чертежей, на которых одинаковые позиции обозначают одинаковые части. Компоненты на чертежах не обязательно представлены в масштабе, вместо этого акцент делается на иллюстрации принципов изобретения. Кроме того, все иллюстрации предназначены для передачи концепций, причем относительные размеры, форма и другие конкретизированные атрибуты могут быть проиллюстрированы скорее схематически, нежели буквально или точно.

На фиг. 1A иллюстрируется аксиальный вид аксиальных магнитных полей FRC,  $B_z$ .

На фиг. 1B иллюстрируется теоретический профиль аксиального магнитного поля,  $B_z$ , для конфигурации магнитного поля FRC.

На фиг. 2 иллюстрируется аксиальный вид аксиального магнитного поля FRC  $B_z$  с источником излучения, освещающим снаружи.

На фиг. 3 иллюстрируется аксиальный вид аксиального магнитного поля  $B_z$  FRC с самоосвещением.

На фиг. 4 иллюстрируется примерная доля поляризации вследствие эффекта Ханле вдоль аксиальных полей FRC-плазм.

На фиг. 5 иллюстрируется примерный радиальный вид аксиального магнитного поля  $B_z$  с освещением снаружи.

На фиг. 6 иллюстрируется примерный радиальный вид аксиального магнитного поля  $B_z$  с самоосвещением.

На фиг. 7 иллюстрируется примерная доля поляризации с радиальным видом.

На фиг. 8 иллюстрируется примерная схема измерительной системы для использования с вариантами осуществления настоящего раскрытия.

На фиг. 9 иллюстрируется сравнение измеренного и теоретического сигналов векторов Стокса (Q и U) с изменением магнитного поля согласно вариантам осуществления настоящего изобретения.

На фиг. 10 иллюстрируется система, содержащая спектрополяриметр согласно вариантам осуществления настоящего изобретения с освещением снаружи.

На фиг. 11 иллюстрируется система, содержащая спектрополяриметр согласно вариантам осуществления данного изобретения с самоосвещением.

Следует отметить, что элементы аналогичных конструкций или функций обычно представлены на всех чертежах сходными позициями в целях иллюстрации. Следует также отметить, что чертежи предназначены лишь для облегчения описания предпочтительных вариантов осуществления.

### Подробное описание

Каждый из дополнительных признаков и принципов, раскрываемых ниже, можно использовать отдельно или в сочетании с другими признаками и принципами для разработки систем и способов, которые облегчают невозмущающие измерения слабого магнитного поля и магнитного нуля-поля в высокотемпературных плазмах. Теперь, с дополнительными подробностями и ссылками на прилагаемые чертежи, будут описаны типичные примеры описываемых здесь вариантов осуществления, предусматривающие использование многих из этих дополнительных признаков и принципов, как в отдельности, так и в комбинации. Это подробное описание предназначено просто для того, чтобы специалист в данной области мог изучить дополнительные подробности для осуществления предпочтительных аспектов принципов данного изобретения на практике, а не для того, чтобы ограничить объем притязаний изобретения. Поэтому совокупности признаков и этапов, раскрываемые в нижеследующем подробном описании, могут и не оказаться необходимыми для практического осуществления изобретения в самом широком смысле, а вместо этого указаны лишь для того, чтобы описать типичные примеры принципов данного изобретения.

Помимо этого, различные признаки типичных примеров и зависимых пунктов формулы изобретения могут быть объединены способами, которые не перечислены конкретно и явно, чтобы обеспечить дополнительные полезные варианты осуществления принципов данного изобретения. Кроме того, специально отмечается, что все признаки, раскрытые в описании и/или формуле изобретения, намеренно раскрываются отдельно и независимо друг от друга с целью первоначального раскрытия, а также с целью

ограничения заявляемого предмета изобретения независимо от составов признаков в вариантах осуществления и/или формуле изобретения. Также специально отмечается, что все диапазоны значений или указания групп объектов раскрывают каждое возможное промежуточное значение или промежуточный объект с целью оригинального раскрытия, а также с целью ограничения заявляемого предмета изобретения.

Различные варианты осуществления, представляемые здесь, в целом направлены на создание систем и способов, которые облегчают невозмущающие измерения слабого магнитного поля и магнитного нуля-поля в высокотемпературных плазмах. Здесь представлен возможный диагностический метод измерения слабого магнитного поля в высокотемпературной лабораторной плазме, включая FRC-плазмы и плазмы магнитного поля остроугольной геометрии. Этот невозмущающий метод позволяет измерять не только амплитуду, пространственный профиль и направление магнитного поля, но и положение нулевого магнитного поля (нуля) и его форму.

Физическое явление, известное как эффект Ханле, описывает модификацию линейной поляризации рассеянного излучения резонансной линии в присутствии магнитного поля. Падающее излучение линии, рассеиваемое из некоторого атома (с верхним уровнем  $J=1$  и нижним уровнем  $J=0$  полного момента количества движения), оказывается линейно поляризованным при отсутствии магнитного поля (например, если смотреть перпендикулярно углу падения). Однако с приложением магнитного поля рассеянное излучение преимущественно деполаризуется.

С точки зрения квантовой физики эффект Ханле представляет собой частный случай явления пересечения уровней в нулевых магнитных полях. Излучения, испускаемые с генерированных подуровней, когерентны и претерпевают деструктивную интерференцию в одном направлении, давая линейно поляризованное излучение. С приложением магнитных полей вырождение прерывается, что сопровождается разделением на подуровни Зеемана на величину, которая больше, чем их естественная ширина, что приводит к деполаризации рассеянного излучения.

Присутствие поляризованного сигнала Ханле в магнитно-удерживаемых плазмах, например FRC-плазме или плазме с магнитным полем остроугольной геометрии, может само предполагать присутствие положения почти нулевого магнитного поля или нуля. Посредством измерений с пространственным разрешением, например, отображений или многохордовых видов, можно получить радиальное местоположение нуля и его форму, наряду с профилем магнитного поля. Чтобы иметь подробности полной поляризации с пространственным разрешением, можно развернуть двумерное отображение вектора Стокса. Вектор Стокса - это решение, разработанное Стоксом в 1852, чтобы обеспечить математическую обработку и возможность непосредственного измерения поляризации излучения.

Эффект Ханле модифицирует линейную поляризацию рассеянного излучения резонансной линии в присутствии магнитного поля. Для измерения можно использовать излучение линий у основных ионов плазмы или примесных ионов при условии, что оно удовлетворяет условиям перехода для эффекта Ханле.

В FRC-плазмах состояния зарядов разных элементов имеют разные радиальные профили из-за их зависимости от температуры электронов ( $T_e$ ) и радиальных профилей плотности ( $n_e$ ). Следует выбрать состояние заряда, которое присутствует в области слабого поля в нуле или в его окрестности, которое, как правило, находится в области высоких  $T_e$  и  $n_e$ . В дополнение к этому выбор уровня должен быть таким, чтобы линию флуоресценции можно было возбуждать с помощью внешнего источника излучения, в типичных случаях - лазера.

Чтобы обеспечить линию Ханле, которую можно возбуждать лазером как линию флуоресценции, в плазму можно добавлять известные примеси. Добавление примесей также может обеспечить возможность выбирать линию, для которой имеется лазер. Одним примером этого является инжекция неона или гелий-неоновой смеси, обеспечивающая уровни, которые можно возбуждать коммерчески доступными гелий-неоновыми лазерами.

В качестве конкретного применения FRC-плазм с целью измерения аксиального магнитного поля и положения местоположения нуля внешнее излучение (например, лазера) освещает плазму с радиального направления. Резонансный сигнал рассеянного излучения может наблюдаться при перпендикулярном обзоре в радиальном или аксиальном направлениях. Наблюдаемая линейная поляризация этого сигнала будет пиковой только в местоположениях, где падающее излучение пересекает местоположение нуля, обеспечивая положение для местоположения нуля. Аналогично вышеупомянутому примеру, доля поляризации обеспечит напряженность магнитного поля и т.д.

В FRC-плазме местоположение нуля отстоит от центра, и поэтому световое излучение из FRC освещает нуль асимметрично. Чтобы обеспечить рассеянный резонансный сигнал в окрестности нуля и вследствие этого полностью исключить потребность во внешнем источнике освещения, может оказаться достаточным самоосвещение. В дополнение, визуализация пиковых рассеянных резонансных поляризованных сигналов с помощью этой схемы самоосвещения обеспечит форму (или изображение) нуля-поля, а следовательно, и информацию о режиме колебаний и вращательных неустойчивостях. С помощью радиального вида можно также измерить длину FRC-плазмы путем измерения расстояния между местоположениями поляризованного сигнала из точек X перегиба вдоль длины FRC-плазмы.

В одном примере рассеянный сигнал от атомов плазмы можно собирать в направлении, перпендикулярном излучению, падающему извне на плазму. Наблюдаемый рассеянный резонансный сигнал будет

полностью линейно поляризованным при отсутствии магнитного поля. Однако, с увеличением магнитного поля, доля поляризации будет уменьшаться и совершенно исчезнет при более сильном магнитном поле. Диапазон чувствительности магнитного поля будет зависеть от интенсивности излучения, выбранной линии атома плазмы. Изменение угла поляризации обеспечит направление магнитного поля. Пространственные измерения или отображение пиковой поляризации обеспечит местоположение нулевого магнитного поля (нуля) и его форму.

В области ядра плазмы, где магнитное поле, как правило, является слабым и существует нуль-поле, температура электронов является высокой, и поэтому присутствие нейтральных атомов водорода обычно невозможно в области высокой температуры электронов из-за их низкой энергии ионизации. Вместе с тем, недавно были созданы усовершенствованные FRC-плазмы с накачкой пучком, предусматривающие инжекцию пучков высокоэнергетических нейтральных частиц (атомов водорода) (см., например, WO 2013/074666 и WO 2015/048092). Пучки нейтральных частиц, инжектируемые в FRC-плазмы, обеспечивают не только пучок высокоэнергетических (7-20 кэВ) нейтральных атомов, но и имеющие температуру подогрева (~0,5-1 кэВ) нейтральные атомы водорода в области ядра плазмы благодаря обмену зарядами с ионами плазмы. Излучение от этих возбужденных нейтральных атомов (подогретых и высокоэнергетических) можно использовать для измерения эффекта Ханле.

Помимо этого, процессы обмена зарядами с полностью и частично ионизированными примесями также обеспечивают состояния и переходы зарядов, которые, как правило, имеют меньший шанс присутствовать или вовсе отсутствуют в высокотемпературной плазме. В качестве примера доступны лазерные диоды большой мощности, работающие на или в окрестности линии Бальмер-альфа (656,1 нм), которые можно использовать для возбуждения сигнала флуоресценции из нейтральных атомов водорода в высокотемпературном ядре. В дополнение к этому для дальнейшего управления измерениями и их улучшения можно также использовать модулированные пучки нейтральных атомов водорода.

В случаях когда помимо лазера также присутствует сильный сигнал на линии Ханле вследствие возбуждения столкновениями электронов, сигнал лазерного возбуждения может быть отделен от сильного фона посредством прерывания или модуляции лазерного пучка. Лазеры - это хороший выбор для источника освещения ввиду их направленности, малой дисперсии, малой спектральной ширины и доступной высокой интенсивности. Хотя на рынке доступен богатый ассортимент лазеров с фиксированной длиной волны и перестраиваемых лазеров, не всегда возможно или экономично иметь лазер, работающий на требуемой длине волны. В связи с этим выбор лазера и его линии, а также линии Ханле, следует делать одновременно. Для получения сигнала Ханле можно также рассмотреть двухфотонную флуоресценцию.

С учетом столкновений при высоких энергиях процессы поглощения и излучения становятся некоррелированными, что приводит к деполяризации рассеянного излучения и уничтожает квантовую интерференцию при эффекте Ханле, даже если магнитное поле отсутствует. Для типичных FRC-плазм (при  $n_e \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $T_e \sim 100 \text{ эВ}$ ) частота электрон-ионных столкновений составляет  $\sim 10^5 \text{ с}^{-1}$ , что на несколько порядков величины меньше, чем значения, типичные для частоты излучения (или коэффициентов Эйнштейна),  $A \sim 10^8 \text{ с}^{-1}$ , а это означает, что деполяризацией из-за столкновения можно пренебречь. Для высокоинтенсивной плазмы можно учесть столкновительное уширение сигнала Ханле для в целом точного измерения амплитуды слабого магнитного поля.

На фиг. 1А иллюстрируется аксиальный вид аксиального магнитного поля ( $B_z$ ) 100 FRC. На фиг. 1В иллюстрируется теоретический профиль аксиального магнитного поля ( $B_z$ ) FRC-плазмы. В FRC-плазме магнитное поле 100 вдоль радиального направления сильнее всего вблизи последней замкнутой поверхности потока ( $R_s$ ), также известной как радиус 101 FRC-плазмы. Аксиальное магнитное поле ( $B_z$ ) 100 постепенно уменьшается внутри FRC-плазмы и исчезает в местоположении ( $R_0$ ) 102 нуля. В пределах радиуса 102 нуля величина аксиального магнитного поля 100 увеличивается в противоположном направлении по сравнению с областью снаружи нуля и становится пиковой в центре FRC-плазмы. Линии противоположно направленных внутреннего и внешнего полей соединяются на некотором осевом расстоянии (называемом точкой X), определяя длину FRC-плазмы.

На фиг. 2 иллюстрируется аксиальный вид аксиального магнитного поля ( $B_z$ ) 200 FRC с источником излучения, освещающим снаружи. В примерной диагностической установке источник 201 интенсивного излучения, например лазер с выбранной длиной волны, осуществляет радиальную инжекцию в магнитные поля FRC с пересечением радиально изменяющегося аксиального магнитного поля 200, включая местоположения 202, 203 нуля. Рассеянное излучение резонансной линии собирают с помощью аксиального вида. Благодаря эффекту Ханле линейно поляризованные сигналы будут наблюдаться только в местоположении нуля и в его окрестности, обеспечивая радиальные положения 202, 203 нуля. Для этой простой геометрии испускания и сбора излучения уравнение степени поляризации можно записать следующим образом:

$$p_L = \frac{1}{\sqrt{1 + 4H^2}}, \quad (1)$$

Где  $H = \omega r / A$  - соотношение ларморовской частоты связанного электрона и коэффициента Эйн-

штейна или частоты излучения иона. Измерение степени поляризации обеспечивает значение ларморовской частоты, которая тоже является функцией магнитного поля. Величина  $H$ , по существу, пропорциональна отношению магнитного поля к эйнштейновскому коэффициенту излучения. Это делает возможным измерение слабого магнитного поля.

На фиг. 4 иллюстрируется примерная доля поляризации благодаря Эффекту Ханле вдоль аксиальных полей FRC-плазм. На фиг. 4 показано изменение доли поляризации вдоль радиуса аксиального магнитного поля 100 FRC, данного на фиг. 1В. Сигнал поляризации достигает пика только в местоположении магнитного нуля. Это может обеспечить локализацию нуль-поля для измерений с пространственным разрешением. На фиг. 4 показана доля поляризации для  $B_H=0,02$  Тл (20 Гс) 401, и  $B_H=0,1$  Тл (100) Гс 402.

В дополнение к этому направление поляризации также повернуто относительно поляризации нуль-поля на угол  $\alpha = 0,5 \cdot \text{tg}^{-1}(2H)$ , который обеспечивает направление магнитного поля. Направление магнитного поля может быть измерено даже в сильных полях, где сигнал Ханле, заданный уравнением (1) насыщается. Это придает способу уникальную возможность, в соответствии с которой существование обращения поля можно подтвердить путем проведения измерений в двух пространственных местоположениях, т.е. с каждой из сторон от ориентировочного местоположения нуля, независимо от напряженности поля в местоположениях, где проводятся измерения. В магнитном поле FRC измерение в окрестности центра установки и другое измерение в окрестности края могут обеспечить подтверждение об обращении поля.

На фиг. 3 иллюстрируется аксиальный вид аксиального магнитного поля  $B_z$  FRC 300 с самоосвещением. Что касается аксиального вида, то это отображение порта наблюдения или сбора сигналов вдоль аксиального направления аксиального магнитного поля 300 FRC, и поэтому аксиальное магнитное поле 300 FRC можно рассматривать как круговую структуру, что и показано на фиг. 3.

В магнитных полях FRC с круговой симметрией каждое местоположение за исключением центра магнитного поля FRC принимает анизотропическое падающее излучение из самой FRC-плазмы. Этот вывод справедлив для линейчатого излучения ионов всех примесей и основного газа благодаря своему азимутально симметричному распределению. Это асимметрично освещение может оказаться достаточным для наблюдения эффекта Ханле без необходимости источника освещения снаружи. Помимо этого, вместо всего двух местоположений нуля, наблюдаемых с помощью внешнего источника, сигналы поляризации будут пиковыми по всей окружности местоположения нуля, причем поляризация будет происходить в азимутальном направлении. Это обеспечивает возможность отображения всей окружности местоположения нуля одновременно, а значит и непосредственное измерение местоположения формы центра FRC-плазмы на основе внутренней магнитной структуры. С изменением сигналов во времени это обеспечит значимую информацию о режиме колебаний при  $n=1$  и вращательных неустойчивостях при  $n=2$ .

Для осевой геометрии сбора излучения уравнение степени поляризации можно записать как вышеупомянутое уравнение (1). Измерение степени поляризации дает значение ларморовской частоты, которая тоже является функцией магнитного поля. Величина  $H$ , по существу, пропорциональна отношению магнитного поля к эйнштейновскому коэффициенту излучения. Это делает возможным измерение слабого магнитного поля. На фиг. 4 показано изменение доли поляризации вдоль радиуса аксиального магнитного поля 100 FRC, заданного на фиг. 1В. Сигнал поляризации достигает пика только в местоположении магнитного нуля. Это может обеспечить локализацию нуль-поля для измерения с пространственным разрешением.

В дополнение к этому направление поляризации также повернуто относительно поляризации нуль-поля на угол  $\alpha = 0,5 \cdot \text{tg}^{-1}(2H)$ , который обеспечивает направление магнитного поля. Направление магнитного поля может быть измерено даже в сильных полях, где сигнал Ханле, заданный уравнением (1), насыщается. Это придает способу уникальную возможность, в соответствии с которой существование обращения поля можно подтвердить путем проведения измерений в двух пространственных местоположениях, т.е. с каждой из сторон от ориентировочного местоположения нуля, независимо от напряженности поля в местоположениях, где проводятся измерения. В магнитном поле FRC измерение в окрестности центра установки и другое измерение в окрестности края могут обеспечить подтверждение об обращении поля.

На фиг. 5 иллюстрируется возможный радиальный вид аксиального магнитного поля  $B_z$  500 FRC с освещением снаружи. Аксиальные виды в установке для получения линейной FRC-плазмы не всегда доступны или, по меньшей мере, легко доступны. Во многих случаях (или единственно) предпочтительной опцией для диагностики является наблюдение сигнала с радиального вида. При таких ситуациях (с освещением 501 снаружи, например лазерным излучением, падающим с радиального направления), можно выбрать виды, которые перпендикулярны направлению падающего излучения в той же радиальной плоскости, как показано на фиг. 5. При этом расположении магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости рассеяния (или наблюдения). При этой диагностической геометрии вместо уравнения (1) частичную линейную поляризацию задает следующее уравнение:

$$p_L = \frac{1 + 2H^2}{1 + 6H^2} \quad (2)$$

В данном случае диапазон изменения поляризации составляет лишь 2/3 по сравнению со случаями наблюдения с аксиального вида (уравнение (1)). Вместе с тем, изменение направления линейной поляризации не происходит, а положение нуля 502, 503 нулевого поля можно найти со столь же приемлемым пространственным разрешением.

На фиг. 6 иллюстрируется примерный радиальный вид аксиального магнитного поля  $B_z$  600 с самоосвещением. Аксиальные виды в установке для получения линейной FRC-плазмы не всегда доступны или, по меньшей мере, легко доступны. Во многих случаях (или единственно) предпочтительной опцией для диагностики является наблюдение сигнала с радиального вида. При таких ситуациях можно выбрать виды наблюдения в радиальной плоскости. Для этого вида диапазон изменения поляризации мал по сравнению со случаями наблюдения с аксиального вида (уравнение (1)). Вместе с тем, изменение направления линейной поляризации не происходит, а сигнал остается пиковым в местоположениях 601, 602 нуля. Положение нуля нулевого поля можно найти с приемлемым пространственным разрешением.

На фиг. 7 показан примерный профиль сигнала поляризации для примерного случая радиального вида с освещением снаружи. Показаны доли поляризации для  $B_H=0,02$  Тл (20 Гс) 701 и  $B_H=0,1$  Тл (100 Гс) 702, а также магнитное поле 703.

Для теоретической оценки сигнала Ханле при данной геометрии освещения источником излучения, сбора рассеянного излучения и магнитного поля вычисляют фазовую матрицу Ханле. Впоследствии эту фазовую матрицу можно использовать для оценки векторов Стокса, которые, в свою очередь, обеспечивают теоретическую оценку частичной поляризации, угла поворота и других параметров. Осуществляемое экспериментальным путем измерение различных составляющих поляризованного излучения и сложение этих составляющих может обеспечить векторы Стокса, которые можно использовать для сравнения с теоретическими выводами и обеспечить требуемую информацию о магнитном поле. Как правило, различные составляющие поляризации собирают, используя двоякопреломляющий кристалл или поляризационные пластины.

На фиг. 8 иллюстрируется возможная схема измерительной системы 800 для использования с вариантами осуществления данного изобретения. Как показано на фиг. 8, в разрядной трубке 801, имеющей находящийся на проксимальном конце электрод 810А и находящийся на дистальном конце электрод 801В и длину около 508 мм (20 дюймов), создают плазму 810 постоянного тока. Плазму 810 создают, используя газообразный неон при давлении около 266,64 Па (2 торр). Катушку 802А, 802В Гельмгольца, находящуюся вблизи одного конца (например, дистального конца 801В) трубки 801, используют для создания магнитного поля в направлении, показанном стрелкой 803. Из малого объема плазмы 811, находящегося под катушкой 802А, 802В Гельмгольца, собирают сигнал излучения и подвергают воздействию магнитного поля. Остаток плазмы 810 в трубке служит в качестве источника для освещения плазмы 811 под катушкой 802А, 802В Гельмгольца. Хотя имеются множество линий, излучаемых из неона, что свидетельствует о наличии эффекта Ханле, для выделения линии 626,6 нм с целью измерений используют монохроматор 807. Линия 626,6 нм излучается непосредственно из плазмы (благодаря электронному возбуждению), а также имеет сигнал Ханле благодаря резонансному рассеянию. Имея рассеянное излучение той же длины волны, сигнал Ханле наряду с большим фоном непосредственно от плазмы делает обнаружение сигнала Ханле сложным. Разделение сигналов достигается путем использования усилителя 806 с фазовой автоматической подстройкой частоты совместно с вращающимся поляризатором 809. Излучение из плазмы 811 проходит через вращающийся поляризатор 809 перед тем, как попадает в монохроматор 807. Монохроматор 807 измеряет векторы Стокса или составляющие поляризации. Сигналы из усилителя 806 с фазовой автоматической подстройкой частоты оцифровываются для дальнейшего анализа и построения графиков.

Используемая в данном случае совокупность аппаратных средств эффективно работает как спектрополяриметр 804, который может выдавать составляющие поляризации или вектор Стокса некоторой спектрально разрешенной линии. Есть множество путей построения спектрополяриметра 804 в зависимости от требований. Спектрополяриметр 804 также содержит модуль 808 фотоумножителя и генератор 805 программных функций.

На фиг. 9 иллюстрируется сравнение измеренного и теоретического сигналов векторов Стокса (Q и U) с изменением магнитного поля согласно вариантам осуществления настоящего изобретения. В вариантах осуществления отдельный источник освещения (например, лазер) не используется для освещения части плазмы в процессе исследования. Излучение, испускаемое плазмой вдоль длины трубки, само освещает часть плазмы под катушкой Гельмгольца, откуда собирают сигнал. Следовательно, геометрия (или длина) трубки относительно направления поля обеспечивает направление освещения. На фиг. 9 показаны два параметра Стокса, Q и U, нормализованные по интенсивности сигнала I, для случая магнитного поля, где магнитное поле ориентировано вдоль направления обзора и перпендикулярно направлению освещения (или длине трубки). Для сбора сигналов направление магнитного поля изменяют с поло-

жительного на отрицательное. На фиг. 9 также показаны теоретические данные, построенные поверх экспериментальной кривой, демонстрируя приемлемое согласование между ними. Как можно заметить, составляющая  $Q$  вектора приобретает пик, а вектор стремится к нулю при нулевом магнитном поле, следовательно, это демонстрирует способность обеспечивать информацию о местоположении нуля поля в магнитном поле FRC. Для слабого поля, например - 0,02 Тл (20 Гаусс) или менее, с помощью этих векторов также можно оценить напряженность поля. Асимметрия вектора  $U$  для направления магнитного поля допускает измерения направления магнитного поля. Отношение векторов  $U$  и  $Q$  задается изменением угла поляризации, что, в свою очередь, задает направление магнитного поля.

В магнитных полях FRC может присутствовать малое азимутальное магнитное поле ( $B_\theta$ ). Знать это азимутальное поле также весьма желательно. Вышеописанные способы можно распространить на составляющие трехмерного вектора магнитного поля. Этого можно достичь (i) путем использования нескольких почти ортогональных видов для одного и того же объема плазмы (ii) или путем использования двух или более резонансных линий излучения с разными чувствительностями (например,  $N \sim 1$  и  $N \gg 1$ ). Первый способ использования нескольких видов трудно реализовать на практике из-за дефицита доступности надлежащих видов в устройстве, масштаб которого позволяет получить термоядерную плазму. Последние способы в дополнении к этому требуют нахождения нескольких линий Ханле, несколько усложняя теоретическое рассмотрение результатов. Однако теоретическая проблема упрощается, если поляризацией освещающего излучения можно управлять. Такие методы могут обеспечить измерение обоих, т.е. и азимутального, и аксиального магнитных полей в FRC-плазме одновременно.

В вариантах осуществления аппаратура для высокотемпературной FRC-плазмы содержит инструмент для обеспечения следующих измерений применительно к высокотемпературной FRC-плазме:

доказательство существования обращения поля и его эволюции во времени;

радиальное местоположение нуля поля и его эволюция во времени;

пространственный профиль вектора направления поля для чисто магнитного поля внутри плазмы и его эволюция во времени.

Каждое из этих измерений и большее их количество могут быть достигнуты посредством описываемых здесь системы и способов. На фиг. 10 и 11 иллюстрируется конструкция спектрополяриметра и его целевого воплощения на установках, работающих с FRC-плазмой.

На фиг. 10 иллюстрируется система, содержащая спектрополяриметр, соответствующая вариантам осуществления настоящего изобретения, предусматривающим освещение снаружи. Спектрометр с высокоскоростной ПЗС-камерой модифицирован так, чтобы сделать спектрополяриметр. Как обычно, длина волны отображается вдоль направления горизонтальной оси ПЗС. Спектральный диапазон достаточно широк, чтобы включать множество длин волн, которые следует измерять одновременно для измерений векторного поля. Радиальная протяженность плазмы, которая включает в себя нуль поля, отображается вдоль вертикального направления ПЗС. Излучение в вертикальном направлении далее расщепляется на ортогональные поляризации с помощью двоякопреломляющего кристалла, либо материала или компонента, обладающего аналогичными свойствами.

В FRC-плазму радиально инжектируют, например сбоку, три лазерных пучка с разной поляризацией, отделенные малым расстоянием друг от друга, а в противном случае - с одинаковой длиной волны и другими свойствами. Спектрополяриметр также может иметь три щели для отображения этих трех лазерных пучков. Каждая комбинация щели и лазера обеспечит ее собственную спектральную линию, отстоящую от двух других. Инжектируемые лазерные пучки пересекают местоположение нуля в магнитном поле FRC в двух местоположениях. Траектории этих пучков вдоль радиального направления отображаются в вертикальном направлении ПЗС с требуемым пространственным разрешением. Спектрополяриметр обеспечивает комбинацию трех входных поляризаций: двух ортогональных поляризаций и трех или более спектральных линий при одномерном пространственном разрешении вдоль радиального направления. Скоростная камера обеспечивает измерения с требуемым временным разрешением.

В дополнение к местонахождению нуля другой точкой, где магнитное поле исчезает в FRC-плазме, является точка  $X$  в окрестности краев FRC вдоль аксиального направления. Расстояние между точкой  $X$  и нулем задает длину FRC. Представляемые здесь способы предусматривают измерение местоположений точки  $X$  и длины FRC. Длина в FRC может сокращаться со временем. Это затрудняет использование одного лазерного пучка, инжектируемого радиально и находящегося в фиксированном осевом положении, для освещения точки  $X$ . В вариантах осуществления лазерный пучок инжектируют аксиально, так что он может освещать обе точки  $X$  одновременно, и их освещение продолжается во время сжатия магнитного поля FRC. Альтернативный подход к освещению может предусматривать использование множества лазеров или уровней лазера, предусматривающих радиальную инжекцию. В любом случае для сбора сигнала можно использовать радиальный вид, перпендикулярный инжектирующему лазеру и аналогичный радиальному виду, описанному выше.

На фиг. 11 иллюстрируется система, содержащая спектрополяриметр, соответствующая вариантам осуществления настоящего изобретения, предусматривающим самоосвещение. Спектрометр с высокоскоростной ПЗС-камерой модифицирован так, чтобы получить спектрополяриметр. Как обычно, длина волны отображается вдоль направления горизонтальной оси ПЗС. Спектральный диапазон достаточно

широк, чтобы в него входили длины волн, которые следует измерять одновременно для измерений векторного поля. Радиальная протяженность плазмы, которая включает в себя нуль поля, отображается вдоль вертикального направления ПЗС. Излучение в вертикальном направлении дополнительно расщепляется на ортогональные поляризации с помощью двоякопреломляющего кристалла, либо материала или компонента, обладающего аналогичными свойствами. Прибор может обеспечить комбинацию двух ортогональных поляризаций и нескольких спектральных линий при одномерном пространственном разрешении вдоль радиального направления. Скоростная ламера обеспечивает измерения с требуемым временным разрешением. Сигнал можно собирать с аксиального или радиального вида магнитного поля FRC. Для сбора сигнала щель спектрополяриметра должна отображаться на плазме в подходящем местоположении и направлении. Для аксиального вида щель 1101 будет выставлена радиально, покрывая все возможные местоположения нуля. Для радиального вида щель 1102 также будет выставлена вдоль радиального направления.

В дополнение к местоположению нуля другими точками, где магнитное поле исчезает в FRC-плазме, являются точки X в окрестности краев FRC вдоль аксиального направления. Расстояние между точками X определяет длину FRC-плазмы. Представляемые в изобретении способы можно также использовать для измерения местоположений точек X и длины FRC-плазмы. Радиальный вид обеспечивает простейшую геометрию для наблюдения точки X. Можно использовать спектрополяриметр, аналогичный уже описанному здесь. Направление одномерного пространственного разрешения (т.е. длину вида, где отображается щель 1103) следует выставлять в аксиальном направлении FRC-плазмы, которая включает в себя область точек X. Поскольку длина FRC-плазмы сокращается со временем, точка X будет двигаться к срединной плоскости FRC-плазмы. Один спектрополяриметр обеспечит измерение местоположения одной точки X, следовательно, для измерения расстояния между двумя точками X, а значит и длины FRC-плазмы, необходимо проводить два одновременных измерения.

Предлагаемые здесь системы и способы обеспечивают входы для управления FRC-плазмой в реальном масштабе времени и с обратной связью. Рассматриваемые здесь система и способы обеспечивают радиальное, а также аксиальное позиционирование FRC-плазмы в реальном масштабе времени, что можно использовать непосредственно для управления с обратной связью. Например, высокоскоростная камера, используемая с вышеупомянутой конфигурацией, может выдавать местоположения магнитного нуля в двух точках на некоторой хорде, скажем, вдоль диаметра. С помощью простой алгебры эту информацию можно использовать для задания радиуса и центра FRC-плазмы в реальном масштабе времени посредством компьютера или даже обработки аналоговых или цифровых сигналов. (Например, центр этих нулей будет задавать центр плазмы.) Эту информацию в реальном масштабе времени можно выдавать в систему управления с обратной связью для управления радиальным местоположением и размером FRC-плазмы посредством управления магнитным полем, прикладываемым извне. Если имеются в наличии замеры точек X или длины FRC-плазмы, их можно также выдавать в систему с обратной связью для управления аксиальным местоположением FRC-плазмы.

В эту систему с обратной связью можно непосредственно подавать векторы Стокса - Q, U и V. Это может обеспечить способность принимать решение по автоматическому управлению, основанное на существовании обращения поля, местоположения нуля поля и даже направления или составляющей магнитного поля в FRC-плазме.

В реакторе термоядерного синтеза на основе плазмы критично иметь возможности базовых измерений параметров плазмы и управления ею для нормальной работы и безопасности. Описываемые здесь системы и способы обеспечивают невозмущающие измерения конфигурации и положений магнитного поля и могут быть использованы для активного управления в реакторе термоядерного синтеза на основе FRC-плазмы.

Варианты осуществления настоящего изобретения направлены на создание невозмущающего способа измерения магнитных полей в высокотемпературных плазмах, содержащего радиальную инжекцию первого множества лазерных пучков в FRC-плазму, причем каждый из лазерных пучков имеет отличающуюся поляризацию, пересечение местоположения нуля в магнитном поле FRC упомянутой FRC-плазмы в двух местоположениях; отображение траекторий упомянутого первого множества лазерных пучков в вертикальном направлении ПЗС; расщепление излучения в вертикальном направлении с дополнительным расщеплением на ортогональные поляризации с помощью двоякопреломляющего кристалла; измерение местоположения нуля магнитного поля FRC.

В вариантах осуществления способ дополнительно содержит аксиальную инжекцию лазерного пучка в магнитное поле FRC; освещение каждой из двух точек X магнитного поля FRC; измерение расстояния между этими двумя точками X для получения длины магнитного поля FRC.

В вариантах осуществления способ дополнительно содержит радиальную инжекцию второго множества лазерных пучков в магнитное поле FRC; освещение каждой из двух точек X магнитного поля FRC; измерение расстояния между упомянутыми двумя точками X для получения длины магнитного поля FRC.

В вариантах осуществления способ дополнительно содержит выдачу местоположений для местоположения нуля магнитного поля FRC в двух точках вдоль диаметра FRC-плазмы; вычисление радиуса и

центра FRC-плазмы с использованием локализаций местоположения нуля; выдачу упомянутых радиуса и центра в систему управления с обратной связью.

В некоторых вариантах осуществления система управления с обратной связью управляет радиальным местоположением и размером FRC-плазмы посредством управления магнитным полем, прикладываемым извне.

Варианты осуществления настоящего раскрытия также направлены на создание невозмущающего способа измерения магнитных полей в высокотемпературных плазмах, содержащего отображение длины волны FRC-плазмы вдоль направления горизонтальной оси ПЗС; отображение радиальной протяженности FRC-плазмы вдоль направления вертикальной оси ПЗС; расщепление излучения в вертикальном направлении на ортогональные поляризации с использованием двоякопреломляющего кристалла; измерение местоположения нуля магнитного поля FRC упомянутой FRC-плазмы.

В вариантах осуществления способ дополнительно содержит выставление щели первого спектрополяриметра в аксиальном направлении FRC-плазмы; измерение местоположения первой точки X магнитного поля FRC.

В вариантах осуществления способ дополнительно содержит одновременное выставление щели второго спектрополяриметра в аксиальном направлении FRC-плазмы; измерение местоположения второй точки X магнитного поля FRC; измерение расстояния между первой точкой X и второй точкой X для получения длины магнитного поля FRC.

В вариантах осуществления способ дополнительно содержит выдачу местоположений для местоположения нуля магнитного поля FRC в двух точках вдоль диаметра FRC-плазмы; вычисление радиуса и центра FRC-плазмы с использованием упомянутых местоположений для местоположения нуля; выдачу упомянутых радиуса и центра в систему управления с обратной связью.

В вариантах осуществления система управления с обратной связью управляет радиальным местоположением и размером FRC-плазмы посредством управления магнитным полем, прикладываемым извне.

Варианты осуществления настоящего раскрытия направлены на спектрополяриметр для невозмущающего измерения магнитных полей в высокотемпературных плазмах, содержащий спектрометр; высокоскоростную ПЗС-камеру; три лазерных пучка; двоякопреломляющий кристалл.

В вариантах осуществления упомянутые три лазерных пучка имеют разные поляризации, одинаковые длины волн и малое расстояние друг от друга.

В вариантах осуществления спектрополяриметр дополнительно содержит три щели для визуализации упомянутых трех лазерных пучков.

В вариантах осуществления спектрополяриметр выполнен с возможностью радиальной инъекции упомянутых трех лазерных пучков в FRC-плазму; пересечения местоположения нуля в магнитном поле FRC упомянутой FRC-плазмы в двух местоположениях; отображения траекторий упомянутого первого множества лазерных пучков в вертикальном направлении ПЗС; расщепления излучения в вертикальном направлении, с дополнительным расщеплением на ортогональные поляризации с использованием двоякопреломляющего кристалла; измерения с использованием ПЗС местоположения нуля магнитного поля FRC.

В вариантах осуществления спектрополяриметр дополнительно выполнен с возможностью аксиальной инъекции лазерного пучка в магнитное поле FRC; освещения каждой из двух точек X магнитного поля FRC; измерения расстояния между этими двумя точками X для получения длины магнитного поля FRC.

В вариантах осуществления спектрополяриметр дополнительно выполнен с возможностью радиальной инъекции второго множества лазерных пучков в магнитное поле FRC; освещения каждой из двух точек X магнитного поля FRC; измерения расстояния между этими двумя точками X для получения длины магнитного поля FRC.

В вариантах осуществления спектрополяриметр выполнен с возможностью отображения длины волны FRC-плазмы вдоль направления горизонтальной оси ПЗС; отображения радиальной протяженности FRC-плазмы вдоль направления вертикальной оси ПЗС; расщепления излучения в вертикальном направлении на ортогональные поляризации с использованием двоякопреломляющего кристалла; измерения с использованием ПЗС местоположения нуля магнитного поля FRC упомянутой FRC-плазмы.

В вариантах осуществления спектрополяриметр дополнительно выполнен с возможностью выдачи местоположения для местоположения нуля магнитного поля FRC в двух точках вдоль диаметра FRC-плазмы; вычисления радиуса и центра FRC-плазмы с использованием упомянутых местоположений для местоположения нуля; выдачи упомянутых радиуса и центра в систему управления с обратной связью.

В вариантах осуществления система управления с обратной связью управляет радиальным местоположением и размером FRC-плазмы посредством управления магнитным полем, прикладываемым извне.

Варианты осуществления данного изобретения направлены на систему для невозмущающего измерения магнитных полей в высокотемпературных плазмах, содержащую первый спектрополяриметр и второй спектрополяриметр, причем первый спектрополяриметр выполнен с возможностью выставления

щели первого спектрополяриметра в аксиальном направлении FRC-плазмы; и измерения местоположения первой точки X магнитного поля FRC; при этом второй спектрополяриметр выполнен с возможностью одновременного выставления щели второго спектрополяриметра в аксиальном направлении FRC-плазмы; измерения местоположения второй точки X магнитного поля FRC; и измерения расстояния между первой точкой X и второй точкой X для получения длины магнитного поля FRC.

Все признаки, элементы, компоненты, функции и этапы, описанные применительно к любому представленному здесь варианту осуществления, следует считать объединяемыми и взаимозаменяемыми без ограничений с признаками, элементами, компонентами, функциями и этапами из любого другого варианта осуществления. Если некоторый признак, элемент, компоненты, функция или этап описывается применительно лишь к одному варианту осуществления, то должно быть ясно что этот признак, элемент, компонент, функцию или этап можно использовать со всеми остальными описанными здесь вариантами осуществления, если явно не указано иное. Следовательно, этот абзац служит в качестве априорного базиса и письменного обоснования для введения формулы изобретения всякий раз, когда объединяют признаки, элементы, компоненты, функции и этапы из разных вариантов осуществления или когда заменяют признаки, элементы, компоненты, функции и этапы из одного варианта осуществления признаками, элементами, компонентами, функциями и этапами из другого, даже если в последующем описании не явно изложено в конкретном примере, что такие объединения и замены возможны. Выражение формулировок каждой возможной комбинации и замены слишком обременительно, особенно при условии допущения того, что специалисты в данной области техники по прочтении этого описания легко распознают всякую без исключения объединительную совокупность и замену.

Во многих случаях объекты описываются здесь как связанные с другими объектами. Следует понять, что термины "связанный (связанная, связанное, связанные)" и "соединенный (соединенная, соединенное, соединенные)" или любые из форм употребляются здесь взаимозаменяемо и в обоих случаях являются родовыми для непосредственной связи двух объектов без каких-либо существенных, например паразитных промежуточных, объектов и косвенной связи двух объектов с одним или более промежуточными объектами. Если объекты показаны как непосредственно связанные воедино или описаны как связанные воедино без описания какого-либо промежуточного объекта, следует понять, что эти объекты тоже могут быть непосредственно связаны воедино, если в контексте явно не диктует иное.

Хотя варианты осуществления могут быть подвергнуты внесению различных модификаций и альтернативных форм, их конкретные примеры показаны на чертежах и описаны здесь подробно. Однако должно быть ясно, что эти варианты осуществления не ограничиваются раскрытой конкретной формой, а наоборот, эти варианты осуществления следует считать охватывающими все модификации, эквиваленты и альтернативы, находящиеся в рамках сущности изобретения. Помимо этого, приводить в формуле изобретения или вносить в нее можно любые признаки, функции, этапы или элементы согласно вариантам осуществления, а также отрицательные ограничения, которые определяют объем притязаний согласно изобретению признаками, функциями, этапами или элементами, находящимися вне этого объема.

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Невозмущающий способ измерения радиально изменяющихся аксиальных магнитных полей в высокотемпературных плазмах конфигурации с обращенным полем (FRC), содержащий

радиальную инжекцию первого множества лазерных пучков из одного или более источников излучения в FRC-плазму перпендикулярно магнитному полю FRC, удерживающему FRC-плазму, причем упомянутые один или более источников излучения являются внешними по отношению к FRC-плазме, и каждый из упомянутого первого множества лазерных пучков имеет отличающуюся поляризацию, причем каждый из упомянутого первого множества лазерных пучков пересекает местоположение нулевого магнитного поля в магнитном поле FRC FRC-плазмы в двух радиальных местоположениях по мере того, как каждый из упомянутого первого множества лазерных пучков радиально пересекает магнитное поле FRC;

сбор сигналов рассеянного излучения от атомов плазмы, освещаемых упомянутым первым множеством лазерных пучков, причем сигналы рассеянного излучения собирают в направлении обзора, перпендикулярном траекториям инжекции упомянутого первого множества лазерных пучков и либо радиальном, либо аксиальном к магнитному полю FRC;

определение местоположения нулевого магнитного поля в магнитном поле FRC FRC-плазмы по собранным сигналам рассеянного излучения как функции частичной линейной поляризации,  $p_L$ , собранных сигналов рассеянного излучения, причем частичная линейная поляризация,  $p_L$ , собранного сигнала излучения составляет

$$p_L = \frac{1}{\sqrt{1 + 4H^2}}$$

при сборе в направлении обзора, аксиальном к магнитному полю FRC, или

$$p_L = \frac{1 + 2H^2}{1 + 6H^2}$$

при сборе в направлении обзора, радиальном к магнитному полю FRC, где

$H = \omega_p/A$  - соотношение ларморовской частоты связанного электрона и коэффициента Эйнштейна или частоты излучения иона.

2. Способ по п.1, дополнительно содержащий

аксиальную инжекцию второго множества лазерных пучков в FRC-плазму в направлении, параллельном магнитному полю FRC, причем каждый из упомянутого второго множества лазерных пучков пересекает местоположение нулевого магнитного поля в магнитном поле FRC FRC-плазмы в двух аксиальных местоположениях, смежных с противоположными аксиальными краями магнитного поля FRC, по мере того как каждый из упомянутого второго множества лазерных пучков аксиально пересекает магнитное поле FRC;

сбор сигналов рассеянного излучения от атомов плазмы, освещаемых упомянутым вторым множеством лазерных пучков, причем сигналы рассеянного излучения собирают в направлении обзора, перпендикулярном траекториям инжекции упомянутого второго множества лазерных пучков и радиальном к магнитному полю FRC;

определение первого и второго аксиальных местоположений нулевого магнитного поля в магнитном поле FRC FRC-плазмы по собранным сигналам рассеянного излучения как функции частичной линейной поляризации,  $p_L$ , собранных сигналов рассеянного излучения, причем частичная линейная поляризация,  $p_L$ , собранного сигнала излучения составляет

$$p_L = \frac{1 + 2H^2}{1 + 6H^2} ;$$

и измерение расстояния между первым и вторым аксиальными местоположениями нулевого магнитного поля для получения длины магнитного поля FRC.

3. Способ по п.1, дополнительно содержащий

радиальную инжекцию второго и третьего множеств лазерных пучков в FRC-плазму в направлении, перпендикулярном магнитному полю FRC, в первом и втором аксиальных местоположениях, смежных соответственно с первым и вторым противоположными аксиальными краями магнитного поля FRC;

сбор сигналов рассеянного излучения от атомов плазмы, освещаемых упомянутыми вторым и третьим множествами лазерных пучков, причем сигналы рассеянного излучения собирают в направлении обзора, перпендикулярном траекториям инжекции упомянутых второго и третьего множеств лазерных пучков и либо радиальном, либо аксиальном к магнитному полю FRC;

определение первого и второго аксиальных местоположений нулевого магнитного поля в магнитном поле FRC FRC-плазмы по собранным сигналам рассеянного излучения как функции частичной линейной поляризации,  $p_L$ , собранных сигналов рассеянного излучения, причем частичная линейная поляризация,  $p_L$ , собранного сигнала излучения составляет

$$p_L = \frac{1}{\sqrt{1 + 4H^2}}$$

при сборе в направлении обзора, аксиальном к магнитному полю FRC, или

$$p_L = \frac{1 + 2H^2}{1 + 6H^2}$$

при сборе в направлении обзора, радиальном к магнитному полю FRC; и измерение расстояния между первым и вторым аксиальными местоположениями нулевого магнитного поля для получения длины магнитного поля FRC.

4. Способ по любому из пп.1, 2 или 3, причем этап сбора сигналов рассеянного излучения от атомов плазмы содержит

выставление щели первого спектрополяриметра в направлении обзора, перпендикулярном траекториям инжекции упомянутого первого множества лазерных пучков и либо радиальном, либо аксиальном к магнитному полю FRC FRC-плазмы;

сбор сигналов рассеянного излучения от атомов плазмы, освещаемых упомянутым первым множеством лазерных пучков, через щель; и

определение местоположения нулевого магнитного поля в магнитном поле FRC FRC-плазмы по собранным сигналам рассеянного излучения как функции частичной линейной поляризации,  $p_L$ , собранных сигналов рассеянного излучения.

5. Способ по п.3, причем этап сбора сигналов рассеянного излучения от атомов плазмы содержит

одновременное выставление первой и второй щелей первого и второго спектрополяриметров в направлении обзора, перпендикулярном траекториям инжекции упомянутых второго и третьего множеств лазерных пучков и либо радиальном, либо аксиальном к магнитному полю FRC FRC-плазмы;

сбор сигналов рассеянного излучения от атомов плазмы, освещаемых упомянутыми вторым и третьим множествами лазерных пучков, через первую и вторую щели;

определение первого и второго аксиальных местоположений нулевого магнитного поля в магнитном поле FRC по собранным сигналам рассеянного излучения как функции частичной линейной поляризации,  $p_L$ , собранных сигналов рассеянного излучения; и

измерение расстояния между первым и вторым аксиальными местоположениями нулевого магнитного поля для получения длины магнитного поля FRC.

6. Способ по любому из пп.2-5, дополнительно содержащий

определение местоположений нулевого магнитного поля в магнитном поле FRC в двух точках вдоль диаметра FRC-плазмы;

вычисление радиуса и центра FRC-плазмы с использованием упомянутых местоположений нулевого магнитного поля; и

выдачу упомянутых радиуса и центра в систему управления с обратной связью.

7. Способ по п.6, причем система управления с обратной связью управляет радиальным местоположением и размером FRC-плазмы посредством управления прикладываемым извне магнитным полем.

8. Способ по любому из пп.1-7, причем сбор сигналов рассеянного излучения включает в себя отображение сигналов рассеянного излучения с помощью ПЗС, расщепление сигналов рассеянного излучения на пары ортогональных поляризаций сигналов рассеянного излучения и отображение пар ортогонально поляризованных сигналов рассеянного излучения с помощью ПЗС.

9. Способ по любому из пп.1-7, причем инжекция множества лазерных пучков включает расщепление лазерного пучка на первый, второй и третий лазерные пучки.

10. Способ по п.9, дополнительно содержащий выставление первой, второй и третьей щелей в направлении обзора, перпендикулярном траектории инжекции каждого из упомянутых первого, второго и третьего пучков соответственно.

11. Система для невозмущающего измерения радиально изменяющихся аксиальных магнитных полей в высокотемпературных плазмах конфигурации с обращенным полем (FRC), содержащая

первый спектрополяриметр, содержащий спектрометр, имеющий высокоскоростную камеру на приборах с зарядовой связью (ПЗС);

первый источник излучения, расположенный внешним по отношению к FRC-плазме и выполненный с возможностью радиальной инжекции первого множества лазерных пучков в FRC-плазму перпендикулярно магнитному полю FRC, удерживающему FRC-плазму, причем упомянутое магнитное поле FRC является радиально изменяющимся аксиальным магнитным полем, причем каждый из упомянутого первого множества лазерных пучков имеет отличающуюся поляризацию, причем первый источник излучения выполнен с возможностью инжекции каждого из упомянутого первого множества лазерных пучков вдоль траектории, пересекающей местоположение нулевого магнитного поля в магнитном поле FRC FRC-плазмы в двух радиальных местоположениях, причем спектрополяриметр выполнен с возможностью собирать сигналы рассеянного излучения от атомов плазмы, освещаемых упомянутым первым множеством лазерных пучков в направлении обзора, перпендикулярном траекториям инжекции упомянутого первого множества лазерных пучков и либо радиальном, либо аксиальном к магнитному полю FRC;

блок обработки, выполненный с возможностью определять местоположение нулевого магнитного поля в магнитном поле FRC FRC-плазмы по собранным сигналам рассеянного излучения как функцию частичной линейной поляризации,  $p_L$ , собранных сигналов рассеянного излучения, причем частичная линейная поляризация,  $p_L$ , собранного сигнала излучения составляет

$$p_L = \frac{1}{\sqrt{1 + 4H^2}}$$

при сборе в направлении обзора, аксиальном к магнитному полю FRC, или

$$p_L = \frac{1 + 2H^2}{1 + 6H^2}$$

при сборе в направлении обзора, радиальном к магнитному полю FRC, где

$H = \omega_p/A$  - соотношение ларморовской частоты связанного электрона и коэффициента Эйнштейна или частоты излучения иона.

12. Система по п.11, причем спектрополяриметр дополнительно содержит

множество щелей, каждая из которых выставлена с отдельным из упомянутого множества лазерных пучков для сбора и отображения сигналов рассеянного излучения от атомов плазмы, освещаемых упомянутым множеством лазерных пучков, или дополнительно содержащая

двокопреломляющий кристалл для расщепления сигналов рассеянного излучения на пары ортогональных поляризаций сигналов рассеянного излучения, и

множество щелей в спектрополяриметре, причем каждая из упомянутого множества щелей выставлена с отдельным из упомянутого множества лазерных пучков для сбора и отображения пар ортогонально поляризованных сигналов рассеянного излучения с помощью ПЗС.

13. Система по п.11 или 12, выполненная с возможностью

отображения собранных сигналов рассеянного излучения от атомов плазмы, освещаемых упомянутым первым множеством лазерных пучков, с помощью ПЗС; и

определения с использованием ПЗС местоположения нулевого магнитного поля в магнитном поле FRC FRC-плазмы по собранным сигналам рассеянного излучения как функции частичной линейной поляризации,  $p_L$ , собранных сигналов рассеянного излучения.

14. Система по п.13, дополнительно выполненная с возможностью

аксиальной инжекции второго множества лазерных пучков в FRC-плазму в направлении, параллельном магнитному полю FRC, причем каждый из упомянутого второго множества лазерных пучков пересекает местоположение нулевого магнитного поля в магнитном поле FRC FRC-плазмы в двух аксиальных местоположениях, смежных с противоположными аксиальными краями магнитного поля FRC, по мере того как каждый из упомянутого второго множества лазерных пучков аксиально пересекает магнитное поле FRC;

сбора сигналов рассеянного излучения от атомов плазмы, освещаемых упомянутым вторым множеством лазерных пучков, причем сигналы рассеянного излучения собираются в направлении обзора, перпендикулярном траекториям инжекции упомянутого второго множества лазерных пучков и радиальном к магнитному полю FRC;

определения первого и второго аксиальных местоположений нулевого магнитного поля в магнитном поле FRC FRC-плазмы по собранным сигналам рассеянного излучения как функции частичной линейной поляризации,  $p_L$ , собранных сигналов рассеянного излучения, причем частичная линейная поляризация,  $p_L$ , собранного сигнала излучения составляет

$$p_L = \frac{1 + 2H^2}{1 + 6H^2} ;$$

измерения расстояния между первым и вторым аксиальными местоположениями нулевого магнитного поля для получения длины магнитного поля FRC.

15. Система по п.13, дополнительно выполненная с возможностью

радиальной инжекции второго и третьего множеств лазерных пучков в FRC-плазму в направлении, перпендикулярном магнитному полю FRC, в первом и втором аксиальных местоположениях, смежных соответственно с первым и вторым противоположными аксиальными краями магнитного поля FRC;

сбора сигналов рассеянного излучения от атомов плазмы, освещаемых упомянутыми вторым и третьим множествами лазерных пучков, причем сигналы рассеянного излучения собираются в направлении обзора, перпендикулярном траекториям инжекции упомянутых второго и третьего множеств лазерных пучков и либо радиальном, либо аксиальном к магнитному полю FRC;

определения первого и второго аксиальных местоположений нулевого магнитного поля в магнитном поле FRC FRC-плазмы по собранным сигналам рассеянного излучения как функции частичной линейной поляризации,  $p_L$ , собранных сигналов рассеянного излучения, причем частичная линейная поляризация,  $p_L$ , собранного сигнала излучения составляет

$$p_L = \frac{1}{\sqrt{1 + 4H^2}}$$

при сборе в направлении обзора, аксиальном к магнитному полю FRC, или

$$p_L = \frac{1 + 2H^2}{1 + 6H^2}$$

при сборе в направлении обзора, радиальном к магнитному полю FRC; и

измерения расстояния между первым и вторым аксиальными местоположениями нулевого магнитного поля для получения длины магнитного поля FRC.

16. Система по п.14 или 15, дополнительно выполненная с возможностью

определения местоположений нулевого магнитного поля в магнитном поле FRC в двух точках вдоль диаметра FRC-плазмы;

вычисления радиуса и центра FRC-плазмы с использованием упомянутых местоположений нулевого магнитного поля; и

выдачи упомянутых радиуса и центра в систему управления с обратной связью.

17. Система по п.16, причем система управления с обратной связью управляет радиальным местоположением и размером FRC-плазмы посредством управления прикладываемым извне магнитным полем.

18. Система по любому из пп.10, 11, дополнительно содержащая

второй спектрополяриметр, содержащий спектрометр, имеющий высокоскоростную ПЗС-камеру,

второй источник излучения, расположенный внешне по отношению к FRC-плазме и выполненный с возможностью аксиальной инжекции второго множества лазерных пучков в FRC-плазму в направлении, параллельном магнитному полю FRC, причем второй источник излучения выполнен с возможностью инжекции каждого из упомянутого второго множества лазерных пучков вдоль траектории, пересекающей местоположение нулевого магнитного поля в магнитном поле FRC FRC-плазмы в двух аксиаль-

ных местоположениях, смежных с противоположными аксиальными краями магнитного поля FRC, причем спектрополяриметр выполнен с возможностью собирать сигналы рассеянного излучения от атомов плазмы, освещаемых упомянутым вторым множеством лазерных пучков в направлении обзора, перпендикулярном траекториям инжекции упомянутого первого множества лазерных пучков и радиальном к магнитному полю FRC; и

блок обработки, выполненный с возможностью определять первое и второе местоположения нулевого магнитного поля, смежные с первым и вторым аксиальными краями магнитного поля FRC FRC-плазмы, по собранным сигналам рассеянного излучения как функцию частичной линейной поляризации,  $p_L$ , собранных сигналов рассеянного излучения, причем частичная линейная поляризация,  $p_L$ , собранного сигнала излучения составляет

$$p_L = \frac{1 + 2H^2}{1 + 6H^2}$$

19. Система по любому из пп.11, 12, дополнительно содержащая второй и третий спектрополяриметры, каждый из которых содержит спектрометр, имеющий высокоскоростную ПЗС-камеру; и

второй и третий источники излучения, расположенные внешними по отношению к FRC-плазме и выполненные с возможностью радиальной инжекции второго и третьего множеств лазерных пучков в FRC-плазму в направлении, перпендикулярном магнитному полю FRC, в первом и втором аксиальных местоположениях, смежных соответственно с первым и вторым противоположными аксиальными краями магнитного поля FRC, вдоль траектории, пересекающей местоположение нулевого магнитного поля в магнитном поле FRC FRC-плазмы, смежной с противоположными аксиальными краями магнитного поля FRC, причем каждый спектрополяриметр второго и третьего спектрополяриметров выполнен с возможностью собирать сигналы рассеянного излучения от атомов плазмы, освещаемых упомянутыми вторым и третьим множествами лазерных пучков в направлении обзора, перпендикулярном траекториям инжекции упомянутых второго и третьего множеств лазерных пучков и либо радиальном, либо аксиальном к магнитному полю FRC; и

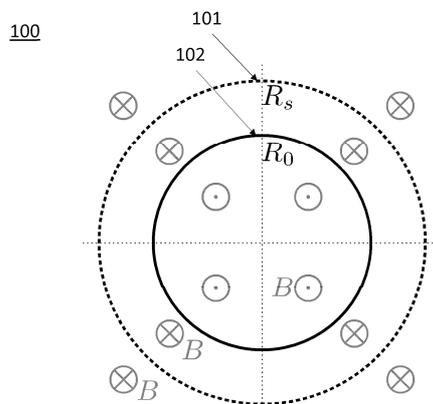
блок обработки, выполненный с возможностью определять первое и второе местоположения нулевого магнитного поля, смежные с первым и вторым противоположными аксиальными краями магнитного поля FRC FRC-плазмы, по собранным сигналам рассеянного излучения как функцию частичной линейной поляризации,  $p_L$ , собранных сигналов рассеянного излучения, причем частичная линейная поляризация,  $p_L$ , собранного сигнала излучения составляет

$$p_L = \frac{1}{\sqrt{1 + 4H^2}}$$

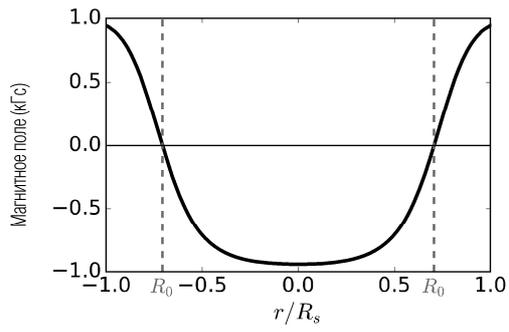
при сборе в направлении обзора, аксиальном к магнитному полю FRC, или

$$p_L = \frac{1 + 2H^2}{1 + 6H^2}$$

при сборе в направлении обзора, радиальном к магнитному полю FRC.

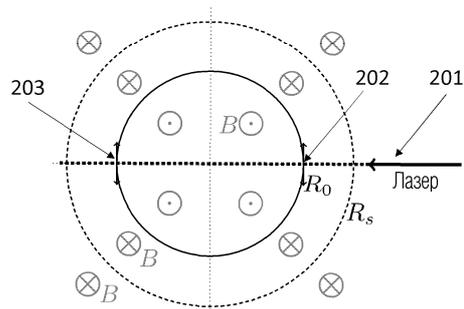


Фиг. 1А



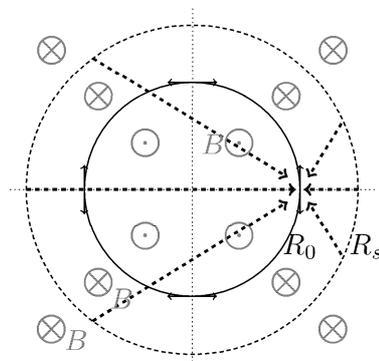
Фиг. 1В

200

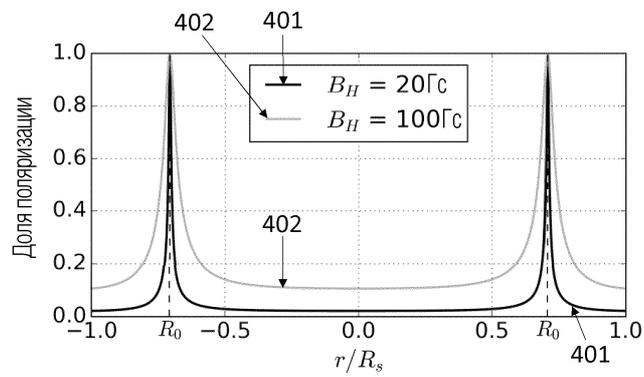


Фиг. 2

300

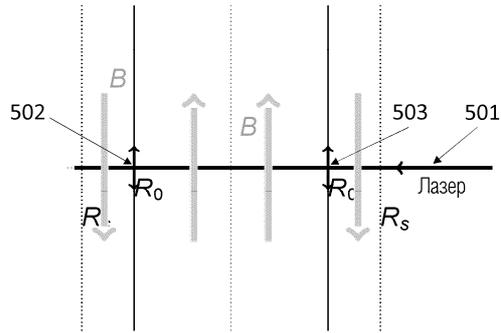


Фиг. 3



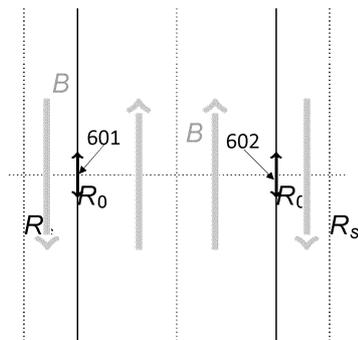
Фиг. 4

500

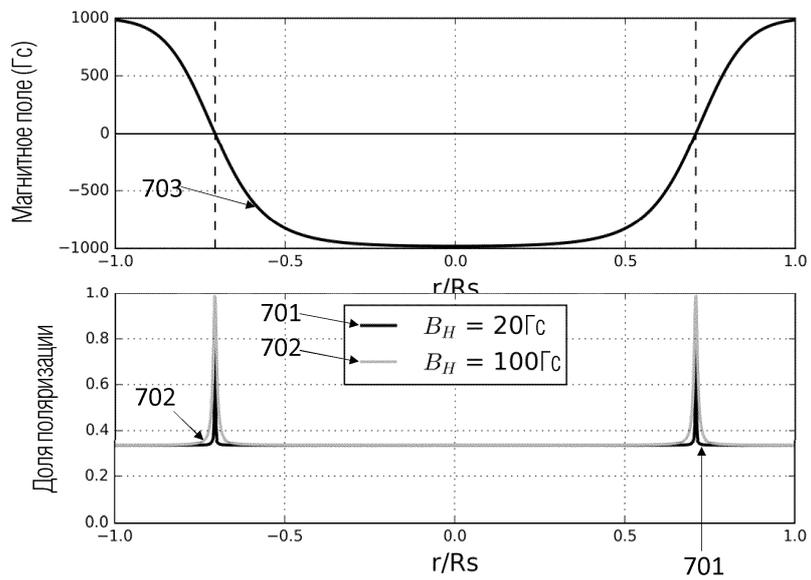


Фиг. 5

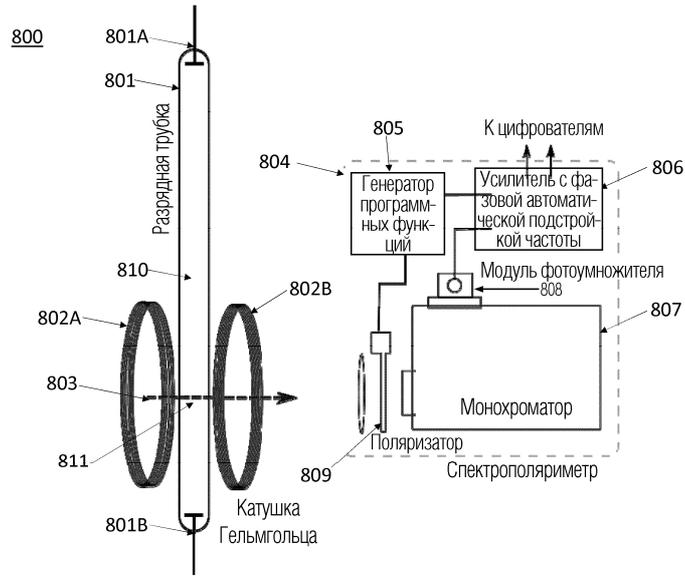
600



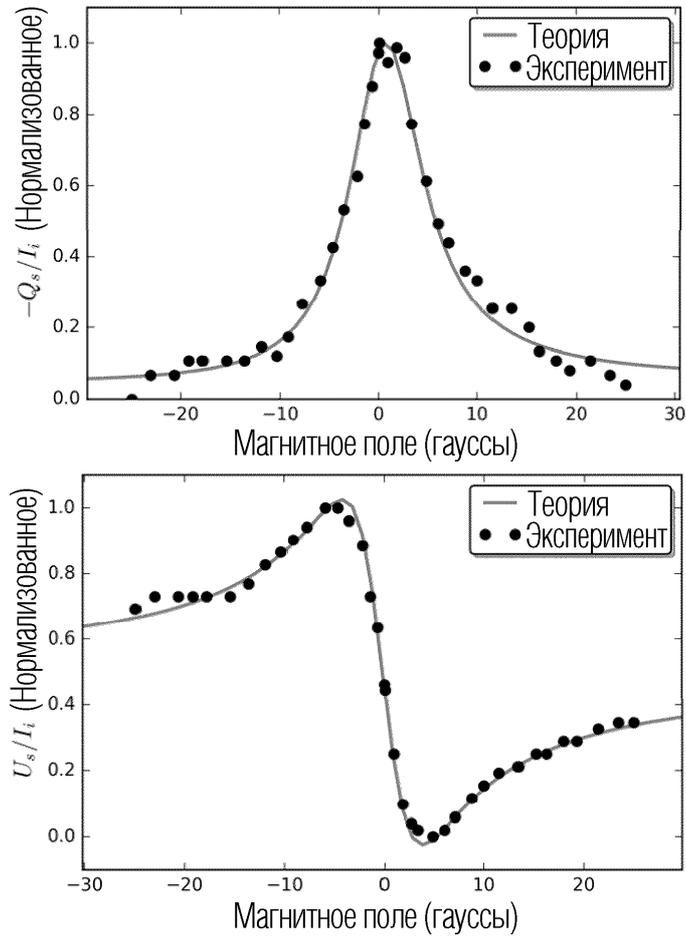
Фиг. 6



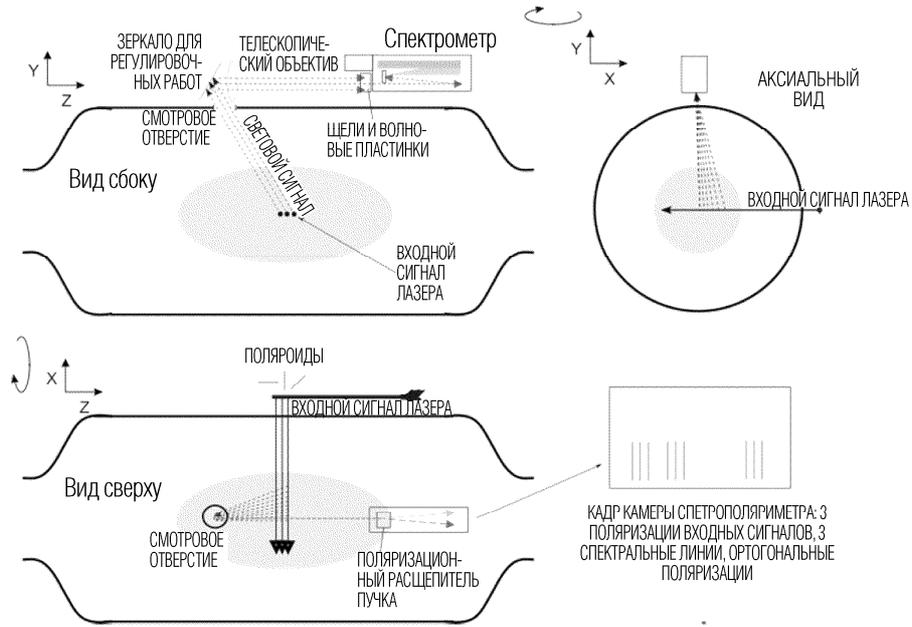
Фиг. 7



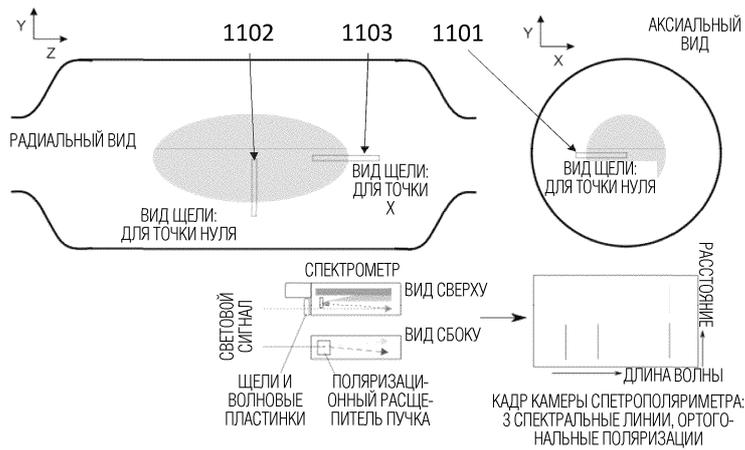
Фиг. 8



Фиг. 9



Фиг. 10



Фиг. 11

