(19) Евразийское патентное ведомство

(21) 202191043 (13) A1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки
2021.06.01

(22) Дата подачи заявки
2019.10.14

(51) Int. Cl. ***H01F 6/06*** (2006.01)
H01F 41/10 (2006.01)
H01F 27/28 (2006.01)
H01F 41/04 (2006.01)

(54) МАГНИТ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ СВЕРХПРОВОДНИКОМ

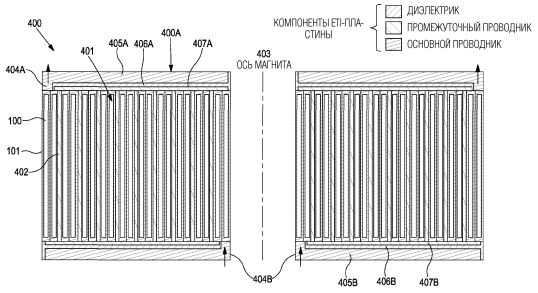
(31) **1816762.7; 1900177.5**
(32) **2018.10.15; 2019.01.07**
(33) **GB**
(86) **PCT/GB2019/052926**
(87) **WO 2020/079412 2020.04.23**

(71) Заявитель:
ТОКЕМЕК ЭНЕРДЖИ ЛТД (GB)

(72) Изобретатель:
Бриттлс Грег, Круип Марсель, Лангтри Тони, Смит Джордж (GB)

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

(57) Магнит с высокотемпературным сверхпроводником (ВТСП), содержащий катушку, образованную вложенными обмотками. Каждая обмотка содержит ВТСП-материал. ВТСП-магнит дополнительно содержит проводящий элемент, содержащий поверхность электрического контакта, через которую подается электрический ток к участку по меньшей мере одной из обмоток. Эта поверхность обеспечивает электрический контакт между проводящим элементом и осевой кромкой катушки практически по пути по меньшей мере одной из обмоток.



202191043 A1

202191043 A1

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

2420-568028EA/050

МАГНИТ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ СВЕРХПРОВОДНИКОМ

Область техники

Настоящее изобретение относится к магнитам с высокотемпературным сверхпроводником (ВТСП), ВТСП-магнитам. В частности, оно относится к подаче электрического тока в ВТСП-магниты.

Предпосылки изобретения

Сверхпроводящие материалы типично делятся на «высокотемпературные сверхпроводники» (ВТСП) и «низкотемпературные сверхпроводники» (НТСП). НТСП-материалы, такие как Nb и NbTi, являются металлами или металлическими сплавами, сверхпроводимость которых может быть описана теорией БКШ (Бардина-Купера-Шриффера). Все низкотемпературные сверхпроводники имеют критическую температуру (температуру, выше которой материал не может быть сверхпроводящим даже в нулевом магнитном поле) ниже примерно 30 К. Поведение ВТСП-материала не описывается теорией БКШ, и такие материалы могут иметь критические температуры выше примерно 30 К (хотя следует отметить, что именно физические различия в работе и составе сверхпроводников, а не критическая температура, определяют ВТСП-материал). Наиболее часто используемыми ВТСП являются «купратные сверхпроводники» – керамика на основе купратов (соединений, содержащих группу оксида меди), таких как BSCCO или ReBCO (где Re – редкоземельный элемент, обычно Y или Gd). Другие ВТСП-материалы включают пниктиды железа (например, FeAs и FeSe) и диборат магния (MgB_2).

ReBCO типично производят в виде лент со структурой, показанной на фигуре 1. Такая лента 100 обычно имеет толщину приблизительно 100 микрон и включает в себя подложку 101 (типично электрополированный сплав Хастелой толщиной приблизительно 50 микрон), на который нанесена методом ионно-лучевого осаждения (IBAD), магнетронного распыления или другого подходящего метода последовательность буферных слоев, известных как буферный пакет 102, приблизительной толщиной 0,2 микрона. Эпитаксиальный слой 103 ВТСП-ReBCO (нанесенный методом химического осаждения из паровой фазы металлоорганических соединений (MOCVD) или другим подходящим методом) покрывает этот буферный пакет 102 и типично имеет толщину 1 микрон. На слой ВТСП нанесен 1-2-микронный слой 104 серебра методом магнетронного распыления или другим подходящим методом, и на ленту гальваническим методом или другим подходящим методом нанесен стабилизирующий слой 105 меди (или "оболочка"), который(ая) часто полностью инкапсулирует ленту. Электрический ток обычно

подводится к ленте 100 через оболочку.

Подложка 101 обеспечивает механическую основу, которая может подаваться по производственной линии и позволяет выращивать последующие слои. Буферный пакет 102 требуется для обеспечения биаксиально текстурированного кристаллического шаблона, на котором будет расти слой ВТСП, и предотвращает химическую диффузию элементов из подложки в ВТСП, что нарушает его сверхпроводящие свойства. Слой 104 серебра требуется для обеспечения перехода с низким сопротивлением от ReBCO к стабилизующему слою, а стабилизирующий слой 105 обеспечивает альтернативный путь тока в случае, когда какая-либо часть ReBCO перестает быть сверхпроводящей (переходит в «нормальное» состояние).

ВТСП-магниты могут быть сформированы посредством намотки ВТСП-ленты, такой как описанная выше ReBCO-лента 100, в катушку. Обычными точками выхода из строя в таких ВТСП-магнитах являются те места, где отдельные ленты или кабель отходят от пакета обмоток в области стыка (т.е. электрического соединения).

Фигура 2 схематично показывает «традиционный» электрический стык с катушкой 201, содержащей ВТСП-ленту 100. Внешняя обмотка катушки 201 была частично оттянута от пакета обмоток, чтобы создать «свободный конец» 202. К свободному концу 202 прижимается крепление 203 электрического стыка для того, чтобы подавать электрический ток на катушку 201.

В стыках со свободным концом, таких как показанные на фигуре 2, ВТСП-ленты повреждаемы из-за циклического перемещения под действием электромагнитных (ЭМ) сил и теплового сжатия, вызывающих их деградацию во время нормальной работы. Часто эти «открытые» участки ВТСП-ленты также подвержены дополнительному риску, поскольку нет соседних ВТСП-витков (обмоток), с которыми можно было бы поделиться током в случае нарушения критического тока, и это означает, что такие участки не пользуются близостью к главному пакету обмоток для рассеивания тепла и/или тока.

Эти области свободных концов также склонны к повреждению во время процессов намотки и сборки магнита, поскольку отдельные ленты хрупкие и легко сгибаются при неправильном обращении. Кроме того, в схеме со свободным концом приходится изготавливать дорогостоящие, прецизионно обработанные детали для направления и поддержания свободных концов по мере того, как они выходят из пакета обмоток в крепление стыка.

Другой проблемой, которая может возникать в сверхпроводящих магнитах, является нарушение сверхпроводимости. Нарушение сверхпроводимости происходит, когда часть сверхпроводящих провода или катушки переходит в резистивное состояние.

Это может происходить вследствие колебаний температуры или магнитного поля, либо физического повреждения или дефектов в сверхпроводнике (например, из-за нейтронного облучения, если магнит используется в термоядерном реакторе). Вследствие высоких токов, присутствующих в магните, когда даже малая часть сверхпроводника становится резистивной, он быстро нагревается. Как упоминалось выше, сверхпроводящие провода снабжены некоторым медным стабилизатором для защиты от нарушения сверхпроводимости. Медь обеспечивает альтернативный путь тока, если сверхпроводник становится нормальным. Чем больше меди присутствует, тем медленнее растет температура в горячем пятне, которое образуется вокруг области проводника с нарушенной сверхпроводимостью.

Следовательно, существует потребность в ВТСП-магните, который устраняет или смягчает некоторые или все эти недостатки.

Сущность изобретения

Задачей настоящего изобретения является предоставление ВТСП-магнита, который решает или по меньшей мере смягчает описанные выше проблемы.

Согласно первому аспекту изобретения предложен ВТСП-магнит. ВТСП-магнит содержит: катушку, образованную вложенными концентрическими обмотками, причем каждая обмотка содержит ВТСП-материал; и проводящий элемент, содержащий поверхность электрического контакта, через которую подается электрический ток к участку по меньшей мере одной из обмоток. Эта поверхность обеспечивает электрический контакт между проводящим элементом и осевой кромкой катушки практически по пути упомянутой по меньшей мере одной из обмоток.

Каждая обмотка может содержать ВТСП-ленту и оболочку, электрически соединенную с ВТСП-лентой, причем электрический контакт обеспечивается с оболочкой.

Поверхность электрического контакта может обеспечивать электрический контакт с осевой кромкой катушки по более чем 20%, более чем 50% или более чем 80% пути упомянутой по меньшей мере одной из обмоток. Поверхность электрического контакта может быть кольцеобразной.

ВТСП-магнит может содержать пластину, проходящую по одной или более из других обмоток, причем проводящий элемент выполнен заодно с пластиной или предусмотрен на ней. Проводящий элемент может выступать из лицевой стороны пластины, а пластина дополнительно содержит диэлектрический или электрорезистивный слой для электрической изоляции этой лицевой стороны пластины от участка одной или более из других обмоток.

Используемый здесь термин «электрорезистивный» слой означает слой, который

имеет электрическое сопротивление, большее электрического сопротивления между проводящим элементом и катушкой и электрического сопротивления между витками катушки (т.е. радиального электрического сопротивления катушки). Тем не менее, электрорезистивный слой может быть теплопроводящим, тем самым позволяя более эффективно переносить тепло от катушки (или к ней). Электрорезистивный слой может быть или не быть диэлектрическим слоем. Недиэлектрический, но электрорезистивный слой может быть предпочтительным в случаях, когда диэлектрик был бы подвержен радиационному повреждению, например, когда катушки являются частью термоядерного реактора токамак.

ВТСП-магнит может содержать промежуточный проводящий слой, проходящий по одной или более другим обмоткам, для передачи тепла и/или электрического тока от кромки упомянутой или каждой обмотки. Промежуточный проводящий слой может содержать латунь и/или нержавеющую сталь. Также могут быть использованы и другие «паяемые» металлы, т.е. металлы, с которыми может сцепляться припой для того, чтобы обеспечить электрический контакт. Промежуточный проводящий слой может быть снабжен рисунком (структурирован) за счет изменения его толщины, например, с получением «паутиноподобного» рисунка.

Катушка может содержать электрическую изоляцию между обмотками.

ВТСП-магнит может содержать один или более датчиков и/или один или более нагревателей, расположенных между пластиной и катушкой.

Поверхность электрического контакта может обеспечивать электрический контакт либо с самой внутренней, либо с самой внешней обмоткой катушки. Поверхность электрического контакта может обеспечивать электрический контакт через несплошность (разрыв) в обмотках. Например, если катушка образована из двух отрезков ВТСП-ленты, поверхность электрического контакта может действовать как электрический стык для последовательного соединения лент.

ВТСП-магнит может дополнительно содержать другой проводящий элемент, содержащий поверхность электрического контакта для приема электрического тока от участка другой по меньшей мере одной из обмоток. Эта поверхность обеспечивает электрический контакт с упомянутой или другой осевой кромкой катушки практически по пути другой по меньшей мере одной из обмоток. Поверхности электрического контакта могут обеспечивать электрический контакт с противоположными сторонами (гранями) катушки.

ВТСП-магнит может дополнительно содержать одну или более дополнительных катушек, причем упомянутая или каждая дополнительная катушка имеет проводящие

элементы для обеспечения электрического контакта с противоположными сторонами (гранями) этой катушки, причем катушки уложены стопкой в осевом направлении и электрически соединены друг с другом через свои соответствующие проводящие элементы. Соседние уложенные стопкой в осевом направлении катушки могут быть намотаны в противоположных направлениях.

ВТСП-магнит может содержать две или более концентрически вложенных катушек, каждая из которых имеет соответствующие проводящие элементы, причем каждая катушка электрически соединена с соседней катушкой электрическим соединением между соответствующими проводящими элементами катушек. Это электрическое соединение может быть гибким, чтобы приспосабливаться к перемещению катушек относительно друг друга. ВТСП-магнит может содержать одну или более промежуточных опор, расположенных между соседними катушками, для пресечения радиальных сил.

Соответствующие ВТСП-ленты соседних катушек могут отличаться по одному или более из: толщины; состава; ширины; и числа.

Согласно второму аспекту настоящего изобретения предложен ВТСП-магнит, содержащий первую и вторую катушки, причем каждая катушка образована вложенными концентрическими обмотками, а каждая обмотка содержит ВТСП-материал; и первый и второй проводящие элементы, причем каждый проводящий элемент обеспечивает электрическое соединение между катушками. Каждый проводящий элемент содержит: первую поверхность электрического контакта, через которую передается электрический ток к и от участка по меньшей мере одной из обмоток первой катушки; и вторую поверхность электрического контакта, через которую передается электрический ток к или от участка по меньшей мере одной из обмоток второй катушки. Каждая поверхность обеспечивает электрический контакт между соответствующим проводящим элементом и осевой кромкой соответствующей катушки практически по пути упомянутой по меньшей мере одной из обмоток.

Электрическое сопротивление электрического соединения, обеспечиваемого первым проводящим элементом, деленное на электрическое сопротивление электрического соединения, обеспечиваемого вторым проводящим элементом, может составлять более 1,5, более 3 или более 10. Площади поверхностей электрического контакта второго проводящего элемента могут быть больше площадей поверхностей электрического контакта первого проводящего элемента.

Первый проводящий элемент может быть расположен радиально снаружи от второго проводящего элемента. Это может позволить разместить первый проводящий

элемент в области более низкого магнитного поля.

Первый или второй проводящий элемент может содержать переменный резистор или переключатель. Переменный резистор или переключатель могут содержать ВТСП-материал.

Согласно третьему аспекту настоящего изобретения предложен токамак, содержащий описанный выше ВТСП-магнит. ВТСП-магнит выполнен с возможностью обеспечения тороидального магнитного поля или полоидального магнитного поля.

Согласно четвертому аспекту настоящего изобретения предложен способ создания полунезатухающего тока в описанном выше ВТСП-магните. Способ включает: подготовку каждой из катушек в сверхпроводящем состоянии; подключение источника питания параллельно катушкам; и отключение источника питания.

Второй проводящий элемент может содержать ВТСП-материал, а способ может включать, после подключения источника питания параллельно катушкам, переведение ВТСП-материала из нормального состояния в сверхпроводящее состояние.

Согласно пятому аспекту настоящего изобретения предложен способ выполнения электрического соединения с ВТСП-магнитом, содержащим катушку, образованную вложенными концентрическими обмотками, причем каждая обмотка содержит ВТСП-материал. Способ включает: нанесение диэлектрического или электрорезистивного слоя для частичного покрытия лицевой стороны катушки; приложение проводящей пластины к диэлектрическому или электрорезистивному слою; и формирование электрического контакта между проводящей пластиной и осевой кромкой катушки практически по пути по меньшей мере одной из обмоток.

Способ может дополнительно включать нанесение промежуточного проводящего слоя между диэлектрическим или электрорезистивным слоем и катушкой, причем промежуточный проводящий слой проходит по одной или более из других обмоток для передачи тепла или электрического тока от кромки упомянутой или каждой обмотки.

Согласно шестому аспекту настоящего изобретения предложена проводящая пластина для подачи тока к осевой кромке катушки, образованной вложенными концентрическими обмотками. Проводящая пластина содержит кольцеобразный проводящий элемент, выполненный заодно с пластиной или предусмотренный на ней. Проводящий элемент содержит поверхность электрического контакта для обеспечения электрического контакта между проводящим элементом и катушкой. Проводящий элемент дополнительно содержит диэлектрический или электрорезистивный слой на проводящей пластине для обеспечения электроизолирующего барьера смежно с поверхностью электрического контакта.

Проводящая пластина может дополнительно содержать промежуточный проводящий слой, частично или полностью проходящий по диэлектрическому или электрорезистивному слою. Промежуточный проводящий слой выполнен с возможностью передачи тепла или электрического тока от кромки упомянутой или каждой обмотки.

Согласно седьмому аспекту настоящего изобретения предложен способ изготовления проводящей пластины для подачи тока к осевой кромке катушки, образованной вложенными концентрическими обмотками. Способ включает: обеспечение кольцеобразного проводящего элемента, выполненного заодно с пластиной или предусмотренного на ней, причем проводящий элемент содержит поверхность электрического контакта для обеспечения электрического контакта между проводящий элементом и катушкой; и отверждение композита волокон и смолы на проводящей пластине с образованием диэлектрического или электрорезистивного слоя на проводящей пластине для обеспечения электроизолирующего барьера смежно с поверхностью электрического контакта.

Отверждение может включать нагрев композита до целевой температуры, поддержание композита при целевой температуре в течение периода времени и охлаждение композита.

Скорость нагрева может быть менее 1°C в минуту, предпочтительно менее 0,3°C в минуту. Скорость охлаждения может быть менее 1°C в минуту, предпочтительно менее 0,4°C в минуту. Целевая температура может быть больше или равна 180°C. Период может быть больше 1 часа и, предпочтительно, больше 2 часов.

Также здесь описан способ формирования электрического и/или термического (теплового) соединения с поверхностью меди, включающий обеспечение слоя серебра на поверхности меди и обеспечение слоя индия на поверхности серебра, за счет чего электрическое и/или термическое соединение может быть сформировано к слою индия. Также здесь описано электрическое и/или термическое соединение, содержащее поверхность меди, слой серебра и слой индия, причем слой серебра расположен непосредственно между поверхностью меди и слоем индия.

Краткое описание чертежей

Фигура 1 – схематичный вид в перспективе ВТСП-ленты уровня техники;

Фигура 2 – схематичный вид сверху стыка со свободным концом уровня техники;

Фигуры 3А и 3В – схематичные виды сверху ВТСП-магнитов; и

Фигура 4 – схематичный вид в разрезе ВТСП-магнита;

Фигура 5 – схематичный вид в разрезе ВТСП-магнита;

Фигура 6 – схематичный вид в радиальном разрезе ВТСП-магнита с радиальным

стыком;

Фигура 7 – схематичный вид в радиальном разрезе ВТСП-магнита с множественными «уложенными стопкой» катушками;

Фигура 8 – схематичный вид в разрезе другого ВТСП-магнита;

Фигура 9 – схематичный вид в разрезе ВТСП-магнита по фигуре 8, показывающий электрический ток, протекающий через магнит, когда источник питания подключен параллельно катушкам; и

Фигура 10 – схематичный вид в разрезе ВТСП-магнита по фигурам 8 и 9, показывающий электрический ток, протекающий через магнит после отключения источника питания.

Подробное описание изобретения

Здесь предлагается решение вышеуказанных проблем, в котором электрическое соединение с катушкой ВТСП-магнита выполняется через осевую кромку катушки, так что электрический ток может подаваться или приниматься через лицевую сторону (грань) катушки. Эта форма соединения позволяет сохранить плотным пакет обмоток ВТСП-ленты, так что ни одна из ВТСП-лент не должна отходить от катушки. Например, электрическое соединение может быть обеспечено проводником в форме кольца, расположенным поверх лицевой стороны катушки, при этом проводник контактирует с обращенной вверх кромкой обмотки по окружности катушки. Такое расположение или «кольцевое соединение» («кольцевой стык») могут быть использованы для минимизации риска точечных отказов в магните, причем как во время сборки, так и во время эксплуатации. Это также позволяет подавать ток к ВТСП-катушкам или извлекать ток из ВТСП-катушек без потребности в свободных концах, устраняя необходимость во многих вспомогательных деталях, уменьшая стоимость и сложность и упрощая производство ВТСП-магнитов. Такие соединения или стыки могут также улучшать характеристики ВТСП-магнитов, как описано ниже.

Хотя в этом документе делается ссылка на некоторые направления (например, вверх, вниз) или употребляются относительные термины (например, выше, поверх, ниже и т.д.), следует понимать, что такие термины используются просто с целью предоставления примеров описанных здесь концепций. Аналогично, хотя раскрытие изобретения проиллюстрировано на примере со ссылкой на дисковые катушки (также иногда называемые «галетными»), т.е. в основном плоские катушки, образованные вложенными концентрическими обмотками, из приведенного ниже обсуждения будет понятно, что раскрытие изобретения не ограничивается такими катушками.

Встраивание кольцевых стыков в более крупные конструкции (описанные ниже как

пластины электротермического интерфейса, от англ. «Electro-Thermal Interface, "ETI", plates» или ETI-пластины) также позволяет обеспечить в виде единого блока термические соединения, электрическую изоляцию и датчики, которые часто традиционно устанавливаются на магнит отдельно. Это упрощает процесс сборки и позволяет изготавливать эти компоненты независимо от ВТСП-катушки.

Фигуры 3А и 3В показывают схематичные виды сверху двух возможных вариантов реализации кольцевого стыка 300А, 300В для дисковой катушки 301.

Катушка 301 содержит вложенные концентрические обмотки из ВТСП-ленты 100 в преимущественно плоском расположении. ВТСП-лента 100 намотана «лицом к лицу», так что противоположные кромки ленты 100 проецируются вдоль оси 303 катушки. Каждая полная обмотка соответствует одному полному обороту (витку) ВТСП-ленты 100 вокруг оси 303 катушки. Начальная и конечная точки самой внешней обмотки обозначены на фигуре 3А позициями 301А и 301В.

Кольцевые стыки 300А, 300В образованы соответствующими кольцевыми проводниками 304А, 304В. Ради ясности, кольцевые проводники 304А, 340В показаны за катушкой 301 для того, чтобы показать обмотки катушки. Каждый кольцевой проводник 304А, 304В содержит кольцевидную конструкцию или кольцо, выполненные из проводящего материала, предпочтительно металла, такого как медь. Кольцевые проводники 200А, 200В контактируют с верхней или нижней кромкой обмоток для того, чтобы обеспечивать электрический контакт с катушкой 201. Кольцевой проводник 300А расположен на внешнем радиусе катушки 201, в то время как кольцевой проводник 200В расположен на внутреннем радиусе катушки 201. Каждый кольцевой проводник 200А, 200В покрывает только часть обмоток, так что электрический ток может подаваться к одному концу катушки 201 и, тем самым, циркулирует по обмоткам.

Поскольку каждый из кольцевых проводников 300А, 300В обеспечивает электрический контакт с разными концами ВТСП-ленты 100, они могут быть использованы в паре для возбуждения электрического тока радиально изнутри наружу катушки 301 (или наоборот). Например, катушка 201 может быть предусмотрена (помещена) между парой кольцевых проводников 304А, 304В так, что ток может подаваться к одной лицевой стороне (грани) катушки 301 (например, верхней) одним кольцевым проводником 304А, проходить через обмотки катушки 301 для того, чтобы создавать магнитное поле, и затем приниматься с другой лицевой стороны (грани) катушки другим кольцевым проводником 304В.

Радиальные ширины кольцевых проводников 304А, 304В выбираются так, чтобы обеспечить компромисс сопротивления стыка с числом витков между стыками.

Сопротивление стыка может быть уменьшено путем выполнения кольцевого проводника 304A, 304B более широким, чтобы покрывать больше витков катушки 301. Однако, в результате, создаваемое магнитом на единицу тока магнитное поле уменьшается, поскольку уменьшается число витков, несущих полный ток магнита. Если радиальная ширина уменьшается, то справедливо обратное.

Поскольку кольцевые стыки могут противолежать на расстоянии порядка длины окружности катушки, стыки с низким сопротивлением типично могут быть выполнены с радиально узкими кольцевыми проводниками 304A, 304B, которые значительно не уменьшают создаваемое магнитом поле. Хотя кольцевые проводники 304A, 304B на фигурах 3A и 3B показаны немного выходящими за внешние/внутренние кромки катушки 301, форма кольцевых проводников может, альтернативно, быть более точно совпадающей с радиальным профилем катушки 301, чтобы минимизировать радиальный «отпечаток» катушки 301 и кольцевого стыка 300A, 300B.

Хотя на фигурах 3A и 3B используются круглые дисковые («галетные») катушки, чтобы проиллюстрировать признаки кольцевых стыков 300A, 300B, будет легко понятно, что стыки этих типов могут быть применены к катушкам других форм, таких как «D»-образные катушки тороидального поля, такие как используемые в токамаке. В таких случаях кольцевые стыки 300A, 300B не должны быть круглыми и могут быть выполнены с такой формой, чтобы следовать траектории обмоток катушки. Аналогично, не является необходимым, чтобы «кольцевые» проводники 304A, 304B проходили полностью по всей траектории обмоток катушки, и, вместо этого, они могут проходить только частично по траектории (пути) обмоток катушки. Например, у магнитов большого радиуса и/или содержащих толстую ВТСП-ленту может оказаться возможным сформировать стык с низким сопротивлением, используя кольцевой проводник, который проходит только на 20%, 50% или 80% пути по траектории обмоток, т.е. так, что кольцевой проводник проходит угол менее 360 градусов. Введение подобного «разрыва» в кольцевой проводник (из-за его непрохождения полностью по траектории обмоток) может предпочтительно исключить образование контуров паразитных токов в кольцевом проводнике, что может быть полезным в таких прикладных задачах, как ядерный магнитный резонанс (ЯМР) или магнитно-резонансная томография (МРТ). В других приложениях, таких как токамак (см. ниже), например, геометрические ограничения и/или присутствие других компонентов могут делать необходимым такой разрыв.

Кольцевые стыки могут быть предусмотрены как часть более крупной конструкции, которая может быть названа проводящей пластиной или пластиной электротермического интерфейса (ETI). Такие ETI-пластины, в целом, являются

составными пластинами металл/изолятор/датчик, которые, как обсуждается ниже, могут быть прикреплены к кромочным граням ВТСП-катушек для выполнения ряда функций:

• средство создания электрических стыков с и/или между ВТСП-катушками;

• средство введения управляемого резистора параллельно с ВТСП-катушкой, чтобы добиться «частичной изоляции». Геометрическая форма резистора может быть выбрана так, чтобы регулировать динамическое электротермическое поведение катушки;

• средство формирования термического интерфейса с ВТСП-катушкой для охлаждения;

• средство введения тонкой электрической изоляции между ВТСП-катушками и механической защиты такой изоляции от повреждения;

• средство включения вспомогательных элементов (таких как датчики или нагреватели) в состав ВТСП-магнита без нарушения ВТСП-обмоток.

Фигура 4 показывает сечение примерного магнита 400, содержащего две ETI-пластины 400A, 400B, приложенные к одной дисковой катушке 401. В этом примере катушка 401 содержит два отрезка ВТСП-ленты 100, намотанных вместе вокруг оси 303 магнита. Ленты 100 заключены в оболочку из меди 101 как «пара типа 0» (как описано, например, в WO2018/078326), так что каждая обмотка включает в себя две ленты. Между обмотками ВТСП-лент 100 предусмотрен изолятор 402, чтобы предотвратить протекание электрического тока между лицевыми сторонами ВТСП-ленты, т.е. так, чтобы электрический ток, вводимый в один конец, был вынужден протекать по обмоткам катушки 401. Каждая из ETI-пластин 400A, 400B содержит соответствующий кольцевой проводник 404A, 404B, образующий кольцевой стык с тем или иным концом ВТСП-лент 100. В этом примере электрический ток подается в катушку 401 через радиально самый внутренний конец ВТСП-лент 100 с использованием нижней ETI-пластины 400B. Ток течет по последовательным обмоткам катушки 301 прежде, чем принимается верхней ETI-пластиной 400A через кольцевой проводник 404A на радиально самом внешнем конце ВТСП-лент 100.

Хотя ETI-пластины 400A, 400B находятся в электрическом контакте с катушкой 401 только через кольцевые проводники 404A, 404B, сами пластины проходят радиально по катушке, образуя слой 405A, 405B «основного проводника», через который подается ток к кольцевым стыкам (или принимается ток от них) и обеспечивается путь отведения тепла от катушки 301. В этом примере основные проводники 405A, 405B выполнены из меди, хотя могут быть также использованы и другие проводящие материалы (например, металлы). Кольцевые проводники 404A, 404B могут быть выполнены заодно с основными проводниками 405A, 405B или прикреплены к ним, например, пайкой.

При выполнении кольцевых проводников 404A, 404B на ETI-пластинах 400A, 400B (или заодно с ними) они могут быть сделаны очень узкими по своему радиальному размеру (субмиллиметровыми, при необходимости), но при этом все еще легкими в обращении, таким образом, которого было бы трудно добиться, если бы кольцевой проводник был самостоятельным элементом. Большая площадь поверхности, обеспечиваемая основными проводниками 405A, 405B, позволяет эффективно отводить тепло от катушки 401 и обеспечивает большую гибкость в том, где могут быть размещены электрические соединения с магнитом.

Основной проводник 405A, 405B в ETI-пластинах 400A, 400B может быть выполнен тонким для того, чтобы минимизировать повышение температуры на нем и гарантировать, что катушки не разнесены слишком далеко друг от друга в осевом направлении, чтобы избежать ослабления напряженности магнитного поля. Альтернативно, тепло может также извлекаться радиально в охлаждающую шину на внешнем или внутреннем диаметре катушки 401, и в таком случае основной проводник 405A, 405B должен быть выполнен достаточно толстым, чтобы удовлетворять требованиям по температуре. ETI-пластины 400A, 400B могут также быть сконструированы с возможностью обеспечивать более эффективное охлаждение одной или более из граней катушки 401 (т.е. не полагаясь на теплопроводность к радиальным краям катушки). Например, ETI-пластины 400A, 400B могут включать в себя каналы или трубки, через которые должен протекать газообразный или жидкий хладагент для того, чтобы уносить тепло от катушки 401. Предпочтительно, каналы или трубки могут быть предусмотрены на или в одном или более основных проводниках 405A, 405B.

Использование ETI-пластин 400A, 400B для охлаждения обеспечивает подход, альтернативный таким методам, как использование теплопроводных паст, которые имеют худшую теплопроводность по сравнению с припоем и могут быть труднонаносимыми надлежащим образом тонкими слоями и усложняют процесс производства.

ETI-пластина 400A, 400B также включает в себя диэлектрический слой 406A, 406B, чтобы электрически изолировать кромки ВТСП-ленты 100 от участков основного проводника 405A, 405B пластин. Диэлектрические слои 406A, 406B выполнены из диэлектрического материала, например, композита стекловолокна/смолы, такого как «препрег».

ETI-пластины 400A, 400B дополнительно включают в себя промежуточный проводящий слой 407A, 407B, который может быть припаян к катушке 401 для обеспечения превосходного термического и электрического контакта. Этот слой действует как радиальный резистор для управления термическим и электрическим поведением

катушки 401. Такая «частичная изоляция», т.е. введение управляемого «межвиткового» резистора, обеспечивает желаемый баланс между термостойкостью и временем нарастания характеристики катушки в ВТСП-катушках. Промежуточный проводящий слой выполнен из проводящего материала, предпочтительно латуни или нержавеющей стали, поскольку этот материал может быть припаян и имеет намного большее удельное электрическое сопротивление, чем медь, что позволяет ему быть более толстым, а значит, иметь легче регулируемую толщину. Такая «частичная изоляция» (от англ. “Partial Insulation”, PI), т.е. введение управляемого «межвиткового» резистора, обеспечивает желаемый баланс между термостойкостью и временем нарастания характеристики катушки в ВТСП-катушках. В частности, использование слоя, проходящего по обмоткам катушки, может устранить необходимость в других видах частичной изоляции, таких как «вмотанные» слои металлов, таких как нержавеющая сталь.

В некоторых случаях промежуточный проводящий слой 407A, 407B может быть скреплен с диэлектрическим слоем 406A, 406B с помощью клея. Однако клей должен обладать способностью выдерживать температуры пайки, не становясь структурно ослабленным, поскольку в противном случае существует тенденция к отслаиванию этих слоев во время пайки. Одним из способов решения этой проблемы является использование композита из стекловолокна/смолы, такого как «препрег», в качестве как диэлектрика, так и связующей среды. Например, может быть использован такой композит, как "Prepreg MTC400", производимый компанией "SHD Composites". Выполняя относительно длительный процесс отверждения, можно повысить температуру стеклования (T_g) композита выше типичной температуры пайки катушки. Например, композит можно «пост-отверждать» (т.е. подвергать последующему отверждению) посредством нагрева со скоростью около 0,3°C/мин до 180°C, выдержки в течение 2 часов и затем охлаждения со скоростью около 0,3°C/мин. Эта процедура может, например, достигать T_g, равной 200°C, что позволяет композиту выдерживать большинство процессов низкотемпературной пайки, которые происходят при более низких температурах. Однако может оказаться невозможным выполнять такую обработку отверждением с ETI-пластиной на месте (in-situ) на катушке, поскольку повышенные температуры и времена привели бы к повреждению катушки (вследствие непрерывной деградации ВТСП-лент, которая происходит в зависимости от температуры и времени) и возможному повреждению или ухудшению любых паяных соединений, которые уже были выполнены.

Хотя могут также быть использованы неизолированные катушки, введение изолятора 402 увеличивает эффективность «межвиткового» сопротивления за счет

блокирования альтернативного пути с низким сопротивлением между обмотками через медную оболочку ВТСП-лент 100.

Толщина ETI-пластин 400A, 400B (т.е. полная толщина, включая кольцевой проводник) типично составляет в диапазоне 0,25-1,00 мм, при этом толщина диэлектрического слоя (при его наличии) типично составляет в диапазоне 10-100 мкм, и толщина промежуточного проводника (при его наличии) типично составляет в диапазоне 10-100 мкм.

Припоем, используемым для скрепления промежуточного слоя 407A, 407B с обмотками катушки 401, типично является оловянно-свинцовый (PbSn). Однако этот материал настолько проводящий, что даже тонкое покрытие из PbSn на промежуточном слое 407A, 407B обеспечит путь тока с очень низким сопротивлением, что вынудит электрический ток обходить промежуточный слой 407A, 407B. Чтобы исключить эту проблему, в качестве материала припоя выбирается материал с высоким удельным сопротивлением, предпочтительно такой, который имеет более высокое удельное сопротивление по сравнению с PbSn, например, припой, удельное сопротивление которого более чем в 10 раз больше удельного сопротивления PbSn, когда катушка используется в магните, например, при более низкой температуре, чем критическая температура ReBCO-ленты. Например, припой может быть выполнен из PbBi, поскольку этот материал имеет удельное сопротивление, которое примерно в 50 раз больше, чем у PbSn. Аналогично, может также быть использован PbBiSn. Более высокое сопротивление покрытия из свинцово-висмутового (PbBi) или оловянно-свинцово-висмутового (PbBiSn) припоя (по сравнению с покрытием из PbSn припоя) означает, что больше тока протекает в промежуточном слое 407A, 407B.

Частично изолирующие ETI-пластины предлагают преимущество, заключающееся в высокой гибкости. Межвитковое сопротивление можно регулировать, изменяя толщину и состав промежуточного проводника. Геометрия слоя промежуточного проводника может быть модифицирована с использованием литографии, например, травлением фрагментированных паутинообразных рисунков, чтобы пресечь радиальные токи на большие расстояния или индуктивные спирали, обеспечивающие импеданс, то и другое из которых может позволить получить баланс между временами зарядки и термоэлектрической устойчивостью.

Тонкая электрическая изоляция между дисковыми катушками желательна для обеспечения необходимых диэлектрических свойств без привнесения слишком большого роста температуры, вызванного протекающим через нее теплом. Однако, поскольку многие обычные диэлектрические материалы (такие как полиимидные листы) являются

мягкими, они уязвимы к проколу под действием электромагнитных напряжений, встречающихся во время эксплуатации и сборки магнита. За счет встраивания изоляции внутрь ETI-пластины, с металлическими листами, защищающими изоляцию с обеих сторон, риск прокола минимален.

Поскольку ETI-пластина является отдельным объектом по отношению к катушке, она может быть заменена для того, чтобы изменить поведение катушки. Например, можно первоначально прикрепить ETI-пластины с толстым промежуточным проводником для безопасной работы катушки и определения ее критического тока. После того как максимальный рабочий ток определен, ETI-пластина может быть заменена на пластину, которая дает возможность более быстро менять характеристику магнита в пределах известного диапазона характеристик магнита.

Фигура 5 показывает сечение магнита 500, содержащего два уложенных стопкой в осевом направлении магнита 400, каждый из которых содержит дисковую катушку 401A, 401B. Термические и электрические стыки между катушками 401A, 401B могут быть выполнены посредством соединения основных медных слоев соседних ETI-пластин 402A, 402B вместе после укладки стопкой. Это может быть выполнено либо посредством осевого прижатия (т.е. по оси 503 магнита) и необязательного добавления податливого проводящего слоя 504, такого как слой индия, между магнитами 400, или посредством пайки (хотя это требует нагрева всего магнита). Также может быть использован метод "NanoBond"®, в котором вставляют многослойную фольгу между ETI-пластинами 402A, 402B и инициируют химическую реакцию в фольге с выделением тепла, чтобы припаять фольгу к каждой из пластин.

Для того, чтобы термические и/или электрические стыки между соседними ETI-пластинами 402A, 402B были эффективными, предпочтительно, чтобы состояние поверхности пластин было хорошим, например, чистым от оксидов. Одним способом, которым этого можно добиться, является снабжение основного(ых) медного(ых) слоя(ев) ETI-пластин 402A, 402B слоем (например, покрытием) из благородного металла, такого как серебро. Слой серебра является предпочтительным, поскольку серебро имеет низкое сродство к кислороду, а также химически совместимо с индием, что обеспечивает возможность создания высококачественных прессованных стыков с использованием податливого слоя 504 индия.

Дополнительные пластины 505A, 505B, такие как медные пластины, могут быть предусмотрены по оси на том и другом конце магнита 500 для того, чтобы обеспечить дополнительное охлаждение или обеспечить электрические соединения с магнитом 500.

К пластинам 505A, 505B подключается источник питания (не показан) для подачи

электрического тока в магнит 500. В этом примере кольцевые стыки с каждой из лицевых сторон (граней) магнита расположены на радиально внешних кромках катушек, в то время кольцевые стыки, соединяющие две катушки, расположены на радиально внутренних кромках катушек. Поэтому электрический ток течет радиально внутрь по обмоткам одной из катушек, затем аксиально между катушками и затем радиально наружу по обмоткам другой катушки. Поскольку ток протекает в противоположных направлениях через каждую катушку, катушки 401A, 401B намотаны в противоположных направлениях (т.е. по часовой стрелке/против часовой стрелки), так что магнитное поле, создаваемое каждым из магнитов 400, имеет одинаковую полярность, тем самым позволяя генерировать очень большие магнитные поля. Например, катушки 401A и 401B могут быть приготовлены идентично (т.е. намотаны в одинаковом направлении), а затем одну из катушек «переворачивают» относительно другой перед укладкой стопкой с образованием магнита 500. Будет понятно, что таким же образом могут быть уложены стопкой и другие дисковые катушки с дополнительными ETI-пластинами между ними.

Как обсуждалось выше, ETI-пластины могут включать в себя каналы или трубки, по которым будет протекать газ или жидкость для того, чтобы переносить тепло от катушки(ек). Такой вариант исполнения является особенно эффективным для охлаждения уложенных стопкой в осевом направлении магнитов 400, таких как показанные на фигуре 5. В частности, наличие охлаждающих каналов или трубок в ETI-пластинах 402A, 402B, расположенных в промежутке между катушками, обеспечивает более эффективный перенос тепла от "тела" катушек 401A, 401B.

Кольцевые проводники в ETI-пластинах могут также быть использованы для создания электрических стыков между вложенными/концентрическими дисковыми катушками, т.е. стыков, которые несут ток в радиальном направлении, а не в осевом направлении, как описано выше. Например, дисковая катушка может быть укрупнена посредством намотки вокруг нее второго отрезка ВТСП-ленты, и в таком случае может быть выполнен электрический стык между концами двух ВТСП-лент с использованием кольцевого проводника, предпочтительно в ETI-пластине, т.е. кольцевой проводник используется для обеспечения стыка через несплошность или разрыв в обмотках. Примером того, где это может быть полезно, является снижение механических напряжений в глубоких катушках (таких, у которых внешний радиус, деленный на внутренний радиус, является большим, например, больше ~3). В такой ситуации полезно подразделить катушку на множественные вложенные катушки и пресечь силы, создаваемые каждой из них, предотвращая накопление механического напряжения в обмотках. В таком случае может быть выполнен радиальный стык между вложенными

катушками с помощью подходящего кольцевого проводника в ETI-пластине.

Фигура 6 показывает радиальное сечение ВТСП-магнита 600 с двумя кольцевыми проводниками 604A, 604B, обеспечивающими радиальные стыки между внутренней катушкой 601 и внешней катушкой 602. Между внутренней и внешней катушками 601, 602 предусмотрена механическая опора 607, такая как цилиндр, чтобы пресечь (перехватить) радиальные силы между ними.

Фигура 7 показывает радиальное сечение ВТСП-магнита 600, который способен создавать очень сильные магнитные поля компактным, надежным и простым образом.

ВТСП-магнит 700 содержит радиально вложенные стопки 701, 702, 703 описанных выше ВТСП-магнитов 400. Например, радиально самая внешняя стопка содержит ВТСП-магниты 400A-F, расположенные в осевом направлении, при этом соседние магниты электрически соединены через их соответствующие ETI-пластины. Кольцевые стыки, образованные ETI-пластинами, расположены так, что течение тока чередуется между осевым потоком (межу соседними катушками) и радиальным потоком (по обмоткам каждой катушки), как указано стрелками, наложенными на ВТСП-магниты 400A-F на фигуре 6. Что касается ВТСП-магнита 400, описанного со ссылкой на фигуру 4, то катушки соседних магнитов намотаны в противоположных направлениях, так что магнитное поле по оси 704 магнита максимизируется. Другие две вложенные стопки 702, 703 магнитов имеют аналогичную конфигурацию для того, чтобы усилить магнитное поле, создаваемое внешней стопкой 701. Между конечными ETI-пластинами соседних стопок образованы радиальные стыки/соединения 705, 706, чтобы позволить электрическому току вытекать из одной стопки, втекая в следующую. В примере, показанном на фигуре 6, ток подается в магнит 700 через верхнюю ETI-пластину самого верхнего ВТСП-магнита 400A внешней стопки 701. После протекания через стопку 701, как описано выше, ток затем течет радиально через стык 705 во внешнюю вложенную стопку 702. Аналогично, после протекания через эту стопку 702, ток затем течет радиально во внутреннюю вложенную стопку 703 через стык 706. Наконец, после протекания через внутреннюю вложенную стопку 703 ток выходит из магнита 700 через нижнюю ETI-пластину самого нижнего ВТСП-магнита внутренней вложенной стопки 703.

Хотя в примерном магните 700, показанном на фигуре 7, существуют три стопки 701, 702, 703, каждая с 6 ВТСП-катушками, конечно же, может использоваться любое число стопок и/или катушек. Стопки могут также иметь различные количества катушек, чтобы обеспечивать большую гибкость при конструировании магнита.

Составление ВТСП-магнита 700 из многих более мелких ВТСП-магнитов («подразделение катушки») обеспечивает ряд преимуществ. В частности, как описано

ниже, подразделение катушки позволяет преодолеть проблемы с ограничениями механического напряжения ВТСП-лент и обеспечивает более оптимальную конструкцию магнита за счет «градации» подразделенных катушек в соответствии с их местоположением в магните 700.

Учитывая ограничения механического напряжения ВТСП-лент, максимально допустимая прочность на поперечное растяжение ВТСП-лент 100 типично составляет около 10-50 МПа, что предоставляет практический предел по радиальной глубине обмоток, которые могут быть использованы. Однако этой проблемы можно избежать подразделением катушки, разделив катушку на несколько радиально вложенных катушек, как показано на фигуре 7, и вставив между катушками механические опоры 707, 708. Аналогично, осевые силы могут быть пресечены посредством подразделения вдоль оси магнита и вставки осевых опорных конструкций (не показаны).

С учетом «градации» подразделенных катушек, в сильнопольных магнитах, вектор магнитного поля может значительно изменяться в зависимости от радиального и/или осевого местоположения внутри магнита. Для ВТСП-магнитов это означает, что параметры, характеризующие работу магнита как сверхпроводника, такие как критический ток, тоже зависят от местоположения. Поэтому более оптимальная конструкция магнита 700 может быть получена посредством «градации» ВТСП-ленты 100 согласно тому, где она находится в магните. Например, для достижения наивысшего возможного магнитного поля и для управления нарушением сверхпроводимости, желательно максимизировать отношение (гамма) тока к критическому току (I/I_c) повсюду в магните. «Градацию» можно выполнить, варьируя число ВТСП-лент на виток/обмотку, ширину или толщину ленты, или тип ленты (т.е. производитель или используемые ВТСП-материалы).

Частым является случай, когда датчики (такие как датчики температуры или деформации) должны быть встроены в ВТСП-магниты в целях мониторинга. Также могут потребоваться другие элементы, такие как нагреватели, в целях защиты от нарушения сверхпроводимости. Желательно, чтобы ВТСП-катушка и вспомогательные элементы были отдельными объектами, так чтобы их можно было изготовить отдельно и заменять независимо в случае выхода из строя. Подходящим образом приспособленная ETI-пластина может быть выполнена с возможностью размещения в ней многих датчиков или других элементов, которые не нужно встраивать непосредственно в обмотки ВТСП-катушки.

Фигура 8 показывает сечение ВТСП-магнита 800, который аналогичен ВТСП-магниту 500, показанному на фигуре 5, за исключением того, что каждая из соседних ETI-

пластин 801A, 801B содержит внутренний кольцевой проводник 804A, 804B и внешний кольцевой проводник 805A, 805B.

Как показано на фигуре 9, включение двух кольцевых проводников на каждой пластине обеспечивает два альтернативных пути 908, 909 для протекания тока через магнит 800, когда источник 907 питания подключен к паре катушек. Один путь 908 является таким же, что и путь, описанный со ссылкой на фигуру 4, т.е. ток течет по обмоткам каждой катушки 400 по очереди, через внутренние кольцевые проводники 805A, 805B. Другой путь 909 «закорачивает» или обходит путь 908, обеспечивая электрическое соединение между внешними обмотками катушек 400. В этом случае ток течет в одну из катушек 400 через ее внешнюю(ие) обмотку(и) и из катушки через внешний кольцевой проводник 804B вместо прохождения по другим обмоткам катушки. Аналогично, ток проходит во внешние обмотки другой катушки через внешний кольцевой проводник 804A, между их осевыми кромками и из катушки, без прохождения по другим обмоткам другой катушки.

Доля тока, протекающего по каждому пути 908, 909, определяется относительными электрическими сопротивлениями путей, которыми можно управлять, изменяя электрические сопротивления внешних и внутренних кольцевых проводников 804A, 804B, 805A, 805B и/или электрические сопротивления, связанные с электрическими контактами кольцевых проводников с обмотками катушек 400. Более длинный, обходной путь 908 можно сделать предпочтительнее более короткого, более прямого пути 909, так что большая часть тока течет радиально внутрь и из катушек 400, сделав электрическое сопротивление прямого пути 909 намного большим, чем у обходного пути 908. Этого достигают, например, делая площади внешних кольцевых проводников 804A, 804B меньшими, чем площади внутренних кольцевых проводников 805A, 805B. Хотя небольшая величина тока утечки проходит по пути 909 и не вносит вклад в магнитное поле, создаваемое за счет протекания тока по обмоткам катушек 400, катушки 400 могут быть заряжены до полного критического тока на внутренних обмотках, а дополнительный ток утечки может переноситься внешними обмотками, поскольку они имеют более высокий критический ток в этой области более низкого магнитного поля. После того как магнит 800 зарядился, источник 907 питания может быть отключен, так что ток течет по катушкам 400 в замкнутом контуре.

Фигура 10 показывает путь 1010 «захваченного» тока, протекающего внутри магнита 800 после отключения источника 907 питания. В этом случае ток течет по замкнутому контуру, проходящему через обмотки катушек 400 и через каждый из кольцевых проводников 805B, 805A, 804A, 804B по очереди. Поскольку катушки 400

являются сверхпроводящими, ток способен протекать по пути 1010 в течение длительных периодов до затухания, т.е. циркулирующий ток и создаваемое им магнитное поле являются «полунезатухающими».

Постоянная времени, связанная с затуханием циркулирующего тока, определяется отношением (L/R) магнитной самоиндукции катушки (L) к ее электрическому сопротивлению (R). Рассмотрим, например, магнит, который имеет катушки с внутренним диаметром 50 мм и внешним диаметром 98 мм, самоиндукцией ~2 мГн и электрическими стыками типичного сопротивления ~1-5 нОм в жидком азоте (т.е. расчетное суммарное сопротивление внутренних и внешних электрических стыков ~10 нОм). Постоянная времени L/R этого магнита будет приблизительно равна 200000 секунд, т.е. 2,3 дня.

Большая постоянная времени также связана с большим временем «зарядки», т.е. временем до установления устойчивого состояния распределения тока между путями 908, 909, когда источник питания подключен. Чтобы минимизировать время зарядки, полезно увеличить сопротивление пути 908 во время зарядки (т.е. в конфигурации, показанной на фигуре 9). Это может быть достигнуто с помощью переменного резистора или переключателя, встроенного во внешнее электрическое соединение, обеспечиваемое внешними кольцевыми проводниками 804A, 804B. Например, между внешними кольцевыми проводниками 804A, 804B может быть предусмотрен ВТСП-переключатель, содержащий ВТСП-материал. Во время зарядки этот переключатель является «выключенным» (находится в несверхпроводящем состоянии), обеспечивая большое сопротивление и, следовательно, быстрый заряд. Это достигается, например, посредством нагрева ВТСП-материала выше его критической температуры. Затем переключатель «включается» (например, больше не нагревается или, скорее, охлаждается), чтобы замкнуть путь 1010 тока, а источник питания отсоединяется.

Одним важным применением ВТСП-магнитов, таких как описанные выше, является применение в разновидности термоядерного реактора, известной как токамак. Токамак сочетает в себе сильное тороидальное магнитное поле, высокий ток плазмы и, обычно, большой объем плазмы и значительный вспомогательный нагрев для получения горячей стабильной плазмы. Это позволяет токамакам создавать такие условия, при которых может происходить слияние ядер. Вспомогательный нагрев (например, посредством инжекции пучка в десятки мегаватт нейтральных частиц высокоэнергетического водорода, дейтерия или трития) необходим для увеличения температуры до достаточно высоких значений, требуемых для возникновения ядерного синтеза и/или для поддержания тока плазмы.

Магнитные катушки на токамаке могут быть разделены на две группы. Катушки

полоидального поля представляют собой горизонтальные круглые катушки, намотанные с их центром, лежащим на центральной колонне токамака, и создают полоидальное поле (т.е. поле, которое практически параллельно центральной колонне). Катушки тороидального поля намотаны вертикально через центральную колонну и вокруг внешней части плазменной камеры (так называемые «обводы» или «обратные ветви»), чтобы создавать тороидальное поле (т.е. поле, которое является круглым вокруг центральной колонны). Сочетание полоидального и тороидального полей создает спиральное поле внутри плазменной камеры, которое удерживает плазму в ограниченном пространстве.

Токи, требуемые для создания тороидального поля, очень велики. Поэтому конструкции токамаков все чаще подразумевают использование сверхпроводящих материалов в катушках возбуждения поля. У компактного сферического токамака диаметр центральной колонны должен быть как можно меньшим. Это предъявляет противоречивые требования, поскольку плотность тока, которая может быть достигнута даже со сверхпроводящими материалами, ограничена.

Описанные здесь ВТСП-магниты особенно подходят для применения в токамаках, в частности, сферических токамаках, например, для создания одного из полоидального или тороидального полей (или обоих).

Хотя выше были описаны различные варианты осуществления настоящего изобретения, следует понимать, что они были представлены в качестве примера, а не ограничения. Специалистам в данной(ых) области(ях) техники будет очевидно, что могут вноситься различные изменения по форме и деталям без отступления от сущности и объема изобретения. Например, хотя катушки выше были описаны как имеющие ВТСП-ленты 100, расположенные в конфигурации «типа 0», могут быть также использованы и другие конфигурации, например, «типа 1» и «типа 2» (как описано, например, в WO2018/078326). Аналогично, хотя в описанных выше примерах катушки обычно подключают к источнику питания последовательно, также возможно подключать катушки к источнику питания параллельно. Таким образом, настоящее изобретение не должно ограничиваться какими-либо из вышеописанных примерных вариантов осуществления, а должно определяться только в соответствии с последующей формулой изобретения и ее эквивалентами.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Магнит с высокотемпературным сверхпроводником, ВТСП, содержащий:

катушку, образованную вложенными концентрическими обмотками, причем каждая обмотка содержит ВТСП-материал; и

проводящий элемент, содержащий поверхность электрического контакта, через которую подается электрический ток к участку по меньшей мере одной из обмоток, причем эта поверхность обеспечивает электрический контакт между проводящим элементом и осевой кромкой катушки практически по пути по меньшей мере одной из обмоток.

2. ВТСП-магнит по п. 1, при этом каждая обмотка содержит ВТСП-ленту и оболочку, электрически соединенную с ВТСП-лентой, а электрический контакт обеспечивается с оболочкой.

3. ВТСП-магнит по п. 1 или 2, при этом поверхность электрического контакта обеспечивает электрический контакт с осевой кромкой катушки по более чем 20%, более чем 50% или более чем 80% пути по меньшей мере одной из обмоток.

4. ВТСП-магнит по любому из предшествующих пунктов, при этом поверхность электрического контакта является кольцеобразной.

5. ВТСП-магнит по любому из предшествующих пунктов, содержащий пластину, проходящую по одной или более из других обмоток, причем проводящий элемент выполнен заодно с пластиной или предусмотрен на ней.

6. ВТСП-магнит по п. 5, при этом проводящий элемент выступает из лицевой стороны пластины, а пластина дополнительно содержит диэлектрический или электрорезистивный слой для электрической изоляции лицевой стороны пластины от участка одной или более из других обмоток.

7. ВТСП-магнит по п. 6, содержащий промежуточный проводящий слой, проходящий по одной или более другим обмоткам, для передачи тепла и/или электрического тока от кромки обмоток.

8. ВТСП-магнит по п. 7, при этом промежуточный проводящий слой содержит паяемый металл, такой как латунь и/или нержавеющая сталь.

9. ВТСП-магнит по п. 7 или 8, при этом промежуточный проводящий слой снабжен рисунком посредством изменения его толщины.

10. ВТСП-магнит по любому из пп. 7-9, при этом катушка содержит электрическую изоляцию между обмотками.

11. ВТСП-магнит по любому из пп. 5-10, содержащий один или более датчиков и/или один или более нагревателей, расположенных между пластиной и катушкой.

12. ВТСП-магнит по любому из предшествующих пунктов, при этом поверхность электрического контакта обеспечивает электрический контакт либо с самой внутренней, либо с самой внешней обмоткой катушки.

13. ВТСП-магнит по любому из предшествующих пунктов, при этом поверхность электрического контакта обеспечивает электрический контакт через несплошность в обмотках.

14. ВТСП-магнит по любому из предшествующих пунктов, дополнительно содержащий другой проводящий элемент, содержащий поверхность электрического контакта для приема электрического тока от участка другой по меньшей мере одной из обмоток, причем эта поверхность обеспечивает электрический контакт с упомянутой или другой осевой кромкой катушки практически по пути упомянутой другой по меньшей мере одной из обмоток.

15. ВТСП-магнит по п. 14, при этом поверхности электрического контакта обеспечивают электрический контакт с противоположными лицевыми сторонами катушки.

16. ВТСП-магнит по п. 15, дополнительно содержащий одну или более дополнительных катушек, причем упомянутая или каждая дополнительная катушка имеет проводящие элементы для обеспечения электрического контакта с противоположными лицевыми сторонами этой катушки, причем катушки уложены стопкой в осевом направлении и электрически соединены друг с другом через их соответствующие проводящие элементы.

17. ВТСП-магнит по п. 16, при этом соседние уложенные стопкой в осевом направлении катушки намотаны в противоположных направлениях.

18. ВТСП-магнит по любому из предшествующих пунктов, содержащий две или более концентрически вложенных катушки, каждая из которых имеет соответствующие проводящие элементы, причем каждая катушка электрически соединена с соседней катушкой электрическим соединением между соответствующими проводящими элементами катушек.

19. ВТСП-магнит по п. 18, при этом электрическое соединение является гибким.

20. ВТСП-магнит по п. 18 или 19, содержащий одну или более промежуточных опор, расположенных между соседними катушками, для пресечения радиальных сил.

21. ВТСП-магнит по любому из пп. 18-20, при этом соответствующие ВТСП-ленты соседних катушек отличаются по одному или более из: толщины; состава; ширины; и числа.

22. Магнит с высокотемпературным сверхпроводником, ВТСП, содержащий:

первую и вторую катушки, причем каждая катушка образована вложенными концентрическими обмотками, причем каждая обмотка содержит ВТСП-материал; и

первый и второй проводящие элементы, причем каждый проводящий элемент обеспечивает электрическое соединение между катушками и содержит:

первую поверхность электрического контакта, через которую передается электрический ток к или от участка по меньшей мере одной из обмоток первой катушки; и

вторую поверхность электрического контакта, через которую передается электрический ток к или от участка по меньшей мере одной из обмоток второй катушки,

при этом каждая поверхность обеспечивает электрический контакт между соответствующим проводящим элементом и осевой кромкой соответствующей катушки практически по пути упомянутой по меньшей мере одной из обмоток.

23. ВТСП-магнит по п. 22, при этом электрическое сопротивление электрического соединения, обеспечиваемого первым проводящим элементом, деленное на электрическое сопротивление электрического соединения, обеспечиваемого вторым проводящим элементом, составляет более 1,5, более 3 или более 10.

24. ВТСП-магнит по п. 23, при этом площади поверхностей электрического контакта второго проводящего элемента больше площадей поверхностей электрического контакта первого проводящего элемента.

25. ВТСП-магнит по п. 22, 23 или 24, при этом первая и вторая катушки уложены стопкой в осевом направлении с расположенными между катушками первым и вторым проводящими элементами.

26. ВТСП-магнит по п. 25, при этом первый проводящий элемент расположен радиально снаружи от второго проводящего элемента.

27. ВТСП-магнит по любому из пп. 22-26, при этом первый или второй проводящий элемент содержат переменный резистор или переключатель.

28. ВТСП-магнит по п. 27, при этом переменный резистор или переключатель содержит ВТСП-материал.

29. ВТСП-магнит по любому из пп. 22-28, дополнительно включающий признаки любого из пп. 2-21.

30. Токамак, содержащий ВТСП-магнит по любому из предшествующих пунктов, при этом ВТСП-магнит выполнен с возможностью обеспечивать тороидальное магнитное поле или полоидальное магнитное поле.

31. Способ создания полунезатухающего тока в магните с высокотемпературным

сверхпроводником, ВТСП, по любому из пп. 22-29, содержащий:

подготовку каждой из катушек в сверхпроводящем состоянии;

подключение источника питания параллельно катушкам; и

отключение источника питания.

32. Способ по п. 31, при этом второй проводящий элемент содержит ВТСП-материал, а способ содержит:

после подключения источника питания параллельно катушкам, переведение ВТСП-материала из нормального состояния в сверхпроводящее состояние.

33. Способ выполнения электрического соединения с магнитом с высокотемпературным сверхпроводником, ВТСП, содержащим катушку, образованную вложенными концентрическими обмотками, причем каждая обмотка содержит ВТСП-материал, а способ содержит:

нанесение диэлектрического или электрорезистивного слоя для частичного покрытия лицевой стороны катушки;

прикладывание проводящей пластины к диэлектрическому или электрорезистивному слою; и

формирование электрического контакта между проводящей пластиной и осевой кромкой катушки практически по пути по меньшей мере одной из обмоток.

34. Способ по п. 33, содержащий

нанесение промежуточного проводящего слоя между диэлектрическим или электрорезистивным слоем и катушкой, причем промежуточный проводящий слой проходит по одной или более из других обмоток для передачи тепла или электрического тока от кромки упомянутой или каждой обмотки.

35. Проводящая пластина для подачи тока к осевой кромке катушки, образованной вложенными концентрическими обмотками, содержащая:

кольцеобразный проводящий элемент, выполненный заодно с пластиной или предусмотренный на ней, причем проводящий элемент содержит поверхность электрического контакта для обеспечения электрического контакта между проводящим элементом и катушкой; и

диэлектрический или электрорезистивный слой на проводящей пластине для обеспечения электроизолирующего барьера смежно с поверхностью электрического контакта.

36. Проводящая пластина по п. 35, дополнительно содержащая промежуточный проводящий слой, проходящий частично или полностью по диэлектрическому или электрорезистивному слою, причем промежуточный проводящий слой выполнен с

возможностью передачи тепла или электрического тока от кромки упомянутой или каждой обмотки.

37. Проводящая пластина по п. 35 или 36, при этом диэлектрический или электрорезистивный слой образован из композита волокон и смолы, такого как препрег.

38. Проводящая пластина по п. 37, при этом композит имеет температуру стеклования более 150°C, предпочтительно более 180°C, или, предпочтительнее, более 200°C.

39. Проводящая пластина по любому из пп. 35-38, содержащая слой серебра на проводящей пластине, причем слой серебра и диэлектрический или электрорезистивный слой находятся на противоположных лицевых сторонах проводящей пластины.

40. Проводящая пластина по любому из пп. 35-39, при этом проводящая пластина содержит медь.

41. Магнит с высокотемпературным сверхпроводником, ВТСП, содержащий:

катушку, образованную вложенными концентрическими обмотками, причем каждая обмотка содержит ВТСП-материал; и

проводящую пластину по любому из пп. 35-40, находящуюся в контакте с осевой кромкой катушки.

42. Способ изготовления проводящей пластины для подачи тока к осевой кромке катушки, образованной вложенными концентрическими обмотками, содержащий:

обеспечение кольцеобразного проводящего элемента, выполненного заодно с пластиной или предусмотренного на ней, причем проводящий элемент содержит поверхность электрического контакта для обеспечения электрического контакта между проводящим элементом и катушкой;

отверждение композита волокон и смолы на проводящей пластине с образованием диэлектрического слоя на проводящей пластине для обеспечения электроизолирующего барьера смежно с поверхностью электрического контакта.

43. Способ по п. 42, при этом отверждение содержит нагрев композита до целевой температуры, поддержание композита при целевой температуре в течение периода времени и охлаждение композита.

44. Способ по п. 43, при этом скорость нагрева составляет менее 1°C в минуту, предпочтительно менее 0,3°C в минуту.

45. Способ по п. 42 или 43, при этом скорость охлаждения составляет менее 1°C в минуту, предпочтительно менее 0,4°C в минуту.

46. Способ по любому из пп. 43-45, при этом целевая температура больше или равна 180°C.

47. Способ по любому из пп. 43-46, при этом период времени составляет более 1 часа и, предпочтительно, более 2 часов.

ИЗМЕНЕННАЯ по ст.34 РСТ ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

(для сведения)

1. Магнит с высокотемпературным сверхпроводником, ВТСП, содержащий:

катушку, образованную вложенными концентрическими обмотками, намотанными вокруг оси катушки, причем каждая обмотка содержит ВТСП-материал; и

первый и второй проводящие элементы, каждый из которых содержит соответствующие поверхности электрического контакта, через которые подается электрический ток к или принимается электрический ток от участка соответствующей по меньшей мере одной из обмоток, причем каждая поверхность электрического контакта обеспечивает электрический контакт между проводящим элементом и осевой кромкой катушки по более чем 20% пути соответствующей по меньшей мере одной из обмоток, при этом поверхность электрического контакта первого проводящего элемента расположена ближе к оси, чем поверхность электрического контакта второго проводящего элемента, за счет чего электрический ток, подаваемый в катушку через первый проводящий элемент, протекает по последовательным обмоткам катушки прежде, чем принимается вторым проводящим элементом.

2. ВТСП-магнит по п. 1, при этом каждая обмотка содержит ВТСП-ленту и оболочку, электрически соединенную с ВТСП-лентой, а электрические контакты обеспечиваются с оболочкой.

3. ВТСП-магнит по п. 1 или 2, при этом поверхности электрического контакта обеспечивают электрический контакт с одной или более из осевых кромок катушки по более чем 50% или более чем 80% пути соответствующей по меньшей мере одной из обмоток.

4. ВТСП-магнит по любому из предшествующих пунктов, при этом одна или более из поверхностей электрического контакта являются кольцеобразными.

5. ВТСП-магнит по любому из предшествующих пунктов, содержащий по меньшей мере одну пластину, проходящую по одной или более из других обмоток, причем первый или второй проводящий элемент выполнен заодно с пластиной или предусмотрен на ней.

6. ВТСП-магнит по п. 5, при этом первый или второй проводящий элемент выступает из лицевой стороны пластины, а пластина дополнительно содержит диэлектрический или электрорезистивный слой для электрической изоляции лицевой стороны пластины от участка одной или более из других обмоток.

7. ВТСП-магнит по п. 6, содержащий промежуточный проводящий слой, проходящий по одной или более другим обмоткам, для передачи тепла и/или электрического тока от кромки обмоток.

8. ВТСП-магнит по п. 7, при этом промежуточный проводящий слой содержит паяемый металл, такой как латунь и/или нержавеющая сталь.

9. ВТСП-магнит по п. 7 или 8, при этом промежуточный проводящий слой снабжен рисунком посредством изменения его толщины.

10. ВТСП-магнит по любому из пп. 7-9, при этом катушка содержит электрическую изоляцию между обмотками.

11. ВТСП-магнит по любому из пп. 5-10, содержащий один или более датчиков и/или один или более нагревателей, расположенных между пластиной и катушкой.

12. ВТСП-магнит по любому из предшествующих пунктов, при этом поверхность электрического контакта первого или второго проводящего элемента обеспечивает электрический контакт либо с самой внутренней, либо с самой внешней обмоткой катушки.

13. ВТСП-магнит по любому из предшествующих пунктов, при этом поверхность электрического контакта первого или второго проводящего элемента обеспечивает электрический контакт через несплошность в обмотках.

14. ВТСП-магнит по любому из предшествующих пунктов, при этом поверхности электрического контакта обеспечивают электрический контакт с противоположными лицевыми сторонами катушки.

15. ВТСП-магнит по любому из предшествующих пунктов, дополнительно содержащий одну или более дополнительных катушек, причем упомянутая или каждая дополнительная катушка имеет проводящие элементы для обеспечения электрического контакта с противоположными лицевыми сторонами этой катушки, причем катушки уложены стопкой в осевом направлении и электрически соединены друг с другом через их соответствующие проводящие элементы.

16. ВТСП-магнит по п. 15, при этом соседние уложенные стопкой в осевом направлении катушки намотаны в противоположных направлениях.

17. ВТСП-магнит по любому из предшествующих пунктов, содержащий две или более концентрически вложенных катушки, каждая из которых имеет соответствующие проводящие элементы, причем каждая катушка электрически соединена с соседней катушкой электрическим соединением между соответствующими проводящими элементами катушек.

18. ВТСП-магнит по п. 17, при этом электрическое соединение является гибким.

19. ВТСП-магнит по п. 17 или 18, содержащий одну или более промежуточных опор, расположенных между соседними катушками, для пресечения радиальных сил.

20. ВТСП-магнит по любому из пп. 17-19, при этом соответствующие ВТСП-ленты соседних катушек отличаются по одному или более из: толщины; состава; ширины; и числа.

21. Токамак, содержащий ВТСП-магнит по любому из предшествующих пунктов, при этом ВТСП-магнит выполнен с возможностью обеспечивать тороидальное магнитное поле или полоидальное магнитное поле.

22. Способ выполнения электрического соединения с магнитом с высокотемпературным сверхпроводником, ВТСП, содержащим катушку, образованную вложенными концентрическими обмотками, причем каждая обмотка содержит ВТСП-материал, а способ содержит:

нанесение диэлектрического или электрорезистивного слоя для частичного покрытия лицевой стороны катушки;

прикладывание проводящей пластины к диэлектрическому или электрорезистивному слою;

формирование электрического контакта между проводящей пластиной и осевой кромкой катушки практически по пути по меньшей мере одной из обмоток; и

нанесение промежуточного проводящего слоя между диэлектрическим или электрорезистивным слоем и катушкой, причем промежуточный проводящий слой проходит по одной или более из других обмоток для передачи тепла или электрического тока от кромки упомянутой или каждой обмотки.

23. Проводящая пластина для подачи тока к осевой кромке катушки, образованной вложенными концентрическими обмотками, содержащая:

кольцеобразный проводящий элемент, выполненный заодно с пластиной или предусмотренный на ней, причем проводящий элемент содержит поверхность электрического контакта для обеспечения электрического контакта между проводящим элементом и катушкой;

диэлектрический или электрорезистивный слой на проводящей пластине для обеспечения электроизолирующего барьера смежно с поверхностью электрического контакта; и

промежуточный проводящий слой, проходящий частично или полностью по диэлектрическому или электрорезистивному слою, причем промежуточный проводящий слой выполнен с возможностью передачи тепла или электрического тока от кромки упомянутой или каждой обмотки.

24. Проводящая пластина по п. 23, при этом диэлектрический или электрорезистивный слой образован из композита волокон и смолы, такого как препрег.

25. Проводящая пластина по п. 24, при этом композит имеет температуру стеклования более 150°C, предпочтительно более 180°C, или, предпочтительнее, более 200°C.

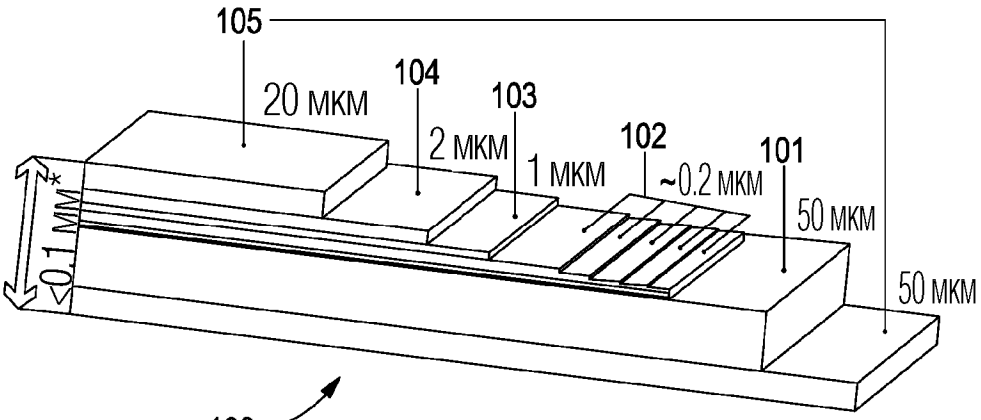
26. Проводящая пластина по любому из пп. 23-25, содержащая слой серебра на проводящей пластине, причем слой серебра и диэлектрический или электрорезистивный слой находятся на противоположных лицевых сторонах проводящей пластины.

27. Проводящая пластина по любому из пп. 23-26, при этом проводящая пластина содержит медь.

28. Магнит с высокотемпературным сверхпроводником, ВТСП, содержащий:

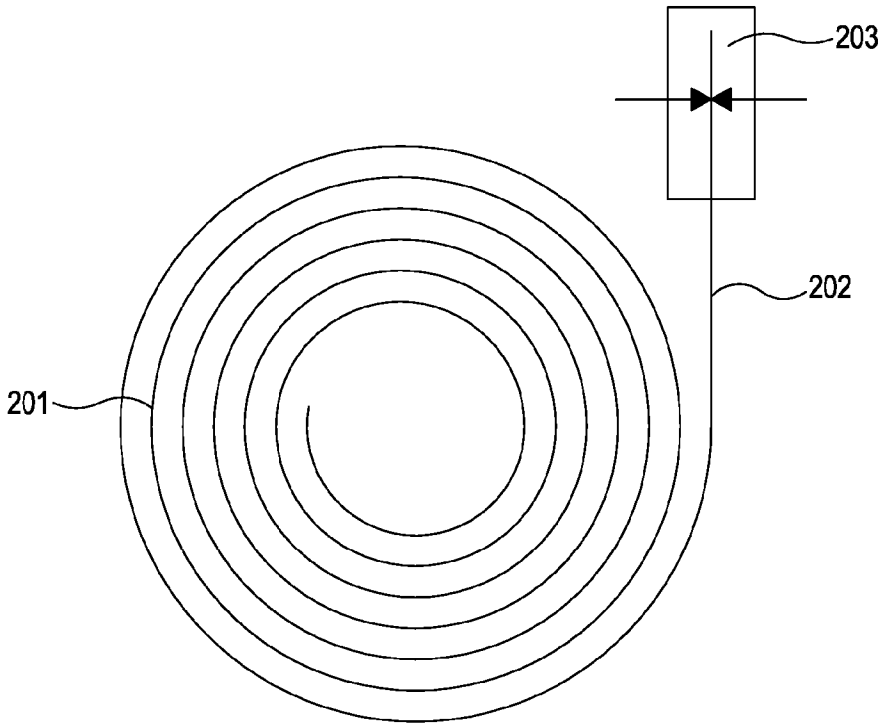
катушку, образованную вложенными концентрическими обмотками, причем каждая обмотка содержит ВТСП-материал; и

проводящую пластину по любому из пп. 23-28, находящуюся в контакте с осевой кромкой катушки.



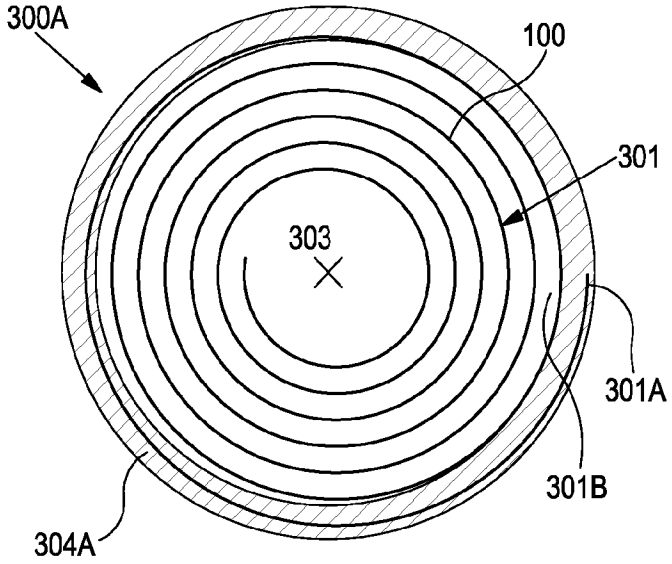
УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

ФИГ. 1

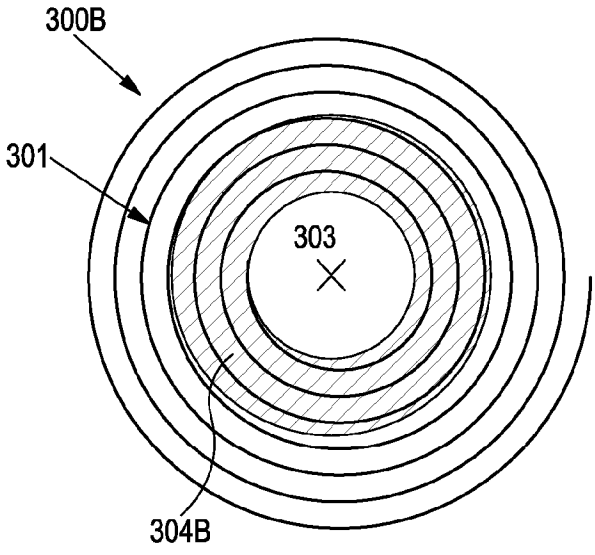


УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

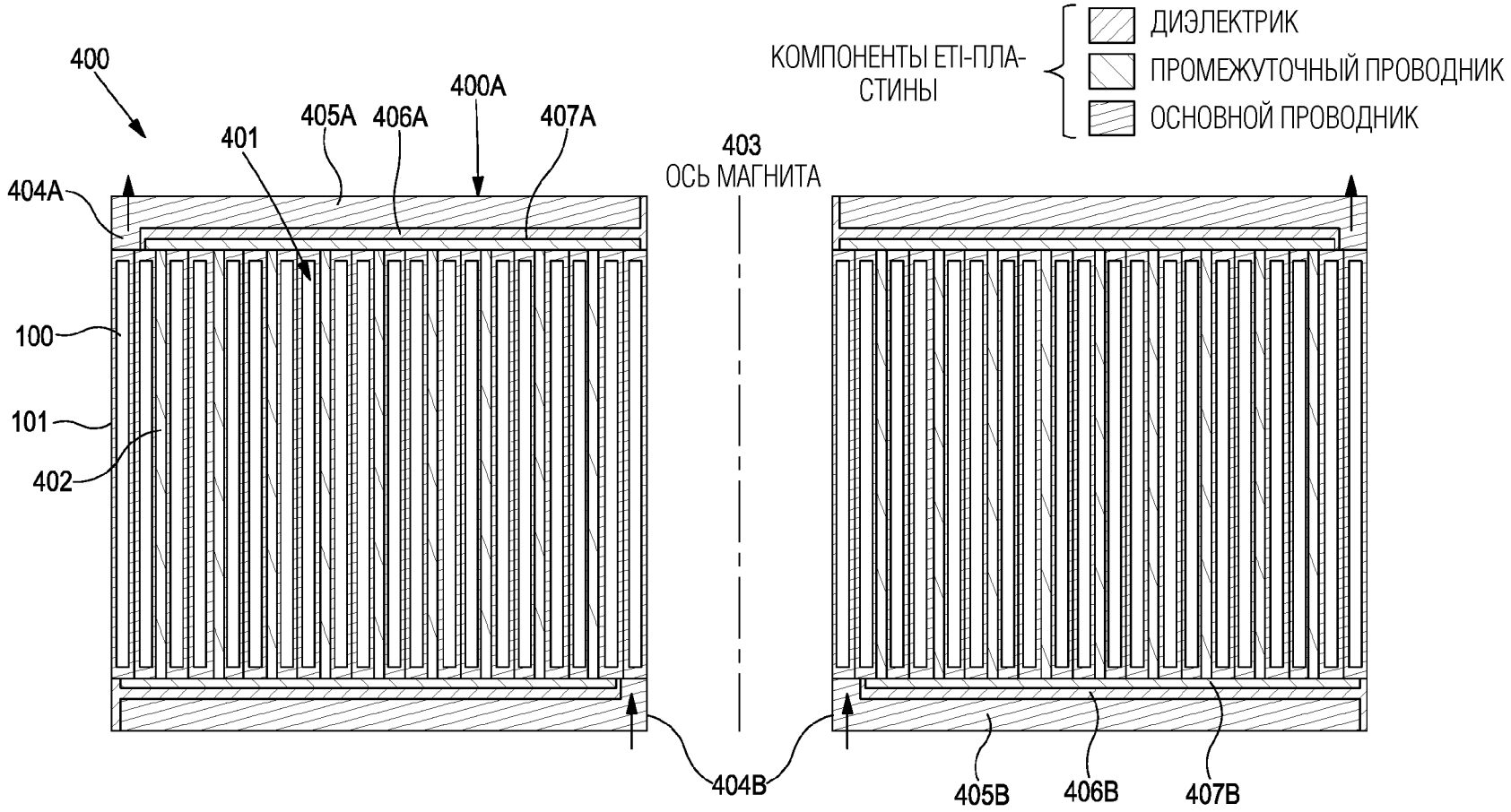
ФИГ. 2



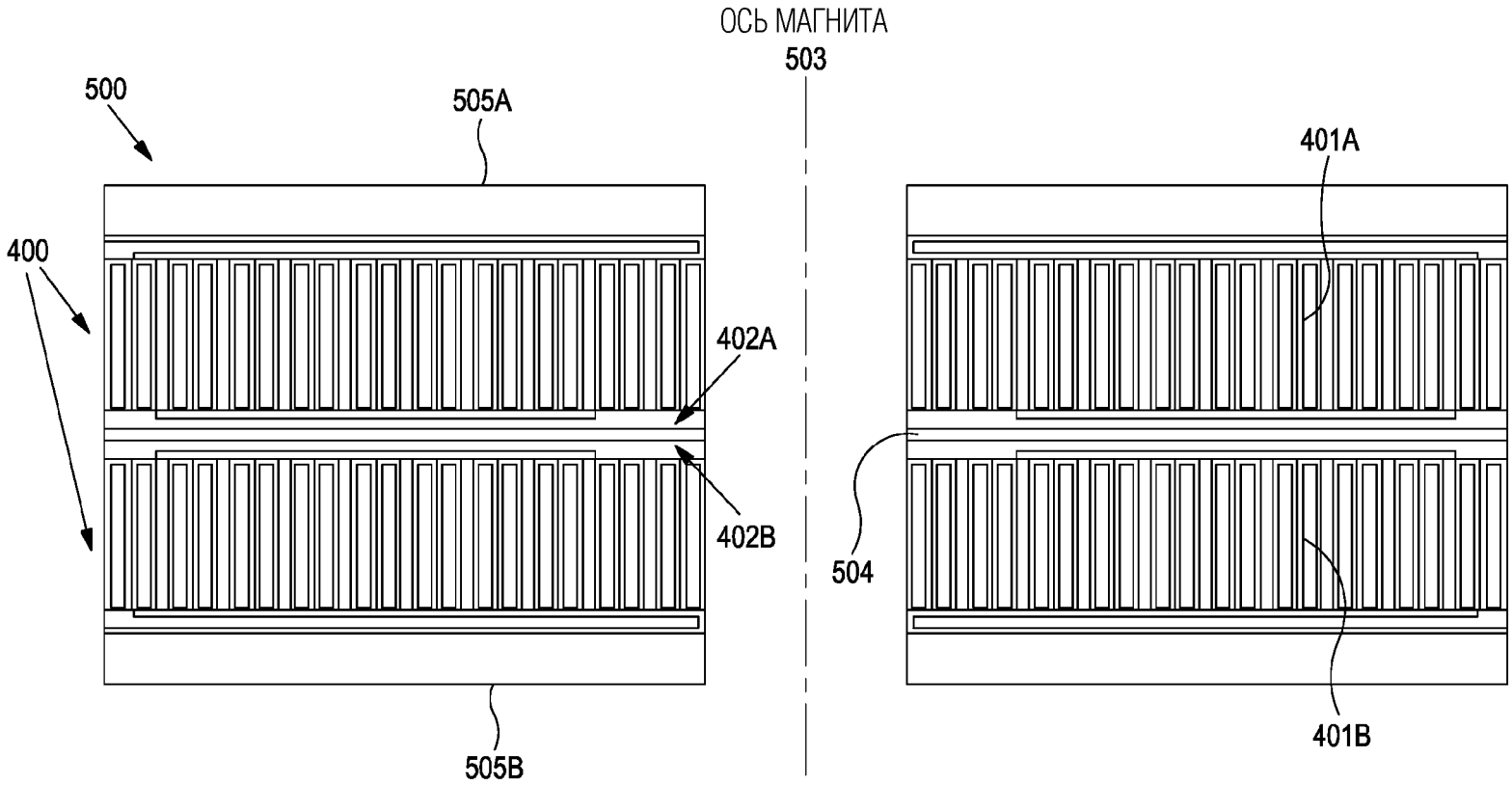
ФИГ. 3A



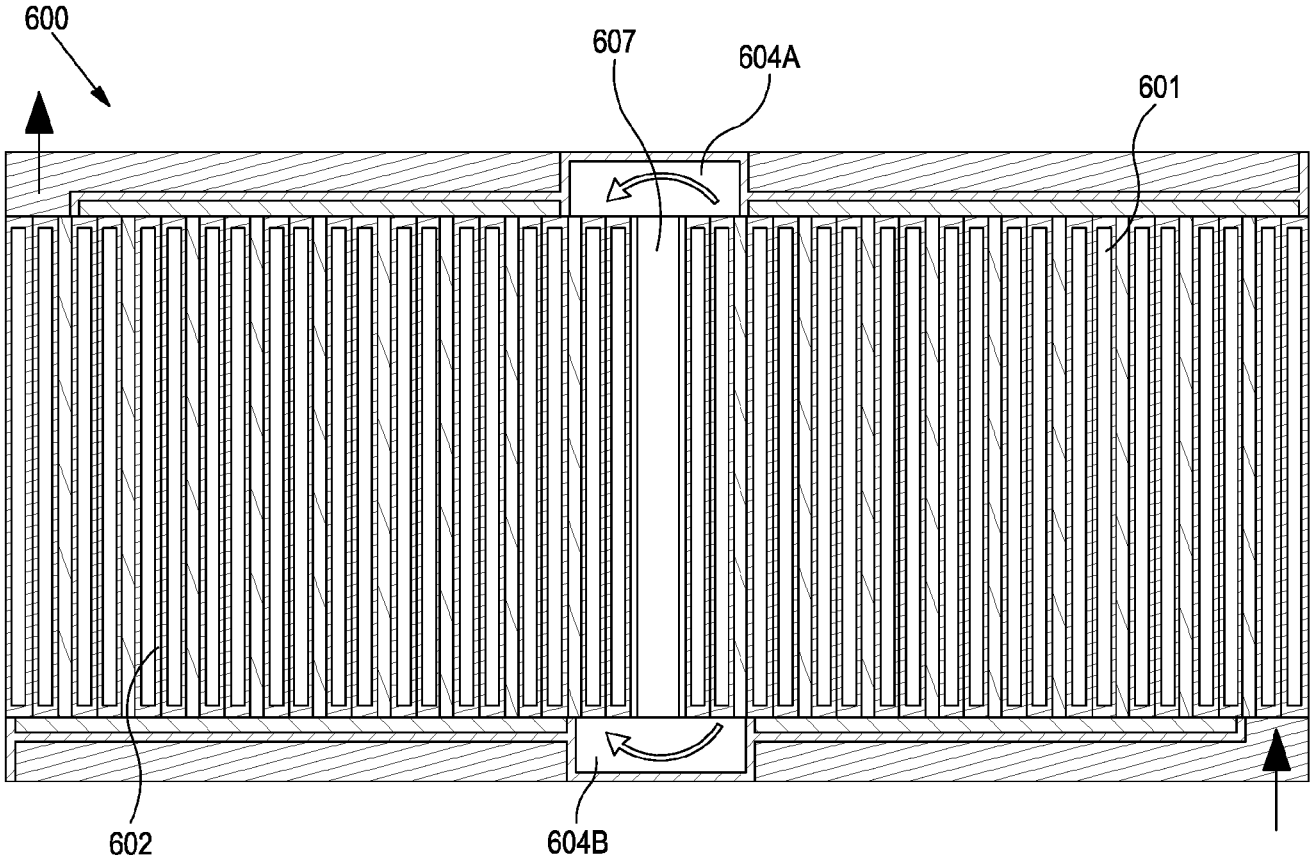
ФИГ. 3B


400
401
405A
406A
400A
407A
403
ОСЬ МАГНИТА
КОМПОНЕНТЫ ETI-ПЛА-СТИНЫ
ДИЭЛЕКТРИК
ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ ПРОВОДНИК
ОСНОВНОЙ ПРОВОДНИК
404A
100
101
402
404B
405B
406B
407B

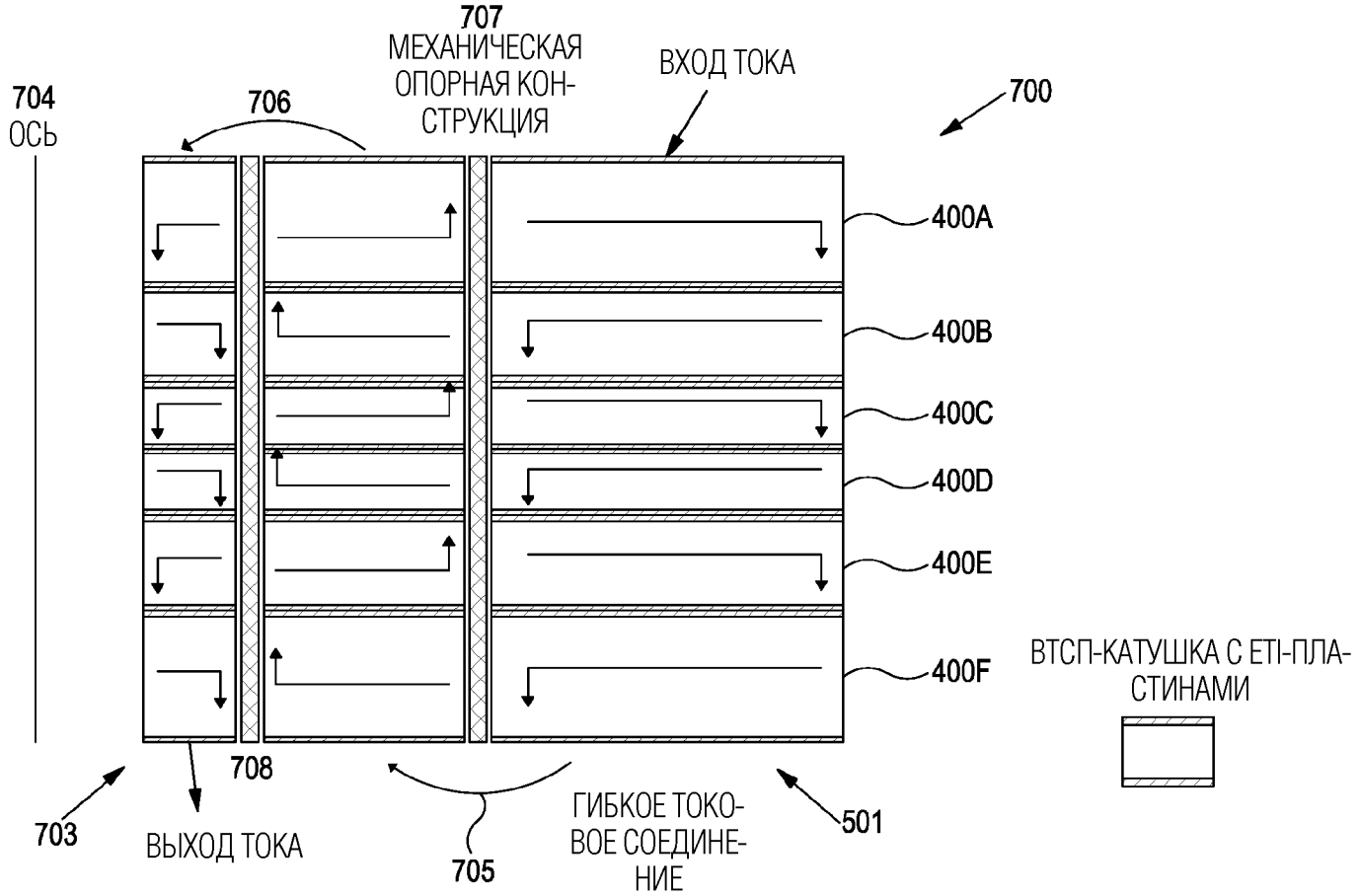
ФИГ. 4



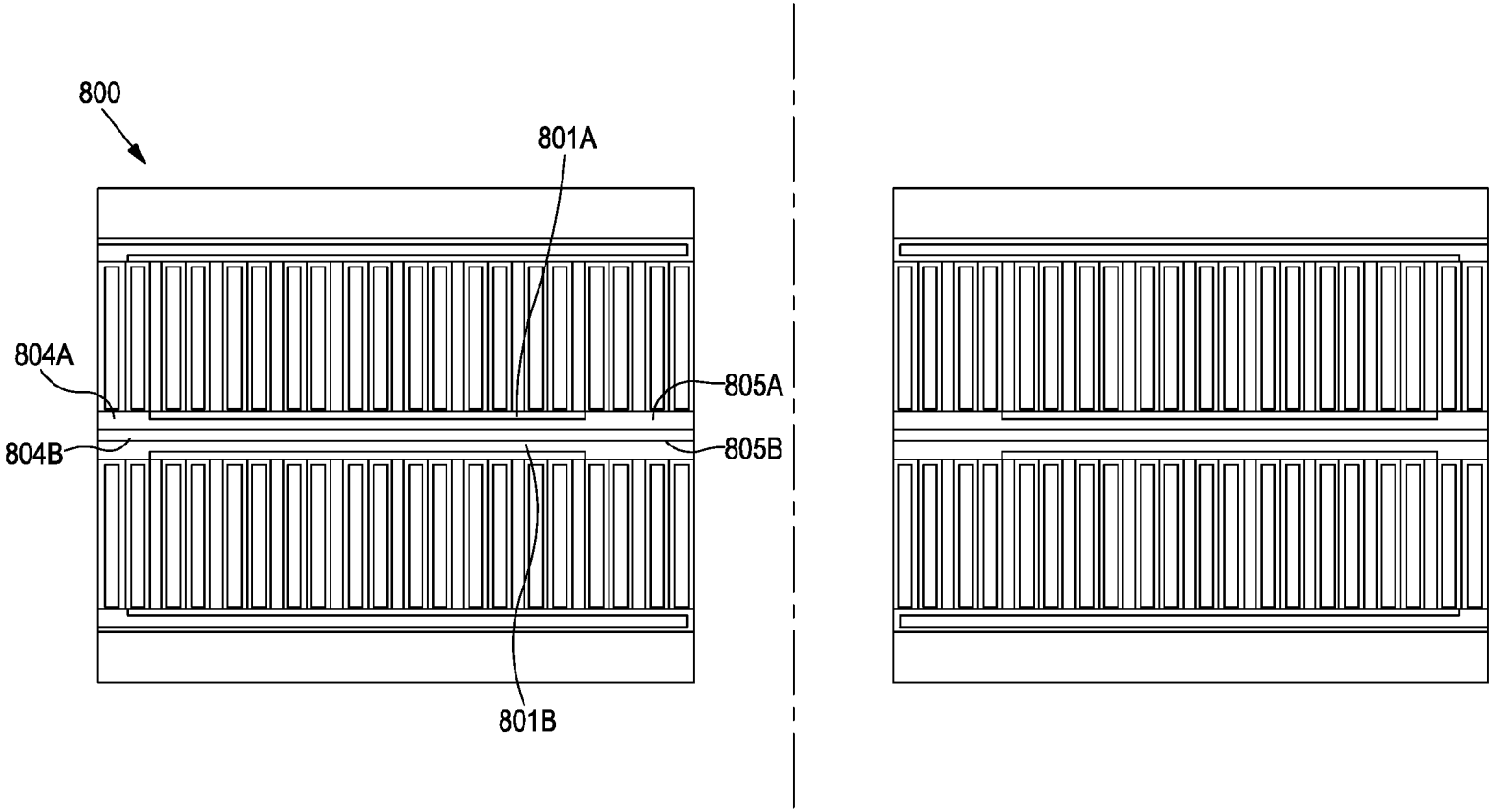
ФИГ. 5



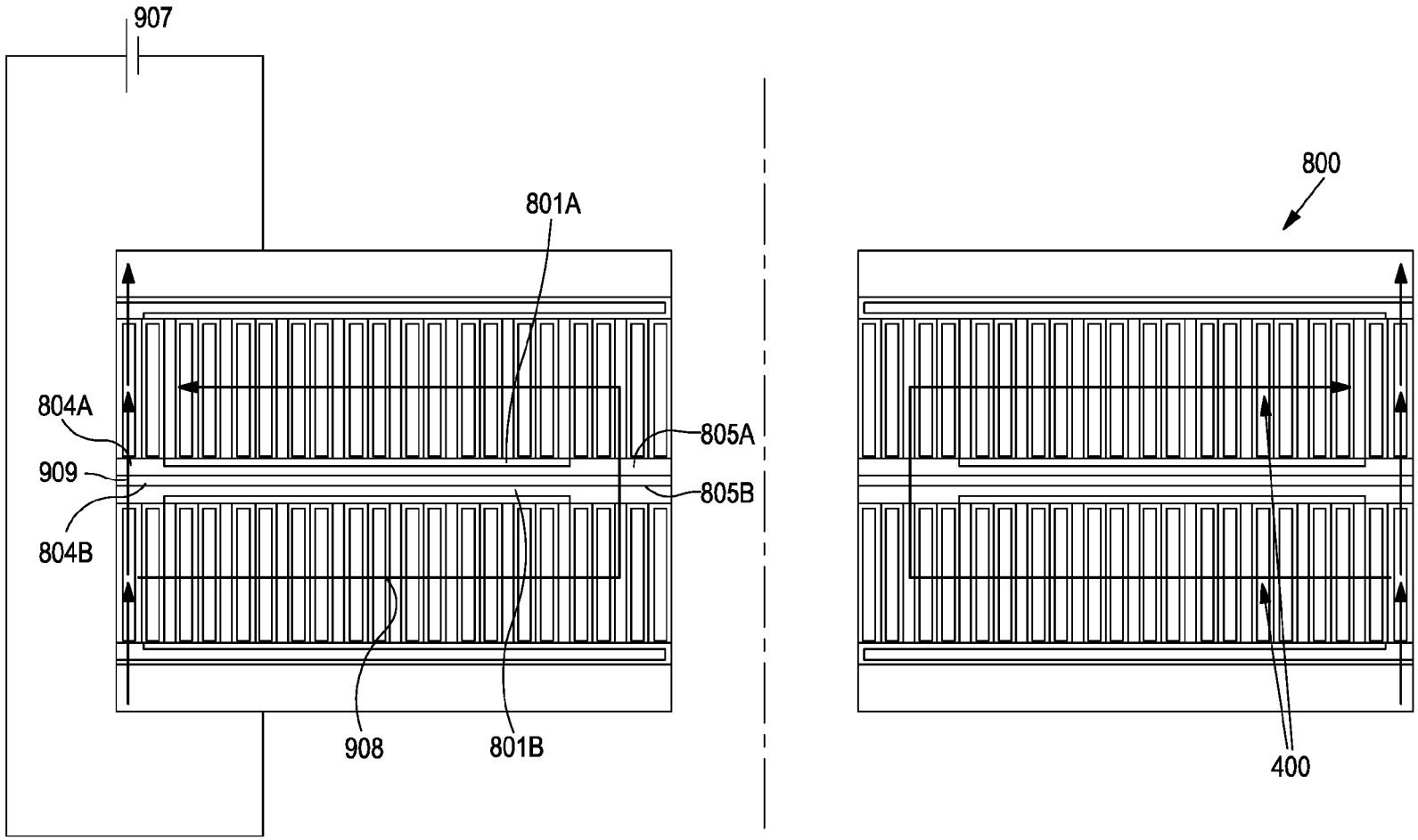
ФИГ. 6


707
МЕХАНИЧЕСКАЯ ОПОРНАЯ КОНСТРУКЦИЯ
ВХОД ТОКА
704
ОСЬ
706
700
400A
400B
400C
400D
400E
400F
ВТСП-КАТУШКА С ETI-ПЛАСТИНАМИ
708
703
ВЫХОД ТОКА
705
ГИБКОЕ ТОКОВОЕ СОЕДИНЕНИЕ
501

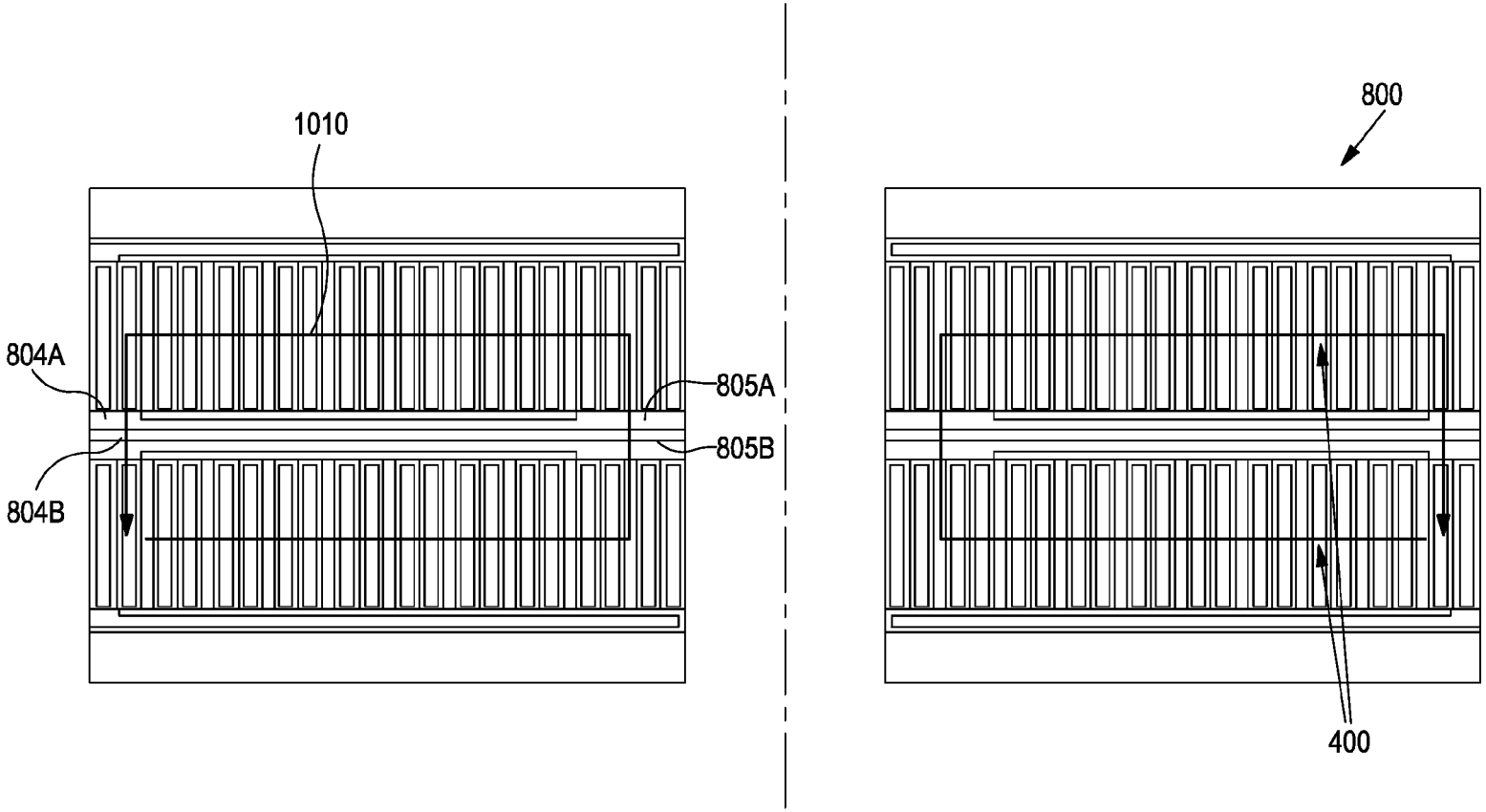
ФИГ. 7



ФИГ. 8



ФИГ. 9



ФИГ. 10