

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **040480**(13) **B1**(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2022.06.08

(21) Номер заявки
202192674

(22) Дата подачи заявки
2020.03.31

(51) Int. Cl. **G01R 15/18** (2006.01)
H05K 1/16 (2006.01)
H01F 6/02 (2006.01)
H01F 6/06 (2006.01)
H05K 3/42 (2006.01)

(54) **ТОКОНЕСУЩИЙ УЗЕЛ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАТУШКЕ МАГНИТА С
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ СВЕРХПРОВОДНИКОМ (ВТСП)**

(31) **1904528.5**

(32) **2019.04.01**

(33) **GB**

(43) **2021.12.31**

(86) **PCT/EP2020/059184**

(87) **WO 2020/201316 2020.10.08**

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

(72) Изобретатель:
**Бэйтман Род, Слэйд Роберт, Ван
Нюгтерен Бас (GB)**

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

(56) **US-A1-2013057267**

US-A1-2017016937

HASEGAWA SHIN ET AL: "Fundamental Evaluations of Applicability of LTS Quench Detectors to REBCO Pancake Coil", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, IEEE SERVICE CENTER, LOS ALAMITOS, CA, US, vol. 29, no. 5, 21 February 2019 (2019-02-21), pages 1-5, XP011716205, ISSN: 1051-8223, DOI: 10.1109/TASC.2019.2900633 [retrieved on 2019-03-22] abstract; figure 1

US-A1-2009046399

TAE SUNG LEE ET AL: "The effects of co-wound Kapton, stainless steel and copper, in comparison with no insulation, on the time constant and stability of GdBCO pancake coils", SUPERCONDUCTOR SCIENCE AND TECHNOLOGY, IOP PUBLISHING, TECHNO HOUSE, BRISTOL, GB, vol. 27, no. 6, 15 May 2014 (2014-05-15), page 65018, XP020264378, ISSN: 0953-2048, DOI: 10.1088/0953-2048/27/6/065018 [retrieved on 2014-05-15] the whole document

GB-A-1101652

EP-A1-2363897

(57) Предложен частично изолирующий слой для использования в катушке ВТСП-магнита. Частично изолирующий слой содержит изолирующее тело 401, имеющее внутри себя набор связывающих дорожек и набор воспринимающих дорожек. Каждая связывающая дорожка является электропроводной и электрически соединена с первой и второй поверхностями частично изолирующего слоя для того, чтобы обеспечить электрический путь между упомянутыми первой и второй поверхностями. Каждая воспринимающая дорожка является электропроводной и индуктивно соединена с соответствующей связывающей дорожкой и электрически изолирована от первой и второй поверхностей. Каждая из воспринимающих дорожек выполнена с возможностью подключения к токоизмерительному устройству для того, чтобы измерять индуцируемый в воспринимающей дорожке ток по изменению тока, протекающего в соответствующей связывающей дорожке.

B1**040480****040480****B1**

Область изобретения

Настоящее изобретение относится к магнитам с высокотемпературным сверхпроводником (ВТСП), т.е. ВТСП-магнитам. В частности, изобретение относится к частично изолирующему слою для использования в ВТСП-магните с частичной изоляцией.

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- и НТСП-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 производится в виде лент со структурой, показанной на фиг. 1. Такая лента 100 обычно имеет толщину приблизительно 100 микрон и включает в себя подложку 101 (типично электрополированный сплав хастеллой 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, приблизительно 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 и типично имеет толщину 1 микрон. На слой ВТСП нанесен 1-2-микронный слой 104 серебра методом распыления или другим подходящим методом, и на ленту гальваническим методом или другим подходящим методом нанесен стабилизирующий слой 105 меди, который часто полностью инкапсулирует ленту.

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 стабилизирующему слою, а стабилизирующий слой 105 обеспечивает альтернативный путь тока в случае, когда какая-либо часть ReBCO перестает быть сверхпроводящей (переходит в "нормальное" состояние).

Кроме того, может быть изготовлена "отслоенная" ВТСП-лента, которая не имеет подложки и буферного пакета, а вместо этого имеет слои серебра на обеих сторонах слоя ВТСП. Лента, которая имеет подложку, будет называться ВТСП-лентой "с подложкой".

ВТСП-ленты могут быть скомпонованы в ВТСП-кабели. ВТСП-кабель содержит одну или более ВТСП-лент, которые соединены по своей длине проводящим материалом (обычно медью). ВТСП-ленты могут быть уложены стопкой (т.е. расположены так, что слои ВТСП являются параллельными), или они могут иметь некоторую другую компоновку лент, которая может изменяться по длине кабеля. Примечательными особыми случаями ВТСП-кабелей являются одиночные ВТСП-ленты и ВТСП-пары. ВТСП-пары содержат пару ВТСП-лент, расположенных так, что слои ВТСП являются параллельными. Когда используется лента с подложкой, ВТСП-пары могут быть типа 0 (со слоями ВТСП, обращенными друг к другу), типа 1 (со слоем ВТСП одной ленты, обращенным к подложке другой) или типа 2 (с подложками, обращенными друг к другу). В кабелях, содержащих более 2 лент, некоторые или все ленты могут размещаться в ВТСП-парах. Уложенные стопкой ВТСП-ленты могут иметь различные компоновки ВТСП-пар, чаще всего либо стопку пар типа 1, либо стопку пар типа 0 (или, эквивалентно, пар типа 2). ВТСП-кабели могут содержать смесь лент с подложкой и отслоенных лент.

Сверхпроводящий магнит образован посредством размещения ВТСП-кабелей (или отдельных ВТСП-лент, которые в целях этого описания могут рассматриваться как одноленточный кабель) в катушки, либо посредством намотки ВТСП-кабелей, либо посредством обеспечения секций катушки, выполненных из ВТСП-кабелей, и соединения их вместе. ВТСП-катушки бывают трех широких классов:

изолированные, имеющие электроизолирующий материал между витками (так что ток может протекать через ВТСП-кабели только по "спиральному пути");

неизолированные, где витки соединены радиально, а также вдоль кабелей (например, посредством соединения стабилизирующих слоев меди ВТСП-кабелей);

частично изолированные, где витки соединены радиально с регулируемым сопротивлением, либо за счет использования материалов с высоким сопротивлением (например, по сравнению с медью), либо посредством обеспечения прерывистой изоляции между катушками.

Неизолированные катушки могут также рассматриваться как случай частично изолированных катушек низкого сопротивления.

Отсутствие изоляции или частичная изоляция между витками замедляет скорость, с которой повышается температура локального "горячего пятна" (нормальной зоны).

Скорость роста (пространственного распространения) нормальной зоны (резистивного ВТСП) в ВТСП-магните зависит от множества параметров, но типично меньше 100 мм/с в осевом направлении (т.е. вдоль кабеля) и приблизительно в 2-100 раз медленнее в поперечном направлении (т.е. между соседними витками). Точная скорость распространения нормальной зоны в каждом направлении зависит от тепловых и электрических свойств используемых материалов и конструкции кабеля. В частности, на скорость поперечного распространения влияют тепловые свойства материала между витками.

В большом магните (с линейными размерами в метры, и когда размеры поперечного сечения катушки являются небольшими (т.е. в ~10 раз меньшими) по сравнению с наибольшим габаритным размером катушки) поперечное распространение может вызывать то, что все поперечное сечение катушки становится нормальным в зоне, охватывающей небольшую долю периферии катушки, приводя в результате к суммарному току всех витков, протекающему в пределах нормального сечения только в металлическом стабилизаторе. За пределами нормальной зоны проводники все еще являются сверхпроводящими. Сопротивление этой нормальной зоны является недостаточным, чтобы вызывать быстрое падение тока магнита, но приводит к тому, что накопленная магнитная энергия всего магнита сбрасывается в этот небольшой нормальный (резистивный) объем, которые медленно растет лишь по периферии катушки. Если только эта ситуация быстро не обнаруживается, так что накопленная энергия магнита может быть сброшена во внешнее по отношению к катушке сопротивление, температура нормальной зоны будет расти очень быстро, что, вероятно, вызовет значительное повреждение проводников в нормальной зоне.

Одним применением ВТСП-магнитов является их использование в термоядерных реакторах токамак и плазменных камерах, в частности в сферических токамаках. Токамак имеет два набора магнитов - катушки полоидального поля, которые выставляются для создания полоидального поля и обычно являются круглыми, и катушки тороидального поля, которые содержат центральную колонну и множество обратных ветвей (обводов) и выполнены и расположены с возможностью создания тороидального поля. ВТСП-магниты могут быть использованы для того или иного набора катушек возбуждения поля, но являются особенно полезными для катушек тороидального поля в небольших токамаках, поскольку такие катушки возбуждения имеют жесткие ограничения по пространству, в чем может значительно помочь улучшенная плотность тока и/или уменьшенные требования к охлаждению ВТСП.

Другое потенциальное применение ВТСП-магнитов состоит в их использовании в устройствах протонно-лучевой терапии. Протонно-лучевая терапия (ПЛТ, также известная как протонная терапия) является разновидностью лучевой терапии заряженными частицами, используемой в лечении злокачественных опухолей (и других состояний, которые реагируют на радиотерапию). В ПЛТ пучок протонов направляется к месту лечения (например, опухоли).

Другой аналогичной терапией является бор-протонозахватная терапия (БПЗТ), при которой бор-11 вводится в целевое место и используется пучок протонов для инициирования реакции $p+^{11}\text{B} \rightarrow \text{Za}$. Один и тот же аппарат может быть использован для подачи пучков протонов либо для ПЛТ, либо для БПЗТ.

Пучки протонов для ПЛТ и БПЗТ создают ускорителями частиц, такими как циклотроны или линейные ускорители. Ускорители, типично используемые для ПЛТ и БПЗТ, типично дают протоны с энергиями в диапазоне 60-250 МэВ, при этом самая мощная в настоящее время действующая установка имеет максимальную энергию 400 МэВ.

Конструкция устройств ПЛТ или БПЗТ требует, чтобы гентри удерживала электромагниты, способные направлять протоны при такой энергии пучка. Это требует очень сильных магнитных полей, и, по сути, применение ВТСП-магнитов может в значительной степени уменьшать массу и размер электромагнитов и гентри, необходимой для их перемещения. ВТСП-магниты могут быть использованы в ускорителе, четырехполюсных магнитах, управляющих пучком магнитов, или двухполюсных магнитах, управляющих пучком магнитов.

Сущность изобретения

Согласно первому аспекту предусмотрен частично изолирующий слой для использования в катушке ВТСП-магнита. Частично изолирующий слой содержит изолирующее тело 401, имеющее внутри себя набор связывающих дорожек и набор воспринимающих дорожек. Каждая связывающая дорожка является электропроводной и электрически соединена с первой и второй поверхностями частично изолирующего слоя для того, чтобы обеспечить электрический путь между упомянутыми первой и второй поверхностями. Каждая воспринимающая дорожка является электропроводной и индуктивно связана с соответствующей связывающей дорожкой и электрически изолирована от первой и второй поверхностей. Каждая из воспринимающих дорожек выполнена с возможностью подключения к токоизмерительному устройству для того, чтобы измерять индуцируемый в воспринимающей дорожке ток по изменению тока, протекающего в соответствующей связывающей дорожке.

Согласно второму аспекту предусмотрен частично изолирующий слой для использования в катушке ВТСП-магнита. Частично изолирующий слой содержит изолирующее тело 701, имеющее внутри себя

набор связывающих дорожек и набор воспринимающих дорожек. Каждая связывающая дорожка является электропроводной и электрически соединена с первой и второй поверхностями частично изолирующего слоя для того, чтобы обеспечить электрический путь между упомянутыми первой и второй поверхностями. Воспринимающая дорожка является электропроводной, простирается по длине частично изолирующего слоя и электрически изолирована от первой и второй поверхностей. Воспринимающая дорожка выполнена с возможностью подключения к устройству измерения напряжения для того, чтобы измерять индуцируемое в воспринимающей дорожке напряжение по изменению тока в ВТСП-проводнике катушки ВТСП-магнита.

Согласно третьему аспекту предусмотрена катушка возбуждения с высокотемпературным сверхпроводником, ВТСП, содержащая один или более ВТСП-кабелей и один или более частично изолирующих слоев, при этом упомянутые один или более ВТСП-кабелей расположены с образованием витков, а упомянутые один или более частично изолирующих слоев расположены соединяющими витки радиально, при этом частично изолирующие слои являются частично изолирующими слоями согласно первому или второму аспекту.

Согласно четвертому аспекту предусмотрен токамак, содержащий катушку тороидального поля, которая является ВТСП-катушкой возбуждения согласно третьему аспекту.

Согласно пятому аспекту предусмотрено устройство протонно-лучевой терапии, ПЛТ, содержащее ВТСП-катушку возбуждения согласно третьему аспекту, при этом ВТСП-катушка возбуждения является одной из:

катушки возбуждения ускорителя устройства ПЛТ;
двухполюсного или четырехполюсного магнита системы направления протонного пучка устройства ПЛТ.

Краткое описание чертежей

Фиг. 1 является схематичной иллюстрацией ВТСП-ленты;
фиг. 2А-Е показывают частично изолирующий слой для ВТСП-катушки;
фиг. 3 показывает принципиальную схему, иллюстрирующую принцип примерного частично изолирующего слоя;
фиг. 4А-Ф показывают примерный частично изолирующий слой;
фиг. 5 показывает альтернативную конструкцию катушки;
фиг. 6А и 6В показывают дополнительную альтернативную конструкцию катушки; и
фиг. 7А и 7В показывают альтернативную конструкцию частично изолирующего слоя.

Подробное описание изобретения

Фиг. 2А-Е показывают частично изолирующий слой, который может быть нанесен между ВТСП-кабелями, чтобы соединять их радиально.

Этот частично изолирующий слой содержит 5 слоев, которыми являются, в указанном порядке:

первый металлический соединительный слой 211;

первый изолирующий слой 221;

электропроводящий слой 230;

второй изолирующий слой 222;

второй металлический соединительный слой 212.

Фиг. 2С-Е показывают компоновку первого металлического соединительного слоя 211, электропроводящего слоя 230 и второго металлического соединительного слоя 222 соответственно. Фиг. 2А и В являются сечениями по линиям А и В на фиг. 2С-Е.

Соединительный слой присутствует для обеспечения лучшего электрического соединения с ВТСП-кабелями (посредством пайки или прямого контакта).

Электропроводящий слой подразделен на несколько проводящих областей. Эти области бывают двух типов. Квадратные области 231 (хотя на практике они могут быть любой формы) соединены проводящими перемычками 206 только с одним из металлических соединительных слоев. Эти области не влияют на электрические свойства частично изолирующего слоя, но обеспечивают тепловой мостик через соответствующий изолирующий слой. Изменяя размер этих областей и число соединений между ними и металлическим соединительным слоем, можно изменять термические свойства частично изолирующего слоя независимо от его электрических свойств.

Другие области 232, каждая, соединяют первый металлический соединительный слой 211 со вторым металлическим соединительным слоем 212 через окна 201, 202 в первом изолирующем слое 221 и втором изолирующем слое 222, соответственно. Сопротивлением между окнами можно управлять, изменяя геометрию областей 232, например, когда область 232 содержит удлиненную дорожку 233, как показано на фиг. 2В, причем увеличение ширины дорожки уменьшит сопротивление между окнами, а увеличение длины дорожки (например, посредством обеспечения нелинейной дорожки или посредством перемещения окон) увеличит сопротивление между окнами. Сопротивлением всего частично изолирующего слоя можно управлять, как изменяя сопротивление каждого соединения между окнами, так и изменяя число таких соединений вдоль частично изолирующего слоя.

Окна 201 в первом изолирующем слое образованы просверленными через первый соединительный

слой и первый изолирующий слой отверстиями, которые затем покрыты металлом 203 (или другим электропроводным материалом), чтобы соединить первый соединительный слой 211 и электропроводящий слой 230. Окна 202 во втором изолирующем слое формируются посредством сверления отверстия 202 сквозь все слои, которое затем покрывается металлом 204 (или другим электропроводным материалом). Чтобы предотвратить формирование соединения с первым соединительным слоем через окна 202 второго изолирующего слоя, первый соединительный слой вытравляется вокруг окна 202, чтобы электрически изолировать его, и на конец окна 202 помещается изолирующий колпачок 205, чтобы гарантировать, что вследствие пайки или контакта с ВТСП-кабелем не возникнет замыкание.

В качестве альтернативы, окна 202 могут вместо этого быть просверлены с другой стороны частично изолирующего слоя, так что они проходят сквозь второй соединительный слой, второй изолирующий слой и электропроводящий слой и не проходят сквозь (или не проходят полностью сквозь) первый изолирующий слой. В качестве дополнительной альтернативы, все окна могут быть сформированы из отверстий, которые проходят сквозь все слои, с помощью травления второго соединительного слоя и изолирующего колпачка на втором соединительном слое, используемого для окон 201 первого изолирующего слоя.

Эта реализация и относящиеся к ней примеры дополнительно описаны в поданной тем же заявителем заявке PCT/GB2019/050275.

Использование частичной изоляции значительно продлит время, доступное для обнаружения нарушения сверхпроводимости, по сравнению с эквивалентной неизолированной катушкой. Однако все еще существует необходимость в способах обнаружения нарушения сверхпроводимости, которые являются достаточно быстрыми, чтобы своевременно обнаружить формирующееся в катушке горячее пятно с тем, чтобы можно было предпринять контрмеры прежде, чем повреждение магнита становится неизбежным.

Когда величина тока в части ВТСП-кабеля катушки достигает критического тока ВТСП-кабеля, некоторая часть тока покинет ВТСП и начнет протекать через стабилизирующие слои кабеля. В этот момент ток начнет протекать через резистивные и индуктивные переемы, образующие частичную изоляцию между ВТСП-витками. Изготовленная в виде печатной платы (PCB) частичная изоляция облегчает точную компоновку и проектирование связывающих дорожек, обеспечивая возможность точной настройки межвиткового сопротивления и индуктивности связывающей дорожки.

Настоящее изобретение сосредоточено на обнаружении того, что ток протекает, и использовании этого обнаружения для того, чтобы обнаруживать тот момент, когда в ВТСП-магните начинается происходить такое перераспределение тока. Обнаружение этого режима перераспределения тока может быть использовано в качестве улучшенного предупреждения о нарушении сверхпроводимости (или потенциальном нарушении сверхпроводимости - используемый в данном документе термин "обнаружение нарушения сверхпроводимости" включает в себя обнаружение надвигающихся нарушений сверхпроводимости или условий, вероятно вызывающих нарушение сверхпроводимости).

Этот принцип схематично показан на фиг. 3, которая является принципиальной схемой, представляющей частично изолирующий слой. Частично изолирующий слой имеет первую дорожку, или "связывающую дорожку" 301, которая соединяет ВТСП-кабели 311, 312 по обе стороны частично изолирующего слоя (эквивалентно дорожкам 233 на фиг. 2). Частично изолирующий слой также имеет вторую дорожку, или "воспринимающую дорожку", 302, которая электрически изолирована от ВТСП-кабелей 311, 312 и индуктивно связана с первой дорожкой (представлено трансформатором 303). Вторая дорожка 302 соединена с контрольно-измерительным прибором 304 для изменения тока. Отметим, что, хотя на фиг. 3 резистор и трансформатор показаны отдельно, в нижеприведенных примерах сопротивление и индуктивная связь возникают вследствие длины и формы самой дорожки, т.е. резистор и трансформатор не должны быть предусмотрены в виде отдельных компонентов.

Вследствие индуктивной связи между первой и второй дорожками любое изменение тока в первой дорожке (например, из-за нарушения сверхпроводимости) будет вызывать соответствующее изменение тока во второй дорожке. Это может быть обнаружено контрольно-измерительным прибором для измерения тока, а результаты измерения тока от этого контрольно-измерительного прибора могут быть использованы контроллером магнита, чтобы обнаружить нарушение сверхпроводимости.

Для улучшения чувствительности обнаружения нарушения сверхпроводимости могут быть использованы различные модификации. Например, связывающим и воспринимающим дорожкам можно придавать форму, обеспечивающую большую индуктивную связь, например, в виде катушек, которые совместно используют общую ось. Могут быть предусмотрены множественные воспринимающие дорожки (каждая из которых соответствует отдельной связывающей дорожке), подключенные параллельно друг другу и к контрольно-измерительному прибору для измерения тока, так что этот контрольно-измерительный прибор измеряет суммарный ток, индуцируемый во всех воспринимающих дорожках.

Фиг. 4А-Е показывают примерный частично изолирующий слой, реализующий схему по фиг. 3. Частично изолирующий слой содержит одиннадцать слоев, из которых 6 слоев содержат электропроводящие элементы, каждый из которых отделен изолирующим слоем 401 (который может быть либо изолятором, на котором напечатаны электропроводящие слои, например лентой картона™, или изолирующим клеем). Слои, содержащие электропроводящие элементы, представляют собой, в указанном порядке:

первый металлический соединительный слой 410, показанный на фиг. 4B;
 слой 420 связывающих дорожек, показанный на фиг. 4C;
 слой 430 воспринимающих дорожек, показанный на фиг. 4D;
 слой 435 соединения воспринимающих дорожек, показанный на фиг. 4E;
 второй металлический соединительный слой 440, показанный на фиг. 4F;
 фиг. 4A является разрезом по линии А-А на фиг. 4B-F.

Первый и второй металлические соединительные слои 410, 440 являются практически такими же, что и слои в случае предыдущего примера, т.е. они являются уместными для обеспечения электрического соединения с ВТСП-кабелями.

Слой связывающих дорожек содержит несколько связывающих дорожек 421, образованных в этом примере как спирали 422, имеющие хвост 423. Центр спирали 422 соединяется с проводящей перемычкой 402, которая простирается через изолирующий слой, соединяя связывающую дорожку 421 с первым металлическим соединительным слоем, а противоположный конец хвоста 423 соединяется с проводящей перемычкой 403, которая соединяет связывающую дорожку 421 со вторым металлическим соединительным слоем. Проводящие перемычки могут быть сформированы в виде покрытых металлом (металлизированных) отверстий, как в предыдущем примере.

Слой 430 воспринимающих дорожек содержит воспринимающую дорожку 431, соответствующую каждой из связывающих дорожек 421. Каждая воспринимающая дорожка является спиралью таких же размеров, что и соответствующая связывающая дорожка 421, и располагается непосредственно под ней. Каждая воспринимающая дорожка соединена с шиной 432 на внешней стороне спирали и с шиной 433 через внутреннюю часть спирали посредством проводящей перемычки 404, которая соединяет внутреннюю часть спирали с дорожкой 436 в слое 435 соединения воспринимающих дорожек, и проводящей перемычки 405, которая соединяет дорожку 436 с шиной 433.

Подключение воспринимающих дорожек 431 к шинам 432, 433 гарантирует, что воспринимающие дорожки 431 соединены параллельно. Это означает, что, когда шины 432, 433 соединяются через измеритель тока (не показан, но шины имеют контактные площадки 434, которые простираются до края слоя, обеспечивая возможность присоединения к шинам других участков частично изолирующего слоя или к измерителю тока), ток, измеряемый измерителем тока, будет суммой токов в воспринимающих дорожках.

Проводящие перемычки 403 между слоем связывающих дорожек и вторым металлическим соединительным слоем также проходят через слой воспринимающих дорожек и слой соединения воспринимающих дорожек, но они электрически не соединены с другими элементами в таких слоях.

Чтобы избежать помех, связывающие и воспринимающие дорожки должны быть расположены так, что они не связываются значительно с магнитным полем магнита, например, имея ничтожно малое (пренебрежимое) сечение, перпендикулярное локальному магнитному полю. Этого можно достичь, расположив их в плоскости частично изолирующего слоя, как показано в приведенных выше примерах, но также возможны и другие ориентации.

Фиг. 5 показывает альтернативное расположение связывающих дорожек (которое может также быть применено к воспринимающим дорожкам). Вместо обеспечения изогнутых спиральных катушек, как на фиг. 4C, связывающие дорожки в слое 520 связывающих дорожек (который может быть заменен на слой 420 связывающих дорожек, как требует конструкторский замысел) предусмотрены в виде прямоугольных катушек 522.

Фиг. 6A и 6B показывают дополнительное альтернативное расположение связывающих дорожек. Слой 420 связывающих дорожек по фиг. 4A заменяется первым и вторым слоями 620, 625 связывающих дорожек. Связывающие дорожки формируются как "катушки-бабочки" с рисунком наподобие "восьмерки". Вследствие этого рисунка, содержащего область, где дорожки пересекались бы между собой, их следует размещать в два слоя, чтобы избегать коротких замыканий, - одно такое расположение показано на фиг. 6A и 6B, с главной частью катушки-бабочки 622, предусмотренной на слое 620, и пересекающимися дорожками 626, предусмотренными на отдельном слое 625, с проводящими перемычками 627 между пересекающимися дорожками и главной частью катушки-бабочки. Возможны и другие расположения, которые исключают короткое замыкание и которые могут быть легко представлены специалистом.

Конструкции катушек на фиг. 4-6 приведены только в качестве примера. Любое расположение, которое приводит в результате к тому, что воспринимающие дорожки чувствительны к изменениям тока связывающих дорожек (т.е. индуктивно связаны со связывающими дорожками), может быть использовано для обнаружения утечки тока через частично изолирующий слой.

Альтернативная конструкция показана на фиг. 7A и B. Фиг. 7 показывает частично изолирующий слой 701, содержащий:

первый металлический соединительный слой (идентичный слою 211 на фиг. 2A-E);
 слой связывающих дорожек (идентичный слою 230 на фиг. 2A-E);
 слой 710 воспринимающих дорожек; и
 второй металлический соединительный слой (идентичный слою 212 на фиг. 2A-E).

Эти слои разделены изолирующими слоями 701, как в предыдущих примерах.

Слой 710 воспринимающих дорожек содержит воспринимающую дорожку 711, которая простирается

вдоль катушки для того, чтобы связываться со спиральным путем ВТСП-магнита, и проводящие переемычки 712, которые соединяют слой связывающих дорожек со слоем внешнего интерфейса (без соединения с воспринимающей дорожкой). Воспринимающая дорожка 711 имеет контактные площадки 712 на каждом конце, которые затем соединяются с вольтметром. Воспринимающая дорожка 711 находится в непосредственной близости к проводнику катушки и будет индуктивно связываться с ним. Напряжения, которые появляются на катушке, также будут возникать на этой совместно намотанной дорожке и будут обнаруживаться вольтметром. Дополнительные контактные площадки могут быть предусмотрены по длине частично изолирующего слоя, обеспечивая возможность его легкого изготовления в массиве и затем нарезки на длину, которая требуется для магнита (т.е. гарантируя, что контактная площадка может быть доступной на конце частично изолирующего слоя, независимо от размера ВТСП-катушки).

Частично изолирующие слои, описанные выше, могут быть изготовлены с помощью процесса изготовления гибкой РСВ, т.е. начиная с одного из изолирующих слоев, нанесения меди на его верхнюю и нижнюю поверхность и травления меди с образованием двух соседних электропроводящих слоев. Дополнительные слои могут быть добавлены посредством нанесения дополнительных изолирующих слоев и медных слоев на эту "стопку" (где изолирующий слой может быть склеен, используемым для присоединения следующего медного слоя к "стопке") и затем травления, или посредством присоединения друг к другу дополнительных покрытых медью и протравленных изолирующих слоев (например, с образованием конструкции медь-изолятор-медь-клей-медь-изолятор-медь). Переходные отверстия под межсоединения могут быть просверлены через соответствующие медные и изолирующие слои и затем покрыты медью, чтобы обеспечить соединение между медными слоями (т.е. проводящие переемычки из вышеприведенных примеров). Если межсоединение проходит через слой, с которым оно не должно электрически соединяться, то область этого слоя вокруг межсоединения может быть вытравлена, чтобы обеспечить чистое изолирующее пространство между межсоединением и электропроводящими компонентами такого слоя. Когда это происходит на внешнем слое (например, металлических соединительных слоях 410, 440), к концу межсоединения может быть прикреплен изолирующий колпачок, чтобы предотвращать короткие замыкания вследствие пайки или подключения к ВТСП-кабелю.

Хотя описанное выше ссылается на единственный "частично изолирующий слой" для катушки, будет понятно, что он может состоять из нескольких участков (секций), соединенных встык, либо с помощью соединений между слоями воспринимающих дорожек, либо с отдельным датчиком тока для каждого участка слоя воспринимающих дорожек (или некоторого сочетания - например, датчика тока для каждого N участков).

Частично изолирующий слой может иметь ту же ширину, что и ВТСП-лента. Способ намотки плоских (дисковых) ВТСП-катушек может подразумевать разматывание ВТСП-ленты с множественных бобин с образованием "кабеля" из множества лент, которые собираются в катушке. Частично изолирующий слой мог бы подаваться в этот многоленточный кабель, образуя часть обмотки. Результирующая структура катушки была бы многоленточным кабелем, чередующимся с частично изолирующим слоем. Внешние поверхности лент и частично изолирующего слоя предварительно смачиваются флюсом, а затем намотанный комплект объединяется заливкой припоём. Впоследствии лицевые поверхности катушки очищаются, чтобы гарантировать, что слои частично изолирующего слоя не шунтированы переемычками припоёя от витка к витку.

После намотки и объединения конец частично изолирующего слоя на внешнем диаметре катушки слегка расслаивается так, чтобы пара тонких проводов могла быть прикреплена к контактным площадкам на конце слоя воспринимающей катушки. Эта скрученная пара проводов связывает с преобразователем тока, используемым для обнаружения сигнала тока, протекающего в такой пропускающей изоляции.

Будет понятно, что вышеприведенные примеры могут быть модифицированы простыми способами без отступления от принципа изобретения (т.е. обеспечения наличия воспринимающих дорожек, индуктивно связанных либо с ВТСП-катушкой, либо с резистивными тактами через частично изолирующий слой). Например, соединительные слои на внешних поверхностях частично изолирующих слоев могут быть исключены, а соединение между слоем связывающих дорожек и ВТСП-кабелями выполнено непосредственно через проводящие переемычки, или частично изолирующий слой может иметь связывающие и воспринимающие дорожки, размещенные в сплошном изолирующем теле, а не в многослойной конструкции, представленной выше.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Токонесущий узел для использования в катушке магнита с высокотемпературным сверхпроводником (ВТСП), содержащий частично изолирующий слой и первый и второй ВТСП-кабели; причем частично изолирующий слой содержит: изолирующее тело 401, имеющее внутри себя: набор связывающих дорожек 421, при этом каждая связывающая дорожка является электропроводной и электрически соединена с первой и второй поверхностями частично изолирующего слоя для того, чтобы обеспечить электрический путь между упомянутыми первой и второй поверхностями; набор воспринимающих дорожек 431, при этом каждая воспринимающая дорожка является элек-

тропроводной и индуктивно связана с соответствующей связывающей дорожкой и электрически изолирована от первой и второй поверхностей;

при этом первый и второй ВТСП-кабели находятся на соответствующих первой и второй поверхностях частично изолирующего слоя; и

при этом каждая из воспринимающих дорожек электрически соединена с электрическими контактами на поверхностях частично изолирующего слоя, отличных от первой и второй поверхностей.

2. Токонесущий узел по п.1, при этом упомянутый набор воспринимающих дорожек соединен параллельно и выполнен с возможностью подключения параллельно токоизмерительному устройству.

3. Токонесущий узел по п.2, при этом воспринимающие дорожки расположены так, что, когда частично изолирующий слой соединен встык с идентичным дополнительным частично изолирующим слоем, воспринимающие дорожки на обоих частично изолирующих слоях соединены параллельно друг с другом и с токоизмерительным устройством через упомянутые электрические контакты.

4. Токонесущий узел по любому предшествующему пункту, при этом каждая воспринимающая дорожка и каждая связывающая дорожка имеет участок, который является спиралью.

5. Токонесущий узел по любому из пп.1-3, при этом каждая воспринимающая дорожка и каждая связывающая дорожка имеет участок, который является катушкой типа бабочка.

6. Токонесущий узел по любому предшествующему пункту, при этом каждая связывающая дорожка электрически соединена с упомянутыми первой и второй поверхностями посредством межсоединений, которые покрыты электрическим проводником.

7. Токонесущий узел для использования в катушке магнита с высокотемпературным сверхпроводником (ВТСП), содержащий частично изолирующий слой и первый и второй ВТСП-кабели;

причем частично изолирующий слой содержит изолирующее тело 701, имеющее внутри себя:

набор связывающих дорожек 231, при этом каждая связывающая дорожка является электропроводной и электрически соединена с первой и второй поверхностями частично изолирующего слоя для того, чтобы обеспечить электрический путь между упомянутыми первой и второй поверхностями;

воспринимающую дорожку 711, при этом воспринимающая дорожка является электропроводной, простирается по длине частично изолирующего слоя и электрически изолирована от первой и второй поверхностей; при этом первый и второй ВТСП-кабели находятся на соответствующих первой и второй поверхностях частично изолирующего слоя; и

при этом воспринимающая дорожка имеет электрические контакты на поверхностях частично изолирующего слоя, отличных от первой и второй поверхностей.

8. Токонесущий узел по п.7, при этом воспринимающие дорожки расположены так, что, когда частично изолирующий слой соединен встык с идентичным дополнительным частично изолирующим слоем, воспринимающие дорожки на обоих частично изолирующих слоях соединены последовательно друг с другом и с устройством измерения напряжения через упомянутые электрические контакты.

9. Токонесущий узел по любому предшествующему пункту, при этом частично изолирующий слой сформирован в виде множества слоев, причем каждый слой отделен изолирующим материалом, а слои содержат:

слой связывающих дорожек, имеющий внутри себя связывающие дорожки; и

слой воспринимающих дорожек, имеющий внутри себя воспринимающие дорожки;

при этом электрическое соединение между связывающими дорожками и первой и второй поверхностями достигается посредством содержащих электропроводный материал межсоединений сквозь изолирующий материал.

10. Токонесущий узел по любому предшествующему пункту, содержащий на каждой из первой и второй поверхностей электропроводный соединительный слой, электрически соединенный на одной стороне со связывающими дорожками, а на другой стороне с соответствующим ВТСП-кабелем.

11. Катушка возбуждения с высокотемпературным сверхпроводником (ВТСП), содержащая один или более токонесущих узлов по любому предшествующему пункту, при этом упомянутые ВТСП-кабели расположены с образованием витков, а упомянутые частично изолирующие слои расположены соединяющими витки радиально.

12. ВТСП-катушка возбуждения по п.11, при этом упомянутые один или более ВТСП-кабелей и один или более частично изолирующих слоев непрерывно намотаны с образованием витков.

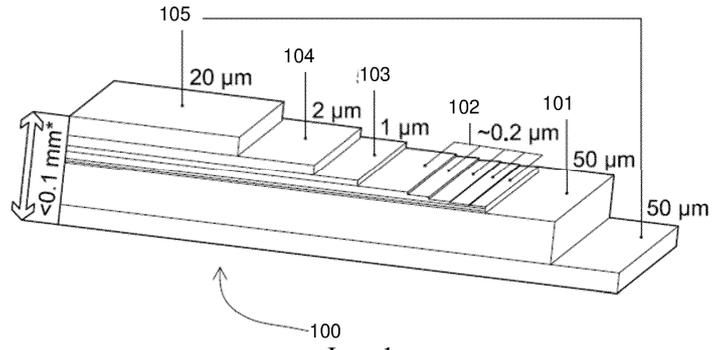
13. ВТСП-катушка возбуждения по п.11, при этом упомянутые один или более ВТСП-кабелей и упомянутые один или более частично изолирующих слоев расположены во множестве секций, соединенных стыками.

14. Токамак, содержащий катушку тороидального поля, которая является ВТСП-катушкой возбуждения по любому из пп.11-13.

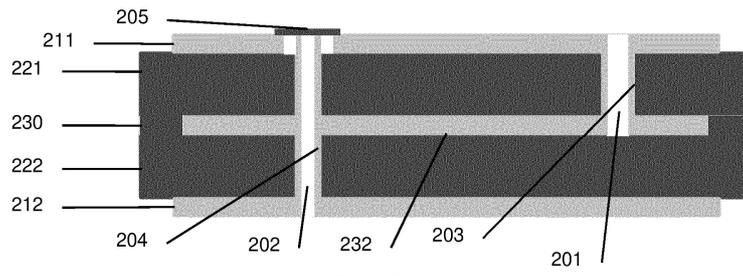
15. Устройство протонно-лучевой терапии (ПЛТ), содержащее ВТСП-катушку возбуждения по любому из пп.11-13, при этом ВТСП-катушка возбуждения является одной из:

катушки возбуждения ускорителя устройства ПЛТ;

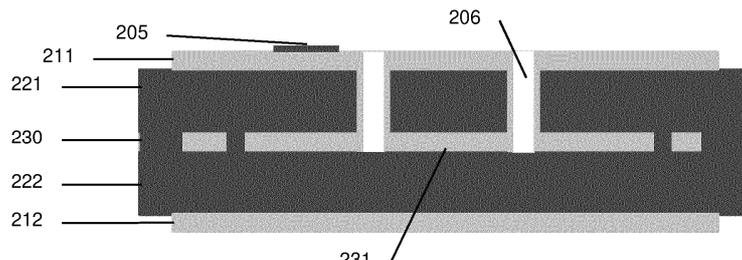
двухполюсного или четырехполюсного магнита системы направления протонного пучка устройства ПЛТ.



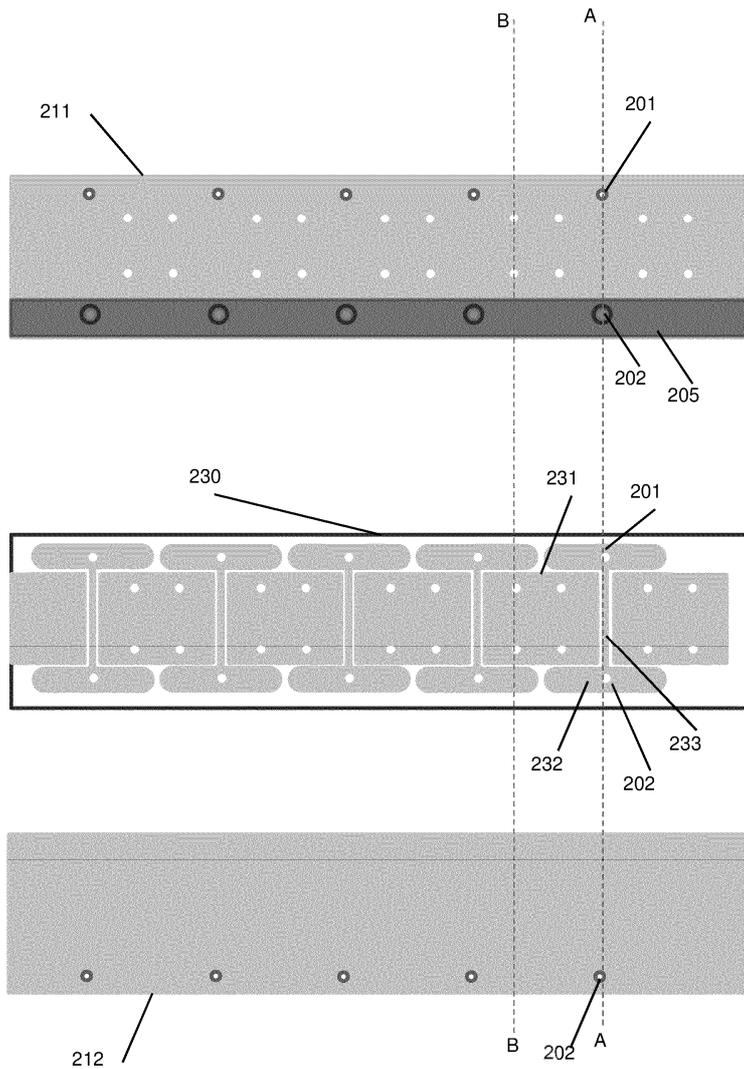
Фиг. 1



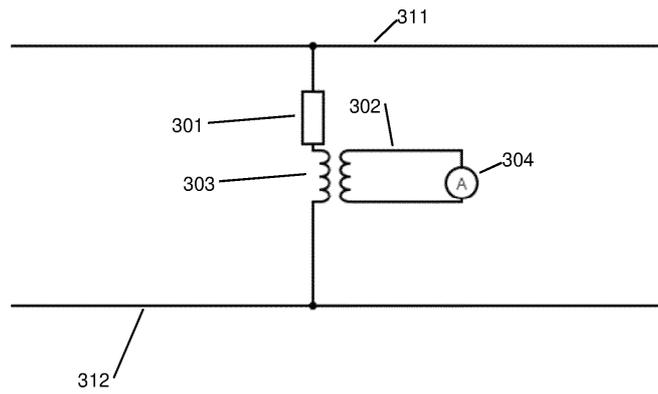
Фиг. 2А



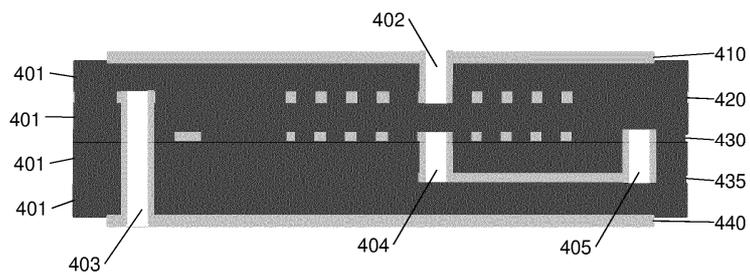
Фиг. 2В



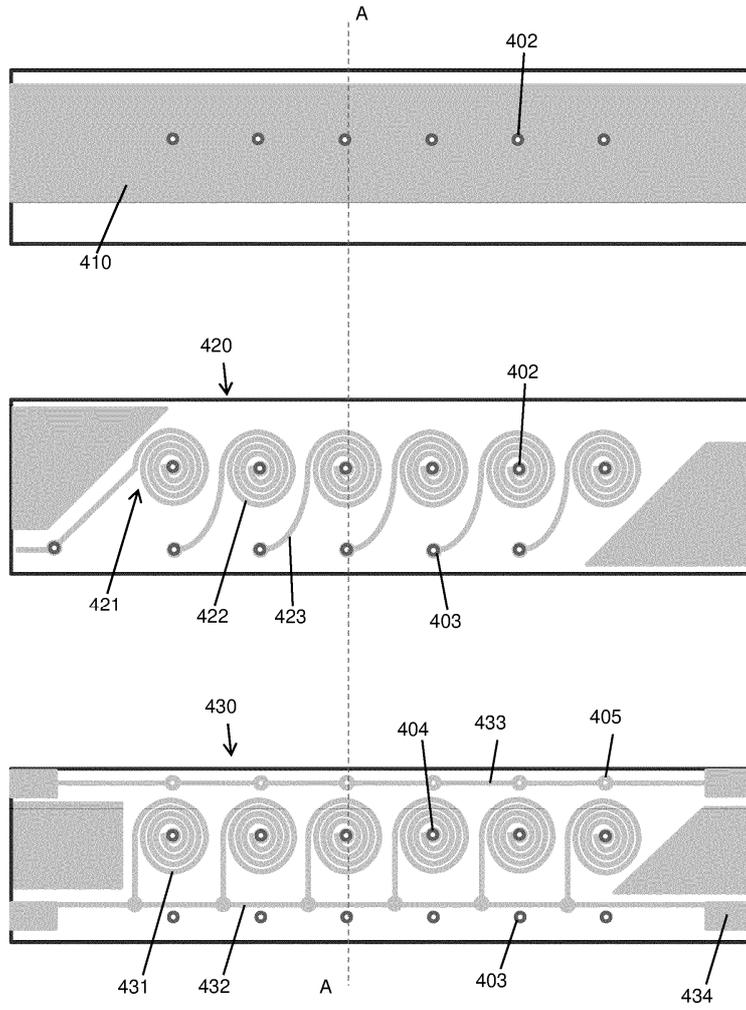
Фиг. 2С-2Е



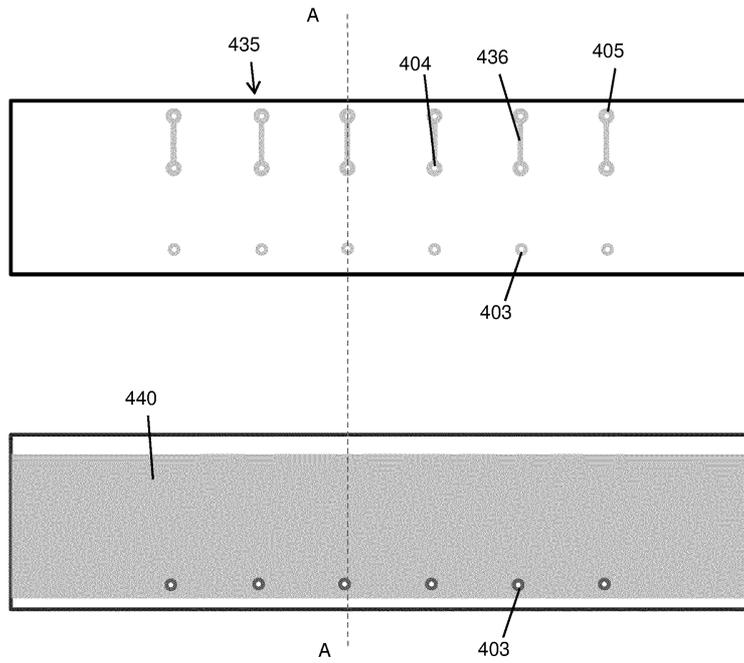
Фиг. 3



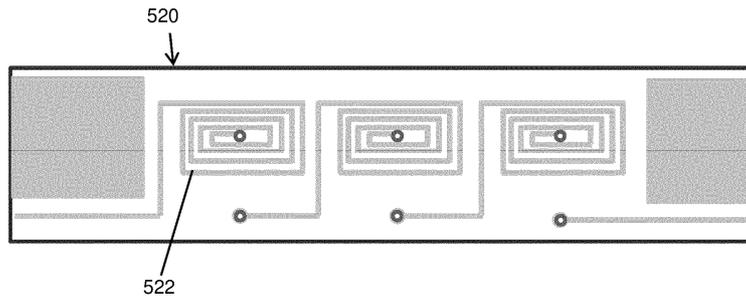
Фиг. 4А



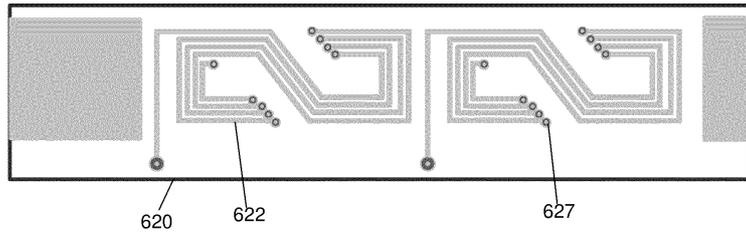
Фиг. 4В-4D



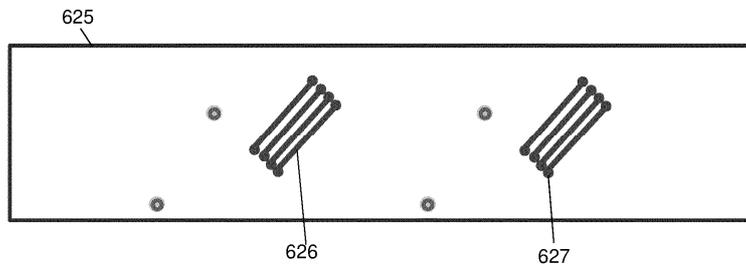
Фиг. 4Е-4F



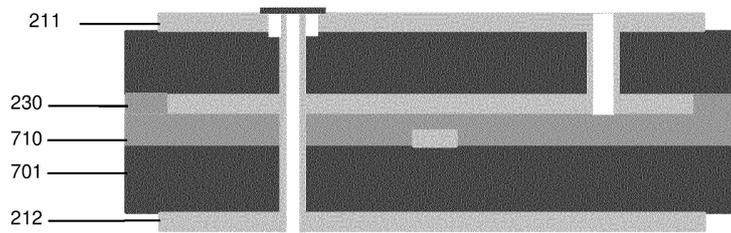
Фиг. 5



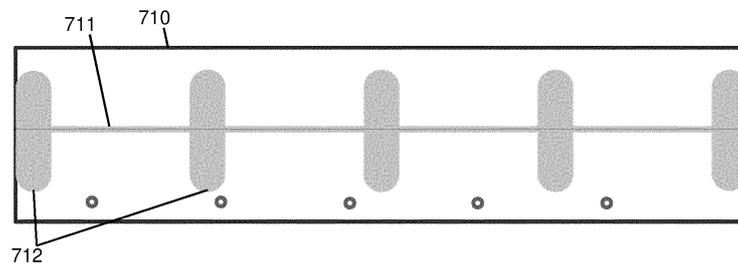
Фиг. 6А



Фиг. 6В



Фиг. 7А



Фиг. 7В

