

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **039528**

(13) **B1**

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

(45) Дата публикации и выдачи патента
2022.02.07

(21) Номер заявки
202190659

(22) Дата подачи заявки
2019.08.30

(51) Int. Cl. **G21B 1/21** (2006.01)
H01B 12/00 (2006.01)
H01F 6/06 (2006.01)

(54) **КАБЕЛЬ ДЛЯ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В ОБМОТКЕ МАГНИТА И СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАБЕЛЯ ДЛЯ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В ОБМОТКЕ МАГНИТА**

(31) **1814357.8**

(32) **2018.09.04**

(33) **GB**

(43) **2021.06.30**

(86) **PCT/GB2019/052435**

(87) **WO 2020/049281 2020.03.12**

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

(72) Изобретатель:
**Слэйд Роберт, Бриттлс Грег, Ван
Нюггерен Бас (GB)**

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

(56) **WO-A1-2018078326**
WO-A1-2015011491
WO-A2-0108234
DE-A1-102010038656
EP-A1-1039483

(57) Кабель для переноса электрического тока в обмотке магнита. Кабель содержит стопку сборок ленты. Каждая сборка ленты имеет такие длину и ширину, что длина намного больше ширины, и каждая сборка ленты содержит слой ВТСП из анизотропного высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП-материала), при этом с-ось слоя ВТСП находится под ненулевым углом к вектору, перпендикулярному плоскости слоя ВТСП. Сборки ленты уложены стопкой в виде последовательности пар, причем каждая пара содержит первую и вторую сборки ВТСП-ленты и слой меди между ними. Сборки ленты в каждой паре расположены так, что с-ось слоя ВТСП первой сборки ВТСП-ленты каждой пары имеет зеркальную симметрию по отношению к с-оси слоя ВТСП второй сборки ВТСП-ленты каждой пары относительно плоскости, которая параллельна каждому слою ВТСП и равноудалена от каждого слоя ВТСП.

B1

039528

039528

B1

Область изобретения

Настоящее изобретение относится к высокотемпературным сверхпроводникам (ВТСП). В частности, настоящее изобретение относится к кабелям, содержащим ВТСП-ленты.

Предпосылки изобретения

Сверхпроводящие материалы обычно 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 составе и работе сверхпроводников, а не критическая температура, определяют ВТСП-материал). Наиболее часто используемыми ВТСП являются "купратные сверхпроводники" - керамика на основе купратов (соединений, содержащих группу оксида меди), такие 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 (MgB₂).

ReBCO типично изготавливают в виде лент со структурой, показанной на фиг. 1. Такая лента 500 обычно имеет толщину приблизительно 100 мкм и включает в себя подложку 501 (типично - электрополированный сплав Хастеллой толщиной приблизительно 50 мкм), на которую нанесена методом ионно-лучевого осаждения (IBAD), магнетронного распыления или другого подходящего метода последовательность буферных слоев, известных как буферный пакет 502, с приблизительной толщиной 0,2 мкм. Эпитаксиальный слой 503 ВТСП-ReBCO (нанесенный методом химического осаждения из паровой фазы металлоорганических соединений (MOCVD) или другим подходящим методом) покрывает этот буферный пакет 502 и типично имеет толщину 1 мкм. На слой ВТСП нанесен слой 504 серебра толщиной 1-2 мкм методом магнетронного распыления или другим подходящим методом, и на ленту гальваническим методом или другим подходящим методом нанесен стабилизирующий слой 505 меди, который часто полностью инкапсулирует ленту.

Подложка 501 обеспечивает механическую основу, которая может подаваться по производственной линии и позволяет выращивать последующие слои. Буферный пакет 502 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 504 серебра требуется для обеспечения перехода с низким сопротивлением от ReBCO к стабилизирующему слою, а стабилизирующий слой 505 обеспечивает альтернативный путь тока в случае, когда какая-либо часть ReBCO перестает быть сверхпроводящей (переходит в "нормальное" состояние).

Фиг. 2 показывает ReBCO-ленту 200, иллюстрируя систему координат x, y, z, которая будет использоваться в этом документе. Ось y проходит по длине ленты (т.е. в направлении тока, когда лента находится в эксплуатации), ось x проходит по ширине ленты (т.е. в плоскости ленты, перпендикулярной оси y), а ось z перпендикулярна осям x и y (т.е. является нормалью к плоскости ленты).

Фиг. 3 показывает поперечное сечение примерной ReBCO-ленты в плоскости x/z. Сам слой ReBCO является кристаллическим, и главные оси кристалла ReBCO показаны для одной точки в ленте. ReBCO-лента показана в упрощенном виде со слоем 301 ВТСП, медной оболочкой 302 и подложкой 303. Кристаллическая структура ReBCO имеет три главные оси, которые являются взаимно перпендикулярными, называемые осями a, b и c в данной области техники. В целях этого раскрытия мы игнорируем какую-либо зависимость критического тока от ориентации составляющей магнитного поля в плоскости ab, так что оси a и b можно считать взаимозаменяемыми, поэтому они будут рассматриваться только как плоскость a/b (т.е. плоскость, определяемая осями a и b). На фиг. 3 плоскость a/b слоя 301 ReBCO показана в виде единственной линии 310, перпендикулярной c-оси 320.

Критический ток ленты зависит от толщины и качества кристалла ReBCO. Он также имеет приблизительно обратную зависимость от температуры окружающей среды, а также величины приложенного магнитного поля. Наконец, слой ВТСП-ReBCO демонстрирует анизотропный характер поведения критического тока, т.е. критический ток зависит от ориентации приложенного магнитного поля по отношению к c-оси. Когда вектор приложенного магнитного поля лежит в a/b-плоскости 310, критический ток является значительно более высоким, чем когда вектор приложенного магнитного поля выставлен по c-оси 320. Критический ток плавно меняется между этими двумя экстремумами при ориентации поля "вне плоскости a/b", как показано сплошной кривой на фиг. 6А. (На практике может быть более одного угла, при котором критический ток показывает пик. Кроме того, амплитуда и ширина пиков меняются как с приложенным полем, так и с температурой, но в целях этого объяснения мы можем рассматривать ленту с единственным доминирующим пиком, который определяет оптимальную ориентацию приложенного поля B, которая дает максимальный критический ток.)

ReBCO-ленты обычно производят так, чтобы c-ось была как можно ближе к перпендикулярной плоскости ленты. Однако существует вероятность некоторой изменчивости в угловом сдвиге между ориентациями c-оси и z-оси вдоль ленты вследствие различий в производственных процессах. Этот сдвиг,

вероятно, будет включать фиксированный сдвиг плюс переменный сдвиг, который изменяется с положением вдоль ленты. При фиксированной ориентации магнитного поля этот угловой сдвиг между с-осью и z-осью приводит к вариации критического тока вдоль ленты. Это нежелательно, когда пара лент переносит транспортный ток, близкий к суммарному критическому току отдельных лент, так как вызванные этой вариацией снижения критического тока могут вынудить достаточный транспортный ток перераспределяться в слой меди на достаточно большом расстоянии, чтобы создать горячее пятно, которое ведет к тепловому разгону и локализованному нарушению сверхпроводимости ("квенчу").

Сущность изобретения

Согласно первому аспекту предложен кабель для переноса электрического тока в обмотке магнита. Кабель содержит стопку сборок ленты (стопку лент в сборе). Каждая сборка ленты имеет такие длину и ширину, что длина намного больше ширины, и каждая сборка ленты содержит слой ВТСП из анизотропного высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП-материала), при этом с-ось слоя ВТСП находится под ненулевым углом к вектору, перпендикулярному плоскости слоя ВТСП. Сборки ленты уложены стопкой в виде последовательности пар, причем каждая пара содержит первую и вторую сборки ВТСП-ленты и слой меди между ними. Сборки ленты в каждой паре расположены так, что с-ось слоя ВТСП первой сборки ВТСП-ленты каждой пары имеет зеркальную симметрию по отношению к с-оси слоя ВТСП второй сборки ВТСП-ленты каждой пары относительно плоскости, которая параллельна каждому слою ВТСП и равноудалена от каждого слоя ВТСП.

Согласно второму аспекту предложен способ изготовления кабеля для переноса электрического тока в обмотке магнита. Обеспечивают первую и вторую сборки ленты, причем каждая сборка ленты содержит слой высокопрочной металлической подложки и слой ВТСП из анизотропного высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП-материала), при этом с-ось слоя ВТСП находится под ненулевым углом к вектору, перпендикулярному плоскости слоя ВТСП. Накладывают первую сборку ленты на слой меди. На этот слой меди накладывают вторую сборку ленты так, что слой ВТСП первой ленты и слой ВТСП второй ленты параллельны и разделены слоем меди, и так, что с-ось второй сборки ВТСП-ленты имеет зеркальную симметрию по отношению к с-оси слоя ВТСП второй сборки ВТСП-ленты каждой пары относительно плоскости, которая параллельна каждому слою ВТСП и равноудалена от каждого слоя ВТСП.

Краткое описание чертежей

- Фиг. 1 представляет собой иллюстрацию структуры ReBCO-ленты;
- фиг. 2 - схему, показывающую систему координат для описания ReBCO-ленты;
- фиг. 3 - пару сечений ReBCO-ленты, показывающих главные оси кристалла ReBCO;
- фиг. 4 - поперечные сечения пары типа 0;
- фиг. 5 - поперечные сечения примерной пары типа 0;
- фиг. 6А, 6В, 6С и 6D показывают изменение критического тока с внешним магнитным полем у конструкций по фиг. 4 и 5 для различных ReBCO-лент;
- фиг. 7А показывает соотношение токов ReBCO в обмотке возбуждения поля, построенной с использованием конструкции по фиг. 4;
- фиг. 7В показывает соотношение токов ReBCO в обмотке возбуждения поля, построенной с использованием конструкции по фиг. 5.

Подробное описание

Изобретение описывает способ комбинирования пар ВТСП-лент так, что любое изменение угла, при котором возникает пиковый критический ток вдоль ленты, усредняется в такой паре, приводя к более согласованному поведению.

Фиг. 4 показывает примерную пару типа-0 ReBCO-лент в поперечном сечении, перпендикулярном оси ленты. Пара типа-0 содержит две ленты 410, 420, ориентированные так, что слои 411, 421 ReBCO обращены друг к другу, и с медной прослойкой 430 между ними. В случае дефекта или "срыва" критического тока в одной ленте (такого как трещина), это позволяет току переходить между слоями 411, 421 ReBCO через медную прослойку, которая обладает низким удельным сопротивлением. Сопротивление между парами ReBCO является более низким в этой ориентации, чем в более общепринятой компоновке с простой укладкой друг на друга лент со слоями ВТСП, обращенными в одном и том же направлении (пары типа-1).

Каждая лента имеет с-ось 412, 422 под углом α относительно перпендикуляра к плоскости слоя ReBCO (т.е. z-оси) и угол пикового I_c (т.е. тот угол приложенного магнитного поля, для которого критический ток наибольший), который перпендикулярен с-оси.

Традиционно, пара типа-0 была бы построена сначала наложением ленты 410 с бобины (катушки) ReBCO-ленты на медную прослойку 430 от одного конца до другого, а затем наложением ленты 420 с той же бобины (катушки) ВТСП-ленты в том же направлении на противоположной стороне медной прослойки. Это приводит в результате к тому, что с-ось ReBCO 412, 422 и a/b-плоскость 413, 423 (т.е. угол приложенного магнитного поля, для которого I_c является максимальным) ориентированы так, как показано на фиг. 4, с осевой (вращательной) симметрией относительно u-оси 401 пары типа-0.

В качестве альтернативы пара типа-0 может быть построена так, как показано на фиг. 5, которая является поперечным сечением, эквивалентным фиг. 4 для примерной конструкции пары типа-0. Ленты 510,

слои 511 ReBCO и медная прослойка 530 эквивалентны ленте 410, слою 511 ReBCO и медной прослойке 430 по фиг. 4. Лента 520 была наложена так, что слой 421 ReBCO обращен к слою 511 ReBCO ленты 510, и так, что с-оси 511, 521 и a/b-плоскости 512, 522 каждой ленты 510, 520 имеют зеркальную симметрию относительно плоскости 501, которая параллельна каждой ленте и равноудалена от каждой ленты пары типа-0.

Наложение ленты с образованием конструкции по фиг. 5 (т.е. "перевернутой пары" или, иначе говоря, "зеркально отраженной пары") может быть проделано сначала наложением ленты 510 с бобины ReBCO-ленты в одном направлении, а затем наложением ленты 520 с той же бобины ReBCO-ленты в противоположном направлении вдоль y-оси.

Альтернативно ReBCO-лента может быть размотана с бобины между наложением ленты 510 и наложением ленты 520 и перемотана в противоположном направлении, затем лента 520 накладывается в том же направлении, что и при наложении ленты 510. В качестве дополнительной альтернативы, лента 510 и лента 520 могут быть наложены в одинаковом направлении с разных рулонов, которые были ранее намотаны в противоположных направлениях, чтобы получить правильное выставление с-осей.

Если ленту не нужно накладывать непосредственно с бобины, ориентация "перевернутой пары" легче всего достигается посредством

- 1) отматывания двух одинаковых отрезков ленты с бобины;
- 2) переворачивания одной ленты вокруг ее y-оси так, чтобы покрытые ВТСП стороны были обращены друг к другу;
- 3) поворота одной ленты на 180° по длине вокруг z-оси.

Альтернативно этого можно добиться отматыванием одной ленты более чем в два раза больше требуемой длины, загибанием (складыванием) ее в середине вокруг x-оси (т.е. конец к концу) и отрезанием или удалением иным образом участка, содержащего сгиб, оставляя две ленты, которые затем размещают в паре типа-0 в "перевернутой" ориентации (или паре типа-2, если ленту складывают так, что подложки обращены друг к другу).

Фиг. 6A-6D показывают графики зависимости критического тока от угла магнитного поля для пар типа-0, построенных согласно фиг. 4 (сплошная линия) или фиг. 5 (штриховая линия), для лент с углом между с-осью и перпендикуляром к ленте, приблизительно равным 1° (фиг. 6A), 5° (фиг. 6B), 10° (фиг. 6C) и 35° (фиг. 6D).

Как можно видеть из фигур, использование конструкции по фиг. 5 приводит в результате к более низкому пиковому критическому току, но диапазону относительно высоких критических токов в более широком диапазоне углов. Для ленты, в которой с-ось точно совмещена с перпендикуляром к ленте (z-осью), эти две конструкции эквивалентны.

Для лент с небольшим углом ($<5^\circ$) сдвига между с-осью и z-осью компоновка в виде перевернутой пары имеет полезный эффект усреднения влияния каких-либо изменений угла, при котором возникает пиковый критический ток в каком-либо положении вдоль ленты. Причина этого состоит в том, что пики отдельных лент в паре сливаются в один более низкий и более широкий пик, как показано на фиг. 6A (штриховая кривая). Небольшие отклонения в угловом сдвиге вдоль ленты будут вызывать уширение или заострение пика.

Кроме того, в том случае, когда перевернутую пару изготавливают из одной катушки ленты, если критический ток в начале катушки является более низким или более высоким, чем в конце катушки, в том виде как она поставляется, он также будет усреднен посредством перевернутой ориентации типа-0.

Результирующий эффект перевернутой ориентации пары заключается в усреднении производственных отклонений пикового критического тока вдоль ВТСП-ленты. Преимущества по преобразованию проекта магнита, который предполагает равномерный критический ток вдоль ленты, в реальный работающий магнит очевидны.

Однако следует отметить, что в некоторых имеющихся в продаже лентах с-ось 320 отклоняется на целых $30-35^\circ$ от перпендикуляра к плоскости ленты. Ориентация перевернутой пары менее полезна с такими лентами, поскольку пиковый I_c разделяется на два пика, оба ниже, чем пик в неперевернутой компоновке пар лент. Это проиллюстрировано на фиг. 6D.

Кроме того, применение конструкции с "перевернутой лентой" приводит в результате к симметричному распределению тока, перераспределяющегося в пределах обмотки магнита, намотанной с использованием пар типа-0 и приведенной близко к критическому току. Фиг. 7A показывает диаграмму соотношения между током и критическим током для поперечного сечения дисковой (плоской) обмотки электромагнита, построенной из множества пар типа-0 согласно конструкции по фиг. 4, а фиг. 7B показывает диаграмму соотношения между током I и критическим током I_c для поперечного сечения обмотки магнита, построенной из множества пар типа-0 согласно конструкции по фиг. 5 (т.е. "перевернутой" ориентации). Каждая обмотка выполнена из двух спиральных "дисковых" обмоток из пар типа-0, уложенных друг на друга (т.е. одна от $z=0$ до $z=12$ и одна от $z=0$ до $z=-12$), с x-осью всех лент, параллельной оси обмотки магнита, и z-осью ленты, ориентированной по радиусу обмотки магнита. Используемая ReBCO-лента имеет угол между с-осью и перпендикуляром к плоскости ленты (z-осью), равный 35° . Как можно видеть из

фигур, компоновка по фиг. 7В является симметричной. Это ведет к симметричному нагреву вследствие перераспределения тока, что более желательно с точки зрения понимания рабочих характеристик обмотки.

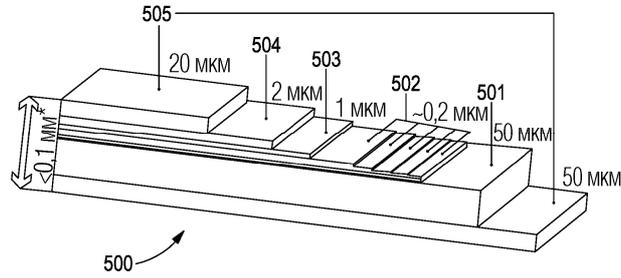
Хотя вышеприведенное описание сосредоточено на компоновках пар типа-0 ВТСП-лент, аналогичные компоновки могут быть использованы для пар типа-1 (т.е. когда слой ВТСП одной ленты обращен к слою подложки другой, так что один слой ВТСП находится между подложками, а один - нет) или пар типа-2 (т.е. когда слои подложки обращены друг к другу, так что они находятся между слоями ВТСП), скомпонованными так, что с-оси ВТСП-лент имеют зеркальную симметрию относительно плоскости, параллельной слоям ВТСП. Кроме того, вышеприведенное раскрытие может также быть применено к случаям, когда одна или обе ленты в паре представляют собой "отслоенную" ВТСП-ленту, т.е. ВТСП-ленту без подложки.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

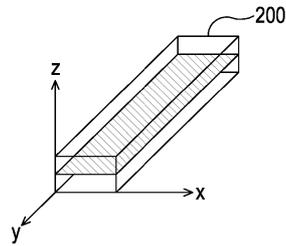
1. Кабель для переноса электрического тока в обмотке магнита, содержащий стопку сборок ленты, причем каждая сборка ленты имеет такие длину и ширину, что длина намного больше ширины, и каждая сборка ленты содержит слой ВТСП из анизотропного высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП-материала), при этом с-ось слоя ВТСП находится под ненулевым углом к вектору, перпендикулярному плоскости слоя ВТСП, при этом сборки ленты уложены стопкой в виде последовательности пар, причем каждая пара содержит первую и вторую сборки ВТСП-ленты и слой меди между ними, при этом сборки ленты в каждой паре расположены так, что с-ось слоя ВТСП первой сборки ВТСП-ленты каждой пары имеет зеркальную симметрию по отношению к с-оси слоя ВТСП второй сборки ВТСП-ленты каждой пары относительно плоскости, которая параллельна каждому слою ВТСП и равноудалена от каждого слоя ВТСП.
2. Кабель по п. 1, при этом ВТСП-материалом является один из ReBCO и BSCCO.
3. Кабель по п. 1 или 2, при этом каждая сборка ВТСП-ленты содержит подложку.
4. Кабель по п. 3, при этом каждая пара скомпонована так, что слои ВТСП сборок ВТСП-ленты расположены между подложками сборок ВТСП-ленты.
5. Кабель по п. 3, при этом каждая пара скомпонована так, что подложки сборок ленты расположены между слоями ВТСП сборок ВТСП-ленты.
6. Кабель по п. 3, при этом каждая пара скомпонована так, что один слой ВТСП расположен между подложками сборок ВТСП-ленты, а другой слой ВТСП расположен снаружи подложек сборок ВТСП-ленты.
7. Кабель по п. 1 или 2, при этом каждая сборка ВТСП-ленты содержит отслоенную ВТСП-ленту.
8. Кабель по любому предшествующему пункту, при этом толщина слоя меди составляет между 10 и 400 мкм.
9. Способ изготовления кабеля для переноса электрического тока в обмотке магнита, содержащий обеспечение первой и второй сборок ленты, причем каждая сборка ленты содержит слой высокопрочной металлической подложки и слой ВТСП из анизотропного высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП-материала), при этом с-ось слоя ВТСП находится под ненулевым углом к вектору, перпендикулярному плоскости слоя ВТСП;
 - накладывание первой сборки ленты на слой меди;
 - накладывание второй сборки ленты на слой меди, так что слой ВТСП первой ленты и слой ВТСП второй ленты параллельны и разделены слоем меди, и так, что с-ось второй сборки ВТСП-ленты имеет зеркальную симметрию по отношению к с-оси слоя ВТСП второй сборки ВТСП-ленты каждой пары относительно плоскости, которая параллельна каждому слою ВТСП и равноудалена от каждого слоя ВТСП.
10. Способ по п. 9, при этом каждая сборка ВТСП-ленты содержит слой подложки.
11. Способ по п. 10, при этом первую и вторую сборки ВТСП-ленты накладывают на слой меди так, что соответствующий слой ВТСП находится между соответствующим слоем подложки и слоем меди.
12. Способ по п. 10, при этом первую и вторую сборки ВТСП-ленты накладывают на слой меди так, что соответствующий слой подложки находится между соответствующим слоем ВТСП и слоем меди.
13. Способ по п. 10, при этом первую и вторую сборки ВТСП-ленты накладывают на слой меди так, что слой ВТСП первой сборки ВТСП-ленты находится между слоем подложки первой сборки ВТСП-ленты и слоем меди, а слой подложки второй сборки ВТСП-ленты находится между слоем ВТСП второй сборки ВТСП-ленты и слоем подложки.
14. Способ по п. 8, при этом каждая сборка ВТСП-ленты содержит отслоенную ВТСП-ленту.
15. Способ по любому из пп. 8-14, также содержащий частичное перенесение основной сборки ВТСП-ленты с первой катушки на вторую катушку, отделение части основной сборки ВТСП-ленты на первой катушке от части основной сборки ВТСП-ленты на второй катушке и накладывание первой сборки ВТСП-ленты с первой катушки и второй сборки ВТСП-ленты со второй катушки.

16. Способ по любому из пп.8-14, при этом первую сборку ВТСП-ленты накладывают по слою меди в направлении, противоположном тому направлению, в котором накладывают вторую сборку ВТСП-ленты.

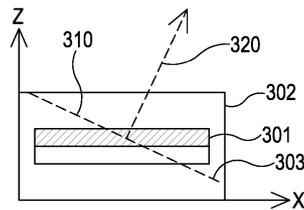
17. Способ по любому из пп.8-14, при этом первую и вторую сборки ВТСП-ленты формируют загибанием основной сборки ВТСП-ленты вокруг оси, лежащей в плоскости слоя ВТСП и перпендикулярной длине основной сборки ВТСП-ленты, и удалением содержащей гиб области основной сборки ВТСП-ленты.



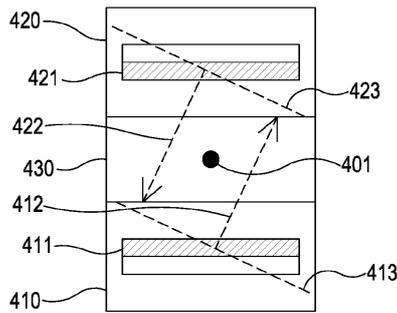
Фиг. 1



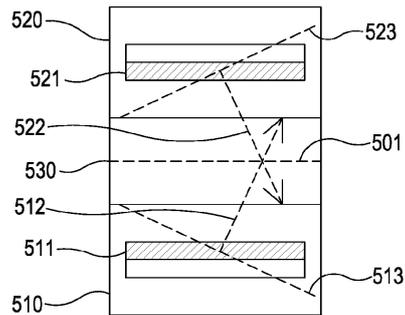
Фиг. 2



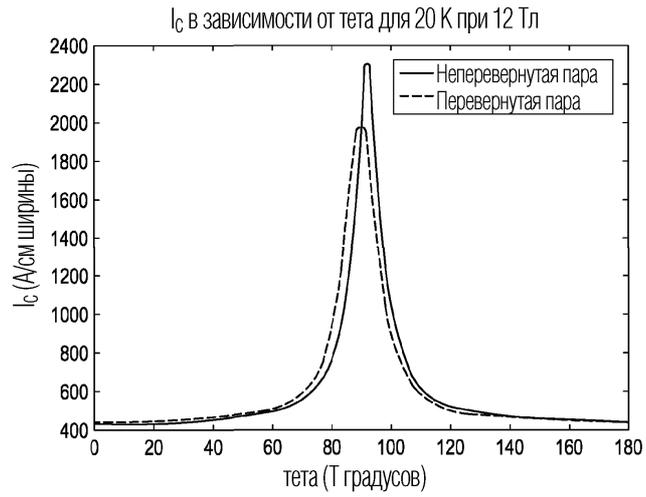
Фиг. 3



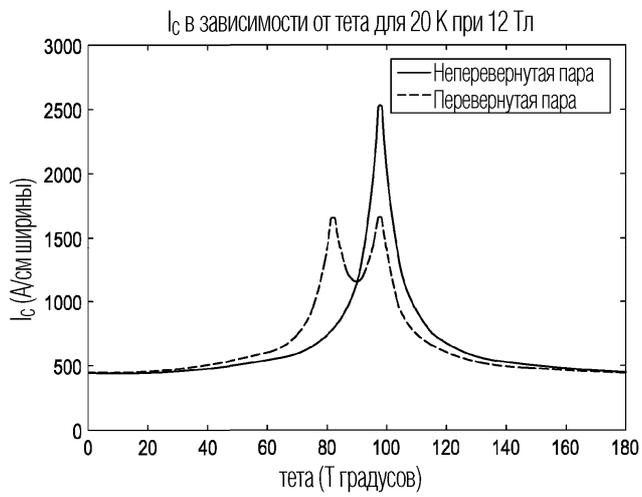
Фиг. 4



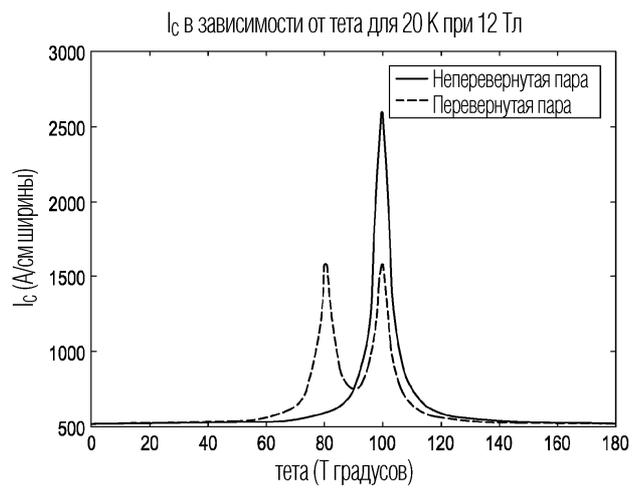
Фиг. 5



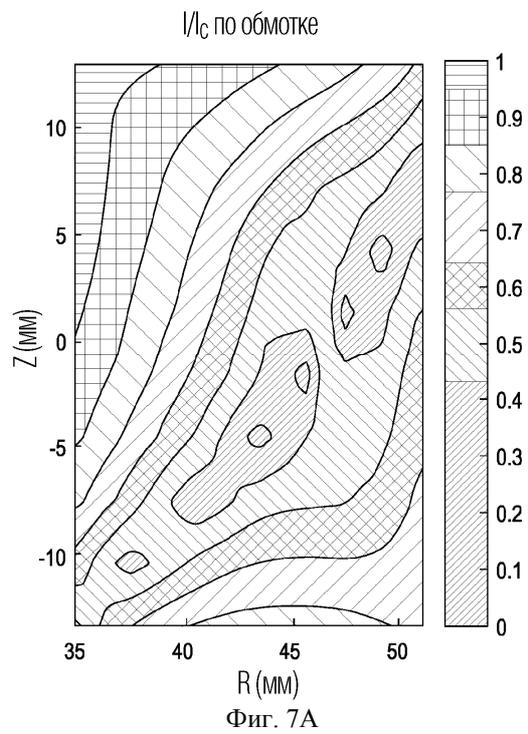
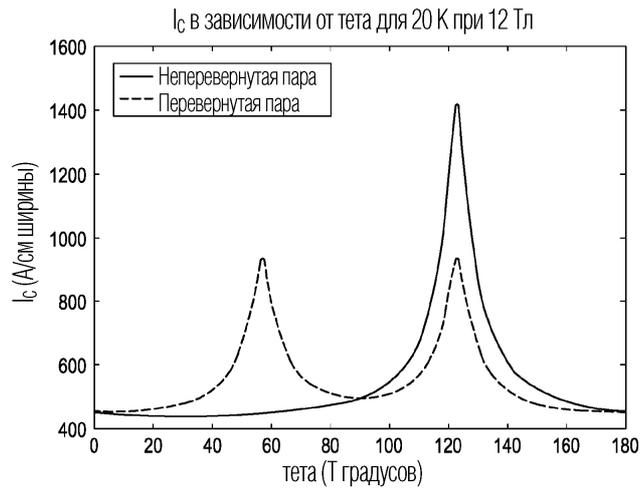
Фиг. 6А

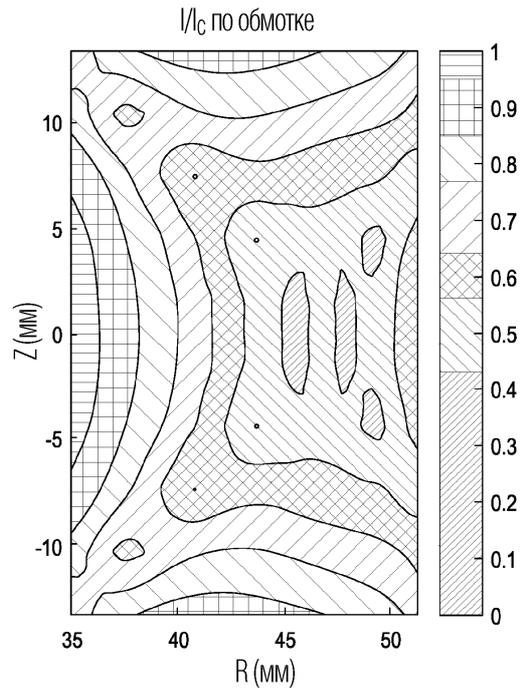


Фиг. 6В



Фиг. 6С





Фиг. 7В

