

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **039430**(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2022.01.26

(21) Номер заявки
202091850

(22) Дата подачи заявки
2019.01.31

(51) Int. Cl. **H01F 6/02** (2006.01)
H01F 6/06 (2006.01)
H01F 27/32 (2006.01)
G21K 1/093 (2006.01)
G21B 1/05 (2006.01)

(54) ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ ОБМОТКА ВОЗБУЖДЕНИЯ

(31) 1801621.2; 1812119.4; 1818817.7

(32) 2018.02.01; 2018.07.25; 2018.11.19

(33) GB

(43) 2020.09.30

(86) PCT/GB2019/050275

(87) WO 2019/150123 2019.08.08

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
ТОКЕМЕК ЭНЕРДЖИ ЛТД (GB)

(72) Изобретатель:
**Слэйд Роберт, Круип Марсель, Ван
Нюгтерен Бас, Бриттлс Грег, Руис Де
Вилла Вальдес Энрике, Бэйтман Род,
Даун Элан (GB)**

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

(56) EP-A2-0921535
US-A1-2009286685

(57) Предложена высокотемпературная сверхпроводящая (ВТСП) обмотка возбуждения. ВТСП-обмотка возбуждения содержит множество витков и частично изолирующий слой. Упомянутое множество витков содержит ВТСП-материал и металлический стабилизатор. Частично изолирующий слой разделяет витки, так что ток может перераспределяться между витками через частично изолирующий слой. Частично изолирующий слой содержит электропроводный слой, а также первый и второй изолирующие слои. Электропроводный слой покрыт на одной стороне первым изолирующим слоем и на другой стороне вторым изолирующим слоем. Каждый изолирующий слой имеет одно или более окон, через которые может осуществляться электрический контакт между витками и электропроводным слоем. Окна в первом изолирующем слое смещены в плоскости электропроводной полосы от окон во втором изолирующем слое.

B1**039430****039430****B1**

Область изобретения

Данное изобретение относится к ВТСП-магнитам.

Предпосылки изобретения

Проблема производства термоядерной энергии чрезвычайно сложна. Предложены многие альтернативные установки помимо токамаков, однако же ни одна из них еще не дали никаких результатов, сравнимых с показываемыми наилучшими эксплуатируемыми в настоящее время токамаками, такими как JET.

После начала строительства ITER - самого крупного и самого дорогостоящего (более 15 миллиардов евро) из всех когда либо строившихся токамаков, мировые исследования термоядерного синтеза вошли в новую фазу. Успешный путь к промышленному термоядерному реактору требует длительного импульса и стабильной работы в сочетании с высокой эффективностью, необходимой для того, чтобы сделать производство электроэнергии экономичным. Эти условия особенно трудно достижимы одновременно, а запланированная программа потребует многих лет экспериментальных исследований на ITER и других установках термоядерного синтеза, а также теоретических и технологических исследований. Широко распространен прогноз, что промышленный термоядерный реактор, разрабатываемый этим путем, не будет построен до 2050 г.

Чтобы получить реакции термоядерного синтеза, необходимые для экономической выработки электроэнергии (т.е., получения отдаваемой мощности, гораздо большей, чем подводимая мощность), традиционный токамак должен быть гигантским (примером чего является ITER), так что время удержания энергии (которое, грубо говоря, пропорционально объему плазмы) может оказаться достаточно большим, чтобы плазма стала достаточно горячей для прохождения термоядерного синтеза.

В WO 2013/030554 описан альтернативный подход, предусматривающий применение компактного сферического токамака, чтобы использовать его в качестве источника нейтронов или источника энергии. Форма плазмы с низким аспектным отношением в компактном сферическом токамаке увеличивает время удержания частиц и обеспечивает выработку полезной электрической мощности в значительно меньшей установке. Вместе с тем, необходим центральный столб малого диаметра, что вызывает трудности проектирования удерживающего плазму магнита. Перспективная технология для таких магнитов представлена высокотемпературными сверхпроводящими (ВТСП) обмотками.

Еще одним потенциальным применением ВТСП-магнитов являются устройства для протонно-лучевой терапии. Протонно-лучевая терапия (ПЛТ, также известная как протонная терапия) является видом лучевой терапии заряженными частицами, используемой при лечении раковых заболеваний (и других состояний, которые реагируют на радиотерапию). При ПЛТ, к месту лечения (например, опухоли) направляют пучок протонов.

Еще одной подобной терапией является протон-бор-захватная терапия (ПБЗТ), при которой бор-11 вводят на место нахождения целевого объекта, а для инициирования реакции $p^{+11}\text{B} \rightarrow 3\alpha$ используют пучок протонов. Тем же аппаратом можно воспользоваться с целью выдачи пучком протонов либо для ПЛТ, либо для ПБЗТ.

Пучки протонов для ПЛТ и ПБЗТ генерируются ускорителями частиц, такими, как циклотроны или линейные ускорители. Ускорители, в типичных случаях применяемые для ПЛТ и ПБЗТ, обычно порождают протоны с энергиями в диапазоне от 60 до 250 МэВ, при этом наиболее мощная эксплуатируемая в настоящее время установка имеет максимальную энергию 400 МэВ.

Вообще говоря, существуют два типа конструкции установок для ПЛТ, которые позволяют изменять угол пучка. В конструкции первого типа, как изображено на фиг. 7, ускоритель 3001 установлен на гентри 3002, которая позволяет поворачивать его вокруг пациента 3003 (обычно - вокруг горизонтальной оси). Пациента кладут на подвижную кушетку 3004, что обеспечивает дополнительные степени свободы (например, поступательное движение и поворот вокруг вертикальной оси).

Конструкция второго типа изображена на фиг. 8. Ускоритель 4001 неподвижен, а пучок направляют на пациента посредством управляющих магнитов 4002 (в общем случае включающих в себя и квадрупольные, и дипольные магниты), по меньшей мере некоторые из которых находятся на гентри 4003, так что пучок можно поворачивать вокруг пациента 4004 (например, вокруг горизонтальной оси). Пациента кладут на подвижную кушетку 4005.

Любая из этих конструкций требует, чтобы гентри поддерживала электромагниты, выполненные с возможностью управления протонами при энергии пучка, которая может достигать 400 МэВ. Это требует очень сильных магнитных полей, и, как таковое, применение ВТСП-магнитов может привести к значительному снижению массы и габаритов электромагнитов и гентри, необходимой для их движения. ВТСП-магниты можно использовать в пределах ускорителя, квадрупольных магнитов, входящих в состав управляющих магнитов, или дипольных магнитов, входящих в состав управляющих магнитов.

Сверхпроводящие материалы в типичных случаях делятся на "высокотемпературные сверхпроводники" (ВТСП) и "низкотемпературные сверхпроводники" (НТСП). НТСП-материалы, такие, как Nb и NbTi, представляют собой металлы или сплавы металлов, сверхпроводимость которых можно описать посредством теории Бардина-Купера-Шриффера (БКШ). Все низкотемпературные сверхпроводники имеют критическую температуру (температуру, выше которой материал не может быть сверхпроводя-

щим даже в нулевом магнитном поле) ниже примерно 30 К. Поведение ВТСП-материала не описывается посредством теории БКШ, и такие материалы могут иметь критические температуры выше примерно 30 К (хотя и следует отметить, что именно физические различия в составе и работе в режиме сверхпроводимости, а не критическая температура, определяют ВТСП и НТСП материалы). Наиболее широко применяемыми ВТСП являются "купратные сверхпроводники" - керамика на основе купратов (соединений, включающих группу оксида меди), - такие, как BSCCO, или ReBCO (где Re - редкоземельный элемент, обычно Y или Gd). Другие ВТСП-материалы включают в себя пниктиды железа (например, FeAs и FeSe) и диборат магния (MgB_2).

ReBCO в типичных случаях изготавливают в виде лент со структурой, показанной на фиг. 1. Такая лента 100 в общем случае имеет толщину приблизительно 100 микрон и включает в себя подложку 101 (обычно из подвергнутого электрополировке хаотеллоя толщиной приблизительно 50 микрон), на которую ионно-лучевым осаждением (IBAD), магнетронным распылением или другим подходящим методом наносят ряд буферных слоев, известную как буферный пакет 102, толщиной приблизительно 0,2 микрона. Поверх буферного пакета уложен эпитаксиальный ReBCO-ВТСП слой 103 (осажденный посредством химического осаждения из паровой фазы металлоорганических соединений (ХОПФМОС) или другим подходящим методом), в типичных случаях имеющий толщину 1 мкм. На ВТСП-слое посредством распыления или другим подходящим методом осажден слой 104 серебра толщиной 1-2 мкм, после чего посредством гальванизации или другим подходящим методом на ленту осажден стабилизирующий слой 105 меди, который зачастую полностью инкапсулирует ленту.

Подложка 101 обеспечивает механическую основу, которую можно подавать посредством технологической линии и позволяет выращивать последующие слои. Буферный пакет 102 необходим для обеспечения двухосно текстурированной кристаллической матрицы, на которой будет расти ВТСП-слой, и предотвращает химическую диффузию элементов из подложки в ВТСП, нарушающую его сверхпроводящие свойства. Слой 104 серебра необходим для обеспечения поверхности раздела с низким сопротивлением от ReBCO к стабилизирующему слою, а стабилизирующий слой 105 обеспечивает альтернативный путь тока в случае, если какая-либо часть ReBCO перестает быть сверхпроводящей (переходит в "нормальное" состояние).

В дополнение к этому, можно изготавливать "отслоенную" ВТСП-ленту, которая не имеет подложки и буферного пакета, а вместо них имеет слои серебра на обеих сторонах ВТСП-слоя. Лента, которая имеет подложку, будет именоваться ВТСП-лентой "на подложке".

ВТСП-ленты можно компоновать в ВТСП-кабели. ВТСП-кабель содержит одну или более ВТСП-лент, которые соединены вдоль своей длины посредством проводящего материала (обычно - меди). ВТСП-ленты можно располагать одну над другой (т.е., располагать так, что ВТСП-слои станут параллельными), или возможна некоторая другая компоновка лент, которая может изменяться вдоль длины кабеля. Примечательными особыми случаями ВТСП-кабелей являются одиночные ВТСП-ленты и ВТСП-пары. ВТСП-пары содержат пару ВТСП-лент, расположенных так, что ВТСП-слои становятся параллельными. Если используют ленту на подложке, то возможны ВТСП-пары типа 0 (с ВТСП-слоями, обращенными друг к другу), типа 1 (с ВТСП-слоем одной ленты, обращенным к подложке другой) или типа 2 (с подложками, обращенными друг к другу). Кабели, содержащие более 2-х лент, могут предусматривать наличие некоторых или всех лент, имеющихся в ВТСП-парах. Уложенные друг на друга ленты могут предусматривать различные компоновки ВТСП-пар, чаще всего - либо стопу из пары типа 1, либо стопу из пары типа 0 и (или, что эквивалентно) пары типа 2. ВТСП-кабели могут содержать комбинацию из ленты на подложке и отслоенной ленты.

При описании обмоток в этом документе будут употребляться следующие термины:

"ВТСП-кабель" - кабель, содержащий одну или более ВТСП-лент; в этом определении, одиночная ВТСП-лента представляет собой ВТСП-кабель;

"виток" - секция ВТСП-кабеля в пределах обмотки, охватывающая внутренность обмотки (т.е., виток можно смоделировать как некоторый замкнутый контур);

"дуга" - непрерывный отрезок обмотки, который меньше, чем вся обмотка возбуждения;

"внутренний или внешний радиус" - расстояние от центра обмотки до внутренней или внешней поверхности ВТСП-кабелей;

"внутренний или внешний периметр" - расстояние, измеряемое по внутренней или внешней поверхности обмотки;

"толщина" - радиальная глубина всех витков обмотки, т.е. разность между внутренним и внешним радиусами;

"критический ток" - ток, при котором ВТСП должен становиться нормальным проводником при заданных температуре и внешнем магнитном поле (где ВТСП считается "ставшим нормальным" в некоторой характеристической точке перехода в состояние сверхпроводимости, где лента генерирует E_0 вольт на метр. Выбор E_0 произволен, но обычно его принимают составляющим 10 или 100 микровольт на метр);

"критическая температура" - температура, при котором ВТСП должен становиться нормальным проводником, при заданных магнитном поле и токе;

"пиковая критическая температура" - температура, при котором ВТСП должен становиться нормальным проводником без заданного внешнего магнитного поля и при пренебрежимо малом токе.

Вообще говоря, существуют два типа конструкции обмоток магнитов, получаемые путем намотки или путем сборки нескольких секций. Наматываемые обмотки, как показано на фиг. 2, изготавливают, наматывая ВТСП-кабель 201 вокруг шаблона 202 непрерывной спиралью. Шаблону придают форму, обеспечивающую требуемый внутренний периметр обмотки, и этот шаблон может быть конструктивной частью готовой намотанной обмотки или может быть извлекаемым после намотки. Секционированные обмотки, как схематически показано на фиг. 3, состоят из нескольких секций 301, каждая из которых может содержать несколько кабелей или предварительно сформированных сборных шин 311 и которые будут образовывать дугу всей обмотки в целом. Секции соединены соединениями 302, образуя комплектную обмотку. Хотя витки обмоток на фиг. 2 и 3 для ясности показаны разнесенными, в общем случае будет присутствовать материал, соединяющий витки обмотки, например, они могут быть объединены путем заливки эпоксидной смолой.

Обмотки могут быть "изолированными" - имеющими электрически изолирующий материал между витками обмотки, или "неизолированными", и в этом случае витки обмотки электрически соединены радиально, а также вдоль кабелей (например, путем соединения стабилизирующих слоев меди посредством пайки или за счет непосредственного контакта). По причинам, которые будут подробнее рассмотрены ниже, неизолированные обмотки непригодны для создания сильнополюсных обмоток.

На фиг. 4 показано сечение намотанной обмотки особого типа, известной как "плоская обмотка", в которой ВТСП-кабели 401 обернуты, образуя плоскую обмотку, аналогично обмотке красящей ленты. Плоские обмотки можно изготавливать с внутренним периметром любой двумерной формы. Плоские обмотки зачастую предусматривают в виде "сдвоенной плоской обмотки", как показано в сечении на фиг. 5, которая содержит две плоские обмотки 501, 502 с намоткой в противоположные стороны при наличии изоляции 503 между плоскими обмотками и с внутренними контактными выводами 504, соединенными друг другом. Это означает, что для пропускания тока по виткам обмотки и генерирования магнитного поля напряжение надо подавать только на внешние контактные выводы 521, 522, которые обычно доступнее.

Сущность изобретения

Задача изобретения состоит в создании неизолированных и/или частично изолированных ВТСП-обмоток для больших магнитов, эксплуатируемых в условиях, где возможны нарушения сверхпроводимости. Это достигается благодаря управлению постоянной времени обмотки таким образом, что становится возможным постепенное нарастание тока до некоторого устойчивого магнитного поля в приемлемых временных рамках при обеспечении некоторой степени перераспределения тока между витками около нормальной зоны с нарушением сверхпроводимости для ограничения скорости увеличения температуры горячего пятна. Это обеспечивает обнаружение горячего пятна посредством оперативного контроля температур обмотки и, при необходимости, посредством систем активной защиты от нарушения сверхпроводимости, которые будут задействованы для снижения тока магнита во временных рамках, расширенных по сравнению с эквивалентной изолированной обмоткой.

Кроме того, использование неизолированных и/или частично изолированных обмоток позволяет достичь более высоких плотностей тока, поскольку неизолированные и/или частично изолированные обмотки требуют меньше меди или другого металлического стабилизатора, чем изолированные обмотки.

В соответствии с первым аспектом изобретения предложена высокотемпературная сверхпроводящая (ВТСП) обмотка возбуждения. ВТСП-обмотка возбуждения содержит множество витков и частично изолирующий слой. Упомянутое множество витков содержит ВТСП-материал и металлический стабилизатор. Частично изолирующий слой разделяет витки, так что ток может перераспределяться между витками через частично изолирующий слой. Частично изолирующий слой содержит электропроводный слой, а также первый и второй изолирующие слои. Электропроводный слой покрыт на одной стороне первым изолирующим слоем и на другой стороне вторым изолирующим слоем. Каждый изолирующий слой имеет одно или более окон, через которые может осуществляться электрический контакт между витками и электропроводным слоем. Окна в первом изолирующем слое смещены в плоскости электропроводной полосы от окон во втором изолирующем слое.

В соответствии со вторым аспектом изобретения предложен способ изготовления ВТСП-обмотки возбуждения. Обеспечивают ВТСП-кабель, содержащий ВТСП-материал и металлический стабилизатор. Обеспечивают частично изолирующий слой. Частично изолирующий слой содержит электропроводный слой и первый и второй изолирующие слои. Электропроводный слой покрыт на одной стороне первым изолирующим слоем и на другой стороне вторым изолирующим слоем. Каждый изолирующий слой имеет одно или более окон, через которые может осуществляться электрический контакт между витками и электропроводным слоем. Окна в первом изолирующем слое смещены в плоскости электропроводного слоя от окон во втором изолирующем слое. ВТСП-кабель и частично изолирующий слой собраны так, чтобы образовать ВТСП-обмотку возбуждения, так что ток может перераспределяться между витками ВТСП-кабеля через частично изолирующий слой.

В соответствии с третьим аспектом изобретения предложена высокотемпературная сверхпроводя-

щая (ВТСП) обмотка возбуждения, имеющая радиус больше 50 см, причем ВТСП-обмотка возбуждения имеет множество витков, содержащих ВТСП-материал, при этом витки расположены так, что ток может перераспределяться между витками через резистивный материал.

В соответствии с четвертым аспектом изобретения предложена высокотемпературная сверхпроводящая (ВТСП) обмотка возбуждения, имеющая радиус больше 50 см, причем ВТСП-обмотка возбуждения имеет витки, содержащие ВТСП-материал, при этом витки разделены материалом, обеспечивающим переход металл-изолятор, имеющим первое удельное сопротивление при первой температуре, которая меньше, чем пиковая критическая температура ВТСП, и второе, более низкое удельное сопротивление при второй температуре, которая выше, чем первая температура.

В соответствии с пятым аспектом изобретения предложен термоядерный реактор типа "токамак", содержащий ВТСП-обмотку возбуждения в соответствии с любым из первого, третьего или четвертого аспектов, причем ВТСП-обмотка возбуждения является одной из обмотки возбуждения тороидального поля или обмотки возбуждения полоидального поля.

В соответствии с шестым аспектом изобретения предложена установка для протонно-лучевой терапии (ПЛТ), содержащая ВТСП-обмотку возбуждения в соответствии с любым из первого, третьего или четвертого аспектов, причем ВТСП-обмотка возбуждения является одной из:

обмотки возбуждения ускорителя установки для ПЛТ;

дипольного или квадрупольного магнита системы управления пучком протонов установки для ПЛТ.

Дополнительные варианты осуществления изобретения изложены в п.2 и последующих пунктах формулы изобретения.

Краткое описание чертежей

На фиг. 1 представлено схематическое изображение ВТСП-ленты;
на фиг. 2 представлено схематическое изображение намотанной ВТСП-обмотки;
на фиг. 3 представлено схематическое изображение секционированной ВТСП-обмотки;
на фиг. 4 представлено схематическое изображение сечения плоской обмотки;
на фиг. 5 представлено схематическое изображение сечения сдвоенной плоской обмотки;
на фиг. 6 показаны ток, напряжение и мощность в частично изолированной обмотке во время линейного нарастания тока и перехода в установившийся режим;
на фиг. 7 представлено схематическое изображение установки для протонно-лучевой терапии;
на фиг. 8 представлено схематическое изображение дополнительной установки для протонно-лучевой терапии;
на фиг. 9А представлено схематическое изображение частично изолирующего слоя;
на фиг. 9В представлен вид сбоку частично изолирующего слоя согласно фиг. 9А;
на фиг. 10А представлено схематическое изображение частично изолирующего слоя в соответствии с альтернативной конструкцией;
на фиг. 10В представлено сечение частично изолирующего слоя согласно фиг. 10А;
на фиг. 11 представлено схематическое изображение примерного частично изолирующего слоя;
на фиг. 12 показана альтернативная конструкция частично изолирующего слоя;
на фиг. 13 показан схематический чертеж примерной системы намотки;
на фиг. 14 представлено поперечное сечение сборки частично изолирующего слоя и ВТСП-ленты;
на фиг. 15 показана примерная залитая припоем обмотка; и
на фиг. 16 А-Е показана дополнительная альтернативная конструкция частично изолирующего слоя.

Подробное описание

Как отмечалось выше, ВТСП-обмотки могут быть изолированными или неизолированными. Вообще, неизолированные обмотки не считаются подходящими для больших магнитов, эксплуатируемых в условиях, где возможны нарушения сверхпроводимости, таких, как обмотки возбуждения токамака. Отсутствие изоляции преднамеренно допускает перераспределение тока не только среди лент в каждом витке кабеля, но и между витками кабеля. Возможны также "частично изолированные" обмотки, где материал между витками имеет сопротивление, промежуточное между сопротивлением некоторого традиционного проводника, например - металла, и сопротивлением некоторого традиционного изолятора, такого, как керамический или органический изолятор, например - имеющий удельное сопротивление, превышающее удельное сопротивление меди в $100\text{--}10^{15}$ раз или находящееся между 10^{-6} и 10^8 Ом·м. Отсутствие полной или частичной изоляции между витками уменьшает скорость, с которой растет температура локального "горячего пятна" (нормальной зоны). Скорость роста (пространственного распространения) нормальной (резистивной ВТСП) зоны в ВТСП-магните зависит от многих параметров, а в типичных случаях меньше 100 мм/с в аксиальном направлении (т.е. вдоль кабеля) и приблизительно в 2-100 ниже в поперечном направлении (т.е. между соседними витками). Точная скорость распространения нормальной зоны в каждом направлении зависит от тепловых и электрических свойств материалов и конструкции используемого кабеля. В частности, на скорость поперечного распространения негативно влияют тепловые свойства материала между витками.

В большом магните (где линейные размеры выражаются метрами, а радиус, например, больше 50 см, и где размеры поперечного сечения обмотки малы (т.е., примерно в 10 раз меньше, чем наибольший габаритный размер обмотки)), поперечное распространение может обуславливать ситуацию, в которой все поперечное сечение обмотки в целом окажется нормальным в некоторой зоне, покрывающей малую долю периферии обмотки, приводя к тому, что суммарный ток всех витков потечет только в металлическом стабилизаторе в пределах нормальной секции. Вне нормальной зоны проводники остаются сверхпроводящими. Сопротивление этой нормальной зоны является не достаточным для того, чтобы вызвать быстрое падение тока в магните, но приводящим к сбросу аккумулированной магнитной энергии всего магнита в целом в этот малый нормальный (резистивный) объем, который растет вокруг периферии обмотки лишь медленно. Если эту ситуацию не обнаруживают быстро с тем, чтобы аккумулированную энергию магнита можно было сбросить в сопротивление, внешнее по отношению к обмотке, температура нормальной зоны будет расти очень быстро, что, вероятно, вызовет причинение значительного повреждения проводникам в пределах нормальной зоны.

Для малых обмоток (где линейные размеры выражаются несколькими сантиметрами, а радиус, например, меньше 10 см, и где поперечное сечение имеет размер, подобный наибольшему размеру обмотки), аккумулированные магнитные энергии, вовлеченные в процесс, являются относительно гораздо более низкими, а нормальная зона будет равномернее распределяться по всему объему обмотки за короткое время. Иными словами, нарушение сверхпроводимости распространяется, охватывая всю обмотку до того, как температура нормальной зоны превысит некоторое значение повреждения (в типичных случаях принимаемое составляющим около 200 K).

По этой причине, неизолированные или частично изолированные обмотки считались хорошими вариантами для пассивной защиты малых ВТСП-магнитов от нарушения сверхпроводимости, но неадекватными для пассивной защиты больших магнитов от нарушения сверхпроводимости.

Помимо этого неизолированная или частично изолированная обмотка демонстрирует задержку стабилизации магнитного поля во время линейного нарастания тока. Это происходит потому, что напряжение, развиваемое на индуктивности обмотки возбуждает ток через металл между витками. Неизолированную ВТСП-обмотку можно смоделировать как имеющую три пути тока - два спиральных пути, которые следуют по ВТСП-лентам (один - в ВТСП и один - в металлическом стабилизаторе), и радиальный путь через металл (и любой другой резистивный материал), соединяющий неизолированные или частично изолированные витки ВТСП-кабеля между контактными выводами обмотки (хотя это можно смоделировать как одиночный путь, он фактически представляет собой сумму всех радиальных резистивных путей через магнит). Только ток, протекающий по спиральным путям, генерирует значительное осевое магнитное поле в центре обмотки. Спиральный путь через ВТСП можно смоделировать как индуктор, имеющий индуктивность L и нулевое или пренебрежимо малое сопротивление, когда вся лента оказывается сверхпроводящей. Спиральный путь через медный стабилизатор проходит параллельно пути через ВТСП и имеет такую же индуктивность, но значительное сопротивление. По этой причине, пренебрежимо малый ток течет в нем до тех пор, пока в частях спирального пути через ВТСП не начнется нарушение сверхпроводимости. Если это случается, избыточный ток больше критического тока I_c спирального пути через ВТСП перераспределяется между спиральным путем через стабилизатор и радиальным путем в соответствии с их относительными сопротивлениями. Радиальный путь тока можно смоделировать как имеющий пренебрежимо малую индуктивность и гораздо большее сопротивление R , чем спиральный путь, хотя ВТСП является сверхпроводящим на всем его протяжении.

На фиг. 6 показаны ток, напряжение и мощность в частично изолированной обмотке во время линейного нарастания тока и работы в установившемся режиме. Во время линейного нарастания тока неизолированной обмотки ток сначала потечет главным образом по радиальному пути (период А на фиг. 6), а потом стабилизируется. Величина тока, протекающего по радиальному пути, выше для более высоких скоростей линейного нарастания тока (поскольку выше напряжение, развиваемое по спиральному пути, $L \cdot dI/dt$, - это период b). В конце линейного нарастания тока, dI/dt упадет до нуля и произойдет перенос тока на спиральный путь через ВТСП с некоторой постоянной времени, L/R (период C). Перенос тока будет происходить в основном на спиральный путь с несколькими (приблизительно пятью) постоянными времени, L/R , по окончании линейного нарастания тока. Как таковую, постоянную времени следует выбирать, достигая в результате оправданного времени линейного нарастания тока, например, постоянная времени 5-10 ч была бы приемлемой для обмотки тороидального поля (ТП) токамака (давая время линейного нарастания тока примерно 1-2 суток).

Если в ВТСП-кабеле, используемом для намотки обмотки, есть соединения, то малая доля тока источника питания продолжит течь по радиальному пути на протяжении периода C. Эта доля просто представляет собой отношение сопротивления спирального пути к сумме радиального сопротивления (т.е. сумме всех сопротивлений от витка к витку или межвитковых сопротивлений) и сопротивления спирального пути.

Выдерживание короткой постоянной времени задержки зарядки в магните с большой L требует относительно высокого межвиткового сопротивления, а выдерживание низкой температуры нормальной зоны требует относительно низкого межвиткового сопротивления. Поэтому желательно найти некоторый

способ простого управления сопротивлением от витка к витку для достижения наилучшего компромисса.

Дополнительным соображением при выборе идеального межвиткового сопротивления является тепловая нагрузка, обуславливаемая возбуждением тока через радиальное сопротивление во время фазы линейного нарастания тока магнита (периоды А и В). Эта дополнительная тепловая нагрузка, которая может быть существенной (порядка нескольких кВт), не потребует дополнительного охлаждения, если она не превышает тепловую нагрузку, которая возникает во время работы установки, содержащей обмотку возбуждения, например, нейтронной тепловой нагрузке для обмоток в термоядерном реакторе. Это возможно потому, что рабочая тепловая нагрузка и тепловая нагрузка линейного нарастания тока не могут возникнуть одновременно (например, потому, что термоядерная реакция не инициируется, пока магнит тороидального поля находится в поле). Конечно, возможно также постепенное нарастание тока с более высокой тепловой нагрузкой (т.е., более высоким сопротивлением от витка к витку) и обеспечением дополнительного охлаждения - это, вообще говоря, обойдется дороже, но обеспечит меньшее время линейного нарастания тока.

Во избежание повреждения из-за нарушения сверхпроводимости (либо в изолированной, либо в неизолированной обмотке) в большом магните можно также воплотить алгоритм активной защиты от нарушения сверхпроводимости. При этом алгоритме аккумулированную энергию магнита можно сбрасывать в некоторый компонент, отличный от области магнита, где происходит нарушение сверхпроводимости, прежде чем может произойти рост температуры в области, где происходит нарушение сверхпроводимости, вызывающий повреждение. Этим отличающимся компонентом может быть внешнее сопротивление или некоторый отдельный участок магнита, который подвергся нарушению сверхпроводимости, в пределах большей доли холодной массы магнита (тем самым распределяя аккумулированную энергию магнита по большому объему и снижая общее повышение температуры). Вместе с тем, активный подход требует, чтобы время между инициированием нормальной зоны (также именуемой "горячим пятном") и запуском постепенного снижения тока магнита ("сброса") было достаточно коротким, чтобы температура контактных выводов горячего пятна была меньше температуры, при которой возможно причинение повреждения обмотке, например, составляла бы около 200 К.

Поэтому желательно разработать средства управления постоянной времени обмотки таким образом, что окажется возможным постепенное нарастание тока до некоторого устойчивого магнитного поля в приемлемых временных рамках и обеспечение при этом некоторой степени перераспределения тока между витками около нормальной зоны с нарушением сверхпроводимости для ограничения скорости увеличения температуры горячего пятна.

Возможными параметрами обмотки, которые можно изменять, чтобы выбрать постоянную времени, L/R , являются:

индуктивность L , которая пропорциональна квадрату числа N витков в обмотке; следовательно, постоянную времени можно уменьшать путем уменьшения числа витков; вместе с тем, магнитное поле пропорционально ампер-виткам, так что генерирование сильного поля с помощью малого числа витков потребует более высокого тока переноса, чем генерирование магнитом такого же поля с помощью большего числа витков и более низкого тока переноса;

радиальное сопротивление от витка к витку, R_T (где $R = NR_T$).

В соответствии с этими параметрами R приблизительно пропорционально NR_T , а L приблизительно пропорциональна N^2 , так что L/R приблизительно пропорционально N/R_T . Минимальное значение N будет задано требуемым магнитным полем (B) и максимальным током на кабель, (I), поскольку B пропорциональна NI . Постоянную времени и тепловую нагрузку во время линейного нарастания тока можно уменьшить, используя меньше витков, но это потребует повышенного тока, чтобы магнит смог создать заданное поле.

Постоянную времени и тепловую нагрузку линейного нарастания тока также можно уменьшить путем увеличения каждого межвиткового сопротивления R_T . Вместе с тем, слишком большое увеличение R_T будет препятствовать перераспределению между витками, понижая "пассивную защиту от нарушения сверхпроводимости" обмотки, т.е., способности обмотки восстанавливаться от горячего пятна без нарушения сверхпроводимости и без сброса энергии из обмотки. Сильноточные кабели требуют нескольких лент, несущих ток, и желательно поддерживать сопротивление между лентами в витке очень низким, в частности, чтобы обеспечить приемлемое перераспределение и высокую теплопроводность между лентами; это делает ленту стойкой к образованию дефектов в сверхпроводящем слое ReBCO . Если каждый виток содержит множество лент, требуемое R_T может быть гораздо больше, чем сопротивление между лентами каждого витка, так что перераспределение тока предпочтительно будет происходить скорее в пределах витка, чтобы обойти дефекты, а не между витками; вместе с тем, R_T по-прежнему должно допускать перераспределение между витками, чтобы ограничить скорость теплового пробоя горячего пятна и максимизировать время для обнаружения проблемы и сброса магнита.

Обнаружено, что применение частично изолированной обмотки может значительно расширить временное окно между инициированием горячего пятна и достижением температуры нормальной зоны выше 200 К по сравнению с эквивалентной изолированной обмоткой, обеспечивая дополнительное время для инициирования сброса магнита. Это неожиданно делает частично изолированные обмотки с пра-

вильным выбором R_T подходящими для использования в качестве больших обмоток возбуждения в токамаке.

В пределах этого временного окна, горячее пятно должно быть обнаружено, система обнаружения нарушения сверхпроводимости должна определить, что, вероятно, будет вызвано нарушение сверхпроводимости (а не диссипация посредством пассивного перераспределения) горячего пятна, и безопасным путем сбросить энергию магнита, т.е. вынудить управляемый подогрев большой холодной массы (большая холодная масса может быть некоторой частью магнита, намеренно подвергнутой нарушению сверхпроводимости, например, это могут быть сегменты витков обмотки возбуждения тороидального поля).

Продолжительность временного окна зависит от количества проводящего металла, например меди, в каждом витке: при большем количестве металлического стабилизатора временное окно расширяется. Вместе с тем, увеличение количества стабилизатора снизит плотность тока обмоток, что нежелательно в приложениях, связанных с ограниченным пространством, таких, как центральный столб обмотки возбуждения тороидального поля (где более высокая плотность тока обеспечивает более толстый нейтронный защитный экран в термоядерном реакторе, а, следовательно, и меньшую тепловую нагрузку или более благоприятное аспектное отношение или меньшие габариты для сферического токамака).

Современные подходы к защите от нарушения сверхпроводимости с помощью изолированных обмоток для сферических токамаков приводят к большему количеству металлического стабилизатора в витках, что, в свою очередь, приводит к более крупным, более дорогим установкам, чтобы увеличить временное окно до управляемых уровней, но временное окно все же остается коротким (порядка 0,5-1 секунды). Применение неизолированной или частично изолированной обмотки возбуждения тороидального поля позволило бы расширить временное окно и увеличить плотность тока, поскольку неизолированные или частично изолированные обмотки требуют меньше металлического стабилизатора, чем изолированные обмотки. Фактически, ограничение по плотности тока для неизолированной обмотки возбуждения тороидального поля является механической, а не электрической проблемой, так как механическое напряжение на центральном столбе становится ограничивающим фактором по мере увеличения плотности тока. В конечном счете, результирующая деформация в материалах лент переносится на слой ReBCO , обуславливая ухудшение критического тока.

Рассмотрим примерный магнит тороидального поля (ТП), имеющий радиус плазмы 1,4 м и магнитное поле 5 Т с 18-ю сегментами. Суммарный ток центрального стержня ТП должен составлять 35 МА. Полагая, что ток переноса составляет 10 кА, получаем, что каждый сегмент должен иметь 196 витков, а суммарная индуктивность ТП должна составлять приблизительно 46 Гн. Достижение постоянной времени 1,4 часа (чтобы иметь суммарное время линейного нарастания тока примерно 6 часов) должно потребовать радиального сопротивления, составляющего примерно 0,5 мОм, для каждого отдельного сегмента. Следовательно, чтобы достичь желаемой постоянной времени, среднее сопротивление от витка к витку, R_T , должно составлять 2,54 мкОм.

Посредством моделирования обнаружено, что этого можно достичь с помощью частично изолирующего слоя между витками, имеющего толщину 0,05 мм и удельное сопротивление 0,02 Ом·м, которое в 2×10^6 больше, чем у нормальной меди при 20 К. Специалист поймет, что для частичной изоляции были бы возможны и другие параметры.

R_T можно корректировать путем выбора металлов для плакирования в пределах ВТСП-кабеля и/или между витками обмотки. В типичных ВТСП-кабелях это была бы медь, но для обеспечения большего сопротивления можно использовать другие металлы, такие как нержавеющая сталь. В альтернативном или дополнительном варианте можно увеличивать промежуток между витками обмотки, что приведет к более толстому (и, следовательно, более резистивному) слою металла между витками обмотки. Подходящие материалы, которые также удовлетворяли бы другим инженерным ограничениям (например, по плотности тока и структурной устойчивости), включают в себя германий и другие полупроводники.

Дополнительной альтернативой является использование нормальных (т.е. не сверхпроводящих) металлов для изоляции, но с коррекцией геометрии путей тока за счет использования обычной изоляции. Иными словами, речь идет об увеличении расстояния, через которое вынужден протекать ток между витками. Материал между витками обмотки может включать в себя частично изолирующий слой, содержащий металлическую полосу (или другую электропроводную полосу), имеющую "пропускающую изоляцию", как показано на фиг. 9А и В. Металлическая полоса 901 снабжена тонким изолирующим покрытием 902 на по меньшей мере сторонах, обращенных к ВТСП-кабелям, где изолирующее покрытие удалено или не нанесено над окнами (или "сквозными отверстиями") 903 через интервалы с каждой стороны металлической полосы. Окна могут иметь любую форму и могут простирались до краев ленты. Окна на любой из двух сторон металлической полосы расположены в шахматном порядке, как показано на фиг. 9В, что увеличивает сопротивление (по сравнению с неизолированной полосой или с полосой, где окна на каждой стороне были бы расположены непосредственно друг против друга), поскольку ток должен прокладывать путь 910 вдоль части длины металлической полосы.

Сопротивление частично изолирующего слоя, показанного на фиг. 9А и В (т.е. сопротивление от витка к витку) будет зависеть от

расстояния между соседними окнами на одной и той же стороне (большее расстояние приводит к большему сопротивлению); этот эффект является доминирующим;

смещения между соседними окнами на противоположных сторонах, т.е., расстояния между некоторым окном на одной стороне и соседним окном на противоположной стороне (большее смещение приводит к большему сопротивлению);

сопротивление также будет изменяться с изменением относительного смещения одной из двух сторон окна, и максимизируется для некоторого заданного расстояния между окнами на одной и той же стороне, когда окна на одной стороне находятся на полпути между ближайшими окнами на противоположной стороне; эта компоновка также обеспечивает равномерный резистивный нагрев частично изолирующего слоя;

толщины металлической полосы (если смещение значительно больше толщины, большая толщина приводит к меньшему сопротивлению);

ширины металлической полосы (большая ширина приводит к меньшему сопротивлению);

удельного сопротивления металлической полосы (большее удельное сопротивление приводит к большему сопротивлению);

площади окон (большая площадь приводит к меньшему сопротивлению); вместе с тем, площадь окна значима только в случае, если расстояние между окнами сопоставимо с размерами окон.

Точную зависимость можно моделировать обычными имеющимися методами, известными в данной области техники, или посредством простого эксперимента.

При этом неважно, является ли межоконный промежуток всегда одинаковым. Важным фактором является то, что ток должен проходить от одного витка на одной стороне полосы к другому; он должен проходить через окно в полосу, затем вдоль полосы, и выходить через еще одно окно на противоположной стороне полосы. Ток вполне может входить в одно окно, разделяясь по нескольким путям и выходя через несколько окон. Доля тока, следующего по каждому пути, будет просто зависеть от импеданса того пути (в импедансе будет доминировать активное сопротивление путей, чтобы замедлить изменение токов, а индуктивности сыграют свою роль для быстрого изменения токов).

Пока расстояние между окнами на противоположных сторонах полосы сопоставимо с размерами окна, активное сопротивление пути между окнами будет доминирующим и пропорциональным расстоянию между окнами и обратно пропорциональным толщине полосы. Это желательная компоновка для частично изолирующей полосы.

Если в обмотке желательно изменение сопротивления в разных точках, то любое из этих свойств можно изменять вдоль длины частично изолирующего слоя.

Изолирующее покрытие может быть, например, полиамидом, применяемым в виде ленты Kapton™ или в виде жидкости, майларовой пленкой, изолирующим лаком или любым другим подходящим изолятором.

Металлом может быть медь, латунь, нержавеющая сталь, хастеллой или любой другой подходящий металл (или неметаллический проводник) по потребности. Применение таких материалов, как нержавеющая сталь или хастеллой, позволяет придать частично изолирующему слою повышенную структурную стабильность по сравнению с обычным, полностью медным магнитом, и это позволяет справиться с большими механическими напряжениями, воздействию которых подвергается сильнополюсный токамак.

ВТСП-обмотку можно наматывать как обычно с частично изолирующим слоем, размещаемым между витками по мере их намотки. ВТСП-обмотка может быть инкапсулирована в смоле или запаяна - в последнем случае на частично изолирующий слой можно (по выбору) нанести паяемое покрытие, чтобы улучшить адгезию припоя между витками. Частично изолирующий слой наматывают непрерывно с витками ВТСП, чтобы он отделял каждый виток обмотки.

Окна могут быть изготовлены посредством травления, резания изолирующей полосы перед наложением на металлическую полосу, посредством нанесения покрытия напылением через маску, посредством струйной печати или другими подходящими способами, известными в данной области техники (например, с помощью известных методов изготовления гибких печатных плат).

Если расстояние между окнами значительно больше, чем размер окон, а окна смещены так, что окна на одной стороне находятся на полпути между окнами на другой стороне, сопротивление "виток-виток", R_{TT} , можно приближенно охарактеризовать как

$$R_{TT} = \frac{d^2 \rho}{4wtL},$$

где d - расстояние между окнами (т.е. между некоторым окном и следующим окном на той же стороне), ρ - удельное сопротивление (с учетом того, что обмотки будут эксплуатироваться при низкой температуре и в сильном магнитном поле), w - ширина ленты, t - толщина металлической полосы, а L - средняя длина каждого витка.

Например, сопротивления "виток-виток", составляющего 2,54 мкОм, можно было бы достичь с помощью латунной полосы ($\rho = 45$ нОм·м при температуре ~20 К), имеющей ширину 20 мм, толщину 50 мкм, длину витка 16,2 м и расстояние d между окнами 60,5 мм.

Альтернативная структура "пропускающей изоляции" показана на фиг. 10А (вид в плане) и 10В (поперечное сечение В-В согласно фиг. 10А). Как описано ранее, металлическая полоса 1001 снабжена тонким изолирующим покрытием 1002, по меньшей мере, на обращенных к ВТСП сторонах. В этом случае, вместо предусматриваемых продольно разнесенных окон в предыдущем примере, каждое изолирующее покрытие 1002 имеет одиночное окно 1003 (или "узкий проход"), которое (который) простирается по длине металлической полосы, причем окно на каждой стороне металлической полосы находится на противоположном краю (например, полоса может иметь окно слева на верхней поверхности и справа на нижней поверхности, если смотреть с одного конца полосы).

Окна показаны как простирающиеся до края металлической полосы, но это не обязательно так, т.е. на обеих сторонах окон возможен изолирующий материал.

Окна расположены так, что они не перекрываются, допуская протекание тока 1010 через полосу только за счет прохождения вдоль ширины полосы.

В этой структуре сопротивление от витка к витку определяется:

расстоянием между окном на одной стороне и окном на другой стороне (измеряемым между внутренними их краями вдоль ширины полосы, причем большее расстояние приводит к большему сопротивлению);

толщиной металлической полосы (большая толщина приводит к меньшему сопротивлению);

удельным сопротивлением металлической полосы (большее удельное сопротивление приводит к большему сопротивлению);

шириной каждого окна (большая ширина приводит к меньшему сопротивлению);

как и в случае с площадью окон в ранее описанной конструкции, этот эффект незначителен, хотя и следует отметить, что в этом случае расстояние между окнами и ширина каждого окна будут ограничены шириной металлической полосы.

Если расстояние между окнами значительно больше, чем толщина полосы, сопротивление от витка к витку можно охарактеризовать как:

$$R_{TT} = \frac{s\rho}{tL},$$

где s - расстояние между окнами, ρ - удельное сопротивление (с учетом того, что обмотки будут эксплуатироваться при низкой температуре и в сильном магнитном поле), t - толщина металлической полосы, а L - длина каждого витка.

Например, сопротивления "виток-виток", составляющего 2,54 мкОм, можно было бы достичь с помощью полосы из нержавеющей стали ($\rho = 486$ нОм·м), имеющей ширину 20 мм, толщину 50 мкм и неизолированными полосой 7,9 мм на противоположных краях на каждой стороне.

В общем случае, частными примерами которого являются обе вышеупомянутые конструкции, частично изолирующий слой содержит металлическую полосу, имеющую тонкий изолирующий слой на каждой стороне. Каждый изолирующий слой имеет одно или более окон, которые смещены в плоскости металлической полосы от окон другого слоя (в дополнение к смещению благодаря толщине полосы). Расстояние смещения может быть больше, чем толщина металлической полосы, и значительно меньше, чем длина витка обмотки (например, по меньшей мере в пять раз меньше, по меньшей мере в десять раз меньше или по меньшей мере в 100 раз меньше). Окна обеспечивают электрический контакт между ВТСП-лентой и металлической полосой, что приводит к пути тока между соседними ВТСП-лентами в намотанной обмотке, проходящему по металлической полосе (либо вдоль длины, либо вдоль ширины). Это дает возможность легко управлять сопротивлением частично изолирующего слоя путем изменения позиционирования окон и межоконного промежутка и приводит к большему сопротивлению, чем получалось бы посредством одной только металлической полосы аналогичных размеров.

Окна могут быть равномерно распределены вдоль длины частично изолирующего слоя, причем такое распределение простирается по всей длине частично изолирующего слоя. В альтернативном варианте расстояние между окнами (или другие свойства окон) могут быть изменяющимися вдоль частично изолирующего слоя таким образом, что суммарное сопротивление каждого витка обмотки окажется постоянным.

В случае, где в каждом частично изолирующем слое предусмотрено только одно окно, каждое окно может простираться по всей длине частично изолирующего слоя.

Чтобы гарантировать электрический контакт через окна, частично изолирующий слой можно напавать на ВТСП-кабели во время намотки. В альтернативном варианте контакта можно достичь просто благодаря давлению в только что намотанной обмотке. В качестве дополнительной альтернативы в окна можно вводить дополнительные электропроводные вкладыши, или металлическая полоса может иметь выступы, которые простираются в окна. Вкладыши или выступы могут заполнять все окно или могут заполнять лишь некоторую часть окна. Например, если окно представляет собой "узкий проход", вкладыши могут быть предусмотрены через интервалы вдоль этого узкого прохода. Это приводит к эффективному воздействию вкладышей на снижение размера окна и может быть использовано для дополнительной настройки сопротивления частично изолирующего слоя.

Все различные компоновки окон, предложенные выше, могут быть достигнуты посредством некоторой комбинации окон и металлических вкладышей или выступов, которые частично заполняют окна, например, промежуток между металлическими вкладышами может быть изменяющимся вдоль частично изолирующего слоя, чтобы гарантировать постоянство сопротивления на виток обмотки.

Физическое соединение частично изолирующего слоя и ВТСП-обмотки возможно посредством лишь давления (т.е., просто путем компактной намотки обмотки), посредством клеевого (например, эпоксидного) соединения изолирующего покрытия и внешней поверхности ВТСП-кабеля, и/или посредством паяных соединений между внешней поверхностью металла частично изолирующего слоя и ВТСП-кабелем.

На фиг. 11 показаны некоторые дополнительные усовершенствования, которые могут быть внесены в частично изолирующий слой, чтобы гарантировать надлежащие физические и электрические соединения. Как отмечалось ранее, частично изолирующий слой содержит металлическую (или иную электропроводную) полосу 1101 и тонкое изолирующее покрытие 1102. В окнах можно разместить металлические вкладыши 1103, или металлическая полоса может иметь выступы, которые простираются через окна, облегчая контакт с ВТСП-кабелями.

В альтернативном или дополнительном варианте, чтобы обеспечить большую поверхность пайки (а, следовательно, упрощенное изготовление обмотки и прочнее скрепленную обмотку), частично изолирующий слой также может содержать дополнительные металлические полосы 1104, именуемые далее "соединительными перемычками", соединенными с внешними гранями изолирующего слоя. Эти соединительные перемычки оказывают пренебрежимо малое влияние на электрические свойства слоя, но обеспечивают припаивание частично изолирующего слоя к ВТСП-кабелю практически по всей поверхности.

Частично изолирующий слой также может иметь изолирующий материал 1105, соединенный с краями частично изолирующего слоя, покрывающий по меньшей мере края металлической полосы 1101, во избежание создания мостиков припоя через частично изолирующий слой и/или через изолирующее покрытие в процессе изготовления обмотки.

Частично изолирующий слой можно изготовить как гибкую печатную плату, причем изолирующие покрытия будут сцеплены с металлической полосой посредством клея, а затем протравлены для образования окон, при этом любые дополнительные металлические элементы надлежащим образом сцеплены с изолирующим покрытием или металлической полосой, так что они оказываются в электрическом контакте с металлической полосой. В альтернативном варианте изолирующее покрытие может иметь окна, имеющие предварительно сделанные вырезы (или имеющие такие размеры, что при нанесении на полосу обеспечиваются "узкие проходы"), и тогда оно может быть сцеплено с металлической полосой посредством клея во время обмотки. Можно воспользоваться и другими способами изготовления.

На фиг. 12 показана альтернативная конструкция частично изолирующего слоя. Как и прежде, частично изолирующий слой содержит металлическую полосу 1201 и изолирующее покрытие 1202, скомпонованные так, что образуется "узкий проход" на одном краю каждой стороны металлической полосы (как описано выше со ссылками на фиг. 10А и В). В этом случае, металлическая полоса снабжена "шпунтом" или "зубцом" 1203, т.е. она изогнута так, что участок металлической полосы, раскрытый окном, лежит в плоскости изолирующего покрытия. Изолирующее покрытие может быть снабжено свесом 1204, чтобы предотвратить нежелательное шунтирование между металлической полосой и ВТСП-лентой на другой стороне изолирующего покрытия в процессе пайки.

Хотя вышеизложенное написано в первую очередь с точки зрения частично изолирующего слоя, формируемого путем нанесения изоляции на металлическую полосу и последующей обмотки последней ВТСП-кабелем для формирования обмотки, должно быть ясно, что конструкции где, изоляция нанесена на ВТСП-кабель, который затем наматывают на неизолированную металлическую полосу, эквивалентны, поскольку являются конструкциями, где ВТСП-кабель, изоляция и металлическая полоса собраны друг с другом во время намотки. В сущности, "частично изолирующий слой" можно формировать на месте использования в процессе намотки обмотки.

В качестве дополнительной альтернативы слою пропускающей изоляции вокруг полосы металла можно было бы наматывать спиральную обертку из изолирующего материала, такого, как лента Картон™, намеренно оставляя зазоры между витками изоляции, чтобы сформировать "окна". В альтернативном варианте можно было бы спирально наматывать каждый виток изолирующим слоем, оставляя зазоры, чтобы сформировать "окна". Вместе с тем, при последнем подходе управление удельным сопротивлением (т.е., площадями контакта окон и смещением между окнами на противоположных сторонах) между соседними витками было бы затруднено.

На фиг. 16А-Е показан еще один дополнительный альтернативный слой пропускающей изоляции. Как и в предыдущих примерах, технические признаки согласно этому примеру не обязательно применять вместе и можно объединять с признаками согласно другим примерам, где это уместно. Слой пропускающей изоляции содержит 5 слоев, которыми в указываемом ниже порядке являются: первый соединительный слой 1611 металла; первый изолирующий слой 1621; электропроводный слой 1630; второй изолирующий слой 1622; второй соединительный слой 1612 металла.

На фиг. 16А-С показана планировка первого соединительного слоя 1611 металла, электропроводного слоя 1630 и второго соединительного слоя 1622 металла, соответственно. На фиг. 16D и E представлены поперечные сечения вдоль линий D и E, показанных на фиг. 16А-С.

Как и в предыдущих примерах, для облегчения подсоединения к ВТСИ-кабелям посредством пайки присутствует соединительный слой.

В отличие от предыдущих примеров, где электропроводный слой представляет собой непрерывную металлическую полосу, в этом примере электропроводный слой делится на несколько проводящих областей. Эти области относятся к двум типам. Квадратные области 1631 (хотя на практике они могут иметь любую форму) соединены посредством переходных отверстий 1606 только с одним из соединительных слоев металла. Эти области не влияют на электрические свойства частично изолирующего слоя, а обеспечивают тепловой путь через соответствующий изолирующий слой. Изменяя размеры этих областей и число соединений между ними и соединительным слоем металла, можно изменять тепловые свойства частично изолирующего слоя независимо от электрических свойств.

Каждая из других областей 1632 соединяет окно 1601 первого изолирующего слоя 1621 с окном 1602 второго изолирующего слоя 1622. Сопротивлением между окнами можно управлять путем изменения геометрии областей 1632, например, там, где область 1632 содержит дорожку 1633, которая пролегает, как показано на фиг. 16В, причем увеличение ширины дорожки уменьшило бы сопротивление между окнами, а увеличение длины дорожки (например, за счет обеспечения нелинейной дорожки или за счет перемещения окон) увеличило бы сопротивление между окнами.

Окна 1601 в первом изолирующем слое образованы переходными отверстиями, просверленными через первый соединительный слой и первый изолирующий слой, а затем отверстия металлизуют металлом 1603 (или другим электропроводным материалом), чтобы соединить первый соединительный слой и электропроводный слой. Окна 1602 во втором изолирующем слое образованы путем сверления переходного отверстия 1602 через все слои, которое металлизуют металлом 1604. Чтобы предотвратить формирование соединения с первым соединительным слоем через окна 1602 второго изолирующего слоя, первый соединительный слой стравливают вокруг переходного отверстия 1602, чтобы электрически изолировать его, а на конце переходного отверстия 1602 размещают изолирующую крышку 1605, чтобы гарантировать, что не произойдет шунтирование из-за пайки или контакт с ВТСИ-кабелем.

В качестве альтернативы окна 1602 вместо этого можно сверлить с другой стороны частично изолирующего слоя, так что они окажутся проходящими через второй соединительный слой, второй изолирующий слой и электропроводный слой и не проходящими через (или не проходящими полностью через) первый изолирующий слой. В качестве дополнительной альтернативы все окна могут быть образованы из переходных отверстий, которые проходят через все слои, травлением второго соединительного слоя и изолирующей крышки на втором соединительном слое, используемой для окон 1601 первого изолирующего слоя.

В качестве примера частично изолирующий слой в соответствии с фиг. 16А-Е может быть получен посредством процесса изготовления гибких печатных плат следующим образом:

предусматривают первый изолирующий слой 1621 и металлизуют его верхнюю и нижнюю поверхность медью (чтобы сформировать первый соединительный слой 1611 и электропроводный слой 1630, соответственно);

просверливают первый изолирующий слой 1621, металлизированный медью (т.е., слои 1621, 1611, 1630), чтобы сформировать переходные отверстия 1601, и металлизуют отверстия (1603);

травят электропроводный слой 1630, чтобы сформировать области 1632 (и, необязательно, области 1631, хотя их можно и стравить, если это необходимо);

наносит второй изолирующий слой 1622 на электропроводный слой 1630; это могут быть такой же изолятор, как первый изолирующий слой, или другой изолятор;

в одном примере второй изолирующий слой может представлять собой клей, который используют для соединения второго соединительного слоя;

наносит второй соединительный слой 1612 на второй изолирующий слой 1622;

сверлят переходные отверстия, как описано выше, чтобы сформировать окна 1602 в первом и втором изолирующем слоях;

покрывают переходные отверстия медью 1604;

травят первый соединительный слой, чтобы изолировать окна 1602 от этого слоя (1611);

накладывают изолирующую крышку 1605 на конец переходных отверстий, образующих окна 1602 в первом соединительном слое 1611.

Конечно, если в частично изолирующем слое используются лишь некоторые из признаков примера согласно фиг. 16А-Е, этапы способа, соответствующие отсутствующим признакам, не проводят.

Следует отметить, что общие признаки из примеров частично изолирующих слоев, предложенные выше, можно объединять множеством способов и можно использовать отдельно от других признаков в соответствующих примерах. Например, окна в изолирующих слоях можно предусмотреть как для примера со "узкими проходами" (фиг. 10А), при этом на краю каждого изолирующего слоя находится одиночное окно, или объединенными со структурированным электропроводным слоем согласно фиг. 16В, а

электропроводный слой может быть снабжен "шпунтом", чтобы привести электрические контакты структурированного в узкий проход изолирующего слоя, как на фиг. 12.

Отметим, что, хотя в вышеизложенном описании много внимания уделено большим ВТСП-обмоткам, "пропускающую изоляцию", предложенную выше, можно было бы применить также к меньшим ВТСП-обмоткам, чтобы обеспечить управляемое межвитковое соединение в тех обмотках.

Теперь будут описаны различные способы изготовления обмотки, предусматривающие такую "пропускающую изоляцию". Они представлены лишь в качестве примеров, и специалист легко поймет, что возможны другие способы намотки и что элементы из каждого примера могут быть объединены множеством не представленных здесь способов.

Частично изолирующий слой можно сформировать заранее (например, посредством процесса изготовления гибких печатных плат, как описано выше), или можно сформировать на месте использования во время намотки. Нанесение изолирующего покрытия на металлическую полосу может подразумевать нанесение клея (например, эпоксидного) на изолирующее покрытие и/или металлическую полосу перед их соединением.

Если частично изолирующий слой формируют перед намоткой обмотки (формируют либо заранее, либо посредством ранее проводимой стадии процесса намотки, как описывается ниже), слой можно снабжать ВТСП-лентой на каждой стороне, чтобы было проще осуществлять соединения во время процесса намотки.

На фиг. 13 показан схематический чертеж примерной системы намотки. Обмотку 1300 наматывают с трех бобин ВТСП-ленты 1301 и наносят частично изолирующий слой 1302. Частично изолирующий слой формируют на месте использования с двух бобин ВТСП-ленты 1311, двух бобин изолирующей ленты 1312, покрытой на каждой стороне сухим эпоксидным клеем, и одной бобины фольги 1313 из нержавеющей стали. Составляющие сборку частично изолирующий слой и ВТСП-ленту сцепляют друг с другом, пропуская через нагревательные прижимные ролики 1303 (которые можно исключить или заменить роликами, не прикладывающими значительный нагрев или давление, если давление намотки оказывается достаточным для отверждения эпоксидного клея). Каждый компонент из частично изолирующего слоя 1302 и ВТСП-лент 1301 пропускают через флюсовую коробку 1304, чтобы нанести флюс на омываемые поверхности.

Хотя обмотка на фиг. 13 показана круглой, аналогичную систему для намотки можно использовать для намотки обмотки любой формы (например, с помощью шаблона, выполненного по-другому).

На фиг. 14 показано сечение сборки частично изолирующего слоя и ВТСП-ленты. Сборка содержит ленту 1401 из нержавеющей стали, заключенную между изолирующими слоями 1402, которые, в свою очередь, заключены между ВТСП-лентами 1403. Каждый слой приклеен эпоксидным клеем, хотя на непосредственных соединениях между лентой из нержавеющей стали и ВТСП-лентой эпоксидный клей не используется (чтобы гарантировать приемлемые электрические соединения). Этот способ изготовления обмотки предпочтителен для больших обмоток, поскольку минимальный радиус изгиба сборки частично изолирующего слоя и ВТСП будет более ограниченным, чем минимальный радиус изгиба одиночной ВТСП-ленты (из-за толщины сборки). Вместе с тем, это можно преодолеть посредством частичного изгиба сборки заранее в процессе изготовления, т.е., посредством формирования сборки в частично изогнутом состоянии (так что положение "нулевой деформации" достигается при радиусе кривизны, промежуточном между распрямленной лентой и минимальным радиусом кривизны обмотки).

В показанном примере изолирующая лента выполнена обеспечивающей вариант осуществления, предусматривающий "узкие проходы" с одиночным большим окном на одном краю каждой стороны ленты. Это достигается посредством смещения изолирующей ленты от ВТСП-ленты и ленты из нержавеющей стали во время намотки, чтобы сформировать свес 1410. Этот свес способствует предотвращению нежелательного электрического шунтирования между ВТСП и нержавеющей сталью в процессе пайки сборки или когда обмотку "заливают припоем", как описывается ниже. В альтернативном варианте можно предусмотреть изолирующую ленту, более узкую чем нержавеющая сталь, и выровненную с одним краем нержавеющей стали (чтобы обеспечить "узкий проход" на другом краю).

Если частично изолирующий слой имеет другие компоновки окон, обеспечить припой можно во время сборки частично изолирующего слоя, чтобы гарантировать электрические соединения между ВТСП-лентой и стальной лентой, например, если окна не допускают сообщение по текучей среде с внешними краями частично изолирующего слоя. В альтернативном или дополнительном варианте можно использовать дополнительные металлические вкладыши в пределах окон или выступы в слое металла, как описано ранее.

Чтобы и консолидировать обмотку, и обеспечить улучшенные электрические соединения, обмотку можно "заливать припоем" или "консолидировать припоем", т.е. полностью покрывать припоем, которому позволяет проникать в обмотку (по аналогии с "заливкой эпоксидным клеем", которая хорошо известна в данной области техники). На фиг. 15 показана примерная залитая припоем обмотка. Обмотка содержит частично изолирующий слой 1510 и ВТСП-кабель 1520. Частично изолирующий слой 1510 содержит металлическую полосу 1511 и изолирующие покрытия 1512 в тех случаях, когда изолирующие покрытия имеют свес 1513, который выступает за пределы краев обмотки. Когда обмотку заливают при-

поем, припой 1530 покрывает поверхности обмотки и станет простирается между лентами ВТСП-кабеля, тем самым гарантируя электрические соединения между лентами ВТСП-кабеля, а также между ВТСП-кабелем и слоем металла. Поверхности металла ВТСП-лент и раскрытые поверхности металла частично изолирующего слоя можно обрабатывать флюсом перед пайкой.

Потом обмотку можно подвергнуть механической обработке вдоль узких проходов 1514 (пунктирные линии), чтобы срезать свесы и сгладить припой, и это дополнительно гарантирует, что от края до края свесов не останется мостиков припоя.

В тех случаях, когда частично изолирующий слой снабжен изолирующим покрытием на краях вместо свесов (например, как показано на фиг. 11 и описано выше), обмотку можно подвергнуть механической обработке вплоть до этого изолирующего покрытия после заливки припоем. В тех случаях, когда используемый припой не смачивает используемое изолирующее покрытие, такие мостики образовываться не могут, если изолирующее покрытие на краю является достаточно широким.

В качестве альтернативы обеспечению свесов на одной стороне обмотки, ту сторону обмотки можно покрыть удаляемой маской (например, двухкомпонентным кремнийорганическим покрытием), которая не дает припою шунтировать соединения на той стороне. Эта компоновка упрощает выравнивание обмотки, поскольку все ВТСП-ленты и частично изолирующий слой можно расположить так, что один конец будет пролегать по общему узкому проходу.

Хотя заливка припоем показана для варианта осуществления, предусматривающего "узкие проходы", она применима и к другим конструкциям, представленным ранее. В некоторых случаях можно предусмотреть свесы 1513 на обеих сторонах каждого изолирующего покрытия, или только вдоль части длины частично изолирующего слоя, т.е., там, где соединения от края до края изолирующего слоя нежелательны и при этом свес отсутствует там, где такие соединения приемлемы (как в случае, где окно простирается до края слоя металла). Если окна в изолирующих покрытиях расположены так, что они не сообщаются по текучей среде с пространством снаружи обмотки, то можно проводить отдельную стадию пайки во время намотки, чтобы пропаять соединения через эти окна, или вместо этого можно воспользоваться любыми другими способами соединения (например, предусматривая дополнительные металлические вкладыши в пределах окон).

Если частично изолирующий слой выполнен с возможностью электрического соединения с ВТСП-лентой лишь посредством прижима (например, в вариантах осуществления согласно фиг. 11 и 12 и других вариантах осуществления, в которых часть или компоненты слоя металла, электрически соединенные со слоем металла, находятся в плоскости изолирующего покрытия), электрическое соединение можно формировать между ВТСП и частично изолирующим слоем без заливки припоем или пайки иным образом, хотя можно использовать и припой, если это желательно. В этом случае обмотку можно залить эпоксидным клеем, чтобы повысить механическую стабильность, хотя и следует принять меры во избежание блокировки любого из электрических соединений эпоксидным клеем (либо в пределах ВТСП-кабеля, либо между кабелем и частично изолирующим слоем).

ВТСП-кабель можно пропаивать отдельно, либо перед намоткой, либо во время процесса намотки. Пайки во время намотки можно достичь, покрывая каждую ВТСП-ленту в припое по мере ее разматывания с бобины и пропуская их вместе через нагретый ролик, чтобы сформировать кабель, который затем наматывают с частично изолирующим слоем.

Благодаря малому размеру зазоров между ВТСП-кабелем и слоем металла в некоторых вариантах осуществления, припой не может смачивать эти зазоры во время заливки, это будет зависеть от состава припоя, слоя металла, и внешней поверхности ВТСП-кабеля. Обычно это будет происходить там, где слой металла и внешняя поверхность ВТСП-кабеля неодинаковы. А если так, то в вариантах осуществления, где электрическое соединение не воплощено путем непосредственного контакта слоя металла и ВТСП-кабеля, слой металла и внешняя поверхность ВТСП-кабеля могут быть из одинаковых металлов, или эти зазоры можно пропаивать по отдельности а не посредством заливки.

Аналогичным образом, припой обычно не будет увлажнять зазор между изолирующим слоем и ВТСП-лентой. После заливки припоем, обмотку можно залить эпоксидным клеем, чтобы консолидировать эти зазоры (по меньшей мере там, где они сообщаются по текучей среде с пространством снаружи обмотки).

В некоторых случаях (например, когда частично изолирующий слой делают в виде гибкой печатной платы) может оказаться желательными создание укороченных отрезков частично изолирующего слоя (например, 2-5 м) и соединения их посредством соединений впритык в пределах обмотки. Это следует рассматривать как одиночный "частично изолирующий слой" в любом из вышеупомянутых примеров.

Хотя вышеизложенное описание в равной степени относилось в равной степени ко многим из переменных, должно быть ясно, что для некоторого заданного магнита процесс проектирования может предусматривать ограничение некоторых переменных и обеспечивать свободный выбор других. Например, в случаях, где требуемая геометрия магнитного поля и магнита известна, процесс проектирования может включать в себя следующие этапы:

определение требуемого числа "ампер-витков" (т.е., число N витков, умноженное на ток I переноса) для получения требуемого магнитного поля;

выбор значений I и N так, чтобы обеспечить индуктивность L (зависящую от N) и радиальное сопротивление R (зависящее от N и сопротивления "виток-виток", $R_{\text{ТТ}}$),

которые поспособствуют достижению допустимой постоянной времени (где "допустимость" будет зависеть от случая применения);

выбор свойств частичной изоляции, чтобы обеспечить требуемое $R_{\text{ТТ}}$.

Вероятно, что выбор I и $R_{\text{ТТ}}$ будет ограничен другими факторами, например, ток переноса не может превышать критический ток ВТСП-кабелей, а $R_{\text{ТТ}}$ будет зависеть от допустимой толщины частично изолирующего слоя и ширины лент (а оба этих параметра, вероятно, задаются из других соображений, например, доступного пространства и рабочих характеристик ВТСП-лент).

Хотя вышеизложенное описание приведено со ссылками на намотанную плоскую обмотку, аналогичные соображения применимы к секционированным обмоткам. Для таких обмоток, зависимости L и R от параметров обмоток могут быть другими, но их сможет установить специалист, пользуясь методами проектирования ВТСП-магнитов.

Данное изобретение обеспечивает применение неизолированных и/или частично изолированных обмоток за счет того, что обеспечивают коррекцию постоянной времени, L/R , для достижения приемлемого компромисса между допустимо малым временем постепенного нарастания тока обмотки и большим временным окном между формированием горячего пятна в одном витке и причинением повреждения ВТСП-ленте. Это обеспечивает обнаружение горячего пятна посредством оперативного контроля температур обмотки и, при необходимости, посредством систем активной защиты от нарушения сверхпроводимости, которые будут задействованы для снижения тока магнита во временных рамках, расширенных по сравнению с эквивалентной изолированной обмоткой.

В дополнение к этому, неизолированные обмотки требуют меньше меди или другого металлического стабилизатора, чем эквивалентные изолированные обмотки, поскольку медь можно "перераспределять" между ВТСП-кабелями (т.е., обмотка в целом требует достаточно меди для перераспределения тока только из некоторого подмножества кабелей, а не каждый ВТСП-кабель требует достаточно меди для перераспределения тока из того кабеля). Следовательно, с помощью частично изолированных обмоток можно достичь более высоких плотностей тока, что используется конкретно в таких приложениях, как обмотка возбуждения тороидального поля сферического токамака, где толщина обмоток является важным конструкторским соображением (чтобы в случае сферического токамака минимизировать радиус центрального столба или обеспечить лучшую нейтронную защиту для некоторого заданного радиуса центрального столба).

Если для нормальной работы желательно поведение изолированной обмотки, выгоды неизолированной обмотки по-прежнему можно получить во время нарушения сверхпроводимости посредством применения материала, обеспечивающего переход металл-изолятор, такого, как оксид ванадия, который обладает очень высоким сопротивлением, когда он холодный, и относительно низким сопротивлением (по меньшей мере в 10 раз более низким), когда он подогрет выше температуры перехода (приблизительно 10 K в случае оксида ванадия). А если так, то "полуизолированная"

обмотка с присутствующим между витками материалом, обеспечивающим переход металл-изолятор, должна вести себя как изолированная обмотка во время нормальной работы и во время линейного нарастания тока (имея очень низкую постоянную времени), и как неизолированная обмотка во время нарушения сверхпроводимости (которое вызовет нагрев материала, обеспечивающего переход металл-изолятор, и превращение его в проводящий). Это позволяет иметь R_{T} , когда металл, обеспечивающий переход металл-изолятор, имеет низкое сопротивление, как можно более низким, не оказывая негативное влияние на постоянную времени линейного нарастания тока (при условии, что R_{T} при низких температурах обеспечивает достаточно низкую постоянную времени, но это легко достижимо, поскольку материалы, обеспечивающие переход металл-изолятор, имеют очень резкий спад удельного сопротивления около своей температуры перехода, например, спад удельного сопротивления по меньшей мере в 10 раз при температуре, превышающей 10 Кельвинов, или даже спад удельного сопротивления в 10^3 раз при температуре, превышающей 10 Кельвинов).

Вышеизложенное изобретение применимо к множеству систем ВТСП-магнитов. Помимо термоядерного реактора типа "токамак", упомянутого выше в качестве примера, изобретение можно использовать для ВТСП-обмоток в установках для визуализации посредством ядерного магнитного резонанса (УИ/ЯМР-установках), при манипулировании магнитными устройствами в пределах немагнитной среды посредством магнитных полей (например, в роботизированных магнитных системах навигации для манипулирования медицинскими устройствами внутри пациента), и в магнитах электродвигателей, например - для самолетов радиоэлектронного подавления. В качестве дополнительного примера, изобретение применимо к установкам для протонно-лучевой терапии, содержащим системы ВТСП-магнитов, включающие в себя раскрытые признаки, где системы ВТСП-магнитов применяются в пределах ускорителя установки для ПЛТ, квадрупольных или дипольных управляющих магнитов установки для ПЛТ, или любого другого магнита установки для ПЛТ.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Высокотемпературная сверхпроводящая (ВТСП) обмотка возбуждения, содержащая: множество витков, содержащих ВТСП-материал и металлический стабилизатор; частично изолирующий слой, разделяющий витки, так что ток может распределяться между витками через частично изолирующий слой, причем частично изолирующий слой содержит электропроводный слой, покрытый на одной стороне первым изолирующим слоем и на другой стороне вторым изолирующим слоем, при этом каждый изолирующий слой имеет одно или более окон, через которые может осуществляться электрический контакт между витками и электропроводным слоем, при этом окна в первом изолирующем слое смещены в плоскости электропроводной полосы от окон во втором изолирующем слое.
2. ВТСП-обмотка возбуждения по предыдущему пункту, причем электропроводный слой представляет собой непрерывную электропроводную полосу.
3. ВТСП-обмотка возбуждения по п.1, причем электропроводный слой содержит множество областей, причем каждая область электрически соединяет соответствующее первое окно в первом изолирующем слое с соответствующим вторым окном во втором изолирующем слое, и при этом каждая область электрически изолирована в плоскости электропроводного слоя от других областей.
4. ВТСП-обмотка возбуждения по п.3, причем каждая область содержит дорожку между первым и вторым окном, причем длина дорожки между первым и вторым окном по меньшей мере вдвое больше ширины дорожки, измеряемой перпендикулярно длине.
5. ВТСП-обмотка возбуждения по п.4, причем каждая дорожка является нелинейной.
6. ВТСП-обмотка возбуждения по любому предыдущему пункту, причем каждое из окон во втором слое является частью соответствующего переходного отверстия, простирающегося через первый изолирующий слой, второй изолирующий слой и электропроводный слой, причем частично изолирующий слой дополнительно содержит изолирующую крышку на конце каждого переходного отверстия, находящегося у первого изолирующего слоя.
7. ВТСП-обмотка возбуждения по любому предыдущему пункту, причем расстояние смещения между каждым окном в одном слое и ближайшим окном в другом слое больше, чем толщина электропроводного слоя, и/или причем расстояние смещения между каждым окном в одном слое и ближайшим окном в другом слое меньше, чем $1/5$ длины витка ВТСП-обмотки возбуждения, более предпочтительно меньше чем $1/10$, более предпочтительно меньше чем $1/50$.
8. ВТСП-обмотка возбуждения по любому предыдущему пункту, причем каждый изолирующий слой содержит множество окон, смещенных вдоль длины частично изолирующего слоя.
9. ВТСП-обмотка возбуждения по п.8, причем окна в каждом изолирующем слое разнесены на одинаковые расстояния с промежутком, который является одинаковым для обоих изолирующих слоев, и при этом каждое окно имеет одну и ту же площадь, и/или причем окна в одном изолирующем слое смещены от окон в противоположном изолирующем слое так, что каждое окно в одном изолирующем слое равноудалено от двух ближайших окон противоположного изолирующего слоя.
10. ВТСП-обмотка возбуждения по п.8 или 9, причем изолирующие слои сформированы посредством спирального наматывания изолирующей ленты вокруг электропроводного слоя или спирального наматывания изолирующей ленты вокруг витков, так что зазоры в спиральной намотке образуют окна.
11. ВТСП-обмотка возбуждения по любому из пп.1-7, причем каждый изолирующий слой содержит одно окно, простирающееся по длине изолирующего слоя, а окно в одном изолирующем слое смещено по ширине частично изолирующего слоя от окна в другом изолирующем слое.
12. ВТСП-обмотка возбуждения по п.11, причем электропроводный слой изогнут так, что участок электропроводного слоя, открытый каждым окном, лежит в плоскости соответствующего изолирующего слоя.
13. ВТСП-обмотка возбуждения по любому предыдущему пункту, причем каждый изолирующий слой простирается за пределы электропроводного слоя на по меньшей мере одной стороне.
14. ВТСП-обмотка возбуждения по любому предыдущему пункту, причем частично изолирующий слой содержит электропроводные вкладыши в одном или каждом окне; каждое окно металлизировано электропроводным материалом; и/или электропроводный слой содержит электропроводные выступы, которые простираются в одно или каждое окно, и причем электропроводные вкладыши или выступы заполняют соответствующее окно, или электропроводные вкладыши или выступы заполняют только участок соответствующего окна, а электрический контакт между электропроводным слоем и витками через окно происходит только посредством электропроводных вкладышей.
15. ВТСП-обмотка возбуждения по любому предыдущему пункту, причем частично изолирующий слой содержит электропроводные соединительные полосы, находящиеся снаружи изолирующих слоев и

электрически соединенные с электропроводной соединительной полосой посредством окон, причем электропроводные соединительные полосы электрически соединены с соседними витками.

16. ВТСП-обмотка возбуждения по любому предыдущему пункту, причем частично изолирующий слой содержит множество секций, соединенных посредством соединений впрыток.

17. Способ изготовления ВТСП-обмотки возбуждения, содержащий обеспечение ВТСП-кабеля, содержащего ВТСП-материал и металлический стабилизатор; обеспечение частично изолирующего слоя, содержащего электропроводный слой, покрытый на одной стороне первым изолирующим слоем и на другой стороне вторым изолирующим слоем,

причем каждый изолирующий слой имеет одно или более окон, через которые может осуществляться электрический контакт между витками и электропроводным слоем,

при этом окна в первом изолирующем слое смещены в плоскости электропроводного слоя от окон во втором изолирующем слое;

сборку ВТСП-кабеля и частично изолирующего слоя друг с другом с образованием ВТСП-обмотки возбуждения, так что ток может распределяться между витками ВТСП-кабеля через частично изолирующий слой.

18. Способ по п.17, причем обеспечение частично изолирующего слоя содержит обеспечение по отдельности каждого из электропроводного слоя и изолирующих слоев и формирование частично изолирующего слоя во время намотки ВТСП-обмотки возбуждения.

19. Способ по п.18, причем формирование частично изолирующего слоя во время намотки обмотки содержит присоединение изолирующих слоев к электропроводному слою с помощью эпоксидного клея и отверждение эпоксидного клея путем использования нагретых прижимных роликов непосредственно перед намоткой частично изолирующего слоя в обмотку.

20. Способ по п.17, причем обеспечение частично изолирующего слоя содержит сцепление изолирующих слоев с электропроводным слоем посредством клея; травление изолирующих слоев для формирования окон.

21. Способ по любому из п.п.17-20, причем обеспечение частично изолирующего слоя содержит обеспечение первого изолирующего слоя;

покрытие поверхности первого изолирующего слоя электропроводным слоем;

присоединение второго изолирующего слоя к электропроводному слою;

сверление окон в первом и втором изолирующих слоях.

22. Способ по любому из пп.17-21 и содержащий заливку ВТСП-обмотки возбуждения припоем.

23. Способ по п.22, причем по меньшей мере один из частично изолирующих слоев имеет свес, который простирается за пределы электропроводного слоя по меньшей мере на одной стороне, и содержащий после этапа заливки припоем механическую обработку этой стороны ВТСП-обмотки возбуждения до такого уровня, что по меньшей мере часть свеса удаляется.

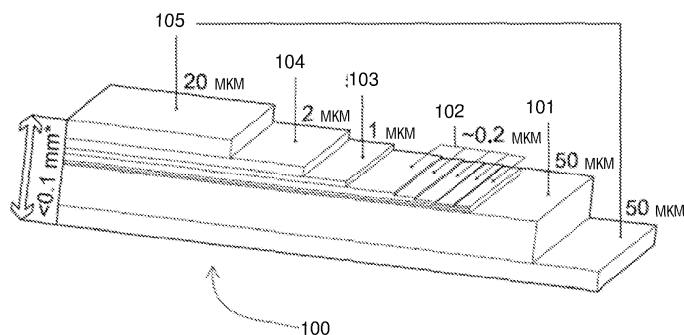
24. Способ по любому из пп.22-23 и содержащий перед заливкой припоем нанесение удаляемой маски на одну сторону ВТСП-обмотки возбуждения и удаление этой маски после этапа заливки припоем.

25. Термоядерный реактор типа "токамак", содержащий ВТСП-обмотку возбуждения по любому из пп.1-16, причем ВТСП-обмотка возбуждения является одной из обмоток возбуждения тороидального поля или обмотки возбуждения полоидального поля.

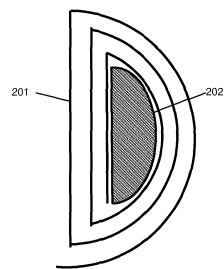
26. Установка для протонно-лучевой терапии (ПЛТ), содержащая ВТСП-обмотку возбуждения по любому из пп.1-16, при этом ВТСП-обмотка возбуждения является одной из

обмоток возбуждения ускорителя установки для ПЛТ;

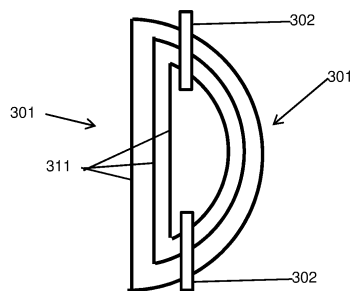
дипольного или квадрупольного магнита системы управления пучком протонов установки для ПЛТ.



Фиг. 1



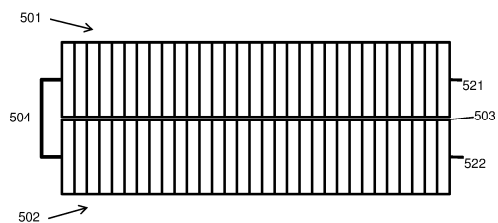
Фиг. 2



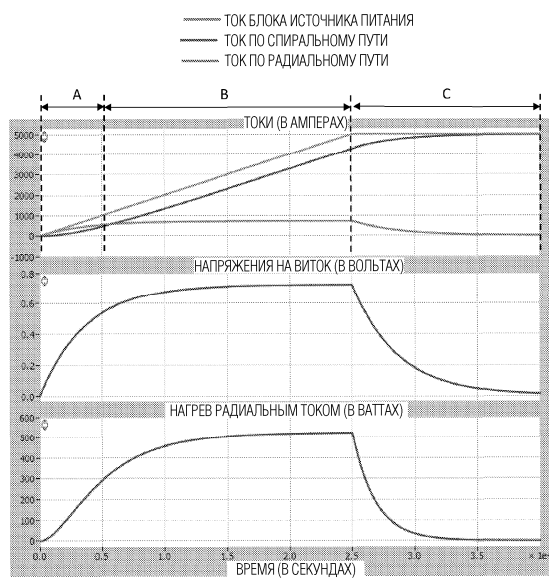
Фиг. 3



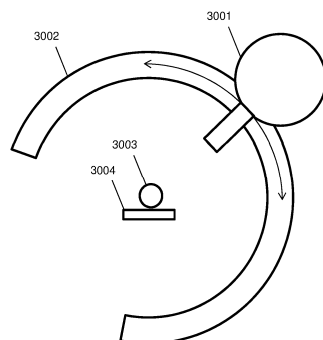
Фиг. 4



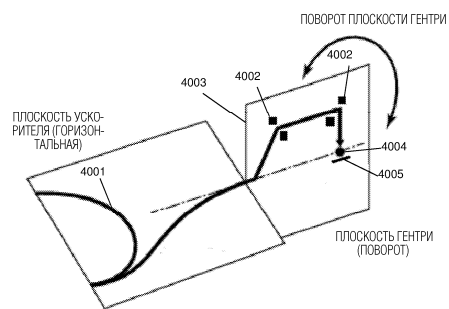
Фиг. 5



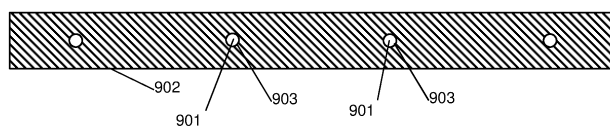
Фиг. 6



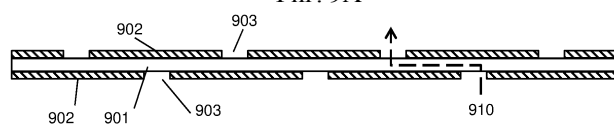
Фиг. 7



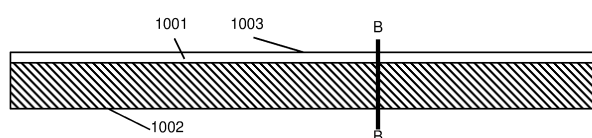
Фиг. 8



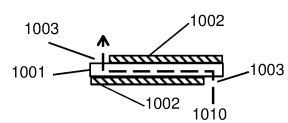
Фиг. 9А



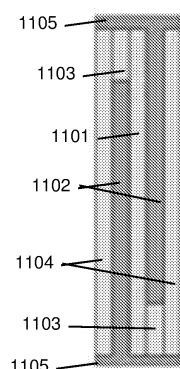
Фиг. 9В



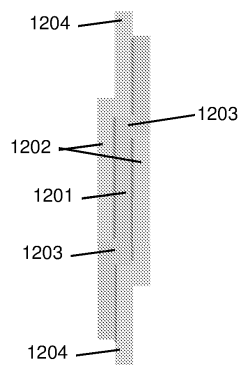
Фиг. 10А



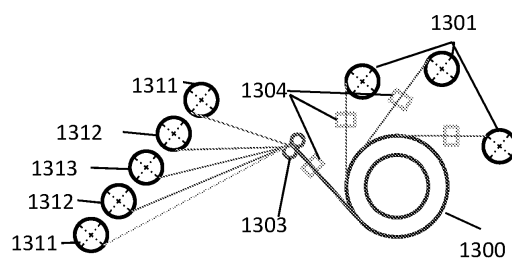
Фиг. 10В



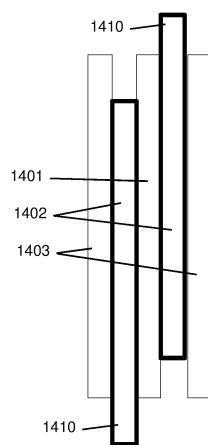
Фиг. 11



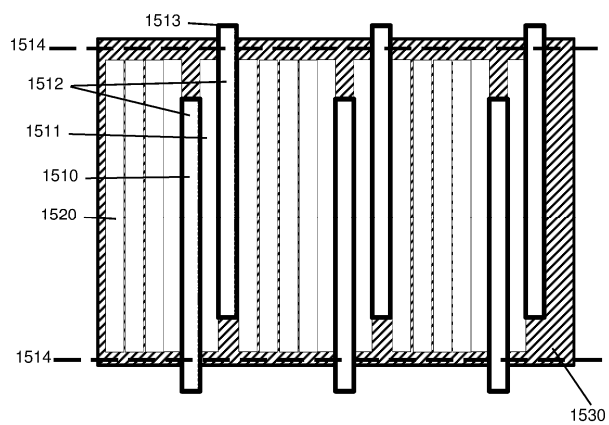
Фиг. 12



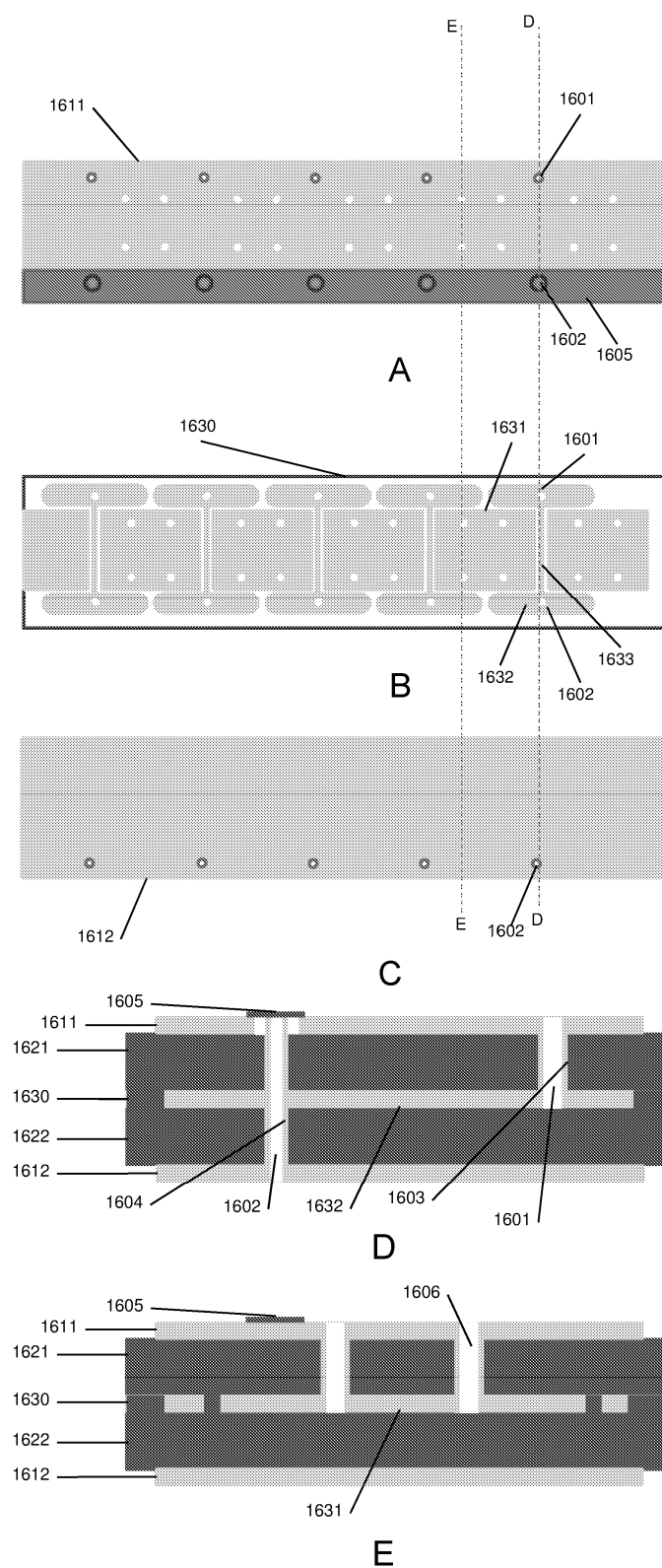
Фиг. 13



Фиг. 14



Фиг. 15



Фиг. 16А-Е

