

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **042767**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2023.03.23

(21) Номер заявки
201990155

(22) Дата подачи заявки
2017.06.28

(51) Int. Cl. **G01R 33/022** (2006.01)
G01R 33/02 (2006.01)
G21B 1/05 (2006.01)

(54) **КОМБИНИРОВАННЫЙ МАГНИТОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ЗОНД И СИСТЕМА
УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ**

(31) **62/356,344; 62/361,980**

(32) **2016.06.29; 2016.07.13**

(33) **US**

(43) **2019.05.31**

(86) **PCT/US2017/039766**

(87) **WO 2018/005653 2018.01.04**

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

(72) Изобретатель:
**Томпсон Мэттью, Рош Томас, Траск
Эрик, Напп Курт (US)**

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

(56) **US-H-H24**

Pomeroy et al. Electromagnetism surrounding Plasmoid Formation in an FRC Test Article. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 19 September 2015, [retrieved on 2017-08-24], Retrieved from the internet: <URL: http://campus.mst.edu/aplab/index_files/UGRC_2012_Pomeroy.pdf>, entire document

US-A1-20130333466

US-A1-20090309577

US-A1-20060066304

US-A-4581291

(57) Комбинация из потоковой петли и миниатюрного индуктивного зонда, содержащая один кабель с минеральной изоляцией, содержащий внешнюю оболочку, например, из нержавеющей стали или подобного, и три (3) проводника, расположенных внутри оболочки и заделанных в минеральный изолятор, например, MgO. Один из проводников формирует потоковую петлю, имеющую одиночную петлю, и второй и третий проводники формируют миниатюрный индуктивный зонд, содержащий один провод, имеющий двойную петлю. Комбинированный зонд выполнен с возможностью предотвращения скручивания проводников по перегибу кривой, когда комбинированному зонду придана криволинейная форма. Для предотвращения скручивания проводники могут иметь форму ленточных проводов, имеющих, в общем, плоское поперечное сечение прямоугольной формы, и/или оболочка может иметь поперечное сечение, в общем, овальной или прямоугольной формы.

B1

042767

042767

B1

Область изобретения

Объект изобретения, описанный в настоящей заявке, относится, в общем, к диагностике плазмы и, в частности, к магнитному диагностическому зонду, который облегчает измерение изменяющихся магнитных полей, генерируемых плазмой и магнитными катушками.

Уровень техники изобретения

Индуктивные средства магнитной диагностики применяются для измерения изменяющихся магнитных полей, генерируемых плазмой и магнитными катушками. Многие параметры плазмы, например, плазмы обращенной магнитной конфигурации (FRC-плазмы), можно вывести из результатов магнитных измерений, в том числе: размер, форму, местоположение, режимы глобальной неустойчивости и значительные флуктуации частоты. Измерения характеристик качества этих различных параметров требуют специальных решеток из отдельных магнитных датчиков, размещенных по всей внутренней стенке вакуумного или сосуда для удержания. Каждый отдельный магнитный датчик обычно является проволочной петлей, соединенной с аналоговым интегратором и электронными устройствами сбора данных. Датчик данного типа обычно называют магнитным зондом или миниатюрным индуктивным зондом (B-dot зондом), если он имеет небольшую площадь поперечного сечения, или потоковой петлей, если он имеет большие размеры. Хотя упомянутые магнитные датчики очень просты концептуально, проектирование практических магнитных диагностических систем осложняется набором факторов, в том числе: шириной детектируемой полосы частот, наведенными шумами, совместимостью с вакуумной средой, радиационной совместимостью, общей надежностью, настраиваемостью и дрейфом сигнала. Выбор компромиссного решения, характерного для взаимодействия всех приведенных факторов является ключом к проектированию эффективной магнитной диагностической системы.

Магнитные зонды и потоковые петли представляют собой испытанные средства для диагностики плазмы, которые являются как надежными, так и эффективными. Данные устройства используют закон Фарадея для измерения магнитного поля и потока. Изменение магнитного потока $\Phi = \int \vec{B} \cdot \vec{n} da$, проходящего через витки провода, создает напряжение V_c , которое пропорционально производной по времени составляющей B магнитного поля, параллельной оси катушки

$$V_c = - \frac{d\Phi}{dt} = - n_c a_c \frac{dB}{dt} \quad (1)$$

где n_c означает число витков, и a_c означает площадь каждого витка. Поэтому результаты измерения V_c можно интегрировать как электронным, так и вычислительным методами, чтобы получить значения для Φ или B , в зависимости от конфигурации катушки. Одновитковые катушки, которые охватывают большие площади, применяются для измерения Φ и называются потоковыми петлями. Многовитковые катушки, которые являются достаточно малыми, чтобы магнитное поле внутри них можно было считать однородным, называются магнитными зондами или миниатюрными индуктивными зондами и применяются для измерения B .

Форму, размер и продольное положение FRC-плазмы можно вывести из магнитного потока, вытесняемого FRC-плазмой. Однородное магнитное поле обычно заполняет камеру удержания в системе удержания FRC-плазмы до возбуждения плазмы. Данное поле представлено как B_0 на фиг. 1. Диамагнитные свойства плазменного тороида, в сочетании со свойствами расширения магнитного потока вакуумным сосудом, приводят к сжатию исходного магнитного поля камеры удержания между FRC и стенкой, когда плазма входит в область удержания из формирующей секции. Получаемое усиление поля в зоне, внешней относительно FRC, B_e на фиг. 1, измеряется магнитными зондами, расположенными непосредственно внутри стенки камеры. В идеальном случае, радиус $r_{\Delta\phi}$ вытесненного потока дается простым выражением $r_{\Delta\phi} = r_w \sqrt{1 - B_0/B_e}$, где r_w означает радиус стенки. Радиус $r_{\Delta\phi}$ вытесненного потока приблизительно равен радиусу r_s сепаратрисы в большинстве режимов. Сепаратриса является поверхностью разграничения между открытыми и замкнутыми силовыми линиями поля, которая ограничивает FRC.

Контроль магнитного поля, формируемого магнитными катушками, является важной вспомогательной функцией средств магнитной диагностики. Просчеты могут возникать, когда магнитные катушки соединяют или при программировании их питания. Поэтому, желательно располагать независимым средством проверки того, что фактическое магнитное поле в устройстве является таким, которое требовалось. Средства магнитной диагностики, большинство из которых калибруется абсолютным методом по известным магнитным полям перед монтажом, обеспечивают упомянутую возможность.

Бывают случаи, когда, вместо применения отдельных зондов и предположений о расширении потока, необходимо непосредственно измерять представляющие интерес величины с использованием потоковых петель и кольцевых миниатюрных индуктивных зондов. Однако пространство и практически обоснованное число проникновений в вакуумном корпусе всегда ограничено, что затрудняет обеспечение оптимального числа отдельных потоковых петель и миниатюрных индуктивных зондов.

Поэтому желательно создать усовершенствованные потоковые петли и миниатюрные индуктивные зонды.

Краткое описание чертежей

Подробную информацию о примерных вариантах осуществления, в том числе о конструкции и функционировании, можно собрать, частично, из изучения прилагаемых чертежей, на которых одинаковые числовые позиции относятся к одинаковым частям. Компоненты на фигурах не обязательно вычерчены в масштабе, а, вместо этого, внимание уделяется принципам изобретения. Кроме того, все иллюстрации предназначены для сообщения концепций, при этом относительные размеры, формы и другие подробные характерные черты могут поясняться схематически, а не буквально или в точности.

Фиг. 1 - изображение, поясняющее вытеснение ранее существующего магнитного потока (слева) при появлении FRC-плазмы (справа).

Фиг. 2 - поперечное сечение, поясняющее систему удержания FRC с комбинацией из потоковой петли и миниатюрного индуктивного зонда, расположенной в данной системе.

Фиг. 3 - изображение трехпроводной (3-проводной) конфигурации комбинации из потоковой петли и миниатюрного индуктивного зонда в соответствии с настоящими вариантами осуществления.

Фиг. 4 - сечение, поясняющее комбинацию из потоковой петли и миниатюрного индуктивного зонда, где сечение взято по линии 4-4 на фиг. 3.

Фиг. 5, 6 и 7 - сечения, поясняющие альтернативные варианты осуществления комбинации из потоковой петли и миниатюрного индуктивного зонда.

Следует отметить, что элементы аналогичных конструкций или функций обычно представляются одинаковыми числовыми позициями с целью иллюстрации на всех фигурах. Следует также отметить, что предназначены только для облегчения описания предпочтительных вариантов осуществления.

Описание

Каждые из дополнительных признаков или идей, раскрытых ниже, можно использовать по отдельности или в сочетании с другими признаками и идеями, чтобы обеспечить комбинацию из потоковой петли и миниатюрного индуктивного зонда.

Характерные примеры вариантов осуществления, предлагаемые в настоящей заявке и использующие многие из упомянутых дополнительных признаков и идей как по отдельности, так и в сочетании, будут подробно описаны далее со ссылкой на прилагаемые чертежи. Данное подробное описание предназначено только для предоставления специалисту в данной области техники дополнительной подробной информации для практического применения предпочтительных аспектов настоящих идей и не предполагает ограничения объема изобретения. Поэтому, сочетания признаков и этапов, раскрываемые в последующем подробном описании, могут быть и не обязательны для практического применения изобретения в самом широком смысле и, вместо этого, приведены только для конкретного описания характерных примеров настоящих идей.

Кроме того, различные признаки характерных примеров и зависимых пунктов формулы изобретения можно объединять такими способами, которые не перечислены конкретным и явным образом, чтобы обеспечивать дополнительные полезные варианты осуществления настоящих идей. Кроме того, следует отметить, что все признаки, раскрываемые в описании и/или формуле изобретения, предполагают раскрытие по отдельности и независимо друг от друга с целью первоначального раскрытия, а также с целью ограничения заявленного объекта изобретения, не зависимо от наборов признаков в вариантах осуществления и/или формуле изобретения. Следует также четко отметить, что все диапазоны значений или указания о группах элементов раскрывают каждое возможное промежуточное значение или промежуточный элемент с целью первоначального раскрытия, а также с целью ограничения заявленного объекта изобретения.

Варианты осуществления, предлагаемые в настоящей заявке, направлены на комбинацию из потоковой петли и миниатюрного индуктивного зонда, которая облегчает монтаж внутри удерживающего корпуса по кривой внутренней стенки корпуса. На фиг. 2 показана система 10 удержания FRC-плазмы, содержащая камеру или сосуд 12 для удержания, FRC-плазму 14, удерживаемую внутри сосуда 12 и магнитную катушку 16 соленоида, расположенную вокруг сосуда 12. Комбинация 20 из потоковой петли и миниатюрного индуктивного зонда расположена у внутренней стенки сосуда 12.

Миниатюрные индуктивные зонды и потоковые петли представляют собой испытанные типы средств для диагностики плазмы, которые являются как надежными, так и эффективными. Среды горячей плазмы, в которых диагностические датчики подвергаются воздействию излучения плазмы и/или флюенса нейтронов, например внутренние области сосуда 12 для удержания в системе 10 удержания FRC-плазмы или токамаков и т.п., требуют применения датчиков, которые не будут перегреваться под действием излучения плазмы, и требуют применения материалов датчиков, которые могут оставаться исправными при воздействии флюенса нейтронов. В средах горячей плазмы, в которых флюенс нейтронов является высоким, обычно применяют кабели с минеральной изоляцией, которые содержат неорганический изоляционный материал, содержащий, например, MgO или подобный ему. См. например, публикацию Hodapp et al, "Magnetic diagnostics for future tokamaks", Proceedings of 16th International Symposium on Fusion Engineering, Champaign, IL, 1995, pp. 918-921 vol. 2, которая включена в настоящую заявку по ссылке.

Как показано на фиг. 3 и 4, комбинированный зонд 20 предпочтительно содержит один кабель с

минеральной изоляцией, имеющий внешнюю оболочку 26, содержащую, например, нержавеющую сталь, инконель или другой высокотемпературный металлический сплав, и три (3) проводника 22 и 24, расположенных внутри оболочки 26 и заделанных в минеральный изолятор 28, содержащий неорганический минеральный изолятор, например MgO , SiO_2 , или другой уплотняемый изоляционный минеральный порошок. Один из проводников 22 формирует потоковую петлю 22, которая однократно обходит вокруг всего сосуда 12, гибается на себя и выходит из сосуда 12. Вторым и третьим проводниками формируют миниатюрный индуктивный зонд 24, который очень чувствителен к изменению в зоне. Миниатюрный индуктивный зонд 24 содержит один провод, который обходит петлями вокруг сосуда 12 два (2) раза. Провод 24 закорочен на одном конце, закручен на себя и выходит из сосуда 12.

Чтобы потоковая петля 22 и миниатюрные индуктивные зонды 24 функционировали надлежащим образом, при заключении внутри одного кабеля с минеральной изоляцией, три (3) проводника 22 и 24 комбинированного зонда 20 предпочтительно выставлены перпендикулярно стенке сосуда 12. Если скручивание происходило бы по перегибу кривой, когда комбинированному зонду 20 придается криволинейная форма, то это привело бы к уменьшению площади поперечного сечения между проводниками, что обычно создает проблемы для миниатюрного индуктивного зонда 24, который, как отмечено выше, обычно бывает очень чувствителен к изменению площади.

Как показано на фиг. 5, вариант осуществления комбинированного зонда 120 включает в себя кабель, содержащий три (3) ленточных провода 122 и 124, которые сформированы, например, из меди или подобного материала и имеют, в общем, уплощенное поперечное сечение прямоугольной формы. Ленточные провода 122 и 124 пространственно расположены друг над другом по их ширине. Приведенная конфигурация проводов с расположением друг над другом обычно предотвращает скручивание, когда комбинированному зонду 120 придана криволинейная форма. Из трех лент, одна лента 122 используется для потоковой петли, и две других ленты 124 предпочтительно содержат одиночную ленту, формирующую миниатюрные индуктивные зонды.

Другой вариант осуществления комбинированного зонда 220 представлен на фиг. 6. Показана внешняя оболочка 226, предпочтительно содержащая противоположные удлиненные плоские стороны, формирующие поперечное сечение в общем овальной, прямоугольной или подобной формы. Как показано, оболочка 226 содержит противоположные плоские стороны 225 и 227, простирающиеся между дуговидными сторонами 221 и 223. Как показано дополнительно, три (3) ленточных провода 122 и 124 пространственно расположены друг над другом вдоль широких плоских сторон 225 и 227 оболочки 226. Конфигурация оболочки 226 с поперечным сечением овальной формы, вместе с конфигурацией ленточных проводов 122 и 124 с прямоугольным поперечным сечением обычно дополнительно препятствует скручиванию ленточных проводов 122 и 124, когда комбинированному зонду 220 придана криволинейная форма.

В еще одном другом варианте осуществления комбинированный зонд 320, показанный на фиг. 7, содержит внешнюю оболочку 226, предпочтительно содержащую противоположные удлиненные плоские стороны, формирующие поперечное сечение в общем овальной, прямоугольной или подобной формы. Как показано, оболочка 226 содержит противоположные плоские стороны 225 и 227, простирающиеся между дуговидными сторонами 221 и 223. Однако, вместо расположенных друг над другом плоских ленточных проводов, три (3) проводника 322 и 324 могут иметь любую форму поперечного сечения, в том числе, например, круглую, квадратную, восьмигранную и т.п. Широкие плоские стороны 225 и 227 внешней оболочки 226 обычно препятствуют скручиванию трех (3) проводников 322 и 124, когда комбинированному зонду 320 придана криволинейная форма.

Хотя варианты осуществления, представленные в настоящей заявке, описаны применительно к среде FRC-плазмы исключительно для примера, упомянутые варианты осуществления можно использовать во множестве высокотемпературных окружающих сред, при наличии излучения плазмы и/или флюенса нейтронов, например, в токамаках и т.п.

Примерные варианты осуществления, приведенные в настоящей заявке, предназначены только для иллюстрации и не для какого-либо ограничения.

Все признаки, элементы, компоненты, функции и этапы, описанные со ссылкой на любой вариант осуществления, приведенный в настоящей заявке, предполагают возможность свободного сочетания с и замены таковыми из любого другого варианта осуществления. Если некоторый признак, элемент, компонент, функция или этап описан со ссылкой только на один вариант осуществления, то следует понимать, что данный признак, элемент, компонент, функция или этап может применяться с каждым другим вариантом осуществления, приведенным в настоящей заявке, если прямо не указано иначе. Поэтому настоящий параграф служит предшествующей основой и письменным обеспечением для представления формулы изобретения в любое время, когда сочетают признаки, элементы, компоненты, функции и этапы из разных вариантов осуществления, или когда признаки, элементы, компоненты, функции и этапы из одного варианта осуществления заменяют таковыми из другого варианта осуществления, даже если последующее описание не указывает прямо, в конкретном примере, что такие сочетания или замены возможны. Явное упоминание каждого возможного сочетания или замены является чрезмерно обременительным, особенно если допустимость каждого такого сочетания и замены будет легко замечена специали-

стами в данной области техники, при прочтении настоящего описания.

Во многих случаях, элементы описаны в настоящей заявке как связанные с другими элементами. Следует понимать, что термины "связанный" и "соединенный" (или любые их формы) используются в настоящей заявке с возможностью взаимной замены и, в обоих случаях, характеризуют непосредственное соединение двух элементов (без каких-либо существенных (например, пассивных) промежуточных элементов) и косвенное соединение двух элементов (с одним или более пассивными промежуточными элементами). Когда элементы показаны как непосредственно соединенные или описаны как соединенные без описания какого-либо промежуточного элемента, следует понимать, что данные элементы можно также соединять косвенно, если по контексту явным образом не предписано иначе.

Хотя варианты осуществления допускают различные модификации и альтернативные формы, их конкретные примеры показаны на чертежах и подробно описаны в настоящей заявке. Однако следует понимать, что данные варианты осуществления не ограничены раскрытой конкретной формой, а напротив, данные варианты осуществления предусматривают охват всех модификаций, эквивалентов и альтернатив, не выходящих за пределы существа раскрытия. Кроме того, любые признаки, функции, этапы или элементы вариантов осуществления могут быть упомянуты в формуле изобретения или добавлены в нее, как и отрицательные ограничения, которые определяют объем притязаний формулы изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Комбинированный магнитоизмерительный зонд, содержащий комбинацию из одного или более из потоковой петли и миниатюрного индуктивного зонда, причем магнитоизмерительный зонд содержит единственный кабель, содержащий три проводника, расположенных внутри внешней оболочки, причем внешняя оболочка имеет противоположные удлиненные плоские стороны, а проводники пространственно расположены друг над другом в направлении, ортогональном поверхностям удлиненных плоских сторон, так чтобы предотвращать скручивание, когда магнитоизмерительному зонду придана криволинейная форма, причем магнитоизмерительный зонд имеет первый конец и второй конец, причем один из трех проводников образует потоковую петлю, содержащую одиночный провод, имеющий одиночную петлю, простирающуюся между первым концом магнитоизмерительного зонда и вторым концом магнитоизмерительного зонда и заканчивающуюся на втором конце магнитоизмерительного зонда, и причем другие два из трех проводников образуют миниатюрный индуктивный зонд, содержащий одиночный провод, имеющий двойную петлю, простирающийся между первым концом магнитоизмерительного зонда и вторым концом магнитоизмерительного зонда и возвращающийся к первому концу магнитоизмерительного зонда и заканчивающийся на первом конце магнитоизмерительного зонда.

2. Зонд по п. 1, причем единственный кабель представляет собой кабель с минеральной изоляцией.

3. Зонд по п. 1, причем проводники заделаны в минеральный изолятор.

4. Зонд по п. 3, причем внешняя оболочка сформирована из высокотемпературного металла или металлического сплава.

5. Зонд по п. 4, причем высокотемпературный металлический сплав представляет собой инконель или нержавеющую сталь.

6. Зонд по п. 3, причем минеральный изолятор содержит уплотняемый изоляционный минеральный порошок.

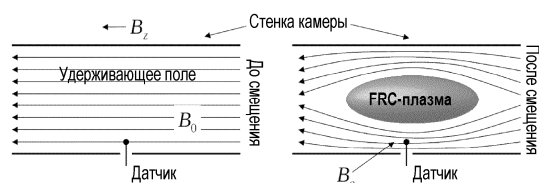
7. Зонд по п. 6, причем уплотняемый изоляционный минеральный порошок содержит один из MgO и SiO₂.

8. Зонд по любому из пп. 1-7, причем проводники представляют собой ленточные провода, имеющие, в общем, плоское поперечное сечение прямоугольной формы.

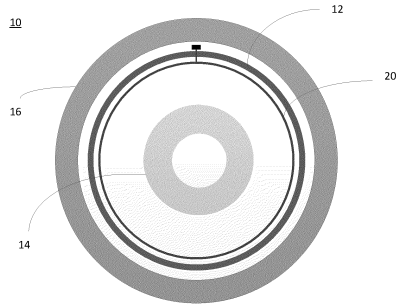
9. Зонд по п. 1, причем внешняя оболочка имеет одно из поперечного сечения овальной формы и поперечного сечения прямоугольной формы.

10. Зонд по п. 1, причем противоположные плоские стороны простираются между дуговидными сторонами.

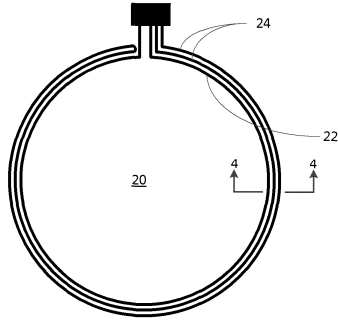
11. Система удержания плазмы, содержащая сосуд для удержания, магнитную катушку, расположенную вокруг сосуда, и комбинированный магнитоизмерительный зонд по любому из пп. 1-10, расположенный у внутренней стенки сосуда.



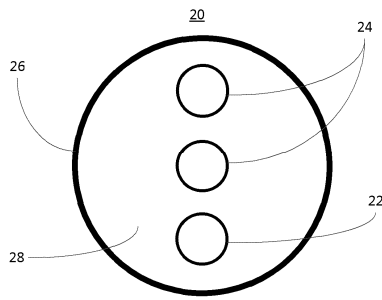
Фиг. 1



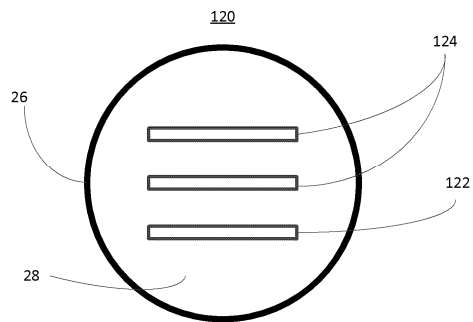
Фиг. 2



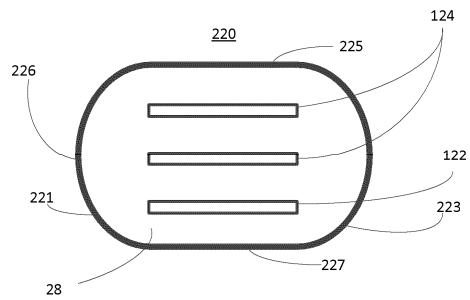
Фиг. 3



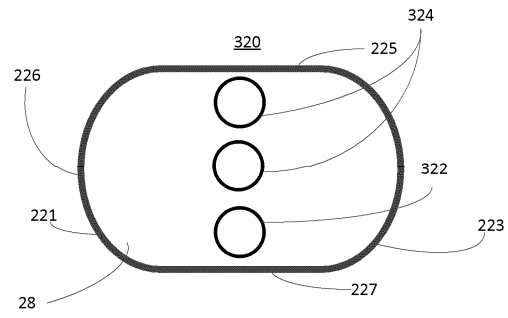
Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7

