

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **039446**(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2022.01.27

(21) Номер заявки
201890310

(22) Дата подачи заявки
2016.07.09

(51) Int. Cl. **G01L 1/18 (2006.01)**
G01L 1/20 (2006.01)
G01L 1/26 (2006.01)

(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА НЕГО СИЛЫ (F)

(31) **10 2015 111 425.9**

(32) **2015.07.14**

(33) **DE**

(43) **2018.05.31**

(86) **PCT/DE2016/100305**

(87) **WO 2017/008784 2017.01.19**

(71)(72)(73) Заявитель, изобретатель и
патентовладелец:

КЛЕММ ЙАН (DE)

(74) Представитель:
Андрушак Г.Н. (RU)

(56) **DE-A1-102010024808**
US-A1-2003164047
DE-A1-10253178

- (57) Устройство для электрического измерения силы F , которая минимально действует между двумя прижатыми друг к другу металлическими электродами (1) и металлическим электродом (3) и отличается тем, что металлические электроды из твердого сплава, стали или низкоомных слоев металла на керамике, стекле или пластмассе с электрическим сопротивлением в диапазоне от нескольких миллиом до не более чем 10 Ом и средней глубиной шероховатости R_a не более 400 нм обладают не зависящей от силы проводимостью на контактных поверхностях, а сила, которая непосредственно действует на тонкий слой изоляции (2) или тонкий слой многослойной изоляции (2), расположенный между металлическим электродом (1) и металлическим электродом (3) с геометрическим замыканием и состоящий из оксида цинка или восстановленного случайным образом оксида алюминия Al_2O_x при значениях от $x=2,4$ до $x=2,8$, или карбида кремния, или слоя DLC [алмазоподобное углеродное покрытие], при минимальной относительной деформации металлического электрода (1) и металлического электрода (3) в пределах не более 0,1 промилле, и что эталонный металлический электрод (4), расположенный так, что он не зависит от измеряемого силового потока и зафиксирован крепежным элементом (5) с постоянной удерживающей силой, который электрически воздействует на металлический электрод (3) через конструктивно идентичный тонкий слой изоляции (2) или тонкий слой многослойной изоляции (2) с точно таким же физическим поведением, так что такое эталонное сопротивление тонкого слоя изоляции между металлическим электродом (3) и металлическим электродом (4) испытывает постоянную силу прижима для полной температурной компенсации измерительного устройства, служит полумостом или мостом, причем по контуру в последовательном соединении от металлического электрода (1) через тонкий слой изоляции (2) к металлическому электроду (3) и через тонкий слой изоляции (2) к металлическому электроду (4) протекает ток от высокоточного источника тока (6), так что при прохождении через тонкий слой изоляции между металлическим электродом (1) и металлическим электродом (3) имеет место зависящее от силы уменьшение напряжения (8), а между металлическим электродом (3) и металлическим электродом (4) - эталонное уменьшение напряжения (9), соответствующее эталонному тонкому слою изоляции (2), соотношение таких напряжений не зависит от температуры, причем результирующее напряжение измерительного моста или соотношение напряжений, измеренное напрямую, представляет собой постоянную, поддающуюся точному описанию воспроизводимую функцию с высоким разрешением, которая определяет воздействующую силу независимо от рабочей температуры установки для электрического измерения силы.

B1**039446****039446****B1**

Изобретение касается устройства для электрического измерения силы, возникающей между минимум двумя металлическими электродами, при котором в качестве сенсорного элемента используется минимум один тонкий слой изоляции, электропроводность которого связана с воздействующей силой однозначной, точно выводимой функцией.

В целом изобретение относится к области техники для измерения силы, причем новые возможности применения изобретения, отличающих его от известного уровня техники, достигаются с помощью упрощения конструкции датчиков силы без деформации корпуса. При этом отличительной особенностью конструкции является использование одного или нескольких однородных слоев изоляции, наносимых на плоские или однородные поверхности механических элементов передачи силы таким образом, что между электрически изолированными элементами передачи силы и металлическими электродами возможна установка датчика, который напрямую и без существенной деформации этих элементов будет генерировать сигнал в форме зависящего от силы изменения напряжения при заданном токе, представляющего собой обладающее высоким уровнем разрешения однозначное непрерывное отражение силы, оказывающей воздействие на прямом механическом и электрическом пути.

Данная технология позволит создавать датчики с высоким уровнем термостойкости, зависящим от выбранного тонкого слоя изоляции как в миниатюрном исполнении, а именно для монтажного пространства менее одного кубического миллиметра и измерения силы в миллиньютоновом диапазоне, так и в любом размере в макроисполнении, для измерения силы в диапазоне от нескольких ньютонов до нескольких миллионов ньютонов, причем в зависимости от задачи на измерение возможно получить любую геометрическую форму передающих силу механических элементов с размещенными на них тонкими слоями изоляции, любое монтажное пространство, направление воздействия силы и коэффициенты механической передачи.

Например, произвольный выбор угла внутреннего и внешнего усеченного конуса, на наружную поверхность которого наносится тонкий слой изоляции, позволяет получить конструктивно необходимую чувствительность измерения и в зависимости от геометрического исполнения датчик тяги либо датчик давления. Дополнительную степень свободы при разработке механического и электрического исполнения датчиков силы обеспечивает возможность выбора материала, конструкции и химического состава тонкого слоя изоляции (или системы слоев), который наносится на передающие силу элементы, причем в зависимости от задач измерения за счет этого слоя можно обеспечить любые характеристики термостойкости и чувствительности измерения. Возможна также реализация как миниатюрных, так и крупных сочетаний из нескольких датчиков силы с тонким слоем изоляции в конструкции комбинированного сенсорного блока, чтобы, например, определять величину и направление действующей в пространстве силы по трем направлениям: ширине (составляющая x), длине (составляющая y), глубине (составляющая z).

В целом тензорезистивный эффект достаточно хорошо известен из предыдущего уровня техники, а первые публикации о нем появились примерно в 1920 г. Тензорезистивный эффект описывает изменение электрического сопротивления материала под действием значительной внешней силы или давления. Этот эффект наблюдается у всех материалов, обладающих электропроводностью от умеренной до высокой, но у полупроводников чувствительность к давлению во много раз выше, чем у металлов. Принципиально необходимо установить, что такое изменение сопротивления под воздействием внешней силы в результате чувствительности к давлению можно увеличить, если целенаправленно подобрать у полупроводников ориентацию одиночного кристалла в направлении протекания электрического тока и легирование примесными атомами материала носителя.

Тензорезистивный эффект можно наблюдать также на примере слоев аморфного углерода с алмазоподобной структурой кристаллической решетки, как описано в патенте DE 19954164 B4, причем необходимо установить, что влиять на выраженность тензорезистивного эффекта при помощи целенаправленного подбора химического состава и вида структуры кристаллической решетки можно не только в случае использования слоев аморфного углерода, но и в случае использования других тонких слоев и многослойных систем, так называемых "многоуровневых слоев", таких как, например, нитрид алюминия-титана, нитрид алюминия-хрома, оксинитрид циркония или оксинитрид алюминия-хрома и многие другие, причем включение примесных атомов или молекулярных структур в качестве зерен в слой-носитель нанокompозитного материала позволяет значительно усилить тензорезистивный эффект. То есть чувствительность, выражающаяся в изменении электрического сопротивления согласно уровню действующей механической силы или давления, значительно повышается, так как в зависимости от сочетания материалов и имеющихся дефектов решетки в полупроводниках высвобождаются дополнительные носители заряда, зависящие от давления, в форме ионов и(или) электронов. Этот эффект известен еще с 1920 г.; однако благодаря техническому прогрессу и развитию способов изготовления и применения систем слоев появляются новые комбинации материалов и системы слоев, которые, с одной стороны, могут наноситься на самые разные материалы, например на поверхности из металла, керамики, стекла или пластмассы, а с другой стороны - имеют состав, по электрическим свойствам очень близкий к полупроводникам.

Однако такие тензорезистивные слои демонстрируют очень сильный дрейф сопротивления в зависимости от температуры: относительное температурозависимое изменение сопротивления составляет от

-0,4 до приблизительно -1,2% на 1 кельвин повышения температуры - это также известный технический факт. Такие слои и структуры позволяют создавать дискретные электронные компоненты и схемы на планарных материала-носителях, например на стекле, как при производстве современных плоских экранов. Также такие поверхности с покрытием отличаются чрезвычайной механической прочностью, превосходящей твердые сплавы по прочности на сжатие более чем на 2 ГПа, и устойчивы к температурам в диапазоне от -100 до 1200°C, что зависит от выбранного материала носителя и используемой системы слоев.

Патент DE 102010024808 A1 описывает конструкцию датчика с тензорезистивным тонким слоем структурированного углерода и электронным измерительным устройством. Используются только слои углерода (DLC, алмазоподобное углеродное покрытие). Такие слои имеют очень низкое электрическое сопротивление. Использование структурированного тензорезистивного функционального слоя ведет к высокой стоимости изготовления поверхностей, на которые воздействует сила. Кроме того, функциональный слой из DLC имеет покрытие для защиты от износа, что может приводить к электрическим помехам в работе измерительного устройства.

Патент US 2003/0164047 A1 описывает датчик силы с элементом регистрации силы и элементом для температурной компенсации, причем оба элемента изготавливаются из одного материала и имеют одинаковые размеры.

Патент DE 10253178 A1 описывает применение слоя из алмазоподобного углерода в качестве температурного датчика, преимущественно для использования в участках механизмов, подвергающихся трибологическим нагрузкам. Дополнительно включена возможность одновременного измерения давления и температуры с использованием разных участков слоя.

Перечень фигур

Фиг. 1 - вид в разрезе ячейки для измерения силы с тонким слоем изоляции в разрезе - эталонный тонкий слой изоляции для температурной компенсации используется в качестве электрического измерительного полумоста.

Фиг. 2 - вид в разрезе ячейки для измерения силы с тонким слоем изоляции в разрезе - эталонный тонкий слой изоляции для температурной компенсации используется в качестве устройства для измерения сопротивлений.

Фиг. 3 - вид в разрезе ячейки для измерения силы с тонким слоем изоляции в разрезе - эталонный тонкий слой изоляции для температурной компенсации в двукратном исполнении используется в качестве высокочувствительного моста.

Фиг. 4 - вид в разрезе ячейки для измерения силы с тонким слоем изоляции для одновременной регистрации сил, действующих в двух направлениях - F_x и F_y - эталонный тонкий слой изоляции для температурной компенсации, используемый в качестве электрического устройства для многоканального измерения сопротивлений.

Фиг. 5 - конструкция и схема измерения n-мерного датчика силы с тонким слоем изоляции - n-мерная схема измерения с многоканальным эталонным тонким слоем изоляции, используемым для температурной компенсации; сверху: сегмент двумерного датчика с тонким слоем изоляции, вид в разрезе;

внизу: пример варианта осуществления изобретения с поворотным расположением сегментов из $n=4$ двумерных блоков датчиков с $4 \times 2 = 8$ измерительными каналами для определения направления силы и измерения ее составляющей. Обозначения:

E1-1 и E1-2 - пара электродов $F_y + F_x$, угол поворота 0° ;

E2-1 и E2-2 - пара электродов $F_y + F_x$, угол поворота 45° ;

E3-1 и E3-2 - пара электродов $F_y + F_x$, угол поворота 90° ;

E4-1 и E4-2 - пара электродов $F_y + F_x$, угол поворота 135° .

Фиг. 6 - кривая зависимости сопротивления от силы для измерительной ячейки с тонким слоем изоляции - ячейка состоит из твердосплавного электрода без покрытия и твердосплавного электрода с покрытием типа 02.

Фиг. 7 - кривая зависимости сопротивления от силы для измерительной ячейки с тонким слоем изоляции - ячейка состоит из твердосплавного электрода без покрытия и твердосплавного электрода с покрытием типа 03.

Фиг. 8 - кривая зависимости сопротивления от силы для измерительной ячейки с тонким слоем изоляции - ячейка состоит из твердосплавного электрода без покрытия и твердосплавного электрода с покрытием типа 01.

Фиг. 9 - кривая зависимости сопротивления от силы для измерительной ячейки с тонким слоем изоляции - ячейка состоит из двух твердосплавных электродов без покрытия; сопротивление между контактными поверхностями составляет несколько миллиом и колеблется в пределах ± 1 мОм.

Фиг. 10 - кривая зависимости сопротивления от силы для измерительной ячейки с тонким слоем изоляции - ячейка состоит из двух твердосплавных электродов без покрытия; сопротивление между контактными поверхностями составляет несколько миллиом и колеблется в пределах ± 1 мОм.

Фиг. 11 - кривая зависимости сопротивления от силы для измерительной ячейки с тонким слоем

изоляции - ячейка состоит из двух твердосплавных электродов без покрытия с разным уровнем шероховатости (полированное покрытие SiC_05 и неполированное покрытие SiC_02).

Фиг. 12 - кривая зависимости сопротивления от силы для измерительной ячейки с тонким слоем изоляции - ячейка состоит из двух твердосплавных электродов без покрытия с разным уровнем шероховатости (полированное покрытие SiC_05 и неполированное покрытие SiC_03).

В общем случае изобретение представляет собой устройство для электрического измерения действующей на него силы (F), которая действует между как минимум двумя прижатыми друг к другу металлическими электродами (1) и металлическим электродом (3). Металлические электроды выполнены из твердого сплава, стали или низкоомных слоев металла на керамике, стекле или пластмассе с электрическим сопротивлением в диапазоне от нескольких миллиом до не более чем 10 Ом и средней шероховатостью R_a не более 400 нм и обладают не зависящей от силы проводимостью на контактных поверхностях. Сила непосредственно действует на тонкий слой изоляции (2) или тонкий слой многослойной изоляции (2), расположенный между металлическим электродом (1) и металлическим электродом (3) с геометрическим замыканием и состоящий из оксида цинка или восстановленного случайным образом оксида алюминия Al_2O_x при значениях от $x=2,4$ до $x=2,8$, карбида кремния или слоя DLC (алмазоподобного углеродного покрытия), при минимальной относительной деформации металлического электрода (1) и металлического электрода (3) в пределах не более 0,1 промилле. Эталонный металлический электрод (4), расположенный так, что он не зависит от измеряемого силового потока и зафиксирован крепежным элементом (5) с постоянной удерживающей силой и который электрически воздействует на металлический электрод (3) через конструктивно идентичный тонкий слой изоляции (2) или тонкий слой многослойной изоляции (2) с точно таким же физическим поведением таким образом, что такое эталонное сопротивление тонкого слоя изоляции между металлическим электродом (3) и металлическим электродом (4) испытывает постоянную силу прижима для полной температурной компенсации измерительного устройства и служит полумостом или мостом, причем по контуру в последовательном соединении от металлического электрода (1) через тонкий слой изоляции (2) к металлическому электроду (3) и через тонкий слой изоляции (2) к металлическому электроду (4) протекает ток от высокоточного источника тока (6) таким образом, что при прохождении через тонкий слой изоляции между металлическим электродом (1) и металлическим электродом (3) имеет место зависящее от силы падение напряжения (8), а между металлическим электродом (3) и металлическим электродом (4) - эталонное падение напряжения (9), соответствующее эталонному тонкому слою изоляции (2), при этом коэффициент трансформации по таким напряжениям зависит от температуры, причем результирующее напряжение измерительного моста или коэффициент трансформации по напряжениям, измеренным напрямую, представляет собой поддающуюся точному описанию непрерывную воспроизводимую функцию с высоким разрешением, которая определяет действующую силу независимо от рабочей температуры установки для электрического измерения силы, и причем коэффициент трансформации по напряжению с компенсацией температуры или измеренное напряжение моста можно напрямую использовать на блоке подготовки и обработки сигналов при помощи электрического соединения, получив таким образом гальванически развязанную, механически прочную конструкцию предлагаемого устройства для измерения силы. Геометрическая форма металлических электродов (1, 2, 3) может быть произвольной: как плоской, так и фасонной.

Вариант осуществления изобретения отличается тем, что при изготовлении контактных поверхностей как минимум двух металлических электродов обеспечивается средний уровень шероховатости R_a не более 400 нм с геометрическим замыканием в диапазоне менее 4 мкм по всей площади контактной поверхности, при этом электрическое сопротивление между контактными поверхностями минимум двух или большего числа металлических электродов (1), металлических электродов (3) и металлических электродов (4) без тонкого слоя изоляции, которые могут быть выполнены, например, из твердого сплава, очень прочной стали или низкоомных слоев металла на керамике, стекле или пластмассе с электрическим сопротивлением в диапазоне от нескольких миллиом до не более чем 10 Ом, независимо от силы, с которой эти металлические элементы прижимаются друг к другу, остается постоянным в пределах допустимого диапазона ± 3 мОм и в зависимости от используемого металла и площади контактных поверхностей составляет от 20 до не более чем 160 мОм, что обеспечивает необходимое для измерительной техники подтверждение того, что на тонком слое изоляции (2) имеет место зависящее от силы изменение сопротивления.

Вариант осуществления изобретения отличается тем, что на твердосплавные или стальные электроды или электроды из керамики, стекла или пластмассы с металлическим покрытием нанесен такой тонкий слой изоляции (2), имеющий электрическое сопротивление в диапазоне от нескольких миллиом до не более чем 10 Ом, что прочность основных элементов металлических электродов (1), металлических электродов (3) и металлических электродов (4) равна прочности тонкого слоя изоляции (2) или превышает ее, что предотвращает деформацию и повреждение тонкого слоя изоляции в результате смещения или вдавливания в материал, на который он нанесен, а деформация измерительного устройства под воздействием силы отсутствует или чрезвычайно мала, т.е. относительная деформация менее 0,1 промилле, благодаря чему вся система измерения силы при работе не подвергается смещению в результате деформации металлических электродов (1), металлических электродов (3) и металлических электродов (4), и воз-

действие силы на тонкий слой изоляции преобразуется в прямое изменение сопротивления как однозначная непрерывная функция силы с высоким разрешением.

Вариант осуществления изобретения отличается тем, что механические передающие элементы в форме металлических электродов (1), металлических электродов (3) и металлических электродов (4), служащие для передачи силы от внешней точки, на которую воздействует сила, на тонкий слой изоляции (2) устройства для измерения силы и эталонный тонкий слой изоляции (2), расположенный между металлическими электродами (3) и (4), изготовлены из высокопрочных сортов стали или твердых сплавов, из металлического порошка по технологии литья под давлением, из керамики или стекла с нанесением специального высокопрочного слоя или системы слоев из карбида кремния, DLC (алмазоподобное углеродное покрытие), оксида цинка или восстановленного случайным образом оксида алюминия $Al_{2,8}O_x$ с относительным содержанием кислорода x от 2,4 до 2,8, что обеспечивает очень высокую механическую и химическую прочность, устойчивость формы и отсутствие износа элементов измерительного ячейки, состоящей из металлических электродов (1, 3, 4) и тонкого слоя изоляции (2) таким образом, что такая ячейка выдерживает термическую нагрузку на тонкий слой изоляции (2) и электрический контакт с электронной схемой измерения составляющих (6, 7 и далее до 17) вблизи измерительного устройства на расстоянии до 200 мм, позволяя эксплуатировать измерительное устройство в температурном диапазоне от -80 до +300°C без изменения однозначного соответствия между силой и сопротивлением тонкого слоя изоляции (2) или многослойной системы тонких слоев изоляции (2) при числе циклов срабатывания, значительно превышающем сто тысяч.

Вариант осуществления изобретения отличается тем, что ячейка для измерения силы, состоящая из металлических электродов (1), металлических электродов (3) и металлических электродов (4) и минимум одного тонкого слоя изоляции (2), реализуется в высокотемпературном варианте для диапазона температур от -80 до +1100°C, и в одном случае до +1200°C, за счет использования термостойкого электрического соединения между тонким слоем изоляции (2) и электронным модулем обработки результатов для составляющих (6, 7 и далее до 17); причем металлический проводник и изолятор и контактные поверхности системы подключения устойчивы к температурам до 1200°C при длине проводов от 20 мм до 5 м, что обеспечивается целенаправленным подбором системы слоев изоляции (2) (SiC , Al_2O_x , ZnO).

Вариант осуществления изобретения в компактном миниатюрном исполнении для электрического измерения силы F в диапазоне от милли- до меганьютонов отличается тем, что позволяет создать очень прочную, устойчивую к динамическим нагрузкам систему измерения силы за счет механической конструкции металлических электродов (1), металлических электродов (3) и металлических электродов (4), причем средняя шероховатость R_a контактных поверхностей металлических электродов (1) и (4) в 2-30 раз больше, чем средняя шероховатость R_a металлических электродов (3), которая составляет не более 200 нм, что обеспечивает возрастание постоянной кривой зависимости сопротивления от силы для измерительной ячейки в соответствии с прикладной задачей, причем отношение шероховатостей 1:1 у электродов дает существенно меньшее возрастание кривой зависимости сопротивления от силы по сравнению с более высоким соотношением $X:1$ при X в диапазоне от 1,5 до 30,0, что обеспечивает существенно большее крутое возрастание кривой зависимости сопротивления от силы. Также используются контактные поверхности металлических электродов в форме фасонных элементов с планарной или произвольной поверхностью и определенной шероховатостью поверхности, которые повышают силу сцепления высокопрочных покрытий с поверхностями, через которые передается сила, в результате чего прочность тонкого слоя изоляции (2) или тонкого слоя многослойной изоляции (2) и основной части металлических электродов (1), металлических электродов (3) и металлических электродов (4) по устойчивости к давлению достигает уровня твердых сплавов (до 2 ГПа) или очень прочных сталей (до 1,2 ГПа). За счет выбора технологии изготовления тонкого слоя изоляции (2) (материал и способ его обработки) существующие методики нанесения покрытий позволяют обеспечить определенные характеристики сопротивления или рабочие диапазоны зависящего от силы поведения изоляции для измерения изменений, составляющих от нескольких мОм или Ом до нескольких сот кОм, причем исполнение для измерения сил в миллиньютоновом диапазоне требует объема несколько кубических миллиметров, размер среднего устройства для сил, измеряемых в ньютонах и килоньютонах, составит до ста кубических сантиметров, а крупное устройство, занимающее объем менее одного кубического метра, позволит измерять силы в меганьютоновом диапазоне.

Вариант осуществления изобретения отличается тем, что устройство для измерения элементов (1, 2, 3 и т.д. до 17) с использованием сочетания нескольких тонких слоев изоляции (2) или многослойных систем тонких слоев изоляции (2) (также называемых "многоуровневые слои"), работает по электрической схеме измерительного моста или полумоста таким образом, что за счет способа электрического подключения достигается многократное увеличение чувствительности измерения. При помощи одного или нескольких эталонных металлических электродов (4) для каждой ячейки для измерения силы обеспечивается полная компенсация обусловленного температурой отклонения сопротивления. Также обеспечивается возможность пространственного расположения одной комбинации измерительных ячеек, состоящих из металлических электродов (1) и металлических электродов (3), тонких слоев изоляции (2) и эталонных металлических электродов (4) в направлении действия измеряемой силы, а элементов (1, 2, 3 и 4) второй

комбинации измерительных ячеек - в направлении нежелательных составляющих силы, например, возникающих в системе при механическом наложении колебаний, для реализации электрической дифференциальной схемы с измерительным мостом или полумостом таким образом, что обеспечивается целенаправленное снижение или полная компенсация возмущающих сигналов паразитарных механических колебаний.

Вариант осуществления изобретения отличается тем, что измерительное устройство с сочетанием нескольких тонких слоев изоляции (2.1 соответствует каналу 1, а 2.2 - каналу 2) или многослойных систем тонких слоев изоляции (2.1, 2.2 и т.д. до 2.n), называемых также "многоуровневые слои", электрически функционирует как групповое соединение нескольких измерительных каналов с одним или несколькими измерительными мостами или полумостами, пространственное или геометрическое расположение которых позволяет одновременно точно определять величину и направление векторов измеряемых сил по присвоенным измерительным каналам путем отдельной регистрации воздействия сил в качестве векторных составляющих минимум по трем направлениям декартовой системы координат (ширина - X, длина - Y, высота - Z) и(или) дополнительно в полярной системе координат для оси вращения вокруг нормального вектора плоскости X-Y, оси Z и дополнительной оси вращения, однозначно описываемой при помощи угла наклона относительно плоскости X-Y.

Вариант осуществления изобретения отличается тем, что возможны как простые, так и сложные механические конструкции элементов металлических электродов (1), тонких слоев изоляции (2), металлических электродов (3) и эталонных металлических электродов (4) в составе устройства для электрического измерения силы, представляющего собой одно устройство или комбинацию из нескольких устройств для электрического измерения силы при помощи тонких слоев изоляции (2), состоящих из простых (2) или многослойных систем (2 или 2.n), называемых также "многоуровневые слои изоляции", которые наносятся на определенные плоские или фасонные поверхности соответствующих деталей при исполнении как в макроразмере (больше 10 мм), так и в миниатюрном формате (в субмиллиметровом масштабе), причем цепь из нескольких элементов из металла и(или) керамики или стекла располагается с силовым и(или) геометрическим замыканием, а действующие моменты и силы регистрируются с компенсацией температуры, причем за счет нанесения высокоомных слоев изоляции в мегаомном диапазоне эти элементы обладают высокоомной электрической изоляцией относительно окружающей среды и достаточной электрической изоляцией по отношению друг к другу и функционируют как невзаимодействующие друг с другом металлические электроды (1), (3) и (4) с механическим и электрическим расцеплением.

Вариант осуществления изобретения отличается тем, что чувствительность устройства для электрического измерения силы определяется в диапазоне от миллиньютонов до меганьютонов, а также тем, что направление силы задано предварительно посредством конструктивного исполнения металлических электродов (1), металлических электродов (3) и эталонных металлических электродов (4), являющихся соединяемыми элементами, для изготовления которых можно выбрать любую правильную форму, позитивную и негативную, причем отклонение от заданной формы составит не более 6 мкм при средней шероховатости контактной поверхности электродов R_a не более 400 нм; например, это могут быть сопряженные рабочие поверхности внутреннего и внешнего усеченных конусов для измерения силы тяги или давления, с нанесенным на рабочую поверхность тонким слоем изоляции (2), причем угол конуса и, соответственно, отношение механической передачи ячейки давления или тяги могут быть выбраны произвольно. Также поверхности вставленных друг в друга внутреннего и внешнего цилиндров с нанесенными на внутреннюю поверхность тонкими слоями изоляции для определения радиальной силы натяжения позволяют напрямую измерять способность к передаче радиального и осевого усилия зажимных соединений в цилиндрических зажимных системах, которая определяется как действие линейной силы между этими двумя телами. Еще одним примером конструктивной гибкости данной системы измерения является прямое измерение осевых сил тяги или давления с помощью ступенчатых цилиндров, у которых тонкий слой изоляции (2) двух или нескольких фасонных элементов наносится на торцевые поверхности цилиндрических колец и, таким образом, позволяет напрямую линейно измерять силу тяги или давления, действующую на прижатые друг к другу фасонные элементы; также возможно прямое измерение крутящих моментов, при котором существует плоская контактная поверхность между металлическими электродами (1) и металлическими электродами (3) с лежащим между ними тонким слоем изоляции (2) - в этом случае нормальный вектор направлен по касательной к направлению вращения: у взаимосцепляющихся симметричных относительно оси вращения фасонных деталей тонкий слой изоляции наносится на плоскую или фасонную поверхность вала таким образом, что нормальный вектор указывает направление действия скручивающей измеряемой силы, действующей по окружности цилиндров обоих тел.

Вариант осуществления изобретения отличается тем, что металлические электроды при помощи одного или нескольких тонких слоев изоляции (2 или 2.n) электрически изолированы друг от друга и механически имеют такую правильную форму или фасонную форму, что обеспечивают возможность измерения сил тяги и давления по двум или нескольким каналам, при этом тонкий слой изоляции нанесен по окружности двух связанных друг с другом усеченных конусов на наружную поверхность соответствующего внутреннего электрода, а точно подогнанные по посадке (т.е. со средней шероховатостью

менее 400 нм и допуском по форме менее 6 мкм) два электрически изолированных друг от друга внешних электрода формируют негативную ответную часть, при этом деформация металлических электродов (1), металлических электродов (3) и эталонных металлических электродов (4) отсутствует или имеет место очень незначительная относительная деформация менее 0,01 промилле, а тонкий слой изоляции (2) на усеченном конусе, вершина которого расположена в направлении действия силы, измеряет силу давления, а на усеченном конусе, вершина которого расположена в направлении, противоположном действию силы, - силу тяги, благодаря чему такое устройство для электрического измерения силы позволяет одновременно измерять силы, действующие в противоположных направлениях, в форме положительных и отрицательных значений.

При электрическом измерении силы при помощи тонкого слоя изоляции (2) с использованием описанного выше устройства в качестве источника тока (6) используется прецизионный электронный генератор сигналов, который работает в режиме регулируемого источника постоянного тока или в режиме источника сигналов переменного тока, подавая на схему измерения сопротивления четко определенные, пригодные в качестве точного эталона сигналы выходного тока, например синусоидальные, прямоугольные или треугольные импульсы, при возможности произвольного выбора амплитуды и частоты. При этом схема обработки и оценки сигнала подобрана в соответствии с используемым режимом таким образом, что в зависимости от конкретного применения можно целенаправленно подавлять или компенсировать влияние электрических помех из окружающей среды, т.е. сильных электрических или электромагнитных полей, посредством фильтрации сигнала через полосовой пропускающий или задерживающий фильтр, предельные частоты которого определяются в соответствии с конкретной задачей. При этом в режиме "импульс-пауза" обеспечивается снижение потребления энергии таким измерительным устройством на 20-40%.

Динамика системы измерения силы при помощи тонкого слоя изоляции, причем система состоит из металлических электродов (1), тонких слоев изоляции (2), металлических электродов (3) и эталонных металлических электродов (4) или комбинации устройств для электрического измерения силы при помощи тонкого слоя изоляции с соответствующими элементами (1, 2, 3 и 4), обеспечивает при измерении силовых воздействий частоту замеров в мегагерцевом диапазоне исключительно за счет выбора тонких слоев изоляции (2) и эталонных тонких слоев изоляции (4) с низкоомным измерительным сопротивлением в диапазоне от 1 до 100 Ом. Это позволяет повысить измерительные токи и, в частности, крутизну фронта измерительного напряжения, которое проявляется как падение напряжения при преодолении сопротивления тонкого слоя изоляции и достигается в диапазоне от десятков наносекунд до нескольких микросекунд. Электрическая регулировка измерительной электроники для регистрации падения напряжения при преодолении тонкого слоя изоляции (2 или 2.п) с разрешением как минимум до трех знаков в микровольтовом диапазоне при задержке менее восьмисот наносекунд полностью определяет производительность всей измерительной системы в плане быстродействия и чувствительности; таким образом, обеспечивается измерение силы с высокой частотой и без искажений, например, на подшипниковых вкладышах турбин или генераторах сильных токов.

Механические передающие элементы в форме металлических электродов (1), металлических электродов (3) и эталонных металлических электродов (4), служащие для передачи силы от внешней точки, на которую она воздействует, на тонкий слой изоляции (2), изготовлены из прочных пластмасс или высокопрочных композиционных материалов в форме фасонных элементов, причем система электрического измерения силы создается за счет нанесения высокопрочных слоев металла, действующих в качестве электропроводящих металлических электродов элементов (1, 3 и 4), нанесения тонких слоев изоляции (2 или 2.п) на эти металлические электроды (1, 3 и 4), и за счет низкоомного электрического подключения этих электродов к электронной измерительной системе с диапазоном сопротивления менее пятидесяти миллиом для элементов (6, 7 и далее до 17) на материале-носителе основания металлических электродов (1, 3 и 4) - пластмассе или композиционном материале.

Металлические электроды (1, 3 и 4) изолированы друг от друга при помощи тонкого слоя изоляции (4), так что емкость и(или) сопротивление такой измерительной ячейки, состоящей из элементов (1, 2, 3 и далее до 17), находится в однозначной и постоянной функциональной зависимости от действующей на нее внешней силы давления, причем для электрического измерения зависящей от силы емкости C или полного сопротивления Z в качестве источника тока используется прецизионный электронный генератор сигналов, работающий в режиме источника сигналов переменного тока, подавая на схему измерения емкости и полного сопротивления четко определенные, пригодные в качестве точного эталона сигналы выходного тока, например синусоидальные, прямоугольные или треугольные импульсы, при возможности произвольного выбора амплитуды и частоты, возбуждая схему в качестве колебательного контура с резонансной частотой, причем под действием силы между металлическими электродами (1, 3 и 4) колебательный контур перестраивается из-за изменения емкости и(или) полного сопротивления, а амплитуда измеряемого сигнала переменного напряжения уменьшается в результате емкостно-резистивного сопротивления тонкого слоя изоляции (2), характер которого описывается однозначной и постоянной функциональной зависимостью от действующей силы давления, а электронная схема обработки и оценки сигнала при помощи соответствующего задаче полосового пропускающего или задерживающего филь-

ра может практически полностью подавить или компенсировать посторонние сигналы от паразитарных механических колебаний или внешних электрических полей.

Металлические электроды (1, 3 и 4) электрически изолированы друг от друга тонким слоем изоляции таким образом, что полное сопротивление Z (т.е. индуктивное сопротивление переменного тока или емкостное сопротивление переменного тока) такой электрической измерительной ячейки демонстрирует однозначную и постоянную функциональную зависимость от внешней воздействующей на ячейку силы давления, причем для электрического измерения зависящей от силы индуктивности L или емкости C в качестве источника тока используется прецизионный электронный генератор сигналов, работающий в режиме регулируемого источника сигналов переменного тока, подавая на схему измерения емкости и полного сопротивления четко определенные, пригодные в качестве точного эталона сигналы выходного тока, например синусоидальные, прямоугольные или треугольные импульсы, при возможности произвольного выбора амплитуды и частоты, и возбуждая схему в качестве колебательного контура с резонансной частотой.

Согласно изобретению измерение сил выполняется, как показано в примерах осуществления изобретения на фиг. 1, 2 и 3: между как минимум двумя механическими элементами, передающими силу (1 и 3), выполненными в форме электродов, электрически изолированных друг от друга посредством тонкого слоя изоляции (2), электрическое сопротивление которого связано однозначно прослеживаемой функцией с развивающейся силой F ; при этом в конструктивной близости, но за пределами силового потока, располагается эталонный металлический электрод (4), крепление которого обеспечивает постоянную силу прижима этого электрода (4) к электроду истока (3).

Таким образом, можно создать измерительный полумост или мост, который будет полностью компенсировать зависимость измерительного устройства от температуры таким образом, что результирующее напряжение моста будет связано однозначной прослеживаемой функцией с воздействием силы между электродами (1 и 3) независимо от температуры окружающей среды. Для этого минимум два электрода (1 и 3) и общий электрод истока (E_q или 3) с соответствующими сенсорными электродами (E_n) электрически подключаются к источнику тока (6) таким образом, что заданный известный ток I_q от регулируемого источника тока (6), измеряется при помощи амперметра (7) как ток I , а при прохождении через тонкий слой изоляции происходит падение напряжения U или U_n в случае многомерного датчика, которое измеряется с высокой степенью точности при помощи вольтметра (8) и передается на один или несколько эталонных измерительных электродов (4 или $U_{ref}(n)$) при использовании схемы с измерительным мостом или полумостом в качестве напряжения мостовой схемы, что позволяет полностью компенсировать зависимость сопротивления тонкого слоя изоляции и, соответственно, измерительного устройства от температуры.

По сравнению с известными решениями для датчиков силы и, в частности, с патентами DE 19954164 B4 и DE 102006019942 A1, отличия состоят в следующем: все устройства для измерения силы на основе тензорезистивных систем с тонким слоем изоляции, известные из предыдущего уровня техники, не включают устройство для полной компенсации обусловленного температурой дрейфа сопротивления изоляции;

применяются тонкие слои изоляции и многослойные системы, обладающие свойствами полупроводников, причем их чувствительность, обусловленная зависимостью электрической проводимости и электрического сопротивления от силы, целенаправленно существенно повышается посредством специальной технологии изготовления, подбора сочетания химических веществ и создания дефектов решетки, которые высвобождают дополнительные носители электрического заряда. Примеры таких тонких слоев изоляции и их сочетаний: нитрид алюминия-титана, нитрид алюминия-хрома, оксинитрид циркония или оксинитрид алюминия-хрома и многие другие материалы, которые как полупроводники демонстрируют высокую чувствительность и значительное изменение сопротивления под действием силы;

форма и материалы для механических элементов, передающих силу, выбираются таким образом, чтобы под воздействием силы их геометрия не менялась или деформация была бы пренебрежимо мала, что обеспечивает измерение силы без погрешности из-за изменения траектории или длины пути на прямом отрезке при передаче электрически измеримого сигнала, т.е. единственным чувствительным связующим звеном является тонкий слой изоляции и на измерительную цепь не влияют какие-либо прочие допуски конструктивных элементов или механические неполадки;

также, например, при исполнении датчика с использованием в качестве электродов (1 и 3) твердосплавных передающих силу элементов, между соседними поверхностями металлических электродов (1 и 3) возникают точно определенные переходные сопротивления, постоянные с точностью до нескольких мОм, вне зависимости от силы, с которой эти элементы прижимаются друг к другу; доступность любого, в том числе миниатюрного, исполнения датчиков для измерения силы или комбинаций таких датчиков с измерением силы по нескольким направлениям позволяет создать чрезвычайно быстродействующее и точное измерительное устройство, причем физическая величина такой системы ограничивается только такими электрическими параметрами, как время перезаряда измерительных токов и изменения напряжения измерительного контура на участке до аналого-цифрового преобразователя. Таким образом, для современных электронных схем усиления и обработки сигналов становится доступен неизвестный ранее

класс мощности в области динамического измерения силы;

в зависимости от выбранного тонкого слоя изоляции или многослойной системы таких слоев и их состава при использовании передающих силу элементов соответствующей прочности становится возможной недоступная прежде устойчивость таких датчиков к температурам в диапазоне от -100 до 1200°C;

возможно применение датчиков силы в энергосберегающих решениях и высокорентабельных миниатюрных системах для измерения силы с продолжительностью работы от батареи до нескольких лет, так как измеряемые токи лишь кратковременно переключаются в активный режим при очень длительных периодах покоя, а очень короткие переходные процессы измерительной системы позволяют обеспечить минимальную длительность активной фазы;

механическая прочность и стойкость к износу тонкого слоя изоляции превышает предельные нагрузки, действующие на механические элементы системы. Например, при использовании твердосплавных элементов прочность на сжатие составляет более 2 ГПа.

Данная технология измерения с использованием тонкого слоя изоляции предусматривает разнообразные возможности конструктивного исполнения, которые дают высокую степень свободы при выборе типоразмеров - от миниатюрных и средних с использованием стандартных механических элементов, например крепежа (болтов, винтов, прижимных шайб и т.п.), до масштабов, используемых в тяжелом машиностроении.

На примере варианта осуществления изобретения на фиг. 4 внизу показан вид в разрезе устройства для измерения силы в одном направлении, а на фиг. 4 сверху - измерение силы с раскладкой на составляющие по двум направлениям, т.е. в двумерном пространстве (2D) с составляющими силы F_x и F_y .

Еще один пример исполнения, приведенный на фиг. 5, представляет собой конструкцию многомерного датчика, электрическим способом измеряющего силу с раскладкой на компоненты в двоекном четырехмерном пространстве при 4 разных углах поворота в трехмерном пространстве ($F_x + F_y$). Для этой электрической измерительной схемы и выбранной для нее конструкции датчика представлен вид в разрезе, причем конструкция позволяет добавить любое количество роторных сенсорных элементов (n-); данный конкретный пример приведен для $n=4$, что соответствует отдельным блокам для 4 углов поворота и демонстрирует свободу выбора механической конструкции и возможности электрической измерительной системы.

Обозначения.

- (1) - Электрод; общий электрод в случае многомерных измерительных ячеек.
- (2) - Тонкий слой изоляции (в случае многомерного исполнения - 2-n или 2.n), т.е. тонкий слой изоляции n.
- (3) - Электрод; электрод N в случае многомерных датчиков (в случае многомерного исполнения - 3-n или 3.n).
- (4) - Эталонный металлический электрод; электрод N в случае многомерных датчиков (в случае многомерного исполнения - 4-n или 4.n).
- (5) - Крепление эталонного металлического электрода, фиксирующее его с постоянной силой в обоих противоположных направлениях.
- (6) - Источник тока I_q .
- (7) - Амперметр I или, в случае многомерного исполнения, амперметр N соответствующей компоненты (направления) силы и сопоставленного ей канала измерения тока N.
- (8) - Вольтметр U или, в случае многомерного исполнения, U_n - вольтметр N соответствующей компоненты (направления) силы и сопоставленного ей канала измерения напряжения N (в случае многомерного исполнения - 8-n или 8.n).
- (9) - Эталонный вольтметр U_{ref} или, в случае многомерного исполнения, U_{ref-m} - вольтметр M соответствующей компоненты (направления) силы и сопоставленного ей канала измерения эталонного напряжения M (в случае многомерного исполнения - 9-m или 9.m).
- (10) - Эталонный амперметр I_{ref} или, в случае многомерного исполнения, I_{ref-m} - амперметр M соответствующей компоненты (направления) силы и сопоставленного ей канала измерения эталонного тока M (в случае многомерного исполнения - 9-m или 9.m).
- (11) - Постоянное сопротивление R_1 - константа измерительного полумоста.
- (12) - Постоянное сопротивление R_2 - константа измерительного полумоста.
- (13) - Сопротивление слоя изоляции R_1 измерительного моста.
- (14) - Эталонное сопротивление изоляции R_{ref-1} измерительного моста.
- (15) - Сопротивление изоляции R_2 измерительного моста.
- (16) - Эталонное сопротивление изоляции R_{ref-2} измерительного моста.
- (17) - Сопротивление слоя изоляции R_{17} между двумя прилегающими друг к другу измерительными элементами, позволяющее реализовать схему полного измерительного моста

$$R_{\geq 500 \times R_1}.$$

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

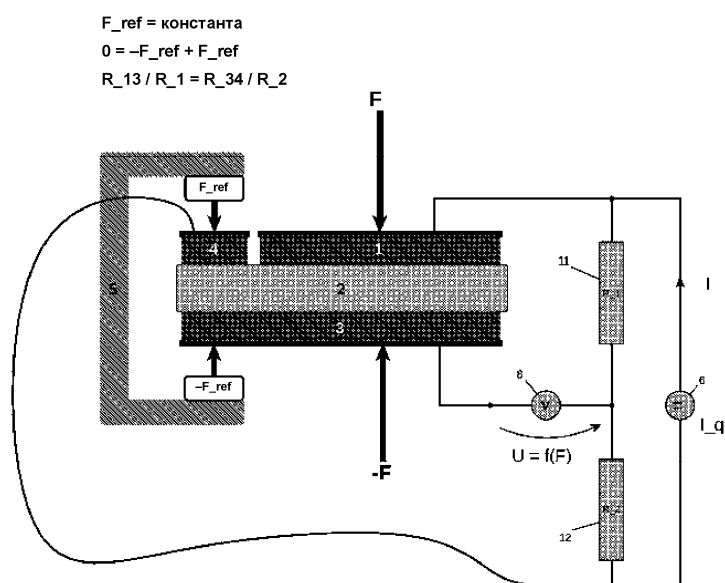
1. Устройство для электрического измерения действующей на него силы (F), включающее ячейку для измерения силы, состоящую из первого металлического электрода (1) и расположенного в направлении измеряемой силы (F) от него второго металлического электрода (3), каждый из которых выполнен из твердого металла, стали или низкоомных слоев металла на керамике, стекле или пластмассе, с контактными поверхностями, на которые воздействует измеряемая сила (F) и которые имеют электрическое сопротивление в диапазоне от нескольких миллиом до не более чем 10 Ом и среднюю шероховатость поверхности (R_a) не более 400 нм для получения не зависящей от силы проводимости; тонкой изоляционной пленки (2), расположенной между металлическими электродами (1, 3) с геометрическим замыканием, изготовленной из материала, относящегося к группам, состоящим из оксида цинка, восстановленного случайным образом оксида алюминия Al_2O_x , где x = от 2,4 до 2,8, карбида кремния, слоя DLC (алмазоподобного углеродного покрытия); эталонного металлического электрода (4), помещаемого на отрезок тонкой изоляционной пленки (2), на который не передается сила от первого металлического электрода (1) и который присоединен ко второму металлическому электроду (3) при помощи крепежного элемента (5), обеспечивающего постоянную удерживающую силу; измерительной схемы, выполненной в форме полумоста или моста, при этом токовая цепь, питающаяся от источника тока (6), имеет последовательное соединение с первым металлическим электродом (1), тонким слоем изоляции (2) со вторым металлическим электродом (3), а также тонким слоем изоляции (2) с эталонным металлическим электродом (4); выполнено таким образом, что зависящее от силы измеряемое напряжение (8) представляет напряжение между первым металлическим электродом (1) и вторым металлическим электродом (3), при этом напряжение уменьшается, проходя через тонкую изоляционную пленку (2); эталонное напряжение (9) представляет напряжение между вторым металлическим электродом (3) и эталонным металлическим электродом (4); измерительная схема определяет отношение между зависящим от силы напряжением (8) и эталонным напряжением (9), которое отражает величину действующей силы.
2. Устройство по п.1, отличающееся тем, что тонкий слой изоляции (2) выполнен в виде тонкой многослойной изоляционной пленки (2).
3. Устройство по п.1 или 2, отличающееся тем, что контактные поверхности первого и второго металлических электродов (1, 3) выполнены с геометрическим замыканием с зазором не менее 4 мкм по всей площади контакта.
4. Устройство по одному или нескольким пп.1-3, отличающееся тем, что прочность первого металлического электрода (1), второго металлического электрода (3) и эталонного металлического электрода (4) равна прочности тонкой изоляционной пленки (2) или превышает ее.
5. Устройство по одному или нескольким пп.1-4, отличающееся тем, что между измерительной схемой и ячейкой для измерения силы зазор составляет не более 200 мкм.
6. Устройство по одному или нескольким пп.1-5, отличающееся тем, что средняя шероховатость R_a контактных поверхностей первого металлического электрода (1) и эталонного металлического электрода (4) в 2-30 раз превышает среднюю шероховатость контактной поверхности второго металлического электрода (3), для которого средняя шероховатость R_a составляет не более 200 нм.
7. Устройство по одному или нескольким пп.1-6, отличающееся тем, что ячейка для измерения силы включает несколько эталонных металлических электродов (4).
8. Устройство по одному или нескольким пп.1-7, отличающееся наличием второй ячейки для измерения силы, конструктивно идентичной первой, которую можно ориентировать в направлении составляющей возмущающей силы.
9. Устройство по одному или нескольким пп.1-8, отличающееся тем, что ячейка для измерения силы включает несколько тонких изоляционных пленок (2.1, 2.2), которые электрически подключены к нескольким измерительным схемам и имеют пространственное и(или) геометрическое расположение для одновременной регистрации направления действия и величины составляющих векторов измеряемых сил.
10. Устройство по пп.1-9, отличающееся тем, что изготовленные в виде соединяемых элементов металлические электроды (1, 3) и эталонный металлический электрод (4) относятся к следующей группе: с конструкцией в виде внутреннего и внешнего усеченных конусов с пригнанными рабочими поверхностями и нанесенной на рабочую поверхность тонкой изоляционной пленкой (2); с конструкцией в виде внешнего и внутреннего цилиндров с тонкой изоляционной пленкой, нанесенной на рабочие поверхности цилиндра, причем тонкая изоляционная пленка (2) нанесена на торцевую поверхность цилиндрических колец.
11. Устройство по одному или нескольким пп.1-10, отличающееся тем, что тонкая изоляционная

пленка (2) расположена по окружности двух соединенных друг с другом усеченных конусов и на наружной поверхности соответствующего внутреннего электрода, к которому точно подогнаны электрически изолированные друг от друга наружные охватывающие электроды.

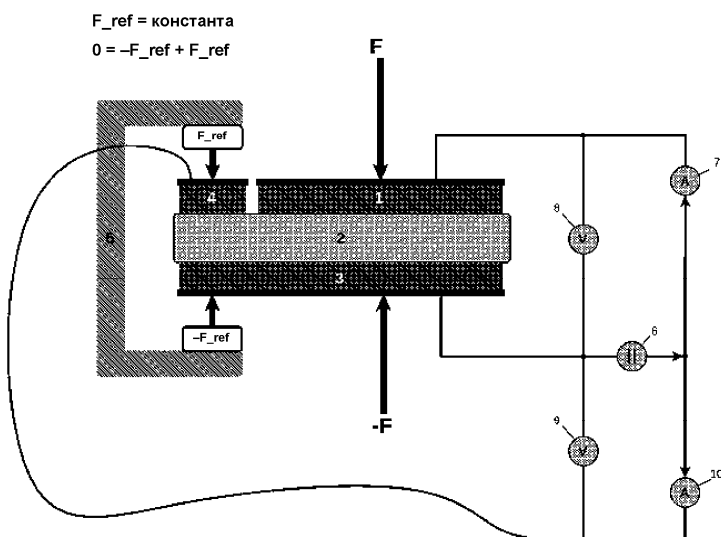
12. Устройство по одному или нескольким пп.1-11, отличающееся тем, что источником тока (6) является электронный генератор сигналов, который работает в качестве регулируемого источника постоянного тока в первом режиме работы или в качестве источника сигналов переменного тока во втором режиме работы, причем измерительную схему можно настраивать на соответствующий режим работы.

13. Устройство по одному или нескольким пп.1-12, отличающееся тем, что механические передающие элементы, передающие силу на металлические электроды (1, 3) и эталонный металлический электрод (4), выполнены в виде отформованных деталей из твердых пластмасс или высокопрочных композитных материалов.

14. Устройство по одному или нескольким пп.1-13, отличающееся тем, что измерительная схема дополнительно включает полосовой пропускающий или задерживающий фильтр.

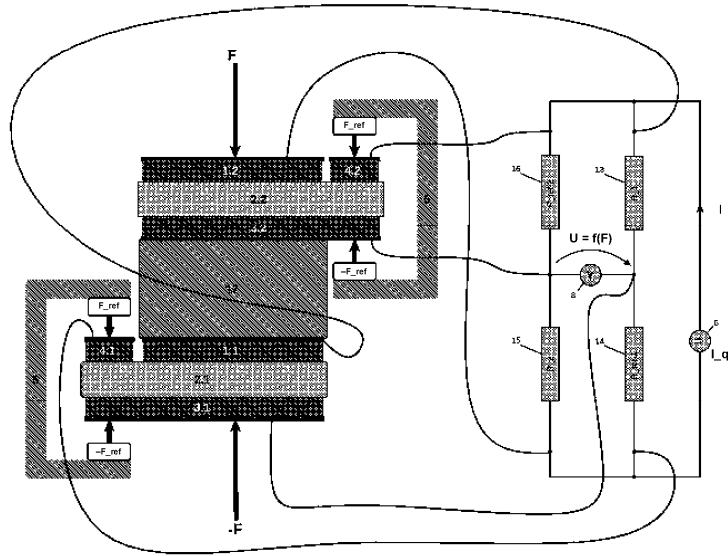


Фиг. 1

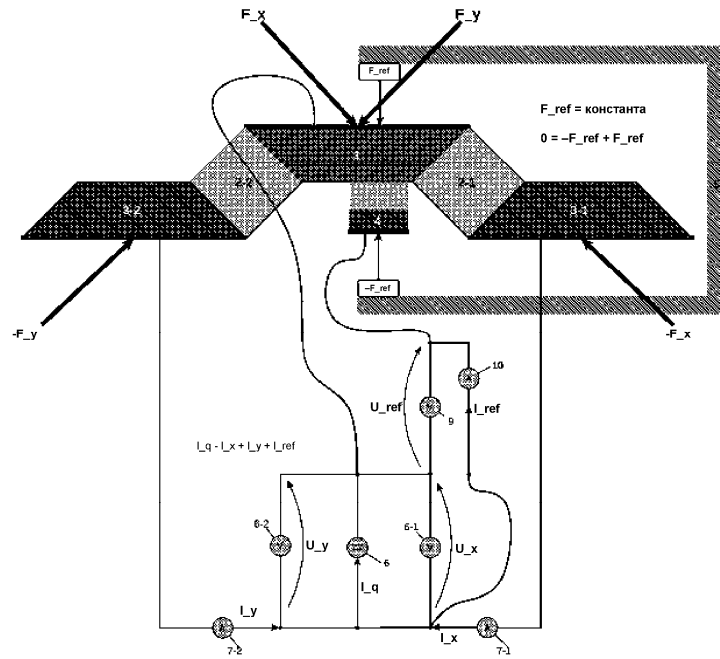


Фиг. 2

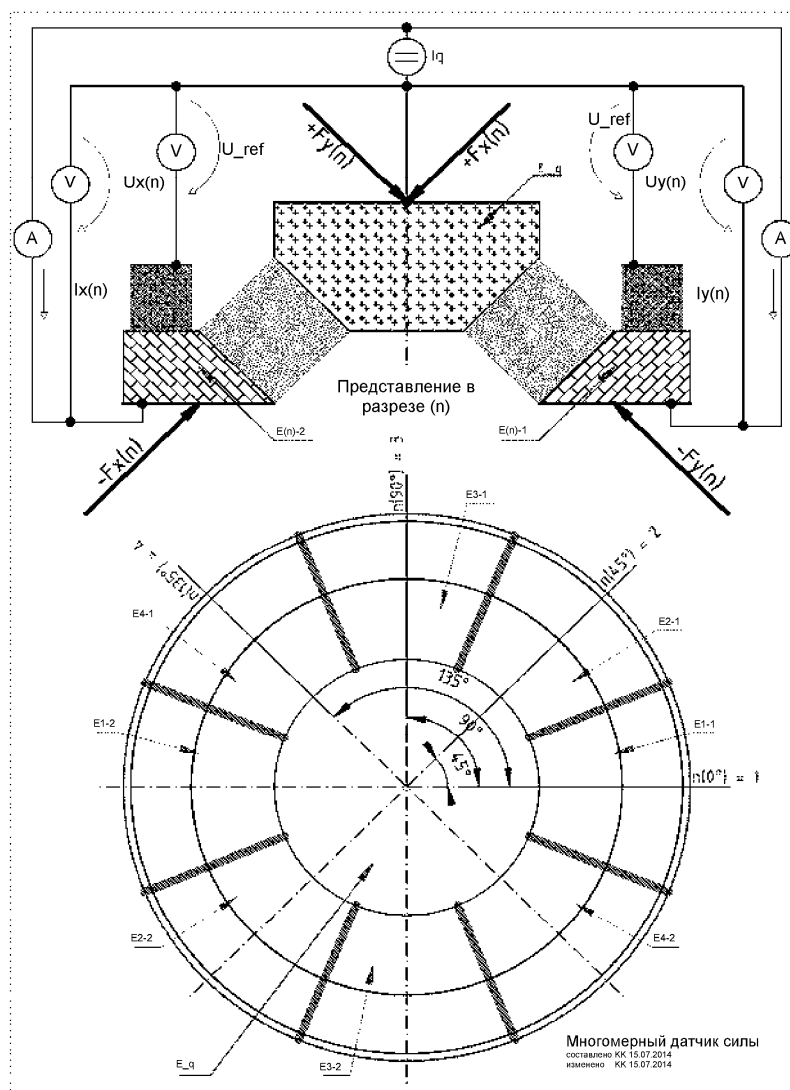
$F_{ref} = \text{константа}$
 $0 = -F_{ref} + F_{ref}$
 $R_1 / R_{ref-1} = R_2 / R_{ref-2}$
 $R_{17} \geq 500 * R_1 \geq 500 * R_2$



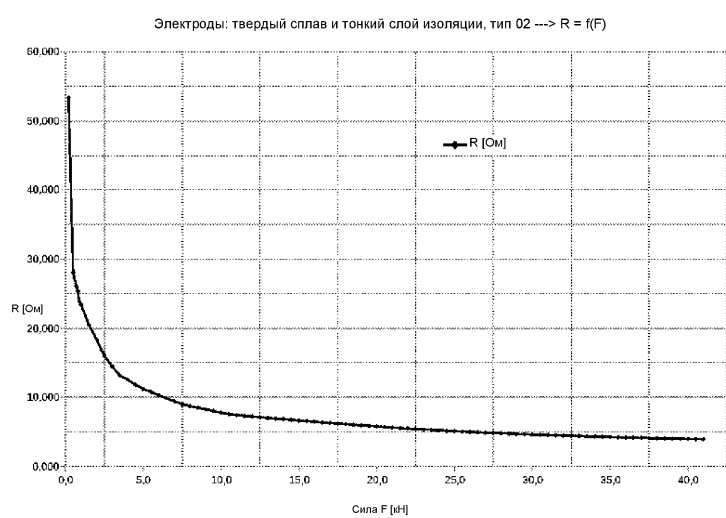
Фиг. 3



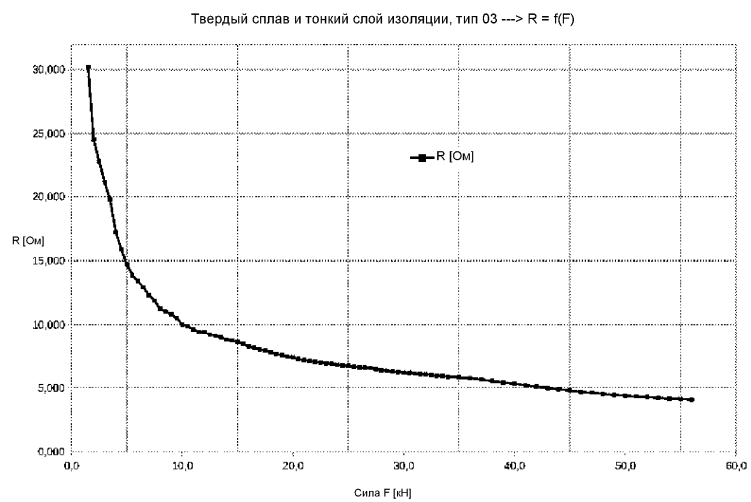
Фиг. 4



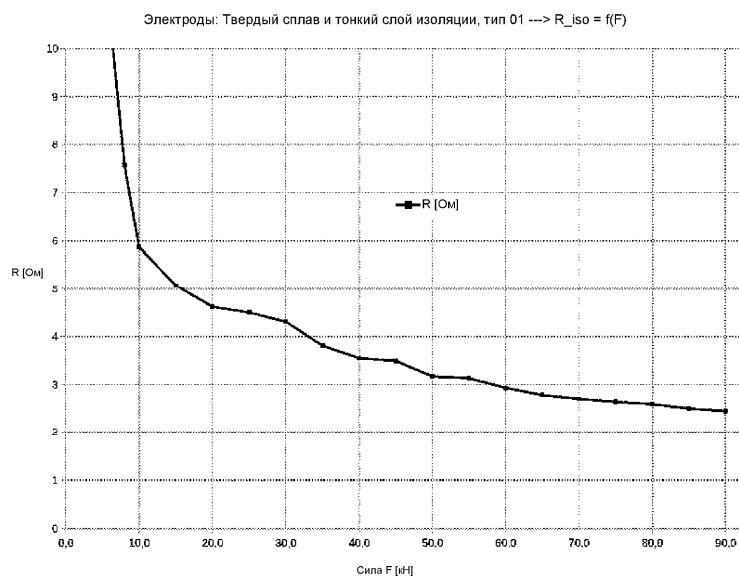
Фиг. 5



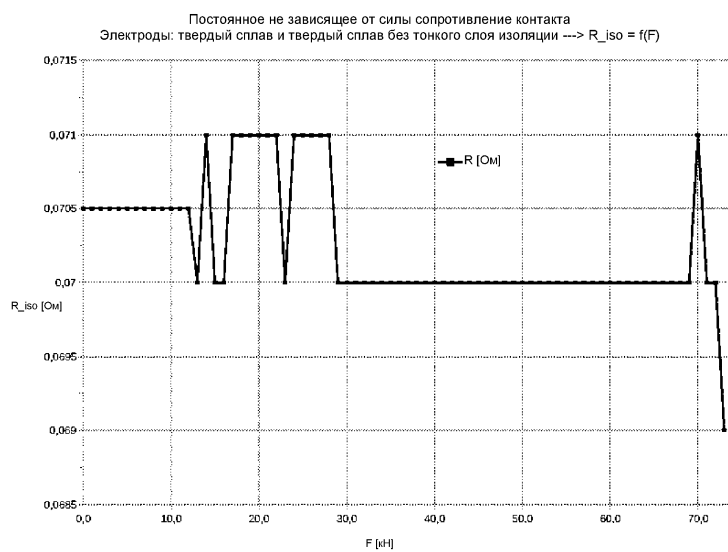
Фиг. 6



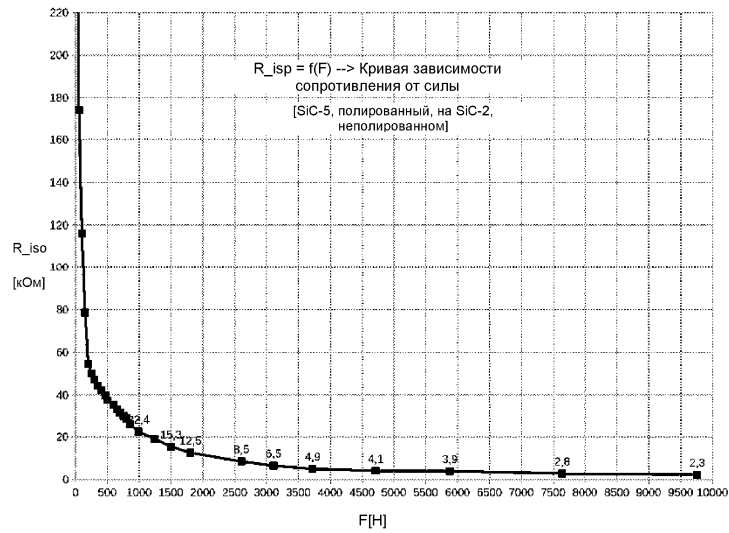
Фиг. 7



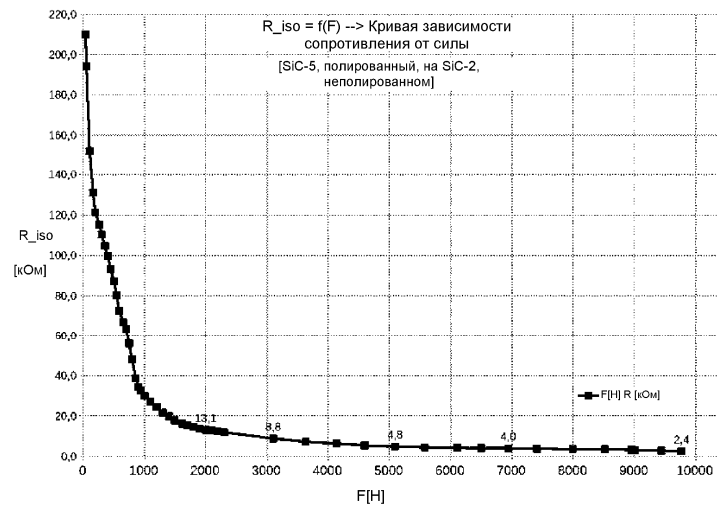
Фиг. 8



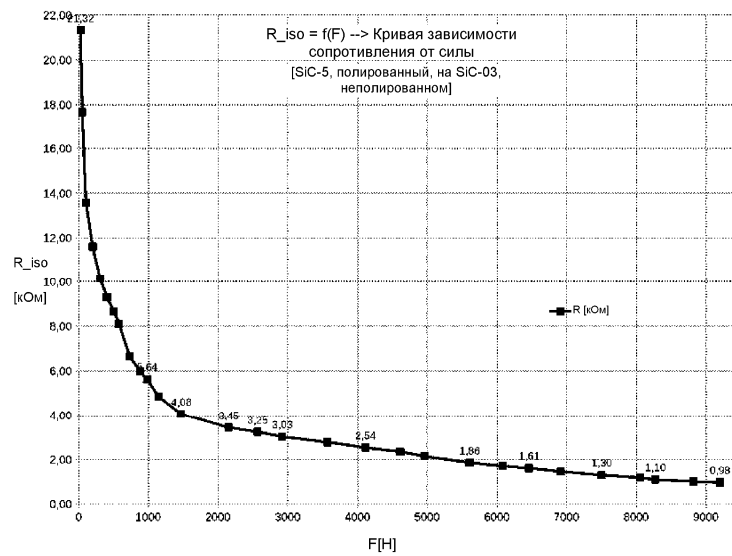
Фиг. 9



Фиг. 10



Фиг. 11



Фиг. 12



Евразийская патентная организация, ЕАПВ

Россия, 109012, Москва, Малый Черкасский пер., 2